

Universität
Rostock



Traditio et Innovatio

Rissdetektion mittels akustischer Emission an höchstfesten Stahldrähten

Dissertation

zur Erlangung des Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr. -Ing.)

an der Fakultät Maschinenbau und Schiffstechnik

der Universität Rostock

vorgelegt von

Mathias Lorenz

aus Wismar

Wismar, 2025

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. Wilko Flügge, Universität Rostock,

Fraunhofer-Institut für Großstrukturen in der Produktionstechnik

Prof. Dr.-Ing. habil. Olaf Keßler, Universität Rostock, Lehrstuhl für Werkstofftechnik

Prof. Dr. Daniela Schwerdt, Hochschule Wismar, Lehrstuhl für Werkstofftechnik

Jahr der Einreichung: 2024

Jahr der Verteidigung: 2025

Für Manuela, Theresa, Ivon, Denise und Anne-Marie

Danksagung

Die vorliegende Dissertation wurde während meiner Tätigkeit an der Hochschule Wismar an der Fakultät Maschinenbau im Bereich der Werkstoffkunde im Rahmen eines vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) finanzierten Forschungsprojektes (IGF 20846 BR) angefertigt.

Die wissenschaftliche Betreuung erfolgte durch Prof. Dr.-Ing. Daniela Schwerdt, der ich für ihr Interesse, ihr wissenschaftliches Engagement, die wertvollen Diskussionen und die zahlreichen Hinweise bei der Durchsicht des Manuskripts herzlich danken möchte. Bei Prof. Dr.-Ing. Wilko Flügge bedanke ich mich besonders für die reibungslose Kooperation, die fachliche Expertise und die wertvollen Hinweise.

Weiterhin danke ich dem Verband der Deutschen Federnindustrie e.V. (VDFI) und der Forschungsvereinigung Stahlumformung e.V. für die finanzielle Unterstützung sowie insbesondere Dr.-Ing. Andres Weinrich vom VDFI und den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses für die aufschlussreichen Diskussionen und die fachliche Unterstützung.

Ein herzlicher Dank gilt auch dem gesamten Team der QASS GmbH, insbesondere Christoph Filusch, Sören Barteldes, Christian Radek und Ulrich Seuthe für die stets gute Zusammenarbeit und die allzeit konstruktiven fachlichen Diskussionen zum Thema *akustische Emissionsprüfung*.

Allen Mitarbeitern des Bereichs Maschinenbau – insbesondere den Kollegen aus der Arbeitsgruppe Werkstoffe Sybille Möller, Dipl.-Ing. Ronald Berndt und Dipl.-Ing. Annett Berkholz – möchte ich für die konsequente Hilfsbereitschaft, die fachliche Unterstützung und die konstruktiven Diskussionen herzlich danken. Ihre Expertise in den Bereichen der Metallographie, der Computertomographie und der Elektronenmikroskopie hat zum Erfolg dieser Arbeit erheblich beigetragen.

Ein ganz besonderer Dank gilt meiner Familie, meinen Freunden und meinen Kollegen aus der Mittagsrunde, die mich während der gesamten Zeit und in jeder Lage bedingungslos unterstützt haben. Vielen Dank an Prof. Dr. rer. nat. Christoph Hornberger, Prof. Dr. rer. nat. Thilo Moshagen, Melanie Hagemann M. Eng., Markus Schröder M. Eng., Tobias Oertel M. Eng., Max Hoffmann M. Eng., Tobias Hansen, Wolfgang Harten und Jens Dettmann.

Kurzfassung

Bei der Drahtherstellung können fertigungsbedingt Mikrorisse entstehen, die später bei der Herstellung oder dem Einsatz von Federn wachstumsfähig werden und somit zum Versagen führen können. Eine weitere Quelle der Rissentstehung liegt in der Federfertigung mit hohen Umformgraden sowie -geschwindigkeiten: dem Winden und dem Setzen. Bisher wird keine zerstörungsfreie In-Process-Überwachung der einzelnen Fertigungsschritte in der Federnproduktion hinsichtlich der Rissbildung durchgeführt. Das übergeordnete Forschungsziel war, das Schließen dieser Lücke.

In der Literatur wird auf das Potenzial der akustischen Emission (AE) zur Unterscheidung von mikrofraktographischem Risswachstumsverhalten aufgrund der Abhängigkeit und des Einflusses auf die Ausprägung des risstypischen AE-Signals hingewiesen. Diese Arbeitshypothese sollte im Rahmen des Forschungsprojekts zur industriellen Serienfertigung von Federn durch statistisch geplante Laborversuche mit unterschiedlichen Einflussparametern untermauert werden. Ziel war es, durch die Entwicklung geeigneter Analyseketten in der anlagenspezifischen Software die Detektion und eindeutige Zuordnung der AE-Signale zu unterschiedlichen Schädigungsmechanismen zu ermöglichen. Die gewonnenen Messwerte sollen Rückschlüsse auf den Schadensmechanismus zulassen, sodass direkt und ohne weitere zeit- und damit kostenintensive Untersuchungen Abhilfemaßnahmen definiert und in der Produktion umgesetzt werden können.

Für die Übertragung der AE-Methode zur In-situ-Risserkennung in die industrielle Anwendung wurde der Einfluss probenabhängiger Parameter (Drahtmaterial, -durchmesser und -festigkeit) sowie prozessbedingter Faktoren (Umformgeschwindigkeit, Vorbearbeitung) auf das detektierte risstypische AE-Signal analysiert. Zur Quantifizierung der Einflussfaktoren wurden umfangreiche experimentelle Untersuchungen an ölschlussvergütetem Ventildraht durchgeführt. Für die AE-Untersuchungen unter Laborbedingungen erfolgen Biegeversuche in Anlehnung an DIN EN ISO 74381 an gekerbten Drahtproben unterschiedlicher Federstahlvarianten. Durch die gewonnenen Ergebnisse und Erkenntnisse wurde die Möglichkeit geschaffen, eine Musterbibliothek der einzelnen risstypischen AE-Muster für die automatisierte Mustererkennung aufzubauen.

Zur Verifikation der Verwendung der AE-Messtechnik für den industriellen Einsatz in einer Produktionshalle wurden Windeversuche an einer typischen Windemaschine durchgeführt, um Risse in Federn, bei denen ein Signal detektiert wurde, mithilfe metallographischer, raster-elektronenmikroskopischer sowie computertomographischer Untersuchungen nachzuweisen.

Abstract

During wire production, production-related micro cracks can occur which can later grow during the manufacture or use of springs and thus lead to failure. Another source of cracking depends in spring production with high forming degrees and speeds: coiling and setting. Up to now, no non-destructive in-situ process monitoring of the individual production steps in spring production with regard to crack formation is applied. The primary research objective is to close this gap.

The literature refers to the potential of acoustic emission (AE) to differentiate between microfractographic crack growth behavior due to the dependence and the influence on the characteristic of the typical AE signal. This working hypothesis was tested as part of the research project on the industrial series production of springs by statistically planned laboratory tests with different influencing parameters. The aim was that by developing suitable analysis chains in the system-specific software to enable the detection and clear assignment of the AE signals to different damage mechanisms. The measured values obtained should allow conclusions to be drawn about the damage mechanism. This will allow the definition and implementation of remedial measures in production avoiding direct, time-consuming, and cost-intensive investigations.

In order to transfer the AE method for in-situ crack detection to industrial applications, the influence of the sample-dependent parameters (wire material, wire diameter, wire strength) and process-related factors (forming speed, pre-processing) on the detected crack-typical AE signal is analysed. To quantify the influencing factors, extensive experimental investigations were carried out on the oil tempered valve steel wire. For the AE tests under laboratory conditions, bending tests based on DIN EN ISO 74381 were carried out on notched wire samples of different spring steel variants. The results and findings obtained will make it possible to create a sample catalogue of the individual crack-typical AE patterns for automated pattern recognition.

To verify the use of AE measurement technology for industrial applications in a production hall, coiling tests are carried out on a typical coiling machine and cracks in springs, where a signal is detected with the aid of metallographic, scanning electron microscopic and computer tomographic examinations, are proven.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	III
Abbildungsverzeichnis	VIII
Tabellenverzeichnis	XV
1 Einleitung und Motivation.....	1
2 Stand der Wissenschaft und Technik	5
2.1 Werkstoffe	5
2.2 Federnherstellung und Ursachen der Rissentstehung	7
2.3 Prüfmethoden zum Nachweis von Rissen.....	21
2.4 Akustische Emissionsprüfung	25
2.4.1 Grundlagen der akustischen Emission.....	25
2.4.2 Quellen für akustische Emissionen	34
2.4.3 Stand der Forschung zur akustischen Emissionsprüfung.....	36
2.4.4 Messsystem Optimizer4D	38
2.4.5 Mustererkennung.....	43
2.5 Normen und Standards.....	51
3 Zielstellung	52
4 Experimenteller Teil	54
4.1 Materialcharakterisierung.....	56
4.2 Labortechnische Versuche	63
4.3 Erprobung in der industriellen Praxis	67
4.4 Schädigungsmechanismen	70
4.5 Versuche unter zyklischer Belastung	71
5 Ergebnisse und Interpretation.....	73
5.1 Ergebnisse der Labortechnischen Versuche.....	73
5.2 Ergebnisse der Erprobung in der industriellen Praxis.....	88
5.3 Ergebnisse der Schädigungsmechanismen	94
5.4 Ergebnisse der Versuche unter zyklischer Beanspruchung	100

6 Zusammenfassung und Ausblick.....	109
7 Literaturverzeichnis	113
8 Eidesstattliche Versicherung	122
9 Anhang.....	123

Abkürzungsverzeichnis

μ

μ CT: Mikro-Computertomographie 24

1

1D: eindimensional 28

2

2D: Zweidimensional 109

3

3D: dreidimensional 27

A

AET: Acoustic-Emission-Testing 1

C

CF: Frequenzschwerpunkt 27

CT: Computertomographie 23

D

DFT: Diskrete Fourier-Transformation 32

DIN: Deutsches Institut für Normung 2

E

E-Modul: Elastizitätsmodul 28

EN: Europäische Norm 2

engl: englisch 1

F

FFT: Fast Fourier-Transformation 26

H

HCL: Hydrogenchlorid 70

HEDE: Hydrogen-enhanced Decohesion 19

HEE: hydrogen environment embrittlement 20

HELP: Hydrogen-enhanced Localized Plasticity 19

HFIM: Hoch-Frequenz-Impuls-Messung 27

I

i. O.: in Ordnung 3

i.O.: In Ordnung 3

I/O: In/Out 42

IHE: internal hydrogen embrittlement 20

K

kfz: kubisch flächenzentrierte 56

KMU: kleine und mittelständische Unternehmen 4

krz: kubisch-raumzentriert 14

L

LTE: Long Term Evolution 30

M

M2M: Machine-to-Machine 38

MPEG: Moving Picture Experts Group 30

N

n. i. O.: nicht in Ordnung 3

P

PbA: Projektbegleitender Ausschuss 94

PF: Spitzenfrequenz 26

S

SE: Schallemission 23

SPM: Servohydraulische Schwingprüfmaschine 42

T

trz: tetragonal-raumzentriert 14

V

VDFI: Verband der Deutschen Federnindustrie 56

Z

ZfP: Zerstörungsfreie Prüfung 21

Symbolverzeichnis

Griechische Buchstaben

$\Delta \sigma$	[N/mm ²]	Spannungsschwingweite
σ_a	[N/mm ²]	Spannungsamplitude
σ_m	[N/mm ²]	Mittelspannung
σ_o	[N/mm ²]	Oberspannung
σ_u	[N/mm ²]	Unterspannung
R	[-]	Spannungsverhältnis
$\Delta \rho$	[-]	Phase
α_k	[-]	Kerbwirkung
η	[-]	Verlustfaktor
λ	[m]	Wellenlänge
μ	[-]	Lamé-Konstante
ν	[-]	Poissonzahl
ω	[Hz]	Kreisfrequenz
ρ	[kg/m ³]	Dichte
σ_0	[N/mm ²]	mittlere Spannung ungekerbt
σ_{max}	[N/mm ²]	Spannungsüberhöhung der Kerbstelle
ρ	[W/m ³]	Schalldichte
ϑ	[° C]	Temperatur
φ	[-]	Phi
ε_{pl}	[-]	plastische Dehnung

Lateinische Buchstaben

A	[mm]	Amplitude
D_m	[mm]	Windungsdurchmesser
E	[N/m ²]	Elastizitätsmodul
E	[-]	normierte Energie
F	[N]	Kraft
F_c	[N]	Setzkraft
G	[N/mm ²]	Schubmodul, Proportionalitätskonstante
L	[mm]	Drahtlänge
L_0	[mm]	ungespannte Federlänge
L_c	[mm]	Blocklänge
N	[-]	Anzahl an Schwingungen
P	[mm]	Steigung
R_m	[N/mm ²]	Zugfestigkeit
T	[s]	Periodendauer
Δf	[Hz]	Halbwertsbreite
\vec{d}	[mm]	mechanische Verschiebung, Auslenkung
\vec{v}	[m/s]	Schallschnelle
a	[-]	Amplitude (quantisierte Spannung)
a_w	[mm]	Windungsabstand
b	[mm]	Streifenbreite
c	[m/s]	Schallgeschwindigkeit
c_L	[m/s]	Schallgeschwindigkeit longitudinal
c_T	[m/s]	Schallgeschwindigkeit transversal
d	[mm]	Durchmesser, Drahtdurchmesser
f	[Hz]	Frequenz
f_0	[Hz]	Resonanzfrequenz
k	[-]	Spannungsbeiwert, Steigung
n	[-]	Anzahl federnder Windungen

n_t	[-]	Gesamtzahl an Windungen
p	[dB]	Schalldruck
s	[mm]	Weg, Strecke
s_w	[mm]	Steigungshöhe
t	[mm]	Banddicke, Materialstärke
t	[s]	Zeit
t_k	[mm]	Kerbtiefe
v	[m/s]	Geschwindigkeit, Auslenkung
w	[mm]	Wickelverhältnis, Auslenkung

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Vereinfachte schematische Darstellung der Herstellung kaltgeformter Federn sowie der Zuordnung von Prüfungen zu den einzelnen Prozessphasen.....	3
Abbildung 2: Ursachen für Federnbrüche durch herstellungs- und betriebsbedingte Faktoren; in Anlehnung an [MAY23].....	7
Abbildung 3: A) Spannungs-Dehnungs-Diagramm sowie Fließkurve aus dem Flachzugversuch und B) Verknüpfung zwischen der plastischen Dehnung ϵ_{pl} und dem Umformgrad φ [DOE16]	10
Abbildung 4: A) Windmaschine OMD Officina Meccanica Domaso S.p.A [DAM22] und vergleichend B) schematische Darstellung einer Windmaschine für Schraubenfedern mit Einzugrollen (1), Drahtführung (2), Windestifte (3), Schneidmesser (4), Steigungsstift (5) [MEI15].....	11
Abbildung 5: Verlauf der Eigenspannungen im Querschnitt der Feder nach der Rückfederung sowie Verlauf der Eigenspannungen über den Drahtquerschnitt [RET23].....	11
Abbildung 6: Belastungsspannungen beim bzw. nach dem Winden einer Feder [MEI15]....	12
Abbildung 7: Vergleich der Eigenspannungsverläufe und Tiefenprofil der inneren Oberflächenschicht einer kaltgeformten Feder sowie nach jedem Federherstellungsprozess [DAE22]	13
Abbildung 8: Voraussetzungen (Einflussgrößen) für das Auftreten einer wasserstoffinduzierten Rissbildung (Sprödbruchbildung); in Anlehnung an [WEN98]	15
Abbildung 9: Wasserstofffallen mit a) Diffusion der H-Atome über Zwischengitterplätze, b) Adsorption des atomaren Wasserstoffs, c) Diffusion der H-Atome entlang der Oktaederlücken in das Kristallgitter, d) Anlagern von H Atomen entlang der Großwinkelkorngrenzen, e) Anlagern der H Atome im Zugspannungs- bzw. Zugdehnungsfeld von Versetzungen und f) Anlagern der H-Atome in Leerstellen zwischen den einzelnen Atomgittern [PUN06].....	16
Abbildung 10: Schematische Darstellung des AIDE-Mechanismus [LYN12].....	19
Abbildung 11: Trennung von Metallatomen aufgrund der Schwächung interatomarer Bindungen durch (i) Wasserstoff im Gitter, (ii) adsorbierten Wasserstoff an der Rissspitze und (iii) Wasserstoff an der Partikel-Matrix-Grenzfläche [TRA20, LYN12]	19
Abbildung 12: Schematische Darstellung des HELP-Mechanismus, der ein lokal stark begrenztes Zusammenwachsen von Mikrohohlräumen bewirkt [TRA20, LYN12]	19

Abbildung 13: A) Einfluss des Wasserstoffgehalts auf die Duktilität von Vergütungsstählen mit verschiedenen Zugfestigkeiten (MPa) [CHA11, TRA20] und B) Zusammenhang des kritischen Spannungsintensitätsfaktors in wasserstoffbeladenem AISI 4340 (35CrNiMo6) von der Streckgrenze [GAR12, TRA20]	21
Abbildung 14: Parameter zur Beschreibung eines transienten akustischen Emissions-signals laut DIN EN 1330-9 mit Anstiegszeit (1), Maximalamplitude (2), Nachweisschwelle (3), Signaldauer (5), Anzahl der Überschwingungen (6), Spannung (7) und Zeitpunkt des Überschreitens der Nachweisschwelle (8) [DIN12]	26
Abbildung 15: Funktionsweise der Akustische-Emissions-Technik sowie systemspezifische Auswertung [QAS17, LOR22]	27
Abbildung 16: Richtungswinkel der longitudinalen (U_L) und transversalen (U_T) Wellenausbreitung an einem Mikroriss [WAC16]	29
Abbildung 17: Rechteckfunktion in der Fourier Reihe [ULR22]	31
Abbildung 18: Rechteckfunktion mit Sinus-Funktion [ULR22]	31
Abbildung 19: Rechteck mit Fourier-Reihe (a) $n = 5$ und (b) $n = 19$ [ULR22]	32
Abbildung 20: Gegensätzliche Bruchverhaltensweisen schematisch dargestellt: a) Ein sehr schneller Rissfortschritt in einem spröden Material mit geringer Zähigkeit oder Ermüdungsrisswachstum in einer korrosiven Umgebung und b) die langsame, duktile Rissbildung eines zähen Materials in einer reinen Umgebung [WAC16,ROG01].....	35
Abbildung 21: Nachweisbarkeit eines Risssignals beim Lochaufweitungsversuch mit akustischer Emission in Abhängigkeit vom Werkstoff [BEH15], mit dem gekennzeichneten Bereich, der in dieser Arbeit vorgesehenen Werkstoffe [DEG14].....	38
Abbildung 22: a) Messgerät, b) Vorverstärker und c) Akustiksensoren (schematische Schnittdarstellung) [QAS22]	39
Abbildung 23: Veranschaulichung einer Datenfilterung über eine Differenzmaske [QAS19]	40
Abbildung 24: Signatur aus der Energieauswertung mit komprimierten und ungefilterten Fast-Fourier-Transformation-Rohmessdaten.....	41
Abbildung 25: Fast-Fourier-Transformation-Messdaten in Optimizer4D	42
Abbildung 26: Flowchart für den schematischen Prozess einer Mustererkennung [QAS20]	44
Abbildung 27: Beispielhafte Grundeinstellungen einer Mustererkennung im Operator Editor.....	45
Abbildung 28: Schematische Darstellung der Einteilung der Quadranten im <i>Decision-Operator</i> , der Basis des grundlegenden Bewertungsprinzips; in Anlehnung an [QAS20].....	47
Abbildung 29: Ablauf der Mustererkennung mit den vier Quadranten in der visuellen Darstellung [QAS20].....	48
Abbildung 30: Vorgehensweise in Quadrant III in der visuellen Darstellung [QAS20]	48

Abbildung 31: A) Datenpunkte mit gleichem Abstand um die Signalkurve in der zweidimensionalen Darstellung und B) Verbindung der Datenpunkte in der dreidimensionalen Darstellung; in Anlehnung an [QAS19].....	49
Abbildung 32: A) Untersuchung des Gefüges vom Federstahldraht (SH) mit $d = 7,5$ mm und B) feinstlamellarer Perlit (Sorbit) in Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme; keine Randentkohlung	58
Abbildung 33: Gefüge des Federstahldrahts aus FDSiCr mit $d = 7,5$ mm; (geätzt mit 1% Nital).....	59
Abbildung 34: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme des ölschlussvergüteten FDSiCr-Drahtes ($d = 7,5$ mm) mit feinkörnigem, homogenem Martensit (normkonform).....	59
Abbildung 35: A) Gefüge des Federstahldrahts 1.4310 mit $d = 6$ mm, geätzt mit Oxalsäure, und B) Nachweis von vorwiegend austenitischem Gefüge und Anteilen an Umformmartensit durch rasterelektronmikroskopische Aufnahme	60
Abbildung 36: A) Gefüge des Federstahldrahts 1.4568 mit $d = 6$ mm geätzt mit Oxalsäure, und B) Nachweis von vorwiegend austenitischem Gefüge mit Umformmartensit, durch rasterelektronmikroskopische Aufnahme	61
Abbildung 37: Ergebnisse des Härtemappings mittels <i>Matlab</i> : A) Draht im Anlieferungszustand, B) Draht einer gewundenen Feder mit Innenseite (I) und Außenseite (A), und C) schematische Darstellung des Querschnitts für die Härtemessung	63
Abbildung 38: Beispielhafte Darstellung des Versuchsaufbaus unter Laborbedingungen mit einer Prüfmaschine und dem Akustischen-Emissions-Analysesystems von QASS: A) Servohydraulische Prüfmaschine (Instron 8802, $F_{max} = 250$ kN) und B: QASS Optimizer 4D, AE-Messsystem mit elektronischer Anbindung an die Prüfmaschine über ein C) Optokoppler-Modul.....	64
Abbildung 39 Versuchsaufbau: A) Biegeversuch in Anlehnung an DIN EN ISO 74381 mit Akustischen-Emissions-Sensoren an verschiedenen geeigneten Montagepositionen und B) Einwindungsproben zur Durchführung von überlagerten Biege- und Torsionsbelastungen	64
Abbildung 40: Darstellung der Zeitverzögerung anhand eines Beispiels. Nach dem ersten Rissignal wurde innerhalb der Zeitverzögerung ein weiteres Signal detektiert	65
Abbildung 41: A) Windmaschine mit den unterschiedlichen Positionen der Akustische-Emissions-Detektoren und B) Akustische- Emissions-Signale beim Federnwinden und das Signal bei einem Federbruch.....	68
Abbildung 42: Für die In-situ-Rissdetektion geeignete Position der Akustischen-Emissions-Sensoren an einer Windmaschine	69

Abbildung 43: Dreidimensionale Darstellung der detektierten Signale mit Abschneiden der Feder, des Windeprozesses mit Reibgeräuschen und des risstypischen Akustischen-Emissions-Signals eines Mikrorisses während der Windephase.....	70
Abbildung 44: Versuchsaufbau an der Universalprüfmaschine E10000 (Intron).....	71
Abbildung 45: Eigens programmierter Programmaufbau für die Universalprüfmaschine.....	72
Abbildung 46: Auswertung von Risssignalen mithilfe der Energiedetektion und der Mustererkennung	73
Abbildung 47: Fast-Fourier-Transformation-Rohsignal (Probentyp Nr. 1) mit Darstellung der Filtermethoden und typischen Merkmale	74
Abbildung 48: Aufnahmen einer gekerbten Biegeprobe nach dem Bruch (links: Lichtmikroskopie der Kerbe mit Riss; Mitte und rechts: Computertomographie-Aufnahmen mit Abmessungen und Umrandung der Bruchfläche).....	75
Abbildung 49: Fast-Fourier-Transformation-Rohsignal gefiltert (Filter <i>Noise-Maske</i> Methode <i>Energiedetektion</i>)	76
Abbildung 50: Fast-Fourier-Transformation-Rohsignal gefiltert (Filter <i>Difference-Maske</i> und Methode <i>Mustererkennung</i>).....	76
Abbildung 51: Computertomographie-Aufnahmen einer gekerbten Biegeprobe nach dem Stopp durch die In-situ-Analyse	77
Abbildung 52: Linke Seite: Probentyp Nr. 7 (Einwindungsprobe nicht kugelgestrahlt); rechte Seite: Probentyp Nr. 8 (Einwindungsprobe kugelgestrahlt); untere Reihe: Computertomographie-Aufnahmen mit Bestimmung der Risstiefe für die mittels Mustererkennung unterbrochenen Versuche; obere Reihe: Bruchflächenaufnahmen (Lichtmikroskop und Rasterelektronenmikroskop) nach weiterer Belastung bis zum Bruch des Querschnitts mit Rissausgang an der Oberfläche der Innenseite der Windung.....	80
Abbildung 53: Ergebnisse aus den Akustischen-Emissions(AE)-Messungen zur Erkennung von Unterschieden in den AE-Signalen bei der Rissbildung nach verschiedenen Drahtmaterialien: A) Einwindungsprobe VDSiCr d = 7,5 mm mit Makroriss mit einer Länge von 260 µm und dem typischen Riss-AE-Signal. (darüber hinaus wurde nach dem Makroriss ein Mikroriss festgestellt) und gekerbte Biegeprobe mit einem Riss von 110 µm (B) und einem Mikroriss von 40 µm (C) und dem mit der Energiemethode erfassten risstypischen Signal.....	81
Abbildung 54: Während des Biegeversuchs am gekerbten VDSiCr-Federdraht (mit einem Durchmesser von 7,5 mm) detektiertes AE-Signal (a). Korrelative Analyse mittels Mikrotomographie (b) sowie lichtmikroskopische Aufnahme der zielpräparierten Probe (c) zeigen einen Mikroriss von ca. 20 µm im Kerbgrund	83
Abbildung 55: Biegeprobe 1.4568, d = 3 mm mit A) detektierten AE-Signalen, B) Computertomographie-Aufnahme von der Kerbe, C) Rasterelektronenmikroskop-	

Aufnahme mit zwei Rissen und D) mikroskopischer Aufnahme nach der Zielpräparation mit drei Rissen.....	84
Abbildung 56: Biegeprobe 1.4310, d = 3 mm.....	85
Abbildung 57: a) Dreidimensionale Darstellung der detektierten Signale mit Abschneiden der Feder, Windeprozess mit Reibgeräuschen und risstypischem Akustischen-Emissions-Signal von einem Mikroriss während der Windephase; b) korrelative Analyse mittels Mikrocomputertomographie vom Kerbgrund ohne erkennbaren Riss; C) Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme der Federprobe mit einer zuvor eingebrachten Kerbe, in der durch die hohen Umformgrade und -geschwindigkeiten ein Riss von 20 µm initiiert wurde (Oberfläche teilweise verzündert)	89
Abbildung 58: a) Dreidimensionale Darstellung der detektierten Signale mit dem risstypischen akustischem Signal von einem Mikroriss während der Windephase; b) Aufnahme der metallographischen Zielpräparation, bei der ein Mikroriss von 25 µm nachgewiesen wurde.....	90
Abbildung 59: a) Dreidimensionale Darstellung der detektierten Signale mit einem risstypischen akustischem Signal im vorderen Abschnitt der Windephase; b) Rasterelektronenmikroskopie-Aufnahme der Federprobe mit einer zuvor eingebrachten Kerbe, in der durch die hohen Umformgrade und -geschwindigkeiten ein Riss von 150 µm initiiert wurde	91
Abbildung 60: Verhalten von Schallwellen an Grenzflächen mit dem reflektiertem Anteil I_R und der einlaufenden Welle I_0 [QAS17]	92
Abbildung 61: Darstellung der Grenzflächen im Biegeversuch (A) sowie im Vergleich dazu beim Federnwinden an der Windemaschine (B); schematische Darstellung der einlaufenden Wellen mit dem reflektierten und transmittierten Anteil (C) [QAS17].....	93
Abbildung 62: Untersuchte Probe im Anlieferungszustand, Biegeversuch an gekerbtem Draht bis Bruch; a) akustisches Signal nach der FFT zeigt eine hohe Amplitude bei 100 kHz, die über den Frequenzbereich exponentiell abklingt und im höheren Frequenzbereich wieder (trompetenförmig) steigt; b) Korrelativ zeigt die Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme das duktile Versagen.....	95
Abbildung 63: Untersuchte Probe im Anlieferungszustand wurde im Biegeversuch bis zum Bruch mechanisch beansprucht; a) akustisches Signal nach der Fast Fourier-Transformation zeigt eine hohe Amplitude bei 100 kHz, die über den Frequenzbereich abklingt; b) Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme zeigt einen transkristallinen Spaltbruch mit geringen Anteilen eines duktilen Wabenbruchs.....	96
Abbildung 64: a) akustisches Signal nach der Fast Fourier-Transformation zeigt ein hohe Amplitude bei 100 kHz, die über den Frequenzbereich deutlich abklingt; signifikant ist die	

ausgeprägte Amplitude über den Zeitbereich (Nachhallen). b) Korrelativ zeigt die Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme das interkristalline Versagen aufgrund einer unzulässigen Wärmebehandlung	97
Abbildung 65: a) akustisches Signal nach der Fast Fourier-Transformation sowie b) korrelativ die Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme zum interkristallinen Versagen aufgrund einer Wärmebehandlung und wasserstoffinduzierter Rissbildung	98
Abbildung 66: a) akustisches Signal nach der Fast Fourier-Transformation sowie b) korrelativ die Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme zum interkristallinen Versagen aufgrund wasserstoffinduzierter Rissbildung	99
Abbildung 67: Versuchsaufbau für Messung der Rissortung.....	102
Abbildung 68: Kerbe mit Riss auf der rechten Seite (Probe 67 N = 32).....	103
Abbildung 69: Riss im metallographischen Schliff (Probe 79).....	104
Abbildung 70: Riss im metallographischen Schliff (Probe 80).....	105
Abbildung 71: Riss im metallographischen Schliff (Probe 99).....	106
Abbildung 72: Auszug der Spektren (Probe 99).....	106
Abbildung 73: Riss im metallographischen Schliff (Probe 104).....	107
Abbildung 74: Auszug der Spektren (Probe 104).....	107
Abbildung 75: Akustisches Emissionssignal während des Biegeversuchs am VDSiCr Draht in 3 mm mit einer Umformgeschwindigkeit von 1 mm (links) und 30 mm (rechts).....	126
Abbildung 76: Akustisches Emissionssignal während des Biegeversuchs am VDSiCr Draht in 7,5 mm mit einer Umformgeschwindigkeit von 1 mm (links) und 30 mm (rechts) ..	126
Abbildung 77: Musterkatalog SH Draht, SH-D-7.5-B-14.1-BK.....	127
Abbildung 78: Musterkatalog DH Draht, DH-D-7-5-B-B-10-1_2021	128
Abbildung 79: Musterkatalog FDSiCr Draht, FDSiCr-D-7-5-B-B-2021-02-17	129
Abbildung 80: Musterkatalog VDSiCr Draht, VDSiCr-D-7_5-B-05032021	130
Abbildung 81: Musterkatalog 1.4310 Draht, 1.4310-D-0_7-B-B-2022_13	131
Abbildung 82: Musterkatalog 1.4568 Draht, 1.4568-6-un-B-21.1	132
Abbildung 83: Keine Randentkohlung SH_D_7.5_B_1_1M	134
Abbildung 84: Gefüge SH_D_7.5_B_4_2M	134
Abbildung 85: Keine Randentkohlung DH_D_5_B_7_1	136
Abbildung 86: Gefüge DH_D_5_B_7_1	136
Abbildung 87: Keine Randentkohlung FDSiCr_D_7.5_B_3_2.....	138
Abbildung 88: Gefüge FDSiCr-D-7.5-B-1.1.....	138
Abbildung 89: Gefüge FDSiCr-D-7.5-B-1.1.....	139
Abbildung 90: Keine Randentkohlung VDSiCr_D_7.5_B_5_3M	141
Abbildung 91: Gefüge VDSiCr-D-7.5-B-1.3.....	141

Abbildung 92: Gefüge 1.4310, 1.4310_D_3_B_24_3M.....	143
Abbildung 93: 1.4310, 1.4310_D_6_B_2_1M	143
Abbildung 94: Gefüge 1.4310_D_1_B_2_1	144
Abbildung 95: Gefüge 1.4310, 1.4310_D_1_B_2_1.....	144
Abbildung 96: Gefüge 1.4310, 1.4310_D_1_B_2_1.....	145
Abbildung 97: Gefüge 1.4568, 1.4568_D_3_B_13_1.....	147
Abbildung 98: Gefüge 1.4568, 1.4568_D_6_B_1_1.....	147
Abbildung 99: Gefüge 1.4568, 1.4568_D_3_B_12_2.....	148
Abbildung 100: Gefüge 1.4568, 1.4568_D_6_B_1_1.....	148
Abbildung 101: Instron Controller Anschluss Digital IO.....	149
Abbildung 102: Digitale Ausgänge Instron.....	149
Abbildung 103: Digital Ausgangskreis Instron.....	150
Abbildung 104: Optokopplermodul (links: 5V→24V, rechts 24V→5V).....	150
Abbildung 105: QASS Optimizer4D Anschluss	150
Abbildung 106: Spannungsversorgung vom QASS für das Optokopplermodul.....	151
Abbildung 107: Beschaltung QASS Eingang	151
Abbildung 108: Digitale Eingänge Instron.....	151
Abbildung 109: Digital Eingangskreis Instron.....	151
Abbildung 110: Optokopplermodul von 24V auf 5V	152
Abbildung 111: Beschaltung QASS Ausgang	152

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vergleich der Bindungsenergien des Wasserstoffs in Abhängigkeit der H-Fallen [KUR00].....	17
Tabelle 2: Übersicht über die unterschiedlichen Schädigungsmechanismen. [LYN11, LYN12, LOI14]	19
Tabelle 3: Prüfverfahren zur Rissdetektion und zur Prüfung der Qualität von Federwerkstoffen und technischen Federn (Vorteil (+) und Nachteil (-)). [SCH15, DIN7, DIN8, DIN9, STU11, GRU16, ZFP18].....	22
Tabelle 4: Orientierungswerte für Auflösungsgrenzen für die Risserkennung nach verschiedenen Verfahren (Vorteile (+), Nachteile (-); RÖ: Rissöffnung, RF: Rissfläche, RT: Risstiefe). [SCH15, DIN7, DIN8, DIN9, STU11, GRU16, ZFP18]	23
Tabelle 5: Auflistung der Mechanismen bei der Rissentstehung mit der Intensität und der Quellenart des AE-Signals. [SCR85, RAU04, WAC16].....	34
Tabelle 6: Versuchsmatrix für die labortechnischen Untersuchungen und Industrieversuche. Die Zuordnung der Chargennummern ist dem Anhang (1). zu entnehmen.....	55
Tabelle 7: Übersicht über die verwendeten Federstähle.	57
Tabelle 8: Beispielhafte Auswahl der geprüften Federdrahtvarianten mit den probenspezifischen Eigenschaften; Alle Werte aus den Untersuchungen lagen innerhalb der Norm (a: eigene Untersuchung, b: Prüfzeugnis).....	57
Tabelle 9: Zusammenfassung der Korngrößenkennzahl G und der mittleren Korndurchmesser für die jeweilige Drahtsorte.....	62
Tabelle 10: Rissabmessungen in Tiefen- und Längsrichtung mittels der Computertomographie-Aufnahmen (Mittelwert über je drei Proben).	79
Tabelle 11: Parameter für die Betrachtung der akustischen Ähnlichkeit.	93
Tabelle 12: Messdaten zum Versuch zur Rissortung.....	102
Tabelle 13: Versuchsdaten nachgewiesener Risse für Probe 79 und 80.	104
Tabelle 14: Versuchsdaten aus dem Schwingversuch mit den Proben 99, 104, 107 und 114, bei denen ein Riss nachgewiesen werden konnte.	105

1 Einleitung und Motivation

Obwohl eine Schraubenfeder auf den ersten Blick als ein einfaches Bauelement erscheint – im Grunde ein ‚geschickt‘ gewickelter Draht –, erfüllt diese die Aufgabe, mechanische Energie zu speichern oder ggf. auch eine spezifische Vorspannkraft zu erzeugen. Die einfache Bauweise und der vergleichsweise niedrige Preis verleiten dazu, die Feder als untergeordnetes Bauteil anzusehen. Tatsächlich gibt es nur wenige Konstruktionselemente, die hochzyklisch beansprucht werden, z. B. Ventildfedern in Motoren, und gleichzeitig hohe Anforderungen hinsichtlich der Oberflächen- und Werkstoffqualität aufweisen. Aus wirtschaftlicher Sicht steht der niedrige Preis der Feder im Kontrast zu den hohen Folgekosten, die der Bruch einer Feder häufig nach sich zieht, durch den es zum Versagen der Funktion oder zur Zerstörung des ganzen Aggregats kommen kann. Die Detektion der Risse hat eine hohe Priorität. Die Implementierung eines in der Federnherstellung noch nicht angewendeten Verfahrens, der Rissdetektion mittels akustischer Schallemission, ist Thema dieser Arbeit.

Allgemein stellt der Begriff *Schallemission* die spontane Auslösung einer transienten elastischen Welle in einem Festkörper als Folge einer plötzlichen lokalen Spannungsänderung dar. Auf Grundlage dieses physikalischen Ereignisses wurde die akustische Emissionsprüfung (engl. Acoustic-Emission-Testing, AET; allgemein: Schallemissionsprüfung), eine zerstörungsfreie Prüfmethode entwickelt, mit der bei In-situ-Messungen die Rissentstehung und das Risswachstum mithilfe moderner Messtechnik erfasst werden können [DGZ18]. Es besteht jedoch ein komplexer Zusammenhang zwischen der Entstehung der akustischen Emission (AE), der Ausbreitung der Schallwellen, der Detektion durch den piezoelektrischen Sensor und schließlich der elektronischen Ausgabe des sogenannten Schallemissionssignals. Im Gegensatz zur Schallemissionsprüfung für vorhandene Risse, bei der ein Ultraschallsender und -detektor verwendet wird, erfolgt die akustische Emissionsprüfung zur Rissentstehung und zum Risswachstum ausschließlich mit einem piezoelektrischen Detektor. Derzeit findet die AE-Messung während der Fertigung z. B. beim Biegewellenrichten (vgl. QASS, [BAR15]) und zur Überwachung von Bauteilen im Betrieb, z. B. zur Rissdetektion bei Druckbehältern [DIN13], Anwendung. Bislang konzentrieren sich zahlreiche Studien in diesem Bereich auf die Analyse von Probenkörpern. Eine weitere Frage, die sich stellt, betrifft daher die Übertragbarkeit bekannter Ergebnisse auf tatsächliche Bauelemente, z. B. auf Prozesse der Herstellung technischer Federn aus höchstfesten Stählen.

Bei der Herstellung von Federndraht können fertigungsbedingt Mikrorisse entstehen, die nachfolgend beim Einsatz wachstumsfähig werden und somit zum Versagen führen können. Eine weitere Quelle der Rissentstehung liegt in der Federnfertigung mit hohen Umformgraden sowie

-geschwindigkeiten: dem Winden und dem Setzen. Darüber hinaus können unplanmäßige mechanische oder auch korrosive lokale Beschädigungen der Drahtoberfläche infolge der Kerbwirkung bei den genannten Prozessen Risse initiieren. Die meist automatisierten Herstellungsprozesse in der Federnindustrie werden mit Hilfe optischer Messtechnik zur Kontrolle der Qualität der Geometrie überwacht. Der Schwachpunkt bleibt die **fehlende In-Prozess-Qualitätskontrolle** bezüglich der Rissentstehung und des Risswachstums.

Diese wissenschaftliche Arbeit gibt einen Einblick in die Gebiete der Federnherstellung, der Rissentstehung sowie der AE-Prüfung. Beschrieben werden zudem die Zusammenhänge zwischen den charakteristischen AE-Signalen und den Ereignissen im Material. Anhand der ganzheitlichen Betrachtung der Ergebnisse wird die Eignung der zerstörungsfreien Analytik für die In-situ-Detektion von Mikro-Risswachstum sowie die In-situ-Untersuchung unterschiedlicher Schädigungsmechanismen bzw. Brucharten im industriellen Umfeld aufgezeigt und die Wirksamkeit dieser Messmethode dargestellt.

Motivation

Technische Federn werden in einer Vielzahl von Industrieanwendungen eingesetzt, beispielsweise als Ventildfedern im Motor, als Achsfedern in Nutz- und Personenkraftfahrzeugen sowie als Schenkelfedern an landwirtschaftlich genutzten Maschinen bzw. Fahrzeugen. Die verwendeten Halbzeuge und Stähle gehören zu den höchstfesten Stählen (Zugfestigkeiten über $R_m = 2000$ MPa) und sind hochgradig auf die jeweilige Anwendung spezialisiert. Die Herstellung der Federn aus Federstahldraht erfolgt in den meisten Fällen in kleinen und mittelständischen Unternehmen (KMU). Diese Unternehmen bestellen die Federstahldrähte nach DIN EN 10270, Teil 1 bis 3 [DIN1, DIN2, DIN3] sowie teilweise nach firmeninternen Spezifikationen bei Stahl- bzw. Drahtherstellern oder Drahthändlern. Bisher wird keine zerstörungsfreie In-Prozess-Überwachung der einzelnen Fertigungsschritte in der Federnproduktion hinsichtlich der Rissbildung durchgeführt (Abbildung 1). Es gibt hierzu keine technisch sowie wirtschaftlich sinnvolle Lösung.

Beispielsweise werden Druckfedern für die Anwendung im Bahnbereich nach dem Winden und Setzen und vor dem Kugelstrahlen zu 100 % mittels Magnetpulverprüfung (Fluxen) zerstörungsfrei geprüft. Hierbei kann nicht jeder Riss detektiert werden – innenliegende Risse

werden z. B. nicht erkannt. Außerdem erfolgt die Prüfung unter einem hohen zeitlichen Aufwand und nach Abschluss des kritischen Herstellungsprozesses. Oftmals wird eine Qualitätskontrolle bei besonders kritischen Federn innerhalb einer Federgruppe durchgeführt, beispielsweise bei Federn mit hohen Drahtfestigkeiten oder kleinem Windeverhältnis bei großen Drahtdurchmessern. Diese Federn werden nach der Herstellung je nach Kundenanforderung im Schwingversuch (mit relativ geringen Frequenzen, max. 10 Hz [AKH08]) geprüft und müssen bei vorgegebener Beanspruchungsamplitude bestimmte Lastwechsel erreichen. Ist dies gegeben, wird davon ausgegangen, dass unkritischere Federn ebenfalls als in Ordnung (i. O.) bewertet werden können. Damit liegt der Nachteil dieser Vorgehensweise auf der Hand: Sie ist zerstörend, zeitaufwendig und kostenintensiv, zudem ist keine Inline-Überwachung der Prozesse denkbar.

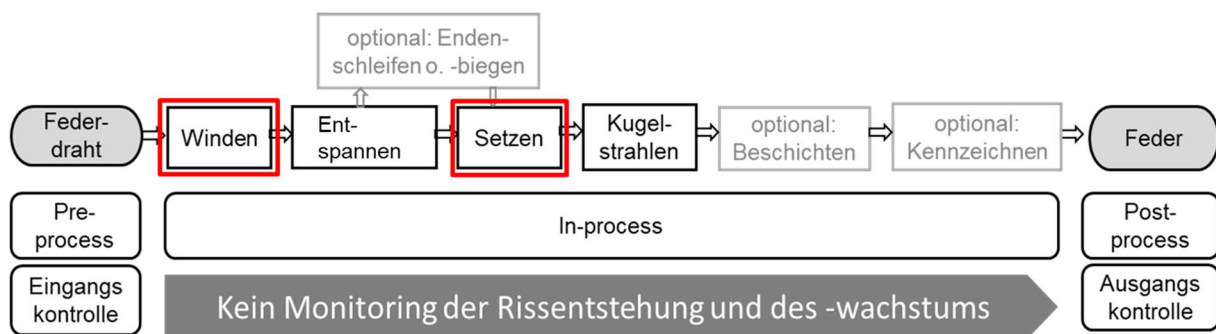


Abbildung 1: Vereinfachte schematische Darstellung der Herstellung kaltgeformter Federn sowie der Zuordnung von Prüfungen zu den einzelnen Prozessphasen

Ziel der wissenschaftlichen Arbeit ist die Behebung des aufseiten der Industrie erkannten Problems der momentan fehlenden 100%igen Qualitätskontrolle hinsichtlich Rissentstehung bzw. -wachstum während der Prozesse des Windens und Setzens.

Rissbildung und -wachstum erzeugen im Werkstoff Schallwellen, die prinzipiell mittels AE-Prüfung auch an komplexen Bauteilen nachgewiesen werden können [SAU13, WAC16, ZFP18]. Folgende Anforderungen werden für die Erfassung des Risswachstums in der industriellen Anwendung an die AE-Messung gestellt:

- Die Umgebungsgeräusche, teilweise von baugleichen Maschinen müssen ausgefiltert werden.
- Zur Detektion von Mikrorisswachstum bei Prozessen mit hohen Geschwindigkeiten (Taktzeit beim Federwinden bis über 100 Federn/ Minute) müssen die Messungen mit einer extrem hohen Rate durchgeführt werden.
- Zum Aussortieren der rissbehafteten Bauteile in einem kontinuierlichen Prozess muss eine In-situ-Auswertung der Messergebnisse direkt das Ergebnis (*i. O.* oder *nicht in*

Ordnung, n. i. O.) liefern und ein Output-Signal generieren, um Maßnahmen (Maschinenstopp, rote Warnlampe, Ansteuerung eines Fließbands zum Aussortieren der Federn, etc.) zu veranlassen.

Die wissenschaftliche Bedeutung des Forschungsvorhabens ergibt sich durch die Arbeitshypothese, dass die Schallfrequenz, die bei Risswachstum erzeugt wird, von dem Schädigungsmechanismus abhängig ist. Die Signifikanz der Unterscheidung der Signale in Abhängigkeit des Bruchmechanismus muss statistisch bestätigt werden und die Unterscheidung muss die automatische In-situ-Erkennung und Zuordnung des jeweiligen Signals ermöglichen. Dies ist die Aufgabe im Rahmen dieser Arbeit. Damit wäre in Zukunft nicht nur die Feststellung, ob eine Feder einen Riss aufweist und somit dem Fertigungsprozess zu entnehmen ist, sondern auch die Identifikation, ob ein sprödes oder duktiler Bruchverhalten, ein transkristalliner oder ein interkristalliner Riss vorliegt, möglich. Mit diesen Erkenntnissen kann der Federhersteller ohne aufwendige Untersuchungen, für die KMU keine Möglichkeit haben (z. B. rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen), Rückschlüsse ziehen, bei welchem Prozess eine unerwünschte Änderung des Werkstoffzustands geschah, und korrigierend in diesen Prozess eingreifen bzw. eine Reklamation beim Drahthersteller untermauern. Des Weiteren rückt hiermit eine Signalzuordnung zu Werkstoffantworten, die auf andere (nicht rissinduzierte) mikrostrukturelle Änderungen zurückzuführen sind, in greifbare Nähe und es kann auf Grundlage von Auswertalgorithmen gezielt eine Aussonderung von intakten Bauteilen vermieden werden.

2 Stand der Wissenschaft und Technik

2.1 Werkstoffe

Für die Fertigung technischer Federn werden Federdrahtstähle, die sich durch eine hohe Zugfestigkeit R_m auszeichnen, verwendet. Diese Drähte sind nach DIN EN 10089 [DIN01], DIN EN ISO 16120-1 bis 4 [DIN02, DIN03, DIN04, DIN05] spezifiziert und liegen im unlegierten bis hochlegierten Zustand vor. Bezüglich der Festigkeitsabstufungen innerhalb einer Werkstoffart ist die Zugfestigkeit R_m der bedeutendste Faktor, die Duktilität wird durch Anforderungen an die Brucheinschnürung Z und die Verwindeszahl N_t charakterisiert.

Patentiert gezogener Federstahl

Ein typischer unlegierter Federwerkstoff ist der patentiert gezogene Federstahl nach DIN EN 10270-1 [DIN1]. Das Ziel des Patentierens ist es, ein gut kalt verformbares feinlamellares perlitisches Gefüge zu erzeugen. Hierzu wird der vorgezogene Draht auf Austenitierungstemperatur erhitzt bzw. austenitisiert und anschließend in einem Medium, z. B. im Salzbad oder an Luft, im Bereich der Perlitbildung (450 - 600 °C) isotherm abgeschreckt und bis zum vollständigen Ablauf der isothermen Umwandlung gehalten [BLE16, DIN02]. Nach dem anschließenden Abkühlen wird der Drahtquerschnitt kalt auf das gewünschte Maß gezogen. Durch die Querschnittsänderung von bis zu 80 % ist eine Veränderung der Zugfestigkeit, der Brucheinschnürung, der Biege- sowie der Torsionswechselfestigkeit zu verzeichnen [SCH10, TER23]. Patentiert gezogener Federstahldraht startet ab 0,05 mm und zeichnet sich durch seine hohe Zugfestigkeit [0,5 mm (2720 MPa) < d ≤ 20 mm (1160 MPa)] und eine ausgeprägte Textur in Ziehrichtung aus [MEI15]. Die DIN EN 10270-1 klassifiziert Drahtarten basierend auf ihrem Verwendungszweck in *statische Beanspruchung oder gelegentliche dynamische Belastung* (S) und *häufige oder vorwiegend dynamische Beanspruchung* (D). Darüber hinaus erfolgt eine Einteilung in drei Zugfestigkeitsklassen: *niedrig* (L), *mittel* (M) und *hoch* (H) [DIN01].

Ölschlussvergüteter Federstahldraht

Ölschlussvergüteter Ventulfederstahldraht wird für hohe statische und hohe zyklische Beanspruchungen verwendet und ist in der DIN 10270-2 klassifiziert [DIN2]. Dieser wird bei der Herstellung nach austenitischer Umwandlung in Öl abgeschreckt und anschließend angelassen. Hierdurch werden ein feines Vergütungsgefüge und hohe Zugfestigkeiten [0,5 mm (2380 MPa) < d ≤ 17 mm (1250 MPa)] erzielt. Für Federstahldrähte werden Walzdrähte mit höchstem Reinheitsgrad und Oberflächengüte verwendet. Hierzu wird der Walzdraht für Ventulfederdrähte vor dem Ziehen ggf. geschält oder geschliffen und im Anschluss an das Ölschlussvergüten mittels Wirbelstromprüfung rissgeprüft [JIN07, SCH10].

Beim Schälen werden etwa 0,15 mm der Walzdrahtoberfläche abgetragen, um die Oberflächenentkohlung zu entfernen. Danach erfolgt eine Wärmebehandlung, durch die Eigenspannungen abgebaut werden. Im Anschluss wird der Draht auf den Enddurchmesser gezogen. Das Schälen bewirkt eine Festigkeitssteigerung des Drahtes von etwa 10 %. Gemäß der Norm werden die Sorten der Beanspruchung entsprechend in die Kategorien *statisch* (FD), *mittlere* (TD) und *hohe Dauerfestigkeit* (VD) unterteilt und innerhalb dieser Kategorien nach ihrer Zugfestigkeit differenziert [DIN02].

Nichtrostender Federstahldraht

Weitere häufig verwendete Federstähle sind in der DIN EN 10270-3 als nichtrostende Federstahldrähte spezifiziert und werden dem Gefügestand entsprechend in vier Hauptgruppen (ferritisch, martensitisch, austenitisch-ferritischen und austenitischen Stähle) eingeteilt [DIN3, SCH23, DIN14]. Die hohe Festigkeit dieser Stähle [$0,5 \text{ mm} (2480 \text{ MPa}) < d \leq 10 \text{ mm} (1250 \text{ MPa})$] wird durch die Kaltverfestigung erzeugt, was bedeutet, dass sie im federharten Zustand verarbeitet und im Anschluss wärmebehandelt werden [SCH23]. Weiterhin werden den nickel-martensitischen Stählen ausscheidungshärtbare korrosionsbeständige Stähle wie 1.4568 und 1.4594 zugeordnet, die sich durch die der Norm DIN EN 10088-3 zu entnehmenden Wärmebehandlungen auf hohe Festigkeitswerte bringen lassen [DIN15]. Die Festigkeitssteigerung erfolgt durch Ausscheiden einer oder mehrerer Phasen aus übersättigter fester Lösung. Die Wärmebehandlung besteht in der Regel aus Lösungsglühen und Warmauslagern [SCH23, ULL23].

2.2 Federnherstellung und Ursachen der Rissentstehung

Bei der Fertigung von Federn (vgl. Kapitel 1.1 Abbildung 1) können herstellungsbedingt Risse auftreten. Bisher wird jedoch keine zerstörungsfreie In-Prozess-Überwachung der einzelnen Fertigungsschritte hinsichtlich Rissbildung in der Federnproduktion durchgeführt. Nach Mayer [MAY23] sind etwa zwanzig verschiedene Schadensarten bei Druckfedern bekannt, die je nach Ursache in Herstellungsfehler und betriebsbedingte Fehler eingeteilt werden können (Abbildung 2). Im Folgenden werden die einzelnen Prozessschritte – vom Draht zur Feder – und die möglich herstellungsbedingten Ursachen der Rissentstehung beschrieben.

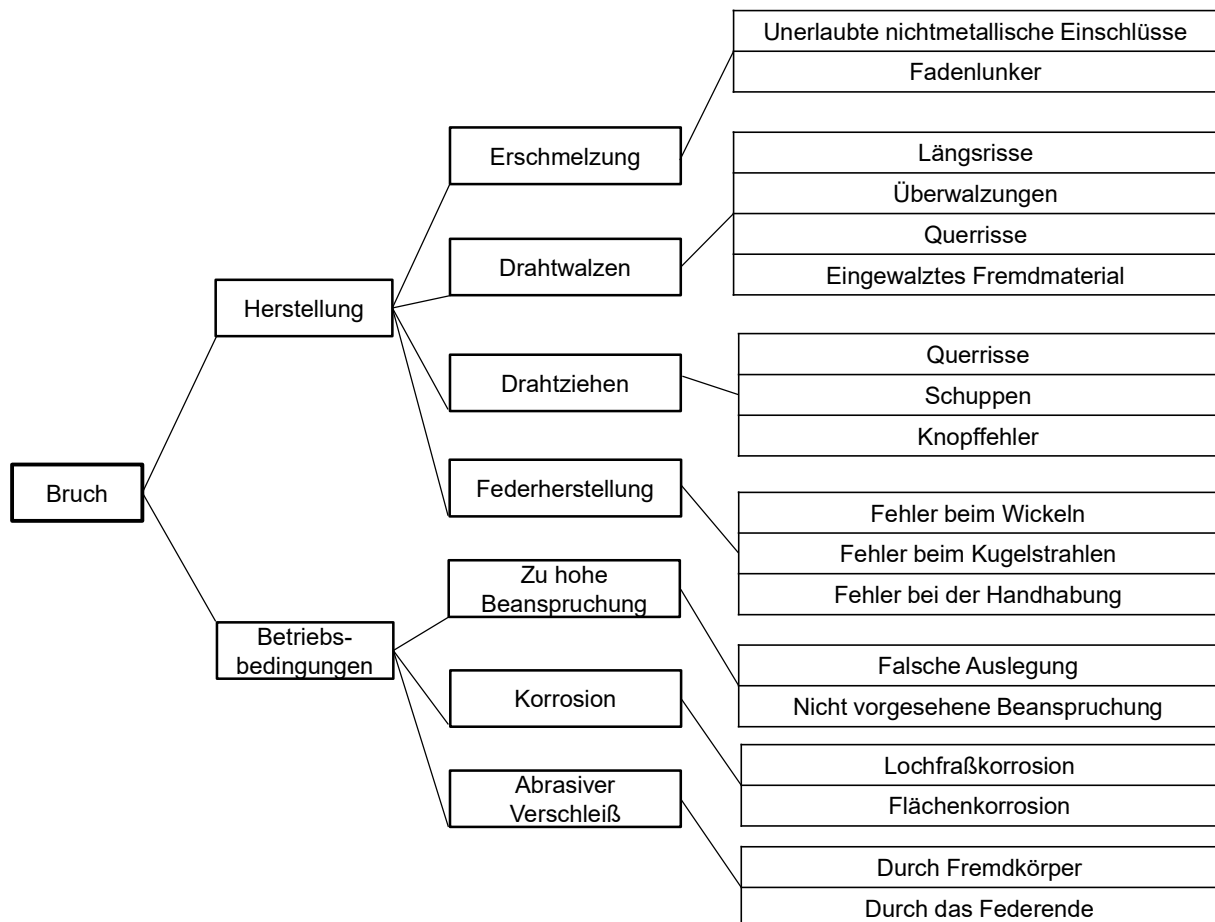


Abbildung 2: Ursachen für Federnbrüche durch herstellungs- und betriebsbedingte Faktoren; in Anlehnung an [MAY23]

Materialfehler im Ausgangszustand am Halbzeug Draht

Das Halbzeug Draht kann an der Oberfläche Imperfektionen wie unzulässige Oberflächenrauigkeiten, Ziehriefen, Kerben aufgrund mechanischer Beschädigung der Drahtoberfläche, Randentkohlung, in seltenen Fällen bis hin zur Randauskohlung, oder ggf. Randaufkohlung, aber auch Walzfehler aufweisen. In den Normen *DIN EN ISO 16120 Teile 1–4* sind Lieferbe-

dingung und Art der Prüfung z. B. Entkohlung, Oberflächenfehler, nichtmetallische Einschlüsse, Kernseigerungen und Gefüge spezifiziert [DIN02, DIN03, DIN04, DIN05]. Häufig liegen Materialspezifikationen, die zwischen Federn- und Drahthersteller über die in den jeweiligen Normen geforderten Merkmale hinausgehend vereinbart werden, vor. Für die Prüfung wird die erforderliche Anzahl an Proben von einem Ende des abgeschnittenen Walzdrahttringes entnommen.

Das Gefüge kann in seltenen Fällen Poren, singulär auftretende Einschlüsse, die in Größe und Verteilung über den geforderten (Mikro-) Reinheitsgrad hinausgehen, sowie Unterschiede in der Konzentration der Legierungselemente (Seigerungen, Zeiligkeit des Gefüges) enthalten. Diese Imperfektionen wirken als geometrische und/oder metallurgische Kerben und damit als Spannungskonzentratoren [KRU04], die bei ausreichend hohen Umformgraden während des Windes oder Setzens oder bei der späteren betrieblichen (meist zyklischen) Beanspruchung zur Rissinitiierung führen können. Beispielsweise können Risse an oxidischen Einschlüssen auch unterhalb der Drahtoberfläche, also im Volumen, während hochzyklischer Beanspruchung entstehen [BRU14]. Die nichtmetallischen Einschlüsse sind im Material zwar prinzipiell unerwünscht, jedoch nicht vollständig zu vermeiden. Kleine Einschlüsse, z. B. bei Ventildrahten von bis zu etwa 15 μm , werden akzeptiert und müssen bei der Auslegung der maximalen Beanspruchung der Feder berücksichtigt werden [MAY23].

Ebenfalls kann der Draht durch das Walzen und Kaltziehen bereits Längs- und auch Querrisse enthalten. Einige Drahtproduzenten nutzen ein Inline-Monitoring-Verfahren, das es ermöglicht, Querrisse mit einer minimalen Größe von 100 μm mithilfe induktiver Wirbelstromprüfung nachzuweisen [DIN9, MEI15]. Bei Federn aus ungeschältem Material treten sporadisch Längsrisse auf, die bereits im Walzdraht zustande gekommen sind. Da Walzrisse durch Maßnahmen beim Drahtwalzen nicht zuverlässig zu verhindern sind, müssen sie durch eine nachträgliche Drahtprüfung gefunden werden. Allerdings können innenliegende Längsrisse auf diese Weise nicht erkannt werden. Das für die Federnproduktion wichtige Halbzeug – der höchstfeste Federdraht – kann somit schon mit Mikrorissen behaftet angeliefert werden. Diese Mikrorisse können u. U. in den Prozessschritten des Federnwindens und -setzens wachstumsfähig werden [HOE87, BRU12].

Winden

Schraubendruckfedern werden häufig bei einem Drahtdurchmesser $d \leq 30 \text{ mm}$ kaltgeformt oder im Bereich $8 \text{ mm} \leq d \leq 60 \text{ mm}$ warmgeformt hergestellt [WAF23]. Die Kaltumformung vom Draht zur Feder wird *Winden* genannt, die Warmumformung bei ca. 900 °C als *Wickeln* definiert.

Der Zusammenhang zwischen Federdurchmesser D_m und Drahtstärke d wird beim Wickeln und Winden als *Wickelverhältnis* w bezeichnet und mit Gleichung 2.2.1 berechnet.

$$w = \frac{D_m}{d} \quad (\text{Gl. 2.2.1})$$

Das Verhältnis sollte bei Schraubendruckfedern vorzugsweise bei $7 \leq w \leq 10$ liegen, wobei nach der Norm dafür der Bereich $4 \leq w \leq 16$ zugelassen und in Ausnahmefällen auch $3 \leq w \leq 18$ erlaubt ist [MEI15]. Je kleiner das Windeverhältnis der herzustellenden Feder ist, desto höher ist die Beanspruchung des Werkstoffs während der Fertigung [SCH10].

In der Umformtechnik wird die Größe einer Veränderung, bei der ein Körper mit einem definierten Volumen durch äußere Kräfte in eine andere Gestalt gebracht wird, als *Formänderung* bezeichnet. In diesem Zusammenhang wird von *Formänderungen* bzw. *Umformgraden* gesprochen, für die das Symbol φ gewählt wird. Fließkurven zeigen den Zusammenhang zwischen der Fließspannung k_f – auch *wahre Spannung* bezeichnet – und dem Umformgrad φ graphisch auf und kennzeichnen das Werkstoffverhalten bei der Umformung im plastischen Bereich (Abbildung 3). Dieser Zusammenhang bildet die Grundlage für die Ermittlung der Umformkraft und der Umformarbeit, aber auch der Ermittlung von Spannungen und Formänderungen.

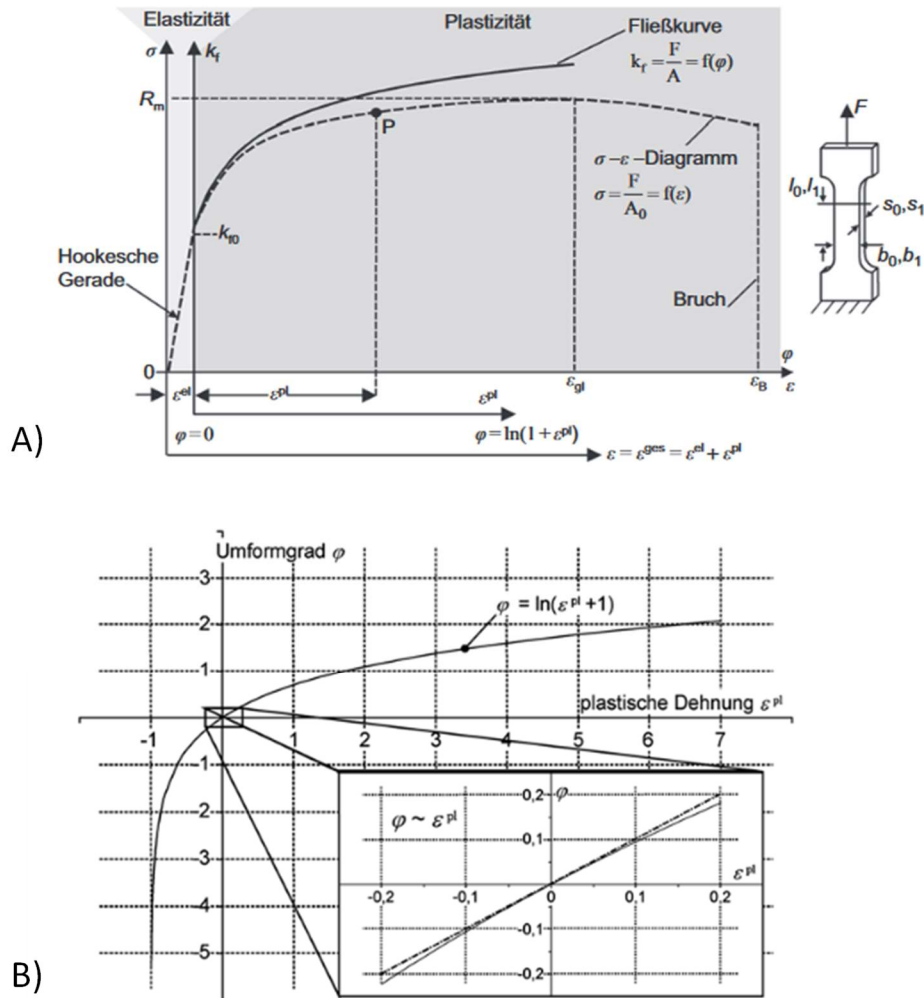


Abbildung 3: A) Spannungs-Dehnungs-Diagramm sowie Fließkurve aus dem Flachzugversuch und B) Verknüpfung zwischen der plastischen Dehnung ϵ_{pl} und dem Umformgrad φ [DOE16]

Abbildung 4 (A) zeigt den Prozess des Windens einer Schraubendruckfeder. Beim Winden einer Druckfeder wird der Federdraht über Einzugsrollen durch eine Drahtdurchführung geleitet. Anschließend kann über den Steigungsstift die Steigung s_w der Feder eingestellt werden. Der Durchmesser d wird durch die Windestifte bestimmt. Abschließend wird der Draht durch das Schneidmesser durchtrennt. Durch die vielen Freiheitsgrade der dargestellten Windemaschine können die Federn individuell angepasst werden. Eine spannungsmechanische Beschreibung des Windungsvorgangs findet sich bei Kobelev et al. [KOB10] und Rethmann [RET23] (Abbildung 5). In den inneren Fasern, die zur Federmitte gerichtet sind, treten Druckspannungen auf, während in den äußeren Fasern Zugspannungen entstehen. Auf der Außenseite wirken demnach Zugspannungen, die den Ausgangspunkt für eine Rissbildung während der Umformung darstellen [SCH10, SHA24]. Wird die Verformung beendet, d. h. das Bauteil entlastet, findet eine elastische Rückfederung statt. Abbildung 6 zeigt den resultierenden Verlauf der nach der elastischen Rückfederung wirkenden Spannungen.

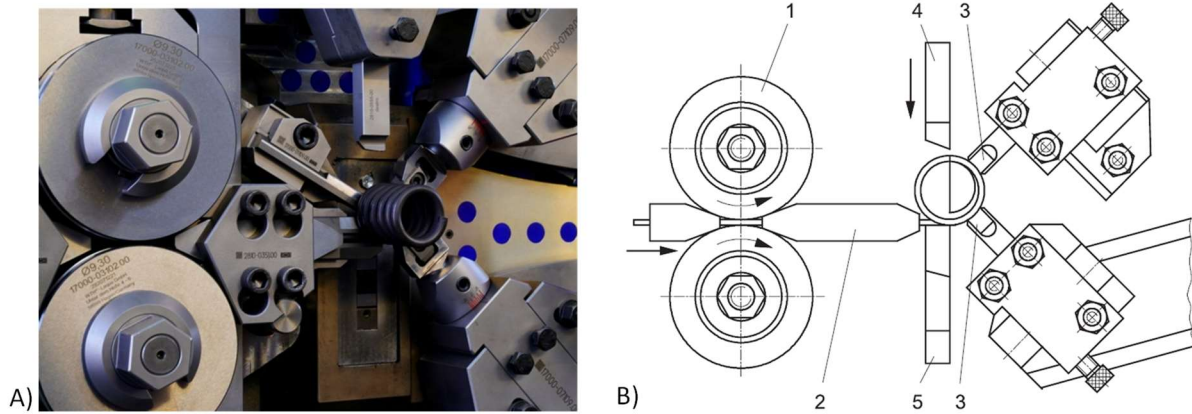


Abbildung 4: A) Windmaschine OMD Officina Meccanica Domaso S.p.A [DAM22] und vergleichend B) schematische Darstellung einer Windmaschine für Schraubenfedern mit Einzugrollen (1), Drahtführung (2), Windstifte (3), Schneidmesser (4), Steigungsstift (5) [ME115]

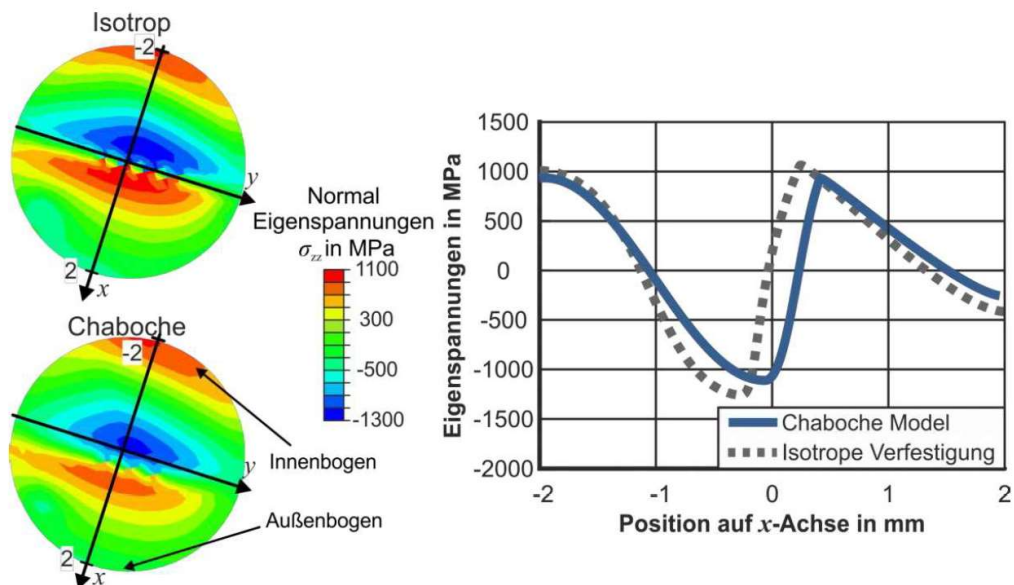


Abbildung 5: Verlauf der Eigenspannungen im Querschnitt der Feder nach der Rückfederung sowie Verlauf der Eigenspannungen über den Drahtquerschnitt [RET23]

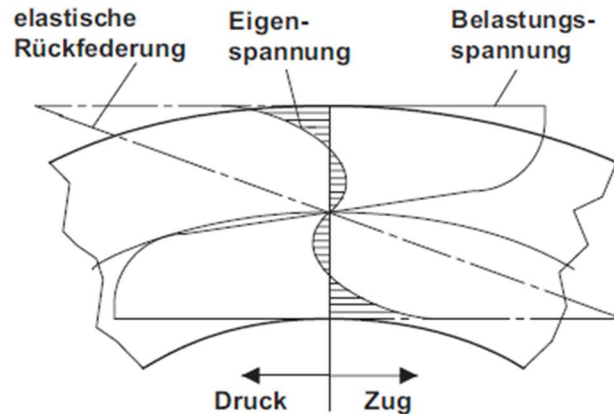


Abbildung 6: Belastungsspannungen beim bzw. nach dem Winden einer Feder [MEI15]

Wärmebehandlung bzw. Spannungsarmglühen

Auf der Windungsinneseite liegen nach der elastischen Rückfederung Zugspannungen vor. Diese vermindern die betriebliche Belastbarkeit (Schwingfestigkeit) der Federn. Die Federn werden nach dem Winden einer Wärmebehandlung (Entspannen bzw. Spannungsarmglühen) unterzogen, um dem ungünstigen induzierten Eigenspannungszustand entgegenzuwirken, wodurch die Eigenspannungen reduziert werden [KOB10]. Bei rissempfindlichen Werkstoffen (z. B. VDSiCr) muss die Zeit zwischen Federwinden und Wärmebehandlung minimiert werden, da sich bei zu langer Liegezeit Spannungsrisse quer zur Umformrichtung bilden können [GEI15]. Mit der Wärmebehandlung gehen unvermeidbare werkstoffabhängige Geometrieänderungen einher, die bereits bei der Federauslegung berücksichtigt werden sollten. Ebenfalls in Abhängigkeit des Werkstoffs (z. B. X7CrNiAl17-7) kann mithilfe der Wärmebehandlung durch Ausscheidungshärtung die Festigkeit gesteigert werden [LUX10].

Schleifen der Endwindungen

Für eine optimale Kraftübertragung von der Feder auf den Anschlusskörper müssen die Federnenden so beschaffen sein, dass die Federn in möglichst jeder Stellung axial einfedern. Das Schleifen, wenn gefordert, und das Entgraten der Federenden erfolgen spanend. Beim Schleifen ist darauf zu achten, den Wärmeeinfluss zu kontrollieren, damit nicht eine Wärmeübertragung und damit eine mögliche Versprödung in der ersten Windung auftritt [MEI15, MAY23, SCH17]. In der Literatur wird angegeben, dass in der geschliffenen Windung, in der ersten Windung bzw. im Entwindungsbereich aufgrund von Versprödung teilweise Federbrüche entstehen [KOB18, MEI15]. Derzeit (Stand Dezember 2023) läuft zu dieser Thematik ein Forschungsprojekt an der Technischen Universität Dortmund [VDF23].

Kugelstrahlen

Beim Fertigungsverfahren, dem *Kugelstrahlen*, wird ein Strahlmittel (Werkzeug) in Strahlgeräten beschleunigt und auf die zu bearbeitende Oberfläche eines Strahlguts (Werkstück) gerichtet. Beim Auftreffen des Strahlmittels auf dem Strahlgut wird die kinetische Energie insbesondere in elastisch-plastische Verformungsarbeit umgewandelt. Durch das Kugelstrahlen werden Zugeigenspannungen abgebaut und teilweise kleine Oberflächenfehler wie Riefen eliminiert. Die daraus resultierenden Druckeigenspannungen bzw. die Kaltverfestigung in der Oberfläche verringern die rissausbreitende Wirkung der im Betrieb aufgeprägten Zugspannung [MAY23, SHA24]. In Abbildung 7 ist beispielhaft der Eigenspannungsverlauf über die Tiefe mit dem Vergleich zwischen kalt gewundenen Federn und dem Verlauf nach der Wärmebehandlung, dem Setzen und dem Kugelstrahlen.

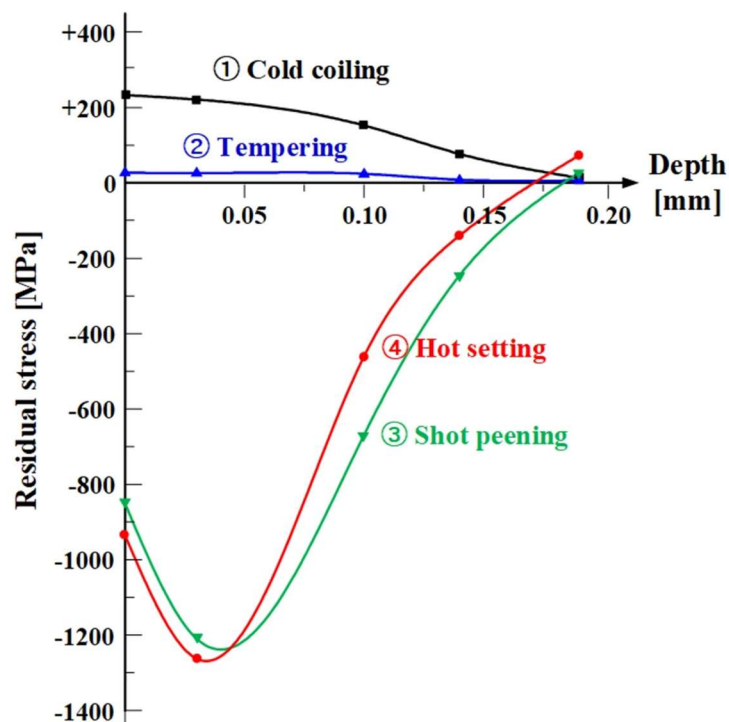


Abbildung 7: Vergleich der Eigenspannungsverläufe und Tiefenprofil der inneren Oberflächenschicht einer kaltgeformten Feder sowie nach jedem Federherstellungsprozess [DAE22]

Setzen

Das Plastifizieren von Federn, auch *Setzen* oder *Vorsetzen* genannt, wird eingesetzt, um die Werkstoffausnutzung zu verbessern und die Federeigenschaften zu optimieren. Eigenspannungen, die bei überelastischer Beanspruchung der Feder entstehen, mindern die Belastungsspannung im Federeinsatz. Durch diesen zusätzlichen Arbeitsgang wird ein späterer Längenverlust (Setzverlust) der Feder im Einsatz vermieden und die Belastbarkeit der Feder erhöht [MEI15].

Ausgangskontrolle

Großen Einfluss auf die Funktionswerte von Federn haben die Werkstoffeigenschaften der verwendeten Halbzeuge sowie die nach der Fertigung geometrisch eingestellten Kennwerte. Die Einhaltung bestimmter Toleranzen ist z. B. in der DIN 10270 festgelegt. Nach der Fertigung wird in den Unternehmen eine Ausgangskontrolle zur Ermittlung der Federcharakteristik und somit der Federkennlinie vorgenommen [LOW86, BAC10]. Neben der Bestimmung der Federkennlinie ist die Ermittlung des Schwingfestigkeitsverhalten für zyklisch belastete Federn von Bedeutung. Dieses Schwingfestigkeitsverhalten wird über einen Schwingfestigkeitsversuch, bei dem die Federn unter konstanten Wegamplituden geprüft werden, untersucht [MAY23]. Die Versuche zur Federkennlinie und Schwingfestigkeit werden je nach Kunden- und Produktanforderung stichprobenartig durchgeführt – was bei den meisten KMUs aufgrund des Zeitaufwandes sowie der Kosten nicht möglich ist. Weiterhin zählen Schwingfestigkeitsversuche zu den zerstörenden Prüfverfahren.

Zwischen den einzelnen Prozessschritten findet kein Prozessmonitoring hinsichtlich Rissentstehung und -wachstum statt. Die Lücke soll durch die vorliegende Arbeit geschlossen werden.

Wasserstoffinduzierte Rissbildung

Stähle machen 90 % des weltweiten Marktes für Metalllegierungen aus. Insbesondere hochfeste Stähle mit kubisch-raumzentrierten (krz) und tetragonal-raumzentrierten (trz) Gittern können anfällig für Wasserstoffversprödung sein [SUN21, LOI14]. Während der gesamten Prozesskette vom Draht zur Feder kann die Gefährdung durch Wasserstoff auftreten, wenn z. B. das Drahtcoil oder die gefertigte Feder direkt nach dem Winden mit vorliegenden Zugspannungen der Luftfeuchtigkeit oder genereller Feuchtigkeit ausgesetzt ist. Bei den hohen Drahtfestigkeiten und den Zugspannungen kann bereits eine hohe Luftfeuchte, aber auch örtliche Korrosion der gerade gefertigten Federn die Ursache für eine Wasserstoffaufnahme und damit für wasserstoffinduzierte Rissbildung sein [SCH05]. Diese kann bereits während der Fertigung auftreten, aber – und das ist typisch für diesen Schadensmechanismus – auch zeitverzögert im Betrieb [LYN12, PRA20]. Damit wird deutlich, dass beim Nachweis interkristallinen Spaltbruchs durch die AE-Analytik direkt in die Fertigung eingegriffen bzw. diese kritisch begutachtet werden kann. Dadurch können ohne langwierige Laboruntersuchungen Abhilfemaßnahmen oder in Bezug auf den Drahthersteller Sperren des Coils bzw. Reklamationen eingeleitet werden.

Wasserstoffversprödung ist ein Überbegriff für Schädigungen, die durch den Einfluss von Wasserstoff verursacht werden. Die Schädigungsart bei Metallen wird auch oftmals als H-indu-

zierte Spannungsrisskorrosion (H-SpRK) bezeichnet und führt zu einer Verringerung der Duktilität und der Zähigkeit bei mechanischen Beanspruchungen. Je nach Ursache des Versagens wird bei Wasserstoffversprödung bzw. verzögerter Rissbildung entweder nach *internal hydrogen embrittlement* (IHE), ausgelöst durch den durch die Fertigungsverfahren im Werkstoff eingetragenen Wasserstoff, oder nach *environmental hydrogen embrittlement* (EHE), ausgelöst durch Wasserstoff aus der Umgebung während der technischen Anwendung des Werkstoffs, unterschieden. [SCH05, LOI14]

Die wasserstoffinduzierte Rissbildung ist eine komplexe Systemeigenschaft, die durch das Zusammenwirken von Werkstoffzustand, H-Angebot und mechanischem Beanspruchungszustand hervorgerufen wird [WEN98]. Wenn diese drei Faktoren in einem kritischen Maß überlagert werden (Abbildung 8), tritt H-SpRK auf und es kommt zu einem H-induzierten Bruch. Innerhalb der Prozesskette von der Drahtherstellung bis zur gewundenen Feder sind folgende Einflussgrößen relevant:

- Werkstoffzustand (höchstfeste Stähle mit krz bzw. trz Gitter),
- Beanspruchung (hohe Zugeigenspannungen) und
- H-Quellen (hohe Luftfeuchtigkeit bis hin zu Nassregen).

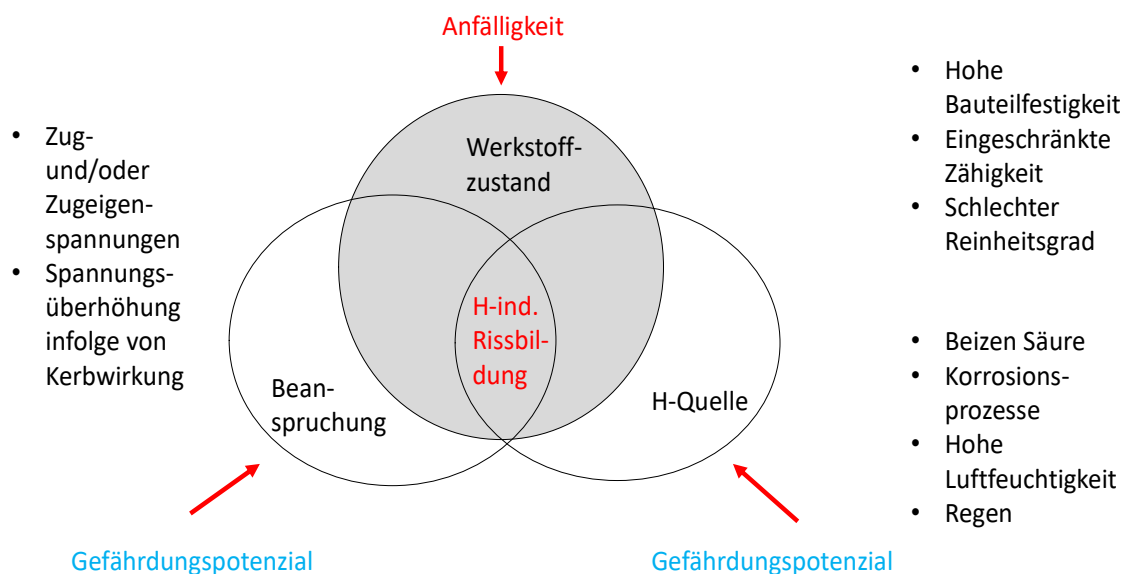


Abbildung 8: Voraussetzungen (Einflussgrößen) für das Auftreten einer wasserstoffinduzierten Rissbildung (Sprödbruchbildung); in Anlehnung an [WEN98]

Wasserstoffeintritt

Für den Transport von Wasserstoff aus der Umgebung in den Festkörper sind mehrere sequentielle Schritte erforderlich. Zu diesen Schritten gehören die Anlagerung des Wasserstoff-

atoms an die Oberfläche, die Übertragung eines Elektrons an das Elektronengas und abschließend die Dissoziation durch die Aufnahme des Wasserstoffprotons in den Festkörper [LOI14]. Bestimmte Energieniveaus müssen je nach Teilschritt überschritten werden. Die Kinetik dieser Teilschritte wird von verschiedenen Randbedingungen beeinflusst, z. B. dem Umgebungsmedium, der Temperatur, dem Partialdruck, der Oberflächenbeschaffenheit, den Spannungsfeldern und der Aktivität der adsorbierten Wasserstoffatome [TRA20].

Wasserstofffallen

Wasserstoff, das kleinste Atom im Periodensystem, zeigt eine hohe Diffusionsfähigkeit im Eisengitter. Die Diffusionskoeffizienten variieren stark je nach den verschiedenen Modifikationen des Stahls. Die Löslichkeit von Wasserstoff ist aufgrund der verschiedenen Anzahlen und Größen der Oktaeder- bzw. Tetraederlücken im austenitischen Gitter ($2,15 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$) und martensitischen Gefüge ($2 \times 10^{-9} \text{ cm}^2/\text{s}$) mehr als 1000-mal höher als im ferritischen Gefüge ($1 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$) [SMI00, LOI14]. Die existierende Aufwärtsdiffusion (*up-hill diffusion*), stellt dabei die Diffusion entgegen dem Konzentrationsgradienten und entlang des Gradienten im chemischen Potenzial dar [TRA20]. Aufgrund des chemischen Potenzials neigen die adsorbierten Wasserstoffatome dazu, im Metallgitter zu diffundieren, wobei diese sich bevorzugt an Gitterdefekten binden, die als *H-Fallen* (engl. *traps*) bezeichnet werden. Die Bindung an Wasserstofffallen ist energetisch günstiger im Vergleich zur Bindung an Zwischengitterplätzen (ff. wird unter *Bindung* nicht die chemische Bindung im engeren Sinne, sondern die Bindung der H-Atome zu den jeweiligen Traps verstanden). Typische H-Fallen im metallischen Gitter sind unter anderem Leerstellen, gelöste Fremdatome, Versetzungen sowie Korngrenzen, Mikroporen und Ausscheidungen (Abbildung 9) [PRA20, TRO22, BEH24].

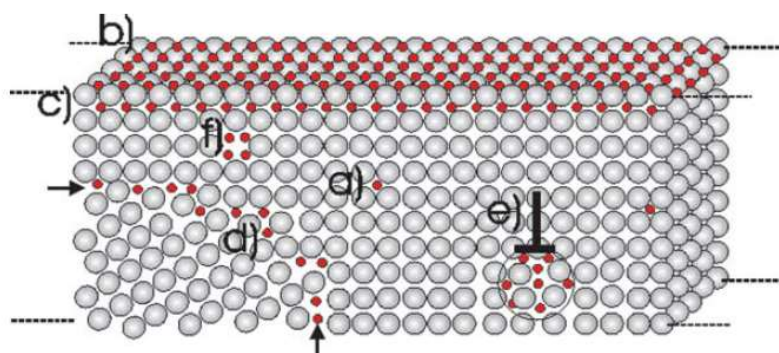


Abbildung 9: Wasserstofffallen mit a) Diffusion der H-Atome über Zwischengitterplätze, b) Adsorption des atomaren Wasserstoffs, c) Diffusion der H-Atome entlang der Oktaederlücken in das Kristallgitter, d) Anlagern von H Atomen entlang der Großwinkelkorngrenzen, e) Anlagern der H Atome im Zugspannungs- bzw. Zugdehnungsfeld von Versetzungen und f) Anlagern der H-Atome in Leerstellen zwischen den einzelnen Atomgittern [PUN06]

H-Fallen werden allgemein in reversible und irreversible eingeteilt, wobei häufig davon ausgegangen wird, dass primär der H-Anteil in den energetisch niedriger liegenden reversiblen Fallen zur Diffusion und folglich für die Schädigung verantwortlich ist [LYN11]. In Tabelle 1 sind vergleichend die H-Fallen und die Bindungsenergien aufgelistet.

Tabelle 1: Vergleich der Bindungsenergien des Wasserstoffs in Abhängigkeit der H-Fallen [KUR00].

Bezeichnung	Gefügebestandteil	Bindungsenergie [kJ/mol]	Merkmale der Traps
frei beweglich	Matrix	8	Bewegung findet über Zwischengitterplätze statt.
flache Traps	Korngrenzen, Versetzungen, Leerstellen	< 30	Wasserstoff ist an geweitete Zwischengitterplätze oder Versetzungen gebunden. Die Bewegung durch das Gitter ist noch möglich.
tiefe Traps	Mikroporen und Karbide	> 50 kJ/mol	Wasserstoff ist an Ausscheidungen oder Einschlüsse irreversibel gebunden.

Schädigungsablauf

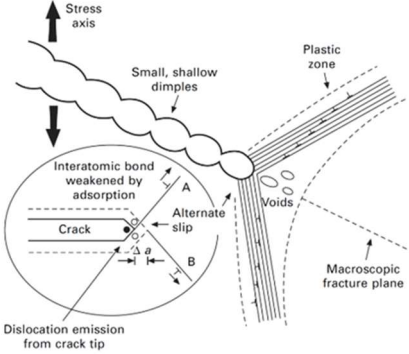
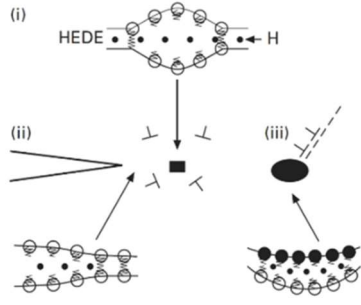
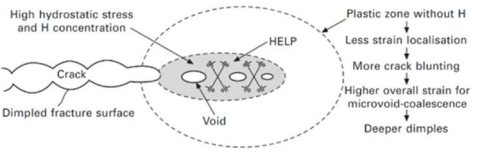
Der erste Schritt im Schädigungsprozess der Wasserstoffversprödung ist die Diffusion von Wasserstoff in das Metall. Die diffundierten Wasserstoffatome sammeln sich in Fallen, die den Atomen energetisch günstigere Positionen bieten als interstitielle Plätze. Die Verteilung im Gitter und in den H-Fallen wird durch die Bedingungen der Wasserstoffbeladung, der Diffusion, den inneren Spannungen und der Fallenenergien bestimmt. Während des Betriebs oder bei Umformvorgängen können Spannungsfelder entstehen, die lokal begrenzt oder makroskopisch sein können. In Bereichen mit erhöhter Verzerrung der metallischen Gefügestruktur tritt verstärkt Wasserstoffdiffusion auf. Wird eine Wasserstoffkonzentration überschritten, die mit den auftretenden Spannungen korreliert, können Risse entstehen oder vorhandene Risse wachsen. Die kritische Konzentration hängt von der Wasserstoffdiffusion, der Wasserstoffverteilung, dem Spannungszustand und dem Diffusionskoeffizienten ab. Das Risswachstum erfolgt oft nicht kontinuierlich, sondern in bestimmten Intervallen. Wasserstoff sammelt sich in der plastischen Zone vor der Rissfront und in der nahen elastischen Zone um den Riss. Dort entfaltet er seine schädigende Wirkung und führt zu einer weiteren Rissausbreitung. Durchbricht der Riss die mit Wasserstoff angereicherte Region, kann es zu einem vorübergehenden Stillstand des Risswachstums kommen. Das fortschreitende Risswachstum verändert die mechanischen Spannungen, wodurch Wasserstoffatome zur neu positionierten Rissfront diffundieren. Sobald an der Rissfront wieder eine kritische Wasserstoffkonzentration erreicht ist,

setzt das Risswachstum bis zum endgültigen Bruch wieder ein. [LYN12, REH14, PRA20, TRO22]

Die Wasserstoffversprödung von Stählen wird seit mehr als 145 Jahren untersucht. Es besteht jedoch keine Einigkeit darüber, welcher der zahlreichen beschriebenen Schädigungsmechanismen allgemeingültig ist [LYN11, TRA20].

Es existieren verschiedene Schädigungsmechanismen, die meist in Kombination auftreten (Tabelle 2).

Tabelle 2: Übersicht über die unterschiedlichen Schädigungsmechanismen. [LYN11, LYN12, LOI14]

Theorie	Mechanismus	Schema
<p>Adsorptionstheorie <i>adsorption-induced dislocation emission</i> (AIDE)</p>	<p>Die schädlichen Auswirkungen von Wasserstoff resultieren aus der Adsorption von Wasserstoffmolekülen an der Oberfläche eines Werkstoffs, was zu einer Reduktion der Oberflächenspannung führt. Diese Oberflächen können sowohl die äußere Oberfläche als auch innere Defekte wie Risse oder Poren innerhalb des Werkstoffs umfassen. [LOI14]</p>	 <p>Abbildung 10: Schematische Darstellung des AIDE-Mechanismus [LYN12]</p>
<p>Dekohäsionstheorie <i>hydrogen induced decohesion</i> (HEDE)</p>	<p>Wasserstoffatome können die Kohäsionskräfte der Matrixmetallatome entlang kristallographischer Ebenen oder Phasengrenzen verringern. Dadurch kann bei mechanischer Belastung eine Schädigung auftreten. [TRO22]</p>	 <p>Abbildung 11: Trennung von Metallatomen aufgrund der Schwächung interatomarer Bindungen durch (i) Wasserstoff im Gitter, (ii) adsorbierten Wasserstoff an der Risspitze und (iii) Wasserstoff an der Partikel-Matrix-Grenzfläche [TRA20, LYN12]</p>
<p>Versetzungstheorie <i>hydrogen enhanced localized plasticity</i> (HELP)</p>	<p>Innerhalb des Zugspannungsbereichs von Versetzungen bewirken Wasserstoffatome eine Verringerung der Energiebarriere für die Versetzungsbewegung. Dies führt zur Senkung der Peierls-Spannung und infolgedessen zu einer erhöhten Mobilität der Versetzungen. Dies kann lokale Gleit- und duktile Bruchprozesse verursachen. [TRO22].</p>	 <p>Abbildung 12: Schematische Darstellung des HELP-Mechanismus, der ein lokal stark begrenztes Zusammenwachsen von Mikrohöhlräumen bewirkt [TRA20, LYN12]</p>

Neue Forschungsergebnisse deuten darauf hin, dass Wasserstoff nicht nur dazu beiträgt, dass die Entwicklung der verformungsinduzierten Mikrostruktur beschleunigt wird, sondern auch die Konfiguration der Versetzungsanordnung beeinflusst. Daher wird vermutet, dass H-induzierte Brüche nicht allein durch das HEDE-Modell erklärt werden können, sondern eher eine Kombination aus dem AIDE, dem HELP- und dem HEDE-Modell herangezogen werden sollte [WAC16, TRO22, BEH24].

Verarbeiter hochfester Stähle verwenden verschiedene mechanische Tests, um die Neigung zur Wasserstoffversprödung von Stählen festzustellen. Zur Bewertung dieser Neigung werden in der Regel interne Wasserstoffversprödung (*internal hydrogen embrittlement*, IHE) und umgebungsbedingten Wasserstoffversprödung (*hydrogen environment embrittlement*, HEE) kombiniert, bei denen entweder vorbeladene Proben oder Proben in wasserstoffreichen Umgebungen getestet werden. Zur Bestimmung des Einflusses von Wasserstoff auf die (bruch-)mechanischen Eigenschaften, werden Laststeigerungsversuche (SEP1970) durch Zug- oder Langsamzugversuche sowie Biegeversuche an vorbeschädigten Proben (z. B. Kerbe, Risse) vorgenommen. Oft gilt die Veränderung der mechanischen Eigenschaften im Zugversuch unter dem Einfluss von Wasserstoff als Maß für die Versprödung. Die vorgelagerte Wasserstoffbeladung (IHE) und die In-situ-Beladung (HEE) können in der Gasphase, elektrochemisch oder durch wasserstoffbildende Korrosionsprozesse erfolgen. [REH14, VEN16]

In der Praxis enthalten einigen Normen wie DIN EN ISO 4042, DIN EN ISO 19598 und DIN 50969-2, Warnhinweise für Stähle mit einer Zugfestigkeit von über 1000 MPa [DIN4-DIN6]. Diese Grenze ist jedoch nicht genau festgelegt und basiert auf Erkenntnissen aus Schadensanalysen und phänomenologischen Untersuchungen. Um die Einflussfaktoren bezüglich der Anfälligkeit von Werkstoffen zu identifizieren und zu bewerten, wurden in vielen wissenschaftlichen Arbeiten zusätzlich mikrostrukturelle Untersuchungen mit Hilfe von Rasterelektronenmikroskopen (REM), H-Analysen zur Bestimmung der Neigung zur Wasserstoffaufnahme und/oder der Anregungsenergien sowie Permeationsversuche durchgeführt [REH14]. Laut aktueller Literatur beziehen sich die meisten Arbeiten zur Werkstoffanfälligkeit auf einen Bereich der Zugfestigkeit von rund 1000 bis 1800 MPa [TRA20]. Eine weithin akzeptierte Regel besagt, dass die Empfindlichkeit von Stählen gegenüber Wasserstoffversprödung mit zunehmender Festigkeit ansteigt [LIE07, MAR07, CHA11, GAR12]. Dieser Grundsatz wird durch die in Abbildung 13 gezeigten Diagramme gestützt. Diese Regel ist jedoch nicht die einzige Entscheidungsgrundlage. Viele Normen, beispielsweise ANSI/NACE MR0175 [ANS15], legen fest, dass die Streckgrenze und die Zugfestigkeit wichtige Kriterien sind, um zu bestimmen, ob ein Material unter potenziell versprödenden Bedingungen verwendet werden kann.

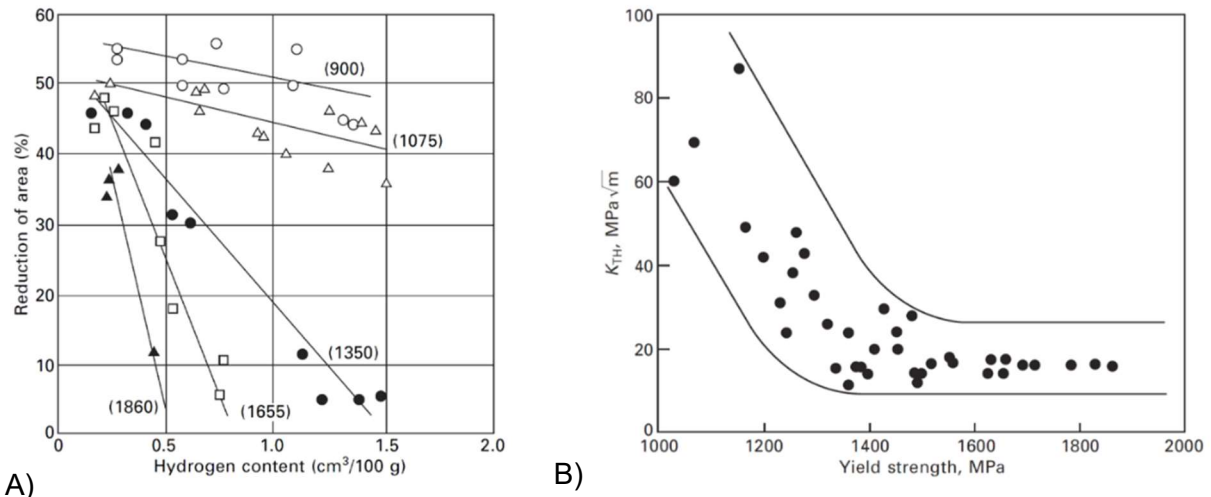


Abbildung 13: A) Einfluss des Wasserstoffgehalts auf die Duktilität von Vergütungsstählen mit verschiedenen Zugfestigkeiten (MPa) [CHA11, TRA20] und B) Zusammenhang des kritischen Spannungsintensitätsfaktors in wasserstoffbeladenem AISI 4340 (35CrNiMo6) von der Streckgrenze [GAR12, TRA20]

2.3 Prüfmethoden zum Nachweis von Rissen

Vorzugsweise sollen Fehler in Bauteilen vor der Inbetriebnahme, spätestens aber während des Betriebs, bevor es zum Schaden kommt, nachgewiesen werden. Die zerstörungsfreie Prüfung (ZfP) soll die Funktion des Werkstückes nicht beeinflussen. Je nach zerstörungsfreiem Prüfverfahren und jeweiliger Nachweisgrenze können Fehler an der Oberfläche und im Inneren der Werkstücke detektiert werden. Zerstörungsfreie Prüfverfahren können in vier Gruppen aufgeteilt werden:

- optische Verfahren,
- magnetische und magnetinduktive Verfahren,
- akustische Verfahren und
- Strahlenverfahren [DIN16].

Von den bekannten Prüfverfahren zur Prüfung der Qualität von Federwerkstoffen und technischen Federn (Tabelle 3) sind die passiven akustischen Verfahren – d. h. nur ein Schallempfänger ohne Schallsender – in der Lage, die dynamischen Änderungen im Material im Moment der Rissentstehung und, nachfolgende Risswachstumsprozesse zu erfassen sowie diese zu orten. Tabelle 4 zeigt Orientierungswerte für erreichbare Nachweisgrenzen dieser Methoden, die auf einer Literaturrecherche beruhen. Insbesondere die Nachweisgrenze kann im industriellen Umfeld deutlich höher ausfallen.

Tabelle 3: Prüfverfahren zur Rissdetektion und zur Prüfung der Qualität von Federwerkstoffen und technischen Federn (Vorteil (+) und Nachteil (-)) [SCH15, DIN7, DIN8, DIN9, STU11, GRU16, ZFP18]

Verfahren/ Prinzip	Automatisierbarkeit	In-Prozess-Überwachung	Darstellung der Ergebnisse	Einfluss der Probengeometrie	Rissgeometrie / -lage / -richtung	Prüfdauer	Vorbereitung der Prüfproben	Aufwand für Auswertung	Kosten für die Ausbildung des Personals	Kosten für Geräte- und Prüfmit-	Kosten für die Durchführung der Prüfung	Entsorgungskosten	Anwendung in Federindustrie
Sichtprüfung optisch [SCH15]	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	ja
Farbeindringverfahren [DIN7]	-	-	-	-	-	+	-	+	+	+	-	-	ja
Magnetpulverprüfung [DIN8]	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	ja
Wirbelstromverfahren [DIN9]	+	-	+	+	-	+	-	+	-	+	-	+	ja
Ultraschall – aktiv, Schallemission (SE) [STU11]	+	+	+	+	-	+	+	+	+	-	+	+	nein
Computertomographie (CT) [GRU16]	-	-	+	-	+	-	+	-	-	-	-	+	nein
akustische Emission (AE) – passiv [ZFP18]	+	+	+	+	-	+	+	-	-	+	+	+	nein

Tabelle 4 Orientierungswerte für Auflösungsgrenzen für die Risserkennung nach verschiedenen Verfahren (Vorteile (+), Nachteile (-); RÖ: Rissöffnung, RF: Rissfläche, RT: Risstiefe) [SCH15, DIN7, DIN8, DIN9, STU11, GRU16, ZFP18]

Verfahren/Prinzip	Detektion von Rissen geöffnet zur Oberfläche	Detektion von Rissen nahe der Oberfläche	Detektion innenliegender Risse	Detektion von Rissentstehung und -wachstum	Auflösung gemäß Literaturangaben, Geräte und labortechnischer Versuche an der HSW
Sichtprüfung optisch [SCH15]	+	-	-	-	> 80 µm (RÖ)
Farbeindringverfahren [DIN7]	+	-	-	-	> 30 µm (RÖ)
Magnetpulverprüfung [DIN8]	+	+	-	-	> 30 µm (RT)
Wirbelstromverfahren [DIN9]	+	+	+	-	> 20 bis 60 µm (RT)
Ultraschall, Schallemission (SE) [STU11]	+	+	+	-	> 0,5 mm ² quer zur Schallrichtung; (RF)
Computertomographie (CT) [GRU16]	+	+	+	-	> 0,4–3 µm (RÖ), > 25 µm (RT)
Akustische Emission (AE) [ZFP18]	+	+	+	+	nicht bekannt

Die einzelnen Methoden unterscheiden sich in der erreichbaren Genauigkeit und der örtlichen Nachweisbarkeit von Rissen. In der ZfP wird zwischen Oberflächenprüfverfahren, wie der Makroskopie und Lichtmikroskopie, und Volumenprüfverfahren, beispielsweise Ultraschall- oder Röntgenverfahren, unterschieden. Anwendung in dieser Arbeit fanden die folgenden Verfahren:

- Makroskopie
- Lichtmikroskopie und metallographischer Schliff
- Rasterelektronenmikroskopie
- AE-Analyse
- Röntgentomographie
- Zug-, Dreipunktbiege- und Schwingversuch

Im Rahmen dieser Arbeit wurden statische Versuche (Zug- und Dreipunktbiegeversuch) zum Hervorrufen von Rissen für die In-situ-Rissdetektion herangezogen. Mithilfe des Schwingver-

suchs wurden die Erkenntnisse auf die zyklische Beanspruchung und damit auf das Risswachstum übertragen. Zur Verifikation des jeweils risstypischen AE-Signals wurden die Proben zunächst zerstörungsfrei mittel Mikro-Computertomographie (μ CT) und dann auch zerstörend mit den Methoden der Metallographie untersucht. Die Rasterelektronenmikroskopie kam zum einen zur Kontrolle der Oberfläche hinsichtlich Rissbildung und zum anderen zur Bestimmung der Ausprägung der Bruchmikrostruktur an gebrochenen Proben oder an Proben, die nach einem Anriss im Labor gezielt aufgebrochen wurden, zum Einsatz. Mithilfe des metallographischen Schliffes können anhand aufwendiger Zielpräparationen Risse im zweidimensionalen Schnitt nachgewiesen werden.

2.4 Akustische Emissionsprüfung

2.4.1 Grundlagen der akustischen Emission

Akustische Emission oder *Schallemission* werden allgemein physikalische Phänomene beschrieben, bei dem sich transiente elastische Wellen durch die schnelle Freisetzung von Energie an lokalen Quellen im Material bilden [MOE10]. Diese Definition schließt auch mechanische Wellen ein, die durch Rissereignisse angeregt werden und als AE betrachtet werden können. In Festkörpern kann sich Schall in Form von Längswellen (Longitudinalwellen, $c_L = 5900$ m/s) und Querwellen (Transversalwellen, $c_T = 3200$ m/s) ausbreiten.

Da es sich bei AE um Körperschall handelt, sind zur Messung prinzipiell zwei Arten geeignet: Elektrische oder optisch gesteuerte Systeme wie Interferometer werden von einer mechanischen Bewegung angeregt. Elektromechanische Wandler nutzen das elektrodynamische, elektrostatische, magnetostriktive oder piezoelektrische Prinzip als Grundlage [LER09].

Piezoelektrische Sensoren sind mittlerweile in nahezu allen Bereichen der Körperschallmessung weit verbreitet. Die Robustheit, einfache Handhabung, kostengünstige Herstellung und der breiten Variation ermöglichen eine optimale Auswahl für spezifische Anwendungsfälle. Diese Sensoren werden in der Regel aufgeschraubt oder mithilfe von aushärtbaren oder körperschallübertragenden Knetmischungen fixiert. Die Sensoren decken einen breiten Frequenzbereich von wenigen Hertz bis hin zu mehreren Megahertz ab. Die mechanische Bauweise und die gemessenen physikalischen Größen (Schwinggeschwindigkeit und -beschleunigung) variieren je nach Einsatzgebiet. Durch die akustischen Wellen im Prüfobjekt entsteht ein Wechseldruck, der im sensitiven Piezoelement des AE-Sensors ein frequenzabhängiges elektrisches Spannungssignal (Amplitude) erzeugt, dessen Signalcharakteristik durch weitere Verstärker und Messtechnik ausgewertet werden kann [SAU16]. Abbildung 14 stellt zweidimensional den Amplituden-Zeit-Verlauf des Rohsignals mit den charakteristischen Parametern dar.

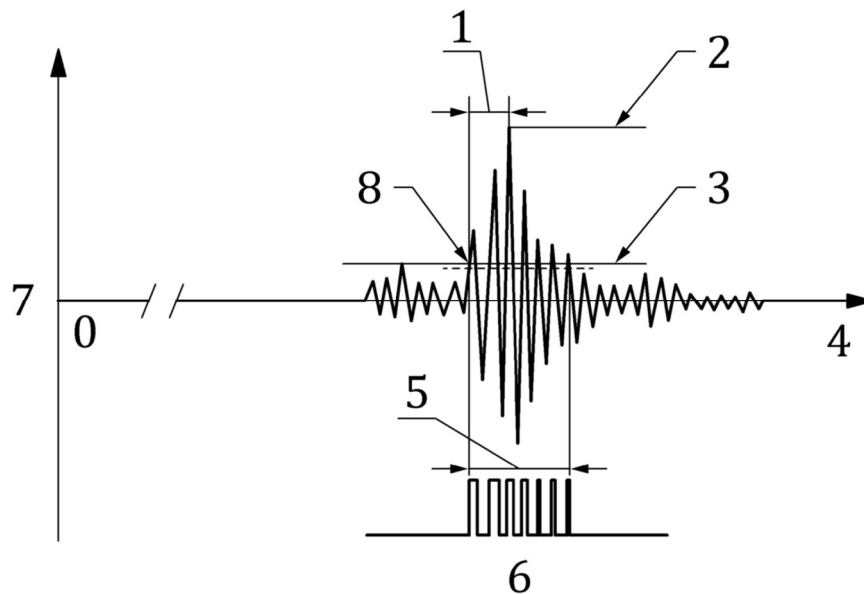


Abbildung 14: Parameter zur Beschreibung eines transienten akustischen Emissionssignals laut DIN EN 1330-9 mit Anstiegszeit (1), Maximalamplitude (2), Nachweisschwelle (3), Signaldauer (5), Anzahl der Überschwingungen (6), Spannung (7) und Zeitpunkt des Überschreitens der Nachweisschwelle (8) [DIN12]

Die folgenden Parameter werden, für die direkte Auswertung der AE-Signale verwendet:

- Signalanzahl oder Signalrate pro Zeiteinheit: Anzahl der Überschwinger innerhalb des Signals, bei denen die Schwelle überschritten wird (engl. *counts*)
- Amplitude: maximale elektrische Spannung der Signalform (engl. *amplitude*)
- Signaldauer: Zeitintervall zwischen der ersten Zählung und dem letzten Abstieg der Schwellenüberschreitung
- Anstiegszeit: Zeitintervall zwischen dem Auslösezeitpunkt des AE-Signals und dem Zeitpunkt der Spitzenamplitude
- Energie: Die Definitionen von Energien sind je nach AE-System unterschiedlich, aber im Allgemeinen wird die Energie als gemessene Fläche unter der Signalhüllkurve (absolute Energie der gleichgerichteten Amplitude) betrachtet. Unter derselben Definition findet sich auch der Begriff *Signalstärke*. Bei der normierten Energie, dem Energieäquivalent, wird nach der Fast Fourier-Transformation (FFT) die Energie auf die Maximalamplitude für die Analyse normiert (vgl. Kapitel 2.4.4).
- durchschnittliche Frequenz: wird im Zeitbereich als Verhältnis aus Anzahl der Ereignisse (*counts*) über die Dauer der Wellenform in kHz definiert.

Durch moderne Computertechnologie können AE-Wellenformen sowie parametrischen Merkmale in nahezu Echtzeit durch wellenformbasierte Merkmale wie die Spitzenfrequenz (PF) und den Frequenzschwerpunkt (CF) anhand der FFT analysiert werden.

Bei der indirekten Auswertung der AE-Signale werden Wellenformparameter (Energie oder Amplitude) und/oder Wellenform, die sich auf Länge oder Muster der Wellenform (Anstiegszeit oder Dauer) bezieht, ausgewertet [COO69]. Bei digitalen AE-Messsystemen sind die Parameter die Abtastrate, die Zeitspanne zwischen zwei aufeinanderfolgenden Messpunkten und der Auflösungsbereich (d. h. die Angabe, wie viele verschiedene elektrische Spannungswerte zwischen dem Minimum und dem Maximum gemessen werden können) für die Analyse hochdynamischer Prozesse entscheidend. Im Rahmen dieser Arbeit wurde das akustische Messsystem *Optimizer 4D* des Unternehmens QASS verwendet, das basierend auf der Hoch-Frequenz-Impuls-Messung (HFIM) und der FFT eine neuartige Auswertmethode für AE darstellt. Neben der direkten Auswertung der AE-Signale können mittels FFT Umgebungs- und Störgeräusche herausgefiltert werden, wodurch spezifische Informationen über den Verlauf von Frequenz, Zeit und Amplitude vorliegen (3D-Darstellung; Abbildung 15). In der internen Bibliothek der Software können erkannte Muster verwendet werden, beispielsweise zur automatisierten Risserkennung während der Prozessüberwachung [BAR16].

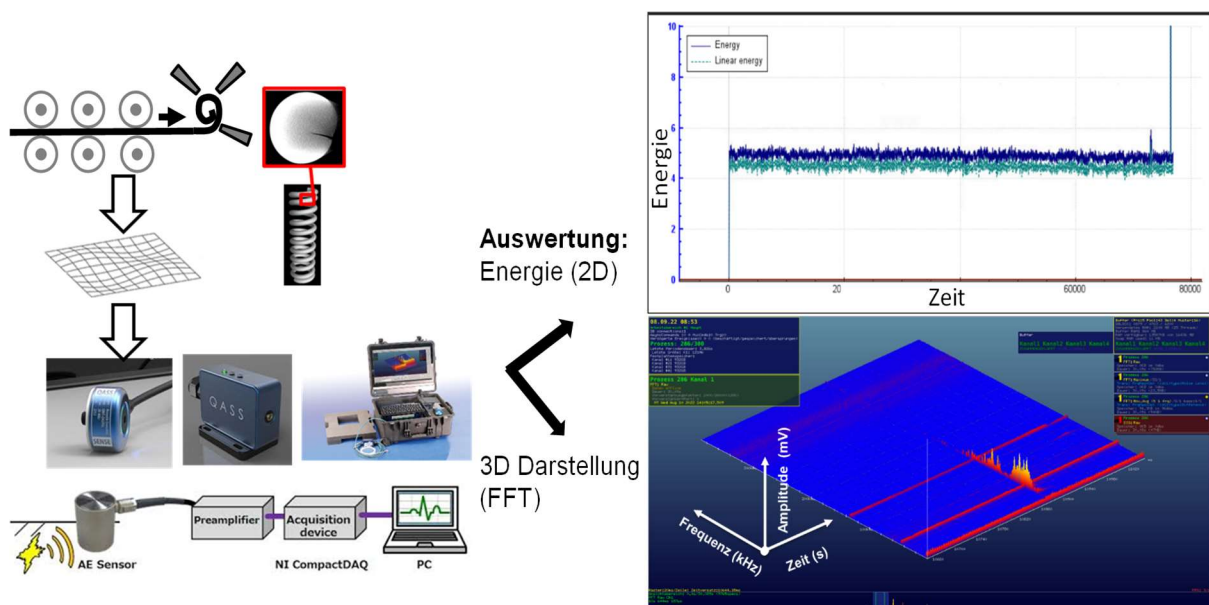


Abbildung 15: Funktionsweise der Akustischen-Emissions-Technik sowie systemspezifische Auswertung [QAS17, LOR22]

In den letzten zwanzig Jahren wurden viele Ansätze veröffentlicht, in denen die geführte Wellenanalyse und Mustererkennungstechniken angewendet werden, um AE-Quellen zu identifizieren. Dabei wird zwischen der Signalklassifizierung und der Quellenidentifizierung unterschieden [AGG21]. Bei der Signalklassifizierung wird die Clusterbildung verwendet, bei dem häufig durch die Datenanalyse mehrerer Daten, die basierend auf Ähnlichkeiten der Signale für die Analyse gruppiert werden. Die für das Clustering von AE-Signalen genutzten Methoden

reichen von der Analyse diskreter Merkmalswerte bis hin zur automatisierten Mustererkennung. Nach der Bildung von Clustern von AE-Signalen werden bei der Quellenidentifizierung bestimmte Cluster einem spezifischen Quellentyp zugeordnet [AGG21].

Konträr zu Gasen und Flüssigkeiten setzen feste Körper nicht nur einer Volumenänderung, sondern auch einer Formänderung elastischen Widerstand entgegen [LER09]. Für die Beschreibung elastischer Eigenschaften sind deshalb mindestens zwei Konstanten notwendig. Häufig genutzt werden das Elastizitätsmodul (E-Modul) E und Schubmodul G . Für eine vollständige Charakterisierung ist weiterhin die Dichte erforderlich. Aufgrund der komplexen Zusammenhänge ist die Beschreibung eines Schallfeldes in festen Körpern nur durch eine Vektorfunktion möglich. Die Wellengleichung für Festkörper wird über das Hookesche Gesetz für den dreidimensionalen Spannungsfall hergeleitet. Bei der Herleitung wird eine 1D-Wellengleichung für jede Richtung (x, y, z) aufgestellt. Zur Bestimmung der allgemeinen Wellengleichung für den dreiachsigen Spannungsfall werden die drei 1D-Wellengleichungen zusammengefasst. Die allgemeine 3D-Wellengleichung für einen isotropen Festkörper wird durch die folgende Gleichung (Gl. 2.4.1) beschrieben. Dafür werden die Lamé-Konstanten μ und λ zur Hilfe genommen. In diesem Fall bezeichnet μ das Schubmodul G und λ die Ausdehnung senkrecht zur Kraft. Die mechanische Verschiebung wird durch \vec{d} beschrieben. [LER09]

$$(2\mu + \lambda)\Delta\vec{d} + (\mu + \lambda)\operatorname{rot}\vec{d} = \varrho\frac{\partial^2\vec{d}}{\partial t^2} \quad (\text{Gl. 2.4.1})$$

Dabei ist ϱ als Schalldichte und t für die Zeit

Nach den Regeln der Vektoranalysis lässt sich die Gleichung 2.4.1 in einen wirbel- und einen quellenfreien Anteil zerlegen. Ein Feld, dessen Rotation verschwindet, ist wirbelfrei, eines, dessen Divergenz verschwindet, quellenfrei. Der wirbelfreie Anteil beschreibt dabei Longitudinalwellen, der quellenfreie Anteil Transversalwellen. Unter Annahme eines allseitig unbegrenzten Festkörpers können sich in diesem Fall reine Transversal- oder Longitudinalwellen ausbreiten. Sobald der Körper von mindestens einer Seite begrenzt wird, kommt es aufgrund der Reflexion zur Überlagerung beider Wellentypen [LER09]. Durch das Enthalten einer Oberfläche und das Überlagern beider Wellentypen entstehen oberflächennahe Rayleigh-Wellen. Rayleigh-Wellen sind Oberflächenwellen, die mit dem Abstand zur Oberfläche abnehmen. [LER09]

In Abbildung 16 ist schematisch die Ausbreitungsrichtung der Longitudinal- und Transversalwelle an einer wachsenden Risspitze dargestellt.

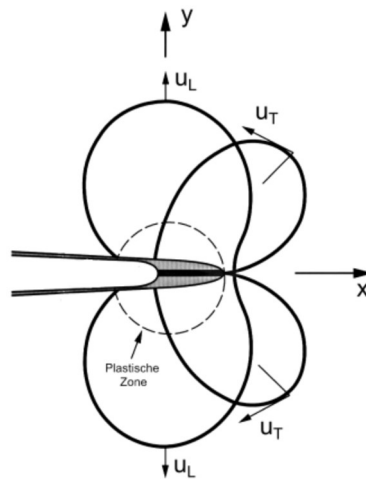


Abbildung 16: Richtungswinkel der longitudinalen (u_L) und transversalen (u_T) Wellenausbreitung an einem Mikroriss [WAC16]

Schraubenfedern beispielsweise werden in den meisten Fällen aus Runddrähten hergestellt. Kräfte werden hierbei quer in Achsrichtung aufgebracht. Im Betrieb werden im Federdraht Torsionsspannungen erzeugt. Aufgrund dieser Torsionsspannung entstehen hauptsächlich Torsionswellen (Transversalwellen). Die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Torsionswellen wird mit der Gleichung 2.4.2 beschrieben, bestehend aus der Wurzel des Quotienten aus Schubmodul G und Dichte ρ [MOE10]. Dieser Zusammenhang gilt nur für rotationssymmetrische Querschnitte.

$$c_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (\text{Gl. 2.4.2})$$

Dabei ist c_T die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Transversalwelle und ρ die Dichte.

Die bisher beschriebenen Zusammenhänge von Wellen und deren Ausbreitung basieren auf Modellen. Tatsächlich ist aus Experimenten bekannt, dass Schwingungen zeitlich und räumlich ‚abklingen‘, also gedämpft werden. Ursachen liegen in der Streuung der Wellen an Grenzflächen, z. B. Korngrenzen sowie der Absorption, die in thermische Energie umgewandelt wird [MOE10, DUG12].

Die Dämpfung von Schallwellen in Metallen hängt von verschiedenen Faktoren ab. Die Dichte ρ , der Elastizitätsmodul E , die Poissonzahl ν und die Schallgeschwindigkeit c sind unabhängig von der Vorgeschichte, der Dauer der Beanspruchung und der Frequenz f . Der größte Dämpfungsfaktor in zusammengesetzten Strukturen, wie Maschinen, ist der Übergang zwischen Verbindungsstellen. Deshalb sind Dämpfungsfaktoren, die von der Mikrostruktur abhängig sind in solchen Fällen meist unbedeutend [MOE10].

Bei einer Verschraubung von Blechen ist mit einem Verlustfaktor η von etwa 2×10^{-2} zu rechnen. Der Verlustfaktor wird durch Gleichung 2.4.3 beschrieben. Dabei entspricht Δf der Halbwertsbreite und f_0 der Resonanzfrequenz. [MOE10]

$$\eta = \frac{\Delta f}{f_0} \quad (\text{Gl. 2.4.3})$$

Fourier-Transformation

Die Fourier-Transformation ist ein Teilbereich der Fourier-Analyse. In den meisten modernen Techniken, die sich mit der Verarbeitung und Übertragung von Signalen beschäftigen, wird die Fourier-Transformation verwendet. Beispiele hierfür sind die Mobilfunktechnik, das mobile Internet über den Standard Long Term Evolution (LTE) sowie die Digitalisierung und Komprimierung von Sprache und Video in Formaten wie Moving Picture Experts Group (MPEG). Die Fourier-Transformation nimmt als Grundlage die Fourier-Reihe, eine Erweiterung einer periodischen Funktion. Diese besteht aus einer Überlagerung von Sinus- und Cosinus-Funktionen. Durch die FFT findet eine simultane Transformation der Amplituden- und der Zeitdomäne über die Frequenzdomäne statt. Durch die Umwandlung wird die Berechnung signifikant beschleunigt und eine schnelle Verarbeitung großer Datenmengen ermöglicht. [MUE13, NEU12, LAN19, ULR22]

Die allgemeine Form der Fourier-Reihe mit Sinus und Cosinus ist beschrieben durch Gleichung 2.4.4. Die Gleichungen 2.4.5 bis 2.4.7 beschreiben die Berechnung der Fourier-Koeffizienten, wobei $n = 1, 2, 3 \dots$ ist. [ULR22]

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(nx) + b_n \sin(nx) \quad (\text{Gl. 2.4.4})$$

mit:

a_0 – Fourier-Koeffizient

a_n – Fourier-Koeffizient

b_n – Fourier-Koeffizient

$$a_0 = \frac{1}{\pi} \int f(x) dx \quad (\text{Gl. 2.4.5})$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int f(x) \cos(nx) dx \quad (\text{Gl. 2.4.6})$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int f(x) \sin(nx) dx \quad (\text{Gl. 2.4.7})$$

Beispielhaft wird die Fourier-Reihe in Abbildung 17 dargestellt. Alle Abbildungen sind zur Vereinfachung auf die Periode bis zwei π beschränkt.

$$r(x) = \begin{cases} 0 & \text{für } -\pi < x < 0, \\ 1 & \text{für } 0 < x < \pi. \end{cases}$$

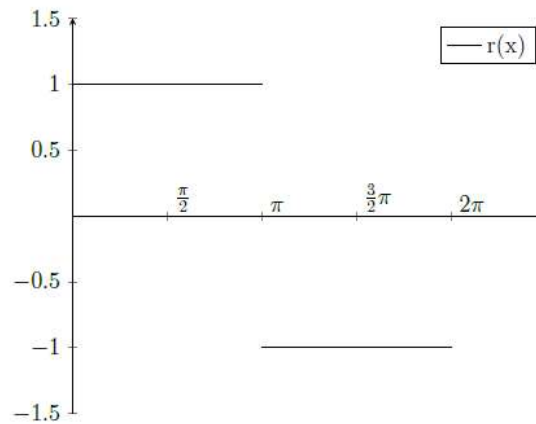


Abbildung 17: Rechteckfunktion in der Fourier Reihe [ULR22]

Diese Rechteckfunktion ist eine ungerade Funktion. Dadurch ergibt sich $a_0 = a_n = 0$. Die allgemeine Gleichung für die Fourier-Reihe reduziert sich dadurch auf die Gleichung 2.4.8. Abbildung 18 zeigt eine Sinus-Funktion zusammen mit der Rechteckfunktion. Die Sinus-Funktion ergibt sich aus der reduzierten Fourier-Gleichung (Gl. 2.4.9). In der Abbildung ist zu erkennen, dass die Sinus-Funktion sich nur schlecht der Rechteckfunktion nähert [ULR22].

$$f(x) = \frac{4}{\pi} + \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \frac{\sin(nx)}{n} \quad (\text{Gl. 2.4.8})$$

$$f(x) = \frac{4}{\pi} + \sum_{n=1}^1 \frac{\sin(nx)}{n} \quad (\text{Gl. 2.4.9})$$

Um die Annäherung der Sinus-Funktion zu verbessern, wird die Fourier-Reihe genutzt.

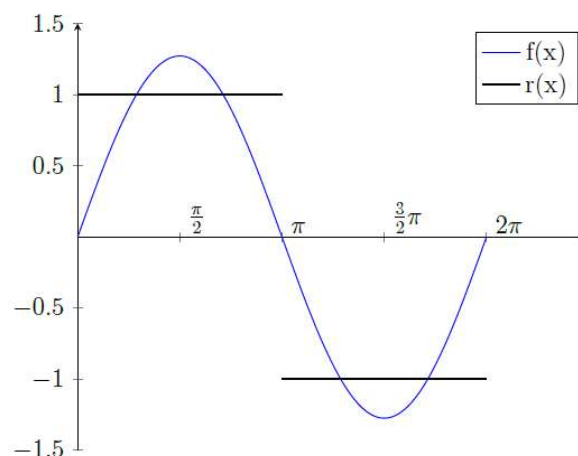


Abbildung 18: Rechteckfunktion mit Sinus-Funktion [ULR22]

Dabei wird n erhöht, wodurch weitere Sinus-Funktionen zu der bestehenden addiert werden. Für die Gleichung 2.4.10 wird n auf fünf erhöht (Abbildung 19). Zur Verdeutlichung wird die

Fourier-Reihe in der Gleichung 2.4.11 auf $n = 19$ erhöht. Abbildung 19 zeigt eine besser werdende Annäherung an die Rechteckfunktion. Die Genauigkeit der Annäherung kann über n auf einen beliebigen Wert angepasst werden. An den Unstetigkeiten ist ein Überschwingen zu erkennen. Dieses Überschwingen nennt sich *Gibbs'sches Phänomen* und lässt sich bei einer endlichen Menge von n nicht vermeiden, sondern nur reduzieren. Bei einer unendlichen Menge läuft die Funktion an diesen Stellen gegen den Wert 0. [ULR22]

$$f(x) = \frac{4}{\pi} + \sum_{n=1,3,5}^5 \frac{\sin(nx)}{n} \quad (\text{Gl. 2.4.10})$$

$$f(x) = \frac{4}{\pi} + \sum_{n=1,3,5}^{19} \frac{\sin(nx)}{n} \quad (\text{Gl. 2.4.11})$$

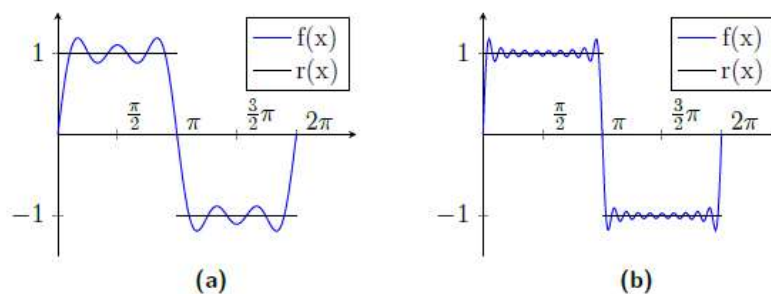


Abbildung 19: Rechteck mit Fourier-Reihe (a) $n = 5$ und (b) $n = 19$ [ULR22]

2.6.1 Diskrete und Fast Fourier-Transformation

Für die Anwendungsfälle, in denen eine Fourier-Transformation mittels moderner Rechentechnik berechnet wird, wurden die Diskrete Fourier-Transformation (DFT) und die Fast Fourier-Transformation entwickelt. Die DFT stammt aus einem Teilbereich der Fourier-Analyse. Es wird ein zeitdiskretes endliches Signal im Bildbereich dargestellt. Die DFT wird in der Signalverarbeitung z.B. für die Bestimmung der Hauptfrequenzen eines zeitdiskreten Signals verwendet. Weiterhin lassen sich die Amplituden und die dazugehörigen Phasenlagen der Frequenzen ermitteln oder digitale Filter implementieren. Die FFT nutzt schnelle Algorithmen und ist ein Werkzeug der DFT, mit der Signale schnell zerlegt werden. Algorithmen der DFT sind rechen aufwändig, weshalb effizientere Verfahren, wie die FFT, entwickelt wurden. [ULR22]

2.6.2 Beispiel für einen Berechnungsalgorithmus

Im folgenden Beispiel wird gezeigt, welche Algorithmen die FFT nutzt, um die Berechnung von Ergebnissen zu beschleunigen. Werden nach der Schulmethode zwei n -stellige Zahlen x und y miteinander multipliziert, so wird jede Ziffer der Zahl x mit jeder Ziffer der Zahl y multipliziert. Dadurch ergibt sich ein exponentiell ansteigender Rechenaufwand von n^2 . Dass diese Methode weit verbreitet ist, erweckt den Anschein, dass sie die schnellste ist und nicht verbessert werden kann. Die Komplexität lässt sich durch $O(n^2)$ beschreiben.

Es existieren aber Multiplikationsalgorithmen die schneller arbeiten als die herkömmliche Methode. [FOR15]

Bei einer Multiplikation ganzer Zahlen ($x, y > 0$) kann die Berechnung mit einer Basis b durch die im Folgenden genannten Gleichungen ausgedrückt werden. Die Gleichungen 2.4.12 und 2.4.13 stellen die Faktoren bezüglich der gewählten Basis dar. [FOR15]

$$x = \sum_{n=0}^{N-1} x_n b^n \quad (\text{Gl. 2.4.12})$$

$$y = \sum_{m=0}^{M-1} x_m b^m \quad (\text{Gl. 2.4.13})$$

Für die Zahlen x_n und y_m gilt $0 \leq x_n$ und $y_m < b$. Das Produkt $z = xy$ ergibt sich aus den Gleichungen 2.4.14 und 2.4.15. [FOR15]

$$z = xy = \sum_{n,m} x_n y_m b^{n+m} = \sum_k z_k b^k \quad (\text{Gl. 2.4.14})$$

mit

$$z_k = \sum_{n+m=k} x_n y_m \quad (\text{Gl. 2.4.15})$$

Nach diesen Gleichungen müssen N mal M Produkte von $x_n y_m$ berechnet werden. Diese Aufarbeitung einer Multiplikation soll verdeutlichen, dass mit der herkömmlichen Methode eine Komplexität von $O(n^2)$ erreicht wird. Im Folgenden wird eine Methode dargestellt, die auf einer Basis b beruht und schneller ist als die herkömmliche. [FOR15]

Dieses Verfahren stammt von Karatsuba und Ofman und heißt *Karatsuba-Algorithmus*. Dabei sind zwei n -stellige Zahlen x und y der Basis b miteinander zu multiplizieren, die zu

$$x = x_1 b^n + x_0 \quad (\text{Gl. 2.4.16})$$

und

$$y = y_1 b^n + y_0 \quad (\text{Gl. 2.4.17})$$

Zerlegt werden können [FOR15].

Die Berechnung von xy erfolgt mit Gleichung 2.4.17 [FOR15].

$$xy = x_1 y_1 b^{2n} + (x_1 y_0 + x_0 y_1) b^n + x_0 y_0 \quad (\text{Gl. 2.4.18})$$

Nach der Gleichung 2.4.18 werden vier Multiplikationen benötigt, um das Ergebnis zu berechnen. Es ist aber möglich, schon mit drei Multiplikationen zum Ergebnis zu kommen. Dafür werden $x_1 y_1$, $x_0 y_0$ und $u := (x_1 + x_0) \times (y_1 + y_0)$ berechnet. Dadurch ergibt sich die folgende Gleichung.

$$x_1 y_0 + x_0 y_1 = u - x_1 y_1 + x_0 y_0 \quad (\text{Gl. 2.4.19})$$

Die Berechnung wurde auf drei Multiplikationen reduziert. Damit ergibt sich durch diese Methode eine Komplexität von $O(N^{1.585})$ [MUE13, FOR15]. Hiermit konnte gezeigt werden, dass

es möglich ist, große Zahlen schneller zu multiplizieren als mit der herkömmlichen Schulrechenweise. Es gibt noch schnellere Verfahren, die Methoden aus der Analysis nutzen. Andere Algorithmen, die für die FFT genutzt werden sind z.B. der Sande-Tukey-Algorithmus und der Algorithmus von Cooley und Tukey. [FOR15]

2.4.2 Quellen für akustische Emissionen

Quellen für AE bei Metallen können neben Rissbildung sowie -wachstum und Bruch auch einige physikalische Phänomene sein, beispielsweise die Bewegung von Versetzungen oder die Hohlrumbildung z. B. um Einschlüsse, die in bestimmten Fällen gleichzeitig in einer beanspruchten Struktur auftreten können. Sobald diese Ereignisse einen ausreichend hohen Energiegehalt aufweisen, um im umgebenden Material eine elastische Welle auszulösen, die sich bis zur Oberfläche fortsetzt, können diese laut DIN EN 1330-9 Quellen angesehen werden [DIN12, WAC16].

Beim Risswachstum entstehen im Material verschiedene Mechanismen, die Schallemissionen erzeugen. Diese lassen sich in sogenannte primäre AE-Ereignisse einteilen, die direkt mit dem Risswachstum verbunden sind, und sekundäre AE-Ereignisse, die hauptsächlich durch Reibeffekte entstehen (Tabelle 5).

Tabelle 5: Auflistung der Mechanismen bei der Rissentstehung mit der Intensität und der Quellenart des AE-Signals [SCR85, RAU04, WAC16]

Mechanismus	Intensität des AE-Signals	Quellenart
plastische Deformation	gering	primär
Brechen und Ablösen spröder Einschlüsse (Hohlrumbildung)	stark	primär
plastische Verformung am Ende eines Bindefehlers bzw. an der Rissspitze	gering	primär
Rissinitierung und stabiles Risswachstum	gering	primär
instabile Rissausbreitung	stark	primär
Reibung an den Rissflanken bzw. Verkeilen der Rissflanken oder der Einschlüsse	stark	sekundär
Brechen und Ablösen von Korrosionsschichten und anderen betriebsbedingten spröden Oberflächenschichten	stark	sekundär

In einer frühen Studie von Scruby et al. [SCR85] wurde bereits nachgewiesen, dass nicht nur die bloße Energie des Quellereignisses, sondern auch die Energiefreisetzungsraten, die beispielsweise durch die Risswachstumsrate ausgedrückt werden können, für die Amplitude des AE-Signals verantwortlich sind.

Daraus wurde geschlossen, dass spröde Bruchvorgänge im Vergleich zu einem duktilen Rissfortschritt leicht über die akustische Schallemission zu detektieren sind (Abbildung 20).

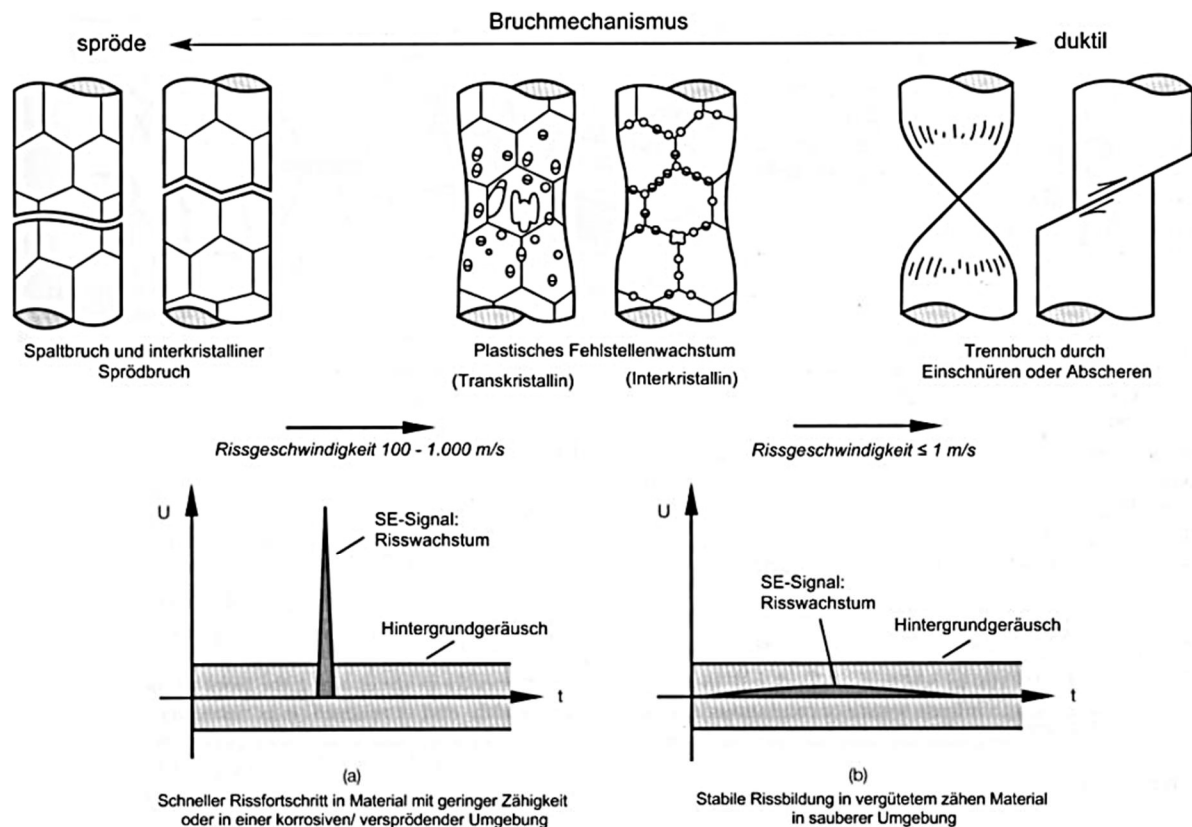


Abbildung 20: Gegensätzliche Bruchverhaltensweisen schematisch dargestellt: a) Ein sehr schneller Rissfortschritt in einem spröden Material mit geringer Zähigkeit oder Ermüdungsrisswachstum in einer korrosiven Umgebung und b) die langsame, duktile Rissbildung eines zähen Materials in einer reinen Umgebung [WAC16,ROG01]

Eine frühe und umfassende Untersuchung von Dunegan et al. [DUN68] konzentriert sich auf die Beziehung zwischen akustischen Schallemissionsparametern und dem Spannungsintensitätsfaktoren im Rissöffnungsmodus I sowie der plastischen Zone. Das entwickelte Modell dieser Studie bietet die Möglichkeit, Risse zu charakterisieren, bei denen sowohl sprödes als auch duktiler Risswachstum auftreten. Grundlegend beruht das Modell auf der Annahme, dass in einer rissbehafteten Probe die plastische Verformung des Materials vor der Risspitze akustische Schallemissionen auslöst. Es wird auch angenommen, dass die Mikromechanik, die das Risswachstum hervorruft, ebenfalls zu Schallemissionen im Material führt [BAS87]. Daraus folgt, dass ein Zusammenhang zwischen den Parametern und den Ereignissen besteht, die AE verursachen.

In einer Studie von Rogers [ROG01] wurden bei Schwingfestigkeitsversuchen am Stahlwerkstoff 1.0570 AE-Analysen durchgeführt, bei denen die Amplitudenverteilungen kategorisiert wurden. Bei der Parameterbetrachtung wurden Amplituden in Dezibel (AE) angegeben [DIN12]. Dabei wurde die Spannung U des Schallemissionssignals in der dB_{AE} -Skala auf den Vorverstärkereingang bezogen, um ein Vergleichsmaß zu erhalten (Gl. 2.4.20).

$$dB_{\text{AE}} = 20 \log \left(\frac{U}{U_R} \right) \quad (\text{Gl. 2.4.20})$$

Dabei gilt für die Referenzspannung $U_R = 1 \mu\text{V}$.

Kleine Amplituden im Bereich von 26 bis 40 dB wurden mit Vorgängen der plastischen Verformung assoziiert, die eine niedrige Energiedichte aufweisen oder durch Hintergrundgeräusche verursacht werden. Amplituden im Bereich von 40 bis 70 dB hingegen wurden mit mikroskopischen Bruchereignissen in der plastischen Zone in Verbindung gebracht. Amplituden um 90 dB wurden mit Ereignissen assoziiert, die bei hohen zyklischen Spannungsintensitätsfaktoren auftreten und aus Risswachstumsprozessen resultieren. [WAC16]

2.4.3 Stand der Forschung zur akustischen Emissionsprüfung

Die Einordnung aufgezeichneter AE-Signale in Musterkategorien stellt eine der neuesten Fortschritte in der Schallemissionsanalysetechnik dar und ist eng mit den Möglichkeiten verbunden, die moderne Computersysteme bieten. Frühe Anwendungen dieser Technik fanden ihren Ursprung im Bereich der Faserverbundwerkstoffe, wo festgestellt wurde, dass unterschiedliche Schädigungsmechanismen wie Matrixrisse, Versagen an den Faser-Matrix-Grenzflächen und Faserbruch anhand von Frequenzparametern der akustischen Emissionssignale unterschieden werden können [RAM04]. In nachfolgenden Arbeiten von Sause und Horn wurde die Mustererkennung der verschiedenen Signale weiter vorangetrieben. Hierbei wurde eine Klassifizierung mithilfe weitgehend automatisierter Clustering-Algorithmen durchgeführt und die Zuverlässigkeit dieser Klassifizierung quantifiziert [SAU13, SAU16]. Im Laufe der Zeit wurden die Signalverarbeitungsmethoden weiter verbessert und immer raffiniertere Verfahren zur Signalerkennung entwickelt, um das Stadium der Rissausbreitung zu identifizieren. Im Laufe der Zeit wurden die Signalverarbeitungsmethoden weiterentwickelt und immer differenziertere Verfahren zur Signalerkennung wurden zur Identifizierung des Stadiums der Rissausbreitung entwickelt [SAU18, KIR20].

In einer Studie von Shiwa et al. und Seleznev et al. wurde die Eignung der neuesten AE-Messtechnik und Signalverarbeitung für die Analyse der Riss-Wachstums-Stadien im

Schwingversuch anhand korrelierender fraktographischer Rissverlaufsuntersuchungen nachgewiesen. Dabei wurde festgestellt, dass eine plötzliche Rissöffnung mit einem diskreten AE-Signal auftritt. Es ist also möglich, die transiente AE vom Risswachstum zu detektieren und auf verschiedene Weise unter Verwendung ihrer Amplituden, Anstiegszeit und Frequenz zu charakterisieren [SHI10, SEL21].

Der Thematik der Integration von AE-Prüfungen in die In-Prozess-Risserkennung sind einige laufende oder vor kurzem abgeschlossene Forschungsvorhaben gewidmet [BEH13, BEH15, WOL15, KUS20]. So wurde im IGF-Projekt 16821 [BEH13] z. B. ein kostengünstiges Online-Risserkennungssystem entwickelt, das verschiedene Fehler und Schädigungsarten bei Kaltumformvorgängen von Stahlbauteilen mittels der AE-Analyse erfasst. Diese Methode zur Detektion von Chevron-Rissen wurde an fließgepressten Bauteilen im industriellen Umfeld validiert und verifiziert. Das Projekt hat die Möglichkeit der Risserkennung während der Kaltumformung von Stahlwerkstoffen generell bestätigt.

Im einem Bericht von der *Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung* [BEH15] sind die Untersuchungsergebnisse zur zerstörungsfreien Rissdetektion bei kragengezogenen Blechbauteilen mittels verschiedener Prüfverfahren (Mikromagnetik, Schallemissionsanalyse, Wirbelstrom, elektromagnetisch erzeugter Ultraschall, Induktions-Thermographie) in Pre-, In- und Post-Prozess-Phasen des Kragenziehens an Stahlblechen zusammengefasst und bezüglich der Relevanz für die Prozessüberwachung miteinander verglichen. Die AE-Messergebnisse der in-process Prüfung beim Lochaufweitungsversuch haben gezeigt, dass die Schallemissionsakustik mit Körperschallsensoren grundsätzlich zur exakten Bestimmung des Zeitpunktes der Rissbildung eingesetzt werden kann und die Nachweisbarkeit des Risssignals von der Zugfestigkeit (Härte) des Werkstoffes abhängig ist (Abbildung 21).

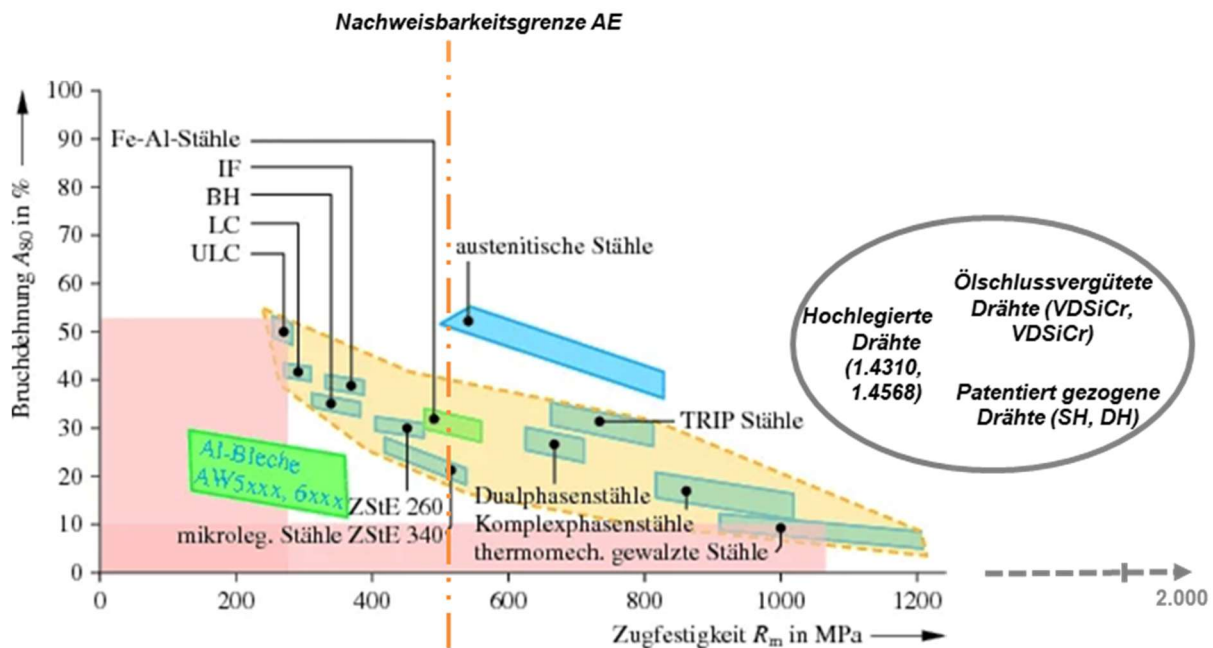


Abbildung 21: Nachweisbarkeit eines Rissignals beim Lochaufweitungsversuch mit akustischer Emission in Abhängigkeit vom Werkstoff [BEH15], mit dem gekennzeichneten Bereich, der in dieser Arbeit vorgesehenen Werkstoffe [DEG14]

Bisher konzentrierten sich viele Studien im Bereich der AE-Prüfung hauptsächlich auf die Untersuchung an Probekörpern. Eine weitere Fragestellung betrifft also die Anwendbarkeit bekannter Ergebnisse auf reale Bauteile. Auf Basis der Literaturrecherche kann zusammenfassend festgestellt werden, dass bisher in der Federnindustrie keine zerstörungsfreie In-Prozess-Überwachung der einzelnen Fertigungsschritte hinsichtlich Rissbildung und -wachstum sowie Schädigungsmechanismus durchgeführt wird. Generell ist das AE-Verfahren für die Detektion der Rissentstehung in Werkstoffen während der Umformung des Drahts zur Feder geeignet. Die Literaturrecherche hat aufgezeigt, dass der Einsatz akustischer Prüfverfahren zur Qualitätskontrolle bzw. zur Rissüberwachung bei Korrosions- und Ermüdungsbeanspruchungen sowie bei der Blechverarbeitung sich als geeignet und effektiv erwiesen hat. Damit scheint die Anwendung des AE-Verfahrens auch für die Federnfertigung vielversprechend zu sein.

Für die Überführung der AE in die industrielle Anwendung zur Rissdetektion beim Federnwinden höchstfester Stähle sollten in dieser Arbeit die Einflussfaktoren bezüglich des AE-Signals, die durch das Material und/oder den Prozess bestimmt werden, für die zu entwickelnde Messstrategie identifiziert werden, sodass eine automatisierte In-situ-Rissdetektion ermöglicht wird.

2.4.4 Messsystem Optimizer4D

Der *Optimizer4D* ist ein Messsystem der Firma QASS GmbH, das für die Risserkennung an Stahlwellen beim Biegerichten entwickelt wurde. Das Messsystem ermöglicht das Monitoren

verschiedener Produktionsprozesse. So können beispielhaft Fertigungsprozesse an Maschinen und Werkzeugen überwacht und optimiert werden, um die Standzeiten zu erhöhen oder Produktionsfehler zu erkennen [BAR16].

Aufbau

Das Messgerät befindet sich in einem geschlossenen Koffer und ist mobil einsetzbar. Es verfügt über Datenein- und -ausgänge (In/Out-Ports), die für die Machine-to-Machine (M2M)-Kommunikation verwendet werden können. Die Messkette besteht aus einem Sensor, der über ein Sensorkabel mit dem Vorverstärker verbunden ist. Dieser wiederum ist durch ein Vorverstärkerkabel mit dem Messgerät verbunden. Abbildung 22 zeigt das Messsystem mit Vorverstärker (a und b) und eine schematische Schnittdarstellung eines Akustiksensors (c). Der verwendete Sensor ist für die HFIM geeignet und besteht aus piezo-keramischen Elementen. [QAS17, BAR14]

Buffer und Signalaufbereitung

Die HFIM ist ein spezielles Verfahren in der Körperschallmessung. Die gemessenen Amplituden werden, mit dazugehörigen Zeiten, aufgenommen und direkt durch die DFT und FFT umgewandelt (Kapitel 2.4.1). So können die Signale in nahezu Echtzeit in ihrer Frequenzverteilung dargestellt werden. [BAR14]

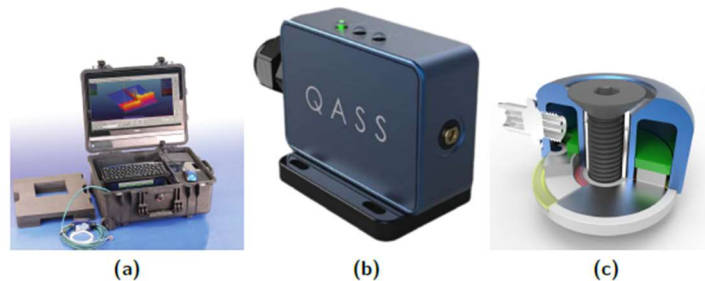


Abbildung 22: a) Messgerät, b) Vorverstärker und c) Akustiksensoren (schematische Schnittdarstellung) [QAS22]

Abbildung 23 zeigt eine beispielhafte Prozesslandschaft. Die Messdaten werden in drei Achsen aufgeteilt: Zeit t , Amplitude A und Frequenz f . Die Sensoren bieten eine Abtastfrequenz von bis zu 50 kHz. Mit der FFT beträgt die Verarbeitungszeit für ein Spektrum 41 μ s. Die Prozesslandschaft besteht aus einer Aneinanderreihung von Spektren über die Zeitachse, wobei jedes Spektrum 512 Einzelwerte (Amplitude über Frequenz) umfasst [QAS17].

Die FFT erzeugt zusammen mit der Echtzeitmessung große Datenmengen, die zur besseren Verarbeitung mit Buffer-Methoden gespeichert werden müssen. Buffer komprimieren die Rohsignale nach festgelegten Kriterien. Die Daten werden in verschiedenen Formaten aufbereitet, beispielsweise nach der Standardverteilung oder einem gleitenden Mittelwert. Dadurch wer-

den die Datenmengen reduziert, die wesentlichen Bestandteile der Prozesslandschaft herausgearbeitet und die Prozesszeiten von Nachfolgeberechnungen verkürzt. Die weitere Datenaufbereitung erfolgt durch Frequenzmasken, die festgelegte Bestandteile, wie Störsignale oder das Grundrauschen, aus den Spektren herausfiltern. Abbildung 23 zeigt weiterhin die Anwendung eines Differenzfilters auf die Prozesslandschaft. Unerwünschte Bestandteile werden aus der Prozesslandschaft herausgefiltert. [QAS17]

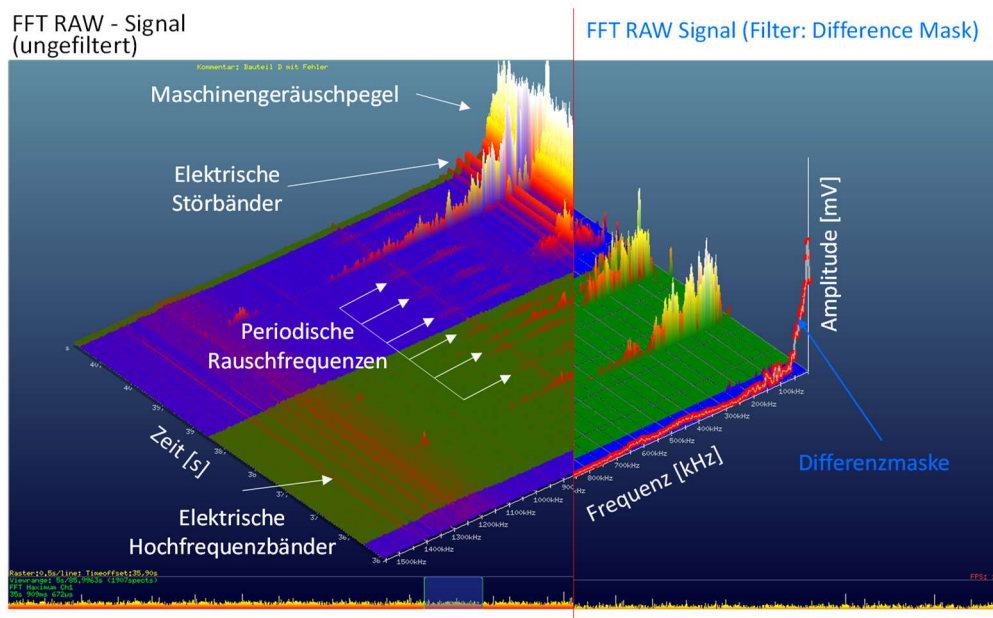


Abbildung 23: Veranschaulichung einer Datenfilterung über eine Differenzmaske [QAS19]

Energie (normiert)

Bei der ‚Energie‘ handelt es sich um eine einheitenlose Bezeichnung, die ein Vergleichsmaß der Lautstärke eines Körperschallsignals wiedergibt und nicht mit dem physikalischen Begriff gleichzusetzen ist. Bei gleichen Messeinstellungen lassen sich Signale miteinander vergleichen. Ändern sich Vorverstärkung oder Rauschanteile in Signalen muss der Energiewert neu bestimmt werden. Abbildung 24 zeigt exemplarisch die Energieauswertung der komprimierten und ungefilterten FFT-Rohmessdaten. Der Energie Peak-Wert, die maximale Spannungsamplitude, wird bei der Mustererkennung (Kapitel 2.4.5) mitverwendet und kann ebenso allein für die Analysen angewendet werden.

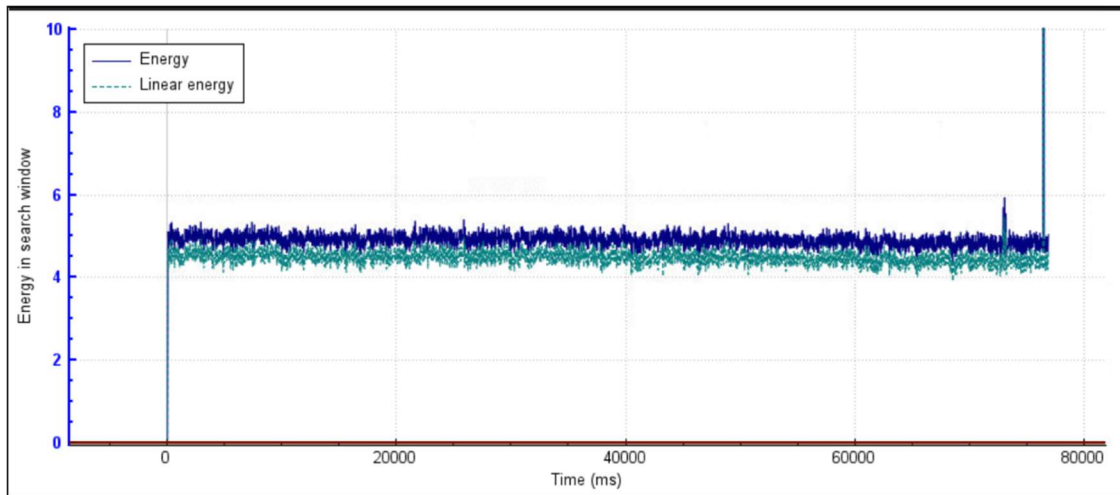


Abbildung 24: Signatur aus der Energieauswertung mit komprimierten und ungefilterten Fast-Fourier-Transformation-Rohmessdaten

Nach der FFT wird die Energie auf die gemessene Maximalamplitude normiert. Dies bedeutet, dass in Bezug auf im Prozess auftretende Signale, deutlich abweichende Signale im Amplitudenverlauf hervorstechen und signifikant im Hinblick auf die Begleitsignale werden.

Die normierte Energie wird nach Gleichung 2.4.21 berechnet.

$$E = \frac{a \cdot frqPerBand \cdot specDuration}{max.Amplitude} \quad (\text{Gl. 2.4.21})$$

mit:

$frqPerBand$ [1 Hz \triangleq 1 1/s] – Abstand Frequenzband

$specDuration$ [t] – Zeitabstand Spektrum

a [-] – Amplitude (quantisierte Spannung)

Beispiel: Der Energie-Peak-Wert entspricht dem quantisierten Millivolt-Wert von 43 515 (a /mV). Dieser Wert wird bei einer Signatur (Fenster Zeit über Frequenz) aufsummiert und normalisiert.

Das Normalisieren der Energierferenz entspricht (Abbildung 25):

1. dem Abstand von Frequenz zu Frequenz
2. $frqPerBand$ von 11562,5 Hz $\left(aus \frac{800000Hz}{512 \text{ Bänder}} \right)$ und
3. dem Spektralen Abstand $\cdot specDuration$ (80 μ s oder 0,00008 s), dividiert durch den maximalen Amplitudenwert 65 636.

Dieses Produkt wird dann mit dem vorhandenen gemessenen Wert multipliziert.

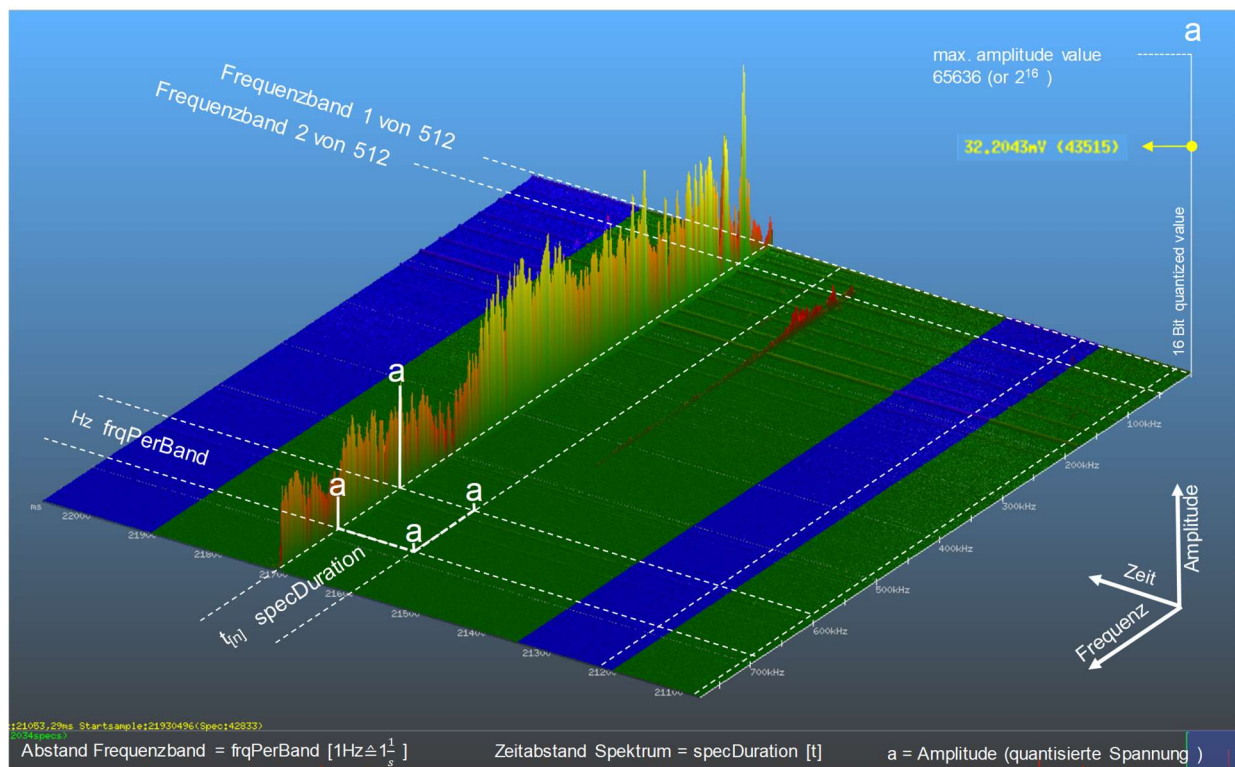


Abbildung 25: Fast-Fourier-Transformation-Messdaten in Optimizer4D

Energieerkennung

Für die reine Energieerkennung wird die Mustererkennung deaktiviert. Das Operatornetzwerk analysiert die Messdaten nur nach einem vorbestimmten Energiewert und löst über diesen den Trigger aus, der die Messung stoppt. Aufgrund dieser Vereinfachung ist die Energieerkennung weitaus schneller als die Mustererkennung, aber auch fehleranfälliger.

Trigger

Trigger lösen beim Eintreten festgelegter Ereignisse definierte Aktionen aus und sind in der Trigger-Liste aufgeführt. In dieser Arbeit wurde die Trigger-Liste für das automatische Starten und Stoppen der Messungen und der Servohydraulischen Schwingprüfmaschine (SPM) verwendet. Die Trigger-Liste wird über die In/Out-(I/O)-Ports angesteuert [QAS17]. Die Entwicklung einer Kommunikationsschnittstelle zwischen dem Messgerät und dem Steuercomputer der SPM war Bestandteil der Arbeit.

Operator-Editor

Im Operator-Editor wird, über einzelne Operatoren, eine graphische Programmieroberfläche geschaffen. In jedem Operator sind Verarbeitungsalgorithmen einprogrammiert, wobei ein Operator aus einem oder mehreren Ein- und Ausgängen besteht. Der Operator analysiert den Eingang, führt die vorbestimmten Aktionen aus und stellt die Ergebnisse an seinen Ausgängen

zur Verfügung. Operatoren werden durch Konnektoren an ihren Ein- und Ausgängen miteinander verbunden. [QAS20]

2.4.5 Mustererkennung

Die Fähigkeit, in einer Menge von Daten Muster, Wiederholungen, Ähnlichkeiten oder Gesetzmäßigkeiten zu erkennen, wird *Mustererkennung* genannt. Im Rahmen der Mustererkennung werden gemessene Signale in Kategorien eingeordnet und klassifiziert. Wichtig dafür ist die Erkennung von Mustern, deren Merkmalen und den Gemeinsamkeiten in der entsprechenden Kategorie. Je umfangreicher die vorgenommene Klassifizierung ist, desto einfacher ist die Unterscheidung der Objekte. Im Vordergrund steht dabei die Extraktion von Merkmalen mit hoher Relevanz oder auch Diskriminierfähigkeit. [MUS09]

Das Messsystem *Optimizer4D* mit der hinterlegten Software ermöglicht die In-situ-Analyse aufgenommener Daten. Dabei können die Daten vielfältig verarbeitet werden. Für diese Arbeit war die Verarbeitung nach der normierten Energie und nach einem Muster von Bedeutung. Die Analyse nach der normierten Energie richtet sich nach der in mV gemessenen Amplitude. Die Mustererkennung bezieht sich auf ein vorher definiertes Spektrum oder einen Bereich. Der *Optimizer4D* berechnet aus der Charakterisierung des Spektrums nach Zeit, Frequenz und Amplitude die normierte Energie. Die Detektion von Rissen über die normierte Energie hat den Vorteil, besonders schnell zu sein, weist aber ein erhöhtes Fehlerpotenzial auf. Unabhängig von der Spektrenform wird jedes Signal, das die festgelegte Schwelle überschreitet, detektiert. Dem kann durch die Signalaufbereitung (Kapitel 2.4.1) entgegengewirkt werden. Strukturelle Änderungen bei der Bauteilnutzung lösen Festkörperschallwellen aus. Risse erzeugen spezifische Riss-signale im Frequenz-Zeit-Diagramm. Diese Riss-signale weisen häufig eine kurze Entstehungsdauer auf, wobei die Schwingungen länger abklingen. Je höher die einwirkende Kraft gegenüber dem Werkstoffzusammenhalt ist, desto kürzer ist die Dauer der Entstehung von Schallwellen. Mit einer schnelleren Entstehung folgt das Angleichen des Riss-signales an einen Impuls. Das gesamte Bauteil wird dadurch zu einer speziellen Schwingung, der Impulsantwort, angeregt. Die Impulsantworten von Rissen können als Muster im *Optimizer4D* abgelegt werden, wodurch eine In-situ-Rissüberwachung mithilfe der Mustererkennung ermöglicht wird. Die Mustererkennung benötigt einen höheren Rechenaufwand als die Energiedetektion, womit die Methode etwas langsamer ist. Die genauen Zeiten richten sich nach der Datenkompression sowie der Komplexität und der Anzahl der verwendeten Muster. Die Vorteile der Mustererkennung gegenüber der Energiedetektion sind die geringere Fehleranfälligkeit und eine höhere Flexibilität sowie Modularität. In der vorliegenden Arbeit sollte die Methode unter anderem dazu eingesetzt werden, AE-Signale in Abhängigkeit vom Schädigungsmechanismen

differenzieren zu können. Die Mustererkennung durchläuft eine parallele Prüfung auf die Muster i. O. und n. i. O, mit gleichzeitiger Energieerkennung. In Abbildung 26 ist beispielhaft ein schematischer Ablauf einer Mustererkennung im Optimizer4D dargestellt. Statt Prozesse in situ zu überwachen, können auch Prozesslandschaften im Nachgang einer Messung importiert und auf Muster untersucht werden. [QAS17, BAR14, MOE10]

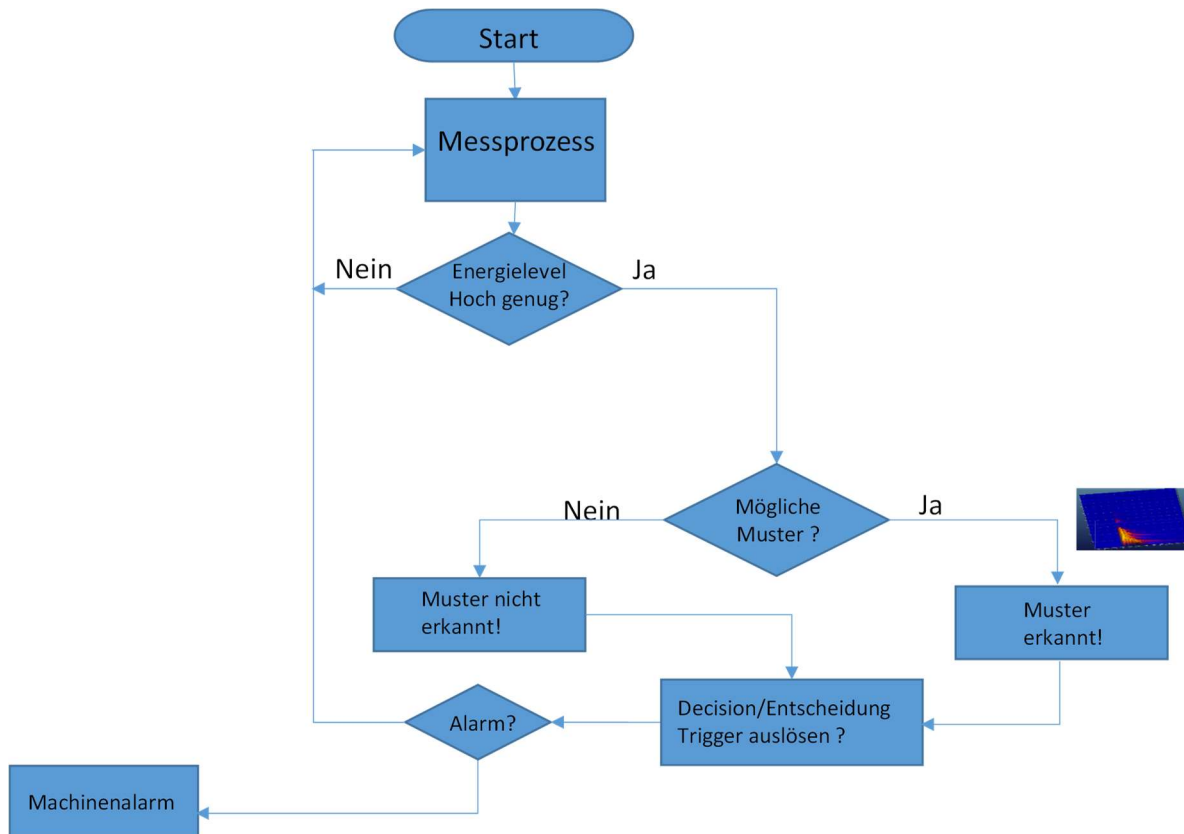


Abbildung 26: Flowchart für den schematischen Prozess einer Mustererkennung [QAS20]

Im Rahmen dieser Arbeit sollte mit dem Beginn eines Versuchs beispielsweise an der SPM die Messung über ein Output-Signal gestartet werden. Während der Messung sollten die Spektren nach einer vorher bestimmten Energie abgesucht werden. Wurde für ein bestimmtes Spektrum oder einen Spektrenbereich die Energieschwelle überschritten, sollte die Mustererkennung starten. Diese verglich gemessene Spektren mit Mustern in der Musterbibliothek. Wurde ein Muster erkannt, sollte mithilfe der Trigger-Liste ein Output-Signal generiert werden. Die Trigger-Liste sollte so eingestellt sein, dass das Erkennen eines Musters zum Maschinenstopp führen und die Messung angehalten werden kann. Hierfür müssten im Rahmen der Arbeit, über den Stand der Technik heraus, die für den Federdraht relevanten Rissmuster sowie relevante Energieschwellen und die komplette Analyseketten, die auf dem vorhandenen Operatorennetzwerk beruht, entwickelt, validiert und optimiert werden. Weiterhin war es notwendig, ein Schnittstellenmodul für die Kommunikation zwischen der Maschine und dem QASS-Analysegerät zu entwickeln.

Operator Editor

Der Operator Editor bietet eine Oberfläche (Abbildung 27) auf der mit einzelnen Bausteinen (Operatoren) und deren Verbindungen ein Programmablauf erstellt werden kann. Operatoren werden per Drag and Drop auf die Oberfläche gezogen. Die objektbasierte Programmierung beruht auf der Programmiersprache *Python* [QAS20].

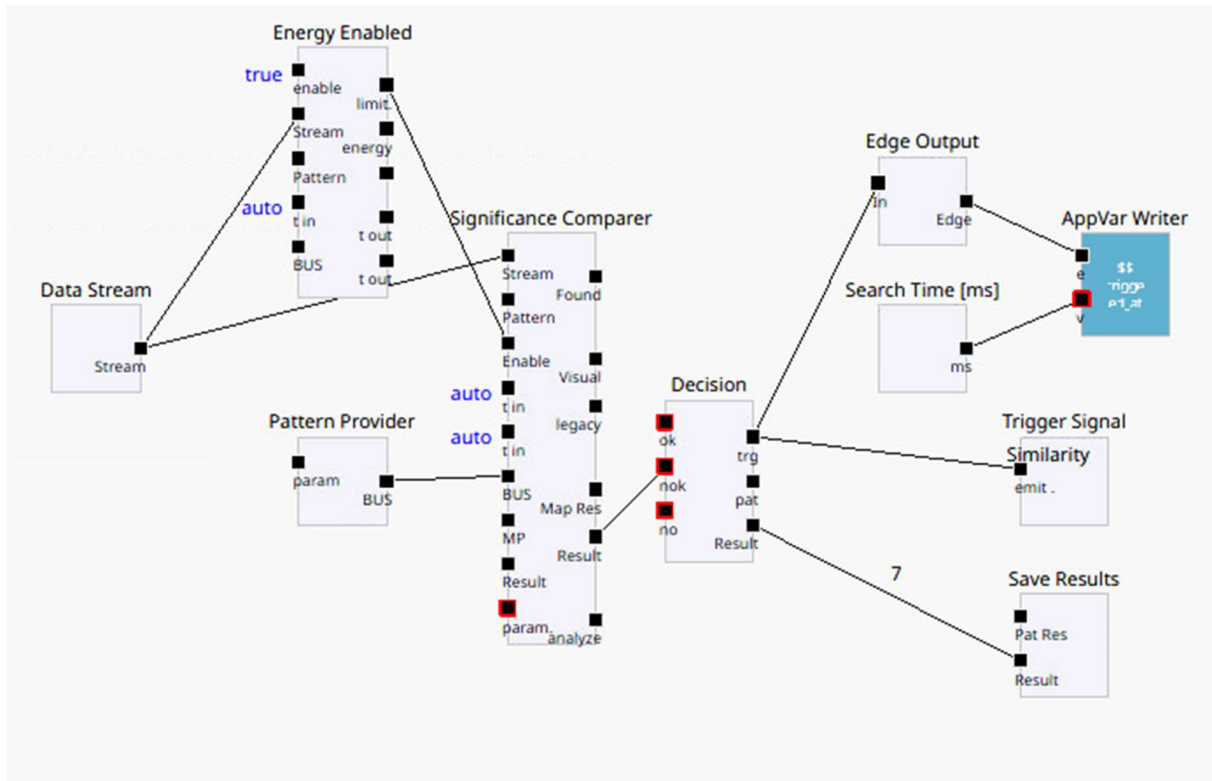


Abbildung 27: Beispielhafte Grundeinstellungen einer Mustererkennung im Operator Editor

Das erstellte Programm wird bei der Messung ausgeführt und abgearbeitet, wobei jeder Operator seine hinterlegten Algorithmen durchführt. Am Eingang werden die Signale aufgenommen, am Ausgang werden diese transformiert wieder ausgegeben. Durch das Verbinden der Operatoren mittels Konnektoren entsteht ein Operatornetzwerk. Netzwerke werden durch *Custom Operators* vereinzelt, die wiederum einen Container bilden, in dem Programmabschnitte ausgeführt werden [QAS22]. Der erste Operator ist der *Clock Slot*, der den Ausführungstakt des angeschlossenen Analysetools angibt und das Programm *Messungsbeginn* startet. Der Operator ist mit der Trigger-Liste verbunden. Der *Clock Slot* wird mit einem *Custom Operator* verbunden, in dem die Mustererkennung abläuft [QAS22].

Die Grundkonfiguration der Mustererkennung erfolgt im *Custom Operator*. Der erste Operator ist ein *Data-Stream*-Operator mit einem Buffer als Ausgang, der die Messdaten des Messgerätes dem Operatornetzwerk zur Verfügung stellt. Der *Search-Time*-Operator gibt die aktuelle Suchzeit des *Raw-Buffer* weiter. Dieser wiederum sorgt dafür, dass der nächste zur Verfügung

stehende Wert angesteuert und verarbeitet wird. Weiterhin wird hierdurch die zeitliche Zuordnung für weitere Operatoren ermöglicht. Der *Energy-Enable*-Operator wird mit den vorherigen Operatoren verbunden und überwacht die normierte Energie anhand eines vorher eingestellten Energiewerts. Wird dieser Energiewert erreicht, werden die Messdaten an den nächsten Operator weitergegeben. [QAS22]

Der Folgeoperator ist der *Significance Comparer*. Dieser stellt, über den Parameter *Needed Similarity*, die prozentuale Wahrscheinlichkeit der Übereinstimmung (Ähnlichkeit) mit einem Muster dar. Die Betrachtung der prozentualen Ähnlichkeit lässt sich beliebig festlegen und wird in der Konfiguration eingetragen. In die Eingänge fließen die Operatoren *Data Stream*, *Energy Enable*, *Search Time* und *Pattern Provider*. Der *Pattern-Provider*-Operator hat Zugriff auf die Musterbibliothek, in der Muster gespeichert werden und aus der entsprechend Muster abgerufen werden können. Muster können in der Prozesslandschaft erstellt werden und werden dem *Significance Comparer* zur Verfügung gestellt. Für die Erstellung von Mustern wird der *Raw Buffer* empfohlen. Das Muster bleibt frei von Nachbearbeitungen und kann für alle Bufertypen eingesetzt werden. Die Operatoren *Visualize Search* und *Decision* folgen dem *Significance-Comparer*-Operator. *Visualize Search* gibt ein grafisches Feedback zu der Prozesslandschaft und zeigt, welche Spektren der *Significance Comparer* momentan verarbeitet. Der relevanteste Operator für die Mustererkennung ist der *Decision*-Operator, dem die gesamten Ergebnisse zugeführt werden. Dort werden Treffer aus vorigen Operatoren, die NIO sind, aufgenommen. *Nicht in Ordnung* wird gewählt, da die erkannten Muster Risse angeben. Die Hauptkonfiguration des *Decision*-Operators erfolgt über vier Graphen.

Im späteren Verlauf der Untersuchungen wird das Operatornetzwerk um die Operatoren *Counter*, *Value Comparer* und *Constant* erweitert. Diese werden zwischen *Decision* und *Trigger Signal* geschaltet. Es soll die Möglichkeit gegeben werden, die Messung nach einer selbstbestimmten Anzahl an erkannten Mustern zu stoppen. *Counter* erstellt einen Zähler, der sich mit jedem gefundenen Muster erhöht. Der *Constant*-Operator liefert einen konstanten Wert. Hierüber wird die Anzahl der Muster eingestellt, die notwendig sind, um die Messung zu stoppen. Beide Werte werden im *Value Comparer* verglichen. Sind sie gleich, wird das Signal an den *Trigger-Signal*-Operator geleitet und die Messung gestoppt. [QAS20]

Ziel im Rahmen dieser Arbeit war es, eine Musterbibliothek speziell für die Federdrähte in Abhängigkeit von unterschiedlichen Versuchsparametern zu entwickeln und in der Messtechnik einzustellende Parameter herauszuarbeiten.

Funktionsweise der Mustererkennung

Bei der Mustererkennung beruht die Ähnlichkeit (Similarity) auf einer kombinierten Häufigkeits- und Konturbetrachtung. Dabei wird für jeden Anwendungsfall eine Bibliothek entwickelt und erstellt, die in Abhängigkeit der Variation der AE-Signale eine zuverlässige Detektion ermöglichen soll. Abbildung 28 zeigt den *Decision-Operator* mit den drei verwendeten Methoden, bei denen Riss- und Störgeräusche sowie die Energiewerte analysiert werden, und bildet die visuelle Darstellung in Graphen im *Decision-Operator* ab. Dabei sind IO-Bereiche grün und NIO-Bereiche rot hinterlegt. Treffer (in dieser Arbeit also erkannte Risse) werden als rote Punkte angezeigt. Die Graphen werden in die Quadranten I bis IV eingeteilt. Dieser Operator nimmt eine graphische Auswertung der von den Netzwerken erhaltenen Ergebnisse vor.

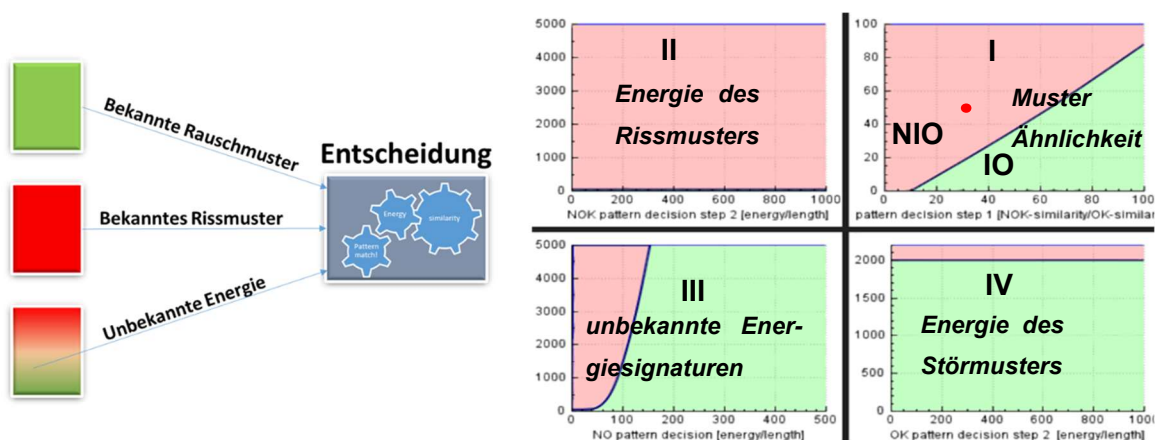


Abbildung 28: Schematische Darstellung der Einteilung der Quadranten im *Decision-Operator*, der Basis des grundlegenden Bewertungsprinzips; in Anlehnung an [QAS20]

Der Algorithmus der Mustererkennung gleicht die Veränderung von Amplitude und Frequenz im definierten Zeitfenster mit dem Referenzmuster ab. Hierfür wird ein Ähnlichkeitsfaktor (Similarity) in Prozent [%] angegeben. Im folgenden Abschnitt ist die Berechnung der Similarity beschrieben. Im zweiten Schritt der Mustererkennung findet eine automatische Überprüfung der Musterform als Hüllkurve statt.

Die Auswertung startet in Quadrant I, in dem alle Ergebnisse der Mustersuche angezeigt werden. Dabei werden NIO- und IO-Muster gegeneinander getestet und das Ergebnis wird im Diagramm eingezeichnet. Der IO-Bereich ist grün, der NIO-Bereich rot hinterlegt (Abbildung 29). Hierbei ergeben sich die folgenden Optionen:

- a) IO – detektiertes Signal weist Übereinstimmung mit dem im Musterkatalog hinterlegten Muster auf; NIO – nicht erkannt: Anzeige im grünen Bereich (1 → 2) sowie zusätzliche Prüfung in Quadrant II, ob IO-Muster hohe Energiewerte aufzeigt. Wenn dies der Fall ist, wird die Prüfung in Quadrant II (5) fortgesetzt.

Wenn nicht, liegt ein IO-Muster vor und kein Riss wurde detektiert.

- b) NIO – erkannt; IO – nicht erkannt: Anzeige im roten Bereich (4), weitere Prüfung in Quadrant II

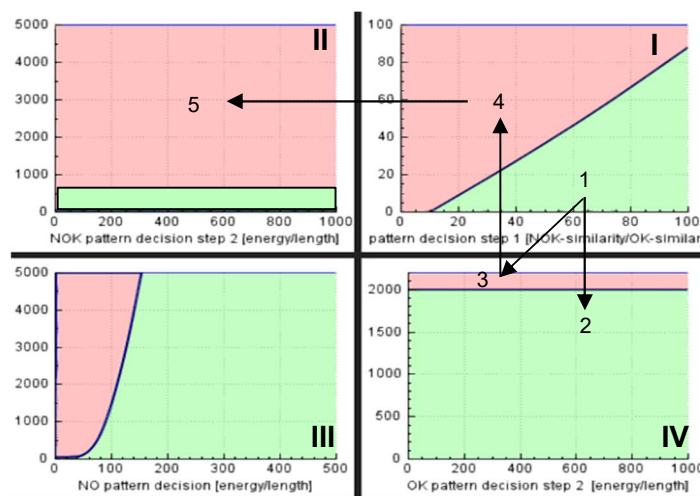


Abbildung 29: Ablauf der Mustererkennung mit den vier Quadranten in der visuellen Darstellung [QAS20]

Quadrant II stellt den zweiten Schritt im Entscheidungsprozess dar, der beginnt, sobald in Quadrant I ein NIO-Signal (4) gemessen wurde. Die Energie wird über die Länge (Zeit) des Signals aufgetragen. Der Operator entscheidet anhand der Lage nach IO und NIO. Wird der Energiewert zu hoch gewählt, kann es passieren, dass Rissignale nicht korrekt erkannt werden, da die benötigte Energie nicht erreicht wird. Bei zu geringer Einstellung werden zu viele Spektren untersucht und die Messung verlangsamt sich. Bei Identifizierung eines IO-Musters wird die Prüfung beendet. Wird ein NIO-Muster in Quadrant II (5) erkannt, wird die Prüfung in Quadrant III (Abbildung 30) mit folgenden Möglichkeiten fortgesetzt:

- a) (6) Muster mit hoher Energie über eine kleine Zeitspanne (z. B. Riss) → NIO
- b) (7) Muster mit geringer Energie über eine lange Zeitspanne (z. B. Abschneiden der Feder) → IO

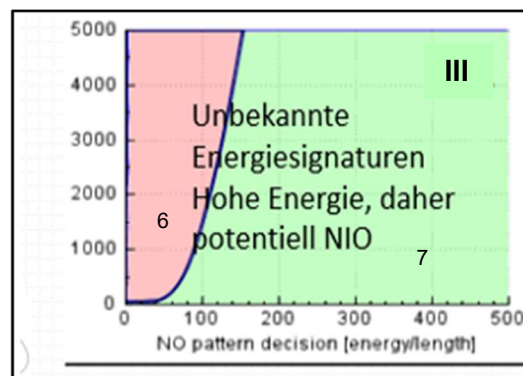


Abbildung 30: Vorgehensweise in Quadrant III in der visuellen Darstellung [QAS20]

Befindet sich das Muster im grünen Bereich, ist das Energielevel im normalen Bereich und die Messung wird fortgesetzt. Der Grenzwert in diesem Graphen erlaubt es zu alarmieren oder zu ignorieren, falls eine Energie unerwartet hoch oder ungewöhnlich ist. Dadurch können auch gefilterte Störgeräusche in den roten Bereich fallen und die Messung stoppen. Der Grenzwert als Linie zwischen NIO- und IO- Bereich muss je nach Prozess angepasst werden und kann linear sowie als parabolische Kurve verlaufen.

Abschließend werden die Operatoren *Trigger Signal* und *Save Results* verwendet. Im Ersteren werden Signale vom *Decision*-Operator an die Trigger-Liste geleitet. In diesem Fall wird die Messung gestoppt. Der zweite Operator speichert die Ergebnisse der Mustererkennung vom Operatornetzwerk in eine Datenbank. [QAS20]

Berechnung der Similarity

Die Similarity-Berechnung erfolgt im FFT-Signal anhand dreier Schritte:

1. Meshing zur Datenreduktion
2. Skalierung
3. Vergleich der Amplitudenwerte

Im ersten Schritt wird zunächst das reale AE-Muster definiert. Hierbei wird ein Netz aus Datenpunkten für die Merkmalsextraktion erstellt (Abbildung 31, A). Für die Auswertung ist die Dichte der Punkte und somit die Steigung relevant.

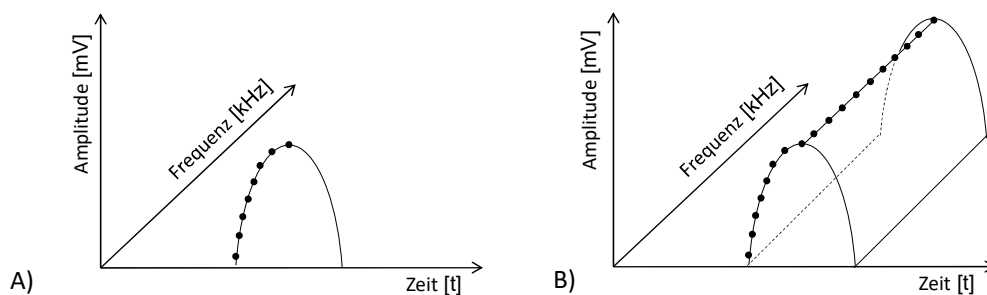


Abbildung 31: A) Datenpunkte mit gleichem Abstand um die Signalkurve in der zweidimensionalen Darstellung und B) Verbindung der Datenpunkte in der dreidimensionalen Darstellung; in Anlehnung an [QAS19]

Anschließend werden die Datenpunkte über den Frequenz- und Zeitbereich verbunden, sodass ein drei dimensionales Netz aus Datenpunkten entsteht (*Fischernetz*). Die Vernetzung bzw. Verbindung von Datenpunkten ist in Abbildung 31 (B) dargestellt. Daraufhin erfolgt eine Mesh-Compression, bei der die Dichte des Netzes für die Analyse zusammengefasst wird. Laut Hersteller sollte für Riss signale die Kompression bei 3 bis 5 % liegen.

Bei diesem Test werden die Häufigkeiten der übereinstimmenden Netzpunkte verglichen.

Im zweiten Schritt der Skalierung und im dritten Schritt des Vergleichs der Amplitudenwerte wird, nach dem Meshing das Muster über das Zeitsignal gezogen, bis eine Mindestähnlichkeit gefunden wurde. Wird diese identifiziert, werden anschließend die Amplitudenwerte und die Zeitspanne skaliert, was im Rohsignal erfolgt. Eine Skalierung über den Frequenzbereich wird nicht vorgenommen. Die Mindestähnlichkeit wird vorher im Programm angegeben und sollte möglichst klein sein, d. h. zwischen 10 und 20 % liegen. Je kleiner dieser Wert ist, desto häufiger wird im Programm geprüft, ob eine Ähnlichkeit besteht, wodurch auch die Messung verlangsamt wird. Dabei sind eine Verdopplung und eine Halbierung zulässig. Zur Steigerung der Genauigkeit können mehrere Muster hinterlegt werden, wobei eine Similarity für jedes Muster ausgegeben wird. Dabei findet ein Vergleich der Differenz vom Muster zum Signal statt. Die Similarity berechnet sich mit Gleichung 2.4.22 wie folgt:

$$Similarity = 1 - \left(\frac{Distanz}{Normierung} \right) * 100\% \quad (\text{Gl. 2.4.22})$$

Die Werte werden dabei so gewählt, dass das Signal bei 0 eine Similarity von 0 % aufweist.

2.5 Normen und Standards

Beim Vergleich von Messergebnissen ist es notwendig, sich an definierten Standards zu orientieren. Im Folgenden sind in Bezug auf die AE-Prüfung die für diese Arbeit relevanten Regelwerke aufgeführt [DGZ18]:

- ISO 12713, Zerstörungsfreie Prüfung – Schallemissionsprüfung – Primärkalibrierung von Wandlern
- ISO 12714, Zerstörungsfreie Prüfung – Schallemissionsprüfung – Sekundärkalibrierung von Schallemissionsaufnehmern
- ISO 12716, Zerstörungsfreie Prüfung – Schallemissionsprüfung – Begriffe
- ISO 18249, Zerstörungsfreie Prüfung – Schallemissionsprüfung – Prüfung von faserverstärkten Polymeren – Spezifische Vorgehensweise und allgemeine Bewertungskriterien

Neben weiteren ISO-Normen und Standards (Europäische Normen [EN], Normen der American Society of Mechanical Engineers [ASME], Normen der American Society for Testing and Material [ASTM]) sind Richtlinien, Berichtsbände (Kolloquien der Deutschen Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung [DGZfP] zur Schallemission) und Verfahrensanweisungen für einige allgemeine Anwendungsfälle gegeben. Durch die Weiterentwicklung der AE-Detektoren und insbesondere der Auswertungsmethoden ist, mithilfe der schnellen Rechentechnik, momentan eine Anwendung außerhalb genormter Verfahren möglich – es existiert keine standardisierte Vorgehensweise. Für die allgemeine Anwendung der AE-Analytik sind die Reproduzierbarkeit und die Sicherheit einer Messung unabdingbar. Ziel dieser Arbeit war es, durch die erzielten Ergebnisse und Erkenntnisse eine allgemeingültige standardisierte Vorgehensweise zu entwickeln und für die Anwender in der Federnindustrie bereitzustellen.

3 Zielstellung

Bisher wird in der Federindustrie keine zerstörungsfreie Inline-Überwachung der einzelnen Fertigungsschritte hinsichtlich Rissbildung und Werkstofffestigkeit durchgeführt. Das übergeordnete Forschungsziel ist das Schließen dieser Lücke. Auf Basis der Literaturrecherche und der eigenen Vorarbeiten aus der Industrie sowie an der Forschungsstelle werden folgendes Schlussfolgerungen gezogen: Bisher war es nicht möglich,

1. Risse an jedem Bauteil, das durch ein auffälliges akustisches Signal aussortiert wurde, im Labor nachzuweisen (die Nachweisbarkeit und das zu wählende Verfahren sind abhängig von der Lage der Risse (innen bzw. außen), der Risslänge und der Rissöffnung),
2. entstandene akustische Emissionssignale entweder einem Riss oder einem anderen Ereignis sicher und reproduzierbar zuzuordnen und
3. die Signale, die tatsächlich einen Riss abbilden, hinsichtlich der Rissarten zu separieren.

In der Literatur wird auf das Potenzial der akustischen Emissionstechnik zur Unterscheidung von mikrofraktographischem Risswachstumsverhalten aufgrund der Abhängigkeit und des Einflusses auf die Ausprägung des risstypischen akustischen Signals hingewiesen [ROG01, WAC16]. Diese Arbeitshypothese soll im Rahmen der Arbeit zur industriellen Serienfertigung von Federn durch statistisch geplante Laborversuche mit unterschiedlichen Einflussparametern untermauert werden. Das akustische Emissionsverfahren ist für die Rissentstehungsdetektion in Werkstoffen während der Umformung des Drahts zu Federn generell geeignet; die Zugfestigkeitswerte der zu untersuchenden Werkstoffe für die Federherstellung liegen weit über dem von Behrens und Buse [BEH15] bestimmten Grenzwert von 550 MPa. Für die Überführung der Technik in die industrielle Anwendung zur Rissdetektion beim Federwinden höchstfester Stähle ist das Ziel, die Einflussfaktoren in Bezug auf das akustische Signal, die durch das Material oder den Prozess bestimmt werden, für die zu entwickelnde Messstrategie zu identifizieren, sodass eine automatisierte In-situ-Rissdetektion ermöglicht wird. Ein weiteres Ziel ist es, dass durch die Entwicklung geeigneter Analyseketten in der anlagenspezifischen Software die Detektion und die eindeutige Zuordnung der akustischen Signale zu unterschiedlichen Schädigungsmechanismen erfolgen können.

Beispielsweise kann eine falsche oder zu niedrig gewählte bzw. angewandte Anlasstemperatur in den Durchlauföfen bei der Drahtherstellung zu einem spröden Werkstoffverhalten und damit zu transkristallinem Spaltbruch führen. Feuchtigkeit während der Federnfertigung, insbesondere im Zeitraum zwischen dem Winden und dem Spannungsarmglühen, kann zu wasserstoffinduzierter Rissbildung und damit zu interkristallinem Rissverlauf führen. Dies kommt

– zum Missfallen der Federhersteller – in der Praxis immer wieder vor. Bei diesen hohen Drahtfestigkeiten und den Windeigenspannungen (Zug) kann bereits eine hohe Luftfeuchte, aber auch örtliche Korrosion der frisch gefertigten Federn die Ursache für eine Wasserstoffaufnahme und damit für wasserstoffinduzierte Rissbildung sein [SCH05].

Daraus lassen sich folgende Forschungsfragen ableiten:

1. Sind eine Zuordnung der Schallemissionsmesssignale zu möglichen Werkstoffantworten (Monitoring *Messsignal – Ereignis*), z. B. Rissen oder Abplatzen von Zunder, und ein Trennen der detektierten Signale hinsichtlich des Bauteilzustands (n. i. O. bzw. i. O.) möglich?
2. Besteht eine Abhängigkeit zwischen den gemessenen akustischen Signalen und den Materialeigenschaften sowie Fertigungsparametern?
3. Wie hoch sind die Auflösungsgrenzen (minimal detektierbare Risstiefe) und sind diese von den Material- und Prozessfaktoren (z. B. der Umformgeschwindigkeit) abhängig?
4. Ist über die Signalcharakteristik eine Zuordnung der akustischen Signale zu den Brucharten und somit Schädigungsmechanismen möglich?
5. Kann anhand der entwickelten Signalaufbereitung und des Algorithmus zur Klassifizierung (Mustererkennung) eine In-situ-Auswertung der Messsignale zur Detektion von Rissentstehung und -wachstum im industriellen Prozess bei der Verformung von Federstahldrähten sicher implementiert und eingesetzt werden?

4 Experimenteller Teil

Zur Beantwortung der Forschungsfragen wurden systematische Untersuchungen durchgeführt, die sich grundsätzlich in vier Kategorien einteilen lassen:

1. **Labortechnische Versuche**, die grundlegend die Eignung der akustischen Emissionsprüfung zur Detektion von Rissentstehung und -wachstum (Mikro- und Makrowachstum) bei höchstfesten Stählen bestätigen sowie die Identifizierung von Einflussfaktoren ermöglichen
2. **Versuche im industriellen Umfeld** mit der Übertragung der im Vorfeld programmierten Analyseketten, sowie anhand der Ergebnisse und Erkenntnisse am Beispiel des Federwindens
3. **Versuche zur Unterscheidung der Brucharten bzw. Schädigungsmechanismen** in Abhängigkeit der risstypischen AE-Signalmuster
4. **Versuche zur Lokalisierung der AE-Quelle** anhand von Laufzeit- bzw. Intensitätsunterschieden sowie **Rissdetektion** unter zyklischer Belastung

Tabelle 6 zeigt die Versuchsmatrix für sämtlich erhaltene Materialien mit den jeweils durchgeführten Untersuchungen und den Versuchsparametern.

Tabelle 6: Versuchsmatrix für die labortechnischen Untersuchungen und Industrierversuche; die Zuordnung der Chargennummern ist dem Anhang (0) zu entnehmen

Material/ Gefüge	Bezeichnung	Durchmesser [mm]/ Charge/ Zugfestigkeit [MPa]	Unterschiedliche mechanische Beanspruchung im Labor	Umformgeschwindigkeit im Labor [mm/min]	Industrierversuche beim Winden vom Draht zur Feder	Umformgeschwindigkeiten in der Industrie [St/min]	Unterscheidung Schädigungsmechanismen	Schwingversuche Feder	Materialcharakterisierung/ Begleitende Untersuchungen
Öschlussvergüteter Draht (angelassener Martensit)	VDSiCr	VDSiCr_D1.2_A2_2139	Biegung	1					X
		VDSiCr_D1.6_B4_2045	Biegung	1					X
		VDSiCr_D3.0_A4_1945	Biegung	1, 10, 30				X	X
		VDSiCr_D3.2_A4_1939	Biegung	10	X	5 bis 20		X	X
		VDSiCr_D7.5_C2_1746	Biegung	10					X
		VDSiCr_D7.5_E1_1781	Biegung, Zug	1, 10, 30					X
		VDSiCr_D7.5_E2_1740	Biegung, Torsion	1, 10, 30				X	X
	VDSiCr_D7.5_E3_1740	Biegung, Torsion	1, 10, 30				X	X	
	FDSiCr	FDSiCr_D7.5_B3_1763	Biegung	10					X
		FDSiCr_D7.5_B4_1785	Biegung	10				X	X
		FDSiCr_D3.4_F1_1890				X	139, 146, 60, 25		X
	FDSiCrV	FDSiCrV_D3.2_A5_2256	Biegung	10					X
		FDSiCrV_D3.4_A2_2240	Biegung	10					X
	Patentiert gezogener Draht (feinstlamellarer)	SH	SH_D7.5_B1_1514	Biegung	1, 10, 30				X
DH		DH_D5.0_B2_1707 DH_D7.5_C1_1636	Biegung Biegung	1, 10, 30 1, 10, 30				X X	
Hochlegierter Draht (Austenit mit unterschiedlichen Anteilen von Umformartensit)	1.4310	1.4310_D0.7_C4_2130	Biegung	10					X
		1.4310_D1.0_A3_2010	Biegung	10					X
		1.4310_D2.0_A2_1980	Biegung	10					X
		1.4310_D1.0_A2_2010	Biegung	10					X
		1.4310_D6.0_C6_1556	Biegung	10					X
		1.4310_D6_C6_1557	Biegung	10					X
	1.4568	1.4310_D3_C5_1745	Biegung	10				X	X
		1.4568_D6_C8_1424	Biegung	10					X
		1.4568_D3_C8_1499	Biegung	10				X	X
		1.4568_D0,7_C7	Biegung	10					X
		1.4568_D6_C8_1378	Biegung	10					X
		1.4568_D3_C8_1489	Biegung	10					X

4.1 Materialcharakterisierung

Die zu untersuchenden Federn und die jeweiligen Werkstoffe (Tabelle 7) wurden vor Beginn der Arbeit in Zusammenarbeit mit dem Verband der Deutschen Federnindustrie (VDFI) und einigen Herstellern gewählt. Hierbei wurden die Federn und die typischen Federwerkstoffe dahingehend ausgewählt, dass diese in der industriellen Praxis bei den meisten Mitgliedern ein hohes Produktionsvolumen bei extrem hohen Anforderungen hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften inkl. des Schwingfestigkeitsverhaltens und damit Rissfreiheit aufweisen, sodass die Ergebnisse einen hohen Nutzerkreis ansprechen, aber auch auf andere Federarten übertragen werden können. Bei der Werkstoffauswahl wurden sowohl patentiert gezogene und höchstfeste Vergütungsstähle (krz, trz) als auch korrosionsbeständige (kubisch flächenzentrierte, kfz) Stähle (die in Abhängigkeit des Umformgrads Martensitanteile enthalten) berücksichtigt, sodass die Übertragbarkeit auf weitere krz bzw. trz sowie kfz Stähle gegeben ist. Die Möglichkeit, mittels AE-Analysen Risse zu detektieren, sollte für die Prozesse des Windens und Setzens untersucht werden.

Im Rahmen sämtlicher experimenteller Untersuchungen wurden folgende Geräte und Methoden verwendet bzw. angewendet:

- Optimizer 4D inkl. zwei Messketten (AE-Analytik mit dem HFIM), QASS GmbH
- Prüfmaschinen: Servohydraulisches Prüfsystem 8802 von Instron (SPM), Elektrodynamische Prüfmaschine E 10.000 von Instron, Universalprüfmaschine Zwick 1446
- Mikro-Computertomograph mit Nano-Röhre (180 kV) und Mikrofokus-Röhre (240 kV), Detektor: Y. Panel 4343 CSI, YXLON, Auswertesoftware Volume Graphics
- automatisches Mikro-/Makrohärteprüfgerät für Vickers Duramin-40 AC2, Struers
- metallographische Präparationsstrecke, Struers
- motorisiertes Auflichtmikroskop-System DM6 M mit Bildanalyse, Leica
- Funkenemissionsspektrometer Belec Vario Lab A2002374
- REM von Zeiss DSM 962 (EDX von Oxford, WDX und Focus Ion Beam [FIB] für Materialanalysen, Auriga Compact)

Im Vorfeld der labortechnischen Untersuchungen wurden bei allen Drahtproben umfangreiche Materialcharakterisierungen durchgeführt, wobei verschiedene Verfahren – beispielsweise Funkenemissionsanalysen, Zugversuche, Härtemessungen, Gefügeanalysen, die Bestimmung der Oberflächenrauheit, mikroskopische Untersuchungen hinsichtlich der Randoxidation und der Randentkohlung sowie die Bestimmung der scheinbaren Korngröße sowie der ehemaligen Austenitkorngröße zur Sicherstellung konstanter Versuchseingangsbedingungen – angewandt wurden (beispielhafte Darstellung in den Tabellen 7 und 8). Die Untersuchungen

fanden an allen ölschlussvergüteten, patentiert gezogenen sowie hochlegierten Federstählen (SH, DH, FDSiCr, VDSiCr, 1.4310 und 1.4568 gemäß EN-10270 Teil 1-3) statt. Die chemische Zusammensetzung wurde mittels optischer Funkenemissions-Spektral-Analyse bestimmt. Zur Ermittlung der quasistatischen mechanischen Kennwerte wurden Zugversuche nach Norm durchgeführt [DIN10,DIN11].

Tabelle 7: Übersicht über die verwendeten Federstähle

Werkstoff	Bezeichnung	R _m (Zugfestigkeit) [N/mm ²]	Eigenschaften
1.1200	EN 10270-1-SH	1 220–2 940	- patentiert gezogener Federstahldraht für statische oder quasi-statische Anwendungen
1.1211	EN 10270-1-DH	1 220–3 400	- patentiert gezogener Federstahldraht für statische oder dynamische Anwendungen
Oteva 70	EN 10270-2 -FDSiCr	1 550–2 300	- ölschlussvergüteter Federstahl für statische und dynamische Anwendungen
1.7103	EN 10270-2 -VDSiCr	1 670–2 230	- ölschlussvergüteter Ventildraht für hoch dynamische Anwendungen (Ventilfedern, Kupplungsfedern)
1.4310	EN 10270-3 X10CrNi18-8	1 280–2 710	- rostfreier Edelstahl für die häufigsten Anwendungen in feuchter Umgebung - leicht magnetisch durch Umformmartensit bei Kaltverfestigung
1.4568	EN 10270-3 X7CrNiAl17-7	1 210–2 280	- ausscheidungshärtbarer Chrom-Nickel-Stahl für dynamische Beanspruchungen - hervorragende Korrosionsbeständigkeit (Luft- und Raumfahrt, Lebensmittelindustrie)

Tabelle 8: Beispielhafte Auswahl der geprüften Federdrahtvarianten mit den probenspezifischen Eigenschaften; Alle Werte aus den Untersuchungen lagen innerhalb der Norm (a: eigene Untersuchung, b: Prüfzeugnis)

Material	Durchmesser [mm]	Norm	R _m (Norm) [N/mm ²]	R _m MW [N/mm ²]	Standardabweichung s [N/mm ²]	R _m innerhalb der Norm	Gefüge
SH	7.5	EN 10270-1	1 490–1 660	1514 (b)	15	ok	feinstlamellarer Perlit (Sorbit)
DH	7.5	EN 10270-1	1 510–1 680	1636 (a)	3	ok	feinstlamellarer Perlit (Sorbit)
FDSiCr	7.5	EN 10270-2	1 710–1 860	1763 (a)	6	ok	homogenes, feinkörniges Vergütungsgefüge
VDSiCr	7.5	EN 10270-2	1 710–1 810	1748 (a)	2	ok	homogenes, feinkörniges Vergütungsgefüge
FDSiCr-V	3.4	EN 10270-2	2 110–2 260	2231 (b)	3	ok	homogenes, feinkörniges Vergütungsgefüge
1.4310	6	EN 10270-3	1 400–1 610	1557 (a)	5	ok	austenitischen Gefüge mit Umformmartensit
1.4568	6	EN 10270-3	1 300–1 500	1424 (a)	9	ok	Gefüge mit Austenit und Umformmartensit

Die Gefügestände aller Drahtsorten im Ausgangszustand wurden umfangreich charakterisiert, (vgl. Anhänge 0 bis 0).

Der Gefügestand des patentiert gezogenen Federstahldrahts (SH) mit feinstlamellarem Perlit (Sorbit) ist in Abbildung 32 dargestellt.

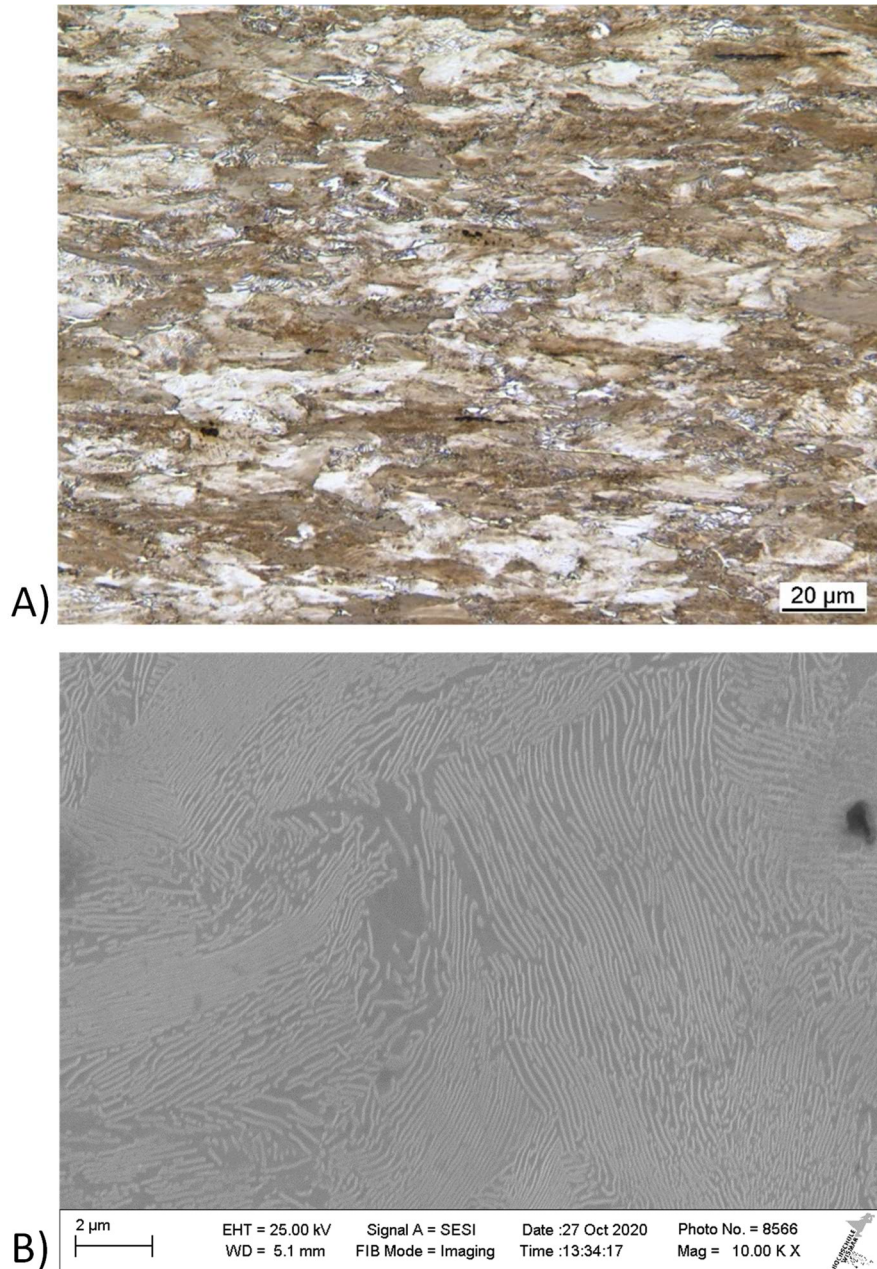


Abbildung 32: A) Untersuchung des Gefüges vom Federstahldraht (SH) mit $d = 7,5$ mm und B) feinstlamellarer Perlit (Sorbit) in Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme; keine Randentkohlung

Der Gefügestand des ölschlussvergüteten Federstahldrahtes (FDSiCr) ist in Abbildung 33 dargestellt. Der geätzte Quer- und Längsschliff von der Mitte und vom Rand zeigt ein typisches feinkörniges Vergütungsgefüge. Eine Randentkohlung liegt nicht vor.

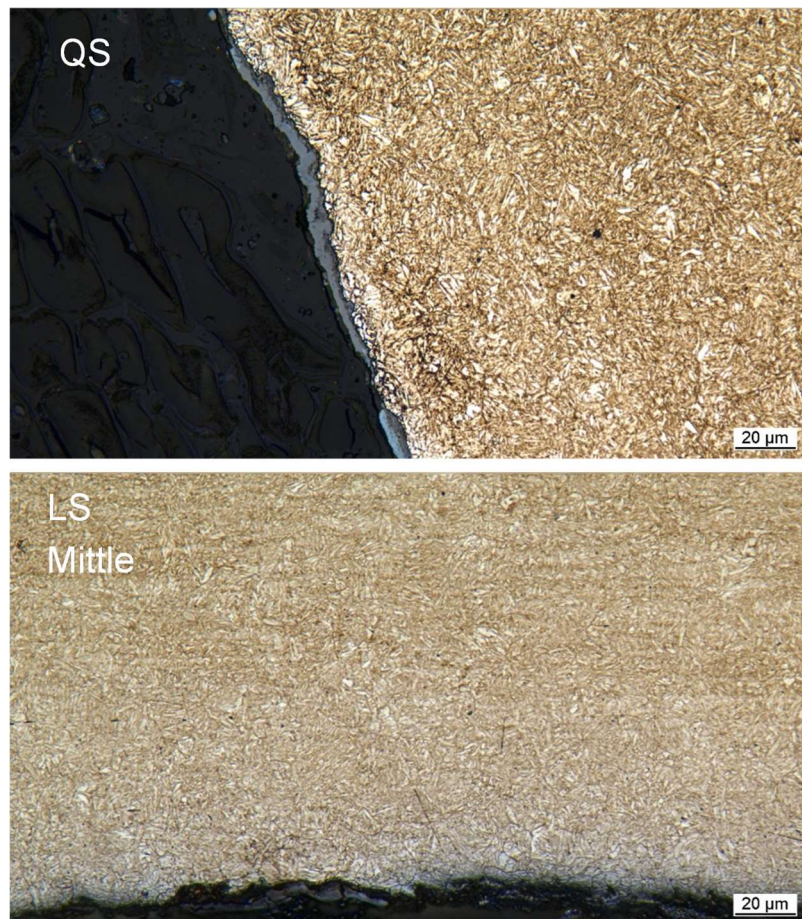


Abbildung 33: Gefüge des Federstahldrahts aus FDSiCr mit $d = 7,5$ mm; (geätzt mit 1% Nital)

Abbildung 34 zeigt die rasterelektronenmikroskopische Aufnahme des ölschlussvergüteten FDSiCr-Drahtes mit feinkörnigem, homogenem Martensit.

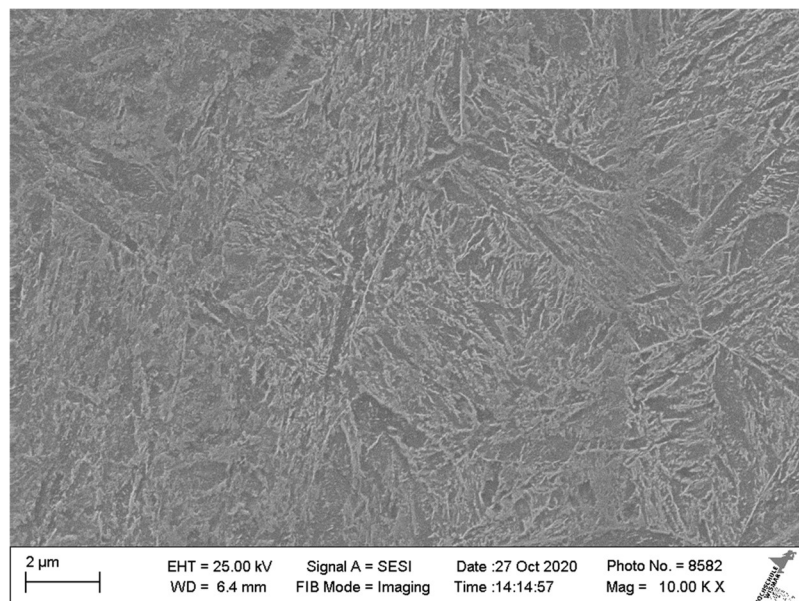


Abbildung 34: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme des ölschlussvergüteten FDSiCr-Drahtes ($d = 7,5$ mm) mit feinkörnigem, homogenem Martensit (normkonform)

In den Abbildungen 35 und 36 sind die Ergebnisse der Gefügeuntersuchung für die flächenzentrierten hochlegierten Sorten 1.4310 und 1.4568 dargestellt.

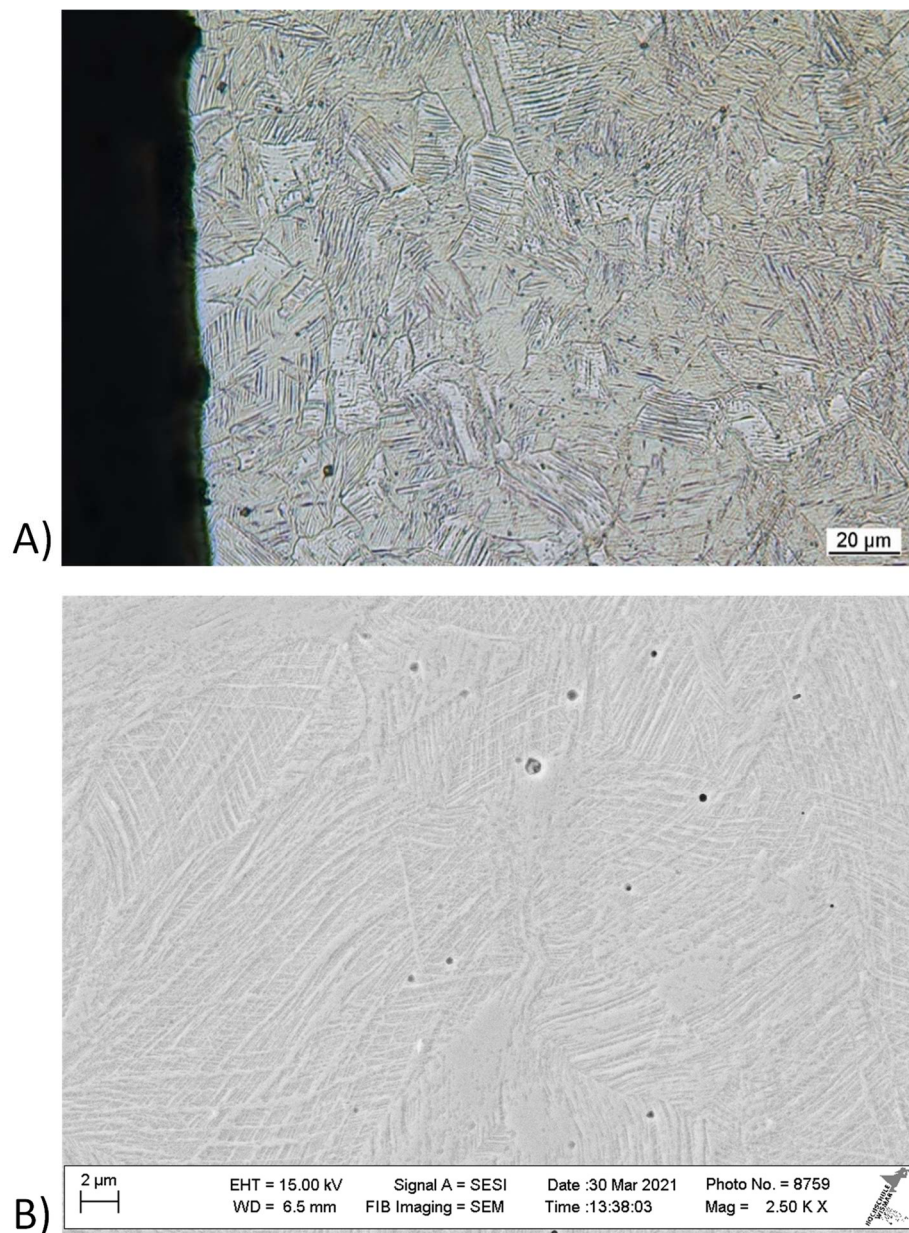


Abbildung 35: A) Gefüge des Federstahldrahts 1.4310 mit $d = 6$ mm, geätzt mit Oxalsäure, und B) Nachweis von vorwiegend austenitischem Gefüge und Anteilen an Umformmartensit durch rasterelektronmikroskopische Aufnahme

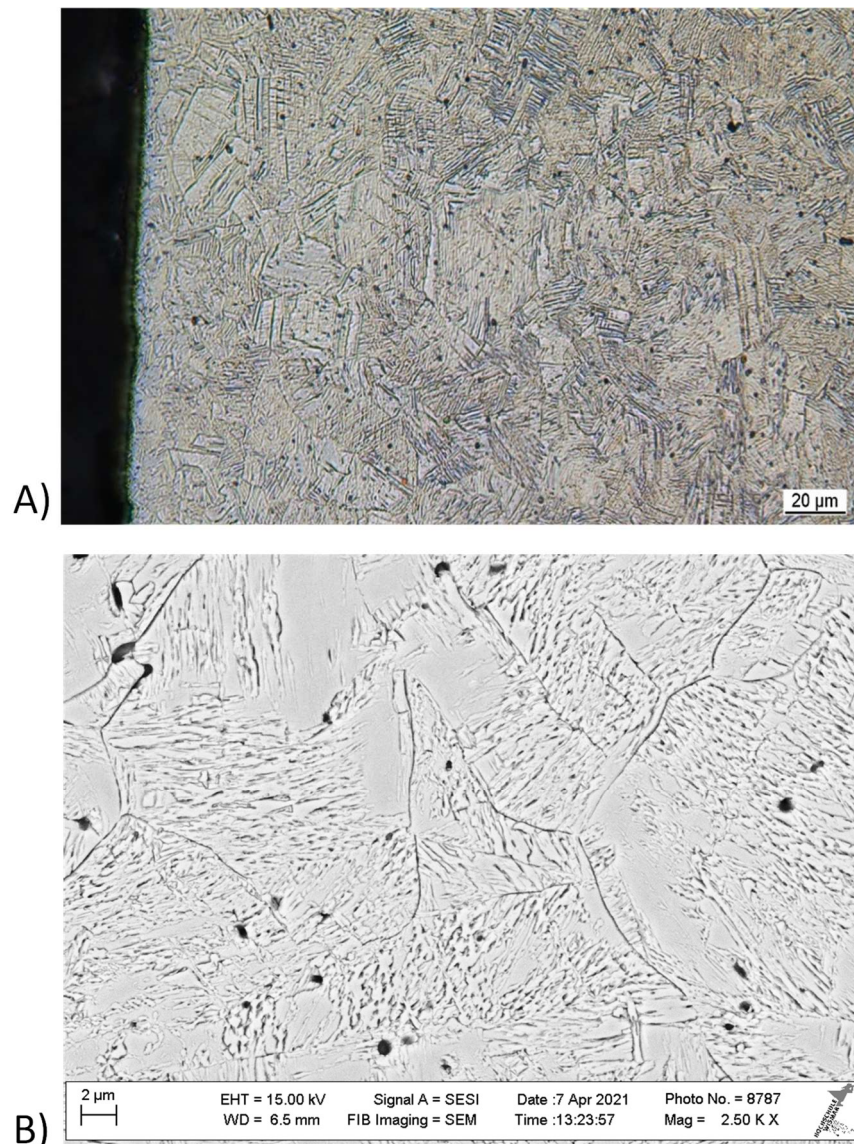


Abbildung 36: A) Gefüge des Federstahldrahts 1.4568 mit $d = 6$ mm geätzt mit Oxalsäure, und B) Nachweis von vorwiegend austenitischem Gefüge mit Umformmartensit, durch rasterelektronmikroskopische Aufnahme

Zur Bestimmung der Korngrößenverteilung (ehemalige Austenitkorngröße bei den patentiert gezogenen und ölschlussvergüteten, sowie die scheinbare Korngröße der austenitischen Körner bei den hochlegierten Stählen) wurden geätzte metallographische Schlitze lichtmikroskopisch untersucht. Die Korngrößenbestimmung erfolgte nach dem Linienschnitt-Verfahren laut DIN EN ISO 643. Tabelle 9 zeigt die Ergebnisse: Alle Werte liegen innerhalb der Norm und es traten keine Auffälligkeiten auf.

Tabelle 9: Zusammenfassung der Korngrößenkennzahl G und der mittleren Korndurchmesser für die jeweilige Drahtsorte

Probe	Korngrößenkennzahl G und mittlerer Korndurchmesser [μm]
DH	11 (7 μm)
SH	11 (7 μm)
FDSiCr-D-7.5 mm	11 (10 μm)
VDSiCr-D-7.5 mm	11 (8 μm)
1.4310-D-2 mm	12 (6 μm)
1.4568-D-3 mm	11 (8 μm)

Ziel der Materialcharakterisierung war es, eine Eingangskontrolle der verwendeten Werkstoffe durchzuführen, um das Vorliegen eines Normzustands bzw. spezifikationsgerechten Zustands nachzuweisen. Alle untersuchten Drähte (ölschlussvergütete, patentiert gezogene und hochlegierte) entsprechen hinsichtlich der chemischen Zusammensetzung, der Mikrostruktur und der Festigkeitswerte der Norm.

Für einen Vergleich und zur Darstellung der Härteverteilung wurde ein Härtemapping an einem Draht und einer Feder in Anlehnung an DIN EN ISO 6507 (Verfahren nach Vickers) durchgeführt. Abbildung 37 (A) zeigt, dass durch die Fertigung des Drahtes im Anlieferungszustand der Kern eine geringere Härte aufweist. Im Außenbereich wurde eine nahezu gleichmäßige Härte mit dem Maximalwert von 593 HV 1 gemessen. Das Härtemapping bei der Drahtprobe einer gewundenen Feder (Abbildung 37, B) belegt, dass sich zwei Bereiche ausbilden, die den inneren und den äußeren Bereich darstellen. Der Verlauf der Härte ist hierbei nicht kreisförmig wie bei der Drahtprobe, sondern nahezu gradlinig segmentiert. Der Werkstoff weist somit nach der Verformung eine deutliche Vorzugsrichtung auf, die über den Härteverlauf sichtbar gemacht werden kann. Dabei ist zu erkennen, dass an der Windungsaußenseite die höchste Härte also auch die höchste Kaltverfestigung und damit im Rückschluss der höchste Umformgrad beim Winden aufgetreten ist.

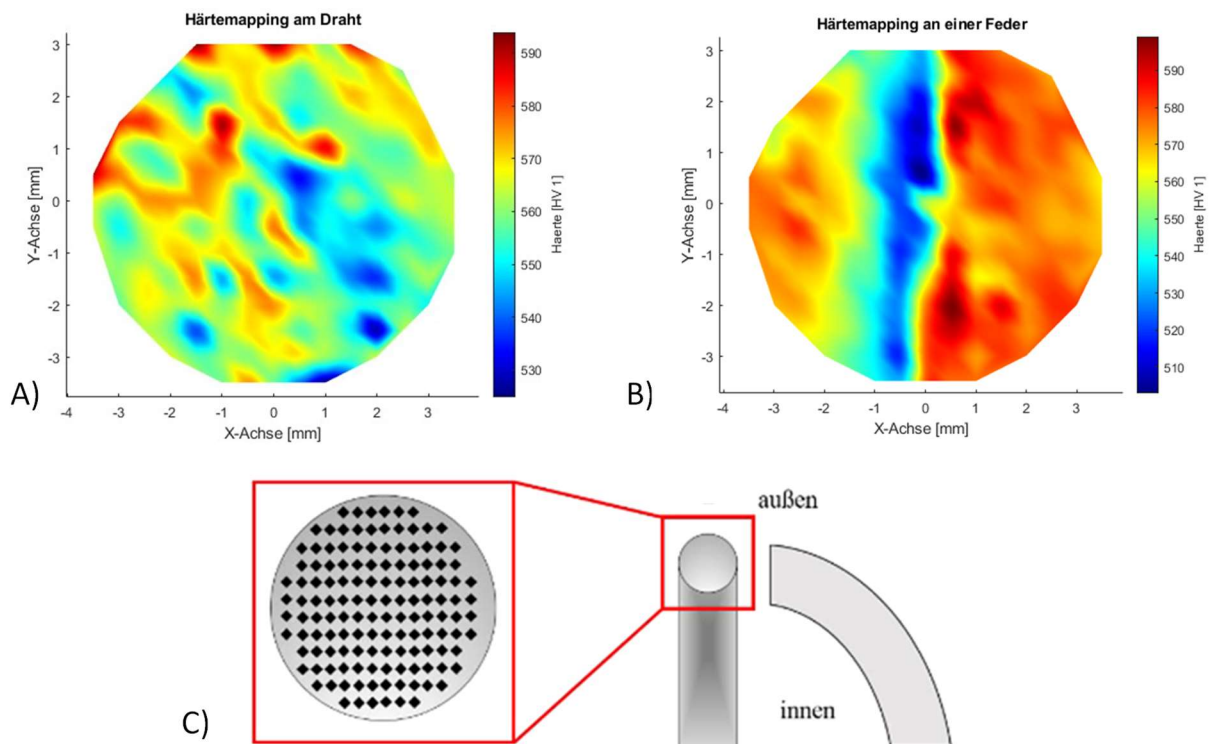


Abbildung 37: Ergebnisse des Härtemappings mittels *Matlab*: A) Draht im Anlieferungszustand, B) Draht einer gewundenen Feder mit Innenseite (I) und Außenseite (A), und C) schematische Darstellung des Querschnitts für die Härtemessung

4.2 Labortechnische Versuche

Für die Übertragung der AE-Methode zur In-situ-Risserkennung in die industrielle Anwendung war es notwendig, den Einfluss der probenabhängigen Parameter (z. B. des Drahtmaterials, des Drahtdurchmessers und der Drahtstärke) sowie prozessbedingter Faktoren (z. B. der Umform- bzw. der Vorschubgeschwindigkeit) auf das detektierte risstypische AE-Signal zu ermitteln. Zur Untersuchung der Einflussfaktoren erfolgten zunächst umfangreiche experimentelle Untersuchungen mit dem Versuchsaufbau an der SPM wie in Abbildung 38 und im Detail in Abbildung 39 dargestellt.



Abbildung 38: Beispielhafte Darstellung des Versuchsaufbaus unter Laborbedingungen mit einer Prüfmaschine und dem Akustischen-Emissions-Analysesystems von QASS: A) Servohydraulische Prüfmaschine (Instron 8802, $F_{\max} = 250 \text{ kN}$) und B) QASS Optimierer 4D, AE-Messsystem mit elektronischer Anbindung an die Prüfmaschine über ein C) Optokoppler-Modul

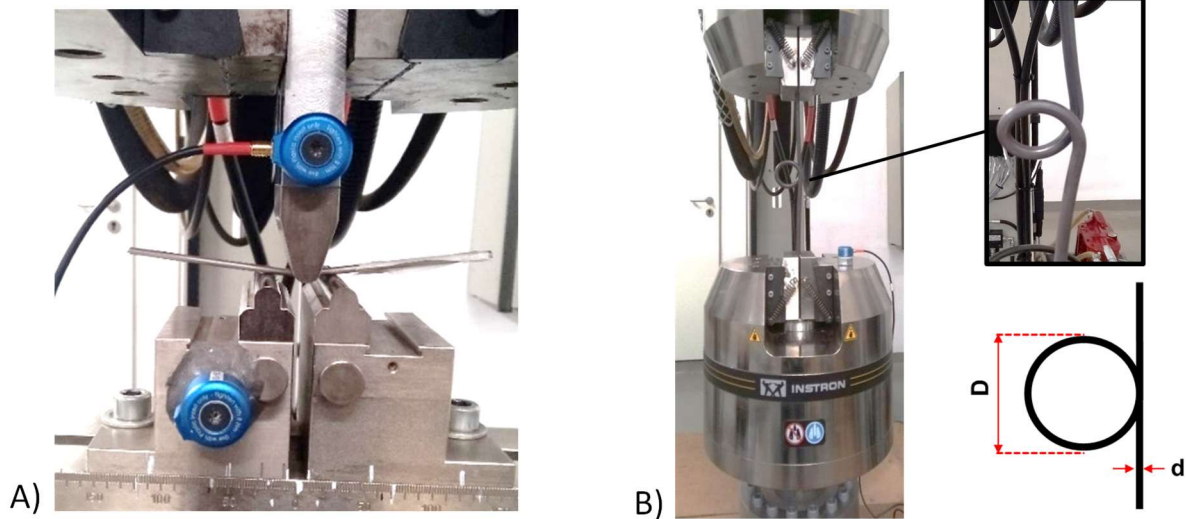


Abbildung 39: Versuchsaufbau: A) Biegeversuch in Anlehnung an DIN EN ISO 74381 mit Akustischen-Emissions-Sensoren an verschiedenen geeigneten Montagepositionen und B) Einwindungsproben zur Durchführung von überlagerten Biegungs- und Torsionsbelastungen

Für eine definierte Rissinitiation in den experimentellen Versuchen war es notwendig, eine Kerbe mit hoher Wiederholgenauigkeit auszulösen. Die Herstellung einer Kerbe mit einer Tiefe von $120 \pm 20 \mu\text{m}$ an insgesamt drei Proben je Drahtvariante erfolgte mit einer Vorrichtung bestehend aus einem Rotationswerkzeug (Dremel, 3000-5) mit einer 0,1 mm dicken Trennscheibe und einer Linear-z-Achse sowie einer Feinmessuhr ($\pm 5 \mu\text{m}$). Die Wiederholbarkeit der Kerbherstellung wurde mittels metallografischer Analysen und μCT überprüft.

In der ersten Versuchsreihe wurden jeweils drei Biegeproben von einer Drahtvariante bis zum Bruch und nachfolgend bis zum Mikroriss ($x < 100 \mu\text{m}$) sowie Makroriss ($x > 100 \mu\text{m}$) belastet und die dabei entstehenden Schallsignale über den an der Biegevorrichtung angebrachten Schallsensor aufgenommen. Ziel war es, die mit dem AE-Messsystem detektierten Risssignale zu charakterisieren und diese für die automatisierte Risserkennung in der Software-Bibliothek zu hinterlegen.

In der folgenden Versuchsreihe wurde der Biegeversuch unterbrochen, sobald dieses typische Signal durch die AE-Messung erkannt wurde. Hierzu wurde, wie in Kapitel 2.4.4 beschrieben, die Energiedetektion zur automatischen Risserkennung angewendet. Für die hierfür erforderliche Kommunikation von Prüfmaschine und AE-Anlage wurde, eigens für diese Anlagenkombination, der in Abbildung 38 (D) auf der rechten Seite dargestellte Optokoppler entwickelt und hergestellt. Dieser dient der Umwandlung der für beide Anlagen unterschiedlichen Signalspannungen (vgl. Anhang 0). Die gemessene Zeitspanne zwischen der Detektion eines risstypischen Signals und dem Stopp der Prüfmaschine liegt bei 0,240 ms (vgl. Abbildung 40). Zur Bestätigung einer Rissentstehung und Ermittlung der Risslänge bzw. -tiefe wurden die Proben im Computertomograph untersucht. Auch hier wurden die Versuche an je drei Proben je Probenart durchgeführt.

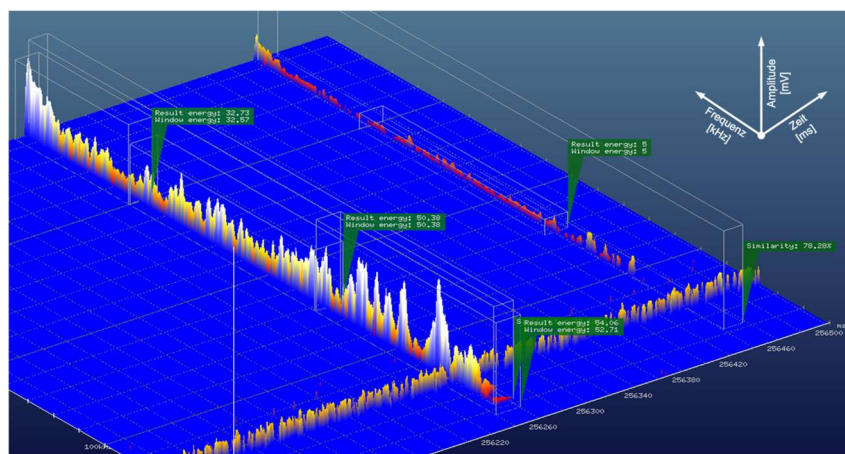


Abbildung 40: Darstellung der Zeitverzögerung anhand eines Beispiels. Nach dem ersten Risssignal wurde innerhalb der Zeitverzögerung ein weiteres Signal detektiert

Für die Abbildung des Fertigungsschrittes *Winden* im Labormaßstab, wurden Einwindungsproben hergestellt, bei denen beim Zusammenziehen in der Prüfmaschine Torsions- und Biegespannungen vergleichbar zum Winden auftreten. Für die Untersuchung wurden VDSiCr-Proben mit einem Drahtdurchmesser von 7,5 mm, einem Windungsaußendurchmesser von 50 mm und einer Drahtlänge von 30 mm von einem Industriepartner gefertigt und mit der Universalprüfmaschine mit eingespannten Enden bis zum ersten AE-Signal auseinandergezogen (Abbildung 39). Anschließend wurden die Proben mit dem Mikro-Computertomograph auf Risse überprüft, dann wieder eingebaut und bis zum nächsten AE-Signal weiter auseinandergezogen. Weiterhin wurden Einwindungsproben mit kugelgestrahlter und ungestrahlter Oberfläche untersucht, um den Einfluss von Druckeigenspannungen sowie Kaltverfestigungen das AE-Signal zu ermitteln.

Zur Untersuchung der Einflussfaktoren erfolgten zunächst umfangreiche experimentelle Untersuchungen am VDSiCr ($d = 7,5$ mm). Wurde nachgewiesen, dass ein Faktor keinen Einfluss auf das risstypische Signal hat, wurde der jeweilige Erkenntnisgewinn bezüglich der Einflussfaktoren auf die anderen Materialvarianten übertragen. Nachdem z. B. festgestellt wurde, dass die Verformungsgeschwindigkeit im Biegeversuch keinen Einfluss auf das AE-Signal hat, wurden die weiteren Versuche mit konstanter Geschwindigkeit durchgeführt. Die hochlegierten Federstahldrähte 1.4310 und 1.4568 mit einem Durchmesser von $0,7 \text{ mm} < d < 6 \text{ mm}$ wurden gesondert hinsichtlich der Einflussfaktoren betrachtet.

4.3 Erprobung in der industriellen Praxis

Ein wesentliches Ziel der labortechnischen Analysen war es, die AE-Analytik mit allen der im Vorfeld programmierten Analyseketten (Energiedetektion und Mustererkennung) sowie anhand der Ergebnisse und Erkenntnisse in den industriellen Einsatz am Beispiel des Federwindens zu übertragen. Hierzu wurde die AE-Messtechnik mit den AE-Detektoren bei zwei Industriepartnern jeweils an einer Windmaschine adaptiert. Hierbei sollte geprüft werden, ob die Rissdetektion im realen Prozess mit Umgebungsgeräuschen von teilweise baugleichen Maschinen, den Schallemissionen des Windeprozesses selbst (z. B. Abhacken der Feder, Reib- und Störgeräuschen) sowie den hohen Geschwindigkeiten (Taktzeit des Federwindens von bis zu 1000 Federn pro Minute) zuverlässig eingesetzt werden kann. Weiterhin sollte die zuvor hinterlegte Mustererkennung am realen Prozess optimiert werden.

Erster Industrierversuch

Im ersten Schritt wurden AE-Analysen während des Federwindens eines FDSiCrV-Drahtes durchgeführt. Die Positionen der AE-Detektoren an der Windmaschine sind in Abbildung 41 dargestellt. Hierbei wurde darauf geachtet, eine möglichst hohe Signalausbeute zu erhalten, d. h. möglichst wenig Grenzflächen zwischen dem zu windenden Draht und den Detektoren einzustellen. Diese ersten Versuche ergaben, dass die Positionierung der Detektoren in allen drei Fällen zu einer gleichbleibenden hohen Signalausbeute führt.

Zu Beginn der Untersuchungen konnten beim herkömmlichen Winden keine Risse nachgewiesen werden. Im nächsten Schritt wurde ein zurückgestellter Draht einer Drahtcharge, die in der Serienfertigung aufgrund von Drahtbrüchen beim Winden als problematisch eingestuft wurde, verwendet. Zusätzlich wurden nicht optimale Windeparameter (kritisches Windeverhältnis $w \leq 3$ und Windestift mit Verschleißspuren) ausgewählt und der Draht wurde durch verschiedene Werkzeuge leicht beschädigt. Auf diese Weise konnten nur I.O.-Federn oder Drahtbrüche, aber keine Risse erzeugt werden. Zur Sicherstellung, dass während des Herstellungsprozesses keine Risse entstanden waren, die undetektiert blieben, wurden im Nachgang an der Hochschule Wismar stichprobenhaft einige Proben (insgesamt 10 von 100) mittels μ CT untersucht. Es wurden keine Risse nachgewiesen.

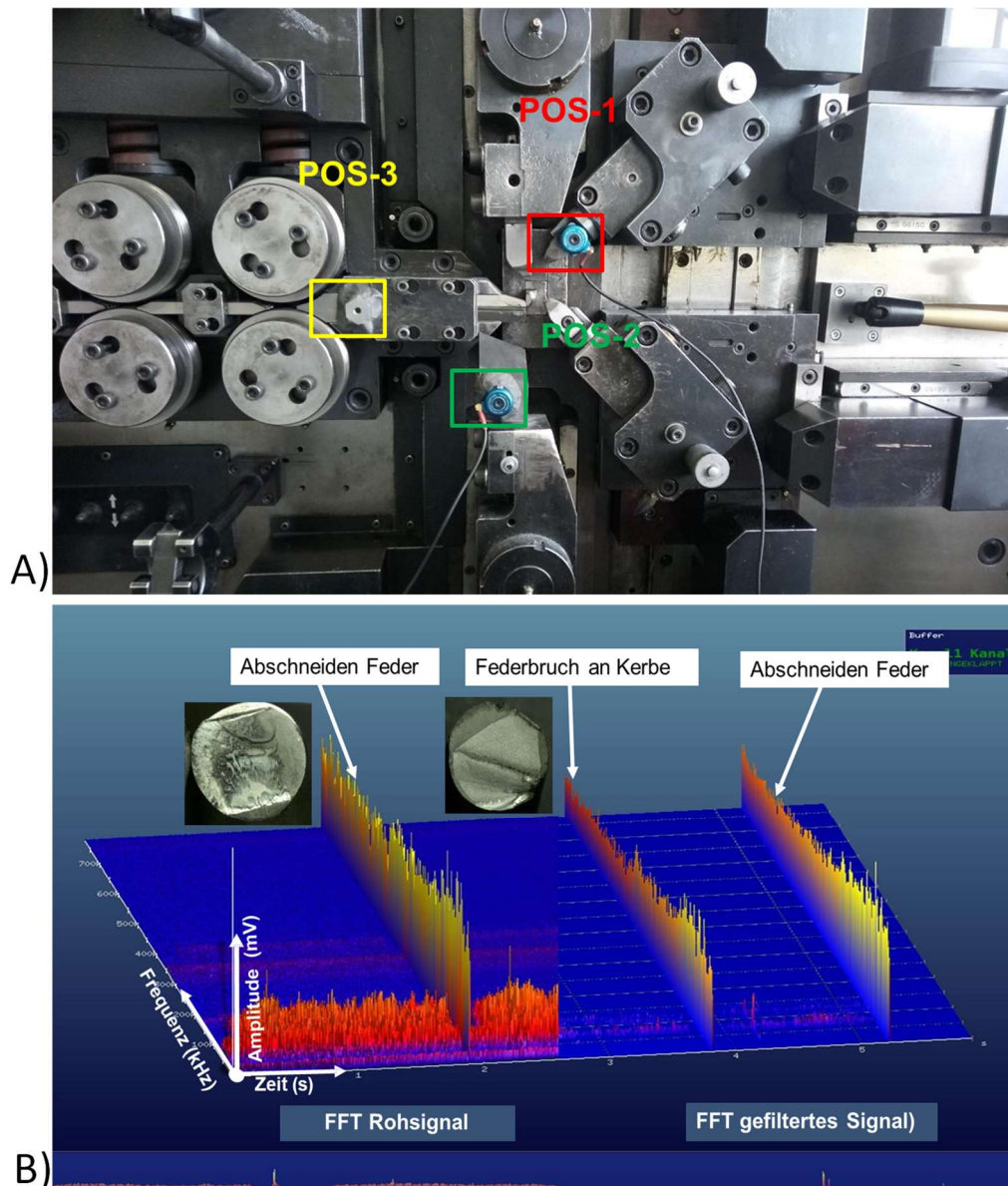
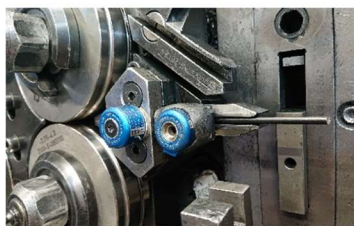
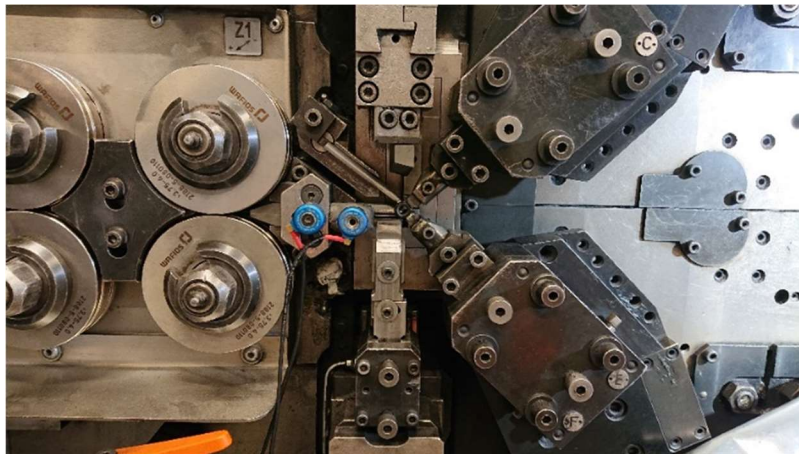


Abbildung 41: A) Windmaschine mit den unterschiedlichen Positionen der Akustische-Emissions-Detektoren und B) Akustische- Emissions-Signale beim Federnwinden und das Signal bei einem Federbruch

Zweiter Industrierversuch

Im nächsten Schritt wurde das QASS-Analyse-System für die In-situ-Rissdetektion beim Federnwinden unter realen Bedingungen ein zweites Mal im industriellen Umfeld integriert (Abbildung 42). Dabei wurden verschiedene Positionen der AE Detektoren, die geklebt oder angeschraubt wurden, an der Windmaschine unter Berücksichtigung von im realen Betrieb geeigneten Positionen, die beispielsweise beim Drahtwechsel oder beim Austausch von Maschinenkomponenten (z. B. des Halters für Windestifte) nicht stören, überprüft. Diese ersten Versuche ergaben, dass die Positionierung der Detektoren in allen fünf Fällen zu einer gleichbleibenden hohen Signalausbeute führt (Abbildung 42).



- POS- 1 : Der Sensor wurde mit einer M5- Innensechskantschraube befestigt. Signalintensität sehr gut.
- POS- 2 : Der Sensor wurde mit Knete (Typ EA3463) befestigt. Signalintensität im Vergleich zu POS- 2 ähnlich.



- POS- 3 : Der Sensor wurde mit einer M5- Innensechskantschraube befestigt. Signalintensität gering, schwache Signale (kleine Risse) werden wahrscheinlich nicht detektiert.



- POS- 4 : Der Sensor wurde mit Knete (Typ EA3463) befestigt. Kleinste Signalintensität im Vergleich zu den anderen Positionen. Risse werden wahrscheinlich nicht detektiert.

Abbildung 42: Für die In-situ-Rissdetektion geeignete Position der Akustischen-Emissions-Sensoren an einer Windemaschine

Für eine optimale AE-Detektion sollte jedoch die Entfernung zwischen Rissentstehungsort und Detektor klein sein und die Grenzflächen dazwischen sollten so gering wie möglich sein.

Für die Durchführung der Versuche wurden die zuvor in labortechnischen Versuchen erzeugten materialspezifischen Rissmuster in der Software-internen Bibliothek gespeichert und während der Industrierversuche angewendet. Weiterhin wurde während der Untersuchungen ein kritisches Wickelverhältnis ausgewählt und der Draht durch verschiedene Werkzeuge leicht

beschädigt, um bewusst einen Riss ohne Bruch zu erzeugen. In Abbildung 43 sind die AE-Signale, die während des Windeprozesses detektiert wurden, dargestellt.

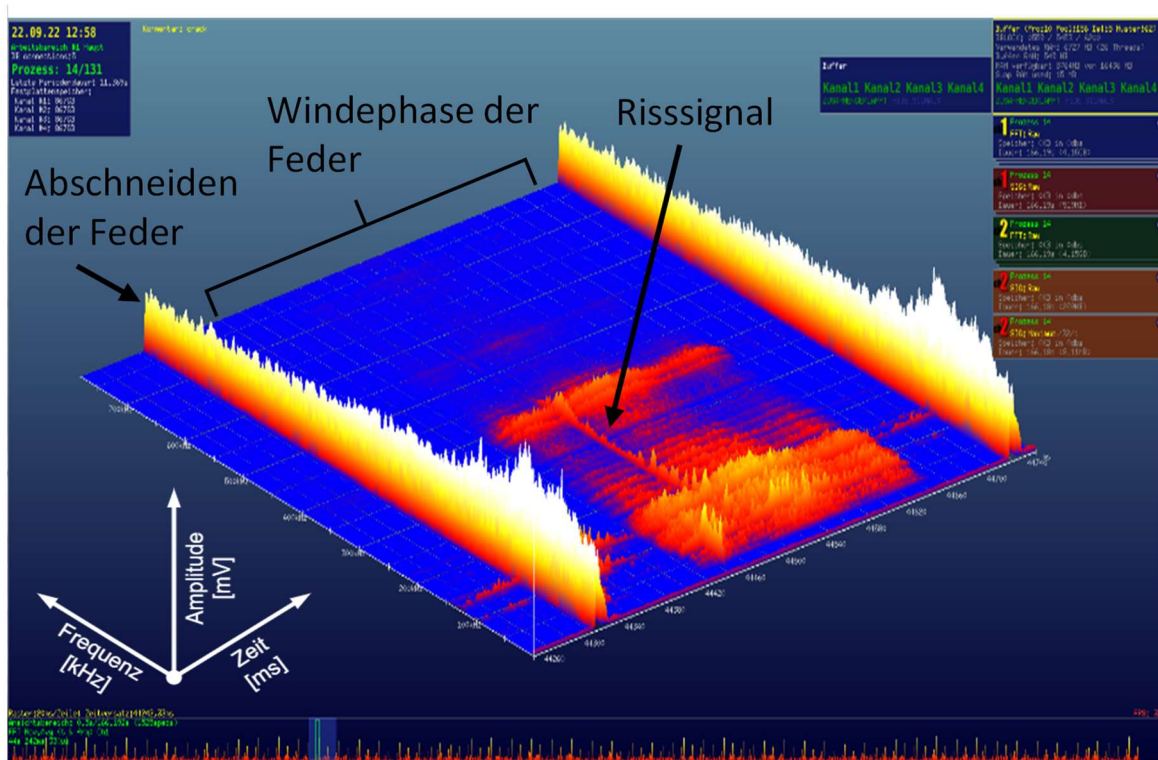


Abbildung 43: Dreidimensionale Darstellung der detektierten Signale mit Abschneiden der Feder, des Windeprozesses mit Reibgeräuschen und des risstypischen Akustischen-Emissions-Signals eines Mikrorisses während der Windephase

4.4 Schädigungsmechanismen

Zur Verifikation, dass risstypische Signalmuster abhängig vom Schädigungsmechanismus unterschiedlich ausgeprägt sind, wurden differenziert vorgeschädigte Drahtproben mit dem Anlieferungszustand (duktiler Wabenbruch) vergleichend untersucht. Hierzu wurden die Drahtproben unterschiedlich behandelt und im Biegeversuch beansprucht.

- falsche Wärmebehandlung → transkristalliner Spaltbruch erwartet: Ofentemperatur von 950 °C, Verweilzeit von 0,5 h, Abschrecken mit Wasser
- wasserstoffinduzierte Rissbildung → interkristalliner Rissverlauf erwartet: Ofentemperatur von 850 °C, Verweilzeit von 0,5 h, Abschrecken mit Öl (70°C) und anschließend Salzsäure (HCL), (8 %, unter elastischer Verspannung)
- wasserstoffinduzierte Rissbildung → interkristalliner Rissverlauf erwartet: Anlieferungszustand, HCL (28 %) 24 h unbelastet, anschließend 3 h belastet mit Erhöhung bis 70 % Streckgrenze

- d) Tieftemperaturbeanspruchung → transkristalliner Spaltbruch erwartet: Anlieferungszustand, Kühlung bei ca. -190°C (Stickstoff)

Hierbei sollte untersucht werden, ob mit den in der Software hinterlegten Rissmustern eine Unterscheidung zwischen transkristallinem Spaltbruch (bei zu sprödem Werkstoffverhalten), interkristallinem Spaltbruch (bei wasserstoffinduzierter Rissbildung) und transkristallinem duktilen Wabenbruch mittels Mustererkennung bei In-situ-Anwendungen möglich ist. Mit diesen Erkenntnissen kann der Federhersteller ohne aufwendige und in KMUs nicht vorhandene (z. B. rasterelektronenmikroskopische) Untersuchungsmöglichkeiten korrigierend in den Prozess eingreifen bzw. eine Reklamation beim Drahthersteller untermauern. Grundlage dafür sind direkte Rückschlüsse darauf, bei welchem Prozess eine unerwünschte Änderung des Werkstoffzustands eintrat.

4.5 Versuche unter zyklischer Belastung

Im Rahmen des Arbeitspaketes sollten Setzversuche an speziell nicht setzfesten Federn durchgeführt werden. Im Zuge der Arbeiten wurden Druckplatten mit geeigneter Aufnahme für die Einspannung konstruiert und an der SPM angebaut. Bei den Versuchen konnten keine Risse erzeugt und detektiert werden. Nach Absprache mit dem projektbegleitenden Ausschuss wurde die Entscheidung getroffen, die Setzversuche durch mehrmaliges Setzen zu erweitern, um so eine zyklische Beanspruchung zu realisieren und die Eignung der AE-Messtechnik zu überprüfen.

Für die Untersuchung zur Eignung der AE-Analytik im Schwingversuch wurde die Universalprüfmaschine *ElectroPuls E10 000* der Firma *Intron* verwendet (Abbildung 44). Das elektrodynamische Prüfsystem verfügt über eine dynamische Leistungsfähigkeit für Frequenzen von bis zu 100 Hz und eine Nennkraft von bis zu 10 kN.

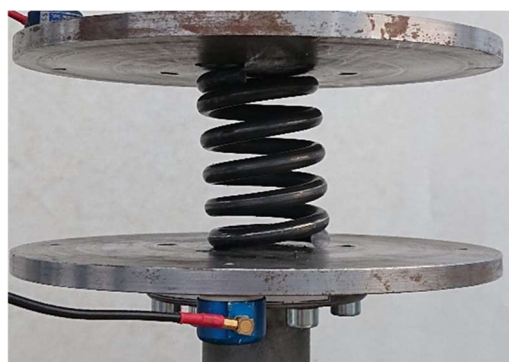


Abbildung 44: Versuchsaufbau an der Universalprüfmaschine E10000 (Intron)

In Abbildung 45 ist ein beispielhafter Aufbau eines Programmablaufs zu sehen. Die digitalen Ausgänge kommunizieren mit dem Messgerät und der Trigger-Liste. Schritt 1 beschreibt eine Rampe. Der Aktor fährt auf einen zuvor definierten Wert, dieser bestimmt sich aus der Position der Traverse und der Höhe der Feder ergibt. Es wird ein Wert eingestellt, bei dem die Feder leicht eingespannt ist und sich nicht bewegen lässt. Dadurch werden Störsignale durch Verutschen und andere Einflüsse minimiert. Ein eventuelles Setzen der Probe wird beachtet.

Im zweiten Schritt hält der Aktor für einige Sekunden die Position. Es wird ein Signal an das Messgerät gesendet und die Messung wird gestartet. Der dritte Schritt ist die Bewegung des Aktors, die durch eine Sinusfunktion beschrieben wird. Für spätere Setzversuche wird die Funktion durch eine Trapezfunktion ersetzt. Die Sinusfunktion ist durch die Amplitude A , die Frequenz f und die Anzahl der Zyklen N charakterisiert. Dabei wird die Amplitude so gewählt, dass der maximale Bewegungsspielraum der Feder ausgenutzt wird. Dadurch entsteht die größtmögliche Belastung der Probe und ein Rissignal wird schnell erzeugt. Aus vorangegangenen Versuchen geht hervor, dass dabei eine maximale Frequenz von 6 Hz erreicht werden kann. Sobald am digitalen Eingang ein Signal eingeht, werden die Messung und die Maschine gestoppt. Im letzten Schritt wird ein Signal an das Messgerät gesendet und die Aufzeichnung beendet.

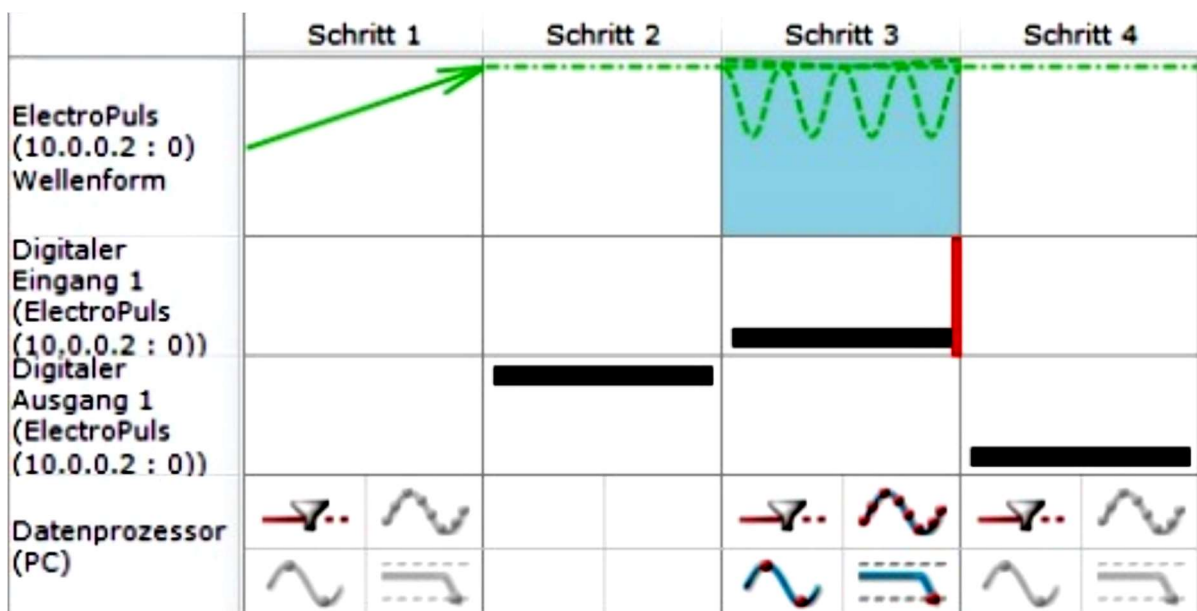


Abbildung 45: Eigens programmierter Programmaufbau für die Universalprüfmaschine

In den weiteren Untersuchungen wurde geprüft, ob der Entstehungsort des Risses in der Feder beim Winden eingegrenzt bzw. bestimmt werden kann und darauf aufbauend eine Lokalisierung einer rissbehafteten Feder bei der Mehrfachprüfung im Schwingversuch möglich ist.

5 Ergebnisse und Interpretation

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der AE-Analyse mit den detektierten Signalen, der Materialcharakterisierung und den metallographischen Untersuchungen dargestellt und vor dem Hintergrund der Literatur interpretiert. Daraus wird eine allgemeine Vorgehensweise zur Implementierung der akustischen Schallemission zur In-Situ-Detektion von Rissentstehung und -wachstum in der industriellen Anwendung abgeleitet. Zudem werden die Analyseketten zur Mustererkennung programmiert. In einem anschließenden Schritt wird die Auswirkung der beschriebenen Schädigungsmechanismen auf das AE-Signal interpretiert.

5.1 Ergebnisse der Labortechnischen Versuche

Zur Detektion von Rissentstehung und -wachstum während der Biegeversuche und zur Analyse wurden die Methoden der Energiedetektion und der Mustererkennung einzeln und zusammen angewendet. Für die Betrachtung beider Methoden wurde der Frequenzbereich in drei Teile geteilt (f_1 von 15 kHz bis 155 kHz, f_2 von 155 kHz bis 300 kHz und f_3 von 300 kHz bis 400 kHz).

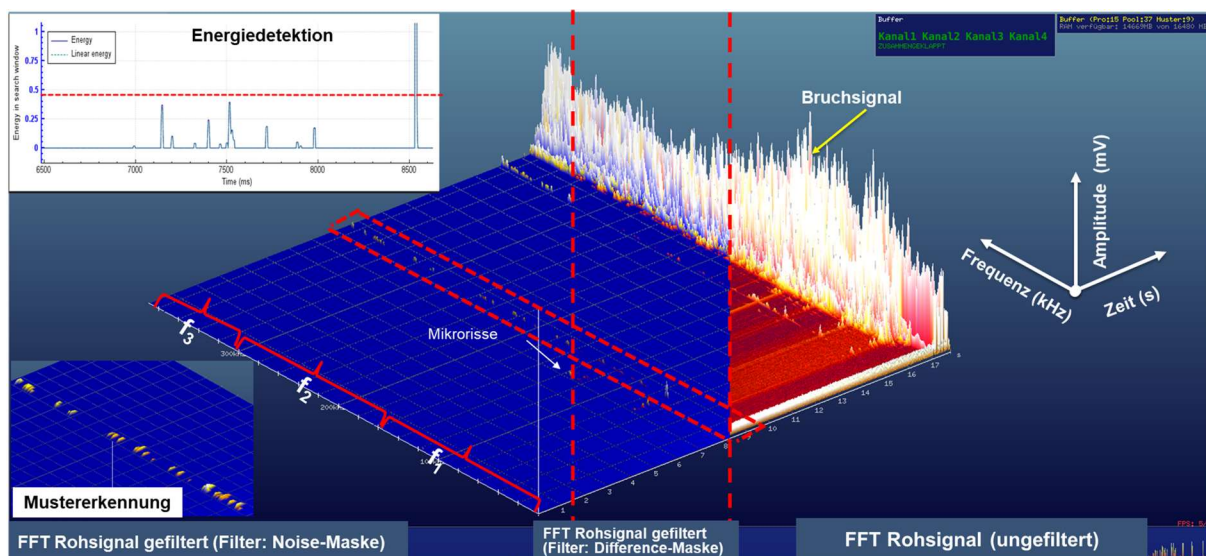


Abbildung 46: Auswertung von Rissignalen mithilfe der Energiedetektion und der Mustererkennung

Zur Auswertung der AE-Signale untersuchte Analyseketten.

Ziel war es, mit der im Optimizer4D-CIS.02 integrierten Auswertesoftware Analyseketten zu untersuchen, die ein für die Rissbildung typisches Schallsignal eindeutig identifizieren können. Abbildung 47 zeigt ein typisches während der bis zum Probenbruch durchgeführten Versuchsreihe aufgenommenes FFT-Diagramm.

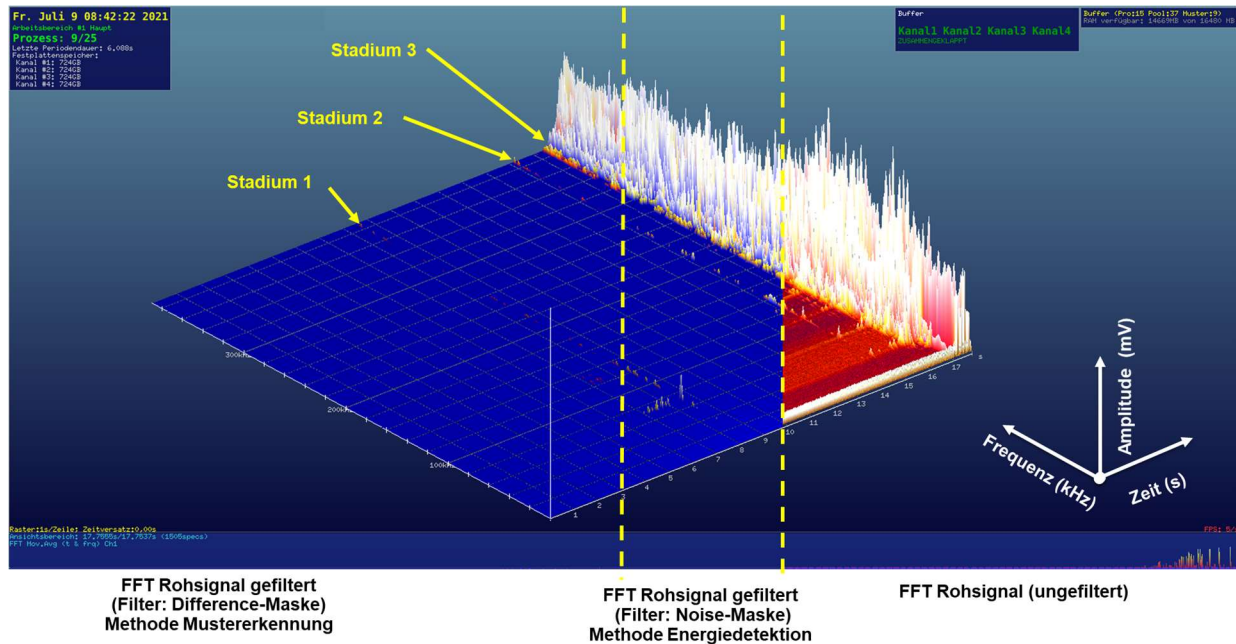


Abbildung 47: Fast-Fourier-Transformation-Rohsignal (Probentyp Nr. 1) mit Darstellung der Filtermethoden und typischen Merkmale

Aufgezeichnet wurden hier über der Zeit die Amplituden der Schallsignale mit der jeweiligen Frequenz. Dargestellt ist im rechten Bereich das ungefilterte Rohsignal mit den Maschinen-, Stör- und Hintergrundgeräuschen im niederfrequenten Bereich. Diese können durch die eingesetzten Filtermethoden der Difference-Maske (Abbildung 47, links) und der Noise-Maske (Abbildung 47, Mitte) herausgenommen werden. So können die durch Rissbildung und Risswachstum entstehenden AE-Signale ausgewertet werden. Für die bis zum Bruch der Proben aufgezeichneten AE-Signale wurden drei Stadien von Signalen jeweils über den gesamten untersuchten Frequenzbereich von 15 bis 400 kHz beobachtet. Stadium 1 wurde der Rissentstehung und dem Mikrorisswachstum zugeordnet, das für die Nachweisgrenze – kleinster möglicher nachzuweisender Riss – analysiert wurde. Die ersten beiden Stadien sind durch geringe Signalamplituden charakterisiert mit einer Zunahme von Stadium 1 zu Stadium 2 und einem zeitlichen Abstand zueinander. Auf Stadium 2 folgt unmittelbar Stadium 3 mit erheblich stärkeren Signalamplituden über den gesamten Frequenzbereich.

Abbildung 48 zeigt Aufnahmen des nach den Biegeversuchen aufgetretenen Bruchbildes. Im linken Bild ist eine lichtmikroskopische Aufnahme der Kerbe als Rissausgangsort zu sehen. Die beiden anderen Abbildungen zeigen die Aufnahmen der gebrochenen Federstahldrahtprobe aus der Computertomographie. Das beobachtete Bruchbild entsteht mit den in Stadium 3 (Abbildung 47) aufgezeichneten AE-Signalen.

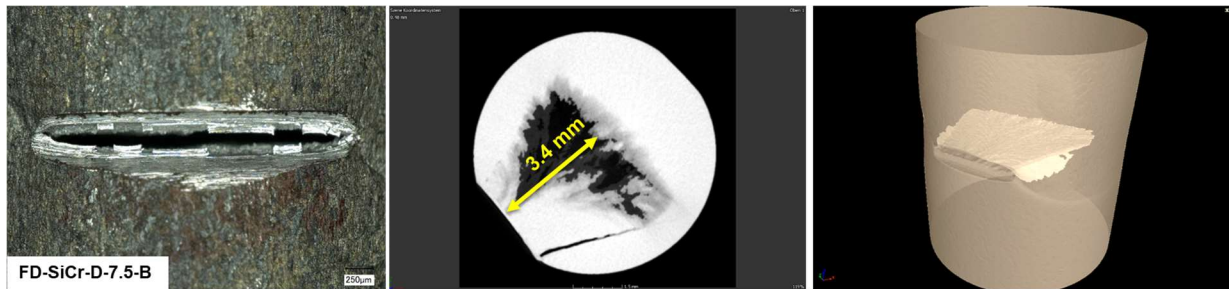


Abbildung 48: Aufnahmen einer gekerbten Biegeprobe nach dem Bruch (links: Lichtmikroskopie der Kerbe mit Riss; Mitte und rechts: Computertomographie-Aufnahmen mit Abmessungen und Umrandung der Bruchfläche)

Das Ziel für die nachfolgende Versuchsreihe war es, den Versuch zu unterbrechen, sobald mit einer geeigneten Analyseketten ein für Stadium 1 typisches Signal erkannt wird. Hierzu wurden die durch die Auswertesoftware bereitgestellten Methoden der Energiedetektion sowie der Mustererkennung untersucht. Bei der Methode der Energiedetektion wurde der Filter *Noise-Maske* der Auswertesoftware genutzt. Abbildung 49 zeigt die entsprechend gefilterten Signale. Für ein möglichst kleines Zeitfenster der Signalanalyse wurde der Frequenzbereich in drei Teile geteilt (f_1 von 15 kHz bis 155 kHz, f_2 von 155 kHz bis 300 kHz und f_3 von 300 kHz bis 400 kHz). Diese Aufteilung ermöglichte eine Auswertung der Energie der aufgezeichneten AE-Signale, die alle 10 ms stattfand. Innerhalb dieses Zeitfensters wurden die Amplituden der Fourier-Spektren aufsummiert. Die Ergebnisse der Energiedetektion für die drei Frequenzbereiche für Stadium 1 sind rechts in Abbildung 49 dargestellt. Auf Grundlage der AE-Messungen der ersten Versuchsreihe bis zum Bruch wurden Energieniveaus als empfohlene Grenzen ermittelt, bei deren Überschreiten ein Stopp-Signal über den Optokoppler an die Prüfmaschine übermittelt wurde. Da die gemessenen Amplituden der Schallsignale von den Gegebenheiten der Anlagentechnik abhängig sind, benötigt diese Methode immer eine Kalibrierung auf Maschinentyp, Werkstoff und Umgebungsgeräusche. Durch die Wirkung elektrischer Einkopplungen, neuer Signaltypen oder Prozessveränderungen können falsch-positive Meldungen bei dieser Methode nicht ausgeschlossen werden.

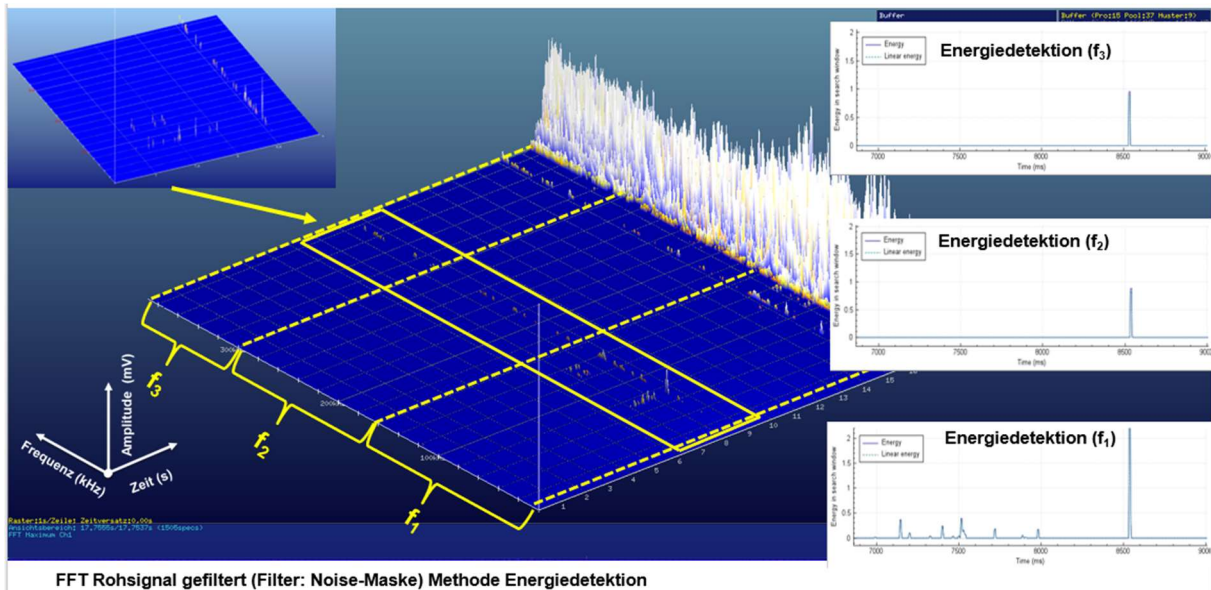


Abbildung 49: Fast-Fourier-Transformation-Rohsignal gefiltert (Filter *Noise-Maske* Methode *Energiedetektion*)

Die Ergebnisse, die unter Einsatz der Mustererkennung erzielt wurden, sind in Abbildung 50 dargestellt. Diese Methode beruht auf der Annahme, dass die Rissbildung im Federstahldraht ein charakteristisches Muster im Spektraldatendiagramm mit typischer Form und typischem Abklingverhalten über allen Frequenzbereichen erzeugt. Mit den entsprechenden Einstellungen der Auswertesoftware erfolgte ein Anlernen anhand der zuvor detektierten Rissmuster der unterschiedlichen Drahtvarianten. Wurde während der Biegeversuche eines von den angelesenen Mustern ähnliches AE-Signal detektiert, wurde mit dieser Analyseketten des AE-Systems der Versuch über den Optokoppler unterbrochen.

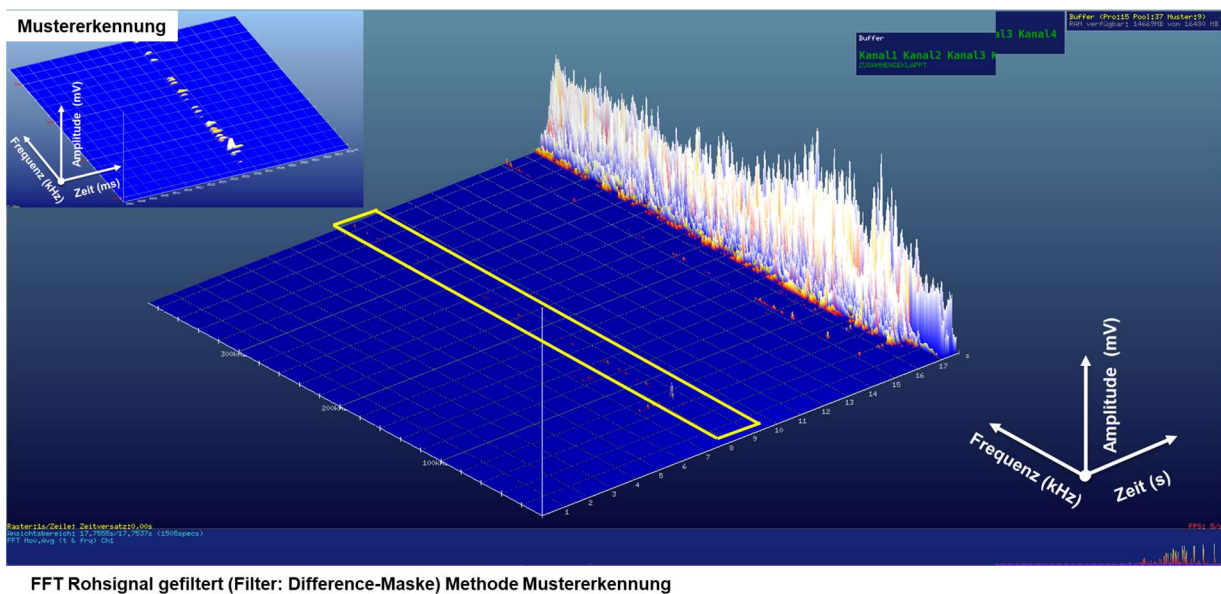


Abbildung 50: Fast-Fourier-Transformation-Rohsignal gefiltert (Filter *Difference-Maske* und Methode *Mustererkennung*)

Die Versuche an den in Tabelle 7 dargestellten gekerbten Biegeproben und den Einwindungsproben (jeweils drei Proben jedes Probenotyps) wurden unter Verwendung der beiden untersuchten Analysemethoden der Energiedetektion und der Mustererkennung durchgeführt. Bei allen Proben wurde nach dem Stopp des laufenden Versuchs aufgrund der Überschreitung der eingestellten Energiegrenzen bzw. des Auftretens des für die Rissbildung typischen Musters der Schallsignale eine CT-Untersuchung vorgenommen. Dabei konnte jeweils eine Rissentstehung für alle Proben nachgewiesen werden. Abbildung 51 zeigt hier exemplarisch die entsprechenden CT-Aufnahmen. Zu erkennen ist die Bildung eines Risses im Bereich des Kerbgrundes. Die Risstiefe wurde anhand der Schnittaufnahmen der Computertomographie bestimmt.

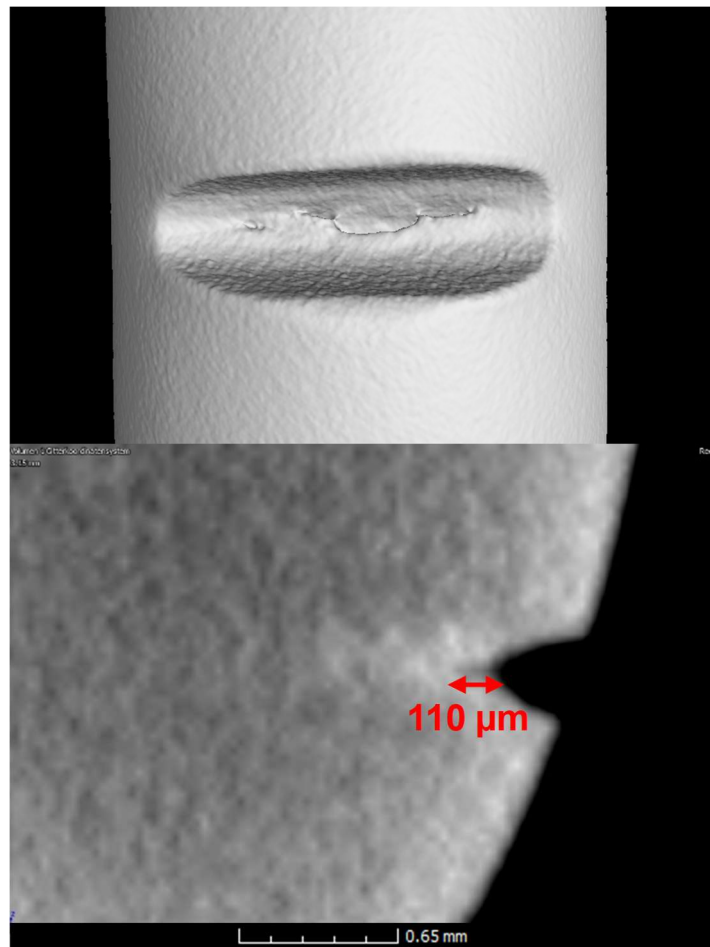


Abbildung 51: Computertomographie-Aufnahmen einer gekerbten Biegeprobe nach dem Stopp durch die In-situ-Analyse

Die Ergebnisse der Messung von Risstiefe und -länge sind für die Analysekette der Mustererkennung in Tabelle 10 dargestellt. Aufgeführt ist jeweils der Mittelwert über drei getestete Proben. Dabei lag die kleinste Risstiefe, bei der der Versuch gestoppt wurde, bei 40 µm für den Probenotyp Nr. 3 (FDSiCr). Abbildung 52 zeigt die CT-Aufnahmen und die Bruchflächen der

Einwindungsprobe für den Probentyp ohne und mit Kugelstrahlen. Die CT-Aufnahmen dokumentieren die für den mit der Methode der Mustererkennung unterbrochenen Versuch ermittelte Risstiefe. Bei weiterer Belastung bis zum Bruch des gesamten Querschnitts werden die oben gezeigten Bruchflächen freigelegt. Die Aufnahmen zeigen den Ort des Rissausgangs an der Innenseite der Windung und die jeweils für die drei Proben je Probentyp charakteristische Bruchfläche für den Zustand ohne und mit Kugelstrahlen der Einwindungsprobe.

Tabelle 10: Rissabmessungen in Tiefen- und Längsrichtung mittels der Computertomographie-Aufnahmen (Mittelwert über je drei Proben)

Probe	Material	Durchmesser [mm]	Risstiefe (Mustererken- nung) [µm]	Risslänge [µm]	Probenart
1.	SH	7,5	200	> 500	Draht
2.	DH	7,5	100	> 300	Draht
3.	FDSiCr	7,5	40	> 300	Draht
4.	VDSiCr	7,5	20	> 100	Draht
5.	VDSiCr	7,5	50	> 300	Draht
6.	1.4310	6	50	> 300	Draht
7.	1.4568	6	90	> 500	Draht
8.	VDSiCr	7,5	260	> 500	Einwindung ohne Kugel- strahlen
9.	VDSiCr	7,5	320	> 500	Einwindung mit Kugelstrahlen

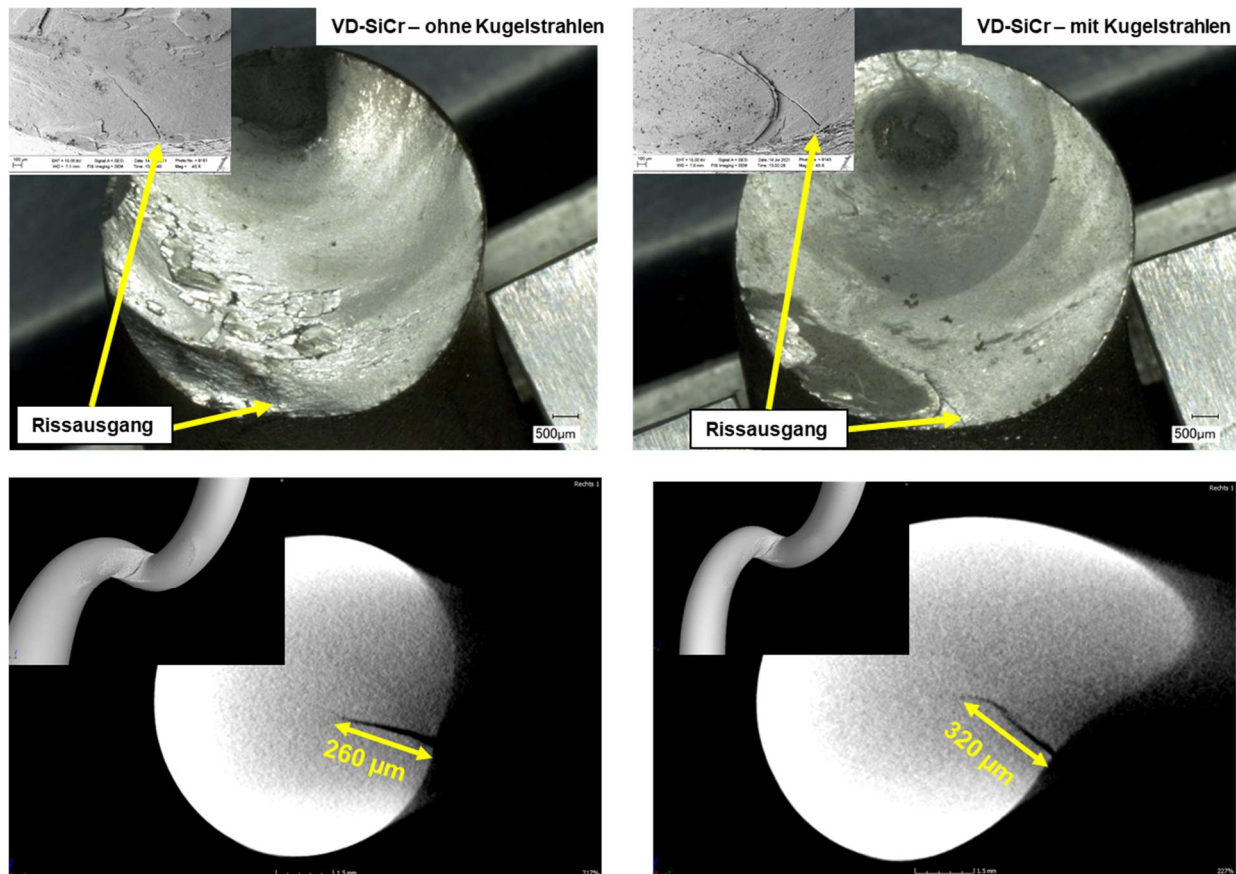


Abbildung 52: Linke Seite: Probenotyp Nr. 7 (Einwindungsprobe nicht kugelgestrahlt); rechte Seite: Probenotyp Nr. 8 (Einwindungsprobe kugelgestrahlt); untere Reihe: Computertomographie-Aufnahmen mit Bestimmung der Rissstiefe für die mittels Mustererkennung unterbrochenen Versuche; obere Reihe: Bruchflächenaufnahmen (Lichtmikroskop und Rasterelektronenmikroskop) nach weiterer Belastung bis zum Bruch des Querschnitts mit Rissausgang an der Oberfläche der Innenseite der Windung

Die gesamten Ergebnisse der AE-Messungen während der labortechnischen Versuche für den patentiert gezogenen und den ölschlussvergüteten Federstahl haben gezeigt, dass der Drahtdurchmesser, die Umformgeschwindigkeit, der gerichtete oder ungerichtete Zustand, die Oberflächenbeschaffenheit (nicht gestrahlt oder kugelgestrahlt) sowie die Drahtcharge innerhalb eines Werkstoffs im untersuchtem Umfang keinen Einfluss auf das risstypische Signal haben. Im Anhang

3 sind exemplarisch die AE-Ergebnisse für den VDSiCr-Draht in 3 mm und 7,5 mm bei einer jeweiligen Umformgeschwindigkeit von 1 und 30 mm/min gegenübergestellt.

Begleitend zu den Untersuchungen wurde eine Computertomographie durchgeführt, um die vom AE-Messsystem erkannten Risse zu bestätigen.

Die Ergebnisse wurden zur Interpretation und zur Zuordnung der Daten aus den AE-Messergebnissen verwendet, ebenso zur Bestimmung, ob die erfassten und aufgezeichneten AE-Signale auf die Mikrorisse zurückzuführen sind, die während der mechanischen Beanspruchung der Drahtproben im Material entstanden und/oder gewachsen sind. Abbildung 53 zeigt beispielhaft das Ergebnis der Messungen und die jeweiligen AE-Signale, die mit VDSiCr-Einwindungsprobe (A) und -Drahtbiegeprobe (B und C) aufgezeichnet wurden.

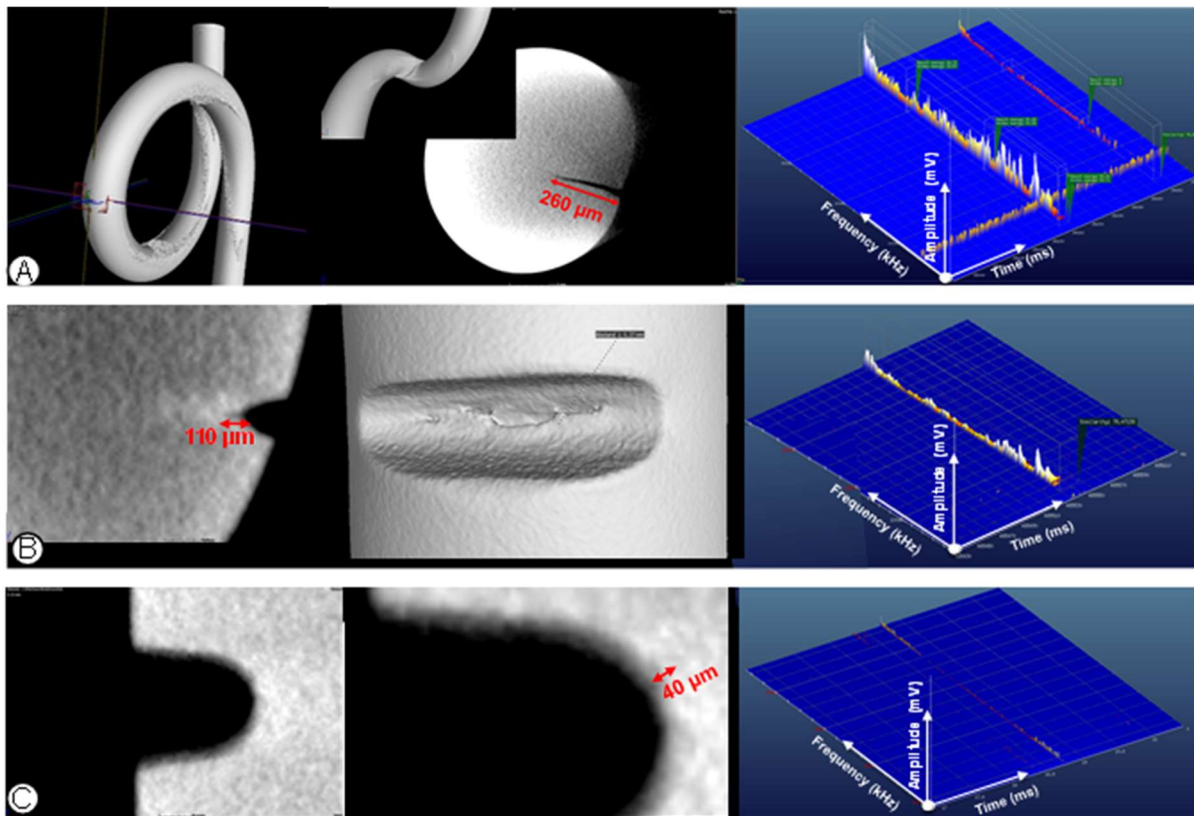


Abbildung 53: Ergebnisse aus den Akustischen-Emissions(AE)-Messungen zur Erkennung von Unterschieden in den AE-Signalen bei der Rissbildung nach verschiedenen Drahtmaterialien: A) Einwindungsprobe VDSiCr $d = 7,5$ mm mit Makroriss mit einer Länge von $260 \mu\text{m}$ und dem typischen Riss-AE-Signal. (darüber hinaus wurde nach dem Makroriss ein Mikroriss festgestellt) und gekerbte Biegeprobe mit einem Riss von $110 \mu\text{m}$ (B) und einem Mikroriss von $40 \mu\text{m}$ (C) und dem mit der Energiemethode erfassten risstypischen Signal

Die Makrorisse mit einer Länge von $260 \mu\text{m}$ (Abbildung 53, A) und einer Länge von $110 \mu\text{m}$ (Abbildung 53, B) befinden sich direkt am Kerbengrund, von wo aus diese in Richtung der Drahtachse verlaufen. In Abbildung 53 (C) sind die μCT -Ergebnisse des Mikrorisses mit einer Länge von $40 \mu\text{m}$ und das zugehörige AE-Signal dargestellt. Der Vergleich der detektierten Rissignale zeigt, dass die Signalintensität erwartungsgemäß mit abnehmender Risstiefe sinkt. Darüber hinaus wurde beobachtet, dass die Art des Stahls bzw. die Mikrostruktur – patentiert gezogen (feinlamellarer Perlit) oder ölschlussvergütet (homogenes feinkörniges Vergütungsgefüge) – einen Einfluss auf das jeweilige Muster des AE-Signals hat. Daraus folgt,

dass für jedes Material das spezifische Muster des AE-Signals im Bewertungsalgorithmus hinterlegt werden muss. Belegt wurde zudem, dass Chargeneinfluss, Drahtdurchmesser, Drahtstärke und Beanspruchungsart das AE-Signal nicht beeinflussen. Für die Rissdetektion bei derselben Werkstoffart sollte eine Ähnlichkeit von 75 % vorliegen. Liegt die Ähnlichkeit unter dem genannten Wert, können auch neue Arten von Werkstoffen, für die kein AE-Muster vorliegt, für die Rissdetektion verwendet werden. Aufgrund der geringeren Toleranz gegenüber Störgeräuschen steigt jedoch die Wahrscheinlichkeit, dass Störgeräusche als Risse fehlinterpretiert werden.

Die umfangreichen labortechnischen Untersuchungen am VDSiCr-Draht- und -Federmaterial sowie die Analyse der Ergebnisse haben gezeigt, dass Schmelz- und Materialcharge einer Werkstoffart, Drahtdurchmesser sowie Beanspruchungsart und -geschwindigkeit keinen Einfluss auf das risstypische AE-Signal haben, die jeweilige Art des Werkstoffs (ölschlussvergütet bzw. patentiert gezogen) hingegen Einfluss nimmt. Es wurde mit der μ CT und/oder im metallographischen Schliff nachgewiesen, dass an allen untersuchten Proben, die ein risstypisches AE-Signal aufwiesen, auch tatsächlich Risse vorhanden waren. Der kleinste erzeugte und mittels AE sowie im Schliff belegte Riss weist eine Länge von 20 μ m auf. Abbildung 54 zeigt das detektierte risstypische AE-Signal mit dem dazugehörigen tomografischen Nachweis sowie das Ergebnis der metallographischen Zielpräparation eines Mikrorisses mit einer Länge von 20 μ m [LOR22, LOR23].

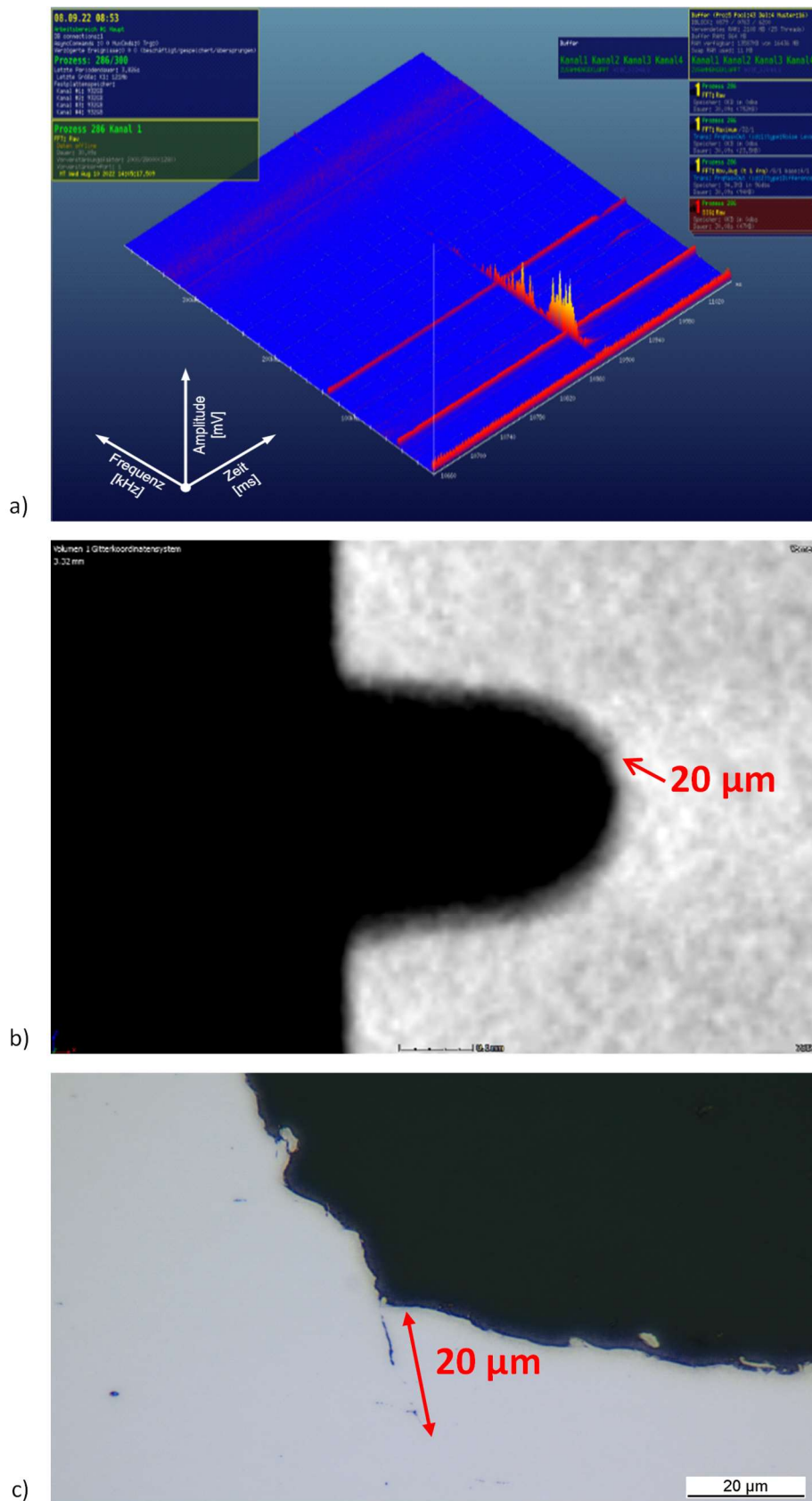


Abbildung 54: Während des Biegeversuchs am gekerbten VDSiCr-Federdraht (mit einem Durchmesser von 7,5 mm) detektiertes AE-Signal (a). Korrelative Analyse mittels Mikrotomographie (b) sowie lichtmikroskopische Aufnahme der zielpräparierten Probe (c) zeigen einen Mikroriss von ca. 20 μm im Kerbgrund

Hochlegierte korrosionsbeständige Drähte

Die umfangreichen labortechnischen Untersuchungen am ölschlussvergüteten und patentiert gezogenen Draht- und Federmaterial haben gezeigt, dass Schmelz- und Materialcharge einer Werkstoffart sowie die prozessgebenden Faktoren keine Auswirkungen auf das risstypische AE-Signal haben, aber ein materialabhängiger Einfluss auf das Signal vorliegt. Dies wurde ebenso exemplarisch an den hochlegierten Drahtvarianten überprüft und nachgewiesen. Mittels μ CT und/oder im metallografischen Schliff wurde belegt, dass an allen untersuchten Proben, die ein risstypisches AE-Signale aufwiesen, auch tatsächlich Risse vorhanden waren. Exemplarisch zeigt Abbildung 55 (A) das Signalbild mit insgesamt sieben risstypischen AE-Signalen, die auf ein fortschreitendes Risswachstum oder das Entstehen neuer Risse zurückzuführen sind. Bei der dazugehörigen tomographischen Untersuchung konnte kein Nachweis erbracht werden (Abbildung 55 B). Die anschließende REM-Untersuchung zeigt zwei Rissöffnungen von wenigen Mikrometern (Abbildung 55 C). Bei der danach erfolgten metallographischen Zielpräparation wurden Risse mit einer Tiefe zwischen 25 μ m und 185 μ m nachgewiesen (Abbildung 55 D).

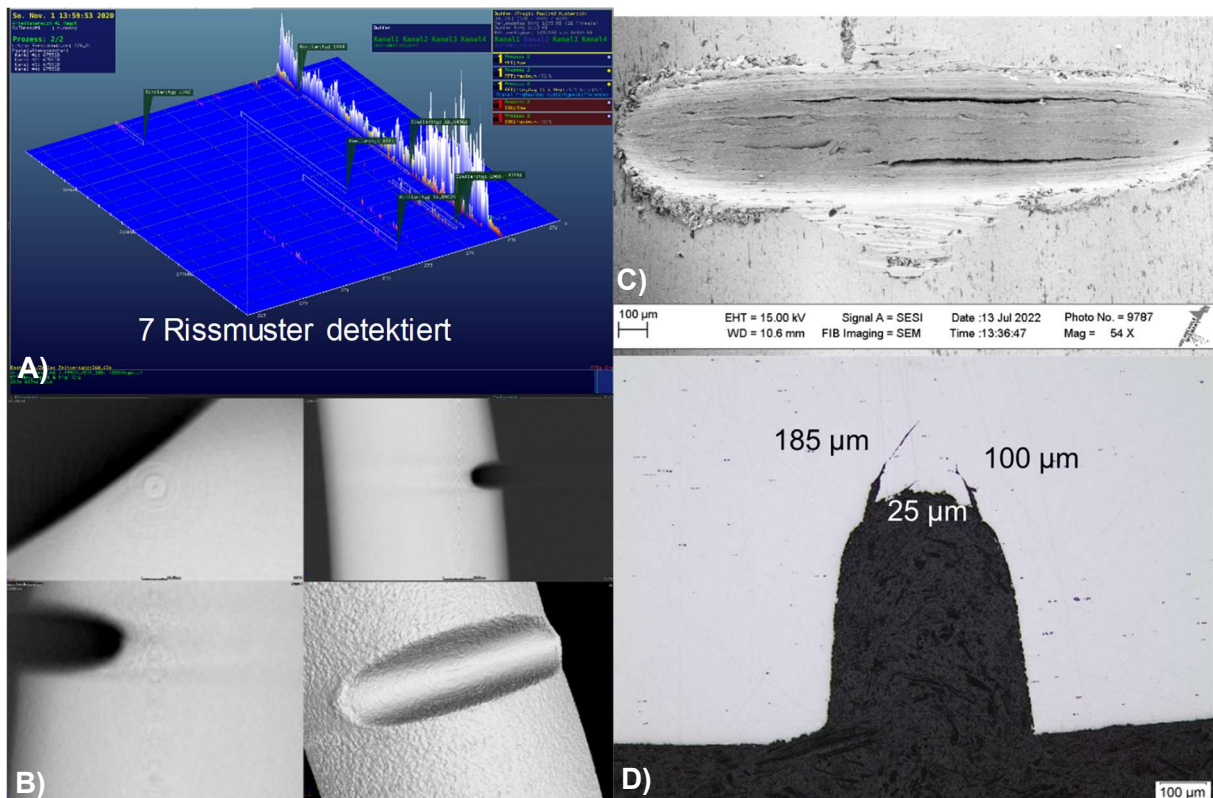


Abbildung 55: Biegeprobe 1.4568, $d = 3$ mm mit A) detektierten AE-Signalen, B) Computertomographie-Aufnahme von der Kerbe, C) Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme mit zwei Rissen und D) mikroskopischer Aufnahme nach der Zielpräparation mit drei Rissen

Zur Verifizierung wurden bei einer weiteren Probe durch die metallographische Zielpräparation mindestens drei Risse mit einer Länge zwischen 10 μm und 100 μm den detektierten AE-Signalen mit zwei typischen Rissmustern zugeordnet (Abbildung 56).

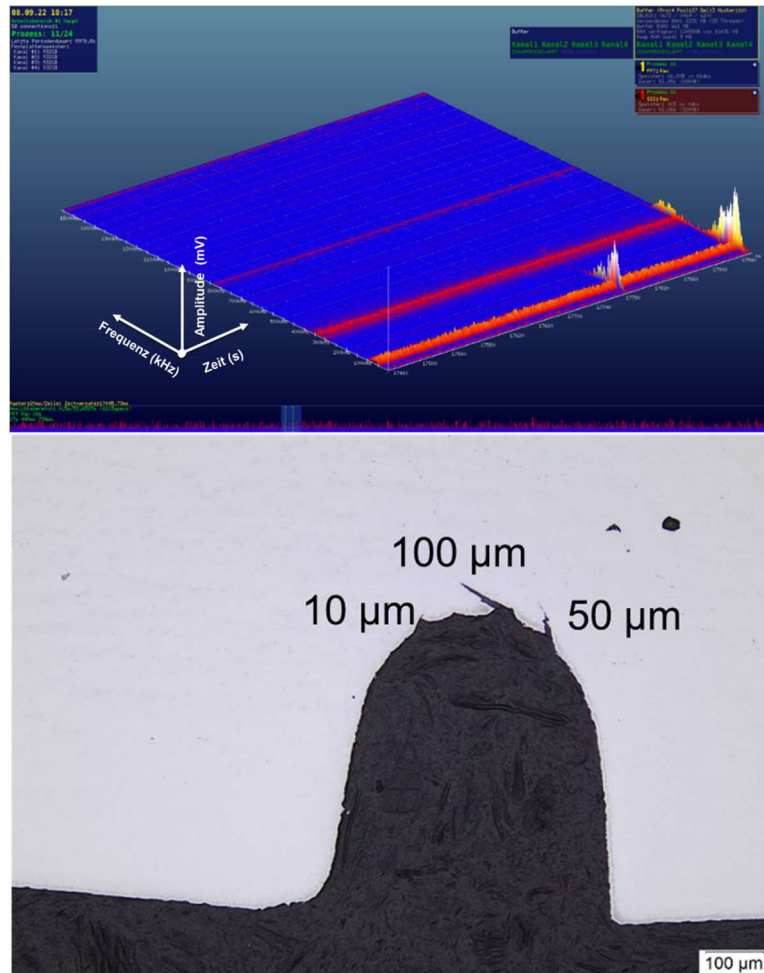


Abbildung 56: Biegeprobe 1.4310, $d = 3 \text{ mm}$

Basierend auf den Erkenntnissen wurde eine materialabhängige Rissmuster-Bibliothek für die automatisierte In-situ-Rissdetektion aufgebaut. Durch die Definition von Störgeräuschen und die Entwicklung eines Algorithmus (softwareinterne Objektprogrammierung) erfolgten eine Anpassung an die jeweiligen mechanischen Prozesse sowie eine Optimierung. Diese Rissmusterbibliothek bildet die Grundlage zur Einführung der Messtechnik in den industriellen Prozess. Jeder im PbA erhält somit mit dem Abschlussbericht die digitale Version der Musterbibliothek und kann die Messtechnik ohne vorheriges erneutes Anlernen von Mustern im jeweiligen Unternehmen einsetzen. Es müssen nur die für die jeweilige Maschinenhalle typischen Störgeräusche identifiziert werden, um diese in den Messungen herausfiltern zu können.

Signalcharakterisierung

Für die Charakterisierung der gesamten AE-Signale nach der FFT wurden die Signale hinsichtlich der Quelle (z. B. Maschinen-, Stör- und Hintergrundgeräusch) untersucht und zugeordnet. Alle für die Untersuchung nicht relevanten Signale sind wie in vergleichbaren Studien bereits beschrieben [SCR85, RAU04, SHI10], zeitlich unbegrenzt und dem niederfrequenten Bereich zugeordnet. Somit ist die Unterscheidung von Rissignalen, die über den gesamten Frequenzbereich auch bei z. B. hohem Aufkommen an Störgeräuschen, wie es beim Federnwinden auftreten kann, möglich.

Signalintensität

In den umfassenden labortechnischen Untersuchungen wurden für jedes Material die unterschiedlichen Arten (Bruch, Makroriss, Mikroriss) im Biegeversuch erzeugt und anschließend an den Proben mittels μ CT nachgewiesen. Ein weiteres Ziel war es, zu ermitteln, ob zwischen Signalintensität und Rissgröße ein Zusammenhang, wie in der Literatur beschrieben, festgestellt werden kann. Diesbezüglich ist darauf hinzuweisen, dass die theoretische Berechnung darauf beruht, dass der Riss immer an der gleichen Stelle unter bekannten/definierten Bedingungen – Voraussetzung eines idealen homogenen Gefüges – mit der gleichen Geometrie auftritt. Hinsichtlich der festgestellten Zunahme der Energie im Vergleich von Mikro- zu Makrorissen bei labortechnischen Versuchen unter ähnlichen Bedingungen ist ein Vergleich mit der Theorie von Bruchmechanik und Akustik erforderlich. Hierzu soll ergänzend zu Kapitel 2.4.1 die Energiefreisetzungsrates betrachtet werden.

Die Anwendung der linear-elastischen Bruchmechanik ist für alle Materialien geeignet, die hauptsächlich ein globales und lokales linear-elastisches Verhalten aufweisen, z. B. Keramik und hochfeste Metalle. Die auf einen infinitesimalen Rissfortschritt dA bezogene freigesetzte Energie $d\Pi$ wird *Energiefreisetzungsrates* G (*energy release rate*) genannt (Gl. 5.1).

$$G = -\frac{d\Pi}{dA} \quad (\text{Gl. 5.1})$$

Im reinen Modus I besteht nach Gross und Seelig [GRO16] eine eindeutige Beziehung zwischen Bruchzähigkeit K_I (hochfeste Stähle 25 ... 95 [MPa $\sqrt{\text{m}}$] 1600 ... 2000 $Rp0,2$ [MPa]) und der *Energiefreisetzungsrates* G , wobei zur Rissentstehung das folgende Kriterium erfüllt sein muss:

$$G = G_c \quad (\text{Gl. 5.2})$$

Darin ist G_c ein Materialkennwert, der *Risswiderstand* oder *Risswiderstandskraft* genannt und mit Gleichung 5.3 berechnet wird.

$$G_c = \frac{K_{Ic}^2}{E} \quad (\text{Gl. 5.3})$$

Wegen des unmittelbaren Zusammenhangs wird G_c häufig, genau wie K_{Ic} , auch als *Bruchzähigkeit* bezeichnet. Demnach ist die Energiefreisetzungsrate abhängig vom E-Modul und somit von der kristallographischen Gitterstruktur.

Aus Sicht der Akustik (vgl. Kapitel 2.4.1 hängt die Ausbreitung der Schallwellen von den Materialeigenschaften, z. B. dem Elastizitäts- und Schubmodul, sowie die Dämpfung innerhalb des Materials ab. Damit kann zusammengefasst werden, dass ein unmittelbarer Zusammenhang zwischen der Signalintensität (freigesetzte Energie, Dämpfung) bei gleichbleibenden Versuchsbedingungen und gleichbleibendem E-Modul der Gitterstruktur besteht. Für die Berechnungen in realen Versuchen gehen weitere Parameter, beispielsweise die Position des Detektors, die Art der Anbringung und das Anzugsmoment mit ein, die eine Zuordnung zur Signalintensität derzeit nicht zulassen.

Signalausprägung

In den labortechnischen Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass die Art des Werkstoffs bzw. die Mikrostruktur – patentiert gezogen (feinlamellares Perlit), ölvergütet (homogene feinkörnige Vergütungsstruktur) oder hochlegiert – einen Einfluss auf das AE-Signal hat. Laut der Literatur wurden bisher einzelne oder vergleichend zwei Materialien betrachtet, wobei keine Untersuchungen hinsichtlich des Zusammenhangs zwischen Mikrostruktur und AE-Signal stattfanden. Diese Betrachtung ist nur relevant, sobald eine hohe Wahrscheinlichkeit und damit hohe Prozesssicherheit, Risse zu detektieren, erreicht werden soll. Durch die Feinabstimmung bei der softwareinternen Mustererkennung konnten minimale Unterschiede des Signalmusters bei verschiedenen Arten von Werkstoffen festgestellt werden, die auf die unterschiedlichen Gefügestrukturen, Gitterkonstanten a , E-Module und daraus resultierende Energiefreisetzungsraten, Dämpfungen innerhalb des Material sowie Schallgeschwindigkeiten v (transversal, longitudinal) zurückzuführen sind [GRO16].

Für die Anwendung im industriellen Umfeld sollte das für die 5 Ergebnisse und Interpretation Muster ausgewählt und eine Ähnlichkeit von 75 % angewendet werden:

1. Wird ein vorhandenes materialspezifisches AE-Muster z. B. für ein neues Material herangezogen, muss eine Ähnlichkeit von 65 % angewendet werden.

2. Aufgrund der geringeren Toleranz gegenüber Störgeräuschen kann dadurch die Wahrscheinlichkeit, dass Störgeräusche als Risse fehlinterpretiert werden, steigen.
3. Der Einsatz vorhandener AE-Muster zur Rissdetektion bei neuen Werkstoffen ist durch eine softwareinterne Anpassung sowie Anlernen grundsätzlich möglich.

5.2 Ergebnisse der Erprobung in der industriellen Praxis

Für die Übertragung der In-situ-Rissdetektion in das industrielle Umfeld wurden bei zwei Unternehmen Versuche an Windemaschinen durchgeführt. Hierbei konnten mit den Ergebnissen und Erkenntnissen aus den labortechnischen Versuchen sowie der programmierten Mustererkennung die rissbehafteten Federn sofort erkannt und für metallographische, rasterelektronenmikroskopische sowie tomographische Untersuchungen während der Versuche entnommen werden. Zur statistischen Absicherung wurden rund 100 Federn, bei denen ein risstypisches Signal detektiert worden war, entnommen. Die markantesten Proben wurden für die korrelativen Analysen ausgewählt. Bei der Untersuchung mittels μ CT konnten zunächst die tatsächlichen Risse in den Federn zu den detektierten risstypischen AE-Signalen nicht nachgewiesen werden. Bei einer untersuchten Feder konnte mittels Rasterelektronenmikroskopie ein Mikroriss von 20 μm festgestellt und dem AE-Signal zugeordnet werden (Abbildung 57).

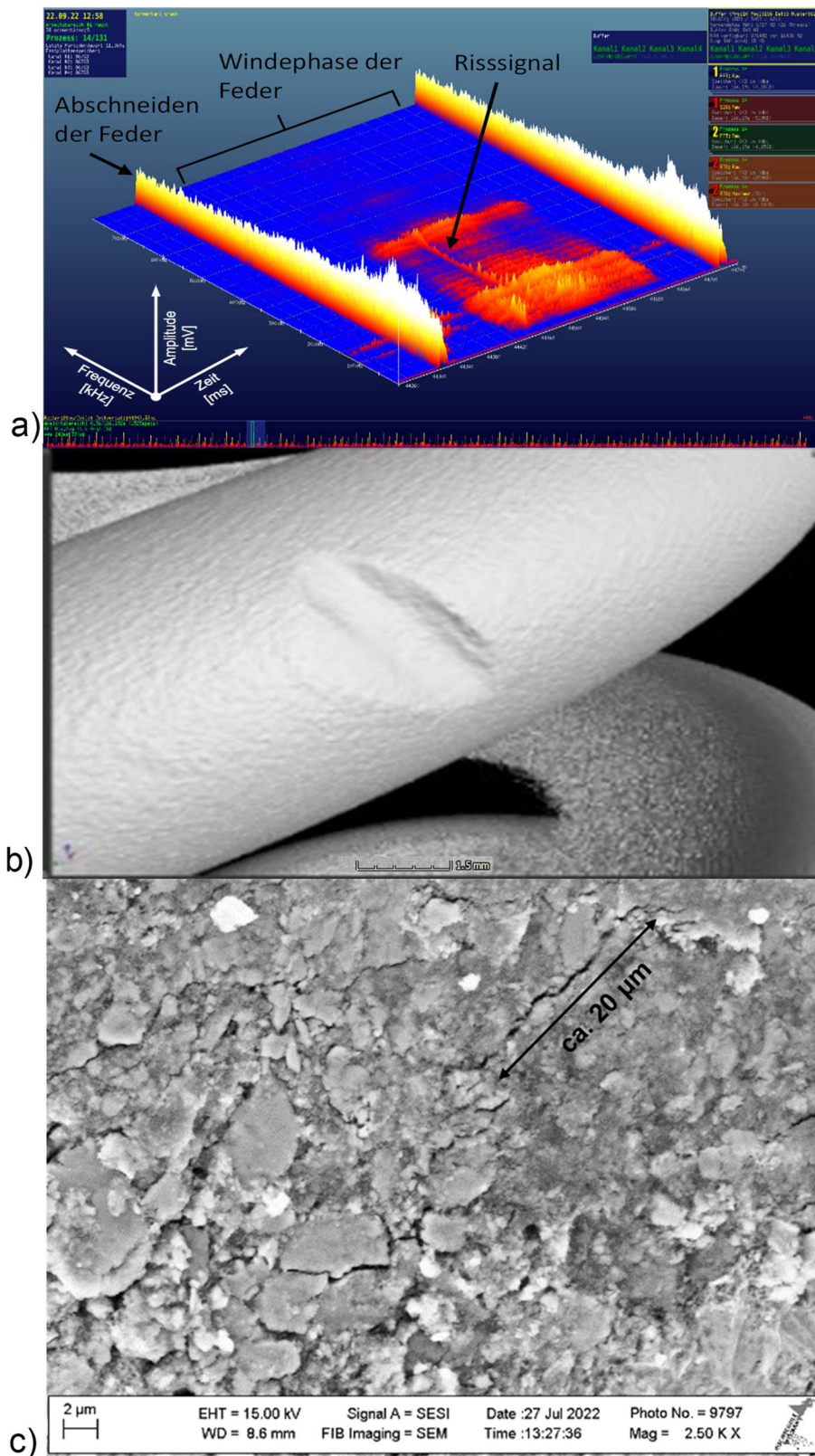


Abbildung 57: a) Dreidimensionale Darstellung der detektierten Signale mit Abschneiden der Feder, Windeprozess mit Reibgeräuschen und risstypischem Akustischen-Emissions-Signal von einem Mikroriss während der Windephase; b) korrelative Analyse mittels Mikrocomputertomographie vom Kerbgrund ohne erkennbaren Riss; c) Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme der Federprobe mit einer zuvor eingebrachten Kerbe, in der durch die hohen Umformgrade und -geschwindigkeiten ein Riss von 20 µm initiiert wurde (Oberfläche teilweise verzundert)

Bei einer weiteren Probe konnte mittels metallographischer Zielpräparation ein Riss nachgewiesen werden – Mikroriss mit einer Risstiefe von 25 μm im Kerbgrund –, der dem detektierten risstypischen AE-Signal zugeordnet werden konnte (Abbildung 58).

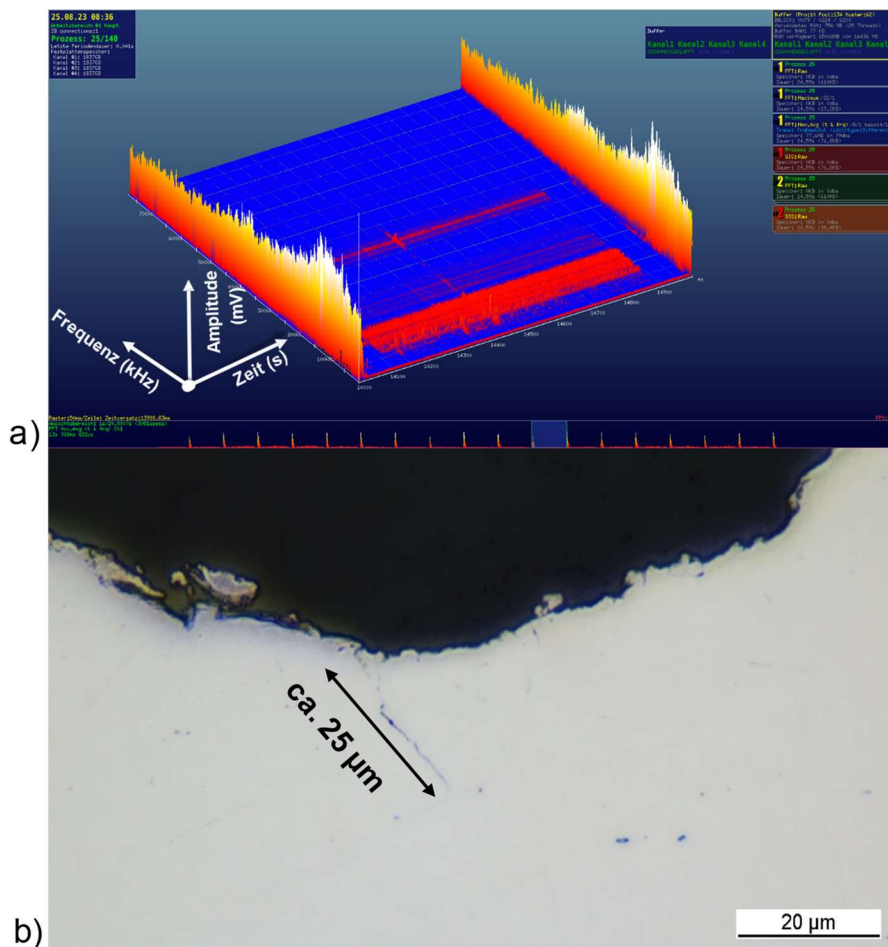


Abbildung 58: a) Dreidimensionale Darstellung der detektierten Signale mit dem risstypischen akustischem Signal von einem Mikroriss während der Windphase; b) Aufnahme der metallographischen Zielpräparation, bei der ein Mikroriss von 25 μm nachgewiesen wurde

Zur Absicherung der Ergebnisse wurden weitere Federproben, bei denen ein typisches AE-Signal detektiert wurde, einer rasterelektronenmikroskopischen Untersuchung und/oder einer Zielpräparation unterzogen. Bei einer anderen Probe konnte mittels REM ein Riss mit einer Länge von 150 μm nachgewiesen werden (Abbildung 59). Insgesamt konnten drei detektierte AE-Signale Rissen, die während der Industrierversuche beim realen Federwinden entstanden sind, mittels Rasterelektronenmikroskopie und metallographischer Zielpräparation zugeordnet werden.

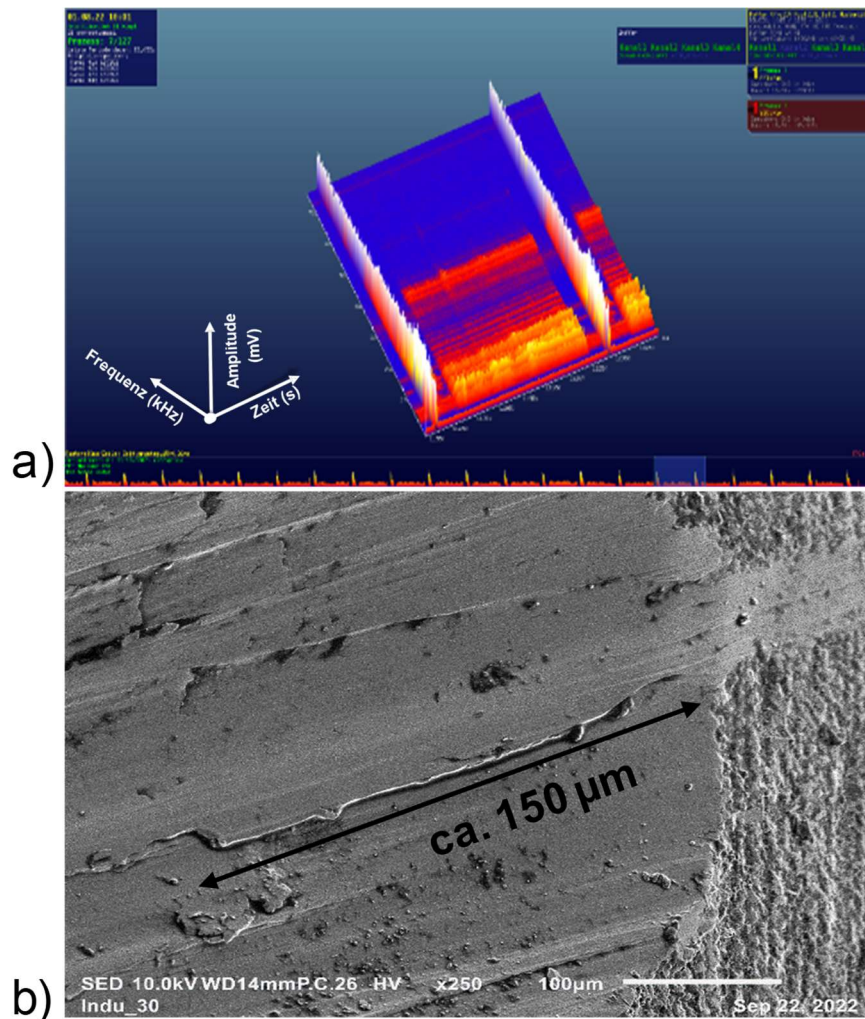


Abbildung 59: a) Dreidimensionale Darstellung der detektierten Signale mit einem rissstypischen akustischem Signal im vorderen Abschnitt der Windphase; b) Rasterelektronenmikroskopie-Aufnahme der Federprobe mit einer zuvor eingebrachten Kerbe, in der durch die hohen Umformgrade und -geschwindigkeiten ein Riss von 150 µm initiiert wurde

Ein wesentliches Ziel bestand darin, aufbauend auf den Ergebnissen und Erkenntnissen aus den labortechnischen Untersuchungen die AE-Analyse mitsamt den im Vorfeld programmierten Analyseketten, die auf die im Rahmen dieser Arbeit neu erstellte Musterbibliothek zurückgreifen, in den industriellen Einsatz (exemplarisch auf den Prozess des Federwindens) zu übertragen. Es wurde gezeigt, dass das QASS-Analysesystem für die In-situ-Rissdetektion beim Federwinden unter realen Bedingungen im industriellen Umfeld integriert werden kann. Hierzu wurden für die industrielle Anwendung verschiedene Positionen der AE-Detektoren an konventionellen Windemaschinen aufgezeigt. Laut der Literatur [SAU18] sollte für eine optimale AE-Messung der Abstand zwischen Schallquelle und Detektor möglichst gering sein.

Tritt eine Körperschallwelle von einem Material in ein anderes über (etwa vom Werkstück in die Werkstückaufnahme), so wird an der Grenzfläche ein Teil der einlaufenden Schallwelle reflektiert, tritt also nicht über. Der restliche Teil wird transmittiert. Das Verhältnis zwischen reflektiertem und transmittiertem Anteil ist dabei abhängig von den beiden Materialien. Grundsätzlich gilt: Je identischer die Materialien in ihren akustischen Eigenschaften (d. h. Dichte und Festigkeit) sind, desto besser kann eine Körperschallwelle überkoppeln.

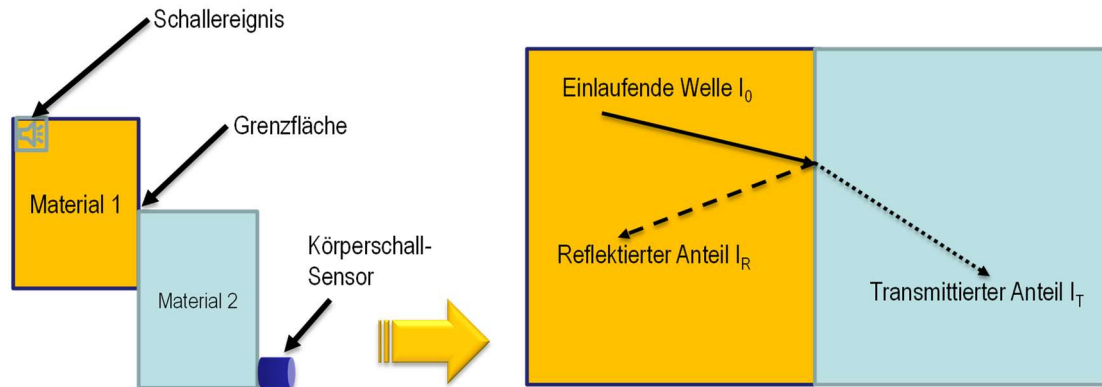


Abbildung 60: Verhalten von Schallwellen an Grenzflächen mit dem reflektierten Anteil I_R und der einlaufenden Welle I_0 [QAS17]

Die ‚akustische Ähnlichkeit‘ wird durch die *Schallimpedanz* Z beschrieben:

$$Z = \rho c \quad (\text{Gl. 5.4})$$

Mit der Gleichung für die Schallimpedanz lässt sich transmittierter Anteil I_T berechnen:

$$I_T = 1 - I_R \quad (\text{Gl. 5.5})$$

Mit
$$I_R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (\text{Gl. 5.6})$$

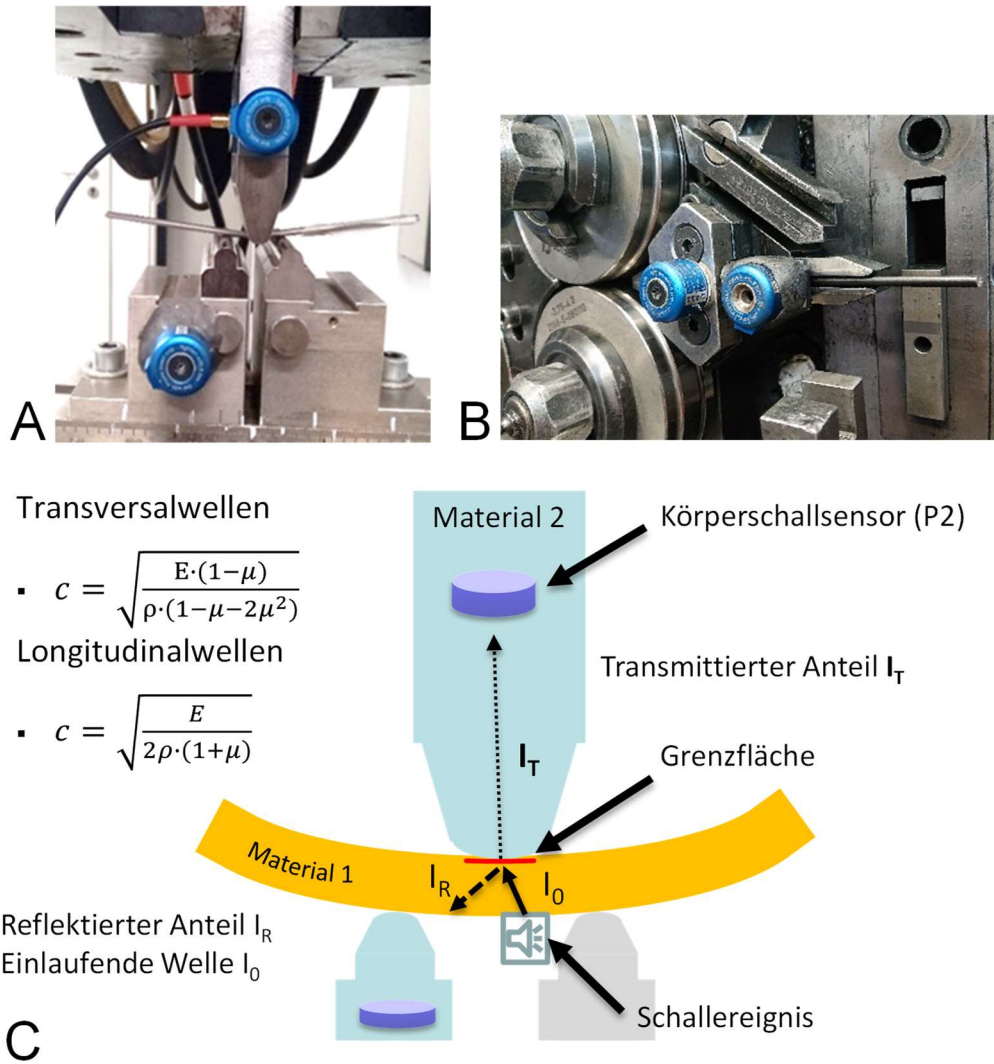


Abbildung 61: Darstellung der Grenzflächen im Biegeversuch (A) sowie im Vergleich dazu beim Federnwinden an der Windmaschine (B); schematische Darstellung der einlaufenden Wellen mit dem reflektierten und transmittierten Anteil (C) [QAS17]

Exemplarisch kann durch gegebene Kenngrößen (Tabelle 11) und Gleichung 5.4 der gemessene transmittierte Anteil abgeschätzt werden.

Tabelle 11: Parameter für die Betrachtung der akustischen Ähnlichkeit

Material	ρ [kg/m ³]	c [m/s]	Z_F [kg/m ² s]
Luft	1,204	331,5	428,3
Stahl	7800	6000	45×10^6

Den Versuchen zufolge führt die Positionierung der Detektoren in allen fünf vorgeschlagenen Fällen zu einer gleichbleibenden hohen Signalausbeute. Zur abschließenden Validierung wurden die Positionen der Detektoren den Mitgliedern des PbA, unter Einbezug von Anwendern aus der Federindustrie, dargestellt und ausführlich diskutiert – die Eignung der Positionen wurde bestätigt.

Für den Beleg, dass die AE-Technik zur In-situ-Detektion von Rissentstehung und -wachstum beim Federwinden eingesetzt werden kann, wurden bei allen untersuchten Federproben aus den Industrierversuchen, bei denen ein risstypisches Signal detektiert wurde, Risse durch die metallographische Zielpräparation nachgewiesen. Ferner konnte bereits die Anbindung vom Messgerät zur Maschine (Prüfmaschine) gezeigt werden, sodass insgesamt die Implementierung in die industrielle Anwendung bewiesenermaßen möglich ist [LOR22, LOR24].

5.3 Ergebnisse der Schädigungsmechanismen

Für die vergleichenden Untersuchungen zur Ausprägung der AE-Signale resultierend aus dem Schädigungsmechanismus wurden zunächst vorgekerbte Drahtproben im Anlieferungszustand mechanisch bis zum Bruch beansprucht (duktiler Wabenbruch). Das detektierte risstypische AE-Signal für einen duktilen Wabenbruch, der hauptsächlich in den labortechnischen Versuchen erzeugt wurde, weist eine hohe Amplitude im niedrigen Frequenzbereich auf, die exponentiell bis zum erneuten Anstieg bei 800 kHz abfällt (trompetenförmig; Abbildung 62).

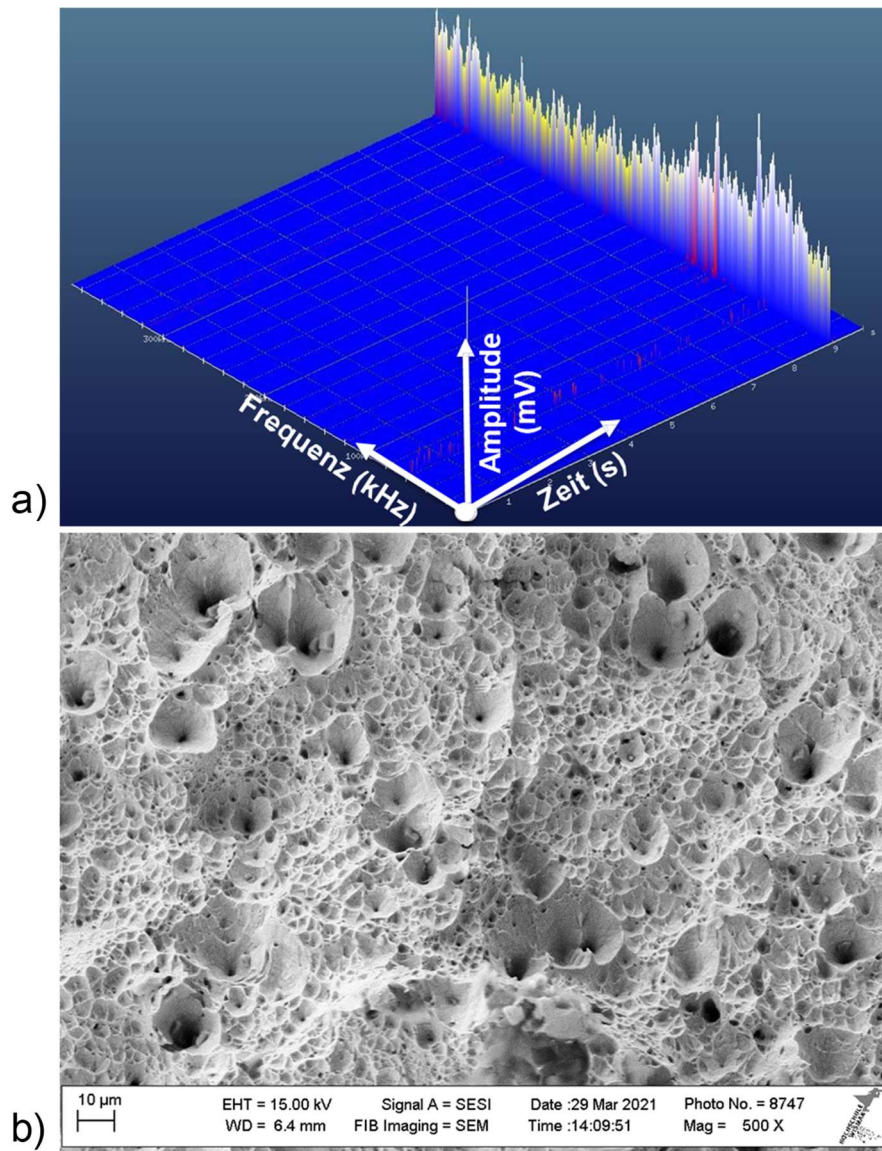


Abbildung 62: Untersuchte Probe im Anlieferungszustand, Biegeversuch an gekerbtem Draht bis Bruch; a) akustisches Signal nach der FFT zeigt eine hohe Amplitude bei 100 kHz, die über den Frequenzbereich exponentiell abklingt und im höheren Frequenzbereich wieder (trompetenförmig) steigt; b) Korrelativ zeigt die Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme das duktile Versagen

Für die Tieftemperaturbeanspruchung wurden VDSiCr-Drahtproben für 20 min in einem Behälter mit flüssigem Stickstoff (ca. $-190\text{ }^{\circ}\text{C}$) gelagert und anschließend unter CO_2 -Kühlung mittels Sprühvorrichtung im Dreipunktbiegeversuch bis zum Probenbruch beansprucht. Das riss-typische AE-Signal aufgrund einer Tieftemperaturbeanspruchung zeigt eine hohe Amplitude bei 100 kHz, die über den Frequenzbereich kontinuierlich abklingt. Die Bruchmikrostruktur des Sprödbruchs ist ein transkristalliner Spaltbruch mit geringen Anteilen eines duktilen Wabenbruchs (Abbildung 63).

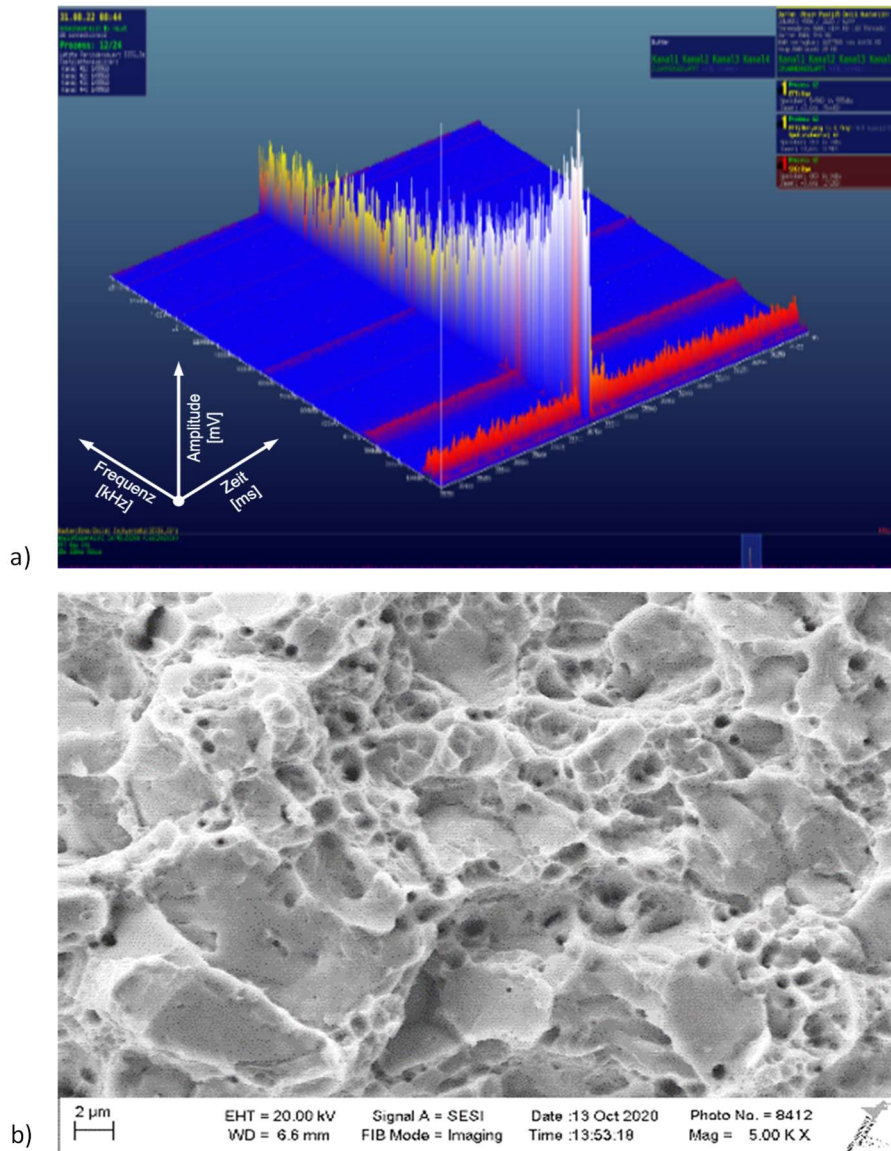


Abbildung 63: Untersuchte Probe im Anlieferungszustand wurde im Biegeversuch bis zum Bruch mechanisch beansprucht; a) akustisches Signal nach der Fast Fourier-Transformation zeigt eine hohe Amplitude bei 100 kHz, die über den Frequenzbereich abklingt; b) Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme zeigt einen transkristallinen Spaltbruch mit geringen Anteilen eines duktilen Wabenbruchs

Es war geplant, bei weiteren Versuchen einen transkristallinen Spaltbruch aufgrund einer unzulässigen Wärmebehandlung hervorzurufen. Hierzu wurden die Proben bei 950 °C für 30 min im Ofen gelagert, mit Wasser (20 °C) abgeschreckt und im Dreipunktbiegeversuch beansprucht. Die anschließende Untersuchung mittels REM zeigte entgegen der Erwartung einen interkristallinen anstelle eines transkristallinen Spaltbruchs. Durch die Bestimmung der Korngröße wurde festgestellt, dass die unzulässige WBH, die hohe Ofentemperatur und vor allem die lange Verweilzeit zur Kornvergrößerung mit interkristallinem Versagen geführt haben. Der Korndurchmesser d lag vor dem Versuch bei 7 bis 10 µm und nach dem Versuch zwischen 30 und 50 µm. Abbildung 64 zeigt das während der Beanspruchung detektierte AE-Signal. Im

Vergleich zu den zuvor detektierten Signalen ist eine deutliche Ausprägung der Amplitude über die Zeitachse zu erkennen.

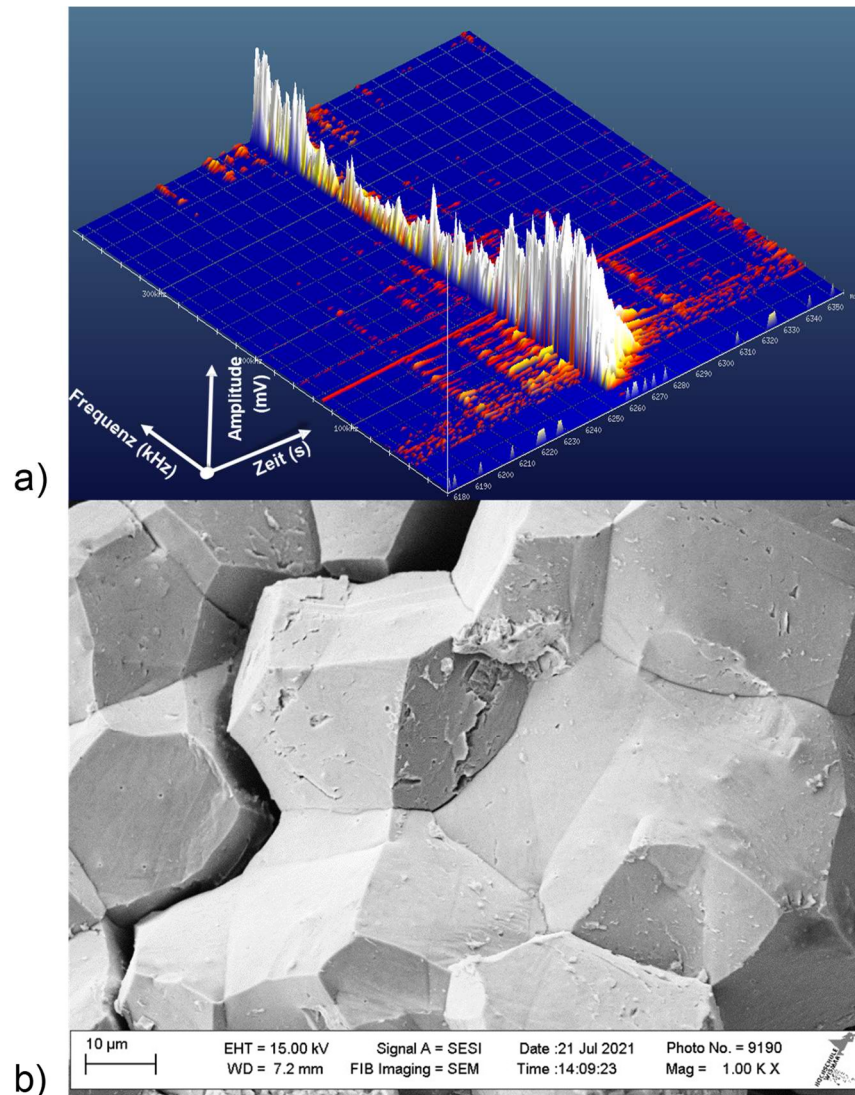


Abbildung 64: a) akustisches Signal nach der Fast Fourier-Transformation zeigt ein hohe Amplitude bei 100 kHz, die über den Frequenzbereich deutlich abklingt; signifikant ist die ausgeprägte Amplitude über den Zeitbereich (Nachhallen). b) Korrelativ zeigt die Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme das interkristalline Versagen aufgrund einer unzulässigen Wärmebehandlung

Bei zwei weiteren Versuchen sollte die Plausibilität der Ergebnisse hinsichtlich der unterschiedlichen Signalausprägung sowie der Wiederholbarkeit bei interkristalliner Rissbildung und Versagen überprüft werden. Hierzu wurden VDSiCr-Drahtproben einer 30-minütigen Wärmebehandlung bei 850 °C unterzogen und anschließend in Öl abgeschreckt. Danach wurden die Proben zusätzlich mit 8%iger Salzsäure während des Biegeversuchs behandelt.

In der weiteren Untersuchung wurden VDSiCr-Drahtproben leicht vorgespannt in Salzsäure-Atmosphäre (28 %) für 48 h in einem Behälter gelagert und anschließend unter kontinuierlicher Salzsäurezufuhr im Biegeversuch beansprucht. Bei beiden Untersuchungen wurden die gleichen AE-Signalmuster über den Zeitbereich festgestellt. Die folgenden Abbildungen zeigen das detektierte AE-Signal nach der WBH und Salzsäurebehandlung (Abbildung 65) mit der jeweiligen korrelativen REM-Aufnahme von interkristallinen Versagen sowie bei alleiniger Salzsäurebehandlung (Abbildung 66) mit der jeweiligen korrelativen REM-Aufnahme von interkristallinem Versagen.

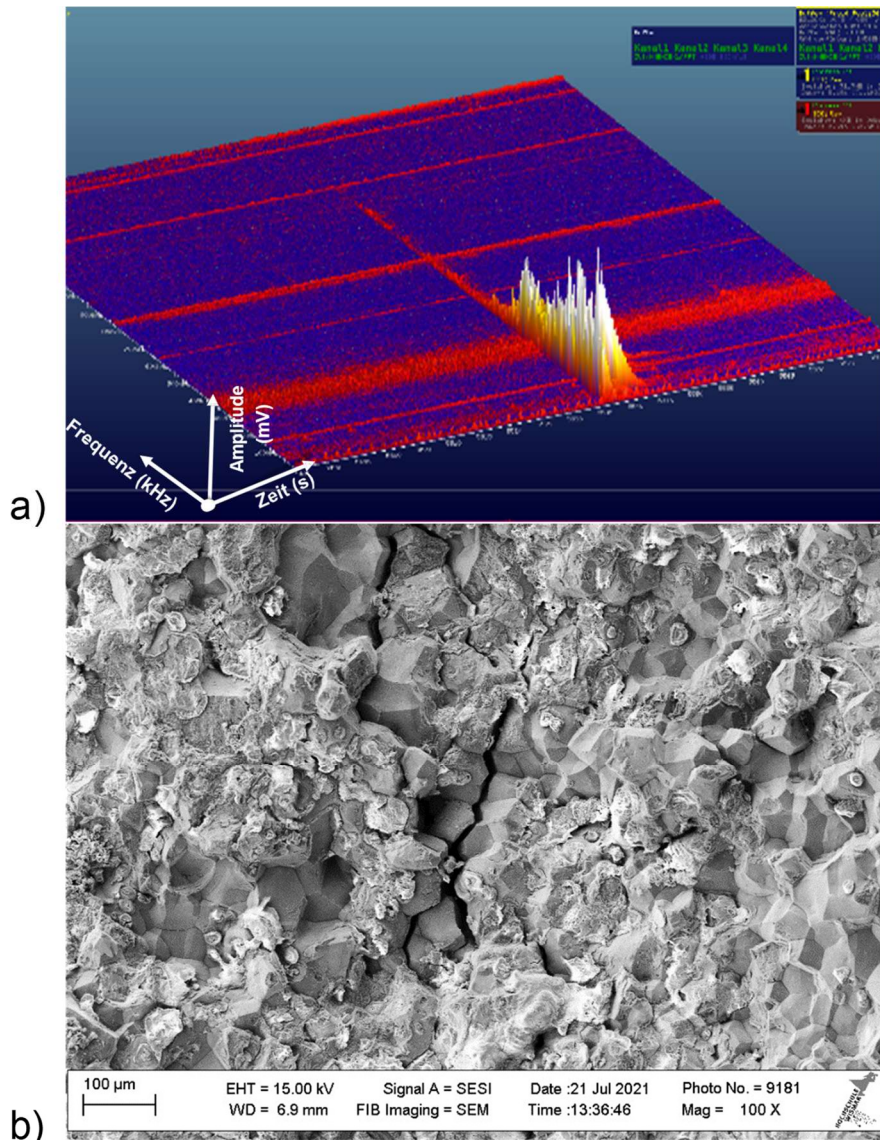


Abbildung 65: a) akustisches Signal nach der Fast Fourier-Transformation sowie b) korrelativ die Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme zum interkristallinen Versagen aufgrund einer Wärmebehandlung und wasserstoffinduzierter Rissbildung

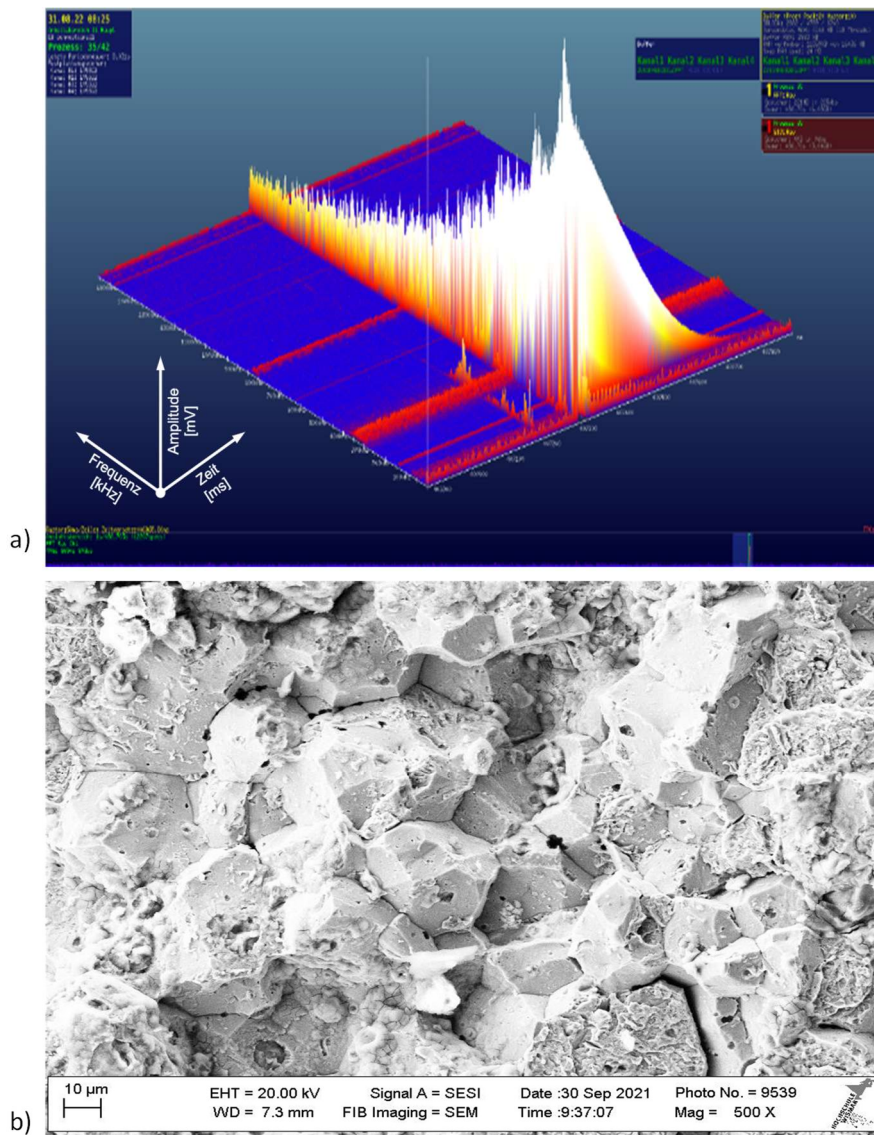


Abbildung 66: a) akustisches Signal nach der Fast Fourier-Transformation sowie b) korrelativ die Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme zum interkristallinen Versagen aufgrund wasserstoffinduzierter Rissbildung

Die Ergebnisse der Biegeversuche zeigen, dass sich die AE-Signale für duktilen Versagen im Anlieferungszustand, interkristallines Versagen aufgrund wasserstoffinduzierter Rissbildung sowie transkristallinen Spaltbruch aufgrund einer Tieftemperaturbeanspruchung unterscheiden. Ein wesentliches Ergebnis dieser Arbeit besteht darin, dass interkristalliner Spaltbruch und transkristalliner Wabenbruch mittels Mustererkennung der AE-Analyse in situ – also während des Risswachstums – differenziert werden können. Hierzu wurde im Nachgang der Untersuchungen das entsprechenden Signalmuster in der Mustererkennung (*Pattern Provider*) hinterlegt und jeweils gegen die gespeicherten Prozessdaten der anderen Schädigungsmechanismen geprüft. Das AE-Muster für einen interkristallinen Riss konnte beispielsweise nicht dem Wabenbruch zugeordnet werden. Damit wurde gezeigt, dass eine Unterscheidung möglich ist

und somit nicht nur der Riss, sondern auch der Entstehungsmechanismus (Schädigungsmechanismus) des Risses direkt identifiziert werden kann.

Abhängigkeit von AE-Signalcharakteristik und Schädigungsart (Schallquelle)

Transiente AE-Signale haben einen physikalischen Ursprung, der ihre Form mitbestimmt. Einfluss haben auch der Sensor, die Geometrie, der Laufweg sowie das Material des Prüfobjekts, in dem sich die Schallwelle fortbewegt. Liegt jedoch bei einer großen Anzahl aufgenommener AE-Signale der einzige Unterschied in der Schallemissionsquelle, besteht die Wahrscheinlichkeit, dass sich ihr Einfluss dazu nutzen lässt, die AE-Signale einem bestimmten Quellmechanismus zuzuordnen [WAC16]. Eine Zuordnung bzw. Klassifizierung wurde aufgrund von Unterschieden in den Parametern der AE-Signale vorgenommen. Dies sind die Maximalamplitude und der Amplitudenverlauf über den Frequenz- sowie Zeitbereich. Für die Untersuchungen wurden ergänzend zum duktilen Versagen aus den labortechnischen Versuchen gezielt Schädigungen der Gefügestruktur durch Temperaturbeanspruchung bzw. Wasserstoffbeladung hervorgerufen. Durch die begleitenden Untersuchungen der Bruchflächen mittels REM wurden die Brucharten nachgewiesen. In Korrelation zur Erkenntnis, dass materialabhängige Unterschiede im AE-Signal bei einer Feinabstimmung der Messumgebung vorhanden sind (vgl. Kapitel 2.4.1), wurden ebenso bei den Untersuchungen zu den Schädigungsmechanismen signifikante Unterschiede festgestellt [LOR23, LOR241].

Einer aktuellen zusammenfassenden Studie von Calabrese und Proverbio [CAL21] zufolge wurden in vielen Forschungsarbeiten die unterschiedlichen AE-Signalcharakteristiken bei verschiedenen Schädigungsarten bewiesen. Die Auswertung der AE-Signale diesbezüglich und das komplette Verständnis weisen jedoch Lücken auf.

In dieser Arbeit konnte erstmals im Labormaßstab nachgewiesen werden, dass es durch in der Musterbibliothek hinterlegte Signalmuster möglich ist, in situ zwischen duktilem Wabenbruch, interkristallinem Spaltbruch und transkristallinem Versagen zu unterscheiden. Durch die nachgewiesene Übertragbarkeit der Mustererkennung auf den industriellen Maßstab zur allgemeinen Rissdetektion (duktiler Wabenbruch) ist die Möglichkeit zur Differenzierung der anderen Rissarten auch im industriellen Umfeld gegeben.

5.4 Ergebnisse der Versuche unter zyklischer Beanspruchung

Ziel der Untersuchung war es, den Entstehungsort des Risses in der Feder beim Winden durch die Entwicklung von Algorithmen in der Auswertesoftware mit Korrelation der Aufnahmezeit sowie Windegeschwindigkeit und damit der Drahtlänge der Feder einzugrenzen bzw. zu bestimmen. Weiterhin wurde geprüft, ob eine Lokalisierung des Risses sowie eine Zuordnung

der betroffenen Feder im Schwingversuch bei gleichzeitiger Mehrfachprüfung möglich ist. Hierzu wurden mehrere Federn angekerbt und im Schwingversuch hinsichtlich der Rissentstehung überwacht.

Rissortung

Laut Möser [20] findet die Auswertung der Schallintensität in festen Körpern noch nicht weitreichend Anwendung. Die theoretische Betrachtung der Ausbreitungswege von Körperschall, der Lokalisierung von Schallquellen oder des Vorhandenseins von Dämpfungsmaterialien ist gegeben. In der industriellen Anwendung kann die Eingrenzung der ungefähren Position der Signalquelle für die weitere Verarbeitung oder nachfolgende Untersuchungen hilfreich sein. Ist von Rissgrößen im Submikrometer-Bereich auszugehen, so hat sich bereits gezeigt, dass sich das Lokalisieren als schwierig erweist.

Das AE-Messsystem erlaubt eine hohe Zeitauflösung mit einer hohen Abtastrate von $41 \mu\text{s}$. Die Abtastrate, auch *Samplerate* genannt, bestimmt, wie oft ein Analogsignal (zeitkontinuierliches Signal) in einer vorgegebenen Zeit, oftmals einer Sekunde, gemessen und in ein zeitdiskretes Signal umgewandelt wird. Die Abtastrate kann als ein Kriterium für die Reproduzierbarkeit einer abgetasteten Frequenz angesehen werden.

Ist die Schallgeschwindigkeit bekannt, lässt sich die Position berechnen. Die Schallgeschwindigkeit für Körperschall ist werkstoffspezifisch und beträgt für Stahl 5850 m/s . Die Wellengeschwindigkeit für Longitudinal- und Transversalwellen unterscheidet sich, wobei die Schallgeschwindigkeit longitudinal (c_L) höher ist als die Schallgeschwindigkeit transversal (c_T).

Für den Versuch wurde Feder 3 mit einer Drahtlänge von $553,9 \text{ mm}$ und einem Drahtdurchmesser von 5 mm aus DIN/EN 10270-1-DH verwendet. Die zwei AE-Sensoren wurden jeweils an den Schwingtellern der Prüfmaschine befestigt (Abbildung 67). Die Signale wurden mit einer Druckbleistiftmine an unterschiedlichen Windungen der Feder erzeugt. Die Feder weist $n_t = 7$ Windungen auf. Es wurde jeweils an der ersten, zweiten und dritten Windung getestet.



Abbildung 67: Versuchsaufbau für Messung der Rissortung

In Tabelle 12 sind die Messergebnisse mit dem Zeitpunkt des Signals und der gemessenen Energie der Sensoren *CH1* (Sensor oben) und *CH2* (Sensor unten) aufgelistet. Der bei den Messungen 1, 2 und 6 gemessene Zeitunterschied beträgt wenige Mikrosekunden. Der größte Zeitunterschied liegt bei $\Delta 328 \mu\text{s}$ (Messungen 3, 4). Der ungünstigste Rissentstellungsort befindet sich genau in der Mitte der Federlänge. Nach den Berechnungen ergibt sich eine theoretische Signallaufzeit von ca. $47 \mu\text{s}$.

Tabelle 12: Messdaten zum Versuch zur Rissortung

Messung	Windung	Zeit CH1 [μs]	Zeit CH2 [μs]	Energie CH1	Energie CH2
1	3	267660	267660	31,87	33,44
2	1	123142	123193	37,25	37,33
3	2	817561	817233	29,29	31,65
4	3	561971	561643	33,85	33,15
5	3	609157	608929	32,2	33,58
6	3	449249	449249	35,67	35

Die Ergebnisse zeigen, dass die $41 \mu\text{s}$ der Spektrenaufnahme für die Lokalisierung von Schallquellen bei einer Drahtlänge von $553,9 \text{ mm}$ nicht ausreichend sind. Um eine gezielte Aussage über den Ort der Schallquelle treffen zu können, ist eine höhere Aufnahme Frequenz notwendig. Mit sinkender Drahtlänge und zunehmender Genauigkeitsanforderung steigt die Anforderung an die Aufnahme Frequenz weiter an.

Durch Rücksprache mit den Entwicklern bei QASS konnten die Ergebnisse bestätigt werden. Die 41 μs ergeben sich aus der Verarbeitung der Messdaten. Die Auswertung von Rohdaten erfordert Rechenzeit und die Mustererkennung wird erst dann gestartet, wenn ein Großteil des Musters ausgewertet ist. Theoretisch kann über eine Gradienten-Auswertung der einzelnen Zeitsignale die Berechnungsgeschwindigkeit erhöht werden. Mit der FFT kann theoretisch eine Genauigkeit von 2 cm erreicht werden. Würde die Abtastrate auf 50 MHz erhöht, ließe sich auch eine von 0,2 mm erzielen. Dieses Verfahren befindet sich bei QASS noch in der Entwicklung. Die Betrachtung der gemessenen Energie gibt keinen Aufschluss über den Ort der Schallquelle. Eine weitere Annahme war, dass die Höhe der Energie Aufschluss liefern könnte. Dies hat sich nicht bestätigt. Die Energien liegen zu dicht beieinander und Messungenauigkeiten können nicht ausgeschlossen werden. Eine Lokalisierung ist bei diesen Drahtlängen nicht möglich. Zudem liefert das Messgerät im jetzigen Zustand nicht die benötigte Genauigkeit.

Schwingversuche

Um die Prozesszeit und den Aufwand für Nachfolgeuntersuchungen gering zu halten, wurden weiterhin gekerbte Federn verwendet. Durch tiefe Kerben wird die Prozesszeit auf ein Minimum reduziert. Ziel ist der Erhalt eines Rissignals nach den ersten Schwingungen. Tiefere Kerben garantieren die Rissentstehung in der Kerbe. Die Kerben wurden an der Außenseite der Federn, bei Windung 2.5, eingebracht. Mit einem Dremel und einer $t = 0,1$ mm starken Diamanttrennscheibe wurden die Kerben manuell erzeugt. Die Kerbtiefe t_k liegt zwischen 500 und 3000 μm . Die Vermessung der Kerben erfolgte über eine 3D-Zusammensetzung von Einzelbildern am Konfokalmikroskop. Weiterhin wurden unterschiedliche Schwellenwerte für die Energie und die Ähnlichkeit ausgewertet.

Die Federn wurden nach Auftreten eines risstypischen Signals mittels Mikroskopie auf Risse untersucht. Bei auffälligen Federn mit einem deutlichen risstypischen AE-Signal erfolgte die metallographische Zielpräparation an der Kerbe. Abbildung 68 zeigt die Kerbe von Probe 67. Bei einer Kerbtiefe t_k von 2613 μm entstand das erste Rissignal nach $N = 32$ Schwingungen. Der resultierende Riss ist makroskopisch erkennbar.

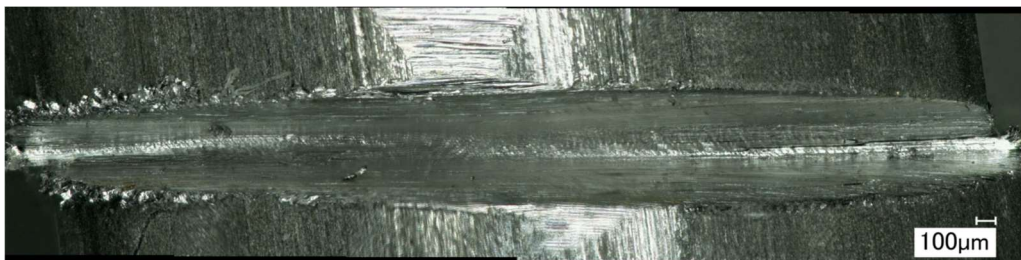


Abbildung 68: Kerbe mit Riss auf der rechten Seite (Probe 67 N = 32)

Bei den Proben 79 und 80 konnte ein Riss mittels metallographischen Schliffes nachgewiesen werden. In Abbildung 69 ist beispielhaft der Riss von Probe 79 dargestellt. Abbildung 70 zeigt einen Ausschnitt der dazugehörigen Spektren aus der Messung. Die Fahnen weisen auf gefundene Musterübereinstimmungen hin. Die Versuchsdaten beider Proben sind in Tabelle 13 aufgelistet.

Tabelle 13: Versuchsdaten nachgewiesener Risse für Probe 79 und 80

Probe	Kerbtiefe t_k [μm]	Energie	Ähnlichkeit [%]	N	Anzahl der Signale
79	2467	48	45	10	9
80	2522	40	40	1	1

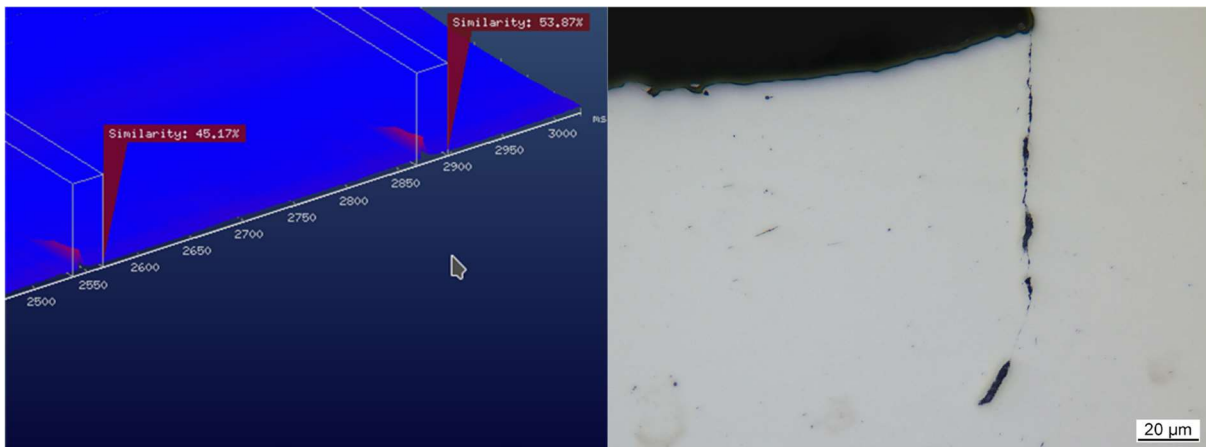


Abbildung 69: Riss im metallographischen Schliff (Probe 79)

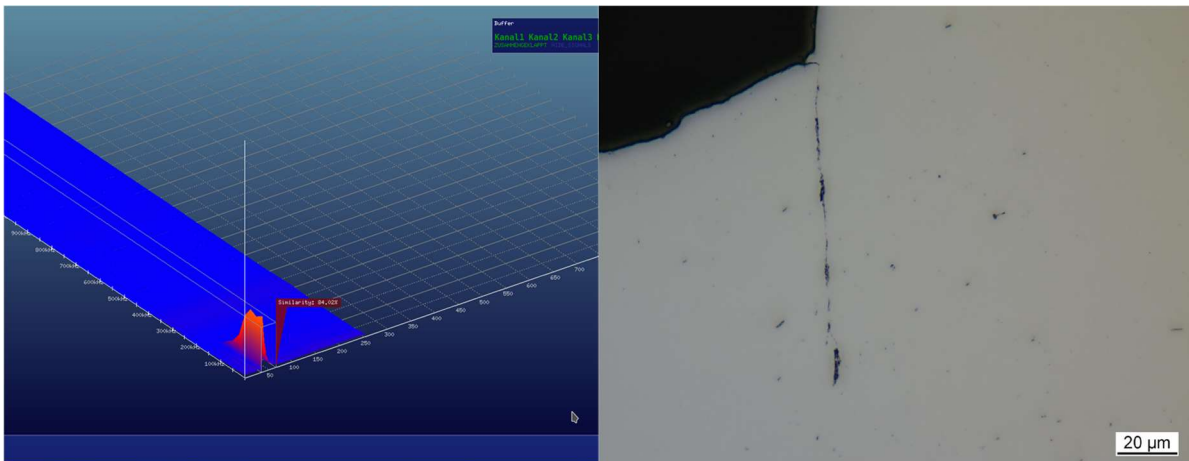


Abbildung 70: Riss im metallographischen Schliff (Probe 80)

Nach Betrachtung unterschiedlicher Kerbtiefen und Einstellungen wurde die Mustererkennung im Operator-Editor erweitert. Der Operator-Editor erhält einen Zähler (vgl. Kapitel 2.4.4), der die Trigger-Liste erst nach einer vorbestimmten Anzahl an Mustern auslöst. Die Risse sollen in dieser Zeit auf eine nachweisbare Größe anwachsen. Mit den neuen Einstellungen konnten drei weitere Risse nachgewiesen werden. In Tabelle 14 sind die Versuchsdaten der Proben aufgeführt und in den folgenden Abbildungen (Abbildung 71 bis Abbildung 74) sind beispielhaft die Risse mit den dazugehörigen Spektren dargestellt.

Von diesen Spektren werden, je nach Anzahl der Signale, nur Ausschnitte gezeigt.

Tabelle 14: Versuchsdaten aus dem Schwingversuch mit den Proben 99, 104, 107 und 114, bei denen ein Riss nachgewiesen werden konnte

Probe	Kerbtiefe tk [µm]	Energie	Ähnlichkeit [%]	N	Anzahl der Signale
99	459	70	60	7093	1
104	448	15	60	2942	20
107	641	15	60	25	30
114	922	1,6	50	59	10

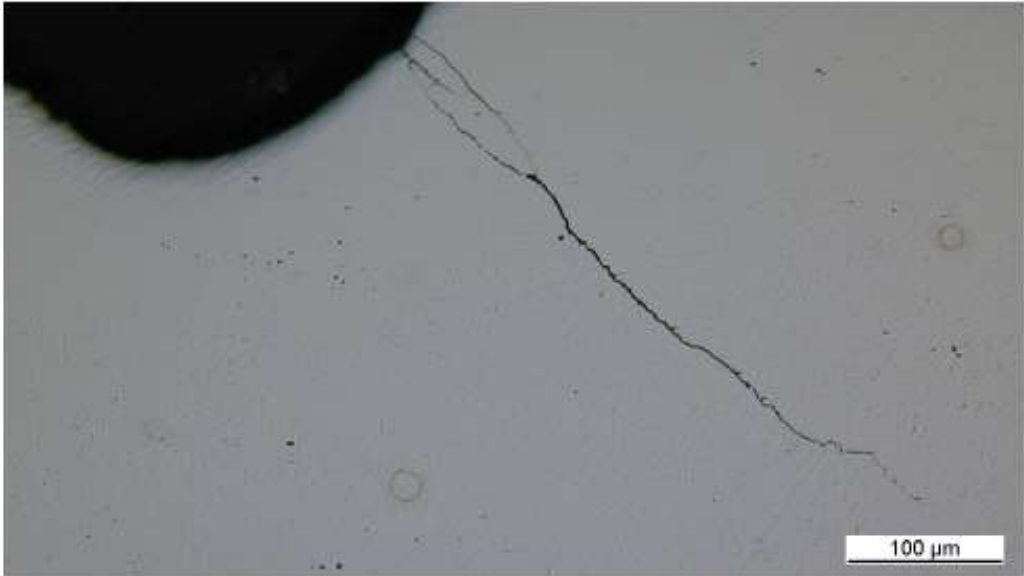


Abbildung 71: Riss im metallographischen Schliff (Probe 99)

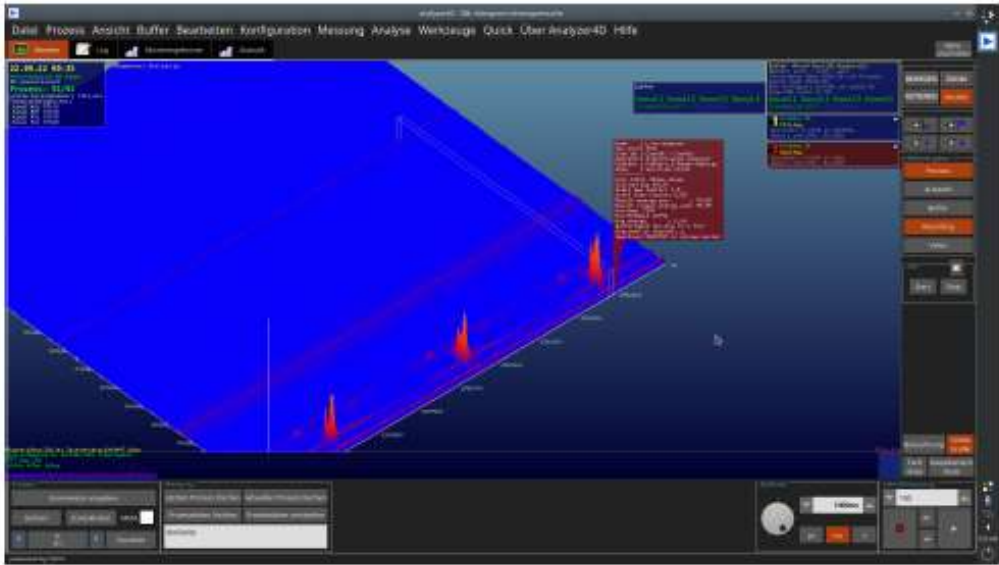


Abbildung 72: Auszug der Spektren (Probe 99)

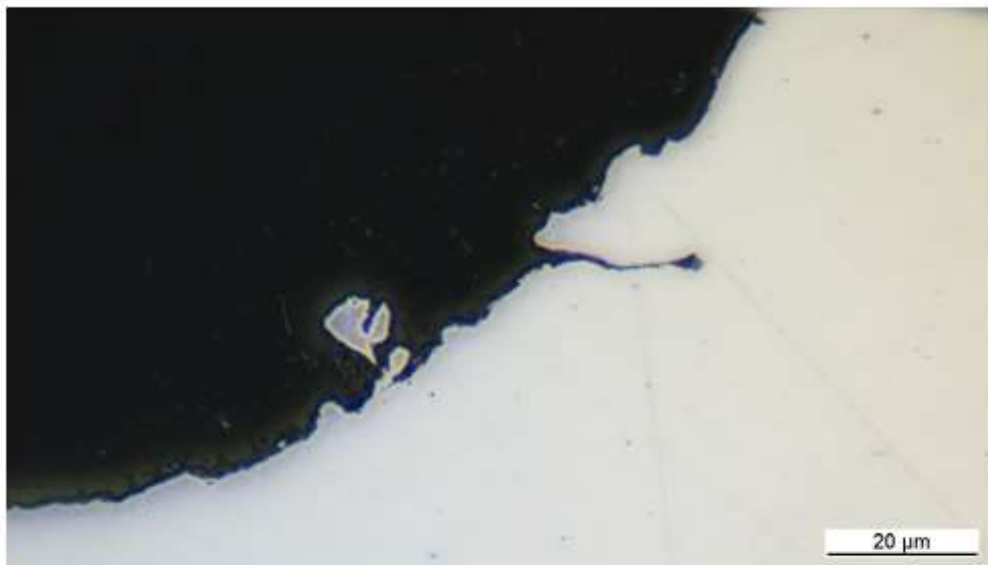


Abbildung 73: Riss im metallographischen Schliff (Probe 104)

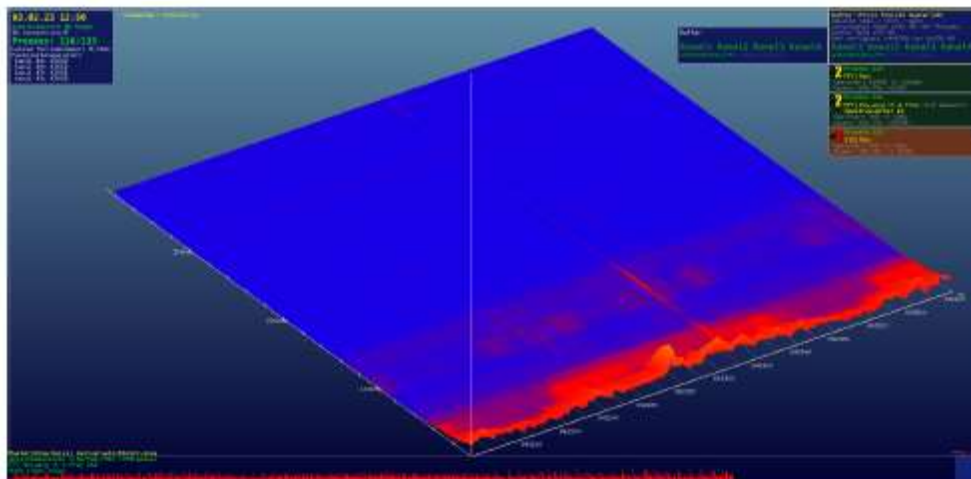


Abbildung 74: Auszug der Spektren (Probe 104)

Ziel des Arbeitspaketes war es, den Entstehungsort des Risses in der Feder beim Schwingversuch durch die Entwicklung von Algorithmen in der Auswertesoftware mit Korrelation der Aufnahmezeit und damit mit der Drahtlänge der Feder einzugrenzen bzw. zu bestimmen. Weiterhin sollte geprüft werden, ob die AE-Analytik zur Rissdetektion im Schwingversuch mit einer Feder geeignet ist. Die Ergebnisse belegen, dass bei den untersuchten geringen Drahtlängen der Federn und der hardwaretechnischen Berechnungszeit von 41 µs eine exakte Zuordnung zum Entstehungsort des Risses derzeit nicht möglich ist. Durch eine Anpassung der Hardware sowie eine Optimierung des Berechnungsalgorithmus sollte, bei größeren Federlängen, die Anwendung zukünftig möglich sein. Im Rahmen der Untersuchungen im Schwingversuch wurden risstypische AE-Signale detektiert und durch anschließende metallographische Zielpräparationen als Mikrorisse verifiziert. Die AE-Analytik ist somit für den Einsatz im Schwingversuch

bei einer Probenanzahl von $n = 1$ zur Detektion von Rissentstehung und -wachstum prinzipiell geeignet. Dies wurde zum Abschluss der vorliegenden Arbeit im Projekt *Weiterentwicklung des Kerbfallkatalogs für Schrauben großer Durchmesser im Stahl- und Anlagenbau* (IGF-Nr. 22748 BG; Fraunhofer IGP, Sincotec PS2000 MOT Evo, Kraftbereich von ± 2 MN) sowie an der Universität Siegen (Minitorsionsprüfstand) weiter erfolgreich eingesetzt.

Für einen Vielprobenversuch müssten weitere Schritte wie die Erhöhung der Anzahl der Sensoren und die Triangulation der Messsignale erfolgen.

6 Zusammenfassung

Technische Federn werden in einer Vielzahl von Industrieanwendungen eingesetzt, beispielsweise als Ventildfedern im Motor, als Achsfedern in Nutz- und Personenkraftfahrzeugen sowie in Armaturen und Transportsystemen, z. B. für Wasserstofftechnologien. Die verwendeten Stahldrähte gehören zu den höchstfesten Stählen (1700 MPa bis über 2200 MPa) und sind damit hochgradig auf die jeweilige Anwendung spezialisiert. Bei der Drahtherstellung können fertigungsbedingt Mikrorisse entstehen, die später bei der Herstellung oder dem Einsatz von Federn wachstumsfähig werden und somit zum Versagen führen können. Eine weitere Quelle der Rissentstehung liegt in der Federfertigung mit hohen Umformgraden sowie -geschwindigkeiten: dem Winden und dem Setzen. Darüber hinaus können unplanmäßige mechanische oder auch korrosive lokale Beschädigungen der Oberfläche, die zu einer Kerbwirkung führen, bei den genannten Prozessen Risse initiieren. Bisher wird keine zerstörungsfreie Inline-Überwachung der einzelnen Fertigungsschritte hinsichtlich Rissbildung in der Federproduktion durchgeführt. Hieraus ergab sich das technisch-wissenschaftliche Ziel des Forschungsvorhabens: ein In-situ-Monitoring der Rissinitiierung und des Risswachstums während des Federwindens mittels akustischen Emissionen zu ermöglichen und die Auflösungsgrenze sowie die Einflussfaktoren in Bezug auf die akustischen Signale zu ermitteln und, wenn möglich, zu quantifizieren.

In der Literatur wird auf das Potenzial der akustischen Emissionstechnik zur Unterscheidung von mikrofraktographischen Risswachstumsverhalten aufgrund der Abhängigkeit und des Einflusses auf die Ausprägung des risstypischen Signals hingewiesen. Diese Arbeitshypothese sollte im Rahmen des Forschungsprojekts zur industriellen Serienfertigung von Federn durch statistisch geplante Laborversuche mit unterschiedlichen Einflussparametern untermauert werden. Ein weiteres Ziel war es, durch die Entwicklung geeigneter Analyseketten in der anlagenspezifischen Software die Detektion und die eindeutige Zuordnung der akustischen Emissionssignale zu unterschiedlichen Schädigungsmechanismen zu ermöglichen. Die gewonnenen Messwerte sollten Rückschlüsse auf den Schadensmechanismus zulassen, sodass direkt und ohne weitere zeitintensive und damit kostenintensive Untersuchungen Abhilfemaßnahmen definiert und in der Produktion umgesetzt werden können.

Die Schallemissionsprüfung basiert auf der Detektion dynamischer Verschiebungen im Nanometer-Bereich an der Oberfläche des Prüfobjekts, die durch Körperschallwellen bewirkt werden. Diese Wellen werden durch kurzzeitige, geringe Verschiebungen erzeugt, die bei plötzlichen Spannungsänderungen in schnell ablaufenden Prozessen im Werkstoff entstehen.

Durch diese Schallwellen resultiert eine Wechseldruckanregung des akustischen Sensors. Der Wechseldruck wiederum erzeugt im sensitiven Piezoelement des Sensors einen frequenzabhängigen elektrischen Spannungsaussschlag (Amplitude). Durch die Verstärkung der elektrischen Signale und die Hoch-Frequenz-Impuls-Messung können die Signale (Zeit-Amplituden-Verlauf, 2D) anhand der Energiesignaturen ausgewertet werden. Weiterhin können durch eine Echtzeit-Fast Fourier Transform Umgebungs- und Störgeräusche effektiv herausgefiltert werden, wodurch spezifische Informationen über den Verlauf von Frequenz, Zeit und Amplitude vorliegen (3D-Darstellung).

Für die Übertragung der akustischen Emissionstechnik zur In-situ-Risserkennung in die industrielle Anwendung war es notwendig, den Einfluss der probenabhängigen Parameter (Drahtmaterial, -durchmesser und -festigkeit) sowie prozessbedingter Faktoren (Umformgeschwindigkeit, Vorbearbeitung) auf das detektierte risstypische Signal zu ermitteln. Zur Quantifizierung der Einflussfaktoren wurden zunächst umfangreiche experimentelle Untersuchungen an dem ölschlussvergüteten Ventildraht VDSiCr durchgeführt. Für die akustischen Emissions-Untersuchungen unter Laborbedingungen erfolgten Biegeversuche in Anlehnung an DIN EN ISO 74381 an gekerbten Drahtproben unterschiedlicher Federstahlvarianten (patentiert gezogener Draht [SH, DH], ölschlussvergüteter Draht [FDSiCr, VDSiCr], hochlegierter kaltverfestigter Draht [1.4301], hochlegierter kaltverfestigter und ausscheidungsgehärteter Draht [1.4568]) an der SPM *Instron 8802*, bei der das akustische Emissionsmesssystem für die automatisierte Stopp-Funktion bei Risserkennung implementiert wurde. Dadurch konnte beim Auftreten des ersten typischen Risssignals der Versuch automatisch unterbrochen werden und die Proben konnten mittels hochauflösender Mikrocomputertomographie analysiert werden. Wurde ein Mikroriss bestätigt, wurden die Tests mit denselben Proben bis zum nächsten Signal (Makroriss) fortgesetzt. Anhand der gewonnenen Erkenntnisse konnte eine Musterbibliothek der einzelnen risstypischen Signalmuster für die automatisierte Mustererkennung aufgebaut werden. Darüber hinaus wurde der experimentelle Nachweis erbracht, welche akustischen Signalmuster tatsächlich zu einem Mikroriss gehören und welche Größenordnung die kleinsten noch nachgewiesenen Risse aufweisen. Hierzu wurde zum einen die Risstiefe und zum anderen die Rissflankenfläche berücksichtigt. Im Zuge dessen wurde die systemspezifische Mustererkennung für die automatisierte Detektion weiterentwickelt, angepasst und optimiert. In den labortechnischen Versuchen konnte als kleinster detektiertes Riss ein Riss mit einer Länge von 10 µm mittels Zielpräparation nachgewiesen werden.

Zur Verifikation des industriellen Einsatzes der akustischen Messtechnik in einer Produktionshalle mit lauten Umgebungsgeräuschen sowie Übertragungsmöglichkeiten von Körperschall wurden Windeversuche an einer typischen Windmaschine mit einem Federstahldraht aus

VDSiCrV mit unterschiedlichen Windeparametern durchgeführt. Zur Erzeugung von Mikrorissen (und zur Vermeidung von Brüchen) war es notwendig, den Draht punktuell vorzuschädigen. Mithilfe der aufgrund der labortechnischen Versuche programmierten Mustererkennung konnten die rissbehafteten Federn sofort identifiziert und für metallographische, rasterelektronenmikroskopische sowie tomographische Untersuchungen entnommen werden. Zur statistischen Absicherung wurden rund 100 Federn, bei denen ein risstypisches Signal detektiert worden war, entnommen und die markantesten für die korrelativen Analysen ausgewählt. Bei drei untersuchten Federn konnten mittels Rasterelektronenmikroskopie und insbesondere durch die Zielpräparation Mikrorisse im Bereich von 20 µm bis 150 µm festgestellt und den akustischen Signalen zugeordnet werden.

Zur Verifikation, ob die risstypischen Signalmuster abhängig vom Schädigungsmechanismus unterschiedlich ausgeprägt sind, wurden differenziert vorgeschädigte Drahtproben im Vergleich zum Anlieferungszustand (duktiler Wabenbruch) untersucht. Beispielsweise wurden zur Erzeugung wasserstoffinduzierter, interkristallin verlaufender Risse die Drahtproben im elastisch verspannten Zustand mit 8%iger Salzsäure beaufschlagt und zur Erzeugung von transkristallinem Spaltbruch einer inkorrekten Wärmebehandlung (950 °C, 0,5 h, Abschrecken in Wasser) unterzogen. Die Ergebnisse zeigen, dass die Muster der akustischen Signale in Abhängigkeit der Vorschädigung signifikante Unterschiede aufweisen. Weiterhin konnte erstmals im Labormaßstab aufgezeigt werden, dass zwischen duktilem Wabenbruch, transkristallinem Spaltbruch und interkristallinem Versagen mittels Mustererkennung Emissionsanalyse in-situ differenziert werden kann. Durch die nachgewiesene Übertragbarkeit der Mustererkennung in den industriellen Maßstab für die allgemeine Rissdetektion (duktiler Wabenriss) ist die Möglichkeit der Unterscheidung zwischen den anderen Rissarten auch im industriellen Umfeld gegeben.

Die umfassenden labortechnischen Untersuchungen an ölschlussvergüteten, patentiert gezogenen sowie hochlegierten Stahldrähten belegen, dass Schmelz- und Materialcharge, Drahtdurchmesser sowie Beanspruchungsart und -geschwindigkeit im untersuchten Umfang keinen Einfluss auf das risstypische Signal haben. Für die Rissdetektion bei derselben Werkstoffart ist eine Ähnlichkeit von 75 % anzuwenden. Ist die Ähnlichkeit geringer, können auch neue Werkstoffarten, für die kein Signalmuster vorliegt, für die Rissdetektion eingesetzt werden. Aufgrund der geringeren Toleranz gegenüber Störgeräuschen steigt jedoch die Wahrscheinlichkeit, dass Störgeräusche als Risse fehlinterpretiert werden.

Für die Erprobung im industriellen Umfeld wurden an dem ‚offenen‘ Softwaresystem (QASS Optimizer4D) Strategien für eine automatische In-situ-Rissdetektion entwickelt, validiert sowie

bei Industriepartnern umgesetzt. Die Ergebnisse belegen die Eignung der Schallemissionsanalytik für die In-situ-Detektion von Mikrorissen bei der Federherstellung im industriellen Umfeld bei hohen Umformgeschwindigkeiten. Darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass die akustische Emissionstechnik zur Untersuchung unterschiedlicher Schädigungsmechanismen bzw. Brucharten eingesetzt werden kann und mittels Mustererkennung bei In-situ-Anwendungen eine Unterscheidung zwischen interkristallinem Spaltbruch (bei wasserstoffinduzierter Rissbildung) und transkristallinem duktilen Wabenbruch möglich ist.

Die Durchführung der Forschung zu dieser Arbeit wurde durch den sich aus leitenden Mitarbeitern von Feder- bzw. Federbandherstellern sowie innerhalb des VDFI konstituierenden PbA unterstützt. Die Zusammensetzung des PbAs, der ca. 25 Teilnehmer umfasst, garantiert bereits das Bekanntmachen der Untersuchungsergebnisse und den Transfer der Ergebnisse zu einem großen Anwenderkreis. Ferner wurden im Rahmen der Projektbearbeitung neben den Versuchen im industriellen Umfeld weitere Einsatzmöglichkeiten der akustischen Emissionsprüfung zur Detektion von Rissentstehung und -wachstum geprüft.

Die weitreichenden Untersuchungen haben gezeigt, dass der Transfer der Technik inklusive der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Analyseketten sowie der hier erstellten Musterbibliothek zur In-situ-Rissdetektion gewährleistet und die Implementierung, z. B. in andere Anwendungen, Umformprozesse, Versuchsaufbauten und Maschinen, einfach, schnell und kostengünstig möglich ist. Zudem wurden die entwickelten Analyseketten und Rissmuster den Anwendern digital und in Form eines Musterkatalogs zur Verfügung gestellt, wodurch der Transfer abgesichert ist. Die Ergebnisse wurden zudem für Fachkollegen auf Konferenzen und in Fachzeitschriften umfassend publiziert [LOR22, LOR23, LOR231, LOR24, LOR241].

Für die Zukunft ist der Einsatz der akustischen Emissionstechnik zur Rissdetektion bei weiteren Forschungsaktivitäten in der Federindustrie laut VDFI denkbar. Beispielsweise könnte mittels Analytik das Drahtziehen bei der Analyse zur maximal erreichbaren Prozessgeschwindigkeit hinsichtlich Rissentstehung überwacht werden. Eine weitere Fragestellung ergibt sich im Bereich des sekundären Recyclings hinsichtlich der Verwendung und insbesondere der Auswirkungen dessen, einen höheren Anteil an Metallschrott mit Fremdlegierungen in den Produktionsprozess einfließen zu lassen. Denkbar ist der Einsatz der Analytik zur Detektion von Rissen bei der Werkstoffprüfung hinsichtlich mechanischer Beanspruchungen. Ferner – bezogen auf die Ergebnisse und Betrachtungen aus Kapitel 5.1 – ist die Nutzung der akustischen Emissionstechnik zur Beantwortung der Fragestellung, ob eine Korrelation zwischen Signalintensität und Bestimmung der tatsächlichen Rissgröße möglich ist, vorstellbar.

7 Literaturverzeichnis

- [AGG21] Aggelis, D.G. et al. (2021). Acoustic Emission. In: Sause, M.G.R., Jasiūnienė, E. (eds) Structural Health Monitoring Damage Detection Systems for Aerospace. Springer Aerospace Technology. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-72192-3_7.
- [AKH08] Arbeitskreis-Lastenheft (AK-LH) Nr. 7, Dezember 2008 (Lastenheft der Automobilindustrie).
- [ANG19] Angela, D.D.; Ercolino, M. Acoustic emission entropy as a fracture-sensitive feature for realtime assessment of metal plates under fatigue loading. *Procedia Struct. Integr.* 2019, 18, 570–576.
- [ANS15] International Standard ANSI/NACE MR0175/ISO 15156:2015, Petroleum, petrochemical, and natural gas industries – Materials for use in H₂S-containing environments in oil and gas production, NACE International, Houston, TX, USA, 2015.
- [BAC10] Bach, Walter: Federfibel Berechnungsgrundlagen und Anwendungen. 7. Auflage. SCHERDEL GmbH, 2010. – ISBN 978–3–00–0267736–9.
- [BAR14] Barteldes, S; Walther, Frank; Holweger, Walter: Wälzlagerdiagnose und Detektion von White Etching Cracks mit Barkhausen-Rauschen und Hochfrequenz-Impuls-Messung, 2014.
- [BAR15] Barteldes S., Seuthe, U.: Verbesserung der Wirtschaftlichkeit mit Reduktion des Pseudoausschusses bei der Kaltumformung durch innovative Signalauswertung und Sensorbau; Institut für Maschinentechnik der Rohstoffindustrie, RWTH Aachen, 2016.
- [BAR16] Barteldes S., Holweger W.: Using High-Frequency-Impulse-Measurement (HFIM) for Detection of Lubrication driven WEC-formation, 19th World Conference on Non-Destructive Testing 2016.
- [BAS87] Bassim, M: Section 2: Macroscopic Origins of Acoustic Emission. *Nondestructive Testing Handbook*. Bd. 5. 2. Aufl., 1987, S. 46–61.
- [BEH13] Behrens, B. A.; Buse, C. Steigerung der Prozesssicherheit beim Kaltumformen von Einsatz- und Vergütungsstählen mittels Akustischer Emissionsprüfung, *Forschung für die Praxis P 855*, FOSTA Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V.
- [BEH15] Behrens, B.-A., Gaebel, C. M., Hanke, R., Wolter, B. Prozessüberwachung beim Kragenziehen hochfester Blechwerkstoffe. - Forschungsbericht Nr. 413, 2015, Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e.V. (EFB), ISBN: 978-3-86776-459-9.
- [BEH24] Behvar A., Haghshenas M. and Djukic M. B.: Hydrogen embrittlement and hydrogen-induced crack initiation in additively manufactured metals: A critical review on mechanical and cyclic loading. *International Journal of Hydrogen Energy* Volume 58, 2024, Pages 1214-1239, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.01.232>.

- [BEN20] Bender, Beate; Göhlich, Dietmar: Dubbel Taschenbuch für den Maschinenbau. 26. Auflage. Springer Vieweg, 2020. – ISBN 978–3–662–59712-5.
- [BLE16] Bleck, W.: Werkstoffkunde Stahl, 978-3-89653-820-8. 2016.
- [BRU12] Brunner I., Pyttel B., Kaiser B., Oechsner M., Influence of end coil geometry and shot peening on very high cycle fatigue strength of helical compression springs, Materials Science Engineering Congress, Darmstadt, 2012.
- [BRU14] Brunner I., Kaiser B., Oechsner M., Untersuchung von Werkstoff- und Fertigungseinflüssen auf das VHCF-Verhalten von Schraubendruckfedern. Abschlussbericht IGF-Nr. 16873 BR, TU Darmstadt, 05.06.2014.
- [CAL21] Calabrese L, Proverbio E. A Review on the Applications of Acoustic Emission Technique in the Study of Stress Corrosion Cracking. Corrosion and Materials Degradation. 2021; 2(1):1-30. <https://doi.org/10.3390/cmd2010001>.
- [CHA11] Chatterjee U.K., Singh Raman R.K., Stress corrosion cracking (SCC) in low and medium strength carbon steels, in: T. Shoji, V.S. Raja (Eds.), Stress corrosion cracking: Theory and practice, Woodhead Publishing, Oxford, Cambridge, Philadelphia, New Delhi, 2011, 169-198. DOI: 10.1533/9780857093769.3.169.
- [COO69] Cooley, Lewis and Welch: The Fast Fourier Transform and its Applications, IEEE Trans on Education, Volume 12, Issue 1, 1969, pp. 28-34.
- [DAE22] Dae C. Ko, Ahn, NS. & Lee, KH. Influence of the surface flaws in oil-tempered wires on the fatigue life of automotive engine valve springs. Sci Rep 12, 21131 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-25597-1>.
- [DAM22] Dambock J.: Neue Windemaschine aus Italien - OMD stellte auf der „wire“ die „C9.1“ vor. Draht/ Wire 2022, <https://umformtechnik.net/draht/Inhalte/Fachartikel/Neue-Windemaschine-aus-Italien>. Zugriff 01.02.2024.
- [DEG14] Degischer, HP. (2014). Werkstoffe - Leistungspotenziale erkennen und nutzen. In: Skolaut, W. (eds) Maschinenbau. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-8274-2554-6_15.
- [DGZ18] DGZfP-Fachausschuss Schallemissionsprüfverfahren, Kompendium Schallemissionsprüfung Acoustic Emission Testing (AT), Grundlagen, Verfahren und praktische Anwendung Version 2018.
- [DIN01] DIN EN 10089, Warmgewalzte Stähle für vergütbare Federn – Technische Lieferbedingungen, Beuth Verlag GmbH, 2003.
- [DIN02] DIN EN ISO 16120-1, Walzdraht aus unlegiertem Stahl zum Ziehen – Teil 1: Allgemeine Anforderungen, Beuth Verlag GmbH, 2011.
- [DIN03] DIN EN ISO 16120-2, Walzdraht aus unlegiertem Stahl zum Ziehen – Teil 2: Besondere Anforderungen an Walzdraht für allgemeine Verwendung, Beuth Verlag GmbH, 2011.

- [DIN04] DIN EN ISO 16120-3, Walzdraht aus unlegiertem Stahl zum Ziehen – Teil 3: Besondere Anforderungen an Walzdraht aus unberuhigtem und ersatzunberuhigtem Strahl mit niedrigem Kohlenstoffgehalt, Beuth Verlag GmbH, 2011.
- [DIN05] DIN EN ISO 16120-4, Walzdraht aus unlegiertem Stahl zum Ziehen – Teil 4: Besondere Anforderungen an Walzdraht für Sonderanwendungen, Beuth Verlag GmbH, 2011.
- [DIN1] DIN EN 10270 Stahldraht für Federn - Teil 1: Patentiert gezogener unlegierter Federstahldraht. Deutsche Fassung EN 10270-1:2011.
- [DIN2] DIN EN 10270 Stahldraht für Federn - Teil 2: Ölschlussvergüteter Federdrahtstahl; Deutsche Fassung EN 10270-2:2011.
- [DIN3] DIN EN 10270 Stahldraht für Federn - Teil 3: Nichtrostender Federstahldraht – Deutsche Fassung EN 10270-3:2011.
- [DIN4] DIN EN ISO 4042, Verbindungselemente – Galvanisch aufgebrauchte Überzugssysteme, Ausgabe 2018.
- [DIN5] DIN EN ISO 19598, Metallische Überzüge - Galvanisch Zink- und Zinklegierungen auf Eisenwerkstoffen mit zusätzlichen Cr(VI)-freien Behandlungen, Ausgabe 2017.
- [DIN6] DIN 50969-2, Vermeidung fertigungsbedingter wasserstoffinduzierter Sprödbrüche bei hochfesten Bauteilen aus Stahl, Ausgabe 2013.
- [DIN7] DIN EN ISO 3452:2014-09 Zerstörungsfreie Prüfung - Eindringprüfung - Teile 1 bis 6 (EN ISO 3452-1:2013).
- [DIN8] DIN EN ISO 3059:2013-03 Zerstörungsfreie Prüfung - Eindringprüfung und Magnetpulverprüfung - Betrachtungsbedingungen (ISO 3059:2012).
- [DIN9] DIN EN ISO 15549:2019-10; Zerstörungsfreie Prüfung - Wirbelstromprüfung - Allgemeine Grundlagen (ISO 15549:2019).
- [DIN10] DIN EN 10002-1:2001-12, Metallische Werkstoffe Zugversuch, Prüfverfahren bei Raumtemperatur, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, 2001.
- [DIN11] DIN EN ISO 6892-1:2009-12, Metallische Werkstoffe Zugversuch, Prüfverfahren bei Raumtemperatur, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, 2009.
- [DIN12] DIN EN 1330-9: Zerstörungsfreie Prüfung–Terminologie–Teil 9: Begriffe der Schallemissionsprüfung (2009).
- [DIN13] DIN EN 13554:2011-04: Zerstörungsfreie Prüfung - Schallemissionsprüfung - Allgemeine Grundsätze; Deutsche Fassung, 2011.
- [DIN14] DIN EN 10088-1: Nichtrostende Stähle - Teil 1: Verzeichnis der nichtrostenden Stähle; Deutsche Fassung EN 10088-1:2014.

- [DIN15] DIN EN 10088-3: Technische Lieferbedingungen für Halbzeug, Stäbe, Walzdraht, gezogenen Draht, Profile und Blankstahlerzeugnisse aus korrosionsbeständigen Stählen für allgemeine Verwendung; Deutsche Fassung EN 10088-3:2014.
- [DIN16] DIN EN ISO 9712:2022-09, Zerstörungsfreie Prüfung - Qualifizierung und Zertifizierung von Personal der zerstörungsfreien Prüfung (ISO 9712:2021); Deutsche Fassung EN ISO 9712:2022.
- [DOE16] Doege, E., Behrens, BA. (2016). Grundlagen der Umformtechnik. In: Handbuch Umformtechnik. VDI-Buch. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-43891-6_2.
- [DUG12] Dugan S.: Untersuchung der Ultraschallabsorption in ermüdungsbeanspruchten Werkstoffen mittels Laserultraschall. Dissertation, Technischen Fakultät III Chemie, Pharmazie, Bio- und Werkstoffwissenschaften der Universität des Saarlandes Saarbrücken 2012.
- [DUN68] Dunegan, H; Harris, D ; Tatro, C: Fracture analysis by use of acoustic emission. In: Engineering Fracture Mechanics Bd. 1 (1968), Nr. 1, S. 105-122.
- [FOR15] Forster, Otto: Algorithmische Zahlentheorie. 2. Auflage. Springer Spektrum, 2015. – ISBN 978–3–658–06539–3.
- [GAR12] Garrison W.M., Moody N.R., Hydrogen embrittlement of high strength steels, in: B.P. Somerday, R.P. Gangloff (Eds.), Gaseous hydrogen embrittlement of materials in energy technologies: Volume 2: Mechanisms, modelling and future developments, Woodhead Publishing Ltd., Cambridge, 2012, 421–492. DOI: 10.1533/9780857093899.3.421.
- [GEI15] Geinitz, V., Kletzin, U.: Wärmebehandlung kalt geformter Federn. In: Ilmenauer Federntag 2015 (2015), S. 9–20.
- [GRU16] Gruber, A. Entwicklung eines Verfahrens zur Bestimmung der Messgenauigkeit bei Groß-CT-Anlagen. - ZfP-Zeitung 148, 2016.
- [GRO16] Gross D und Seelig T, Bruchmechanik, Mit einer Einführung in die Mikromechanik, 2016, Springer Vieweg Berlin, DOI <https://doi.org/10.1007/978-3-662-46737-4>.
- [HEN16] Hennlich, Federtechnik: Druckfedern: Technische Beschreibung. (2016).
- [HOE87] Hoesch K.: Warm geformte Federn – Konstruktion und Berechnung. W.Stumpf Verlag, Bochum 1987.
- [JIN07] Jinbo, T.; Fujiwara, T.; Suda, S.; Ibaraki, N.;; High Strength, Oil-tempered Steel Wire for Valve Springs, Manufactured by Rapid Heating Mono-strand Process. 23 Kobelco technology Review Nr.27; 2007.
- [KIR20] Karimian SF, Modarres M, Bruck HA (2020) A new method for detecting fatigue crack initiation in aluminum alloy using acoustic emission waveform information entropy. Eng Fract Mech 223:106771.

- [KLO81] Kloos, K. H.; Kaiser, B.: Einflüsse unterschiedlicher Randentkohlung und anschließender Kugelstrahlbehandlung auf die Dauerfestigkeit eines vergüteten Federstahles. HTM 37 (1981), S. 7–16.
- [KOB10] Kobelev, V.: Simulation des Windungsprozesses und der Eigenspannungen von kalt geformten schraubendruckförmigen Federn. In: Ilmenauer Federntag 2010, S. 45-58
- [KOB18] Kobelev V.: Durability of Springs. Springer International Publishing AG <https://doi.org/10.1007/978-3-319-58478-2>. 2018.
- [KRU04] Krupp U.: Mikrostrukturelle Aspekte der Rissinitiierung und -ausbreitung in metallischen Werkstoffen. Habilitationsschrift, 2004.
- [KUR00] Kuron D., Wasserstoff und Korrosion, Bonn: Irene Kuron, 2000.
- [KUS20] Kusche, C. F., Dunlap, A., Pütz, F., Tian, C., Kirchlechner, C., Aretz, A., Schwedt, A., Al-Samman, T., Münstermann, S., Korte-Kerzel, S., 2020. Efficient characterization tools for deformation-induced damage at different scales. *Production Engineering* 14 (1), pp. 95-104.
- [LAN19] Lange, Jörg; Lange, Tatjana: Fourier-Transformation zur Signal- und Systembeschreibung. 1. Auflage. Springer Vieweg, 2019. – ISBN 978–3–658-24849–9.
- [LER09] Lerch R., Sessler G.M., Wolf D.: Technische Akustik- Grundlagen und Anwendungen, Springer Verlag, 2009, ISBN 978-3-540-23430-2.
- [LIE07] Liebermann, K.; Schorcht, H.-J.; Weiß, M.; Kletzin, U.: Optimization of strength and forming behavior of SiCr-alloyed oil hardened spring steel wire. In: International Wire & Cable Conference, Tagungsband, S. 1-13, 2007.
- [LOI14] Loidl M.: Entwicklung einer Prüfmethode zur Charakterisierung höchstfester Karoseriestähle hinsichtlich des Risikos zur Wasserstoff induzierten Rissbildung. Diss., 2014.
- [LOR22] Lorenz M., Heidemann J., Salih M. and Schwerdt D.: Application of sound measurements for quality control of wires during the production of technical springs. International conference on steels in cars and trucks, Milan, Italy, 2022.
- [LOR23] Lorenz M., Heidemann J., Schwerdt D.: In situ Prozesskontrolle zur Detektion von Rissentstehung und -wachstum beim Federnwinden an höchstfesten Federstahldrähten mittels akustischer Emission In situ Prozesskontrolle zur Detektion von Rissentstehung und -wachstum beim Federnwinden an höchstfesten Federstahldrähten mittels akustischer Emission, Ilmenauer Federntag 2023.
- [LOR231] Lorenz M., Salih M., Schwerdt D., Al-Hamdany N., Maawad E., Schell N. and Müller E.: Three-Point Bending Test and Crack Detection by Acoustic Emission on Different Spring Steel Wires with Different Crystallographic Textures, *Journal of Materials Science and Engineering A* 13 (7-9) (2023) 53-67. doi: 10.17265/2161-6213/2023.7-9.001.
- [LOR24] Lorenz M. und Schwerdt D.: In-situ-Rissdetektion mittels akustischer Emission an höchstfesten Stahldrähten, *Fachzeitschrift Draht/Wire* 01/2024.

- [LOR241] Lorenz M. und Schwerdt D.: Hydrogen-induced cracking - Differentiation between damage mechanisms in high-strength spring steel wires using acoustic emission, 5th International Conference On Materials Science & Engineering, 2024, San Francisco.
- [LOU08] Louthan, M. R., 2008, "Hydrogen embrittlement of metals: a primer for the failure analyst", *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 8, S. 289-307.
- [LOW86] Lowack, H.: Qualitätsanforderungen an die Federnindustrie. *Draht* 37 (1986) 3, S. 475-477.
- [LYN11] Lynch S. P., Hydrogen embrittlement phenomena and mechanisms, *Corrosion Reviews* 30 105–123. DOI: 10.1515/correv-2012-0502, 2012.
- [LYN12] Lynch S.P., Metallographic and fractographic techniques for characterising and understanding hydrogen-assisted cracking of metals, in: B.P. Somerday, R.P. Gangloff (Eds.), *Gaseous hydrogen embrittlement of materials in energy technologies: Volume 1: The problem, its characterisation and effects on particular alloy classes*, Woodhead Publishing Ltd., Cambridge, 2012, 274–346. DOI: 10.1533/9780857093899.2.274.
- [LUX10] Lux, R., Kletzin, U.: Möglichkeiten zur Prüfung und Beeinflussung der Werkstoffigenschaften von ölschlussvergüteten Federstahldrähten durch Wärmebehandlungsprozesse bei der Draht- und Federherstellung. In: *Konstruktion, Werkstoffentwicklung und Schadensanalyse* (2010), S. 107–112.
- [MAR07] Marchi C. S., Somerday B.P., SAE Technical Paper 2007-01-0433: Effects of High-Pressure Gaseous Hydrogen on Structural Metals, Warrendale, PA, 2007. DOI: 10.4271/2007-01-0433.
- [MAY23] Mayer in E. Müller (Hrsg.): *Fahrzeugfedern 2023*, Kompetenzreihe des Steinbeis-Transferzentrums für Federntechnologie, Bauteilverhalten und Prozess, Band 2, Iserlohn, 2023, ISBN 978-3- 9825226-0-9, S. 207-233.
- [MEI15] Meissner, Manfred; Schorcht, Hans-Jürgen; Kletzin, Ulf: *Metallfedern*. 3. Auflage. Springer Vieweg, 2015. – ISBN 978–3–642–39122–4.
- [MOE10] Möser, Michael: *Messtechnik der Akustik*. 1. Auflage. Springer Vieweg, 2010. – ISBN 978–3–540–68086–4.
- [MUS09] Burkhardt, H.: *Grundlagen der Mustererkennung*. 2009.
- [MUE13] Müller-Wichards, Dieter: *Transformationen und Signale*. 2. Auflage. Springer Vieweg, 2013. – ISBN 978–3–658–01102–4 *Systembeschreibung*. 1. Auflage. Springer Vieweg, 2019. – ISBN 978–3–658-24849–9
- [NEU12] Neubauer, André: *DFT - Diskrete Fourier-Transformation*. 1. Auflage. Springer Vieweg, 2012. – ISBN 978–3–8348–1996–3
- [OHK05] OH, K.H; HAN, K.S: Interrelationship between stress intensity factor and acoustic emission parameter in the opening mode fatigue crack propagation. *Advances in Safety and Structural Integrity* 2005. ISBN 3-908451-15-9, S. 71–77.

- [PIN20] Pineault J. Belassel M.: Quantifying Residual Stress in Shot-Peened Springs; Shot peening research, 2020. James and Mohammed | PROTO Manufacturing
- [PUN06] Pundt A. and Kirchheim R., HYDROGEN IN METALS: Microstructural Aspects, *Annu. Rev. Mater. Res.* 2006. 36:555–608, doi: 10.1146/annurev.matsci.36.090804.094451.
- [PRA20] Pradhan A., Vishwakarma M. and Dwivedi S. K.; A review: The impact of hydrogen embrittlement on the fatigue strength of high strength steel, Volume 26, Part 2, 2020, Pages 3015-3019, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.627>.
- [QAS17] QASS: Optimizer4D - Analyzer4D Grundwissen inkl. Mustererkennung. 2017.
- [QAS19] QASS: Training Mustererkennung, Signal Chain Edition, 2019.
- [QAS20] QASS: Mustererkennung V3.0. 2020.
- [QAS22] Optimizer4D Technisches Handbuch. QASS Webseite, 2022.
- [RAM04] Ramirez-Jimenez, C; Papadakis, N; Reynolds, N; Gan, T; Purnell, P; Pharaoh, M: Identification of failure modes in glass/polypropylene composites by means of the primary frequency content of the acoustic emission event. In: *Composites Science and Technology* Bd. 64 (2004), Nr. 12, S. 1819–1827.
- [RAU04] Rauscher, F: Charakterisierung der Druckprüfung und der Schallemissionsuntersuchung im Vergleich zu anderen zerstörungsfreien Prüfungen. In: *DACH-Jahrestagung*. Salzburg, 2004.
- [REH14] Rehr J.: Wasserstoffversprödung in hochfesten, mikrolegierten Stählen, Dissertation 2014. Technische Universität München.
- [RET23] Rethmann P., Grodotzki J., und Tekkaya A.E.: Berücksichtigung der Umformhistorie gezogener Drähte bei der Simulation des Federwindens. *Biegen in Siegen*, Tagungsband, Doi: <https://doi.org/10.25819/ubsil/10397>, 2023.
- [ROG01] Rogers, L M: *Structural Engineering Monitoring by Acoustic Emission Methods - Fundamentals and Applications*. London: Lloyd's Register, Technical Investigation Department, 2001.
- [ROO22] Roos, Eberhard; Maile, Karl; Seidenfuß, Michael: *Werkstoffkunde für Ingenieure*. 7. Auflage. Springer Vieweg, 2022. – ISBN 978-3-662-64731-8.
- [SAU13] Sause, M; Horn, S: Quantification of the Uncertainty of Pattern Recognition Approaches Applied to Acoustic Emission Signals. In: *Journal of Nondestructive Evaluation* Bd. 32 (2013), Nr. 3, S. 242–255.
- [SAU16] Sause M.G.R: *In Situ Monitoring of Fiber-Reinforced Composites Theory, Basic Concepts, Methods, and Applications*, Springer 2016, ISBN 978-3-319-30953-8.
- [SAU18] Sause M, Hamstad M (2018) Acoustic emission analysis. In: Beaumont PWR, Zweben CH (eds) *Comprehensive composite materials II*. Elsevier, Oxford, pp 291–326. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.10036-0>.

- [SCH05] Schröder-Rentrop, I., Landgrebe, R., Berger, C., Hasselmann, U. Entwicklung eines praxisgeeigneten Prüfverfahrens zur Bewertung des Wasserstoffgefährdungspotenzials von Salzsäurebeizen und Vergleich der Wirksamkeit von Inhibitoren.- in: Materialwissenschaft und Werkstoff-technik, 36, 2005, S. 731-747.
- [SCH10] Scherdel Federfibel – Berechnungsgrundlagen und Anwendungen, 7. Aufl., 2010.
- [SCH17] Schwerdt, D., Lesnych, N., Schütz, A. Gefüge- und Härteprüfungen an kaltgewundenen Federn mit geschliffenen Federenden. - 11. Ilmenauer Federntag „Neueste Erkenntnisse zu Funktion, Berechnung, Prüfung und Gestaltung von Federn und Werkstoffen“ am 2017 in Ilmenau, Tagungsband, S. 113-122, ISBN 978-3-938843-89-5
- [SCH15] Schiebold, K. Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung - Sichtprüfung. Berlin, Heidelberg. Springer-Verlag, 2015.
- [SCH23] Schlegel J.: Nichtrostender austenitischer Stahl, Ein Stahlproträt, Springer Vieweg, 2023, <https://doi.org/10.1007/978-3-658-42286-8>.
- [SCR85] Scruby, C; Baldwin, G; Stacey, K: Characterisation of fatigue crack extension by quantitative acoustic emission. In: International Journal of Fracture Bd. 28 (1985), Nr. 4, S. 201–222
- [SEL21] Seleznev M, Weidner A, Biermann H, Vinogradov A (2021) Novel method for in situ damage monitoring during ultrasonic fatigue testing by the advanced acoustic emission technique. Int J Fatigue 142:105918.
- [SHA24] Shao C., Wang D., Zang Y. and Cheng P.: Surface Residual Stress Release Behavior of Shot-Peened Springs, Metals 14(3):355, 2024, DOI:10.3390/met14030355.
- [SHI10] Shiwa M, Furuya Y, Yamawaki H, Ito K, Enoki M (2010) Fatigue process evaluation of ultrasonic fatigue testing in high strength steel analyzed by acoustic emission and non-linear ultrasonic. Mater Trans 51(8):1404–1408.
- [SKO14] Skolaut, Werner: Maschinenbau. 2. Auflage. Springer Vieweg, 2014. – ISBN 978–3–662–55881–2.
- [SMI00] Smith, L.; Celant, M.; Pourbaix, A. Duplex America 2000 Conference: Stainless Steel World. 2000.
- [STU11] Stüber, A., Waltner, M., Bäcker B. u. a.
Zerstörungsfreie Prüfverfahren für Langprodukte - aktueller Stand. - „Stahl und Eisen“ Nr. 131 (2011), Heft 8, S. 73-82.
- [SUN21] Sun, B., Lu, W., Gault, B. et al. Chemical heterogeneity enhances hydrogen resistance in high-strength steels. Nat. Mater. 20, 1629–1634 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41563-021-01050-y>.
- [TER23] Terhaar A., Gergeen A., Thome R., Ames M. Elbe-Wolf B. und Block V.;; Potenziale zur Verbesserung von Festigkeit und Duktilität bei Federstählen; Ilmenauer Federntag 2023.

- [TRA20] Trautmann A., Wasserstoffversprödung von Werkstoffen bei der Erzeugung erneuerbarer Energien. Diss.Montan Universität Leoben. 2020.
- [TRO22] Trollst S.: Bewertung der Anfälligkeit und des Gefährdungspotenzials hinsichtlich einer wasserstoffinduzierten Spannungsrisskorrosion galvanisch beschichteter hochfester Schrauben, 2022, Technische Universität Darmstadt.
- [ULL23] Ullosat J.: Mechanismus der Umformmartensitbildung in metastabilen rostfreien Präzisionsbandstählen. Ilmenauer Federntag 2023.
- [ULR22] Ulrich, Helmut; Ulrich, Stephan: Laplace-Transformation, Diskrete Fourier-Transformation und z-Transformation. 1. Auflage. Springer Spektrum, 2022. – ISBN 978–3–658–31876–5.
- [VAL] Vallen, H. Schallemissionsprüfung: Grundlagen - Gerätetechnik - Anwendungen. DGZfP-Jahrestagung 2001, ZfP in Anwendung, Entwicklung und Forschung, Berlin, 21.-23. Mai 2001 - Berichtsband 75-CD.
- [VDF23] VDFI Verband der Deutschen Federnindustrie e.V. Tätigkeitsbericht, Projekt GF 22902 – Federendenschleifen Langtitel: Analyse der schleiftechnologischen Bearbeitung von Federenden am Beispiel von Schraubendruckfedern, TU Dortmund
- [VEN16] Venezuela J., Liu Q., Zhang M., Zhou Q., Atrens A., A review of hydrogen embrittlement of martensitic advanced high-strength steels, Corrosion Reviews 34 (2016) 153–186. DOI: 10.1515/correv-2016-0006.
- [WAC16] Wachsmuth, J. Analyse der Schallemissionssignale aus Ermüdungsrisswachstum und Korrosionsprozessen - Untersuchung der Möglichkeiten für die kontinuierliche Zustandsüberwachung von Transportbehältern mittels Schallemissionsprüfung. - Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades Dr.-Ing., TU Berlin, Fakultät V – Verkehrs- und Maschinensysteme, BAM-Dissertationsreihe, Band 142, Berlin, 2016.
- [WAF23] Wafios Windemaschine FUL226 Datenblatt, https://www.wafios.com/fileadmin/user_upload/WAFIOS/Downloads/Downloads_Prospekte/Deutsch/Federmaschinen/L_FUL226_V1-2_DE.pdf. Zugriff: 29.01.2024
- [WEN98] Wendler-Kalsch, E., Gräfen, H., Korrosionsschadenkunde, 1. Auflage, Springer Vieweg, Berlin, 1998.
- [WOL15] Wolter. B., Behrens, B.-A., Müller, T., Hübner, S. Prüfsysteme zur Prozessüberwachung beim Kragenziehen - Blechteilen geht es an den „Kragen“. - Zeitschrift „Qualität und Zuverlässigkeit“ (QZ), Nr. 8 (60) 2015, S. 44-47
- [ZFP18] Kompendium Schallemissionsprüfung Acoustic Emission Testing (AT) Grundlagen, Verfahren und praktische Anwendung, Version 2018, DGZfP-Fachausschuss Schallemissionsprüfverfahren.

8 Eidesstattliche Versicherung

Ich versichere eidesstattlich durch eigenhändige Unterschrift, dass ich die Arbeit selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Veröffentlichungen entnommen sind, habe ich als solche kenntlich gemacht.

Die Arbeit ist noch nicht veröffentlicht und ist in gleicher oder ähnlicher Weise noch nicht als Studienleistung zur Anerkennung oder Bewertung vorgelegt worden. Ich weiß, dass bei Abgabe einer falschen Versicherung die Prüfung als nicht bestanden zu gelten hat.

Ort

28.06.2024

(Abgabedatum)

(vollständige Unterschrift)

9 Anhang

1. Zuordnung der Drahtchargen für alle erhaltenen Materialien

Abk.	Charge:	1	2	3	4	5	6	7	8
A		135056	-	10423140	55245/R	135056			
B		1225023449	-	-	-	-			
C		2379823	EB23/225R	-	100445-FP6	181842-FBN	156050-1	843111-FAT	18290
E		1140-01370	1140-01371	1140-01372					

2. Übersicht über die verwendeten Materialien und durchgeführte Untersuchungen

Pos.	Materialgröße	Durchmesser mm	Norm	Rm Mean N/mm ²	Menge Anzahl und Probenlänge	Datum	gerichtet/ ungerichtet	gestraht/ ungestraht	Lieferform	Drahtcharge-nnummer	Firma	CT	B	SE	Z	SE	H	M	SEM	ChZ	Proben jetzt verfügbar	Bestellen
1	SH	7,5	EN 10270-1	1514	16/0,3m	12.19	ge	un	Draht	-	B	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	0	16
2	SH	7,5	EN 10270-1	1514	20/0,3m	12.20	ge	un	Draht	1225023449	B	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	2	18
3	DH	7,5	EN 10270-1		80/0,3m	10.20	un	un	Draht	2379823	C	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	50	30
4	FDSr	7,5	EN 10270-2	1763	20/0,3m	12.20	ge	un	Draht	-	B	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	0	20
5	FDSr	7,5	EN 10270-2	....	16/0,3m	12.19	ge	un	Draht	-	B	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	5	11
6	FDSr-V	3,4	EN 10270-2	2256	20/1m	01.21	ge	un	Draht	-	A	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	14	6
7	VDSr	7,5	EN 10270-2	1748	16/0,3m	12.19	ge	un	Draht	-	B	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	0	16
8	VDSr	7,5	EN 10270-1	....	80/0,3m	10.20	ge	un	Draht	EB23/225R	C	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	3	77
9	VDSr	7,5	EN 10270-1	....	25/0,3m	12.20	ge	un	Draht	1140-01370	E	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	0	25
10	VDSr	7,5	EN 10270-1	....	40/0,4m	12.20	ge	un	Einwendung	1140-01371	E	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	0	40
11	VDSr	7,5	EN 10270-1	....	20/0,4m	12.20	ge	ge	Einwendung	1140-01372	E	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	0	40
12	VDSr	3	EN 10270-2	1945	80/1m	12.19	ge	un	Draht		A	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	48	32
13	VDSr	1,6	EN 10270-1	....	20m	12.20	ge	un	Draht	-	B	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	15M
14	VDSr	1,2	EN 10270-2	2045	80/1m	12.19	ge	un	Draht		A	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	70	10

Pos.	Materialgüte	Durchmesser mm	Norm	Rm Mean N/mm ²	Menge Anzahl und Probenlänge	Datum	gerichtet/ ungerichtet	gestraht/ ungestraht	Lieferform	Drahtbezeichnung nummer	Firma	CT	B	SE	Z	SE	H	M	SEM	CHZ	Proben jetzt verfügbar	Bestellen
15	1.4310	2	EN 10270-3	1860	10/1m	12.19	un	un	Draht		A		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	0	10
16	1.4310	1	EN 10270-3	1940	10/1m	12.19	un	un	Draht	10423140	A		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	0	10
17	1.4310	0,7	EN 10270-3	----	20/1m	12.20	un	un	Draht	100445-FP6	C		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	16	4
18	1.4310	3	EN 10270-3	1733	20/1m	12.20	ge	un	Draht	181842-FBN	C	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	0	20
19	1.4310	3	EN 10270-3	1745	20/1m	12.20	un	un	Draht	181842-FBN	C		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	0	20
20	1.4310	6	EN 10270-3	1556	20/1m	12.20	ge	un	Draht	156050-1	C	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	0	20
21	1.4310	6	EN 10270-3	1557	20/1m	12.20	un	un	Draht	156050-1	C		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	0	20
22	1.4568	0,7	EN 10270-3	----	20/1m	12.20	un	un	Draht	84311-FAT	C		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	14	6
23	1.4568	3	EN 10270-3	1489	20/1m	12.20	ge	un	Draht	18290	C	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	0	20
24	1.4568	3	EN 10270-3	1499	20/1m	12.20	un	un	Draht	18290	C		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	0	20
25	1.4568	6	EN 10270-3	1424	20/1m	12.20	ge	un	Draht	18290	C	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	0	20
26	1.4568	6	EN 10270-3	1378	20/1m	12.20	un	un	Draht	18290	C		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	0	20

Pos.	Materialgüte	Durchmesser mm	Norm	Rm Mean N/mm ²	Menge Anzahl/Lund Probenlänge	Datum	gerichtet/ ungerichtet	gestrahlt/ ungestrahlt	Lieferform	Drahtcharge-n nummer	Firma	CT	B	SE	D	SE	H	M	SEM	ChZ	Proben jetzt verfügbar	Bestellen
28	1,4568	3,6	EN 10270-3		30	11.20	-	-	Federn		C	✓					✓	✓			25	5
29	VDSiCr	3,2	EN 10270-2		50	05.21			Federn	55245/R	A										15	35
30	DH	5	EN 10270-1		50	10.21			Federn		B										45	5
31	SH	7,5	EN 10270-1		50	10.21			Federn		B										45	5
32	FDSiCrV	3,2	EN 10270-2		250	06.21			Federn	135056	A										0	250
33	FDSiCrV	3,2	EN 10270-2		10M				Draht	135056	A		✓				✓	✓			3	7
33	1.8159(S0CrV4)	12,5x6x8	EN 2093		15	08.21			Teller-Feder	3BH4348262	G										0	15

3. Vergleichende Darstellung der akustischen Emissionssignale

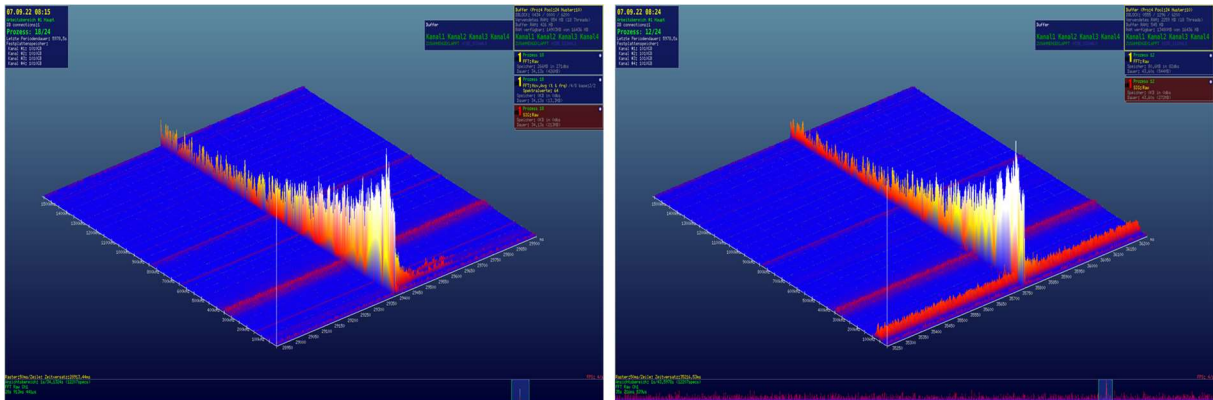


Abbildung 75: Akustisches Emissionssignal während des Biegeversuchs am VDSiCr Draht in 3 mm mit einer Umformgeschwindigkeit von 1 mm (links) und 30 mm (rechts)

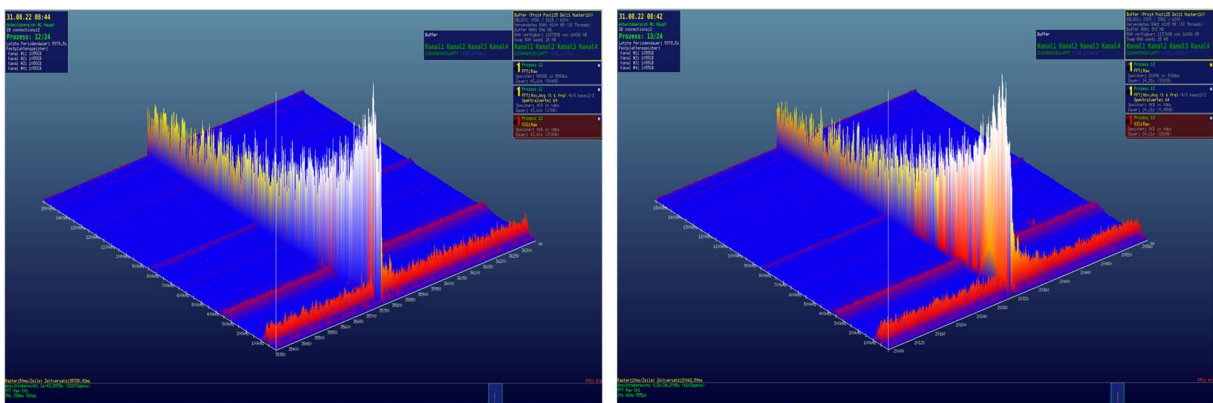
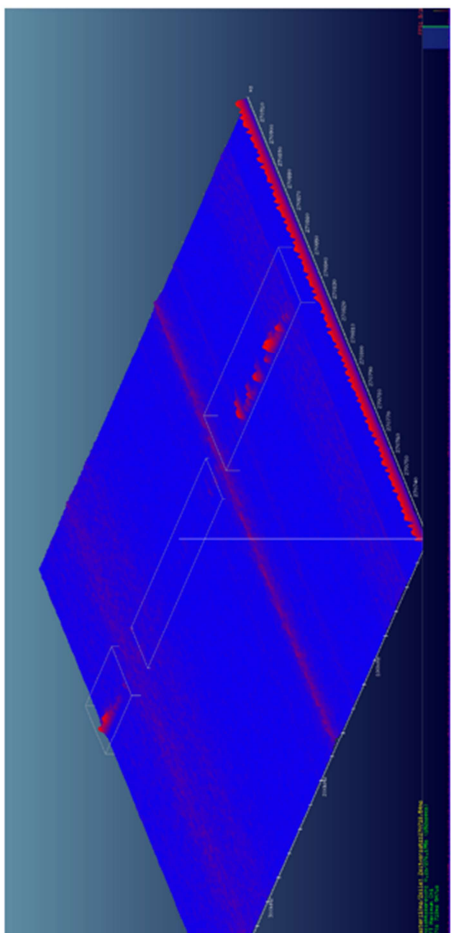
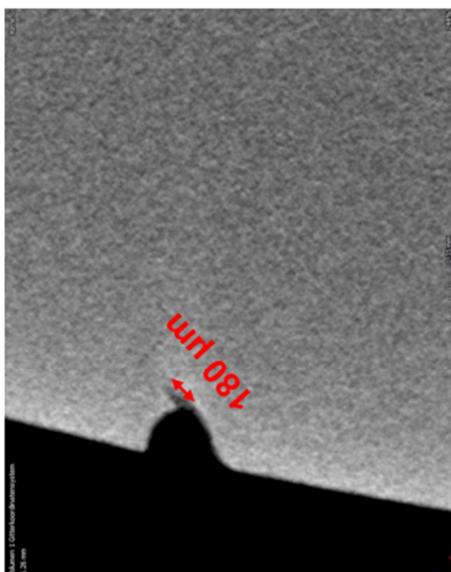


Abbildung 76: Akustisches Emissionssignal während des Biegeversuchs am VDSiCr Draht in 7,5 mm mit einer Umformgeschwindigkeit von 1 mm (links) und 30 mm (rechts)

4. Katalog der risspezifischen AE-Muster



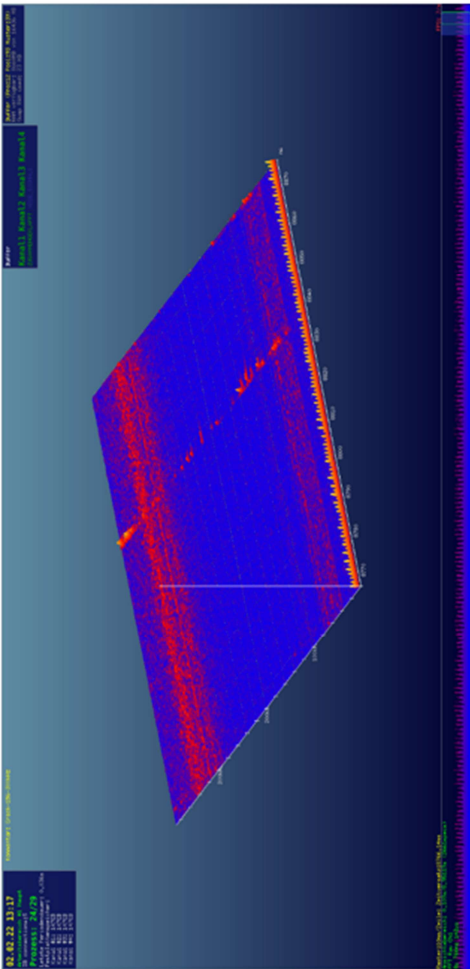
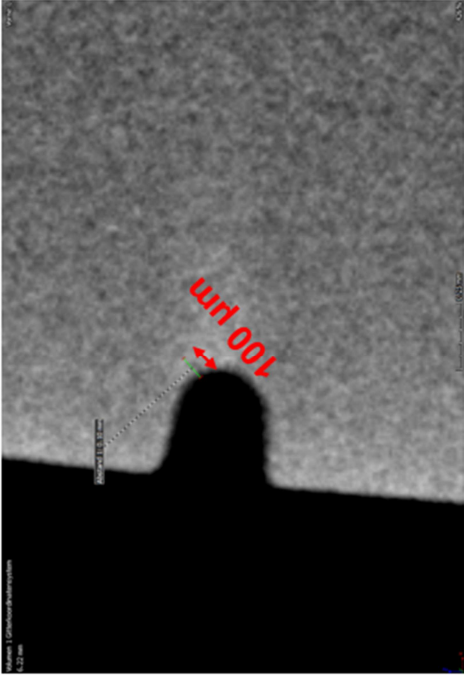
Material:

Gerichteter SH Draht 7,5 mm mit einer Zugfestigkeit von 1514 N/mm²

Versuchsparameter:

Biegebeanspruchung, Vorschubgeschwindigkeit: 1 mm/min

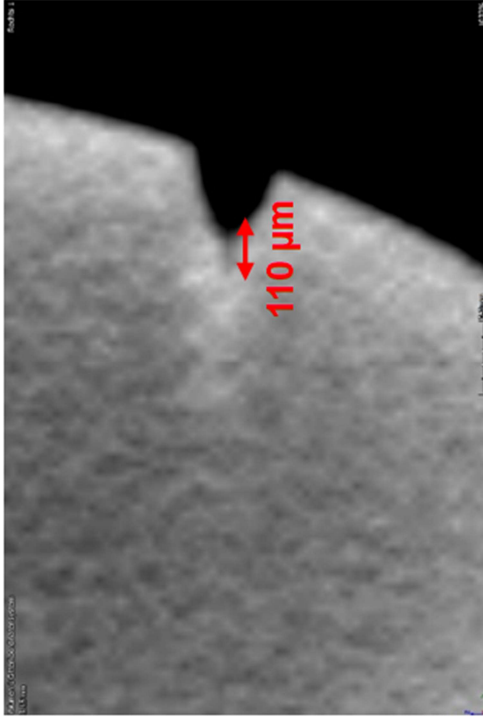
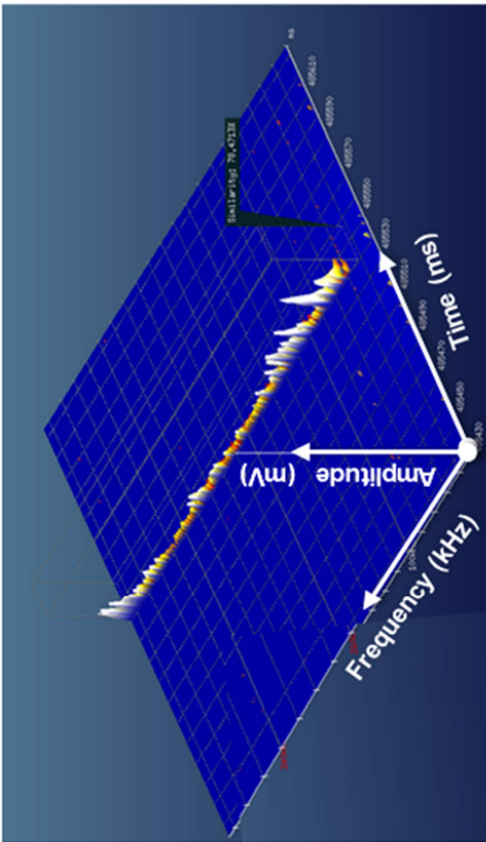
Abbildung 77: Musterkatalog SH Draht, SH-D-7.5-B-14.1-BK



Material:
Ungerichteter DH Draht 7,5 mm

Versuchsparameter:
Biegebeanspruchung, Vorschubgeschwindigkeit: 10 mm/min

Abbildung 78: Musterkatalog DH Draht, DH-D-7-5-B-B-10-1_2021



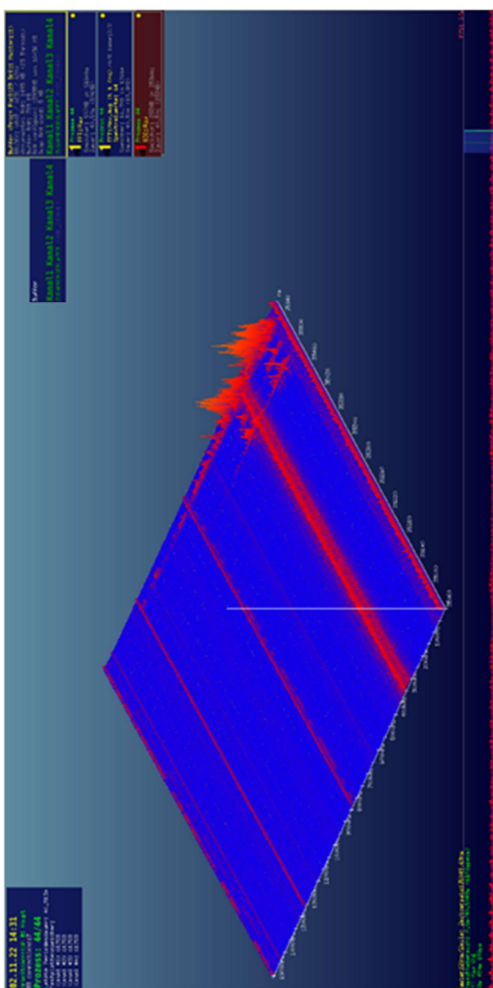
Material:

Gerichteter FDSiCr Draht 7,5 mm mit einer Zugfestigkeit von 1763 N/mm²

Versuchsparameter:

Biegebeanspruchung, Umformgeschwindigkeit: 10 mm/min

Abbildung 79: Musterkatalog FDSiCr Draht, FDSiCr-D-7-5-B-B-2021-02-17



Material:

Hochlegierter Draht 1.4310 mit $d=0,7$ mm

Versuchsparameter:

Biegebeanspruchung, Vorschubgeschwindigkeit: 20 mm/min

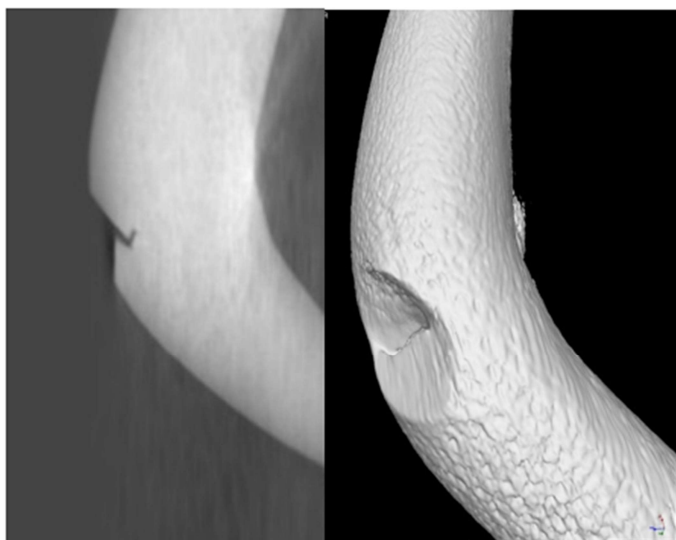
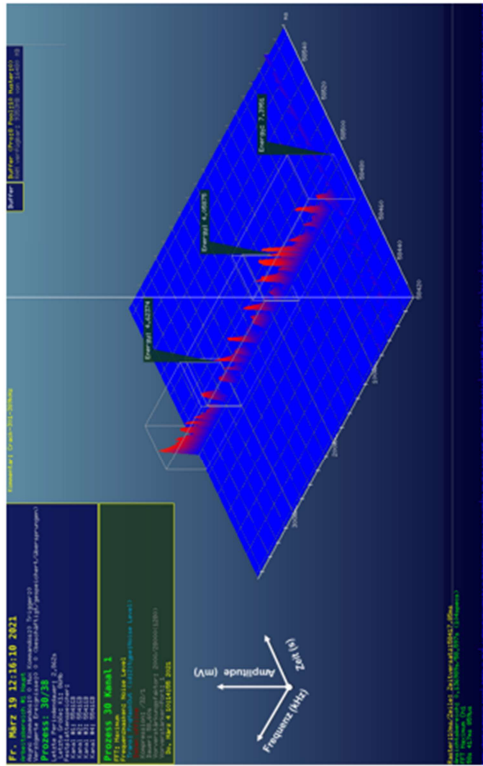


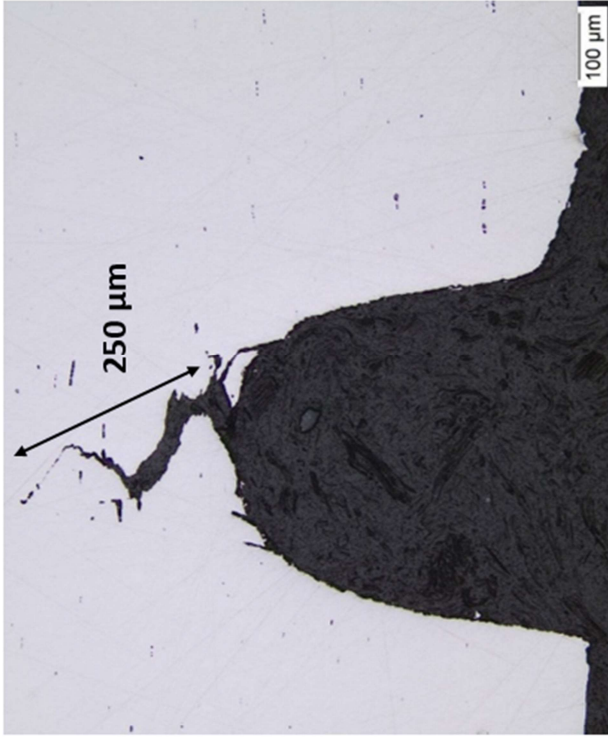
Abbildung 81: Musterkatalog 1.4310 Draht, 1.4310-D-0_7-B-B-2022_13



Material:
Hochlegierter Draht 1.4568 mit $d=6$ mm

Versuchsparameter:
Biegebeanspruchung, Vorschubgeschwindigkeit: 30 mm/min

Abbildung 82: Musterkatalog 1.4568 Draht, 1.4568-6-un-B-21.1



5. Materialcharakterisierung SH (SH_D7.5_B1_1514)



Hochschule Wismar
Fakultät für Ingenieurwissenschaften

Tel.: +49 3841 753-0

Philipp-Müller-Straße 14
23966 Wismar, Germany

Internet: www.hs-wismar.de

Analysen - Protokoll

Datum: 02.10.2020

Messwerte :

Nr	C	Si	Mn	P	S	Cu	Al	Cr	Mo	Ni	Ni	V	Ti	Nb	Co	W	Sn	Pb	B	As	Zr	V.	Mn.	Fe	Fe	
1	0,868	0,201	0,570	<0,001	0,010	0,042	0,023	0,161	0,008	0,068		0,048	<0,001	<0,001	0,006	0,002	0,095	<0,001	0,004	0,374	<0,001				97,5	97,5
2	0,864	0,203	0,573	<0,001	0,009	0,040	0,024	0,164	0,006	0,068		0,049	<0,001	<0,001	0,006	0,011	0,092	<0,001	0,004	0,377	<0,001				97,5	97,5
3	0,852	0,200	0,576	<0,001	0,010	0,040	0,024	0,163	0,008	0,067		0,048	<0,001	<0,001	0,007	0,004	0,091	<0,001	0,004	0,373	<0,001				97,5	97,5

Mittelwert :

C	0,861	0,201	0,573	<0,001	0,010	0,041	0,024	0,163	0,007	0,068		0,048	<0,001	<0,001	0,006	0,005	0,092	<0,001	0,004	0,375	<0,001				97,5	97,5
---	-------	-------	-------	--------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	--	-------	--------	--------	-------	-------	-------	--------	-------	-------	--------	--	--	--	------	------

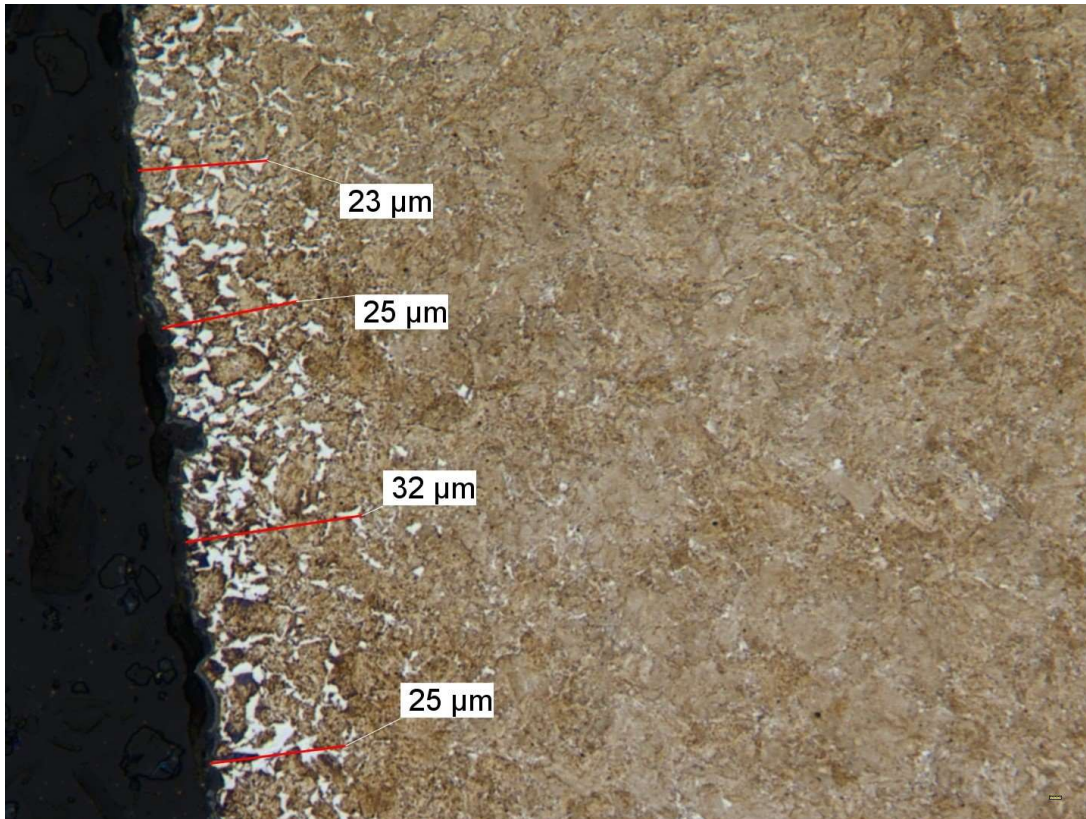


Abbildung 83: Keine Randentkohlung SH_D_7.5_B_1_1M

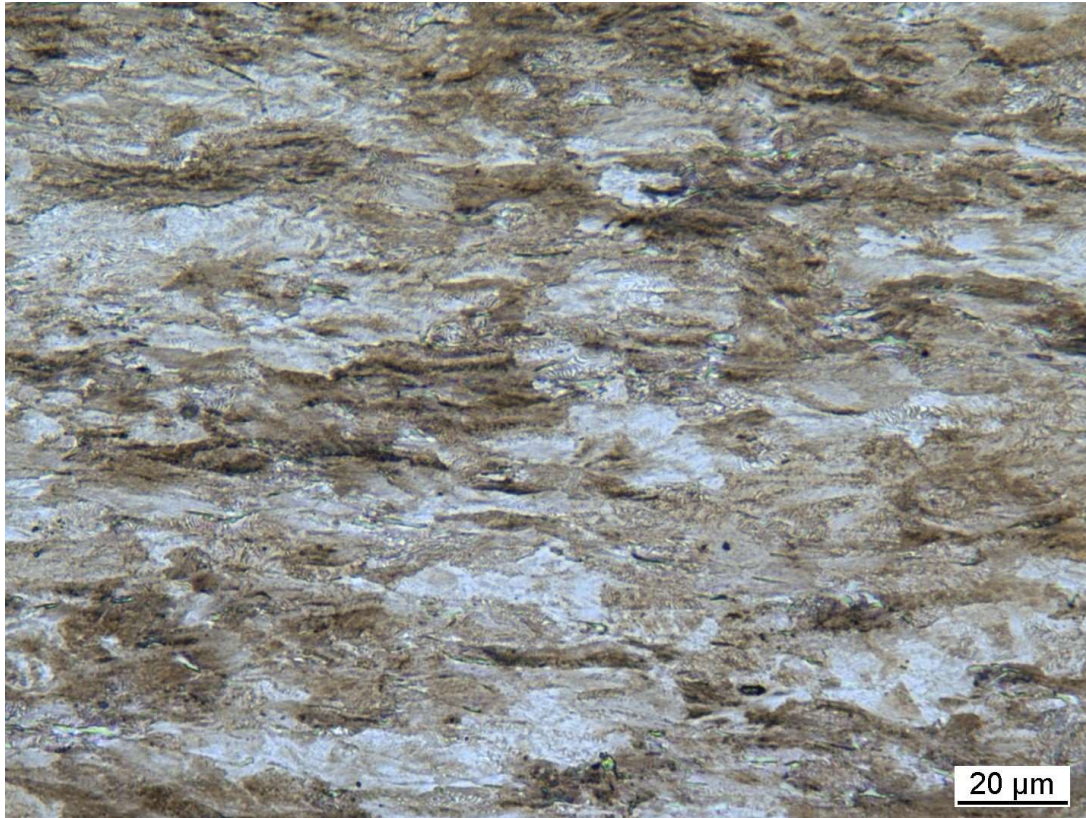


Abbildung 84: Gefüge SH_D_7.5_B_4_2M

6. Materialcharakterisierung DH (DH_D7.5_C1_1636)



Hochschule Wismar
Fakultät für Ingenieurwissenschaften

Tel.: +49 3841 753-0

Philipp-Müller-Straße 14
23966 Wismar, Germany

Internet: www.hs-wismar.de

Analysen - Protokoll

Datum: 12.01.2021

Messwerte :

Nr	C	Si	Mn	P	S	Cu	Al	Cr	Cr.	Mo	Ni	Ni.	V	Ti	Nb	Co	W	Sn	Pb	B	As	Zr	V.	Mn.	Fe	Fe	
1	0,860	0,202	0,568	<0,001	0,010	0,041	0,024	0,163	0,005	0,066	0,048	<0,001	<0,001	0,048	<0,001	0,006	0,016	0,093	<0,001	0,003	0,354	<0,001				97,5	Fe
2	0,857	0,200	0,567	<0,001	0,009	0,037	0,024	0,162	0,006	0,064	0,048	<0,001	<0,001	0,048	<0,001	0,006	<0,001	0,090	<0,001	0,003	0,360	<0,001				97,6	Fe
3	0,853	0,198	0,567	<0,001	0,010	0,037	0,024	0,164	0,006	0,064	0,048	<0,001	<0,001	0,048	<0,001	0,006	0,005	0,091	<0,001	0,003	0,362	<0,001				97,5	Fe

Mittelwert :

C	0,857	0,200	0,567	<0,001	0,010	0,039	0,024	0,163	0,006	0,064	0,048	<0,001	<0,001	0,048	<0,001	0,006	0,007	0,091	<0,001	0,003	0,359	<0,001				97,5	Fe
---	-------	-------	-------	--------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	--------	--------	-------	--------	-------	-------	-------	--------	-------	-------	--------	--	--	--	------	----

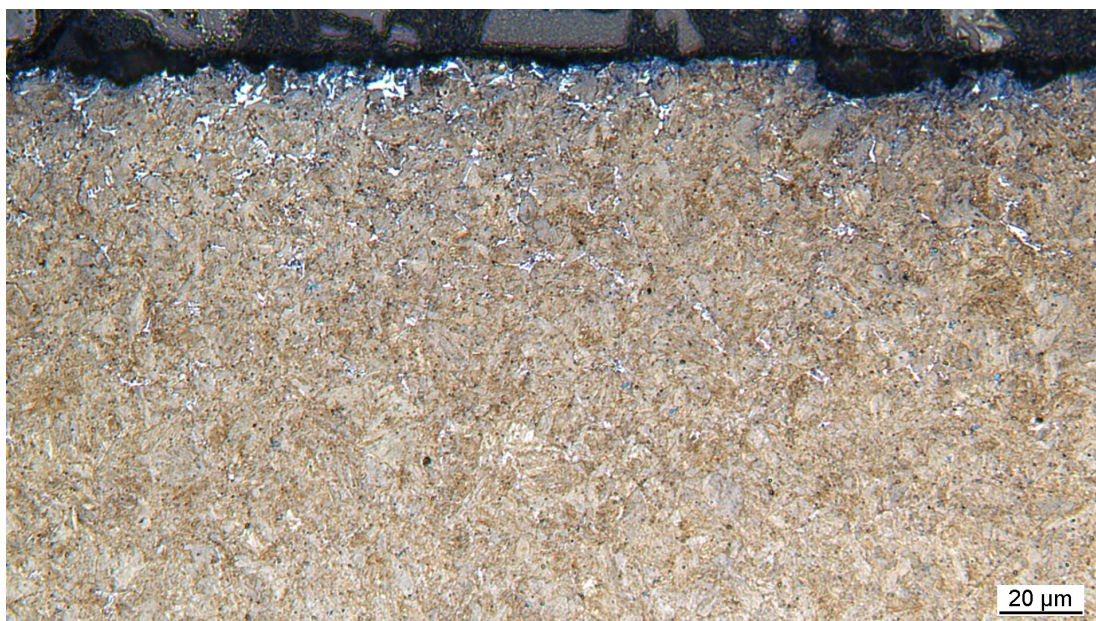


Abbildung 85: Keine Randentkohlung DH_D_5_B_7_1



Abbildung 86: Gefüge DH_D_5_B_7_1

7. Materialcharakterisierung FDSiCr (FDSiCr_D7.5_B4_1785)



Hochschule Wismar
 Fakultät für Ingenieurwissenschaften
 Philipp-Müller-Straße 14
 23966 Wismar, Germany
 Tel.: +49 3841 753-0
 Internet: www.hs-wismar.de

Analysen - Protokoll

Datum: 02.10.2020

Messwerte :

Nr	C	Si	Mn	P	S	Cu	Al	Cr	Cr.	Mo	Ni	Ni.	V	Ti	Nb	Co	W	Sn	Pb	B	As	Zr	V.	Mn.	Fe	Fe	
1	0,585	1,415	0,733	<0,001	<0,001	0,012	0,005	0,742	0,006	0,008	0,006	<0,001	0,006	<0,001	<0,001	0,012	<0,001	<0,002	<0,001	<0,0001	<0,001	0,002				96,5	96,5
2	0,579	1,445	0,745	<0,001	<0,001	0,015	0,005	0,749	0,002	0,011	0,008	<0,001	0,008	<0,001	0,016	0,018	<0,001	<0,002	<0,001	<0,0001	<0,001	0,008				96,4	96,4
3	0,568	1,465	0,748	<0,001	<0,001	0,020	0,005	0,754	0,002	0,010	0,009	<0,001	0,016	<0,001	0,016	0,016	<0,001	<0,002	<0,001	<0,0001	<0,001	0,007				96,4	96,4

Mittelwert :

C	0,578	1,442	0,742	<0,001	<0,001	0,016	0,005	0,749	0,003	0,009	0,008	<0,001	0,011	<0,001	0,011	0,015	<0,001	<0,002	<0,001	<0,0001	<0,001	0,006				96,4	96,4
---	-------	-------	-------	--------	--------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	--------	-------	--------	-------	-------	--------	--------	--------	---------	--------	-------	--	--	--	------	------

Qualität : 1.7104 55 SiCr 6-3

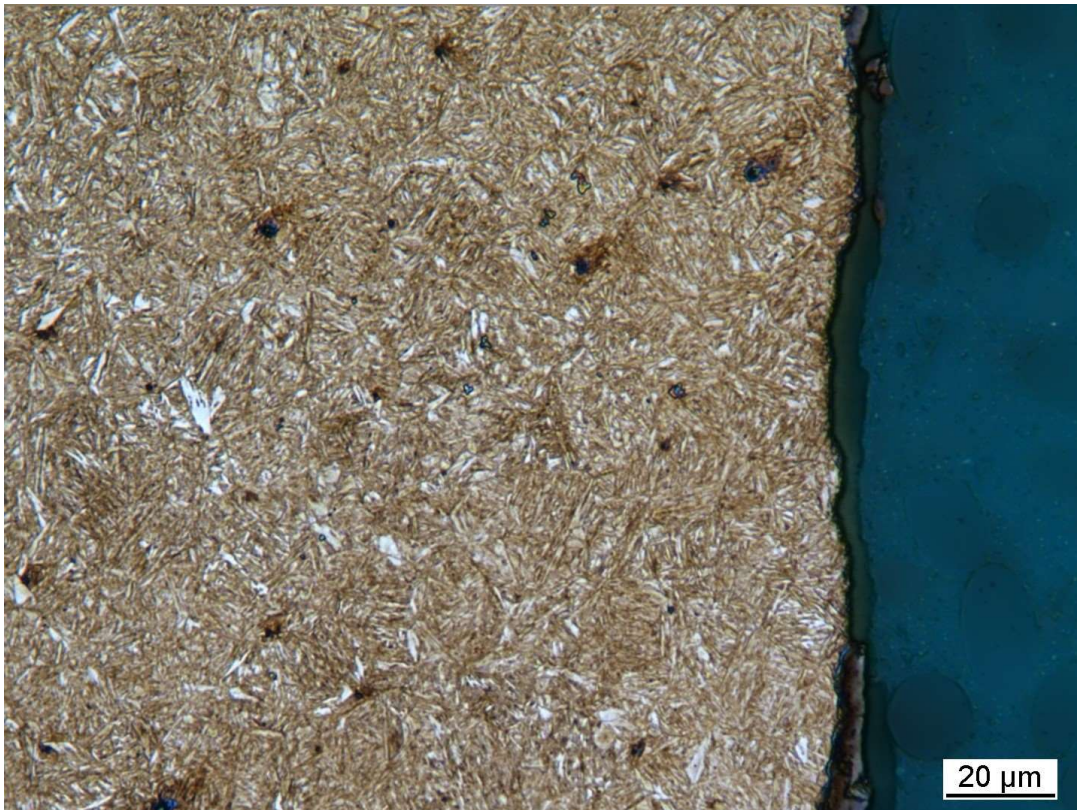


Abbildung 87: Keine Randentkohlung FDSiCr_D_7.5_B_3_2

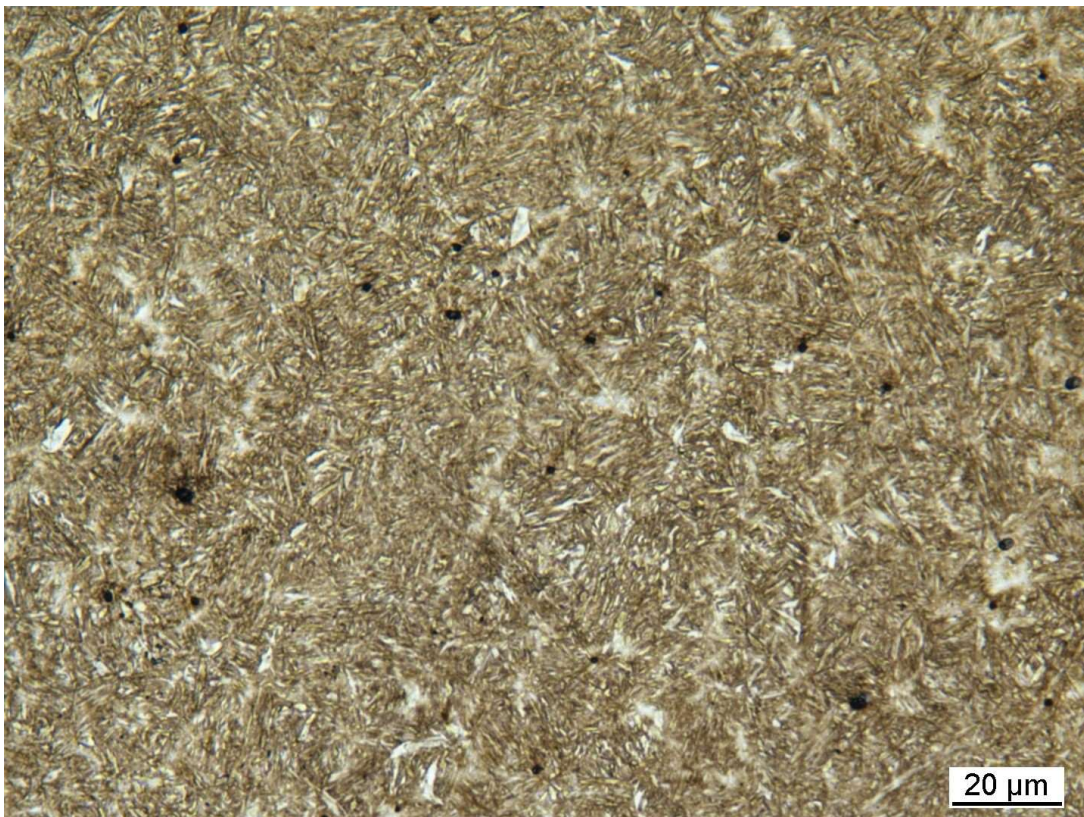


Abbildung 88: Gefüge FDSiCr-D-7.5-B-1.1

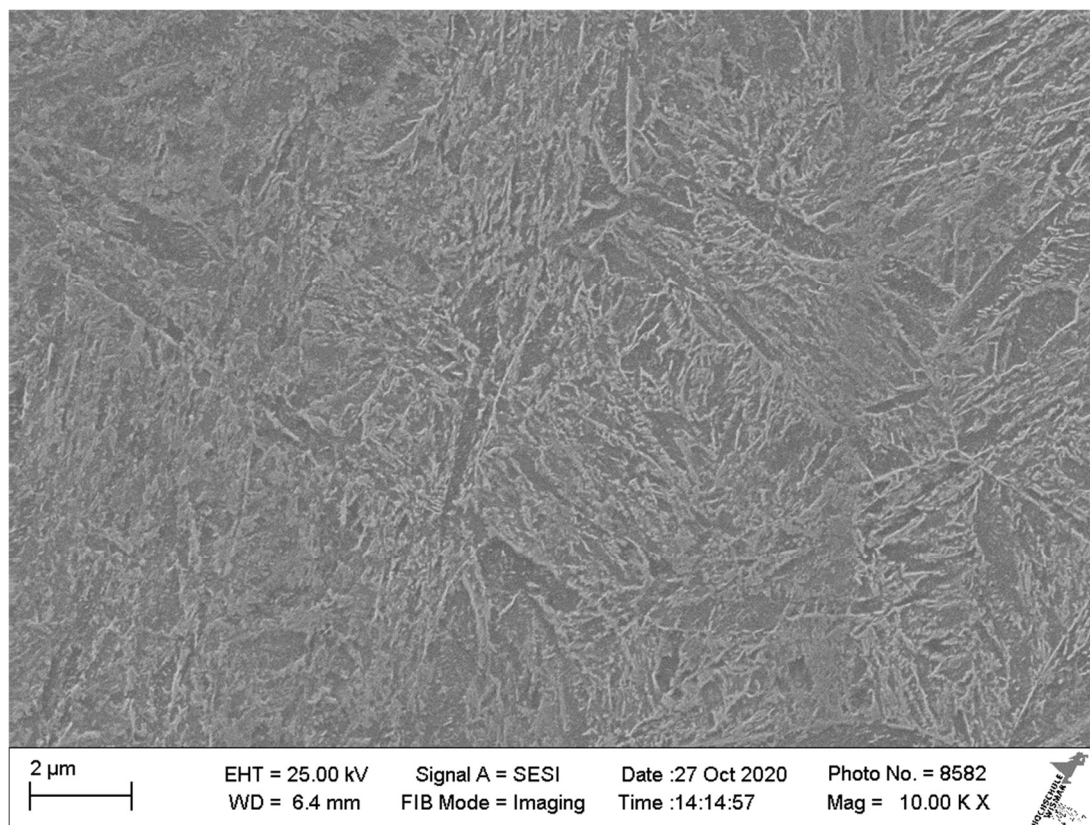
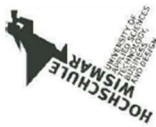


Abbildung 89: Gefüge FDSiCr-D-7.5-B-1.1

8. Materialcharakterisierung VDSiCr (VDSiCr_D7.5_C2_1746)



Hochschule Wismar
 Fakultät für Ingenieurwissenschaften
 Philipp-Müller-Straße 14
 23966 Wismar, Germany
 Tel.: +49 3841 763-0
 Internet: www.hs-wismar.de

Analysen - Protokoll

Datum: 02.10.2020

Messwerte :

Nr	C	Si	Mn	P	S	Cu	Al	Cr	Cr.	Mo	Ni	Ni.	V	Ti	Nb	Co	W	Sn	Pb	B	As	Zr	V.	Mn.	Fe	Fe	Fe	Fe				
1	0,564	1,906	0,752	<0,001	<0,001	0,007	0,008	0,710		0,009	0,004	0,008	0,002	0,003	0,010	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,010	0,010	0,018	<0,0001	<0,001	0,010	0,010	96,0	96,0	96,0	96,0
2	0,557	1,933	0,752	<0,001	<0,001	0,003	0,007	0,711		0,002	0,003	0,009	<0,001	0,009	0,011	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,005	0,005	0,011	<0,0001	<0,001	0,005	0,005	96,0	96,0	96,0	96,0
3	0,551	1,957	0,748	<0,001	<0,001	0,005	0,008	0,689		0,002	0,003	0,009	0,002	0,018	0,010	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,009	0,009	0,011	<0,0001	<0,001	0,009	0,009	96,0	96,0	96,0	96,0

Mittelwert :

C	0,557	1,932	0,751	<0,001	<0,001	0,005	0,007	0,703		0,004	0,003	0,009	0,002	0,010	0,010	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,008	0,008	0,012	<0,0001	<0,001	0,008	0,008	96,0	96,0	96,0	96,0
---	-------	-------	-------	--------	--------	-------	-------	-------	--	-------	-------	-------	-------	-------	-------	--------	--------	--------	--------	--------	-------	-------	-------	---------	--------	-------	-------	------	------	------	------

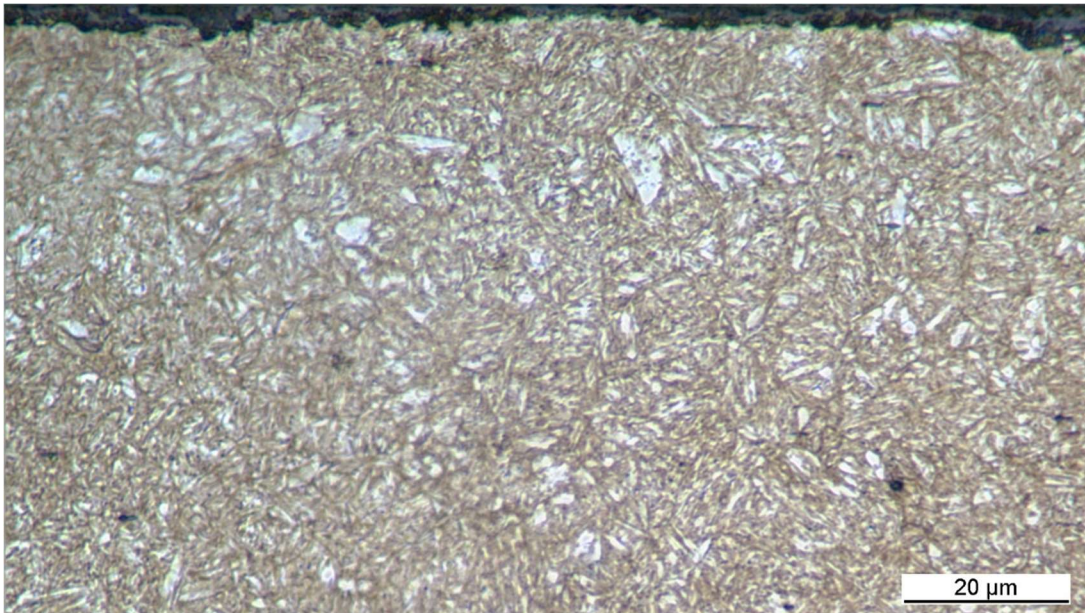


Abbildung 90: Keine Randentkohlung VDSiCr_D_7.5_B_5_3M

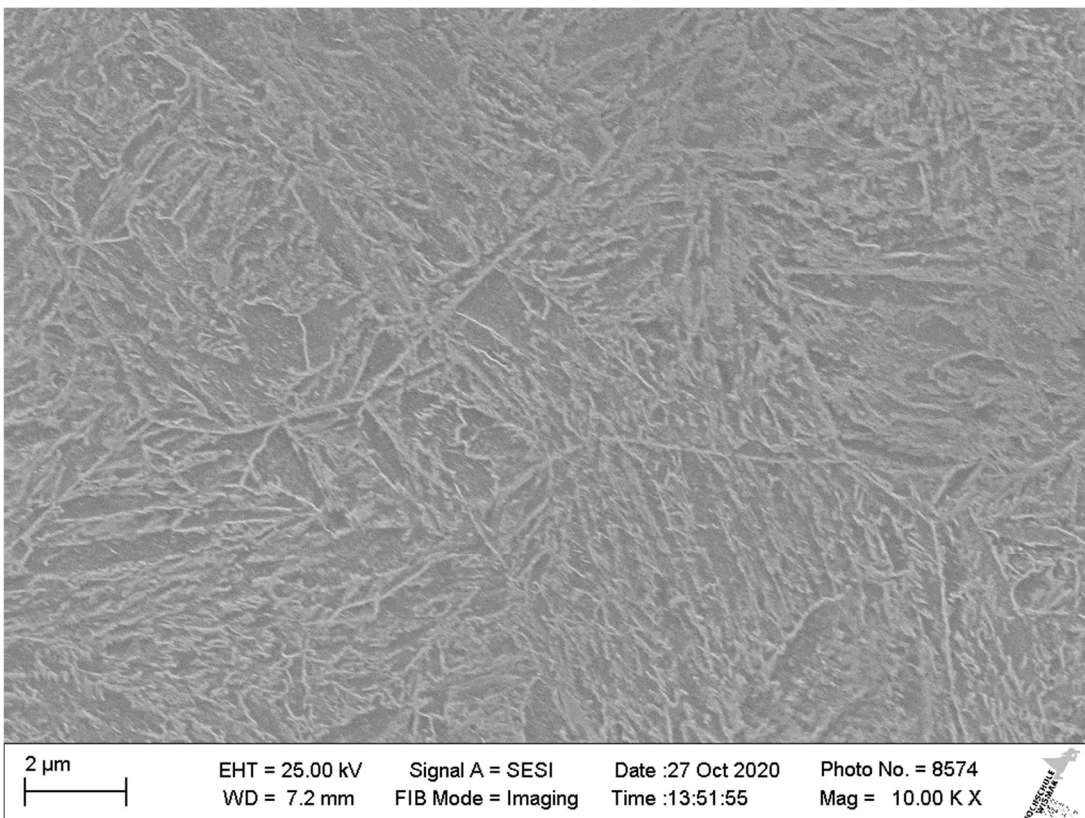


Abbildung 91: Gefüge VDSiCr-D-7.5-B-1.3

9. Materialcharakterisierung 1.4310 (1.4310_D6.0_C6_1556)



Hochschule Wismar
Fakultät für Ingenieurwissenschaften
Tel.: +49 3841 753-0
Philip-Müller-Straße 14
23966 Wismar, Germany
Internet: www.hs-wismar.de

Analysen - Protokoll

Datum: 12.01.2021

Messwerte :

Nr	C	Si	Mn	P	S	Cu	Al	Cr.	Mo	Ni.	V	Ti	Nb	Co	W	Fe
1	0,060	0,625	1,276	0,003	<0,001	0,378	0,010	17,67	0,329	7,15	0,081	0,020	0,019	0,190	0,049	72,14
2	0,055	0,646	1,298	0,002	<0,001	0,383	0,011	17,72	0,317	7,07	0,085	0,021	0,029	0,189	0,051	72,11
3	0,050	0,622	1,313	0,004	<0,001	0,382	0,011	17,76	0,319	7,02	0,082	0,020	0,019	0,189	0,039	72,16

Mittelwert :

C	Si	Mn	P	S	Cu	Al	Cr.	Mo	Ni.	V	Ti	Nb	Co	W	Fe
0,055	0,631	1,296	0,003	<0,001	0,381	0,011	17,72	0,321	7,08	0,082	0,020	0,022	0,189	0,046	72,14

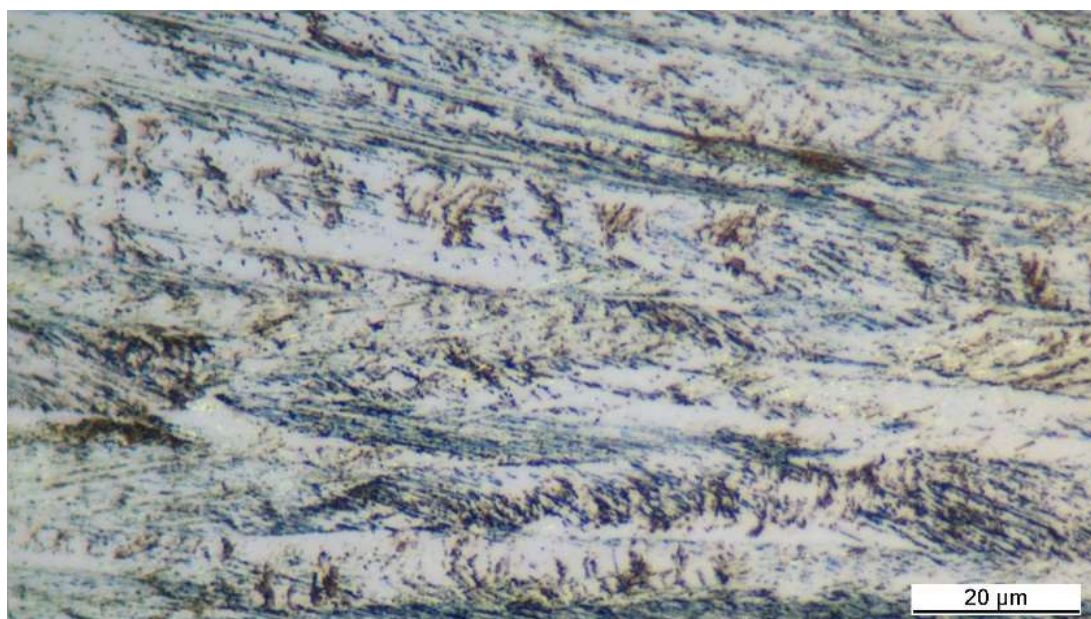


Abbildung 92: Gefüge 1.4310, 1.4310_D_3_B_24_3M

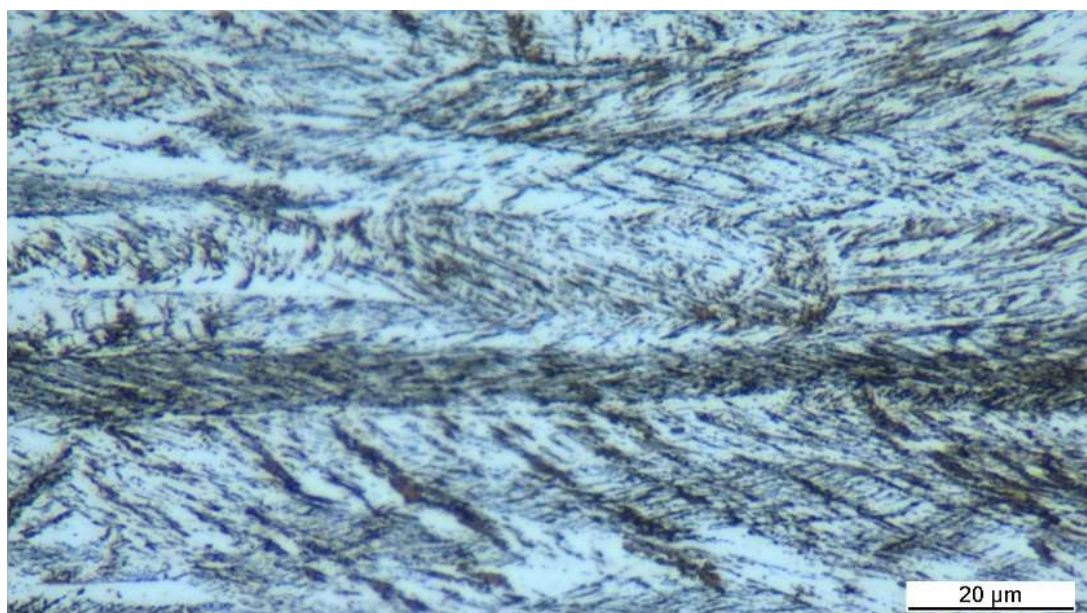


Abbildung 93: 1.4310, 1.4310_D_6_B_2_1M

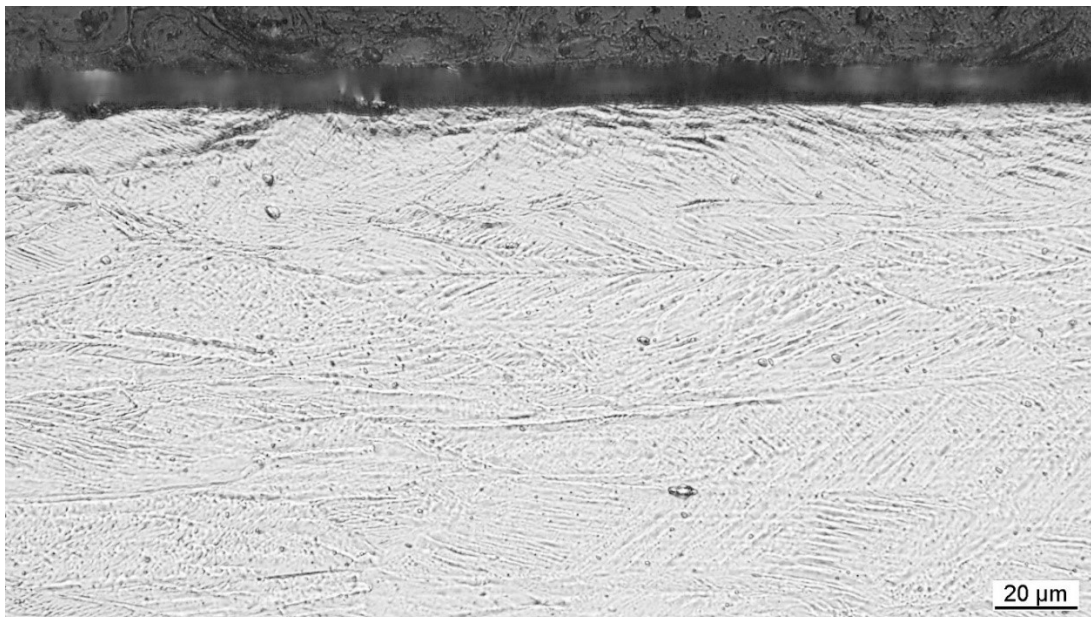


Abbildung 94: Gefüge 1.4310_D_1_B_2_1



Abbildung 95: Gefüge 1.4310, 1.4310_D_1_B_2_1

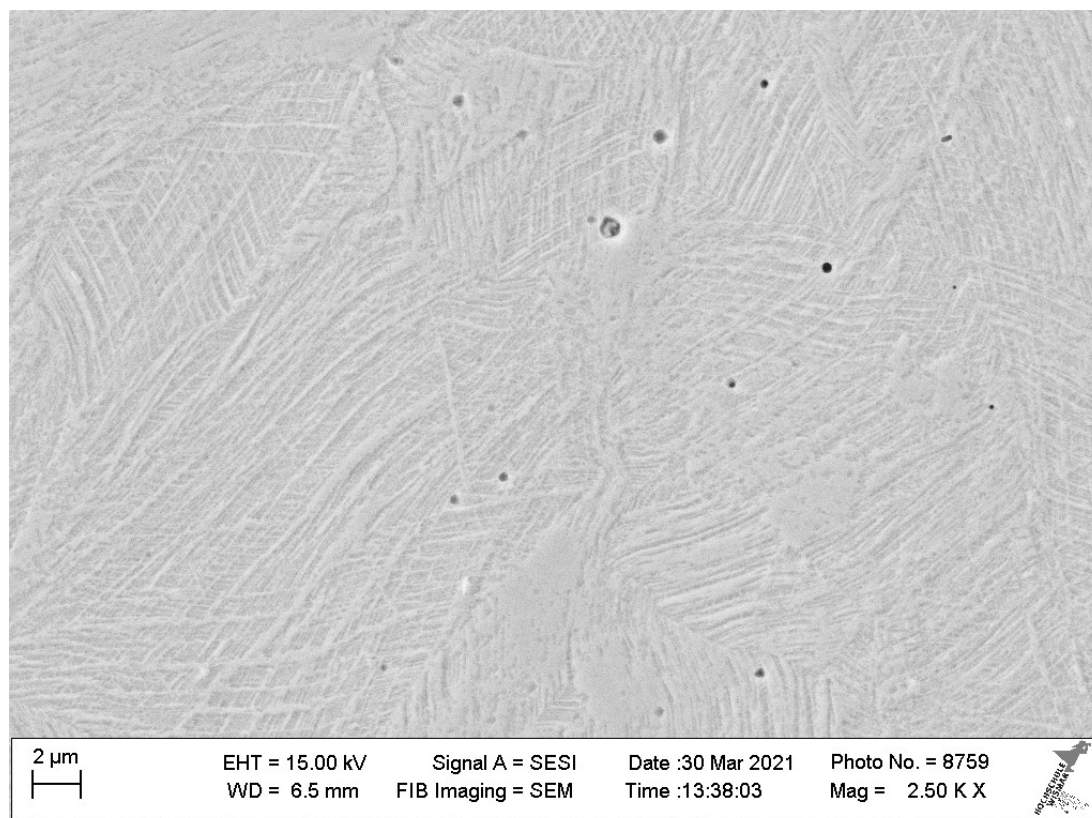


Abbildung 96: Gefüge 1.4310, 1.4310_D_1_B_2_1

10. Materialcharakterisierung 1.4568 (1.4568_D6_C8_1378)



Hochschule Wismar
 Fakultät für Ingenieurwissenschaften
 Philipp-Müller-Straße 14
 23566 Wismar, Germany
 Tel.: +49 3841 755-0
 Internet: www.hs-wismar.de

Analysen - Protokoll

Datum: 29.03.2022

Messwerte :		C	Si	Mn	P	S	Cu	Al	Cr	Cr	Mo	Ni	Ni	V	Ti	Nb	Co	W	Sn	Pb	B	As	Zr	V	Mn	Fe	Fe
Nr	1	0,099	0,479	0,757	<0,001	<0,001	0,242	1,254	16,41	0,251	7,50	0,053	0,025	0,000	0,137	0,134											72,64
	2	0,098	0,480	0,764	<0,001	<0,001	0,252	1,240	16,49	0,255	7,56	0,056	0,025	0,006	0,143	0,145											72,48
	3	0,097	0,491	0,766	<0,001	<0,001	0,245	1,267	16,48	0,262	7,47	0,056	0,025	0,000	0,141	0,124											72,56
Mittelwert :		C	Si	Mn	P	S	Cu	Al	Cr	Cr	Mo	Ni	Ni	V	Ti	Nb	Co	W	Sn	Pb	B	As	Zr	V	Mn	Fe	Fe
		0,098	0,483	0,763	<0,001	<0,001	0,246	1,254	16,46	0,256	7,51	0,055	0,026	0,002	0,141	0,134											72,56

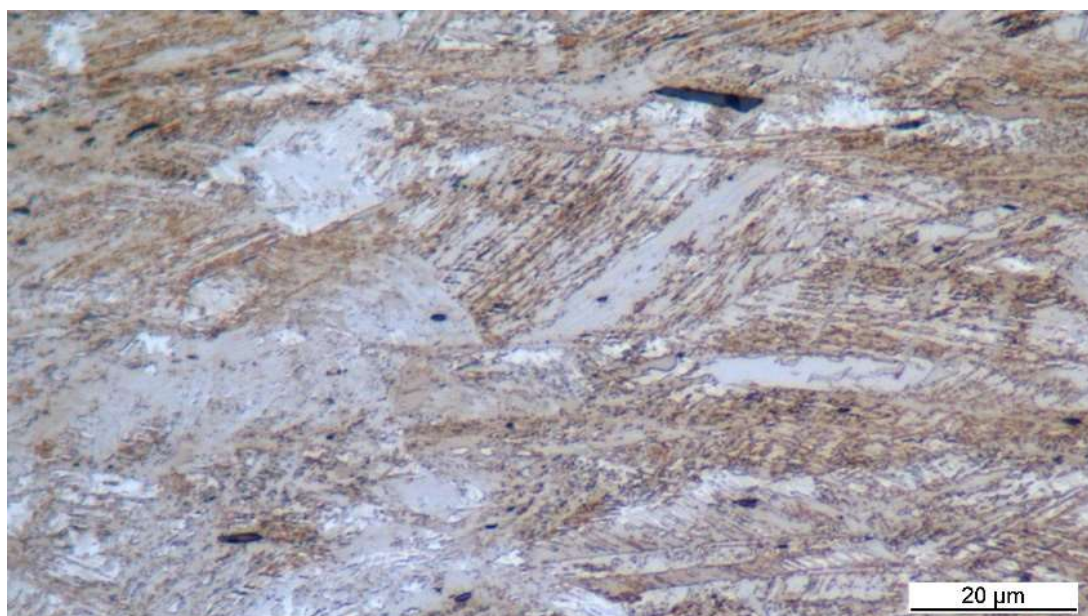


Abbildung 97: Gefüge 1.4568, 1.4568_D_3_B_13_1

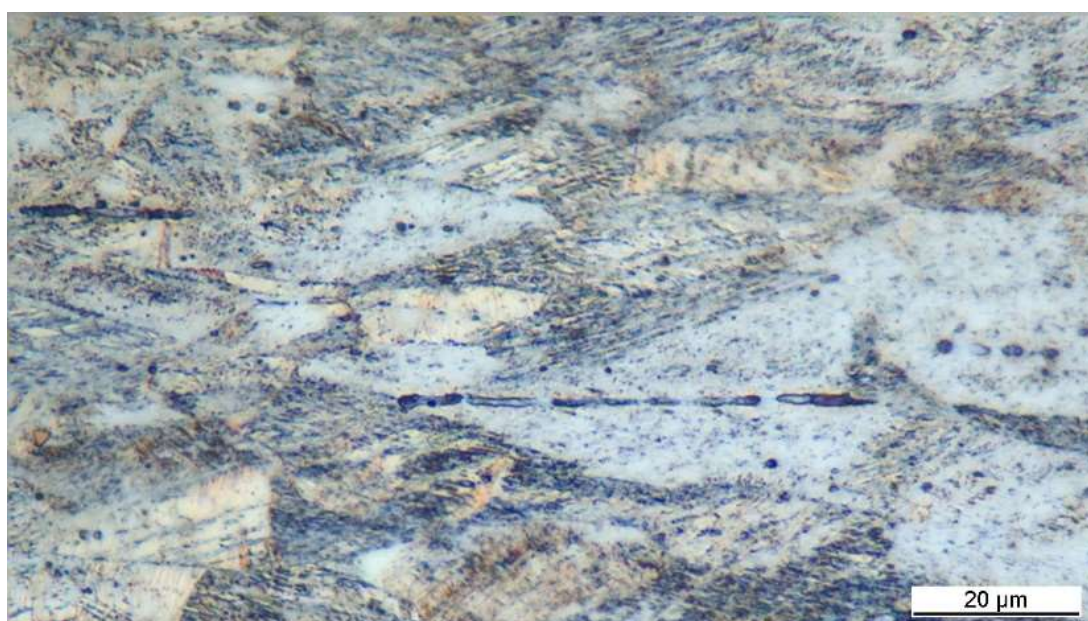


Abbildung 98: Gefüge 1.4568, 1.4568_D_6_B_1_1

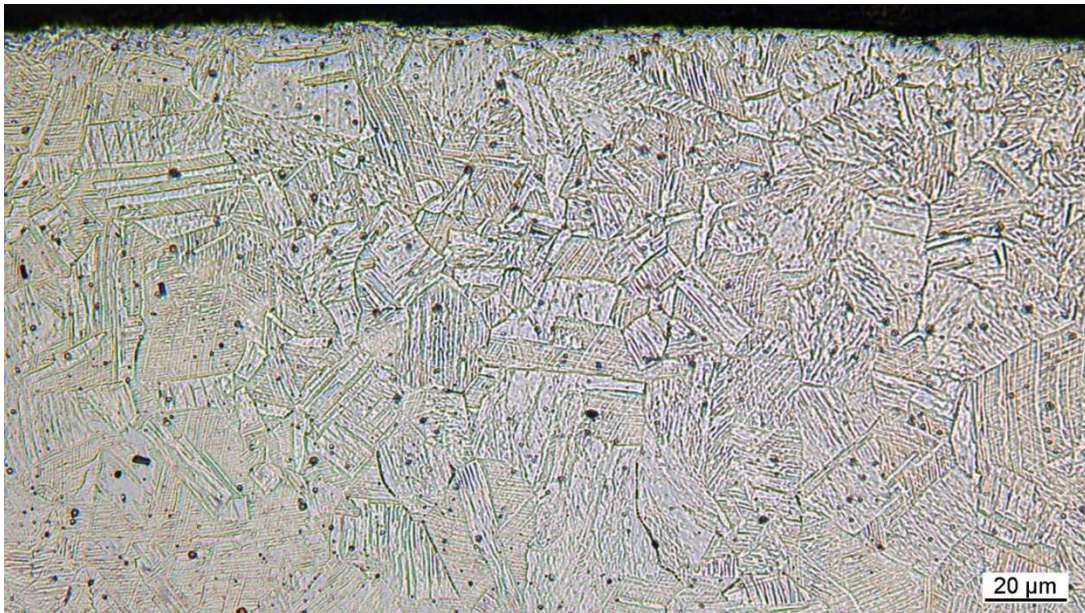


Abbildung 99: Gefüge 1.4568, 1.4568_D_3_B_12_2

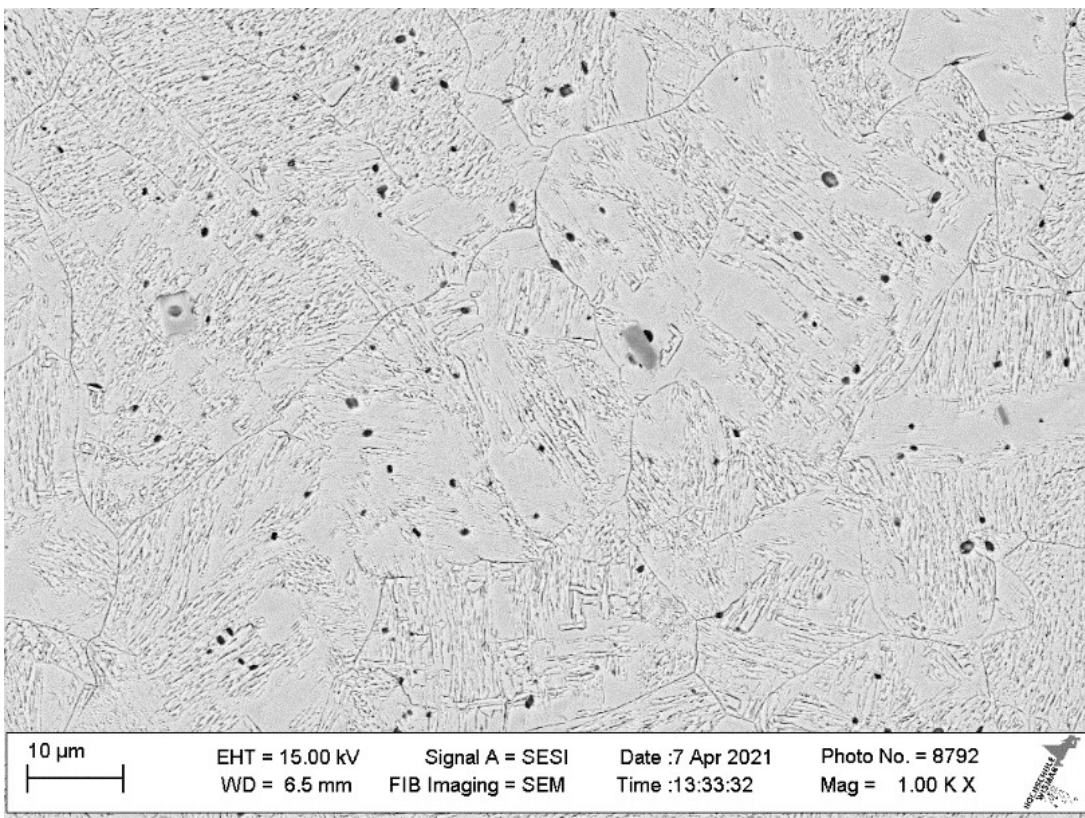


Abbildung 100: Gefüge 1.4568, 1.4568_D_6_B_1_1

11 Optokopplermodul Kommunikation QASS und Instron

- **Löten vom Sub-D Stecker:**

Ausgang:

Von PIN 1 zu PIN 20 (schwarz) → 5V

Von PIN 2 zu PIN 9 Widerstand → GND

PIN 2 (rot) → 5V

PIN 18 (schwarz/grau) → GND

Eingang:

PIN 9 (pink) → GND

PIN 19 (gelb) → 5V

PIN 10 (braun) → GND

PIN 17 (weiß) → 5V

1.1 Ausgangssignal von Instron (5V) zu QASS (24V)

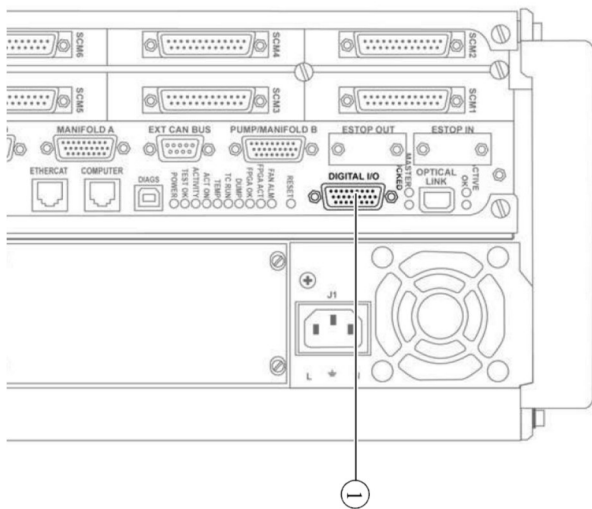


Abbildung 101: Instron Controller Anschluss Digital IO

Ausgang	Positiv	Negativ	5-V-Pull-up
1	Pin1	Pin2	Pin20
2	Pin3	Pin4	Pin22
3	Pin5	Pin6	Pin24
4	Pin7	Pin8	Pin26

Abbildung 102: Digitale Ausgänge Instron

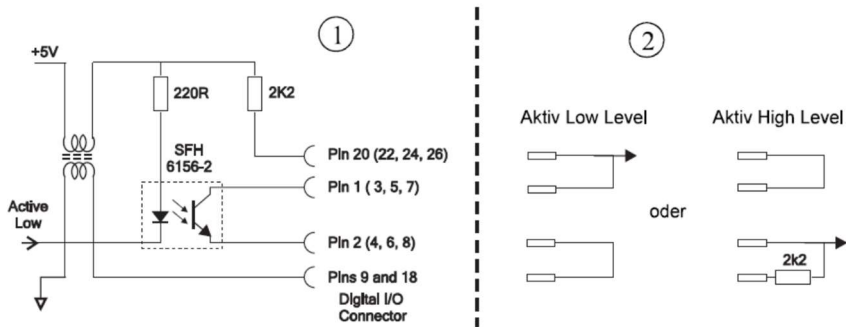


Abbildung 103: Digital Ausgangskreis Instron

Wie in Abbildung 2 dargestellt, wird PIN 2 (rot) mit dem Optokopplermodul („linke Seite“ 5V→24V) Eingang verbunden. PIN 18 für GND (grau) wird mit dem Optokopplermodul GND verbunden. Anschließend wird die Verbindung zum QASS Gerät hergestellt. Hierzu wird das Optokopplermodul mit der Spannungsversorgung (24V) vom QASS Gerät angeschlossen (rot→ +24 , gelb→GND), siehe Abbildung 4.

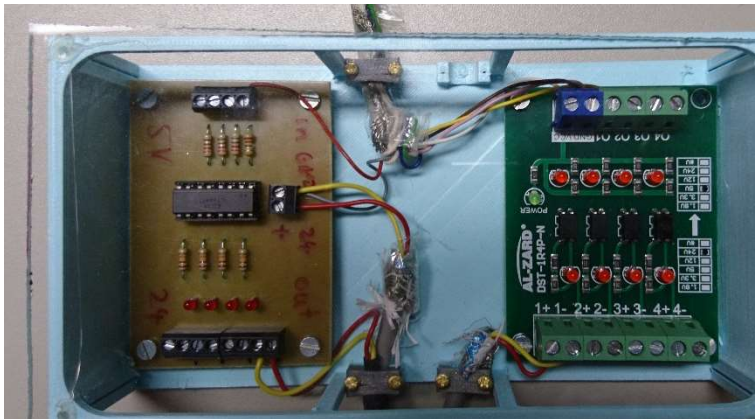


Abbildung104: Optokopplermodul (links: 5V→24V, rechts 24V→5V)

Danach wird das Optokopplermodul +24V (rot) mit dem Eingang am QASS Gerät 1.1 (Abbildung 5, 6 und 7) verbunden. Anschließend wird GND (gelb) vom Optokopplermodul Ausgang zum QASS Gerät Eingang GND verbunden.

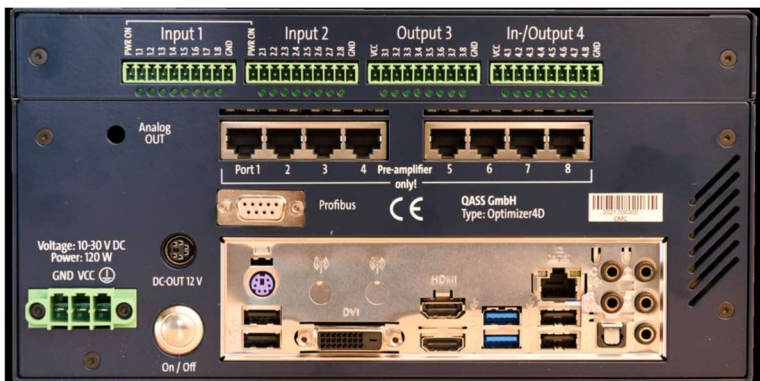
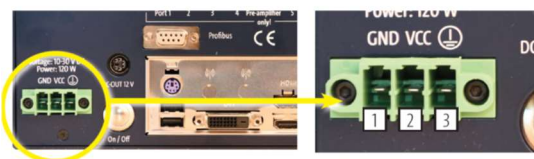


Abbildung 105: QASS Optimizer4D Anschluss

Vcc Stromanschluss Belegung



Vcc Stromanschluss Belegung	
Pos.	Funktion
1	GND
2	12/24 V Eingang
3	Potenzialausgleich

Abbildung 106: Spannungsversorgung vom QASS für das Optokopplermodul

I/O-Anschlüsse

Port	#	PLC Eigenschaft	Bitte beachten
Input 1	-	Ein-Schalter ON1	Ein-Schalter wenn mit ON2 verbunden
Input 1	1.1	Messung starten - Messposition 1	
Input 1	1.2	Messung starten - Messposition 2	
Input 1	1.3	Messung starten - Messposition 3	
Input 1	1.4	Messung starten - Messposition 4	

Abbildung 107: Beschaltung QASS Eingang

1.2 Ausgangssignal von QASS (24V) zu Instron (5V)

Hierzu wird zunächst vom Instron eine Spannungsversorgung von 5V, Pin 2 (+5V) (weiß) und PIN 2 (braun) (GND), siehe Abbildung 8 und 9, mit dem Optokopplermodul (VCC, GND) verbunden, siehe Abbildung 10. Danach wird vom Instron Eingang PIN 19 (gelb) mit dem 01 Eingang am Optokopplermodul und PIN 9 GND (Pink) mit GND am Modul verbunden.

Digital-Eingang	Positiv	Negativ	Interner 5-V-Pull-up
1	Pin19	Pin10	Pin11
2	Pin21	Pin12	Pin13
3	Pin23	Pin14	Pin15
4	Pin25	Pin16	Pin17

Abbildung 108: Digitale Eingänge Instron

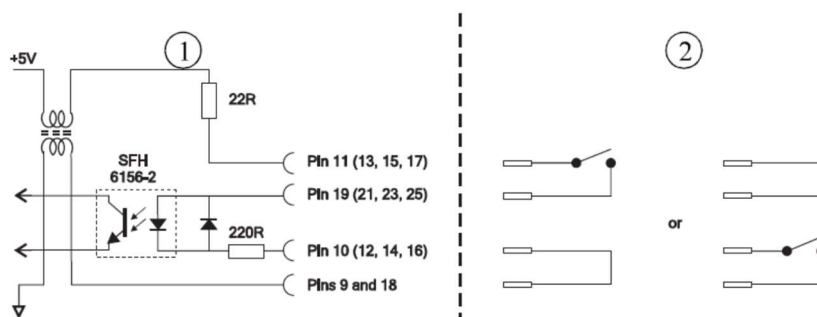


Abbildung 109: Digital Eingangskreis Instron

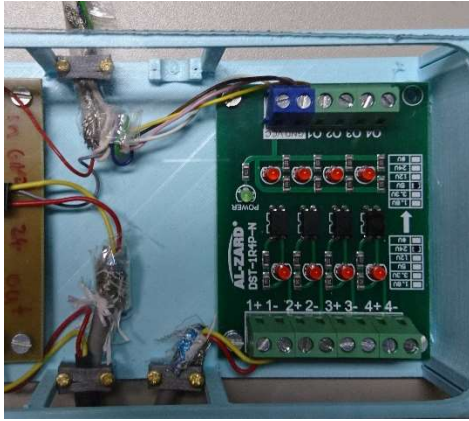


Abbildung 110: Optokopplermodul von 24V auf 5V

Danach erfolgt die Verbindung vom QASS Ausgangssignal zum Optokoppler-Eingang. Hierzu wird die Spannungsversorgung 24V vom QASS Gerät mit dem Ausgang QASS Gerät verbunden. Sobald die Spannungsversorgung verbunden ist, kann vom QASS Ausgang 3.4 (+24) zum Optokopplermodul 1+ verbunden werden. Dann GND vom QASS Ausgang mit dem GND (-1) verbinden.

Output 3	24 V	24 V Eingang / V_{cc}	
Output 3	3.1	Messbereit	
Output 3	3.2	Arbeitet / Busy	
Output 3	3.3	Messung läuft	
Output 3	3.4	Riss	
Output 3	3.5	Bruch	
Output 3	3.6		
Output 3	3.7		
Output 3	3.8		
Output 3	GND		

Abbildung 111: Beschaltung QASS Ausgang