

UNTERSUCHUNG ZUR AUSBILDUNG VON
EIGENSPANNUNGEN IN DER
OBERFLÄCHENGRENZSCHICHT AN SPANEND
HERGESTELLTEN WERKSTÜCKEN DURCH
FRÄSEN

Fakultät Ingenieurwissenschaften
Hochschule Mittweida

Masterarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades
Master of Engineering

Eingereicht von

Florian Berger

geboren am 28. Januar 1993 in Zschopau

am 28. Februar 2020

Studiengang: Maschinenbau
Seminargruppe: MB17wF-M

Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Eckhard Wißuwa
Prof. Dr.-Ing. Frank Hahn

INVESTIGATION OF THE FORMATION OF
RESIDUAL STRESSES IN THE BOUNDARY
SURFACE LAYER ON MACHINED PARTS BY
MILLING

Faculty of Engineering
of the University of Applied Sciences Mittweida

Masterthesis

for obtaining the academic degree
Master of Engineering

submitted by

Florian Berger

born on 28th of January 1993 in Zschopau

on 28th of February 2019

course of studies: Mechanical Engineering
seminar group: MB17wF-M

examiner: Prof. Dr.-Ing. Eckhard Wißuwa
Prof. Dr.-Ing. Frank Hahn

Bibliografische Beschreibung:

Berger, Florian:

Untersuchung zur Ausbildung von Eigenspannungen in der Oberflächengrenzschicht an spanend hergestellten Werkstücken durch Fräsen - 2020 - 109 S.

Mittweida, Hochschule Mittweida, University of Applied Sciences,
Fakultät Ingenieurwissenschaften, Masterarbeit, 2020

Referat:

Die vorliegende Masterarbeit befasst sich mit den Auswirkungen des Stirnplanfräsens auf den Eigenspannungszustand in der Oberflächengrenzschicht von Prüfstücken aus dem unlegierten Vergütungsstahl C45. Dabei liegt der Schwerpunkt auf der Bewertung der Zusammenhänge zwischen relevanten Fertigungsparametern und der sich einstellenden Charakteristik des Randzonenbereichs. Die Ermittlung des Eigenspannungszustands wurde hierbei unter Zuhilfenahme der Messmethodik des Bohrlochverfahrens durchgeführt. Auf der Grundlage der erzielten Erkenntnisse erfolgte ebenfalls eine Analyse der verwendeten Werkzeugmaschine auf ökonomischer Ebene.

Einen weiteren zentralen Bestandteil dieser Arbeit bilden die sich anschließenden Langzeituntersuchungen, welche sich am Vorgehen sowie den Randbedingungen einer spanenden Bearbeitung aus der Praxis orientieren. Erneut steht dabei der sich ausbildende Spannungszustand im Randzonenbereich der C45-Proben im primären Fokus.

Am Ende dieser wissenschaftlichen Arbeit steht die ausführliche Zusammenfassung aller gewonnenen Ergebnisse und Erkenntnis sowie deren Zusammenhänge und Ableitungen der bearbeiteten Forschungsthematik.

Ein Wort des Dankes

Die vorliegende Masterarbeit entstand in Kooperation mit der Fachgruppe für Fertigungs- und Werkstofftechnik der Hochschule Mittweida als Abschluss meines Maschinenbaustudiums. Für das Zustandekommen dieser Arbeit möchte ich einigen Personen meinen Dank aussprechen.

Mein Dank gebührt insbesondere Herrn Prof. Dr.-Ing. Eckhard Wißuwa sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Frank Hahn. Ich danke Ihnen für das mir entgegengebrachte Vertrauen und die Möglichkeit dieses interessante Thema bearbeiten zu dürfen. Außerdem bedanke ich mich sowohl für die hervorragende Betreuung als auch die Unterstützung sowie die lehrreichen Ratschläge während meiner Zeit an der Hochschule.

Des Weiteren möchte ich all jenen Mitarbeitern der Fakultät Ingenieurwissenschaften meinen Dank aussprechen, die mich in dieser Zeit fachlich unterstützt haben. Vor allem gilt an dieser Stelle mein Dank Herrn Rainer Süchting für die zahlreichen Hilfestellungen und die Durchführung der experimentellen Fräsversuche. Ebenfalls bedanke ich mich bei Frau Dipl.-Ing. Ulrike Hähnel für die konstruktiven Diskussionen und Hinweise bei der Eigenspannungsanalyse sowie bei Herrn Dipl.-Ing. Andreas Eysert für die Probenpräparation und die Einführung in die Mikrohärteprüfung.

Frau Ursula Klappstein und Herrn Dipl.-Ing. Danny Hösel möchte ich für die Motivation bei der Fertigstellung der Arbeit sowie die fachlichen als auch nicht fachlichen Gespräche danken.

Ein ganz besonderer Dank gebührt meinen Eltern und Geschwistern. Ich danke euch für die Ermöglichung meines gesamten Studiums gleichermaßen wie die wertvollen Unterstützungen und den Rückhalt, den ihr mir in allen Lebenslagen gebt. Nicht zuletzt danke ich meiner Freundin für ihr Verständnis, ihre Geduld, ihre Kraft und ihre Motivation während dieser Zeit.

Mittweida, Februar 2020

Florian Berger

Inhaltsverzeichnis

Ein Wort des Dankes	I
Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	VI
Abkürzungsverzeichnis	VII
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Aufgabenstellung und Vorgehensweise	2
2 Grundlagen und Kenntnisstand	3
2.1 Zerspanungsprozess und Spanbildung	3
2.2 Aufbau technischer Oberflächen und Randzoneneigenschaften	5
2.3 Eigenspannungen	8
2.3.1 Definition und Einteilung von Eigenspannungen	8
2.3.2 Entstehungsursachen von Eigenspannungen am Beispiel der spanen- den Bearbeitung	12
2.3.3 Ermittlung von Eigenspannungen	15
3 Stand der Forschung	21
4 Material, Werkstoffzustand und Geometrie der Proben	24
4.1 Werkstoff der Proben	24
4.1.1 Vergütungsstahl C45	24
4.1.2 Zustand und Eigenschaften des Probenmaterials C45	25
4.2 Geometrie der Proben	28
5 Experimentelle Versuchsdurchführung	30
5.1 Beschreibung der verwendeten Messtechnik zur Analyse der Zielgrößen . .	30
5.1.1 Messaufbau zur Ermittlung der Eigenspannungen mittels Bohrloch- verfahren	30

5.1.2	Messaufbau zur Bestimmung der Mikrohärte	33
5.1.3	Bewertung der Energieeffizienz der Fräsprozesse	35
5.2	Auswahl der Fräswerkzeuge zur Fertigung der Proben	36
5.3	Planung der Kurzzeituntersuchungen	37
5.3.1	Versuchsaufbau	37
5.3.2	Versuchsreihe 1: Bewertung aller definierter Prozessparameter . . .	38
5.3.3	Versuchsreihe 2: Veränderung der Schnittwerte	40
5.3.4	Versuchsreihe 3: Bewertung der Bauteilhöhe	41
5.4	Planung der Langzeituntersuchungen	42
5.4.1	Versuchsreihe 4: Ermittlung der Zerspannungstemperatur	43
5.4.2	Versuchsreihe 5: Bewertung des Werkzeugverschleißes	46
5.4.3	Versuchsreihe 6: Bewertung der Eigenspannungen nach einer definierten Zeitspanne	48
6	Ergebnisanalyse und Auswertung	49
6.1	Auswertung der Referenzprobe GG	49
6.2	Auswertung der durchgeführten Kurzzeituntersuchungen	51
6.2.1	Analyse der Eigenspannungszustände in der Randzone in Abhängigkeit der variablen Einflussfaktoren	51
6.2.2	Analyse der Mikrohärte in Korrelation zu den Eigenspannungen im Randzonenbereich	65
6.2.3	Bewertung der Energieeffizienz der durchgeführten Stirnfräsprozesse	66
6.3	Auswertung der durchgeführten Langzeituntersuchungen	70
6.3.1	Auswertung der ermittelten Temperaturwerte während der Zerspannung	70
6.3.2	Bewertung der Beeinflussung des Werkzeugverschleißes auf den Spannungszustand in der Randzone	71
6.3.3	Vergleich der gemessenen Eigenspannungen vor und nach einer definierten Zeitspanne	74
7	Zusammenfassung und Ausblick	76
	Literaturverzeichnis	80
	Anlagenverzeichnis	87
	Anlagen, Teil 1	A-I
	Anlagen, Teil 2	A-IV
	Anlagen, Teil 3	A-VIII
	Anlagen, Teil 4	A-IX
	Eidesstattliche Erklärung	88

Abbildungsverzeichnis

2.1	Verformungszone bei der Spanbildung [1][2]	5
2.2	Schematische Darstellung der Grenzschicht an technischen Oberfläche eines bearbeiteten metallischen Werkstücks [3]	6
2.3	verformtes Gefüge eines DC03 nach dem Trennen [4]	7
2.4	Darstellung der Eigenspannungsarten über große Materialbereiche in einphasigen Werkstoffen [5]	9
2.5	Einteilung der Entstehungsursachen von Eigenspannungen nach [5][7] . .	11
2.6	Eigenspannungsentstehung durch mechanische Einwirkung (links) und thermisches Fließen (rechts) [1]	13
2.7	Grundprinzip der Eigenspannungsanalyse mittels Strahlung [34]	16
2.8	Darstellung der Eigenspannungsermittlung mittels Bohrlochverfahren am Grundprinzip der Integralmethode nach [8, S.7-11][9][10]	18
2.9	Darstellung der Kalibrierkonstanten für die Integralmethode der Eigenspannungsermittlung mittels Bohrlochverfahren [8]	20
4.1	Temperatur-Zeit-Regime für das Vergüten der Proben	26
4.2	Gefügeaufnahmen des unlegierten Vergütungsstahls C45 im Abstand von 0 mm (links) und 2 mm (rechts) von der bearbeiteten Oberfläche	27
4.3	Technische Zeichnung der verwendeten Probengeometrie	29
5.1	Versuchsaufbau der Eigenspannungsmessung mittels Bohrlochverfahren	32
5.2	Schematische Darstellung der Anordnung der Härteeindrücke (links), Messaufbau der Mikrohärtmessung (rechts)	35
5.3	Versuchsaufbau der Kurzzeituntersuchungen im Stillstand (links), im laufenden Fräsprozess (rechts)	38
5.4	Versuchsaufbau der Temperaturmessungen mittels Thermografie-Kamera: schematische Darstellung (links), Aufspannung der Prüfstücke (rechts) .	45
6.1	Eigenspannungstiefenverlauf der Referenzprobe GG	50
6.2	Mikrohärte-Tiefenverlauf der Referenzprobe GG	51
6.3	Grafische Darstellung der Eigenspannungstiefenverläufe in Abhängigkeit der Schnittgeschwindigkeit v_c der Versuchsreihe 1	55

6.4	Grafische Darstellung der Eigenspannungstiefenverläufe in Abhängigkeit veränderter Schnittgeschwindigkeiten v_c der Versuchsreihe 2	55
6.5	Grafische Darstellung der Eigenspannungstiefenverläufe in Abhängigkeit des Vorschubs pro Zahn f_z der Versuchsreihe 1	57
6.6	Grafische Darstellung der Eigenspannungstiefenverläufe in Abhängigkeit veränderter Vorschübe f_z der Versuchsreihe 2	58
6.7	Grafische Darstellung der Eigenspannungstiefenverläufe in Abhängigkeit der Verwendung von KSS der Versuchsreihe 1	59
6.8	Grafische Darstellung der Eigenspannungstiefenverläufe in Abhängigkeit des Gleich- und GegenlaufräSENS der Versuchsreihe 1	60
6.9	Grafische Darstellung der Eigenspannungstiefenverläufe in Abhängigkeit des Einstellwinkels κ_r der Versuchsreihe 1	62
6.10	Grafische Darstellung der Eigenspannungstiefenverläufe in Abhängigkeit der Bauteilhöhe h der Versuchsreihe 3	63
6.11	Spannungsverlauf der Parameterkombination zur Ausbildung von Druckeigenspannungen (links), von Zugeigenspannungen (rechts)	64
6.12	Grafische Darstellung der ermittelten MikrohäRte-Tiefenverläufe	66
6.13	Grafische Darstellung der Wirkleistung P beim Stirnfräsprozess einer Probe	67
6.14	Darstellung der Verschleißzustände der Schneidkante	72
6.15	Verlauf der Passivkräfte F_p bei der Bewertung des Werkzeugverschleißes	73
6.16	Grafische Darstellung der Eigenspannungstiefenverläufe in Abhängigkeit der Verschleißmarkenbreite VB der Versuchsreihe 5	74
6.17	Grafische Darstellung der Eigenspannungstiefenverläufe in Abhängigkeit der definierten Zeitspanne von 3 Monaten	75

Tabellenverzeichnis

4.1	Chemische Zusammensetzung des Probenwerkstoffs C45	25
4.2	Technische Kennwerte des Probenmaterials C45 für $d = 16 \dots 40$ mm nach [11][12][13][14][15]	28
5.1	Relevante Parameter für die Eigenspannungsmessung mittels Bohrloch- verfahren	33
5.2	Verwendete Verbrauchsartikel zur Eigenspannungsmessung mittels Bohr- lochverfahren	33
5.3	Relevante Parameter für die Mikrohärteprüfung nach Vickers	34
5.4	Technische Daten des Leistungsaufnehmers zur Messung der Wirkleis- tung [16]	36
5.5	Technische Parameter der Fräswerkzeuge [17]	37
5.6	Variable Einflussgrößen der Versuchsreihe 1	39
5.7	Konstante Einflussgrößen der Versuchsreihe 1	40
5.8	Variable Einflussgrößen der Versuchsreihe 2	41
5.9	Variable Einflussgrößen der Versuchsreihe 3	42
5.10	Konstante Schnittwerte der Versuchsreihe 3	42
5.11	Variable Einflussgrößen der Versuchsreihe 4	43
5.12	Konstante Schnittwerte der Versuchsreihe 4	44
5.13	Technische Spezifikation der Wärmebildkamera [18]	46
5.14	Variable Einflussgrößen der Versuchsreihe 5	47
5.15	Konstante Schnittwerte der Versuchsreihe 5	47
5.16	Technische Daten des verwendeten 3-Komponenten-Dynamometer 9255B [19]	48
6.1	Zusammenfassung der durchschnittlichen Leistungs- und Energiewerte der Versuchsreihe 1 geordnet nach den variablen Einflussgrößen	68
6.2	Berechnung der Zeitspanvolumina aus den geringen und hohen Schnitt- werten der Versuchsreihe 1	69
6.3	Berechnung der durchschnittlichen Passivkräfte F_p bei der Bewertung des Werkzeugverschleißes	73
6.4	Parameterkombination der Versuchsreihe 6	75

Abkürzungsverzeichnis

bzw.	beziehungsweise
DMS	Dehnmessstreifen
d. h.	das heißt
gegen	Gegenlauf
gleich	Gleichlauf
ggf.	gegebenenfalls
HC	beschichtetes Hartmetall
HM	Hartmetall
HV	Härte nach Vickers
HRC	Härte nach Rockwell
HSC	High Speed Cutting
HSK	Hohlschaftkegel
i. d. R.	in der Regel
IR	Infrarot
KSS	Kühlschmierstoff
PVD	Physical Vapour Deposition
RT	Raumtemperatur
trocken	Trockenbearbeitung
WC	Wolframkarbid
WSP	Wendeschneidplatte
WZM	Werkzeugmaschine
z. B.	zum Beispiel
a	Abstand bei der Mikrohärteprüfung
b	Abstand bei der Mikrohärteprüfung
l x b x h	Länge x Breite x Höhe (Bauteilabmessungen)
n	Anzahl der Bohrinkremente (Eigenspannungsberechnung)
s	Schrittweite der Mikrohärteprüfung
t	maximale Messtiefe der Mikrohärteprüfung
z	Tiefeninkrement bei der Bohrlochmethode
Z	Gesamtbohrtiefe bei der Bohrlochmethode

Formelzeichen

a_e	Arbeitseingriff
a_p	Schnitttiefe
A^I	Dehnungsauslösung
A_5	Bruchdehnung
d	Gitterebenenabstand
D	Durchmesser
D_{WZ}	Werkzeughdurchmesser
D_0	Bohrlochdurchmesser
E	Energie
E	E-Modul
f	Frequenz
f_s	Abtastfrequenz
f_z	Vorschub pro Zahn
F	Kraft
F_a	Aktivkraft
F_p	Passivkraft
F_Z	Zerspankraft
L	Vorschubweg
n	Drehzahl
p	biaxialer Anteil des Dehnungstensors
P	Leistung
P	biaxialer Spannungsanteil
Q	Zeitspanvolumen
R_e	Streckgrenze
R_m	Zugfestigkeit
r_ϵ	Eckenradius
t	Zeit
t_c	Schnittzeit
t_h	Hauptnutzungszeit
v	Querkontraktionszahl
v_c	Schnittgeschwindigkeit
v_f	Vorschubgeschwindigkeit
V	Volumen
V_α	Phasengehalt einer Phase
VB	Verschleißmarkenbreite
z	Zähnezahl des Fräasers

Z	Bruch einschnürung
ϑ	Temperatur
Θ	Braggwinkel
γ_0	Spanwinkel
λ	Wellenlänge
λ_s	Neigungswinkel
κ_r	Einstellwinkel
κ_{eff}	effektiver Einstellwinkel
ϵ	Dehnung
σ^{E}	lokal wirksame Eigenspannungen
σ^{I}	Haupteigenspannungen I.Art
σ^{II}	Haupteigenspannungen II.Art
σ^{III}	Haupteigenspannungen III.Art
σ^{Makro}	Makroeigenspannungen
σ^{Mikro}	Mikroeigenspannungen

Chemische Symbole

C	Kohlenstoff
Cr	Chrom
Mn	Mangan
Mo	Molybdän
Ni	Nickel
P	Phosphor
S	Schwefel
Si	Silicium
TiAlN	Titan-Aluminium-Nitrit

1 Einleitung

1.1 Motivation

Die Suche nach Wettbewerbsvorteilen sowie ressourcenschonenden und umweltverträglichen Fertigungsprozessen führt gerade im produzierenden Gewerbe zu dem Streben nach stetigen technologischen Innovationen. In Bereichen der spanenden Fertigungstechnik wird dabei der Fokus vor allem auf die kontinuierliche Weiterentwicklung von Werkzeugkonzepten und Bearbeitungsprozessen gelegt. Im Zuge dessen bilden insbesondere die Verbesserung von Schneidstoffen, Beschichtungssystemen und Werkzeuggeometrien sowie die Optimierung von Fertigungsparametern und Bearbeitungsstrategien primäre Schwerpunkte. Derartige Prozessentwicklungen ergeben jedoch neue Anforderungen bezüglich der Bauteilqualität, da sich thermische, mechanische und tribologische Verhältnisse in Abhängigkeit der Prozessführung verändern. Im Mittelpunkt des Interesses stehen hierbei die Eigenschaften der bearbeiteten Bauteiloberfläche und vor allem die Bereiche der Randzone. Diese haben einen entscheidenden Einfluss auf das Betriebsverhalten im praktischen Einsatz sowie die Qualität und Lebensdauer der spanend hergestellten Bauteile. Das thermo-mechanische Lastkollektiv eines spanenden Fertigungsprozesses beeinflusst, durch die Interaktion zwischen Werkzeug und Werkstück, direkt die Oberfläche und somit die Eigenschaften des Bauteils. Als Resultat der Beeinflussungen sind hier insbesondere die Entstehung von Eigenspannungen sowie Gefügeumwandlungen und Härteverläufe in der inneren Grenzschicht des Bauteils zu nennen. [20][21]

Durch ein gezieltes Beeinflussen der Randschichtzustände kann dabei eine erhebliche Steigerung der Lebensdauer eines Werkstücks erreicht werden [22]. Hinzukommend repräsentiert die spanende Fertigung in vielen Fällen den letzten Bearbeitungsschritt in der Herstellungskette eines Bauteils, sodass die daraus resultierenden Zustände maßgeblich auf die Randzoneneigenschaften und damit die Bauteilfunktion einwirken. Folglich ist es im Sinne der Bauteiloptimierung von großem Interesse, die sich ergebenden Zustände des Bauteilrandbereichs definiert einzustellen bzw. Vorhersagen hinsichtlich der Eigenspannungen in Abhängigkeit des Fertigungsprozesses treffen zu können [6].

1.2 Aufgabenstellung und Vorgehensweise

Im Rahmen des Praxissemesters wurden, in Zusammenarbeit mit der Fachgruppe für Fertigungstechnik der Hochschule Mittweida, die sich ausprägenden Charakteristika der Oberflächengrenzschicht des unlegierten Vergütungsstahls C45 nach dem Stirnfräsprozess untersucht. Ein besonderes Hauptaugenmerk lag hierbei auf der Evaluation der sich einstellenden Eigenspannungen in den oberflächennahen Werkstückbereichen. Aus diesem Vorhaben ergeben sich die nachfolgend aufgeführten Zielsetzungen, welche als Leitfaden der durchgeführten Forschungsarbeit dienten:

- Einarbeitung in die theoretischen Grundlagen des Anforderungsprofils der Forschungsarbeit mit dem Fokus auf der Entstehung, Einteilung, Auswirkung und Bewertung von Eigenspannungen
- Einarbeitung in die vorhandene Mess- und Versuchstechnik sowie der damit verbundenen Software
- Konstruktion einer geeigneten Probengeometrie sowie Festlegen des Probenwerkstoffs und Regimes der Wärmebehandlung der Proben
- Entwicklung reproduzierbarer Versuchspläne zur Durchführung der experimentellen Untersuchungen verschiedener Versuchsreihen
- Durchführung von Kurzzeitversuchen zur Korrelationserkennung zwischen Prozessparametern und Oberflächenzuständen sowie Langzeitversuchen zur Bewertung praxisnaher Gegebenheiten auf den Spannungszustand
- Analyse und Auswertung der experimentellen Untersuchungen mit den Schwerpunkten auf:
 - den Spannungszuständen in der Oberflächengrenzschicht nach Ausprägung, Ausrichtung und Lage in Abhängigkeit der definierten Prozessparameter sowie auftretender Prozesstemperaturen, sich einstellender Passivkräfte und Verschleißzustände
 - den Mikrohärteverläufen ins Bauteilinnere in Korrelation zu vorherrschenden Spannungszuständen
 - Bewertungen einzelner Fräsprozesse hinsichtlich der Ressourceneffizienz auf der Basis des Leistungs- und Energiebedarfs

Eine Zusammenfassung der Ergebnisse, welche im Rahmen des Forschungszeitraumes erzielt wurden, die Bewertung und Erschließung möglicher Zusammenhänge sowie die Ableitung von Vorhersagemöglichkeiten und Handlungsmaßnahmen zur Erweiterung der Forschungsthematik runden diese Arbeit ab.

2 Grundlagen und Kenntnisstand

Während des gesamten Produktlebenszyklus unterliegen technische Erzeugnisse einer Vielzahl an unterschiedlichen Belastungen. Diese lassen sich in Belastungen mechanischer, thermischer und chemischer Natur einordnen. Eine besondere Bedeutung wird dabei dem Randzonenbereich von Bauteilen zuteil. Diese Bereiche stellen meist den am höchsten beanspruchten Teil von Produkten dar, wodurch deren Charakteristik das Einsatzverhalten sowie die Lebensdauer von Bauteilen unmittelbar beeinflusst. [2][23] Ebenfalls stehen die Zustände der Bauteilrandzonen in direkter Korrelation zu dem angewandten Fertigungsverfahren, da es durch den Bearbeitungsprozess zur Interaktion zwischen Werkzeug und Werkstück und respektive zu entsprechenden Belastungen der Bauteiloberfläche kommt. [1][2][21][23]

Unter diesem Kapitel werden die notwendigen Grundlagen zur Bearbeitung der Aufgabenstellung im Rahmen der Masterarbeit zusammengefasst. Ziel ist es hierbei, einen Zusammenhang zwischen der spanenden Fertigung und den sich einstellenden Effekten in der inneren Grenzschicht von Bauteilen zu schließen. Die hier aufgeführten Grundlagenkenntnisse bilden die Voraussetzung der sich anschließenden experimentellen Untersuchungen.

2.1 Zerspanungsprozess und Spanbildung

Um die gewünschte geometrische Endform eines Bauteils durch das Spanen zu erzeugen, werden hierbei Späne mittels der Schneide des Zerspanungswerkzeugs auf mechanischem Weg vom Werkstück abgetrennt. Bei diesem, als Spanbildung bezeichneten Vorgang, dringt der Schneidkeil des Werkzeugs in den Werkstoff ein. Hieraus resultiert die Überschreitung der Fließspannung und somit die Aufhebung des Werkstoffverbundes im Werkstück (Übergang von elastischer in plastische Verformung). Der dabei entstehende Span wird anschließend über die Spanfläche abgeleitet, währenddessen an der Freifläche des Werkzeugs die neue Oberfläche des Bauteils entsteht. Der Großteil der dabei benötigten Zerspanleistung wird in Wärme umgewandelt und verteilt sich dabei auf den Span, das Werkstück, das Werkzeug und die Umgebung.

Der Wärmestrom, welcher in die Umgebung abgegeben wird, bleibt aufgrund der geringfügigkeit dieser Wärmemenge für die nachfolgenden Betrachtungen unberücksichtigt. [1, S.21-26][24][25][26]

Bei der kontinuierlichen Spanbildung, d. h. bei der Ausbildung eines Fließspans (Abgleiten des Spans mit gleichmäßiger Geschwindigkeit in stationärem Fluss) kann der Zerspanungsprozess modellhaft durch fünf Verformungszonen beschrieben werden, welche die Wärmeentstehung bestimmen [1]. Veranschaulicht werden diese in der Abbildung 2.1. In der primären Scherzone (1) findet die hauptsächlichste plastische Verformung durch Schubverformung entlang der Scherebene statt. Die dabei entstehende Wärme wird mittels Konduktion (Wärmeleitung) auf den abgeführten Span und das Werkstück verteilt (b). Zusätzliche Verformungen wirken aufgrund von hohen Reibungen zwischen dem Werkzeug und dem Werkstück in der sekundären Scherzone vor der Span- und Freifläche (2,4). Dabei findet ein ständiger Wärmeübergang statt. Die Wärme verteilt sich auf konduktivem Weg auf den Span sowie das Werkzeug (a). Vor der Schneidkante, in der sekundären Scherzone (3), bildet sich eine Stauzone, d. h. eine Zone mit allseitig hohem Druck. In dieser Zone erfolgt die Materialtrennung, wobei durch die plastische Deformation wiederum Wärme erzeugt wird. Diese verteilt sich in den Span und das Werkstück. Die im Bereich der Freifläche (4) entstehende Wärme gelangt einerseits über Konduktion in den Schneidkeil sowie die bearbeitete Bauteiloberfläche, andererseits bewirkt die Strahlung des heißen Zerspanungswerkzeugs eine zusätzliche Aufheizung der Werkstückrandzone (a, c). Die Verformungsvorlaufzone (5) ist gekennzeichnet durch geringe aber bleibende Vorverformungen. Dieser Bereich ist maßgebend für das Eindringen der plastischen Verformung in das Werkstück und somit ausschlaggebend für die Randzonenbeeinflussung sowie die Tiefe dieser Beeinflussung. Hinzukommend gelangt die in diesem Bereich entstehende Wärme zum größten Teil (abhängig vom Werkstoff) in der Bauteilrandzone. [1, S.21-26][2, S.4-10][21, S.8-13]

Die beschriebenen Verformungszonen und Bereiche der Wärmeentwicklung sowie der Wärmeübertragung sind in der Abbildung 2.1 dargestellt. Die darin angegebenen prozentualen Anteile der Verteilung der Zerspanungstemperatur sind dabei als Richtwerte für die Zerspannung von Stahlwerkstoffen anzusehen.

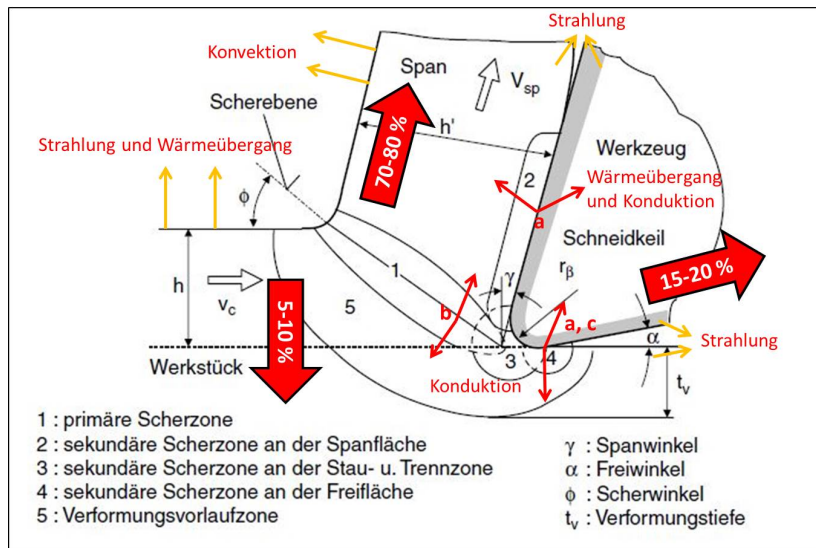


Abbildung 2.1: Verformungszonen bei der Spanbildung [1][2]

Die beschriebenen Verteilungen sowie Ströme der entstehenden Wärme können jedoch durch die Zerspanungsparameter beeinflusst werden. Eine Erhöhung der Schnittgeschwindigkeit und des Vorschubs pro Zahn bewirken beispielsweise einen geringeren Wärmeeintrag in das Bauteil. Grund hierfür ist die Tatsache, dass der Wärme weniger Zeit verbleibt in das Bauteil überzugehen und somit ein größerer Wärmeanteil über die Späne abgeführt wird. Dem entgegen steigen jedoch die Spitzentemperaturen in der Zone der Zerspanung. Die größte Beeinflussung erfährt dabei der Randzonenbereich des Werkstücks. Die Lokalisierung dieses durch die Zerspanung beeinflussten Bereichs im Gesamtsystem der technischen Oberflächen erfolgt im nachfolgenden Kapitel.

2.2 Aufbau technischer Oberflächen und Randzoneneigenschaften

Technische Oberflächen stellen die geometrische Begrenzung technischer Erzeugnisse dar. Diese dienen der Erfüllung eines technischen Zwecks und sind dabei bestimmten Beanspruchungen respektive verschiedenen Zerstörungsmechanismen wie beispielsweise dem Verschleiß oder der Korrosion ausgesetzt. Solchen Belastungen, welche die Funktionsfähigkeit beeinträchtigen sowie die Lebensdauer der technischen Bauteile vermindern, soll die technische Oberfläche möglichst lange standhalten. [23, S.1-6]

Eigenschaften wie die Funktionsfähigkeit und die Lebensdauer hängen dabei signifikant von der Qualität und der Zuverlässigkeit der erzeugten Oberfläche und damit von der Topographie, dem metallurgischen sowie mechanischen Zustand der Randzone ab [21]. In der Aufrechterhaltung der Gebrauchseignung technischer Erzeugnisse liegt demzu-

folge der Grund für die große Relevanz des Themenschwerpunkts zum Aufbau sowie der Einstellung anforderungsgerechter Eigenschaften technischer Oberflächen.

Zur Veranschaulichung von technischen Oberflächen dient die Abbildung 2.2. Diese stellt den schichtförmigen Aufbau von metallischen Werkstoffen dar. Zur Charakterisierung des Aufbaus der technischen Oberflächen wird im Wesentlichen zwischen den drei folgenden Bereichen unterschieden, welche sich von außen nach innen erstrecken [3, S.44][27, S.19-20]:

- äußere Grenzschicht (f),
- innere Grenzschicht (g),
- Grundwerkstoff (e)

Dabei unterscheiden sich die oberflächennahen Bereiche (speziell die innere Grenzschicht) hinsichtlich des Gefüges, der chemischen Zusammensetzung sowie der Festigkeit eines technischen Bauteils meist erheblich vom Grundwerkstoff (e), welcher das ungestörte Metallgefüge verkörpert.

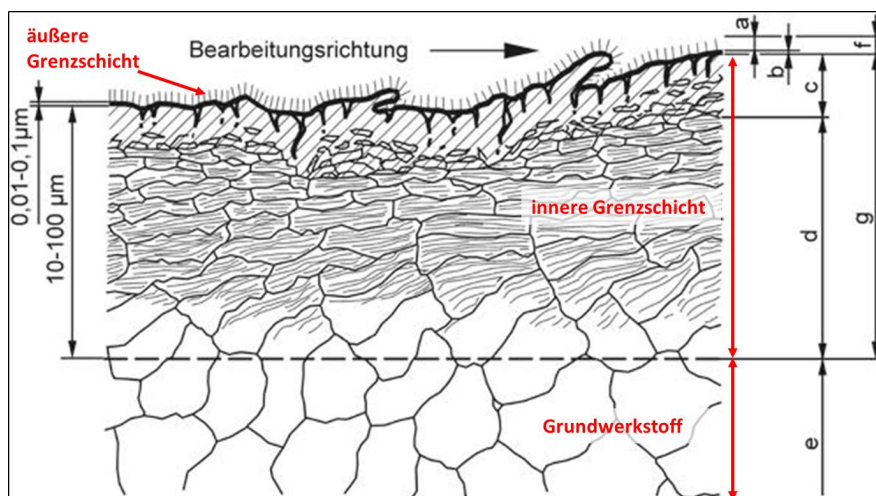


Abbildung 2.2: Schematische Darstellung der Grenzschicht an technischer Oberfläche eines bearbeiteten metallischen Werkstücks [3]

Die äußere Grenzschicht (f) bildet den Bereich, welcher ausschließlich vom umgebenden Medium beeinflusst wird. Aufgrund von Wechselwirkungen dieser Werkstoffzone mit dem Umgebungsmedium und bei der Zerspanung ggf. hinzukommender Schmierstoffe besitzt die äußere Grenzschicht (f) meist eine vom Grundwerkstoff (g) differierende Zusammensetzung und somit veränderte Eigenschaften. Dieser Grenzschichtbereich kann sowohl aus Oxidschichten, Adsorptions- und Reaktionsschichten (b) als auch Verunreinigungen, Fetten und Ölen (a) bestehen. [23, S.18-28]

Der Werkstoffbereich, der in der Abbildung 2.2 als innere Grenzschicht (g) illustriert ist, verkörpert jenen Bereich, welcher für diese theoretischen Betrachtungen sowie die Forschungsthematik von zentraler Bedeutung ist. Wie bereits im Kapitel 2.1 erwähnt, wird diese Zone des Werkstoffs stark von den einzelnen Fertigungsschritten, dominierend vom abschließenden Fertigungsverfahren und den dabei definierten Bearbeitungsparametern beeinflusst und unterliegt den dabei entstehenden Beeinflussungen [3, S.44-45][27, S.19-21][28]. Eine weitere Unterteilung der inneren Grenzschicht (g), welche in einschlägiger Literatur sowie auch im Folgenden dieser Arbeit als Randzone bezeichnet wird, erfolgt in die Übergangszone (c) sowie das verformte Gefüge (d) [23, S.18-28].

An einigen Werkstoffen kann der durch den Bearbeitungsprozess verformte Werkstoffbereich durch eine geeignete Präparation (Schleifen, Polieren, Ätzen) sichtbar gemacht werden. Die Abbildung 2.3 zeigt, wie zuvor schematisch dargestellt, die Zone der plastischen Verformungen eines Tiefziehblechs aus dem Werkstoff DC03 nach dem Trennvorgang [4]. Gut zu erkennen ist hierbei, anhand der Kornverformungen in der dargestellten Verformungszone, die Vorschubrichtung beim Trennen der Probe .

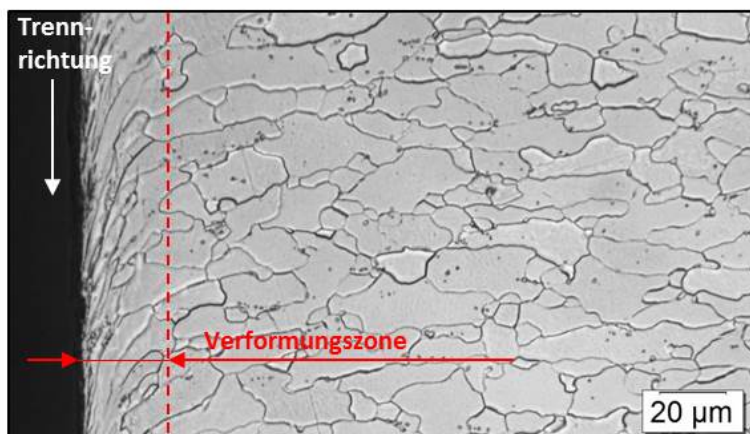


Abbildung 2.3: verformtes Gefüge eines DC03 nach dem Trennen [4]

Definitionsgemäß beschreibt die Randzone den inneren Volumenbereich eines Werkstoffs, dessen Eigenschaften durch den Bearbeitungsprozess beeinflusst wurden. Die für die Trennung des Werkstückmaterials notwendige Energie, die bei der Wechselwirkung zwischen Zerspanungswerkzeug und Werkstück umgesetzt wird, führt zu großen mechanischen, thermischen und chemischen Belastungen von Werkzeug und Werkstück [26][1, S.363-371] [2, S.3-10]. Die Trennung der mechanischen und thermischen Einflüsse eines Zerspanungsprozesses auf die Ausbildung eines spezifischen Randschichtzustandes im Werkstück ist jedoch kaum möglich. Grund hierfür ist die komplexe Überlagerung dieser Belastungen während des realen Prozesses.[29][30][31]

Im Vergleich zum ungestörten Metallgefüge des Grundwerkstoffs (e) kann der innere Grenzschichtbereich (g) infolge der Verformungen durch den Bearbeitungsprozess folgende messbare oder festzustellende Randzoneneigenschaften aufweisen [1, S.363-371][2]:

- Gefügeveränderungen
- plastische Verformung
- Härteänderungen
- Eigenspannungen
- Texturen (Texturinhomogenität)
- Risse

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden in erster Linie die Spannungszustände in der Bauteilrandzone als Folge der auftretenden Belastung des Zerspanungsprozesses betrachtet. Aufgrund dieser Tatsache, befasst sich das nachfolgende Kapitel 2.3 mit der umfassenden Thematik der zerspanungsbedingten Eigenspannungen. Hierbei wird ebenfalls das bereits erwähnte komplexe Belastungskollektiv bei der spanenden Fertigung näher beleuchtet und der Zusammenhang dieser zur Entstehung der Eigenspannungen in der Bauteilrandzone geschaffen.

2.3 Eigenspannungen

2.3.1 Definition und Einteilung von Eigenspannungen

Eigenspannungen werden als mechanischen Spannungen zusammengefasst, welche in einem abgeschlossenen, stoffschlüssigen System, frei von Temperaturgradienten ohne die Einwirkung von äußeren Kräften oder Momenten, vorhanden sind. Die mit den Eigenspannungen verbundenen Kräfte und Momente befinden sich im mechanischen Gleichgewicht. Sie kompensieren sich demzufolge auf makroskopischer Ebene bezüglich jeder Fläche bzw. Achse durch den Körper. [6, S.11][7][22, S.67][31, S.1-4][32, S.5][33][34, S.4-6]

Über die genannte Definition hinaus, die den mechanischen Charakter der Eigenspannungen beschreibt, können diese in verschiedene Kriterien eingeteilt werden. Als zweckmäßig hat sich hierbei die Einteilung nach der Ausdehnung bzw. dem Wirkungsbereich der Eigenspannungen erwiesen. Hierbei unterscheidet man in drei verschiedene Reichweiten [22, S.68][33][34, S.4-6][35][36, S.12][37, S.13-14]:

Eigenspannungen I. Art: Eigenspannungen I. Art charakterisieren den über große Werkstoffbereiche (über mehrere Körner) wirksamen Eigenspannungsanteil. Diese erstrecken sich über den gesamten Bereich nahezu homogen, d. h. konstant in Größe und Richtung. Innere Kräfte, welche mit diesen Eigenspannungen verbunden sind, befinden sich bezüglich jeder Schnittfläche durch den ganzen Körper im Gleichgewicht. Ebenso verschwinden die inneren Momente in Bezug auf eine beliebige Achse. Der Eingriff bzw. eine Abweichung vom Kräfte- und Momentengleichgewicht resultiert immer in makroskopischen Form- und Maßänderungen des Körpers.

Eigenspannungen II. Art: Eigenspannungen II. Art erstrecken sich nur über kleine Werkstoffbereiche (ein Korn oder Kornbereich) als nahezu homogen. Die mit dieser Eigenspannungsart verbundenen inneren Kräfte und Momente sind über hinreichend viele Körner im Gleichgewicht. Abweichungen von diesem Gleichgewichtssystem können makroskopische Maßänderung zur Folge haben.

Eigenspannungen III. Art: Eigenspannungen III. Art sind über kleinste Werkstoffbereiche (Bereich mehrerer Atomabstände) inhomogen. Die mit den Eigenspannungen III. Art verbundenen inneren Kräfte und Momente befinden sich bezüglich kleiner Bereiche (Teile eines Kornes) im Gleichgewicht. Ein Eingriff in dieses Gleichgewichtssystem zieht keine makroskopischen Maßänderung nach sich.

Zur Veranschaulichung der genannten Unterteilung dient die folgende Abbildung 2.4. Diese stellt alle genannten Arten der Eigenspannungsdefinition über einen großen (mehrere Körner), schematisch dargestellten Bereich eines einphasigen Werkstoffes dar.

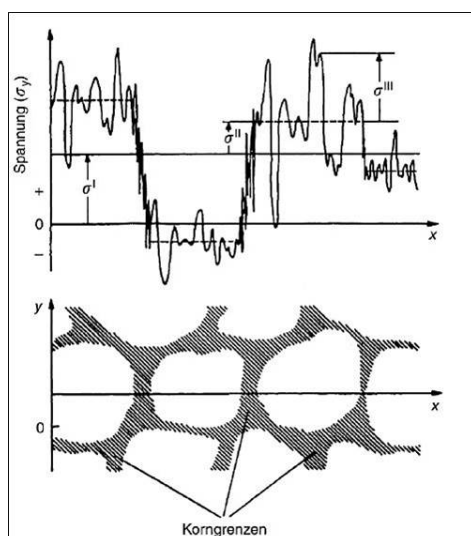


Abbildung 2.4: Darstellung der Eigenspannungsarten über große Materialbereiche in einphasigen Werkstoffen [5]

Im realen Werkstoff liegen in der Regel alle drei Eigenspannungsarten vor und überlagern sich in additiver Form. Aufgrund dieser Tatsache ergibt sich, laut Gleichung 2.1, eine lokal wirksame Eigenspannung σ^E in einem Punkt $P(x, y, z)$ aus der Summe der Eigenspannungen I., II. und III. Art [34, S.4-6].

$$\sigma(x, y, z) = \sigma^E = \sigma^I + \sigma^{II} + \sigma^{III}(x, y, z) \quad (2.1)$$

Zur mathematischen Definition der dargestellten Eigenspannungen in einphasigen Werkstoffen dienen die nachfolgenden Gleichungen 2.2 - 2.4. Hierbei ist zu beachten, dass in der Literatur hinzukommend häufig eine Einteilung der Eigenspannungen in Makro- und Mikrospannungen erfolgt. Diese Einteilung stützt sich dabei auf den Wirkungsbereich der jeweiligen Eigenspannungsart.

Wie aus den Definitionen zu entnehmen, wirken Eigenspannungen II. sowie III. Art über kleinste (mikroskopische) Werkstoffbereiche und sind dementsprechend nur unter hohem Aufwand zu bestimmen. Ihre Entstehungsursache beruht meist auf unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten zweier Phasen oder Gitterstörungen, wie Versetzungen sowie eingelagerten Fremdatomen. Da der Eingriff in das Kräfte- und Momentengleichgewicht dieser Eigenspannungen nur bedingt makroskopische Maßänderungen verursacht und eine exakte getrennte Bestimmung der einzelnen Arten ohnehin nur sehr kompliziert zu realisieren ist, sind fast ausschließlich die Eigenspannungen I. Art von praktischer Relevanz [22, S.67-69][32, S.5-8][35]. Aufgrund dessen bezieht sich der Begriff der Eigenspannungen im weiteren Verlauf der vorliegenden Arbeit vereinfacht auf diese Makroeigenspannungen bzw. die Eigenspannungen I. Art.

$$\sigma^I = \sigma^{\text{Makro}} = \left(\frac{\sigma^E dV_{\text{Makro}}}{dV_{\text{Makro}}} \right)_{\text{mehrere Kristalle}} \quad (2.2)$$

$$\sigma^{II} = \sigma^{\text{Mikro}} = \left(\frac{\sigma^E dV_{\text{Korn}}}{dV_{\text{Korn}}} \right)_{\text{einen Kristallit}} - \sigma^I \quad (2.3)$$

$$\sigma^{III} = \sigma^{\text{Mikro}} = (\sigma^E - \sigma^I - \sigma^{II})_{\text{am Punkt}} \quad (2.4)$$

Die Erweiterung der Begrifflichkeit der Eigenspannungen zur Berücksichtigung der Phasenselektivität (Eigenspannungen in einer Phase) mehrphasiger Werkstoffe bleibt im nachfolgenden unberücksichtigt. Grund hierfür ist die Tatsache, dass diese ausschließlich für eine diffraktometrische Eigenspannungsanalyse von Relevanz ist, welche jedoch im Rahmen dieser Masterarbeit keine Verwendung findet.

Neben der Einteilung der Eigenspannungen in deren Wirkungsbereiche können diese ebenfalls nach ihrer technologischen Herkunft unterschieden werden. Beispielhaft ist dies in der Abbildung 2.5 unter der Hauptgruppe der fertigungsbedingten Eigenspannungen zusammengefasst [6, S.11][32, S.5]. Diese richtet sich dabei nach der Einteilung der Fertigungsverfahren aus der hierfür zugrunde liegenden Normung DIN 8580 [26]. Im Fokus dieser Forschungsarbeit stehen dabei die Bearbeitungseigenspannungen, welche unter dem Punkt des Trennens aufgeführt sind. Eine eingehende Erklärung der Hauptgruppe der beanspruchungsbedingten Eigenspannungen erfolgt im nachfolgenden Kapitel 2.3.2. Diese stellt die Ursachen dar, welche bei der Entstehung der Eigenspannungen wirksam werden.

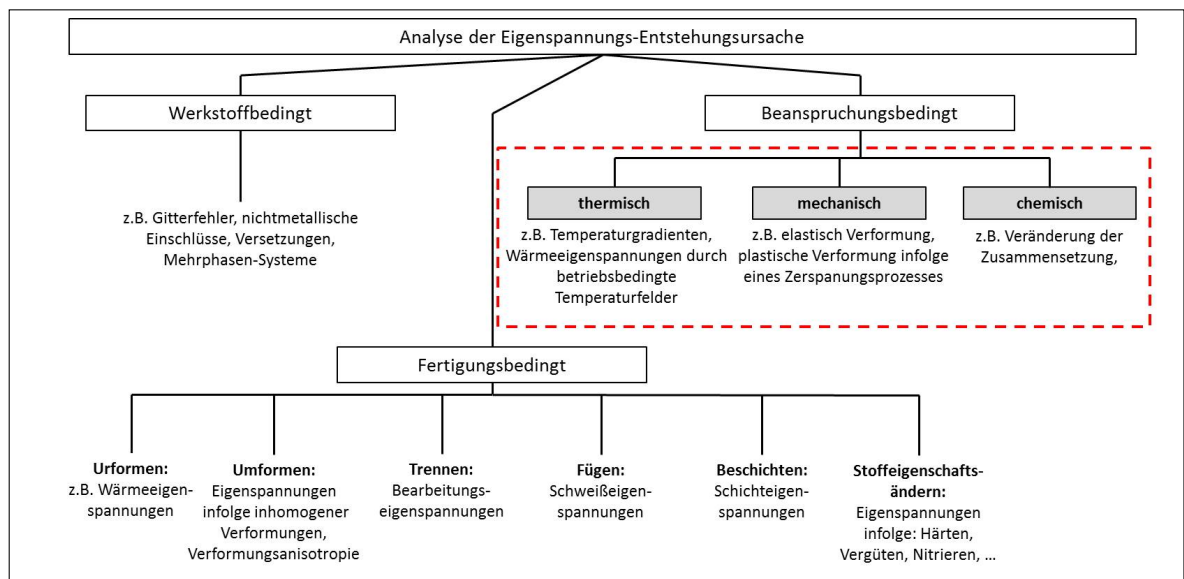


Abbildung 2.5: Einteilung der Entstehungsursachen von Eigenspannungen nach [5][7]

2.3.2 Entstehungsursachen von Eigenspannungen am Beispiel der spanenden Bearbeitung

Eigenspannungen sind unabdingbare Begleiterscheinungen, welche aufgrund der Wechselwirkung zwischen Werkzeug und Werkstück in nahezu allen Fertigungsverfahren sowohl beabsichtigt als auch unbeabsichtigt entstehen. Resultierend daraus werden durch die gesamte fertigungstechnische Vorgeschichte eine Vielzahl an Entstehungsursachen der Eigenspannungen wirksam. Diese Entstehungsursachen folgen dabei jedoch alle der gleichen Gesetzmäßigkeit der Deformationsinkompatibilitäten bzw. der örtlichen Inhomogenität auf Grund von bleibenden Verformungen [5][7]. Hervorgerufen werden diese örtlichen Inhomogenitäten bei Zerspanungsprozessen durch die in der Abbildung 2.5 dargestellten beanspruchungsbedingten Eigenspannungen. Die Aufteilung erfolgt dabei in die mechanische Komponente in Form von plastischen Deformationen, eine thermische Komponente als Temperaturgradienten in der Zerspanungszone und die Wechselwirkung des Umgebungsmediums als eine chemische Komponente. Immer präsent sind bei Zerspanungsbearbeitungen die ersten beiden Komponenten, wobei eine eindeutige Dominanz nur einer Komponente nicht genau vorhergesagt werden kann. Vielmehr handelt es sich um eine komplexe Kombination aus diesen, welche hinzukommend vom Zerspanungsprozess und dessen Bedingungen abhängig sind und sich somit von einer Zerspannung zur anderen unterscheiden. [1, S.363-377][39, S.361-377]

Wie im Kapitel 2.1 beschrieben, wirkt sich beim Zerspanungsprozess die Interaktion zwischen Schneidkeil und Werkstoff im Bereich der Verformungsvorlaufzone auf die Randzone aus. Durch diese mechanische Einwirkung kommt es zu Druckeigenspannungen in Schnittrichtung als Resultat der plastischen Verformungen in randnahen Bereichen. Die linke Darstellung in der Abbildung 2.6 zeigt ein Modell für den Mechanismus der Entstehung der Eigenspannungen durch die mechanische Einwirkung. Dargestellt ist der schematische Verlauf der elastischen und plastischen Dehnungen und der sich daraus ergebenden Spannungen in Schnittrichtung. Das kontinuierliche Vordringen des Schneidkeils in Schnittrichtung hat zunächst elastische und dann plastische Stauchungen zur Folge. Diese gehen unmittelbar hinter dem Kontakt zwischen Werkzeug und Werkstück (im Bereich der Freifläche des Schneidkeils), wo das Werkstückmaterial nun gestreckt wird, in elastische und plastische Dehnungen über, welche teilweise zurückfedern. Dementsprechend zeigt der dargestellte Spannungsverlauf unter Last erst Druckgefolgt von Zugspannungen. Diese steigen bis zum Erreichen der Fließgrenze des Werkstoffs an. Nach der Beendigung der Bearbeitung des betrachteten Materials bzw. der damit einhergehenden Entlastung bleiben Druckeigenspannungen zurück. Die Begründung hierfür sind die bleibenden gedehnten oberflächennahen Schichten, welche gleichsam zu lang sind und somit durch die Eigenspannungen gestaucht werden müssen, um

per Definition den Körperzusammenhalt bzw. das nötige Gleichgewicht zu bilden. [1, S.373-384][2, S.8-13][21, S.4-10]

Thermische Einwirkungen auf die Bauteilrandzone resultieren aus der Leistungsumsetzung in Wärme, siehe Kapitel 2.1. Ein Großteil der benötigten Zerspanleistung wird beim Spanen in Wärme umgewandelt, wodurch ebenfalls typische Eigenspannungen entstehen. Durch die elastische und plastische Verformung des Werkstückmaterials von der Werkzeugschneide kommt es zu einer hohen Wärmeentwicklung. Verstärkt wird diese durch die zusätzliche Reibung zwischen dem ablaufenden Span und der Spanfläche. Diese Einwirkungen äußern sich in starken Temperaturgradienten in der Bauteilrandschicht. Mit der starken Temperaturerhöhung dehnen sich die Materialbereiche in der Randzone aus, wodurch thermische Druckspannungen entstehen. Unter der Wirkung des erhöhten Wärmeeintrags wird die Fließgrenze herabgesetzt, sodass sich in den Randschichten plastische Verformungen einstellen und diese gestaucht werden. Nach dem Überlaufen des betrachteten Materialbereichs durch den Schneidkeil kühlt die Randschicht auf Raumtemperatur ab. Infolgedessen bleiben Zugeigenspannungen zurück. Grund hierfür sind die zuvor gestauchten Randschichten, welche analog der mechanischen Einwirkung gleichsam zu kurz sind und somit durch Zugeigenspannungen kompensiert werden müssen, um per Definition für den Körperzusammenhalt ein Gleichgewicht zu erzeugen. Die rechte Darstellung in der Abbildung 2.6 zeigt den schematischen Verlauf der Temperatur, der Dehnung und Spannung in Schnittrichtung. [1, S.373-384][2, S.8-13][21, S.4-10]

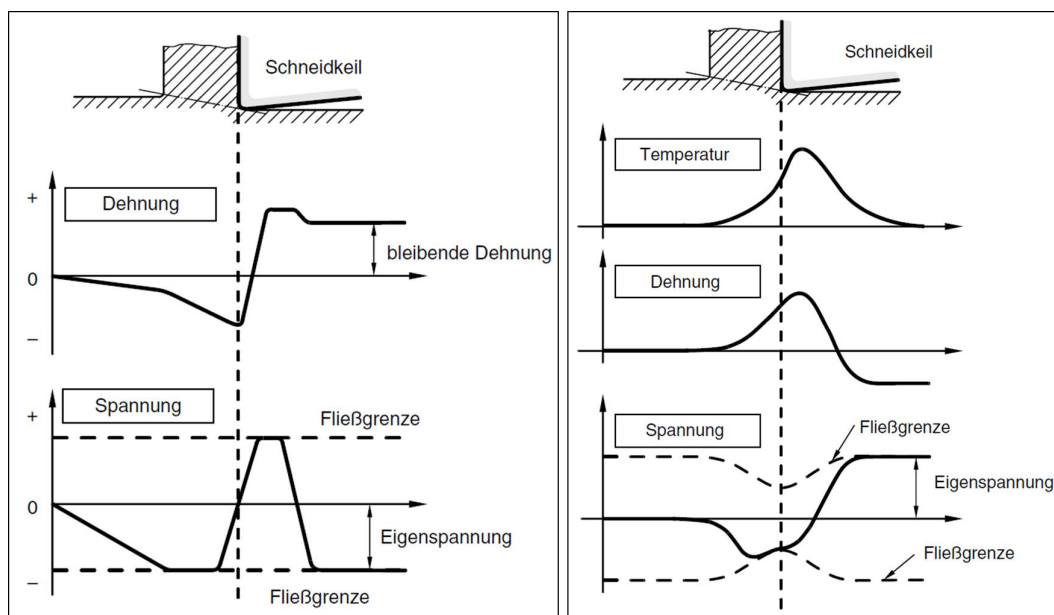


Abbildung 2.6: Eigenspannungsentstehung durch mechanische Einwirkung (links) und thermisches Fließen (rechts) [1]

Infolge der dargestellten thermischen, mechanischen und tribologischen Vorgänge während des Zerspanungsprozesses sowie auf Grund der Charakteristika von Werkzeug, Werkstück und Umgebungsmedien kommt es unter Umständen ebenfalls zu chemischen Wechselwirkungen zwischen den beteiligten Partner und somit zur chemischen Beeinflussung der Bauteilrandzone.

Hier zu nennen ist beispielsweise die Affinität bestimmter Schneidstoffe oder Werkzeugbeschichtungen zu den jeweiligen Werkstoffen, welche der Zerspanung unterzogen werden. Unter der Wirkung hoher Temperaturen kann es hierbei zur Diffusion von Teilchen (Atomen) der Werkzeugbeschichtung wie Karbide oder Oxide in das Werkstück und umgekehrt kommen. Hinzukommend kann die Verwendung von Kühlschmierstoffen bei der spanenden Bearbeitung bzw. deren Bestandteile nachhaltig das Werkstück sowie das Werkzeug beeinflussen. Dies wirkt sich neben der Standzeit des Zerspanungswerkzeugs ebenfalls auf die Charakteristika der gefertigten Bauteilrandschichten aus. [2, S.8-13]

Durch diese genannten Ursachen setzt sich bei Zerspanungsprozessen der typische Eigenspannungstiefenverlauf in der Bauteilrandzone zusammen, wobei die mechanischen und thermischen Einflüsse gegenüber den chemischen Einflüssen dominanter sind. Es stellen sich Zug- oder Druckeigenspannungen an der Oberfläche ein, welche mit einem hohen Spannungsgradienten in ein Maximum von Druck- bzw. Zugeigenspannungen unterhalb der Oberfläche übergehen. Der Eigenspannungsverlauf folgt anschließend einer asymptotischen Annäherung an einen konstanten Wert in tieferen Bauteilschichten. Dies kann zum einen den vollständigen Rückgang der Eigenspannungen bedeuten, insofern sich das Werkstück vor der Zerspanung im spannungsfreien Zustand befand. Ebenfalls können jedoch auch die Eigenspannungen in tieferen Materialbereichen auf einem spezifischen Wert bleiben. Grund dafür sind mechanische oder thermische Belastungen vorangegangener Fertigungsschritte, welche vor der abschließenden Zerspanung durchgeführt wurden und deren Auswirkungen im Bauteilrandbereich verbleiben. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass eine Abhängigkeit der Eigenspannungen in der Randzone von der Dominanz der mechanischen oder thermischen Entstehungsmechanismen besteht. Jedoch ist die genaue Trennung zwischen den mechanischen und thermischen Einflüssen aufgrund der hochgradig nichtlinearen Überlagerung dieser kaum möglich. Zudem resultieren die Spannungszustände, insbesondere in tieferen Materialschichten, aus der Entstehungshistorie des Werkstückmaterials. [2, S.8-13][21, S.4-10][39, S.373-377]

Die Möglichkeiten zur Ermittlung der Eigenspannung sowie der damit verbundenen Aufnahme der Eigenspannungstiefenverläufe werden im anschließenden Kapitel 2.3.3 beschrieben.

2.3.3 Ermittlung von Eigenspannungen

Für die Analyse der Eigenspannungen können unterschiedlichste Methoden Anwendung finden. Prinzipiell wird in einschlägigen Literaturstellen zwischen Diffraktionsverfahren (auch Kristallbeugungsverfahren), mechanische Verfahren, akustischen und magnetischen Messverfahren unterschieden.

Diese einzelnen Messmethoden können jedoch hinzukommend in unterschiedlicher Weise eingeteilt werden. Üblich ist hierbei die Unterteilung in “zerstörungsfreie“ und “zerstörende“ Messverfahren. Allerdings ist relativierend anzumerken, dass diese Einteilung oft nicht eindeutig ist. Einerseits können Messverfahren, bei welchen das Prüfstück lokal nur geringfügig geschädigt wird, global aber in seiner ursprünglichen Form erhalten und somit noch funktionsfähig bleibt, in eine Zwischenstufe der “quasi-zerstörungsfrei“ bzw. “teil-zerstörenden“ Verfahren eingeteilt werden. Andererseits bedarf es bei den zerstörungsfreien Messmethoden oftmals vorangestellte zerstörende Bearbeitungsschritte, um den Prüfkörper in Geometrie und Dimensionierung an die geforderten Restriktionen des Prüfverfahrens sowie des Prüfgerätes anzupassen oder Aussagen über den Eigenspannungsverlauf in die Tiefe treffen zu können. [6, S.13-28][22, S.70-78][33][34, S.8-11][40][41, S.3-15]

In den nachstehenden Unterpunkten erfolgt eine konzentrierte Beschreibung der Grundlagen der genannten Verfahrensunterteilungen sowie der zugehörigen Messmethoden. Dem angeschlossen ist die eingehende Betrachtung der Ermittlung der Eigenspannungen mittels Bohrlochverfahren, welches in der vorliegenden Arbeit eine zentrale Rolle für die Spannungsanalyse einnimmt.

Zerstörungsfreie Messverfahren

Die zerstörungsfreien Verfahren ermöglichen die Bestimmung der Eigenspannungen ohne, dass diese zuvor durch einen mechanischen Eingriff freigesetzt werden müssen. Die Analyse beruht dabei auf der Verzerrung des Kristallgitters infolge der vorherrschenden Spannungen. Je nach Messmethodik werden eine oder mehrere eigenspannungsabhängige Eigenschaften der Probe gemessen und aus der Änderung dieser die Eigenspannungen berechnet. Somit bedarf es hierbei immer einer spannungsfreien Referenzprobe. Zu der Gruppe der zerstörungsfreien Messverfahren zählen beispielsweise die akustischen (Ultraschall) und magnetischen Verfahren. Diese sind jedoch stark vom Gefügestand abhängig, was eine Kalibrierung für jeden einzelnen zu prüfenden Werkstoffzustand notwendig macht. Ebenfalls dieser Gruppe zugehörig ist die Analyse von Eigenspannungen mittels Strahlung. Neben Neutronenstrahlung sowie der Synchronstrahlung (energiereiche, breitbandige elektromagnetische Strahlung), findet vor allem die Röntgenstrahlung für die röntgenographische Messmethode häufig Anwendung bei

der experimentellen Spannungsanalyse. Das Grundprinzip dieser Eigenspannungsmessung beruht auf der Untersuchung des Parameters des Netzebenenabstands im Kristallgitter des Probenmaterials und ist in der Abbildung 2.7 schematisch dargestellt. Aus der Änderung des Gitterebenenabstands im Vergleich zur spannungsfreien Referenzprobe wird die Dehnung im Messpunkt sowie über mathematische Beziehungen unter Anwendung der $\sin^2\psi$ -Methode die Hauptspannungen bestimmt. Die zugrundeliegende Beziehung zwischen den Eigenschaften der einfallenden Strahlung (Wellenlänge λ , Braggwinkel Θ) und des sich daraus ergebenden Abstands der Gitterebenen d entspricht der Bragg'schen Gleichung 2.5. Hierbei werden die Strahlenteile, reflektiert von der Oberfläche oder tieferliegenden Gitterebenen, detektiert. Wirken beispielsweise Zugeigenspannungen parallel zu den Gitterebenen, verringert sich der Abstand zwischen diesen. Folglich lassen sich die Eigenspannungen über die Verschiebung der reflektierten Strahlung resultierend aus der Gitterverzerrung quantifizieren. Aufgrund der Tatsache, dass dieses Verfahren in der anschließenden experimentellen Eigenspannungsanalyse dieser Arbeit jedoch nicht zum Einsatz kommt, wird der exakte mathematische Hintergrund hierbei nicht tiefgreifender betrachtet. [6, S.13-17][32, S.8-10][34][36, S.16-18][41, S.3-15]

$$2 * d * \sin(\Theta) = n * \lambda \quad (2.5)$$

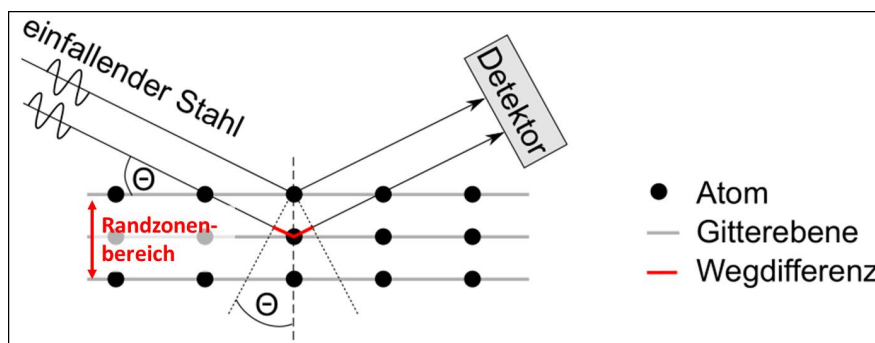


Abbildung 2.7: Grundprinzip der Eigenspannungsanalyse mittels Strahlung [34]

Die maximal erreichbare Eindringtiefe der Röntgenstrahlung ist stark von der Wellenlänge sowie dem Einfallswinkel abhängig. Im Falle einer Messung der Eigenspannungen in tieferen Bereichen (in Stahl $\geq 20 \mu\text{m}$) muss das Material nach jedem Messvorgang schichtweise abgetragen werden (z.B. durch Elektropolieren). Die dabei erzielbare Genauigkeit dieser Messmethodik wird in einschlägiger Literatur mit ca. $\pm 30 \text{ MPa}$ angegeben. [22, S.70-78][41, S.10-12]

Zerstörende Messverfahren

Die zerstörenden bzw. mechanischen Messmethoden beruhen auf dem mechanischen Eingriff in das Spannungsgleichgewicht und der daraus resultierenden Dehnungsauslösung. Wird aus einem eigenspannungsbehafteten Bauteil durch Bohren, Fräsen oder anderen etwaigen Bearbeitungsmethoden ein Materialvolumen entfernt, werden die Spannungen entlang der dabei neu gebildeten Oberfläche freigesetzt. Aus der Definition der Eigenspannungen und der damit verbundenen Gleichgewichtsbedingung muss durch diesen Eingriff eine Umlagerung der Eigenspannungen im Gesamtsystem erfolgen, was mit einer Dehnungsauslösung und Formänderungen verbunden ist. Auf diesem Effekt, welcher in der spannenden Bearbeitung als "Verzug" störend behaftet ist, basieren im allgemeinen die zerstörenden Verfahren zur Ermittlung der Eigenspannungen. Aus dem zu untersuchenden Prüfkörper wird an der interessierenden Stelle Material entnommen und die daraus resultierenden Formänderungen in Form von Dehnungen mit geeigneten Mitteln gemessen. Aus der Änderung der Messwerte vor und nach bzw. während der mechanischen Bearbeitung lassen sich Rückschlüsse auf die zuvor an der betreffenden Stelle vorhandenen und nunmehr gelösten Eigenspannungen ziehen. [6, S.13-17][22, S.70-78]

Die Vorteile der mechanischen Verfahren liegen vor allem darin, dass diese sehr einfach mit herkömmlichen Messmitteln, wie Dehnmessstreifen (DMS) durchzuführen sind. Weiterhin dienen die zerstörenden Messmethoden der Ermittlung der i. d. R. am relevantesten Makrospannungen I. Art, welche durch diese Verfahren, getrennt von den Eigenspannungen II. und III. Art, in gut zu interpretierender Form ermittelt werden. Dem steht als schwerwiegendster Nachteil die Tatsache gegenüber, dass diese Analyse naturgemäß eine Beschädigung (Zerstörung) des Bauteils nach sich zieht. Somit beschränkt sich ihr Einsatzbereich auf Vergleichsstücke des eigentlichen Untersuchungsobjekts.

Zu der beschriebenen Gruppe der zerstörenden Messverfahren zählen das Zerschneide- und Abtragverfahren, die Biegemethode sowie das Ausbohr- und Abdrehverfahren. Wie bereits genannt, kann eine weitere Einteilung in teil-zerstörende Messverfahren erfolgen. Diesen sind das Ring-Kern-Verfahren, das Härteverfahren, das Cut-Compliance sowie das am im nachfolgenden Unterpunkt eingehender beschriebene Bohrlochverfahren. [8, S.7-11][40][41, S.3-15]

Ermittlung von Eigenspannungen mittels Bohrlochverfahren

Die Bohrlochmethode ist das am häufigsten angewendete mechanische Verfahren zur Ermittlung der Eigenspannungen. Definiert wird dieses in der international anerkannte Norm ASTM E 837-99 [42]. Das Messprinzip beruht auf der Teilentlastung der Oberfläche durch das schrittweise, sukzessive Einbringen einer kleinen Sacklochbohrung an der

interessierenden Stelle und damit auf der Störung des Eigenspannungsgleichgewichts sowie der Teilauslösung der dort vorhandenen Eigenspannungen. Die resultierenden Dehnungen an der Oberfläche werden als Funktion der Bohrtiefe in verschiedene Richtungen mittels Dehnmessstreifen gemessen. Standardmäßig erfolgt die Aufnahme der Oberflächendehnungen durch drei Dehnmessstreifen (DMS), welche zumeist unter den Winkeln 0° , 45° und 90° radial um die Bohrung zu einer DMS-Rosette angeordnet sind. Die gefertigten Bohrungen werden in der Regel bis zu einer Tiefe von 60% des Bohrl Lochdurchmessers D_0 gebohrt, da in größeren Tiefen keine Dehnungsauslösungen mehr zu erwarten sind. Übliche Bohrl Lochdurchmesser befinden sich im Bereich von $D_0 = 0,8$ bis 3,5 mm. Dies ermöglicht die relativ einfache Aufnahme eines Eigenspannungstiefenverlaufs über den Bereich der inneren Grenzschicht hinaus (vgl. Kapitel 2.2). Aufgrund der Tatsache, dass der Bohrungsdurchmesser im Vergleich zur Bauteildimensionierung in der Regel sehr klein ist und somit das Bauteil in seiner Funktion trotz der Bohrung in einigen Fällen keinen Einschränkungen unterliegt, wird dieses Messverfahren als teil-zerstörendes Verfahren bezeichnet. Als Nachteil dieser Messmethode kann die Tatsache genannt werden, dass sehr hohe Eigenspannungen oft in störenden plastischen Effekten resultieren, welche die Auswertung sowie die Interpretation der Tiefenverläufe erschweren. Des Weiteren ist es ratsam den Spannungszustand eines Prüfstücks mit mindestens zwei oder mehr Eigenspannungsmessungen zu bewerten, um die Aussagegenauigkeit der Messungen auch aus statistischer Sicht abzusichern. Zur Veranschaulichung der beschriebenen Anordnung sowie der wichtigsten geometrischen und physikalischen Größen dient die nachfolgende Abbildung 2.8. [9, S.18-21][40][42][43]

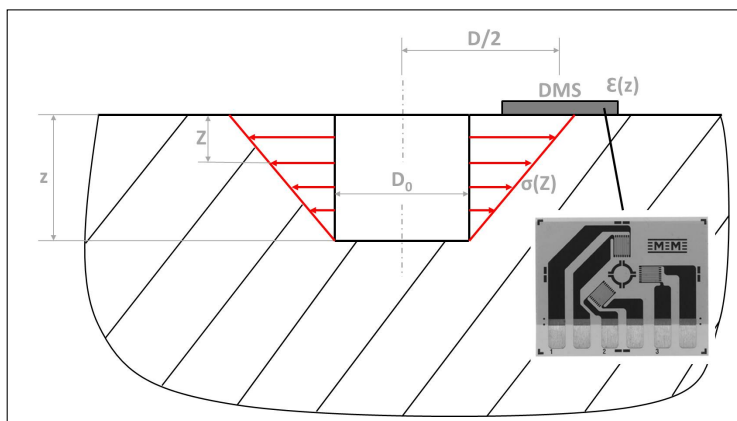


Abbildung 2.8: Darstellung der Eigenspannungsermittlung mittels Bohrlochverfahren am Grundprinzip der Integralmethode nach [8, S.7-11][9][10]

Aus den gemessenen Dehnungsauslösungen, die in Abhängigkeit der Bohrtiefe z aufgenommen werden, berechnet sich auf der Grundlage der linear elastischen Kontinuumsmechanik der Eigenspannungstiefenverlauf im Prüfstück. Hierbei wird von einem

ebenen, zweiachsigen Spannungszustand ausgegangen. Unter dieser Annahme ergeben sich die Hauptspannungen σ_I und σ_{II} aus den drei gemessenen Dehnungen der DMS-Rosette als Mittelwert über die Bohrtiefe z . Auf diesen Mittelwertansatz, welcher in der zugrunde liegenden Normung ASTM E 837-99 beschrieben ist, soll im Folgenden nicht genauer eingegangen werden. Die beiden am häufigsten verwendeten Auswertemethoden zur Bestimmung von Eigenspannungstiefenprofilen sind die Differentialmethode nach Kockelmann [44] und die Integralmethode nach Schajer [45].

Während bei der Differentialmethode davon ausgegangen wird, dass ausschließlich die Eigenspannungen des zuletzt gebohrten Tiefeninkrements zur Dehnungsauslösung beitragen, verfolgt die Integralmethode die Annahme der Dehnungsauslösung $\epsilon(Z)$ aufgrund der Eigenspannung aller bereits gebohrten Tiefeninkremente Z (vgl. Abbildung 2.8). Demzufolge wird nach diesem Grundsatz der Einfluss der Eigenspannungen in allen bereits gebohrten Tiefeninkrementen Z auf die an der Bauteiloberfläche registrierten Dehnungen $\epsilon(z)$ des aktuell gebohrten Tiefenschritts berücksichtigt. Diese Auswertemethode bildet ebenfalls den Algorithmus zur Berechnung von Eigenspannungen in der Auswertesoftware "H-Drill". Aufgrund der Tatsache, dass diese Software mit dem implementierten Auswerteverfahren der Integralmethode in der experimentellen Spannungsanalyse im Rahmen dieser Arbeit ebenfalls zur Anwendung kommt, erfolgt die nachfolgende Betrachtung des mathematischen Hintergrunds ausschließlich von dieser Methodik.[8, S.7-11][9, S.18-21][22, S.70-78][42][46]

Ausgehend von den Annahmen eines linear-elastischen Materialverhaltens, eines isotropen, homogenen Werkstoffzustands sowie einem biaxialen (zweiachsigen) Spannungszustand, gilt bei der Anwendung der Integralmethode die folgende Grundgleichung 2.6. Diese stellt den Zusammenhang zwischen dem biaxialen Anteil des Dehnungstensors $p(z)$ und dem biaxialen Spannungsanteil $P(Z)$ dar. $A^I(Z, z)$ beschreibt dabei die Dehnungsauslösung pro Tiefeneinheit, verursacht durch die Spannungen σ in der Tiefe Z dar (vgl. Abbildung 2.8). Ebenfalls fließen die Materialkonstanten des E-Moduls E sowie der Querkontraktion ν mit in die Gleichung ein.[9, S.18-21]

$$p(z) = \frac{1 + \nu}{E} \int_0^z A^I(Z, z) P(Z) dZ \quad 0 \leq Z \leq z \quad (2.6)$$

In der Praxis erfolgt die Aufnahme der Dehnungen jedoch in diskreten Schritten, da die Bohrung in schrittweisen Inkrementen gefertigt wird. Aus diesem Grund muss die Grundgleichung 2.6 in eine diskrete Form 2.7 überführt werden.

$$p_i = \frac{1 + \nu}{E} \sum_{j=1}^{j=i} \bar{a}_{ij} P_j \quad 1 \leq j \leq i \leq n \quad (2.7)$$

$$\begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \end{bmatrix} = \frac{1+v}{E} \begin{bmatrix} a_{11} & & & \\ a_{21} & a_{22} & & \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Diese diskrete Form beinhaltet mit p_i die nach dem i ten Bohrinkrement gemessene Dehnungsauslösung, die dazugehörige, äquivalente Spannung P_j im j ten Tiefeninkrement und die Gesamtanzahl an Bohrinkrementen n . Die Kalibrierkonstante \bar{a}_{ij} entspricht der Dehnungsauslösung einer Bohrung der Inkrementtiefe i aufgrund einer Spannung im j ten Tiefeninkrement, woraus sich die untere Dreiecksmatrix 2.8 ergibt. Zur Veranschaulichung dient die Abbildung 2.9.[6, S.25-28][8, S.7-11][9, S.18-21][45]

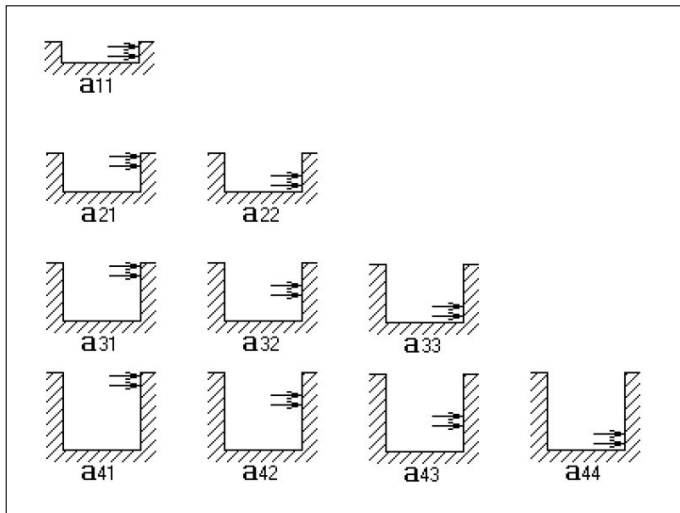


Abbildung 2.9: Darstellung der Kalibrierkonstanten für die Integralmethode der Eigenspannungsermittlung mittels Bohrlochverfahren [8]

Bestimmt werden kann die Kalibrierkonstante ausschließlich über FEM-Berechnungen, um eine nur teilweise Auslösung der Eigenspannungen zu berücksichtigen. Diese sind jedoch bereits Bestandteil der Analysesoftware und müssen nicht separat ermittelt werden. Die Kalibrierkonstanten sind dabei von den folgenden Parametern abhängig, welche zur Berechnung mittels “H-Drill“-Software als Input-Daten ebenfalls in die Auswertung eingehen [8, S.13][46]:

- Bohrlochgeometrie (Bohrlochdurchmesser D_0 , Bohrtiefe z),
- Rosettengeometrie (Rosettendurchmesser D , Breite und Länge der DMS),
- elastischen Eigenschaften des Probenmaterials

3 Stand der Forschung

Wie bereits genannt, sind Eigenspannungen unabdingbare Resultate aller Fertigungsverfahren nach DIN 8580 [24], woraus folgt, dass keine technischen Werkstoffzustände existieren, welche frei von Eigenspannungen sind. Eine wichtige Thematik ist daher, ob und gegebenenfalls wie sich unterschiedliche Eigenspannungszustände auf Bauteile im Betriebsverhalten auswirken. Aus diesem Grund wurde der Begriff der “surface integrity“ definiert, womit der Zusammenhang der physikalischen Eigenschaften einer Oberfläche und deren funktionales Verhalten beschrieben wird. [47][48]

Das Verhalten schwingend beanspruchter metallischer Werkstoffe in Korrelation zum Fertigungsverfahren bzw. den dabei definierten Parametern und Randbedingungen steht dabei im Fokus einiger experimentellen Untersuchungen. Das vorrangige Ziel aller durchgeführten Forschungsarbeiten dieses Themengebiets liegt insbesondere in der Erhöhung der Druckeigenspannungen in oberflächennahen Bereichen, da hierdurch der Anstieg der Schwingfestigkeit, des Ermüdungsverhaltens erwartet wird. [49]

Zugeigenspannungen hingegen werden negative Auswirkungen auf die Bauteileigenschaften zugesprochen. Hierzu zählen vor allem die Verringerung der Schwingfestigkeit, die Beschleunigung der Rissausbreitung sowie die Begünstigung der Spannungsrissskorrosion und der Schwingungsrissskorrosion. [23][28][33][50][51]

Yang et al. [52] sowie Brinksmeier et al. [53] bewerten in ihren Übersichtsarbeiten dabei die Eigenspannungen als wichtigsten Einflussfaktor auf das Ermüdungsverhalten. Verfahrensbeispiele, welche bereits verifiziert zu einer Verbesserung der Schwingfestigkeit durch das Einbringen von Druckeigenspannungen führen, sind beispielsweise das Kugelstrahlen sowie das Festwalzen. [23][50][54]

Es wurde unter anderem von Sasahara [55], Klein et al. [56] und Maximov et al. [57] beobachtet, dass durch die Wahl geeigneter Bearbeitungsparameter bei der spanenden Bearbeitung das Ermüdungsverhalten bearbeiteter Bauteile gegenüber dem Grundmaterial durch eine Modifikation der eingebrachten Eigenspannungen erhöht werden kann.

Wendt et al. [20] untersuchten die Charakterisierung der Randschicht des Vergütungsstahls C45E und des Warmarbeitsstahls 40CrMnMo7 nach dem High-Speed-Cutting HSC-Prozess. Die zu bewertenden Bearbeitungsparameter der Schnittgeschwindigkeit

v_c sowie des Gleich- und GegenlaufräSENS wurden dabei variiert. Bei allen Versuchsreihen erreichten die signifikanten Eigenspannungen nach einer Tiefe von ca. $60 \mu\text{m}$ das jeweils werkstofftypische Grundniveau. Ebenfalls zeigte sich der Übergang von Zug- in Druckeigenspannungen an der Probenoberfläche mit steigender Schnittgeschwindigkeit beim GegenlaufräSEN. Im Gegensatz dazu wurden beim GleichlaufräSEN über den gesamten Schnittgeschwindigkeitsbereich Zugspannungen nachgewiesen.

Sutanto und Madl [58] beschäftigten sich, ähnlich der Untersuchungen von Wendt et al., mit dem Einfluss der Schnittgeschwindigkeit v_c sowie des Vorschubs pro Zahn f_z beim PlanfräSEN von gehärtetem Stahl (60 HRC). Hierbei zeigten sich Tendenzen, welche eine Eigenspannungsverschiebung in den Druckbereich mit Erhöhung der Schnittgeschwindigkeit sowie des Vorschubs verursachen.

Die Ergebnisse aus der Abhandlung von Moussaoui et al. [59] verhalten sich hierzu jedoch konträr. Eine Erhöhung der Druckeigenspannungen sowie eine Verbesserung des Ermüdungsverhaltens von gefräSTEM Ti6Al4V wurde durch die Parameterkombination einer geringen Schnittgeschwindigkeit v_c , eines geringen Vorschubs pro Zahn f_z , eines kleinen Eckenradius r_ϵ verbunden mit dem Einsatz von Kühlschmierstoff (KSS) erzielt.

Der Zahnradverzug durch Eigenspannungen als Resultat eines WälzfräSprozesses wurde durch Kohlhoff und Brinksmeier [60] erforscht. Beim untersuchten Werkstoff handelt es sich um einen 20MnCr5. Als Erkenntnis konnte gewonnen werden, dass durch keinen der variierten Prozessparameter der Vorschubrichtung (Gleich-, Gegenlauf), der Schnittgeschwindigkeit v_c , des Vorschubs pro Zahn f_z sowie der Stollenzahl i_o eine Veränderung des Eigenspannungszustandes in der Randzone hervorgerufen wird. Ebenfalls wurde der Zahnradverzug aufgrund einer Veränderung der Parameter beim WälzfräSEN ausgeschlossen.

Capello [61] untersuchte ebenfalls eine Vielzahl an Zerspanungsparametern beim Drehen von Fe370,C45 und 39NiCrMo3. Die dokumentierten Ergebnisse dieser Forschungsarbeit zeigen bei der Charakterisierung der Randzone für alle untersuchten Werkstoffe die gleichen Tendenzen des Spannungszustands bei der Variation der Prozessparameter. Als vernachlässigbar stufte Capello den Einfluss der Parameter der Schnittgeschwindigkeit V_c sowie der Schnitttiefe a_p ein. Der größte Effekt auf die Eigenspannungen wurde durch die Variation des Vorschubs pro Zahn f_z sowie des Eckenradius r_ϵ erzielt. Mit sinkenden Werten dieser Parameter stellten sich ebenfalls geringere Spannungswerte ein.

Ein Zusammenhang zwischen Druckeigenstressungen und der Mikrohärtigkeit in der Oberflächengrenzschicht wird in der Arbeit von Yao et al. [62] beim Drehen einer Titan-Aluminium-Legierung beschrieben. Die Steigerung der Schnittgeschwindigkeit v_c sowie der Schnitttiefe a_p bewirkt einerseits einen Anstieg der Druckspannungen, andererseits stellt sich eine Verschiebung dieser in tiefere Schichten ein. Sowohl ein Anstieg als auch eine Verschiebung wird analog zum Spannungszustand auch beim Tiefenverlauf der Mikrohärtigkeit dokumentiert.

Am Beispiel des Tagungsbeitrags von Schaeffler [63] wird ersichtlich, dass Korrelationen zwischen dem Zerspanungsprozess sowie dem Eigenspannungszustand ebenfalls in praktischen Anwendungen Einzug halten. Hierbei werden hochbeanspruchte Bereiche eines Innenrings von Radlagereinheiten für Fahrzeuge der Bearbeitung des Hartdrehens unterzogen, um gezielt Druckspannungen in den Randbereich dieser Zonen einzubringen. Ziel dieser Vorgehensweise ist es, eingetretene Schadensfälle (Risse) aufgrund von Zug-eigenstressungen in Kombination mit Korrosion am Innenring zukünftig zu vermeiden. Ebenfalls geht hieraus die Erkenntnis hervor, dass der Einfluss der Werkzeuggeometrie gegenüber dem Schneidstoff bei der gezielten Ausbildung von Druckeigenstressungen dominierend ist.

Der Einfluss des Werkzeugverschleißes auf das Ermüdungsverhalten wurde anhand von Fräsversuchen in Titanaluminid in der Arbeit von Mantle und Aspinwall [64] bewertet. Aufgrund des ansteigenden Verschleißzustandes des Fräswerkzeugs kommt es ebenfalls zum Anstieg der Oberflächenrauigkeit der bearbeiteten Prüfstücke. Trotz dieser Tatsache wird eine Erhöhung der Dauerfestigkeit, infolge der eingebrachten Druckeigenstressungen, im Vergleich zur Referenzprobe mit geringerer Rauigkeit, festgestellt. Diese Ergebnisse werden durch Novovic et al. [65] bestätigt. An Untersuchungen verschiedener metallischer Werkstoffe ergibt sich ein dominierender Einfluss der Eigenspannungen im Vergleich zum Einfluss der Rauigkeit auf die Ermüdungseigenschaften.

Aus den Ergebnissen der Forschungstätigkeit von Bentley et al. [66] wird ergänzend zur Arbeit von Mantle und Aspinwall ersichtlich, dass der Einsatz einer verschlissenen Werkzeugschneide in der Randzone der Proben eine deutlich höhere Mikrohärtigkeit aufweist. Verglichen wurden in dieser Arbeit die Auswirkungen des Hochgeschwindigkeitsfräsens mit Werkzeugen im arbeitsscharfen sowie im verschlissenen Zustand auf die Randzone von Titanaluminid. Weiterhin erfolgt die Gegenüberstellung der Dauerfestigkeit von Proben nach der Hochgeschwindigkeitsbearbeitung, nach dem Schleifen sowie dem Polieren. Die höchste Dauerfestigkeit wird hierbei nach der Hochgeschwindigkeitsbearbeitung dokumentiert.

4 Material, Werkstoffzustand und Geometrie der Proben

4.1 Werkstoff der Proben

Die Auswahl des in Rahmen dieser Arbeit untersuchten Werkstoffs richtet sich vor allem nach den Restriktionen des Einsatzgebiets sowie der praktischen Relevanz. Insbesondere Werkstoffe, welche unter dynamischen Beanspruchungen zum Einsatz kommen und zudem in der Herstellung von Bauteilen einer spanenden Bearbeitung als abschließenden Fertigungsschritt unterzogen werden, bilden hierbei den Mittelpunkt des Interesses. Eine sehr hohe Relevanz nimmt dabei die Gruppe der Vergütungsstähle ein. Aufgrund dieser Tatsache erfolgen die experimentellen Untersuchungen im Rahmen der vorliegenden Masterarbeit an dem unlegierten Vergütungsstahl C45 (Werkstoffnummer: 1.0503). In nachfolgenden Unterpunkten wird neben einer Beschreibung der Vergütungsstähle der ausgewählte Werkstoff C45 eingehender betrachtet.

4.1.1 Vergütungsstahl C45

Vergütungstähle nach DIN EN ISO 683-1 (früher DIN EN 10083) [67] sind legierte oder unlegierte Stähle mit einem C-Gehalt zwischen 0,22 % und 0,6 %, welche aufgrund des Wärmebehandlungsverfahrens des Vergütens für den Einsatz von mechanisch hochbeanspruchten, insbesondere schwingungsbeanspruchten Bauteilen geeignet sind. Grund hierfür ist die durch das Vergüten gesteigerte Streckgrenze R_e sowie das größere Streckgrenzenverhältnis R_e/R_m bei gleichzeitig verbesserter Zähigkeit. Dieses Wärmebehandlungsverfahren besteht aus den Teilschritten des Härtens (Austenitisieren und anschließendes Abschrecken) sowie dem Anlassen bei hohen Temperaturen. Für eine vollständige Austenitisierung erfolgt der Schritt des Härtens je nach Werkstoff bei Temperaturen zwischen 800 bis 900 °C. Die Anlasstemperatur, welche die sich einstellenden Werkstoffeigenschaften der Härte, der Zugfestigkeit und der Streckgrenze indirekt proportional sowie die Bruchdehnung und die Kerbschlagzähigkeit proportional beeinflusst, liegt zwischen 500 und 650 °C.[68, S.402-404][69, S.139-141 & 207-208][70]

Die experimentellen Untersuchungen in dieser Arbeit werden allesamt an dem Werkstoff C45 (Werkstoffnummer: 1.0503) durchgeführt. Das Einsatzgebiet dieses unlegierten Vergütungsstahls umfasst dabei primär kleine bis mittlere Vergütungsquerschnitte im Automobil-, Motoren- und Schienenfahrzeugbau sowie Bauteile aus dem allgemeinen Maschinenbau. Somit ist diesem Werkstoff eine hohe praktische Relevanz zuzuschreiben. Aufgrund dieser Tatsache sowie der genannten Einsatzgebiete entspricht der gewählte Probenwerkstoff dem definierten Anforderungsprofil dieser Forschungsthematik. [11][13]

Die chemische Zusammensetzung des Probenmaterials ist in der nachfolgenden Tabelle 4.2 zusammengefasst. Die Ermittlung dieser Werte erfolgte mittels Vakuumemissionspektrometrie nach DIN 51009 [71] an einem den Proben entnommenem Analysestück. Zur Bewertung der IST-Werte mit den SOLL-Werten wurde der seit 2018 gültige Standard DIN EN ISO 683-1 [67] herangezogen. Es zeigt sich, dass alle relevanten Werte des gemessenen Probenmaterials im Soll-Bereich der Norm liegen und somit der Spezifikation des Stahlmaterials C45 zugeordnet werden können.

Tabelle 4.1: Chemische Zusammensetzung des Probenwerkstoffs C45

Element	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
SOLL-Wert in % nach [67]	0,39... 0,53	0,07... 0,43	0,46... 0,84	max. 0,05	max. 0,05	max. 0,45	max. 0,13	max. 0,43
IST-Wert in %	0,42	0,27	0,75	0,011	0,009	0,22	0,04	0,18

In dem sich anschließenden Unterkapitel erfolgt die erweiterte Analyse des Probenmaterials. Dabei werden neben der Charakterisierung des Gefüges ebenfalls alle relevanten technischen Kennwerte dargestellt. Des Weiteren erfolgt die Beschreibung des Wärmebehandlungsschritts des Vergütens.

4.1.2 Zustand und Eigenschaften des Probenmaterials C45

Im praktischen Einsatz kommen Bauteile aus dem Werkstoff C45 in der Regel im vergüteten Zustand zum Einsatz. Aufgrund dessen erfolgt vor der spanenden Bearbeitung der Prüfstücke der Wärmebehandlungsschritt des Vergütens. Hierdurch erfährt die Aussagekraft der sich anschließenden Messergebnisse der Eigenspannungsmessungen eine verbesserte praktische Relevanz. Wie bereits im vorangegangenen Unterkapitel

erwähnt, besteht diese Wärmebehandlung aus zwei Teilschritten, welche in der Kombination ein reproduzierbares Temperatur-Zeit-Regime ergeben. Die nachfolgende Abbildung 4.1 stellt den angewendeten Temperatur-Zeit-Verlauf grafisch (idealisiert) dar. Nach diesem Vorgehen wurden die Proben aller durchgeführten Versuchsreihen behandelt, sodass sich das daraus ergebende Gefüge sowie die sich ergebenden technischen Kennwerte für alle Prüfstücke als konstant angenommen werden.

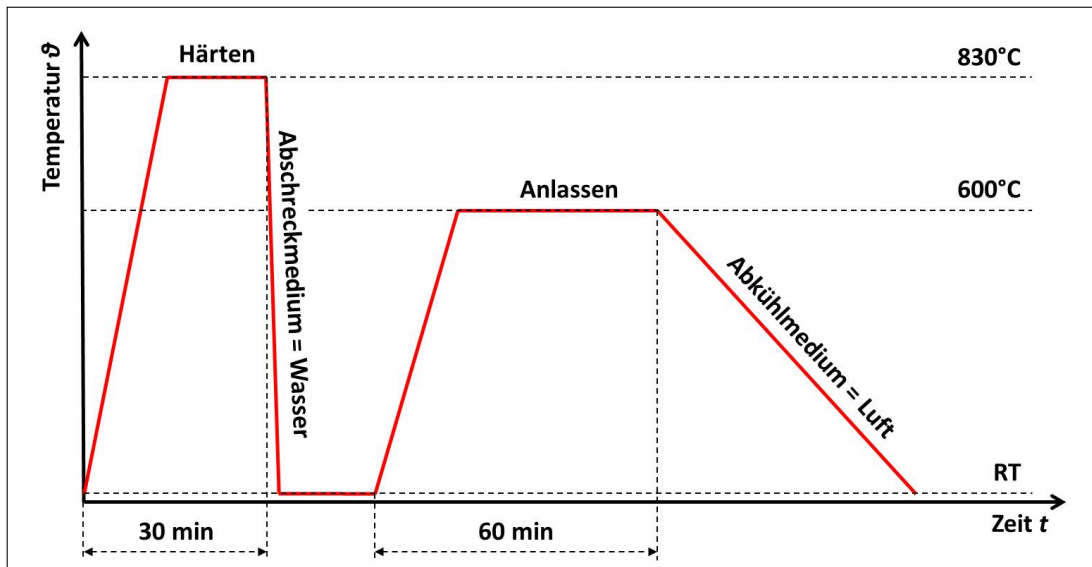


Abbildung 4.1: Temperatur-Zeit-Regime für das Vergüten der Proben

Das Gefüge des C45 im vergüteten Zustand wurde anhand eines metallografischen Schliffs charakterisiert. Die Abbildung 4.2 zeigt die Gefügaufnahmen der Lichtmikroskopie im Abstand von 0 mm von der bearbeiteten Oberfläche auf der linken Seite und im Abstand von 2 mm auf der rechten Seite.

Im Abstand von 0 mm zur Oberfläche (links) liegt ein typisches sehr feinkörniges Vergütungsgefüge mit angelassenem Martensit (weiße Gefügebereiche) und Zementit (schwarze Gefügebereiche) in Form von Karbiden vor. Mit gesteigertem Abstand zur bearbeiteten Oberfläche auf 2 mm (rechts) werden zudem Ferritkörner im Gefüge ersichtlich. Zunehmend tiefere Gefügebereiche würde anschließend sowohl Zwischenstufengefüge (Bainit) als auch Widmanstätten-Gefüge (sprödes ferritisch-perlitisches Gefüge) aufweisen. Aufgrund des sehr feinkörnigen Gefüges des unlegierten Vergütungsstahls ist eine ausgeprägte Verformungszone nach der spanenden Bearbeitung (siehe Abbildung 2.3) in der Randzone nicht zu erkennen. Dennoch ist dieser Randzonenbereich mit dessen Eigenschaften (siehe Kapitel 2.2) für diesen Werkstoff ebenso gültig.

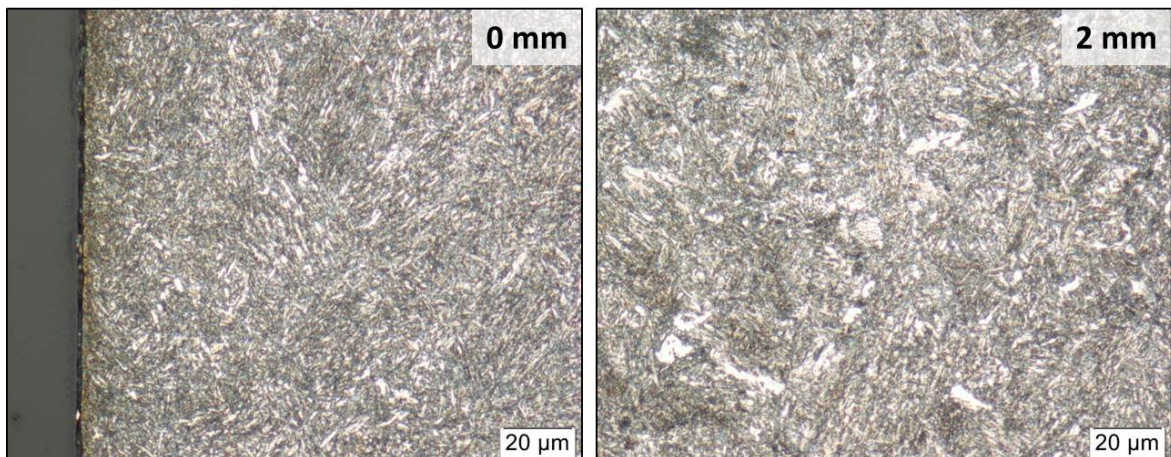


Abbildung 4.2: Gefügebildungen des unlegierten Vergütungsstahls C45 im Abstand von 0 mm (links) und 2 mm (rechts) von der bearbeiteten Oberfläche

Aus der dargestellten Wärmebehandlung des Vergütens ergeben sich die in der Tabelle 4.2 zusammengefassten technischen Kennwerte des Probenmaterials. Diese Werte sind für die Proben aller Versuchsreihen als konstant anzusehen. Es ist zu beachten, dass es sich bei den Werten der Zugfestigkeit R_m , der Bruchdehnung A_5 sowie der Brucheinschnürung Z um Tabellenwerte handelt, welche auf der Basis der Wärmebehandlung sowie der Probendimensionierung der Literatur entnommen wurden. Die Kennwerte sowohl des E-Moduls E als auch der Querkontraktionszahl ν sind ebenfalls Tabellenwerte der Literatur. Die Kenntnisse über diese Werte sind bei der Auswertung der Eigenspannungsmessung von Interesse. Die Angabe der Streckgrenze R_e basiert auf internen Erfahrungswerten. Die Härtewerte nach Rockwell und Vickers wurden an einer Referenzprobe nach den dafür zugrundeliegenden Normen DIN EN ISO 6508-1 [72] und DIN EN ISO 6507-1 [73] bestimmt. Die angegebenen Werte verkörpern Mittelwerte, welche sich aus jeweils fünf Einzelmesswerten berechnen. Für die Berechnung der Härte nach Vickers aus den Diagonalen der Härteindrücke wurde die in der DIN EN ISO 6507-1 definierte Formalität verwendet. Die hierfür verwendete Prüfkraft wurde mit $F = 98,07 \text{ N}$ definiert. Dies entspricht der normgerechten Bezeichnung $HV10$.

Tabelle 4.2: Technische Kennwerte des Probenmaterials C45 für $d = 16 \dots 40$ mm nach [11][12][13][14][15]

technische Eigenschaft	Kennwert
Werkstoff und Werkstoffzustand	C45+QT (1.0503)
Zugfestigkeit R_m in N/mm^2	700 ... 800
Streckgrenze R_e in N/mm^2	650
Bruchdehnung A_5 in %	≥ 16
Brucheinschnürung Z in %	≥ 40
Rockwell-Härte in HRC nach [72]	26,4
Vickers-Härte in HV10 nach [73]	250
E-Modul E in GPa	210
Querkontraktion ν	0,3

4.2 Geometrie der Proben

Die Geometrie der Prüfstücke richtet sich insbesondere nach dem zu bewertenden Bearbeitungsverfahren sowie nach dem verwendeten Analyseverfahren zur Ermittlung der Eigenspannungen. Dabei stellen sowohl das Fertigungsverfahren des Stirnfräsens, welches im Rahmen dieser Untersuchungen zum Einsatz kommt, als auch das Messverfahren der Bohrlochmethode gewisse Restriktionen auf und fordern einen ausreichenden Handlungsspielraum an die Probengeometrie. Speziell die Abmessung der eingesetzten DMS-Rosetten ist von zentraler Bedeutung, um eine problemfreie und flexible Applikation der Rosetten auf den Prüfstücken zu gewährleisten sowie um mehrere Messungen auf einer Oberfläche durchführen zu können. Ebenfalls sollte der sich einstellende Verzug der Proben bei der Wärmebehandlung beachtet werden. Dieser verstärkt sich enorm bei einem kleinen Verhältnis zwischen Probenhöhe und Probenlänge. Um jedoch für alle Versuchsreihen die Fertigungsbedingungen sowie die zu bewertenden Parameter reproduzierbar zu halten, gilt es einen starken Verzug der Proben nach der Vergütung durch eine geeignete Probengeometrie zu vermeiden.

Aus diesen Eingrenzungen ergibt sich für alle Versuchsreihen die nachfolgend in der Abbildung 4.3 dargestellte prismatische Probengeometrie (Basisgeometrie) mit den Maßen ($l \times b \times h$ in mm) $120 \times 40 \times 19$. Sowohl der Fertigungsschritt des Stirnfräsens als auch die messtechnischen Untersuchungen werden dabei an der gekennzeichneten Bauteiloberseite der Prüfstücke durchgeführt. Der Grund für die in der Zeichnung angegebene Formtoleranz liegt im verwendeten Messverfahren zur Ermittlung der Eigenspannungen, um einen geometrischen Fehlereinfluss der Probe zu minimieren.

Zu beachten sind die veränderten Dimensionierungen der Proben in den Versuchsreihen 3 und 4. Diese unterscheiden sich jedoch nur in jeweils einem Maß zur Basisgeometrie. In der Versuchsreihe 3 kommt eine Probendimensionierung zum Einsatz, welche sich im Maß der Probenhöhe im Vergleich zur Basisgeometrie um die Hälfte verringert. Hierdurch ergibt sich die Probenabmessung ($l \times b \times h$ in mm) $120 \times 40 \times 9,5$. Die Geometrie der Proben in der Versuchsreihe 4 variiert hingegen im Maß der Probenlänge verglichen zur Basisprobe, woraus sich die Abmessung ($l \times b \times h$ in mm) $315 \times 40 \times 19$ ergibt. Da sich in beiden Fällen lediglich ein Parameter zur abgebildeten Ausgangsprobe (Abbildung 4.3) unterscheidet, wird von einer zusätzlichen Darstellung dieser Geometrien in Form einer technischen Zeichnung abgesehen.

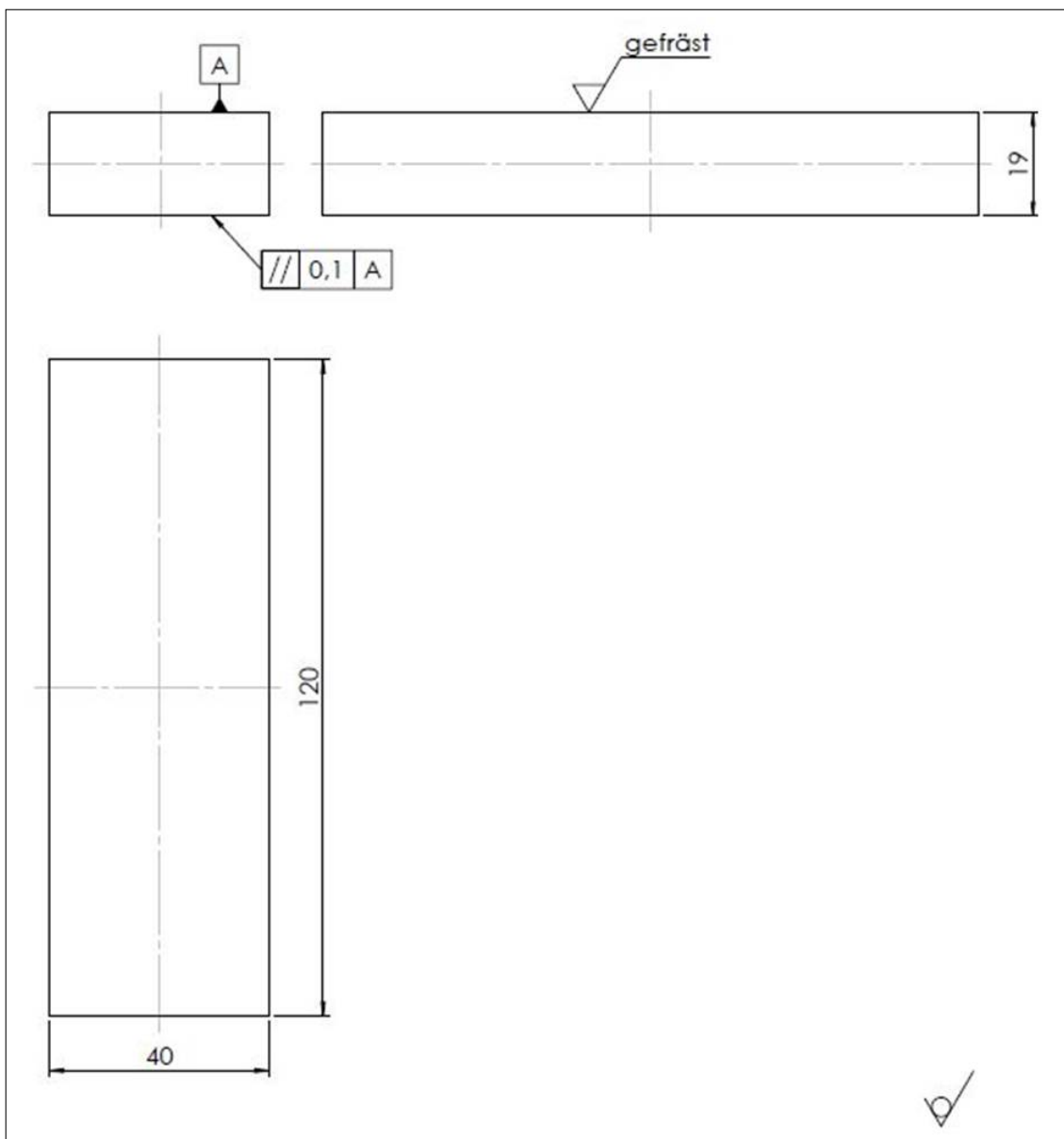


Abbildung 4.3: Technische Zeichnung der verwendeten Probengeometrie

5 Experimentelle Versuchsdurchführung

Dieses Kapitel behandelt die vollständige Planung und Durchführung der experimentellen Untersuchungen. Nach der Beschreibung der gesamten Messtechnik, welche im Rahmen des Analysevorgehens der Zielgrößen Verwendung fand, erfolgt die Auswahl der eingesetzten Fräswerkzeuge für den Fertigungsschritt des StirnfräSENS. Abgeschlossen wird die Planung der Experimente mit der umfassenden Beschreibung der durchgeführten Versuchsreihen mit allen zugehörigen, unmittelbar ergebnisrelevanten Parametern.

5.1 Beschreibung der verwendeten Messtechnik zur Analyse der Zielgrößen

Im Mittelpunkt der Zielgrößen dieser Arbeit steht, wie bereits erwähnt, die Charakterisierung des Randzonenbereiches nach dem StirnfräSEN. Speziell die Faktoren der Ausprägung (Größe der Eigenspannungen), der Ausrichtung (Zug, Druck) sowie der Lage (Abstand zur bearbeiteten Oberfläche) der Eigenspannungen sind dabei zentraler Bestandteil dieser Charakterisierung. Im Zuge dessen ist ebenfalls die Auswirkung der Eigenspannungszustände auf die sich einstellende MikrohäRte im oberflächennahen Bereich von großem Interesse. Neben den Zielgrößen, welche unmittelbar an den Proben ermittelt werden, verfolgt dieses Vorgehen ebenfalls die energetische Bewertung der Fräsprozess, um die Aussagekraft dieser Arbeit auf ökonomischer Ebene zu erweitern.

5.1.1 Messaufbau zur Ermittlung der Eigenspannungen mittels Bohrlochverfahren

Zur Ermittlung und Charakterisierung der Eigenspannungen in den Randzonen der Prüfstücke findet die Messmethode des Bohrlochverfahrens mit der Vorrichtung “RS-200 Milling Guide“ der Firma “Vishay GmbH“ Anwendung. Hierbei folgen die Messungen aller Proben einem identischen Vorgehen. Nach der geeigneten Vorbehandlung der gefräSTEN Oberfläche (Reinigen, Schleifen), auf welcher die Eigenspannungsmessung stattfindet, wird die DMS-Rosette auf dieser mit dem entsprechenden Haftmit-

tel appliziert und die Verbindungskabel für den Anschluss an der Messbrücke verlötet. Die exakte Ausrichtung der Probe (der DMS-Rosette) unter der Turbine erfolgt mittels einer Vorrichtungsplatte sowie eines Mikroskops und Einstellschrauben. Die Turbine beinhaltet die Aufnahme für den Hartmetallbohrer (siehe Tabelle 5.2), mit welchem das Einbringen der Sacklochbohrung vollzogen wird. Das detaillierte Vorgehen zur umfassenden Probenvorbereitung für die Eigenspannungsmessung mit dieser Vorrichtung wird in der Literaturquelle [74] eingehend beschrieben. Der Bohrvorgang erfolgt anschließend, beginnend bei der Bauteiloberfläche, bis zur einer Bohrtiefe von $z = 0,2 \text{ mm}$ mit der an der Messvorrichtung kleinstmöglich einstellbaren Schrittweite von $Z = 0,02 \text{ mm}$. Grund für diese geringen Bohrinkremente ist die Tatsache, dass in diesem oberflächennahen Bereich die stärksten Veränderungen der Eigenspannungen vermutet werden. Nach einer Bauteiltiefe von $z = 0,2 \text{ mm}$ erfolgt der Bohrvorgang mit einer erhöhten Schrittweite von $Z = 0,1 \text{ mm}$ bis zur festgelegten maximalen Bohrtiefe von $z = 0,6 \text{ mm}$ (die Festlegung der maximalen Bohrtiefe basiert auf den Erkenntnissen früherer experimenteller Untersuchungen). Dabei muss nach jedem Schritt der Hartmetallbohrer auf die vorhergehende Messtiefe zurückgesetzt werden, um die Dehnungen im System vollständig zu entspannen und anschließend dokumentieren zu können. Die Ermittlung des Bohrungsdurchmessers mittels des Mikroskops schließt den Eigenspannungsmessvorgang ab. Die Auswertung der Dehnungswerte erfolgt mit der dafür vorgesehenen Software "H-Drill". Der theoretische Hintergrund des beschriebenen Verfahrens sowie das mathematische Vorgehen bei der Auswertung der Dehnungswerte nach der Integralmethode ist im Kapitel 2.3.3 sowie in der international anerkannte Norm ASTM E 837-99 [42] umfassend dargestellt.

Die Genauigkeit der Messung mittels Bohrlochverfahren ist dabei von einer Vielzahl von Faktoren abhängig. Auch der Gewissenhaftigkeit des Bedieners ist dabei ein zentrales Fehlerpotenzial zuzuschreiben. Im Folgenden sind einige wichtige auftretenden Fehlerquellen aufgeführt:

- Fehler bei der Applikation der DMS-Rosette auf der Oberfläche,
- Fehler beim Verlöten der Verbindungskabel mit der DMS-Rosette,
- Fehler bei der Positionierung des Bohrlochs im DMS-Rosettenmittelpunkt,
- Messfehler bei der Tiefenzustellung,
- Messfehler bei der Dehnungsmessung (Messgenauigkeit der DMS-Rosette),
- Messfehler bei der Bestimmung des Bohrlochdurchmessers

Die folgende Abbildung 5.1 zeigt den für alle Proben verwendeten Messaufbau für die Charakterisierung der Eigenspannungen im Randbereich. Dieser aus der Messbrücke (1), den Verbindungskabeln (2), dem Niederhalter (3), der Bohrturbine (4), der Skala zur Einstellung der Messtiefe (5), den Einstellschrauben (6), der Probe (7), dem HM-Bohrer (8) sowie der DMS-Rosette (9) und der Vorrichtungplatte (10).

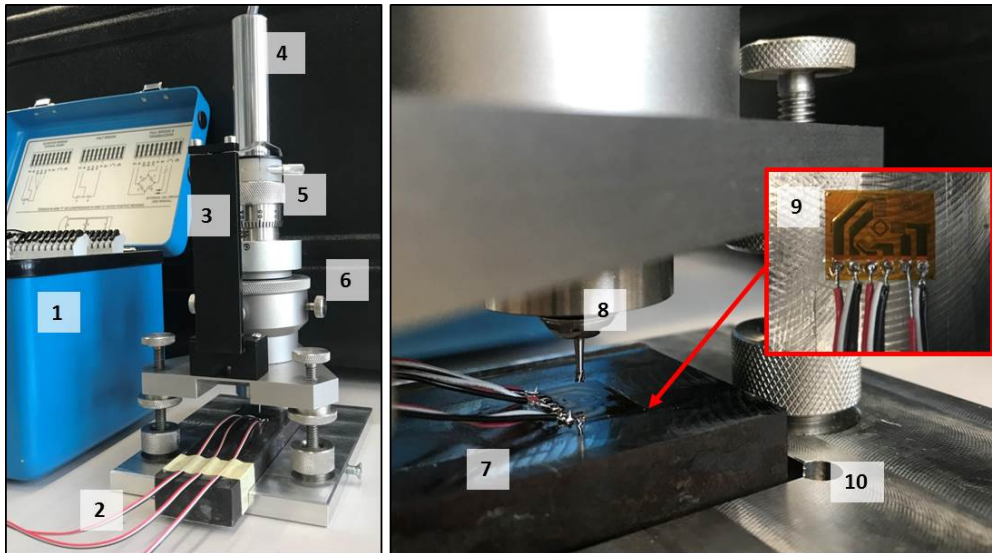


Abbildung 5.1: Versuchsaufbau der Eigenspannungsmessung mittels Bohrlochverfahren

Alle relevanten Parameter des Messvorgehens sowie der dafür verwendeten Verbrauchsartikel sind in den Tabellen 5.1 & 5.2 zusammengefasst. Bei der angegebenen Anzahl der Eigenspannungsmessungen je Probe ist zu beachten, dass es sich dabei um einen Richtwert handelt. Vorhergehende Untersuchungen zeigten starke Schwankungen in der Plausibilität der Spannungstiefenverläufe der jeweils ersten Messung pro Probe. Grund hierfür kann das Auftreten einer oder mehrerer der genannten Fehlerquellen sein. Es ist demzufolge ratsam mindestens zwei Messungen pro Probe durchzuführen, um die dabei erzielten Ergebnisse abzusichern. Die Anordnung der Messungen erfolgen dabei an jedem Prüfstück in den selben Bereichen. Diese Bereiche beschränken sich, infolge der verwendeten Messtechnik, auf die Mittelachse der Oberfläche ($b = 20 \text{ mm}$) im vorderen (ca. $l = 6 \dots 32 \text{ mm}$) und hinteren (ca. $l = 88 \dots 114 \text{ mm}$) Teil der Proben. Die Abbildung 5.1 zeigt die Eigenspannungsanalyse in einem der beschriebenen Probenbereiche. Die verwendeten Verbrauchsartikel der DMS-Rosetten sowie der Hartmetallbohrer sind dabei sowohl aufeinander und auf die eingesetzte Messvorrichtung als auch auf den zu prüfenden Werkstoff abgestimmt, um etwaige Fehlerquellen Seitens der Messtechnik zu minimieren. Dies beinhaltet ebenfalls die stetige Verwendung arbeitsscharfer Bohrer für jede einzelne Messung, um den Einfluss des Verschleißes bei der Eigenspannungsanalyse vernachlässigen zu können.

Tabelle 5.1: Relevante Parameter für die Eigenspannungsmessung mittels Bohrlochverfahren

Parameter	Wert
Messvorrichtung	RS-200 Milling Guide (Vishay GmbH)
maximale Bohrtiefe z in mm	0,6
Schrittweite Z bis in mm	0,02 bis $z = 0,2$ mm; 0,1 bis $z = 0,6$ mm
Anzahl der Messungen pro Probe	mind. 2

Tabelle 5.2: Verwendete Verbrauchsartikel zur Eigenspannungsmessung mittels Bohrlochverfahren

Artikel	Bezeichnung	Widerstand R in Ω	Lochdurchmesser D_0 in mm	Kreisdurchmesser DMS D in mm
DMS	CEA-06-062UL-120	$120 \pm 0,4\%$	1,5 ... 2,0	5,13

Artikel	Bezeichnung	Schneidstoff	geometrische Form	Durchmesser D in mm
Bohrer	ATC-200-062	unbeschichtetes Hartmetall (WC)	umgekehrter Kegel	1,6

5.1.2 Messaufbau zur Bestimmung der Mikrohärt

Zur weiterführenden Charakterisierung der Randzone einzelner Prüfstücke sowie um eine Korrelation zwischen Eigenspannungszustand und Mikrohärt zu erkennen, findet das Härteprüfverfahren nach Vickers Anwendung. Dabei werden Härteeindrücke mittels eines Eindringkörpers in Form einer Diamantpyramide mit quadratischer Grundfläche und einem Winkel von $\alpha = 136^\circ$ in die Oberfläche der Probe eingebracht. Nach der Rücknahme der Prüfkraft schließt sich das Ausmessen der jeweiligen Diagonale des Eindrucks an, anhand welcher der Härtewert berechnet wird. Die Messung im Mikrobereich erfolgt unter Prüfkraften von $0,009807\text{ N} \leq F < 0,9807\text{ N}$ (HV 0,001 ... HV 0,1). Die hierbei zugrundeliegende Normung, welche ebenfalls das mathematische Vorgehen zur Berechnung der Härtewerte aus den Diagonalen des Härteeindrucks beinhaltet, ist die DIN EN ISO 6507-1 [73].

Die Prüfung der Mikrohärtة erfolgt ausschließlich an ausgewählten Proben, welche stark ambivalente Spannungszustände aufweisen. Der jeweiligen Probe muss dabei zur Messung ein Teilstück entnommen werden, um ausgehend von der gefrästen Oberfläche einen Tiefenverlauf der Mikrohärtة ins Bauteilinnere aufnehmen und darstellen zu können. Die Entnahme des Teilstücks erfolgt in einer Entfernung von ca. 30 mm zur vorangegangenen Eigenspannungsmessung, um den Einfluss der dabei gefertigten Bohrung zu vernachlässigen. Die Messung selbst findet jedoch auf der gleichen Achse zu dieser Bohrung statt. Die relevanten Parameter zur Durchführung dieses Analyseverfahrens sind der Tabelle 5.3 zu entnehmen. Zu beachten ist hierbei die definierte Prüfkraft von $F = 0,09807 \text{ N}$ (HV 0,01). Um eine möglichst hohe Auflösung zu erhalten und demzufolge die Abstände zwischen den Härteeindrücken untereinander sowie zur Oberfläche gering zu halten, erfolgte die interne Festlegung auf diese geringe Prüfkraft. Des Weiteren ist die Härteprüfung im Mikrobereich entgegen der Prüfung im Makrobereich lastabhängig, sodass die Prüfkraft für alle zu messenden Proben als konstant definiert wird. Die in der Tabelle angegebenen Abstände (a, b, s, t) sind beziehungsweise zur linken Darstellung der Abbildung 5.2. Diese stellt schematisch die festgelegte Anordnung der Härteeindrücke bei der Mikrohärtةprüfung dar. Die Abstände a und b sind normgerechte Werte aus der DIN EN ISO 6507-1 [73] und stellen den Abstand von der bearbeiteten Oberfläche zum ersten Härteeindruck sowie zu den Eindrücken untereinander dar. Diese sind von den Diagonalen d der Härteeindrücke abhängig. Die maximale Messtiefe t ist auf den Tiefenbereich der Randzone angepasst, in welchem die größten Veränderungen zu erwarten sind. Eine möglichst hohe Auflösung in diesem Bereich ist der Grund für die gering gewählte Schrittweite s . Den Aufbau bei der Mikrohärtةprüfung zeigt die rechte Darstellung der Abbildung 5.2. Dieser besteht aus dem Prüfkopf mit der Diamantpyramide (1), einem Probenhalter (2), dem Mikroskop (3) zum Ausrichten des Teilstücks und Messen der Diagonalen, dem Teilstück der Probe (4) sowie einem Gegenhalter (5).

Tabelle 5.3: Relevante Parameter für die Mikrohärtةprüfung nach Vickers

Parameter	Wert
Härteprüfmaschine	HMV2000 (Shimadzu GmbH)
Prüfkraft F in N	0,09807 (HV 0,01)
Abstand a in μm	$(2,5 \times d)$
Abstand b in μm	$(3 \times d)$
Schrittweite s in μm	10
maximale Messtiefe t in mm	0,2
Anzahl der Messungen pro Probe	1

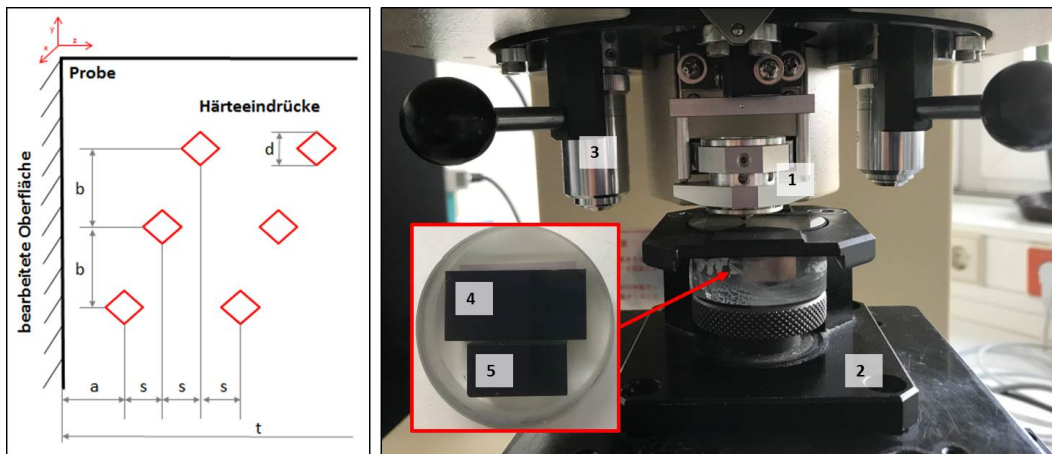


Abbildung 5.2: Schematische Darstellung der Anordnung der Härteeindrücke (links), Messaufbau der Mikrohärtmessung (rechts)

Häufige Fehlerquellen bei der Durchführung der Härteprüfung sind nachfolgend aufgelistet. Eine etwaige Verfälschung der Spannungswerte aufgrund des Eingriffs in das Spannungssystem bei der Entnahme des Teilstücks soll unberücksichtigt bleiben. Grund für diese Annahme ist das sukzessive Schleifen mit kleinerer Körnung bei der Probenpräparation. Durch dieses Vorgehen ist die abgetragene Verformungsschicht am Teilstück um ein Vielfaches größer als die neu eingebrachte Verformungsschicht des letzten Schleifschritts, wodurch diese vernachlässigt werden kann. Übliche Unsicherheiten ergeben sich durch:

- Messfehler des Längenmesssystems (Umkehrspanne der Messschraube),
- Messfehler des Kraftsystems (Prüfkraft),
- subjektive Fehler (Ausmessen der Diagonalen durch den Bediener, Auflösung des Bildschirms)

5.1.3 Bewertung der Energieeffizienz der Fräsprozesse

Neben der Bewertung des Fräsprozesses bezüglich der sich einstellenden Randzonen-Charakteristik der Proben, erfolgt hinzukommend eine wirtschaftliche Evaluation durch die kontinuierliche Messung der mittleren Wirkleistung P der Werkzeugmaschine (WZM). Diese Messung erfolgt mittels eines Leistungsaufnehmers, welcher während der Versuchsreihe 1 der Kurzzeituntersuchungen mit der WZM verbunden ist. Die Umrechnung der gefilterten Leistungswerte in den jeweiligen Energieverbrauch wird anschließend über die mathematische Beziehung $E = P * t$ realisiert, wobei die Zeit t mit dem Parameter der Schnittzeit (Zeit in der der Fräser unmittelbar im Einsatz steht) t_c ersetzt wird.

Somit ergibt sich der mathematische Zusammenhang $E = P * t_c$, auf dessen Grundlage ein energetischer Vergleich der einzelnen Fräsprozesse durchgeführt werden kann. Die technischen Daten des verwendeten Leistungsaufnehmers sind der Tabelle 5.4 zu entnehmen.

Tabelle 5.4: Technische Daten des Leistungsaufnehmers zur Messung der Wirkleistung [16]

Parameter	Wert
Leistungsaufnehmer	PEL 103 (Chauvin Arnoux Group)
Anschlusstyp	Dreiphasig 4 Leiter Y
Nennfrequenz f in Hz	$50 \pm 0,1$
Abtastfrequenz f_s in s^{-1}	1
Eigenunsicherheit in %	$\pm 0,5$

5.2 Auswahl der Fräswerkzeuge zur Fertigung der Proben

Die Fertigung der zu messenden Probenoberfläche wird durch das Bearbeitungsverfahren des Stirnfräsens realisiert. Zur zusätzlichen Bewertung, neben variierender Schnittparameter, erfolgt ebenfalls die Bewertung eines geometrischen Faktor des Werkzeugs, welches für diesen Prozess zum Einsatz kommt. Anwendung findet hierfür der Plan- und Kopierfräser “MultiEdge 45 °“ der Firma “LMT Tools“. Der Vorteil dieses Grundkörpers ist eine universelle Einsetzbarkeit an Wendeschneidplatten (WSP) mit verschiedenen Geometrien. Als zu vergleichende geometrischer Parameter des Planfräsers wurde der Einstellwinkel κ_r definiert. Aus dieser Festlegung ergeben sich somit zwei Wendeschneidplatten, welche, abgesehen von dem zu vergleichenden Parameter, sowohl in ihren Topografien als auch in ihren Geometrien hinreichend genau übereinstimmen. Durch die Auswahl dieser Werkzeuge kann damit der Einstellwinkel κ_r weitestgehend isoliert von allen anderen Werkzeugparametern bewertet werden. Die Auswahl der Werkzeugbeschichtung basiert auf dem Anforderungsprofil des Probenmaterials. Die folgende Tabelle 5.5 fasst die genannten Werkzeuge sowie deren relevanten Werte zusammen. Der entsprechenden Auszug aus dem Werkzeugkatalog der Firma LMT Tools ist den Anlagen, Teil 1 beigelegt.

Tabelle 5.5: Technische Parameter der Fräswerkzeuge [17]

Werkzeug	Grundkörper	WSP 1	WSP 2
Bezeichnung	MultiEdge 45° Universal	OCKX 0606	XCKX 1606
Werkzeugdurchmesser D_{WZ} in mm	52	43,98	43,54
Zähnezahl z	4	/	/
Teilung	gleich geteilt		
Schneidstoff	/	HC, PVD-TiAlN beschichtet (Bezeichnung: LCPK10M)	
Spanwinkel γ_o in °	/	-7	
Winkel der Spanleitstufen γ in °	/	25	
Neigungswinkel λ_s in °	/	20	
Einstellwinkel κ_r in °	/	45	28
Anzahl der Schneiden	/	8	12
Eckenradius r_ϵ in mm	/	0,5	0,5

5.3 Planung der Kurzzeituntersuchungen

Die Kurzzeituntersuchungen dienen ausschließlich einer ersten Bewertung von Korrelationen zwischen dem Zerspanungsprozess bzw. den dabei definierten Fertigungsparametern sowie der geometrischen Größe der Werkzeuge und der sich einstellenden Charakteristik der Randzone. Hierfür wird die Oberfläche der jeweilige Probe mit den Einstellungen der dazugehörigen Parameterkombination einmal gefräst, nachdem sich die genannten messtechnischen Untersuchungen anschließen. Sowohl die zu bewertenden variablen Einflussgrößen als auch die konstanten Parameter sind nachfolgend den jeweiligen Versuchsreihen zugeordnet.

5.3.1 Versuchsaufbau

Der nachfolgende Versuchsaufbau beim Stirnfräsen der Proben, welcher in der sich anschließenden Abbildung 5.3 ersichtlich wird, ist für die gesamten Versuchsreihen der

Kurzzeituntersuchungen identisch. Die linke Darstellung zeigt die unbearbeitete Probe (1) vor der Bearbeitung in der verwendeten Aufspannung bestehend aus Schraubstock (2) auf dem Nullpunktspannsystem (3) bei stillstehendem Fräswerkzeug (Grundkörper (4), WSP (5),Steilkegel-Aufnahme (SK 40) (6), Maschinenspindel (7). Der laufende Fräsprozess ist auf der rechten Darstellung ersichtlich. Es handelt sich hierbei um eine Trockenbearbeitung der Probe, welche im Gegenlauf überfräst wird. Dem Stirnfräsprozess vorangestellt ist das Antasten der Probe in der Aufspannung mittels eines Messtasters. Dieser Vorgang gewährleistet die reproduzierbare Durchführung des Fräsprogramms für die Proben aller Versuchsreihen, aufgrund der exakten Positionsbestimmung des jeweiligen Prüfstücks.



Abbildung 5.3: Versuchsaufbau der Kurzzeituntersuchungen im Stillstand (links), im laufenden Fräsprozess (rechts)

5.3.2 Versuchsreihe 1: Bewertung aller definierter Prozessparameter

Die erste Versuchsreihe dient der umfassenden Bewertung aller definierter Fertigungsparameter, welche nachfolgend in der Tabelle 5.6 aufgeführt sind. Aufgrund der Vielzahl an variablen Einflussgrößen bildet diese Versuchsreihe den größten Umfang, gemessen an der Anzahl der zu fertigenden und anschließend zu messenden Proben. Ebenfalls wird das weitere Vorgehen der nachfolgenden Versuchsreihen auf der Basis der hierbei erzielten Erkenntnisse und Ergebnisse erstellt. Allen in der Tabelle 5.6 aufgelisteten Einflussgrößen werden dabei zwei variierende Werte zugeordnet. Die angegebenen Zerspanungsparameter der Schnittgeschwindigkeit v_c sowie des Vorschubs pro Zahn f_z richten sich nach den Empfehlungen aus dem Werkzeugkatalog der Firma LMT Tools [17]. Trotz der Vielzahl an Einflussgrößen, welche sich auf den Spannungszustand der Bauteilrandzone auswirken (bezugnehmend Kapitel 3), wird sich, aufgrund des begrenzten Rahmens der Abschlussarbeit, auf die nachfolgenden Parameter beschränkt.

Tabelle 5.6: Variable Einflussgrößen der Versuchsreihe 1

Einflussgröße	Wert	
Schnittgeschwindigkeit v_c in m/min	160	220
Vorschub pro Zahn f_z in mm	0,3	0,5
Kühlung	KSS	trocken
Frässtrategie	Gleichlaufräsen	Gegenlaufräsen
Einstellwinkel $\kappa_r = \kappa_{\text{eff}}$ in °	45	28

Den in der Tabelle 5.6 aufgelisteten einzelnen Einflussgrößen wird hierbei jeweils jede mögliche Parameterkombination aus den Werten der weiteren Einflussgrößen zugeordnet. Aus dieser Planung der Parameterkombinationen ergibt sich ein Gesamtumfang der Versuchsreihe von 32 Proben. Der zusammenfassende Versuchsplan, welcher alle Kombinationen der Einflussgrößen beinhaltet, ist den Anlagen, Teil 2 beigelegt. Zuzüglich zum Gesamtumfang von 32 Proben erfolgt ebenfalls die Anfertigung einer Referenzprobe. Diese wird keiner spanenden Bearbeitung unterzogen und liegt somit im Ausgangszustand (Vergütungszustand) vor. Sie bildet die Vergleichsgrundlage der nachfolgenden messtechnischen Analysen.

Des Weiteren zu definieren sind die konstanten Einflussgrößen, welche neben den variablen Parametern ebenfalls den Spannungszustand der Bauteilrandzone beeinflussen könnten, jedoch im Rahmen dieser Untersuchungen nicht im Fokus stehen. Demzufolge werden diesen Einflussgrößen die in der Tabelle 5.7 definierten Werte zugeordnet und für die gesamte Versuchsreihe konstant gehalten. Zu beachten ist hierbei der Wert des Arbeitseingriffs a_e . Aufgrund der Tatsache, dass ein Vergleich des reinen Gleich- und GegenlaufräSENS erfolgen soll, muss die Berechnung des Arbeitseingriffs darauf abzielen, ausschließlich den gewünschten Anteil (Gleichlauf- oder Gegenlaufanteil) beim Fräsen der jeweiligen Probenoberfläche zu ergeben. Dies ist zu realisieren, indem der Wert des Arbeitseingriffs a_e kleiner oder gleich dem Wert des halben Werkzeugdurchmessers D_{WZ} entspricht ($a_e = 0,5 * D_{WZ}$). Da der Durchmesser des Fräswerkzeugs ohnehin größer ist als die Breite der Probe (Vergleich der Unterpunkte 4.2 & 5.2), definiert sich in diesem Fall der Arbeitseingriff als $a_e = 0,5 * \text{Probenbreite } b$, wodurch die Probeoberfläche in zwei identischen Bahnen gefräst wird.

Tabelle 5.7: Konstante Einflussgrößen der Versuchsreihe 1

Parameter	Wert
Schnitttiefe a_p in mm	1
Arbeitseingriff a_e in mm	20
Zähnezahl z	4
Teilung	gleich geteilt
Schneidstoff	HC, PVD-TiAlN beschichtet
Spanwinkel γ_o in $^\circ$	-7
Winkel der Spanleitstufen γ in $^\circ$	25
Neigungswinkel λ_s in $^\circ$	20
Topografie	Struktur der WSP
Kühlmittelkonzentration in % (VDI 3396 [75])	5,8

Aufgrund der Tatsache, dass die definierte Schnitttiefe mit einem Wert von $a_p = 1 \text{ mm}$ größer ist als die in der Tabelle 5.5 aufgelisteten Eckenradien der Wendeschneidplatten mit $r_\epsilon = 0,5 \text{ mm}$, sind die in der Tabelle 5.6 angegebenen Einstellwinkel κ_r ebenfalls als die während der Zerspanung effektiv wirksamen Einstellwinkel κ_{eff} anzusehen. Durch den angegebenen Arbeitseingriff von $a_e = 20 \text{ mm}$ ergibt sich ein Eingriff des Fräs-
werkzeugs von 45,5...46 % (abhängig von der verwendeten Wendeschneidplatte). Ebenfalls berechnet sich daraus der Vorschubweg L . Dieser beträgt für alle Versuchsreihen, welche unter Verwendung dieser Probengeometrie bzw. dieser Probenlänge durchgeführt werden $L = 335,52 \text{ mm}$. Die Formeln zur Berechnung des Vorschubwegs sind den Anlagen, Teil 3 zu entnehmen.

5.3.3 Versuchsreihe 2: Veränderung der Schnittwerte

Auf der Grundlage der ersten Versuchsreihe erfolgt in der sich anschließenden eine weitere Veränderung der Schnittwerte. Dabei werden die Werte der Schnittgeschwindigkeit v_c und des Vorschubs pro Zahn f_z bis an die Maximalwerte der Herstellerangaben gesteigert sowie erheblich reduziert. Die Ausgangswerte für die Steigerung der Parameter sind die höheren Schnittwerten aus der Tabelle 5.6 der ersten Versuchsreihe. Dies bedeutet eine Steigerung der Schnittgeschwindigkeit $v_c = 220 \text{ m/min}$ von 25 % und des Vorschubs pro Zahn $f_z = 0,5 \text{ mm}$ um 5 %. Die Reduzierung der Parameter erfolgte analog dazu mit den niedrigeren Schnittwerten aus der Tabelle 5.6.

Ziel dieses Vorgehens ist die Erweiterung der Aussagekraft über Korrelation zwischen Schnittwerten und Spannungszustand in der Randzone. Die veränderten Parameter sind in der folgenden Tabelle 5.8 dargestellt.

Tabelle 5.8: Variable Einflussgrößen der Versuchsreihe 2

Einflussgröße	Wert	
Schnittgeschwindigkeit v_c in m/min	120	275
Vorschub pro Zahn f_z in mm	0,285	0,525
Kühlung	KSS	trocken
Frässtrategie	Gleichlaufräsen	Gegenlaufräsen
Einstellwinkel κ_r in °	45	28

Entgegen der Parameterkombinationen aus der Versuchsreihe 1 wird bei diesem Untersuchungsschritt, beginnend von einer Ausgangskombination, schrittweise (pro neuer Probe) eine Einflussgröße geändert. Die weiteren Parameter bleiben zur vorhergehenden Kombination konstant. Durch dieses Vorgehen reduziert sich der Probenumfang um ein Vielfaches. Dieser beträgt lediglich 6 Proben. Der Umfang der Vergleichbarkeit innerhalb der Versuchsreihe reduziert sich hierdurch jedoch ebenso, dass ausschließlich die Proben angrenzender Parameterkombinationen gegenübergestellt werden können. Die Parameterkombinationen sind in den Anlagen, Teil 2 ersichtlich. Die konstanten Einflussgrößen erfahren keine Änderungen im Vergleich zur Versuchsreihe 1 und sind demzufolge der Tabelle 5.7 zu entnehmen.

5.3.4 Versuchsreihe 3: Bewertung der Bauteilhöhe

Zur Bewertung des Zusammenhangs zwischen Bauteilhöhe und Spannungszustand infolge eines geringeren Volumens zum Abtransport der entstehenden hohen Temperaturen beim Zerspanungsprozess dient die Versuchsreihe 3. Ziel dieser Untersuchungen ist die Evaluation der Veränderung von thermisch induzierten Eigenspannungen bei einer Reduzierung der Probenhöhe. Dabei findet neben der Basisgeometrie der Proben eine veränderte Probendimensionierung Verwendung, welche im Unterkapitel 4.2 beschrieben ist. Somit ist bei dieser Versuchsreihe der Parameter der Probenhöhe eine der variablen Einflussgrößen. Diese veränderten Geometrien werden beim Wärmebehandlungsschritt des Vergütens dem gleichen Temperatur-Zeit-Regimes unterzogen, welches ebenfalls an den Ausgangsgeometrien Anwendung findet.

Da es sich hierbei um die Betrachtung thermischer Gesichtspunkte handelt, ist der

Vergleich zwischen der Trockenbearbeitung und der Zerspanung mit Kühlschmierstoff ebenfalls von Interesse. Die Tabelle 5.9 fasst die zu bewertenden Parameter zusammen. Die Aufspannung der Prüfstücke ist dabei für beide Probenhöhen so zu wählen, dass neben der Abtragung der definierten Schnitttiefe ebenfalls die sichere Befestigung im Schraubstock gewährleistet wird.

Tabelle 5.9: Variable Einflussgrößen der Versuchsreihe 3

Einflussgröße	Wert	
Probenhöhe h in mm	9,5	19
Kühlung	KSS	trocken

Aufgrund der Tatsache, dass jeder Probenhöhe jeweils einmal die Trockenbearbeitung und die Zerspanung mit KSS zugeordnet wird, ergibt sich ein Probenumfang von 4 Proben. Alle Schnittwerte bleiben, wie aus der Tabelle 5.10 zu entnehmen, über die gesamte Versuchsreihe konstant. Diese basieren auf den erhöhten Schnittwerten aus der vorhergehenden Versuchsreihe 2. Die konstanten Parameter aus der Tabelle 5.7 der Versuchsreihe 1 sind bei diesem Vorgehen ebenfalls als gültig anzusehen.

Tabelle 5.10: Konstante Schnittwerte der Versuchsreihe 3

Parameter	Wert
Schnittgeschwindigkeit v_c in m/min	275
Vorschub pro Zahn f_z in mm	0,525
Frässtrategie	Gegenlaufräsen
Einstellwinkel κ_r in $^\circ$	28

Die sich daraus ergebenden Parameterkombinationen zur spanenden Bearbeitung der vier Prüfstücke dieser Versuchsreihe sind tabellarisch den Anlagen, Teil 2 beigelegt.

5.4 Planung der Langzeituntersuchungen

Die Zielsetzung der unter diesem Kapitel beschriebenen Untersuchungen umfasst eine Erweiterung der Aussagekraft bezüglich des Verhaltens der Eigenspannungen in der Randzone des Probenmaterials in Abhängigkeit praxisrelevanter Einflussfaktoren. Hierbei liegt der Fokus auf der Durchführung von Zerspanungsbearbeitungen, welche sich an spanenden Prozessen aus der Praxis orientieren, der Aufnahme der dabei dominierenden Größen sowie der Bewertung des Einflusses dieser auf den Spannungszustand

der C45-Probenstücke. Analog zu den Kurzzeituntersuchungen schließt sich der Analyseschritt zur Ermittlung der Eigenspannungen dem Fräsprozess der Proben aus der jeweiligen Versuchsreihe an. Von der Aufnahme der Wirkleistung der Werkzeugmaschine wird in diesen Durchführungen abgesehen. Das Vorgehen dieser experimentellen Versuchsdurchführungen ist nachfolgend den jeweiligen Versuchsreihen zugeordnet.

5.4.1 Versuchsreihe 4: Ermittlung der Zerspannungstemperatur

Die Zielsetzung dieser Versuchsreihe beinhaltet die Ermittlung der sich einstellenden Temperaturen in der Kontaktzone zwischen Werkzeug und Werkstück beim Bearbeitungsschritt des Stirnfräsens. Zudem steht die Aufnahme der Temperaturverläufe mit zunehmender Schnittzeit bzw. zunehmendem Vorschubweg auf der erzeugten Oberfläche der Proben im Fokus dieser Untersuchungen. In Abhängigkeit der Temperatur erfolgt ebenfalls die Bewertung des Werkzeugverschleißes und dessen Einfluss auf die Eigenspannungszustände. Die für diese experimentellen Versuche zum Einsatz kommende veränderte Probengeometrie ist im Unterkapitel 4.2 beschrieben. Hierbei erfolgt die Bearbeitung sowie die sich anschließende Eigenspannungsermittlung auf beiden Seiten der Prüfstücke. Die “Oberseite“ der Proben wird mit dem Fräswerkzeug im arbeitsscharfen Zustand mit einer Schnitttiefe von $a_p = 1 \text{ mm}$ einmalig überfräst, nachdem das dreimalige Fräsen der gegenüberliegenden “Unterseite“ (durch Wenden der Probe) bei einer jeweiligen Schnitttiefe von ebenfalls $a_p = 1 \text{ mm}$ erfolgt. Grund für dieses Vorgehen ist die Abbildung einer spanenden Fertigung aus praktischer Sicht bei der mehrfachen Bearbeitung eines Bauteils und dessen Auswirkungen.

Im Falle dieser Versuchsreihe ist die Tatsache des Überfräsens der Proben in zwei identischen Fräsenbahnen zu beachten (bezugnehmend: Trennung zwischen Gegen- und Gleichlaufräsen). Durch dieses Vorgehen ergibt sich ein erhöhter Vorschubweg pro Probe von $L = 5804,16 \text{ mm}$. Der Vorschubweg ergibt sich aus einer Länge von $L_1 = 1451,04 \text{ mm}$ der “Oberseite“ und einer Länge $L_2 = 3 * L_1 = 4353,12 \text{ mm}$. Die Vergütungstiefe bei der Wärmebehandlung der Proben von ca. 4 mm gewährleistet einen vergleichbares Werkstoffgefüge bei der anschließenden Eigenspannungsmessung der beiden Probenseiten. Ein Vergleich zwischen der Trockenbearbeitung und der Zerspannung mit KSS-Einsatz findet hierbei ebenfalls statt. Die variablen Einflussgrößen sind in der nachstehenden Tabelle 5.11 zusammengefasst.

Tabelle 5.11: Variable Einflussgrößen der Versuchsreihe 4

Einflussgröße	Wert	
Vorschubweg L in mm	1451,04 (Oberseite)	4353,12 (Unterseite)
Kühlung	KSS	trocken

Die zu vergleichenden Einflussgrößen ergeben einen Gesamtumfang von zwei Proben. Die in der Tabelle 5.12 dargestellten Schnittwerte werden für die gesamte Versuchsreihe konstant gehalten. Hierzu zählen ebenfalls die Werte aus der Tabelle 5.7. Um einen möglichst hohen Energieeintrag in den Werkstoff zu induzieren und diesbezüglich die Temperaturmessungen zu vereinfachen sowie um den Werkzeugverschleiß zu beschleunigen, erfolgt sowohl die Auswahl einer hohen Schnittgeschwindigkeit v_c als auch eines kleinen Vorschubs pro Zahn f_z . Die Messung der Werkzeugverschleißes schließt sich sowohl an die einmalige Fräsbearbeitung der Oberseite als auch an die dreimalige Zerspannung der Unterseite an. Aus diesen Werten ergibt sich eine Hauptnutzungszeit für die gesamte Fräsbearbeitung pro Probe von $t_h = 7,29 \text{ min}$. Die dafür erforderlichen Formeln sind in den Anlagen, Teil 3 ersichtlich. Der tabellarische Versuchsplan in Form der einzelnen Parameterkombinationen ist den Anlagen, Teil 2 zu entnehmen.

Tabelle 5.12: Konstante Schnittwerte der Versuchsreihe 4

Parameter	Wert
Schnittgeschwindigkeit v_c in m/min	275
Vorschub pro Zahn f_z in mm	0,1
Frässtrategie	Gegenlaufräsen
Einstellwinkel κ_r in $^\circ$	45

Der Aufbau der Fräsbearbeitungen der Prüfstücke ist an den Aufbau der Kurzzeituntersuchungen angelehnt. Variierend zu diesen ist jedoch die Aufspannung der Proben (1), welche aufgrund der erhöhten Probenlänge aus zwei Schraubstöcken (2) auf dem Nullpunktspannsystem (3) besteht. Des Weiteren ist die verwendete Thermografie-Kamera (4) im Vorderbereich der Werkzeugmaschine positioniert, sodass diese die Oberfläche (Kontaktzone) und die Außenkante der Probe fokussiert. Hierfür bedarf es eines geöffneten Arbeitsraums der WZM, um Verfälschungen der Temperaturen aufgrund von Sichtfenstern in den Türen der Fräsmaschine zu vermeiden. Die rechte Darstellung der Abbildung 5.4 zeigt die definierte Aufspannung der Prüfstücke in dieser Versuchsreihe am Beispiel des Ausgangszustands vor der Zerspannung mit KSS-Zufuhr (5). Hinzukommend erfolgt eine reproduzierbare Positionierung der Proben durch den Messvorgang mittels eines Messtasters vor jedem Bearbeitungsschritt. Die Lage der Thermografie-Kamera zur WZM respektive zur Probe sowie die dadurch angestrebte Fokussierung wird auf der linken Seite schematisch dargestellt.

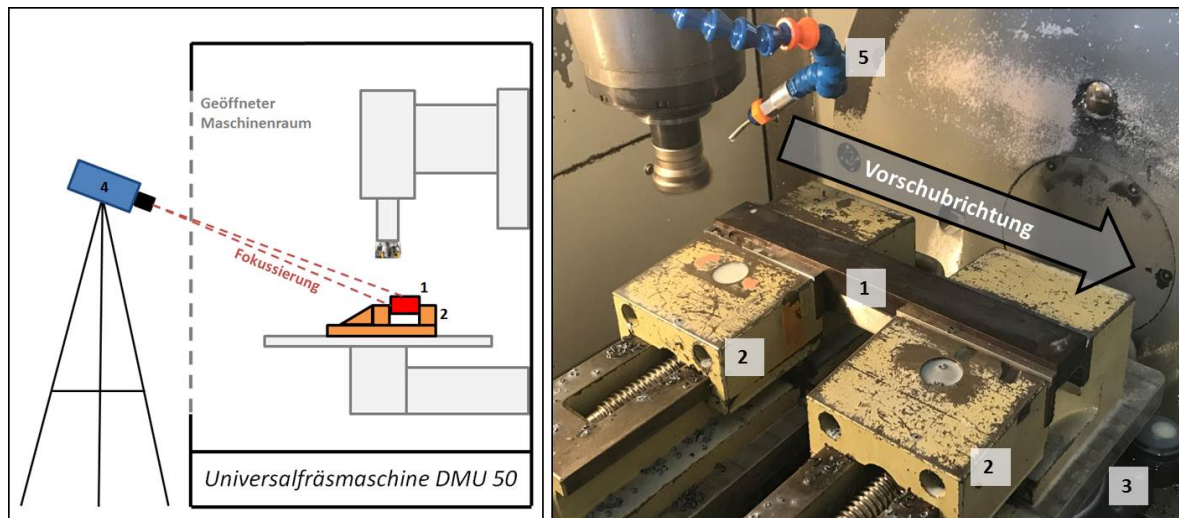


Abbildung 5.4: Versuchsaufbau der Temperaturmessungen mittels Thermografie-Kamera: schematische Darstellung (links), Aufspannung der Prüfstücke (rechts)

Verwendete Messtechnik der Thermografie-Untersuchungen

Bei der Wärmebildkamera, welche in den beschriebenen Thermografie-Untersuchungen Verwendung findet, handelt es sich um die ungekühlte Thermografie-Inspektionskamera "VarioCAM HD research 900". Diese erfasst die eintreffenden Photonen bzw. die Wärmestrahlung der zu messenden Objektoberfläche und bildet die für die anschließende Auswertung notwendigen Messdaten. Die Auswertung erfolgt mit der zugehörigen Software "IRBIS 3". Hierfür ist es erforderlich, die gewünschten Messpunkte oder Messbereiche in den aufgenommenen Thermogrammen zu definieren, um sich anschließend die Temperaturverläufe sowie die Messdaten dieser Punkte und Bereiche in der Analyse-Software ausgeben zu lassen. Durch die in der Tabelle 5.13 angegebenen technischen Daten ist die verwendete Wärmebildkamera spezifiziert.

Tabelle 5.13: Technische Spezifikation der Wärmebildkamera [18]

Parameter	Wert
Spektralbereich in μm	7,5 ... 14
Detektorformat (IR-Pixel)	1.024 x 768
Detektortyp	ungekühltes Mikrobolometer Focal Plane Array
Temperaturmessbereich ϑ in $^{\circ}\text{C}$	-40 ... 2000
Messgenauigkeit	$\pm 1^{\circ}\text{C}$ bzw. $\pm 1\%$
IR-Bildfrequenz	Vollbild: 30 Hz, Teilbildformat: 60 Hz, 120 Hz, 240 Hz
Messfunktion	bewegliche Messfelder/-punkte

5.4.2 Versuchsreihe 5: Bewertung des Werkzeugverschleißes

Zur weiteren Betrachtung des Werkzeugverschleißes und dessen Auswirkung auf den Eigenspannungszustand der Prüfstücke sowie zur Bewertung des Zusammenhangs der dabei vorherrschenden Kräfte bei der Zerspanung dient die Versuchsreihe 5. Dabei erfolgt der Vergleich zwischen dem Werkzeug im arbeitsscharfen Zustand mit dem verschlissenen Werkzeug zum Standzeitende. Die sich einstellenden Eigenspannungen bei der Fertigung der Proben sowie den dabei ermittelten Kräften werden im Anschluss in Korrelation zu diesen unterschiedlichen Werkzeugzuständen gesetzt. Den Bezug zur praktischen Anwendung gewinnt diese Versuchsreihe am Beispiel einer jeden spanenden Fertigung, welche eine große Anzahl an gleichartigen Bauteilen (beispielsweise Massenfertigung) mit identischem Zerspanungswerkzeug, vom Neuzustand bis zum Ende der Standzeit, bearbeitet. Theoretische Überlegungen lassen mit einer zunehmenden Verschleißmarkenbreite VB , aufgrund der vergrößerten wirksamen Fläche der Schneidkante, einen Anstieg der Passivkräfte F_p erwarten. Grund hierfür ist ein steigender Druck in der Kontaktzone (siehe Verformungsvorlaufzone Abbildung 2.1), welcher wiederum in einer Senkung der Eigenspannungen in den Druckbereich resultiert. Die Passivkraft F_p ist diejenige Kraft, welche in diesem Versuchsvorgehen orthogonal zur Wirkebene liegt und somit vom Werkzeug mit dessen Aufnahme und der Maschinenspindel aufgenommen werden muss. Ebenfalls bildet in dieser Versuchsreihe erneut der Einfluss der Prozesskühlung einen Teil der Bewertungsfaktoren. Aus ökonomischen Gründen erfolgt nach der Probenfertigung mit arbeitsscharfem Werkzeug die Einstellung der definierten Verschleißmarkenbreite an einem externen, jedoch, aus Sicht der technischen Eigenschaften, ähnlichen Werkstoff bezüglich des Probenwerkstoffs C45. Die benötigte Zeit bis zum Erreichen der für eine Schruppbearbeitung üblichen Verschleißmarken-

breite von $VB = 0,8 \text{ mm}$ für das Standzeitende sei zu dokumentieren [1, S.149]. Die zu bewertenden variablen Einflussfaktoren sind in der folgenden Tabelle 5.14 zusammengefasst.

Tabelle 5.14: Variable Einflussgrößen der Versuchsreihe 5

Einflussgröße	Wert	
Verschleißmarkenbreite VB in mm	0 (Neuzustand)	0,8 (Standzeitende)
Kühlung	KSS	trocken

Zur Bewertung der angegebenen Faktoren bedarf es eines Probenumfangs dieser Versuchsreihe von 4 Proben. Alle weiteren Schnittparameter werden im Rahmen dieser Untersuchungen konstant gehalten. Diese orientieren sich an den Ausgangswerten der Kurzzeituntersuchungen und sind in der Tabelle 5.15 zusammengefasst sowie der zugehörige Versuchsplan den Anlagen, Teil 2 beigefügt. Ebenfalls als konstant anzunehmen sind die Parameter aus der Tabelle 5.7 der ersten Versuchsreihe.

Tabelle 5.15: Konstante Schnittwerte der Versuchsreihe 5

Parameter	Wert
Schnittgeschwindigkeit v_c in m/min	220
Vorschub pro Zahn f_z in mm	0,5
Frässtrategie	Gleichlaufräsen
Einstellwinkel κ_r in $^\circ$	45

Der für diese Untersuchungen verwendete Versuchsaufbau ähnelt dem der Kurzzeituntersuchungen, welcher in der Abbildung 5.2 dargestellt ist. Es ist jedoch notwendig das Nullpunktspannsystem durch die verwendete Kraftmessplattform auszutauschen, um die entstehenden Passivkräfte während der Fräsbearbeitung kontinuierlich zu messen. Eine Abbildung der verwendeten Aufsammung befindet sich in den Anlagen, Teil 4.

Verwendete Messtechnik der Kraftmessungen

Die für die durchgeführten Kraftmessungen verwendete Kraftmessplattform entspricht dem 3-Komponenten-Dynamometer der Firma "Kistler". Das Funktionsprinzip dieses Kraftsensors richtet sich nach dem piezoelektrischen Messprinzip. Hierbei werden Quarzkristalle in Form von Ringen schichtartig übereinander angeordnet. Die durch eine äußere Einwirkung resultierende elastische Verformung der Kristalle im μm -Bereich

ruft eine Änderung der elektrischen Ladung zwischen diesen hervor, welche über Ladungsverstärker sowie Auswertesoftware in Korrelation zur einwirkenden Kraft gesetzt werden kann. Die elektrische Ladung verhält sich proportional zur aufgebrauchten Kraft. Alle relevanten technischen Daten der verwendeten Kraftmessplattform sind in der folgenden Tabelle 5.16 zusammengefasst. [19]

Tabelle 5.16: Technische Daten des verwendeten 3-Komponenten-Dynamometer 9255B [19]

Parameter	Wert
Messbereich in kN	$F_x, F_y: -20 \dots 20; F_z: -10 \dots 40$
Ansprechwelle in N	$< 0,01$
Abtastfrequenz f_s in s^{-1}	2000
Betriebstemperaturbereich ϑ in $^{\circ}C$	$0 \dots 70$
Empfindlichkeitsabweichung in %	± 2

5.4.3 Versuchsreihe 6: Bewertung der Eigenspannungen nach einer definierten Zeitspanne

Diese abschließende Untersuchung zielt darauf ab, die Veränderung des Eigenspannungszustands in Abhängigkeit einer definierten Zeitspanne zu bewerten. Hierbei liegt der Fokus, aufgrund des begrenzten Rahmens vorhandener Ressourcen, nicht auf einer umfassenden Versuchsreihe sondern lediglich auf einer ersten Beurteilung der Zusammenhänge dieser Faktoren. Als Grundlage dient die Versuchsreihe 1 der Kurzzeituntersuchungen. Aus den dabei festgelegten variablen Einflussgrößen (siehe Anlagen, Teil 1) erfolgt die Entnahme einer bereits gefertigten Probe bzw. einer definierten Parameterkombination, mit welcher das in dieser Versuchsreihe zu messende Prüfstück gefertigt wird. Der Versuchsaufbau sowohl bei der Fräsbearbeitung als auch der Analyse der Randzone entspricht ebenfalls den bereits genannten Kurzzeituntersuchungen. Im direkten Anschluss an die Fräsbearbeitung erfolgt die erste Eigenspannungsmessung (ggf. zwei Messungen) der bearbeiteten Probenoberfläche. Eine weitere Ermittlung des Eigenspannungstiefenverlaufs wird, nach identischem Vorgehen der ersten Messung, erst nach der definierten Zeitspanne von drei Monaten durchgeführt. Dabei wird die Probe während dieser Zeit ruhend gelagert und demzufolge keinen äußeren Belastungen ausgesetzt. Somit handelt es sich hierbei um eine idealisierte Bewertung der Veränderung des Spannungszustands eines etwaigen gefrästen Bauteils über einen längeren Zeitraum im praktischen Einsatz. Diese Versuchsreihe bildet den Abschluss der Untersuchungen zur Bewertung verschiedener Einflussfaktoren und deren Einfluss auf den Spannungszustand spanend hergestellter Proben.

6 Ergebnisanalyse und Auswertung

Die umfassende Auswertung aller durchgeführten Versuchsreihen erfolgt unter diesem Kapitel. Hierbei werden die gewonnenen Ergebnisse und Erkenntnisse den jeweiligen Untersuchungen sowie den entsprechenden zu bewertenden Einflussfaktoren zugeordnet. Die Basis dieser Bewertungen bilden die ermittelten Messwerte der Referenzprobe, welche im anschließenden Kapitel den Analysen der Versuchsreihen vorangestellt sind.

6.1 Auswertung der Referenzprobe GG

Entgegen der Prüfstücke aus den einzelnen Versuchsreihen repräsentiert die Referenzprobe GG den Ausgangszustand des Werkstoffs bzw. der Proben, da diese nach dem Wärmebehandlungsschritt des Vergütens keiner weiteren Bearbeitung unterzogen wurde. Somit liegt bei dieser Probe das unbeeinflusste Vergütungsgefüge vor. Die Auswertung bezüglich der Messung der Eigenspannungen sowie der Prüfung der Mikrohärtigkeit bildet für die sich anschließenden Bewertungen der bearbeiteten Proben die Grenzen zur Veranschaulichung von beeinflussten Werten im Vergleich zum Ausgangszustand.

Im Diagramm der nachfolgenden Abbildung 6.1 ist der ermittelte Eigenspannungstiefenverlauf der maximalen Hauptspannungen der Referenzprobe dargestellt. Dieser zeigt, wie erwartet, einen gleichmäßigen Verlauf bis zur maximalen Bohr-/ Messtiefe von $t = 0,6 \text{ mm}$. Geringe Schwankungen stellen sich lediglich bis zu einer Messtiefe von ca. $t = 0,11 \text{ mm}$ mit Spannungswerten von ca. $\sigma_{\text{Max}} = -10 \dots 80 \text{ MPa}$ ein. Nach dem Überschreiten dieses Punkts verläuft die Eigenspannungskurve nahezu spannungsfrei um den Wert $\sigma_{\text{Max}} = 0 \text{ MPa}$. Aus den geringfügigen Schwankungen im Randzonenbereich bis $t = 0,11 \text{ mm}$ sowie auf der Basis weiterer Eigenspannungsmessungen der Referenzprobe mit ähnlichen, fast identischen Spannungsverläufen, ergeben sich die festgelegten Grenzen der sich anschließenden Auswertungen mit $\sigma_{\text{Max}} = \pm 60 \text{ MPa}$, welche den Ausgangszustand repräsentieren. Des Weiteren zu beachten ist die Tatsache, dass die Probenpräparation zur Eigenspannungsmessung mittels Bohrlochverfahren mit einer geringfügigen Beeinflussung der Spannungszustände einhergeht. Aus diesem Grund entfällt bei der Auswertung der Eigenspannungstiefenverläufe der erste

Messwert bei $t = 0,007 \text{ mm}$, weshalb dieser erst ab einer Tiefe von $t = 0,03 \text{ mm}$ beginnt. Das angewendete Vorgehen zieht sich ebenfalls durch die gesamte anschließende Auswertung der durchgeführten Untersuchungen.

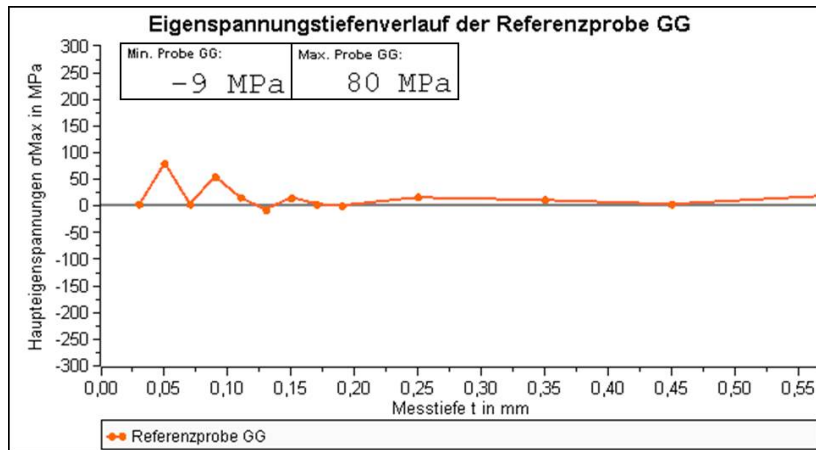


Abbildung 6.1: Eigenspannungstiefenverlauf der Referenzprobe GG

Der ermittelte Mikrohärteverlauf der Referenzprobe wird im Diagramm der Abbildung 6.2 ersichtlich. Analog der Eigenspannungsmessungen ist hierbei ebenfalls zu beachten, dass die Aufnahme des ersten Messwerts erst bei einer Messtiefe von $t = 0,02 \text{ mm}$ erfolgt. Der Grund hierfür liegt jedoch nicht in der Präparation der Prüfstücke, sondern im genormten Vorgehen der Mikrohärteprüfung (siehe Unterkapitel 5.1.2). Die zugrundeliegende Norm DIN EN ISO 6507-1 fordert das Einrücken des ersten Härteeindrucks von der Oberfläche um $t = 2,5 * d$, wobei d der Diagonale des Härteeindrucks entspricht.

Der dargestellte Verlauf der Mikrohärte ist durch einen leichten Anstieg bis zum Erreichen der maximalen Messtiefe von $t = 0,2 \text{ mm}$ gekennzeichnet. Die dabei auftretende Differenz zwischen dem ersten und dem letzten Härtewert des betrachteten Messbereichs, welche zugleich die Minimal- und Maximalwerte verkörpern, beträgt ca. $56 \text{ HV}_{0,01}$. Angesichts der nur sehr kleinen Differenz sowie der Tatsache, dass geringe Härteunterschiede zwischen oberflächennahen Bereichen und dem Inneren des Bauteils aufgrund der Wärmebehandlung des Vergütens keinen untypischen Effekt darstellt, kann die im folgenden Diagramm ersichtliche Kurve dennoch als annähernd konstant angenommen werden. Der abgebildete Härteverlauf bildet die Vergleichskurve für die im anschließenden Kapitel durchgeführte Bewertung der Mikrohärte bearbeiteter Proben.

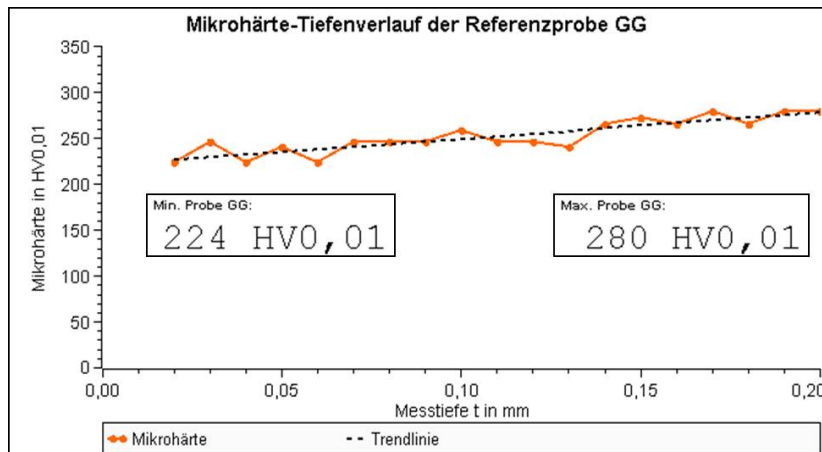


Abbildung 6.2: Mikrohärte-Tiefenverlauf der Referenzprobe GG

6.2 Auswertung der durchgeführten Kurzzeituntersuchungen

6.2.1 Analyse der Eigenspannungszustände in der Randzone in Abhängigkeit der variablen Einflussfaktoren

Die Analyse der Eigenspannungszustände im Randzonenbereich der Prüfstücke ist nachfolgend den einzelnen zu bewertenden Einflussfaktoren aller Versuchsreihen der Kurzzeituntersuchungen zugeordnet. Dabei erfolgt unter der Auswertung des jeweiligen Einflussfaktors der Vergleich von jeweils zwei Proben, welche sich lediglich in dem zu vergleichenden Faktor unterscheiden. Die zugehörigen Parameterkombinationen der verglichenen Proben bzw. Eigenspannungsverläufe sind dabei nachfolgend den Anlagen, Teil 2 zu entnehmen. Aufgrund der Vielzahl an Proben und der damit verbundenen Anzahl an Messwerten und Vergleichsdiagrammen kann in den anschließenden Unterpunkten lediglich ein ausgewählter Teil grafisch dargestellt werden. Durch das hier angewendete Vorgehen und speziell bei der Versuchsreihe 1 der Kurzzeituntersuchungen mit einem Gesamtumfang von 32 Proben ergeben sich somit 16 Vergleichsdiagramme pro Parameter. Die zugehörigen Ergebnisse und Erkenntnisse der Auswertungen sind jedoch als allgemeingültig für den jeweiligen variablen Einflussfaktor anzusehen. Hinzukommend werden die gesamten Messwerte, welche nicht dargestellt werden können, dem beiliegenden Datenträger hinzugefügt.

Von primärem Interesse ist hierbei vor allem der Verlauf der Eigenspannungen im unmittelbaren oberflächennahen Bereich von $t = 0,03 \dots 0,05 \text{ mm}$ (erster und zweiter Messwert) sowie im gesamten Bereich der inneren Grenzschicht bis zu einer Bauteiltiefe von $t = 0,1 \dots 0,13 \text{ mm}$ (fünf bis sechs Messwerte).

Grund hierfür ist die Tatsache, dass die Ausprägung der Spannungszustände in den genannten Zonen die größte Beeinflussung auf das Betriebsverhalten der Bauteile bewirken sowie die stärksten Unterschiede und Schwankungen in diesen Einflussbereiche zu erwarten sind.

Die Beurteilung etwaiger Tendenzen der Eigenspannungstiefenverläufe erfolgt über zwei unterschiedliche Herangehensweisen. Eine visuelle Betrachtung der grafisch dargestellten Spannungskurven und der simultan durchgeführte Vergleich dieser gegeneinander bilden den ersten Teil der Auswertung. Folgende Punkte stehen dabei im Fokus:

- Anzahl der annähernd gleichartig verlaufenden Eigenspannungstiefenverläufe beim Vergleich zweier unterschiedlicher Werte einer Einflussgröße,
- Anzahl der Spannungskurven mit dem ersten Wert einer Einflussgröße (z.B. hoher Wert), welche im Einflussbereich größere Werte aufweisen als die Spannungskurven mit dem zweiten Wert der selben Einflussgröße (z.B. niedriger Wert),
- Anzahl der Spannungskurven mit dem zweiten Wert einer Einflussgröße (z.B. niedriger Wert), welche im Einflussbereich größere Werte aufweisen als die Spannungskurven mit dem ersten Wert der selben Einflussgröße (z.B. hoher Wert)

Das Verhältnis aus diesen drei genannten Bewertungspunkten lässt eine erste Einschätzung möglicher Korrelationen zu.

Die zweite Herangehensweise der Auswertungen bildet die Quantifizierung etwaiger Tendenzen. Hierbei wurden für jede einzelne Probenpaarung die Abstände zwischen den Spannungswerten der jeweiligen Messtiefe des interessierenden Bereichs (oberflächennaher Bereich: $t = 0,03 \dots 0,05 \text{ mm}$; gesamte innere Grenzschicht: $t = 0,03 \dots 0,13 \text{ mm}$) bestimmt (Formel 6.1). Die Bildung des Medians in diesen Bereichen über alle Abstandswerte einer Versuchsreihe lässt anhand des Vorzeichens sowie der Höhe des berechneten Gesamtwerts etwaige Tendenzen des zu bewertenden Einflussfaktors näherungsweise quantifizieren (Formel 6.4 & 6.5). Der Grund für die Berechnung des Medians beruht auf der hohen Wahrscheinlichkeit des Auftretens von starken Schwankungen bzw. Ausreißern der Messwerte sowie um diese demzufolge zu relativieren. Es ist jedoch zu beachten, dass es sich bei diesem rechnerischen Vorgehen und den dabei ermittelten Werten lediglich um Indikatoren der Tendenzen und keine real vorherrschenden, absoluten Spannungswerte handelt. Das mathematische Vorgehen ist nachfolgend am Beispiel von zwei Proben dargestellt:

$$A_i = \sigma_i(t_i, \mathbf{Probe\ 1}) - \sigma_i(t_i, \mathbf{Probe\ 2}) \quad (6.1)$$

$$\tilde{x}_{\text{OF},1} = \tilde{x}(A_1, A_2) \quad (6.2)$$

$$\tilde{x}_{\text{iGS},1} = \tilde{x}(A_1, \dots, A_6) \quad (6.3)$$

$$I_{\text{OF}} = \tilde{x}(\tilde{x}_{\text{OF},1}, \dots, \tilde{x}_{\text{OF},16}) \quad (6.4)$$

$$I_{\text{iGS}} = \tilde{x}(\tilde{x}_{\text{iGS},1}, \dots, \tilde{x}_{\text{iGS},16}) \quad (6.5)$$

- Probe 1 ($v_c = 160$ m/min, $f = 0,3$ mm, KSS, Gleichlaufräsen, $\kappa_r = 45^\circ$)
- Probe 2 ($v_c = 220$ m/min, $f = 0,5$ mm, trocken, Gegenlaufräsen, $\kappa_r = 28^\circ$)
- A_i : Abstand zwischen den Spannungswerten der jeweiligen Messtiefe
- σ_i : Spannungswert der jeweiligen Messtiefe
- t_i : Messtiefe
- $\tilde{x}_{\text{OF},1}$: Median (Index OF: oberflächennaher Bereich, Index 1: Probenpaarung 1)
- $\tilde{x}_{\text{iGS},1}$: Median (Index iGS: gesamter Bereich der inneren Grenzschrift, Index 1: Probenpaarung 1)
- I_{OF} in MPa: Indikatorwert/ Gesamtwert im oberflächennahen Bereich
- I_{iGS} in MPa: Indikatorwert/ Gesamtwert im Bereich der gesamten inneren Grenzschrift
- i : Laufvariable (oberflächennaher Bereich: 2 Messungen, gesamter Bereich: 6 Messungen)

Ergibt sich somit aus den Berechnungen beispielsweise ein negativer Indikatorwert $I_{\text{OF}}/ I_{\text{iGS}}$, weist dies auf eine Tendenz zu höheren Eigenspannungswerten der variablen Einflussgrößen der Probe 2 hin ($v_c = 220$ m/min, $f = 0,5$ mm, trocken, Gegenlaufräsen, $\kappa_r = 28^\circ$). Dem gegenüber verkörpern positive Indikatorwerte $I_{\text{OF}}/ I_{\text{iGS}}$ den Trend höherer Eigenspannungswerte der Einflussparameter der Probe 1 ($v_c = 160$ m/min, $f = 0,3$ mm, KSS, Gleichlaufräsen, $\kappa_r = 45^\circ$).

Bewertung der Schnittgeschwindigkeit v_c

Bei der Bewertung der Eigenspannungstiefenverläufe aller Prüfstücke fällt grundsätzlich auf, dass sich im Vergleich zur bereits betrachteten Referenzprobe GG die Spannungskurven durch den angewendeten Zerspanungsprozess merklich verändern. Jedoch ist beim Vergleich bezüglich der zwei unterschiedlichen Schnittgeschwindigkeiten anhand der ersten visuellen Betrachtung kaum eine Tendenz bzw. ein kausaler Zusammenhang zu erkennen. Ebenso unterstreichen die durchgeführten Berechnungen zur Quantifizierung dieses erste Erkenntnis. Im unmittelbaren oberflächennahen Bereich bis $t = 0,05 \text{ mm}$ ergibt sich ein zu vernachlässigend geringer Gesamtwert, welcher ebenfalls auf keine eindeutige Tendenz schließen lässt. Bei der mathematischen Betrachtung über den gesamten Einflussbereich bis $t = 0,13 \text{ mm}$ steigt der berechnete Indikatorwert geringfügig bis auf $I_{\text{IGS}} = 13 \text{ MPa}$ an (siehe Formel 6.1 bis 6.5), was eine leichte Tendenz zu höheren Spannungswerten mit abnehmender Schnittgeschwindigkeit über die gesamte innere Grenzschicht impliziert. Jedoch ist der ermittelte Wert dennoch sehr gering, weshalb hierbei ebenfalls von keinem eindeutig verifizierbaren Zusammenhang ausgegangen werden kann. Zur Veranschaulichung dienen die vier Vergleichsdiagramme der Abbildung 6.3, welche exemplarisch für die Auswertung des Parameters der Schnittgeschwindigkeit stehen. Aufgrund der Tatsache, dass die Spannungszustände primär im Bereich der inneren Grenzschicht betrachtet werden, erfolgt die grafische Darstellung der Eigenspannungstiefenverläufe lediglich bis zu einer Messtiefe von $t = 0,25 \text{ mm}$. Die eingezeichneten Grenzen verkörpern den Bereich des unbearbeiteten Grundgefüges, welches anhand der Referenzprobe definiert wurde.

Die abgebildete Vergleichskurve 1 zeigt zwei nahezu identische Verläufe, bei welchen keine signifikanten Unterschiede in den Spannungswerten der Kurven unterschiedlicher Schnittgeschwindigkeit zu erkennen sind. Ähnlich verhält es sich mit der Vergleichskurve 2. Lediglich eine sehr geringe Erhöhung der Spannungswerte der Probe EE (höhere Schnittgeschwindigkeit v_c) im Vergleich zur Kurve der Probe O (niedrigere Schnittgeschwindigkeit v_c) wird hierbei ersichtlich. Die Vergleichskurven 3 und 4 verkörpern ebenfalls sich ähnelnde Verläufe. Hierbei spiegeln sich hinzukommend die quantifizierten Tendenzen wider. Es zeigen sich kaum bzw. nur sehr geringe Unterschiede der Spannungskurven bis zu einer Messtiefe von $t = 0,05 \text{ mm}$, bei welchem die Kurven der höheren Schnittgeschwindigkeit zu geringfügig höheren Spannungswerten tendieren. Nach dem Überschreiten dieser Messtiefe stellen sich allerdings höhere Spannungswerte der Kurven mit niedrigerer Schnittgeschwindigkeit ein. Allgemeingültig kann hierbei angebracht werden, dass alle Kurven in einem Messtiefenbereich von $t = 0,1 \dots 0,13 \text{ mm}$ kontinuierlich in den Grenzbereich des Ausgangsgefüges übergehen, wonach sich anschließend kaum noch nennenswerte Veränderungen einstellen.

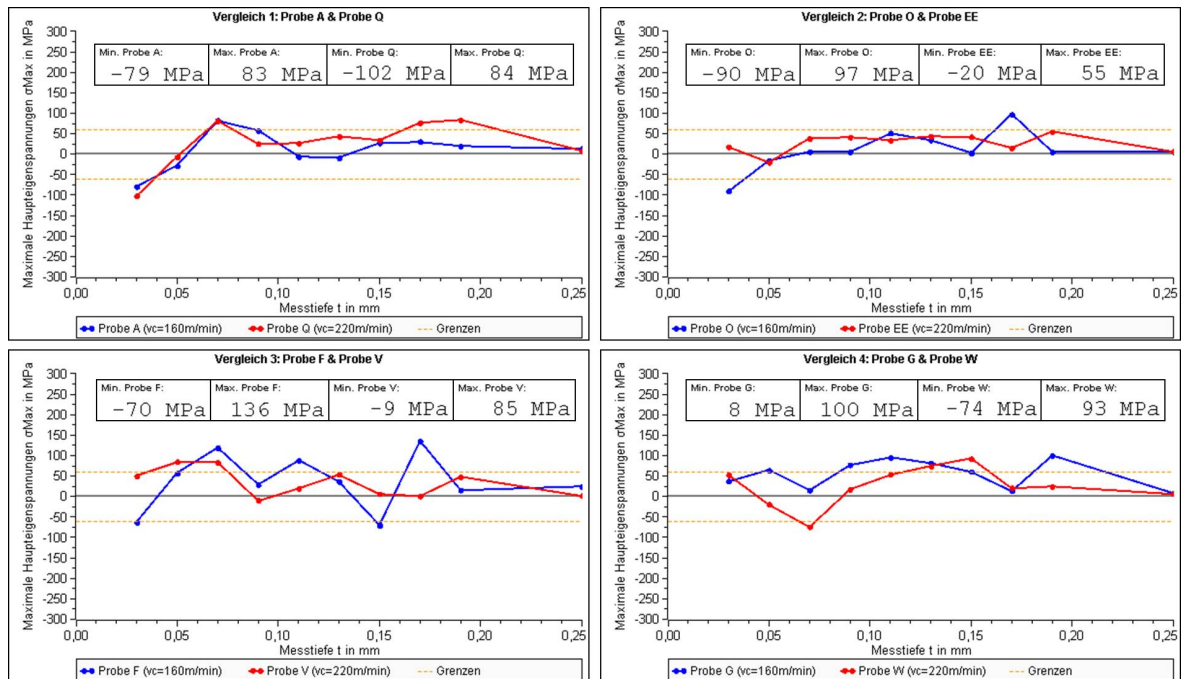


Abbildung 6.3: Grafische Darstellung der Eigenspannungstiefenverläufe in Abhängigkeit der Schnittgeschwindigkeit v_c der Versuchsreihe 1

Weiterführend spiegeln sich die genannten Erkenntnisse in dem Ergebnis der Versuchsreihe 2 der Kurzzeituntersuchungen wider. Wie im Kapitel 5.3.3 beschrieben, erfolgte dabei eine weitere Reduzierung der niedrigen Schnittgeschwindigkeit um 25 % sowie die Steigerung der hohen Schnittgeschwindigkeiten analog dazu um ebenfalls 25 %. Das folgende Diagramm der Abbildung 6.4 zeigt erneut den Vergleich der Proben A und Q (siehe Vergleich 1 Abbildung 6.3) mit veränderten Schnittgeschwindigkeiten.

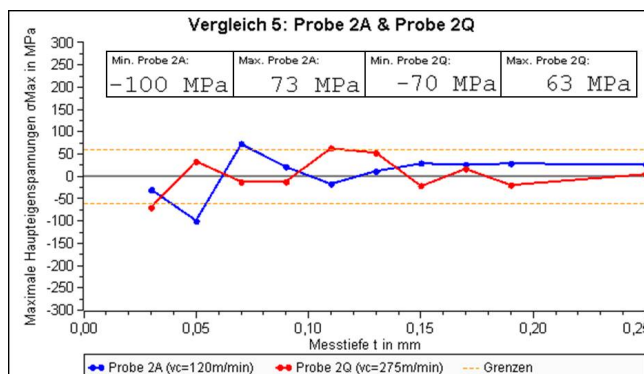


Abbildung 6.4: Grafische Darstellung der Eigenspannungstiefenverläufe in Abhängigkeit veränderter Schnittgeschwindigkeiten v_c der Versuchsreihe 2

Auch in dieser Darstellung zeigen sich zwei ähnliche Spannungsverläufe, welche keine klare Korrelation zwischen der Schnittgeschwindigkeit des Stirnfräsprozesses und den sich einstellenden Eigenspannungen erkennen lassen. Hinzukommend werden die verglichenen Eigenspannungstiefenverläufe fast vollständig vom Grenzbereich des Referenzgefüges umschlossen, was die bereits getroffenen Erkenntnisse weiter bestärkt.

Bewertung des Vorschubs pro Zahn f_z

Ein deutlicherer Zusammenhang zeigt der Vergleich der Eigenspannungstiefenverläufe von Proben, welche mit unterschiedlichen Vorschüben pro Zahn bearbeitet wurden. Insbesondere im unmittelbaren Bereich der Bauteiloberfläche bis zu einer Tiefe von $t = 0,05 \text{ mm}$ zeichnet sich ein klares Bild ab, bei welchem die Spannungskurven des höheren Vorschubs zu niedrigeren Spannungswerten respektive in den Druckeigenspannungsbereich tendieren. Der berechnete Indikatorwert (siehe Formeln 6.1 bis 6.5) von $I_{OF} = 48 \text{ MPa}$ für die betrachtete Messtiefe stärkt ebenfalls die Erkenntnis der visuellen Bewertung höherer Spannungswerte mit abnehmendem Vorschub. Mit fortlaufend steigender Messtiefe lässt sich anschließend eine Angleichung der Eigenspannungstiefenverläufe erkennen, welche in einem Bereich von $t = 0,1 \dots 0,13 \text{ mm}$ im Übergang der Spannungswerte in den Grenzbereich des Referenzgefüges münden. Diese Angleichung der verglichenen Spannungskurven spiegelt ebenfalls der berechnete Wert zur Quantifizierung der Tendenzen wider, welcher bei der Betrachtung über den gesamten Einflussbereich auf $I_{IGS} = 5 \text{ MPa}$ sinkt. Zur repräsentativen Veranschaulichung dienen die nachfolgenden Diagramme der Abbildung 6.5. Die Darstellung dieser erfolgt dabei analog der Darstellung des vorhergehenden Unterkapitels bei der Bewertung der Schnittgeschwindigkeit.

Die in den Vergleichsdiagrammen 1 und 2 ersichtlichen Spannungsverläufe der differierenden Vorschübe zeigen, dass anhand der berechneten Werte beschriebene Bild. Dabei sind in beiden Fällen im Bereich der ersten beiden Messpunkte höhere Spannungswerte der Kurven des geringeren Vorschubs im Vergleich der Kurven des höheren Vorschubs zu erkennen. Bei einer weiteren Betrachtung der Spannungen ins Innere des Bauteils gleichen sich diese Kurven kontinuierlich aneinander an. Die Darstellungen der Vergleiche 3 und 4 zeigen dem gegenüber ein noch deutlicheres Bild der vermuteten Tendenzen. Hierbei sind die Eigenspannungstiefenverläufe der Proben, welche mit dem geringeren Vorschub von $f_z = 0,3 \text{ mm}$ gefertigt wurden, im Spannungsniveau eindeutig erkennbar zu höheren Spannungswerten verschoben.

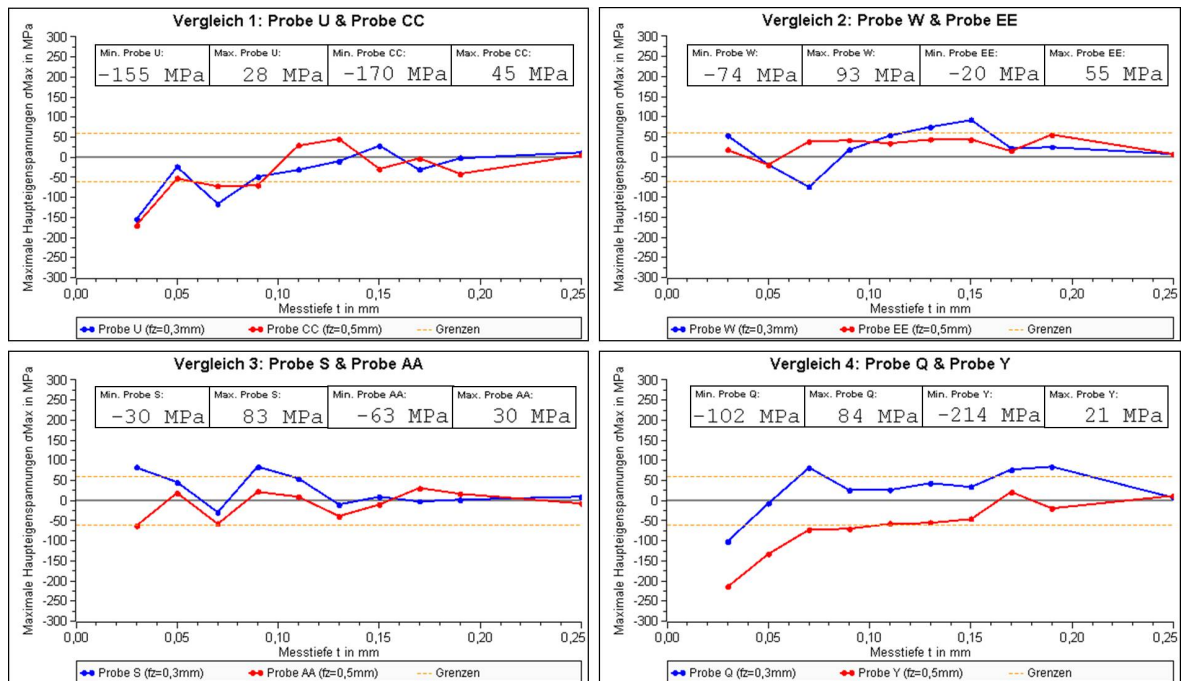


Abbildung 6.5: Grafische Darstellung der Eigenspannungstiefenverläufe in Abhängigkeit des Vorschubs pro Zahn f_z der Versuchsreihe 1

Als Grund für diese genannten Tendenzen können thermische Effekte angenommen werden. Der geringere Vorschub des Fräswerkzeugs geht mit einer erhöhten Zeit zur Temperaturentwicklung während des Zerspanungsprozesses einher. Die erhöhte Zerspannungstemperatur, welche zum Teil über das Werkstück und demzufolge den Bereich der Randzone abgeführt wird, resultiert in der Ausbildung thermisch induzierter Eigenspannungen. Diese Art der Eigenspannungen sind dem Charakter von Zugeigenspannungen zuzuordnen und tendieren aufgrund dessen zu gesteigerten Spannungswerten.

Die Auswertung der weiterführenden Versuchsreihe 2 bestätigt den genannten Zusammenhang. Durch die Veränderung des Vorschubs zeigt sich ein identisches Bild zur Auswertung der Versuchsreihe 1, welches hinzukommend mit der Abbildung 6.6 noch verstärkt wird. Diese Darstellung veranschaulicht erneut den Vergleich der Proben Q und Y. Zu beachten ist hierbei, dass der Vorschub pro Zahn von $f_z = 0,3 \text{ mm}$ um 5% auf $f_z = 0,285 \text{ mm}$ reduziert sowie der Vorschub pro Zahn von $f_z = 0,5 \text{ mm}$ um 5% auf $f_z = 0,525 \text{ mm}$ gesteigert wurde. Der Vergleich der im Diagramm angegebenen Minimal- und Maximalwerte mit dem Diagramm 4 der Abbildung 6.5 zeigt zudem eine weitere Verschiebung dieser Werte in Richtung der genannten Tendenzen. Dabei erhöht sich der Minimalwert der Probe Q ($\sigma_{\text{Min}} = -102 \text{ MPa}$) im Vergleich zur Probe 2Q ($\sigma_{\text{Min}} = -70 \text{ MPa}$) um $\Delta\sigma = +32 \text{ MPa}$. Umgekehrt dazu reduziert sich der Minimalwert der Hauptspannungen der Probe Y ($\sigma_{\text{Min}} = -214 \text{ MPa}$) im Vergleich zur Probe 2Y ($\sigma_{\text{Min}} = -253 \text{ MPa}$) mit gesteigertem Vorschub um $\Delta\sigma = -39 \text{ MPa}$.

Dies bedeutet eine Verschiebung der Spannungswerte in die Richtung von Zugeigen-
spannungen (+) mit sinkendem und in die Richtung von Druckeigen-
spannungen (−) mit steigendem Vorschub pro Zahn.

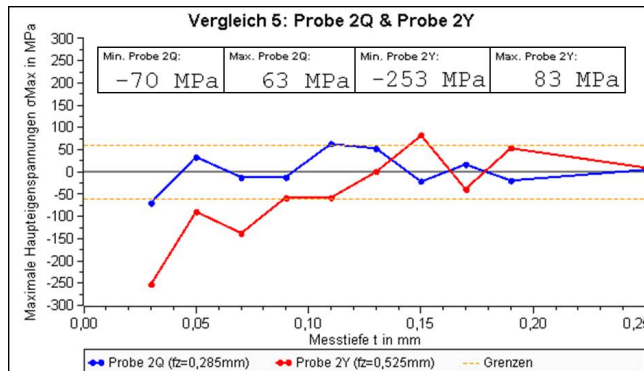


Abbildung 6.6: Grafische Darstellung der Eigenspannungstiefenverläufe in
Abhängigkeit veränderter Vorschübe f_z der Versuchsreihe 2

Bewertung der Verwendung der Prozesskühlung

Der Vergleich des Zerspanungsprozesses unter dem Einsatz von Kühlschmierstoff mit
der Trockenbearbeitung lässt lediglich einen geringen Trend im oberflächennahen Be-
reich erkennen. Bei diesem tendieren die gemessenen Spannungen der Proben, welche
unter dem Einfluss von Kühlschmierstoff gefertigt wurden, zu niedrigeren Werten bzw.
in die Richtung von Druckeigen-
spannungen gegenüber den gemessenen Spannungswerten trocken gefräster Proben. Jedoch ist diese Tendenz nur als sehr gering einzustufen,
da die Mehrheit der jeweiligen Spannungskurven der aufgestellten Vergleichsdiagramme
dieses Einflussfaktors kaum Unterschiede aufweisen. Aufgrund dieser Tatsache ergibt
sich ebenfalls nur ein niedriger Indikatorwert für den oberflächennahen Bereich von
 $I_{OF} = -18 MPa$ (siehe Formel 6.1 bis 6.5). Mit zunehmender Messtiefe strebt dieser
Wert kontinuierlich gegen null, was die Erkenntnis des geringen Trends der visuellen
Betrachtung untermauert. Die Darstellungen der Spannungskurven in der Abbildung
6.7 verdeutlichen den beschriebenen Trend repräsentativ für die gesamte Auswertung
des Einflussfaktors. Die zugehörigen Parameterkombinationen der in der nachfolgenden
Abbildung verglichenen Proben bzw. Eigenspannungsverläufe sind den Anlagen, Teil 2
zu entnehmen.

Die Veranschaulichung der Proben R und V im Vergleich 1 zeigen einen nahezu iden-
tischen Verlauf, bei dem die Kurve der Probe R (KSS) partiell geringere Spannungen
gegenüber der Kurve der Probe V(trocken) aufweist. Hierbei ist der Unterschied je-
doch kaum von Bedeutung. Ebenso verhalten sich die Spannungsgraphen der Proben
AA (KSS) und EE (trocken) im direkten Vergleich 2. Trotz überwiegend kleinerer
Spannungswerte der Probe AA verglichen zur Probe EE sind die Unterschiede dabei

so gering, dass ein annähernd gleichwertiger Eigenspannungstiefenverlauf beider Proben angenommen werden kann. Genau wie im Vergleichsdiagramm 1 werden auch in dieser Darstellung die Spannungskurven fast ausschließlich vom Grenzbereich der Referenzprobe umschlossen. Dem gegenüber kann anhand der Diagramme 3 und 4 der eingangs erwähnte Trend erkannt werden. In beiden Fällen zeigt sich eine anfängliche Verschiebung der Spannungskurven mittels KSS-Einsatz in den Bereich der Druckeigenspannungen, welche sich anschließend jedoch kontinuierlich an die Spannungskurve der Trockenbearbeitung annähert und ab einer Tiefe von $t = 0,1 \dots 0,13 \text{ mm}$ in den Grenzbereich der Referenzprobe übergeht.

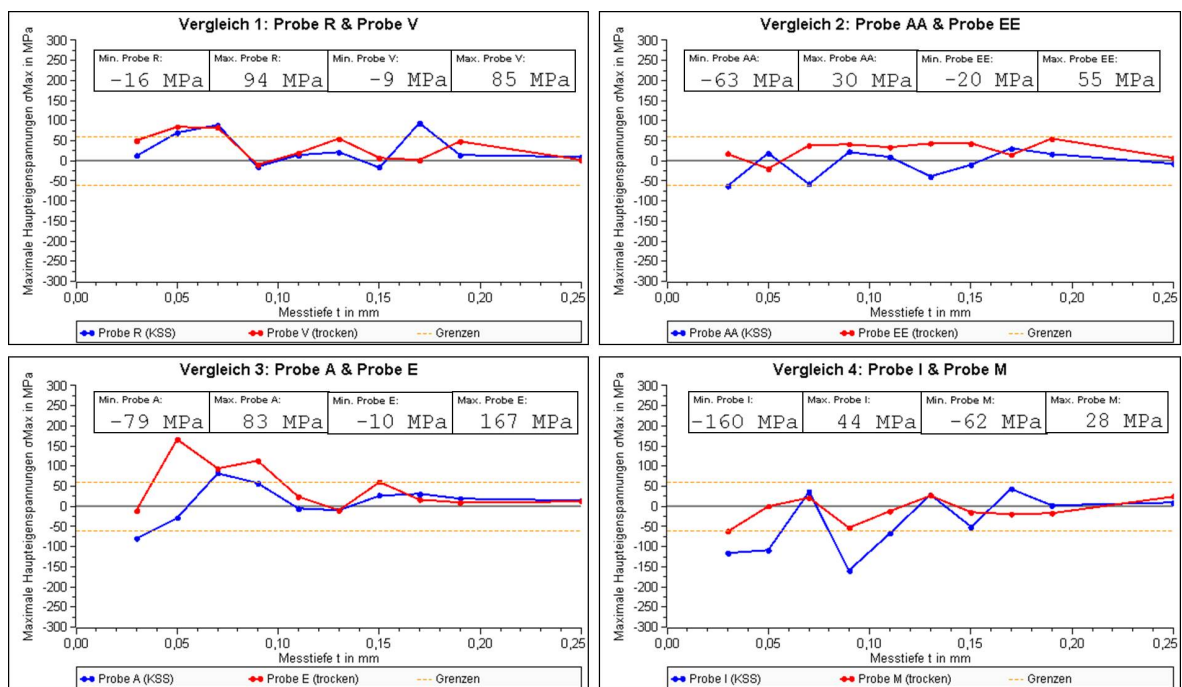


Abbildung 6.7: Grafische Darstellung der Eigenspannungstiefenverläufe in Abhängigkeit der Verwendung von KSS der Versuchsreihe 1

Die vermutete geringfügige Verschiebung der Spannungswerte in die Richtung des Druckbereiches beim Einsatz von Kühlschmierstoff kann mit dem identischen thermischen Effekt aus dem Unterkapitel der Bewertung des Vorschubs pro Zahn f_z erklärt werden. Der Kühlmiteleinsatz bei der spanenden Bearbeitung bewirkt eine Senkung der Zerspannungstemperatur, infolge einer verringerten Reibung in der Kontaktzone sowie eines Übergangs der Wärme in den Kühlschmierstoff. Hierdurch sinkt die Auftretenswahrscheinlichkeit von thermisch induzierten Zugeigenspannungen.

Bewertung des Gleich- und GegenlauffräSENS

Ein weiterer Zusammenhang lässt sich zwischen dem Prozess des GegenlauffräSENS und den sich einstellenden Eigenspannungen erkennen. Diese verschieben sich im Ver-

gleich zum Fräsen mittels Gleichlauf zu höheren Spannungswerten, d.h. in die Richtung von Zugeigenspannungen. Erneut ist dies insbesondere im unmittelbaren Bereich der Oberfläche zu erkennen. Jedoch wird diese Tendenz ebenfalls über den gesamten Einflussbereich sichtbar. Auch die berechneten Indikatoren bestätigen diese Erkenntnisse aus der visuellen Betrachtung. Hierbei stellt sich ein Wert von $I_{OF} = -56 \text{ MPa}$ bis $t = 0,05 \text{ mm}$ sowie ein Wert von $I_{IGS} = -26 \text{ MPa}$ bis $t = 0,13 \text{ mm}$ ein (siehe Formeln 6.1 bis 6.5). Vor allem der Indikatorwert von $I_{OF} = -56 \text{ MPa}$ macht dabei den genannten eindeutigen Trend von höheren Spannungswerten beim Gegenlauffräsen sichtbar. Die folgenden Vergleichsdiagramme der Abbildung 6.8 veranschaulichen repräsentativ für die gesamte Auswertung dieses Einflussfaktors die genannten Erkenntnisse.

Insbesondere die Diagramme 1,3 und 4 stellen im Vergleich eine deutliche Niveaushiftung der Eigenspannungsverläufe von Proben, welche der Fräsbearbeitung im Gegenlauf unterzogen wurden, zu höheren Spannungswerten dar. Im Diagramm 2 zeigt sich diese Verschiebung verstärkend dazu in ausgeprägten Zugspannungen im Messtiefenbereich von $t = 0,05 \dots 0,07 \text{ mm}$, welche anschließend jedoch kontinuierlich die Spannungswerte der Vergleichskurve annimmt. Die kontinuierliche Anpassung der jeweils verglichenen Spannungskurven sowohl aneinander als auch an den Grenzbereich des Grundgefüges zeigt sich allgemeingültig für alle Diagramme erneut in einem Tiefenbereich von $t = 0,1 \dots 0,13 \text{ mm}$.

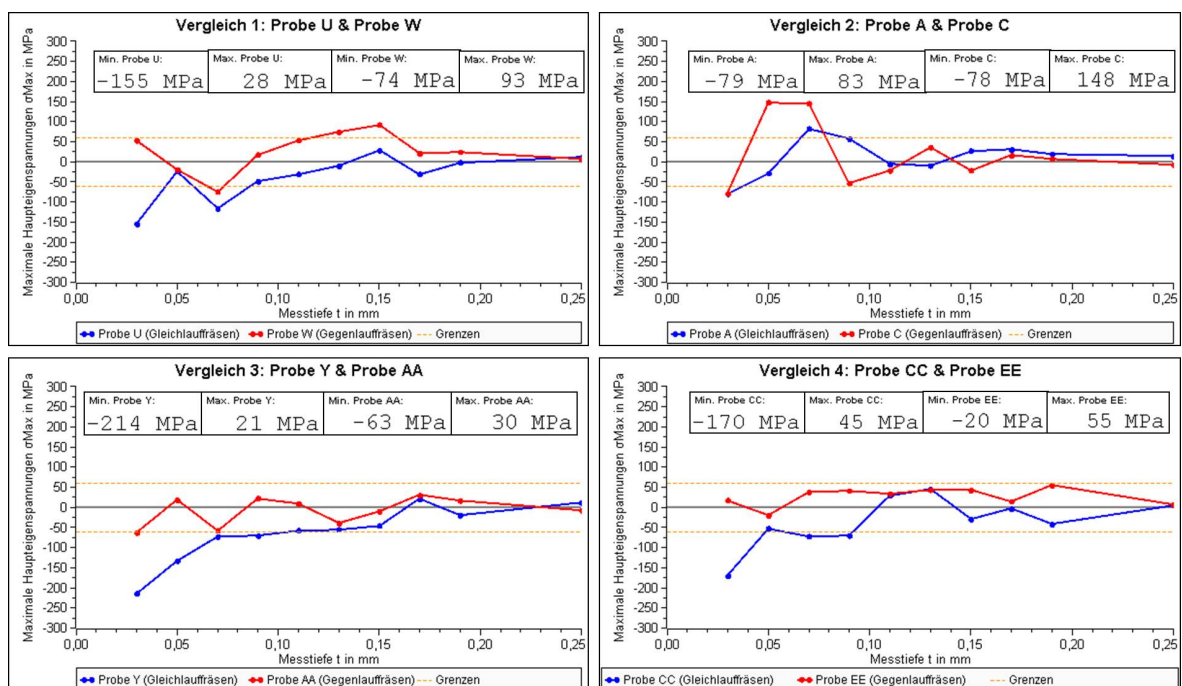


Abbildung 6.8: Grafische Darstellung der Eigenspannungstiefenverläufe in Abhängigkeit des Gleich- und Gegenlauffräsen der Versuchsreihe 1

Eine genaue Begründung dieser hierbei eindeutig auftretenden Korrelation zwischen dem Gleich- bzw. Gegenlaufräsen und den sich einstellenden Eigenspannungstiefenverläufen kann nachfolgend nicht getroffen werden, da einschlägige Literaturstellen diesen Einflussfaktor differierend zu den getroffenen Erkenntnissen bewerten. Dabei zeigten sich in bereits durchgeführten Forschungsarbeiten exakt konträr verlaufende Ergebnisse, was demzufolge der Ausprägung von Zugeigenspannungen beim Gleichlaufräsen entspricht [20][49].

Bewertung des Einstellwinkels κ_r

Beim Vergleich der Spannungszustände der Proben, welche mit unterschiedlichen Einstellwinkeln gefertigt wurden, zeigen sich, insbesondere im unmittelbaren Bereich der Oberfläche, die eindeutigsten Unterschiede aller untersuchter Einflussfaktoren. Hierbei stellen sich deutlich höhere Eigenspannungswerte in die Richtung von Zugeigenspannungen bei der Verwendung des geringeren Einstellwinkels von $\kappa_r = 28^\circ$ ein. Weniger eindeutig, jedoch weiterhin mit der gleicher Tendenz verlaufen die Spannungswerte bis zum Ende der untersuchten Einflusszone. Auch dabei ist erneut die kontinuierliche Annäherung der verglichenen Eigenspannungstiefenverläufe aneinander sowie den Grenzbereich in einer Bauteiltiefe von $t = 0,1 \dots 0,13 \text{ mm}$ zu erkennen. Die visuellen Betrachtungen können ebenso durch die berechneten Indikatorwerte bestätigt werden. Im oberflächennahen Bereich stellt sich der eindeutigste Wert aller Einflussgrößen mit $I_{OF} = -89 \text{ MPa}$ ein. Trotz eines Anstiegs über den gesamten Einflussbereich auf $I_{IGS} = -22 \text{ MPa}$ bleibt hierbei die Tendenz weiterhin erhalten. In den repräsentativ dargestellten Diagrammen der Abbildung 6.9 wird der genannte eindeutige Trend beim Vergleich der Einstellwinkel verdeutlicht.

Im Vergleichsdiagramm 1 zeigt sich die anfänglich große Differenz im Bereich der unmittelbaren Oberfläche, welche im Fall des rot dargestellten Graphen ($\kappa_r = 28^\circ$) in eindeutigen Zugspannungen zu erkennen ist. Mit fortlaufender Bauteiltiefe verringert sich diese Differenz merklich und gleicht sich abschließend an den Spannungsverlauf des Einstellwinkels $\kappa_r = 45^\circ$ sowie dem Grenzbereich des Referenzgefüges an. Die Vergleichsdarstellungen 2 und 3 zeigen dem gegenüber deutliche Niveauunterschiede über den Bereich der gesamten inneren Grenzschicht bis zum genannten Tiefenbereich von $t = 0,1 \dots 0,13 \text{ mm}$. Eine weitere Verstärkung der Niveauunterschiede zwischen Spannungskurven verschiedener Einstellwinkel wird im Diagramm 4 sichtbar. Dieses lässt neben ausgeprägten Zugeigenspannungen der Spannungen des geringeren Einstellwinkels $\kappa_r = 28^\circ$ hinzukommend signifikante Druckspannungen der Eigenspannungswerte des Einstellwinkels $\kappa_r = 45^\circ$ erkennen. Eine sukzessive Angleichung der Spannungsverläufe aneinander sowie an das Grundgefüge der Referenzprobe erfolgt hier ebenfalls mit zunehmender Bauteiltiefe.



Abbildung 6.9: Grafische Darstellung der Eigenspannungstiefenverläufe in Abhängigkeit des Einstellwinkels κ_r der Versuchsreihe 1

Aus grundlegenden Beziehungen einschlägiger Literaturstellen geht hervor, dass mit einem ansteigenden Einstellwinkel κ_r die Zerspankraftkomponente der Passivkraft F_p abnimmt. Da der Passivkraft ebenfalls ein indirekt proportionaler Zusammenhang zu den sich einstellenden Spannungswerten in der Randzone eines Bauteils zugesprochen wird, verhalten sich auch die hier gewonnenen Ergebnisse konträr zum grundlegenden Kenntnisstand. Aus diesem Grund kann eine genaue Erklärung der eindeutig erkennbaren Tendenzen nachfolgend nicht getroffen werden. [49][76]

Bewertung der Bauteilhöhe h

Die Auswertung der Versuchsreihe 3 (siehe 5.3.4) zur Bewertung der Probenhöhe brachte keine eindeutig nennbaren Zusammenhänge hervor. Wie aus den Diagrammen der Abbildung 6.10 ersichtlich wird, stellen sich sowohl bei der Zerspannung mit KSS als auch der Trockenbearbeitung beim Vergleich der Ausgangsdimensionierung der Prüfstücke mit den reduzierten Abmessungen gleichartige Spannungsverläufe ein. Dabei verkörpern die blauen Graphen die untersuchten Prüfstücke mit der reduzierten Probenhöhe bzw. die roten Graphen die Proben mit der Ausgangsdimensionierung. Im Fall der Zerspannung unter der Einwirkung von Kühlschmierstoff (Vergleichsdiagramm 1) zeigt sich eine allgemeingültige Tendenz beider Spannungskurven in die Richtung von Druckeigenspannungen. Dies spiegelt den angenommenen Trend aus der Bewertung des Einflusses von Kühlschmierstoff wider. Jedoch werden hierbei keinerlei

nennenswerte Unterschiede der Spannungswerte sowie Extremwerte ersichtlich. Sowohl der Spannungsverlauf der Ausgangsdimensionierung als auch der reduzierten Probenhöhe sind nahezu vollständig vom Grenzbereich der Referenzprobe umschlossen. Auffällig bei der Darstellung der Trockenbearbeitung (Vergleichsdiagramm 2) ist der Spannungsunterschied von $\Delta\sigma = 170 \text{ MPa}$ im Bereich um $t = 0,05 \text{ mm}$. In diesem Tiefenbereich tendieren die Eigenspannungen der Probe mit der Ausgangsdimensionierung zu höheren Werten in die Richtung von Zugeigenspannungen. Ausgenommen dieser einzelnen Spannungsdifferenz verlaufen die Spannungsgraphen jedoch übereinstimmend und befinden sich analog der Spannungscurven des Vergleichsdiagramm 1 fast ausschließlich innerhalb des Grenzbereichs. Bei der Gegenüberstellung beider Graphen der Basisgeometrie (Vergleichsdiagramm 3) zeigt sich erneut der vermutete Trend bei der Zer-spannung mittels Kühlschmierstoff. Hierbei stellen sich bei der Trockenbearbeitung im Bereich der unmittelbaren Oberfläche höhere Spannungswerte ein, welche sich mit der Überschreitung dieses Bereichs jedoch schnell an den Verlauf der Spannungskurve mit KSS anpasst. Dem gegenüber werden im Diagramm 4 nahezu identische Verläufe der Spannungswerte der reduzierten Probendimensionierung (KSS und trocken) ersichtlich, was vermuten lässt, dass die reduzierte Probengeometrie im Vergleich zur Ausgangsdimensionierung in dieser Untersuchung weniger stark auf Temperaturschwankungen während der spanenden Bearbeitung reagiert.

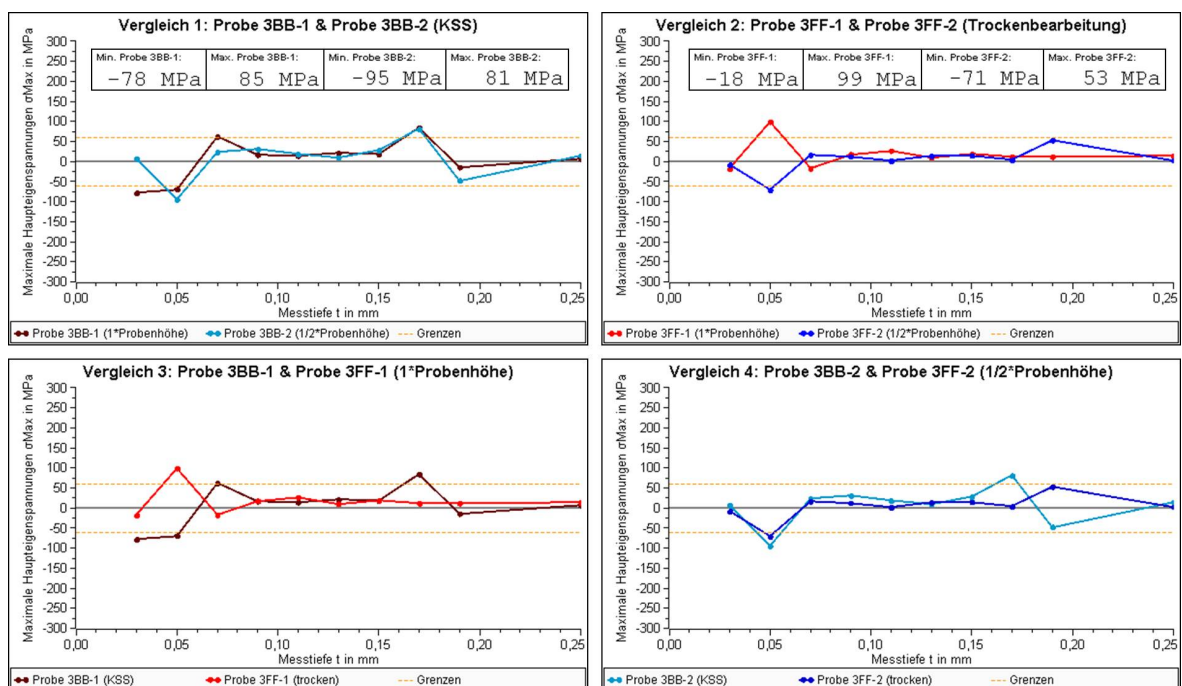


Abbildung 6.10: Grafische Darstellung der Eigenspannungstiefenverläufe in Abhängigkeit der Bauteilhöhe h der Versuchsreihe 3

Schlussfolgerung

Die gewonnenen Erkenntnisse der Kurzzeituntersuchungen lassen in diesem Unterkapitel Schlussfolgerungen über Parameterkombinationen zu, welche sowohl zu einer Ausbildung von Druck- als auch Zugeigenspannungen führen. Zu beachten ist hierbei, dass die Gültigkeit dieser Kombinationen lediglich auf den experimentellen Fräsuntersuchungen innerhalb der definierten Grenzen beruhen. Es ergeben sich folgende Parameterkombinationen:

- Ausbildung von Druckeigenspannungen: $v_c = 220 \text{ m/min}$, $f_z = 0,5 \text{ mm}$, KSS, Gleichlaufräsen, $\kappa_r = 45^\circ$
- Ausbildung von Zugeigenspannungen: $v_c = 160 \text{ m/min}$, $f_z = 0,3 \text{ mm}$, trocken, Gegenlaufräsen, $\kappa_r = 28^\circ$

Beim Abgleich dieser Zusammensetzungen mit den ermittelten Spannungsverläufen der Versuchsreihe 1 ergibt sich eine klare Übereinstimmung bei der Parameterkombination zur Ausbildung von Druckeigenspannungen. Die zu diesen Parametern zugehörige Probe Y zeigt unter allen Proben die geringsten Spannungswerte. Demzufolge lassen sich hierbei signifikante Druckeigenspannungen erkennen, welche ab einer Tiefe von $t = 0,09 \dots 0,1 \text{ mm}$ kontinuierliche in den Spannungsbereich des Grundgefüges übergehen.

Die Probe, welche der ermittelten Parameterkombination zur Ausbildung von Zugeigenspannungen zugehörig ist, wird durch die Probe H verkörpert. Bei dem entsprechenden Spannungsverlauf stellen sich nach anfänglich geringen Werten im Zugbereich signifikante Zugspannungen in einer Messtiefe von $t = 0,07 \text{ mm}$ ein, nachdem diese rasch in den Grenzbereich des Referenzgefüges übergehen. Somit kann auch bei dieser Parameterkombination sowie den zugehörigen Eigenspannungswerten die Ausbildung von Zugspannungen bestätigt werden. Die Darstellung der beschriebenen Diagramme erfolgt in der Abbildung 6.11.

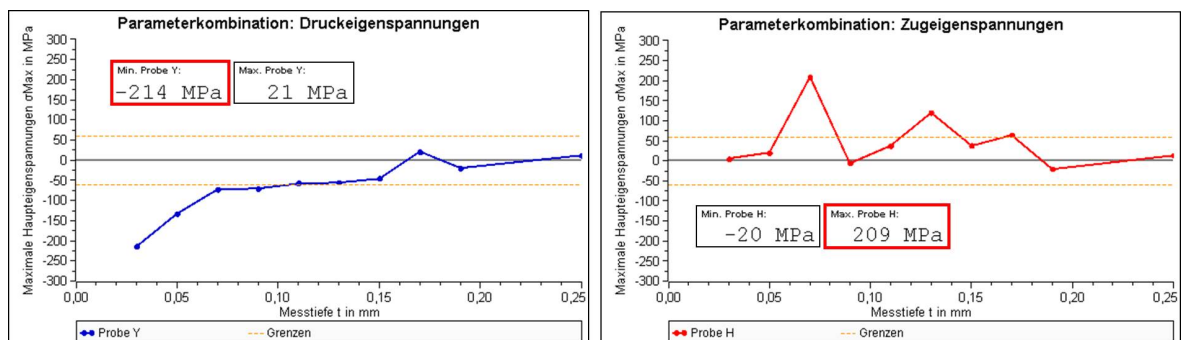


Abbildung 6.11: Spannungsverlauf der Parameterkombination zur Ausbildung von Druckeigenspannungen (links), von Zugeigenspannungen (rechts)

6.2.2 Analyse der Mikrohärtigkeit in Korrelation zu den Eigenspannungen im Randzonenbereich

Die Bewertung der Mikrohärtigkeit in der Randzone der bearbeiteten Proben wurde auf der Basis der zuvor ermittelten Eigenspannungswerte durchgeführt. Dabei erfolgte die Härteprüfung an ausgewählten Prüfstücken, welche in ihren Spannungsverläufen signifikante Eigenspannungen aufweisen. Da es sich hierbei ausschließlich um die Analyse einer Korrelation zwischen den vorherrschenden Eigenspannungen und der sich einstellenden Mikrohärtigkeit handelt, bleiben die definierten Schnittparameter zur Fertigung der jeweiligen Probe unbeachtet. Die Auswahl der Prüfstücke erfolgte aus den Versuchsreihen 1 und 2. Auch unter diesem Kapitel kann zur Auswertung nur ein begrenzter Teil der erzielten Ergebnisse grafisch dargestellt werden, welcher jedoch repräsentativ für die gesamten Untersuchungen anzusehen ist. Die durchgeführten Mikrohärtigkeitprüfungen erfolgten neben der Referenzprobe an acht weiteren Prüfstücken, wobei diese nachfolgend den entsprechenden Auswahlkriterien zugeordnet sind:

- signifikante Druckeigenspannungen: Probe Y, Probe CC, Probe 2Y, Probe I
- signifikante Zugeigenspannungen: Probe N, Probe FF
- Eigenspannungen vollständig innerhalb des Grenzbereichs: Probe AA, Probe DD

Es zeigt sich bei der Auswertung der Härte aller Proben ein sehr gleichmäßiger Tiefenverlauf der Mikrohärtigkeit über den gesamten Messbereich bis $t = 0,2 \text{ mm}$. Auffallend ist hierbei, dass die Mikrohärtigkeitverläufe der bearbeiteten Proben einen gleichmäßigeren Charakter aufweisen als der Mikrohärtigkeitverlauf der Referenzprobe. Des Weiteren sind zwischen den Härtewerten sowie den dargestellten Härteverläufen der bearbeiteten Prüfstücke, selbst bei stark ambivalenten Eigenspannungszuständen, kaum Unterschiede zu erkennen. Allgemeingültig für alle Mikrohärtigkeitverläufe zeigt sich jedoch eine Erhöhung der Mikrohärtigkeit im Vergleich zur Mikrohärtigkeit der Referenzprobe. Diese Erhöhung der Härtewerte ist bis zu einer Messtiefe von $t = 0,12 \dots 0,15 \text{ mm}$ vorherrschend und beträgt durchschnittlich ca. 14%, ausgehend von der Mikrohärtigkeit der Referenzprobe. Nach dem Überschreiten des angegebenen Bereichs gleichen sich die Härteniveaus der Referenzprobe sowie der bearbeiteten Prüfstücke an und verlaufen nahezu identisch bis zum Erreichen der maximalen Messtiefe von $t = 0,2 \text{ mm}$. Die nachfolgende Abbildung 6.12 stellt die Mikrohärtigkeitverläufe der Proben N, Y, AA und CC repräsentativ für die gesamte Auswertung grafisch dar. Der Mikrohärtigkeitverlauf der Referenzprobe wird durch den angegebenen Graphen der "Grenze" verkörpert. Ebenfalls in den Diagrammen enthalten, ist die Angabe des Eigenspannungszustands der jeweiligen Probe. Die zugehörigen Spannungsverläufe sind den Abbildungen 6.3 bis 6.9 zu entnehmen.

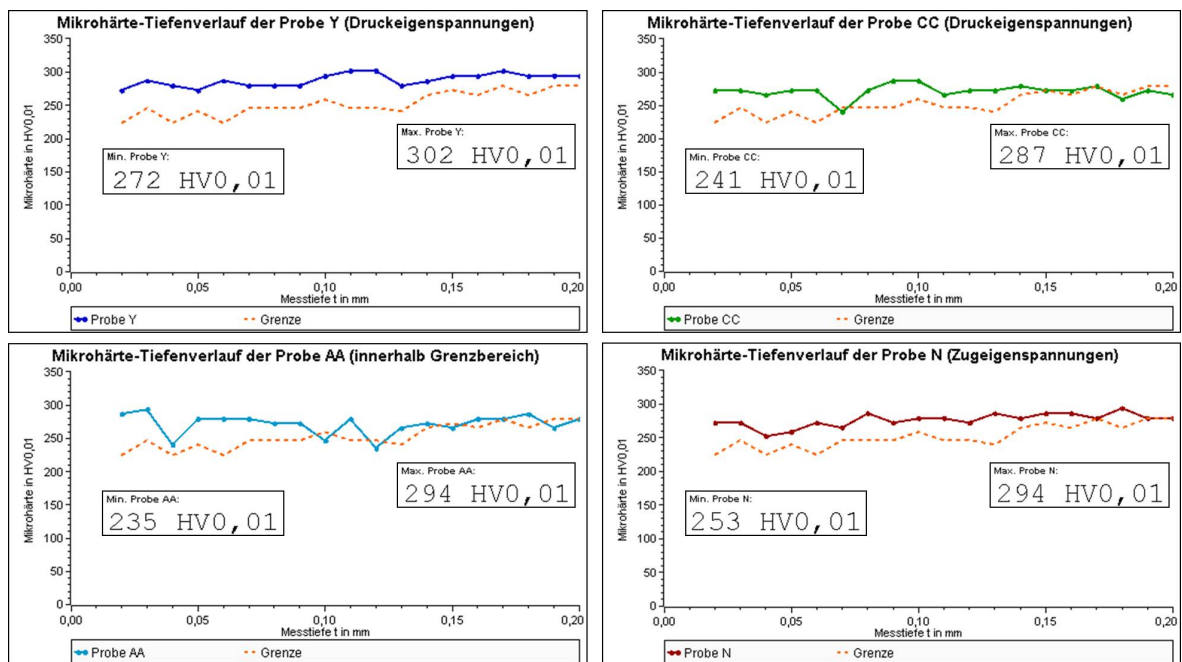


Abbildung 6.12: Grafische Darstellung der ermittelten Mikrohärte-Tiefenverläufe

Wie den Darstellungen der Mikrohärte zu entnehmen ist, sind zwischen den Tiefenverläufen der bearbeiteten Proben mit unterschiedlichen Eigenstresszuständen keine signifikanten Unterschiede der Mikrohärte zu erkennen. Aus diesem Grund kann abschließend allgemeingültig die Schlussfolgerung gezogen werden, dass der Stirnfräsprozess die Mikrohärte im Randbereich geringfügig erhöht hat. Ein Zusammenhang zwischen den vorherrschenden Eigenstressungen und der sich einstellenden Mikrohärte kann jedoch nicht bestätigt werden.

6.2.3 Bewertung der Energieeffizienz der durchgeführten Stirnfräsprozesse

Die kontinuierlichen Messung der Wirkleistung P der Werkzeugmaschine während der Zerspanungsprozesse zielen darauf ab, diese einer wirtschaftlichen Einschätzung zu unterziehen. Die Bewertung erfolgt analog zu den Eigenstressmessungen der Versuchsreihe 1, geordnet nach den definierten variablen Einflussfaktoren. Hierdurch besteht die Möglichkeit die dabei gewonnen Erkenntnisse in den Zusammenhang der bereits erzielten Ergebnisse der Randzonen-Charakterisierung zu setzen.

Die durch dieses Vorgehen entstehende Leistungskurve des Stirnfräsprozesses einer Probe ist exemplarisch in der Abbildung 6.13 dargestellt und kann in fünf Bereiche eingeteilt werden. Hierbei kennzeichnen die konstanten Verläufe (1) den Bedarf Grundleistung der eingeschalteten (stillstehenden) Werkzeugmaschine von ca. $P = 110\text{ W}$. Die folgenden Bereiche verkörpern sowohl den Vorgang des Antastens der Proben mit-

tels Messtaster (2) als auch den Werkzeugwechsel zum Einwechseln des Fräswerkzeugs sowie das Verfahren des Werkzeugs im Eilgang zum Prüfstück (3). Das Zurückziehen des Werkzeugs von der Probe, nach der Beendigung des Fräsprozesses, zeigt der Leistungsverlauf (5). Wie anhand des Stirnfräsprozesses (4) zu erkennen ist, unterteilt sich dieser in zwei gleichartige Leistungsverläufe (4.1) und (4.2). Diese plateauartigen Bereiche kennzeichnen die zwei Fräsbahnen, welche zur Bearbeitung der Probe notwendig sind. Für die nachfolgenden Berechnungen sowie energetischen Bewertung stehen die beiden Leistungsausschläge (4.1) und (4.2) im Fokus der Betrachtungen. Aufgrund der Tatsache, dass sich die Leistungswerte der Grundleistung, des Antastens, des Werkzeugwechsels sowie des Positionierens unabhängig der Schnittparameter konstant verhalten, bleiben diese im weiteren Vorgehen unbeachtet.

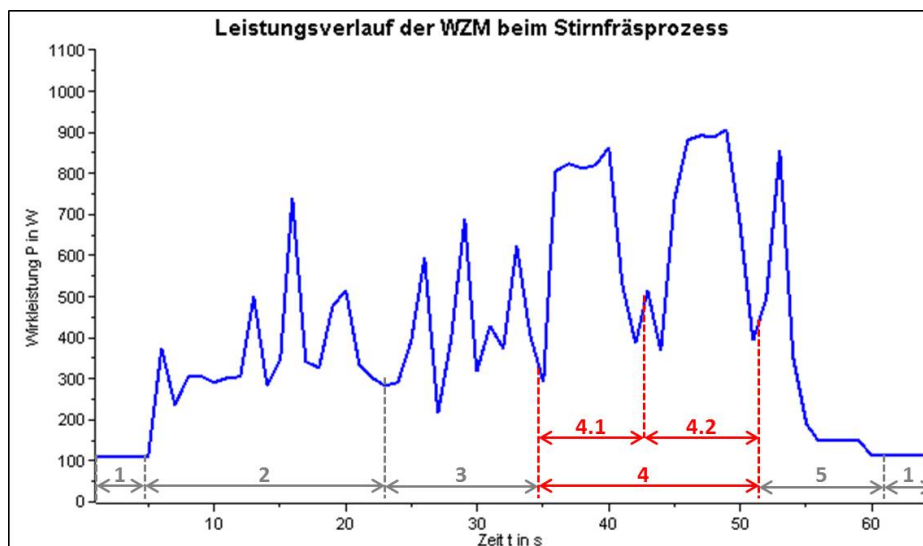


Abbildung 6.13: Grafische Darstellung der Wirkleistung P beim Stirnfräsprozess einer Probe

Die Basis der durchgeführten Berechnungen zur Ermittlung der Energiewerte bildet die grundlegende Formel $E = P * t_c$. Hierfür wurden für jeden Einzelprozess des Stirnfräsens, in Abhängigkeit der Höhe des Vorschubs, die 2 ... 4 Maximalwerte pro Fräsbahn bzw. pro plateauartigem Leistungsverlauf (4.1) und (4.2) ermittelt. Aus diesen Maximalwerten erfolgte im Anschluss die Bildung eines durchschnittlichen Leistungswerts P . In Verbindung mit der Schnittzeit t_c , berechnet aus der entsprechenden Vorschubgeschwindigkeit V_f und der Länge der Probe l , ergibt sich der Zusammenhang zur verbrauchten Energie E des jeweiligen Stirnfräsprozesses. Die Berechnung eines Gesamtdurchschnitts sowohl der Leistungs- als auch der Energiewerte über alle miteinander verglichenen Proben geordnet nach den variablen Einflussfaktoren ermöglicht die wirtschaftliche Bewertung. Die nachstehende Tabelle 6.1 fasst die errechneten Werte zusammen und stellt zudem den jeweiligen Mehrverbrauch prozentual dar.

Tabelle 6.1: Zusammenfassung der durchschnittlichen Leistungs- und Energiewerte der Versuchsreihe 1 geordnet nach den variablen Einflussgrößen

Leistung				
Einflussgröße		Durchschnittliche Leistung P in W	Änderung der Leistung ΔP in W	Mehrverbrauch der Leistung ΔP in %
Schnittgeschwindigkeit v_c	160 m/min	966,60	169,3	17,5
	220 m/min	1135,93		
Vorschub pro Zahn f_z	0,3 mm	967,29	159,1	16,4
	0,5 mm	1126,39		
Prozesskühlung	KSS	1091,07	82,1	8,1
	trocken	1011,46		
Bearbeitungsstrategie	Gleichlaufräsen	1030,49	41,5	4
	Gegenlaufräsen	1072,03		
Einstellwinkel κ_T	45 °	1042,21	18,1	1,7
	28 °	1060,32		
Energie				
Einflussgröße		Durchschnittliche Energie E in kJ	Änderung der Energie ΔE in kJ	Mehrverbrauch der Energie ΔE in %
Schnittgeschwindigkeit v_c	160 m/min	7,81	1,14	17
	220 m/min	6,68		
Vorschub pro Zahn f_z	0,3 mm	8,50	2,52	42,1
	0,5 mm	5,99		
Prozesskühlung	KSS	7,57	0,66	9,6
	trocken	6,92		
Bearbeitungsstrategie	Gleichlaufräsen	7,11	0,28	3,9
	Gegenlaufräsen	7,38		
Einstellwinkel κ_T	45 °	7,24	0,01	0,1
	28 °	7,25		

Wie aus der Tabelle 6.1 ersichtlich wird, steigt der Wert der durchschnittlichen Leistung sowohl mit der erhöhten Schnittgeschwindigkeit als auch des größeren Vorschubs pro Zahn an. Dieser Zusammenhang verhält sich konform zur vorherigen Annahme, da mit steigenden Schnittwerten ebenfalls der Bedarf der Wirkleistung der Werkzeugmaschine

ansteigen muss. Dem gegenüber stellt sich ein gegensätzlicher Verlauf der berechneten Energiewerte ein. Hierbei zeigt sich mit steigenden Schnittwerten ein sinkender Energiebedarf. Grund hierfür ist die Tatsache, dass mit ansteigenden Zerspanungsparametern ebenfalls der Parameter der Vorschubgeschwindigkeit v_f ansteigt. Diese gesteigerte Vorschubgeschwindigkeit geht mit einer sinkenden Schnittzeit t_c einher, in welcher der Fräser beim Stirnfräsprozess im direkten Eingriff steht. Somit bedarf es der Bereitstellung der erhöhten Wirkleistung bei gesteigerten Schnittwerten für eine vergleichsweise geringe Zeitspanne, was den Energiebedarf der WZM senkt.

Ebenfalls lässt sich aus den angegebenen Werten der Tabelle 6.1 entnehmen, dass lediglich die Einflussgrößen der Schnittgeschwindigkeit, des Vorschubs pro Zahn sowie der Prozesskühlung einen nennenswerten Einfluss auf den Energiebedarf haben. Hierbei zeigt der Vorschub pro Zahn mit einem Mehrverbrauch von ca. 42% bei der Reduzierung von $f_z = 0,5 \text{ mm}$ auf $f_z = 0,3 \text{ mm}$ die eindeutigste Signifikanz bei der ökonomischen Betrachtung. Die Einflussgrößen des Gleich- und Gegenlaufränsens sowie des Einstellwinkels können aufgrund der sehr geringen Differenzen aus wirtschaftlicher Sicht vernachlässigt werden.

Bezugnehmend zu den Ergebnissen aus den Randschicht-Charakterisierungen lassen sich zu den Erkenntnissen der wirtschaftlichen Betrachtung Übereinstimmungen feststellen. Vor allem der Anstieg des Vorschubs pro Zahn aber auch eine erhöhte Schnittgeschwindigkeit zeigten ebenfalls den Trend der Ausbildung von Druckeigenspannungen. Folglich ergibt sich aus diesen Übereinstimmungen sowohl eine positive Beeinflussung der Bauteilrandschicht als auch eine Senkung des Energiebedarfs. Des Weiteren resultiert daraus eine Steigerung der Produktivität, welche in der nachfolgende Tabelle 6.2 in Form des Zeitspannvolumens nach der Formel 6.6 dargestellt ist [77].

$$Q = a_p * a_e * v_f \tag{6.6}$$

Tabelle 6.2: Berechnung der Zeitspannvolumina aus den geringen und hohen Schnittwerten der Versuchsreihe 1

Schnittgeschwindigkeit v_c in m/min	Vorschub pro Zahn f_z in mm	Vorschubgeschwindigkeit v_f in mm/min	Schnitttiefe a_p in mm	Arbeitseingriff a_e in mm	Zeitspannvolumen Q in cm^3/min
160	0,3	1390	1	20	27,8
220	0,5	3185	1	20	63,7

Aus den in der Tabelle 6.2 berechneten Zeitspanvolumina ergibt sich eine starke Erhöhung der Produktivität unter Verwendung der Parameterkombination, welche die hohen Schnittwerte beinhaltet. Im Fall einer spanenden Bearbeitung aus der Praxis, könnte demzufolge bei gleichzeitig positiver Beeinflussung der Bauteilrandzone der Energiebedarf gesenkt sowie die Produktivität um ca. 130% gesteigert werden.

Neben der kontinuierlichen Leistungsmessung der Werkzeugmaschine fand ebenfalls eine Aufzeichnung des Drehmoments M der Maschinenspindel statt. Diese erfolgte ähnlich der Messung der Wirkleistung an jeder einzelnen Probe der Versuchsreihe 1 und wurde hinzukommend einem analogen Vorgehen der Auswertung unterzogen. Die daraus gewonnenen Ergebnisse zeigen jedoch keine signifikante Korrelation zwischen den definierten Zerspanungsparametern und dem sich einstellenden Drehmoment. Über alle gemessenen Stirnfräsprozesse der Versuchsreihe 1 ergibt sich ein durchschnittliches Drehmoment von $M = 3,13 Nm$.

6.3 Auswertung der durchgeführten Langzeituntersuchungen

6.3.1 Auswertung der ermittelten Temperaturwerte während der Zerspanung

Die Untersuchungen zur Temperaturentwicklung während des Zerspanungsprozesses resultierten in keinen verwertbaren Ergebnissen. Die Gründe hierfür sind nachfolgend beschrieben.

An den Prüfstücken dieser Versuchsreihe stellte sich ein erhöhter Verzug ein, dessen Grund in der durchgeführten Wärmebehandlung des Vergütens gesehen werden kann. Zurückzuführen ist dies auf die gesteigerte Probenlänge, durch welche das Verhältnis von Probenhöhe zu Probenlänge im Vergleich zur Basisgeometrie sich um ein Vielfaches reduziert. Aufgrund des Verzugs der Prüfstücke konnte die Schnitttiefe von $a_p = 1 mm$ über die gesamte Probelänge nicht gewährleistet werden, wodurch dieser Parameter seine Charakteristik als konstanter Wert verliert. Des Weiteren war nach der Beendigung des Stirnfräsprozesses der Proben kein Verschleiß an den Wendeschneidplatten zu erkennen. Grund hierfür ist einerseits der genannte erhöhte Verzug der Prüfstücke, wodurch an partiellen Bereichen der Proben nur ein sehr geringer oder kein Materialabtrag zu beobachten war. Ebenso ist die sich ergebende Hauptnutzungszeit von $t_h = 7,29 min$ als zu gering einzustufen, um einen sichtbaren Verschleiß an den untersuchten Wendeschneidplatten hervorzurufen. Diese Tatsache macht die Eigenspannungsmessung in Abhängigkeit des Werkzeugverschleißes nicht aussagefähig respektive

überflüssig. Neben dieser Erkenntnissen konnten ebenfalls keine verwertbaren Temperaturwerte während der spanenden Bearbeitung gemessen werden. Als Begründung ist dabei die schlechte Fokussierbarkeit der Kontaktzone zwischen Werkstück und Werkzeug zu nennen. Unter der Verwendung des festgelegten Versuchsaufbaus ist die Distanz zwischen Thermografie-Kamera und Kontaktzone als zu groß zu bewerten, wodurch primär die Temperaturen von Spänen oder Kühlschmierstoff gemessen wurde. Weiterhin stellte die bearbeitete, glänzende Oberfläche der Proben eine Herausforderung bei der Messung mittels Thermografie-Kamera dar. Für eine aussagekräftige Temperaturmessung bedarf es der Ermittlung des exakten Emissionsgrads der Probenoberfläche sowie der verschiedenen Einflussfaktoren bei der Zerspanung, welche im Rahmen der durchgeführten Forschungsuntersuchungen nicht möglich war.

Die Recherche einschlägiger Literatur zeigte jedoch, dass Müller [78] bereits gleichartige Untersuchungen durchführte. Dabei wurde unter anderem die Temperatur bei der Drehbearbeitung von C45N bei ähnliche Schnittparametern mittels einer Infrarotkamera ermittelt. Durch die Fokussierung der primären Scherzone konnten Temperaturen in einem Bereich von ca. $\vartheta = 200 \dots 240^\circ\text{C}$ gemessen werden. Jedoch findet auch in dieser Arbeit der Emissionsgrad sowie dessen nicht exakte Bestimmbarkeit aufgrund weiterer Einflussfaktoren der Zerspanung Erwähnung. Aus diesem Grund wurde in dieser Arbeit ebenfalls darauf hingewiesen, die angegebene Temperaturen ausschließlich als Richtwerte anzusehen.

6.3.2 Bewertung der Beeinflussung des Werkzeugverschleißes auf den Spannungszustand in der Randzone

Die durchgeführten Untersuchungen der Versuchsreihe 5 geben Aufschluss über das Verschleißverhalten der eingesetzten Werkzeuge, der beim Stirnfräsprozess entstehenden Kräfte sowie den daraus resultierenden Eigenspannungen. Das in der Versuchsplanung definierte Standzeitende der Wendeschneidplatten mit einer Verschleißmarkenbreite von $VB = 0,8\text{ mm}$ wurde im Verlauf der Untersuchungen auf $VB = 0,3\text{ mm}$ reduziert. Der Grund hierfür liegt in der zuvor nicht abschätzbaren hohen Verschleißbeständigkeit der eingesetzten Wendeschneidplatten, wodurch auch mit fortlaufender Versuchsdauer kaum Verschleiß erkannt werden konnte. Das somit reduzierte Standzeitende von $VB = 0,3\text{ mm}$ wurde nach einer Schnittzeit von $t_{c1} = 16,5\text{ min}$ erreicht. In diesem Zustand erfolgte die Bearbeitung der Prüfstücke, welche anschließend der Eigenspannungsmessungen unterzogen wurden. Die fortführende Zerspanung mit den bereits verschlissenen Wendeschneidplatten am externen Werkstoff mündete nach einer Schnittzeit von $t_{c2} = 17,4\text{ min}$ im Ausfall des Werkzeugs, durch Ausbrüche an den

Schneidkanten. Somit ist das Standzeitende der eingesetzten Wendschneidplatten mit der Schnittzeit t_{c1} festzulegen. Die Abbildung 6.14 zeigt die fortlaufenden Stadien von der arbeitsscharfen Schneidkante bis hin zum Ausbruch.

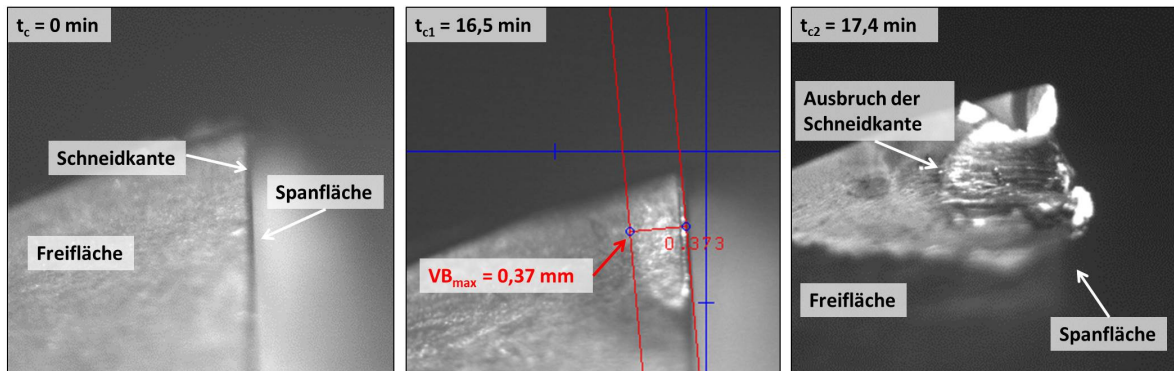


Abbildung 6.14: Darstellung der Verschleißzustände der Schneidkante

Die in diesen Untersuchungen gemessenen Passivkräfte F_p mittels Kraftmessplattform verhalten sich konform zur allgemeinen Annahme. Dabei zeigt sich ein Anstieg der Kräfte mit erhöhter Verschleißmarkenbreite VB . Ebenfalls wird aus den Werten ersichtlich, dass sich bei der Zerspanung mit Kühlschmierstoff im Vergleich zur Trockenbearbeitung keine signifikanten Differenzen einstellen. Die Zunahme der Passivkräfte zwischen arbeitsscharfem Zustand und Standzeitende beträgt für die spanende Bearbeitung mit KSS ca. 11 % sowie ohne KSS ca. 14 %. Dies ist zurückzuführen auf die bei der Zerspanung wirksame Fläche der Schneidkante, welche mit zunehmendem Verschleiß ebenfalls ansteigt. Das Resultat daraus ist eine Erhöhung der Reibung und des Drucks in der Kontaktzone zwischen Werkzeug und Werkstück und demzufolge der Anstieg der Passivkraft F_p . Die Kraftverläufe sind in den Diagrammen der folgenden Abbildung 6.15 dargestellt. Diese teilen sich erneut in die beiden Fräsbahnen, welche zu Herstellung der Proben notwendig sind (bezugnehmend Abbildung 6.13). Die Zusammenfassung der zugehörigen Kraftwerte erfolgt in der anschließenden Tabelle 6.3. Dabei handelt es sich um die durchschnittlichen Kraftwerte über beide Fräsbahnen des jeweiligen Stirnfräsprozesses. Die gemessenen Werte des Ein- sowie des Austritts des Fräasers bleiben bei den angegebenen Passivkräften unberücksichtigt (siehe Auswertebereich). Alle entsprechenden Parameterkombinationen dieser Versuchsreihe sind den Anlagen, Teil 2 zu entnehmen.

Die Auswertung der Aktivkraft F_a ergab keinen signifikanten Anstieg mit steigendem Werkzeugverschleiß. Sowohl für die Zerspanung unter dem Einfluss von KSS als auch die Trockenbearbeitung zeigten sich Erhöhungen um lediglich 2,5 % bis 3 %. Dies weist darauf hin, dass fast ausschließlich die Passivkraft als Komponente der Zerspankraft F_Z von einer steigenden Verschleißmarkenbreite VB beeinflusst wird. Aus diesem Grund wird von einer grafischen Darstellung der Kräfteverläufe der Aktivkraft abgesehen.

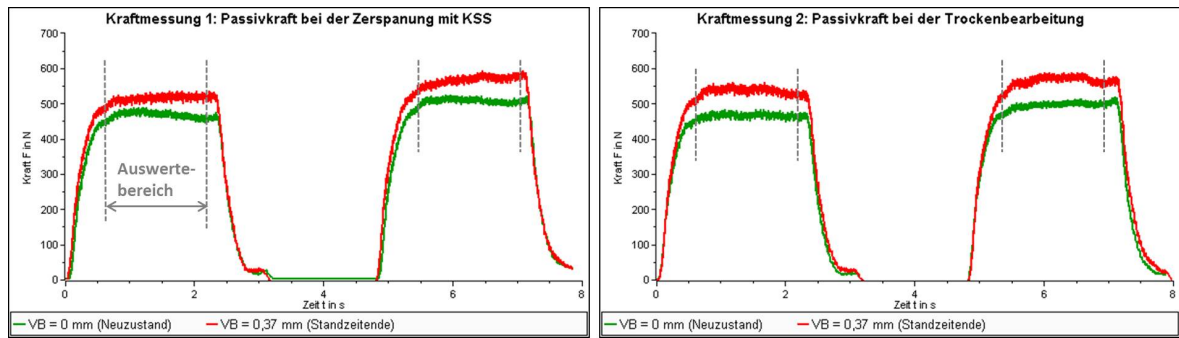


Abbildung 6.15: Verlauf der Passivkräfte F_p bei der Bewertung des Werkzeugverschleißes

Tabelle 6.3: Berechnung der durchschnittlichen Passivkräfte F_p bei der Bewertung des Werkzeugverschleißes

Kraftmessung 1:			
Probe	Prozesskühlung	Verschleißmarkenbreite VB in mm	Durchschnittliche Passivkraft F_p in N
5Y-1	KSS	0	461
5Y-2	KSS	0,37	510
Kraftmessung 2:			
Probe	Prozesskühlung	Verschleißmarkenbreite VB in mm	Durchschnittliche Passivkraft F_p in N
5CC-1	trocken	0	460
5CC-2	trocken	0,37	525

Die Auswertung der Eigenspannungen in den Randzonen der Prüfstücke zeigt zwei differierende Tendenzen, welche die Erkenntnisse aus den Kurzzeituntersuchungen weiter stärken. Beim Vergleich der Eigenspannungstiefenverläufe aus der Fertigung mit Kühlschmierstoff verschieben sich die Spannungswerte mit verschlissenenem Werkzeug zu ausgeprägteren Druckeigenspannungen. Der Zusammenhang liegt dabei in der Kombination aus der gesteigerten Passivkraft bedingt durch die erhöhte Reibung und der Reduzierung der Zerspannungstemperatur aufgrund des Kühlmiteleinsatzes. Konträr dazu verhalten sich die Spannungsverläufe der Trockenbearbeitung. Hierbei verschiebt sich das Spannungsniveau der Probe, welche mit definierter Verschleißmarkenbreite gefertigt wurde, zu höheren Werten in die Richtung von Zugeigenspannungen.

Dieser Verlauf lässt sich ebenfalls auf die gesteigerten Passivkräfte zurückführen. Durch die spanende Bearbeitung ohne KSS wirken dabei jedoch, verstärkt durch eine erhöhte Reibung, die Effekte thermisch induzierter Eigenspannungen. Neben den gewonnenen Erkenntnissen verlaufen die Spannungskurven dieser Versuchsreihe analog zu den Graphen der Kurzzeituntersuchungen und gleichen sich mit fortlaufender Tiefe in einem Bereich von $t = 0,1 \dots 0,13 \text{ mm}$ aneinander sowie den Grenzbereich an. Somit lässt sich eine Korrelation zwischen dem sich einstellenden Verschleiß und den Spannungen in der Bauteilrandzone vermuten, welche bei Vermeidung hoher Prozesstemperaturen zu positiven Druckeigenspannungen führen kann. Die folgende Abbildung 6.16 veranschaulicht die beschriebenen Spannungskurven bei der Bewertung des Werkzeugverschleißes.

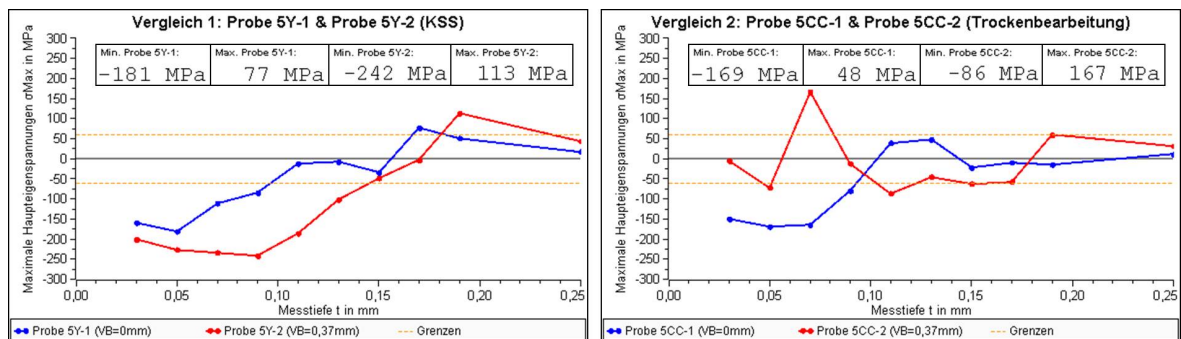


Abbildung 6.16: Grafische Darstellung der Eigenspannungstiefenverläufe in Abhängigkeit der Verschleißmarkenbreite VB der Versuchsreihe 5

6.3.3 Vergleich der gemessenen Eigenspannungen vor und nach einer definierten Zeitspanne

Die Untersuchungen zu dieser abschließenden Versuchsreihe erfolgten an zwei Prüfstücken unterschiedlicher Parameterkombinationen. Aus dem Gesamtumfang der Versuchsreihe 1 wurde dabei die Probe E entnommen. Diese weist im oberflächennahen Randbereich charakteristische Zugeigenspannungen auf. Des Weiteren fand die Fertigung einer weiteren Probe mit der identischen Parameterkombination der Probe Y aus der Versuchsreihe 1 statt. Einerseits um die signifikanten Druckeigenspannungen dieser Schnittwertzusammensetzung zu bestätigen, andererseits um neben der Probe E mit Zugeigenspannungen einen dazu gegensätzlichen Spannungsverlauf zu untersuchen. Die Parameterkombinationen dieser beiden Proben sind nachfolgend in der Tabelle 6.4 zusammengefasst. Zu beachten ist, dass der Vergleich der Spannungsverläufe auf der Basis der Einflussgrößen in dieser Versuchsreihe nicht im Fokus steht.

Die Vergleiche der Eigenspannungstiefenverläufe, gemessen direkt nach der Fertigung und nach der definierten Zeitspanne von 3 Monaten (ruhend gelagert) zeigen erste

Tendenzen. Auffallend ist insbesondere dass die Spitzenwerte der Spannungen bei der Messung direkt nach der Zerspanung, durch die Lagerung während des festgelegten Zeitraums relativiert wurden. Dabei verschiebt sich in beiden Fällen das Niveau der Spannungskurven in die Richtung des Grenzbereichs und somit näher an den Eigenstressungsverlauf der Referenzprobe. Des Weiteren konnten die signifikanten Druckeigenstressungen der Parameterkombination der Probe Y mit dieser Versuchsreihe bestätigt werden. Die beschriebenen Vergleiche der Eigenstressungstiefenverläufe sind in den Diagrammen der folgenden Abbildung 6.17 dargestellt.

Tabelle 6.4: Parameterkombination der Versuchsreihe 6

Parameter	Probe 6E-1/ 6E-2	Probe 6Y-1/ 6Y-2
Schnittgeschwindigkeit v_c in m/min	160	220
Vorschub pro Zahn f_z in mm	0,3	0,5
Prozesskühlung	trocken	KSS
Frässtrategie	Gleichlaufräsen	Gleichlaufräsen
Einstellwinkel κ_T in $^\circ$	45	45

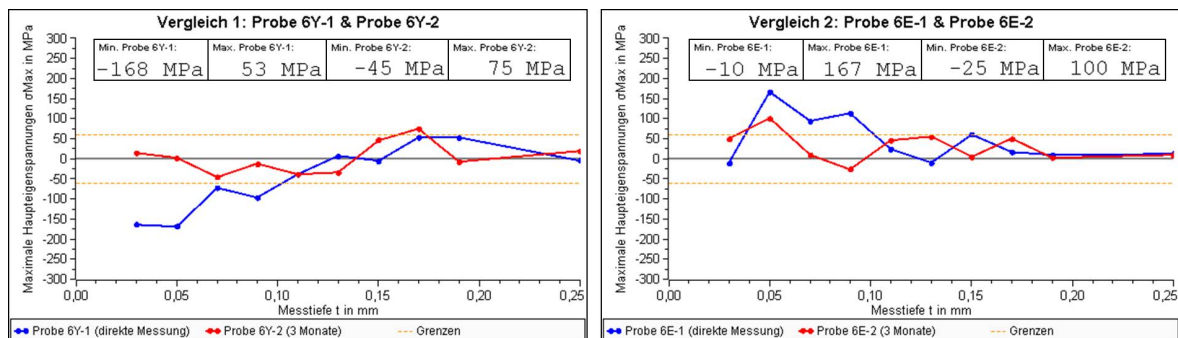


Abbildung 6.17: Grafische Darstellung der Eigenstressungstiefenverläufe in Abhängigkeit der definierten Zeitspanne von 3 Monaten

Aus dieser Versuchsreihe lässt sich somit ebenfalls eine abschließende Erkenntnis bezüglich der Beeinflussung des Eigenstressungszustandes durch die ruhende Lagerung über eine definierte Zeitspanne gewinnen. Schlussfolgernd kann hierbei vermutet werden, dass sich signifikante Eigenstressungen mit fortlaufender Zeit relativieren und demzufolge eine Annäherung dieser an das Grundniveau des Ausgangsgefüges erfolgt. Es ist jedoch zu erwähnen, dass es sich bei diesen Ergebnissen, trotz eindeutiger Trends, lediglich um erste Annahmen handelt, deren Verifizierung weiterführenden sowie umfangreicheren Forschungsuntersuchungen obliegt.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Im Zuge der vorliegenden Arbeit erfolgte die Bewertung des Eigenspannungszustands in der Oberflächengrenzschicht durch den Einfluss variierender Parameter bei der Fräsbearbeitung von C45-Proben. Die Basis für dieses Vorgehen schafft eine fundamentale Grundlagenrecherche, von welcher ausgehend die experimentellen Untersuchungen sowohl geplant, durchgeführt als auch analysiert und ausgewertet wurden. Die dabei fokussierten Parameter umfassen sowohl die Schnittparameter der Schnittgeschwindigkeit v_c sowie des Vorschubs pro Zahn f_z als auch die Einflussgrößen der Prozesskühlung, des Gleich- sowie Gegenlauffräsens und des Einstellwinkels κ_r . Hinzukommend bilden die Bewertungen von Faktoren wie der Zerspanungstemperatur ϑ , des Werkzeugverschleißes VB , der Zeit t und des Energiebedarfs der Werkzeugmaschine Analysebestandteile dieser Arbeit.

Im ersten Teil der experimentellen Versuchsdurchführungen erfolgte die umfassende Auswertung der Kurzzeituntersuchungen (siehe 6.2). Das Beurteilen von kausalen Zusammenhängen zwischen variierenden Schnittparametern und Einflussgrößen und der Randzonen-Charakteristik bildete dabei den zentralen Bestandteil (siehe 6.2.1). Ein dafür erarbeitetes Bewertungssystem diente als Quantifizierung zur Erkennung von Tendenzen (siehe Formeln 6.1 bis 6.5). Die Referenzwerte verkörperten die ermittelten Grenzen der Eigenspannungen des Ausgangsgefüges/ des reinen Vergütungsgefüges (siehe 6.1) von $\sigma_{\text{Max}} = \pm 60 \text{ MPa}$.

Der Vergleich der Eigenspannungszustände infolge einer Fertigung unterschiedlicher Schnittgeschwindigkeiten ergab keinen signifikanten Zusammenhang. Anhand der Ergebnisse der Bewertungsrechnungen lässt sich ein geringer Trend zu höheren Spannungswerten, in die Richtung von Zugeigenspannungen, bei niedrigerer Schnittgeschwindigkeit erkennen. Dieser kann jedoch nicht als eindeutig angenommen werden. Auch eine sich anschließende Veränderung der Schnittwerte (Erhöhung und Reduzierung der Schnittgeschwindigkeit v_c um 25 %) bestätigte diese Erkenntnis.

Dem gegenüber zeigt die Auswertung des Vorschubs pro Zahn eine deutliche Korrelation zum Spannungszustand der Prüfstücke. Insbesondere in unmittelbar oberflächennahen Gebieten von $t = 0,03 \dots 0,05 \text{ mm}$ ist eine Verschiebung der Spannungswerte in die Richtung des Druckbereichs bei erhöhtem Vorschub pro Zahn ersichtlich. Dieser Trend

konnte ebenfalls durch eine weitere Veränderung der Schnittwerte (Erhöhung und Reduzierung von f_z um 5%) bestätigt werden. Der Grund dieser Korrelation beruht auf der Vermeidung von thermisch induzierten Zugeigenspannungen, durch die Verhinderung der Entstehung hoher Prozesstemperaturen infolge einer geringeren Schnittzeit t_c . Hinzukommend lässt sich beim Einsatz von Kühlschmierstoff während des Stirnfräsprozesses ebenfalls eine geringe Verschiebung der Spannungswerte in die Richtung des Druckbereichs feststellen. Dieser Trend beschränkt sich erneut auf den Bereich an der unmittelbaren Oberfläche von $t = 0,03 \dots 0,05 \text{ mm}$ und ist auf die Reduzierung der Zerspannungstemperatur durch den Kühlmiteleinsatz zurückzuführen. Ebenso wie beim Einfluss des Vorschubs pro Zahn können dabei thermische Effekte als Begründung der Zusammenhänge genannt werden.

Die Auswertung des Gleich- bzw. GegenlaufräSENS lässt ebenfalls eine erste Tendenz erkennen. Diese weisen auf die Erhöhung von Spannungswerten (Zugeigenspannungen) beim GegenlaufräSEN hin. Betroffen ist hierbei insbesondere der Tiefenbereich von $t = 0,03 \dots 0,05 \text{ mm}$.

Der signifikanteste Zusammenhang aller Einflussgrößen konnte durch die Variation des Einstellwinkels κ_r abgebildet werden. Bei dieser Analyse lässt sich die deutliche Tendenz zu Druckeigenspannungen bei der Verwendung des größeren Einstellwinkels ($\kappa_r = 45^\circ$) erkennen. Auch über die gesamte untersuchte Einflusszone bis $t = 0,13 \text{ mm}$ bestätigt sich der genannte Trend. Gestärkt werden konnte dieses Ergebnis ebenfalls durch die am höchsten ermittelten Werte der Bewertungsrechnungen (I_{OF}/I_{IGS}). Der Fokus der hierbei durchgeführten Untersuchungen lag auf der isolierten Betrachtung des Einstellwinkels ($\kappa_r = 28^\circ$ & 45°), weshalb sich die verwendeten Werkzeuge sowohl in geometrischer als auch topografischer Hinsicht identisch verhalten.

Keinen charakteristischen Zusammenhang ergab der Vergleich der Ausgangsgeometrie mit der um die Hälfte reduzierten Bauteilhöhe. Lediglich ließen sich bei dieser Versuchsdurchführung nahezu identische Eigenspannungsverläufe der veränderten Probengeometrie nachweisen.

Als allgemeingültige Schlussfolgerung der durchgeführten Kurzzeituntersuchungen kann somit anfänglich genannt werden, dass die Eigenspannungszustände im Randzonenbereich der Prüfstücke eindeutig durch die den Stirnfräsprozess beeinflusst wurden. Dabei stellten sich insbesondere in einem Tiefenbereich von $t = 0,03 \dots 0,05 \text{ mm}$ die größten Veränderungen/ Schwankungen der Spannungen ein. Allen Spannungsverläufen gemein ist der Übergang der Spannungswerte in den Grenzbereich der Referenzprobe bei einer Bauteiltiefe von $t = 0,1 \dots 0,13 \text{ mm}$, wodurch dieser Bereich als Grenzbereich von beeinflusstem zu unbeeinflusstem Gefüge definiert werden kann. Darüber hinaus ergeben sich aus den Eigenspannungsbewertungen die zwei folgenden Parameterkombinationen,

welche bezüglich der genannten Tendenzen sowie unter Beachtung der Versuchsgrenzen zu ambivalenten Eigenspannungszuständen führen:

- Ausbildung von Druckeigenspannungen: $v_c = 220$ m/min, $f_z = 0,5$ mm, KSS, Gleichlaufräsen, $\kappa_r = 45^\circ$
- Ausbildung von Zugeigenspannungen: $v_c = 160$ m/min, $f_z = 0,3$ mm, trocken, Gegenlaufräsen, $\kappa_r = 28^\circ$

Die Prüfung der Mikrohärte (siehe 6.2.2) an Proben mit unterschiedlichen Eigenspannungszuständen ergab keine charakteristischen Differenzen untereinander. Alle aufgenommenen Tiefenverläufe zeigten einen kontinuierlichen Mikrohärteverlauf bis zur maximalen Messtiefe von $t = 0,2$ mm. Jedoch konnte beim Vergleich aller bearbeiteter Prüfstücke mit der Referenzprobe bis zu einem Tiefenbereich von $t = 0,12 \dots 0,15$ mm eine durchschnittliche Erhöhung der Mikrohärte von 14% festgestellt werden. Nach der Überschreitung dieser Messtiefe gleichen sich die Tiefenverläufe aneinander an. Somit ergibt sich die Annahme einer Zunahme der Mikrohärte im Randzonenbereich durch den Stirnfräsprozess.

Die Analyse der Werkzeugmaschine aus ökonomischer Sicht (siehe 6.2.3) zeigt eine signifikante Senkung des Energiebedarfs unter Verwendung der erhöhten Schnittwerte. Da sowohl die Schnittgeschwindigkeit v_c als auch der Vorschub pro Zahn f_z einen Einfluss auf die sich daraus ergebende Vorschubgeschwindigkeit v_f aufweisen, kann trotz höherer Wirkleistungswerte bei höheren Schnittwerten, die Energie durch eine höhere Vorschubgeschwindigkeit reduziert werden. Diese Reduzierung beträgt beim Vergleich der Schnittgeschwindigkeiten 17% und des Vorschubs pro Zahn 42,1%. Dem entgegen steht eine geringe Erhöhung der Energie durch den Einsatz von Kühlschmierstoff um 9,6%. Bezugnehmend zu der genannten Parameterkombination zur Ausbildung von Druckeigenspannungen, ergibt sich somit bei positiver Beeinflussung der Oberflächengrenzschicht eine Reduzierung des Energiebedarfs. Zudem erhöht sich beim Vergleich der Parameterkombinationen das Zeitspanvolumen Q um 130%.

Der erste Teil der Langzeituntersuchungen zur Ermittlung der Zerspanungstemperatur mittels Thermografie-Kamera (siehe 6.3.1) ergab keine auswertbaren Ergebnisse. Aufgrund eines zu starken Verzugs der Probe durch die Wärmebehandlung sowie einer zu geringen Schnittzeit konnte kein Verschleiß am Werkzeug festgestellt werden. Dies macht eine Eigenspannungsbewertung in Abhängigkeit des Werkzeugverschleißes nicht aussagekräftig. Hinzukommend bedarf es bei diesem Vorgehen einer genauen Bestimmung des Emissionsgrads der Probenoberfläche, um eine eindeutige Bestimmung der

Prozesstemperaturen vorzunehmen. Die genannten Erkenntnisse dieser Untersuchungen können jedoch als Grundlage weiterführender Versuche genutzt werden.

Als aufbauende experimentelle Untersuchung diente der Versuch zum Einfluss des Werkzeugverschleißes auf die Eigenspannungen der Randzonenbereich der Prüfstücke (siehe 6.3.2). Dabei konnte die definierte maximale Verschleißmarkenbreite von $VB = 0,3 \text{ mm}$ und somit das Standzeitende nach einer Zeit von $t_c = 16,5 \text{ min}$ festgestellt werden. Nach einer Zeit von $t_c = 17,4 \text{ min}$ kam es zum Ausbruch der Schneidkante der Wendeschneidplatten. Durch den detektierten Verschleiß von $VB = 0,3 \text{ mm}$ stieg ebenfalls die Passivkraft durch eine erhöhte Reibung und einen steigenden Druck in der Kontaktzone um ca. 11 ... 14% an. Dies führte zu einer Verschiebung der Spannungswerte in den Druckbereich bei gleichzeitigem Kühlmiteleinsetz sowie zu einem Anstieg der Spannungswerte in die Richtung von Zugeigenspannungen bei der Trockenbearbeitung.

Der letzte Teil der Langzeituntersuchungen zielte darauf ab die Entwicklung der Eigenspannungen in der Randzone der Proben nach einer definierten Zeit der ruhenden Lagerung von 3 Monaten zu beurteilen (siehe 6.3.3). Es zeigte sich bei anfänglich stark ambivalenten Eigenspannungszustände (signifikante Zug- und Druckeigenspannungen) ein identischer Trend. Dabei verschoben sich beide Spannungsverläufe in die Richtung des Ausgangsgefüges und waren nach der festgelegten Zeitspanne fast vollständig vom Grenzbereich umschlossen. Demzufolge kann ein Abbau der Eigenspannungen mit fortlaufender Zeit angenommen werden.

Abschließend ist zu nennen, dass es sich bei einigen der getroffenen Bewertungen lediglich um erste Annahmen handelt, deren Eindeutigkeit in weiterführenden experimentellen Versuchsdurchführungen bestätigt werden muss. Hierbei lässt sich insbesondere auf diejenigen Untersuchungen hinweisen, welche sich in deren erzielten Ergebnissen konträr zu Forschungserkenntnissen einschlägiger Literaturstellen verhalten. Ebenfalls bietet es sich an, ein weiteres Verfahren zur Eigenspannungsanalyse der Bewertungen hinzuzuziehen. Die daraus gewonnen Aussagen ließen Rückschlüsse sowohl über die Vergleichbarkeit als auch die Verifizierbarkeit der Ergebnisse aus den Spannungsmessungen dieser Arbeit zu. Weiterhin ist es von großem Interesse die hier dargestellten Schlussfolgerungen der Eigenspannungszustände in den Zusammenhang des Ermüdungsverhaltens der Proben zu setzen. Zahlreiche Forschungsprojekte sprechen ausgeprägten Eigenspannungen in der Oberflächengrenzschicht signifikante Auswirkungen auf die Dauerfestigkeit der Bauteile zu. Hierfür bietet die vorliegende Arbeit eine Grundlage, um durch mögliche weiterführende umfassende Schwingungsuntersuchungen Handlungsmaßnahmen für praktische Anwendungen abzuleiten.

Literaturverzeichnis

- [1] Berend Denkena and Hans Kurt T. Nshoff, editors. *Spanen: Grundlagen*. VDI-Buch. Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2011.
- [2] Jürgen Michna. *Numerische und experimentelle Untersuchung zerspanungsbedingter Gefügeumwandlungen und Modellierung des thermo-mechanischen Lastkollektivs beim Bohren von 42CrMo4*. Dissertation, Karlsruhe, 29.01.2014.
- [3] Bernd Sauer, editor. *Konstruktionselemente des Maschinenbaus 1: Grundlagen der Berechnung und Gestaltung von Maschinenelementen*. Springer-Lehrbuch. Springer Vieweg, Berlin and Heidelberg, 9. auflage edition, 2016.
- [4] Frank Hahn. *Werkstofftechnik-Praktikum: Werkstoffe prüfen und verstehen*. Fachbucherl. Leipzig im Hanser Verl., München, 1. aufl. edition, 2015.
- [5] Volker Schulze. *Fertigungsbedingte Eigenspannungen und deren Auswirkung*. Symposium 16, Karlsruhe, 09.2015.
- [6] Tobias Strauß. *Ermittlung von fertigungsprozessbedingten Eigenspannungen bei komplexer Beuteilgeometrie*. Dissertation, Karlsruhe, 04.02.2013.
- [7] Kloos Karl Heinz and Bruno Kaiser. *Fertigungsinduzierte Eigenspannungen*. Htm journal of heat treatment and materials, 04.1990.
- [8] Esther Held. *Eigenspannungsanalyse an Schichtverbunden mittels inkrementeller Bohrlochmethode*. Dissertation, Universität Karlsruhe, Karlsruhe, 25.07.2013.
- [9] Enrique Garcia Sobolevski. *Residual stress analysis of components with real geometries using the incremental hole drilling technique and a differential evaluation method: Zugl.: Kassel, Univ., Diss, 2007*, volume Bd. 9 of *Forschungsberichte aus dem Institut für Werkstofftechnik, Metallische Werkstoffe der Universität Kassel*. Kassel Univ. Press, Kassel, 2007.
- [10] Vishay Precision Group – Micro-Measurements. *Präzisions-DMS: DMS für allgemeine Anwendungen, Spezialanwendungen, Aufschweisbare DMS, Temperatursensoren, Eigenspannungsmessung: Katalog*. Heilbronn, 2010.

- [11] Stahlberatungsstelle des Ministerium für Erzbau, Metallurgie und Kali. *Qualitäts- und Edeltähle: der Deutschen Demokratischen Republik: Eigenschaften, Behandlung, Verwendung*, volume 1. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 4 edition, 1993.
- [12] Wilhelm Dax, Nikolaus Drozd, Wolf-Dieter Gläser, Günter Kotsch, Bernd Kumler, Heribert Laier, Johann Slaby, Andreas Uhlemann, Albert Weiß, and Klaus Zeimer. *Tabellenbuch für Metalltechnik: Theoretische Grundlagen - technische Kommunikation - Werkstofftechnik - Maschinenelemente - Fertigungstechnik - Steuerungs- und Regelungstechnik - Anhang*. Metalltechnik HT. Handwerk und Technik, Hamburg, 16., völlig überarbeitete auflage edition, 2017.
- [13] Saarstahl AG. *Saarstahl - C45E(Ck45) - C45R (Cm45)*. Werkstoff-datenblatt, Völklingen, 2019.
- [14] STEELTEC AG. *Unlegierter Stahl C45 XTP*. Werkstoff-datenblatt, Emmenbrücke.
- [15] Welt Stahlsorten. *1.0503 Werkstoff C45 Stahl Datenblatt, Schweißen, Härten, ZTU Diagramm*. Internetdokument, <https://www.weltstahl.com/1-0503-werkstoff-c45-stahl-datenblatt/>, 2019.
- [16] Chauvin Arnoux Group. *PEL 102, 103*. Bedienungsanleitung, www.chauvin-arnoux.com, rue Championnet.
- [17] LMT Tool Systemy GmbH. *LMT Tools Fräsen: Werkzeuge und Wissen*. Werkzeugkatalog, www.lmt-tools.com.
- [18] InfraTec GmbH. *VarioCAM HD research 900: Technische Spezifikation*. Datenblatt, www.infratec.de/thermografie/waermebildkamaras/variocam-hd-research-900/, 2019.
- [19] Kistler Instrumente GmbH. *Messen mit Kristallen: pezoelektrische Messinstrumente für Druck, Kraft, Beschleunigung*. Dokumentationsmappe für datenblätter, Ostfildern.
- [20] U. Wendt, F. Lierath, M. Krempe, and H.-J. Knoche. Oberflächen- und rand-schichtcharakterisierung von hochgeschwindigkeitsgefrästem stahl. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 33(10):614–620, 2002.
- [21] Julius Ficht. *Numerische Untersuchung der Eigenspannungsentwicklung für sequenzielle Zerspanungsprozesse*. Dissertation, Karlsruhe, 26.07.2017.

- [22] Christof Rohrbach, editor. *Handbuch für experimentelle Spannungsanalyse*. VDI-Verl., Düsseldorf, 1989.
- [23] Herbert von Weingraber and Mohamed Abou-Aly. *Handbuch technische Oberflächen: Typologie, Messung und Gebrauchsverhalten*. Vieweg, Braunschweig and Wiesbaden, 1989.
- [24] DIN Deutsches Institut für Normung e. V. Fertigungsverfahren spanen: Teil 0: Allgemeines, einordnung, unterteilung, begriffe, 09.2003.
- [25] DIN Deutsches Institut für Normung e. V. Bewegungen und geometrie des zerspanvorganges, 10.1985.
- [26] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. Fertigungsverfahren: Begriffe, einteilung, 09.2003.
- [27] Horst Czichos, editor. *Tribologie-Handbuch*. Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2010.
- [28] Carsten Heinzl. *Werkstückrandzonenausbildung bei der schleifenden Bearbeitung*. Conference paper, Universität Bremen, Bremen, 01.2000.
- [29] Karl Heinz Kloos. *Eigenstressen, Definition und Entstehungsursachen*. PhD thesis, Verlag Chemie, GmbH, Weinheim, 09.2011.
- [30] Joachim Ernst Hoffmann. *Der Einfluß fertigungsbedingter Eigenstressen auf das Biegeverhalten von glatten und gekerbten Proben aus CK45 in verschiedenen Werkstoffzuständen*. Dissertation, Universität Karlsruhe, Karlsruhe, 20.12.1984.
- [31] Hans-Dieter Klein. *Eigenstressen und ihre Verminderung in metallischen Werkstücken durch spanende Bearbeitung*. Dissertation, Universität Hannover, Hannover, 13.05.1969.
- [32] Carsten Stock. *Analyse mehrachsiger Eigenstressverteilungen im intermediären Werkstoffbereich zwischen Oberfläche und Volumen mittels energiedispersiver Röntgenbeugung*. Dissertation, Technischen Universität Berlin, Berlin, 01.2003.
- [33] U. Wolfstieg and Eckard Macherauch. *Ursachen und Bewertungen von Eigenstressen*. Publikation, Universität Karlsruhe, Karlsruhe, 02.1973.
- [34] Kristina Lepper. *Entwicklung einer Auslegungsmethodik für ermüdungsfeste Stahlbauteile unter Berücksichtigung von fertigungsabhängigen Werkstoffzuständen*. Dissertation, Karlsruhe, 13.04.2016.

- [35] M. Habschied, B. de Graaff, A. Klumpp, and V. Schulze. *Fertigung und Eigenspannungen*. Htm journal of heat treatment and materials, Köln, 10.2015.
- [36] Jochen Rath. *Maximierung der randnahen Druckeigenspannung von Stählen mit Hilfe einer Hochgeschwindigkeits – Abschreckanlage*. Dissertation, Universität Bremen, Bremen, 2012.
- [37] Jens Gibmeier. *Zum Einfluss von Last- und Eigenspannungen auf die Ergebnisse instrumentierter Eindringhärteprüfungen: Zugl.: Kassel, Univ., Diss, 2004*, volume Bd. 6 of *Forschungsberichte aus dem Institut für Werkstofftechnik, Metallische Werkstoffe der Universität Kassel*. Kassel Univ. Press, Kassel, 2005.
- [38] Arne Kromm and Thomas Böllinghaus. *Umwandlungsverhalten und Eigenspannungen beim Schweißen neuartiger LTT-Zusatzwerkstoffe: Zugl.: Magdeburg, Univ., Fak. für Maschinenbau, Diss., 2011*, volume 72 of *BAM-Dissertationsreihe*. Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin, 2011.
- [39] Hans Kurt Tönshoff and Berend Denkena, editors. *Spanen: Grundlagen*. VDI-Buch. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg and s.l., 2., erweiterte und neu bearbeitete auflage edition, 2004.
- [40] H. J. Schindler. *Mechanische Werkstoffprüfung – klassische Verfahren und neue Entwicklungen: Teil II: Mechanische Verfahren zur Bestimmung von Eigenspannungen*. Skript vorlesung abt. iiii, mat-tec, 2002.
- [41] Mario Stefanelli. *Verfahren zur Messung von Eigenspannungen in Eisenbahnschienen*. Diplomarbeit, Montanuniversität Leoben, Leoben, 03.2011.
- [42] ASTM International. Standard test method for determining residual stresses by the hole-drilling strain-gage method, 11.2001.
- [43] Vishay Precision Group – Micro-Measurements. *Measurement of Residual Stresses by the Hole-Drilling* Strain Gage Method*. Heilbronn, document number: 11053 edition, 11.2010.
- [44] H. Kockelmann and G. König. *Abschlussbericht zum DFG-Forschungsvorhaben: Bohrlochmethode*. Abschlussbericht, Stuttgart, 10.1987.
- [45] G. S. Schajer. *Non-uniform residual stress measurements by the hole drilling method*. Publikation, University of British Columbia, British Columbia, 02.1992.
- [46] G. S. Schajer. *H-Drill: Hole - Drilling Residual Stress Calculation Program*, <http://www.schajer.org/>. Internetdokument, Vancouver.

- [47] Wit Grzesik, Bogdan Kruszynski, and Adam Ruszaj. Surface integrity of machined surfaces. In J. Paulo Davim, editor, *Surface Integrity in Machining*, volume 47, pages 143–179. Springer London, London, 2010.
- [48] M'Saoubi, R, J. C. Outeiro, H. Chandrasekaran, O. Dillon W. Jr., and I. S. Jawahir. A review of surface integrity in machining and its impact on functional performance and life of machined products. *International Journal of Sustainable Manufacturing*, 1(1/2):203, 2008.
- [49] Karlsruher Institut für Technologie. *Entstehung, Ermittlung und Bewertung von Eigenspannungen*. Fortbildungsseminar, Karlsruhe, 03.2012.
- [50] J. Betzold, J. Pucelik, and S. Eisenberg. Eigenspannungen als messgröße zur qualitätssicherung. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 38(4):263–273, 2007.
- [51] Nussbaumer, Bauing, and Günther. *Grundlagen und Erläuterung der neuen Ermüdungsnachweise nach Eurocode 3*. Stahlbaukalende, 2006.
- [52] Xiaoping Yang, C. Richard Liu, and A. F. Grandt. An experimental study on fatigue life variance, residual stress variance, and their correlation of face-turned and ground ti 6al-4v samples. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 124(4):809–819, 2002.
- [53] E. Brinksmeier, J. T. Cammett, W. König, P. Leskovar, J. Peters, and H. K. Tönshoff. Residual stresses — measurement and causes in machining processes. 31(2):491–510, 1982.
- [54] Werner Schatt, editor. *Werkstoffwissenschaft*. Wiley-VCH, Weinheim, 9. aufl., 1. nachdr edition, 2007.
- [55] Hiroyuki Sasahara. The effect on fatigue life of residual stress and surface hardness resulting from different cutting conditions of 0.45%c steel. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45(2):131–136, 2005.
- [56] M. Klein, P. Starke, and D. Eifler. Manufacturing influences on the fatigue properties of quenched and tempered sae 4140 specimens. *Procedia Engineering*, 10:1184–1189, 2011.
- [57] Jordan T. Maximov, Angel P. Anchev, Galya V. Duncheva, Nikolaj Ganeev, Kenan F. Selimov, and Vladimir P. Dunchev. Impact of slide diamond burnishing additional parameters on fatigue behaviour of 2024-t3 al alloy. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 42(1):363–373, 2019.

- [58] Hadi Sutanto and Jan Madl. Residual stress development in hard machining - a review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 420:012031, 2018.
- [59] Kamel Moussaoui, Michel Mousseigne, Johanna Senatore, Remy Chieragatti, and Pascal Lamesle. Influence of milling on the fatigue lifetime of a ti6al4v titanium alloy. *Metals*, 5(3):1148–1162, 2015.
- [60] Tim Kohlhoff and Ekkard Brinksmeier. Zahnradverzug durch eigenspannungen aus dem wälzfräsprozess. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 106(7-8):515–521, 2011.
- [61] Edoardo Capello. Residual stresses in turning. *Journal of Materials Processing Technology*, 160(2):221–228, 2005.
- [62] Changfeng YAO, Jiannan LIN, Daoxia WU, and Junxue REN. Surface integrity and fatigue behavior when turning g-tial alloy with optimized pvd-coated carbide inserts. *Chinese Journal of Aeronautics*, 31(4):826–836, 2018.
- [63] Institut für Fertigungstechnik, Professur Formgebende Fertigungstechnik, editor. *Innovative Technologien für die Bearbeitung metallischer und nichtmetallischer Werkstoffe: Eigenspannungen in der Oberflächenrandzone spanend bearbeiteter Bauteile*, Dresden, 2019.
- [64] A.L Mantle and D.K Aspinwall. Surface integrity and fatigue life of turned gamma titanium aluminide. *Journal of Materials Processing Technology*, 72(3):413–420, 1997.
- [65] D. Novovic, R. C. Dewes, D. K. Aspinwall, W. Voice, and P. Bowen. The effect of machined topography and integrity on fatigue life. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 44(2-3):125–134, 2004.
- [66] S.A Bentley, A.L Mantle, and D.K Aspinwall. The effect of machining on the fatigue strength of a gamma titanium aluminide intermetallic alloy. *Intermetallics*, 7(8):967–969, 1999.
- [67] DIN Deutsches Institut für Normung e. V. Für eine wärmebehandlung bestimmte stähle, legierte stähle und automatenstähle - teil 1: Unlegierte vergütungsstähle, 09.2018.
- [68] Wolfgang Bergmann. *Werkstofftechnik 2: Werkstoffherstellung, Werkstoffverarbeitung, Werkstoffanwendung*. Carl Hanser Fachbuchverlag, s.l., 4., aktualisierte aufl. edition, 2009.

- [69] Wolfgang W. Seidel, Frank Hahn, and Bernd Thoden. *Werkstofftechnik: Werkstoffe, Eigenschaften, Prüfung, Anwendung*. Carl Hanser Fachbuchverlag, s.l., 8. aufl. edition, 2010.
- [70] Seeberger GmbH & Co. KG. *Vergütungsstähle*. Technische information, Schalksmühle, 2019.
- [71] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. Optische atomspektralanalyse – allgemeine grundlagen und begriffe, 11.2013.
- [72] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. Metallische werkstoffe – härteprüfung nach rockwell – teil 1: Prüfverfahren, 12.2016.
- [73] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. Metallische werkstoffe – härteprüfung nach vickers – teil 1: Prüfverfahren, 07.2018.
- [74] Christian Mannigel. *Ermittlung der Eigenspannungsverteilung nach dem Festwalzen von austenitisch-ferritischem Gusseisen mit Kugelgraphit (ADI)*. Diplomarbeit, Hochschule Mittweida, Mittweida, 2014.
- [75] VDI Verein Deutscher Ingenieure. Kühlschmierstoffe für spanende und umformende fertigungsverfahren, 05.2007.
- [76] Birgit Awiszus, Jürgen Bast, and Holger Dürr. *Grundlagen der Fertigungstechnik*. Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, München, 6., aktualisierte auflage edition, 2016.
- [77] Hoffmann Group and Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik. *Garant ToolScout Zerspanungshandbuch: Bohren, Gewinde, Senken, Reiben, Sägen, Fräsen, Drehen, Spannen, Präzisionsschleifen*. Hoffmann Group, München, 2012.
- [78] Bernhard Müller. *Thermische Analyse des Zerspanens metallischer Werkstoffe bei hohen Schnittgeschwindigkeiten*. Dissertation, RWTH Aachen, Aachen, 08.2004.
- [79] Alfred Böge. *Formeln und Tabellen Maschinenbau: Für Studium und Praxis*. Springer, Wiesbaden, 3., korr. aufl. 2012 edition, 2012.


Anlagenverzeichnis

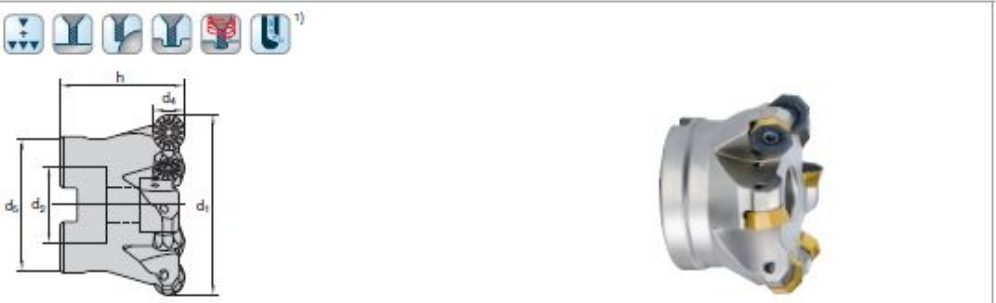
Anlagen, Teil 1	A-I
Anlagen, Teil 2	A-IV
Anlagen, Teil 3	A-VIII
Anlagen, Teil 4	A-IX

Anlagen, Teil 1

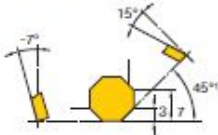
Die nachfolgenden Abbildungen zeigen Auszüge aus dem Werkzeugkatalog der Firma LMT FETTE. Diese Auszüge beinhalten die für die experimentellen Untersuchungen eingesetzten Werkzeuge, welche im Unterkapitel 5.2 beschrieben werden. [17]

MultiEdge 45°
Plan- und Kopierfräser – Aufsteckausführung
Face and copy milling cutter – arbor type

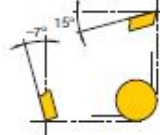




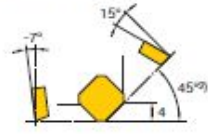
OCKX 0505



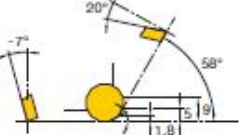
RCKX 1205



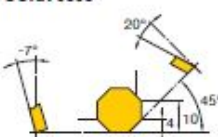
SAHT 1005



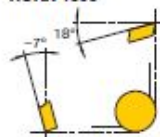
XCKX 1606



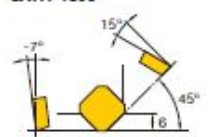
OCKX 0606



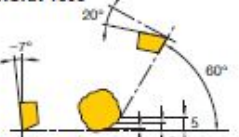
RCKX 1606










SAHT 1306



XOKX 1606



Katalog-Nr.		Cat.-No.		FCT45												
d ₁	d ₄	h	d ₅	d ₂	z	Ident No.	LMT-Code									
42	12	40	32	16	4	1041007	FCT45 005.042AN-I	OCKX 0505	RCKX 1205	SAHT 1005				1045131	1048335	
52	12	40	40	22	5	1041008	FCT45 005.052AN-I									
66	12	50	50	27	6	1041009	FCT45 005.066AN-I									
80	12	50	60	27	7	1041010	FCT45 005.080AN-I									
52	16	40	40	22	4	1041011	FCT45 006.052AN-I	OCKX 0606	RCKX 1606	SAHT 1306	XCKX 1606	XOKX 1606	1045777	1048344		
66	16	50	50	27	5	1041012	FCT45 006.066AN-I									
80	16	50	60	27	6	1041013	FCT45 006.080AN-I									
100	16	50	65	32	7	1041014	FCT45 006.100AN-I									
125	16	63	90	40	8	1041015	FCT45 006.125AN									
160	16	63	95	40	9	4053555	FCT45 006.160AN									

¹⁾ IK IC Ø 42-100

²⁾ Winkel am Werkstück 43°
Angle on workpiece 43°

Schnittwertempfehlungen ab Seite 264
Cutting data recommendations starting page 264



MultiEdge 45°
Wendeschneidplatten
Indexable inserts


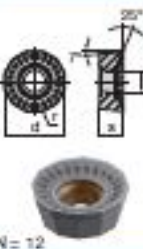

N = Anzahl der Schneidkanten N = Number of cutting edges	ISO-Code	l	d	s	d ₁	b	Schneidstoffsorten Cutting materials Ident. No.										För Fräser For cutter Cat.-No.		
							LCM40M	LCFM40M	LCFK30M	LCF25M	LCFK10M	LCM45M	LCM44M	LCKP90M	LCKP10M	LCK20M		LCR10M	LKN10M
 N = 8	OCKX 0505 AD-TR	12	12	5,56	4,4	0,5	1084035	7002759		7002761			1084035	7047902					FCT45
 N = 8	OCKX 0606 AD-TR	16	16	6,35	5,8	0,5	7054003	7002774	7002770	7002791			10941015						FCT45
	OCKX 0606 AD-TRT	16	16	6,35	5,8	0,5		7002792					1084011	7047904	7047903				
 N = 8	RCKX 1205 MO-TR	-	12	5,56	4,4	-	1084470	7002749		7002758			1084475		7047905				FCT45
 N = 8	RCKX 1606 MO-TR	-	16	6,35	5,8	-	7002823	7002782	7002754	7002783			1084435						FCT45
	RCKX 1606 MO-TRT	-	16	6,35	5,8	-		7002767	7002768				1084406		7047907	7047906			

= Hauptanwendung First choice
 = Nebenanwendung Alternative
 Serienbeschreibung - bezeichnung und ISO-Code ab Seite 454/477
 Description/Designation of grades and ISO-Code starting page 454/477

<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	P
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	M
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	K
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	N
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	S
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	H

MultiEdge 45°
Wendeschneidplatten
Indexable inserts



N = Anzahl der Schneidkanten N = Number of cutting edges	ISO-Code	l	d	s	d ₁	b/r	Schneidstoffsorten Cutting materials Ident. No.											Für Fräser For cutter Cat.-No.																																																																																																																																				
							LCP40M	LCPM10M	LCPK30M	LCP29M	LCPK10M	LCM45M	LCM44M	LCKP90M	LCKP10M	LCK30M	LCK10M		LCN10M	LWN10M	LCHP15M	LCH10M																																																																																																																																
 N = 4	SAHT 1005 AA ER	10	10	5,56	4,4	0,8															FCT45																																																																																																																																	
 N = 12	XCHX 1606 ZDR-TR	16	16	6,35	5,8	0,5																FCT45																																																																																																																																
 N = 4	XCHX 1606 ZD-TR	16	16	6,35	5,8	0,5																FCT45																																																																																																																																
■ = Hauptanwendung First choice □ = Nebenanwendung Alternative Serienbezeichnung/-bezeichnung und ISO-Code ab Seite 454/477 Description/Designation of grades and ISO-Code starting page 454/477							<table border="1"> <tr> <td>■</td><td>■</td><td></td><td>■</td><td>■</td><td></td><td>■</td><td></td><td></td><td>■</td><td></td><td></td><td>■</td><td>■</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>■</td> </tr> <tr> <td>□</td><td>□</td><td></td><td>□</td><td>□</td><td></td><td>□</td><td></td><td></td><td>□</td><td></td><td></td><td>□</td><td>□</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>□</td> </tr> <tr> <td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td> </tr> <tr> <td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td> </tr> <tr> <td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td> </tr> <tr> <td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td> </tr> </table>											■	■		■	■		■			■			■	■								■	□	□		□	□		□			□			□	□								□																																																																																									D M K N S H
■	■		■	■		■			■			■	■								■																																																																																																																																	
□	□		□	□		□			□			□	□								□																																																																																																																																	

Anlagen, Teil 2

Die folgenden Tabellen beinhaltet die gesamten Parameterkombinationen der variablen Einflussgrößen aller beschriebenen Versuchsreihe aus dem Kapitel 5. Für die Versuchsreihe 1 ist zu beachten, dass die Spalten der Drehzahl n sowie der Vorschubgeschwindigkeit v_f jeweils zwei Werte enthalten, da sich der Durchmesser des Fräswerkzeugs in Abhängigkeit der WSP ändert.

Die Berechnungen der Drehzahl n und der Vorschubgeschwindigkeit v_f erfolgen nach dem dargestellten üblichen Formalismus. Hierbei muss die Umrechnung der Einheiten beachtet werden. In der Formel der Drehzahl erfolgt dies durch den angegebenen Faktor 1000:

$$n = \frac{v_c * 1000}{\pi * D_{wz}}$$

$$v_f = f_z * z * n$$

- Schnittgeschwindigkeit v_c in m/min
- Werkzeugdurchmesser D_{wz} in mm
- Vorschub pro Zahn f_z in mm
- Zähnezahl z
- Vorschubgeschwindigkeit v_f in mm/min
- Einstellwinkel κ_r in °
- Drehzahl n in min^{-1}

Parameterkombinationen der Versuchsreihe 1

Probe	variable Einflussgrößen							
	v_c [m/min]	n [min ⁻¹]	f_z [mm]	v_f [mm/min]	Kühlung	Strategie	κ_r [°]	
A	160	45 °: 1158 28 °: 1170	0,3	45 °: 1390 28 °: 1404	KSS	gleich	45	
B							28	
C						gegen	45	
D							28	
E					trocken	gleich	45	
F							28	
G						gegen	45	
H							28	
I		220	45 °: 1592 28 °: 1608	0,5	45 °: 2316 28 °: 2340	KSS	gleich	45
J								28
K							gegen	45
L								28
M						trocken	gleich	45
N								28
O							gegen	45
P								28
Q	220		45 °: 1592 28 °: 1608	0,3	45 °: 1991 28 °: 1930	KSS	gleich	45
R								28
S							gegen	45
T								28
U						trocken	gleich	45
V								28
W							gegen	45
X								28
Y		220	45 °: 1592 28 °: 1608	0,5	45 °: 3185 28 °: 3216	KSS	gleich	45
Z								28
AA							gegen	45
BB								28
CC						trocken	gleich	45
DD								28
EE							gegen	45
FF								28

Parameterkombinationen der Versuchsreihe 2

Ausgehend von der Ausgangskombination der Probe "1FF" ist der sich ändernde Parameter rot hervorgehoben.

Probe	variable Einflussgrößen						
	v_c [m/min]	n [min ⁻¹]	f_z [mm]	v_f [mm/min]	Kühlung	Strategie	κ_r [°]
2FF	275	2010	0,525	4222	trocken	gegen	28
2EE	275	1991	0,525	4180	trocken	gegen	45
2CC	275	1991	0,525	4180	trocken	gleich	45
2Y	275	1991	0,525	4180	KSS	gleich	45
2Q	275	1991	0,285	2269	KSS	gleich	45
2A	120	869	0,285	2269	KSS	gleich	45

Parameterkombinationen der Versuchsreihe 3

Probe	variable Einflussgrößen			
	Probenhöhe h [mm]	Drehzahl n [min ⁻¹]	Vorschubgeschwindigkeit v_f [mm/min]	Kühlung
3FF-1	19	2010	4222	trocken
3FF-2	9,5	2010	4222	trocken
3BB-1	19	2010	4222	KSS
3BB-2	9,5	2010	4222	KSS

Parameterkombinationen der Versuchsreihe 4

Probe	variabele Einflussgrößen			
	Vorschubweg L [mm]	Drehzahl n [min^{-1}]	Vorschubgeschwindigkeit v_f [mm/min]	Kühlung
4W	1451,04 (Oberseite)	1991	796	trocken
	4353,42 (Unterseite)	1991	796	trocken
4S	1451,04 (Oberseite)	1991	796	KSS
	4353,42 (Unterseite)	1991	796	KSS

Parameterkombinationen der Versuchsreihe 5

Probe	variabele Einflussgrößen			
	Verschleißmarke VB [mm]	Drehzahl n [min^{-1}]	Vorschubgeschwindigkeit v_f [mm/min]	Kühlung
5Y-1	0 (Neuzustand)	1592	3185	KSS
5Y-2	0,8 (Standzeitende)	1592	3185	KSS
5CC-1	0 (Neuzustand)	1592	3185	trocken
5CC-2	0,8 (Standzeitende)	1592	3185	trocken

Anlagen, Teil 3

Im Folgenden ist das Vorgehen bei der Berechnung des Vorschubwegs nach [79] ersichtlich. Zu beachten ist die Anzahl der Fräsbahnen, welche benötigt wird, um die Oberfläche der Proben zu überfräsen. Im Rahmen dieser Untersuchungen beträgt diese Anzahl zwei Fräsbahnen, sodass der errechnete Vorschubweg L mit 2 multipliziert werden muss.

$$L = l_w + l_a + l_{\ddot{u}} + l_{fa} + l_{f\ddot{u}}$$

$$l_{fa} = l_{f\ddot{u}} = \frac{D_{WZ}}{2}$$

- Werkstücklänge l_w in mm
- Anlaufweg des Fräasers l_a in mm (Annahme: 2 mm)
- Überlaufweg des Fräasers $l_{\ddot{u}}$ in mm (Annahme: 2 mm)
- Fräserzugabe (Anlaufseite) l_{fa} in mm
- Fräserzugabe (Überlaufseite) $l_{f\ddot{u}}$ in mm
- Werkzeugdurchmesser D_{WZ} in mm (Annahme: Mittelwert für beide Wendeschneidplatten = 43,76 mm)

Die Berechnung der Hauptnutzungszeit ergibt sich aus dem berechneten Vorschubweg sowie der verwendeten Vorschubgeschwindigkeit nach folgender Beziehung [79]:

$$t_h = \frac{L}{v_f}$$

- Vorschubweg L in mm
- Vorschubgeschwindigkeit v_f in mm/min

Anlagen, Teil 4

Die nachfolgende Abbildung zeigt den Versuchsaufbau bei der kontinuierlichen Kraftmessung während der Fräsbearbeitung. Hierbei lag der Fokus auf der Ermittlung der sich einstellenden Passivkräfte F_p . Bei der Verwendung der abgebildeten Kraftmessplattform ist darauf zu achten, dass diese gegen das Eindringen von Flüssigkeiten (KSS) geschützt werden muss, um Beschädigungen sowie Verfälschungen der Messergebnisse zu vermeiden. Im Fall der Versuchsreihe 5 (Unterkapitel 5.4.2), erfolgt dies durch die Abschirmung mittels Kunststofffolien.



Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Mittweida, den 28.02.2020

Florian Berger