



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Bachelorarbeit

Jan-Philip Wenzl

Prozesseinflüsse auf optische Triangulationssensoren beim Laserauftragschweißen

Fakultät Technik und Informatik
Department Maschinenbau und Produktion

Faculty of Engineering and Computer Science
Department of Mechanical Engineering and
Production Management

Jan-Philip Wenzl
**Prozesseinflüsse auf optische
Triangulationssensoren beim
Laserauftragschweißen**

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung

im Studiengang Maschinenbau/ Entwicklung und Konstruktion
am Department Maschinenbau und Produktion
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

in Zusammenarbeit mit:

Fraunhofer IAPT
Am Schleusengraben 14
21029 Hamburg

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. habil. Frank Helmut Schäfer
Zweitprüfer: Dr.-Ing. Dirk Herzog
Industrieller Betreuer: M.Sc. Malte Buhr

Abgabedatum: 29.01.2018

Zusammenfassung

Jan-Philip Wenzl

Thema der Bachelorthesis

Prozesseinflüsse auf optische Triangulationssensoren beim Laserauftragschweißen

Stichworte

Triangulationssensor, Optik, Konturerfassung, Schweißen, Laserauftragschweißen, Additive Fertigung, Laser, Titan, Wärmeübertragung, CMOS-Kamera, Rauscheinflüsse, Prozesseinflüsse

Kurzzusammenfassung

Diese Arbeit umfasst eine Analyse der Prozesseinflüsse der additiven Fertigung durch Laserauftragschweißen auf das Messergebnis einer In-Prozess-Konturerfassung durch einen Linien-Lasertriangulationssensor. Es werden verschiedene Prozess- und Umwelteinflüsse zunächst analytisch identifiziert und anschließend experimentell untersucht. Auf Basis der Versuchsergebnisse werden Optimierungsstrategien für die Integration eines Triangulationssensors in das Fertigungsverfahren gezeigt.

Jan-Philip Wenzl

Title of the paper

Process influences on optical triangulation sensors during laser metal deposition

Keywords

Triangulation Sensor, Optics, contour detection, welding, laser metal deposition, additive manufacturing, laser, titan, heat transfer, CMOS-Camera, noise influences, process influences

Abstract

This paper comprises an analysis of the process influences in additive manufacturing by laser metal deposition on in-process contour detection by a laser line triangulation sensor. First, various process and environmental influences are analytically identified and experimentally investigated. Based on the experimental results, an optimization strategy for the integration of a triangulation sensor in the manufacturing process is being shown.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	VI
Abkürzungsverzeichnis	VII
Nomenklatur	VIII
1 Einleitung	1
2 Stand der Technik	3
2.1 Grundlagen der geometrischen Optik	3
2.1.1 Reflexion und Brechung	3
2.1.2 Abbildung mit sphärischen Linsen	7
2.2 Optische Triangulationssensoren	8
2.2.1 Geometrische Triangulation	8
2.2.2 Aufbau von Triangulationssensoren	9
2.2.3 Messprinzip von Triangulationssensoren	13
2.3 Roboterbasiertes Laserauftragschweißen	15
2.4 Sechs-Achs-Industrieroboter	17
2.5 Arten der Wärmeübertragung	18
2.6 Eigenschaften von Metallen	20
2.6.1 Thermische Eigenschaften von Metallen	20
2.6.2 Optische Eigenschaften von Metallen	21
2.7 Thermoelektrischer Effekt	22
3 Prozesseinflüsse auf Triangulationssensoren	23
3.1 Bearbeitungszustand und Oberflächenmaterial	23
3.1.1 Abrasiv bearbeitete Oberflächen	24
3.1.2 Reflexionsgrad der Oberflächen	25
3.1.3 Lichtdurchlässige Medien	25
3.1.4 Spiegelnde Oberflächen	26
3.1.5 Direktionale Bearbeitungsspuren	27
3.2 Sensorposition und Messabstand	28
3.3 Abschattung durch Körperkanten	29
3.4 Einfluss der Roboterkinematik	30
3.5 Radiometrische Einflüsse	31
3.5.1 Rauschquellen im Signalpfad der digitalen Kamera	31
3.5.2 Belichtungszeit und Sättigung	33
3.6 Prozesstemperatur im Messbereich	34
3.6.1 Allgemeine Temperatureinflüsse	34
3.6.2 Inhomogener Brechungsindex im Messbereich	36
4 Systembeschreibung und Analyse der Einflussfaktoren	38
4.1 Systembeschreibung	38
4.2 Analyse der Einflussfaktoren	40

5	Versuchsbeschreibungen zur Bestimmung der Prozesseinflüsse	44
5.1	Ablauf einer Konturerfassung.....	44
5.1.1	Einstellungen in der Messsoftware.....	44
5.1.2	Programme und Verrechnungen im Postprozessor	45
5.2	Konturerfassung verschiedener Oberflächenprofile	47
5.3	Konturerfassung unter verschiedenen Bewegungsprofilen	50
5.4	Konturerfassung einer Abschattungsprüfstrecke	52
5.5	In-Prozess Temperaturen bei einem LPA Vorgang	54
5.6	In-Prozess Kontur- und Lagen-Offseterfassung	59
6	Bestimmung des Messfehlers durch den inhomogenen Brechungsindex	61
6.1	Vorgehensweise zur Bestimmung des Messfehlers	61
6.2	Ergebnisse der Berechnungen.....	63
6.3	Bewertung der Ergebnisse	65
7	Ergebnisse der Versuchsreihen	66
7.1	Ergebnisse der Konturerfassung verschiedener Oberflächenprofile.....	66
7.1.1	Absolute Messergebnisse und Sollwertabweichung der Oberflächeneinflüsse.....	67
7.1.2	Höhenprofil der Einzelprüfkörper	68
7.1.3	Verfolgung einer Klebespur	70
7.1.4	Bewertung der Ergebnisse.....	71
7.2	Ergebnisse der Konturerfassung unter verschiedenen Bewegungsprofilen	72
7.2.1	Absolute Messergebnisse und Sollwertabweichung der Bewegungsprofile	73
7.2.2	Höhenprofile für Prüfkörper 1 unter verschiedenen Bewegungsprofilen	74
7.2.3	Bewertung der Ergebnisse.....	78
7.3	Ergebnisse der Abschattungsversuche.....	79
7.3.1	Höhenprofil und abgeschattete Längen der Abschattungsprüfstrecke	79
7.3.2	Bewertung der Ergebnisse.....	81
7.4	Ergebnisse der Prozesstemperaturmessung	82
7.4.1	Maximalwerte der Prozesstemperatur	82
7.4.2	Temperaturverlauf über der Prozesszeit	83
7.4.3	Bewertung der Ergebnisse.....	86
7.5	Ergebnisse der In-Prozess Kontur- und Lagen-Offseterfassung.....	87
7.5.1	In-Prozess-Konturerfassung	87
7.5.2	In-Prozess-Lagen-Offseterfassung	90
7.5.3	Bewertung der Ergebnisse.....	92
8	Lösungsansätze und Optimierungsstrategie	93
9	Zusammenfassung und Ausblick	97
10	Literaturverzeichnis	98

A. Anhang	101
A.1 Grafische Darstellung der Rautiefemessungen.....	101
A.2 Grafische Darstellung der Profilbreitenmessung	104
A.3 Grafische Darstellung der In-Prozess-Konturerfassung Messung 1 und 3	109
A.4 Grafische Darstellung der Lagen-Offseterkennung Messung 5 und 6	110
A.5 Berechnungsgrundlage für die Auswertung der In-Prozess-Konturerfassung.....	111
A.6 Tabellen und Konstanten	112
A.7 Versuchsauswertung nach DIN 1319-1	113
A.8 Datenblatt Thermoelemente Typ K	115
A.9 Transmissionsprofil eines Bandpassfilters.....	116
A.10 Auszüge aus dem Datenblatt des Triangulationssensors	117
A.11 Datenträger	119

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Offener- und geschlossener Regelkreis schematisch dargestellt	1
Abbildung 2-1: Reflexion und Brechung eines Strahls am Übergang zwischen zwei Medien..3	
Abbildung 2-2: Bahn des Lichtstrahls, Weg eines paraxialen Strahls	6
Abbildung 2-3: Streureflexion aufgrund von Unebenheiten auf einer realen Oberfläche	6
Abbildung 2-4: Strahlengang für die Brechung an einer dünnen Linse	7
Abbildung 2-5: Geometrische Beziehungen für die triangulatorische Abstandsmessung	8
Abbildung 2-6: Schematischer Aufbau triangulatorischer Messsysteme.....	9
Abbildung 2-7: Positionsbestimmung auf einem CCD Element.....	11
Abbildung 2-8: Messprinzip eines Triangulationssensors	13
Abbildung 2-9: Nichtlinearer Zusammenhang zwischen Δz und δ	14
Abbildung 2-10: Schematische Darstellung des Laserauftragschweißens	15
Abbildung 2-11: Aufbaustrategie einer aufzubauenden Kontur	16
Abbildung 2-12: Sechs-Achs-Industrieroboter mit Achspositionen	17
Abbildung 2-13: Thermoelektrisches Messprinzip	22
Abbildung 3-1: Prozesseinflüsse während des Laserauftragschweißens	23
Abbildung 3-2: Laserauftraggeschweißte Wand, MAG geschweißte Kehlnaht	24
Abbildung 3-3: Typische Profilfolge einer spiegelnd reflektierenden Oberfläche	26
Abbildung 3-4: Gerichtete Reflexionen aufgrund von Bearbeitungsspuren	27
Abbildung 3-5: Typische Profilfolge einer gefrästen Oberfläche	27
Abbildung 3-6: Abnehmenden Signalqualität zu den Enden des Messbereichs	28
Abbildung 3-7: Abschattung durch geometrische Effekte an steilen Kanten	29
Abbildung 3-8: Abweichung der gemessenen z-Koordinate durch Achsfehler des Roboters .	30
Abbildung 3-9: Rauschquellen im Signalpfad einer digitalen Kamera.....	31
Abbildung 3-10: Ablenkung im transmittierten Strahl.....	36
Abbildung 4-1: Laserauftragschweißsystem mit Triangulationssensor	38
Abbildung 4-2: Detailansicht des Triangulationssensors	39
Abbildung 5-1: Der Postprozessor scanCONTROL Configuration Tool 5.1	45
Abbildung 5-2: Abschattungsprüfstrecke.....	53
Abbildung 5-3: CAD-Modell der geschweißten Kontur, Ergebnis der Schweißung.....	54
Abbildung 5-4: Aufgetragene Kontur mit 20 Lagen	59
Abbildung 5-5: Schematischer Ablauf der Kontur- und Lagen-Offseterkennung.....	60
Abbildung 6-1: Brechungsindexgradient im Messbereich	62
Abbildung 7-1: Verlauf der Profilhöhe Prüfkörper 1 - sandgestrahlt.....	68
Abbildung 7-2: Verlauf der Profilhöhe Prüfkörper 2 - geschliffen	68
Abbildung 7-3: Verlauf der Profilhöhe Prüfkörper 3 - poliert	69
Abbildung 7-4: Verlauf der Profilhöhe Prüfkörper 4 - feingeschliffen	69
Abbildung 7-5: Verlauf der Profilhöhe Prüfkörper 5 - gummiert	70
Abbildung 7-6: Verfolgung einer Klebespur	70
Abbildung 7-7: Verlauf der Profilhöhe Bewegungsprofil Linear Messbereich Ende.....	74
Abbildung 7-8: Verlauf der Profilhöhe Bewegungsprofil Linear Maximal Geschwindigkeit.	74
Abbildung 7-9: Verlauf der Profilhöhe Bewegungsprofil Rampe.....	75
Abbildung 7-10: Verlauf der Profilhöhe Bewegungsprofil Dreieck	75

Abbildung 7-11: Verlauf der Profilhöhe Bewegungsprofil Kurve.....	76
Abbildung 7-12: Vergleich zwischen Sättigungsdifferenz und Messsignalqualität.....	76
Abbildung 7-13: Vergleich zwischen Berechnungsmethoden	77
Abbildung 7-14: Höhenprofil der Abschattungsprüfstrecke Abschnitt eins	80
Abbildung 7-15: Höhenprofil der Abschattungsprüfstrecke Abschnitt zwei	80
Abbildung 7-16: Detailansicht auf einen Prüfstreckenabschnitt	81
Abbildung 7-17: Verteilung der Maximaltemperatur am Schweißkopf.....	83
Abbildung 7-18: Prozesstemperaturverlauf Messung 1 mit Hitzeschild Messpunkte 1-7	84
Abbildung 7-19: Prozesstemperaturverlauf Messung 2 ohne Hitzeschild Messpunkte 1-7.....	85
Abbildung 7-20: Ergebnis der In-Prozess Konturerfassung aus Messung 2.....	87
Abbildung 7-21: Vergleich der In-Prozess Messung 1	88
Abbildung 7-22: Vergleich der In-Prozess Messung 2	88
Abbildung 7-23: Vergleich der In-Prozess Messung 3	89
Abbildung 7-24: Gemessene Lagenhöhen aus Messung 4.....	90
Abbildung 7-25: Messsignalfluktuation in Abhängigkeit von der Wandhöhe	91

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Optische Konstanten ausgewählter Metalle	25
Tabelle 3-2: Hemisphärische Gesamt-Emissionsgrade normale zur Oberfläche	35
Tabelle 4-1: Einflussfaktoren auf einen Triangulationssensor	43
Tabelle 5-1: Prüfkörper verschiedener Oberflächen Beschaffenheiten.....	47
Tabelle 5-2: Bewegungsprofile	50
Tabelle 5-3: Beschreibung der Abschattungsprüfstrecke.....	53
Tabelle 5-4: Grenzabweichung für Thermoelemente Typ KCB nach DIN 60584-3	54
Tabelle 5-5: Versuchsaufbau der Prozesstemperaturmessung	55
Tabelle 6-1: Brennweitenbestimmung auf Grundlage der Pixelgröße	61
Tabelle 6-2: Brechungsindex für untersuchte Wellenlängen	61
Tabelle 6-3: Veränderung des Reflexionswinkels durch den Brechungsindexgradienten	63
Tabelle 6-4: Messabweichung durch Brechungsindexgradienten 14 μm und 7 μm	64
Tabelle 6-5: Messabweichung durch Brechungsindexgradienten 1,7 μm	65
Tabelle 7-1: Absolute Messergebnisse der Oberflächeneinflüsse.....	67
Tabelle 7-2: Sollwertabweichung der Oberflächeneinflüsse.....	67
Tabelle 7-3: Messabweichungen der Oberflächeneinflüsse	67
Tabelle 7-4: Absolute Messergebnisse der Bewegungsprofile.....	73
Tabelle 7-5: Sollwertabweichung der Bewegungsprofile	73
Tabelle 7-6: Messabweichungen der Roboterkinematik	73
Tabelle 7-7: Messabweichung durch den Linearitätsfehler des Roboters.....	77
Tabelle 7-8: Konturhöhe und dazugehörige Abgeschattete Länge	79
Tabelle 7-9: Maximaltemperaturen der Messungen 1 und 2.....	82
Tabelle 7-10: Mittlere Messabweichungen der In-Prozess Konturerfassung.....	89
Tabelle 7-11: Absolutes Messergebnis der Lagen-Offsetterfassung.....	91
Tabelle A-1: Experimentell bestimmte Werte des Brechungsindex n	112
Tabelle A-2: Längenausdehnungskoeffizient ausgewählter Metalle.....	112

Abkürzungsverzeichnis

AVI	Audio Video Interleave
CAD	Computer Aided Design
CCD	Charged Coupled Device
CMOS	Complementary Metal-Oxide-Semiconductor
C++	ISO genormte Programmiersprache
DIN	Deutsches Institut für Normung
EN	Europäische Norm
ISO	Internationale Organisation für Normung
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
LED	Light Emitting Diode
LIN	Linear
LPA	Laser-Pulver-Auftragschweißen
MATLAB	Programmiersprache der Firma MathWorks
MBA	Messbereich Anfang
MBE	Messbereich Ende
MBM	Messbereich Mitte
P2P	Point to Point
PIXEL	Picture Element/ Bildpunkt
PK	Prüfkörper/ Probenkörper
PSD	Position Sensitive Detector
SLM	Selective Laser Melting
TCP	Tool Center Point
TXT	Textdatei

Nomenklatur

Symbol	Beschreibung	Einheit
a	Gegenstandsweite	mm
a'	Bildweite	mm
A	Amplitude	m
b	Breite	mm
c_0	Lichtgeschwindigkeit im Vakuum	m/s
c_n	Lichtgeschwindigkeit im Medium n	m/s
D'	Brechwert	Dioptrie
D ₁	Asymptote der Δz Koordinate	-
D ₂	Asymptote der δ Koordinate	-
\dot{e}_s	Energiestromdichte	W/m ²
E	Energie	Nm
F'	Brennpunkt	mm
f	Brennweite	mm
h	Höhe	mm
Δh_l	Lagen Höhe	mm
Δh_r	Lagen-Offset in Aufbaurichtung	mm
H _{theoretisch}	Theoretische Aufbauhöhe	mm
I	Strahlungsleistung	Nm
k	Absorptionskoeffizient	1/mm
K	Absorptionskonstante	1/mm
l	Länge	mm
L _A	Abgeschattete Länge	mm
L _{opt}	Optischer Weg	mm
M	Molare Masse	kg/mol
M(T)	Spezifische Ausstrahlung	Nm
n	Brechungsindex	-
Δn	Brechungsindexgradient	-
p	Druck	Pa
\dot{q}	Wärmestromdichte	W/m ²
Q	Wärme	W

\dot{Q}	Wärmestrom	W
r	Radius	mm
R	Reflexionsvermögen	-
R_G	Allgemeine Gaskonstante	pV
R_z	gemittelte Rautiefe	μm
Δs	Schichtdicke	mm
S	Strecke	m
T	Temperatur	K
U	Spannung	V
v	Geschwindigkeit	m/s
W	Arbeit	Nm
y	Gegenstandsgröße	mm
y'	Bildgröße	mm
z	Koordinate des Messflecks	mm
z_0	Kalibriernullpunkt des Sensors	mm
z_R	Koordinate des Reflexionspunkt am Messfleck	mm
Δz	Abstand zwischen Kalibriernullpunkt und Messfleck	mm
α_k	Wärmeübergangskoeffizient	W/(m ² K)
α_L	Längenausdehnkoeffizient	10 ⁻⁶ /K
β	Abbildungsmaßstab	-
δ	Koordinate auf der Sensormatrix	mm
ε	Emissionsgrad	-
θ	Triangulationswinkel	°
Θ_1	Einfallswinkel	°
Θ_2	Transmissionswinkel	°
Θ_{krit}	kritischer Winkel für Totalreflexion	°
κ	Absorptionsindex	1/mm
λ	Wellenlänge	nm
ρ	Dichte	g/cm ³
σ	Stefan Boltzmann Konstante	W/m ² K ⁴
Φ	Gegenwinkel zum Triangulationswinkel	°

1 Einleitung

Additive Fertigungsverfahren nehmen in verschiedenen Bereichen der Industrie einen immer größeren Stellenwert ein. Insbesondere in der Luft- und Raumfahrt und der Medizintechnik wächst das Interesse an topologieoptimierten Leichtbauteilen, deren komplexe Freiformflächen durch traditionelle fertigungstechnische Verfahren oft nicht mehr herstellbar sind. Neben der Neuanfertigung derartiger Bauteile, liegt zudem ein großes wirtschaftliches und technologisches Potential in der Reparatur von sehr teuren und komplexen Bauteilen wie Turbinenschaufeln oder Brennerköpfen aus Wärmekraftwerken mittels auftragender Prozesse.

Neben dem Pulverbettbasierenden Selektiven Laserschmelzen (SLM) spielt insbesondere das Laserauftragschweißen aufgrund kurze Prozesszeiten und effiziente Materialausnutzung eine wichtige Rolle. Das Laserauftragschweißen ist ein komplexes Fertigungsverfahren, bei dem Produktqualität, Prozessstabilität und Reproduzierbarkeit stark von den eingesetzten Prozessparametern beeinflusst werden. Insbesondere die eingebrachte Laserenergie, die zugeführte Pulvermenge, die Vorschubgeschwindigkeit sowie der Lagen-Offset in Aufbauhöhe, müssen daher ständig überwacht und abgestimmt werden. Die Regelung dieser Parameter erfolgt nach heutigen Industriestandards zumeist im Open-Loop, wobei die Bauteile im Post-Prozess vermessen und die Prozessparameter, entsprechend der Maßhaltigkeit, angepasst werden. Die damit verbundene, aufwändige Handarbeit führt zu Ausschussproduktion, langen Prozesszeiten und hohen Personalkosten. Um dieser Problematik entgegenzuwirken und den Automatisierungsgrad des Laserauftragschweißverfahrens zu erhöhen, muss das Verfahren durch die Integration einer On-Line Überwachung der Prozessparameter mit geschlossenem Regelkreis ergänzt werden. (Abbildung 1-1)

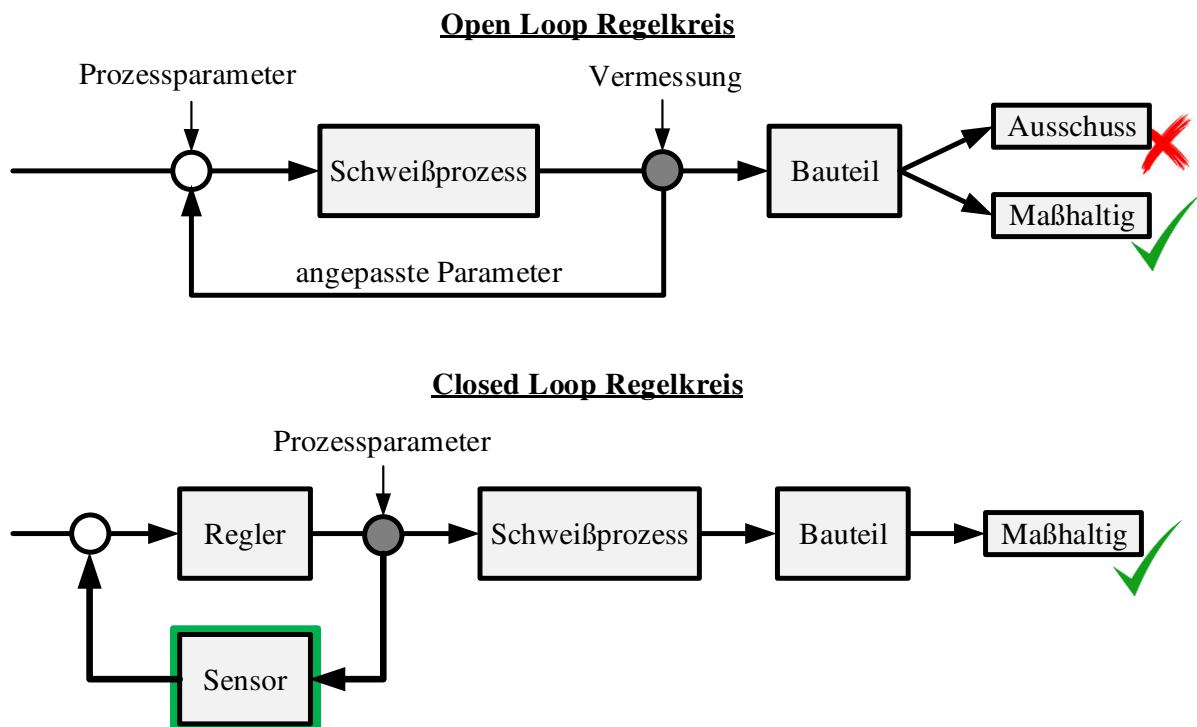


Abbildung 1-1: Offener- und geschlossener Regelkreis schematisch dargestellt

Für die Konturerfassung der aufgetragenen Geometrien im Prozess bietet sich die laseroptische Vermessung mittels Triangulation als berührungsloses Verfahren an. Die Messgenauigkeit eines Triangulationssensors wird jedoch von diversen Prozess- und Umwelteinflüssen, wie der Wärmestrahlung des Schmelzbades, dem Positionsfehler des eingesetzten Industrieroboters oder der Oberflächenbeschaffenheit der Schweißraupe entscheidend beeinflusst. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit sollen die Prozess- und Umwelteinflüsse, die während des Laserauftragschweißens auftreten, identifiziert werden. Anschließend soll die Signifikanz der Einflüsse auf die Messgenauigkeit eines Triangulationssensors experimentell und analytisch bewertet werden. Aus den gewonnenen Erkenntnissen werden abschließend Lösungsansätze entwickelt, um die Messgenauigkeit eines Triangulationssensors bei der In-Prozess-Konturerfassung zu erhöhen.

Anknüpfend an die oben skizzierte Ausgangssituation und die zu klärende Forschungsfrage, wird im Stand der Technik zunächst ein umfassender Überblick über relevante Technologien und Begrifflichkeiten der Konturerfassung mittels Triangulationssensoren beim Laserauftragschweißen gegeben. Darauf aufbauend werden die zu erwartenden Prozesseinflüsse identifiziert und erläutert. Es folgt eine Beschreibung des untersuchten Systems aus Laserschweißzelle, Industrieroboter und Triangulationssensor sowie eine Definition der angestrebten Genauigkeitsgrenzen. Basierend auf der Problemanalyse und einer Einschätzung der messtechnischen Signifikanz der Einzeleinflussfaktoren, werden verschiedenen Versuchsaufbauten zur experimentellen Validierung der Theorie entwickelt. Zusätzlich erfolgt eine ausführliche mathematische Bestimmung der Messsignalverschiebung durch den inhomogenen Brechungsindex im Messbereich des Sensors. Nach der Darstellung und Bewertung der Versuchsergebnisse wird eine Optimierungsstrategie entwickelt, um den Prozesseinflüssen entgegenzuwirken und somit das Messergebnis einer In-Prozess-Konturerfassung mittels Triangulationssensor zu optimieren, damit er sinnvoll in einen geschlossenen Regelkreis integriert werden kann. Abschließend wird die Arbeit kurz zusammengefasst und ein Ausblick auf weitere Ansatzpunkte für die Sensorintegration in das Verfahren wird gegeben.

2 Stand der Technik

In diesem Kapitel wird der Stand der Technik im Bereich der In-Prozess-Konturerfassung während des Laserauftragschweißens mittels optischer Triangulationssensoren beschrieben. Zunächst werden die Grundlagen der geometrischen Optik und die darauf basierende Funktionsweise von optischen Triangulationssensoren erläutert. Anknüpfend daran folgt eine Beschreibung des roboterbasierten Laserauftragschweißverfahrens, sowie eine kurze Betrachtung von Sechs-Achs-Industrierobotern und ihren verschiedenen Bahnplanungsmethoden. Abschließend werden die drei Arten der Wärmeübertragung und diejenigen Eigenschaften von Metallen beschrieben, welche für eine Vermessung mittels optischer Triangulation relevant sind. Ergänzend folgt eine kurze Betrachtung des thermoelektrischen Effektes und der Temperaturmessung mittels Thermoelementen, die für die Ermittlung der Prozesstemperaturen eingesetzt werden.

2.1 Grundlagen der geometrischen Optik

Laser Triangulationssensoren sind optoelektrische Instrumente, deren Messprinzip auf den Gesetzen der geometrischen Optik basiert. Daher werden in diesem Abschnitt die notwendigen physikalischen Grundlagen zu Reflexion, Brechung sowie der Abbildung mit dünnen Linsen erklärt, die für das Verständnis der Funktionsweise von Triangulationssensoren vorausgesetzt werden.

2.1.1 Reflexion und Brechung

Trifft ein Lichtstrahl auf eine ebene Fläche, wird er reflektiert. Der einfallende Strahl und das Lot liegen in einer Ebene und es gilt das Reflexionsgesetz *Einfallswinkel = Austrittswinkel*, wobei dieser Zusammenhang für alle Wellenlängen gleichermaßen gilt. Trifft das Licht auf die Grenzfläche zweier Medien, wird nur ein Teil des Lichts reflektiert, während ein anderer Teil in das Medium eintritt. Die Ausbreitungsrichtung des transmittierten Strahls ändert sich und er wird gebrochen. Ursache für diese Richtungsänderung ist die geänderte Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes in verschiedenen Medien, welche durch den Brechungsindex ausgedrückt wird. [Löf2012], [Kuc2011], [Mes2008]

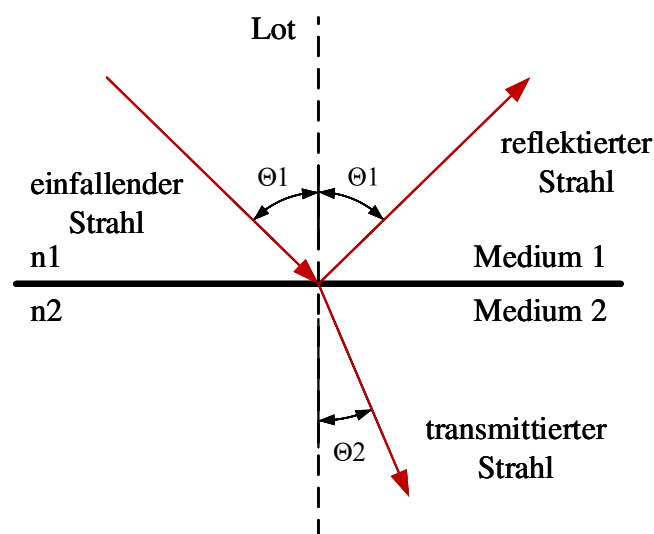


Abbildung 2-1: Reflexion und Brechung eines Strahls am Übergang zwischen zwei Medien

Brechungsindex

Der Brechungsindex bezeichnet das Verhältnis der Phasengeschwindigkeit des Lichtes im Vakuum zur Phasengeschwindigkeit im optischen Medium. Er ist gleich dem Verhältnis der Wellenlänge im Vakuum zu der im optischen Medium. Ausgedrückt wird er in der dimensionslosen Zahl n . Das Medium mit dem höheren Brechungsindex wird als optisch dichter bezeichnet. [LüPo2010], [Kuc2011], [HeHe2013]

Daraus ergeben sich folgende Zusammenhänge:

$$n = \frac{c_0}{c} = \frac{\lambda_0}{\lambda} = \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} \quad (2.1)$$

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{c_1}{c_2} = \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} \quad (2.2)$$

Der Brechungsindex ist wellenlängenabhängig und nimmt im Normalfall mit wachsender Wellenlänge ab. Dieser Zusammenhang wird als Dispersion bezeichnet. Ein Medium, in dem der Brechungsindex keine Abhängigkeit von der Wellenlänge zeigt, wird als dispersionsfrei bezeichnet [Löf2012]. Da die Dispersion, insbesondere in Fluiden, stark von deren Zusammensetzung und dem Temperaturbereich abhängt, existiert keine einheitliche Dispersionsformel. Insbesondere für atmosphärische Luft wurden hierzu ausführliche theoretische Betrachtungen angestellt, die in [Owe1967], [Edl1966] und [BiDo1993] nachzulesen sind. In der Praxis kann insbesondere für trockene Luft auf experimentell ermittelte Tabellenwerte zurückgegriffen und für die benötigte Wellenlänge interpoliert werden. Umfangreiche Tabellenwerke sind beispielsweise [HeHe2013] zu entnehmen, welche der Arbeit auszugsweise in Tabelle A-1 angehängt sind.

Das Reflexionsvermögen eines Materials beschreibt das Verhältnis von reflektierter zu einfallender Lichtintensität. Bleiben die Moleküle eines gasförmigen Körpers unverändert, sprich ohne Dissoziation, Anregung oder Deformierung, gilt nach der Lorenz-Lorentz Formel:

$$R = \frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} * \frac{1}{\rho} = const. \quad (2.3)$$

Es lässt sich demnach eine Korrekturfunktion für abweichende Temperaturen ableiten. Aus den Verhältnissen ergibt sich mit den experimentell ermittelten Werten $n_{p_0}^{T_0}$ bei Temperatur T_0 , Druck p_0 und Dichte ρ_0 :

$$\frac{n_{p_1}^{T_1} - 1}{n_{p_0}^{T_0} - 1} = \frac{\rho_{p_1}^{T_1}}{\rho_{p_0}^{T_0}} \quad (2.4)$$

Für Luft ergibt sich aus der allgemeinen Gasgleichung mit der individuellen Gaskonstante für trockene Luft $R_G = 281,05 \frac{J}{kg \cdot K}$

$$\rho_{Luft} = \frac{p}{R_G * T} \quad (2.5)$$

Zusammengeführt und umgeformt ergibt sich die Korrekturformel: [HeHe2013], [Owe1967], [Edl1966], [BiDo1993]

$$n_{p_1}^{T_1} = 1 + \left[\frac{p_1 T_0}{p_0 T_1} * (n_{p_0}^{T_0} - 1) \right] \quad (2.6)$$

Prinzip von Fermat

Das Licht erfährt beim Durchqueren eines Mediums eine Ablenkung, die durch den zuvor beschriebenen Brechungsindex n ausgedrückt wird. Da stets gilt, dass $n > 1$, ist der somit zurückgelegte optische Weg \mathcal{L}_{opt} länger als die geometrische Strecke s .

$$\mathcal{L}_{opt} = n * s \quad (2.7)$$

Das Fermat'sche Prinzip besagt, dass die Lichtstrahlen beim Durchqueren eines Mediums den kürzesten optischen Weg einschlagen. Für die optische Weglänge entlang eines Vektors \overline{AB} , auf welcher der Brechungsindex vom Ort r abhängt, gilt daher: [Löf2012], [Mes2008], [STB2008]

$$\mathcal{L}_{opt} = \int_A^B n(r) ds = \min \quad (2.8)$$

Inhomogener Brechungsindex

Der Brechungsindex einer Materie ist gemeinhin räumlich inhomogen und unterliegt kontinuierlichen Schwankungen, die sich entsprechend auf den optischen Weg auswirken. Aus (2.8) lässt sich die allgemeine Strahlengleichung der Optik herleiten.

$$\frac{d}{ds} \left(n \frac{dx}{ds} \right) = \frac{\partial n}{\partial x}, \quad \frac{d}{ds} \left(n \frac{dy}{ds} \right) = \frac{\partial n}{\partial y}, \quad \frac{d}{ds} \left(n \frac{dz}{ds} \right) = \frac{\partial n}{\partial z} \quad (2.9)$$

$$\frac{d}{ds} \left(n \frac{dr}{ds} \right) = \nabla n \quad (2.10)$$

Dabei stellt ∇n den Gradienten des Brechungsindex n mit den kartesischen Komponenten $\frac{\partial n}{\partial x}, \frac{\partial n}{\partial y}, \frac{\partial n}{\partial z}$ dar. In der Praxis kann angenommen werden, dass der Strahl nahezu parallel zur z-Achse verläuft. Damit kann die paraxiale Näherung $ds \approx dz$ angenommen werden, womit sich (2.9) vereinfachen lässt. [STB2008], [Mes2008]

$$\frac{d}{dz} \left(n \frac{dx}{dz} \right) \approx \frac{\partial n}{\partial x}, \quad \frac{d}{dz} \left(n \frac{dy}{dz} \right) \approx \frac{\partial n}{\partial y} \quad (2.11)$$

In der folgenden Abbildung 2-2 sind diese Zusammenhänge illustriert.

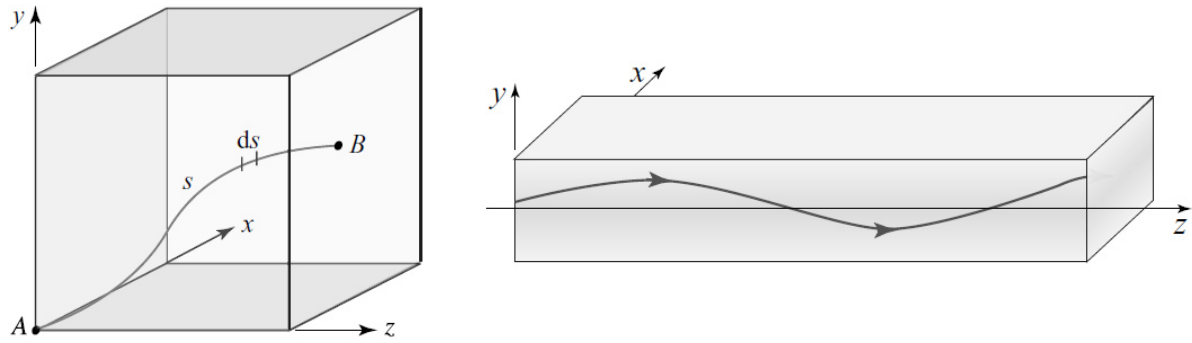


Abbildung 2-2: Links: die Bahn des Lichtstrahls wird parametrisch durch drei Funktionen $x(s)$, $y(s)$ und $z(s)$ beschrieben. Rechts: Der Weg eines paraxialen Strahls im Medium mit variablen Brechungsindex wird beschrieben durch zwei Funktionen $x(z)$ und $y(z)$. modifiziert nach [STB2008]

Streureflexion und Totalreflexion

Das allgemeine Reflexionsgesetz *Einfallswinkel = Austrittswinkel* gilt nur für einen idealisierten Grenzfall mit perfekt reflektierender Oberfläche. Auf realen Oberflächen wird das auftreffende Licht durch Unebenheiten diffus gestreut (Abbildung 2-3). Diese Art der Lichtstreuung nennt man Streureflexion [LüPo2010]. Nach dem in Gleichung (2.1) und (2.2) aufgestellten Brechungsgesetz werden auftretende Strahlen beim Übergang vom optisch dichteren ins optisch dünnere Medium vom Lot weggebrochen. Bei wachsendem Einfallswinkel θ_1 wird der Austrittswinkel θ_2 irgendwann zu 90° , wodurch keine Strahlen mehr austreten können. Diesen Fall nennt man Totalreflexion. Er findet Anwendung, beispielsweise bei der Umlenkung von Lichtstrahlen in Prismen und Lichtwellenleitern [Löf2012]. Der kritische Winkel bei dem eine Totalreflexion auftritt lässt sich berechnen aus:

$$\theta_{\text{krit}} = \arcsin \frac{n_2}{n_1} \quad (2.12)$$

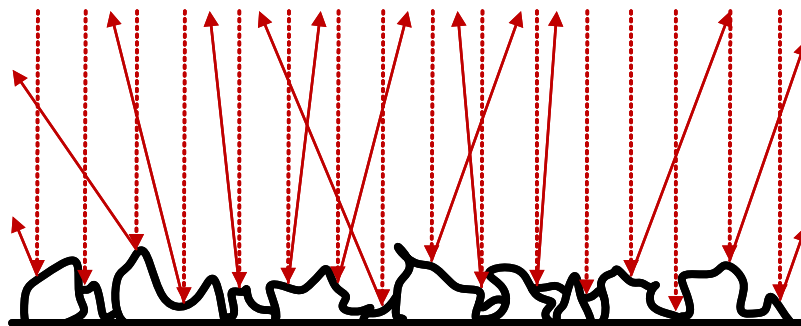


Abbildung 2-3: Streureflexion aufgrund von Unebenheiten auf einer realen Oberfläche

2.1.2 Abbildung mit sphärischen Linsen

Sphärische Linsen sind kugelförmige Oberflächen, die Medien mit unterschiedlichen Brechzahlen voneinander trennen. Man unterscheidet zwischen Sammellinsen, welche in der Mitte dicker sind als am Rand (konkave Linsen) und Zerstreuungslinsen, welche in der Mitte dünner sind als am Rand (konvexe Linsen). Beim Durchlaufen der Linse werden die Lichtstrahlen zweimal gebrochen. Da bei dünnen Linsen, deren Dicke gegenüber dem Krümmungsradius der Kugelfläche klein ist, fallen die Hauptebenen der Linse zusammen und liegen in der Mittellinie wie in Abbildung 2-4 gezeigt. Für die Anwendungsfälle in dieser Arbeit werden nur dünne, bikonkave Linsen betrachtet.

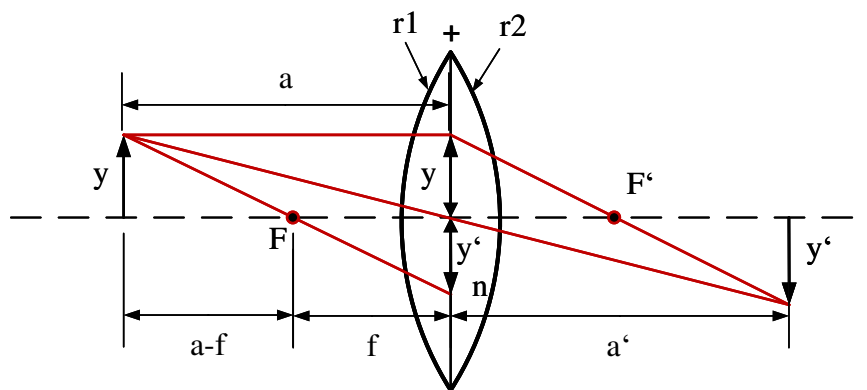


Abbildung 2-4: Strahlengang für die Brechung an einer dünnen Linse

Strahlen, die parallel zur optischen Achse durch eine Konkavlinse treten werden im Brennpunkt F' gesammelt. Sein Abstand von der Linse heißt Brennweite f' [Kuc2011].

Die Brennweite einer dünnen Linse lässt sich bestimmen durch:

$$\frac{1}{f'} = D' = \left(\frac{n}{n_M} - 1 \right) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (2.13)$$

Dabei ist n der Brechungsindex des Linsenmaterials, n_m der Brechungsindex des umgebenden Mediums, r_1 und r_2 die Krümmungsradien der linken- und rechten Linsenhälfte und D' der Brechwert in Dioptrie.

Um die Lage und Größe eines durch die Linse erzeugten Bildes zu bestimmen, müssen die Abbildungsgesetze formuliert werden. Diese bestehen aus dem Abbildungsmaßstab β und der Abbildungsgleichung $\frac{1}{f'}$ mit der Gegenstandsgröße y , der Gegenstandsweite a , der Bildgröße y' und der Bildweite a' . [Kuc2011]

$$\beta = \frac{y'}{y} = \frac{a'}{a} \quad (2.14)$$

$$\frac{1}{f'} = \frac{1}{a'} - \frac{1}{a} \quad (2.15)$$

2.2 Optische Triangulationssensoren

Optische, triangulatorische Sensoren werden als Distanzsensoren für verschiedenste industrielle Anwendungsbereiche eingesetzt. Sie eignen sich zur berührungslosen Positionsbestimmung für Roboter ebenso, wie als Profil-Vermessungssysteme in der Qualitätssicherung. Hierzu wird ein Laserstrahl auf eine diffus reflektierende Oberfläche projiziert, welche einen Teil des Lichtes reflektiert [JiLe1989]. Das reflektierte Licht wird durch eine Optik aufgenommen und auf eine Video-Matrix projiziert, welche auf Basis der geometrischen Triangulation eine Positionsbestimmung der Oberfläche ermöglicht. Es werden Muster auf ein Objekt projiziert, deren Abweichungen und Verzerrungen erfasst und analysiert werden können. Man spricht dabei von strukturierter Beleuchtung. Es existieren auch Triangulationssensoren, deren Funktionsprinzip auf gerichteten Reflexionen basiert, in der vorliegenden Arbeit werden jedoch aufgrund des Anwendungsfalles nur Sensoren betrachtet, die auf diffuser Reflexion basieren. Daher wird im Folgenden mit dem Begriff „Triangulationssensor“ stets ein auf diffuser Reflexion basierender, optoelektrischer Sensor bezeichnet. [JiLe1989],[Wol2016],[GaTa2011] Im folgenden Abschnitt wird die Funktionsweise von Laser Triangulationssensoren erklärt.

2.2.1 Geometrische Triangulation

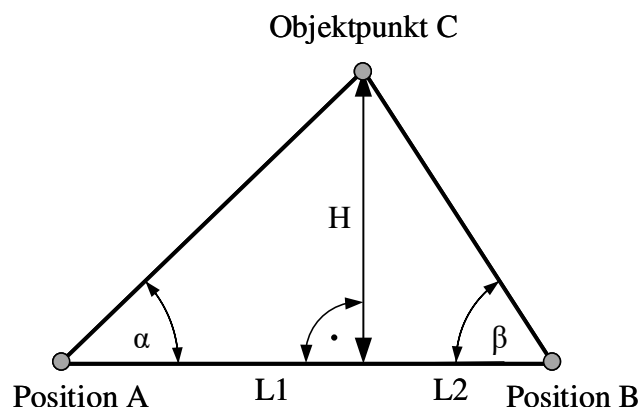


Abbildung 2-5: Geometrische Beziehungen für die triangulatorische Abstandsmessung

Mit Hilfe der allgemeinen trigonometrischen Beziehungen können Seitenlängen und Winkel eines Dreiecks berechnet werden. Im rechtwinkligen Dreieck kann mittels der Tangensfunktion eines Winkels die Länge der An- und Gegenkathete bestimmt werden. Bezogen auf Abbildung 2-5 können folgende mathematische Zusammenhänge formuliert werden:

$$\tan \alpha = \frac{H}{L_1}, \tan \beta = \frac{H}{L_2}$$

$$L = L_1 + L_2 = \frac{H}{\tan \alpha} + \frac{H}{\tan \beta} \quad (2.16)$$

$$H = \frac{L * \tan \alpha * \tan \beta}{\tan \alpha + \tan \beta}$$

Triangulationssensoren basieren auf diesen geometrischen Zusammenhängen. Eine Lichtquelle wirft einen Strahl auf ein Objekt, welches diesen diffus reflektiert (Abschnitt 2.1, Abbildung 2-3) Die zurückgeworfenen Strahlen werden von einem lichtempfindlichen Bauteil detektiert und können auf Basis der oben beschriebenen geometrischen Zusammenhänge ausgewertet werden um den Abstand zum Objekt zu berechnen. [Wol2016]

2.2.2 Aufbau von Triangulationssensoren

Laser Triangulationssensoren bestehen aus verschiedenen optischen und elektronischen Komponenten, deren Zusammenspiel eine Bestimmung des Objektabstandes ermöglichen. Im Folgenden werden die einzelnen Elemente des Messsystems beschrieben. Ein schematischer Messaufbau ist in Abbildung 2-6 dargestellt.

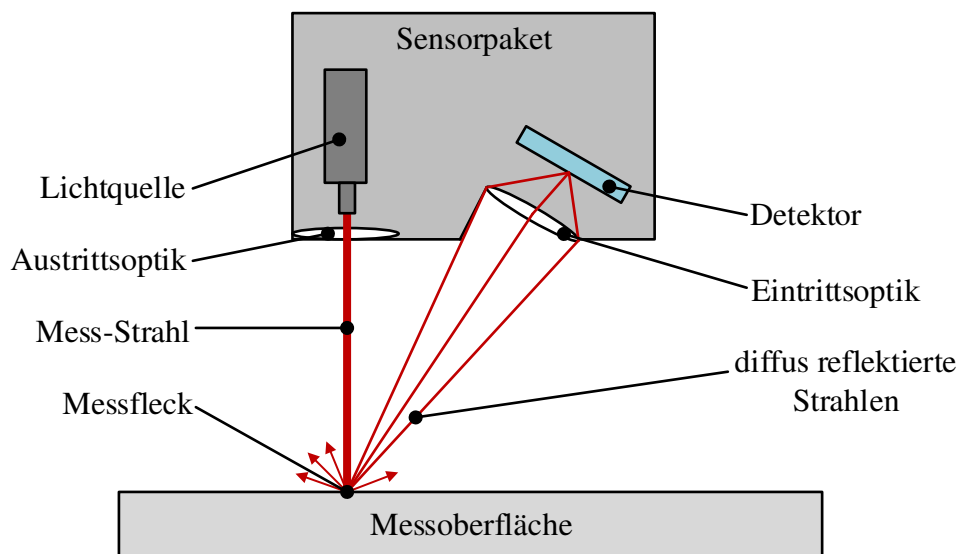


Abbildung 2-6: Schematischer Aufbau triangulatorischer Messsysteme

Lichtquellen

Ein auf strukturiertem Licht basierendes, optisches Messsystem besteht aus einem Projektor und einer oder mehreren Kameras. Um einen gerichteten Lichtstrahl zu generieren, werden als Lichtquellen in der Regel Leuchtdioden (LED) oder Laser eingesetzt, wobei eine Laserquelle mehrere Vorteile gegenüber der LED aufweist. Aufgrund der hohen Helligkeit des Lasers, ist der Sensor weniger störanfällig durch das Umgebungslicht. Zudem emittiert ein Laser einfarbiges Licht in einem sehr geringen Frequenzband. Durch den Einsatz von optischen Filtern vor dem Detektor, können die Einflüsse von Fremdlichtquellen noch weiter reduziert werden. [Wol2016]

Zudem ist die Anordnung der Projektionsmuster entscheidend für die Messeigenschaften des Systems. Man unterscheidet zwischen Punkt-, Linien-, und Mehrlinien Triangulation. Ein Messsystem mit einem Laser-Punkt-Sensor hat eine sehr hohe Messgenauigkeit, kann jedoch zu jedem Zeitpunkt nur einen einzigen Messpunkt auswerten. Ein System mit einem Mehrlinien Sensor hat hingegen Schwierigkeiten, auf komplexen Geometrien die Mehrdeutigkeiten der diffusen Reflexionen mehrerer Lichtquellen auszuwerten. Aufgrund der Nachteile dieser Anordnungen werden in der Praxis vorrangig Linien Triangulationssensoren

eingesetzt, welche einen Laserstrahl auf eine Linie mit mehreren Einzelmesspunkten aufweiten. Jedem Messpunkt kann eine x- und eine z-Koordinate zugewiesen werden. Um eine Koordinate in y-Richtung zu erhalten, muss der Sensor mit einem externen Mechanismus und mit definiertem Vorschub über die zu vermessende Oberfläche bewegt werden, wozu sich beispielsweise ein Industrieroboter eignen. [GaTa2011]

Detektoren

Die Detektion des reflektierten Lichtes kann durch verschiedene Sensortypen realisiert werden. Neben dem Einsatz analoger PSD Sensoren (Position Sensitive Detector), wird häufig auf ein diskretes Detektoren-Array, bestehend aus positionsempfindlichen, optoelektrischen multi-element Sensoren wie CCD (Charged Coupled Device) oder CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor) zurückgegriffen [GaTa2011], [NSL2014]. Im Folgenden werden die verschiedenen Sensortypen genauer beschrieben.

PSD Sensor

Ein PSD Sensor besteht aus einer lichtempfindlichen Fläche, auf der durch den auftreffenden Lichtstrahl ein elektrischer Strom erzeugt wird, welcher in Teilströmen zu den Rändern des Elementes fließt. [Wol2016] Durch die Verhältnisse der Stromstärken an den Rändern kann die Position des auftreffenden Lichtes bestimmt werden. Dieses analoge Messprinzip erlaubt sehr hohe Abtastraten von bis zu 200 kHz und eine hohe Messgenauigkeit [GaTa2011]. Ein PSD Sensor misst jedoch nur den Mittelpunkt des gesamten einfallenden Lichtes und ist somit nicht in der Lage, ein Profil darzustellen.

CCD Sensor

CCD Sensoren sind lichtsensitive Halbleiter, die in ein Gitter aus diskreten Einzelmessflächen aufgeteilt sind, welche als Pixel bezeichnet werden. Die Anordnung der Pixel kann in einer Zeile oder einer Matrix realisiert werden. Je nach Art des verwendeten Halbleitermaterials und Dotierung absorbieren CCDs innerhalb eines bestimmten Bereichs des elektromagnetischen Spektrums Photonen und generieren elektrische Ladungen, die proportional zur Intensität der eintreffenden Photonen sind [NSL2014]. Trifft ein Lichtquant auf einen Pixel, wird eine Ladung aufgebaut und gespeichert. Treffen weitere Lichtquanten auf denselben Pixel, erhöht sich die Ladungsintensität. Die Positionsbestimmung eines eintreffenden Lichtstrahls auf einem rechteckigen CCD Element ist schematisch in Abbildung 2-7 dargestellt. In der Praxis werden mehrere solche rechteckigen Elemente zu einer Sensormatrix zusammengesetzt.

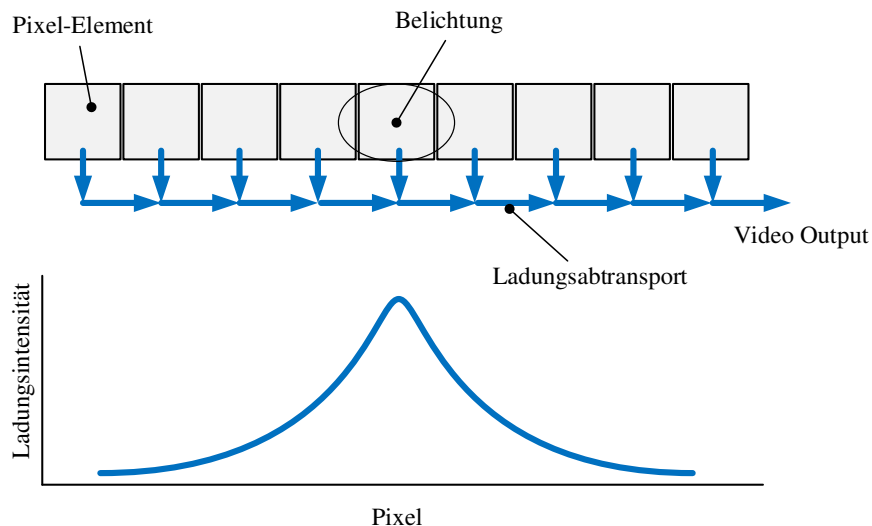


Abbildung 2-7: Positionsbestimmung auf einem CCD Element, modifiziert nach [GaTa2011]

Abtastzyklus

Ein Abtastzyklus einer CCD-Matrix verläuft in zwei Phasen:

1. Belichtungsphase (Integrationsphase)
 - Einfall von Photonen auf die Pixelfläche, Absorption der Photonen und Erzeugung von Ladungsträgern
 - Elektronen werden in Pixeln gesammelt (integriert). Die erzeugte Ladung ist proportional zur einfallenden Lichtmenge
2. Ladungstransport (Auslesephase)
 - Mittels extern erzeugter Taktspannung werden die Ladungen der einzelnen Pixel in Schieberegister übernommen
 - Sequentieller Ladungstransport vom Pixel über Transferegates zum Ausleseverstärker
 - Wandlung der Ladungen am Ausleseverstärker in eine Spannung mit Signalverstärkung, zeilenweises Auslesen der Bildinformationen
 - Nach dem Auslesen werden die Photonenkapazitäten gelöscht und die Integrationsphase kann neu gestartet werden.

CCD Sensoren haben eine geringere Abtastrate als PSD Sensoren und erfordern einen größeren Rechenaufwand im Post-Prozess. Der Vorteil gegenüber einem PSD Sensor ist jedoch, dass aufgrund der Ladungsverteilung auf die Oberflächeneigenschaften des Messkörpers geschlossen werden kann. Weiterhin können im Post-Prozess Filter angewendet werden, die den Sensor weniger anfällig für Störgrößen machen. [GaTa2011] [NSL2014]

CMOS Sensor

Ein CMOS Sensor funktioniert nach demselben Messprinzip wie ein CCD, operiert jedoch mit einem nachgeschalteten Verstärker, wodurch er weniger Energie für seine Messungen benötigt. Anstelle des oben beschriebenen, getakteten Ladungstransfers erfolgt die Ladungs-Spannungs-Wandlung direkt am Pixel, wodurch jeder Pixel direkt per Zeile und Spalte adressierbar ist. Das Auslesen der Bildinformation kann damit schneller erfolgen als bei einem CCD Sensor. Ein CMOS Sensor ist aufgrund des ungünstigen Verhältnisses zwischen fotoempfindlicher Fläche zur gesamten Pixelfläche weniger lichtempfindlich und liefert daher im allgemeinen schlechtere Messergebnisse mit höherem Messsignalrauschen als ein CCD Sensor. Dies kann jedoch durch Post-Prozess Algorithmen und den Einsatz von Mikrolinsen ausgeglichen werden. Durch diese Entwicklungen liefern moderne CMOS Sensoren bei geringerem Preis und höheren Abtastraten eine gleichwertige Messqualität wie CCD Sensoren. Daher werden heute für Industriekameras zumeist CMOS Sensoren eingesetzt. [GaTa2011], [NSL2014]

Eintritts- und Austrittsoptik

Zur Fokussierung des Mess-Lasers bei der Projektion auf die Messoberfläche und zur Fokussierung des diffus reflektierten Lichtstrahls auf der CMOS-Sensormatrix, werden dünne, bikonkave Linsen (Abschnitt 2.1.2) eingesetzt, deren Brennweite entsprechend der Pixelgröße und Anzahl ausgewählt wird. Typische Brennweiten für den Einsatz bei Laser Triangulationsensoren befinden sich im Bereich zwischen 5 und 55mm. [NSL2014]

2.2.3 Messprinzip von Triangulationssensoren

Nach den in Abschnitt 2.1 beschriebenen Gesetzen der geometrischen Optik und den bei der Kalibrierung des Sensors vordefinierten Systemparametern der Nullkoordinate z_0 , der dazugehörigen Nullkoordinate auf der Videomatrix δ_0 und dem Triangulationswinkel θ , kann die z-Koordinate des Messpunktes ermittelt werden. Um den gesamten Messbereich scharf abbilden zu können, muss die Scheimpflug-Bedingung eingehalten werden. Diese besagt, dass die Detektorebene, die Ebene der Lichteintrittsoptik und die optische Achse der austretenden Strahlung so angeordnet sein müssen, dass sie sich in einem Punkt schneiden, um eine fokussierte Abbildung über den gesamten Messbereich zu erreichen. (Abbildung 2-8), [Wol2016], [GaTa2011], [JiLe1989]

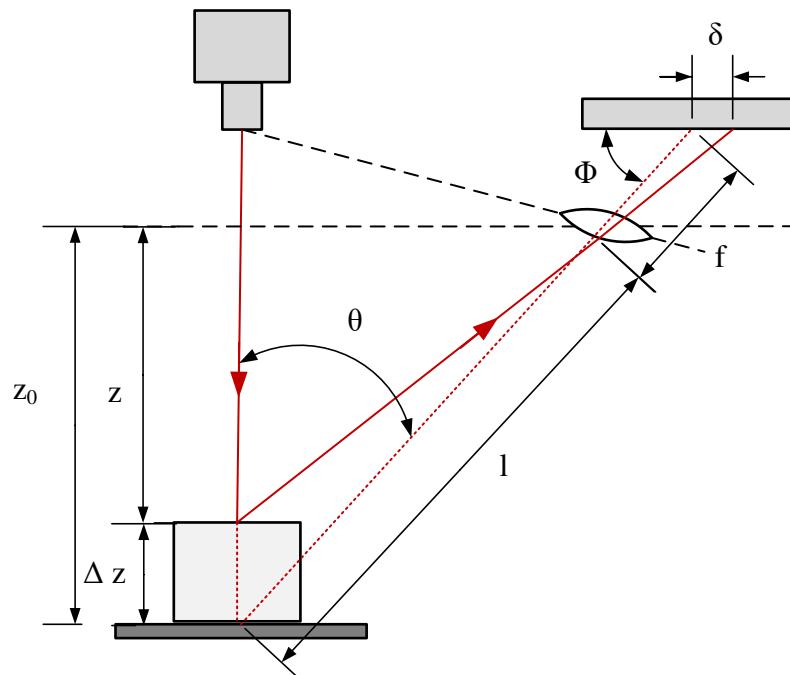


Abbildung 2-8: Messprinzip eines Triangulationssensors mit Anordnung zur Erfüllung der Scheimpflug-Bedingung

Aus den geometrischen Bedingungen ergibt sich der Zusammenhang:

$$\tan \theta = \beta \tan \Phi \quad (2.17)$$

Wobei β den in Abschnitt 2.1.2 eingeführten Abbildungsmaßstab darstellt. Zudem wird definiert, dass:

$$\Delta z = z_0 - z \quad (2.18)$$

Für kleine Δz kann der Zusammenhang $\Delta z/\delta$ linear approximiert werden zu:

$$\delta \approx \frac{f * \sin \theta}{l * \sin \Phi} \Delta z \quad (2.19)$$

$$\Delta z \approx \frac{l * \sin \Phi}{f * \sin \theta} \delta$$

Durch die CMOS Matrix wird eine digitale Bildkoordinate ausgegeben. Mit der Pixelgröße der Matrixelemente s lässt sich die Analoge Beziehung zwischen der geometrischen Koordinate δ und der digitalen Koordinate u herstellen [GaTa2011]:

$$\delta = s * u \quad (2.20)$$

Daraus ergibt sich mit Gleichung (2.20) eingesetzt in (2.19)

$$\Delta z \approx \frac{l * \sin \phi}{f * \sin \Theta} * s * u \quad (2.21)$$

Für große Δz kann die lineare Approximation nicht mehr verwendet werden und es muss eine nichtlineare Beziehung zwischen $\Delta z/\delta$ hergestellt werden.

$$\Delta z = \frac{l \sin \Phi \delta}{f \sin \Theta - \delta \sin(\Theta + \Phi)} = -D_1 \left(1 + \frac{D_2}{\delta - D_2} \right) \quad (2.22)$$

$$\delta = D_2 \left(1 - \frac{D_1}{\Delta z + D_1} \right)$$

$$D_1 = \frac{l \sin \Phi}{\sin(\Theta + \Phi)} \quad (2.23)$$

$$D_2 = \frac{f \sin \Theta}{\sin(\Theta + \Phi)}$$

Dabei sind D_1 und D_2 die Asymptoten der $\Delta z/\delta$ Relationskurve, deren qualitativer Verlauf in Abbildung 2-9 dargestellt ist. Die in Gleichung (2.22) hergestellte Beziehung ist für jede z-Koordinate im Messbereich gültig. Eine ausführliche Herleitung des nichtlinearen Zusammenhanges der $\Delta z/\delta$ Koordinaten ist in [JiLe1989] zu finden.

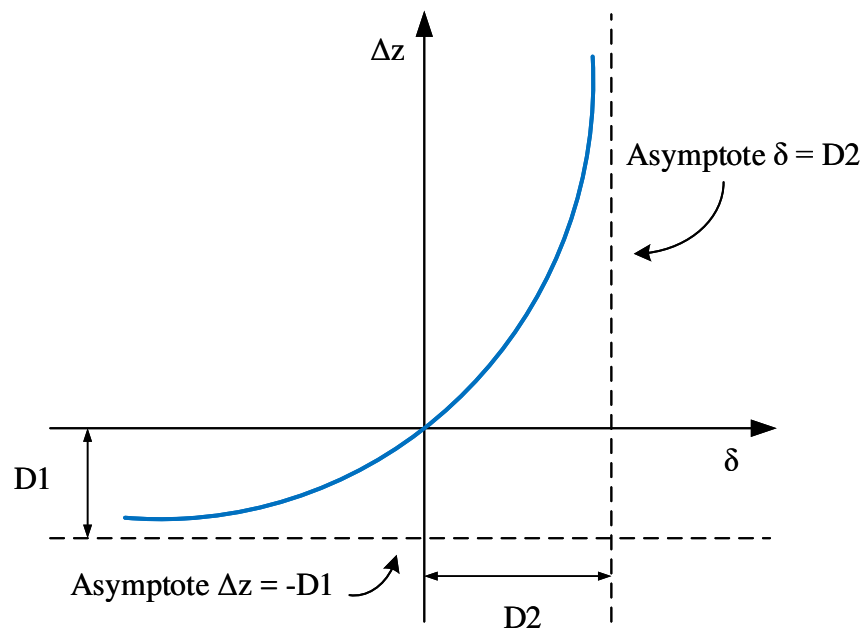


Abbildung 2-9: Nichtlinearer Zusammenhang zwischen Messpunktabweichung Δz und Bildpunktabweichung δ , qualitative Darstellung, modifiziert nach [JiLe1989]

In der Praxis müssen für die Bestimmung der Höhe eines Körpers zwei Punkte bekannt sein. Bei einem Linien Triangulationssensor bietet sich die gleichzeitige Vermessung des Messkörpers und einer Referenzoberfläche an. Hierzu wird aus den Messpunkten auf der Grundplatte auf der das zu vermessende Bauteil aufliegt eine Koordinate $z_{Referenz}$ bestimmt, welche mit der Koordinate auf der Bauteiloberfläche $z_{Bauteil}$ verrechnet werden kann. Durch die Differenz zwischen den Messpunkten $z_{Referenz}$ und $z_{Bauteil}$ wird in der Auswertung die Kantenhöhe Δz bestimmt.

2.3 Roboterbasiertes Laserauftragschweißen

Das Laserauftragschweißen ist ein generatives Fertigungsverfahren und zählt gemäß DIN 8580 sowohl zur Hauptgruppe der urformenden, als auch zur Gruppe der beschichtenden Verfahren. Aus formlosem Stoff wird das Schaffen eines Zusammenhaltes ein fester Körper gefertigt. Dies geschieht durch das Aufbringen einer fest haftenden Schicht auf ein Werkstück. Durch das Übereinanderlegen vieler Schichten ist es möglich, dreidimensionale Bauteile zu erzeugen [DIN2003], [Pop2005]. Dieses Verfahren kann weiter in das Laserauftragschweißen mit zugeführtem Draht und das Laser-Pulver-Auftragschweißen untergliedert werden. Für die vorliegende Arbeit wird lediglich das Laser-Pulver-Auftragschweißen (LPA) (Abbildung 2-10) betrachtet und im Folgenden kurz als Laserauftragschweißen bezeichnet.

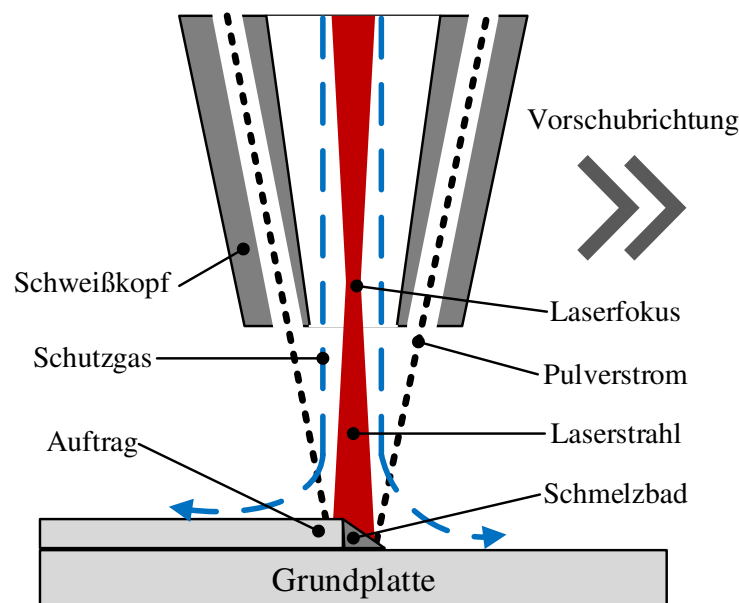


Abbildung 2-10: Schematische Darstellung des Laserauftragschweißens

Beim Laserauftragschweißen wird eine Kontur durch das Aufschmelzen eines Zusatzwerkstoffes und einer dünnen Randschicht des darunterliegenden Materials generiert, wodurch eine schmelzmetallurgische Verbindung zwischen den Schichten entsteht. Die für das Aufschmelzen notwendige Energie wird meist durch einen Festkörperlaser erzeugt, in dessen Fokus die Oberfläche des Grundwerkstoffes sowie des Zusatzmaterials lokal bis zum Schmelzpunkt erhitzt werden. Der Fokuspunkt des Lasers hat einen geringen Durchmesser und führt zu einem entsprechend schmalen Schmelzbad.

Werden Schweißlagen mit einem breiteren Querschnitt gewünscht, muss eine gezielte Fokusschiebung eingesetzt werden, der sich den kaustischen Verlauf des Laserprofils zu Nutze macht. Dabei verschiebt man den Fokuspunkt auf einen Punkt außerhalb der eigentlichen Schweißzone, wodurch der Energieeintrag auf einer größeren Fläche stattfindet und breitere Schweißlagen erzeugt werden. Der Bereich des Lasers in dem das Aufschmelzen des Werkstoffes stattfindet wird als Laser-Spot bezeichnet.

Als Zusatzmaterial wird Metallpulver eingesetzt, welches mittels koaxial am Schweißkopf angeordneter Pulverdüsen zugeführt wird. Um eine axiale Bewegung des Schweißkopfes zu ermöglichen, wird dieser an einem Sechs-Achs-Industrieroboter installiert. Durch den sehr kurzen, lokalen und hohen Energieeintrag des Lasers werden ein geringer Aufmischungsgrad und eine schmale Wärmeeinflusszone erzeugt, wodurch die thermische Belastung des Werkstückes gering bleibt und hohe Aufbauraten erzielt werden können. Die wichtigsten Verfahrensparameter des LPA Prozesses sind Laserleistung, Pulvermassenstrom und Vorschubgeschwindigkeit. [Pop2005], [FaSc2012], [BMB2013]

Typische Abweichungen von der Sollkontur im Bereich von 10 bis 100 Mikrometer sind im einlagigen Bereich zu erwarten [Pop2005]. Beim Generierprozess stellt sich zudem ein additiver Effekt ein, wodurch sich bei ausreichend hoher Lagenzahl Abweichungen der geometrischen Größe im Millimeterbereich ergeben können [Pop2005]. Aus diesem Grund wird in der Praxis eine erzeugte Geometrie zumeist mit einem Aufmaß gefertigt und im Post-Prozess spanend nachbearbeitet, um die geforderten Oberflächen- und Maßtoleranzen zu erreichen. Als Werkstoffe eignen sich eine Vielzahl von Stahl, Titan und Aluminium Legierungen. Ausführliche Tabellenwerke sind dazu beispielsweise [FaSc2012] und [Pop2005] zu entnehmen.

Aufbaustrategie

Der Aufbau einer Kontur wird durch das schichtweise Auftragen einzelner Lagen erzeugt. Der Laser-Spot bewegt sich durch den vom Roboter erzeugten Vorschub im Raum, was als Fluglinie bezeichnet wird. Dabei befindet sich der Laser-Spot auf der Oberfläche der Schweißlage und hat die Fluglinienlänge der aufzutragenden Kontur. Der Lagen-Offset in Aufbaurichtung wird mit Δh_r bezeichnet und gibt die durchschnittliche Aufbaurate an. Anzahl und Länge der Fluglinien sind von der Dimensionierung der aufzubauenden Kontur abhängig. [Sch2017]

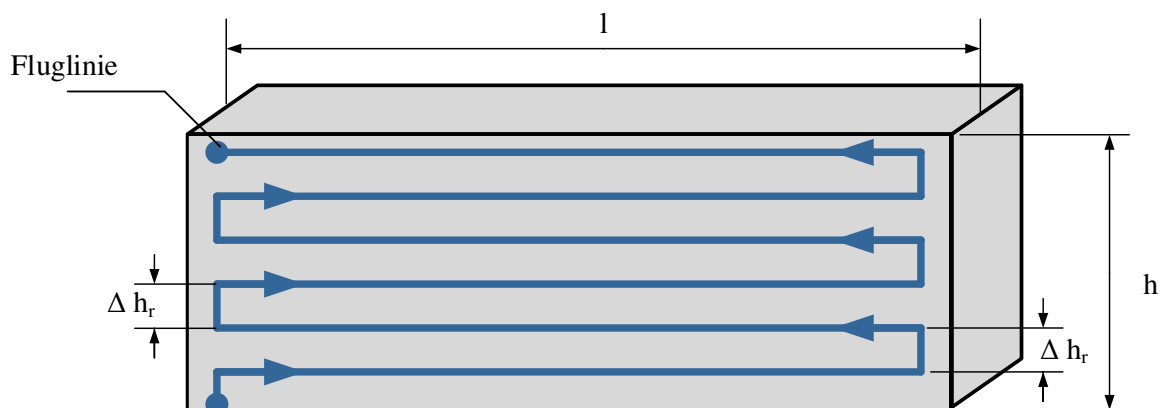


Abbildung 2-11: Aufbaustrategie einer aufzubauenden Kontur, modifiziert nach [Sch2017]

2.4 Sechs-Achs-Industrieroboter

Roboter sind Manipulatoren mit mindestens drei frei programmierbaren Achsen, die sich weiter in Industrieroboter und Serviceroboter unterteilen lassen. Ein Industrieroboter hat die Aufgabe, einen Effektor geeignet im Raum zu führen, wobei der Effektor den Teil des Roboters bezeichnet, der mit der Umgebung in Kontakt tritt [Web2017]. Die Werkzeugspitze wird Tool Center Point (TCP) genannt und ist beim Laserauftragschweißen in der Regel der Laser-Spot. Für schweißtechnische Anwendungen werden Sechs-Achs-Vertikal-Knickarm-Roboter eingesetzt. Die ersten drei Achsen (A1-A3) werden Hauptachsen genannt und sind wesentlich für die Positionierung des TCP im Raum zuständig. Die folgenden drei Achsen (A4-A6) werden Handachsen genannt. Sie sind für die Orientierung des Effektors zuständig und enden an der Roboterflansch, an der das Werkzeug befestigt wird. Der letzte Punkt in der kinematischen Kette des Roboters wird als Endeffektor bezeichnet. Ein schematischer Aufbau eines Industrieroboters mit Position der Achsen ist in Abbildung 2-12 dargestellt.

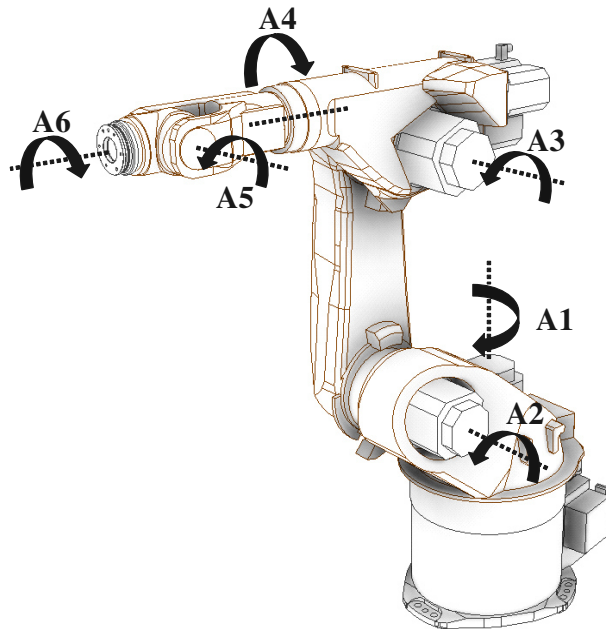


Abbildung 2-12: Sechs-Achs-Industrieroboter mit Achspositionen

Die Position des TCP im Arbeitsraum besteht aus drei geometrischen ($[x \ y \ z]^T$) und drei rotatorischen (A, B, C) Freiheitsgraden und ist mit der Angabe der sechs Achswinkel ($[\Phi_1, \dots, \Phi_6]$) vollständig beschrieben. Eine solche Stellung des Roboters heißt Pose [Web2017]. Der Wechsel zwischen zwei Posen erfolgt mittels verschiedener Bewegungsalgorithmen, wobei für diese Arbeit vor allem die Punkt zu Punkt (P2P) und die Linear Bewegung (LIN) relevant sind. Bei einer P2P Bewegung errechnet die Robotersteuerung selbstständig eine beliebige Trajektorie, zum schnellstmöglichen Erreichen der nächsten Pose, wobei ein Zusammenspiel der Achsbewegungen nur in zeitlicher Hinsicht besteht, sprich die Achsen werden zeitgleich gestartet und zeitgleich gestoppt. Bei einer LIN Bewegung errechnet die Robotersteuerung eine geradlinige Trajektorie, wobei die Achsbewegungen in definierter örtlicher und zeitlicher Abhängigkeit zueinanderstehen. Die erreichbare Geschwindigkeit einer LIN Bewegung ist daher von den Achswinkeln und der Drehgeschwindigkeit der Handachsen abhängig. [Web2017],[Har2014]

2.5 Arten der Wärmeübertragung

Wärme bezeichnet diejenige Energie, die an der wärmedurchlässigen Grenzschicht zwischen zwei thermodynamischen Systemen unterschiedlicher Temperaturen auftritt. Da ein System stets nach dem stabilsten energetischen Zustand strebt, erfolgt ein Ausgleichsvorgang zwischen den Systemen, wobei (Wärme-) Energie ohne Arbeitsleistung von dem System des höheren Energieniveaus auf das System des geringeren Energieniveaus übertragen wird [MaNi2010]. Der Begriff Wärme ist weiterhin definiert durch den ersten Hauptsatz der Thermodynamik: [VDI2013]

$$\Delta E = W + Q + E_M \quad (2.24)$$

Die Energie E ist eine Erhaltungsgröße. Eine Energieänderung ΔE des Systems kann daher nur durch den Transport von Energie über die Systemgrenzen hinweg hervorgerufen werden, welcher durch die Größen Arbeit W , Wärme Q oder Massentransportenergie E_M , erfolgen kann. Der Wärmetransport erfolgt ausschließlich aufgrund von zwischen System und Umgebung vorherrschenden Temperaturdifferenzen und stets in Richtung der abnehmenden Temperatur. Der Wärmestrom \dot{Q} beschreibt die pro Zeiteinheit übertragene Wärme Q durch: [VDI2013]

$$\dot{Q} = \frac{dQ}{dt} \quad (2.25)$$

Weiterhin beschreibt die Wärmestromdichte \dot{q} den Wärmestrom, der je Flächeneinheit über eine Fläche hinweg übertragen wird durch: [VDI2013]

$$\dot{q} = \frac{d\dot{Q}}{dA} \quad (2.26)$$

Allgemein wird zwischen drei Arten des Wärmetransportes unterschieden:

Wärmeleitung

Die Konduktion (Wärmeleitung) stellt einen Energietransport infolge atomarer und molekularer Wechselwirkungen unter dem Einfluss ungleichförmiger Temperaturverteilung dar. Moleküle, die sich auf einem höheren kinetischen Energieniveau befinden, übertragen ihre Energie an die Moleküle niedrigeren Energieniveaus, bis im gesamten thermodynamischen System ein Gleichgewicht hergestellt ist [MaNi2010]. Während die Wärmeleitung in strömenden Fluiden von einer Vielzahl Prozessparametern wie Strömungsgeschwindigkeit und Turbulenzgrad beeinflusst wird, hängt sie in ruhenden Stoffen nur vom Temperaturgradienten und den spezifischen Stoffeigenschaften ab.

Herrscht in einem Stoff ein lokaler Temperaturgradient $\partial T/\partial x$ in Richtung der Ortskoordinate x , ist die Wärmeleitung nur von einem Stoffwert, der Wärmeleitfähigkeit λ_w , abhängig. Nach dem Fourierschen Gesetz ergibt sich damit für den Wärmestrom: [MaNi2010], [Böc2006], [VDI2013]

$$\dot{q} = -\lambda_w \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.27)$$

Konvektion

Die Konvektion (Wärmemitführung) bezeichnet einen massengebundenen Energietransport durch makroskopische Teilchenbewegung in einem strömenden Fluid [MaNi2010]. Durch die Bewegung findet ein Transport von Enthalpie und kinetischer Energie statt. Man unterscheidet weiter zwischen freier-, erzwungener- und Mischkonvektion, bei der sich die beiden Grundkonvektionsarten überlagern. Bei freier Konvektion entsteht Strömung durch Temperaturgradienten im Fluid. Durch die temperaturabhängige Dichte eines Fluides, erfolgen Druckausgleichsvorgänge zwischen den Schichten des Temperaturfeldes, welche zu einer Teilchenbewegung führen. Bei der erzwungenen Konvektion wird die Strömung durch einen äußeren Druckunterschied erzeugt [MaNi2010], [Böc2006]. Die durch Konvektion übertragene Wärmestrommenge wird durch den Temperaturgradienten des umströmenden Fluides T_F , den Temperaturgradienten der Oberfläche des Festkörpers T_W , sowie dem Wärmeübergangskoeffizienten α_k bestimmt. [VDI2013], [Böc2006], [MaNi2010]

$$\dot{q} = \alpha_k(T_W - T_F) \quad (2.28)$$

Wärmestrahlung

Körper emittieren Energie in Form von elektromagnetischen Wellen an ihre Umgebung. Diese Energie wird Wärmestrahlung genannt. Sie ist größer, je höher die Temperatur eines Körpers ist. Von der Oberfläche eines Körpers der Temperatur T kann maximal eine Energiestromdichte \dot{e}_s in Höhe von

$$\dot{e}_s = \sigma T^4 \quad (2.29)$$

emittiert werden. Dabei bezeichnet σ die Stefan-Boltzmann Konstante mit dem Betrag $\sigma = 5,67 * 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$. Ein Körper von dem diese maximale Strahlung ausgeht nennt man schwarzen Körper. Der Schwarze Körper ist ein idealisierter Strahler, der alle auftretende Strahlung absorbiert und weder Transmission noch Reflexion zulässt [VDI2013]. Die Energiestromdichte die von einem schwarzen Körper ausgeht ist gleichzusetzen mit der Wärmestromdichte mit der ein schwarzer Körper Wärme an seine Umgebung abgibt.

$$\dot{q}_s = \dot{e}_s \quad (2.30)$$

Die von einem realen Körper emittierte Wärmestrahlung ist bei gleicher Temperatur geringer als die eines schwarzen Körpers und abhängig von dessen Material und Oberflächenbeschaffenheit. Die Energiestromdichte eines realen Körpers wird beschrieben durch

$$\dot{e}_r = \varepsilon * \dot{e}_s = \varepsilon * \sigma * T^4 \quad (2.31)$$

Dabei beschreibt ε den Emissionsgrad des Körpers, der die Abhängigkeit von Oberflächenbeschaffenheit und Material beinhaltet. Weiterhin ist der Emissionsgrad abhängig von Temperatur, Strahlungsrichtung und Wellenlängenspektrum der Strahlung. [VDI2013], [MaNi2010], [Böc2006]

2.6 Eigenschaften von Metallen

Eine durch Laserauftragschweißen additiv gefertigte Kontur kann aus einer Vielzahl von Stahl, Titan und Aluminium Legierungen bestehen, deren individuelle Stoffeigenschaften merkliche Unterschiede aufweisen. Für die Konturerfassung mittels optischer Triangulation sind dabei vorrangig die Reflektivität und das Absorptionsvermögen der zu vermessenden Oberfläche relevant, da diese Größen die Qualität des diffus reflektierten Mess-Strahls bestimmen. Bei einer In-Prozess-Messung tritt zudem durch die Oberfläche emittierte Wärmestrahlung auf und eine Längenausdehnung des Bauteils auf. In diesem Abschnitt werden daher die für eine Vermessung mittels optischer Triangulation relevanten Stoffeigenschaften von Metallen erläutert.

2.6.1 Thermische Eigenschaften von Metallen

Die von metallischen Körpern emittierte Energiestromdichte e_r lässt sich über Gleichung (2.31) bestimmen. Der Emissionsgrad ε wird dabei maßgeblich von der Temperatur des Körpers beeinflusst. Für die Berechnung der Strahlungswärmeübertragung ist daher insbesondere der hemisphärische Gesamt-Emissionsgrad $\varepsilon(T)$ von Bedeutung. Er wird als das Verhältnis der spezifischen Ausstrahlung $M(T)$ eines realen Körpers zu der spezifischen Ausstrahlung $M^5(T)$ des Schwarzen Körpers bei derselben Temperatur definiert.

$$\varepsilon(T) := \frac{M(T)}{M^5(T)} = \frac{M(T)}{\sigma * (T^4)} \quad (2.32)$$

Ist der hemisphärische Gesamtmissionsgrad bekannt, kann somit die spezifische Ausstrahlung des Körpers berechnet werden. [VDI2013],[Böc2006], [MaNi2010]

$$M(T) = \varepsilon(T) * M^5(T) = \varepsilon(T) * \sigma * T^4 \quad (2.33)$$

Die Werte für ε sind stark von dem betrachteten Material und seiner Oberflächenbeschaffenheit abhängig. In der Praxis wird der hemisphärische Gesamtmissionsgrad für unterschiedliche Materialien und Temperaturen daher aus umfangreichen Tabellenwerken mit experimentell bestimmten Daten entnommen, die beispielsweise in [VDI2013] zu finden sind.

Unter dem Einfluss von Wärme nimmt die Amplitude der schwingenden Moleküle in einem Festkörper zu, wobei sich ihr gegenseitiger Abstand vergrößert. Festkörper dehnen sich daher bei Erwärmung nach allen Richtungen aus [Kuc2011]. Dabei gilt für die Längenänderung die Näherung

$$\Delta l = l_1 \alpha_l \Delta T \quad (2.34)$$

Wobei α_l den Längenausdehnkoeffizienten des Materials beschreibt. Der Längenausdehnkoeffizient ist temperaturabhängig, kann jedoch im Bereich von 0-100 °C mit ausreichender Genauigkeit aus Tabellenwerten bestimmt werden. Im Anhang der Arbeit (Tabelle A-2) sind ausgewählte Beispiele für den Längenausdehnungskoeffizienten von Metallen aus [Kuc2011] dargestellt.

2.6.2 Optische Eigenschaften von Metallen

Das optische Verhalten eines Metalls ist durch die Fortpflanzungsgeschwindigkeit und die Absorption des Lichtes im Metall gekennzeichnet. Aus Gleichung (2.1) lässt sich der Brechungsindex n entnehmen. Zur Kennzeichnung der Absorption des Lichtes im Metall wird der Absorptionskoeffizient k eingeführt, der die Schwächung der Amplitude A der transmittierten Lichtwelle im Metall beschreibt. Die dimensionslose Zahl k kennzeichnet die Amplitudenaufnahme auf einer Strecke der Lichtwellenlänge im Vakuum λ_0 . [HeHe2013]

$$A(x) = A(0)e^{-\frac{2\pi}{\lambda_0} * k * x} \quad (2.35)$$

$A(0)$ und $A(x)$ beschreiben die Amplitude einer ebenen homogenen Welle im Metall am Anfang bzw. am Ende einer durchlaufenden Schicht von der Dicke x . Weiterhin wird der Absorptionsindex κ benötigt. Er kennzeichnet die Amplitudenabnahme auf einer Strecke von der Lichtwellenlänge im Metall λ_M

$$A(x) = A(0)e^{-\frac{2\pi}{\lambda_M} * \kappa * x} \quad (2.36)$$

Zusätzlich ergibt sich die Absorptionskonstante K . Sie kennzeichnet die Abnahme der Strahlungsleistung auf einer definierten Strecke und hat die Dimension $[\frac{1}{mm}]$. [HeHe2013]

$$I(x) = I(0)e^{-K * x} \quad (2.37)$$

Dabei ist $I(0)$ und $I(x)$ die Strahlungsleistung einer ebenen homogenen Welle im Metall am Anfang bzw. am Ende der durchlaufenden Schicht von der Dicke x .

Schlussendlich wird für die vollständige Beschreibung der optischen Eigenschaften eines Metalls das Reflexionsvermögen R benötigt. Es beschreibt das Verhältnis von reflektierter zu einfallender Lichtintensität. Bei senkrechtem Lichteinfall, lässt sich für die Grenzfläche Metall-Luft das Reflexionsvermögen aus den optischen Konstanten berechnen. [HeHe2013]

$$R = \frac{(n - 1)^2 + k^2}{(n + 1)^2 + k^2} \quad (2.38)$$

Es gelten folgende Beziehungen:

$$k = \frac{\lambda_0}{4\pi} K \quad (2.39)$$

$$k = n * \kappa \quad (2.40)$$

$$x = \frac{\lambda_M}{4\pi} K \quad (2.41)$$

$$K = \frac{\rho}{M} * K_M \quad (2.42)$$

Mit $\rho =$ Dichte des Metalls und $M =$ Molare Masse des Metalls

Die Bestimmung der optischen Konstanten erfolgt in der Praxis experimentell und es sind ausführliche Tabellenwerke wie [HeHe2013] vorhanden, aus denen die benötigten Werte interpoliert werden können.

2.7 Thermoelektrischer Effekt

Verbindet man zwei Drähte aus verschiedenen Thermoelektrischen Legierungen miteinander, kann man am freien Ende der Drähte eine Spannung messen. Anhand dieser Spannung lässt sich die Temperaturdifferenz zwischen dem verbundenen und dem freien Ende ermitteln. Die Spannungsunterschiede ergeben sich durch den thermoelektrischen Effekt.

Betrachtet man die Ionen im Kristallgitter eines Metalls, sieht man, dass diese nicht stillstehen, sondern mehr oder weniger stark schwingen. Die Schwingungsamplituden sind temperaturabhängig und werden mit zunehmender Temperatur größer, was eine erhöhte Geschwindigkeit der Einzelatome ausdrückt. Legt man an ein freies Ende eines Drahtes eine Temperatur an, so beginnen die Metallionen zu schwingen und es entsteht eine Geschwindigkeitsdifferenz zwischen warmem und kaltem Metall. Da die Elektronen die Gitterstruktur des Metalls nicht verlassen können, entsteht eine Elektronenüberfüllung im kälteren Bereich des Drahtes, während der warme Teil elektronenärmer wird. Dadurch entsteht eine positive Ladung im warmen- und eine negative Ladung im kalten Teil. Dieses Verhalten wird als Thermoelektrischer Effekt bezeichnet, welcher in Abbildung 2-13 dargestellt ist.

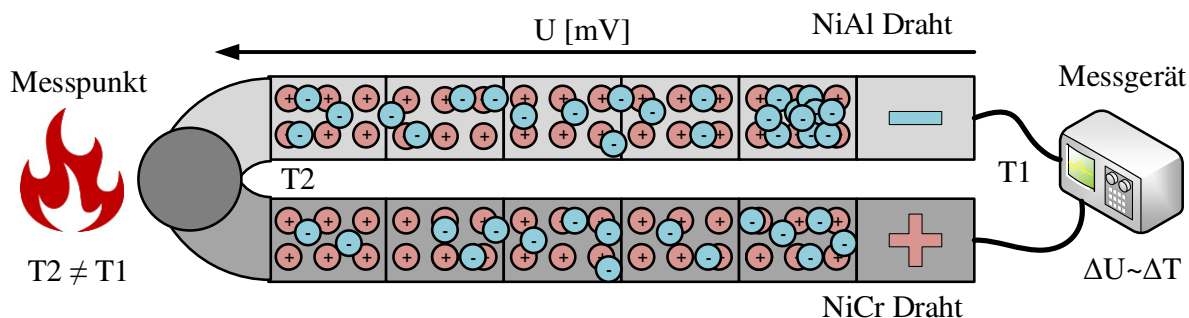


Abbildung 2-13: Thermoelektrisches Messprinzip am Beispiel von NiCr und NiAl Drähten modifiziert nach [Kör1987]

Versucht man die Spannung zu messen, indem man einen Messdraht aus dem gleichen Material verwendet, kann kein Strom fließen, da die Elektronen mit gleicher Geschwindigkeit in beide Drähte geschoben werden. Daher müssen zwei verschiedene thermoelektrische Materialien verwendet werden. Legt man die gleiche Temperatur an zwei Drähte mit unterschiedlichen Atomgewichten an, werden die Drähte aufgrund der verschiedenen großen Elektronenmigrationen eine unterschiedliche Ladung ausbilden. Verbindet man die Drähte an einer Messstelle, dann wirken sie als unterschiedlich starke Elektronenpumpen und eine Differenzspannung kann gemessen werden. Die Kombination aus zwei verbundenen Drähten verschiedener thermoelektrischer Materialien bezeichnet man als Thermoelement. [Kör1987] [Par2016]

Da der thermoelektrische Effekt mathematisch nur schwer zu beschreiben ist, wurde basierend auf der "International Temperature Scale of 1990" (ITS-90) [H. 1990] eine ausführliche experimentelle Vermessung für alle gängigen Thermoelektrischen Materialien durchgeführt und in der internationalen Norm DIN EN 60584-1 [DKE2014] gelistet. Im Anhang A.8 der Arbeit befindet sich beispielhaft ein Datenblatt mit Auszügen aus der Norm. Anhand der am freien Ende der Thermoelemente messbaren Spannungen im mV Bereich, können die am Messpunkt vorherrschenden Temperaturen auf Basis der Tabellenwerte ermittelt werden. Diese Konvertierung wird in der Praxis von einer Messsoftware durchgeführt.

3 Prozesseinflüsse auf Triangulationssensoren

Der Fertigungsprozess des Laserauftragschweißens ist durch eine Vielzahl von physikalischen Prozess- und Umwelteinflüssen geprägt, die einen Einfluss auf die Messgenauigkeit eines optischen Triangulationssensors haben. Um eine In-Prozess-Konturerfassung des Lagen-Offsets zu realisieren und ein exaktes Messergebnis zu erhalten, müssen diese Störgrößen minimiert werden. In diesem Kapitel erfolgt, basierend auf dem Stand der Technik, die Identifikation und Beschreibung der Einflussfaktoren, die während eines Fertigungsprozesses auftreten. Darauf aufbauend folgt in Kapitel 4 die Analyse der identifizierten Faktoren, bezogen auf das untersuchte System. In Abbildung 3-1 ist eine Übersicht der Einflussfaktoren dargestellt.

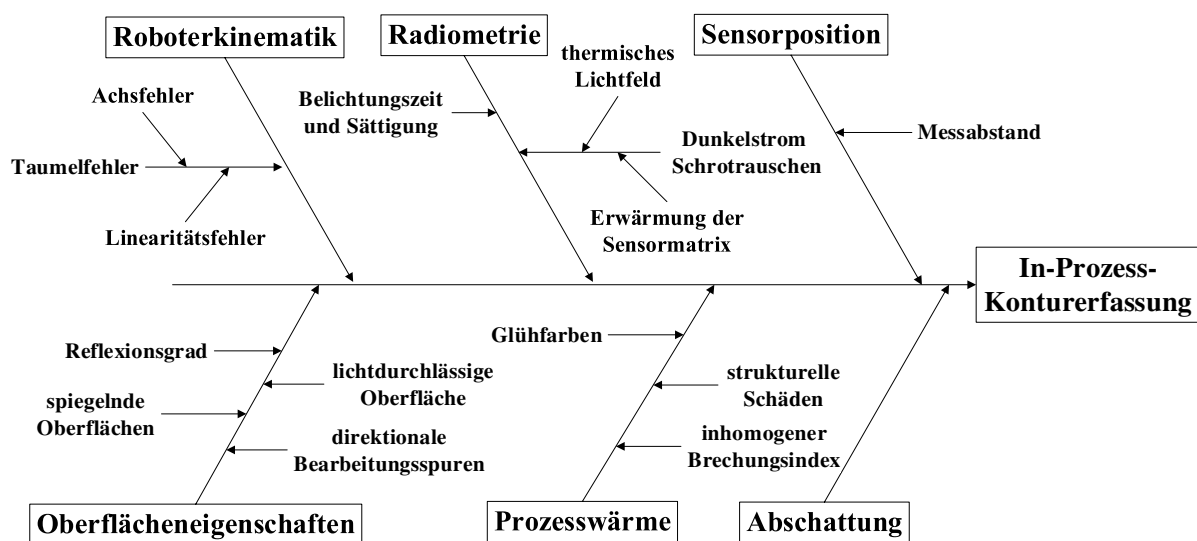


Abbildung 3-1: Prozesseinflüsse während des Laserauftragschweißens

3.1 Bearbeitungszustand und Oberflächenmaterial

Die Eigenschaften der zu vermessenden Oberfläche haben große Einflüsse auf die Messgenauigkeit eines optischen Triangulationssensors. Gemäß der in Abschnitt 2.2 erläuterten Funktionsweise optischer Triangulationssensoren, sind diese auf eine möglichst gleichmäßig diffus reflektierende Messoberfläche angewiesen, damit eine ausreichende Menge Photonen auf die CMOS Matrix auftreffen, um dort die kapazitive Ladung zu bilden. Verschiedene Oberflächenzustände können in der Praxis dafür verantwortlich sein, dass die auftreffenden Lichtstrahlen gerichtet reflektiert werden und somit das Messergebnis verfälschen. Durch unterschiedliche Reflexions, Absorptions, Transmissions und Remissionseigenschaften, sind bei unterschiedlichen bestrahlten Oberflächen signifikante Unterschiede im Messergebnis einer optoelektrischen Konturerfassung zu beobachten. Zusätzlich spielen auch Farbwechsel wie bei Anlauffarben oder Korrosion, Rauigkeitswechsel in der Oberfläche, Wechsel zwischen hellen- und dunklen Oberflächen und der Gleichen mehr eine Rolle. Im Folgenden wird eine Auswahl der messtechnisch besonders signifikanten Oberflächen- und Bearbeitungszustände vorgestellt.

3.1.1 Abrasiv bearbeitete Oberflächen

Beim Laserauftragschweißprozess treten zahlreiche Oberflächeneigenschaften auf, welche zu beachten sind. Die aufgeschweißten Konturen werden im Post-Prozess durch das Drahterosionsverfahren von der Grundplatte gelöst, welche daraufhin durch Zerspanung von Materialresten befreit wird. Die Grundplatte wird für das nächste Auftragschweißen wiederverwendet. Die Platten werden üblicherweise mittels Sandstrahlen nachbehandelt, wodurch die Bearbeitungsspuren nivelliert werden. Wird dieser Arbeitsschritt nicht sorgfältig durchgeführt, verbleiben stark directionale Bearbeitungsspuren auf der Grundplatte. Die aufgeschweißten Lagen, welche ein Laserauftragschweißen mit Pulver hervorbringt, weisen eine pockige, raue Oberfläche auf. Im Gegensatz dazu steht eine Schweißraupe, die mit einem Lichtbogen und zugeführtem Draht geschweißt wird. Wie in Abbildung 3-2 zu sehen ist, weist diese eine deutlich stärker reflexive Oberfläche mit einer typischen, gerichteten Raupenstruktur auf, welche zu messtechnischen Problemen führt. In der Praxis wird das Laserauftragschweißverfahren zudem häufig für die Reparatur von teuren Bauteilen wie Turbinenschaufeln oder Brennerköpfen aus Heitzkraftwerken eingesetzt. Dazu wird an den beschädigten Stellen zunächst Material abgetragen, welches durch Zerspanung oder Schleifen geschehen kann. Die so entstehenden Oberflächen weisen daher häufig directionalen Bearbeitungsspuren auf.

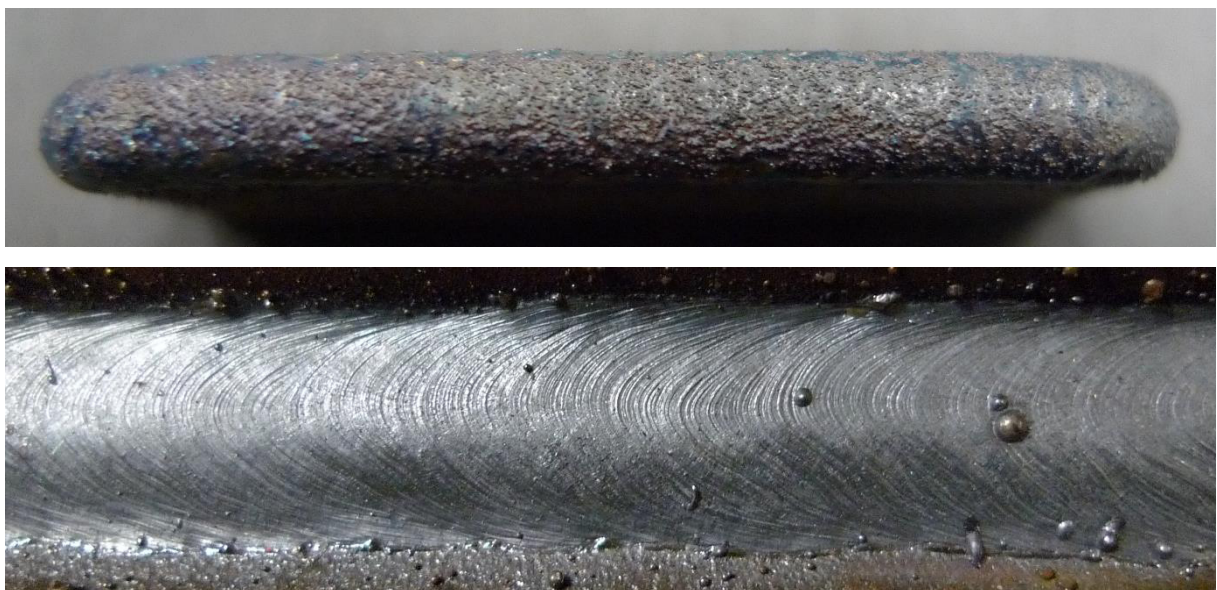


Abbildung 3-2: Oben: Laserauftraggeschweißte Wand aus Titan, Unten: MAG geschweißte Kehlnaht aus Stahl

3.1.2 Reflexionsgrad der Oberflächen

In Abschnitt 2.5 wird der schwarze Strahler und die Absorption schwarzer Oberfläche erläutert. Trifft der Messstrahl auf eine raue Oberfläche, die jedoch absorbierend wirkt, wird nicht genügend Licht diffus reflektiert, um eine Messung zu ermöglichen. Weiterhin werden in Abschnitt 2.5.2 die optischen Eigenschaften von Metallen erläutert. Anhand der Tabelle 3-1 wird deutlich, dass verschiedene Metalle verschiedene Reflexionsgrade aufweisen.

Tabelle 3-1: optische Konstanten ausgewählter Metalle, Auszug aus [HeHe2013]

Metall	λ [nm]	n	k	R
Titan, unlegiert	436	2,04	2,85	53,4
	546	2,53	3,33	57,0
	650	3,03	3,65	59,3
Chrom-Nickel Stahl 1.4301	436	1,96	3,51	63,0
	546	2,42	4,16	66,6
	578	2,70	4,27	66,1
Aluminium, unlegiert	435	0,55	4,23	90,0
	546	0,81	5,47	90,0
	650	1,24	6,60	89,5

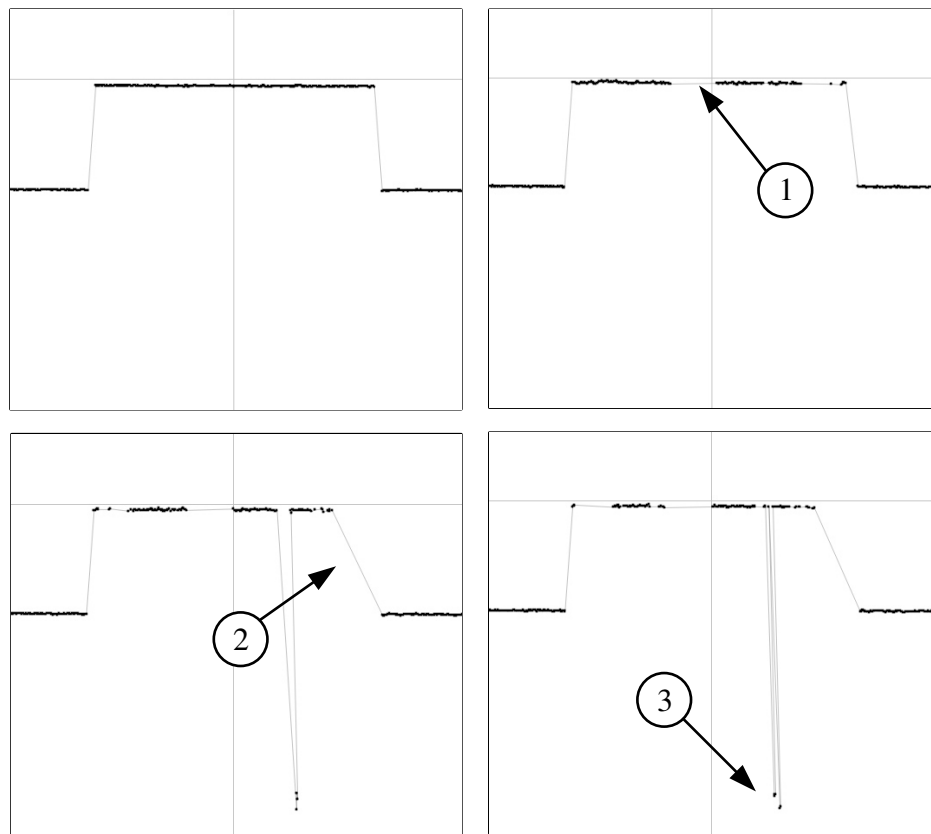
Für den Anwendungsfall des Auftragsschweißens ist insbesondere zu beachten, dass Titan im Gegensatz zu Chrom Nickel Stahl und Aluminium einen deutlich geringeren Reflexionsgrad aufweist. Aufgrund der hohen Absorption wird der Mess-Laser von der Titanoberfläche nur wenig reflektiert, woraus ein schwaches, unsauberes Messsignal resultiert. Weiterhin ist die Wellenlängenabhängigkeit des Reflexionsgrades zu beachten, aus der sich schließen lässt, dass ein Mess-Laser mit geringere Wellenlänge im blauen Farbbereich weniger gut reflektiert wird, als ein Laser mit höherer Wellenlänge im roten Farbbereich.

3.1.3 Lichtdurchlässige Medien

Soll eine Oberfläche vermessen werden, die lichtdurchlässig ist, werden die Strahlen gemäß der in Abschnitt 2.1 beschriebenen Gesetzmäßigkeiten teilweise reflektiert, teilweise transmittiert. Die transmittierten Strahlen durchwandern das Medium und sind damit für die Messung unbrauchbar. Ist das durchlässige Medium nur in einer dünnen Schicht aufgetragen, so wird der transmittierte Strahl von dem dahinterliegenden Medium reflektiert. Dabei wird der Strahl mehrfach im durchlässigen Medium gebrochen und verfälscht das Messergebnis. Die Raumluft im Messbereich ist ebenfalls ein lichtdurchlässiges Medium.

3.1.4 Spiegelnde Oberflächen

Ist die Rauheit einer Oberfläche sehr gering, so dass sie ganz oder teilweise spiegelnd glatt ist, gilt das in Abschnitt 2.1 beschriebene Reflexionsgesetz *Einfallswinkel = Ausfallswinkel*. Für einen Triangulationssensor, dessen Messstrahl unter einem Winkel von 0° zum optischen Lot hin auf die Oberfläche auftrifft, bedeutet dies in Konsequenz, dass keine Lichtstrahlen auf die im Triangulationswinkel θ ausgerichtete Eingangsoptik auftreffen und somit keine Messung möglich ist. Ist eine Oberfläche hingegen nur teilweise spiegelnd, wird ein Teil des Messstrahles diffus reflektiert werden. Die Menge der auftreffenden Lichtquanten auf der CMOS Matrix reichen dann jedoch meist nicht aus, um eine exakte Bestimmung der z-Koordinate zu ermöglichen. Zur Verdeutlichung dieser Effekte zeigt Abbildung 3-4 einen Ausschnitt aus der Vermessung eines spiegelnd polierten Körpers, in der fehlende- und fehlerhafte Messwerte durch abgelenkte Messstrahlen zu erkennen sind.



Oben Links	diffus reflektierendes Vergleichsprofil
Pos. 1	fehlende Messpunkte in der Kontur
Pos. 2	Kantenfehler durch fehlende Messpunkte
Pos. 3	falsche Werte einiger Messpunkte

Abbildung 3-3: Typische Profilfolge einer spiegelnd reflektierenden Oberfläche in der Messsoftware ScanCONTROL Configuration Tool 5.1

3.1.5 Direktionale Bearbeitungsspuren

Die Bearbeitung einer Oberfläche durch Zerspanung, Schleifen und ähnliche Fertigungsverfahren, hinterlässt eine raue, aber durch directionale Bearbeitungsspuren geprägte Messfläche. Trifft der Messstrahl auf eine solche Fläche auf, wird er nicht diffus reflektiert, sondern entsprechend der Ausrichtung der Bearbeitungsspuren größtenteils gerichtet reflektiert. (Abbildung 3-4)

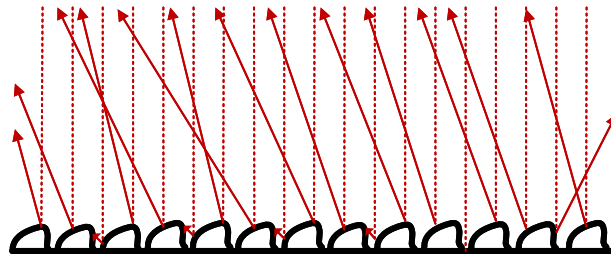
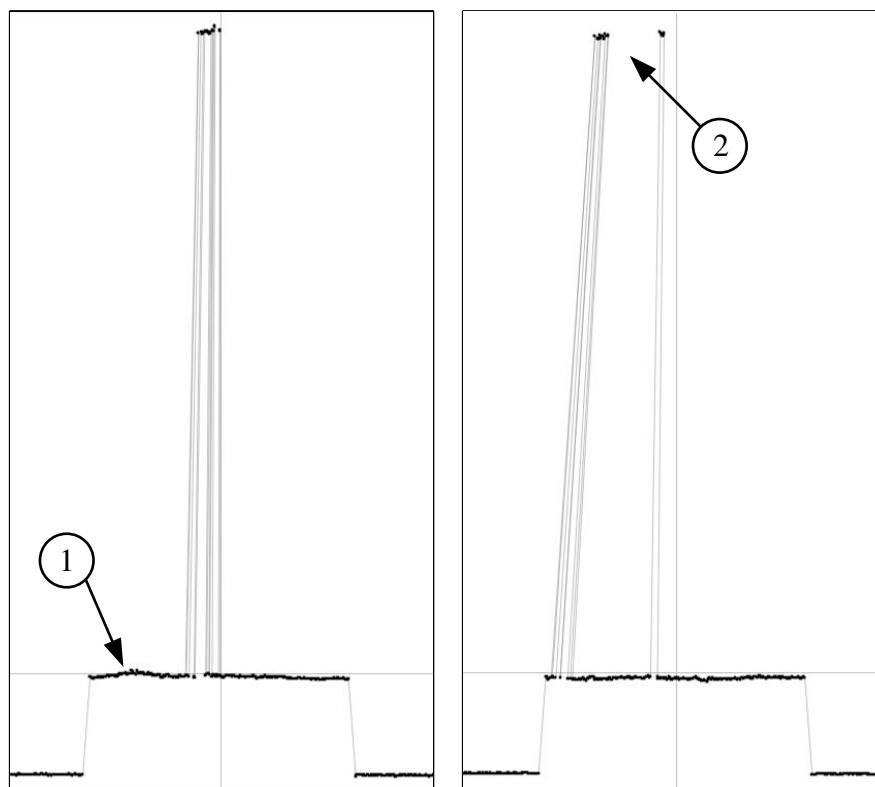


Abbildung 3-4: Gerichtete Reflexionen aufgrund von Bearbeitungsspuren auf der Oberfläche

Die Eingangsoptik des Sensors empfängt dann je nach Spurrichtung entweder deutlich zu viele Lichtstrahlen unter falschem Winkel, deutlich zu wenige oder keine Lichtstrahlen, wodurch das Messergebnis verfälscht wird. Zur Verdeutlichung dieser Effekte zeigt Abbildung 3-5 Ausschnitte aus der Vermessung eines spanend bearbeiteten Körpers mit sichtbaren Bearbeitungsspuren.



- | | |
|--------|-----------------------------------|
| Pos. 1 | Messungenauigkeiten in der Kontur |
| Pos. 2 | falsche Werte mehrerer Messpunkte |

Abbildung 3-5: Typische Profilfolge einer gefrästen Oberfläche in der Messsoftware scanCONTROL Configuration Tool 5.1

3.2 Sensorposition und Messabstand

In Abschnitt 2.2.3 wird die Funktionsweise von Laser Linien Triangulationssensoren erläutert und die Scheimpflug-Bedingung eingeführt (Abbildung 2-8). Eine Anordnung der optischen Komponenten mit Erfüllung der Scheimpflug-Bedingung führt zu einem größeren Messbereich, da der Fokuspunkt der Eingangsoptik bei verschiedenen Eintrittswinkeln der Lichtstrahlen auf der CMOS-Matrix mitwandert. Während für die Vermessung sehr kleiner Messobjekte (kleine Δz) ein linearer Zusammenhang zwischen der z -Position des Reflexionspunktes auf der Messoberfläche und der δ -Position des Fokuspunktes auf der CMOS-Matrix angenommen werden kann, treten aufgrund der realen geometrischen Gegebenheiten für größere Messobjekte (große Δz) nichtlineare Zusammenhänge in Kraft [JiLe1989]. Je weiter der Reflexionspunkt z_R auf der Messoberfläche vom Sensornullpunkt z_0 entfernt ist, desto geringer ist in Folge die Verschiebung des Fokuspunktes δ auf der CMOS-Matrix. Dieser nichtlineare Zusammenhang der $\Delta z/\delta$ Koordinaten ist in Gleichung (2.22) beschrieben und in Abbildung 2-9 dargestellt. Die Koordinaten des Messpunktes und des Fokuspunktes verhalten sich nicht mehr proportional zueinander, wie es für eine Positionsbestimmung mittels Triangulation notwendig ist. Daraus lässt sich ableiten, dass die Auflösung des Messbildes eines Triangulationssensors direkt von dem Abstand Δz des Reflexionspunktes z_R zum Kalibriernullpunkt z_0 abhängig ist. Die Sensorposition am Pulverkopf stellt somit einen Einflussfaktor auf die Messgenauigkeit des Triangulationssensors dar. [GaTa2011] Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 3-6 dargestellt.

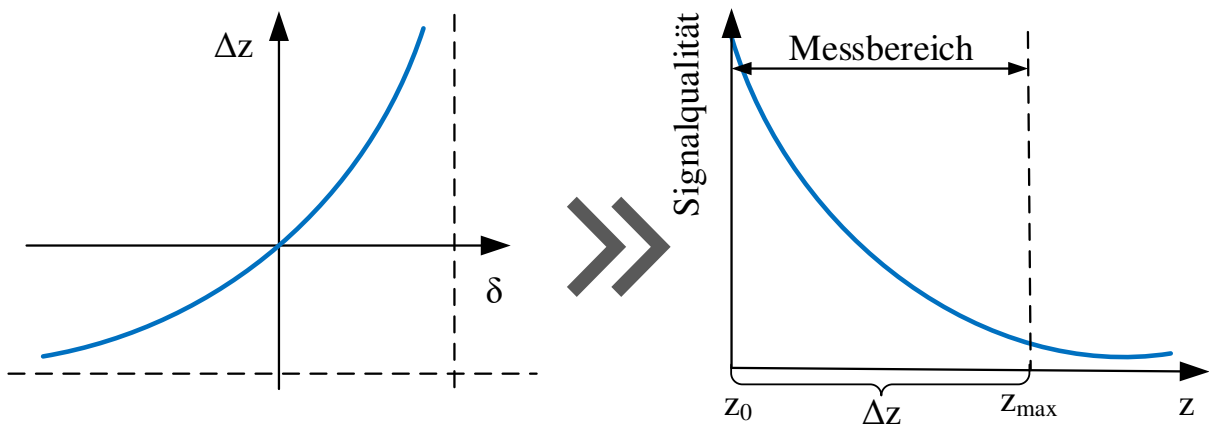


Abbildung 3-6: Die nichtlineare Beziehung zwischen den $\Delta z/\delta$ Koordinaten führt zu einer abnehmenden Signalqualität zu den Enden des Messbereichs

3.3 Abschattung durch Körperkanten

Bei der Vermessung von Konturen mit steilen Kanten durch einen Triangulationssensor kommt es teilweise zur einer Abschattung des reflektierten Signals. In Abbildung 3-7 ist dieser Zusammenhang dargestellt, wobei der linke Teil des Bildes die Abschattung des reflektierten Strahls in z-Richtung durch eine Körperkante zeigt und der rechte Teil die Abschattung des in x-Richtung aufgefächerten Strahles nach dem Austritt aus der Ausgangsoptik veranschaulicht. In beiden Fällen kommen nicht alle vom Messlaser ausgesandten Strahlen an der Eingangsoptik an, wodurch Fehlwerte entstehen.

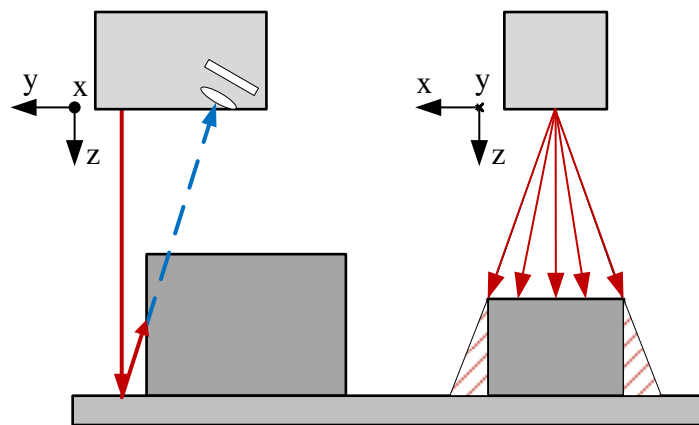


Abbildung 3-7: Abschattung durch geometrische Effekte an steilen Kanten

Aufgrund der Geometrische Beziehungen aus Abschnitt 2.2.1 kann die Länge der abgeschatteten Strecke L_A hergeleitet werden. Diese ergibt sich zu:

$$L_A = \tan(\theta) * \Delta z \quad (3.1)$$

Es kann nach Gleichung (3.1) beispielhaft ermittelt werden, dass bei einem Triangulationswinkel $\theta = 15^\circ$ und einer Messobjekthöhe von $\Delta z = 15 \text{ mm}$ eine Strecke von $L_A = 4,02 \text{ mm}$ hinter der Körperkante nicht vom Triangulationssensor erfasst werden kann. Dieser Zusammenhang gilt in der beschriebenen Form nur, wenn die Referenzfläche im mittleren Messbereich liegt, da bei abweichende Referenzflächenhöhen ein veränderlicher Reflexionswinkel vorliegt. In der Praxis müssen daher die Systemparameter exakt bekannt sein, um die abgeschattete Strecke rechnerisch zu ermitteln. Die Abschattung durch Körperkanten hat einen signifikanten Einfluss auf die Genauigkeit eines Triangulationssensors, der nur durch eine Veränderung der Sensorposition oder die Interpolation der fehlenden Werte in der Datenauswertung vermindert werden kann.

3.4 Einfluss der Roboterkinematik

Um den Laser-Spot des Bearbeitungslasers im Raum zu bewegen, wird ein Sechs-Achs-Industrieroboter eingesetzt (Abschnitt 2.4). Der Triangulationssensor ist dabei fest am Schweißkopf montiert. Im Durchlauf einer Messung, führt der Roboter eine Relativbewegung zum Prüfling durch und fährt den Sensor mit einer vorher definierten Vorschubgeschwindigkeit über das Messfeld. Aufgrund verschiedenster Einflüsse wie dem Achsspiel, der Erwärmung- und Abkühlung der Servomotoren oder der Massenträgheit durch den Pulverkopf bei verschiedenen Vorschubgeschwindigkeiten, wird die Wiederholgenauigkeitsgrenze des Roboters während einer Linearbewegung, nicht immer gleichmäßig erreicht. Da der Triangulationssensor direkt am Pulverkopf befestigt ist, wird er von einer ungewollten Verkippung der Roboterachsen in seiner Genauigkeit beeinflusst. Der aus diesen Achsfehlern entstehende Messfehler ist in der Messinstrumentenkunde als Taumelfehler bekannt und in Abbildung 3-8 dargestellt.

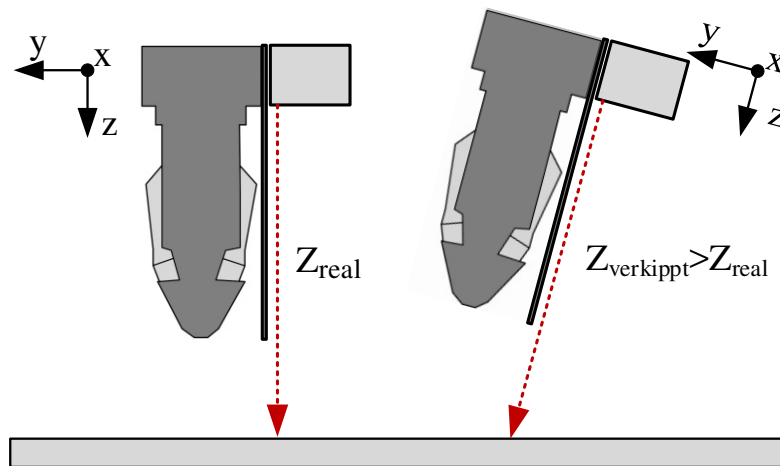


Abbildung 3-8: Abweichung der gemessenen z-Koordinate durch Achsfehler des Roboters

Die Ausgangsoptik des Sensors befindet sich in beiden dargestellten Fällen auf der gleichen Höhe über der Messoberfläche. Eine Ungenauigkeit in der dritten Handachse des Roboters führt in der Abbildung zu einer Verkippung des Pulverkopfes, wodurch die Laserlinie des daran aufgehängten Sensors nicht mehr orthogonal auf die Oberfläche fällt. Dabei verkippt sich auch das Koordinatensystem des Sensors. Die durch den Sensor gemessene z-Koordinate entspricht somit der Hypotenuse eines rechtwinkligen Dreieckes, während die ist-Koordinate der Ankathete des Kippwinkels entspricht. Basierend auf diesem geometrischen Zusammenhang, lässt sich der auftretende Messfehler durch den Verkippungswinkel des Pulverkopfes bestimmen.

$$\Delta z_{\text{Verkippung}} = \frac{z_{\text{real}}}{\cos(\text{Kippwinkel})} - z_{\text{real}} \quad (3.2)$$

Neben der Winkelabweichung der Achsen, treten bei Roboterbewegungen zudem Abweichungen der TCP-Koordinate in allen kartesischen Raumrichtungen auf. Für die Bestimmung einer Konturhöhe bietet sich die in Abschnitt 2.2.3 beschriebene Berechnung mittels einer Referenzfläche an.

Bei Anwendungsfällen, in denen keine geeignete Referenzfläche im Messbereich vorhanden ist, muss eine Berechnung der Höhe mittels der gemessenen Koordinate auf der Bauteiloberfläche $z_{Bauteil}$ und der z-Koordinate des TCP aus der Robotersteuerung erfolgen. Soll dieser Punkt z_{TCP} als Berechnungsgrundlage herangezogen werden, so haben die Richtungsfehler des Roboters einen direkten Einfluss auf die Genauigkeit der Messung. Für diesen Anwendungszweck muss zudem eine Hand-Auge-Kalibrierung zwischen den Koordinatensystemen von Roboter und Sensor vorgenommen werden, um die Pose des Roboters als Referenzwert für die Verrechnung verwenden zu können. Den Einfluss des Positionsfehlers des Roboters ohne geeignete Kalibrierung zu bestimmen ist nicht möglich.

3.5 Radiometrische Einflüsse

Wie in Abschnitt 2.2.2 beschrieben, detektiert die CMOS-Sensormatrix das Auftreffen von Photonen Ladungsträgern und speichert dadurch entstehende kapazitive Ladungen, welche zur triangulatorischen Bestimmung eines Bildpunktes abtransportiert, in eine proportionale Spannung gewandelt, verstärkt und digitalisiert werden. Die radiometrischen Eigenschaften geben die Übertragungscharakteristik der CMOS-Kamera wieder.

3.5.1 Rauschquellen im Signalpfad der digitalen Kamera

Auf dem Signalpfad der digitalen Kamera gibt es mehrere Rauschquellen, die das Signal und somit das Messergebnis beeinflussen. Ein Überblick über die Rauschquellen ist in Abbildung 3-9 dargestellt.

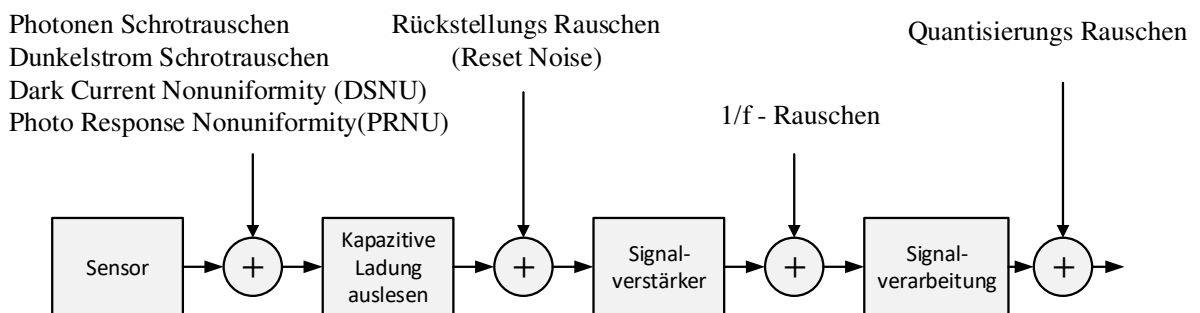


Abbildung 3-9: Rauschquellen im Signalpfad einer digitalen Kamera, modifiziert nach [NSL2014]

Eine Messgröße kann man erst dann erkennen, wenn sie „aus dem Rauschen herauskommt“, sprich wenn sie größer ist als das Eigenrauschen des Detektors [Mes2008]. Dazu gilt das Signal-Rausch-Verhältnis:

$$SNR = \frac{\text{Signalleistung}}{\text{Rauschleistung}} \quad (3.3)$$

Während die verschiedenen Rauschquellen noch vor wenigen Jahren maßgebliche Einflüsse auf die Kamerabilder von Industriekameras und somit auch auf die Messgenauigkeit von Triangulationssensoren hatten, ist diese Problematik bei modernen Industriekamerasystemen durch ihre technische Weiterentwicklung für industrieübliche Anwendungsgebiete weitestgehend gelöst. Ausführliche Betrachtungen verschiedener Rauscheinflüsse und ihrer messtechnischen Signifikanz sind beispielsweise [Wio2001] zu entnehmen.

Weiterhin sind Prüf- und Bewertungsverfahren im EMVA 1288 Standard geregelt, dem auch Standardwerte für Industriekameras zu entnehmen sind. Für den Anwendungsfall des Laser-auftragschweißens ist der Rauscheinfluss des Dunkelstrom Schrotrauschens von besonderer Bedeutung und wird daher im Folgenden erläutert. [Wio2001], [NSL2014]

Dunkelstrom Schrotrauschen (Dark Current Shot Noise)

In jedem Halbleiterelement wird durch Wärmeeinwirkung ein sogenannter Dunkelstrom erzeugt, welcher Temperatur- und Prozessabhängig ist. Durch die thermische Mobilisierung von Ladungsträgern entstehen auf der Sensormatrix Ladungen wie bei einem Photoneinfall durch auftreffende Lichtwellen. Der Dunkelstrom verdoppelt seinen Wert dabei je nach Sensor auf alle 7 bis 9°C Erwärmung der Sensormatrix [NSL2014]. Sensoren die über eine CMOS Matrix messen, müssen daher vor einem Messvorgang ausreichend lange aufgewärmt werden, um den bei ihrer Kalibrierung vorherrschenden Dunkelstromwert zu erreichen und somit die vorgegebenen Genauigkeitsgrenzen einhalten zu können. Auf diesem Zusammenhang begründet sich auch die niedrige Betriebsmaximaltemperatur eines Kamerabasierenden Sensors. Der Dunkelstrom einer Kamera kann experimentell bestimmt werden, indem man eine Bildfolge in einem vollständig dunklen Raum ohne Fremdlichteinfluss aufnimmt und die kapazitiven Ladungen auswertet [Wio2001]. Erst, wenn der Dunkelstrom in einem Matricelement einen bestimmten Schwellwert überschreitet, wird die Ladung vom Signalverarbeiter als sogenannter heißer Pixel erkannt und als Fehlwert dargestellt (Gleichung (3.3)).

Dunkelstrom Schrotrauschen durch ein thermisches Lichtfeld

Ein thermisches Lichtfeld erzeugt ebenso wie der Messlaser einen mittleren Photonenstrom, dessen Intensität starken, zufälligen Schwankungen unterworfen ist. Ebenso wie die Erwärmung der Matrix selbst, wirkt daher auf die Sensormatrix einfallende Wärmestrahlung wie ein Dunkelstrom, da die CMOS-Pixel nicht zwischen der elektromagnetischen Strahlung durch auftreffende Lichtquanten und der elektromagnetischen Strahlung durch Wärmeübertragung differenzieren können. Die auftreffende Ladungsenergie ist im Anwendungsfall äquivalent zur Lichtmenge, während die Strahlungsleistung äquivalent zum Lichtstrom ist. Daher bildet auch eine direkte Wärmebestrahlung des Sensors eine kapazitive Ladung auf der CMOS Matrix aus und führt zu Messsignalrauschen. Dieser Rauscheinfluss wird in der Literatur teils auch dem Photonen Schrotrauschen zugeordnet und beinhaltet eine umfassende physikalische und mathematische Herleitung und Beschreibung, die beispielsweise in [Mes2008] nachzuvollziehen ist. Die genaue theoretische Behandlung dieses Einflussfaktors beinhaltet elektrotechnische und wellenoptische Zusammenhänge die den Umfang dieser Arbeit überschreiten und Teil einer eigenständigen Arbeit sein müssen. Daher wird hier auf eine genaue Herleitung verzichtet und der Einfluss lediglich experimentell nachgewiesen. [NSL2014], [Hug2007], [Mes2008]

3.5.2 Belichtungszeit und Sättigung

Der Triangulationssensor wird für eine Konturerfassung vom 6-Achs Industrieroboter mit einer als Prozessparameter gewählten Vorschubgeschwindigkeit über den Messbereich geführt. Verschiebt sich das Bild während der Belichtung im Bildbereich der Kamera über eine Pixelgrenze hinaus, so kommt es zu Verschmierungen. Daher müssen Vorschubgeschwindigkeit und Belichtungszeiten aufeinander abgestimmt werden. Akzeptable Werte für den Schmiereffekt bei Messanwendungen liegen bei $\frac{1}{2}$ Pixel. Der Schmiereffekt lässt sich mit folgenden Gleichungen bestimmen:

$$\begin{aligned} \text{Auflösung} &= \frac{\text{Pixelzahl}}{\text{Bauteilgröße [mm]}} \\ \text{Vorschubgeschwindigkeit} \left[\frac{\text{mm}}{\text{s}} \right] * \text{Auflösung} &= \frac{\text{Pixel}}{\text{Vorschub}} \text{ [s]} \quad (3.4) \\ \text{Belichtungszeit} &= \frac{1}{2} \text{Pixel} * \frac{\text{Pixel}}{\text{Vorschub}} \text{ [s]} \end{aligned}$$

Die Belichtungszeit hat zudem einen direkten Einfluss auf die Farbsättigung des Bildes.

Die Farbsättigung ist ein Merkmal das kennzeichnet, wie ausgeprägt ein Buntton ist. Wird beispielsweise einem Rotton kontinuierlich Weiß zugemischt, nimmt seine Sättigung mit zunehmenden Weißanteil ab. Eine weiße Oberfläche ist vollständig ungesättigt [Spe1999]. Die Sättigung zeigt somit den anteiligen Grauwert einer Farbe an. Um Störeinflüsse durch Streu- und Umgebungslicht zu vermeiden, ist die Kamera des Triangulationssensors mit einem Bandpassfilter versehen, der lediglich das monochromatische Licht des Messlasers durchlässt und andere Wellenlängen blockiert. Ein solcher Bandpassfilter lässt dabei in üblichen Industriekamera-Anwendungen einen Wellenlängenbereich von +/- 10-20 nm um den gewünschten Sollwert passieren. Die Wellenlänge eines Industrieüblichen Messlasers beträgt $\lambda = 658 \text{ nm}$ und ist Sollwert des Bandpassfilters. Ein beispielhaftes Transmissionsprofil für einen geeigneten Bandpassfilter ist dieser Arbeit in A.9 angehängt. Die Belichtungszeit der Kamera muss daher so gewählt werden, dass die Sättigung des Kamerabildes einen für die Detektion des Messlasers optimalen Wert trifft, da die reflektierten Strahlen ansonsten vom Bandpassfilter blockiert werden. Der Hersteller des in dieser Arbeit betrachteten Sensors gibt für eine Profilvermessung einen optimalen Sättigungswert der Messoberflächen von 90% an. Neben dem in Abschnitt 2.5.2 beschriebenen Reflexionsvermögen einer Oberfläche, ist der Abstand zur Kamera für den Anteil der Sättigung von entscheidender Bedeutung. Soll beispielsweise die Ermittlung einer Profilhöhe über den Vergleich der z-Koordinaten von einer Referenz- und eine Prüffläche erfolgen (Abschnitt 2.2.3), so haben beide Flächen bei gleicher Belichtungszeit unterschiedliche Sättigungswerte und werden auf der CMOS-Matrix nicht mit identischer Intensität auftreten. Es ist daher zu erwarten, dass eine Vermessung von großen Konturen (große Δz) über diese Referenzbeziehung, neben der in Abschnitt 2.2.3 beschriebenen nichtlinearen $\Delta z/\delta$ Beziehung, auch aufgrund der Sättigungsdifferenz zu schlechteren Messergebnissen führen wird.

3.6 Prozesstemperatur im Messbereich

Obwohl das Werkstück beim LPA-Schweißprozess einen nur geringen Wärmeeintrag erfährt, führt das Aufschmelzen von Grundwerkstoff und Zusatzmaterials dennoch zu einem Temperaturgefälle im Messbereich. Die Hohen Temperaturen in Schmelzbad und in der erstarrten Schweißraupe beeinflussen die Messgenauigkeit des Triangulationssensors.

3.6.1 Allgemeine Temperatureinflüsse

Um eine schmelzmetallurgische Verbindung der aufgetragenen Schichten zu ermöglichen, müssen der Grund- und Zusatzwerkstoff durch den Laser bis auf Schmelztemperatur aufgeheizt werden. Während das Aufschmelzen im Fokus des Lasers mit sehr hoher Geschwindigkeit geschieht, kühlt die aufgetragene Kontur nur langsam ab. Während der Abkühlung glüht die Kontur durch den Wärmeeintrag nach und durchläuft dabei das vollständige Spektrum der Glühfarben von Gelbweiß bis Grau. Während der Wärmeabfluss bei kleinen Konturen mit wenigen Lagen relativ schnell geschieht, da die gekühlte Grundplatte ein großes Volumen zur Wärmeabführung bietet, verlangsamt sich dieser bei höheren Schichtzahlen. Da der Wärmetransport mittels Wärmeleitung aufgrund der Wandgeometrie, des niedrigen Temperaturgradienten und der geringen Abflussfläche in der Wand stark eingeschränkt ist, muss mehr Wärme durch Konvektion und Strahlung abgegeben werden [Rad1988]. Dieser Zusammenhang führt zu mehreren Problemen bei einer Vermessung der Kontur mittels optischer Triangulation. [MaNi2010], [Rad1988]

Der Mess-Laser eines Industrieüblichen Sensors strahlt mit einer Wellenlänge von $\lambda = 658 \text{ nm}$, welche sich im Spektrum der Lichtwellenlängen am nahe infraroten Bereich bewegt. Wie oben beschrieben, durchläuft die aufgeschweißte Kontur bei jeder Schweißlage das gesamte Spektrum der Glühfarben. Insbesondere eine Oberfläche, die im Gut-Hellroten bis Kirschroten Bereich zwischen 900 und 780°C , glüht, emittiert Lichtwellen, die sich im selben Spektralbereich wie der Mess-Laser befinden [FGK+2011], [Kuc2011]. Möchte man eine glühende Oberfläche in diesem Temperaturbereich vermessen, so überlagern sich die diffus reflektierten Strahlen des Mess-Lasers mit den emittierten Lichtwellen der Schweißkontur. Die auf der CMOS-Matrix auftreffenden Strahlen geben somit nicht mehr ausschließlich die Position der z-Koordinate des Messfleckes wieder, wodurch eine Positionsbestimmung mittels Triangulation erschwert wird. Ein Industrieüblicher Bearbeitungslaser strahlt hingegen bei einer Wellenlänge von $\lambda = 1030 \text{ nm}$ und hat somit keinen direkten Einfluss auf den Triangulationssensor.

In Abschnitt 3.5.1 wird der radiometrische Einfluss des Dunkelstrom Schrotrauschens eingeführt. Dort wurde erläutert, dass eine Wärmestrahlung, die auf die CMOS-Matrix des Sensors trifft, ebenso kapazitive Ladungen ausbildet wie auftreffende Lichtquanten. Diese Wärmestrahlung wird als thermisches Lichtfeld bezeichnet [Mes2008]. Um eine Kontur zu vermessen, muss der Sensor direkt darüber geführt werden, wobei er, trotz Hitzeschildes, direkter Bestrahlung durch emittierte Wärmestrahlung ausgesetzt wird. Wie oben erläutert, erhöht sich die abgegebene Wärmestrahlung mit höherer Schichtzahl der Schweißkontur, wodurch sich wiederum das Messsignalrauschen durch Dunkelstrom erhöht. In Abschnitt 2.6.1 wird zudem der hemisphärische Emissionsgrad von Metallen eingeführt. Aus Tabelle 3-2 ist zu entnehmen, dass der Emissionsgrad von Titan deutlich höher ist, als der von Stählen oder Aluminium und auch bei niedrigen Temperaturen nur geringfügig abnimmt.

Tabelle 3-2: Hemisphärische Gesamt-Emissionsgrade normale zur Oberfläche, Auszug aus [VDI2013]

Material	T [K]	ϵ
Stahl, poliert	500	0,065
	700	0,144
	1300	0,377
Stahl, geschmiegelt	293	0,242
Titan, oxidiert	200	0,40
	644	0,54
	1000	0,60
Aluminium, walzblank	443	0,049
	1089	0,59

Es ist anzunehmen, dass der Einfluss des Dunkelstrom Schrotrauschens bei aufgeschweißten Konturen aus Titan daher größer sein wird, als bei Konturen aus Stahl- oder Aluminiumlegierungen. Ist die Verweilzeit des Sensors über der warmen Kontur zudem sehr lang, wird er eine Erwärmung durch den Konvektionsstrom erfahren. Eine Erwärmung der CMOS-Matrix führt, wie in Abschnitt 3.5.1 beschrieben, ebenfalls zu Signalrauschen durch Dunkelstrom.

Neben den Störeinflüssen die durch Wärmestrahlung und Konvektion auftreten, kann der Sensor bei zu hohen Temperaturen auch strukturelle Schäden durch Schmelzen oder Verbrennen der Sensorkomponenten, sowie Verzug durch Wärmeausdehnung erleiden.

3.6.2 Inhomogener Brechungsindex im Messbereich

Durch die an die Umgebungsluft abgegebene Wärme der Schweißbraupe, wird die Atmosphäre um das Werkstück aufgeheizt. Dadurch entsteht eine Dichteverminderung der warmen Atmosphäre im Verhältnis zur Umgebung und es bildet sich ein Konvektionsstrom aus (Abschnitt 2.5). Im inhomogenen Temperaturfeld ist der Brechungsindex der Luft nicht mehr konstant und lenkt den Mess-Laserstrahl unter verändertem Winkel ab. Weiterhin entstehen dicht über der heißen Schweißnaht durch den Druck- und Temperaturunterschied turbulente Strömungen, welche ebenfalls zu Fluktuationen im Messsignal führen und sich mit den Ablenkungen überlagern. [Wai1992]

In Abschnitt 2.1.1 wird der inhomogene Brechungsindex eingeführt und seine Auswirkung auf den optischen Weg erläutert. Ist die Temperaturverteilung im Messbereich bekannt, kann der Brechungsindexgradient nach Gleichung (2.6) und Gleichung (2.11) ermittelt werden. Dazu können folgende Annahmen getroffen werden:

Die vorherrschende Temperaturverteilung weist horizontal verlaufende isotherme Schichten mit infinitesimal kleiner Schichtdicke. Um eine Berechnung zu ermöglichen, muss eine geeignete Diskretisierung vorgenommen werden. Da es sich um ein offenes System handelt, können Luftvolumen- und Druck als konstant angenommen werden.

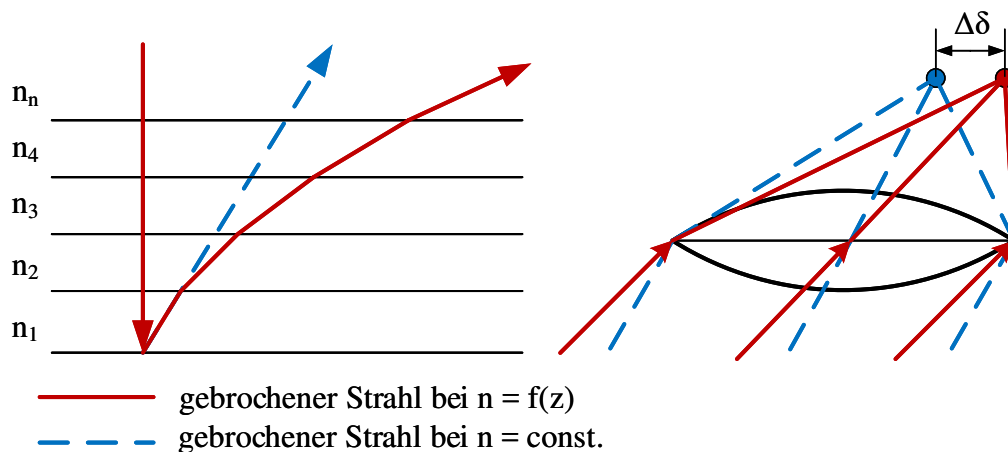


Abbildung 3-10: Durch den inhomogenen Brechungsindex im Messbereich erfolgt eine veränderte Ablenkung im transmittierten Strahl. Die Projektion auf der CMOS Matrix verschiebt sich um den Betrag $\Delta\delta$

Beim Durchqueren des Messbereiches, erfährt der Lichtstrahl einen Übergang zwischen Medien verschiedener Brechungsindizes mit infinitesimal kleiner Schichtdicke, welche durch die isothermen Linien gekennzeichnet sind. Geht man vom Idealfall einer exakt senkrechten Projektion aus der Austrittsoptik des Lasers aus, sprich einem Einfallswinkel $\Theta_1 = 0^\circ$, so erfährt das Licht bei den Übergängen nach Gleichung (2.1) keine Ablenkung. Nach dem Auftreffen auf der unebenen Metalloberfläche, wird der Lichtstrahl diffus reflektiert, wobei von einer gleichmäßigen Ausbreitung des Streulichtes in alle Richtungen ausgegangen werden kann¹.

¹ Tatsächlich sinkt die Strahlungsintensität bei geringer werdendem Abstrahlwinkel proportional zum Produkt aus Kosinus des Winkels und der Fläche. Auf diesen Zusammenhang, der als Lambert'sches Kosinusgesetz bekannt ist, wird aus Signifikanz- und Vereinfachungsgründen nicht eingegangen.

Die so zurückgeworfenen Lichtstrahlen werden unter Einfluss des Brechungsindex beim Übergang zwischen den isothermen Schichten abgelenkt und erfahren eine Winkeländerung. Aus Gleichung (2.2) kann die Gleichung zur Berechnen des Austrittswinkels θ_2 abgeleitet werden.

$$\theta_2 = \sin^{-1}\left(\frac{n_1}{n_2} * \sin(\theta_1)\right) \quad (3.5)$$

Der Verlauf eines das Temperaturfeld durchquerenden Lichtstrahles ist qualitativ in Abbildung 3-10 dargestellt. In Abschnitt 2.2 wird die Scheimpflug-Bedingung (Abbildung 2-8) und der Verlauf der $\Delta z/\delta$ Relationskurve eingeführt (Abbildung 2-9, Gleichung (2.22)). Für die Kalibrierung eines Triangulationssensors müssen drei Werte definiert werden: der Nullpunkt der z-Koordinate des Messfeldes z_0 , der Triangulationswinkel θ sowie der zugehörige Nullpunkt auf der CMOS Matrix δ_0 . Die Kalibrierung durch den Sensorhersteller findet unter Laborbedingungen bei konstanter Umgebungstemperatur statt. Erfolgt nun eine Messung in einem inhomogenen Temperaturfeld, tritt der Lichtstrahl unter verändertem Winkel auf die Eingangsoptik des Sensors auf. Für die selbe Messkoordinate z ergibt sich dadurch eine um den Betrag $\Delta\delta$ abweichende Koordinate auf der CMOS Matrix. Durch die auftretende Konvektion entsteht ein zeitlich inkonsistentes Temperaturfeld $T(z) = f(t)$ und daraus folgt eine zusätzliche Fluktuation im Messsignal.

Bei dem in diese Arbeit betrachteten Triangulationssensor handelt es sich um einen Linien-Lasertriangulationssensor, bei dem ein Laserstrahl unter einem Winkel von 20° auf 1280 Einzelmesspunkte aufgefächert wird, um die Bestimmung einer x-Koordinate zu ermöglichen (Abbildung 3-7). Durch diese Auffächerung durchquert der Laser den Messbereich bereits auf der Strecke *Laserquelle* \rightarrow *Messpunkt* unter einem Winkel $\theta_1(x) \neq 0^\circ$ und erfährt somit schon auf dieser Strecke eine Ablenkung, welche sich weiter auf die Qualität des Messsignals auswirkt. Weiterhin ist zu beachten, dass sich im Messbereich teilweise ein Gasgemisch aus Raumluft und Schutzgas befindet, welches sich ebenfalls auf den Brechungsindex auswirkt, da die Brechungsindizes von Argon und Helium aufgrund der geringeren Dichte niedriger sind als die von Luft.

4 Systembeschreibung und Analyse der Einflussfaktoren

In diesem Kapitel wird das in der vorliegenden Arbeit untersuchte System aus Laserzelle, Industrieroboter und Triangulationssensor beschrieben. Anschließend folgt eine Analyse der in Kapitel 3 identifizierten Einflussfaktoren hinsichtlich ihrer Signifikanz für das untersuchte System. Basierend auf dieser Analyse werden in Kapitel 4 die Versuchsaufbauten zur Bestimmung der Prozesseinflüsse entwickelt.

4.1 Systembeschreibung

Die in der vorliegenden Arbeit untersuchte Laserauftragschweißanlage, befindet sich in einer Laserzelle TruLaser Robot 5020 der Firma Trumpf. Die für den Schweißvorgang notwendige Energie wird durch eine extern gelagerte 6 kW Laserquelle TruDisc 6001 der Firma Trumpf bereitgestellt. Pulverzufuhr und Laserstrahlführung erfolgen durch das System Trumpf DepositionLine. In der Funktionseinheit aus Pulverförderer und Schweißkopf mit Bearbeitungsoptik und Pulverdüse werden alle notwendigen Leitungen für die Laserstrahlführung, den Pulverstrom, das Schutzgas und die Kühlung der Einzelkomponenten geführt. Für die Führung des Schweißkopfes im Raum wird ein 6-Achs-Industrieroboter KUKA KR 60 HA in Kombination mit einem drehbaren Positionierer KUKA KP1-V eingesetzt. Der Auftragschweißvorgang wird in Schutzgaskammern mit unterschiedlichen Abmaßen durchgeführt, in denen wassergekühlte Grundplatte eingespannt werden. Die Schutzgaszufuhr erfolgt durch zusätzliche, radial um die Grundplatte angeordneten Düsen direkt in der Schutzgaskammer, wodurch eine laminar durchströmte Schutzgasatmosphäre im gesamten Bauraum ermöglicht wird. Ein schematischer Aufbau des Systems ist in Abbildung 4-1 dargestellt.

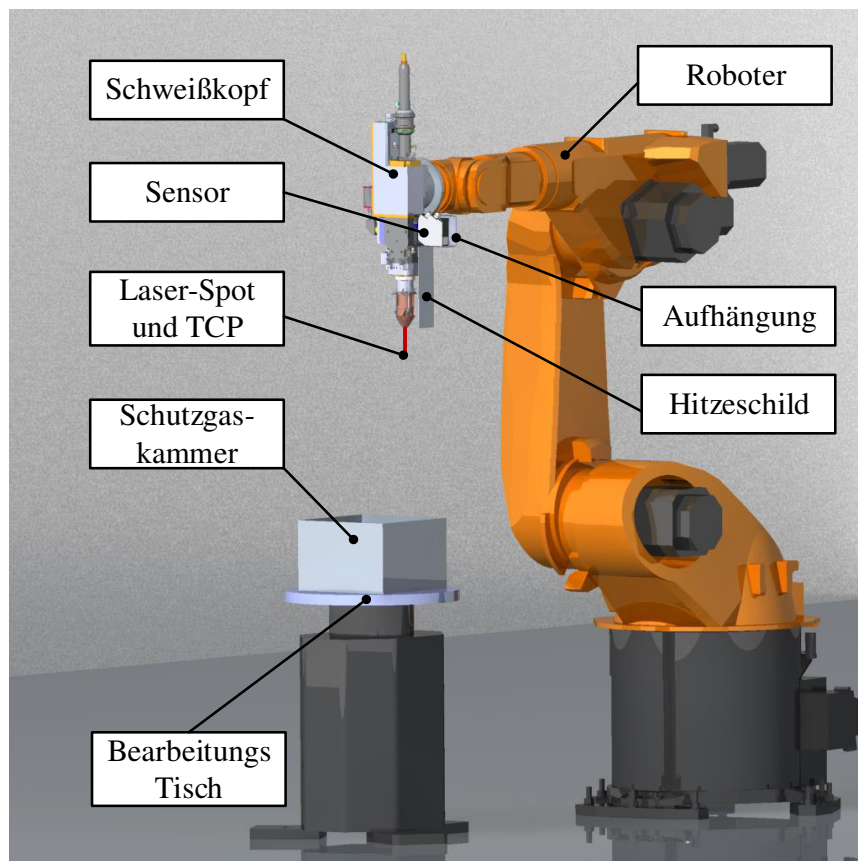


Abbildung 4-1: Laserauftragschweißsystem mit Triangulationssensor

Der in dieser Arbeit betrachtete Roboter KUKA KR 60 HA erzielt laut Hersteller eine Wiederholgenauigkeit von $\pm 0,05$ mm [KUK2005]. Der für die Untersuchungen dieser Arbeit verwendete Sensor scanCONTROL 2910-100 der Firma Micro-Epsilon wird mittels einer Aufhängung seitlich an dem Pulverkopf befestigt und so ausgerichtet, dass die Laser-Linie und die z-Achse des Sensorsystems, orthogonal auf der Grundplatte stehen. Somit liegt die z-Achse des Sensors parallel zu den z-Achsen des Welt- und TCP- Koordinatensystems.

Der Strahl des Messlasers durchläuft nach Austritt aus der Ausgangsoptik die Grenzschicht zur Atmosphäre im optischen Lot und trifft ohne Brechung auf den Messfleck auf. Zusätzlich befindet sich zwischen Sensor und Laserkopf ein Hitzeschild, welches auch als Schutz vor Schweißspritzern dient. Ein Ausschnitt des Systems ist in Abbildung 4-1 dargestellt. Eine Detailaufnahme des Sensors ist in Abbildung 4-2 zu sehen.

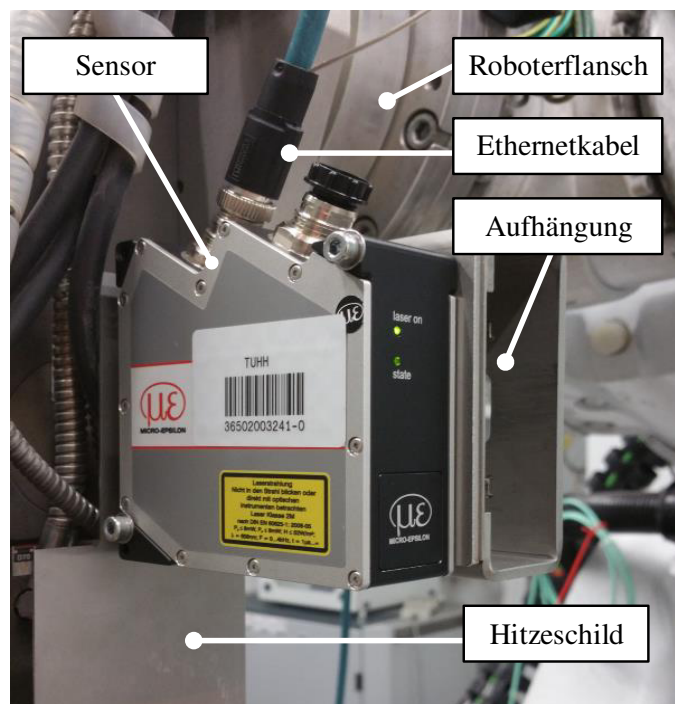


Abbildung 4-2: Detailansicht des Triangulationssensors

Bei dem Sensor handelt es sich um einen Linien-Lasertriangulationssensor, der für die Bestimmung der x-Koordinate den Messstrahl unter einem Winkel von 20° auf 1280 Einzelmesspunkte auffächert. Die Wellenlänge des Messstrahls beträgt $\lambda = 658$ nm und befindet sich somit im roten Bereich des Lichtspektrums. Zur Detektion des reflektierten Lichtes setzt der Sensor eine CMOS-Sensormatrix ein. [Mic2017]

Ein Datenblatt mit den vollständigen technischen Spezifikationen des Sensors ist der Arbeit in Anhang A.10 beigelegt.

Genauigkeitsgrenzen und Temperaturmaxima des Sensors

Der eingesetzte Sensor verfügt laut Herstellerangaben über eine Referenzauflösung von $13\ \mu\text{m}$ über die gesamte Messbereichsbreite. Dieser Wert kann definiert werden als kleinste mögliche Änderung einer Größe, die der Sensor noch zuverlässig messen kann und entspricht dem Wert nach einmaliger Mittelung über die Messfeldbreite [Mic2018]. Dieser Wert entspricht einer idealisierten Messung unter Laborbedingungen und kann in den in dieser Arbeit beschriebenen Versuchen nicht erreicht werden. Daher wird basierend auf einer durchschnittlich zu erwartenden Abweichung der Sollkontur je Lage von $\Delta h_L = 50\ \mu\text{m}$ [Pop2005] die zur Bewertung der Messungen notwendige Genauigkeitsgrenze auf den Wert von $50\ \mu\text{m}$ festgelegt.

Die Betriebsmaximaltemperatur des Sensors wird mit einem Wert von $T_{Bmax} = +45^\circ\text{C}$ angegeben. Dieser Wert darf während eines Messvorgangs nicht überschritten werden, da die Messgenauigkeit temperaturabhängig ist (Abschnitt 3.5, 3.6). Zudem wird die Lagerhöchsttemperatur mit einem Wert von $T_{Lmax} = +70^\circ\text{C}$ angegeben. Es ist davon auszugehen, dass bei einem Überschreiten dieser Temperatur strukturelle Schäden oder Verzug durch Wärmeausdehnung im Sensor auftreten werden. Diese Temperaturen werden daher in der Versuchsauswertung als kritische Höchsttemperaturen am Sensor bewertet und dürfen nicht überschritten werden.

4.2 Analyse der Einflussfaktoren

In Vorversuchen zu der vorliegenden Arbeit wurden erste Einschätzungen zur Signifikanz der in Kapitel 3 beschriebenen physikalischen Prozess- und Umwelteinflüsse vorgenommen, welche zur Auswahl der entwickelten Versuchsaufbauten beitragen. Bezogen auf die Oberflächeneigenschaften führten insbesondere spiegelnde Oberflächen, sowie Oberflächen mit directionalen Bearbeitungsspuren zu messtechnischen Problemen. Daher wird ein Fokus der Untersuchungen auf diese Oberflächenzustände gelegt. Um die Einflüsse unterschiedlicher Reflexionsgrade einzuordnen, werden zudem nahezu vollständig absorbierende und vollständig transmittierende Oberflächen vermessen. Für die Untersuchung der transmittierenden Oberfläche fällt die Wahl auf eine aufgetragene Klebspur, da eine Klebenahrtverfolgung einen industrieüblichen Anwendungsfall für einen Triangulationssensor darstellt.

Die Untersuchungen zur Sensorposition orientieren sich an den vorhandenen geometrischen Einbaubedingungen der Sensorhalterung am Pulverkopf. Der in dieser Arbeit untersuchte Sensor hat laut Herstellerangaben seine Messbereichsmittle und somit den Kalibriernullpunkt bei $z_0 = 240\text{mm}$ und einen Gesamtmessbereich von 100mm . Da der Messbereich sich in beide Richtungen oberhalb und unterhalb der Messbereichsmittle aufteilt, ergibt sich daraus $\Delta z_{max} = \mp 50\text{mm}$. Eine Skizze mit den exakten geometrischen Abmaßen des Messbereiches ist im Anhang A.10 der Arbeit beigelegt. Durch die immer geringer werdende Auflösung der digitalen Bildkoordinate steigt die Messunsicherheit in beide Richtungen zu den Messbereichsenden hin. Bei einem Laserauftragschweißvorgang befindet sich der Laser-Spot des Bearbeitungslasers 16mm unterhalb des Pulverkopfes. Soll eine In-Prozess-Vermessung einer aufgeschweißten Kontur durchgeführt werden, befindet sich der Reflexionspunkt des Sensors aufgrund der Einbauposition der Sensorhalterung somit bei $z_R = 251\text{mm}$, woraus sich $\Delta z = 11\text{mm}$ ergibt. Es ist davon auszugehen, dass eine optimierte Einbauposition des

Sensors, bei der Reflexionspunkt und Messbereichsmittle übereinstimmen ($z_R = z_0 = 240 \text{ mm}$, $\Delta z = 0 \text{ mm}$), zu besseren Messergebnissen führen wird. Diese Zusammenhänge gelten ebenso für die Bestimmung der x-Position des Sensors. Daher sollte eine Messung auch möglichst dicht an der Messbereichsmittle in x-Richtung stattfinden. Weiterführende Herleitungen und Beschreibungen sind in [GaTa2011] nachzulesen.

Wie bereits in Abschnitt 3.3 beschrieben, ist die Problematik der Abschattung durch Körperkanten nur durch eine veränderte Einbauposition oder eine Interpolation der fehlenden Daten im Post-Prozess zu beheben. Die Entwicklung und Implementierung eines passenden Interpolationsalgorithmus übersteigt den Umfang dieser Arbeit und muss Inhalt einer eigenständigen Studienarbeit am Institut sein. Weiterhin betrifft die Abschattung durch Körperkanten jede Messung durch optische Triangulation und ist nicht als exklusiver Prozesseinfluss beim Laserauftragschweißen zu bewerten. Aus diesen Gründen beschränkt sich die vorliegende Arbeit auf die Darstellung der Problematik, beinhaltet jedoch keine exakte Analyse und Lösungsfindung. Daher werden für alle vermessenen Profilfolgen die Start- und Endprofile für die Bewertung je so gewählt, dass der Kantenfehler durch Abschattung minimal ist.

Der Einfluss des Taumelfehlers, der durch Ungenauigkeiten in der Roboterkinematik entsteht, soll ausgiebig untersucht werden, da hier ein signifikanter Einflussfaktor zu vermuten ist. Der Positionsfehler des Roboters stellt ebenfalls einen signifikanten Einflussfaktor dar, kann jedoch im Rahmen dieser Arbeit nur eingeschränkt untersucht werden. Für die Berechnung der gemessenen Konturhöhe über die Beziehung zwischen der z-Koordinate der Bauteiloberfläche z_{Bauteil} und der z-Koordinate des TCP aus der Robotersteuerung z_{TCP} , muss eine Hand-Auge Kalibrierung zwischen den Koordinatensystemen von Roboter und Sensor integriert werden. Für das in dieser Arbeit untersuchte System ist zum Zeitpunkt der Erstellung der Arbeit keine solche Kalibrierung vorhanden. Der Einfluss der Kalibrierung auf das Messergebnis ist zwar signifikant, die notwendigen Untersuchungen dazu übersteigen jedoch den Umfang dieser Arbeit und sind Thema einer eigenständigen Studienarbeit am Institut. Beispiele einer solchen Kalibrierung sind in [Str2015] und [GaTa2011] zu finden. Den Einfluss des Positionsfehlers des Roboters ohne geeignete Kalibrierung quantitativ zu bestimmen ist nicht möglich. Aus diesen Gründen wird in der vorliegenden Arbeit für alle Messungen eine diffus reflektierende Grundplatte als Referenz eingesetzt. Die Höhenkoordinate wird wie in Abschnitt 2.2.3 beschrieben über die Verrechnung des Referenzwertes mit der z-Koordinate der Bauteiloberfläche ermittelt.

Für den in dieser Arbeit betrachteten Sensor wurde eine, wie in Abschnitt 3.5.1 beschriebene, Dunkelstrommessung in einem abgedunkelten Raum durchgeführt, welche keine durch den eingesetzten Postprozessor darstellbaren, heißen Pixel nachweisen konnte. Der Einfluss des Dunkelstrom Schrotrauschens durch das thermische Lichtfeld im Prozess hat sich jedoch in Vorversuchen als signifikanter Faktor herausgestellt und soll daher ausgiebig betrachtet werden.

Weiterhin kann der Einfluss der Belichtungszeit durch Verschmierung aus Gleichung (3.4) bestimmt werden. Bei einem in schweißtechnischen Anwendungen üblichen Vorschub von 0,016 m/s und einer Bauteilgröße von 50 mm ergibt sich für den eingesetzten Sensor mit einer Matrixgröße von 1280x1024 Pixeln eine maximale Belichtungszeit von 1 ms. Die für diese Arbeit untersuchte Kamera erlaubt Belichtungszeiten von 0,01 bis 40 ms und wird konstant auf 0,2ms festgesetzt. Daher können Verschmierungen in der folgenden Untersuchung der Prozesseinflüsse vernachlässigt werden.

Da die Bestimmung des Messfehlers durch den inhomogenen Brechungsindex im Messbereich in der vorliegenden Literatur nur sehr begrenzt behandelt wird, sollen dessen Herleitung und Analyse ein zentraler Inhalt der folgenden Untersuchungen sein. Da für die exakte quantitative Bestimmung des Einflusses jedoch eine genaue Kenntnis der Kalibrierbedingungen notwendig ist und eine Vielzahl von geometrischen Daten in nicht ausreichender Genauigkeit vorliegen, kann im Rahmen dieser Arbeit nur eine qualitative Analyse dieses Einflusses vorgenommen werden. Die mathematische Bestimmung der Signalverschiebung in x-Richtung muss für jeden der 1280 Einzelmesspunkte gesondert vorgenommen werden, da jeder Punkt unter verändertem Winkel aufgefächert wird. Daher wird für die weitere Betrachtung die Vereinfachung $\Theta_1(x) = \text{const.} = 0^\circ$ sowie über dem gesamten Messbereich konstant edelgasfreie, trockene Raumluft angenommen.

Es liegen keine Kenntnisse über die In-Prozess-Temperaturen im Messbereich des Sensors vor. Um eine Optimierung der Sensorhalterung hinsichtlich Einbauhöhe, Hitzeschild und Kühlung vorzunehmen, ist eine genaue Kenntnis der, während eines Fertigungsprozesses vorherrschenden Temperaturen, jedoch unerlässlich. Daher sollen die Temperaturbedingungen im Messbereich untersucht werden, um Daten über die thermische Belastung des Sensors zu erhalten. Aufgrund der Wellenlänge des Mess-Lasers des untersuchten Sensors, sind zudem erheblichen Störungen im Messsignal durch die Glühfarben der Schweißbraupe zu erwarten, welches ebenfalls untersucht werden soll.

Basierend auf dieser Analyse werden die Versuchsaufbauten für die Bestimmung der Signifikanz der einzelnen Einflussfaktoren entwickelt. Eine Zusammenfassung der Ergebnisse dieser Analyse ist in Tabelle 4-1 dargestellt.

Tabelle 4-1: Einflussfaktoren auf einen Triangulationssensor

Einflussfaktor	Signifikanz	Art der Analyse	Bemerkung
Oberflächeneigenschaften		experimentelle Messung mit vollständiger Analyse	Der Reflexionsgrad wird durch die Betrachtung von stark absorbierenden und transmittierenden Oberflächen untersucht.
Spiegelnd	hoch		
Direktionale Bearbeitungsspuren	hoch		
Reflexionsgrad	mittel		
Sensorposition	hoch		
Abschattung	hoch	qualitative Betrachtung	Kein exklusiver Prozesseinfluss, nur durch Interpolationsalgorithmen zu lösen
Roboterkinematik			
Taumelfehler	mittel	experimentelle Messung mit vollständiger Analyse	
Positionsfehler	hoch	kurze, qualitative Betrachtung	Ohne Hand-Auge Kalibrierung zwischen Roboter und Sensor ist keine quantitative Untersuchung des Positionsfehlers möglich.
Radiometrie			
Belichtungszeit und Sättigung	gering	rechnerisch	Einfluss kann vernachlässigt werden
Dunkelstrom durch heiße Pixel	gering	Vorversuch	Einfluss kann vernachlässigt werden
Dunkelstrom durch thermisches Lichtfeld und Erwärmung der Sensor-Matrix	hoch	experimentelle Messung mit vollständiger Analyse	Für eine exakte Bestimmung des Dunkelstroms muss die Sensor Matrix gesondert betrachtet werden, daher beschränkt sich die Betrachtung auf den Anwendungsfall Laserauftragschweißen
Prozesswärme			
Glühfarben	hoch	experimentelle Messung mit vollständiger Analyse	
Inhomogener Brechungsindex	mittel	mathematische Analyse basierend auf den Temperaturdaten	Betrachtung erfolgt qualitativ, da keine ausreichenden Daten über den Sensor vorliegen.
Strukturelle Schäden und Verzug	mittel	Temperaturmessung mittels Thermoelemente	

5 Versuchsbeschreibungen zur Bestimmung der Prozesseinflüsse

Für die Bestimmung der Signifikanz der in Kapitel 4 analysierten Prozesseinflüsse auf die Messgenauigkeit eines Triangulationssensors, werden verschiedene experimentelle Versuche durchgeführt. In diesem Kapitel sind die Versuchsaufbauten und Randbedingungen der einzelnen Messungen erläutert.

5.1 Ablauf einer Konturerfassung

Die in der CMOS-Sensormatrix gespeicherten kapazitiven Ladungen werden im Sensor verstärkt und digitalisiert. Der Sensor bestimmt somit für jeden der Messpunkte auf der Laserlinie eine x- und eine z-Koordinate im Scanner eigenen Koordinatensystem. Eine Einzelaufnahme aller Koordinatenpaarungen wird Profil genannt, mehrere hintereinander aufgenommene Profile werden als Profifolge bezeichnet. Der verwendete Sensor scanCONTROL 2910-100 projiziert je Profil 1280 Einzelmesspunkte. Die so entstandenen Koordinatenpaarungen müssen in einem Postprozessor interpretiert und verrechnet werden. Für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Messungen wird als Postprozessor die Software scanCONTROL Configuration Tool Version 5.1 verwendet. Diese Software übernimmt die vollständige Interpretation und Verrechnung der Profildaten. Die vermessenen Profile werden durch die Software in eine .AVI Datei geschrieben, welche im späteren Verlauf ausgewertet werden kann. Eine Auswahl der vermessenen Profildateien ist der Arbeit in einem Datenträger (A.11) angehängten.

5.1.1 Einstellungen in der Messsoftware

Um aussagekräftige und vergleichbare Messergebnisse zu erhalten, wird die Software so konfiguriert, dass sie möglichst wenig überarbeitete Sensordaten liefert. Es werden daher keine zusätzlichen Median- oder Mittelwerts-Filter angewandt, die das Messergebnis bei einer praktischen Anwendung verbessern würden. Um das Messrauschen zu minimieren, wird die Belichtungszeit mit 0,2 ms so gewählt, dass die Sättigung des gesamten Messbereiches möglichst gleichmäßig nahe bei 90% liegt. Die Einstellung der Belichtungszeit wird zur Steigerung der Wiederholgenauigkeit für alle Messungen auf diesen Wert festgesetzt. Der Schwellwert legt fest, wie stark die Kamera auf die Grauwertunterschiede der einzelnen Pixel reagiert. Für die durchgeführten Versuche wird die Auslöseschwelle der Kamera statisch auf den Standardwert 128 festgelegt.

Die Einzelmessbereiche werden für jedes Programm individuell angepasst. Die Abtastrate des Sensors wird, sofern nicht anders angegeben, konstant auf 100 Profile pro Sekunde eingestellt. Daraus ergibt sich je nach eingesetzter Vorschubgeschwindigkeit v [m/s] eine Auflösung in y-Richtung von

$$\Delta y = \frac{v}{100} \frac{1}{s} \quad (5.1)$$

Je höher die Vorschubgeschwindigkeit, desto geringer wird die Auflösung der Profifolge in y-Richtung. Für die beim Laserauftragschweißen üblichen Vorschubgeschwindigkeit von $v = 0,016 \frac{m}{s}$ ergibt sich somit eine Auflösung in y-Richtung von $\Delta y = 0,16 \text{ mm} \cdot s$.

Um einen Einblick in den Ablauf der Konturvermessungen zu geben, ist in Abbildung 5-1 ein Screenshot der Bedienoberfläche des Postprozessors abgebildet.

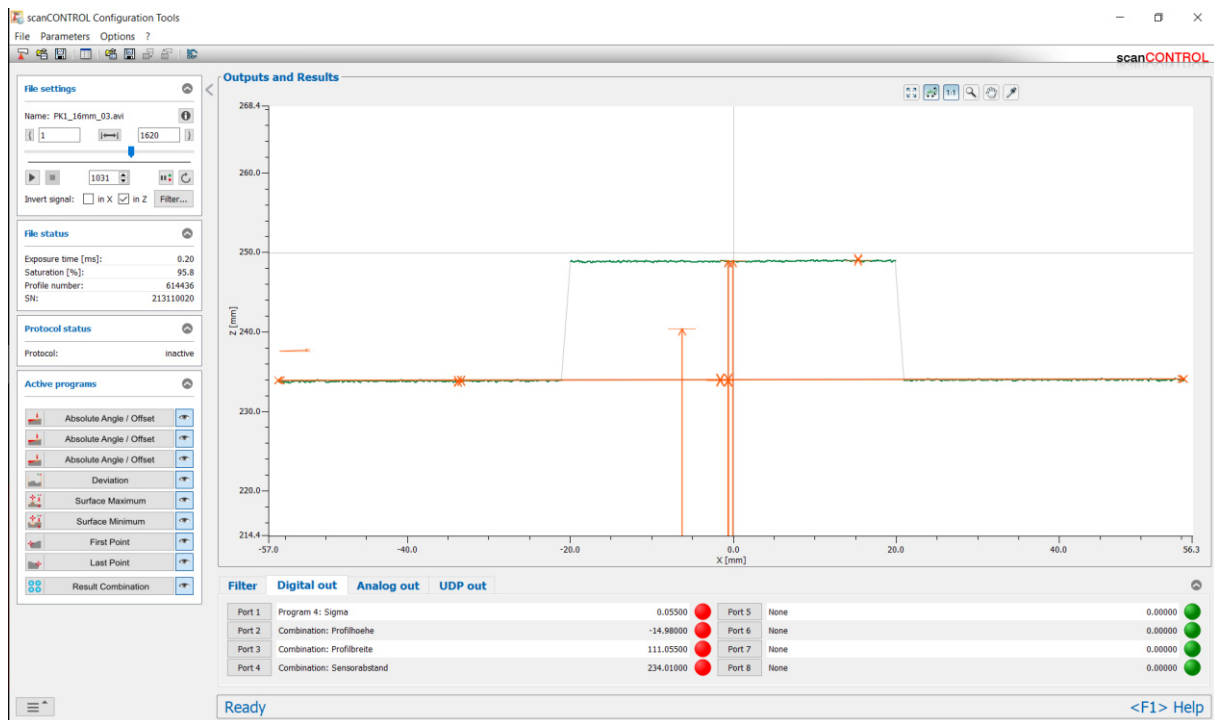


Abbildung 5-1: Der Postprozessor scanCONTROL Configuration Tool 5.1 mit eingelesenen Profildaten

5.1.2 Programme und Verrechnungen im Postprozessor

Es werden folgende durch die Software zur Verfügung gestellte Programme zur Vermessung der Profildaten verwendet:

Absolute Angle/Offset

Das Programm bezieht alle Punkte im gewählten Messbereich mit ein und legt eine Ausgleichsgerade über die z-Koordinate. Somit kann über das interne Koordinatensystem der Abstand des Profilmittelwertes vom Nullpunkt des Sensors bestimmt werden.

First Point / Last Point

Das Programm ermittelt die x-Koordinate des ersten/des letzten messbaren Punktes im gewählten Messbereich in Bezug auf das interne Koordinatensystem des Scanners.

Surface Maximum / Surface Minimum

Das Programm bezieht alle Punkte im gewählten Messbereich mit ein und legt eine Ausgleichsgerade über die z-Koordinate. Nun ermittelt das Programm die höchste Spitze / das tiefste Tal der gemessenen Profiloberfläche in Bezug auf die Ausgleichsgerade.

Maximum Point

Das Programm ermittelt die z-Koordinate des höchsten messbaren Punktes im gewählten Messbereich in Bezug auf das interne Koordinatensystem des Scanners.

Combination: Profilhöhe

Über das Programm Absolute Offset wird der Sensorabstand vom Prüfkörper und von der Grundplatte bestimmt. Die Werte werden miteinander verrechnet über die Gleichung:

$$z_{\text{Prüfkörper}} - z_{\text{Grundplatte}} = h_{\text{Prüfkörper}} \quad (5.2)$$

Damit kann die Höhe der Kontur berechnet werden.

Combination: Profilbreite

Über das Programm First Point / Last Point wird der Anfangspunkt und der Endpunkt des Prüfkörpers im Profil bestimmt. Diese werden verrechnet über die Gleichung:

$$x_{\text{Profilende}} - x_{\text{Profilanfang}} = b_{\text{Prüfkörper}} \quad (5.3)$$

Damit kann die Breite der Kontur berechnet werden.

Combination: Rautiefe

Über das Programm Surface Maximum / Minimum werden die höchsten Spitzen und die tiefsten Täler der Profiloberfläche berechnet werden. Diese werden verrechnet über die Gleichung:

$$\text{Höhe} - \text{Tiefe} = \text{Rautiefe} \quad (5.4)$$

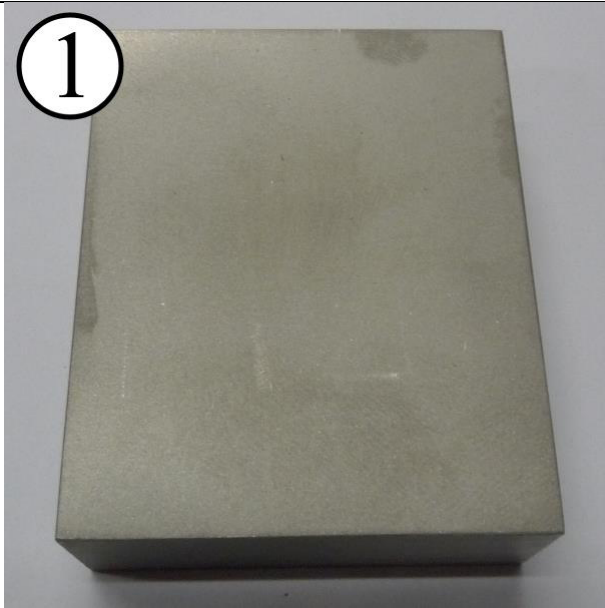
Damit kann die Rautiefe Rz der Kontur berechnet werden.

Die aufgezeichneten Profile können mit den ausgewählten Programmen berechnet werden. Die Software generiert dazu eine Ausgabedatei im .txt Format, in der zu jedem aufgezeichneten Einzelprofil die Rechenergebnisse der ausgewählten Programme aufgelistet werden. Die weitere Auswertung der Messprotokolle erfolgt für die vorliegende Arbeit mit geeigneten MATLAB-Skripten.

5.2 Konturerfassung verschiedener Oberflächenprofile

Angelehnt² an die DIN 32877 „Optoelektrische Abstands-, Profil- und Formmessung [Deu2000] werden 6 Prüfkörper mit verschiedenen Oberflächenbeschaffenheiten entwickelt, mit deren Hilfe die in Abschnitt 3.1 beschriebenen Einflüsse der verschiedenen Oberflächenzustände auf die Messgenauigkeit des Sensors untersucht werden sollen. Für die Prüfkörper wird je ein gefräster, rechtwinkliger, paralleler Block aus Nichtrostendem Stahl (Werkstoffnummer 1.4305) mit den Grundmaßen 15x20x50 mm hergestellt. Die Oberflächen werden im nächsten Schritt mit verschiedenen Verfahren behandelt. Eine genaue Beschreibung der Prüfkörper ist in Tabelle 5-1 zu finden. Die Rauheitswerte der verschiedenen Bearbeitungsverfahren sind aus [FGK+2011] entnommen und orientieren sich an den, durch die Verfahren durchschnittlich erreichbaren Werten. Die Einstellungen in der Messsoftware scanCONTROL Configuration Tool werden gemäß Abschnitt 5.1.1 vorgenommen. Für jeden Prüfkörper werden je 5 vollständige Aufnahmen der Kontur und der Oberfläche angefertigt. Die Messfrequenz wird mit 100 Profilen pro Sekunde angesetzt. Der mittlere Messabstand orientiert sich an dem Laser-Pulver-Auftragsschweißvorgang. Daher wird der Tool Center Point so positioniert, dass er konstant im Abstand von 16 mm zum Prüfkörper bleibt. Der mittlere Messabstand ergibt sich damit zu 251 mm. Das für die Messung eingesetzte Roboterprogramm mit dem Bewegungsprofil „Linear Standard“ ist in Abschnitt 5.3 beschrieben.

Tabelle 5-1: Prüfkörper verschiedener Oberflächen Beschaffenheiten

Prüfkörper	Erläuterung
	<p><u>Prüfkörper 1</u></p> <p>Durch Sandstrahlen wird eine homogene, matte Oberfläche mit einer Rauheit $Rz \approx 10 \mu m$ hergestellt. Da der Prüfkörper 1 die geringsten Fehlereinflüsse aufgrund der Oberflächenbeschaffenheit verspricht und dem in der DIN 32877 geforderten Normkörper gleicht, wird er im Folgenden als Referenz für alle anderen Messwerte herangezogen. Die mittlere Profilhöhe des PK1 beträgt 15 mm.</p>

² Die DIN 32877 ist vorrangig zur Bestimmung von Linearitätstoleranzen, Wiederholstandardabweichungen und Fehlergrenzen von Sensoren vorgesehen. Die in der vorliegenden Arbeit durchgeführten Versuche behandeln diese Größen bewusst nicht intensiv, da es sich um Kalibriergrößen des Sensors handelt und nicht um Einflussgrößen des Laserauftragsschweißprozesses. Aus diesem Grund sind die Prüfkörper zwar an die DIN 32877 angelehnt, entsprechen aber nicht den dort geforderten Bedingungen.

2



Prüfkörper 2

Durch Schleifen mit Körnung 240 wird eine matt glänzende Oberfläche mit leichten Bearbeitungsspuren und einer Rauheit $Rz \approx 4 \mu m$ hergestellt.

Aufgrund der Fertigungsbedingungen kommt es zu einer ungleichmäßigen Abweichung in der Profilhöhe. Die mittlere Profilhöhe des PK2 beträgt 14,95 mm.

3

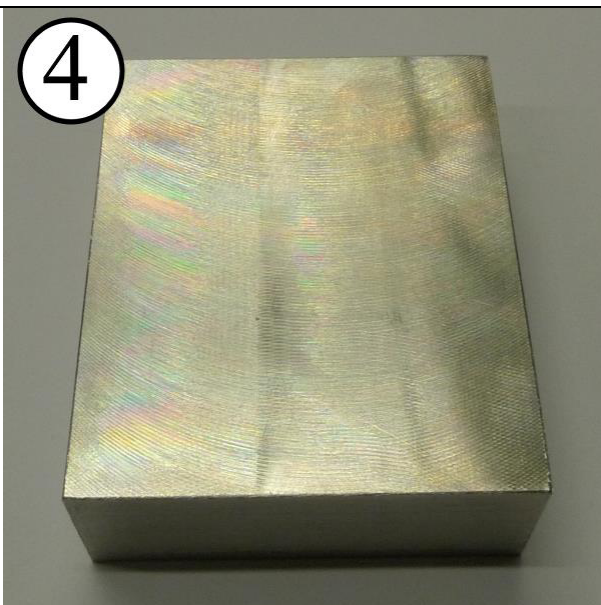


Prüfkörper 3

Durch Schleifen bis Körnung 3000 wird eine hochglanzpolierte, spiegelnde Oberfläche mit einer Rauheit $Rz \approx 1 \mu m$ hergestellt.

Aufgrund der Fertigungsbedingungen kommt es zu einer ungleichmäßigen Abweichung in der Profilhöhe. Die mittlere Profilhöhe des PK3 beträgt 14,95 mm.

4



Prüfkörper 4

Feingeschlichteter Prüfkörper ohne weitere Oberflächenbehandlung mit deutlich sichtbaren Bearbeitungsspuren und einer Rauheit $Rz \approx 25 \mu m$

Aufgrund der Fertigungsbedingungen kommt es zu einer ungleichmäßigen Abweichung in der Profilhöhe. Die mittlere Profilhöhe des PK4 beträgt 14,95 mm.

5



Prüfkörper 5

Auf den Prüfkörper wird eine 1mm starke Schicht aus schwarzem Gummi geklebt. Zu der Oberflächenrauheit kann keine Angabe gemacht werden.

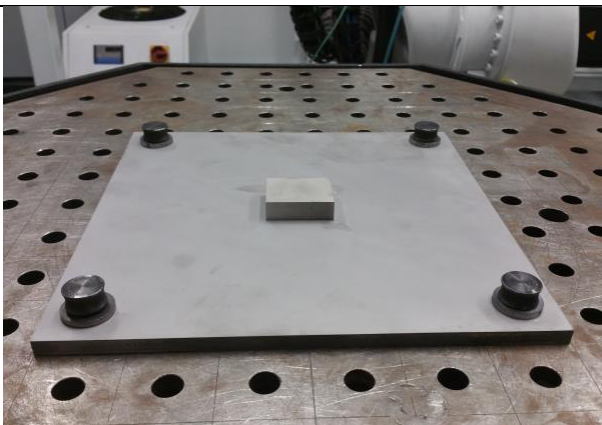
Die mittlere Profilhöhe des PK5 beträgt 16 mm.

6



Prüfkörper 6

Auf den Prüfkörper 1 wird eine Spur durchsichtiger Klebstoff mit einer Höhe von 2 mm und Breite von 5 mm aufgebracht. Die Klebspur stellt eine transmittierende Oberfläche dar. Die abgebildete Aufnahme ist wenige Minuten nach dem Auftragen des Klebstoffes entstanden und zeigt eine nur angetrocknete Oberfläche. Zum Zeitpunkt der Messung ist die Klebspur vollständig durchgetrocknet. Zu der Oberflächenrauheit kann keine Angabe gemacht werden.



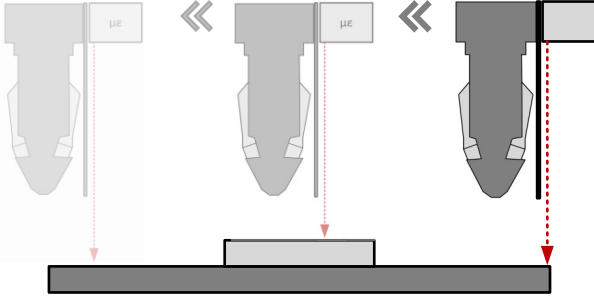
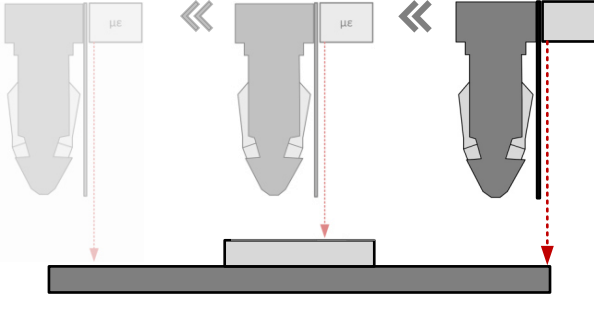

Grundplatte

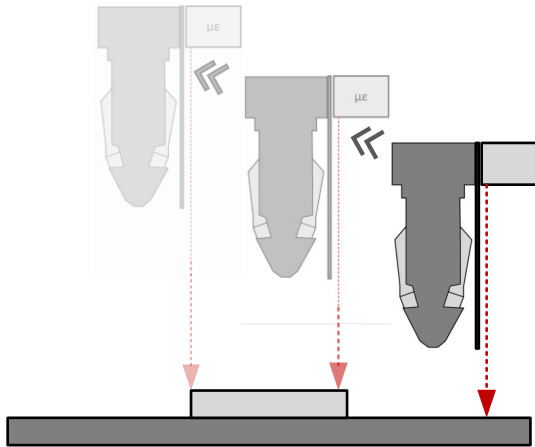
Die Prüfkörper werden für die Messung mittig auf eine sandgestrahlte Grundplatte aus Baustahl mit einer Rauheit $R_z \approx 10 \mu m$ gelegt.

5.3 Konturerfassung unter verschiedenen Bewegungsprofilen

Um die Messabweichungen durch den Achsfehler des Roboters (Abschnitt 3.4) und die Sensorposition (Abschnitt 3.2) zu bestimmen, werden mehrere Roboterprogramme mit unterschiedlichen Positionsfolgen und Vorschubgeschwindigkeiten des Endeffektors entwickelt. Diese Programme werden im Folgenden als Bewegungsprofile bezeichnet. Es handelt sich bei allen Bewegungsprofilen um Linearbewegungen (LIN), bei denen Start- und Endpunkt manuell eingegeben wurden. Die notwendigen Achsstellungen des Roboters zum Erreichen der Einzelposen werden von der Steuersoftware KUKA KRC-2 automatisch ermittelt. Für die Einzelmessungen wird, wie in Abschnitt 5.2 beschrieben, der sandgestrahlte Referenzprüfkörper PK1 auf eine sandgestrahlte Grundplatte gelegt. Für jedes Bewegungsprofil werden fünf Einzelmessungen durchgeführt und später gemäß DIN 1319-1 ausgewertet. Die Messfrequenz wird mit 100 Profilen pro Sekunde angesetzt. In der folgenden Tabelle 5-2 sind die einzelnen Bewegungsprofile beschrieben.

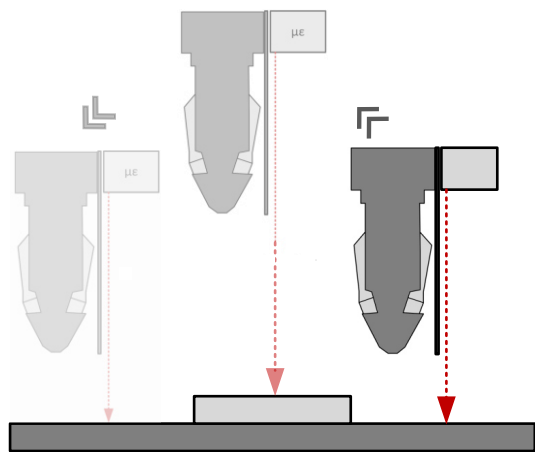
Tabelle 5-2: Bewegungsprofile

Bewegungsprofil	Erläuterung
	<p><u>Linear Standard</u></p> <p>Der Mess-Laser wird mit einem Abstand von 251 mm in einer Linearbewegung über den Prüfkörper geführt. Die Vorschubgeschwindigkeit beträgt $v = 0,016 \frac{m}{s}$. Dies entspricht der üblichen Vorschubgeschwindigkeit beim Laserauftragschweißen.</p>
	<p><u>Linear Maximalgeschwindigkeit</u></p> <p>Der Mess-Laser wird mit einem Abstand von 251 mm in einer Linearbewegung über den Prüfkörper geführt. Die Vorschubgeschwindigkeit beträgt $v = 0,066 \frac{m}{s}$. Dies entspricht der maximal möglichen Vorschubgeschwindigkeit, die beim Laserauftragschweißen üblicherweise eingesetzt wird.</p>
	<p><u>Linear Messbereich Ende</u></p> <p>Der Mess-Laser wird mit einem Abstand von 271 mm über die Oberfläche des Prüfkörpers geführt. Die Grundplatte befindet sich damit auf einem Abstand von 286 mm zum Mess-Laser. Dies entspricht dem Ende des mit dem Sensor maximal messbaren Bereiches.</p>



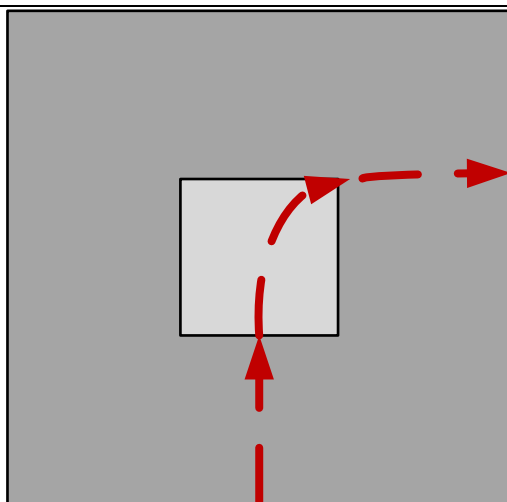
Rampe

Der Mess-Laser wird in einer Rampenfunktion über den Prüfkörper geführt. Dabei befindet sich der mittlere Messbereich zu Beginn auf einer Höhe von 251 mm über dem Prüfkörper. Zum Ende der Messung befindet sich der mittlere Messbereich auf einer Höhe von 271 mm über dem Prüfkörper. Der Roboter führt dabei eine Linearbewegung aus. Die Vorschubgeschwindigkeit beträgt $v = 0,016 \frac{m}{s}$.



Dreieck

Der Mess-Laser wird in einer Dreiecksfunktion über den Prüfkörper geführt. Dabei befindet sich der mittlere Messbereich zu Beginn auf einer Höhe von 251 mm über dem Prüfkörper. Der Roboter fährt daraufhin in einer linearen Rampenfunktion auf eine Maximalhöhe von 271 mm über dem Prüfkörper, die er auf der Mitte des Prüfkörpers erreicht. Der Roboter fährt daraufhin in einer linearen Rampenfunktion zurück auf 251 mm Abstand zur Messoberfläche, die am Ende des Prüfkörpers erreicht werden. Die Vorschubgeschwindigkeit beträgt $v = 0,016 \frac{m}{s}$.



Kurve

Der Mess-Laser wird in einer Kurvenfunktion über den Prüfkörper geführt. Der Abstand zur Oberfläche beträgt konstant 251 mm. Der Roboter führt gleichzeitig eine Linearbewegung und eine Rotation des Endeffektors um 90° durch. Die Vorschubgeschwindigkeit beträgt $v = 0,016 \frac{m}{s}$.

5.4 Konturerfassung einer Abschattungsprüfstrecke

Um den in Abschnitt 3.3 beschriebenen Effekt der Abschattung durch Körperkanten zu untersuchen wird eine Prüfstrecke entwickelt, die verschiedene Spaltmaße und Kantenlängen in verschiedenen Messbereichen enthält. Die Prüfstrecke ist in Abbildung 5-2 und Tabelle 5-3 genauer beschrieben. Die für die Strecke notwendigen Einzelteile werden mittels eines CNC Lasercutters aus 10 mm starken Blechen ausgeschnitten. Der gewählte Werkstoff ist rostfreier Stahl mit der Werkstoffnummer 1.4301, welcher mittels Sandstrahlen nachbearbeitet wird. Die Konturerfassung findet auf der per Hand nachbearbeiteten Schnittkante des Lasercutters statt, wodurch neben Messungenauigkeiten durch Bearbeitungsspuren auch geometrische Abweichungen von der Soll-Geometrie des CAD Modells zu erwarten sind. Aus diesem Grund wird auf eine exakte Bewertung der Messergebnisse nach den in Kapitel 4 festgelegten Grenzwerten verzichtet und es wird lediglich eine qualitative Auswertung hinsichtlich der Abschattungsfehler durchgeführt. Um die Prüfstrecke als universelles Prüfmittel für zukünftige Weiterentwicklungen der Sensorintegration einsetzen zu können, wird ein zusätzlicher Abschnitt mit verschiedenen Oberflächeneigenschaften eingeplant. Die Gesamtstrecke wird zur einfachen Handhabung aus zwei Einzelprüfstrecken zusammengesetzt und hat eine Gesamtlänge von 800 mm bei einer Gesamthöhe von 40 mm.

Für die Konturerfassung wird der Schweißkopf so über der Prüfstrecke positioniert, dass der mittlere Messbereich bei 238 mm auf dem Höchstpunkt der Kontur liegt. Der Triangulations-sensor wird mit einer Vorschubgeschwindigkeit von $v = 0,016 \frac{m}{s}$ über die Kontur geführt und nimmt dabei eine Profilverfolgung auf, die mittels der in Abschnitt 5.1 beschriebenen Programme nach der maximal messbaren Höhenkoordinate ausgewertet wird.

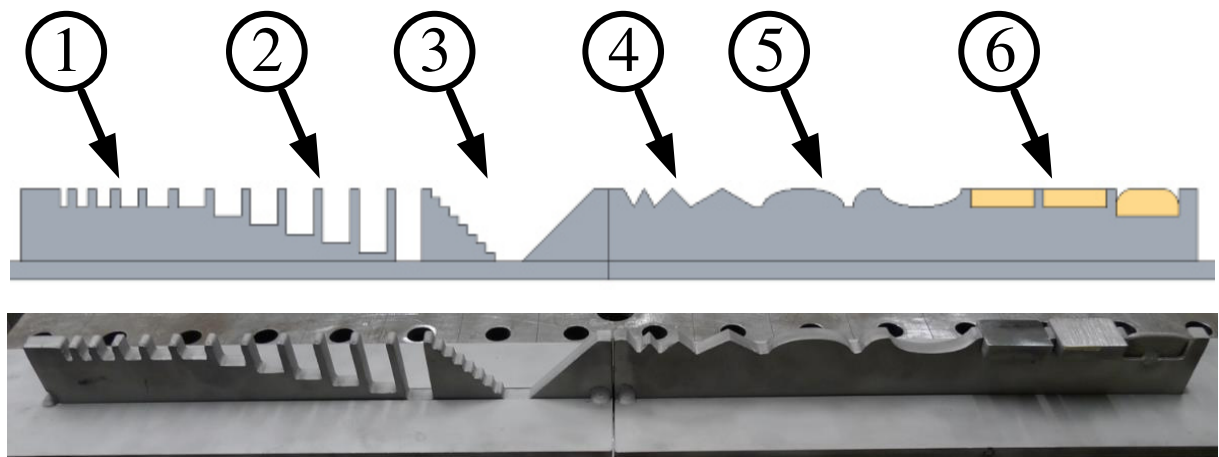


Abbildung 5-2: Abschattungsprüfstrecke - oben: CAD-Modell mit Positionennummern unten: Foto der fertigen Prüfstrecke

Tabelle 5-3: Beschreibung der Abschattungsprüfstrecke

Pos.	Beschreibung
1	Aufeinanderfolgende Spalte mit Breiten von 2, 4, 6, 8, 12 und 15 mm und einer konstanten Tiefe von 10 mm.
2	Aufeinanderfolgende Spalte mit einer konstanten Breite von 15 mm und einer Tiefe von 15, 20, 25, 30, 35 und 40 mm.
3	V-Profil mit einem Treppenstufeneffekt und einer Rampe. Die Treppenstufen haben eine Breite- und Höhe von 5 mm. Die Steigung der Rampe beträgt 45°.
4	Aufeinanderfolgende Dreiecksprofile mit Steigungen von 60°, 45° und 30° mit einer Tiefe von 10 mm.
5	Verschiedene Radien- und Ellipsenformen
6	Verschiedene Oberflächenstrukturen bestehend aus einem spiegelnd polierten Körper, einem Körper mit deutlich sichtbaren, direktionalen Bearbeitungsspuren und einer aufgeschweißten Kontur aus Ti64.

5.5 In-Prozess Temperaturen bei einem LPA Vorgang

Um Erkenntnisse über die Prozesstemperaturen zu ziehen, werden Temperaturmessungen beim Erzeugen einer Turbinenschaufelstruktur aus dem Werkstoff Ti64 durchgeführt. Die Prüfkörper haben eine Gesamtlänge von 100 mm und sollen am höchsten Punkt eine Höhe von 25 mm aufweisen. Es werden dazu 32 Lagen aufgeschweißt, wobei die Lagen 1-20 über die gesamte Länge geschweißt werden. Dabei wird eine mäandernde Aufbaustrategie eingesetzt, wie in Abbildung 2-11 beschrieben. Um eine Steigung in der Geometrie herzustellen, werden die Lagen 21-32 in kürzer werdenden Abständen aufgetragen. Der Schweißprozess findet für diese Lagen nur in eine Richtung statt. Die aufgeschweißte Geometrie ist in Abbildung 5-3 dargestellt. Die Gesamtdauer des Schweißprozesses beträgt 400 Sekunden. Der Prüfkörper wird auf eine gekühlte Titanplatte aufgeschweißt, die sich in einer 220 mm hohen Schutzgaskammer mit Argon Atmosphäre befindet (Abschnitt 4.1).



Abbildung 5-3: Oben - CAD-Modell der geschweißten Kontur, Unten - Ergebnis der Schweißung

Für die durchgeführte Messung werden 7 Thermoelemente NiCr/Ni Typ K nach DIN EN 60584-3 [DKE2008] verwendet. Die in der DIN geregelten Grenzabweichungen sind in Tabelle 5-4 gelistet.

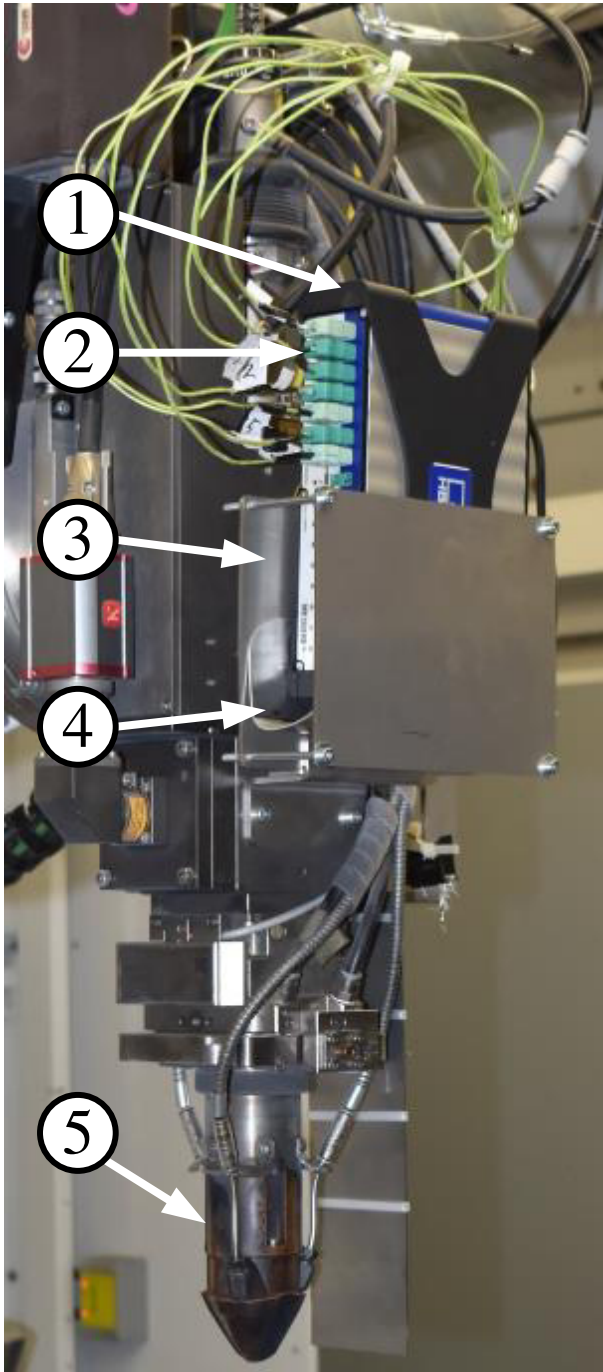
Tabelle 5-4: Grenzabweichung für Thermoelemente Typ KCB nach DIN 60584-3

Typ	Genauigkeitsklasse 2	Anwendungs- Temperaturbereich	Temperatur der Messstelle
KCB	$\pm 100 \mu\text{V}$ ($\pm 2,5^\circ\text{C}$)	0 bis $+100^\circ\text{C}$	900°C

Die Thermoelemente werden über eine Thermoelement-Steckverbindung mit Flachkontakten mit einem Messaufnehmer verbunden. Als Messaufnehmer wird ein Thermoelement Messverstärker Typ K, Modell Mx1609 KB der Firma HBM verwendet. Durch ein Ethernet Kabel wird der der Messaufnehmer mit einem Laptop verbunden.

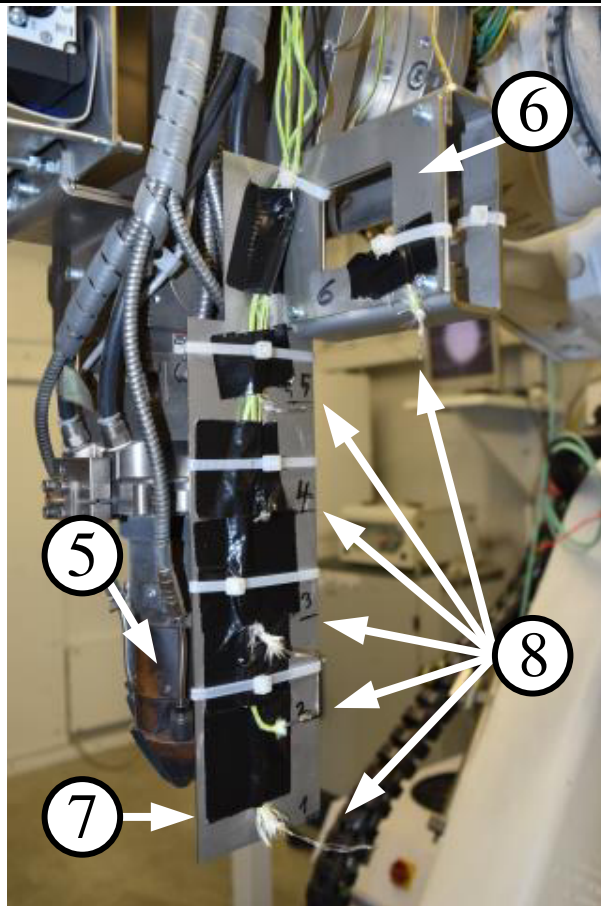
Für die Konfiguration und Verwaltung der Messdaten, sowie die Umrechnung der gemessenen Spannungen in Temperaturwerte nach DIN EN 60584-3, wird die Software CatmanAP der Firma HBM eingesetzt. Die weitere Vorgehensweise für den Messaufbau wird in Tabelle 5-5 beschrieben.

Tabelle 5-5: Versuchsaufbau der Prozesstemperaturmessung

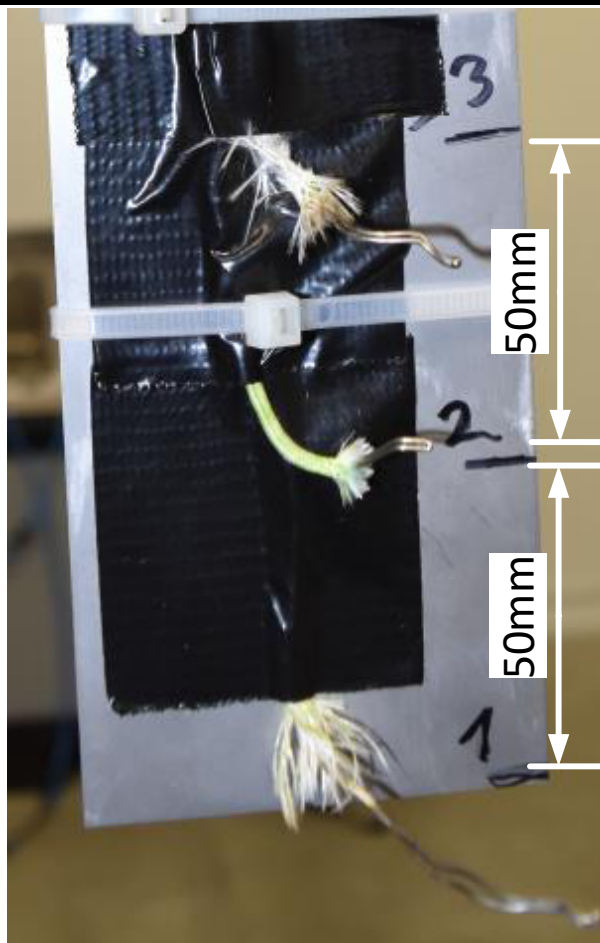
Abbildung	Erläuterung
	<p>Um die Messung während des Schweißprozesses am beweglichen Roboterarm durchführen zu können, wird der Thermoelement Messverstärker (Pos. 1) am Roboter fixiert. Dazu wird der Messverstärker in einer Spannvorrichtung (Pos. 3) am Schweißkopf (Pos. 5) befestigt. Die Spannvorrichtung wird mit 3 Schrauben Größe M5 formschlüssig mit dem Schweißkopf verbunden. Der Messverstärker wird mittels 4 Schrauben der Größe M4, kraftschlüssig zwischen zwei Platten eingespannt. Zusätzlich ist ein Staub- und Hitzeschild (Pos.4) vorgesehen, um eine Beschädigung des Messverstärkers durch Prozesseinflüsse zu verhindern. In dem Messverstärker sind 7 Thermoelemente Typ K (Pos. 2) eingesteckt.</p>



Detailansicht auf den eingespannten Messverstärker



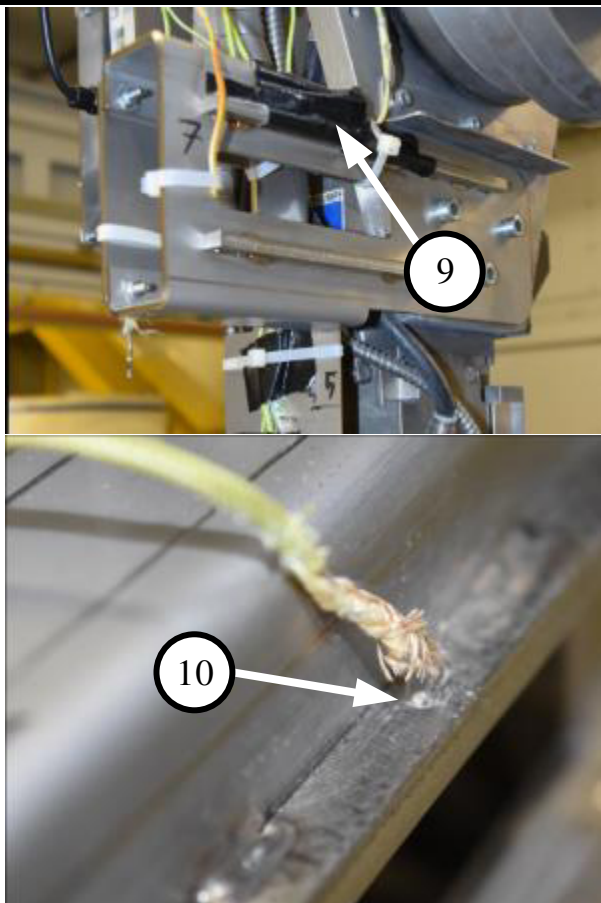
Auf der anderen Seite des Schweißkopfes (Pos. 5) ist die Halterung für den Sensor (Pos. 6) mit Hitzeschild (Pos. 7) angebracht. Am Hitzeschild sind fünf Thermoelemente (Pos. 8) angebracht. Die Thermoelemente werden mit Kabelbindern und Gewebeklebeband an ihren Positionen fixiert. Der erste Messpunkt liegt parallel zum Nullpunkt des Schweißkopfes. Die weiteren Messpunkte sind jeweils in einem Abstand von 50 mm angebracht. Ein sechstes Thermoelement ist an der Einbauposition des Triangulationssensors angebracht.



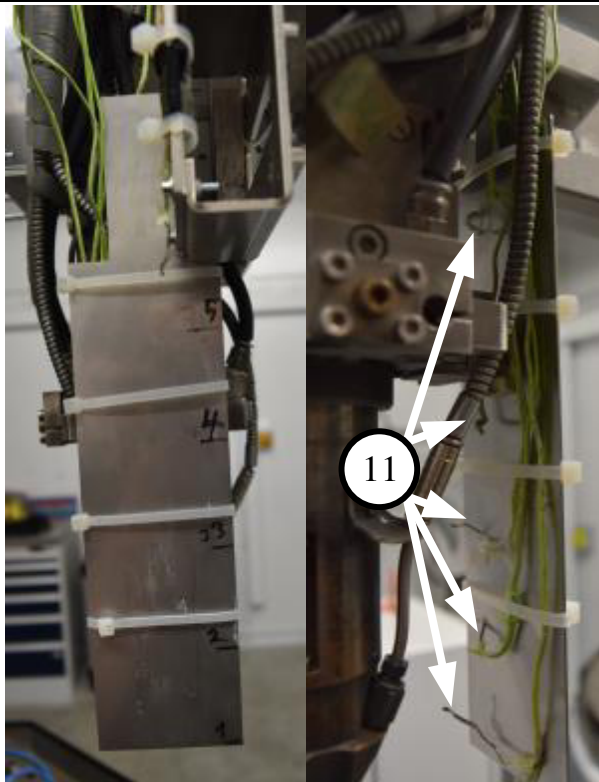
Detailansicht Messpunkt 1, 2 und 3

Die hier eingesetzten Thermoelemente wurden bereits in früheren Versuchsreihen eingesetzt und weisen daher unterschiedliche Abisolierungsgrade an den Messstellen auf. Es ist zu erwarten, dass dieser Faktor zu Messungenauigkeiten führen wird.

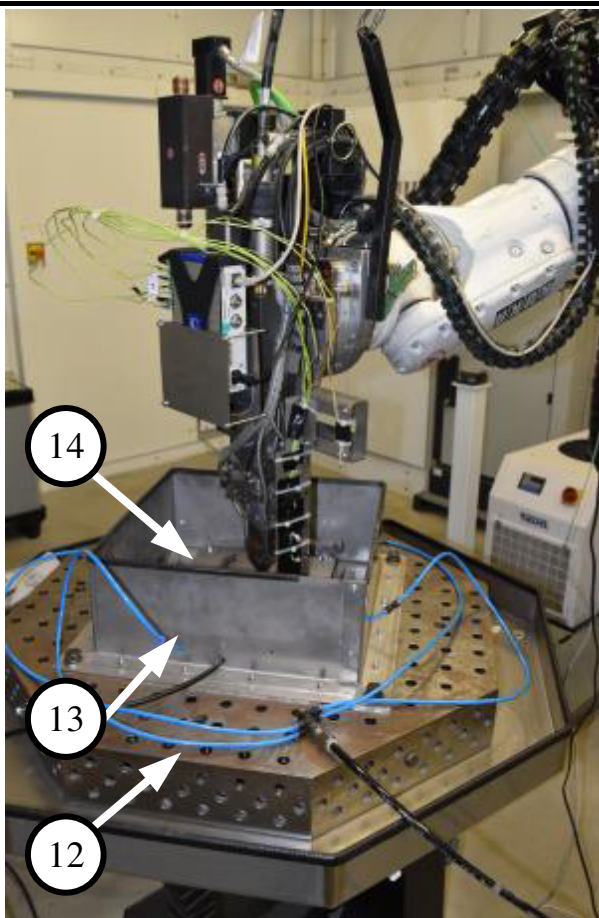
Die Spitze des Thermoelementes auf Messpunkt 3 wird im späteren Verlauf noch vor Beginn der Messung weiter hochgebogen, um bündig mit Linie 3 zu liegen.



Auf der Rückseite der Sensorhalterung wird das siebte Thermoelement angebracht (Pos. 9). Um die Temperaturveränderung und somit den möglichen Verzug der Halterung zu ermitteln, wird eine Sacklochbohrung in eine Strebe der Aufnahme eingebracht (Pos.10). Das Thermoelement 7 wird in die Bohrung eingesetzt und dort mit einer Metallplatte und Gewebeklebeband fixiert.



Für eine zweite Messung werden die Thermoelemente 1-5 auf der Rückseite des Hitzeschildes angebracht (Pos. 11). Die Thermoelemente sind der Wärmestrahlung direkt ausgesetzt und messen somit die absoluten Prozesstemperaturen. Die Höhenkoordinaten der Messpunkte bleiben für die zweite Messung unverändert. Die Messpunkte 6 und 7 bleiben ebenfalls unverändert.



Auf dem Bearbeitungstisch (Pos. 12) wird eine Schutzgaskammer mit einer Wandhöhe von 220 mm angebracht (Pos. 13). In der Kammer befindet sich eine gekühlte Grundplatte (Pos. 14), auf die eine Kontur geschweißt wird. In der Abbildung ist ein Probelauf ohne Schweißvorgang mit vollständigem Messaufbau zu sehen.

5.6 In-Prozess Kontur- und Lagen-Offseterfassung

Für die Kontur- und Lagen-Offseterfassung während eines LPA-Prozesses, werden geradlinige Wände aus dem Werkstoff Ti64 aufgeschweißt. Aus den Versuchsergebnissen sollen Erkenntnisse über die in Abschnitt 3.5 und 3.6 beschriebenen Prozesseinflüsse gezogen werden. Dazu werden insgesamt 20 Lagen mit einer Fluglinienlänge von $l = 35 \text{ mm}$ und einem Lagen-Offset von $\Delta h_r = 0,76 \text{ mm}$ mit mäandernder Aufbaustrategie (Abbildung 2-11) aufgeschweißt. Die theoretische Gesamtaufbauhöhe ergibt sich zu $H_{\text{theoretisch}} = 15,2 \text{ mm}$. Der Prüfkörper wird auf eine gekühlte Titanplatte aufgeschweißt, die sich in einer 220 mm hohen Schutzgaskammer mit Argon-Atmosphäre befindet (Abschnitt 4.1). Es werden in sechs einzelfertigungsvorgängen insgesamt sechs Konturen aufgetragen. Eine Foto-Aufnahme einer aufgetragenen Kontur ist in Abbildung 5-4 zu sehen.

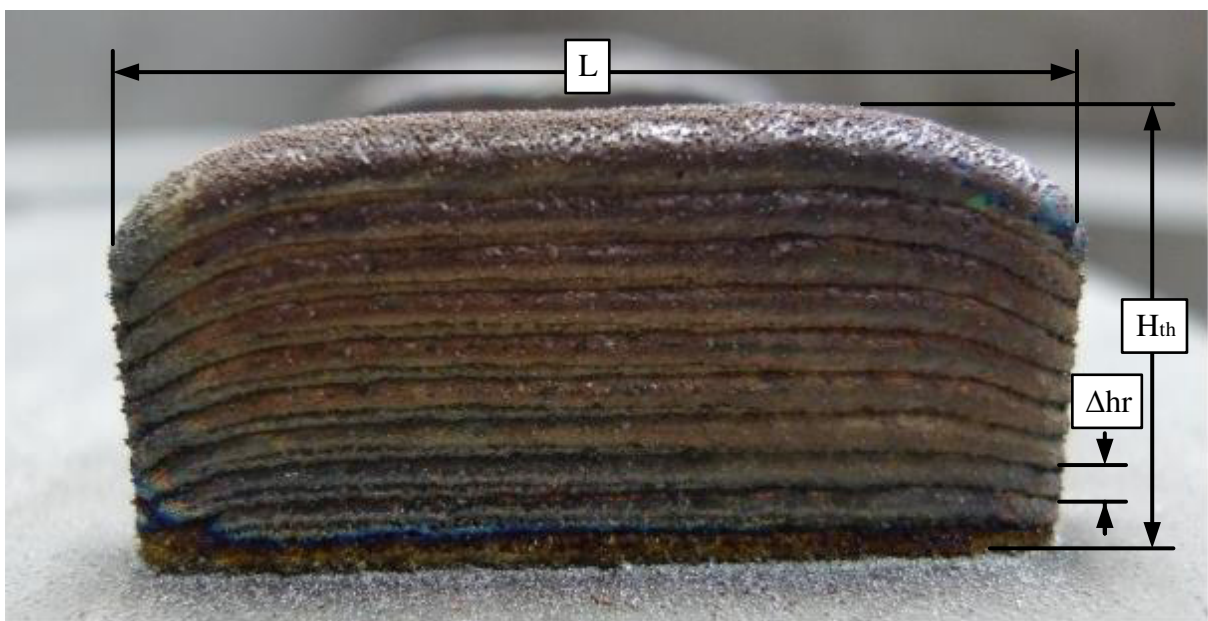


Abbildung 5-4: Aufgetragene Kontur mit 20 Lagen

Die Vermessung der Kontur mittels Triangulationssensor wird auf zwei verschiedene Arten durchgeführt, wobei für jede Messmethode jeweils drei Konturen aufgetragen- und vermessen werden.

In-Prozess Konturerfassung

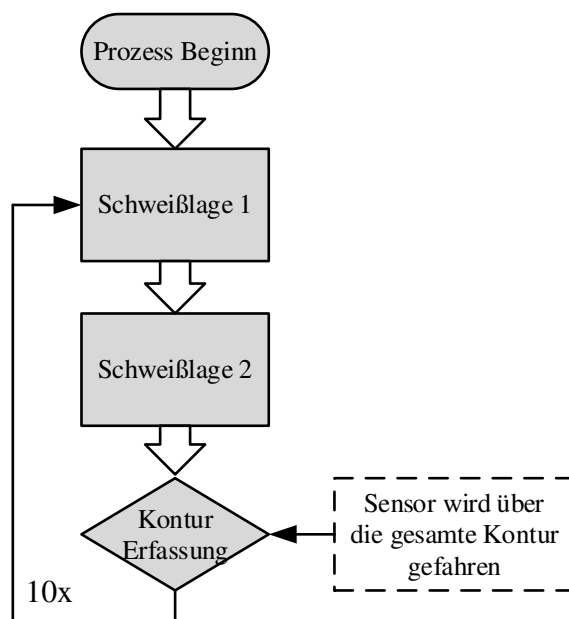
Der Lagenaufbau findet in einer pendelnden Bewegung des Schweißkopfes statt. Nach jeder zweiten aufgetragenen Lage, wird die Laserlinie des am Laserkopf befestigten Triangulationssensors vollständig über die aufgebaute Kontur gefahren und eine Profilfolge wird aufgenommen. Über die in Abschnitt 5.1 beschriebenen Programme, wird der Maximalpunkt der Einzellagen bestimmt, woraus sich eine schichtweise Abbildung der Gesamtkontur erstellen lässt.

In-Prozess Lagen-Offseterfassung

Die Erfassung des Lagen-Offsets erfolgt wie oben beschrieben nach jeder zweiten aufgetragenen Lage. Die Laserlinie des Triangulationssensors wird bis auf die Mitte der aufgetragenen Kontur geschwenkt. Der Sensor verbleibt auf dieser Position für eine Verweildauer von 10 Sekunden und nimmt dort eine Profildfolge auf. Über die in Abschnitt 5.1 beschriebenen Programme, wird der Maximalpunkt der Einzellagen bestimmt, woraus sich eine schichtweise Abbildung des Lagen-Offsets erstellen lässt.

Zusätzlich zu den triangulatorischen Messungen wird eine In-Prozess Temperaturmessung durchgeführt. Dazu wird der Pulverkopf wie in Abschnitt 5.5 beschrieben vorbereitet. Für diese Messung werden lediglich fünf Thermoelemente auf den Messpunkten 1-5 hinter dem Hitzeschild angebracht, um das Temperaturfeld im Messbereich abzubilden. (Tabelle 5-5). Der schematische Ablauf der In-Prozess-Kontur- und Lagen-Offseterfassung ist in Abbildung 5-5 dargestellt.

In-Prozess-Konturerfassung



In-Prozess-Lagen-Offseterfassung

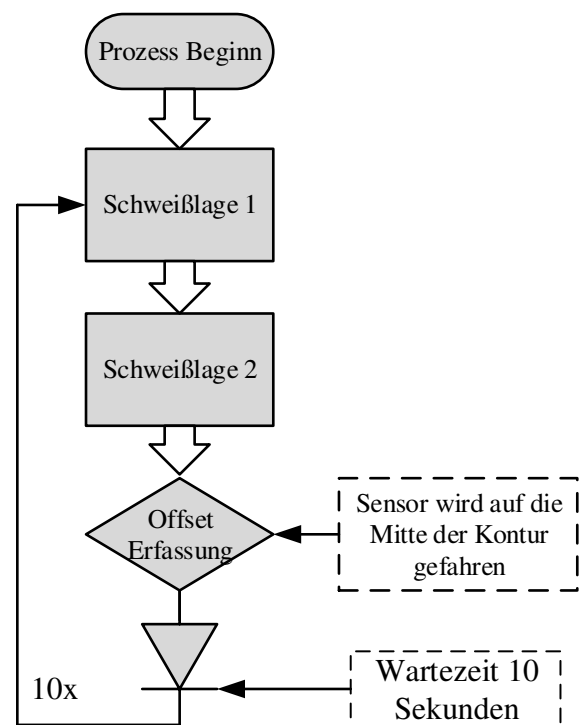


Abbildung 5-5: Schematischer Ablauf der Kontur- und Lagen-Offseterfassung

6 Bestimmung des Messfehlers durch den inhomogenen Brechungsindex

Da eine experimentelle Bestimmung des in Abschnitt 3.6.2 beschriebenen inhomogenen Brechungsindex durch das inhomogene Temperaturfeld im Messbereich mit den zur Verfügung stehenden Daten und Mitteln nicht möglich ist, erfolgt in diesem Abschnitt eine mathematische Herleitung der Einflussgröße. Für diese Herleitung wird auf die Temperaturdaten aus Versuch 5.5 vorgegriffen, die im folgenden Abschnitt 7.4 dargestellt sind.

6.1 Vorgehensweise zur Bestimmung des Messfehlers

Da die nötigen Werte für Pixelgröße, Brennweite und Triangulationswinkel für den in dieser Arbeit untersuchten Sensor nicht bekannt sind, werden für die theoretische Untersuchung folgende Annahmen getroffen:

Es wird ein System mit einer CMOS Matrix untersucht. Die Matrix besteht aus 1280x1024 Einzelpixeln. Für die theoretische Betrachtung werden Pixelgrößen von 14 μm , 7 μm und 1,7 μm untersucht. Weiterhin wird angenommen, dass die maximal zu vermessende Gegenstandsgröße in z-Richtung 50 mm beträgt. Der mittlere Messbereich wird auf 240 mm festgelegt. Aus der allgemeinen Formel zur Bestimmung der Brennweite

$$\text{Brennweite} = \frac{\text{Arbeitsabstand} * \text{Sensorgröße}}{\text{Gegstandsgröße} + \text{Sensorgröße}} \quad (6.1)$$

können für die unterschiedlichen Fälle jeweils die Fokusslängen bestimmt werden. Daraus werden industrieeübliche Normgrößen für die Fokusslänge ausgewählt. [NSL2014]

Tabelle 6-1: Brennweitenbestimmung auf Grundlage der Pixelgröße

Pixelgröße [μm]	Sensorgröße [mm]	Brennweite rechnerisch [mm]	Brennweite Normelement [mm]
14	17,92x14,336	53,47	55
7	8,960x7,168	30,09	30
1,7	2,176x1,741	8,07	8

Aus Tabelle A-1 (Anhang A.6) werden mittels kubischer Interpolation die Brechungsindizes für die zu untersuchenden Wellenlängen ermittelt.

Tabelle 6-2: Brechungsindex für untersuchte Wellenlängen in trockener Luft für 15°C und 23°C

λ [nm]	n_{15}	n_{23}
658	1.00027620	1,00018013
405	1.00028222	1,00018406

Auf Basis des experimentell ermittelten Temperaturfeldes (Abbildung 7-17), wird der Brechungsindexgradient für den Messbereich berechnet (Gleichung (2.6)). Der Messbereich wird dazu auf 240 isotherme Schichten mit einer Schichtdicke von $\Delta s = 1 \text{ mm}$ diskretisiert. Die fehlenden Temperaturwerte werden mittels kubischer Interpolation aus den Messwerten berechnet.

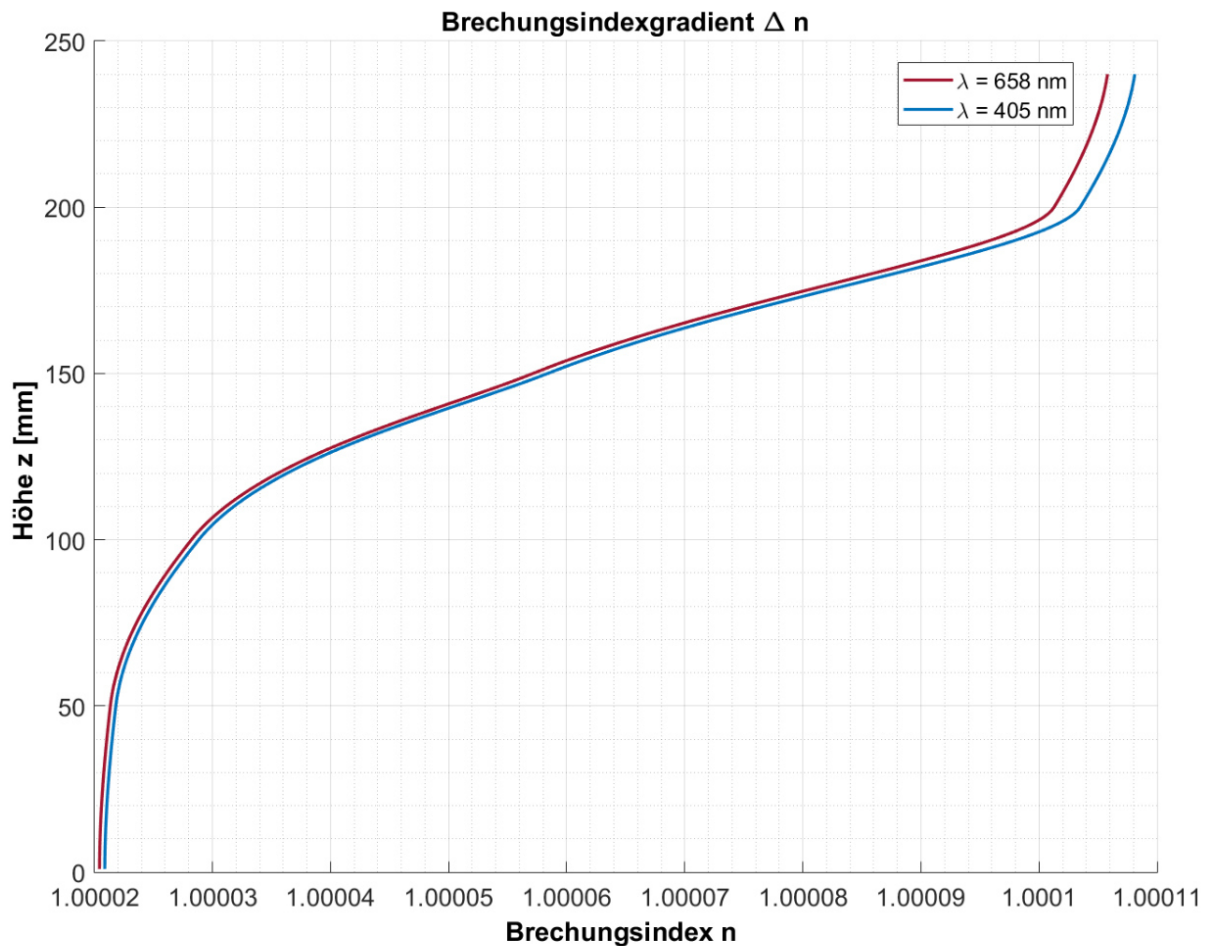


Abbildung 6-1: Brechungsindexgradient im Messbereich auf Basis der Prozesstemperaturen aus Abbildung 7-17

Gemäß den Erwartungen verringert sich der Brechungsindex bei steigender Temperatur aufgrund der geringeren Teilchenmenge in den zur Schweißbraupe hin dünner werdenden Luftschichten. Die Auswirkung des Temperaturfeldes auf den zurückgeworfenen Lichtstrahl können ermittelt werden. Dafür werden zunächst die an der Linse auftreffenden Winkelabweichungen im Vergleich zu dem angenommenen Kalibrier-Triangulationswinkel bei 23°C ermittelt. (Gleichung (3.5))

Tabelle 6-3: Veränderung des Reflexionswinkels beim Auftreffen auf die Eingangsoptik durch den Brechungsindexgradienten

λ_{658}				λ_{405}		
θ [°]			$\Delta\theta$ [°]	θ [°]		$\Delta\theta$ [°]
geometrisch	n_{23}	Δn		n_{23}	Δn	
10	9,99818	9,99914	-0,00095507	9,99814	9,99912	-0,00097587
15	14,99724	14,99869	-0,00145133	14,99724	14,99866	-0,00142271
20	19,99624	19,99822	-0,00197140	19,99624	19,99818	-0,00193253
30	29,99404	29,99717	-0,00312706	29,99404	29,99711	-0,00306540
45	44,98968	44,99510	-0,00541575	44,98968	44,99499	-0,00530896

Die reflektierten Strahlen unterliegen bei der Sensor-Kalibrierung durch den Hersteller dem Brechungsindex n_{23} , wodurch sich eine Winkeländerung zum in der Sensor konstruktion definierten, geometrischen Winkel ergibt. Es wird im Folgenden angenommen, dass für die Nullpunktbestimmung und die daraus folgende Transformation der $\Delta z/\delta$ Koordinaten der Kalibrierwinkel $\theta_{n_{23}}$ eingesetzt wird.

6.2 Ergebnisse der Berechnungen

Die auftretende Messungenauigkeit unter Realbedingungen aufgrund des Brechungsindexgradienten kann ermittelt werden. Für die Betrachtung werden die konstruktiv-geometrischen Winkel von $\theta = 10^\circ, 15^\circ$ und 30° untersucht. Um zusätzlich den Zusammenhang zwischen der Messabweichung und der nichtlinearen $\Delta z/\delta$ Beziehung zu untersuchen, werden die Abweichungen für Messhöhen von $\Delta z = 1 - 50 \text{ mm}$ berechnet. Die Ergebnisse der Berechnung sind in den Tabelle 6-4 und Tabelle 6-5 dargestellt.

Tabelle 6-4: Messabweichung durch Brechungsindexgradienten während des Schweißprozesses für eine CMOS-Matrix mit einer Pixelgröße von 14 µm und 7 µm

Pixelgröße 14µm, Brennweite 55mm								
$\lambda_{658} n_{23}$	$\lambda_{658} \Delta n$	λ_{658}			$\lambda_{405} n_{23}$	$\lambda_{405} \Delta n$	λ_{405}	
Δz [mm]	δ [mm]	δ [mm]	$\Delta \delta$ [µm]	$\Delta \Delta z$ [µm]	δ [mm]	δ [mm]	$\Delta \delta$ [µm]	$\Delta \Delta z$ [µm]
$\theta = 10^\circ$								
1	0,03962	0,03963	0,00375	0,09420	0,03962	0,03963	0,00383	0,09234
10	0,38196	0,38199	0,03611	0,91115	0,38196	0,38199	0,03690	0,89312
20	0,73453	0,73460	0,06945	1,75837	0,73453	0,73460	0,07096	1,72345
30	1,06099	1,06109	0,10032	2,54817	1,06099	1,06109	0,10250	2,49740
40	1,36413	1,36426	0,12898	3,28618	1,36413	1,36426	0,13179	3,22052
50	1,64637	1,64652	0,15567	3,97735	1,64636	1,64652	0,15906	3,89765
$\theta = 15^\circ$								
1	0,05906	0,05906	0,00558	0,09420	0,05906	0,05906	0,00547	0,09234
10	0,56930	0,56935	0,05383	0,91115	0,56930	0,56935	0,05277	0,89312
20	1,09481	1,09491	0,10352	1,75837	1,09481	1,09491	0,10148	1,72345
30	1,58139	1,58154	0,14952	2,54817	1,58139	1,58153	0,14658	2,49740
40	2,03321	2,03340	0,19224	3,28618	2,03321	2,03340	0,18845	3,22052
50	2,45388	2,45411	0,23202	3,97735	2,45388	2,45410	0,22744	3,89765
$\theta = 30^\circ$								
1	0,11409	0,11410	0,01079	0,09420	0,11409	0,11410	0,01057	0,09234
10	1,09980	1,09991	0,10399	0,91115	1,09980	1,09990	0,10194	0,89312
20	2,11500	2,11520	0,19998	1,75837	2,11500	2,11520	0,19604	1,72345
30	3,05501	3,05529	0,28886	2,54817	3,05501	3,05529	0,28316	2,49740
40	3,92786	3,92824	0,37139	3,28618	3,92786	3,92823	0,36407	3,22052
50	4,74053	4,74097	0,44823	3,97735	4,74053	4,74096	0,43939	3,89765
Pixelgröße 7 µm, Brennweite 30 mm								
$\lambda_{658} n_{23}$	$\lambda_{658} \Delta n$	λ_{658}			$\lambda_{405} n_{23}$	$\lambda_{405} \Delta n$	λ_{405}	
Δz [mm]	δ [mm]	δ [mm]	$\Delta \delta$ [µm]	$\Delta \Delta z$ [µm]	δ [mm]	δ [mm]	$\Delta \delta$ [µm]	$\Delta \Delta z$ [µm]
$\theta = 10^\circ$								
1	0,02161	0,02161	0,00204	0,09420	0,02161	0,02161	0,00209	0,09234
10	0,20834	0,20836	0,01970	0,91115	0,20834	0,20836	0,02013	0,89312
20	0,40065	0,40069	0,03788	1,75837	0,40065	0,40069	0,03871	1,72345
30	0,57872	0,57878	0,05472	2,54817	0,57872	0,57878	0,05591	2,49740
40	0,74407	0,74414	0,07035	3,28618	0,74407	0,74414	0,07189	3,22052
50	0,89802	0,89810	0,08491	3,97735	0,89801	0,89810	0,08676	3,89765
$\theta = 15^\circ$								
1	0,03221	0,03222	0,00305	0,09420	0,03221	0,03222	0,00299	0,09234
10	0,31053	0,31056	0,02936	0,91115	0,31053	0,31056	0,02878	0,89312
20	0,59717	0,59722	0,05646	1,75837	0,59717	0,59722	0,05535	1,72345
30	0,86257	0,86266	0,08156	2,54817	0,86257	0,86265	0,07995	2,49740
40	1,10902	1,10913	0,10486	3,28618	1,10902	1,10913	0,10279	3,22052
50	1,33848	1,33860	0,12656	3,97735	1,33848	1,33860	0,12406	3,89765
$\theta = 30^\circ$								
1	0,06223	0,06224	0,00588	0,09420	0,06223	0,06224	0,00577	0,09234
10	0,59989	0,59995	0,05672	0,91115	0,59989	0,59995	0,05560	0,89312
20	1,15364	1,15375	0,10908	1,75837	1,15364	1,15375	0,10693	1,72345
30	1,66637	1,66652	0,15756	2,54817	1,66637	1,66652	0,15445	2,49740
40	2,14247	2,14267	0,20258	3,28618	2,14247	2,14267	0,19858	3,22052
50	2,58574	2,58599	0,24449	3,97735	2,58574	2,58598	0,23967	3,89765

Tabelle 6-5: Messabweichung durch Brechungsindexgradienten während des Schweißprozesses für eine CMOS-Matrix mit einer Pixelgröße von 1,7 μm

Pixelgröße 1,7 μm , Brennweite 8 mm								
Δz [mm]	$\lambda 658$ n23	$\lambda 658 \Delta n$	$\lambda 658$		$\lambda 405$ n23	$\lambda 405 \Delta n$	$\lambda 405$	
	δ [mm]	δ [mm]	$\Delta \delta$ [μm]	$\Delta \Delta z$ [μm]	δ [mm]	δ [mm]	$\Delta \delta$ [μm]	$\Delta \Delta z$ [μm]
$\theta = 10^\circ$								
1	0,00576	0,00576	0,00054	0,09420	0,00576	0,00576	0,00056	0,09230
10	0,05556	0,05556	0,00525	0,91115	0,05556	0,05556	0,00537	0,88980
20	0,10684	0,10685	0,01010	1,75837	0,10684	0,10685	0,01032	1,71116
30	0,15433	0,15434	0,01459	2,54817	0,15433	0,15434	0,01491	2,47168
40	0,19842	0,19844	0,01876	3,28618	0,19842	0,19844	0,01917	3,17787
50	0,23947	0,23949	0,02264	3,97735	0,23947	0,23949	0,02314	3,83536
$\theta = 15^\circ$								
1	0,00859	0,00859	0,00081	0,09420	0,00859	0,00859	0,00080	0,09230
10	0,08281	0,08282	0,00783	0,91115	0,08281	0,08281	0,00768	0,88980
20	0,15924	0,15926	0,01506	1,75837	0,15924	0,15926	0,01476	1,71116
30	0,23002	0,23004	0,02175	2,54817	0,23002	0,23004	0,02132	2,47168
40	0,29574	0,29577	0,02796	3,28618	0,29574	0,29577	0,02741	3,17787
50	0,35693	0,35696	0,03375	3,97735	0,35693	0,35696	0,03308	3,83536
$\theta = 30^\circ$								
1	0,01659	0,01660	0,00157	0,09420	0,01659	0,01660	0,00154	0,09230
10	0,15997	0,15999	0,01513	0,91115	0,15997	0,15999	0,01483	0,88980
20	0,30764	0,30767	0,02909	1,75837	0,30764	0,30767	0,02851	1,71116
30	0,44436	0,44441	0,04202	2,54817	0,44436	0,44441	0,04119	2,47168
40	0,57133	0,57138	0,05402	3,28618	0,57133	0,57138	0,05295	3,17787
50	0,68953	0,68960	0,06520	3,97735	0,68953	0,68959	0,06391	3,83536

6.3 Bewertung der Ergebnisse

Anhand der berechneten Werte kann nachgewiesen werden, dass der inhomogene Brechungsindex im Messbereich während des Schweißprozesses signifikante Auswirkungen auf die Messgenauigkeit hat. Im Höchstpunkt des Messbereiches, bei $\Delta z = 50 \text{ mm}$, kann eine durch den inhomogenen Brechungsindex hervorgerufene Messabweichung $\Delta \Delta z = 3,98 \mu\text{m}$ rechnerisch nachgewiesen werden. Weiterhin kann gezeigt werden, dass die gewählte Wellenlänge des Mess-Lasers zwar nachweisbare, jedoch keine signifikanten Auswirkungen auf die Störanfälligkeit durch den inhomogenen Brechungsindex hat. Auch die gewählte Pixelgröße der CMOS-Matrix und die damit einhergehenden unterschiedlichen Brennweiten, sowie der für die Kalibrierung gewählte Triangulationswinkel θ haben keine signifikanten Auswirkungen auf die Störanfälligkeit durch den inhomogenen Brechungsindex während des Schweißvorganges. Erst im Bereich von einem Nanometer, sind Abweichungen zwischen den Winkeln und Fokusslängen zu erkennen. Ein deutlicher Unterschied in der Verschiebung der $\Delta \delta$ Koordinate aufgrund der unterschiedlichen Brennweiten- und Triangulationswinkel ist jedoch zu beobachten. Weiterhin ist die nichtlineare Beziehung der $\delta/\Delta z$ Koordinaten anhand der Tabellenwerte zu erkennen.

7 Ergebnisse der Versuchsreihen

Im folgenden Kapitel erfolgt die Auswertung der einzelnen Versuchsreihen mittels der in Abschnitt 5.1.2 beschriebenen Verrechnungsprogramme. Die Analyse- und Interpretation der Einzelversuche erfolgt jeweils im Anschluss an die Ergebnispräsentation.

7.1 Ergebnisse der Konturerfassung verschiedener Oberflächenprofile

Für die Bestimmung der Oberflächeneinflüsse werden für jeden Prüfkörper fünf Einzelmessungen nach der in 5.2 beschriebenen Vorgehensweise durchgeführt. Die Einzelmessungen werden gemäß DIN 1319-1 ausgewertet ([DIN1995], Anhang A.7). Für die Bewertung werden die in der Versuchsreihe gemessenen Profildaten für Breite, Höhe und Rautiefe ausgewertet. Die absoluten Messergebnisse sind in Tabelle 7-1 bis Tabelle 7-3 aufgelistet. Die aufgenommenen Messwerte für die Höhenkoordinate sind in Abbildung 7-1 bis Abbildung 7-5 grafisch dargestellt. Die Soll-Werte der Geometrien werden durch das Vermessen der Prüfkörper an 15 Einzelmesspunkten mit Hilfe einer Schieblehre ermittelt. Durch quadratische Interpolation werden die Zwischenwerte ermittelt und in den Verlaufskurven dargestellt. Die Messergebnisse für Prüfkörper 6 sind gesondert in Abbildung 7-6 dargestellt.

7.1.1 Absolute Messergebnisse und Sollwertabweichung der Oberflächeneinflüsse

Tabelle 7-1: Absolute Messergebnisse der Oberflächeneinflüsse

Oberflächeneinflüsse - Absolutes Messergebnis			
Prüfkörper	Profilbreite [mm]	Profilhöhe [mm]	Rautiefe Rz [mm]
1 - sandgestrahlt	39,770 (±0,0231)	14,999 (±0,0044)	0,30250 (±0,0290)
2 - geschliffen	39,987 (±0,0245)	14,947 (±0,0052)	0,49835 (±0,0074)
3 - poliert	37,798 (±0,6720)	14,928 (±0,0078)	0,58150 (±0,0089)
4 - gefräst	41,500 (±1,4179)	14,860 (±0,0058)	0,90830 (±0,0644)
5 - gummiert	39,438 (±0,1390)	16,088 (±0,0078)	1,03400 (±0,1579)

Tabelle 7-2: Sollwertabweichung der Oberflächeneinflüsse

Oberflächeneinflüsse - Sollwertabweichung			
Prüfkörper	Profilbreite [mm]	Profilhöhe [mm]	Rautiefe Rz [mm]
1 - sandgestrahlt	0,23	0,001	-0,02
2 - geschliffen	0,01	0,003	-0,49
3 - poliert	2,20	0,022	-0,58
4 - gefräst	-1,50	0,090	-0,88
5 - gummiert	0,56	-0,088	k.A.

Tabelle 7-3: Messabweichungen der Oberflächeneinflüsse

Oberflächeneinflüsse - Messabweichungen der Einzelmesswerte			
Prüfkörper	Profilbreite [mm]	Profilhöhe [mm]	Rautiefe Rz [mm]
1 - sandgestrahlt	0,0301	0,0091	0,0282
2 - geschliffen	0,0587	0,0219	0,0918
3 - poliert	1,9225	0,0881	0,0943
4 - gefräst	7,9960	0,0597	0,1386
5 - gummiert	0,1692	0,0607	0,4076

7.1.2 Höhenprofil der Einzelprüfkörper

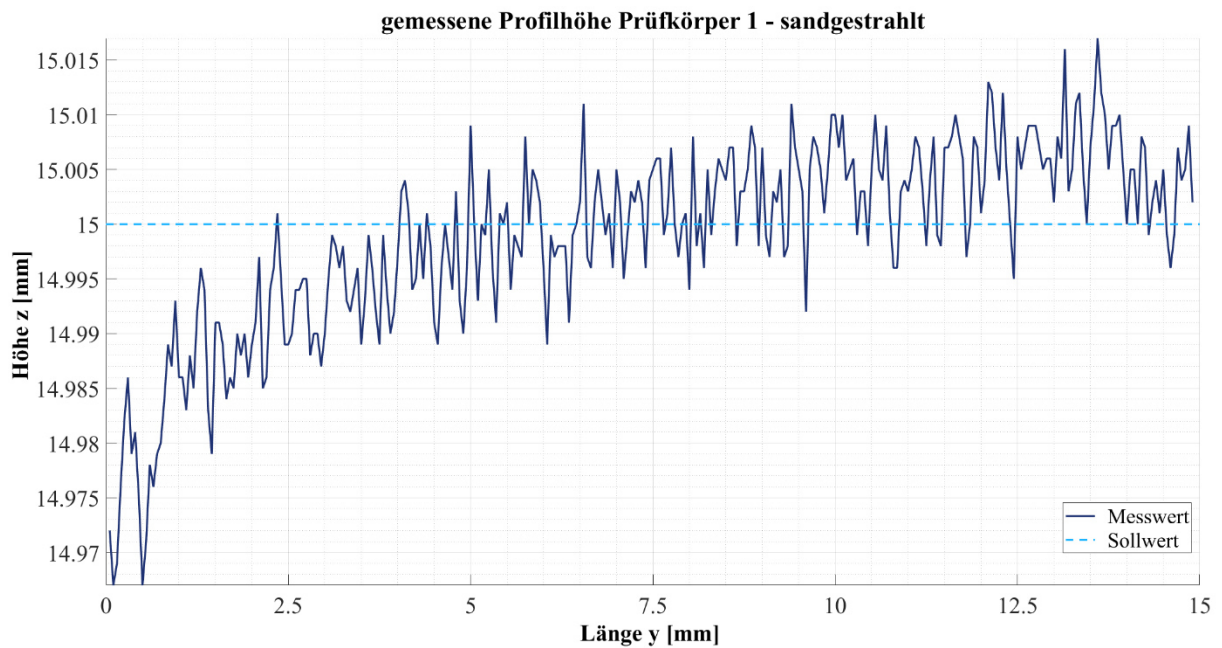


Abbildung 7-1: Verlauf der Profilhöhe Prüfkörper 1 - sandgestrahlt

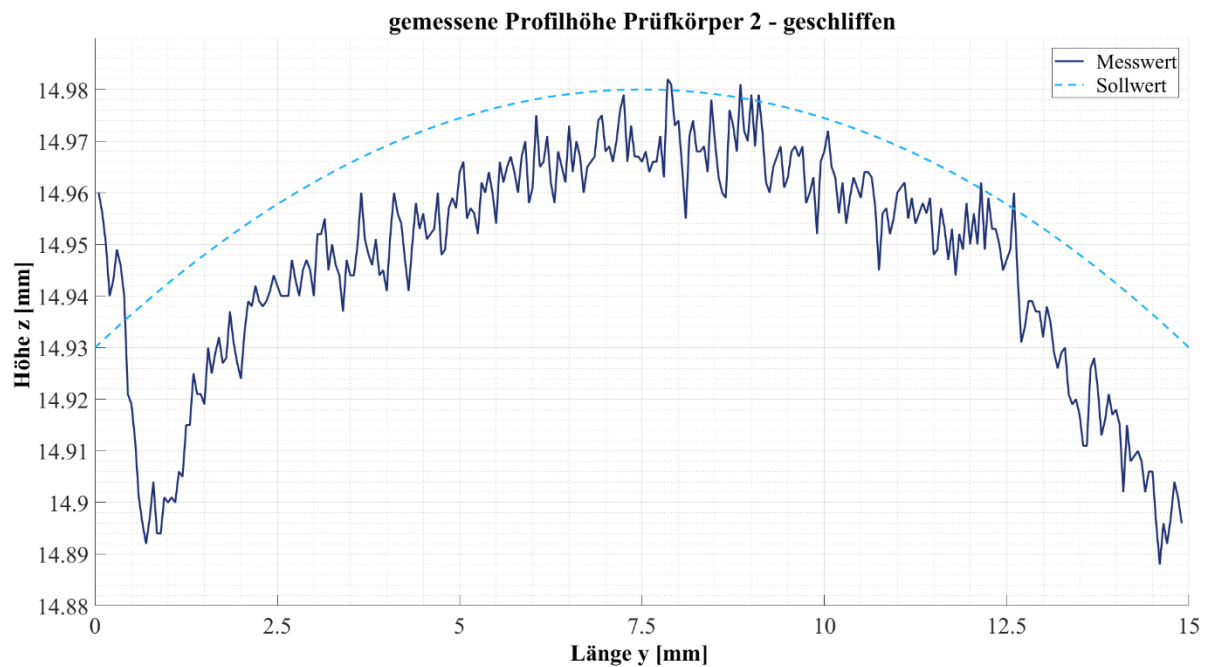


Abbildung 7-2: Verlauf der Profilhöhe Prüfkörper 2 - geschliffen

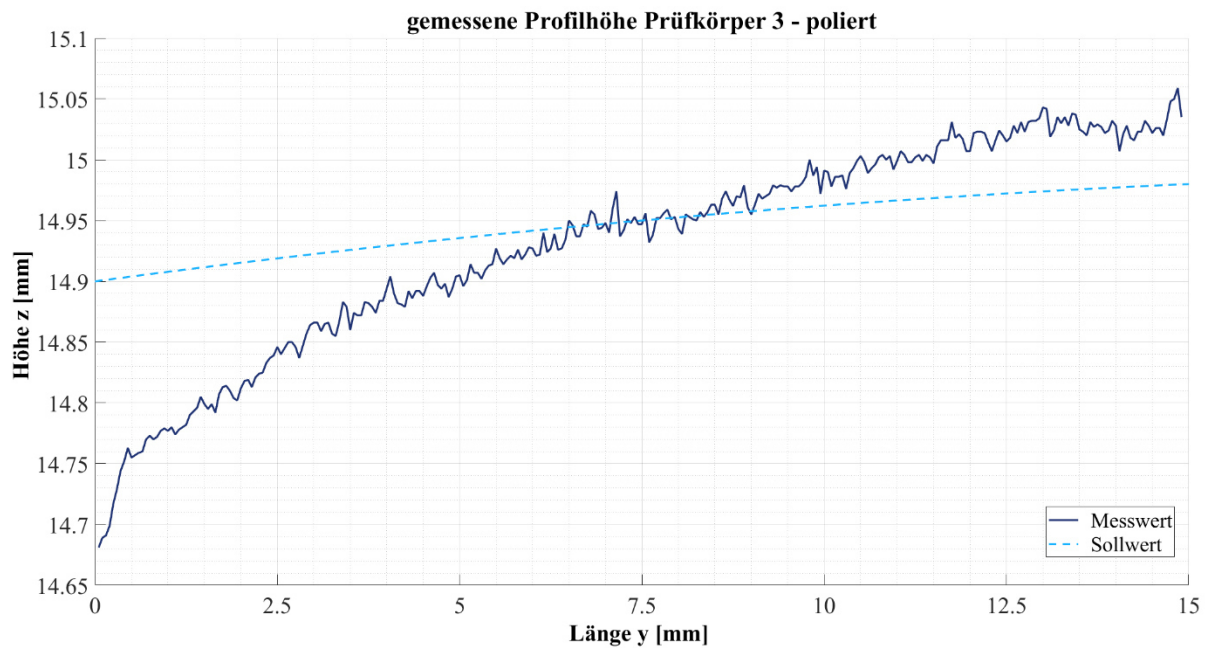


Abbildung 7-3: Verlauf der Profilhöhe Prüfkörper 3 - poliert

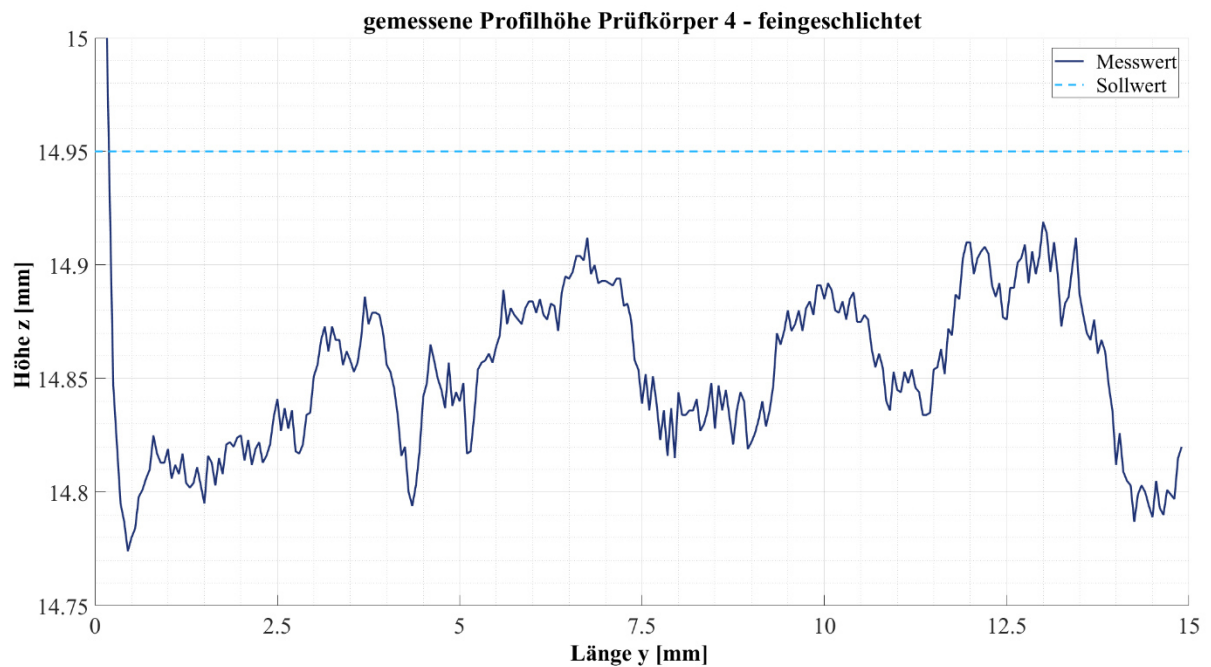


Abbildung 7-4: Verlauf der Profilhöhe Prüfkörper 4 - feingeschliffen

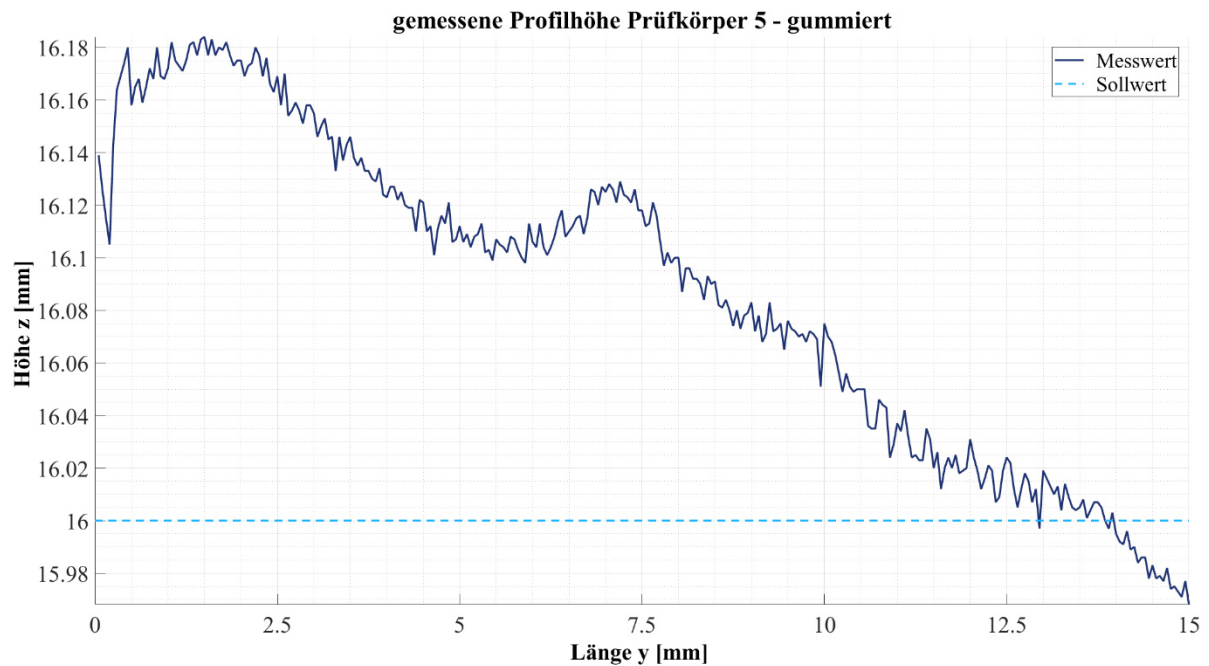


Abbildung 7-5: Verlauf der Profilhöhe Prüfkörper 5 - gummiert

7.1.3 Verfolgung einer Klebespur

Zur Verfolgung der aufgetragenen Spur aus Klebstoff wurde die gesamte Oberfläche des Prüfkörpers als Messfeld festgelegt und nach der jeweils höchsten gemessenen Oberflächenkoordinate untersucht. Der geometrische Höchstpunkt der Oberfläche mit Klebespur befindet sich mittig auf der Klebespur. Die x-Koordinate des gemessenen Höchstpunktes auf der Oberfläche und die x-Koordinate des geometrischen Sollwertes sind in Abbildung 7-6 dargestellt.

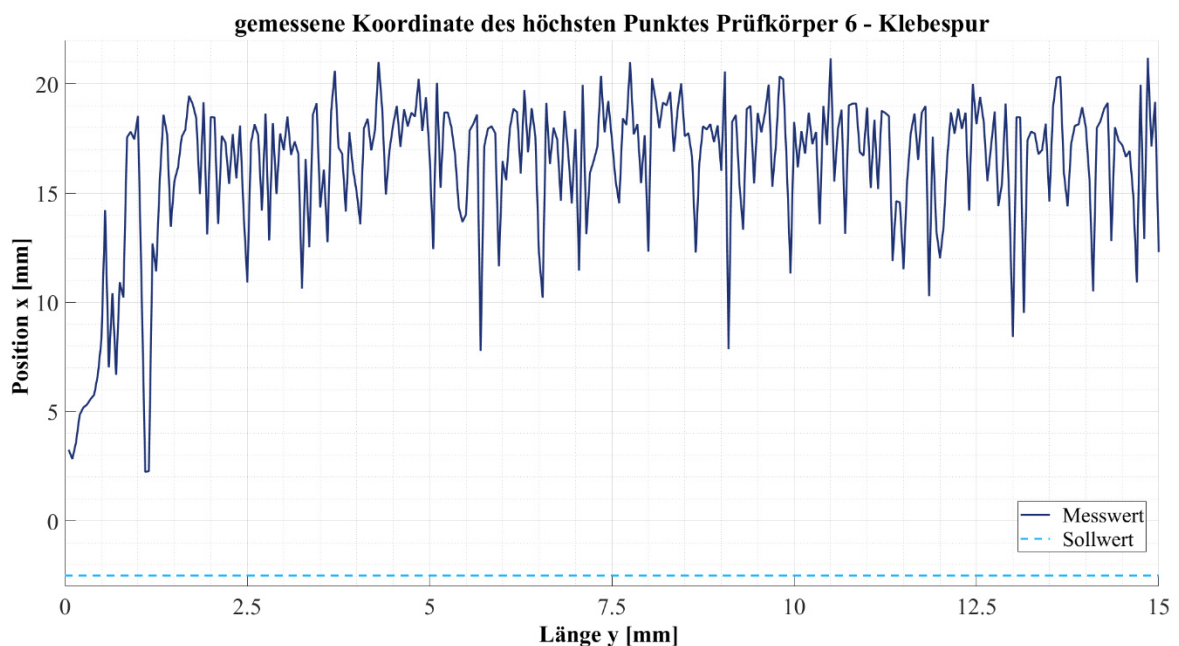


Abbildung 7-6: Verlauf der höchsten messbaren Koordinate zur Verfolgung einer Klebespur

7.1.4 Bewertung der Ergebnisse

Die Vermessung der sandgestrahlten Probenkörper (PK1) und geschliffenen (PK2) Oberfläche hinsichtlich Höhenkoordinate erzielte in den durchgeführten Versuchen Ergebnisse innerhalb der Genauigkeitsgrenzen. Insbesondere für den sandgestrahlten Prüfkörper liegt die Sollwertabweichung mit $\Delta H_1 = 0,001 \text{ mm}$ deutlich unterhalb der Genauigkeitsgrenze von $50 \mu\text{m}$. Auch die in Abbildung 7-1 dargestellte Verlaufskurve zeigt eine sehr geringe Streuung der Werte. Der Messverlauf für Prüfkörper 2 (Abbildung 7-2) liegt ebenfalls sehr dicht am Soll-Verlauf und weist eine geringe Streuung auf. Die Vermessungen der Höhenkoordinaten der spiegelnd polierten Oberfläche (PK3) sowie der Oberfläche mit sichtbaren Frässpuren (PK4) lieferten hingegen deutlich ungenauere Ergebnisse. Während das absolute Messergebnis für PK3 mit ausreichender Genauigkeit am Sollwert liegt, entspricht das Ergebnis für PK4 nicht den in Kapitel 4 definierten Grenzwerten. Ebenso sind die Verlaufskurven beider Prüfkörper für eine präzise Konturerfassung nicht geeignet und befinden sich in den Einzelmesspunkten deutlich oberhalb der Genauigkeitsgrenze von $50 \mu\text{m}$. Hier zeigen sich erkennbar die Störeinflüsse der in Abschnitt 3.1 besprochenen gerichteten Reflexionen, die eine genaue Messung erschweren. Auch die gummierte, stark absorbierende Oberfläche (PK5) weist große Abweichungen von der Sollgeometrie auf und ist für eine exakte Vermessung nur bedingt geeignet. Im direkten Vergleich zwischen den reflektierenden und absorbierenden Oberflächen ist zu beobachten, dass die reflektierenden Oberflächen im Mittel Werte unterhalb des Sollwertes ergeben, während die Vermessung der absorbierenden Oberfläche ein Aufmaß verzeichnet.

Die Vermessung der Profilbreite führte, mit Ausnahme von PK2, insgesamt zu Ergebnissen mit hohen Abweichungen von den Sollwerten. Dies ist darauf zurück zu führen, dass kein Medianfilter, Mittelwertfilter oder Interpolationsalgorithmus zur Verminderung des in Abschnitt 3.3 erläuterten Kantenfehlers durch Abschattung eingesetzt wurde. Insbesondere die Messabweichungen von PK3 mit $\Delta b_3 = 1,9225 \text{ mm}$ und PK4 mit $\Delta b_4 = 7,996 \text{ mm}$ sind auch durch die erwähnten Filteralgorithmen nur schwer auszugleichen. Die Fehlwerte durch gerichtete Reflexionen sind hier signifikant und führen zu unbrauchbaren Messwerten. Insgesamt ist zu beobachten, dass der Fehlereinfluss durch Bearbeitungsspuren größer ist, als der Fehlereinfluss durch spiegelnde Oberflächen. Zudem ist zu erkennen, dass spiegelnde Oberflächen vorrangig zu fehlenden Messwerten führen, während Bearbeitungsspuren vorrangig zu fehlerhaften Messwerten führen. Für eine exakte Vermessung im Mikrometerbereich scheint eine Nachbearbeitung der Oberflächen, etwa durch Sandstrahlen, und die Herstellung einer vollständig diffus reflektierenden Oberfläche unerlässlich.

Die Ergebnisse der Rautiefemessung liegen insgesamt mehr als eine dezimale Größenordnung über den Sollwerten und stehen in keiner Korrelation mit den tatsächlichen Rauwerten. Für eine Bewertung der Oberflächengüte ist die Vermessung mittels des untersuchten Triangulationssensors daher nicht geeignet. Auch die Lokalisierung der Klebespur konnte mit dem untersuchten Verfahren nicht realisiert werden. Die Reflexionseigenschaften des Klebstoffes waren für die Vermessung nicht ausreichend und es wurde größtenteils die darunterliegende Metalloberfläche reflektiert. Die Vermessung von transmittierenden Oberflächen ist mit dem Sensor somit nicht möglich.

7.2 Ergebnisse der Konturerfassung unter verschiedenen Bewegungsprofilen

Für die Bestimmung der Einflüsse durch verschiedene Bewegungs- und Geschwindigkeitsprofile, werden je fünf Einzelmessungen mit Prüfkörper 1 nach der in Abschnitt 5.3 beschriebenen Vorgehensweise durchgeführt. Die Einzelmessungen werden gemäß DIN 1319-1 ausgewertet ([DIN1995], Anhang A.7). Für die Bewertung der Messungen werden die Profildaten für Breite, Höhe sowie Rautiefe ausgewertet. Die absoluten Messergebnisse sind in Tabelle 7-4 sowie Tabelle 7-5 aufgelistet. Ausgewählte Messwerte sind in Abbildung 7-7 bis Abbildung 7-13 grafisch dargestellt. Um einen Vergleich zwischen den Ergebnissen der Vermessung unter den verschiedenen Bewegungsprofilen zu ermöglichen, wird die Messung mit dem Bewegungsprofil Linear Standard als Referenzmessung definiert.

Für die Betrachtung des Positionsfehlers des Industrieroboters und dessen Auswirkungen auf eine Konturerfassung, werden zusätzlich die Messabweichungen der Einzelmesswerte für die, in 5.1.2 beschriebene Profilhöhe aus der Relativbeziehung von Grundplatte zu Prüfkörperoberfläche, sowie die Messabweichung der Einzelmesswerte des Sensorabstandes von der Prüfkörperoberfläche gegenübergestellt. Dies ist in Abbildung 7-13 dargestellt.

Um zu verdeutlichen, ob die Differenz der Oberflächensättigung zwischen Prüfkörperoberfläche und Grundplatte einen Einfluss auf die Messgenauigkeit hat, wird die Sättigungsdifferenz der Oberflächen in Abbildung 7-12 dem Messergebnis einer Einzelmessung mit dem Bewegungsprofil Dreieck gegenübergestellt. Der Einfluss der Sättigungsdifferenz auf die Signalqualität kann daran beispielhaft abgelesen werden.

7.2.1 Absolute Messergebnisse und Sollwertabweichung der Bewegungsprofile

Tabelle 7-4: Absolute Messergebnisse der Bewegungsprofile

Messung 1-6 - Absolutes Messergebnis			
Messung	Profilbreite [mm]	Profilhöhe [mm]	Rautiefe Rz [mm]
1 - Linear	39,770 (±0,0231)	14,999 (±0,0044)	0,3025 (±0,0290)
2 - Z maximal	39,627 (±0,0239)	15,071 (±0,0037)	0,3314 (±0,0263)
3 - V maximal	39,758 (±0,0344)	15,041 (±0,0060)	0,2910 (±0,0289)
4 - Rampe	39,739 (±0,0231)	15,050 (±0,0473)	0,2409 (±0,0185)
5 - Dreieck	39,715 (±0,0269)	15,047 (±0,0056)	0,2447 (±0,0178)
6 - Kurve	41,392 (±0,0420)	15,025 (±0,0038)	0,4282 (±0,0229)

Tabelle 7-5: Sollwertabweichung der Bewegungsprofile

Messung 1-6 - Sollwertabweichung			
Messung	Profilbreite [mm]	Profilhöhe [mm]	Rautiefe Rz [mm]
1 - Linear	0,230	0,001	0,2925
2 - Z maximal	0,373	-0,071	0,3214
3 - V maximal	0,242	-0,041	0,2810
4 - Rampe	0,261	-0,050	0,2309
5 - Berg	0,285	-0,047	0,2347
6 - Kurve	-1,392	-0,025	0,4182

Tabelle 7-6: Messabweichungen der Roboterkinematik

Messung 1-6 - Messabweichungen der Einzelmesswerte			
Messung	Profilbreite [mm]	Profilhöhe [mm]	Rautiefe Rz [mm]
1 - Linear	0,0301	0,0091	0,0282
2 - Z maximal	0,0387	0,0108	0,0333
3 - V maximal	0,0297	0,0093	0,0183
4 - Rampe	0,0231	0,0473	0,0185
5 - Dreieck	0,0622	0,0178	0,0200
6 - Kurve	1,4073	0,0100	0,2559

7.2.2 Höhenprofile für Prüfkörper 1 unter verschiedenen Bewegungsprofilen

Bewegungsprofil Linear Messbereich Ende

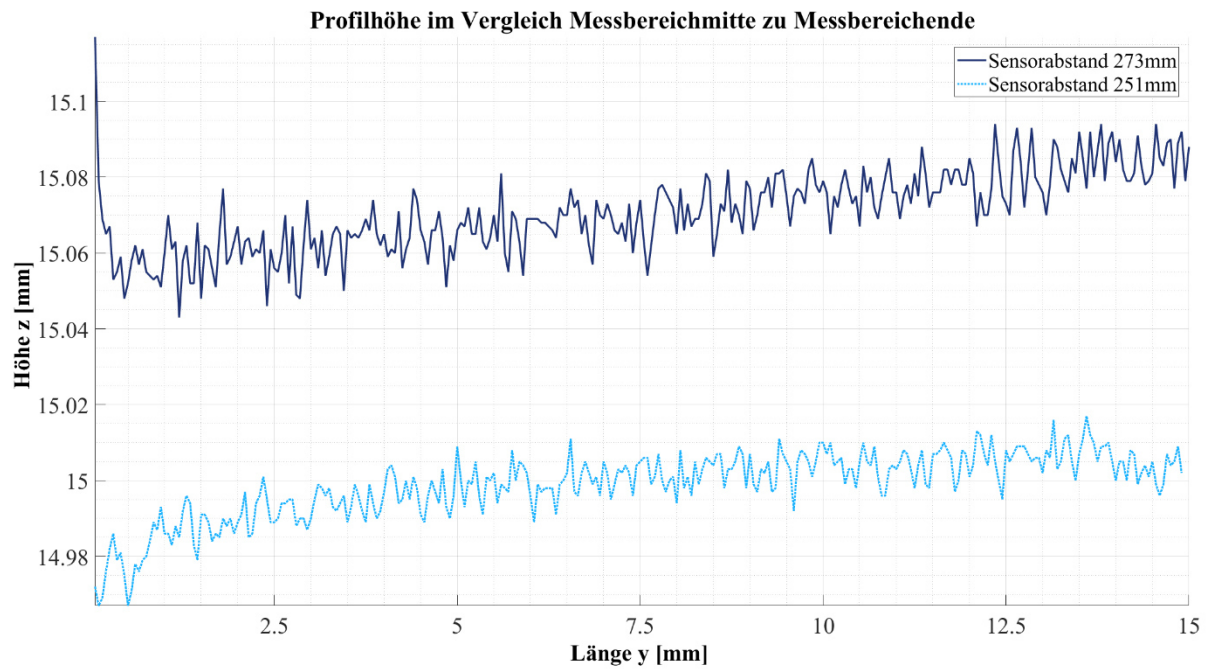


Abbildung 7-7: Verlauf der Profilhöhe Prüfkörper 1 - Bewegungsprofil Linear Messbereich Ende

Bewegungsprofil Linear Maximalgeschwindigkeit

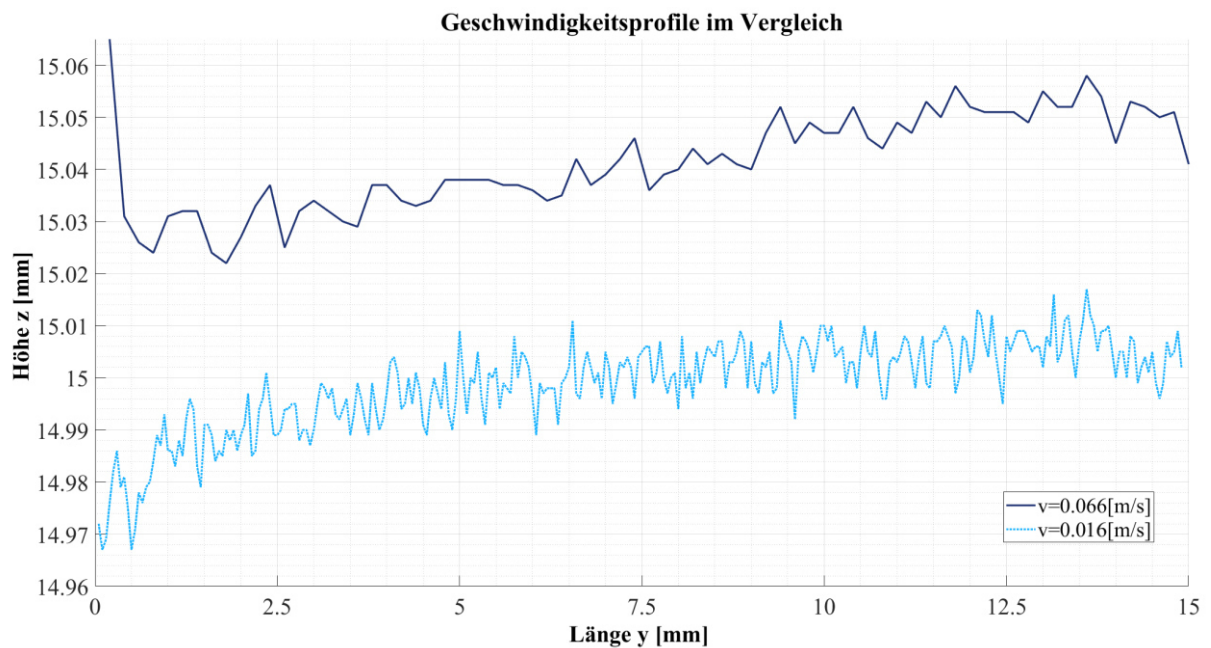


Abbildung 7-8: Verlauf der Profilhöhe Prüfkörper 1 - Bewegungsprofil Linear Maximal-Geschwindigkeit

Bewegungsprofil Rampe

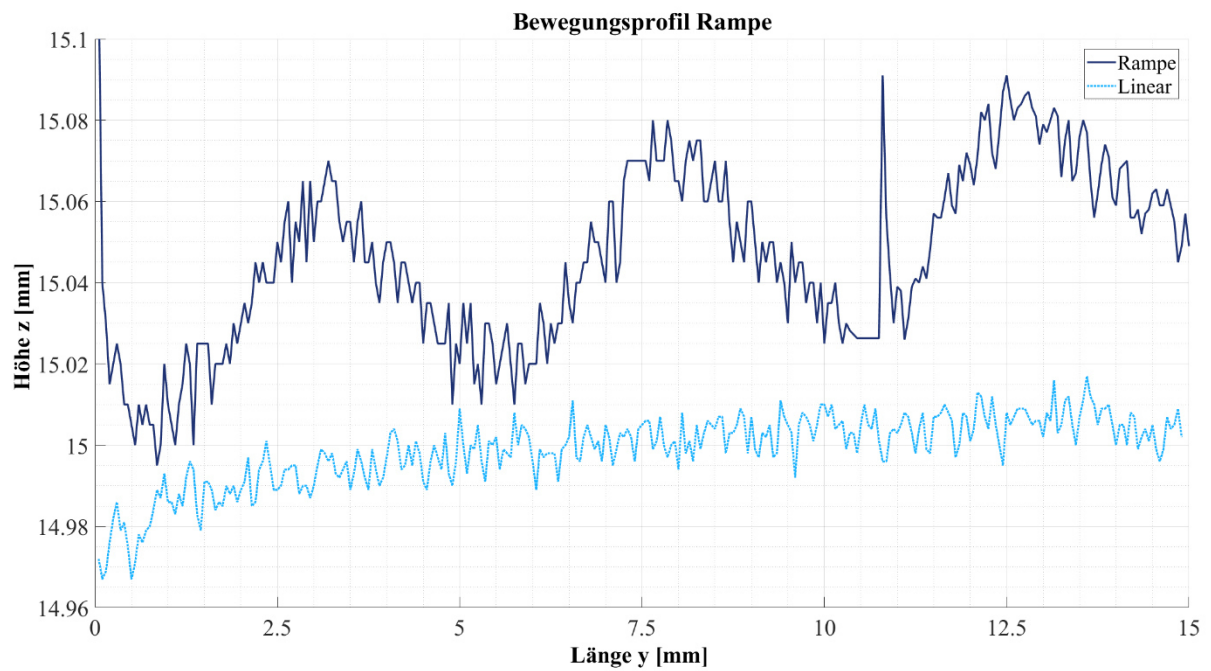


Abbildung 7-9: Verlauf der Profilhöhe Prüfkörper 1 - Bewegungsprofil Rampe

Bewegungsprofil Dreieck

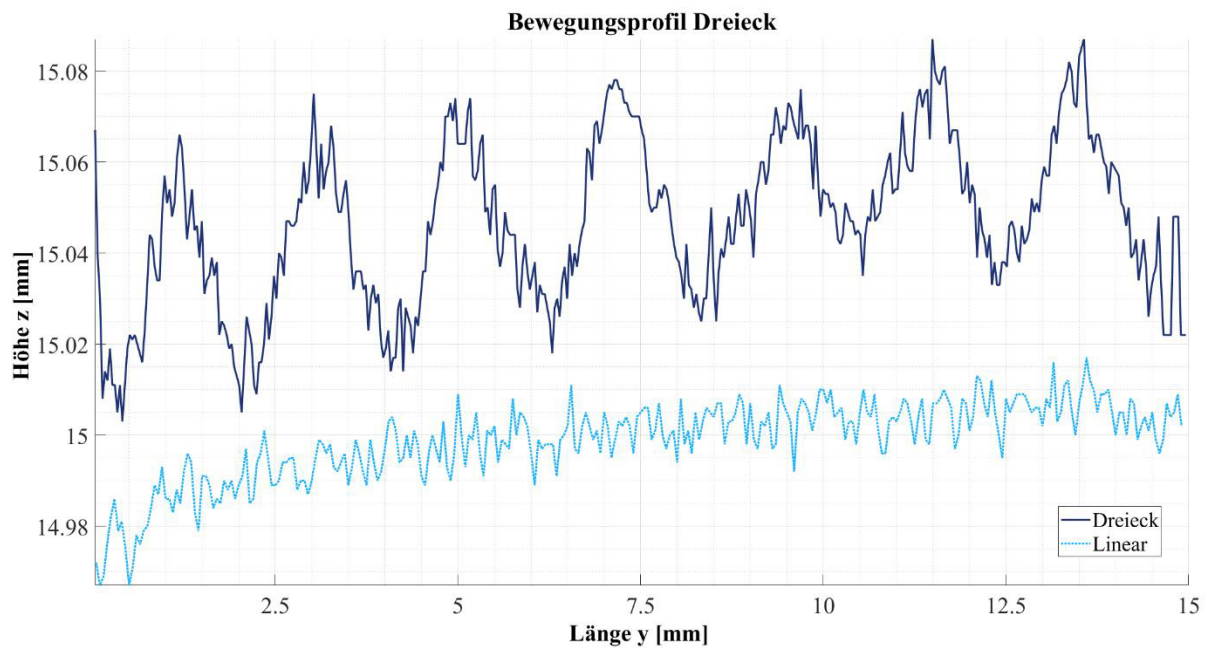


Abbildung 7-10: Verlauf der Profilhöhe Prüfkörper 1 - Bewegungsprofil Dreieck

Bewegungsprofil Kurve

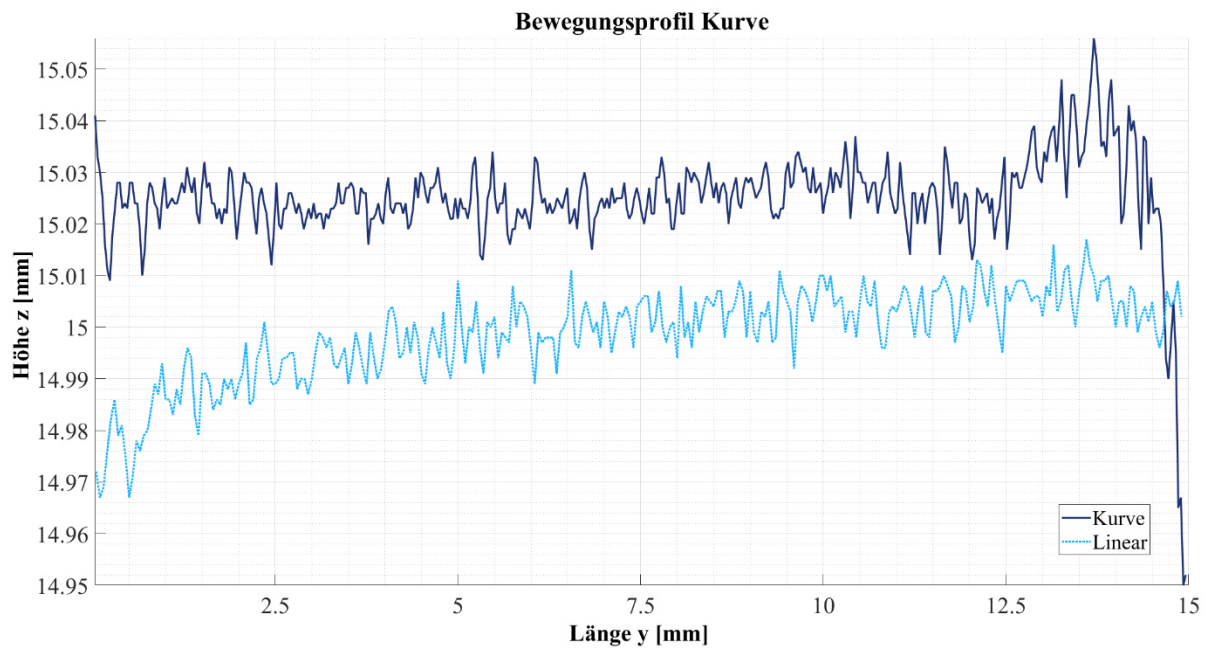


Abbildung 7-11: Verlauf der Profilhöhe Prüfkörper 1 - Bewegungsprofil Kurve

Betrachtung des Fehlers durch die Sättigungsdifferenz

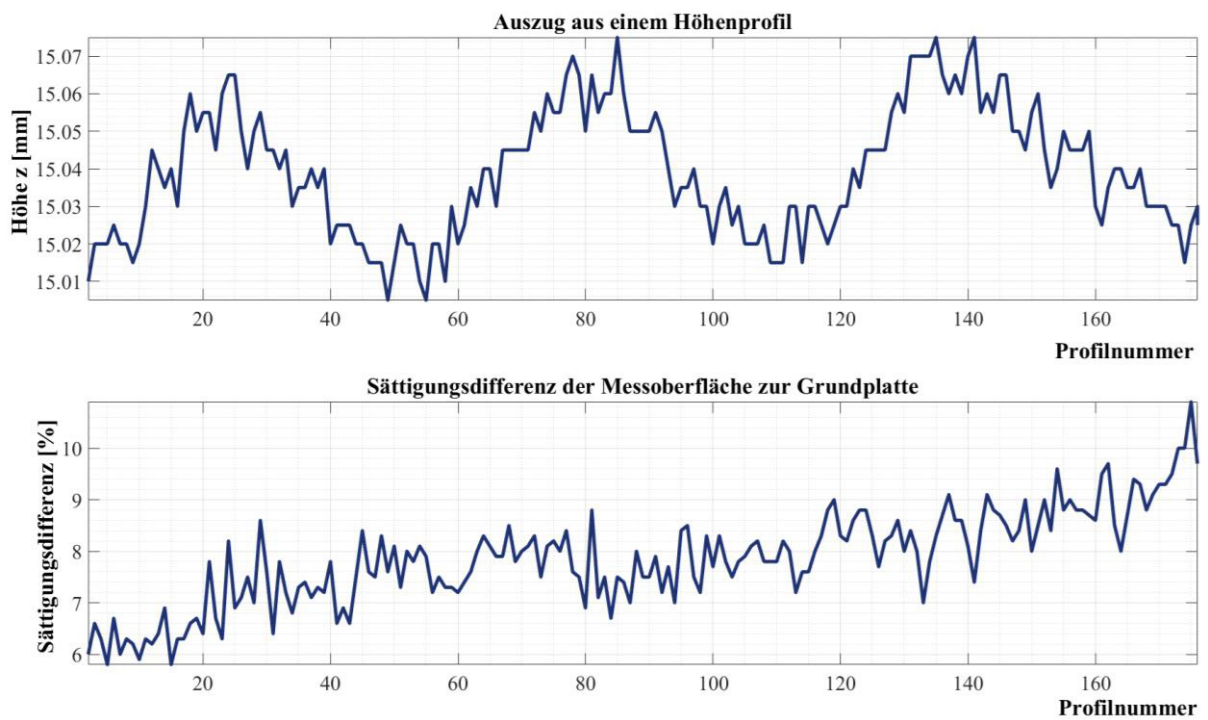


Abbildung 7-12: Vergleich zwischen Sättigungsdifferenz und Messsignalqualität

Betrachtung der Messfehler durch die Achsfehler des Roboters in allen kartesischen Raumrichtungen

Durch die in Abschnitt 3.4 beschriebenen Methode der Berechnung der Höhenkoordinate mittels der gemessenen Koordinate auf der Bauteiloberfläche $z_{Bauteil}$ und der z-Koordinate des TCP aus der Robotersteuerung z_{TCP} , entstehen Messabweichungen durch die Positionsabweichung der TCP-Koordinate in allen kartesischen Raumrichtungen. Um dies zu zeigen wird in Abbildung 7-13 und Tabelle 7-7 ein Vergleich zwischen der Berechnung über den Absolutabstand ($\Delta z_{Abs} = z_{TCP} - z_{Bauteil}$) und den Relativabstand ($\Delta z_{Rel} = z_{Grundplatte} - z_{Bauteil}$) gezogen. Da keine geeignete Hand-Auge Kalibrierung vorhanden ist (Abschnitt 3.4) sind die dargestellten Werte lediglich qualitativ zu bewerten.

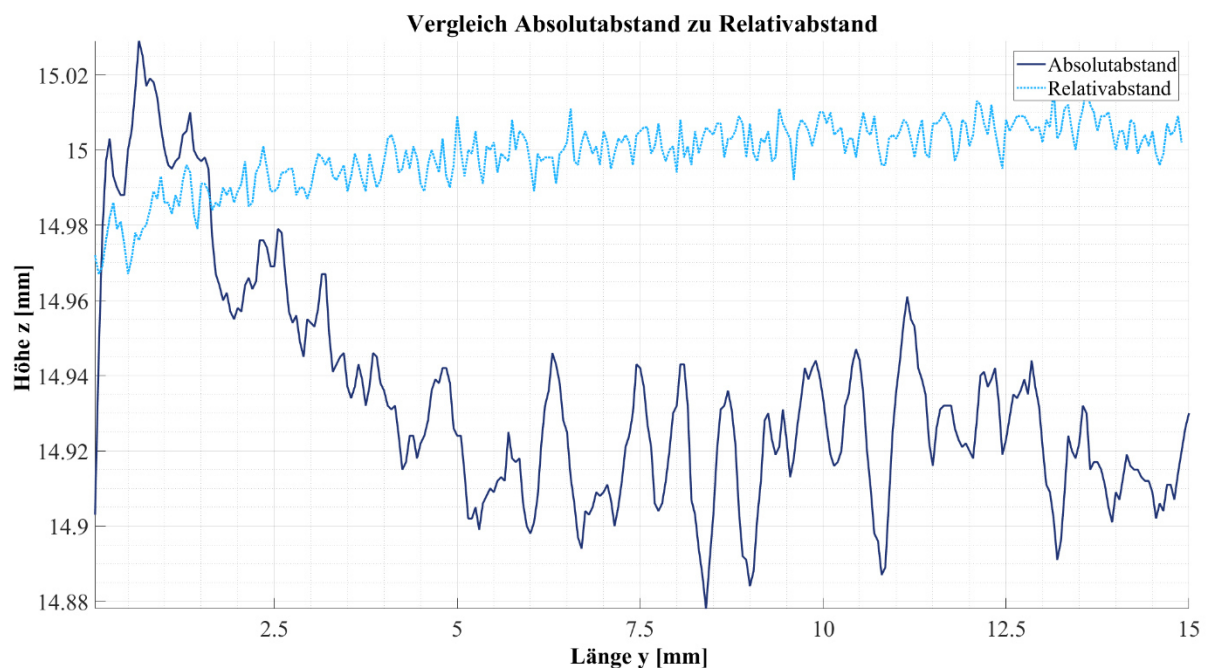


Abbildung 7-13: Verlauf der Profilhöhe Prüfkörper 1 - Bewegungsprofil linear Standard, Vergleich zwischen den Berechnungsmethoden Relativabstand und Absolutabstand

Tabelle 7-7: Messabweichung durch den Linearitätsfehler des Roboters und die daraus resultierende Verschiebung der TCP-Koordinate

<u>Messabweichung durch Linearitätsfehler</u>	
<u>Berechnungsmethode</u>	<u>Messabweichung [mm]</u>
Referenzfläche	0,01054
TCP-Koordinate	0,02999

7.2.3 Bewertung der Ergebnisse

Die absoluten Messergebnisse der Profilhöhen aus den Einzelmessungen der verschiedenen Bewegungsprofile liegen insgesamt in den definierten Genauigkeitsgrenzen. Einzig die Sollwertabweichung der Messung bei maximalem Messabstand liegt mit $\Delta H_2 = 0,071 \text{ mm}$ oberhalb der Genauigkeitsgrenze von $50 \text{ }\mu\text{m}$. Dies verdeutlicht die in Abschnitt 3.2 besprochene nichtlineare Beziehung der $\Delta z/\delta$ -Koordinaten. Die Positionierung des Sensors im Verhältnis zum Messbereich ist somit als signifikanter Einflussfaktor zu bewerten. Die Messergebnisse für die Profiltiefen liegen wie bereits in den Ergebnissen der Oberflächeneigenschaften (Abschnitt 7.1.4) beschrieben, aufgrund von der Abschattung durch die Körperkanten, deutlich außerhalb der Genauigkeitsgrenzen und befinden sich im Bereich von $\Delta b = 0,25 \text{ mm}$. Die besonders große Abweichung der Profiltiefe bei der Kurvenfahrt ist auf geometrische Zusammenhänge zurück zu führen und kann daher nicht als Messfehler bewertet werden. Basierend auf den Absolutwerten der Höhenkoordinate kann kein signifikanter Einfluss der Roboterbewegung auf das Messergebnis erkannt werden. Die dargestellten Werte wurden jedoch durch den Relativbezug zwischen Grundplatte und Profiloberfläche errechnet. Soll die TCP-Koordinate des Roboters als Referenz für die Höhenbestimmung herangezogen werden, so wird die Roboterkinematik zu einem signifikanten Einfluss führen. Dies verdeutlicht die um einen Faktor drei höhere Messabweichung des Sensor-absolut-Abstandes im Vergleich zum Relativabstand beider Oberflächen und die deutlich höhere Streuung der Werte bei einer Berechnung über den Absolutabstand (Abbildung 7-13). Da eine genauere Betrachtung der Werte ohne vorhandene Hand-Auge Kalibrierung zwischen Sensor und Roboter jedoch nicht möglich ist, müssen diese Zusammenhänge in späteren Arbeiten weiterführend untersucht werden.

Obwohl die Einflüsse der Roboterkinematik auf die absoluten Messergebnisse zu Abschnitt sind, erkennt man in den Verlaufskurven der Konturerfassung deutlich den in Kapitel 3.4 beschriebenen Taumelfehler durch Achsverkipfung des Roboters. Insbesondere Bewegungsprofile Rampe und Dreieck (Abbildung 7-9 und Abbildung 7-10) zeigen sinusförmige Schwingverläufe, die auf Achsfehler im Roboter zurück zu führen sind. Auch dass eine erhöhte Vorschubgeschwindigkeit zu einer Winkelabweichung des Schweißkopfes und somit einem Aufmaß in der Höhenmessung führt, kann über die Verlaufskurve in Abbildung 7-8 nachgewiesen werden. Die in Abschnitt 3.5.2 aufgestellte Hypothese, dass die Differenz in den Sättigungen der Referenz- und Messoberfläche einen signifikanten Einfluss auf die Messgenauigkeit haben, kann nicht eindeutig nachgewiesen werden. Zwar zeigen die Verläufe in Abbildung 7-12 teilweise eine Korrelation, die vorliegende Datenlage ist jedoch nicht ausreichend um den Einfluss eindeutig nachzuweisen. Hierzu müssen in nachfolgenden Arbeiten weitere Untersuchungen angestellt werden.

7.3 Ergebnisse der Abschattungsversuche

Im Folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse aus der Konturerfassung der Abschattungsprüfstrecke aus Abschnitt 5.4 dargestellt. In den Abbildung 7-14 und Abbildung 7-15 sind die gemessenen Konturen im Vergleich zur Soll-Geometrie aus dem CAD-Modell dargestellt. In Abbildung 7-16 ist ein Detailausschnitt der zusätzlich eingeplanten Oberflächenstrukturen zu sehen.

Tabelle 7-8 zeigt die Länge der abgeschatteten Streckenabschnitte bei den verschiedenen Prüfkonturhöhen. Wie in Abschnitt 5.4 beschrieben, wird hier auf eine exakte Bewertung der Messung, bezogen auf die genauen Konturhöhen der Prüfstrecke, in den Genauigkeitsgrenzen aus Kapitel 4 verzichtet und die Auswertung reduziert sich auf eine Darstellung der Abschattungs-Problematik.

7.3.1 Höhenprofil und abgeschattete Längen der Abschattungsprüfstrecke

Tabelle 7-8: Konturhöhe und dazugehörige abgeschattete Länge

Konturhöhe h	abgeschattete Länge L_A
[mm]	[mm]
10	1,76
15	2,40
20	3,04
25	3,68
30	5,12
35	4,96

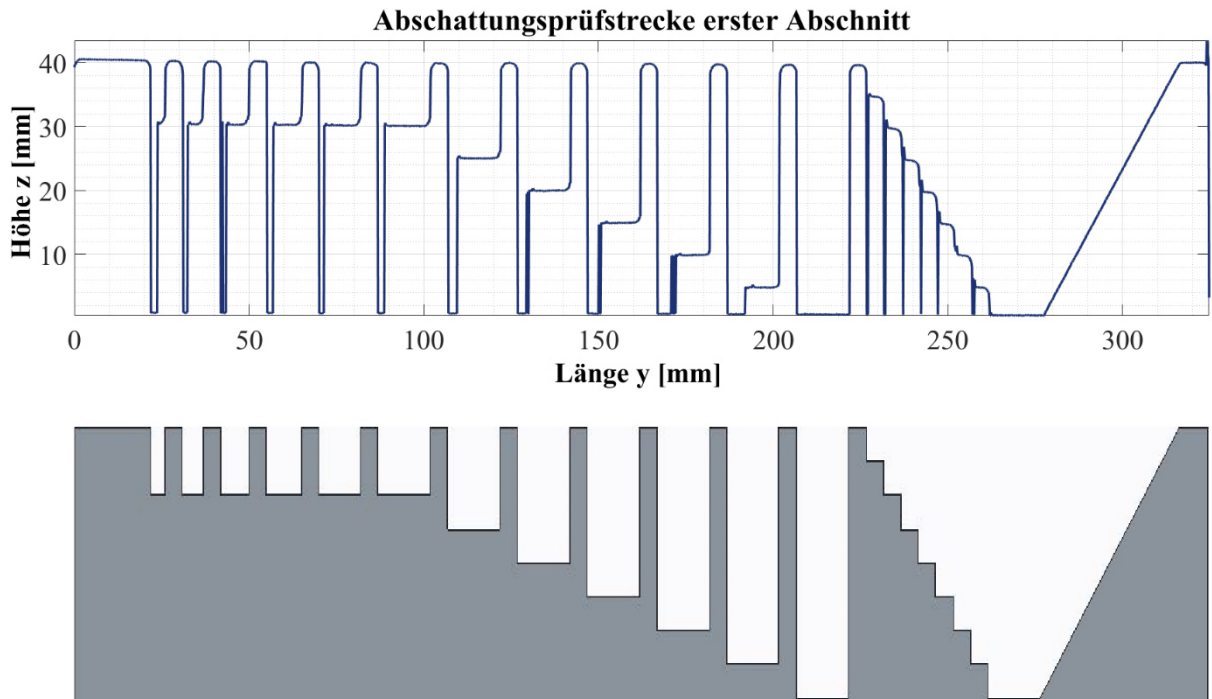


Abbildung 7-14: Oben: aufgenommenes Höhenprofil der Abschattungsprüfstrecke Abschnitt eins Unten: Soll- Höhenprofil aus dem CAD-Modell

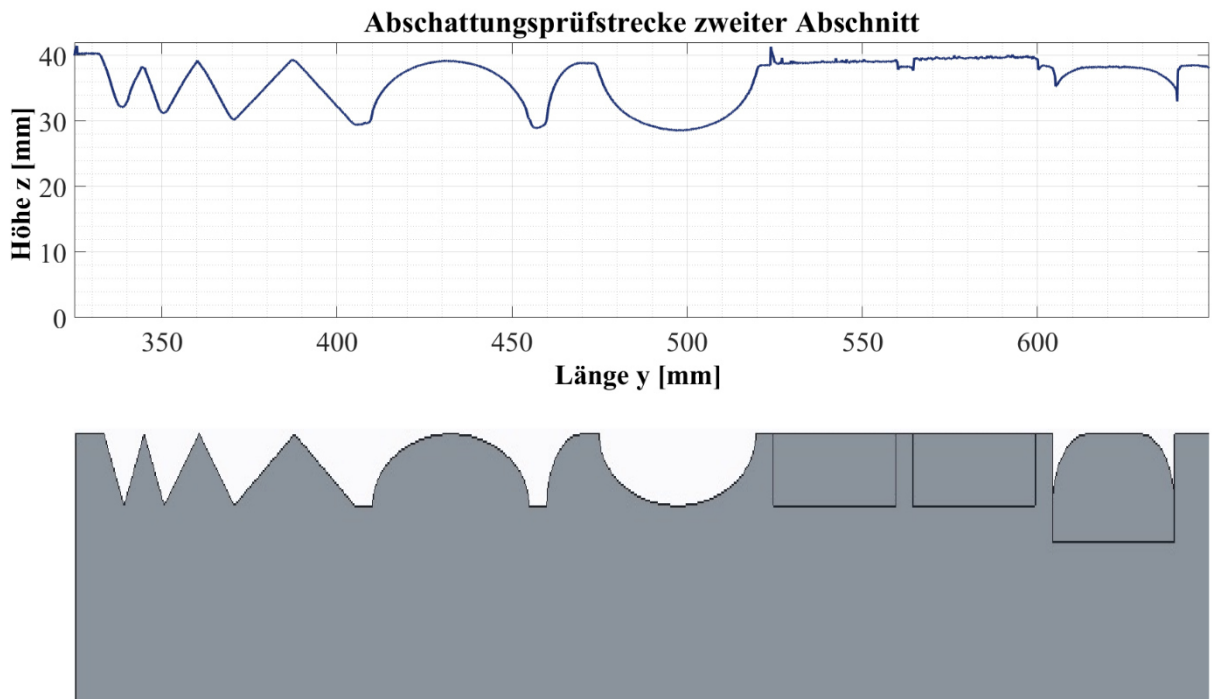


Abbildung 7-15: Oben: aufgenommenes Höhenprofil der Abschattungsprüfstrecke Abschnitt zwei, Unten: Soll- Höhenprofil aus dem CAD-Modell

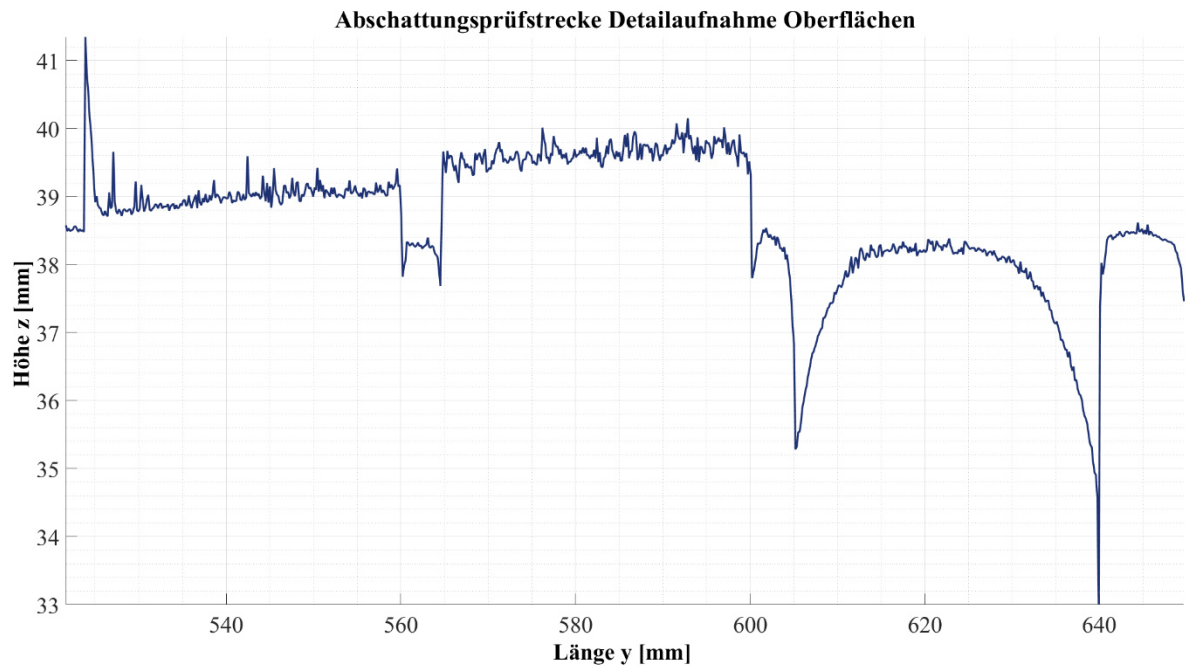


Abbildung 7-16: Detailansicht auf den Prüfstreckenabschnitt mit verschiedenen Oberflächeneigenschaften

7.3.2 Bewertung der Ergebnisse

Anhand der entwickelten Prüfstrecke kann die Signifikanz der Abschattungsfehler nachgewiesen werden. Die abgeschattete Länge L_A zeigt sich durch die fehlenden Werte direkt hinter den Körperkanten der Prüfstrecke. Es können abgeschattete Längen ohne verwertbare Messwerte von bis zu $L_A = 4,96 \text{ mm}$ aufgezeigt werden, welche die Notwendigkeit eines geeigneten Interpolationsalgorithmus im Postprozess begründen. Gleichzeitig zeigen sich sehr gute Messeigenschaften bei den übrigen geometrischen Hindernissen auf der Prüfstrecke. Sämtliche Spaltmaße von 2- 15 mm konnten mit guter Genauigkeit vermessen werden. Auch die Treppenstufen, Steigungen und Radien wurden vom Sensor ohne größere Fehlwerte erfasst. Die spiegelnd glatte Oberfläche und die Oberfläche mit Bearbeitungsspuren bestätigen die bereits in Abschnitt 7.1 nachgewiesenen Messfehler durch gerichtete Reflexionen, wie Abbildung 7-16 deutlich anhand des starken Messsignalflimmerns zeigt.

7.4 Ergebnisse der Prozesstemperaturmessung

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der in Abschnitt 5.5 beschriebenen Temperaturmessung während des Auftragschweißvorganges einer Turbinenschaufelstruktur (Abbildung 5-3) vorgestellt. Im Abschnitt 7.4.1 sind die maximalen Temperaturwerte beider durchgeführten Messungen dargestellt. In dem Abschnitt 7.4.2 sind die Temperaturverläufe der Messungen mit und ohne Hitzeschild über der Prozesszeit dokumentiert.

7.4.1 Maximalwerte der Prozesstemperatur

Anhand der gesammelten Daten kann die während des Prozesses auftretende Maximaltemperatur für jeden Messpunkt ermittelt werden. In Tabelle 7-9 sind sowohl die Werte der Maximaltemperaturen als auch die Zeitpunkte des Erreichens der Maximaltemperaturen für die Messung mit- und ohne Hitzeschild dargestellt. Auf Basis dieser Tabellenwerte kann eine Verlaufskurve der Maximaltemperaturen am Schweißkopf ermittelt werden, welche in Abbildung 7-17 dargestellt ist. Die Raumtemperatur während der Messung betrug konstant 23°C.

Tabelle 7-9: Maximaltemperaturen der Messungen 1 und 2

Messung 1 - mit Hitzeschild			Messung 2 - ohne Hitzeschild		
Messpunkt	maximal Temperatur [°C]	Zeitpunkt [s]	Messpunkt	maximal Temperatur [°C]	Zeitpunkt [s]
1	59,57	300,17	1	169,36	302,13
2	72,12	313,87	2	193,98	315,54
3	70,00	314,03	3	146,77	315,50
4	37,23	279,55	4	72,50	355,85
5	34,26	430,69	5	40,91	440,37
6	27,85	276,38	6	39,08	361,22
7	25,52	393,68	7	26,81	405,97

Da für die Messungen Thermoelemente verwendet wurden, deren Isolation sich während der Versuchsdurchführung als teilweise beschädigt herausstellte, sind einige der Messwerte nicht ideal. Es wäre zu erwarten gewesen, dass die Temperatur an Messpunkt 1 die höchste ist, da dieser Messpunkt am dichtesten an der Schweißbraupe liegt. Diesen qualitativen Verlauf bestätigen auch die Messwerte aus anderen Temperaturmessungen (Abschnitt 7.5). Die Temperaturwerte am Messpunkt 1 sind daher als fehlerhaft einzustufen und werden für die weitere Betrachtung verworfen. Ersatzweise wurden für den in Abbildung 7-17 dargestellten Temperaturverlauf durch kubische Interpolation ermittelte Werte für Messpunkt 1 eingesetzt.

Weiterhin kann auf Basis der Temperaturwerte an Messpunkt 7 mittels Gleichung (2.35) und den Stoffwerten aus Tabelle A-2 (Anhang A.6) der Verzug der Sensoraufhängung berechnet werden.

Der Verzug ergibt sich zu $\Delta L_{\text{Aufhängung}} = 0,01 \text{ mm}$ und $\Delta h_{\text{Aufhängung}} = 0,0036 \text{ mm}$.

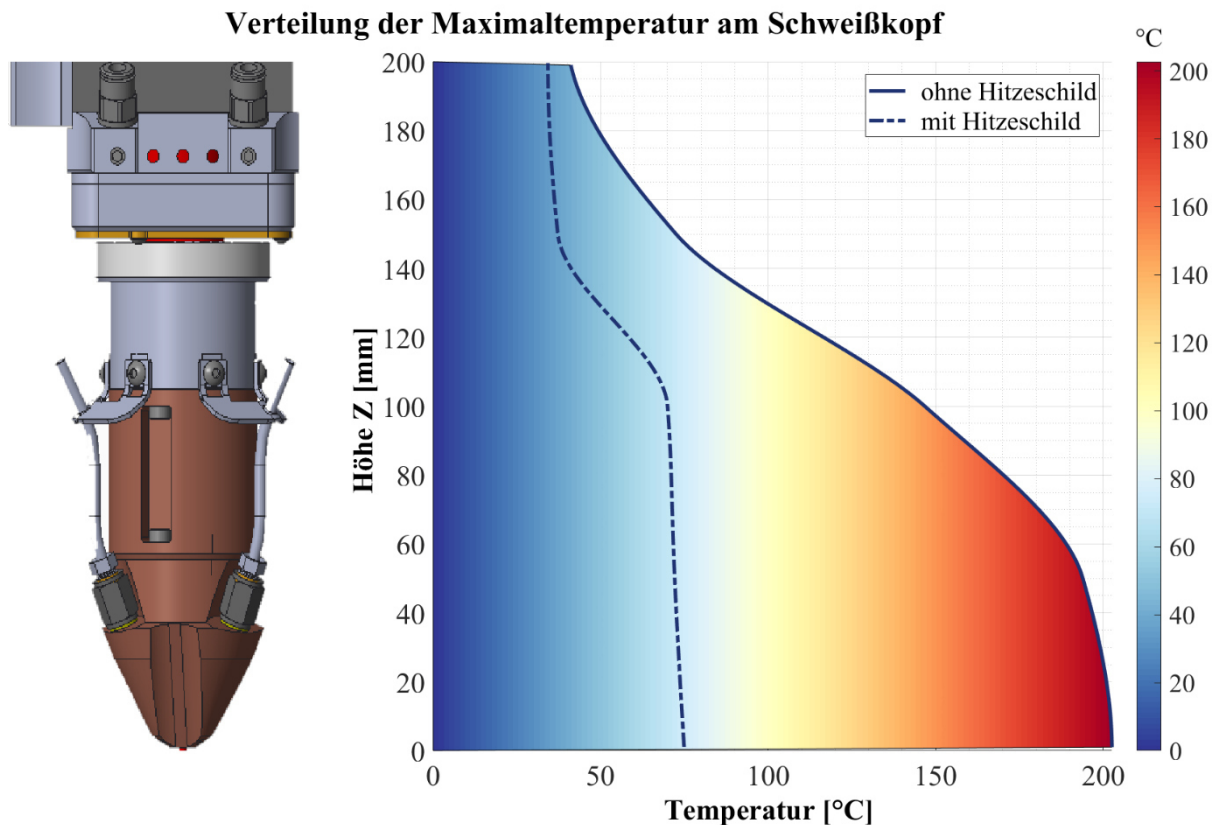


Abbildung 7-17: Verteilung der Maximaltemperatur am Schweißkopf

7.4.2 Temperaturverlauf über der Prozesszeit

Die erste Messung (Messung 1) wurde hinter einem Hitzeschild durchgeführt. Somit waren die Thermoelemente vor der direkten Strahlung von Bearbeitungs-Laser und Schweißbraupe geschützt. In Abbildung 7-18 sind die zeitlichen Verläufe der Temperaturen während des Auftragschweißprozesses für diese Messung dargestellt.

Die zweite Messung (Messung 2) wurde ohne Hitzeschild durchgeführt. Die Thermoelemente waren der Strahlung durch Laser und Schweißbraupe direkt ausgesetzt. In Abbildung 7-19 sind die zeitlichen Verläufe der Temperaturen während des Auftragschweißprozesses für diese Messung dargestellt.

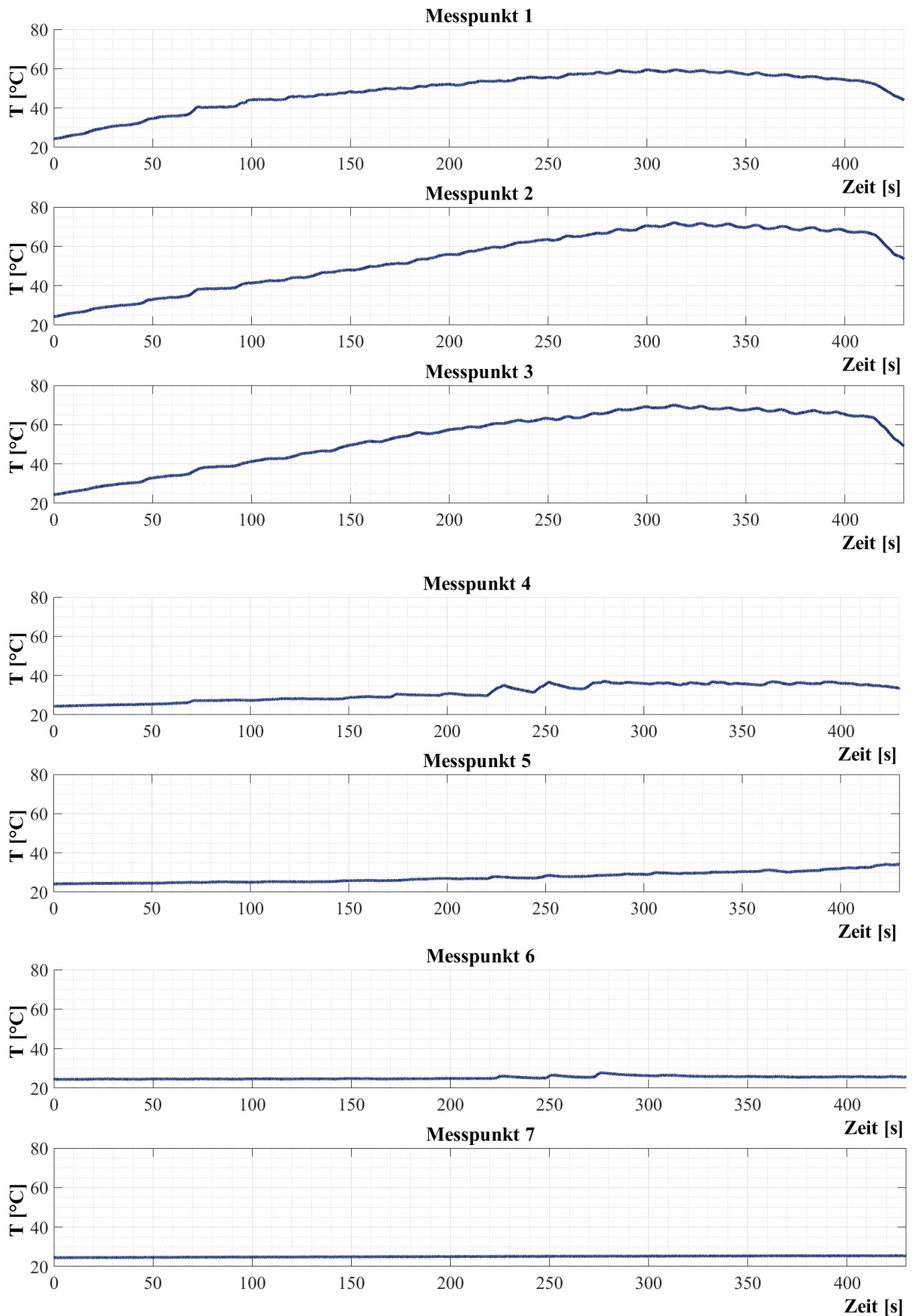


Abbildung 7-18: Prozesstemperaturverlauf Messung 1 mit Hitzeschild Messpunkte 1-7

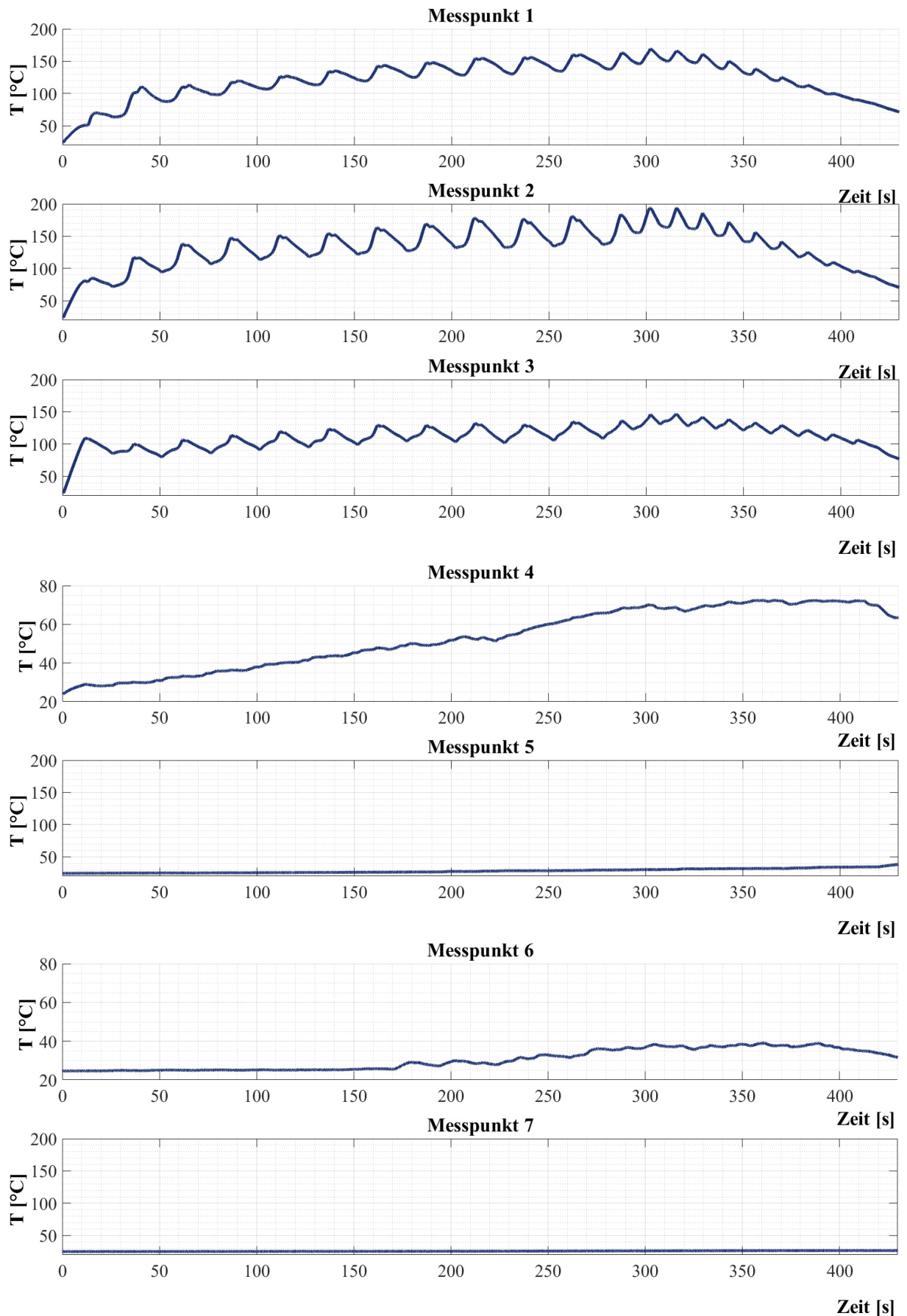


Abbildung 7-19: Prozesstemperaturverlauf Messung 2 ohne Hitzeschild Messpunkte 1-7

7.4.3 Bewertung der Ergebnisse

Durch die ermittelten Temperaturdaten kann die Notwendigkeit eines Hitze- und Strahlungsschildes, sowie einer Kühlung für den Sensor bewertet werden. Anhand der Temperaturverläufe in Messung 1 (Abbildung 7-18) ist zu erkennen, dass der eingesetzte Schild effektiv gegen einen Wärmeanstieg durch Strahlung schützt. Es sind ausschließlich annähernd linear verlaufende Temperaturanstiege durch Konvektionswärme zu erkennen. Gegensätzlich dazu sind in den Temperaturverläufen aus Messung 2 (Abbildung 7-19) deutliche Temperaturanstiege durch Strahlungswärme zu erkennen. Es zeigen sich Überlagerungen der linear verlaufenden Konvektionswärme mit der Strahlungswärme durch das Schmelzbad. Dies ist insbesondere anhand der Spitzen der Sägezahnkurve zu erkennen. Dabei repräsentieren die ersten 11 Spitzen mit Doppel-Peak die ersten 22 aufgeschweißten Lagen über die gesamte Länge in Pendelbewegung, wohingegen die folgenden 10 Spitzen mit Einfach-Peak die Lagen mit jeweils verringerter Länge und Einfachbewegung darstellen.

Die Ergebnisse der Temperaturmessungen zeigen keine Notwendigkeit eines Hitzeschildes zwischen Schweißkopf und Sensor. Die am Sensor messbare Temperatur während eines Schweißprozesses, welche durch den Messpunkt 6 repräsentiert wird, bleibt mit einem Höchstwert von 39,08°C noch unter der maximalen Betriebstemperatur laut Herstellerangaben von 45°C. Dennoch ist ein Temperaturanstieg in dem Messpunkt ohne Hitzeschild zu verzeichnen. Zudem ist zu bedenken, dass die Schweißzeit in diesem Versuch lediglich 400 Sekunden betrug. Soll nicht nur eine einzelne Turbinenschaufel, sondern beispielsweise ein vollständiges Turbinenschaufelblatt gefertigt werden, erhöht sich die Schweißzeit signifikant. Da die Höchsttemperaturen in den Messpunkten insgesamt kurz vor Ende der Schweißzeit gemessen wurden, ist zu erwarten, dass bei längeren Schweißzeiten ein Temperaturanstieg durch Konvektion oberhalb der im Versuch ermittelten Werte auftreten wird. Daher muss in weiterführenden Versuchen überprüft werden, ob eine Kühlung des Sensors bei längeren Fertigungsvorgängen notwendig ist. Treffen die im Prozess emittierten Wärmestrahlen zudem direkt auf die Eingangsoptik des Sensors, wird es zu Signalrauschen durch Dunkelstrom kommen (Abschnitt 3.5.1). Aus diesen Gründen muss der Einsatz eines Strahlschutzes in Erwägung gezogen werden.

Anhand von Abbildung 7-17 kann eine geeignete Einbauhöhe für den Sensor bestimmt werden. Aus dem Temperaturfeld lässt sich ableiten, dass für ein Sensorkpaket mit Hitzeschild und ohne externe Kühlung eine Einbauhöhe ab 140 mm über der Schweißkopfspitze mit den untersuchten Prozessparametern möglich ist. Sollen weder Hitzeschild noch Kühlung eingesetzt werden, so muss die Einbauhöhe oberhalb 200 mm liegen.

Der Verzug der Sensorhalterung durch Wärmeausdehnung kann vernachlässigt werden und hat keinen signifikanten Einfluss auf die Messgenauigkeit.

7.5 Ergebnisse der In-Prozess Kontur- und Lagen-Offseterkennung

7.5.1 In-Prozess-Konturerfassung

Für den Versuch wurden wie in Abschnitt 5.6 beschrieben insgesamt sechs Wände mit einer Gesamtlänge von 35 mm und 20 Einzellagen geschweißt. In den Messungen 1-3 wurde durch Überschnellen des Triangulationssensors nach jeder zweiten Schweißlage eine Konturerfassung der aufgebauten Wand durchgeführt. In Abbildung 7-20 ist das Ergebnis der Konturerfassung für die Messung 2 dargestellt. Um die Übersichtlichkeit zu gewährleisten, sind die Ergebnisse der Messungen 1 und 3 im Anhang der Arbeit zu finden. Die vollständig bis auf Raumtemperatur erkalteten Wände wurden anschließend erneut mit identischen Sensoreinstellungen vermessen. Der Vergleich zwischen der In-Prozess-Konturerfassung und der Konturerfassung bei Raumtemperatur ist in Abbildung 7-21 bis Abbildung 7-23 dargestellt. Für die Messung wurden die Prozesstemperaturen wie in Abschnitt 5.5 beschrieben aufgenommen. Die gemessenen Temperaturwerte entsprechen den in Abschnitt 7.4 vorgestellten Daten- und Verläufen der Messungen mit Hitzeschild (Abbildung 7-17 - 7-18). Die während des Prozesses gemessene Höchsttemperatur am Messpunkt 1 beträgt $67,93^{\circ}\text{C}$, was dem interpolierten Wert für diesen Messpunkt aus Abbildung 7-17 entspricht. Es wird daher auf eine detaillierte Darstellung der Temperaturwerte verzichtet.

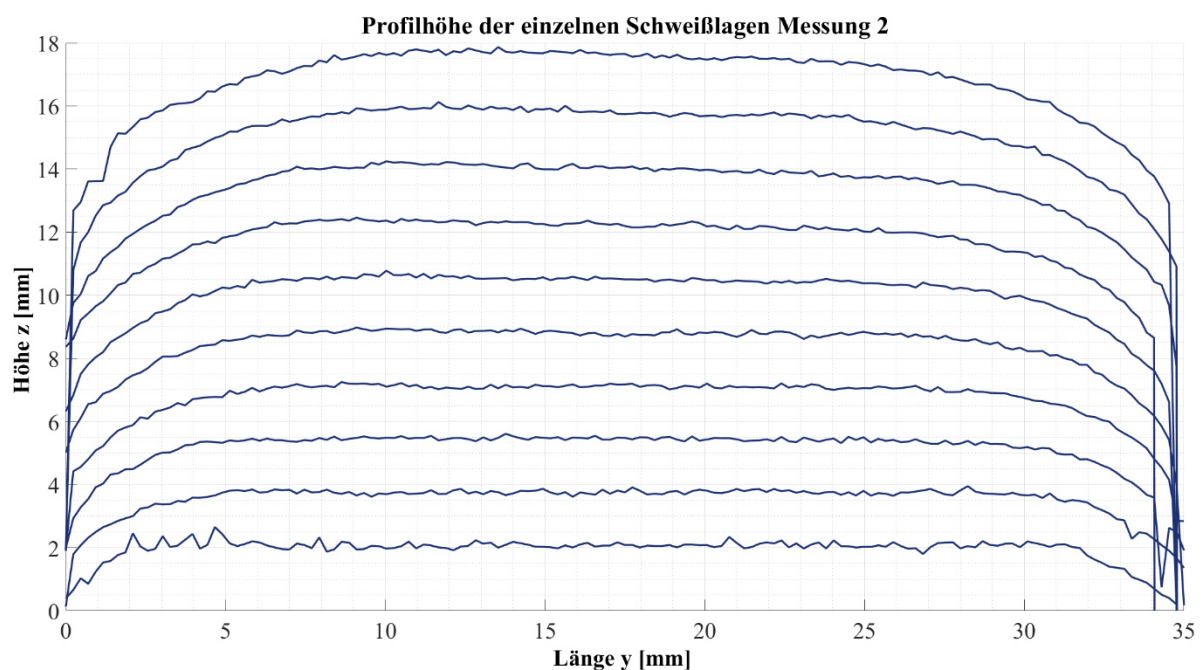


Abbildung 7-20: Ergebnis der In-Prozess Konturerfassung aus Messung 2

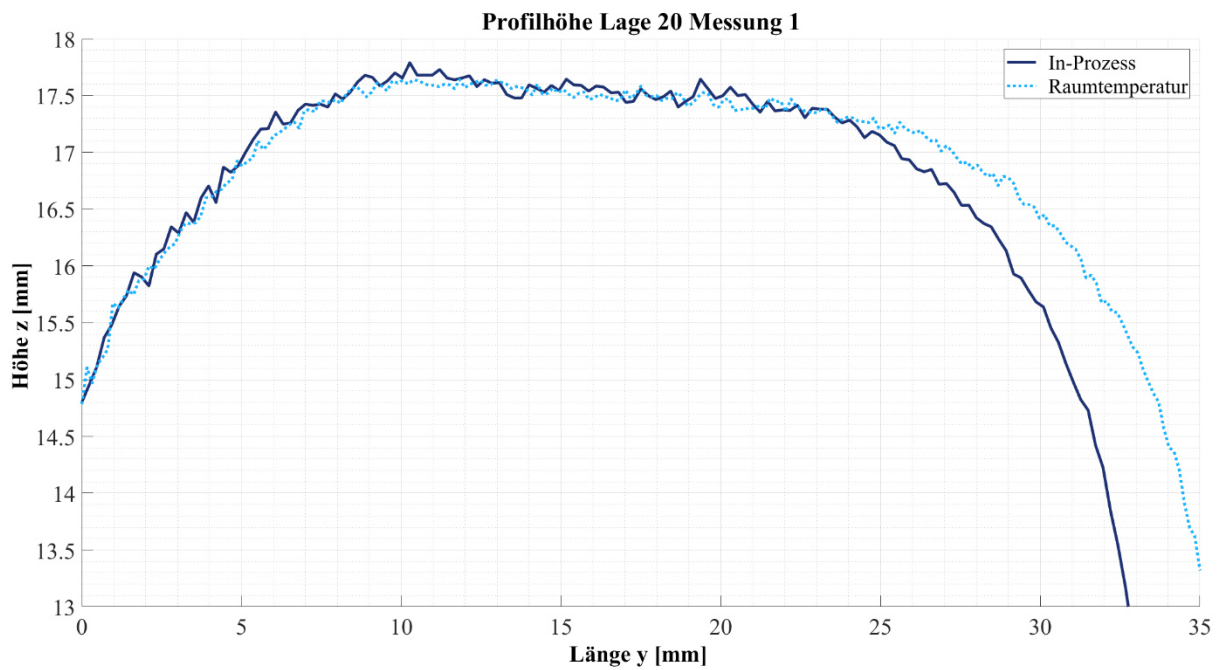


Abbildung 7-21: Vergleich der In-Prozess Messung und der Messung bei Raumtemperatur aus Messung 1

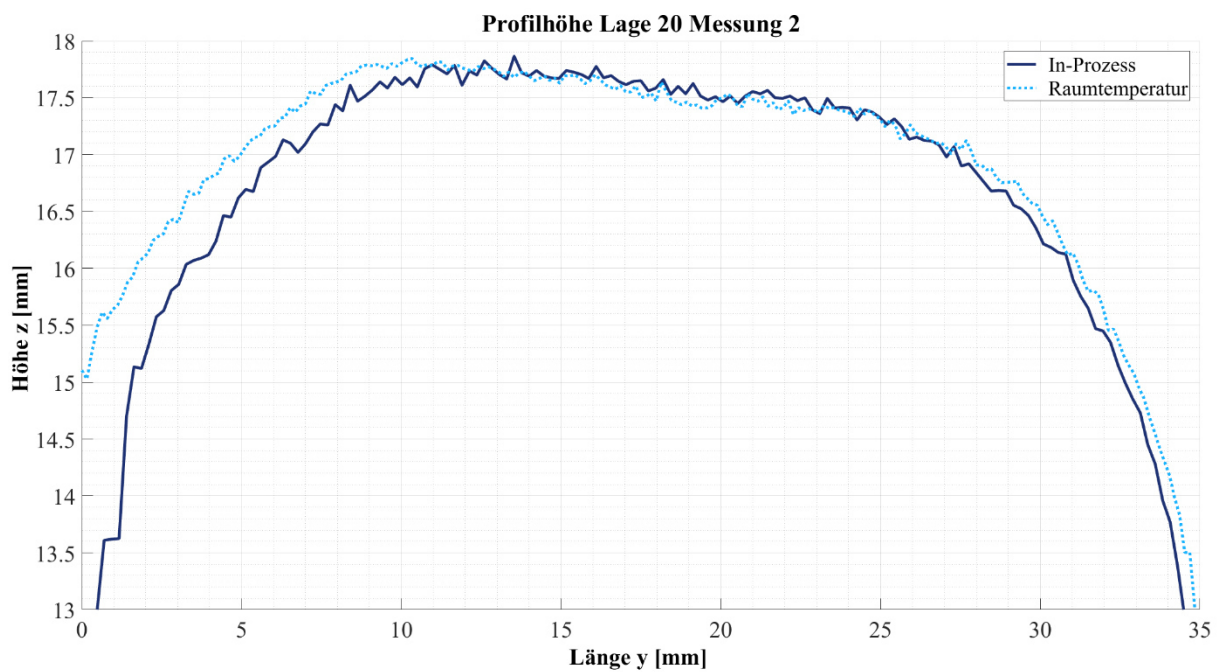


Abbildung 7-22: Vergleich der In-Prozess Messung und der Messung bei Raumtemperatur aus Messung 2

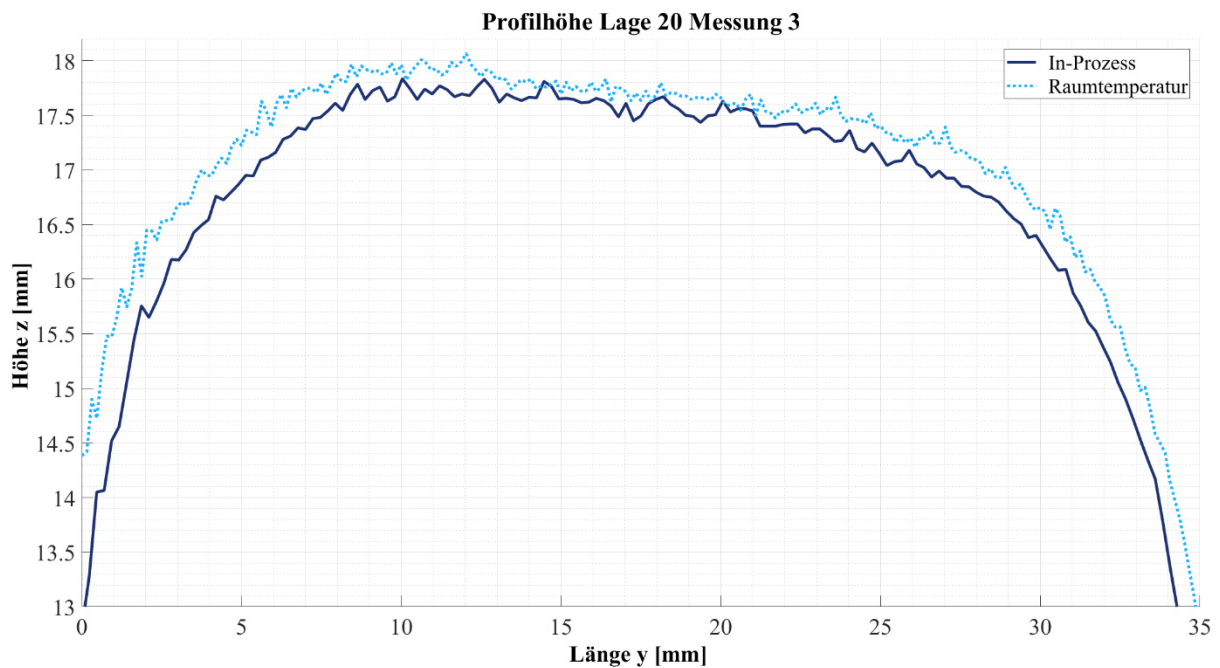


Abbildung 7-23: Vergleich der In-Prozess Messung und der Messung bei Raumtemperatur aus Messung 3

Nach Gleichung (2.34) kann mit den Stoffwerten aus Tabelle A-2 (Anhang A.6) die Schrumpfung in Höhenrichtung der Wände durch die Abkühlung auf Raumtemperatur ermittelt werden. Dabei ergibt sich eine Schrumpfung von $\Delta H \approx 0,05 \text{ mm}$. Aus den Messungen wird die mittlere Messabweichung zwischen der In-Prozess-Konturerfassung und der Konturerfassung bei Raumtemperatur ermittelt. Die der Berechnung zugrundeliegende Tabelle befindet sich im Anhang A.5 der Arbeit.

Tabelle 7-10: Mittlere Messabweichungen der In-Prozess Konturerfassung im Vergleich zur Konturerfassung bei Raumtemperatur

Messung	Mittlere Messabweichung [mm]	Mittlere Messabweichung mit Schrumpfung [mm]
1	-0,03395 ($\pm 0,25447$)	-0,08395 ($\pm 0,25447$)
2	-0,11314 ($\pm 0,39087$)	-0,16314 ($\pm 0,39087$)
3	-0,23071 ($\pm 0,26020$)	-0,28071 ($\pm 0,26020$)

7.5.2 In-Prozess-Lagen-Offseterkennung

Für den Versuch wurden, wie in Abschnitt 5.6 beschrieben, insgesamt drei Wände mit einer Gesamtlänge von 35 mm und 20 Einzellagen geschweißt. In den Messungen 4-6 wurde durch Überschnellen des Triangulationssensors bis zum Mittelpunkt der aufgetragenen Kontur eine Erfassung des Lagen-Offsets in Höhenrichtung nach jeder zweiten Schweißlage der Wand durchgeführt. Die Messung wurde für jede Lage über einen Zeitraum von 10 Sekunden durchgeführt, bevor der Schweißprozess wiederaufgenommen wurde. Ein zeitlicher Verlauf der Messung ist in Abbildung 7-24 beispielhaft für die Messung 4 dargestellt. Die Verläufe der weiteren Messungen sind im Anhang A.4 zu finden. In Tabelle 7-11 sind die absoluten Messergebnisse für alle Messungen- und Schweißlagen dargestellt.

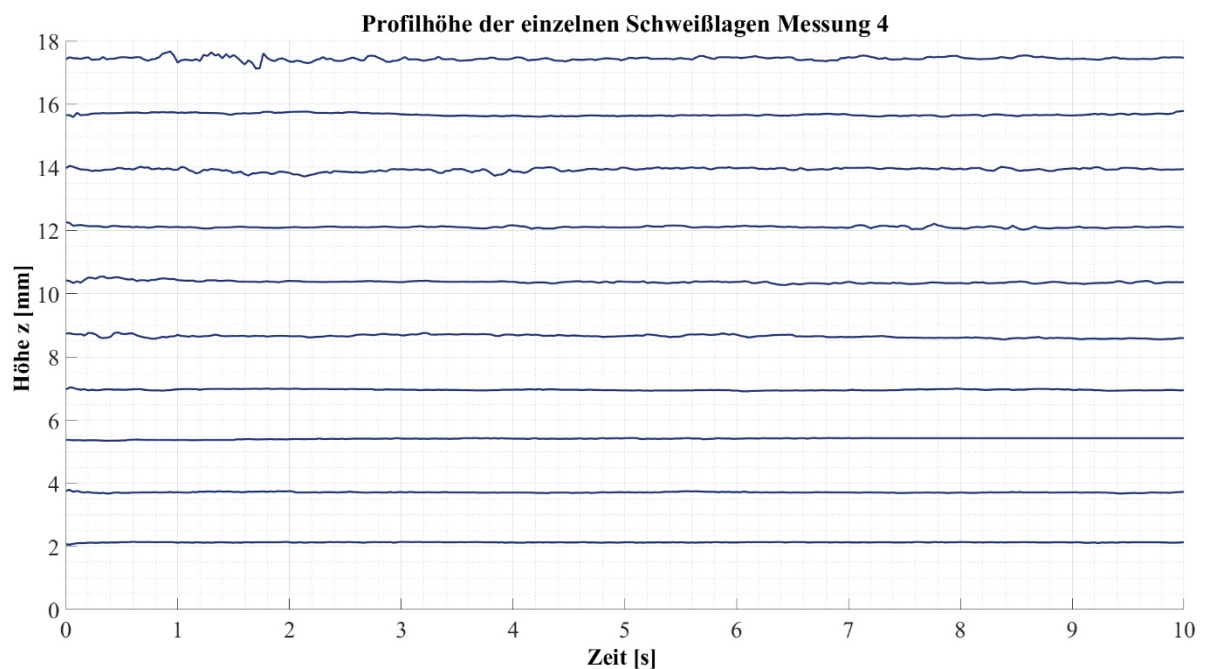


Abbildung 7-24: gemessene Lagenhöhen aus Messung 4

Tabelle 7-11: Absolutes Messergebnis der Lagen-Offseterfassung

Absolutes Messergebnis [mm]			
Schweißlage	Messung 4	Messung 5	Messung 6
2	2,12784 ($\pm 0,00838$)	2,12944 ($\pm 0,02625$)	2,09842 ($\pm 0,02611$)
4	3,71339 ($\pm 0,01475$)	3,78146 ($\pm 0,02111$)	3,80457 ($\pm 0,03062$)
6	5,40897 ($\pm 0,02113$)	5,51561 ($\pm 0,04642$)	5,51350 ($\pm 0,03148$)
8	6,95885 ($\pm 0,01862$)	6,96065 ($\pm 0,03151$)	7,05319 ($\pm 0,04571$)
10	8,65248 ($\pm 0,04914$)	8,75654 ($\pm 0,01714$)	8,66595 ($\pm 0,04514$)
12	10,37156 ($\pm 0,04246$)	10,35010 ($\pm 0,02923$)	10,44493 ($\pm 0,03805$)
14	12,10841 ($\pm 0,02856$)	12,08272 ($\pm 0,06067$)	12,17309 ($\pm 0,03447$)
16	13,92475 ($\pm 0,05910$)	13,82869 ($\pm 0,04593$)	13,85681 ($\pm 0,03716$)
18	15,66839 ($\pm 0,04276$)	15,64779 ($\pm 0,04781$)	15,60814 ($\pm 0,04071$)
20	17,44045 ($\pm 0,05983$)	17,42869 ($\pm 0,06024$)	17,42238 ($\pm 0,05301$)

Die Standardabweichung der absoluten Messergebnisse kann als Flimmern in Messsignal interpretiert werden. Es drückt die mittlere Intensität der Fluktuation des Signals aus. Wie Anhand von Tabelle 7-11 zu erkennen ist, verändert sich die Intensität der Messsignalfuktuation bei steigender Schweißlagenzahl. In Abbildung 7-25 ist der Verlauf der Messsignalfuktuation in Abhängigkeit der aufgebauten Wandhöhe dargestellt.

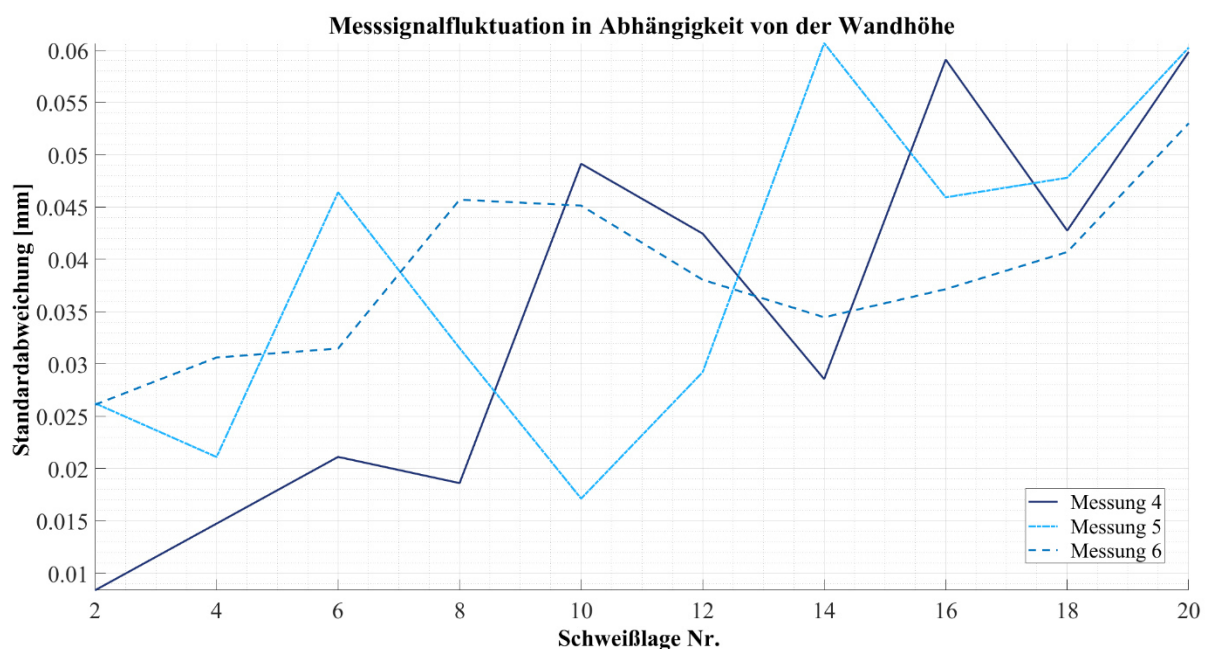


Abbildung 7-25: Verlauf der Messsignalfuktuation in Abhängigkeit von der aufgebauten Wandhöhe

7.5.3 Bewertung der Ergebnisse

Die Verlaufskurven der Konturerfassung zeigen keine messbaren Störungen durch Wärmestrahlung im Bereich von $\lambda = 658 (\pm 10) \mu m$, da die gewählten Prozessparameter eine ausreichende Wärmeabfuhr und somit ein schnelles Abklingen der glühenden Kontur ermöglicht haben. Die in Abschnitt 3.6.1 beschriebenen Messfehler mit Überlagerung von Emissionsstrahlung und den Strahlen des diffus reflektierten Mess-Lasers kann daher experimentell nicht nachgewiesen werden. Zur Verifizierung der Signifikanz der Wärmestrahlung im Bereich von $\lambda = 658 (\pm 10) \mu m$ müssen daher in späteren Arbeiten, weiterführende Versuche mit geänderten Schweißparametern angestellt werden. Der Vergleich der In-Prozess Konturerfassung bei Prozesstemperatur mit der Konturerfassung im Post-Prozess und bei Raumtemperatur zeigt jedoch signifikante Abweichungen in der Messgenauigkeit. Unter Berücksichtigung der durch Abkühlung entstehenden Schrumpfung in Höhenrichtung konnten mittlere Messabweichungen von bis zu $-0,28071 (\pm 0,26020) mm$ nachgewiesen werden. In allen Einzelmessungen lag die mittlere Messabweichung dabei oberhalb der Genauigkeitsgrenze von $50 \mu m$ mit signifikanter Streuung der Werte. Die Verlaufskurven (Abbildung 7-21, Abbildung 7-22, Abbildung 7-23) ergeben dabei kein eindeutiges Bild und lassen nur bedingt Rückschlüsse auf die Herkunft der Messfehler zu. Da der Einfluss des inhomogenen Brechungsindex im Messbereich nach den in Abschnitt 3.6.2 ermittelten Werten einen Höchstwert von $\Delta \Delta z \approx 4 \mu m$ an nimmt, ist der verbleibende Fehler vorrangig im Dunkelstrom Schrotrauschen durch Emissionswärmestrahlung im thermischen Lichtfeld zu verorten. Diese Vermutung bestätigt sich auch durch die Messung des Lagen-Offsets. Anhand des Verlaufes in Abbildung 7-25 kann erkannt werden, dass die Messsignalfuktuation bei zunehmender Aufbauhöhe ebenfalls zunimmt. Dies lässt sich mit dem schlechteren Wärmeabfluss durch Wärmeleitung bei zunehmender Aufbauhöhe und dem somit zunehmenden Wärmeabfluss durch Strahlungsemissionen in Korrelation setzen. Die Messgenauigkeit des Einzellagen-Offsets ist nur schwer zu beurteilen, da gemessene Vergleichs-Sollwerte für die einzelnen Schichten fehlen. Das z-Inkrement und der Lagen-Offset des Roboterprogrammes wurden mit $\Delta h_r = 0,76 mm$ gewählt, wonach sich aus den Parametern eine theoretische Wandhöhe von $H_{theoretisch} = 15,2 mm$ ergeben sollte. Die Abweichung vom Sollwert von $\Delta H \approx 2,2 mm$ über 20 Schweißlagen bestätigen den in Abschnitt 2.3 beschriebenen Aufbaufehler je Schweißlage von bis zu $100 \mu m$ und zeigen deutlich die Notwendigkeit einer Höhenregelung mittels geschlossenem Regelkreis.

8 Lösungsansätze und Optimierungsstrategie

Anhand der Ergebnisse der durchgeführten Versuche können Lösungsansätze entwickelt werden, um das Messergebnis einer Kontur- und Lagen-Offset-Erfassung während eines Laserauftragschweißvorganges mittels optischer Triangulationssensoren zu verbessern und somit die Prozesssicherheit zu steigern.

Sensorposition- und Aufhängung

Die in Abschnitt 2.2.3 und 3.2 beschriebene nichtlineare Beziehung der $\Delta z/\delta$ Koordinate konnte in den Versuchen als signifikanter Einflussfaktor identifiziert werden. Die Position des Sensors sollte daher so gewählt werden, dass die Messbereichsmitte (MBM) möglichst exakt auf Höhe der zu vermessenden Oberfläche liegt. Die Messbereichsmitte ist die z_0 -Koordinate der Sensorkalibrierung und stellt somit den Punkt mit der höchsten Auflösung des digitalen Bildes dar. Die Messbereichsmitte des in dieser Arbeit untersuchten Sensors ScanCONTROL 2910-100 liegt 240 mm unterhalb der Sensorunterkante. Der Laserfokus des Pulverschweißkopfes liegt 16 mm unterhalb der Pulverkopfspitze und stellt den Tool Center Point des Roboters dar. Die Aufhängung des Sensors sollte so konzipiert werden, dass Messbereichsmitte und TCP auf einer Höhenlinie liegen. Die beschriebenen nichtlinearen Beziehungen gelten gleichwertig in z-Richtung und in x-Richtung, weshalb möglichst genau in der Mitte der Laserlinie des Sensors, bei $x = 0$ gemessen werden sollte. Allgemein muss eine Messung in den äußeren Zonen des Messbereiches vermieden werden, da die Messgenauigkeit dort stark abfällt.

Weiterhin hat sich der Abstand zwischen Schweißkopf und Laserlinie des Sensors in den Versuchen als problematisch herausgestellt. In der untersuchten Konfiguration ergibt sich ein Abstand in y-Richtung zwischen TCP und Laserlinie des Sensors von 65 mm. Für eine vollständige Konturerfassung muss die Laserlinie komplett über die Kontur übergeschwenkt werden, wodurch die Spitze des Schweißkopfes einen langen Verfahrensweg durchführen muss. Insbesondere bei aufwändigeren Konturen mit verschiedenen Höhen oder Bauteilen die dicht am Rand der Schutzgaskammer liegen, kann es dabei leicht zu Kollisionen zwischen dem Pulverkopf und Kontur- oder Schutzgaskammer kommen. Die Aufhängung des Sensors muss daher so gestaltet werden, dass die Laserlinie möglichst dicht am TCP liegt. Mit dem in dieser Arbeit untersuchten Sensor und der zuvor beschriebenen Bedingung, die MBM möglichst dicht in den TCP zu legen, ist eine solche Konfiguration nicht möglich. Ein eigens für das Laserauftragschweißen konzipierter Sensor mit einer radialen, direkt am Schweißkopf verbauten Aufhängung würde sich anbieten.

Anhand der ermittelten Prozesstemperaturen, lässt sich eine kritische Einbauhöhe für den Sensor von 150 mm oberhalb der Schweißkopfspitze definieren. Soll ein Sensor für eine niedrigere Einbauposition konzipiert werden, so muss zwingend eine Kühlung vorgesehen werden. Eine geeignete Kühlung könnte zusätzlich die allgemeinen Rauscheinflüsse durch Dunkelstrom reduzieren, die in den Messungen als signifikanter Einflussfaktor nachweisbar waren. Der Einsatz eines Strahlungs- und Hitzeschildes hat sich als empfehlenswert erwiesen und sollte in die Konstruktion mit einfließen. Zur Verminderung des Dunkelstrom Schrotrauschens durch thermische Strahlung sollte ein Strahlungsschutz der Eingangsoptik, beispielsweise durch ein vorgesetztes Glas oder einen zusätzlichen Bandpassfilter, realisiert werden.

Hier muss die zusätzliche Brechung des Laserlichtes durch das durchsichtige Medium mit beachtet werden. Es muss im Einzelfall abgewogen werden, ob die Signalverschlechterung durch die zusätzliche Brechung zu insgesamt größeren Messfehlern führen wird, als die emittierte Wärmestrahlung. Eine ausführliche analytische und experimentelle Betrachtung dieser Wechselwirkung sollte in die Weiterentwicklung der Sensorintegration mit einfließen.

Obwohl sie in dieser Arbeit nicht explizit untersucht wurden, ist davon auszugehen, dass reflexive Oberflächen im Messraum, beispielsweise von dem Hitzeschild oder der Schutzgaskammer, zu erhöhten Streureflexionen des Mess-Lasers führen und sich daher negativ auf die allgemeine Signalqualität auswirken. Die Prozessumgebung sollte daher möglichst matt, optimalerweise absorbierend gestaltet werden. Eine Oberflächenbehandlung von Sensoraufhängung, Hitzeschild und Schutzgaskammer, etwa durch das Eloxan-Verfahren mit schwarzer Farbe, wäre daher zu empfehlen.

Sensorkalibrierung

Das diffus reflektierte Licht des Mess-Lasers wird beim Durchqueren des Messraumes unter dem Triangulationswinkel im Medium der Luft gebrochen. Wie zuvor ausgiebig diskutiert wurde, ist der Brechungsindex n_{Luft} stark Temperaturabhängig. Der Einfluss des inhomogenen Brechungsindex durch die Prozesswärme konnte in den Untersuchungen als signifikanter Einflussfaktor nachgewiesen werden und sollte in eine Optimierungsstrategie bei der Sensorintegration mit einfließen. Die Kalibrierung des Sensors wird unter unbekanntem Laborbedingungen bei einer Raumtemperatur durchgeführt und könnte durch einen Korrekturfaktor auf die Prozesstemperaturen angepasst werden. Ein solcher Faktor könnte etwa anhand der Prozess-Temperaturdaten ermittelt werden und in eine Post-Prozess Algorithmik mit einfließen. Die Abweichung zwischen Kalibrier- und Umweltbedingungen könnte somit in Teilen ausgeglichen werden. Ebenfalls ist ein Ausgleich der oben diskutierten zusätzlichen Brechung durch Hitzeschilde und Bandpassfilter durch einen solchen Korrekturfaktor denkbar.

Berechnungsmethode

Die Höhenkoordinate der vermessenen Konturen Δz wurde in der vorliegenden Arbeit ausschließlich über eine Relativbeziehung zwischen Bauteiloberfläche und Grundplatte ermittelt. Dieses Verfahren bringt in der Praxis viele Nachteile mit sich. Bei großen Konturen ergeben sich Messungenauigkeiten, zum einen durch die nichtlineare $\Delta z/\delta$ Beziehung, zum anderen durch die unterschiedliche Belichtungsintensität der beiden Oberflächen. Zudem ist dieses Verfahren nicht mehr realisierbar, sobald die Höhenunterschiede zwischen Referenzfläche und Messoberfläche den Messbereich überschreiten. Für den betrachteten Sensor und die oben beschriebene Konfiguration aus MBM und TCP ist dies bereits für Konturhöhen ab 50 mm der Fall. Diese Probleme können vermieden werden, indem die absolute z-Koordinate der Bauteiloberfläche für die Bestimmung der Konturhöhe herangezogen wird. Die Referenzkoordinate ist dann die Ist-Position des Roboters im robotereigenen Koordinatensystem. Für eine derartige Positionsbestimmung ist eine exakte Hand-Auge Kalibrierung zwischen Industrieroboter und Triangulationssensor unerlässlich. Dabei muss für jeden Einzelfall entschieden werden, ob die Messabweichung zwischen den Referenzoberflächen oder die Messabweichung durch die Ungenauigkeiten der Roboterkinematik zu größeren Fehlern führt.

Ein weiterer Vorteil der Höhenbestimmung durch den Vergleich zwischen Oberflächenkoordinate und Roboterposition ist die Möglichkeit, einen Sensor mit kleinerem Messbereich zu wählen. Es kann verallgemeinert angenommen werden, dass Sensoren mit kleineren Messbereichen stets eine höhere Auflösung liefern. Der Linien-Lasertriangulationssensor scanCONTROL 2900-10/BL erzielt beispielhaft laut Herstellerangaben eine Referenzauflösung von $1\mu\text{m}$ bei einem Messbereich von 10 mm. Es muss auch hier abgewogen werden, mit welcher Konfiguration bessere Messergebnisse zu erzielen sind.

Sensorwahl

Wie bereits oben beschrieben, verfügt ein Sensor mit kleinerem Messbereich über eine höhere Referenzauflösung und kann daher bessere Messergebnissen liefern. In den durchgeführten Versuchen konnten keine signifikanten Messfehler durch nachglühende Schweißwände und Wärmestrahlung im Bereich von $\lambda = 658\text{nm}$ nachgewiesen werden. Es ist jedoch davon auszugehen, dass derartige Messfehler bei veränderten Prozessparametern auftreten werden. Insbesondere wird dies der Fall sein, wenn man die Laserlinie des Sensors dichter an den Laserfokus legt und somit sehr dicht am Schmelzbad messen möchte. Um diese Fehler auf einfache Weise zu vermeiden, sollte grundsätzlich ein Sensor mit blauem Messlaser und einer Wellenlänge von $\lambda = 405\text{nm}$ eingesetzt werden, bei dem keine derartigen Störeinflüsse zu erwarten sind.

Roboterprogramme

Bei der Untersuchung der Roboterkinematik, konnten Messabweichungen durch Verkippung der Roboterachsen und daraus resultierende Taumelfehler am Sensor nachgewiesen werden. Die Abweichungen sind zwar im absoluten Messergebnis sehr klein, sollten jedoch zur allgemeinen Verbesserung der Messergebnisse mit beachtet werden und in die Optimierungsstrategie mit einfließen. Es ist daher zu empfehlen, dass der Roboter für die Messung eine langsame, geradlinige und ausschließlich horizontale Bewegung durchführt. Dies wird besonders dann relevant, wenn die Absolutkoordinate für die Höhenbestimmung eingesetzt werden soll, da die Linearitätsabweichungen und Positionsfehler des Roboters bei dieser Berechnungsmethode direkten Einfluss auf das Messergebnis haben.

Oberflächeneigenschaften

Aufgrund der Versuchsdaten konnte gezeigt werden, dass insbesondere Oberflächen mit gerichteten Bearbeitungsspuren wie Fräs- oder Schleifspuren und spiegelnde Oberflächen zu großen Messfehlern außerhalb der Genauigkeitsgrenzen führen. Während eine LPA-Geschweißte Kontur eine insgesamt eher raue- und diffus reflektierende Oberfläche aufweist, sind konventionell, etwa mittels MAG, geschweißte Nähte deutlich stärker spiegelnd und directional geschuppt. Insbesondere wenn das Laserauftragschweißen nicht als urformender Prozess, sondern für Reparaturarbeiten eingesetzt werden soll, bei denen zuvor eine Schicht mittels spanender Bearbeitungsverfahren abgetragen wurde, ist mit directionalen Bearbeitungsspuren zu rechnen. Spiegelnde Oberflächen führen allgemein zu fehlenden Messwerten, während Bearbeitungsspuren zu fehlerhaften Messwerten führen. Ersteres ist durch Mittelwertfilter und Interpolationsalgorithmen relativ gut ausgleichbar, wie die absoluten Messergebnisse der Oberflächenversuche gezeigt haben. Fehlerhafte Messwerte zuverlässig zu erkennen und zu korrigieren, stellt insbesondere bei komplexe Konturen, eine deutlich größere

Herausforderung an die Datenverarbeitung im Post-Prozess dar. Daher sollte grundsätzlich eine Bauteilvorbereitung durch Sandstrahlen, Schmirgeln oder ähnliche Verfahren vorgenommen werden, um eine diffus reflektierende Oberfläche zu schaffen.

Die Bestimmung der Oberflächenrauigkeit ist mit dem eingesetzten Sensor nicht zuverlässig möglich. Daher sollte auf derartige Anwendungen verzichtet werden und auf ein geeigneteres Messverfahren, etwa Laser-Speckle-Inferometrie, zurückgegriffen werden. Auch das Auffinden von Klebenähten war in den Versuchen nicht zuverlässig möglich und sollte durch andere Messverfahren realisiert werden.

Post-Prozessing

Neben den bereits beschriebenen Post-Prozessalgorithmen für den Ausgleich fehlerhafter Messwerte durch die Oberflächenbeschaffenheit der Bauteile, besteht eine weitere Herausforderung der Datenauswertung in den fehlenden Messwerten durch die Abschattung durch Körperkanten. Dieser Fehlereinfluss kann physikalisch nur durch eine Positionsänderung des Sensors beeinflusst werden, die beim Laserauftragschweißen nicht praktikabel ist. Dementsprechend müssen für eine exakte Konturerfassung umfangreiche Interpolationsalgorithmen entwickelt werden. Soll ausschließlich eine Höhenregelung des Lagen-Offsets integriert werden, kann die Abschattung jedoch vernachlässigt werden.

In der vorliegenden Arbeit wurden zur besseren Identifikation der Einflussgrößen keine zusätzliche Aufbereitung der Messdaten im Post Prozess vorgenommen. Der Einsatz von dynamischen Auslöseschwellen der Kamera, Medianfiltern und Glättungsalgorithmen in der verwendeten Software ScanCONTROL Configuration Tool 5,1, hat in gesondert durchgeführten Versuchen zu deutlich besseren Messergebnissen geführt. Da für den Anwendungsfall am Institut eine eigenständige Schnittstelle zwischen Roboter und Scanner mittels C++ entwickelt werden soll, müssen derartige Datenaufbereitungstools im Post-Prozess dort mit eingeplant werden.

Messablauf

Die in dieser Arbeit durchgeführten Versuche haben gezeigt, dass mit der vorhandenen Systemkonfiguration aus Sensor, Roboter und Schweißzelle, derzeit keine In-Prozess-Konturerfassung innerhalb der Genauigkeitsgrenzen möglich ist. Die nachgewiesenen mittleren Messabweichungen von 0,08 bis 0,28 mm zwischen In-Prozess Messung und Messung bei Raumtemperatur liegen deutlich oberhalb des angestrebten Wertes von 0,05 mm und können daher nicht als Grundlage für die In-Prozess-Regelung des Lagen-Offsets herangezogen werden. Die in diesem Kapitel beschriebene Optimierungsstrategie verspricht in ihrer Gesamtheit eine signifikante Verbesserung der Messergebnisse. Der Einfluss der Prozesswärme und des daraus resultierenden Dunkelstrom Schrotrauschens hat sich in den durchgeführten Versuchen als besonders signifikant erwiesen. Sollte es nicht möglich sein, diese Messungengenauigkeit durch Kühlung des Sensors und Strahlungsschutz ausreichend zu reduzieren, so verbleibt die Möglichkeit, ausreichend lange Wartezeiten zwischen Schweiß- und Messvorgang einzuplanen. Dies sollte jedoch als letzter Ausweg gesehen werden, da die Prozesszeiten sich durch Wartezeiten erheblich verlängern und die Wirtschaftlichkeit des Fertigungsverfahrens deutlich verschlechtern.

9 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Identifikation und Analyse der beim Laserauftragschweißen auftretenden Prozesseinflüsse und der Bewertung ihrer Auswirkung auf das Messergebnis optischer Triangulationssensoren. Im Fokus steht dabei die In-Prozess-Konturerfassung zum Zweck der Integration einer Lagen-Offset-Regelung in das Fertigungsverfahren. Zu diesem Zweck wird ein System aus automatisierter Laserauftragschweißzelle, Sechs-Achs-Industrieroboter und Linien-Lasertriangulationssensor untersucht. Ausgehend vom derzeitigen Stand der Technik konnten die folgenden Haupteinflussfaktoren identifiziert werden: Sensorposition, Roboterkinematik, Prozesswärme, Messoberflächenbeschaffenheit, Kamerarauschen und Abschattung durch Körperkanten.

Auf Grundlage der analytisch gewonnenen Erkenntnisse wurden verschiedene Versuchsaufbauten entwickelt, um die Signifikanz der Haupteinflüsse zu bestimmen. Um möglichst aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten, wurden im Post-Prozess keine Filter- oder Glättungsalgorithmen für die Messwerte eingesetzt. Anhand der ermittelten Daten wurde eine Bewertung der Prozesseinflüsse auf das Messergebnis vorgenommen und ein Katalog mit Lösungsansätzen entwickelt, um die Messgenauigkeit zu verbessern. Um eine zahlenmäßige Bewertung der Messergebnisse zu ermöglichen, wurde basierend auf dem durchschnittlichen Aufbaufehler pro aufgeschweißter Lage, eine Genauigkeitsgrenze von 50 μm definiert. Zusätzlich zu den experimentellen Untersuchungen, wurde eine ausführliche mathematische Bestimmung der Messsignalverschiebung durch den inhomogenen Brechungsindex im Temperaturfeld zwischen Sensor und Schweißraupe durchgeführt.

Zusammenfassend konnte gezeigt werden, dass alle oben genannten Prozessfaktoren einen signifikanten Einfluss auf das Messergebnis haben. Eine In-Prozess Konturerfassung innerhalb der Genauigkeitsgrenze war mit den untersuchten Systembedingungen nicht möglich. Insbesondere das Kamerarauschen durch das thermische Lichtfeld, die nichtlineare Beziehung der $\Delta z/\delta$ Koordinaten und gerichtete Reflexionen durch Bearbeitungsspuren konnten als Hauptfehlerquellen identifiziert werden.

Um das Laserauftragschweißverfahren weiter zu automatisieren und die Wirtschaftlichkeit zu verbessern, ist eine automatisierte Regelung des Lagen-Offsets unerlässlich. Anhand der Versuche konnte gezeigt werden, dass unter den gegebenen Bedingungen Aufbaufehler pro aufgeschweißter Lage von bis zu 100 μm zu erwarten sind. Insbesondere für große Bauteile mit einer hohen Lagenzahl kann eine manuelle Eingabe der Schweißparameter keine zuverlässige Prozesssicherheit gewährleisten. Die Messergebnisse der In-Prozess-Kontur- und Lagen-Offserterfassung, die in Rahmen dieser Arbeit durch laseroptische Triangulation ermittelt wurden, sind unter den untersuchten Systembedingungen noch nicht geeignet, um als Grundlage für eine automatisierte Lagen-Offset-Regelung herangezogen zu werden. Es konnte jedoch eine Optimierungsstrategie mit zahlreichen Lösungsansätzen identifiziert werden, deren Realisierung zu deutlich besseren Ergebnissen führen kann. Der Fokus weiterführender Forschungsarbeiten sollte auf der Untersuchung und Minimierung der thermischen Rauscheinflüsse, sowie der Implementierung einer Hand-Auge Kalibrierung zwischen Sensor und Schweißroboter und einer konstruktiven Verbesserung der Sensoraufhängung liegen.

10 Literaturverzeichnis

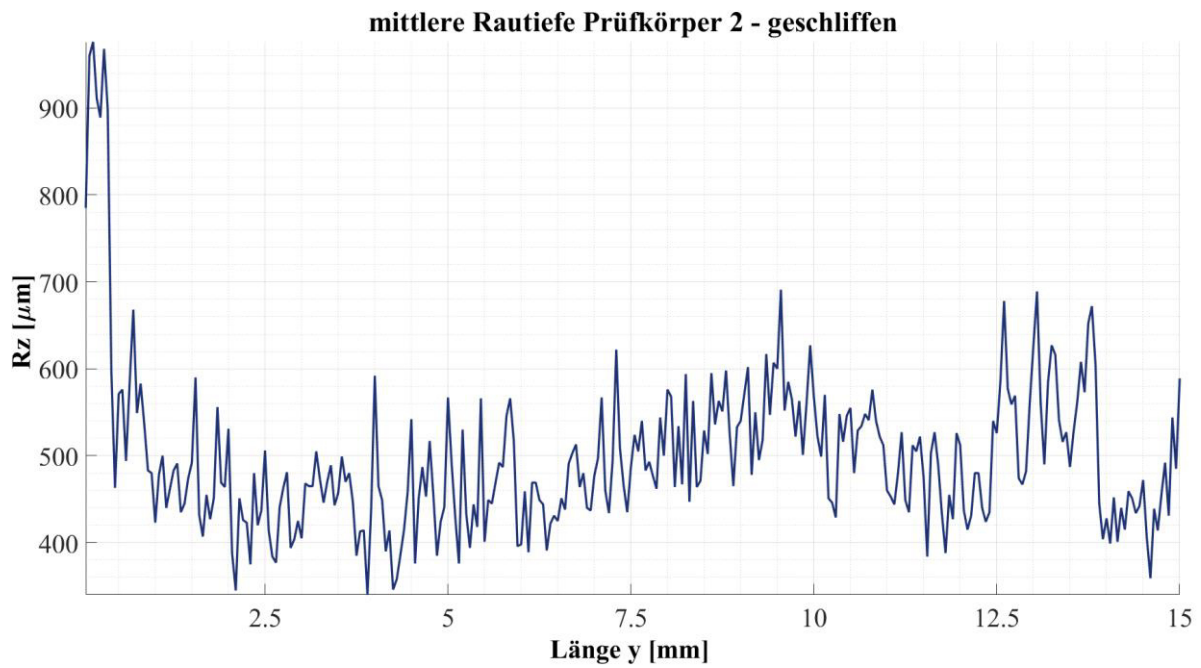
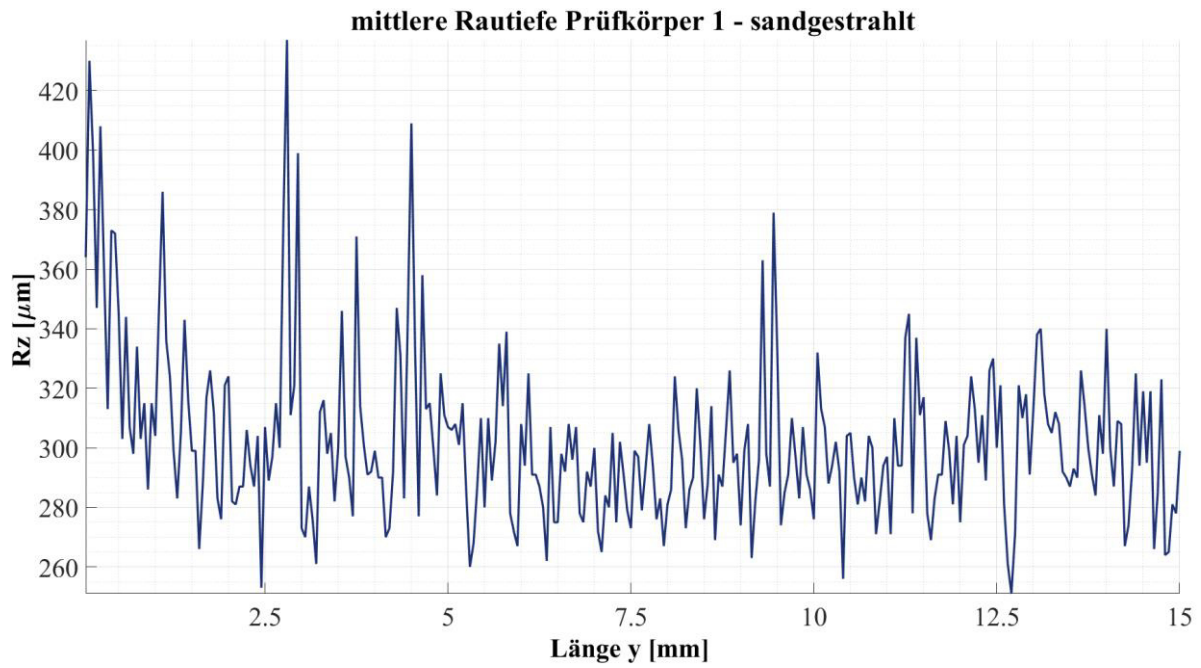
- [BiDo1993] Birch, K. P.; Downs, M. J.: An Updated Edlén Equation for the Refractive Index of Air. In metrologia, 1993, 1993; S. 155–162.
- [BMB2013] Bliedtner, J.; Müller, H.; Barz, A. Hrsg.: Lasermaterialbearbeitung. Grundlagen - Verfahren - Anwendungen - Beispiele. Hanser, München, 2013.
- [Böc2006] Böckh, P. v.: Wärmeübertragung. Grundlagen und Praxis. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2006.
- [Deu2000] Deutsches Institut für Normung: DIN 32877 Optoelektronische Abstands-, Profil- und Formmessung, 2000.
- [DIN1995] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN 1319-1 Grundlagen der Meßtechnik, 1995.
- [DIN2003] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: Fertigungsverfahren Begriffe, Einleitung. Beuth Verlag, Berlin, 2003.
- [DKE2008] DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE: Thermopaare – Teil 3: Thermoleitungen und Ausgleichsleitungen – Grenzabweichungen und Kennzeichnungssystem (IEC 60584-3:2007); Deutsche Fassung EN 60584-3:2008, 2008.
- [DKE2014] DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE: Thermoelemente - Teil 1: Thermospannungen und Grenzabweichungen, 2014.
- [Edl1966] Edlen, B.: The refractive Index of Air. In metrologia, 1966; S. 71–80.
- [FaSc2012] Fahrenwaldt, H.J.; Schuler, V. Hrsg.: Praxiswissen Schweißtechnik. Werkstoffe, Prozesse, Fertigung. Springer, Dordrecht, 2012.
- [FGK+2011] Fischer, U. et al.: Tabellenbuch Metall. Verl. Europa-Lehrmittel Nourney Vollmer, Haan-Gruiten, 2011.
- [GaTa2011] Gan, Z.; Tang, Q. Hrsg.: Visual sensing and its applications. Integration of laser sensors to industrial robots. Zhejiang Univ. Press; Springer, Hangzhou, Berlin, 2011.
- [H. 1990] H. Preston Thomas: ITS-90. The International Temperature Scale of 1990. In metrologia, 1990, 1990.
- [Har2014] Hartwig, J. S.: Automatisierte Bahnplanung für Industrieroboter und Scanneroptiken bei der Remote-Laserstrahlbearbeitung. Dissertation, München, 2014.
- [HeHe2013] Hellwege, K.-H.; Hellwege, A.M. Hrsg.: Landolt-Börnstein Zahlenwerte und Funktionen aus Physik, Chemie, Astronomie, Geophysik und Technik sechste Auflage. Eigenschaften der Materie in ihren Aggregatzuständen, 8. Teil, Optische Konstanten. Springer, Berlin, Heidelberg, 2013.

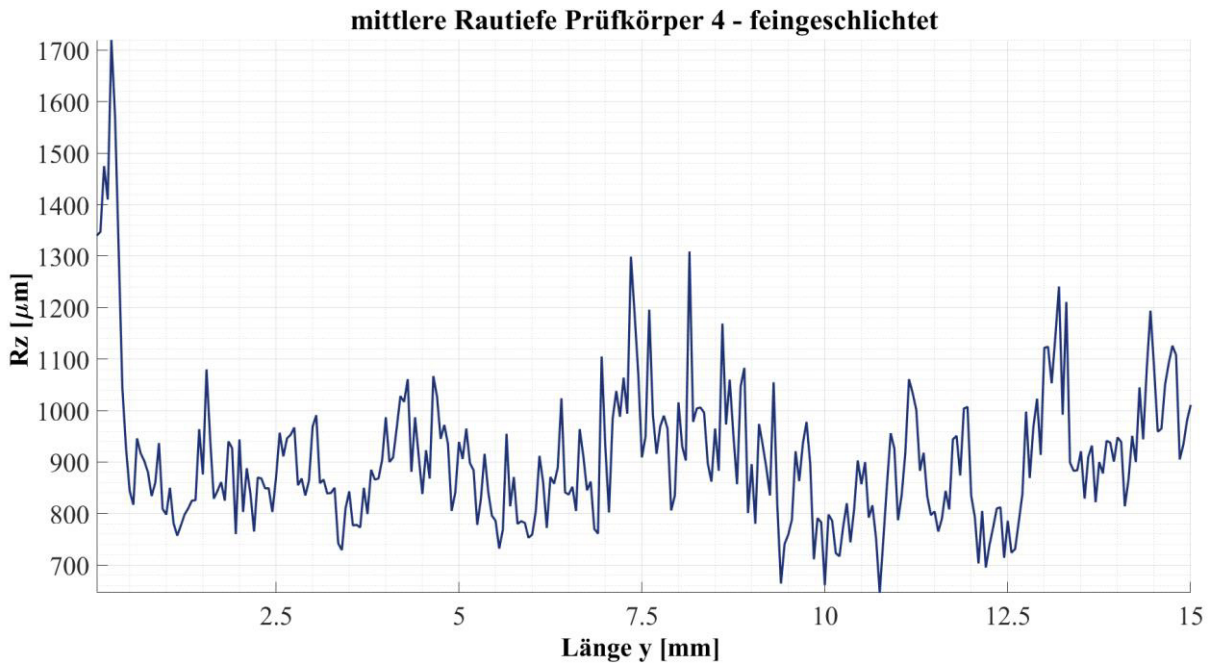
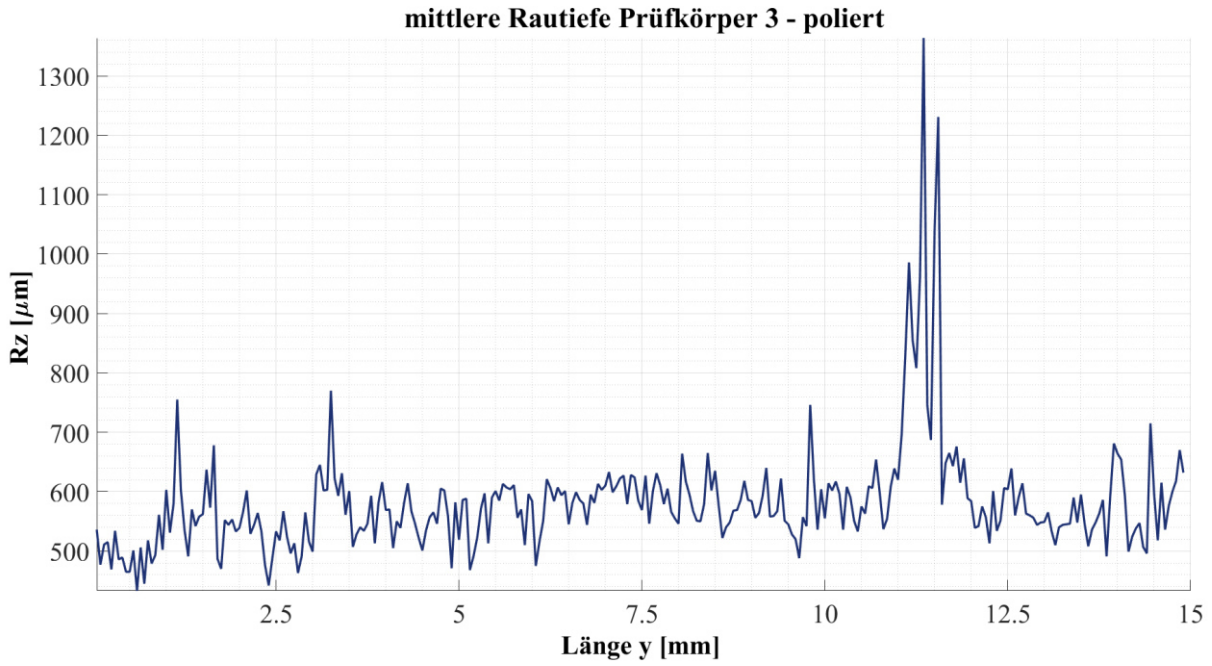
- [Hug2007] Hugenschmidt, M.: Lasermesstechnik. Diagnostik der Kurzzeitphysik. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2007.
- [JiLe1989] Ji, Z.; Leu, M. C.: Design of optical triangulation devices. In *Optics & Laser Technology*, 1989, 21; S. 339–341.
- [Kör1987] Körtvélyessy, L. v.: *Thermoelement-Praxis*. Vulkan-Verlag, Essen, 1987.
- [Kuc2011] Kuchling, H.: *Taschenbuch der Physik. Mit Tabellen*. Fachbuchverl. Leipzig im Carl Hanser Verl., München, 2011.
- [KUK2005] KUKAKUKA: Betriebsanleitung KUKA KR 60 HA, 2005.
- [Löf2012] Löffler-Mang, M.: *Optische Sensorik. Lasertechnik, Experimente, Light Barriers*. Vieweg + Teubner, Wiesbaden, 2012.
- [LüPo2010] Lüders, K.; Pohl, R.O. Hrsg.: *Pohls Einführung in die Physik. Band 2: Elektrizitätslehre und Optik*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2010.
- [MaNi2010] Marek, R.; Nitsche, K.: *Praxis der Wärmeübertragung. Grundlagen - Anwendungen - Übungsaufgaben. Mit 50 Tabellen, 50 vollständig durchgerechneten Beispielen sowie 126 Übungsaufgaben mit Lösungen*. Fachbuchverl. Leipzig im Carl Hanser Verl., München, 2010.
- [Mes2008] Meschede, D.: *Optik, Licht und Laser*. Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, Wiesbaden, 2008.
- [Mic2017] Micro-Epsilon Messtechnik GmbH & Co. Kg Micro-Epsilon Messtechnik GmbH & Co. Kg: Betriebsanleitung scanCONTROL 29xx, 2017.
- [Mic2018] Micro-Epsilon Messtechnik GmbH & Co. Kg: Glossar - Referenzauflösung. <https://www.micro-epsilon.de/service/glossar/Referenzaufloesung.html>, 19.01.2018.
- [NSL2014] Naumann, H.; Schröder, G.; Löffler-Mang, M. Hrsg.: *Handbuch Bauelemente der Optik. Grundlagen, Werkstoffe, Geräte, Messtechnik*. Hanser, s.l., 2014.
- [Owe1967] Owens, J. C.: Optical Refractive Index of Air: Dependence on Pressure, Temperature and Composition. In *Applied Optics*, 1967, 1967.
- [Par2016] Parthier, R.: *Messtechnik. Grundlagen und Anwendungen der elektrischen Messtechnik*. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2016.
- [Pop2005] Poprawe, R.: *Lasertechnik für die Fertigung. Grundlagen, Perspektiven und Beispiele für den innovativen Ingenieur ; mit 26 Tabellen*. Springer, Berlin, 2005.
- [Rad1988] Radaj, D.: *Wärmewirkungen des Schweißens. Temperaturfeld, Eigenspannungen, Verzug*. Springer, Berlin u.a., 1988.
- [Sch2017] Scholl, C.: *Simulationsgestützte Analyse der thermisch induzierten Eigenspannungssituation an einer laserauftragungsgeschweißten Struktur aus einer Titanlegierung*. Bachelorarbeit, 2017.

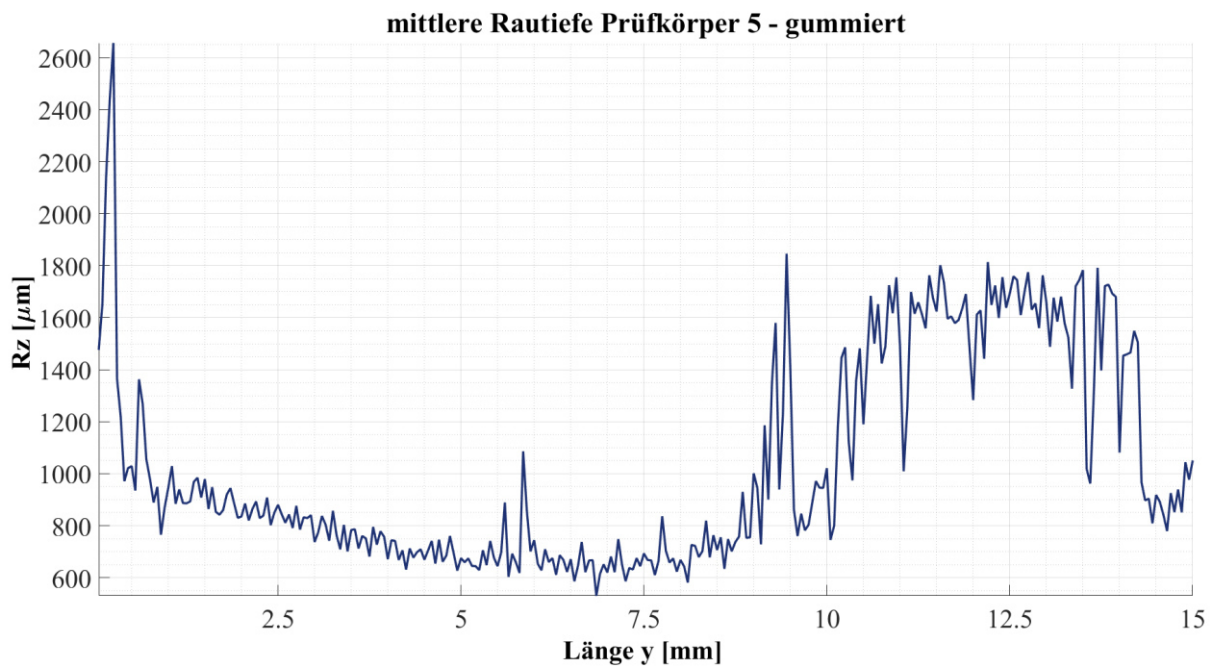
- [Spe1999] Spektrum der Wissenschaft: Lexikon der Optik. Sättigung.
<http://www.spektrum.de/lexikon/optik/saettigung/2928>, 18.12.2017.
- [STB2008] Saleh, B. E. A.; Teich, M. C.; Bär, M.: Grundlagen der Photonik. Wiley-VCH, Weinheim, 2008.
- [Str2015] Strübing, T.: Kalibrierung und Auswertung von lasertriangulationsbasierten Multisensorsystemen am Beispiel des Gleisvermessungssystems RACER II. Dissertation, München, 2015.
- [VDI2013] VDI - Verein Deutscher Ingenieure Hrsg.: VDI-Wärmeatlas. Mit 320 Tabellen. Springer Vieweg, Berlin, 2013.
- [Wai1992] Waidelich, W. Hrsg.: Laser in der Technik / Laser in Engineering. Vorträge des 10. Internationalen Kongresses / Proceedings of the 10th International Congress: Laser 91. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 1992.
- [Web2017] Weber, W.: Industrieroboter. Methoden der Steuerung und Regelung. Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, München, 2017.
- [Wio2001] Wiora, G.: Optische 3D-Messtechnik: Präzise Gestalt-Vermessung mit einem erweiterten Streifenprojektionsverfahren. Dissertation, Heidelberg, 2001.
- [Wol2016] Wolff, M.: Sensor-Technologien. Band 1: Position, Entfernung, Verschiebung, Schichtdicke. De Gruyter Oldenbourg, Berlin, 2016.

A. Anhang

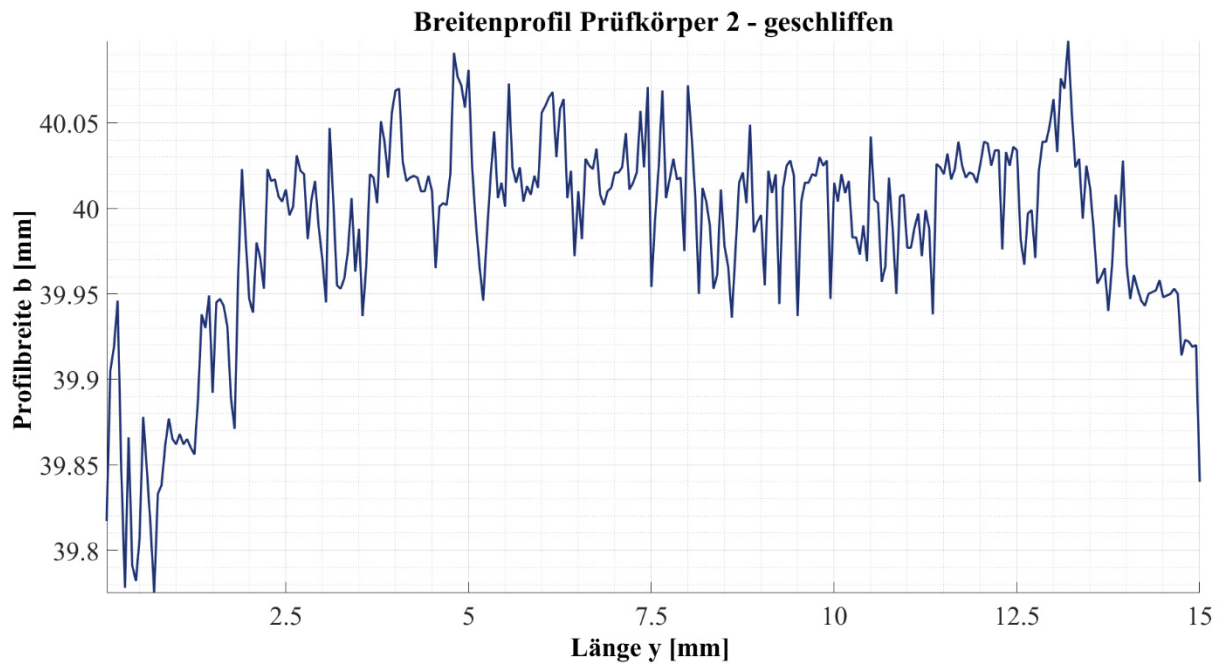
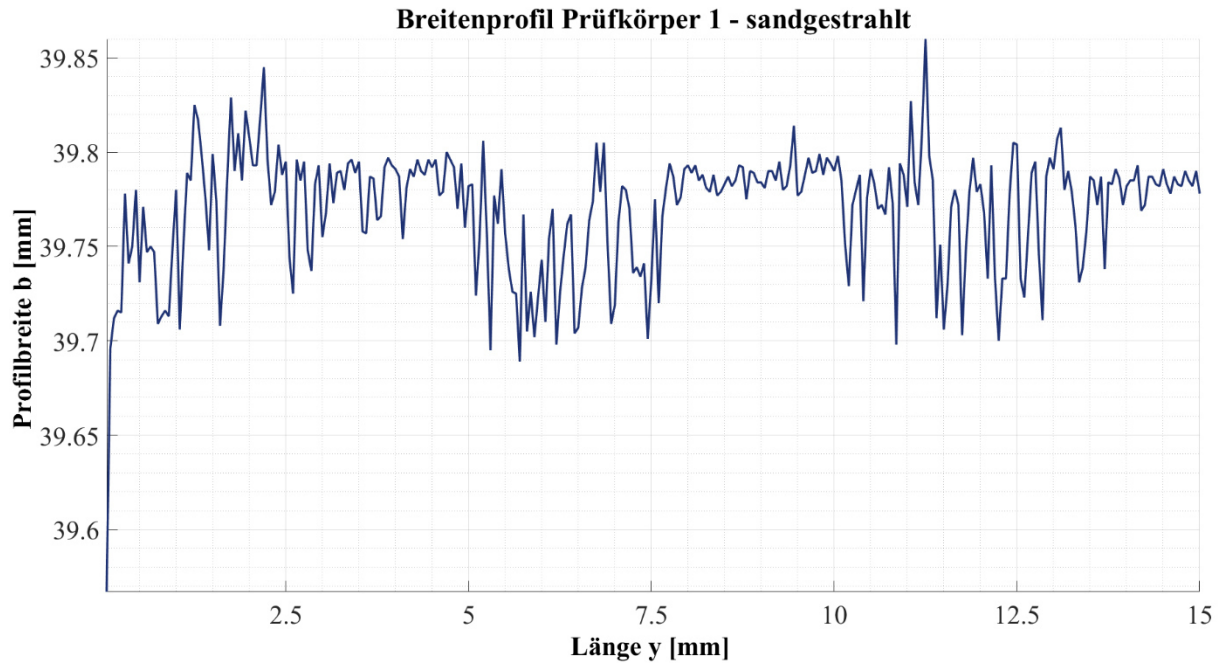
A.1 Grafische Darstellung der Rautiefemessungen

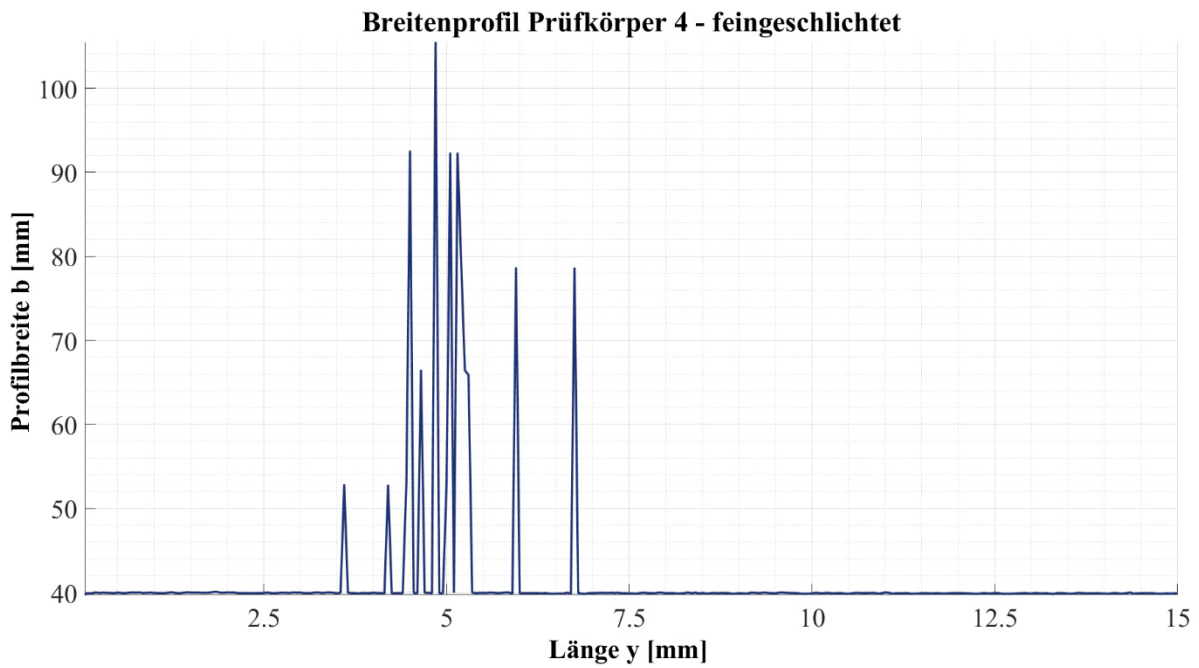
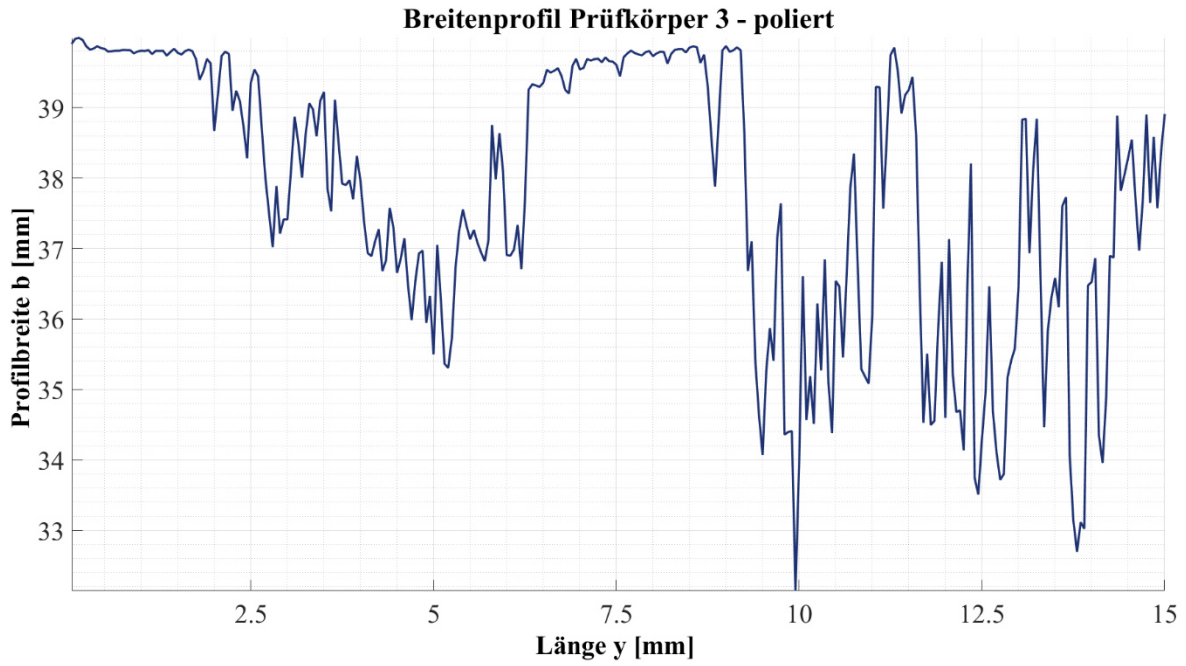




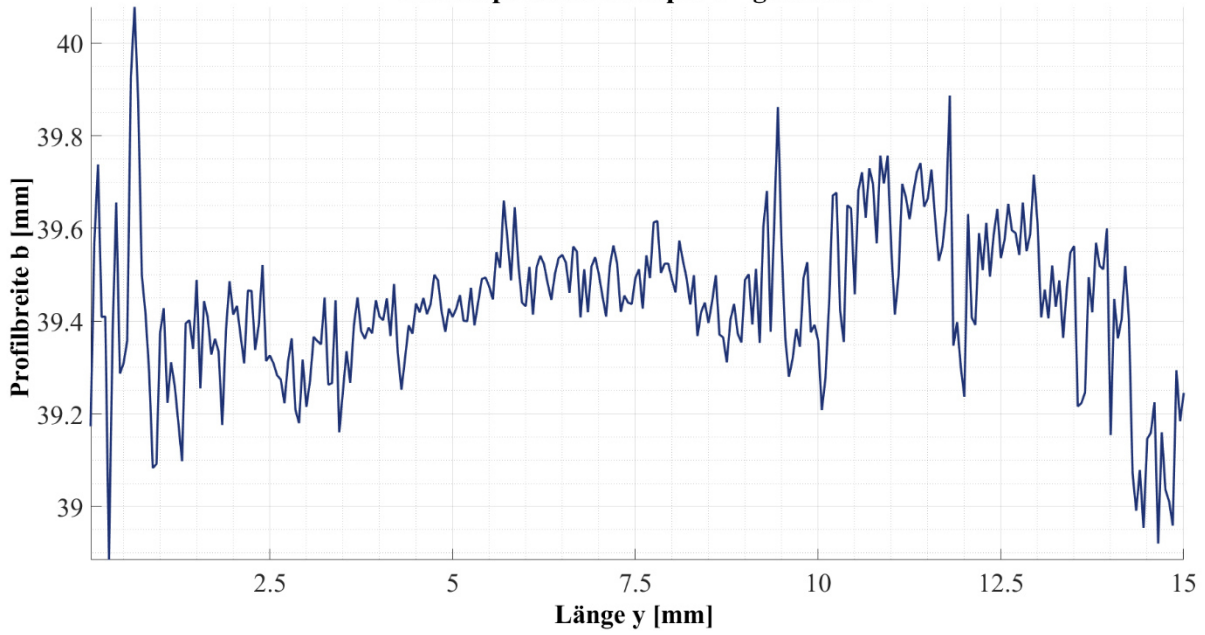


A.2 Grafische Darstellung der Profilbreitenmessung

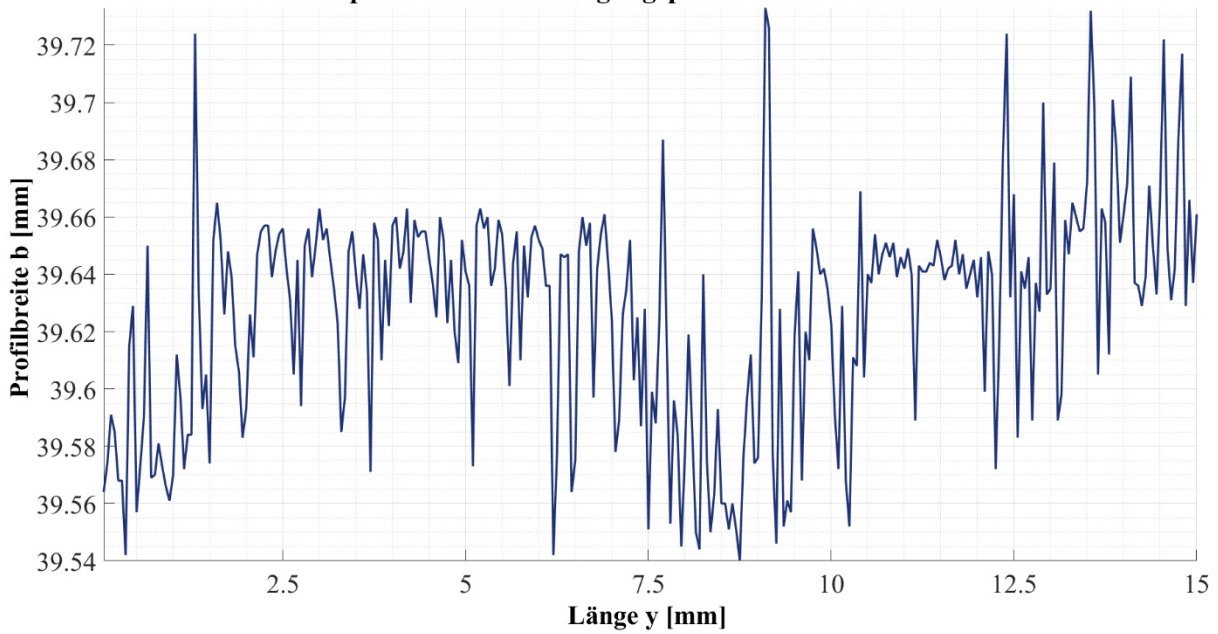


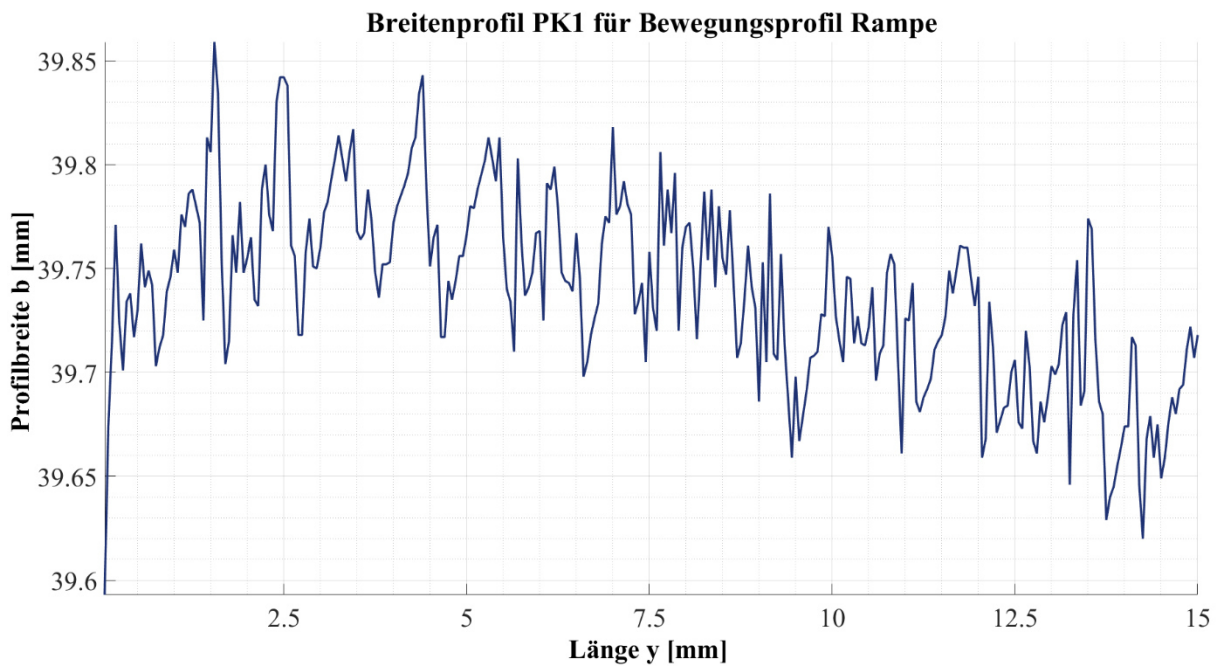
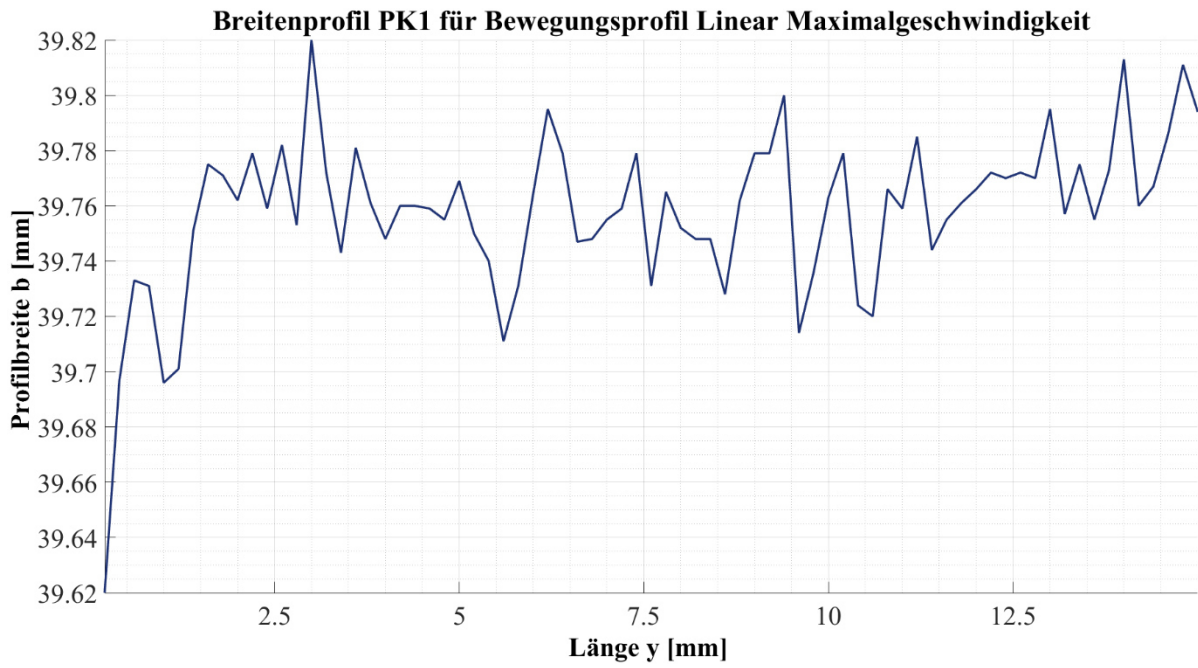


Breitenprofil Prüfkörper 5 - gummiert

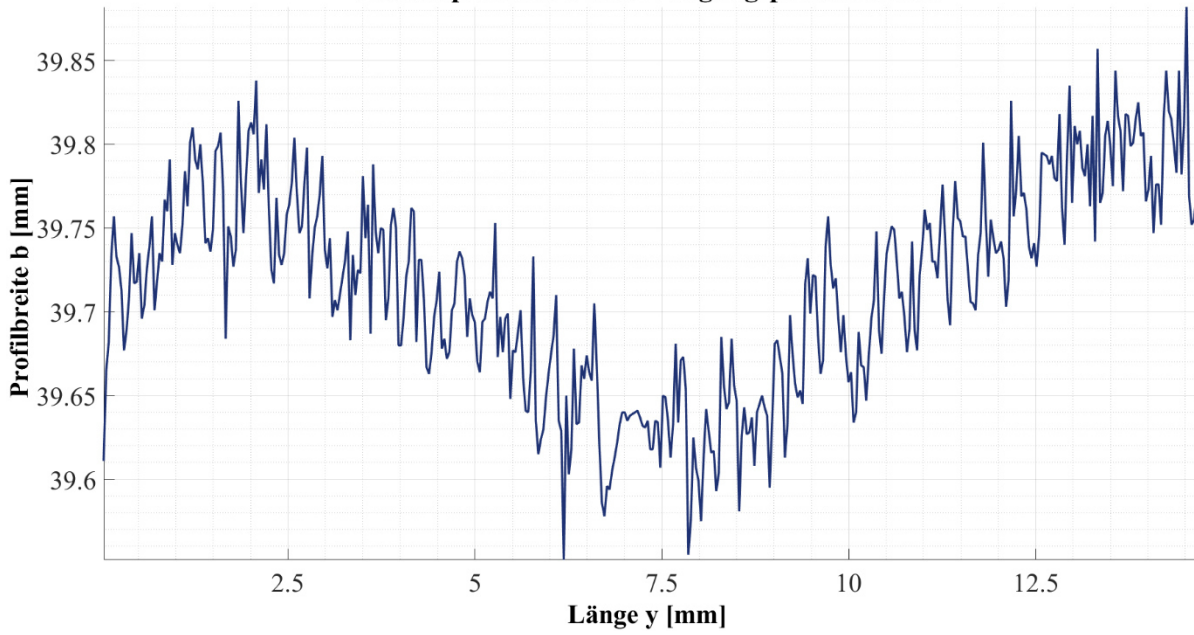


Breitenprofil PK1 für Bewegungsprofil Linear Messbereichende

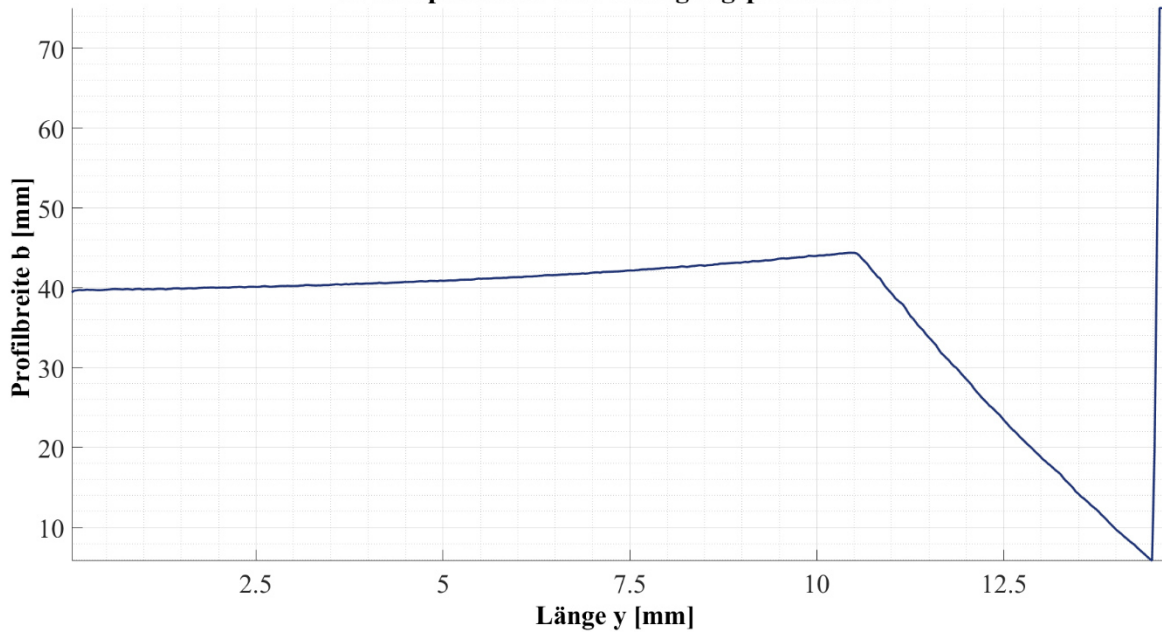




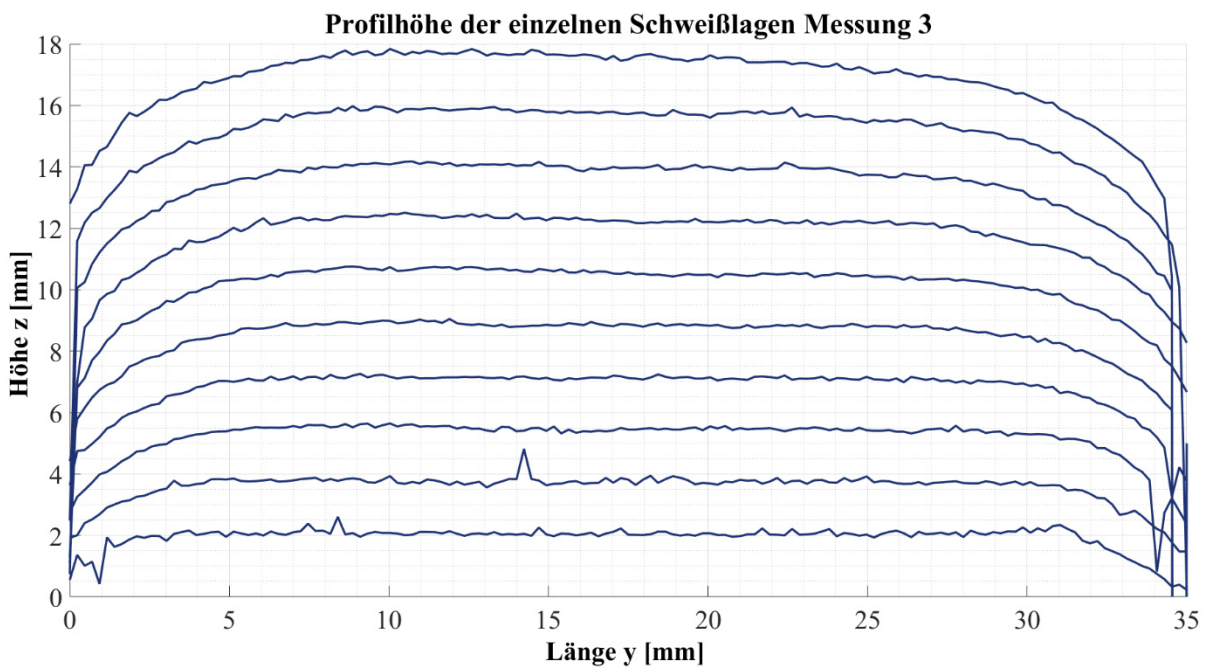
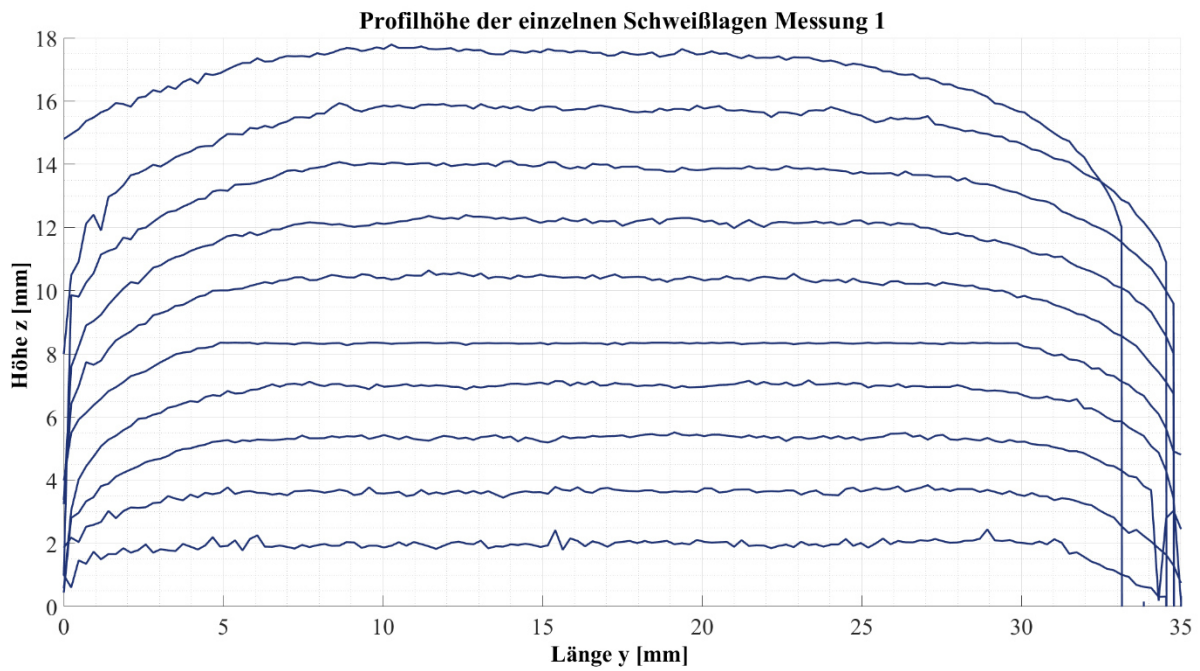
Breitenprofil PK1 für Bewegungsprofil Dreieck



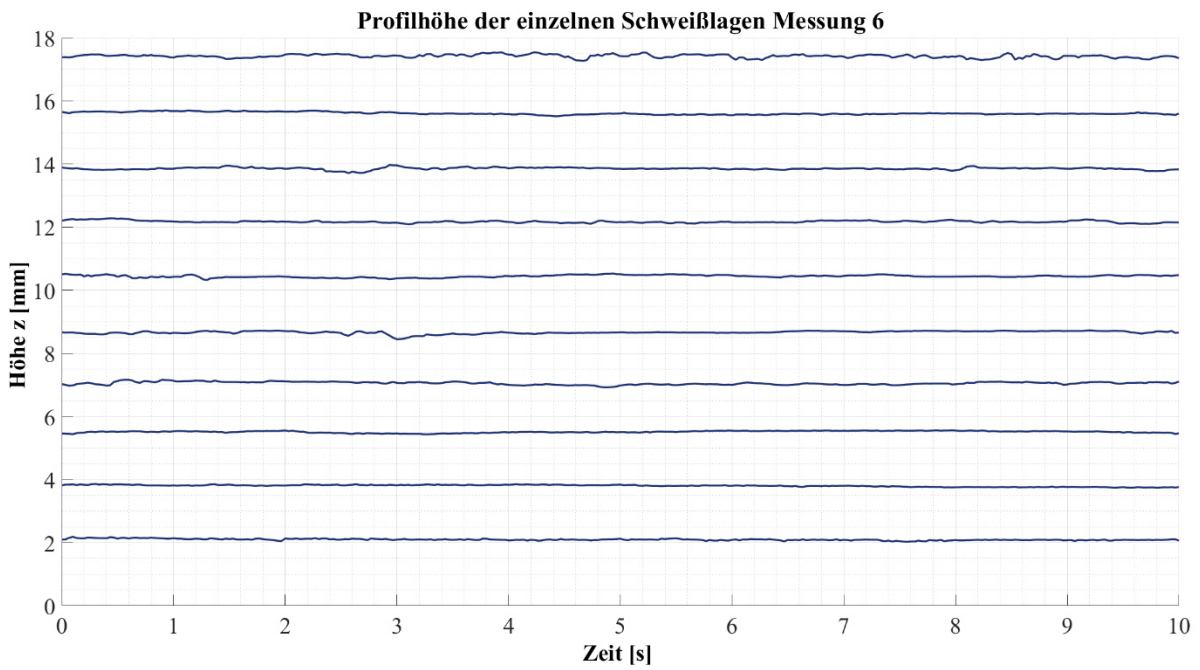
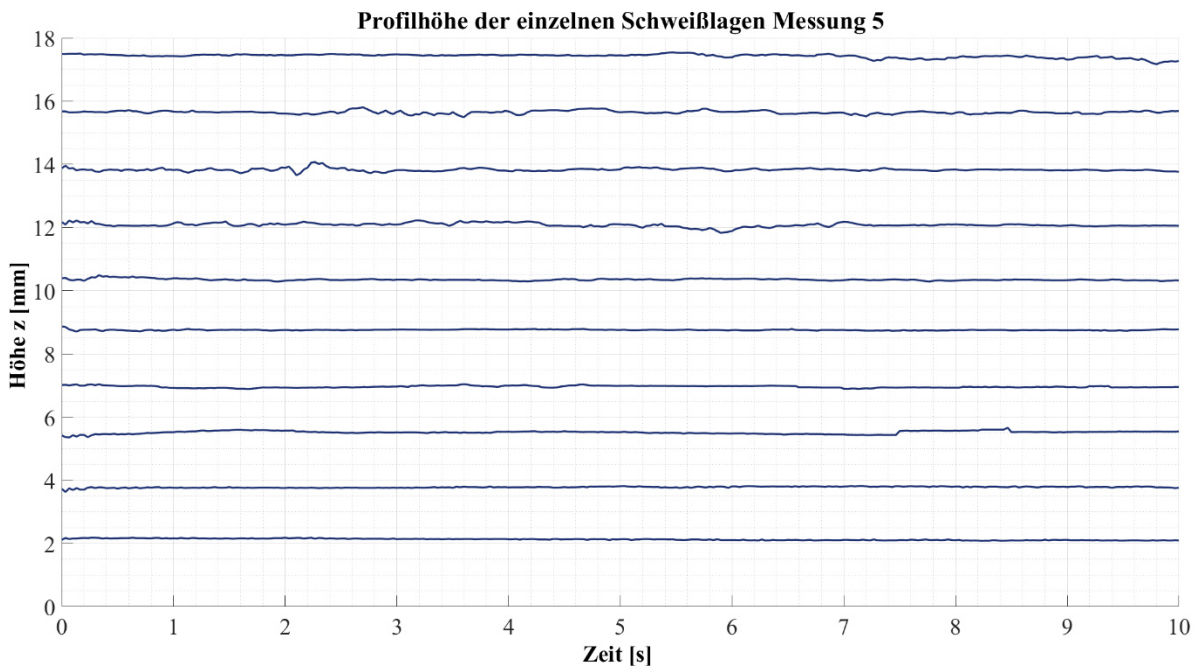
Breitenprofil PK1 für Bewegungsprofil Kurve



A.3 Grafische Darstellung der In-Prozess-Konturerfassung Messung 1 und 3



A.4 Grafische Darstellung der Lagen-Offseterfassung Messung 5 und 6



A.5 Berechnungsgrundlage für die Auswertung der In-Prozess-Konturerfassung

Länge y [mm]	Messabweichungen der In-Prozess Konturerfassung im Vergleich zur Messung bei Raumtemperatur											
	Messung 1				Messung 2				Messung 3			
	Höhe z In-Prozess [mm]	Höhe z Raumtemp. [mm]	Messabweichung [mm]	Höhe z In-Prozess [mm]	Höhe z Raumtemp. [mm]	Messabweichung [mm]	Höhe z In-Prozess [mm]	Höhe z Raumtemp. [mm]	Messabweichung [mm]	Höhe z In-Prozess [mm]	Höhe z Raumtemp. [mm]	Messabweichung [mm]
1	15,480	15,673	-0,19333	13,620	15,637	-2,01667	14,520	15,648	-1,12833			
2	15,905	15,885	0,02000	15,335	16,133	-0,79833	15,650	16,448	-0,79833			
3	16,345	16,302	0,04333	15,860	16,402	-0,54167	16,175	16,658	-0,48333			
4	16,600	16,607	-0,00667	16,120	16,790	-0,67000	16,545	16,948	-0,40333			
5	16,825	16,880	-0,05500	16,620	17,053	-0,43333	16,865	17,223	-0,35833			
6	17,205	17,147	0,05833	16,985	17,253	-0,26833	17,160	17,608	-0,44833			
7	17,260	17,368	-0,10833	17,095	17,447	-0,35167	17,370	17,748	-0,37833			
8	17,400	17,465	-0,06500	17,440	17,637	-0,19667	17,610	17,885	-0,27500			
9	17,620	17,532	0,08833	17,515	17,782	-0,26667	17,725	17,898	-0,17333			
10	17,630	17,633	-0,00333	17,615	17,808	-0,19333	17,835	17,963	-0,12833			
11	17,680	17,590	0,09000	17,790	17,782	0,00833	17,695	17,925	-0,23000			
12	17,655	17,570	0,08500	17,610	17,745	-0,13500	17,695	18,065	-0,37000			
13	17,580	17,635	-0,05500	17,760	17,728	0,03167	17,620	17,832	-0,21167			
14	17,510	17,507	0,00333	17,690	17,690	0,00000	17,665	17,832	-0,16667			
15	17,565	17,555	0,01000	17,670	17,628	0,04167	17,650	17,693	-0,04333			
16	17,645	17,482	0,16333	17,670	17,703	-0,03333	17,655	17,720	-0,06500			
17	17,585	17,552	0,03333	17,645	17,553	0,09167	17,610	17,715	-0,10500			
18	17,440	17,502	-0,06167	17,585	17,472	0,11333	17,645	17,685	-0,04000			
19	17,465	17,410	0,05500	17,535	17,428	0,10667	17,500	17,647	-0,14667			
20	17,450	17,463	-0,01333	17,510	17,497	0,01333	17,630	17,662	-0,03167			
21	17,475	17,387	0,08833	17,515	17,488	0,02667	17,540	17,500	0,04000			
22	17,425	17,360	0,06500	17,495	17,415	0,08000	17,415	17,525	-0,11000			
23	17,365	17,348	0,01667	17,395	17,368	0,02667	17,375	17,612	-0,23667			
24	17,305	17,312	-0,00667	17,415	17,365	0,05000	17,360	17,470	-0,11000			
25	17,260	17,212	0,04833	17,375	17,315	0,06000	17,150	17,403	-0,25333			
26	17,185	17,168	0,01667	17,135	17,193	-0,05833	17,180	17,208	-0,02833			
27	16,945	17,057	-0,11167	17,085	17,070	0,01500	16,925	17,393	-0,46833			
28	16,850	16,890	-0,04000	16,840	16,908	-0,06833	16,795	17,095	-0,30000			
29	16,535	16,777	-0,24167	16,680	16,757	-0,07667	16,625	16,902	-0,27667			
30	16,345	16,420	-0,07500	16,355	16,462	-0,10667	16,290	16,655	-0,36500			
31	15,895	16,178	-0,28333	16,125	16,133	-0,00833	15,870	16,197	-0,32667			
32	15,455	15,692	-0,23667	15,470	15,643	-0,17333	15,380	15,843	-0,46333			
33	14,825	15,235	-0,41000	14,850	14,950	-0,10000	14,725	15,195	-0,47000			
34	13,845	14,407	-0,56167	13,960	14,182	-0,22167	13,360	14,145	-0,78500			
35	12,025	13,320	-1,29500	12,910	12,567	0,34333	12,970	12,657	0,31333			

A.6 Tabellen und Konstanten**Tabelle A-1: experimentell bestimmte Werte des Brechungsindex n bei der Wellenlänge λ für trockene Luft bei 15°C und 1013 hPa Luftdruck - Auszug und modifiziert nach [HeHe2013]**

λ [nm]	n
703	1,00027575
644	1,00027634
588	1,00027711
546	1,00027786
508	1,00027870
480	1,00027948
468	1,00027986
447	1,00028057
436	1,00028102

Tabelle A-2: Längenausdehnungskoeffizient ausgewählter Metalle - Auszug aus [Kuc2011]

Material	$\alpha \left[\frac{10^{-6}}{K} \right]$
Aluminium	23,8
Chrom Nickel Stahl	12,0
Titan	8,35

A.7 Versuchsauswertung nach DIN 1319-1

Im Folgenden sind Auszüge aus der DIN 1319-1 abgebildet, die als Grundlage für die Versuchsauswertungen in der vorliegenden Arbeit verwendet wurden.

Nr.	Benennung	Definition und Anmerkung
1.1	Messgröße	Physikalische Größe, der die Messung gilt
1.2	Messobjekt	Träger der Messgröße
1.3	Wahrer Wert	Wert der Messgröße als Ziel der Auswertung von Messungen der Messgröße
2.1	Messung	Ausführen von geplanten Tätigkeiten zum quantitativen Vergleich der Messgröße mit einer Einheit
2.5	Einflussgröße	Größe, die nicht Gegenstand der Messung ist, jedoch die Messgröße oder die Ausgabe beeinflusst.
2.6	Wiederholbedingung	Bedingungen unter denen wiederholt einzelne Messwerte für dieselbe spezielle Messgröße unabhängig voneinander so gewonnen werden, dass die systematische Messabweichung für jeden Messwert die gleiche bleibt
2.8	Erweiterte Vergleichsbedingung	Bedingungen unter denen eine Gesamtheit unabhängiger Messergebnisse für dieselbe spezielle Messgröße so gewonnen wird, dass durch Vergleich Unterschiede der systematischen Messabweichungen erkennbar werden.
3.2	Messwert	Wert, der einer Messgröße gehört und der Ausgabe eines Messgerätes oder einer Messeinrichtung eindeutig zugeordnet ist Der Messwert x setzt sich zusammen aus: x_w : Wahrer Wert e_r : zufällige Messabweichung e_s : Systematische Messabweichung $x = x_w + e_r + e_s$
3.4	Messergebnis	Aus Messungen gewonnener Schätzwert für den wahren Wert einer Messgröße. Das Schätzen des wahren Wertes erfolgt durch die Anwendung statistischer Schätzmethoden. Liegen n unter Wiederholbedingungen gewonnene Messwerte $x_i (i = 1, \dots, n)$ vor und wird mit diesen Messwerten das arithmetische Mittel $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$

		<p>Gebildet, so ist dieses Mittel das unberichtigte Messergebnis. Das Messergebnis ist:</p> $\bar{x}_E = \bar{x} - e_s$
3.5	Messabweichung	Abweichung eines aus Messung gewonnenen und der Messgröße zugeordneten Wertes vom wahren Wert
3.6	Messunsicherheit	Kennwert der aus Messungen gewonnen wird und zusammen mit dem Messergebnis zur Kennzeichnung eines Wertebereiches für den wahren Wert der Messgröße dient (u)
3.8	Wiederhol Standardabweichung	Standardabweichung vom Messwert unter Wiederholbedingungen. $s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$
3.10	Vollständiges Messergebnis	<p>Messergebnis mit quantitativen Angaben zur Genauigkeit</p> $x = \bar{x}_E \mp u$

A.8 Datenblatt Thermoelemente Typ K

Technische Daten:

Thermoelemente NiCr/Ni, Typ K
Gemäß DIN/IEC 584



Grundwerte von -200 °C bis 1350 °C in 10 °C Schritten, Angaben in mV

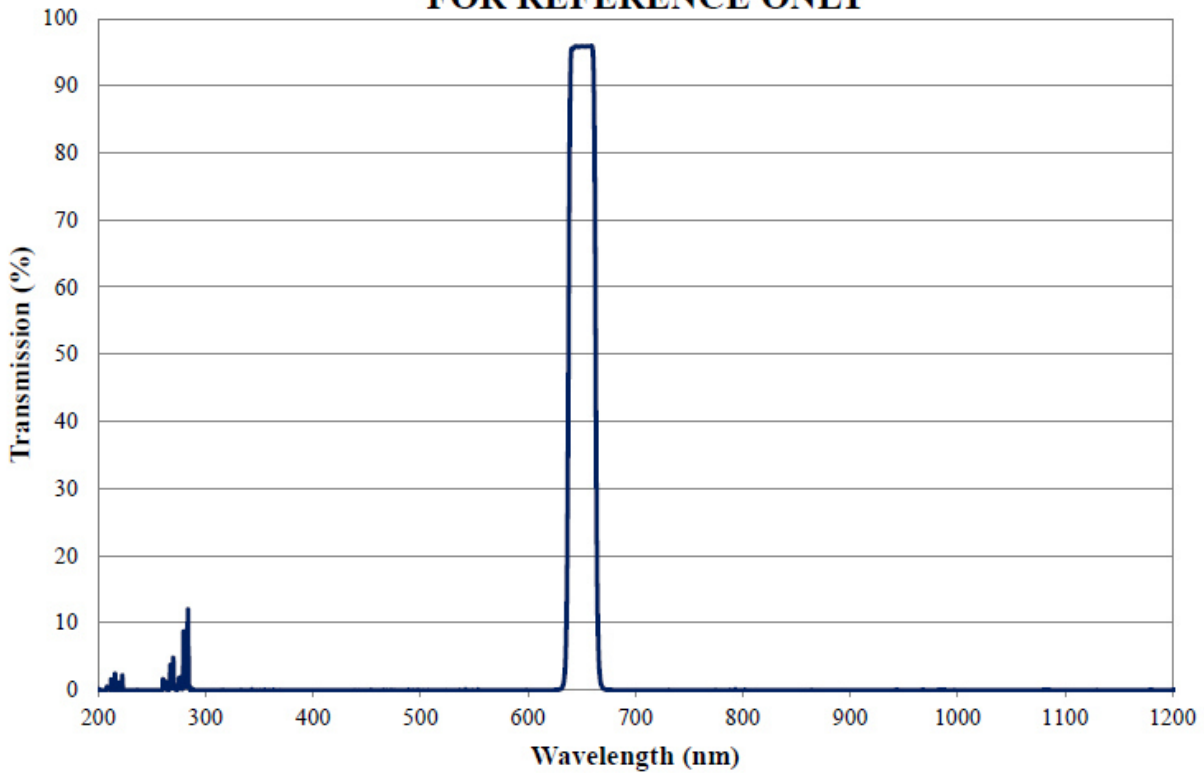
°C	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
-200	-5,891									
-100	-3,553									
0	0	0,397	0,798	1,203	1,611	2,022	2,436	2,850	3,266	3,681
100	4,095	4,508	4,919	5,327	5,733	6,137	6,539	6,939	7,338	7,737
200	8,137	8,537	8,938	9,341	9,745	10,151	10,560	10,969	11,381	11,793
300	12,207	12,623	13,039	13,456	13,874	14,292	14,712	15,132	15,552	15,974
400	16,395	16,818	17,241	17,664	18,088	18,513	18,938	19,363	19,788	20,214
500	20,640	21,066	21,493	21,919	22,346	22,772	23,198	23,624	24,050	24,476
600	24,902	25,327	25,751	26,176	26,599	27,022	27,445	27,867	28,288	28,709
700	29,128	29,547	29,965	30,383	30,799	31,214	31,629	32,042	32,455	32,866
800	33,277	33,686	34,095	34,502	34,909	35,314	35,718	36,121	36,524	36,925
900	37,325	37,724	38,122	38,519	38,915	39,310	39,703	40,096	40,488	40,879
1000	41,269	41,657	42,045	42,432	42,817	43,202	43,585	43,968	44,349	44,729
1100	45,108	45,486	45,863	46,238	46,612	46,985	47,356	47,726	48,095	48,462
1200	48,828	49,192	49,555	49,916	50,276	50,633	50,990	51,344	51,697	52,049
1300	52,398	52,747	53,093	53,439	53,782	54,125	54,466	54,807		

Toleranzen für Thermoelemente NiCr/Ni, Typ K, gemäß DIN/IEC 584

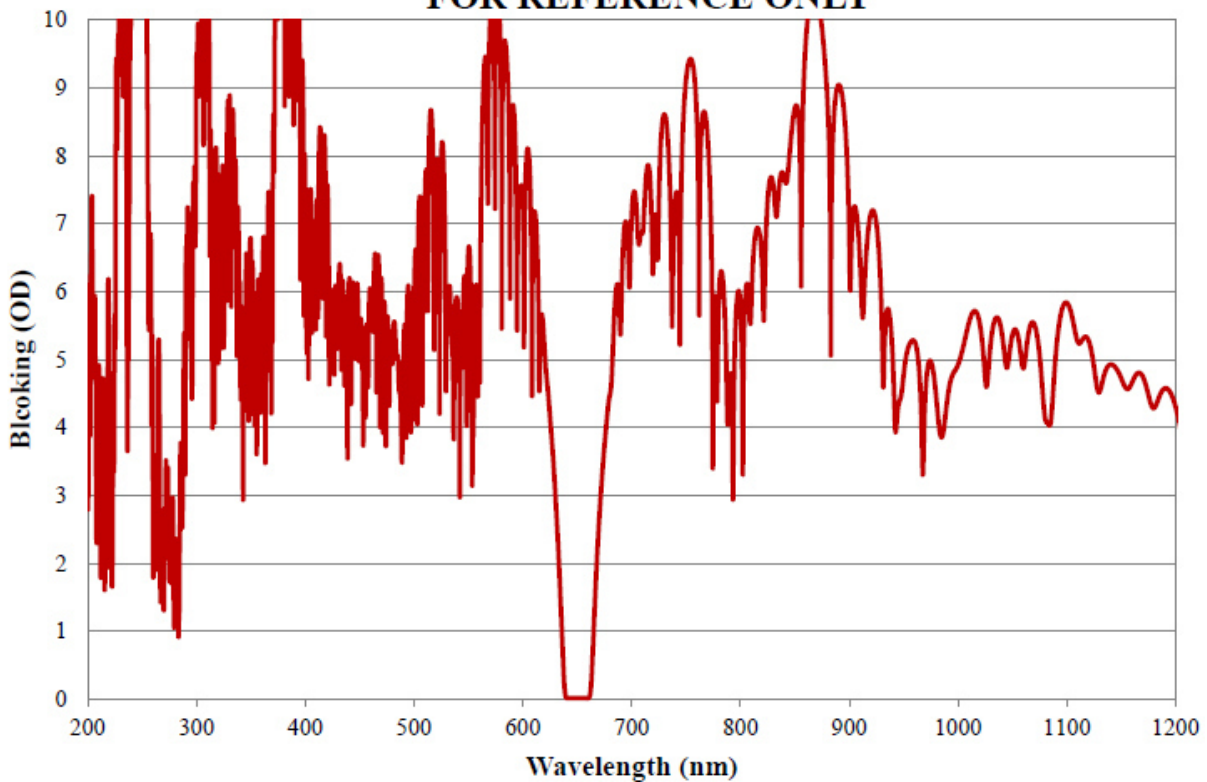
Element-Typ	Temperaturbereich	Toleranz
Klasse 1		
NiCr/Ni, Typ K	-40 °C bis 1000 °C	± 1,5 °C oder ± 0,004 · t
Klasse 2		
NiCr/Ni, Typ K	-40 °C bis 1200 °C	± 2,5 °C oder ± 0,0075 · t
Klasse 3		
NiCr/Ni, Typ K	-200 °C bis 40 °C	± 2,5 °C oder ± 0,015 · t

A.9 Transmissionsprofil eines Bandpassfilters

**650nm Hard Coated Bandpass Interference Filter: 25nm FWHM
OD >4.0 Coating Performance
FOR REFERENCE ONLY**



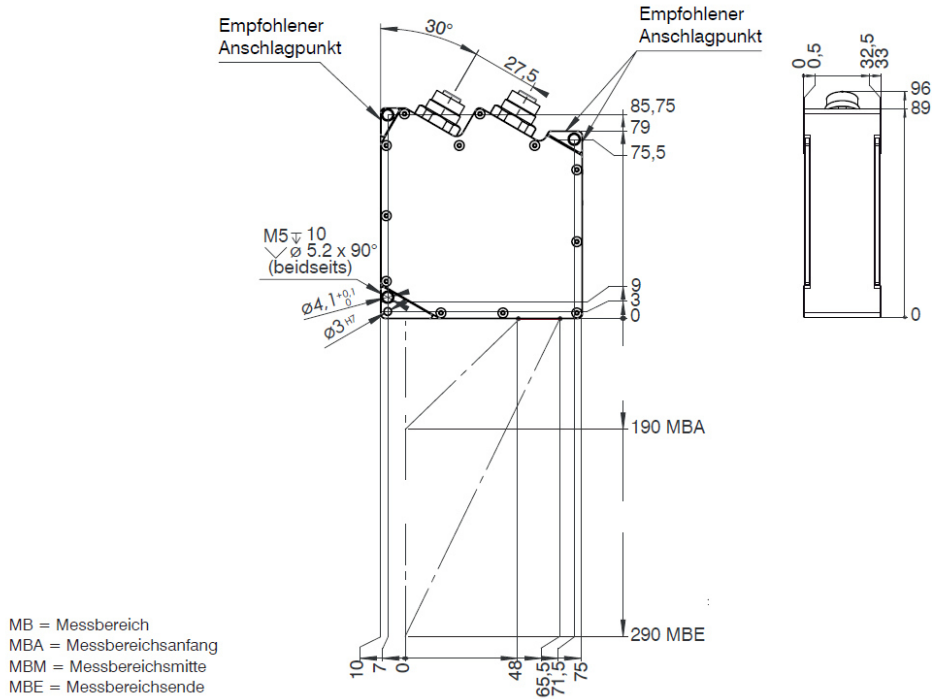
**650nm Hard Coated Bandpass Interference Filter
OD >4.0 Coating Performance
FOR REFERENCE ONLY**



A.10 Auszüge aus dem Datenblatt des Triangulationssensors

3.2 Technische Daten

Typ	scanCONTROL		
	29xx-25	29xx-50	29xx-100
Messbereich Z-Achse	25 mm	50 mm	100 mm
Messbereichsanfang	53,5 mm	70 mm	190 mm
Messbereichsende	78,5 mm	120 mm	290 mm
Messbereichsanfang, erweitert, ca.	53 mm	65 mm	125 mm
Messbereichsende, erweitert, ca.	79 mm	125 mm	390 mm
Linienlänge MBM (X-Achse)	25 mm	50 mm	100 mm
Linearität ¹	± 0,16 % d.M. (3 σ)		
Auflösung X-Achse	1280 Punkte/Profil		
Profilfrequenz (abhängig vom Sensortyp)	200 - 2000 Hz		
Lichtquelle Laser	Halbleiterlaser ca. 658 nm, 20 °... 25 ° Öffnungswinkel, Laserklasse 2M: Leistung 8 mW, reduziert 2 mW Halbleiterlaser ca. 658 nm, 20 °... 25 ° Öffnungswinkel, Laserklasse 3B: Leistung 20 mW, reduziert 8 mW		
Schutzgrad (DIN EN 60529)	IP 65		
Betriebstemperatur	0 °C bis +45 °C		
Lagertemperatur	-20 °C bis 70 °C		
Ausgänge/Eingänge	Ethernet, Laser on/off (optional), 1x RS422 programmierbar (halbduplex), 3 Schalteingänge programmierbar HTL/TTL, alle Ein-/Ausgänge galvanisch getrennt		
Anzeigen	1x state / 1x laser on		

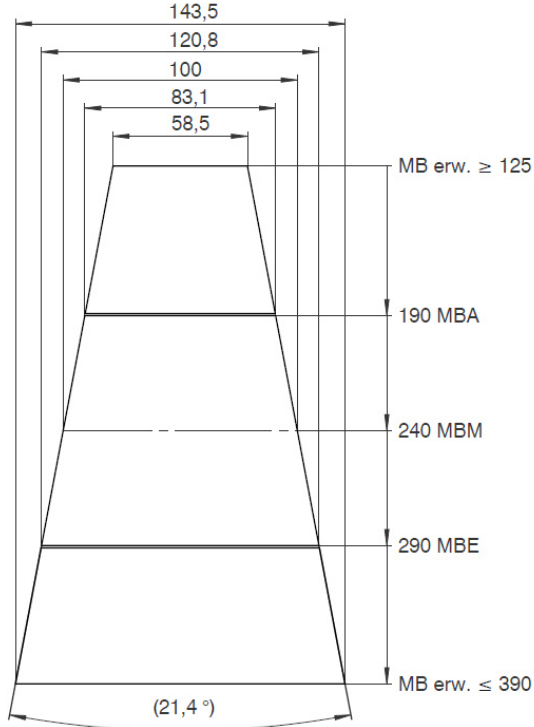


MB = Messbereich
 MBA = Messbereichsanfang
 MBM = Messbereichsmittle
 MBE = Messbereichsende

Abb. 4 Maßzeichnung Sensor scanCONTROL 29xx-100, Maße in mm, nicht maßstabsgetreu

scanCONTROL 29xx

Seite 23



MB = Messbereich
 MBA = Messbereichsanfang
 MBM = Messbereichsmittle
 MBE = Messbereichsende

Abb. 5 Messfeld Sensor scanCONTROL 29xx-100, Maße in mm, nicht maßstabsgetreu

scanCONTROL 29xx

Seite 24

A.11 Datenträger

Angeheftet an die Arbeit befindet sich ein Datenträger, auf dem zur transparenten Darstellung der Arbeitsweise eine Auswahl verwendeter Tabellen, Messprotokolle und Messdateien zu finden ist. Zusätzlich befinden sich auf dem Datenträger die verwendete Literatur sowie sämtliche Abbildungen der Arbeit in digitalem Format.



Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit

Gemäß der Allgemeinen Prüfungs- und Studienordnung ist zusammen mit der Abschlussarbeit eine schriftliche Erklärung abzugeben, in der der Studierende bestätigt, dass die Abschlussarbeit „– bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit [(§ 18 Abs. 1 APSO-TI-BM bzw. § 21 Abs. 1 APSO-INGI)] – ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt wurden. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich zu machen.“

Quelle: § 16 Abs. 5 APSO-TI-BM bzw. § 15 Abs. 6 APSO-INGI

Dieses Blatt, mit der folgenden Erklärung, ist nach Fertigstellung der Abschlussarbeit durch den Studierenden auszufüllen und jeweils mit Originalunterschrift als letztes Blatt in das Prüfungsexemplar der Abschlussarbeit einzubinden.

Eine unrichtig abgegebene Erklärung kann -auch nachträglich- zur Ungültigkeit des Studienabschlusses führen.

Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung der Arbeit

Hiermit versichere ich,

Name: Wenzl

Vorname: Jan-Philip

dass ich die vorliegende Bachelorarbeit bzw. bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit – mit dem Thema:

Prozesseinflüsse auf optische Triangulationssensoren beim Laserauftragschweißen

ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

- die folgende Aussage ist bei Gruppenarbeiten auszufüllen und entfällt bei Einzelarbeiten -

Die Kennzeichnung der von mir erstellten und verantworteten Teile der -bitte auswählen- ist erfolgt durch:

Hamburg

Ort

29.01.2018

Datum

Unterschrift im Original