

Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen
und Umformtechnik IWU, Chemnitz
Abteilung Automatisierung und Monitoring

Schmiedeprozess 4.0
Studie zur Vermessung heißer Schmiederohteile

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,
gefördert unter dem Az: 34020/01 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Dipl.-Ing. Matthias Weiser

Chemnitz, Februar 2019

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	34020/01	Referat	22	Fördersumme	62.485 €
----	-----------------	---------	-----------	-------------	-----------------

Antragstitel **Schmiedeprozess 4.0 – Studie zur Vermessung heißer Schmiedeteile**

Stichworte glühende Schmiedeteile, 3D-Vermessung

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
12 Monate	16.10.2017	16.10.2018	1

Zwischenberichte Kurzbericht zum
Projektfortschritt vom
04.05.2018

Bewilligungsempfänger	Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU Reichenhainer Straße 88 09126 Chemnitz	Tel. 0371 5397-1444 Fax. 0371 5397-61444
		Projektleitung Dipl.-Ing. Matthias Weiser
		Bearbeiter Dipl.-Ing. Matthias Weiser

Kooperationspartner

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

Die Branche der Massivumformung ist ein sehr energieintensiver Industriezweig. Sie ist deshalb permanent gefordert Potenziale zur Energieeinsparung aufzuzeigen. Im Prozess werden heiße Schmiederohteile erst im kalten Zustand nach einer Abkühlphase überprüft. Fehlerhafte Teile werden somit erst erkannt, nachdem bereits eine Vielzahl weiterer Teile produziert wurde. Das Hauptziel des Projektes ist es, Möglichkeiten für eine messtechnische Bewertung des heißen Schmiedeteils hinsichtlich der Erkennung von Form- und Maßabweichungen aufzuzeigen. Neben Kostenreduzierung führt dies auch zu Ressourcen- und Materialeinsparung und damit zur Verminderung von Umweltbelastungen.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Zunächst wurde eine Bestandsaufnahme der Umgebungsbedingungen in der Schmiede durchgeführt, um die speziellen Anforderungen an eine inline-Vermessung von glühenden Schmiederohteilen direkt in Prozess festzulegen. Weiterhin wurden Aspekte wie, die erforderliche 3D-Genauigkeit, Taktzeiten und Handling betrachtet. Um den Stand der Technik zur Vermessung glühender Guss- und Schmiederohteile zu erfassen wurde eine umfangreiche Recherche unter besonderer Beachtung von verfügbarer Sensorik durchgeführt. Es zeigte sich, dass Laser-Scanner mit blauem Laserlicht sehr gut geeignet sind auf rotglühenden Oberflächen Geometrien zu vermessen. Es wurde ein Labormessaufbau realisiert, in dem ein solcher Sensor ergänzt um eine Digitalkamera zum Einsatz kamen. In einem umfangreichen Versuchsprogramm wurden Musterteile bis ca. 1200°C erwärmt und während der Abkühlphase vermessen. Bei jeder Messung wurde die Schmiedeteiltemperatur protokolliert, um die Maßentwicklung in Abhängigkeit von der Temperatur zu ermitteln. Das Material des Probesteils bildete keinen Zunder. Damit war es möglich eine Vielzahl von vergleichbaren Messreihen durchzuführen. Für die Bewertung von verschiedenen Geometrien wurde entsprechende Auswertesoftware erstellt. Die Erkenntnisse wurden zusammengefasst und in Nutzungsempfehlungen zusammengestellt.

Ergebnisse und Diskussion

Die im Arbeitsplan festgelegten Punkte wurden abgearbeitet und die angestrebte Zielstellung der Studie konnte erfüllt werden. Auf Grundlage einer umfangreichen Recherche und von Voruntersuchungen konnte eine zu beschaffende Sensorik ausgewählt werden, die im Rahmen der geplanten Kostenkalkulation lag. Hierbei handelt es sich um einen Laserlinien-Scanner mit blauem Laser der auf Basis des Triangulationsprinzips arbeitet. Zusätzlich wurde verfügbare Kamertechnik für die Untersuchungen eingesetzt. Wie geplant waren die experimentellen Untersuchungen der umfangreichste Arbeitspunkt. Die Auswertung der Messdaten nahm ebenfalls einen großen Zeitrahmen in Anspruch. Es konnte ermittelt werden, dass die untersuchte Sensorik hinreichend genaue Werte für die Vermessung glühender Schmiederohteile bis ca. 1200°C liefert. In oberen Temperaturbereich wurden größere Abweichungen der Messwerte vom Sollmaß ermittelt. Hierbei handelte es sich offensichtlich um systematische Abweichungen, die auf nicht erklärbare physikalische Effekte (thermische Schlieren) zurückzuführen sind. Es konnte nachgewiesen werden, dass diese Abweichungen mit speziellen Korrekturalgorithmen bei der Datenauswertung minimiert werden können. Diese Algorithmen sind auf Grund ihrer Abhängigkeit von Temperatur, Geometrie und physikalischen Messprinzip stets für das konkrete Bauteil und die eingesetzte Sensorik anzupassen. Den Umgebungsbedingungen in der Schmiede Rechnung tragend, wurden die erforderlichen Schutzmaßnahmen für ein inline-System zusammengestellt und es wurden Einsatzempfehlungen formuliert. Als Hauptergebnis der Studie kann festgehalten werden, dass geeignete Sensorik für die Realisierung von inline-Messsystemen an glühenden Schmiedeteilen verfügbar ist. Der Einsatz solcher Systeme kann einen wesentlichen Beitrag zur Minderung von Ausschuss leisten, da Bewertungsergebnisse sofort nach dem Prozess vorliegen. Durch diese Reduzierung fehlerhaft gefertigter Schmiedeteile werden energieintensive Arbeitsgänge eingespart. Dies bedeutet nicht nur Kostenreduzierung, sondern auch Einsparungen von Material, Energieressourcen (Elektroenergie für die Erwärmung der Schmiedeteile) und Arbeitszeit. Die Einsparung von Elektroenergie führt wiederum zur Vermeidung von CO₂-Ausstoß - bei der Erzeugung diese Elektroenergie - und damit zur Reduzierung von Umweltbelastungen.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Der Versuchsstand und erste Ergebnisse wurden bereits auf der 25. Sächsischen Fachtagung Umformtechnik SFU am 06.11.2018 in einer live-Vorführung demonstriert. Die Abteilung Warmmassivumformung des IWU steht in engem Kontakt mit einer Reihe von Schmiedebetrieben und präsentierte dort die Erkenntnisse aus der Studie. Weiterhin ist geplant die Ergebnisse der Studie in der Herbstausgabe der Fachzeitschrift „massivUMFORMUNG“ des Industrieverbandes Massivumformung e. V. zu veröffentlichen.

Fazit

Die inline-Vermessung glühender Schmiederohteile direkt nach dem Umformprozess wird z. Z. nicht durchgeführt, hätte aber in der Schmiedeindustrie ein erhebliches Einsparpotential zur Folge. Mit diesem Förderprojekt war die Möglichkeit gegeben, Sensoren hinsichtlich ihrer Eignung für diesen Einsatzfall zu bewerten. Es konnten experimentelle Untersuchungen durchgeführt werden, die aufzeigen, dass spezielle Lasersensoren und Kamertechnik geeignet sind in inline-Systemen glühende Teile zu vermessen. An Hand von Genauigkeitsbetrachtungen wurde ermittelt, dass die vorgegebenen Genauigkeitsanforderungen über einen weiten Temperaturbereich bis 950°C eingehalten werden. Bei hohen Temperaturen treten physikalische Effekte (thermische Schlieren) auf, die zu Maßabweichungen führen, welche aber durch Korrekturalgorithmen minimiert werden können. Der Umfang der Studie ermöglichte die Untersuchung der o. g. Sensorik. Die Ergebnisse zeigen, dass auch Kamertechnik prinzipiell geeignet ist. Um die Beschränkung auf 2D-Geometrien zu überwinden wäre die Untersuchung von Stereo-Kamerasystemen ein weiteres Feld. Vorteil dieser Methode ist eine sehr kurze Datenerfassungszeit von wenigen Millisekunden. Mit den Ergebnissen dieser Studie sollen potentielle Anwender bestärkt werden den Fertigungsprozess in Richtung automatisierter Qualitätssicherung weiter auszubauen.

Inhaltsverzeichnis

Projektkennblatt.....	2
Verzeichnis von Bildern, Tabellen und Diagrammen	5
1. Zusammenfassung	7
2. Einleitung	8
3. Hauptteil	12
3.1 Anforderungen an eine inline-Vermessung von Schmiederohrteilen.....	12
3.1.1 Umgebungsbedingungen und Schutzmaßnahmen für Messsysteme.....	12
3.1.2 Anordnung von Messsystemen im Prozess und Taktzeiten	13
3.1.3 Erforderliche Genauigkeit	13
3.1.4 Datenhandling	14
3.2 Recherche zum Stand der Technik.....	14
3.2.1 Vermessung von kalten Gießerei- bzw. Schmiedeteilen	15
3.2.2 Vermessung bei erhöhten Temperaturen	15
3.2.3 Vermessung heißer Teile	15
3.2.4 Thermo- bzw. Wärmebildkameras	16
3.2.5 Recherche zu geeigneter Sensorik für die Messung heißer Bauteile	18
3.2.6 Zusammenfassung der Recherche	18
3.3 Voruntersuchungen und Auswahl der Sensorik für Labormessplatz	20
3.4 Beschreibung Messplatz und Versuchsdurchführung.....	22
3.4.1 Komponenten	23
3.4.2 Wärmeschutzmaßnahmen	25
3.4.3 Auswahl von Musterteilen.....	26
3.4.4 Versuchsdurchführung	28
3.5 Bewertung der Messdaten	30
3.5.1 Messdaten des Laserscanners	30
3.5.2 Messdaten der Kamerabilder.....	31
3.5.3 Messergebnisse.....	33
3.6 Bewertung der Ergebnisse im Hinblick auf die Zielsetzung	40
3.7 Einsatzempfehlungen.....	45
3.8 Ökologische, technologische und ökonomische Bewertung der Ergebnisse	48
3.9 Maßnahmen zur Verbreitung der Projektergebnisse	49
4. Fazit	50
Literaturverzeichnis	51
Anhänge A1: Zusammenstellung der Recherche zum Stand der Technik	55

Verzeichnis von Bildern, Tabellen und Diagrammen

Bild 1: Energiebilanz nach Herbertz	10
Bild 2: Laser Liniensensor an einer Querwalze positioniert	20
Bild 3: Blaue Laser-Messlinie auf kaltem und glühendem Teil	20
Bild 4: Darstellung des Messprinzips eines Laserlinien-Scanners	21
Bild 5: Labormessplatz	22
Bild 6: Hauptkomponenten des Labormessplatzes.....	23
Bild 7: PC-Technik zur Steuerung des Labormessplatzes.....	24
Bild 8: Falschfarbenbild der Thermokamera	25
Bild 9: Laserscanner und Kamera mit Temperatursensoren	26
Bild 10: Temperatursensor an der Unterseite der Lineareinheit.....	26
Bild 11: Musterteil Stauchstempel.....	27
Bild 12: Falschfarbenbild des Probenteils	27
Bild 13: Berechnete Sollkurve des Maßes L3 in Abhängigkeit von der Temperatur	28
Bild 14: Glühendes Messobjekt während der Messung	29
Bild 15: Prinzipdarstellung der Auswertung von Messschnitten	31
Bild 16: Ablaufplan der Bewertungssequenz mit Xeidana®	32
Bild 17: Beispiel einer Multisensorvernetzung	46
Tabelle 1: Einsparpotential an CO2 für die Schmiedeindustrie (2011).....	10
Tabelle 2: Thermischer Ausdehnungskoeffizient von Stellite® 6.....	27
Tabelle 3: Maßzusammenstellung bei 20°C	33
Tabelle 4: Zusammenfassung der Ergebnisse.....	39
Tabelle 5: Vergleich der zulässigen Toleranz mit den Streubreiten der Sensoren.....	40
Tabelle 6: Vergleich der Laser-Messwerte mit Erwartungswerten der Normalverteilung .	43
Tabelle 7: Zusammenstellung der Ergebnisse der Recherche zur Messtechnik	56
Diagramm 1: Ablauf der Messung	29
Diagramm 2: Durchmesser E, Vergleich der Messwerte des Lasersensors mit Sollkurve.	34
Diagramm 3: Durchmesser E, Abweichungen zwischen Lasersensor und Sollkurve.....	34
Diagramm 4: Durchmesser D, Vergleich der Messwerte des Lasersensors mit Sollkurve	35
Diagramm 5: Durchmesser D, Abweichungen zwischen Lasersensor und Sollkurve	35
Diagramm 6: Gesamthöhe L3, Vergleich der Messwerte des Lasersensors mit Sollkurve	36
Diagramm 7: Gesamthöhe L3, Abweichungen zwischen Lasersensor und Sollkurve	36
Diagramm 8: Höhe Absatz L4, Vergleich der Messwerte des Lasersensors mit Sollkurve	37
Diagramm 9: Höhe Absatz L4, Abweichungen zwischen Lasersensor und Sollkurve	37

Diagramm 10: Durchmesser E, Vergleich der Messwerte der Kamera/BV mit Sollkurve	.38
Diagramm 11: Durchmesser E, Abweichungen zwischen Kamera/BV und Sollkurve38
Diagramm 12: Vergleich des zulässigen Toleranzbereiches des Musterteils mit den Streubreiten der Sensorwerte, Temperaturbereich 20°C bis 950°C41
Diagramm 13: Vergleich des zulässigen Toleranzbereiches des Musterteils mit den Streubreiten der Sensorwerte, Temperaturbereich größer 950°C41
Diagramm 14: Verteilung der Streubreite der Sensorwerte im Temperaturbereich von 20°C bis ca. 950°C43
Diagramm 15: Abweichungen zwischen Kamera/BV-Messwert bzw. korrigierten Messwert und Sollkurve44

1. Zusammenfassung

In der Branche der Massivumformung ist Deutschland, mit rund 250 überwiegend mittelständischen Unternehmen, Marktführer in Europa. Die Massivumformung ist ein sehr energieintensiver Industriezweig. Deshalb ist die deutsche Schmiedeindustrie permanent gefordert, Potenziale zur Kostenreduzierung bei gleichzeitiger Verbesserung der Produktqualität und Umweltentlastung zu identifizieren. Eine inline-Messmethode zur Vermessung glühender Schmiederohteile direkt nach dem Schmiedeprozess könnte hierzu einen wichtigen Beitrag leisten. Stand der Technik ist die Bewertung der Schmiederohteile nach der Abkühlphase. Während der Abkühlzeit werden weitere Teile gefertigt. Tritt eine unzulässige Maßabweichung beim Schmieden auf, die z. B. auf zu hohen Verschleiß des Gesenks zurückzuführen ist, wird dies erst erkannt, nachdem weitere Teile gefertigt sind. Somit tritt der Fall ein, dass die gesamte Charge nicht der geforderten Qualität entspricht. Diese nicht qualitätsgerechten Bauteile bedeuten eine erhebliche Verschwendung von Ressourcen sowohl bezüglich des Materials als auch insbesondere hinsichtlich der für die Herstellung (Erwärmung und Umformung) eingesetzten Energie. Der erfolgreiche Einsatz einer geeigneten inline-Messmethode direkt nach dem Schmiedeprozess führt

- zu einer wesentlichen Erhöhung des Materialausnutzungskoeffizienten,
- zur Einsparung von Energiere Ressourcen (Elektroenergie),
- zur Minderung des CO₂ Ausstoßes (bei der Elektroenergieerzeugung) und
- zur Verbesserung der Bauteilqualität durch eine inline-Überwachung der Bauteilmaße.

Das Hauptziel dieser Studie besteht darin, Methoden für eine messtechnische Bewertung des heißen, noch glühenden Schmiederohteils im Produktionstakt hinsichtlich der Erkennung von Form- und Maßabweichungen aufzuzeigen. Zunächst wurden die Anforderungen an eine inline-Vermessung von glühenden Schmiederohteilen direkt nach der Umformung erarbeitet. Dabei wurden die Umgebungsbedingungen in der Schmiede analysiert und die erforderlichen Schutzmaßnahmen für die Sensorik zusammengestellt. In einer anschließenden Recherche wurde Sensorik ausgewählt und in Voruntersuchungen die prinzipielle Eignung getestet. Es wurde ein Labormessaufbau erstellt, in dem ein Laserlinien-Scanner und eine 2D-Digitalkamera getestet wurden. In einem umfangreichen Messprogramm wurden Musterteile bis ca. 1200°C erwärmt und bei diesen Temperaturen und während der Abkühlphase vermessen. Dabei wurden unterschiedliche Geometrielemente der Musterteile ausgewertet. Die Untersuchungen bestätigten, dass die ausgewählte Sensorik geeignet ist, glühende Teile zu Vermessen und die für die Schmiedeindustrie erforderliche Genauigkeit zu realisieren. An Hand der Erkenntnisse aus den praktischen Laborversuchen wurden Nachnutzungsempfehlungen für diese Sensorik, notwendige Anpassungen und zu beachtende wichtige Besonderheiten bei der Auswertung der Messdaten abgeleitet, um sie für den Einsatz im Produktionsprozess nutzbar zu machen. Diese Empfehlungen geben den potentiellen Anwender Hilfestellung bei der Konzeption und Realisierung solcher Messplätze.

Diese Studie wurde über ein Entwicklungsprojekt von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt gefördert (Az: 34020/01).

2. Einleitung

Deutschland ist in der Branche der Massivumformung klarer Marktführer in Europa und weltweit betrachtet die Nummer 2. Der Industriezweig ist sehr energieintensiv. Deshalb ist die deutsche Schmiedeindustrie permanent gefordert, Potenziale zur Energieeinsparung aufzuzeigen und umzusetzen. Neben Kostenreduzierung führt ein gesenkter Energieeinsatz auch zur Verminderung von Umweltbelastungen. Die Energiekosten in der Metallindustrie haben sich im Zeitraum von 1997 bis 2013 auf das 2,5-fache erhöht. Somit besteht hier akuter Handlungsbedarf.

Die Technologie der Warmmassivumformung, hier des Gesenkschmiedens, stellt ein sehr komplexes und hochproduktives Fertigungsverfahren dar. Mit diesem Verfahren werden vorwiegend große Stückzahlen bei ca. 1100 - 1200°C geschmiedet. Gegenüber anderen Verfahren der Warmmassivumformung (z.B. Freiformschmieden und Schmieden mit offenen Werkzeugen) ermöglicht dieses Verfahren höhere Maßgenauigkeiten sowie die serienmäßige Fertigung komplexer 3D-Geometrien. Um die Qualität der Schmiederohteile zu verbessern, wurden die zulässigen Bauteiltoleranzfelder gegenüber der DIN EN 10243 (Maßtoleranzen für Gesenkschmiedeteile aus Stahl) in den letzten Jahren erheblich eingeschränkt (bis zu 50%). Um diese höheren Genauigkeiten zu realisieren ist die Fertigung der Werkzeuge entsprechend komplizierter und teurer geworden. Im Fertigungsprozess werden die Werkzeuge nun stärker belastet, was wiederum dazu führt, dass ein höherer Verschleiß auftritt, der die Werkstückqualität negativ beeinflusst. Wird die mangelhafte Bauteilqualität nicht zeitnah erkannt, d. h. erst nach einer u. U. langen Abkühlzeit, wird mit dem Werkzeug weiter produziert und es entsteht eine hohe Anzahl von Ausschussteilen. Dies bedeutet eine erhebliche Verschwendung von Ressourcen sowohl bezüglich des Materials als auch insbesondere hinsichtlich der für die Herstellung (Erwärmung und Umformung) eingesetzten Energie.

Stand der Technik ist die Kontrolle der Maßhaltigkeit nach dem relativ langen Abkühlprozess am zumeist kalten Bauteil. Die Abkühldauer ist von mehreren Faktoren (z. B. Werkstoff, Masse des Schmiederohteils, geforderte Werkstoffkennwerte, Art der Abkühlung aus der Umformwärme u. a.) abhängig und kann technologiebedingt im Normalfall nicht verkürzt werden. Bei einer berührenden Vermessung der Maßhaltigkeit mit Messtastern, Messmaschinen etc. muss das Werkstück nahezu auf Raumtemperatur (<50°C) abgekühlt sein. Bei einer berührungslosen Vermessung mit optischer Messtechnik ist eine Abkühlung auf <600°C ausreichend. Da die Abkühlung entsprechend lange Zeit dauert sind Qualitätsabweichungen als Form- und Lageabweichungen der Außenkontur oder Oberflächenrisse erst erkennbar, wenn bereits eine Vielzahl von defekten Folgeteilen während der Abkühlung geschmiedet wurde [Gro16]. Ständen Messmethoden zur Verfügung, die direkt nach dem Fertigungsprozess des noch heißen Bauteils eine Aussage über dessen Maßhaltigkeit geben könnte, wäre bei auftretenden Qualitätsproblemen eine sofortige Reaktion möglich. Bei einer Trendverfolgung könnte bereits eine Maßänderung in Richtung Toleranzgrenze erkannt werden und bevor ein Ausschussteil entsteht, das Gesenk ausgetauscht werden. Diese Minimierung bzw. Vermeidung des Ausschusses leistet auch einen Beitrag zur Reduzierung der CO₂-Emmission, indem durch die Vermeidung von Abfall sowohl Material als auch Energie eingespart wird. Ziel ist eine Einsparung des Materials um 20 % und die Senkung der spezifischen Energiemenge um 30 %.

Messmethoden, die direkt nach dem Schmiedeprozess eingesetzt werden können, müssten folgende Eigenschaften erfüllen:

- einsetzbar unter den spezifischen Prozessbedingungen zeitnah nach dem Umformprozess (berührungslose Messung am glühenden Teil),
- einsetzbar bei den extremen Umgebungsbedingungen im Schmiedeprozess (Hitze, Schmutz),
- erreichen der erforderlichen Genauigkeit zur Bewertung der Schmiederohteile und
- schnell genug, um in der Taktzeit in der Gesamtprozesskette sofort Messergebnisse liefern zu können.

Messmethoden, die diese Kriterien erfüllen, stehen gegenwärtig nicht zur Verfügung. Aus diesem Stand der Technik wurde das Hauptziel des Projektes abgeleitet. Es sollen Möglichkeiten für eine messtechnische Bewertung des heißen Schmiederohteils im Produktionstakt hinsichtlich der Erkennung von Form- und Maßabweichungen aufgezeigt werden. Dazu sollen verschiedene Messmethoden anhand ihrer physikalischen Wirkungsweise bewertet, ausgewählt und praktisch in einem Laboraufbau erprobt werden. Die vergleichende Bewertung der Messmethoden soll zu Empfehlungen für bevorzugte Messmethoden führen und notwendige Anpassungen, Weiterentwicklungen und Applikationshinweise aufzeigen. Der erfolgreiche Einsatz einer geeigneten Messmethode führt

- zu einer Verringerung von nicht qualitätsgerechten Schmiederohteilen sowie des verfahrensbedingten Abfalls und damit zu einer wesentlichen Erhöhung des Materialausnutzungskoeffizienten,
- zur Einsparung von Energieressourcen (Elektroenergie) und
- zur Verbesserung der Bauteilqualität durch eine inline-Überwachung der Bauteilmaße.

In Zuge der Energiewende gewinnt der effiziente Einsatz aller Ressourcen, besonders die Einsparung von Energieressourcen, in zunehmendem Maße an Bedeutung und steht somit im Fokus aller Aktivitäten zur ressourceneffizienten und kundenorientierten Produktion. Neben den Ressourcen Material, Energie und Arbeitskraft erlangen im Kontext von Industrie 4.0 Informationen und Wissen eine steigende Wichtigkeit. Das Forschungsthema soll einen Beitrag dazu leisten, Methoden von Industrie 4.0 auf den Zweig Massivumformung / Schmieden zu übertragen.

Zur Verdeutlichung des Potentials, das in einer Qualitätsbewertung direkt nach dem Umformprozess liegt, soll ein Szenario an Hand einer Beispielrechnung kurz dargestellt werden. Ein Schmiederohteil mit einem Gewicht von 20 kg benötigt eine Abkühlzeit (gesteuerte Abkühlung) von ca. 1h, um eine Temperatur (<50°C) zu erreichen, bei der eine Vermessung des Teiles z. Z. durchgeführt werden kann. Während dieser Abkühlzeit werden bei 4 Hüben/min 240 Teile mit 20 kg Stückgewicht gefertigt. Tritt eine unzulässige Maßabweichung auf, wird dies erst nachdem 240 weitere Teile produziert wurden, die offensichtlich gleiche Maßabweichungen aufweisen, erkannt. Die gesamte Produktion in dieser Zeit entspricht nicht der geforderten Qualität. Dieser Ausschuss bedeutet Materialverlust, Energieverbrauch mit Emission von CO₂ sowie Maschinenbelegungs- und Arbeitszeit. Die Gesamtkosten pro Teil belaufen sich unter Einbeziehung der Materialkosten, der Kosten für die Erwärmung und weiterer Kosten auf ca. 58,00€. Für das Szenario von 240 nicht qualitätsgerechten Bauteilen entstehen somit Gesamtkosten von ca. 13,9 T€. Diese Kosten könnten bei sofortiger Qualitätsbewertung vermieden werden. Gegenwärtig beträgt die emittierte CO₂-Menge bei der Stromerzeugung ca. 600 g/kWh. Für die Erwärmung dieser 240 Schmiedeteile werden somit ca. 2,9 Tonnen CO₂ (240 Teile x 20 kWh/Teil x 0,6 kg/kWh) erzeugt. Auch diese

Menge könnte vermieden werden. Durch den permanenten Verschleiß der Gesenke lassen sich solche Szenarien immer wieder in der Praxis erkennen.

Folgende Übersicht im Schmiede-Journal von Prof. Herbertz aus dem Jahr 2011 [Herb11] zeigt deutschlandweit das theoretische Brancheneinsparpotential an CO₂:

	in Deutschland	theor. Einsparpotential (6,7%)
Schmiedetonnage [t/a]	2.340.000	
Einsatzmasse [t/a] bei 25% Gratanteil	3.120.000	209.040
Erwärmungsenergie [GWh/a] bei 400 kWh/t	1.248	84
Primärenergie [GWh/a] Stahlherstellung + Umformung	26.704	1.789
CO ₂ Emission Stahlherstellung [t/a] 1345 kg CO ₂ /t Rohstahl	4.196.400	281.159
CO ₂ -Emission Erwärmung für Umformung [t/a] Erwärmungsenergie zu 100% durch Strom	743.808	49.835
CO ₂ -Emission gesamt [t/a] ohne Antriebsenergie der Umformmaschinen	4.940.208	330.994

Tabelle 1: Einsparpotential an CO₂ für die Schmiedeindustrie (2011)

Nach Herbertz lässt sich unter Berücksichtigung der jährlichen Produktionsmengenverteilung für rotationssymmetrische Bauteile bzw. für Fassonteile ein gewichtetes theoretisches Einsparpotential von 6,7 % für alle Bauteile des repräsentativen Teilespektrums ableiten. Im Zahlen betrachtet bedeutet dies ein Einsparpotential an Erwärmungsenergie von 84 GWh/a (bei 400 kWh/t) und an Primärenergie (Stahlherstellung + Umformung) von 1.789 GWh/a in der deutschen Massivumformbranche. In Summe ist somit ein theoretisches Einsparpotential der CO₂-Emissionen von 330.994 t/a möglich (ohne Antriebsenergie der Umformmaschinen). Dieses Einsparpotential bezieht sich auf den gesamten Wertschöpfungsprozess für Massivumformteile. Die im Projektantrag adressierte Energieeinsparung ist ein Teil davon und ordnet sich unter den Punkten Erwärmen und Umformen ein (siehe Bild 1).

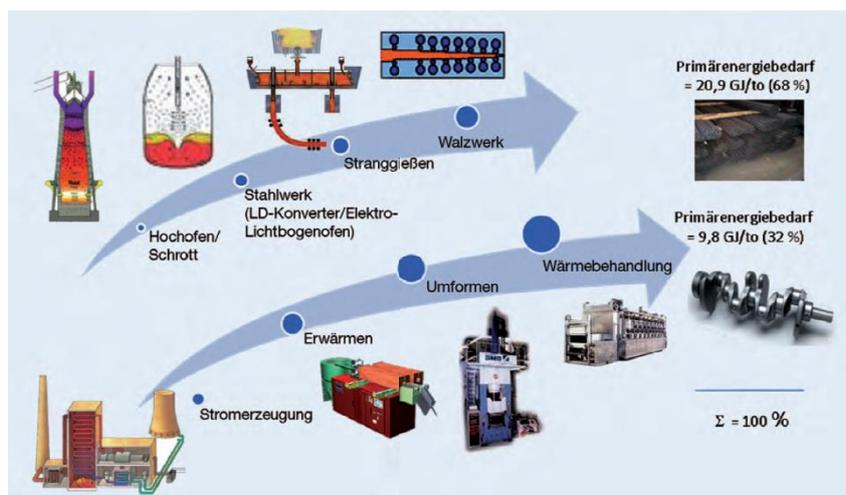


Bild 1: Energiebilanz nach Herbertz

Zur Erreichung des genannten Hauptzieles wurden vier Arbeitspakete vorgesehen:

- Festlegung der Anforderungen an die inline-Vermessung der Schmiederohteile
- Auswahl geeigneter Sensorik anhand physikalischer Messprinzipien
- Praktische Erprobung der Sensoren an repräsentativen Musterteilen und
- Ableitung von Einsatzempfehlungen.

Im ersten Arbeitspaket wurde ein Anforderungsprofil für eine Geometrievermessung von Schmiederohteilen erstellt. Dabei wurden die Randbedingungen (Umgebungsbedingungen, erforderliche Schutzmaßnahmen) für den Einsatz eines Messsystems direkt nach dem Fertigungsprozess betrachtet. Es wurden die mit dem Messsystem zu erreichenden Genauigkeiten ermittelt, repräsentative Musterteile für die praktischen Versuche ausgewählt und die zu bewertenden 3D-Geometrien festgelegt. Weiterhin wurden Überlegungen vorgenommen, wie die Ergebnisbereitstellung und das Datenhandling im Prozess erfolgen könnten.

Aufbauend auf die Erkenntnisse des ersten Arbeitspaketes wurde eine umfangreiche Recherche durchgeführt, um einen repräsentativen Überblick über verfügbare und industrietaugliche Messtechnik zu erhalten, die geeignet ist heiße und glühende Bauteile zu vermessen. Als Ergebnis wurde eine Sensorik ausgewählt (Laser-Scanner und 2D-Kameratechnik) die geeignet erscheint die geforderten Prämissen zu erfüllen. An Hand von praktischen Voruntersuchungen wurde die prinzipielle Eignung dieser Sensorik getestet und unter Beachtung des verfügbaren Kostenrahmens für die Untersuchungen beschafft. Den Aspekt der Umgebungsbedingungen im Schmiedeprozess wurde hierbei bereits eine wichtige Bedeutung beigemessen, insbesondere den Schutz der Sensorik betreffend (industriell verfügbares Schutzgehäuse).

Das dritte und umfangreichste Arbeitspaket beinhaltet den gesamten Komplex der Laboruntersuchungen. Es wurde ein Versuchsplan erstellt, ein Ablaufschema der Versuche entworfen, der Messplatz konzipiert und aufgebaut. Dabei wurde eine Messstrategie realisiert, die angepasst an die Vorortgegebenheiten in der Schmiede in ähnlicher Weise im Prozess ablaufen könnte. Es wurden Maßnahmen vorgesehen, um die Sensorik vor zu starker Wärmeeinwirkung zu schützen. Zur Durchführung der Versuche wurden die Musterproben bis ca. 1200°C erwärmt und während der Abkühlphase wiederholt vermessen. Für die Auswertung der Messdaten wurde entsprechende Software entwickelt, um daraus die Musterteilmaße zu ermitteln. Um bei hohen Temperaturen die Messergebnisse auf Richtigkeit überprüfen zu können, wurde eine Sollkurve berechnet, die als Referenz diente.

Im letzten Arbeitspaket erfolgte die Auswertung der Messergebnisse. Es konnte nachgewiesen werden, dass mit Lasertechnik, speziell mit Laserlinien-Scannern und mit Kameratechnik geometrische Vermessungen an heißen, rotglühenden Schmiederohteilen mit entsprechender Genauigkeit durchgeführt werden können. Es treten bei höheren Temperaturen physikalische Effekte auf, die zu Abweichungen führen, und die abhängig von der Messmethode und der Geometrie unterschiedliche Auswirkungen hervorrufen. Da es sich hierbei offensichtlich um systematische Abweichungen handelt, ist durch den Einsatz von Software-Korrekturmechanismen bei der Datenauswertung eine gute Kompensation möglich. Weiterhin wurden Empfehlungen für den Einsatz im Prozess zusammengestellt.

3. Hauptteil

3.1 Anforderungen an eine inline-Vermessung von Schmiederohtteilen

Um eine Qualitätsüberwachung direkt in Prozessnähe zu lokalisieren, sind zunächst die Umgebungsbedingungen vor Ort genau zu ermitteln sowie die zu messenden Parameter und die erforderlichen Genauigkeiten festzulegen. An Hand dieser Prämissen ist die Sensorik auszuwählen, wobei die Betriebsbedingungen für eine sichere Funktionsfähigkeit dieser Technik eingehalten werden müssen. Daraus leiten sich entsprechende Schutzmaßnahmen ab.

3.1.1 Umgebungsbedingungen und Schutzmaßnahmen für Messsysteme

Zunächst sind die Umgebungsbedingungen in einem Schmiedewerk zu betrachten. Hier herrschen sehr raue Arbeitsbedingungen. Folgende auftretende Belastungen sind zu nennen:

- hohe Umgebungstemperaturen und gleichzeitig große Temperaturunterschiede,
- hohe Temperaturen des Schmiedeteils bedeuten eine enorme Wärmestrahlung,
- Schwingungen, Stöße,
- Schmutz, unter Umständen Funkenflug,
- hohe Staubentwicklung durch Zunder,
- vernebelte Arbeitsumgebung, da Sprühnebel ins Gesenk eingespritzt wird,
- hoher Lärmpegel.

Demgegenüber sind Messsysteme äußerst empfindliche Geräte mit hochwertigen elektronischen Komponenten, die entsprechende Betriebsbedingungen erfordern. So sind Schutzarten, Betriebstemperaturen, Umgebungsdruck, zulässige Luftfeuchte u. a. Parameter vorgegeben, um die ordnungsgemäße Funktionsfähigkeit aufrecht zu erhalten bzw. zu garantieren. Weiterhin sind die Versorgungs- und Datenleitungen zum Steuer- und Auswert-PC, der PC selbst und die Datensicherung den rauen Umgebungsbedingungen ausgesetzt.

Um die Funktionsfähigkeit der Messtechnik zu gewährleisten sind demzufolge Schutzmaßnahmen erforderlich, die trotz der o. g. Umgebungsverhältnisse die Betriebsbedingungen der Sensorik gewährleisten. Zusammengefasst muss die Sensorik vor drei Hauptumgebungsbedingungen zuverlässig geschützt werden: Temperatur, Schwingungen (Stöße) und Schmutz. Dies bedeutet, eine zuverlässige Einhausung, die über eine entsprechende Kühlung verfügt, eine gute Abdichtung realisiert und nur die unbedingt notwendigen Öffnungen enthält, um z. B. das Messobjekt mit einem Laser zu bestrahlen und die rückgestreuten Oberflächeninformationen wieder zu detektieren. Durch die enorme und ständige Stoßbelastung beim Schmieden ist eine Schwingungsisolierung unbedingt erforderlich. Diese Vorkehrungen betreffen nicht nur die Sensorik an sich, sondern auch die Anschlussleitungen. Hier ist eine Isolierung, die vor Wärme und mechanischen Einflüssen schützt, erforderlich. Ähnliche, ev. nicht so hochsensiblen, mechanische Schutzmaßnahmen sind für das Handling notwendig. Die Sensorik muss stabil positioniert und bewegt werden, um reproduzierbare Werte über einen langen Zeitraum zu liefern.

Neben den mechanischen Schutzmaßnahmen sind auch organisatorische Maßnahmen möglich. Für die Durchführung einer Messung ist es unumgänglich, dass sich das Bauteil

im Messfeld des Sensors befindet. Durch die Wärmekapazität großer Teile kommt es sehr schnell zur Aufheizung der Umgebung. Der Messablauf ist so zu gestalten, dass sich der Sensor nur so kurze Zeit wie möglich in Nähe der heißen Teile befindet. Für die Zeit zwischen den Messungen ist der Sensor in eine „Parkstation“ zu fahren, die eine Abschottung von den Umgebungsbedingungen sichert. Hierfür ist geeignete Technik industriell vorhanden. Bei vielen Anwendungen hat sich eine Roboterzuführung bewährt. Entsprechend der Gegebenheiten vor Ort könnte auch eine lineare Verschiebeeinheit zur Anwendung kommen.

3.1.2 Anordnung von Messsystemen im Prozess und Taktzeiten

Die mögliche Position der Messtechnik im Prozess ist von vielen Randbedingungen abhängig. Vor Ort muss zunächst die räumliche Situation bewertet werden. Wo ist der verfügbare Platz für die Messtechnik? Sind dort die o. g. Schutzmaßnahmen möglich? Wird der Prozessablauf behindert? In nächsten Schritt sollte festgelegt werden, welche Parameter zu messen sind. Ist das gesamte Teil zu bewerten oder sind einzelne Messwerte an ausgewählten Bauteilpartien für eine qualitative Bewertung aussagekräftig genug. Daraus lässt sich abschätzen, welche Messtechnik erforderlich ist und wie umfangreich sich die Messung gestaltet. Wichtig ist hierbei die reine Datenerfassungszeit. Damit verbunden kann geklärt werden, ob eine Momentaufnahme, d. h. Messung während der Bewegung, z. B. mit einer Kamera, ausreichend ist oder ob sich das Bauteil für die Zeit der Datenerfassung in Ruhe befinden muss.

Nach Klärung der Platzverhältnisse, des Messumfangs und der dazu notwendigen Sensorik kann festgelegt werden, ob die Messung direkt in der Produktionslinie erfolgen kann oder eine Ausschleusung auf einen separaten Messplatz sinnvoller ist.

Aufgrund der rauen Umgebungsbedingungen sollte eine separate Messstation angestrebt werden. In einer Messzelle sind Schutzmaßnahmen einfacher umsetzbar. Ein weiteres Argument für den Einsatz einer Messzelle besteht darin, dass sie für ein großes Sortiment von Bauteilen konzipiert werden kann. Das Handling (Führung der Sensorik) kann auf Grund der abgeschlossenen Zelle flexibel gestaltet werden, was einer Anpassung an neue Bauteilsortimente entgegenkommt.

Bestimmend für die Taktzeiten bei heutigen Messsystemen ist oftmals die Datenerfassungszeit. Für die Auswertung steht sehr schnelle Rechentechnik zur Verfügung, die in Bruchteilen der reinen Datenerfassungszeit ein Ergebnis liefert. Sollte ein vollständiger CAD-Vergleich gefordert sein, sind auch hier aufwendigere Algorithmen nötig. Bei Schmiedeteilen ist dies in vielen Fällen nicht erforderlich. Bereits die Bewertung weniger Maße oder die Kontrolle auf Vorhandensein bzw. Fehlen von Bauteilpartien gibt wichtige Erkenntnisse über die qualitätsgerechte Ausformung.

3.1.3 Erforderliche Genauigkeit

Die Toleranzen für Maße von Schmiedeteilen sind in der DIN 10243-1 festgelegt. Sie bewegen sich von 1,6 mm für kleine Bauteile bis zum zweistelligen mm-Bereich für große Bauteile. Die Genauigkeit der eingesetzten Sensorik sollte mindesten um eine Größenordnung (Faktor 10) besser sein, als die Toleranz des zu messenden Bauteils. D. h. für kleine Maße sollten Sensorgenauigkeiten von 0,16 mm oder besser angestrebt werden. Für größere Bauteile kann die Genauigkeit der Sensorik entsprechend größer gewählt werden. Das Kriterium für die erforderliche Genauigkeitsklasse ist stets das Maß mit der kleinsten Toleranz.

Bei der Vermessung von heißen Teilen ist die Maß- und Formänderung durch die Wärmeausdehnung zu beachten. Aus diesem Grund ist bei jeder Messung erwärmter Teile die Temperatur ebenfalls zu erfassen und in die Auswertung einfließen zu lassen.

3.1.4 Datenhandling

Messdaten aus Produktionsprozessen werden in der Regel nach zwei unterschiedlichen Gesichtspunkten ausgewertet. Direkt im Prozess ist es wichtig, eine Information zur qualitätsgerechten Ausformung und zur Maßhaltigkeit des Bauteils bereitzustellen. Bei Abweichungen kann der Prozess angehalten und entsprechende Maßnahmen ergriffen werden. Es werden keine weiteren fehlerhaften Teile produziert. Für diese Information genügt die einfache Signalisierung „i. o.“ oder „n. i. o.“. Diese Information kann in einfacher Weise an den Maschinenbediener vor Ort durch optische oder akustische Signale mitgeteilt werden. Das Auswerteprogramm kann mit entsprechenden Signalelementen gekoppelt werden.

Für die tiefere Analyse der Qualitätsentwicklung ist eine lückenlose Archivierung der Messdaten in aufbereiteter, überschaubarer Form erforderlich. Dazu sollten die Messdaten in einer Datenbank gespeichert werden. Sinnvoll ist die Einbindung in das Datennetz der Schmiede. Das zuständige Qualitätssicherungsmanagement hat dann durch die aufgezeichnete Maßentwicklung konkrete Informationen zu Standzeiten und zur Verschleißentwicklung des Gesenks. Diese lückenlosen Daten erlauben Rückschlüsse auf die Prozessstabilität und geben Hilfestellung beim Erkennen von Verbesserungspotential.

Für eine weitergehende Automatisierung (Industrie 4.0) wäre auch eine direkte Anbindung an die Maschinensteuerung denkbar. Ein erster Schritt könnte der sofortige Stop der Maschine sein, sobald fehlerhafte Teile detektiert werden. Eine Regelung von Prozessparametern sollte in einer nächsten Ausbaustufe angedacht werden.

3.2 Recherche zum Stand der Technik

Entsprechend der Aufgabenstellung wurde eine umfangreiche Recherche durchgeführt. Hierbei wurde sowohl in Richtung Sensorik für die Vermessung heißer und glühender Bauteile recherchiert, als auch nach konkreten Anwendungsbeispielen für die Vermessung von Guss- bzw. Schmiederohnteilen gesucht.

Die Ergebnisse können in folgende Rubriken eingeteilt werden:

- Vermessung von kalten Gießerei- bzw. Schmiedeteilen
- Vermessung bei erhöhten Temperaturen (bis 200°C) in rauher Umgebung
- Vermessung heißer Stahlteile (keine konkrete Temperaturangabe)
- Messung bei Temperaturen größer 1000°C
- Thermo- bzw. Wärmebildkameras
- Recherche zu geeigneter Sensorik für die Messung heißer Bauteile.

Teilweise sind keine konkreten Angaben, wie z. B. die genaue Benennung der gemessenen Parameter, die Angabe der maximalen Bauteiltemperatur oder die erreichbaren Genauigkeiten, verfügbar. Die Recherche gibt aber einen guten Überblick über den Stand der Technik. Im Anhang A1 sind in Tabelle 7 die relevanten Ergebnisse in übersichtlicher, knapper Form zusammengefasst und die entsprechenden Quellen angegeben.

3.2.1 Vermessung von kalten Gießerei- bzw. Schmiedeteilen

Eine Reihe von Firmen stellt Messtechnik bzw. Messplätze vor, die für die Vermessung von Schmiede- bzw. Gussteilen geeignet sind. Es wurden keine Angaben gemacht, ob mit diesen Systemen auch heiße Teile gemessen werden können. Es werden Systeme vorgestellt, die sowohl für die inline-Messung als auch für Einzelprüfungen eingesetzt werden und 3D-Daten der Bauteile liefern. Es werden ausschließlich optische Verfahren genannt. Hierbei kommt Lasertechnik, teilweise in Verbindung mitameratechnik, zum Einsatz.

Die Messverfahren basieren prinzipiell auf dem Triangulationsverfahren. Hierbei wird das Messobjekt beleuchtet und das reflektierte bzw. rückgestreute Licht aus einer anderen Richtung, die nicht mit der Beleuchtungsrichtung übereinstimmt, ausgewertet. Dazu zählt auch das Streifenlichtverfahren, bei dem das Bauteil flächig ausgewertet wird. Das Messobjekt wird mit einer Sequenz von unterschiedlich breiten Lichtstreifen beleuchtet. Durch Auswertung der Hell-Dunkelübergänge können 3D-Koordinaten der Oberfläche berechnet werden. Weiterhin kommen Laserlinien-Scanner zu Einsatz, die die Oberflächen entlang einer Laserlinie, die über das Objekt geführt wird, bewerten. Diese Linien enthalten die Tiefeninformation (Z-Richtung) und die Information einer lateralen Richtung (X-Richtung). Durch die Bewegung der Laserlinie über das Bauteil – dies kann durch Verfahren des Sensors oder des Bauteils realisiert werden - wird die zweite laterale Richtung (Y-Richtung) des Bauteils erfasst (siehe Bild 4 im Abschnitt 3.3). Damit kann ein solcher Laserlinien-Scanner 3D-Daten der Oberfläche generieren.

Genauigkeiten der Messungen an Guss- bzw. Schmiedeteile wurden nicht konkret genannt. Bei einer Quelle [HMP18] wird als Höhenauflösung (Z-Richtung) 0,005 mm und als Breitenauflösung (eine laterale Richtung) 0,06 mm angegeben. Die Genauigkeit bzw. Wiederholgenauigkeit ist damit aber nicht eindeutig bestimmbar. Es kann jedoch eingeschätzt werden, dass mit dieser hohen Auflösung eine ausreichende Genauigkeit entsprechend den Vorgaben (siehe Punkt 3.1.3) erzielt werden kann.

3.2.2 Vermessung bei erhöhten Temperaturen

Zwei Firmen wurden recherchiert, die Bauteile im rauen Umfeld bei erhöhten Temperaturen vermessen. Hierbei handelt es sich um ein taktiles Koordinatenmessgerät, das in einer industriellen Schmiede bei Umgebungstemperaturen bis 40°C eingesetzt wird [Zeiss18]. Das zweite System ist ein optisches System und basiert auf dem o. g. Streifenlichtverfahren [Aic18]. Als Beispiele wurde die Vermessung von Gesenken mit einer Größe von ca. 3m x 1,5m und von bis zu 9m langen Bauteilen angeführt. Die Bauteiltemperatur betrug dabei bis zu 200°C. Konkrete erreichte Messgenauigkeiten sind auch hier nicht angegeben. Die speziellen industriellen Anforderungen wurden sicher auch hier erfüllt.

3.2.3 Vermessung heißer Teile

In diesem Abschnitt sind die Anwendungen zusammengefasst, die sowohl genaue Temperaturbereiche angegeben haben, als auch die Quellen, die sich auf die Angabe „heiß“ beschränken. Die recherchierten Anwendungen können in zwei Vermessungsarten eingeordnet werden, in 3D-Geometrievermessung und 2D-Vermessung, bei der Abstands- und Profildaten ermittelt werden.

Bei den vorgestellten 3D-Vermessungsbeispielen kommt ausschließlich das Laser-Triangulationsprinzip und hierbei als Messsensor der Laser-Scanner zum Einsatz. Es

werden drei inline-Prüfsysteme vorgestellt, die durch eine feststehende Sensorik gekennzeichnet sind, das heiße Bauteil wird während der Messung am Sensor vorbeibewegt. Die dritte Dimension wird, wie oben beschrieben, durch die Bewegung des Bauteils realisiert. Hierbei ist für die Genauigkeit in dieser Richtung die Konstanz der Bauteilbewegung von essentieller Bedeutung. In den beschriebenen Messsystemen werden folgende Objekte vermessen: Profil von Stahlschmiedereifen [MEp18_2], Strangussteile [W+R18] und Stabstahl [LIM18]. Bei diesen Messobjekten handelt es sich nicht um komplexe Geometrien, da die drei Dimensionen nicht unregelmäßig geformt sind. In Vorschubrichtung ist die Oberflächenkontur gleich und muss in einem Toleranzband liegen. Der Abstand der Messlinien in Vorschubrichtung (dritte Dimension) ist von untergeordneter Bedeutung. Genau genommen handelt es sich hier um eine 2D-Profil-Vermessung, wird aber als 3D-Geometrievermessung bezeichnet.

Bei den recherchierten 2D-Vermessungsbeispielen wird ebenfalls mit Lasersensorik gearbeitet. Hierbei kommen Punktlaser zur Anwendung und in einem Fall wird das Prinzip des Laserlichtvorhangs genutzt [Zum18]. Die Punktlaser werden eingesetzt um Positionen bzw. Abstände vom Bauteil zum Sensor zu bestimmen. Damit kann die Lage der heißen Objekte im Prozess überprüft werden. Die Sensorik erlaubt Abstandsmessungen bis zu Entfernungen über 100 m. Die Genauigkeit liegt dabei im Bereich von einem bis mehrere Millimeter. Durch die Messung an mehreren Oberflächenpunkten ist die Vermessung von einfachen Geometrien möglich. Eine umfassende und genaue Geometriemessung ist damit jedoch nicht realisierbar. Das Prinzip des Laserlichtvorhangs basiert auf Abschattung eines Laserlichtfächers durch das Messobjekt. Die Größe der Abschattung wird ausgewertet und damit kann z. B. der Durchmesser einer Stahlstange gemessen werden. Die Bewertung unregelmäßiger Profile ist damit nicht realisierbar. Die dritte Dimension basiert, wie oben beschrieben, auf der Vorschubbewegung des Messobjektes.

Als Fazit aus der Recherche kann festgestellt werden, dass keine bekannte Anwendung, die Vermessung von heißen Teilen mit komplex geformter Geometrie ermöglicht.

3.2.4 Thermo- bzw. Wärmebildkameras

Um den Stand der Technik auf dem Gebiet der Thermo- bzw. Wärmebildkameras zu ermitteln, wurde recherchiert, für welche Messungen diese Technik in Schmieden bzw. bei der Stahlherstellung eingesetzt wird. Existieren Anwendungen, bei denen Thermokameras für dimensionale Messungen an heißen Schmiedeteilen verwendet werden?

Auf dem Gebiet der Thermokameras gibt es eine Vielzahl von Anbietern. Es wurden keine Anwendungen und Hinweise gefunden, dass Thermokameras für dimensionale Messungen genutzt werden. Thermokameras werden ausschließlich für Temperaturmessung eingesetzt. Einige Firmen beschreiben Anwendungen ihrer Produkte bei der Stahlherstellung. Als Beispiele sollen hier zwei Systeme genannt werden [Inf18]. Das System SLAG-DETEKT dient zur Schlackefrüherkennung unter rauen Prozessbedingungen bei der Stahlherstellung und das System LHSD (Ladle Hot Spot Detection) wird zur thermographischen Gießpfannenüberwachung genutzt, um gefährliche Pfannendurchbrüche wirksam zu verhindern. Auch die Temperaturmessung direkt vom Gießstrahl im Stahlherstellungsprozess ist ein Anwendungsfeld von Thermokameras [Dia18]. Auch bei weiteren Firmen wurden Anwendungen bei der Stahlherstellung genannt (siehe Tabelle 7).

Der Grund dafür, dass Thermo- bzw. Wärmebildkameras nicht für dimensionale Geometriebewertungen eingesetzt werden, ist auf die eingeschränkte geometrische Auflösung dieser Technik, trotz einer relativ großen Pixelanzahl des Detektors, zurückzuführen. Für die geometrische Auflösung ist zunächst das Sichtfeld (Field of View: FOV) von Bedeutung. Entsprechend des Öffnungswinkels des Kameraobjektivs kann eine Messszene betrachtet werden. Die Anzahl der Pixel im Detektor bestimmt nun die Auflösung dieser Messszene. Das kleinste noch erkennbare Objekt wird als Messfleck bezeichnet und in Milliradian (mrad) angegeben. Die Größe dieses Messflecks ist anhängig vom Abstand der Kamera zum Objekt. Je weiter das Messobjekt vom Kameraobjektiv entfernt ist, desto geringer wird die realisierbare Auflösung. Die messbare Auflösung ist aber nicht gleichzusetzen mit der geometrischen Auflösung. Das wesentliche Kriterium für die geometrische Auflösung wird durch das sogenannte „momentane Sichtfeld“ oder „Instantaneous Field of View“ (IFOV_{geo}) bestimmt. Da ein zu messendes Objekt in der Realität nicht in das von der Auflösung der Kamera vorgegebene Raster passt, verringert sich die geometrische Auflösung. Für die Thermographie kann als Regel angesetzt werden, dass das kleinste real messbare Objekt etwa dem Dreifachen des nach IFOV_{gemessen} zu erkennenden Objekts entspricht [Tes18_2].)

Sehr hoch auflösende Wärmebildkameras sind in [MEp18_1] beschrieben. Diese Kameras arbeiten mit Mikroskop-Optiken. Hier werden kleinste Messflecken (IFOV) bis zu 28 µm erzielt. Diese hohe Auflösung wird jedoch nur erreicht, in dem das Messfeld entsprechend klein gewählt wird. Die mit einer Aufnahme erreichte laterale Messfeldgröße beträgt ca. 20 mm x 20 mm bei einem Abstand des Kameraobjektivs zum Messobjekt von 100 mm. Bei größeren Objekten müssten dadurch eine Vielzahl von Aufnahmen gemacht werden. Für sehr spezielle Teile könnte auch eine Maßbestimmung mittels Wärmebildkamera eine sinnvolle Alternative sein. Hier könnten weitergehende Untersuchungen Aufschluss geben.

Für die Bearbeitung der Forschungsaufgabe stand eine Wärmebildkamera t885-2 der Firma Testo zur Verfügung. Diese Kamera verfügt über einen Detektortyp mit 320 x 240 Pixel. Die garantierte geometrische Auflösung (IFOV_{geo}) beträgt 1,7 mrad beim Einsatz eines Standardobjektivs und 0,6mrad bei Verwendung eines Teleobjektivs [Tes18_1]. Dies bedeutet dass in einer Entfernung von 1m eine Auflösung von 1,7 mm bzw. 0,6 mm gegeben ist [Tes18_2]. Für die dimensionale Bewertung von Bauteilen ist diese Auslösung zu gering.

Diese Kamera verfügt zusätzlich zur Temperaturbildaufnahme über eine Funktion, die ein normales Bild (Realbild) von der Messszene speichert. Das Temperaturbild und das Realbild werden durch separate Optiken aufgenommen. Damit ist keine Übereinstimmung des Maßstabs und des Bildausschnitts zwischen Thermobild und Realbild gegeben. Mit einer einfachen Bildüberlagerungsroutine können durch Festlegen von Referenzpunkten in jedem Bild beide Aufnahmen übereinander gelegt werden. Bereits durch diese Überlagerung der beiden Bilder entsteht ein Versatz zwischen den Konturen. Die durch die Kamerahersteller bereitgestellte Überlagerungsfunktion dient dem Anwender dazu, die Wärmequelle etwas genauer lokalisieren zu können, eine dimensionale Bewertung der Thermobilder im 0,1mm-Bereich ist damit nicht möglich.

Eine exakte Überlagerung von Real- und Thermobild ist nur realisierbar, wenn beide Bilder mit derselben Optik aufgenommen würden. Kameras die diese Funktionalität enthalten wurden nicht ermittelt. Wie oben festgestellt, liegt die geometrische Auflösung

des Thermobildes unter der eines Realbildes. Damit ist es schwer vorstellbar, dass durch ein Thermobild die Auflösung eines Realbildes verbessert werden kann. Die Genauigkeit einer hochauflösenden Digitalkamera kann damit nicht übertroffen werden.

Die Kamera der Firma Testo wurde im Labormessplatz zur Temperaturbestimmung der Messprobe genutzt (siehe Punkt 3.4.1).

3.2.5 Recherche zu geeigneter Sensorik für die Messung heißer Bauteile

Wie sich entsprechend Punkt 3.2.3 (Recherche zur Vermessung heißer Teile) herauskristallisierte, wird die Technik der Laserlinien-Triangulation bei vielen Anwendungen für die Vermessung von Profilen heißer Teile eingesetzt. Dabei werden unterschiedliche Techniken genutzt. Es kommen Sensoren zum Einsatz, die die Laserbeleuchtung und das Empfangselement in einer Sensorik vereinen. Andere spezielle Lösungen bewerten die projizierte Laserlinie mit einer separaten Kamera.

Viele Lasersensoren arbeiten mit rotem Licht. Der Wellenlängenbereich der emittierten Laserstrahlung liegt dabei im Bereich von 670nm. Glühendes Metall emittiert einen hohen Anteil infraroter Strahlung. Diese Strahlung stört die auf rotem Laser abgestimmten Empfangselemente und kann keine exakten Messwerte generieren [MEp18_3]. Aus diesem Grund ist Sensorik mit roten Laserlinien nur für Teile geeignet, deren Temperaturen unterhalb der Glühphase liegen. Blaues Laserlicht hat hinsichtlich der Lichtwellenlänge einen genügend großen Abstand zum Infrarotbereich, so dass Messungen auf glühenden Metallen möglich sind. Ein weiterer Vorteil von blauem Laserlicht besteht darin, dass auf Grund der kürzeren Wellenlänge von blauem Licht (404 nm) diese Strahlung nicht so tief ins Material eindringt. Der Laserstrahl ist damit besser gebündelt und es entsteht auf der Oberfläche ein kleinerer, besser abgegrenzter Lichtpunkt, der exaktere Messwerte liefert.

Aus diesem Grund ist die Verwendung von Sensorik mit blauem Laserlicht für die Vermessung von glühenden Teilen Voraussetzung. Die Verfügbarkeit entsprechender Sensorik wurde recherchiert. Die Ergebnisse sind in Tabelle 7 eingetragen.

Ein weiteres interessantes Verfahren wurde in [Hex18] vorgestellt. Es handelt sich hierbei um ein 3D-Stereokamerasystem. Das Messobjekt wird mit blauem LED-Licht beleuchtet und drei Digitalkameras nehmen Bilder vom Objekt auf (angegebene Aufnahmezeit: 10 ms). Aus diesen drei Aufnahmen werden 3D-Daten vom Messobjekt berechnet. Die Messpunktauflösung wird mit 0,06 mm angegeben. Eine Anwendung zur Vermessung von heißen Schmiedeteilen wurde nicht genannt. Auf Grund der Beleuchtungsart ist davon auszugehen, dass rotglühende Teile gut erfasst werden könnten. Die kurze Datenaufnahmezeit ermöglicht eine kurze Verweilzeit im Messfeld des zu messende heißen Bauteils. Die hohe Messpunktdichte deutet darauf hin, dass die Toleranzen für massivumgeformte Bauteile erreicht werden können.

3.2.6 Zusammenfassung der Recherche

Eine „echte“ 3D-Vermessung komplex geformter Geometrien erfolgt z. Z. nur bei kalten und bis maximal 200°C erwärmten Guss- und Schmiederohtteilen bzw. bei Gesenken. Hierbei kommen optische und taktile Verfahren zum Einsatz.

Bei heißen Teilen wird ausschließlich Lasermesstechnik eingesetzt. Das vorherrschende Messverfahren nutzt die Laserlinien-Triangulation. Weitere Verfahren sind das Impulslaufzeitverfahren, das Phasenvergleichsverfahren und ein Verfahren das auf

Abschattung eines Laserlichtvorhangs basiert. Die meisten Messungen werden an Stangenmaterial, Rohren, Brammen, Grobblechen u. dgl. durchgeführt. Hierbei werden Profile, Durchmesser, Dicken und Abstände vermessen. Eine 3D-Vermessung von glühenden Schmiederohtteilen erfolgt bisher nicht.

Die Recherche zu Thermo- bzw. Wärmebildkameras zeigte, dass diese Technik ausschließlich für Temperaturmessungen genutzt wird.

Für die dimensionale Vermessung von glühenden Teilen mit Laserlinien-Triangulation ist es unbedingt erforderlich Sensorik mit blauem Laserlicht einzusetzen, da rotes Laserlicht auf rotglühenden Oberflächen durch die Empfangselemente nicht exakt erkannt werden kann.

Es wurden keine Hinweise gefunden, dass Digitalkameras für die dimensionale Vermessung heißer Schmiederohteile eingesetzt werden. Eine interessante Quelle beschreibt ein 3D-Stereokamerasystem, das mit einer blauen Beleuchtung arbeitet.

3.3 Voruntersuchungen und Auswahl der Sensorik für Labormessplatz

Da sich in der Recherche zeigte, dass Laserlinien-Scanner für Profilmessungen an heißen Teilen an vielen Stellen eingesetzt werden und auch Laser mit blauem Licht zur Messung auf rotglühenden Oberflächen verfügbar sind, wurde entschieden einen entsprechenden Sensor zu testen, um die Erfolgsaussichten abschätzen zu können. Mit einem Leihensor wurden Probemessungen durchgeführt. An einer Axial-Vorschub-Querwalze wurde dieser Sensor positioniert und während des Walzvorgangs Testmessungen durchgeführt. Im Bild 2 ist die Position des Sensors oberhalb der Walzen zu sehen. Die Messlinie des blauen Lasers ist im Bild 3 auf einem kalten und einem glühenden Teil während des Walzvorgangs dargestellt. Diese Versuche zeigten, dass mit diesem Sensortyp auf glühenden Oberflächen vergleichbar gute Messdaten aufgenommen werden können, wie von Oberflächen kalter Bauteile. Diese Untersuchungen waren ausschlaggebend für die Nutzung eines Laserlinien-Scanner (Bild 4) zur Versuchsdurchführung in diesem Projekt.

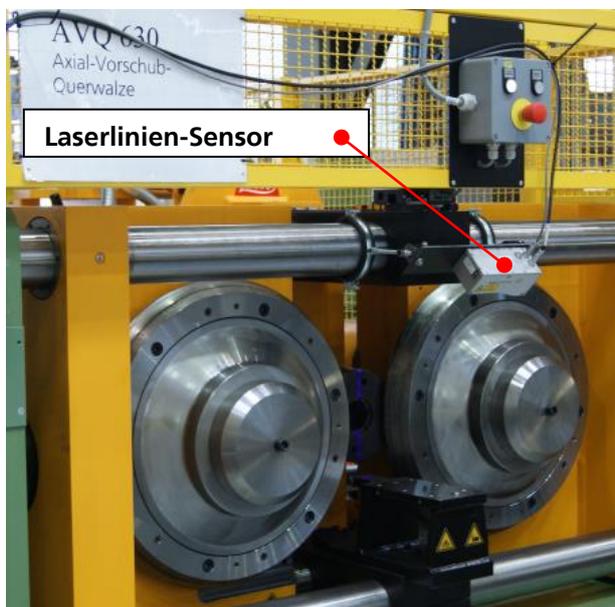


Bild 2: Laser Liniensensor an einer Querwalze positioniert

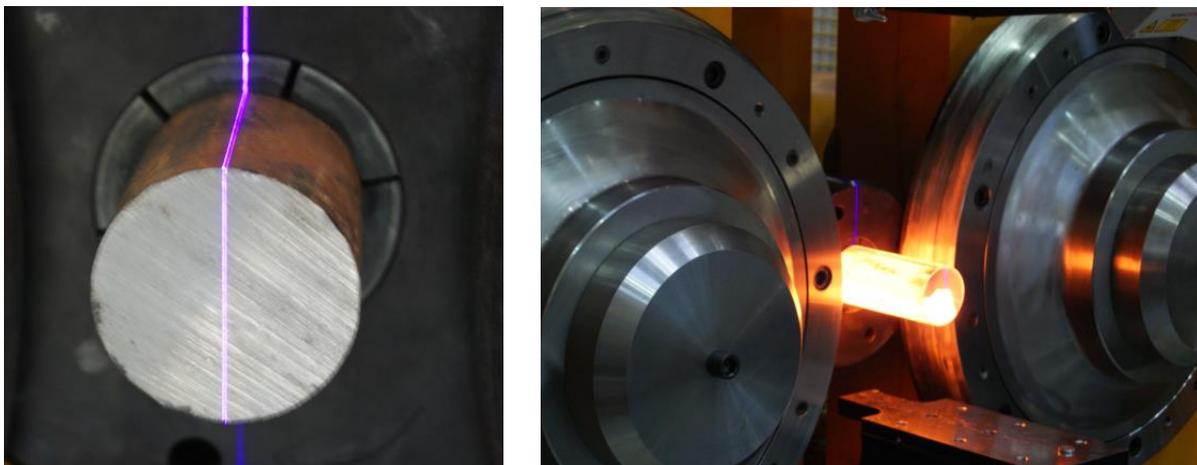


Bild 3: Blaue Laser-Messlinie auf kaltem und glühendem Teil

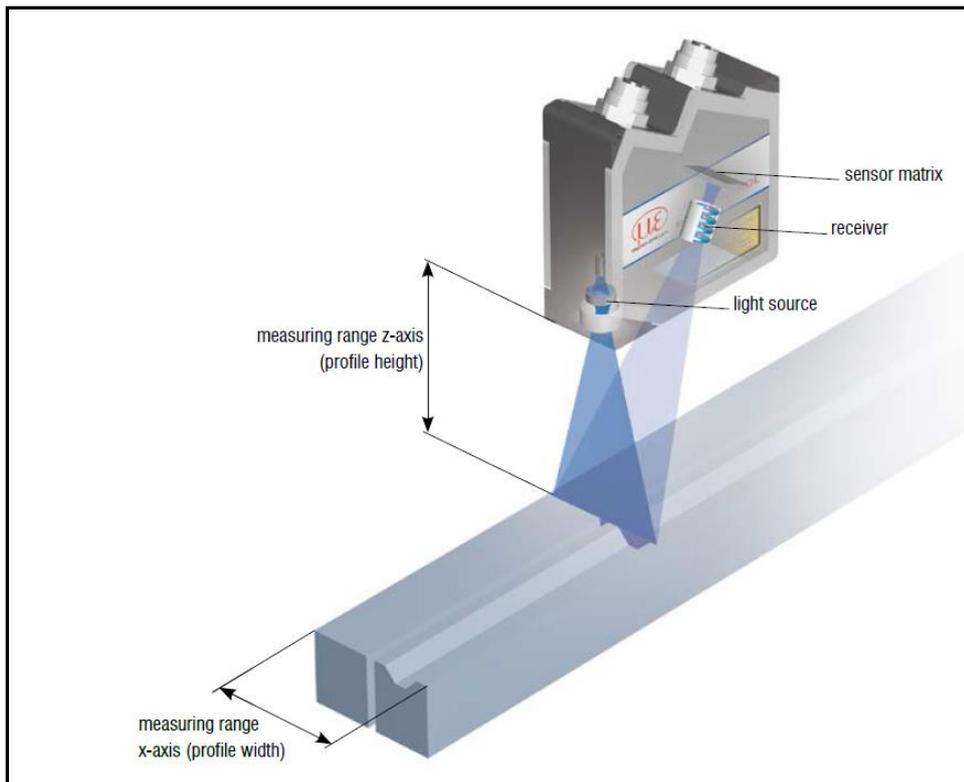


Bild 4: Darstellung des Messprinzips eines Laserlinien-Scanners, Bildquelle [MEp18_2]

Entsprechend dem Sortiment der zu bewertenden Proben und der Eignung für die Durchführung von prozessnahen Messungen an heißen und glühenden Teilen wurde eine Leistungsbeschreibung erstellt. Neben den technischen Parametern (Laserfarbe, Messbereich, Genauigkeit, Messfrequenz) war die Verfügbarkeit eines Schutzgehäuses das die Sensorik vor zu hoher Erwärmung und den im Punkt 3.1.1 genannten Umgebungsbedingungen in der Schmiede schützt, ein wichtiges Auswahlkriterium. Der Sensor sollte bereits für den Einsatz unter Prozessbedingungen in der Schmiede so gut wie möglich vorbereitet sein.

Diese Leistungsbeschreibung wurde an vier Firmen verschickt und entsprechende Angebote angefordert. An Hand der Angebote wurde ein Sensors LLT2900-100/BL der Firma Micro-Epsilon ausgewählt. Die Entscheidung zugunsten dieser Sensorik beruht auf folgende drei Prämissen, die Parametern des Sensors und der Software entsprechen den Vorgaben, ein komfortables Schutzgehäuse ist im Leistungspaket enthalten und der vorgegebene Preisrahmen kann eingehalten werden.

Da im IWU Erfahrungen auf dem Gebiet der Bildaufnahme und -verarbeitung vorhanden sind, lag es nahe auch Untersuchungen mit dieser Technik vorzunehmen. Vorteilhaft ist die digitale Kamertechnik dahingehend, dass entsprechend dem auszuwertenden Messfeld mit geeigneter Optik ein relativ großer Abstand zum Messobjekt realisiert werden kann. Nachteilig ist, dass mit einer Kamera nur eine 2D Auswertung durchgeführt werden kann. Es muss sich somit auf bestimmte Geometrien, wie z. B. Bestimmung von Durchmessern oder laterale Maße, beschränkt werden.

Die Stereokameratechnik wäre hier ein weiterer Lösungsansatz. Eine entsprechende Technik stand aber während der Projektlaufzeit nicht zur Verfügung. Die prinzipielle

Eignung digitaler Kameratechnik hinsichtlich der Spezifika für die Vermessung heißer Schmiedeteile kann aber auch mit einer herkömmlichen 2D-Auswertung erprobt werden.

3.4 Beschreibung Messplatz und Versuchsdurchführung

Zur Durchführung von Versuchen wurde ein Labormessplatz konzipiert und erstellt. Mit diesem Messplatz soll demonstriert werden, wie der Ablauf der Messung von heißen Teilen direkt nach der Massivumformung ablaufen könnte. Zwei wichtige Prämissen sind zu beachten. Zum einen muss der Messplatz stabil und sicher sein, da Messungen an sehr heißen Proben (über 1000°C) durchgeführt werden sollen. Zum zweiten muss eine gute Zugänglichkeit gewährleistet sein um die Proben im Messfeld schnell positionieren zu können, damit noch keine merkliche Abkühlung erfolgt.

Das Grundkonzept besteht darin, die Sensorik an einer motorischen Verschiebeeinheit zu positionieren. Durch diese Verschiebeeinheit kann die Messtechnik schnell zwischen der Messposition und einer Park-Position hin und her bewegt werden. In der Park-Position ist die Messtechnik vor Umgebungseinflüssen geschützt. Dies kann im Produktionsprozess eine geschlossene Kammer sein, die die Technik vor Wärmestrahlung und weiteren Umgebungseinflüssen abschirmt. Liegt ein zu prüfendes Bauteil im Messfeld, wird die Sensorik für die Zeit der Datenaufnahme zum und über das Messobjekt bewegt und fährt sofort wieder in die Park-Position. Die Sensorik ist somit nur während der Datenaufnahme in unmittelbarer Nähe des heißen Messobjektes. Damit wird gewährleistet, dass die Messtechnik nur für eine kurze Zeit der Wärmestrahlung, die bei großen Teilen zu einer schnellen Erwärmung der umgebenen Bauteile führt, ausgesetzt ist. Zusätzlich erfolgt eine ständige Überwachung der Sensortemperatur, um eine Überhitzung sofort zu erkennen und ev. einen Alarm auszulösen. Im Bild 5 ist der gesamte Messplatz dargestellt.



Bild 5: Labormessplatz, links: Grundgestell mit motorischer Lineareinheit, Sensorik und Probenablageplatz, recht: PC-Technik zur Steuerung des Messplatzes

3.4.1 Komponenten

Der Laboraufbau umfasst folgende Hauptkomponenten:

- das Grundgestell,
- Ablageplatz für heiße Proben,
- Heizofen (Kammerofen LH 15/14, Fa. Nabertherm),
- motorische Lineareinheit mit Ansteuereinheit (LES5 der Firma Isel Germany AG),
- manuelle Lineareinheit zur Höheneinstellung,
- Laserscanner (Fima Micro-Epsilon, Typ: LLT2900-100/BL),
- CMOS-Kamera (Firma IDS, Typ: μ Eye UI-522SE-M; Objektiv: Cosmicar / Pentax, TV ZOOM LENS, 8-80 mm,1:1),
- Temperatursensoren mit Datenerfassungssystem (PT 100),
- Thermokamera (Firma Testo, Typ: t884),
- Software
 - o zur Ansteuerung der Lineareinheit,
 - o zur Datenaufnahme der Laser-Scannerdaten,
 - o zur Bildaufnahme der Kamera,
 - o zur Speicherung der Temperaturverläufe.

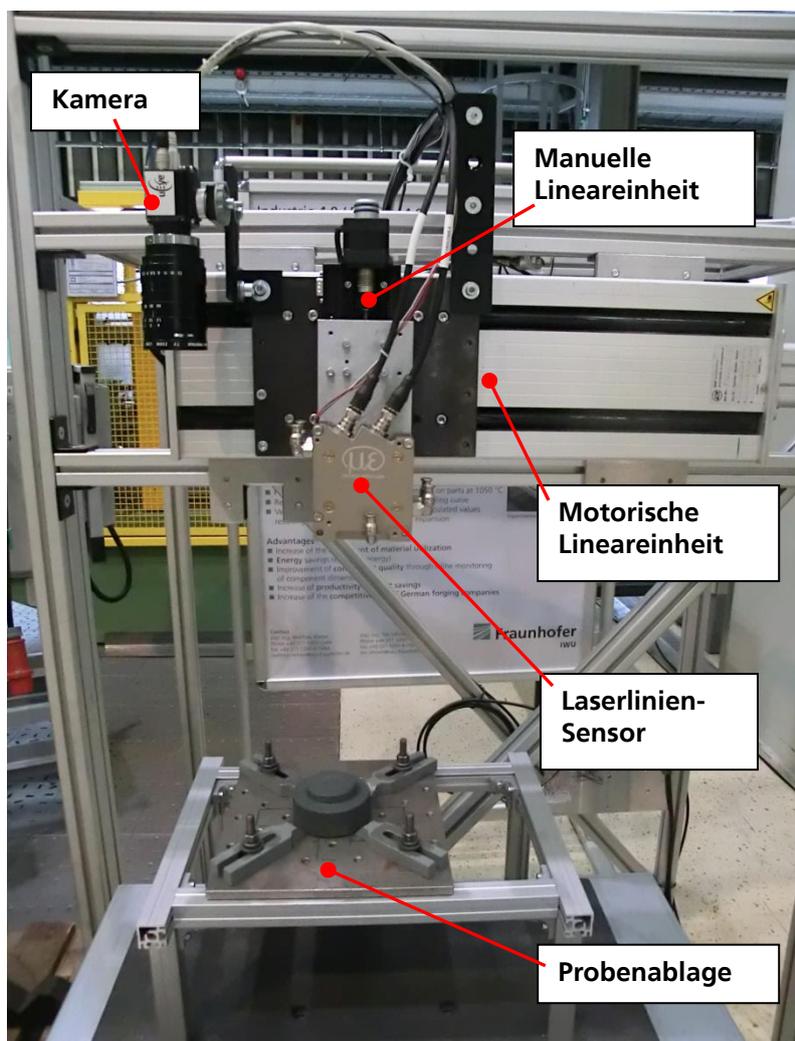


Bild 6: Hauptkomponenten des Labormessplatzes

Das Grundgestell des Laboraufbaus wurde mit Aufbauelementen eines Systembaukastens realisiert. An diesem Gestell sind die Hauptkomponenten (Lineareinheit mit Sensoren, Stromversorgung, Verkabelung) fixiert. Vor diesem Gestell wurde ein stabiler Tisch mit einer Stahlblechabdeckung angeordnet. Auf dem Tisch wurde über eine Stahlplatte ein Ablageplatz für die heißen Proben, ebenfalls mit einer Stahlplatte, realisiert. Mit diesem Grundaufbau wurde eine stabile Anordnung geschaffen, die es erlaubt heiße Probeteile sicher zu vermessen. Am Schlitten der motorischen Linearverschiebeeinheit wurde eine manuelle Verschiebeeinheit zur Höhenjustage und daran der Laserscanner befestigt. Die Höheneinstellung „Laserscanner–Ablageplatz“ wurde so gewählt, dass sich das Messobjekt ca. in der Mitte des Messbereiches des Scanners befindet. Zusätzlich wurde am Schlitten der Lineareinheit die Kamera positioniert.

Zur Steuerung des Messplatzes wurden mehrere Computer, die neben dem Grundgestell angeordnet sind, eingesetzt (Bild 7). Für jede Steuerungsaufgabe (Bewegung der Lineareinheit, Aufnahme der Daten des Laser-Scanners, Bildaufnahme der Kamera, Temperaturerfassung) ist eine spezielle Software erforderlich. Es ist möglich, die gesamte Steuerung des Messplatzes mit einem leistungsfähigen PC zu realisieren. Für den Laboraufbau wurde auf diese Integration der verschiedenen Software in einem Steuerprogramm verzichtet, da für die generelle Aussage der Messbarkeit von heißen Proben auch mit dieser modularen Lösung bewertbare Ergebnisse erzielt werden können.

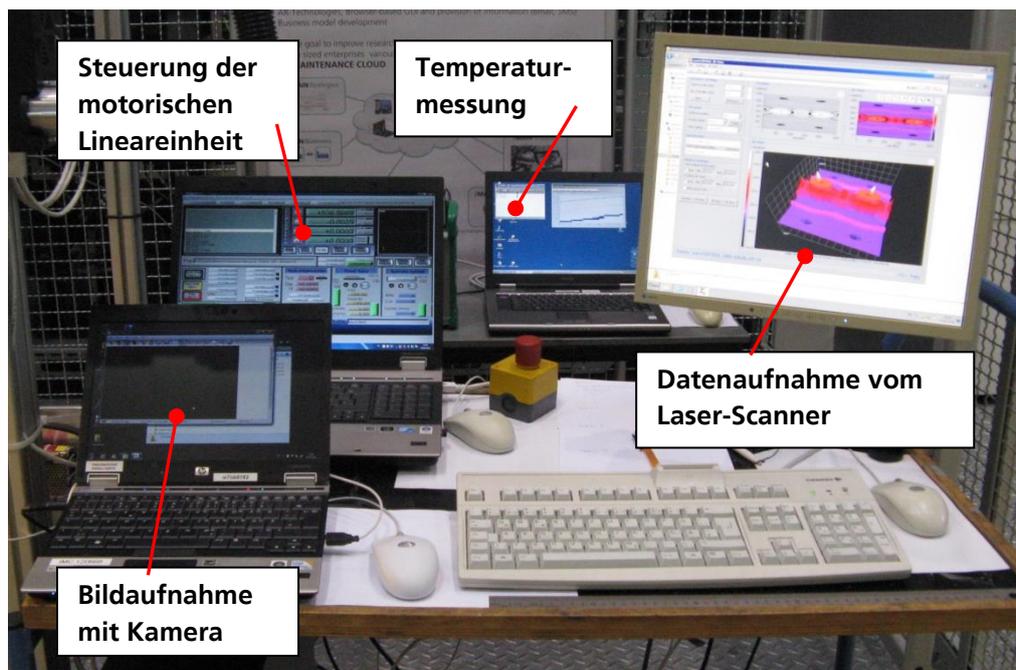


Bild 7: PC-Technik zur Steuerung des Labormessplatzes

Während der Messungen der heißen Probe wurde die Temperatur der Probe mit der Thermokamera protokolliert. Sie wurde mit einem Stativ vor den Messplatz aufgestellt (Bild 8).



Bild 8: Falschfarbenbild der Thermokamera während der Messung der Probentemperatur

3.4.2 Wärmeschutzmaßnahmen

Im Laboraufbau wurden Wärmeschutzmaßnahmen vorgesehen, die auf Grund der relativ kleinen Proben und der damit geringen Wärmestrahlung nicht vollständig ausgeschöpft werden mussten. Dies bestätigte die begleitende Temperaturmessung am Laser-Scanner, an der Kamera (Bild 9) und an der Unterseite der Lineareinheit (Bild 10).

Zum Schutz des Laserscanners wurde der Sensor in einem Schutzgehäuse integriert (Bild 9). Dieses Gehäuse umschließt den Sensor auf der dem Messobjekt zugewandten Unterseite und den Seitenflächen und bietet die Möglichkeit, mittels Kühlwasser eine aktive Kühlung vorzunehmen. Die Laser Austritts- und Eintrittsöffnungen sind mit einer auswechselbaren Glasscheibe geschützt. Um diese Scheibe vor einer Verschmutzung durch umherfliegende Funken o. ä. weitgehend zu schützen, ist die Möglichkeit vorhanden, Sperrluft anzuschließen. Dieses Schutzgehäuse ist genau an die Form des Sensors angepasst und verfügbar.

Für die Kamera wurde keine spezielle Schutzvorrichtung eingesetzt. Durch die Wahl der Optik konnte die Kamera in einem genügend großen Abstand von der Wärmequelle positioniert werden, damit keine unzulässige Erwärmung erfolgte. Es ist jedoch möglich durch entsprechende mechanische Schutzbleche oder mit einer Umhausung, ähnlich der des Laser-Scanners, die Wärmestrahlung abzuhalten.

Für den Wärmeschutz ist ebenfalls wichtig, die Verweilzeit der Sensorik über dem Messobjekt nur so lang wie nötig auszudehnen. Im Laboraufbau ist dies durch die Lineareinheit realisiert. Im Prozess könnte diese Aufgabe auch ein Roboterarm übernehmen, der die Sensoren kurzzeitig über dem heißen Bauteil positioniert.

Die im Laboraufbau erfolgten Maßnahmen sind prinzipiell auch unter realen Prozessbedingungen realisierbar.

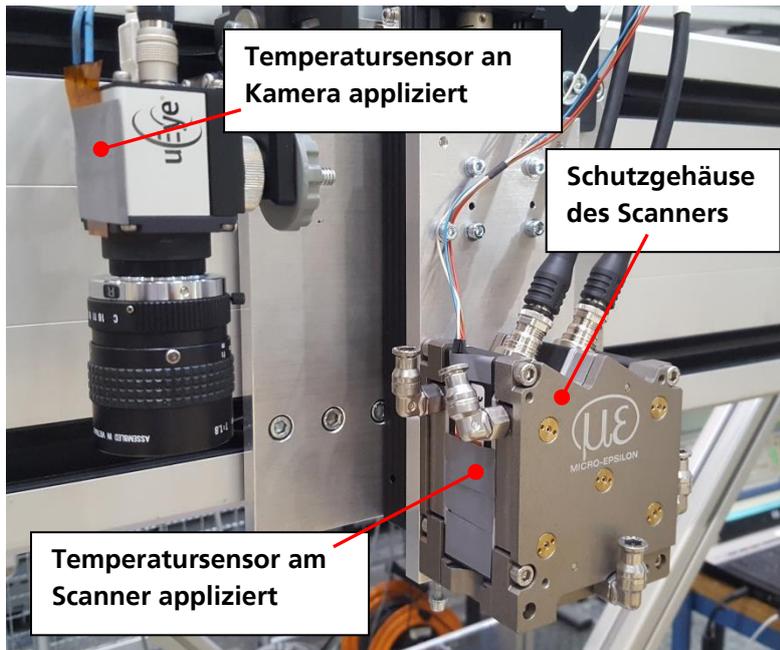


Bild 9: Laserscanner und Kamera mit Temperatursensoren

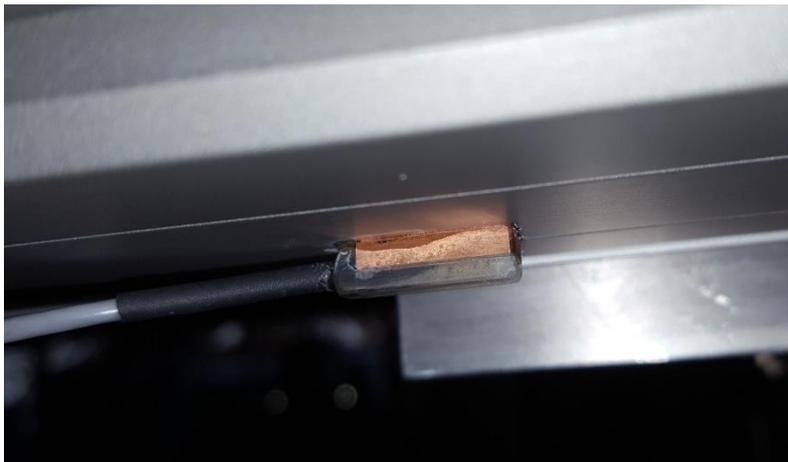


Bild 10: Temperatursensor an der Unterseite der Lineareinheit

3.4.3 Auswahl von Musterteilen

Die auszuwählenden Musterteile sollten unterschiedliche Geometrielemente enthalten, wie z. B. Höhenmaße und Durchmesser, um eine umfassende Bewertung der Messsensorik vornehmen zu können. Ausserdem sollten diese Teile auch für die Durchführung von Versuchen gut handhabbar sein.

Für die Versuche wurde ein Musterteil aus kohlenstoffreichen Hartmetalllegierungen auf Chrom-Cobalt-Basis (Stellite®) verwendet (siehe Bild 11, Bild 12). Dieses Material weist auch eine hohe Zunderbeständigkeit auf. Es zeigte sich, dass bis zu einer Temperatur von 1200°C keine Zunderbildung einsetzte. Damit war es möglich eine wiederholte Erwärmung und Abkühlung durchzuführen und reproduzierbare Messergebnisse zu erhalten.

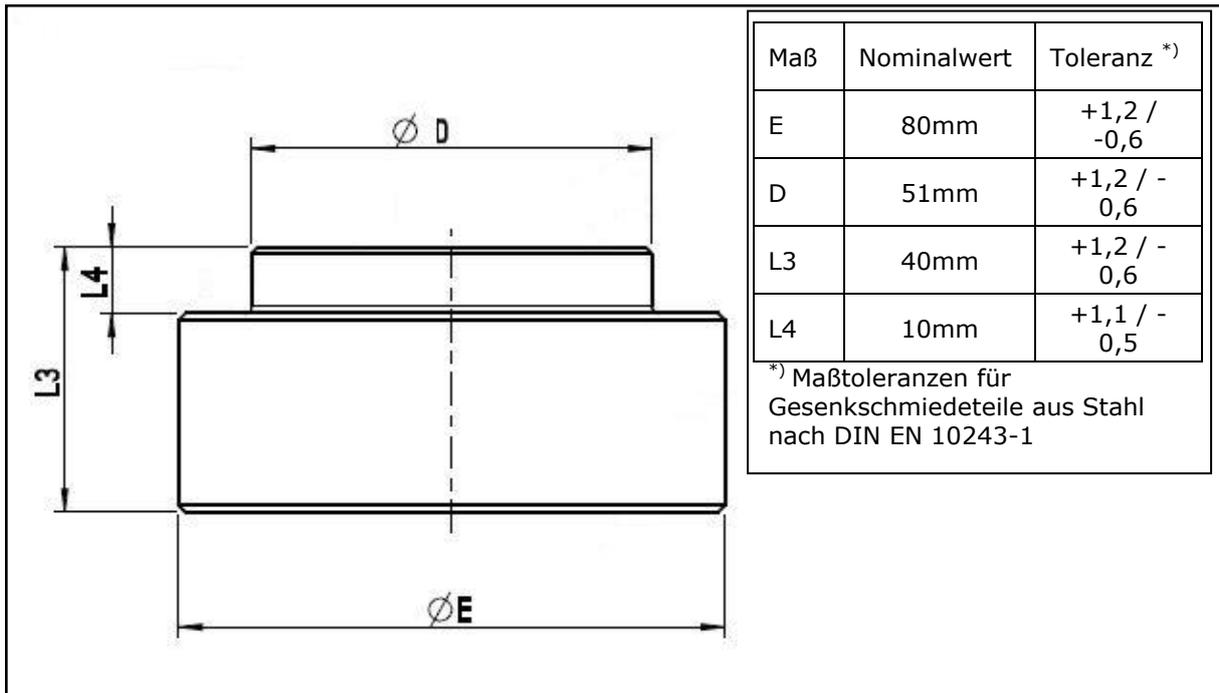


Bild 11: Musterteil Stauchstempel, die Maßangabe ist der Nominalwert, der genaue Wert wird durch Messungen am kalten Teil (20 °C) bestimmt

An Hand des thermischen Ausdehnungskoeffizienten (Tabelle 2) kann die Dehnung des Bauteils in Abhängigkeit von der Temperatur und des Ausgangsmaßes bei 20°C berechnet werden. Für den relevanten Temperaturbereich wurde die Sollkurve berechnet und als Referenzkurve für die mit der Sensorik gemessenen Werte genutzt. Im Bild 13 ist als Beispiel die Sollkurve des Maßes L3 dargestellt.

Temperatur [°C]	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
Koeffizient [$\mu\text{m}/(\text{m}\cdot\text{K})$]	11,35	12,95	13,6	13,9	14,2	14,5	14,7	15,05	15,5	17,5

Tabelle 2: Thermischer Ausdehnungskoeffizient von Stellite® 6 (Wert gilt von 20°C bis zur angegebenen Temperatur) [Ste18]

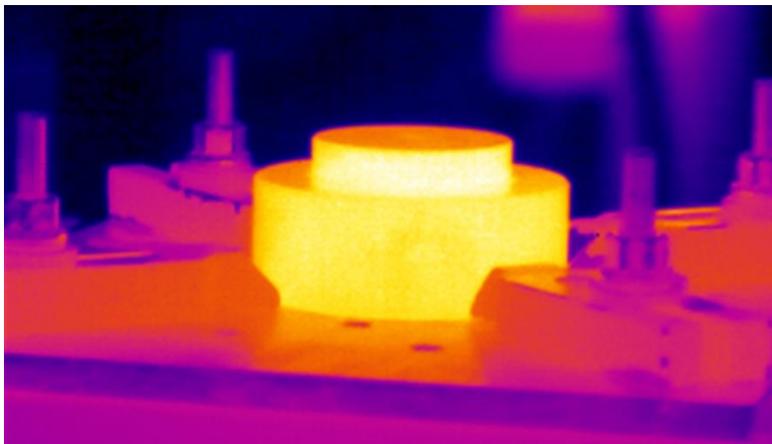


Bild 12: Falschfarbenbild des Probesteils, aufgenommen mit der Thermokamera während der Temperaturmessung

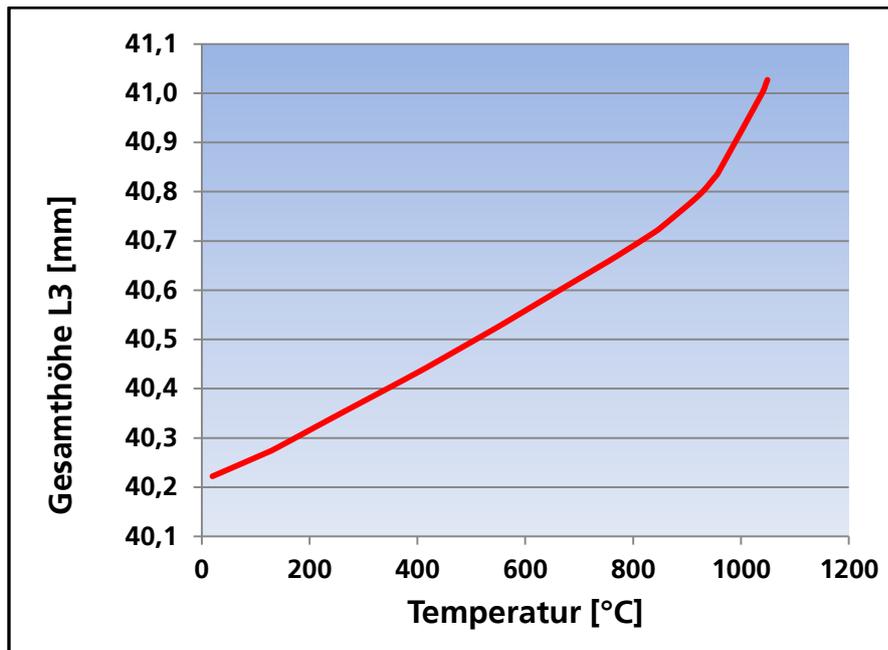


Bild 13: Berechnete Sollkurve des Maßes L3 in Abhängigkeit von der Temperatur

3.4.4 Versuchsdurchführung

Bei der Durchführung der praktischen Versuche wurde folgende Vorgehensweise festgelegt. Zunächst erfolgte die Messung am kalten (20°C) Bauteil. Diese Messungen wurden mit konventionellen Messmitteln, vorzugsweise mit digitalem Messschieber, und mit dem Laser-Scanner und der Kamera durchgeführt. Dabei wurden mindestens 12 Einzelmessungen an unterschiedlichen Positionen des Bauteils vorgenommen und daraus der Mittelwert berechnet. Bei den Messungen mit dem Laser-Scanner wurde das Teil auf dem Ablageplatz mehrfach gedreht, um unterschiedliche Positionen zu erfassen. Die Nutzung von höher auflösenden konventionellen Messmitteln, z. B. eine Zeiss KMG Prismo 7 mit VAST-Tastkopf, ist auf Grund der erforderlichen Bauteilgenauigkeit nicht notwendig.

Zur Vermessung von heißen Teilen wurde das Messobjekt im Kammerofen auf ca. 1200°C erwärmt. Im glühenden Zustand wurde das Bauteil auf die Probenablage gelegt und sofort mit der Messung begonnen. Es wurden Messungen mit dem Laser-Scanner und der Kamera durchgeführt. Dabei wurde die Temperatur mit Hilfe einer Thermokamera bei jeder Messung protokolliert (Bild 8), um jedem Maß die Bauteiltemperatur zuordnen zu können. Das Bauteil wurde in der Messzone belassen und während der Abkühlphase ständig neu vermessen. Dieser Ablauf – Erwärmung und Messung während der Abkühlphase – wurde mehrfach wiederholt (Diagramm 1). Ein Maßvergleich mit konventionellen Messmitteln ist bei heißen Teilen nicht möglich. Deshalb wurden die Messwerte mit der berechneten Sollkurve verglichen und bewertet (siehe Punkt 3.4.3).

Im abgekühlten Zustand wurde das Bauteil erneut mit konventionellen Messmitteln und der Laser- und Kameratechnik gemessen.

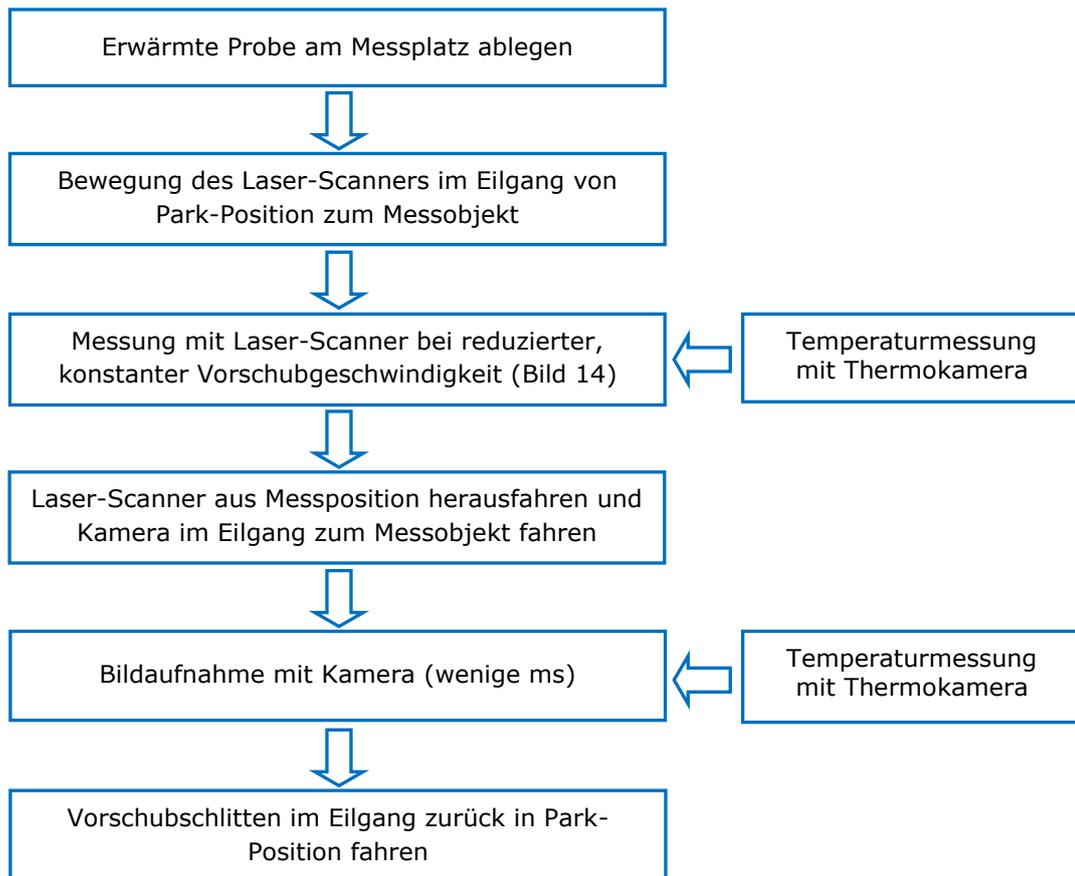


Diagramm 1: Ablauf der Messung

Im glühenden Zustand (Bild 14) erfolgte die Bildaufnahme mit der Kamera ohne Fremdbeleuchtung, der Radius des glühenden Bauteils zeichnete sich deutlich im Kamerabild ab. Nach der glühenden Phase musste eine Fremdbeleuchtung der Messszene vorgenommen werden, um den Radius im Bild detektieren zu können.



Bild 14: Glühendes Messobjekt während der Messung, links ist die blaue Laserlinie beim Scan mit dem Lasersensor zu sehen, rechts das Kamerabild

3.5 Bewertung der Messdaten

Für die Auswertung der Messungen mussten unterschiedliche Vorgehensweisen gewählt werden. Die Messwerte des Laser-Scanners wurden mit der Software „scanCONTROL 3D-View 3.0“ der Firma Micro-Epsilon in Form von 3D-Datensätzen gespeichert. Zur Auswertung dieser Daten wurde eine umfangreiche Software in Form von Excel-Makros erstellt, um die Durchmesser und die Höhenmaße der Probe ermitteln zu können. Zur Auswertung der Kamerabilder konnte die im IWU entwickelte Software Xeidana® [Xeid17] eingesetzt werden. An Hand vorgefertigter Algorithmen ist es möglich mit dieser Software eine intelligente Auswertung von Bildaufnahmen vorzunehmen.

3.5.1 Messdaten des Laserscanners

Die Datenaufnahme mit dem Laser-Scanner erfolgt durch Messung einzelner Linien, während der Sensor über das Messobjekt bewegt wird. Somit besteht der 3D-Datensatz aus einer Folge von 2D-Schnitten. Jeder Schnitt bewertet die Objektkontur an einer Sensorposition in horizontaler (X-Richtung) und in der Höhen-Ausdehnung (Z-Richtung, siehe Bild 4). Durch die Bewegung des Sensors über das Messobjekt wird entsprechend der Vorschubgeschwindigkeit und der Zeilenfrequenz (Frequenz der aufgenommenen Linien / Sekunde) des Scanners eine Vielzahl von Schnitten erzeugt, die die dritte Dimension (Y-Richtung) repräsentieren. Die dimensionale Auflösung dieser Y-Richtung, wird durch den Vorschub des Sensors über das Messobjekt und die Zeilenfrequenz des Sensors festgelegt. Die Genauigkeit in Y-Richtung ist somit hauptsächlich abhängig von der exakten und konstanten Geschwindigkeit der Vorschubeinheit. Um Fehlereinflüsse des Handlingsystems (Vorschubeinheit) auszuschließen, wurden zur Maßbewertung nur die durch den Sensor gemessenen Dimensionen (X- und Z-Richtung) herangezogen. Durch entsprechende Positionierung des Messobjekts und eine hohe Zeilenfrequenz ist in vielen Fällen mit diesen beiden Parametern eine Bestimmung der benötigten Maße möglich. Bei der Messwertaufnahme mit dem Laserscanner wurde eine Vorschubgeschwindigkeit von 200 mm/min gewählt. Die reine Messzeit betrug damit 24 s (Durchmesser der Probe 80 mm). Bei einer Zeilenfrequenz des Sensors von 140 Zeilen/s erhält man eine Auflösung in Y-Richtung von ca. 23 μm . Mit dieser Auflösung werden die Genauigkeitsanforderungen um ein Vielfaches übertroffen. Im realen Prozess kann eine höhere Vorschubgeschwindigkeit gewählt werden, um die Messzeit und die Aufenthaltsdauer der Sensorik über dem heißen Messobjekt zu verkürzen. Es existieren Laserlinien-Scanner, die Zeilenfrequenzen im kHz-Bereich realisieren. Damit ist eine Messzeitreduzierung mindestens um den Faktor 10 möglich.

Die Vorgehensweise der Maßermittlung soll im Folgenden an den Beispielen der Berechnung vom Durchmesser und Höhe kurz erläutert werden. Im 3D-Datensatz sind alle Schnitte entsprechend Bild 15 enthalten. Für die Berechnung der beiden Durchmesser wird durch die Auswertesoftware der Messschnitt ausgewählt, der auf dem Z-Niveau des zu ermittelnden Durchmessers die größte X-Ausdehnung hat. Durch das enge Raster der Messlinien (23 μm) wird gewährleistet, dass der größte Durchmesser erfasst wird. Zur Erhöhung der Messgenauigkeit und Eliminierung von Fehlmessungen wird der Mittelwert über mehrere Linien gebildet. Es hat sich gezeigt, dass der Mittelwert über 7 Schnitte eine gute Lösung darstellt. Durch diese Berechnung wird der Mittelwert des Durchmessers über einen Bereich von ca. 140 μm (6 x 23 μm) in Y-Richtung gebildet. Eine einfache Rechnung belegt, dass an der Position des größten Durchmessers

bei einem Kreis mit dem Durchmesser von 50 mm die Durchmesseränderung über diese Y-Distanz kleiner 0,001 mm ist. Die Mittelwertbildung führt somit zu keiner Verfälschung der Messwerte.

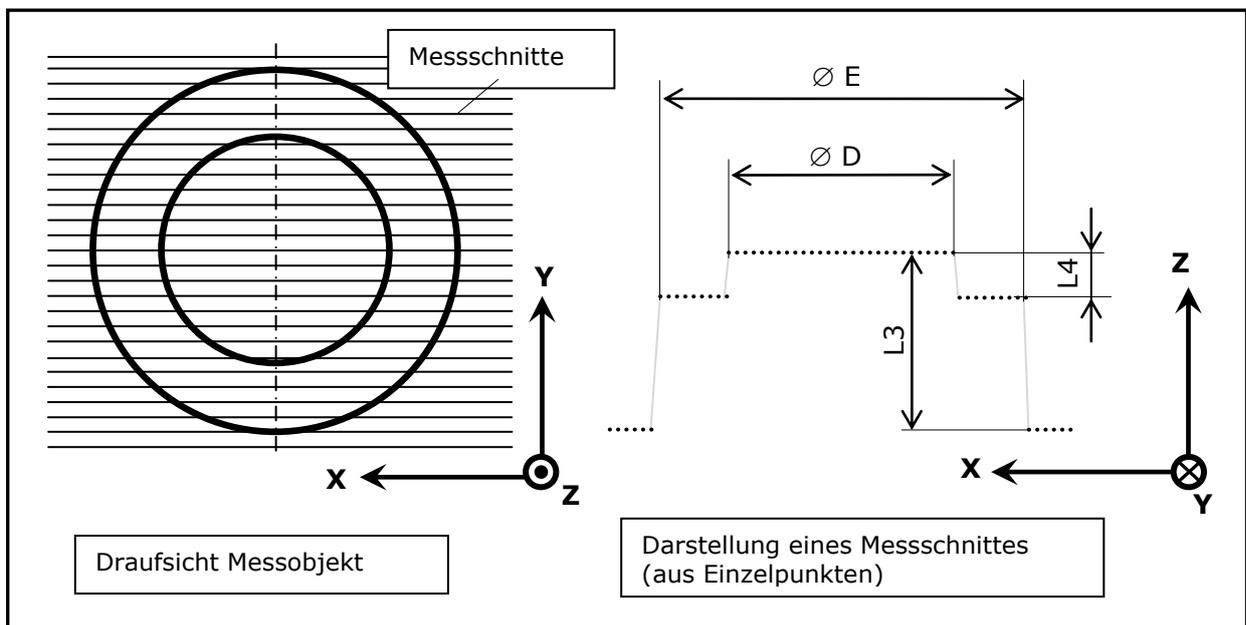


Bild 15: Prinzipdarstellung der Auswertung von Messschnitten

Für die Bestimmung der Höhenmaße werden die Z-Koordinaten der 2D-Schnitte ausgewertet. Die im Projekt genutzte Probe ist durch 2 Höhenstufen repräsentiert. Es müssen somit drei Höhenniveaus (Z-Richtung) bestimmt werden (Grundfläche, mittlere Ebene und obere Ebene), um die Gesamthöhe $L3$ und die Höhe des Absatzes $L4$ durch einfache Berechnung zu bestimmen. Als Grundfläche kann die Ablageebene der Probe genutzt werden. Nach Festlegung der drei Z-Bereiche (Bereichsgrenzen können relativ großzügig festgelegt werden) werden die Messpunkte dem jeweiligen Bereich zugeordnet. Eine anschließende Mittelwertbildung dient zur Eliminierung von Fehlmessungen. Man erhält nun drei Z-Werte, die die Höhenstufen repräsentieren. Durch Subtraktion (obere Ebene - Grundfläche, obere Ebene - mittlere Ebene) erhält man die Höhenmaße. Vorzugsweise werden nicht alle Z-Werte für die Berechnung herangezogen, um die Berechnung zu beschleunigen. Die Nutzung von z. B. 100 Schnitten des Bereiches um den maximalen Durchmesser gewährleistet eine ausreichende Genauigkeit.

Auch für weitere Geometrien, z. B. Radien, Durchbrüche o. a. sind entsprechende Algorithmen realisierbar. Für die Bewertung komplexer Geometrien ist ein Vergleich mit CAD-Daten möglich. Hierzu ist entsprechende Form- und Maßanalysesoftware nutzbar, die teilweise frei verfügbar ist [GOM18].

3.5.2 Messdaten der Kamerabilder

Die Nutzung von Kamertechnik zu Maßbestimmung normal temperierter Objekte ist Stand der Technik. Hierzu existieren bereits sehr viele Anwendungen in der Industrie [VDMA17]. Im IWU wurde eine Software Xeidana® entwickelt [Xeid17], die Messwerte unterschiedlichster Sensorik verarbeiten kann und bei der Analyse dieser Daten einen Katalog von Bewertungsalgorithmen zur Verfügung stellt. Diese Algorithmen können

verknüpft werden, um eine Bewertungssequenz zu erstellen. Solche Sequenzen können nach einer Bildaufnahme automatisiert gestartet werden. Damit ist eine online-Bewertung von Bildern möglich und kann im laufenden Prozess eingesetzt werden kann.

Die glühenden und sich abkühlenden Proben wurden mit einer 2D-CMOS-Kamera aufgenommen. Mit einem geeigneten Objektiv wurden die Aufnahmen so gestaltet, dass das Messobjekt möglichst bildfüllend dargestellt wurde. Damit ist die bestmögliche Maßauflösung mit der vorhandenen Kamera möglich. Mit einer 2D-Sensorik ist nur eine zweidimensionale laterale Bewertung möglich. Aus diesem Grund wurde nur der Durchmesser E der Probe vermessen.

Mit einem in Xeidana® erstellten Ablaufplan (Bild 16) ist die Berechnung des Durchmessers möglich. Vom gemessenen Bild wird zunächst eine HSI-Zerlegung (Aufspaltung des Bildes in Farbwert, Sättigung und Intensität, HSI: hue saturation intensity) vorgenommen und die Intensitätskomponente des Bildes einem Geometrievermessungsmodul zugeführt. Im Vermessungsmodul werden in vier Bildbereichen Intensitätssprünge identifiziert, die auf einen Kreisbogen liegen müssen. Das Modul berechnet nun automatisch den ermittelten Durchmesser des Kreises. Entsprechend einer zuvor erfolgten Kalibrierung (9,13 Bildpixel/mm) wird der Durchmesser direkt in Millimeter berechnet und ausgegeben. Mit diesem Kalibrierfaktor ist eine Messauflösung von ca. 0,1 mm zu erzielen. Die zur Verfügung stehende Kamera hat eine Pixelanzahl von 750 x 480 und ist mit ca. 0,4 Megapixel (MP) Auflösung eine Kamera für allgemeine Anwendungen. Mit höher auflösenden Kameras, z. B. 2 MP (1600 x 1200 Pixel), ist bereits die doppelte Auflösung zu erzielen. Diese Kameras sind ebenfalls bereits Stand der Technik und stehen in einer großen Vielfalt zur Verfügung.



Bild 16: Ablaufplan der Bewertungssequenz und Detektion von Intensitätssprüngen mit Xeidana®

3.5.3 Messergebnisse

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Messungen dargestellt.

In Tabelle 3 sind zunächst die Messwerte des kalten Bauteils (bei 20°C) vor und nach der Erwärmung zusammengestellt. Eine Reinigung nach der Erwärmung erfolgte nicht, um prozessnahe Bedingungen zu simulieren. Es zeigt sich, dass zwischen den Messungen vor und nach der Erwärmung bei allen drei Verfahren Maßabweichungen auftreten. Diese Abweichungen liegen in einer Größenordnung bis 0,14 mm. Dies ist auf Ungenauigkeiten des Messverfahrens und auf Unregelmäßigkeiten der Oberfläche, die nicht die Qualität z. B. einer gedrehten Oberfläche aufweist, zurückzuführen. Der Vergleich der unterschiedlichen Messverfahren zeigt Abweichung in ähnlicher Größenordnung und bestätigt somit die ermittelten Messwerte.

Geometrie	Konventionell			Laser-Scanner			Kamera		
	vor	nach	delta	vor	nach	delta	vor	nach	delta
	[mm]								
Durchmesser E	80,04	80,06	-0,02	80,06	80,07	-0,01	79,93	80,04	-0,11
Durchmesser D	51,04	50,90	0,14	50,89	50,96	-0,07	---		
Gesamthöhe L3	40,28	40,22	0,06	40,14	40,26	-0,12	---		
Höhe Absatz L4	9,90	9,83	0,07	9,94	10,03	-0,09	---		

Tabelle 3: Maßzusammenstellung bei 20°C, vor und nach der Erwärmung, Die Angabe der zweiten Stelle nach dem Komma bei der konventionellen Messung (digitaler Messschieber) ergibt sich aus der Mittelwertbildung über 12 Messungen.

In den folgenden Diagrammen und in Tabelle 4 sind die Messergebnisse der vier Geometrien der Laserlinien-Scanner- und Kameramessung/Bildverarbeitung (BV) für den gesamten Temperaturbereich und aller Messzyklen zusammengestellt. Wie bereits angemerkt sind die Messergebnisse von mehreren Abkühlzyklen in einem Diagramm zusammengefasst. Für jede Geometrie wurden zwei Diagramme erstellt. Zunächst sind die konkreten Messwerte in Abhängigkeit von der Temperatur angegeben. Zum Vergleich wurde die mit dem Wärme-Ausdehnungs-Koeffizienten berechnete Sollkurve im gleichen Diagramm eingetragen. Die Abweichungen der Messwerte von der Sollkurve sind jeweils im zweiten Diagramm, ebenfalls in Abhängigkeit von der Temperatur, dargestellt. Daraus lässt sich die Größenordnung dieser Abweichungen gut erkennen und einschätzen. Im Folgenden wird die Gesamtheit dieser Abweichungen als Streubreite der Sensormessungen bezeichnet und dient als Bewertungskriterium für die Genauigkeit der Sensorik. In Tabelle 4 wurden die Ergebnisse in komprimierter Form zusammengefasst.

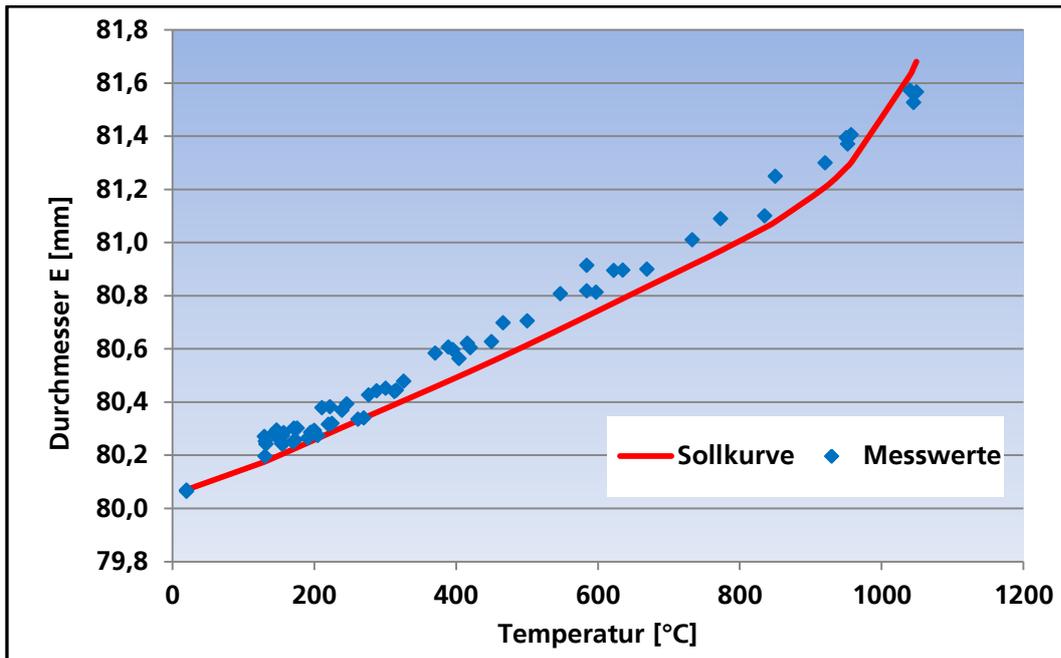


Diagramm 2: Durchmesser E, Vergleich der Messwerte des Lasersensors mit der Sollkurve

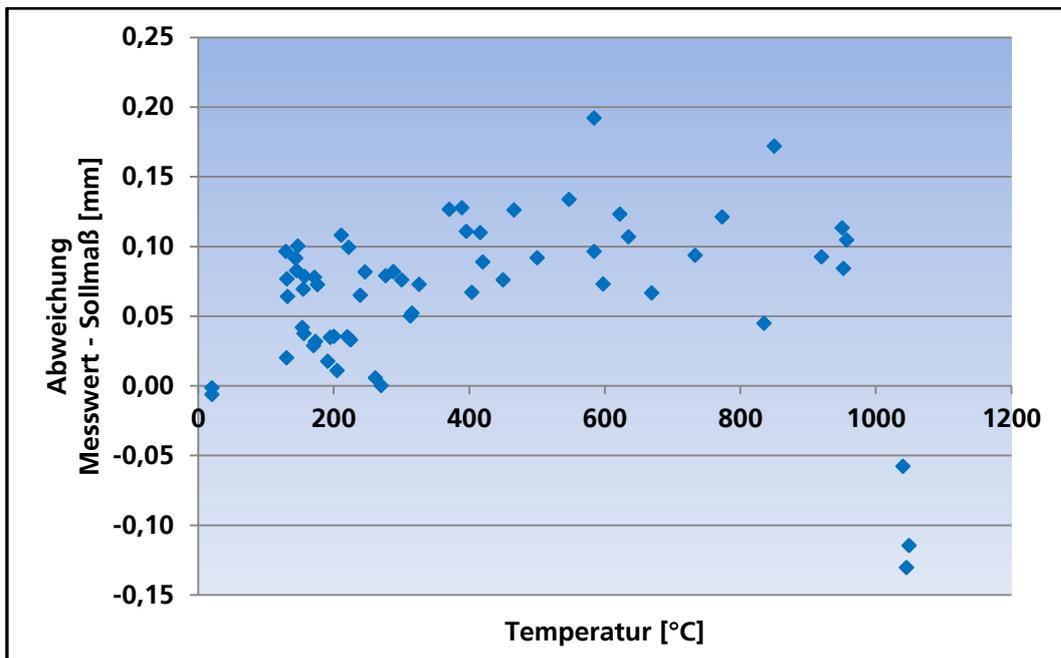


Diagramm 3: Durchmesser E, Darstellung der Abweichungen zwischen Lasersensor-Messwert und Sollkurve

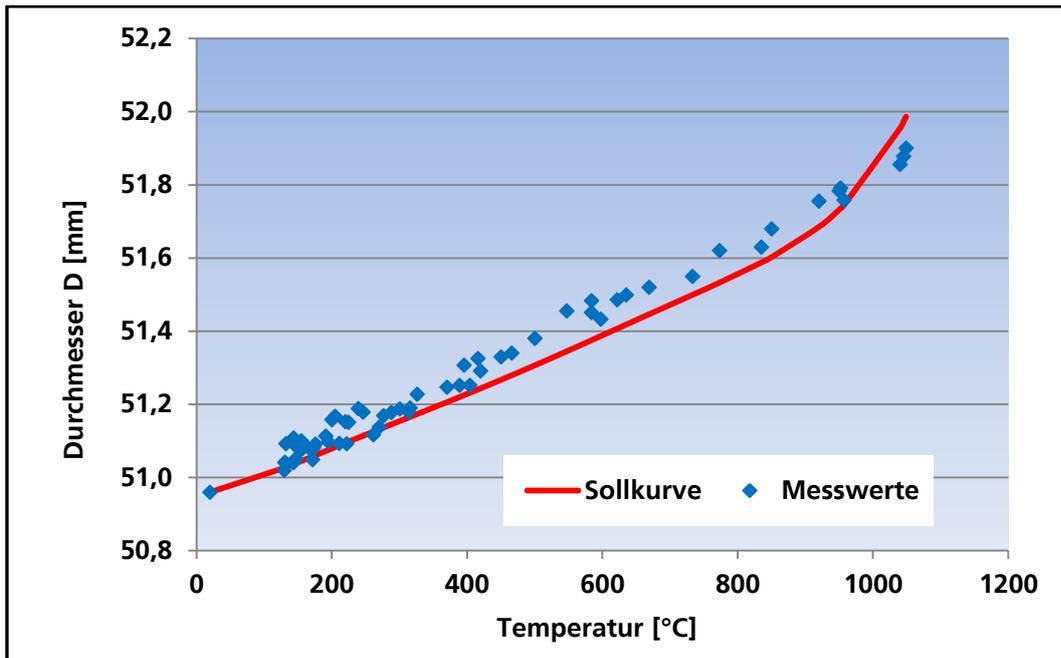


Diagramm 4: Durchmesser D, Vergleich der Messwerte des Lasersensors mit der Sollkurve

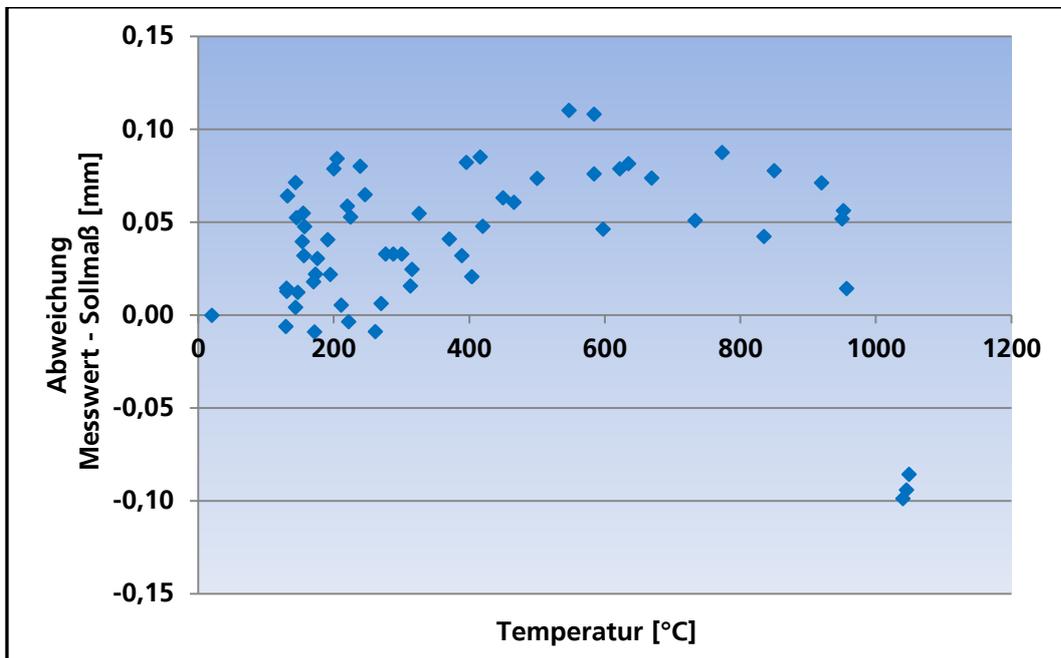


Diagramm 5: Durchmesser D, Darstellung der Abweichungen zwischen Lasersensor-Messwert und Sollkurve

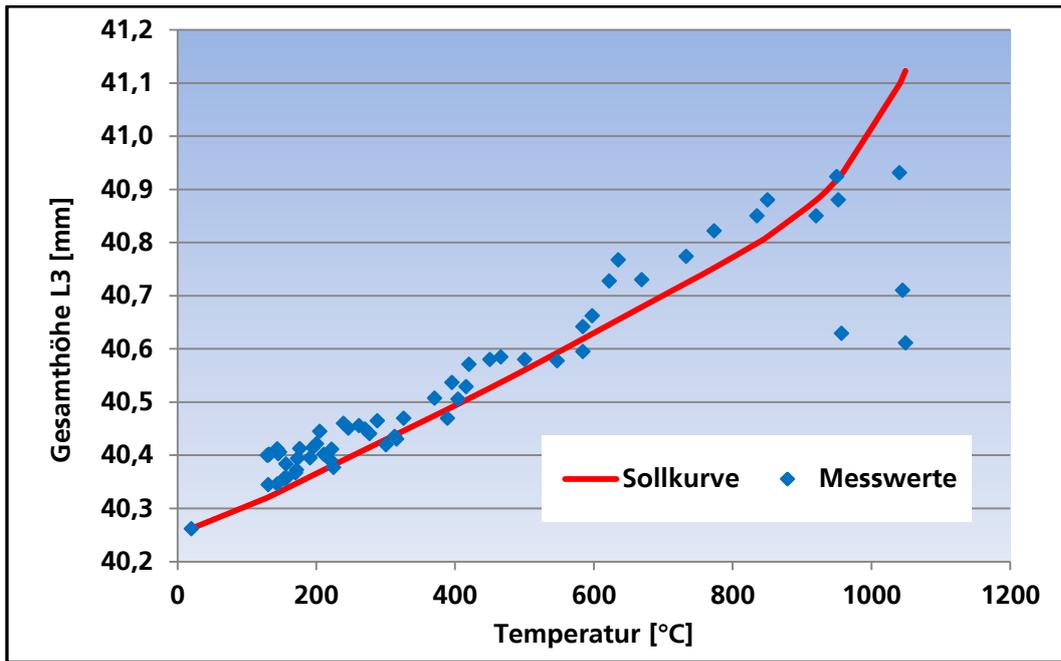


Diagramm 6: Gesamthöhe L3, Vergleich der Messwerte des Lasersensors mit der Sollkurve

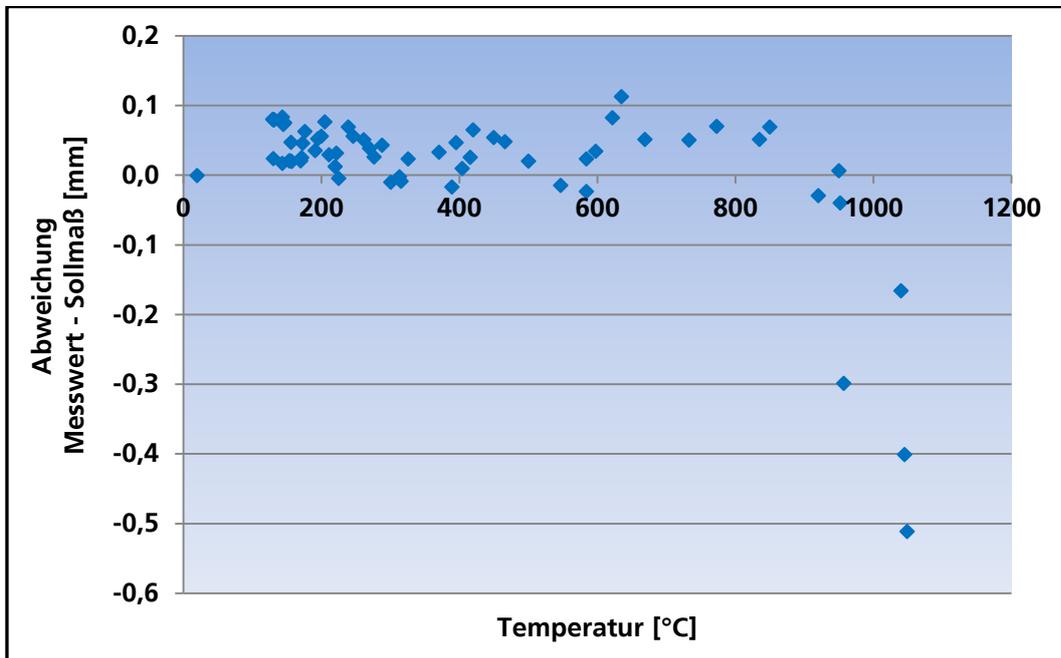


Diagramm 7: Gesamthöhe L3, Darstellung der Abweichungen zwischen Lasersensor-Messwert und Sollkurve

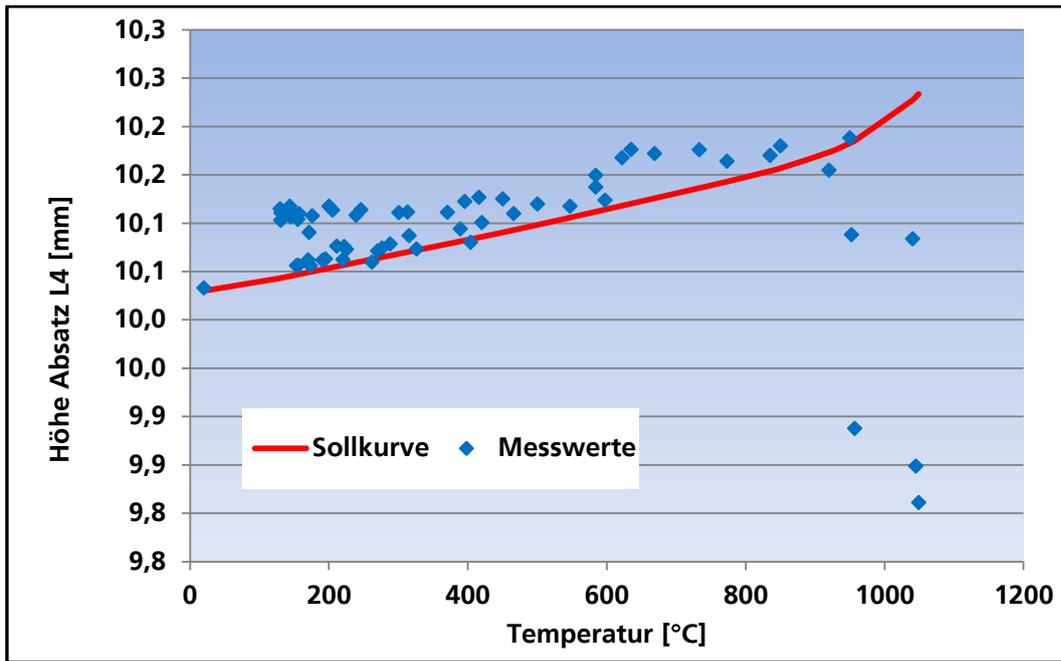


Diagramm 8: Höhe Absatz L4, Vergleich der Messwerte des Lasersensors mit der Sollkurve

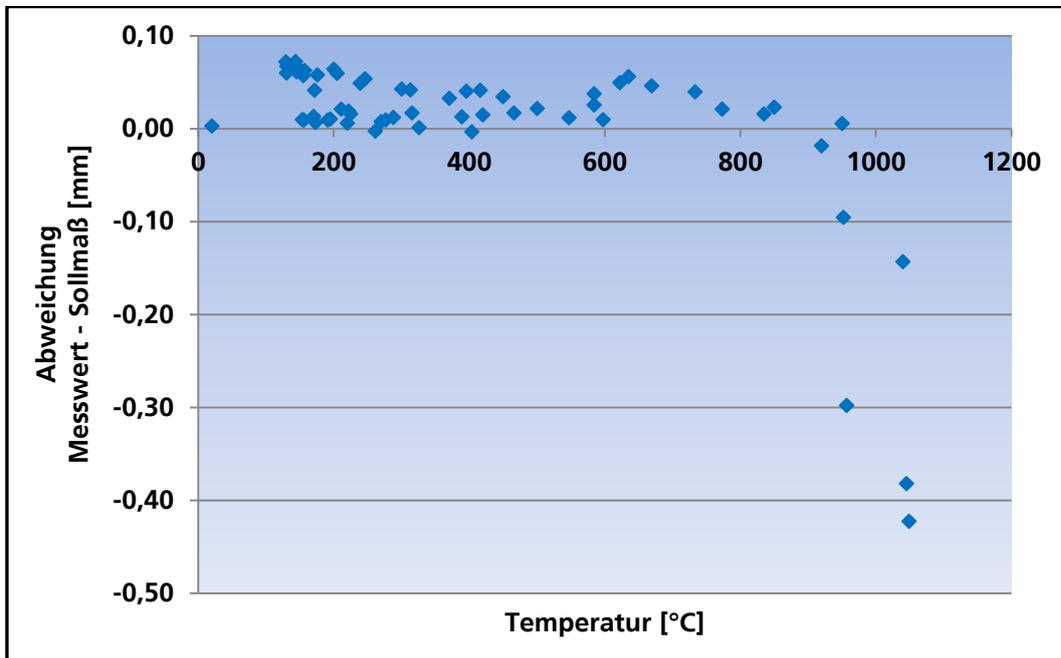


Diagramm 9: Höhe Absatz L4, Darstellung der Abweichungen zwischen Lasersensor-Messwert und Sollkurve

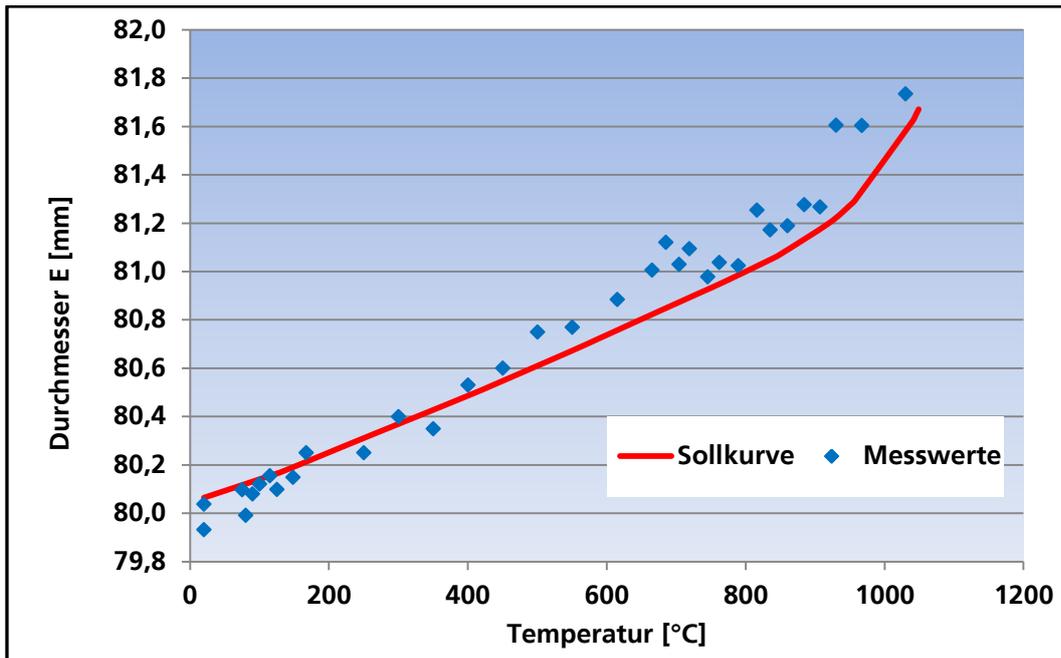


Diagramm 10: Durchmesser E, Vergleich der Messwerte der Kamera/BV mit der Sollkurve

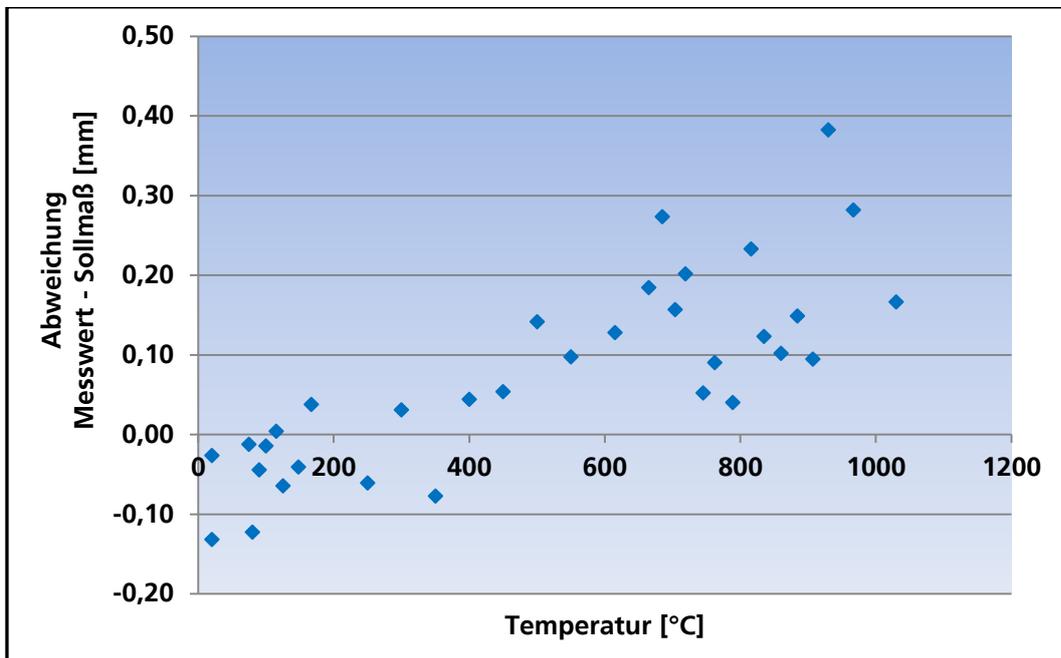


Diagramm 11: Durchmesser E, Darstellung der Abweichungen zwischen Kamera/BV -Messwert und Sollkurve

Messwert	Temperaturbereich [°C]	Abweichung Sensormesswert von Sollkurve		
		max. positiv [mm]	max. negativ [mm]	Mittelwert [mm]
Laser				
Durchmesser E 80 mm	20 – 950	0,18	-0,03	0,05
	950 – 1100	-0,08 ¹	-0,16	-0,13
Durchmesser D 51 mm	20 – 950	0,11	-0,01	0,04
	950 – 1100	-0,08 ¹	-0,1	-0,09
Gesamthöhe L3 40 mm	20 – 950	0,15	0,0	0,06
	950 – 1100	-0,11 ¹	-0,45	-0,29
Absatz L4 10 mm	20 – 950	0,07	-0,02	0,03
	950 – 1100	-0,1 ¹	-0,42	-0,27
Kamera / Bildverarbeitung				
Durchmesser E 80 mm	20 – 1100	0,38	-0,13	0,08

Tabelle 4: Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Ergebnisse der Messungen mit dem Laserlinien-Scanner zeigen, dass bei allen gemessenen Geometrien ein gleiches grundsätzliches Verhalten festgestellt werden kann. Im Temperaturbereich von 20°C bis ca. 950°C liefern die Messungen des Lasers Maße die größer als die berechnete Sollkurve sind. Im Mittel liegen die Sensorwerte um ca. 0,04 mm über der Sollkurve. Die maximal ermittelte Abweichung liegt bei 0,18 mm. Ab einer Temperatur über 950°C liegen die Sensorwerte unter den Werten der Sollkurve, es werden also kleinere Durchmesser und Höhen ermittelt. Hinsichtlich der Größe dieser negativen Abweichungen ist festzustellen, dass die Abweichungen der Durchmesser betragsmäßig ca. in der gleichen Größenordnung liegen, wie die positiven Abweichungen im Temperaturbereich 20°C bis ca. 950°C. Beim Höhenmaß treten maximale Abweichungen auf, die mehr als den doppelten negativen Betrag (-0,45 mm) haben.

Die Ursachen für diese Abweichungen, besonders für den betragsmäßigen Anstieg und den Richtungswechsel der Abweichungen ab ca. 950°C, ist nicht eindeutig erklärbar. In [Bra91] wird der Einfluss thermischer Schlieren näher betrachtet. Der glühende Körper erhitzt die ihm umgebende, kühlere Umgebung. Die entstehenden Schlieren bewirken einen Brechungsindex-Gradienten, der das Licht aus seiner ursprünglichen Richtung ablenkt. Durch dieses Phänomen wird die erreichbare Messgenauigkeit vermindert. Über die erwartete Größe dieser Ungenauigkeit konnten keine allgemeingültigen Aussagen getroffen werden. Da die größeren Abweichungen erst bei Temperaturen über 950°C auftreten sind die Ursachen hierfür sehr wahrscheinlich auf die genannten thermischen Schlieren zurückzuführen, die erst bei diesen hohen Temperaturen auftreten. Bei der Durchmesserberechnung wird die Lage von Bauteilkanten bewertet, für das Höhenmaß erfolgt die Datenaufnahme auf einer Fläche (siehe Punkt 3.5.1). Die Wechselwirkung des Bauteils mit der kühleren Umgebung ist an Kanten erheblich geringer als im Bereich von

¹ Dieser Wert ist der positive Grenzwert der Streubreite

Flächen. Das könnte ein Grund dafür sein, dass thermische Effekte bei Messungen auf Flächen größere Beeinflussungen hervorrufen als an Bauteilkanten.

Bei der Durchmesserbestimmung mit der Kamera/BV wurde nicht die gleiche Abhängigkeit der Maß-Abweichungen in den beiden Temperaturbereichen (20-950°C / 950-1100°C) wie beim Laser-Scanner festgestellt. Im gesamten Temperaturbereich tritt eine größere Streuung der Messwerte im Vergleich zum Laserscanner auf. Tendenziell ist mit steigender Temperatur eine Zunahme der Abweichungen von der Sollkurve in Richtung größerer Durchmesser und eine Zunahme der Streuung der Messwerte zu verzeichnen. So ist z. B. bei 400°C der Mittelwert der Messdaten um 0,04 mm größer als der Wert der Sollkurve, bei 800°C um 0,16 mm und bei 1000°C um 0,22 mm. Über den gesamten Temperaturbereich betrachtet traten maximale Abweichungen von 0,38 mm auf, die mittlere Abweichung beträgt 0,08 mm.

Die Ursachen dieser festgestellten Abweichungen könnten auf denselben physikalischen Phänomenen basieren, wie bereits oben diskutiert.

3.6 Bewertung der Ergebnisse im Hinblick auf die Zielsetzung

In diesem Abschnitt soll an Hand der Messergebnisse eingeschätzt werden, ob die verwendete Sensorik für die Vermessung glühender Schmiederohteile geeignet ist.

In Tabelle 5 sind die zulässigen Toleranzen der Maße des Musterteils, die für Schmiederohteile gelten, eingetragen. In den Spalten „Laser“ und „Kamera“ sind die Streubreiten der Sensormesswerte (Werte entsprechend Tabelle 4) mit den zulässigen Toleranzen der Schmiederohteile verglichen. In den folgenden Diagrammen (Diagramm 12 und Diagramm 13) wird dies graphisch verdeutlicht.

Geometrie	Temperaturbereich	zulässige Toleranz [mm]	Anteil der Streubreite der Sensoren an zulässiger Toleranz		
			Laser	Kamera	
Durchmesser E	20°C – 950°C	1,8 +1,2 / -0,6	12%	28%	
	über 950°C		4%		
Durchmesser D	20°C – 950°C		7%	---	
	über 950°C		1%		
Höhe L3	20°C – 950°C		8%		
	über 950°C		19%		
Höhe L4	20°C – 950°C		1,6 +1,1 / -0,5		6%
	über 950°C		20%		

Tabelle 5: Vergleich der zulässigen Toleranz der Schmiederohteile mit den Streubreiten der Sensoren

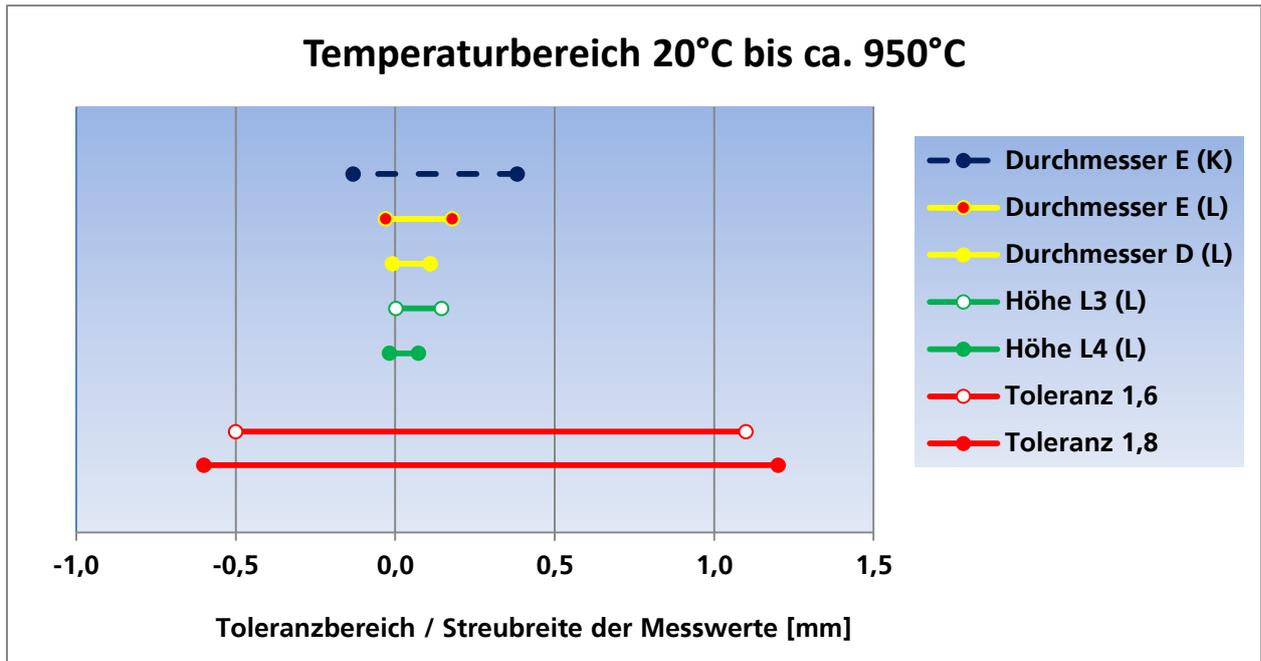


Diagramm 12: Vergleich des zulässigen Toleranzbereiches des Musterteils mit den Streubreiten der Sensorwerte hinsichtlich Größe und Lage, (K ... Kamera/BV-Messung, L ... Lasermessung)

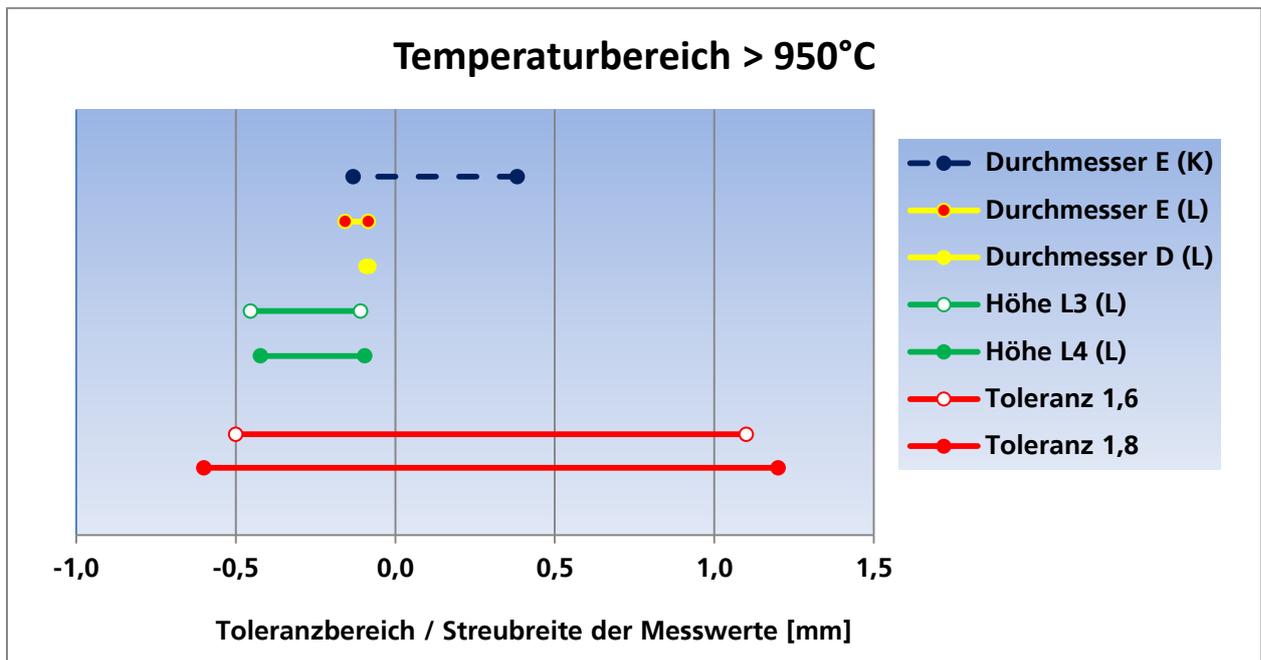


Diagramm 13: Vergleich des zulässigen Toleranzbereiches des Musterteils mit den Streubreiten der Sensorwerte hinsichtlich Größe und Lage, (K ... Kamera/BV-Messung, L ... Lasermessung)

In den graphischen Darstellungen ist zu erkennen, dass die Streubreiten der Messwerte der Sensoren im zulässigen Toleranzbereich liegen und nur einen kleinen Bereich ausnutzen. Alle Messungen liefern somit richtig Ergebnisse. Im Temperaturbereich 20°C bis ca. 950°C liegen die Messwerte in der Mitte des Toleranzbereiches. Im

Temperaturbereich über 950°C verschieben sich die Laser-Scanner-Messwerte in Richtung negative Toleranz und die Streubreite der Höhenmaße nimmt zu.

In der Praxis wird davon ausgegangen, dass Sensoren um eine Größenordnung (Faktor 10) genauer sein sollten, als die zulässige Toleranz des zu messenden Bauteils. Dies ist nicht als unumstößliches Dogma zu betrachten werde. Unter Laborbedingungen sollte diese Voraussetzung jedoch angestrebt werden, da hier im Gegensatz zur rauen Industrieumgebung wesentlich bessere Randbedingungen gegeben sind. Angewendet auf diese Untersuchungen sollte die Streubreite der Sensormessungen maximal 10% der Größe der zulässigen Toleranz betragen. Dieser Vergleich ist in Tabelle 5 vorgenommen. Es ist zu berücksichtigen, dass in den Angaben alle Messwerte eingeflossen sind, auch die extremen Abweichungen.

Lasermessung, Temperaturbereich 20°C bis ca. 950°C:

Die Mehrheit der Messwerte der Lasermessung liegt im Bereich dieser 10%-Vorgabe. Dieser Bereich wird nur durch den Durchmesser E mit 12% geringfügig überschritten. Verantwortlich dafür sind lediglich 3 Messwerte.

In der Messtechnik wird häufig eine Normal- bzw. Gaußverteilung angesetzt, die die Streuung der Messwerte beschreibt. Hierbei ist von Bedeutung, wie viele Messpunkte innerhalb einer gewissen Streubreite liegen [Nor18]. Aus den Messwerten (bzw. in diesem Fall den Abweichungen) wird die Standardabweichung δ (Sigma) berechnet. Um den Mittelwert aller Abweichungen werden Sigma-Umgebungen festgelegt, innerhalb der eine bestimmte Anzahl von Werten vorhanden sind. Oftmals wird die Genauigkeit von Sensoren mit Abweichungen innerhalb der 3-Sigma-Grenze angegeben.

In Tabelle 6 sind die Anzahl der Erwartungswerte für eine Normalverteilung in den drei üblichen Sigma-Umgebungen eingetragen. Zum Vergleich sind die Ergebnisse der Lasermessungen gegenübergestellt. Hierbei wurden die Messwerte mit der gleichen zulässigen Toleranz (1,8 mm bzw. 1,6 mm) jeweils als eine Datenmenge behandelt. Es zeigt sich, dass die gemessenen Werte gut einer Normalverteilung entsprechen. Bei den beiden Durchmessermaßen und der Höhe L3 liegen 98,8% aller Messwerte innerhalb der 3-Sigma-Umgebung. Diese Streubreite entspricht 12% der zulässigen Toleranz. Beim Höhenmaß L4 liegen 100% aller Messwerte innerhalb der 3-Sigma-Umgebung. Hier entspricht die Streubreite der Messwerte 9% der zulässigen Toleranz. Dieses Ergebnis im Temperaturbereich bis ca. 950°C bescheinigt dem Lasersensor eine ausreichend gute Genauigkeit für die Messung von Schmiederohrteilen.

Im Diagramm 14 ist die Verteilung der Abweichungen der beiden Durchmesser und der Höhe L3 entsprechend der Werte der Tabelle 6 graphisch dargestellt. Dazu wurden die Streuungswerte in Schritten von 0,01 mm zusammengefasst. Im Diagramm wurden der Mittelwert und das 3-Sigma-Intervall gekennzeichnet.

Intervall der Abweichungen zum Mittelwert	Erwartungswert aller Messwerte einer Normalverteilung	Anzahl aller Sensorwerte im Intervall	Größe der Streubreite der Sensorwerte	Größe der Streubreite zur zulässigen Toleranz
Durchmesser E und D, Höhe L3 (Standardabweichung 0,036; Mittelwerte 0,050)				
$\pm 1 \delta$	68,27%	67,1%	0,072	4%
$\pm 2 \delta$	95,45%	96,4%	0,145	8%
$\pm 3 \delta$	99,73%	98,8%	0,217	12%
Höhe L4 (Standardabweichung 0,024; Mittelwert 0,031)				
$\pm 1 \delta$	68,27%	63,0%	0,046	3%
$\pm 2 \delta$	95,45%	95,1%	0,097	6%
$\pm 3 \delta$	99,73%	100%	0,146	9%

Tabelle 6: Vergleich der Laser-Messwerte im Temperaturbereich 20°C bis ca. 950°C mit den Erwartungswerten einer Normalverteilung

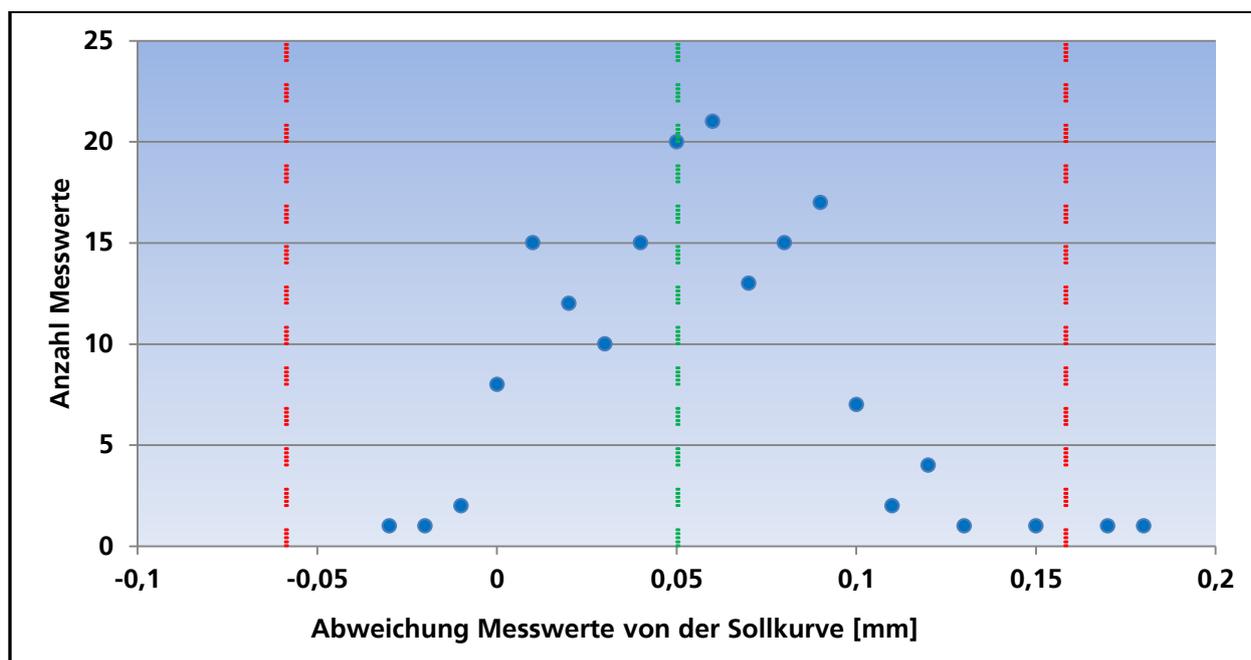


Diagramm 14: Verteilung der Streubreite der Sensorwerte im Temperaturbereich von 20°C bis ca. 950°C, grüne Linie: Mittelwerte der Verteilung = mittlere Abweichung von der Sollkurve, rote Linie: 3-Sigma-Intervall der Verteilung

Lasermessung, Temperaturbereich über 950°C:

Auch in diesem Temperaturbereich liegen die Messwerte im zulässigen Toleranzbereich der Schmiederohrteile. Es treten jedoch größere Abweichungen vom Maß der Sollkurve und teilweise größere Streubreiten auf. Generell muss festgestellt werden, dass die gemessenen Werte in diesem Temperaturbereich kleiner als die Sollmaße sind. Wie aus Tabelle 5 und Diagramm 13 ersichtlich, ist die Streubreite der gemessenen Durchmesser vergleichbar, mit den Ergebnissen im unteren Temperaturbereich. Die Streubreite der Höhenmaße hingegen beträgt 0,3 mm bis 0,4 mm. Damit bewegt sich die Streubreite bei ca. 20% der zulässigen Toleranz und hat damit mehr als den doppelten Betrag. Die mittleren Abweichungen von der berechneten Sollkurve liegen bei den gemessenen Durchmessern bei ca. -0,1 mm, bei den Höhenmaßen bei ca. -0,27 mm. Für den praktischen Einsatz ist es denkbar Korrekturalgorithmen bei der Auswertung der Messdaten einzusetzen, um diese „Verschiebung“ zu kompensieren. Wie gesehen ist die Größe der „Verschiebung“ abhängig von der konkreten Geometrie. D. h. eine Korrektur muss stets auf das zu messende Schmiederohrteil und auf die Geometrie angepasst sein.

Kameramessung/Bildverarbeitung:

Alle Messwerte der Kameramessung/BV liegen im zulässigen Bereich der Bauteiltoleranz (Diagramm 12). Die Streubreite über den gesamten Temperaturbereich von 20°C bis ca. 1200°C beträgt ca. 0,5 mm und liegt damit bei ca. 28% der zulässigen Toleranzen (Tabelle 5). Diese relativ große Streubreite wird hauptsächlich verursacht, durch eine mit steigender Temperatur zunehmenden Abweichung vom Maß der Sollkurve (der ermittelte Durchmesser wird größer als das Sollmaß). Die ebenfalls mit zunehmender Temperatur ansteigende Streuung an sich, hat einen wesentlich geringeren Einfluss auf die Gesamtstreuung. Da es sich bei der Maßabweichung offensichtlich um systematische Abweichungen handelt, sind für den praktischen Einsatz Korrekturalgorithmen bei der Auswertung der Messdaten möglich. Ein temperatur- und geometrieabhängiger Korrekturfaktor kann die gemessene Maßverschiebung kompensieren.

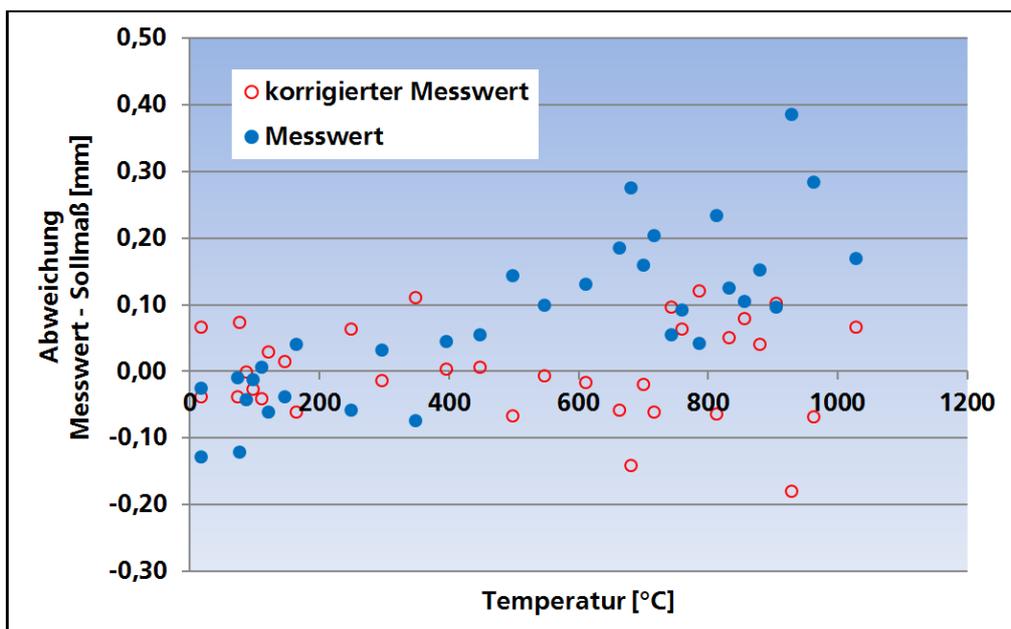


Diagramm 15: Darstellung der Abweichungen zwischen Kamera/BV-Messwert bzw. korrigierten Messwert und Sollkurve

Bereits durch die Nutzung eines einfachen linearen Korrekturfaktors kann die Streubreite der Messwerte verringert werden. Im Diagramm 15 ist dies dargestellt. Die Streubreite der Werte verringert sich durch die Korrekturmaßnahme von ca. 0,5 mm auf ca. 0,3 mm. Dies entspricht noch 16% der zulässigen Toleranz. In solchen Korrekturalgorithmen ist weiteres Potential vorhanden, um eine Optimierung der Ergebnisse zu erzielen. Die Entwicklung solcher Algorithmen muss spezifisch für das konkrete Bauteil erfolgen.

Der Einsatz einer Kamera mit einer höheren Pixelauflösung führt zu einer Erhöhung der Genauigkeit, die festgestellten systematischen Abweichungen werden jedoch in gleicher Größenordnung auftreten.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, die untersuchte Sensorik, die auf Basis der Lasertriangulation und der Bildaufnahme/Bildverarbeitung arbeiten, ist geeignet glühende Schmiederteile zu vermessen. Auf Grund von Schlierenbildung der glühenden Oberflächen entstehen systematische Maßabweichungen, die aber durch intelligente Auswertalgorithmen korrigiert werden können. Eine 3D-Bewertung der Geometrie von Bauteilen kann mit einem Laserlinien-Scanner erfolgen. Für die Vermessung von bestimmten lateralen Dimensionen sind digitale 2D-Kameras einsetzbar.

3.7 Einsatzempfehlungen

Sensorauswahl:

Wie die Untersuchungsergebnisse dieses Berichtes bestätigen sind Laser-Scanner mit blauem Laserlicht und Systeme mit Kamera/Bildauswertung geeignet glühende Schmiederteile zu vermessen. Für die Auswahl passender Sensorik sind zunächst das zu vermessende Teile-Spektrum und die interessierenden Geometrien festzulegen.

Für die Vermessung komplexer 3D-Geometrien eignet sich die Methode der Laserlinien-Triangulation. Ist nur vorgesehen laterale Ausdehnungen zu vermessen, wie z. B. Durchmesser oder Längen, kann eine Kamera genutzt werden. Zusätzlich muss während der geometrischen Vermessung eine Temperaturmessung erfolgen. Die Bauteiltemperatur ist bei der Bewertung der Geometriedaten ein wichtiger Parameter.

Die im Projekt untersuchte Probe ist durch relativ kleine Abmessungen gekennzeichnet. Die gewonnenen Erkenntnisse können auf Schmiedeteile mit größeren Ausdehnungen übertragen werden. Prinzipielle Aussagen zur Eignung von Verfahren gelten unabhängig von der Größenordnung des Bauteils. Zur Anpassung der Sensorik auf Bauteile mit größeren Abmaßen sind verschiedene Vorgehensweisen möglich:

- Nutzung von Sensorik mit größerem Messbereich,
- Parallelschaltung von mehreren Sensoren (Multisensorvernetzung) oder
- Mehrfachmessung mit einem Sensor.

Der Einsatz von Sensorik mit einem größeren Messbereich geht einher mit einer Verringerung der Auflösung und damit sinkt die Genauigkeit. Dem kommt entgegen, dass größere Schmiedeteile auch größere Toleranzen aufweisen. Bei einer sogenannten Multisensorvernetzung werden mehrere Sensoren nebeneinander angeordnet und die Datenaufnahme erfolgt gleichzeitig mit allen Sensoren (Bild 17). Einige Sensoranbieter stellen für die Zusammenführung der Messdaten bereits entsprechende Software bereit [LMI18]. Bei dieser Variante verändert sich die Auflösung der Sensorik nicht. Die dritte

Möglichkeit ein größeres Bauteil zu vermessen besteht darin, den Laser-Scanner mehrfach über das Messobjekt zu führen. Hierbei bleibt die Auflösung des Sensors ebenfalls gleich, aber durch das notwendige Handling können zusätzliche Ungenauigkeiten beim Zusammenfügen der Messdaten entstehen. Ein weiterer Nachteil dieser Variante besteht darin, dass sich die Messzeit entsprechend der Anzahl der erforderlichen Messzyklen verlängert. Die Entscheidung, welche Vorgehensweise die günstigste Lösung darstellt, ist abhängig vom konkreten Anwendungsfall.



Bild 17: Beispiel einer Multisensorvernetzung für die Vermessung von Teilen, die den Messbereich eines Sensors übersteigen, Bildquelle [LMI18]

Die beschriebenen Möglichkeiten zu Vermessung von größeren Bauteilen gelten prinzipiell für den Laser-Scanner und dem System Kamera/Bildauswertung gleichermaßen.

In Segment der Laser-Scanner, die für die Vermessung von glühenden Teilen unbedingt mit blauem Laserlicht arbeiten müssen, ist die Anzahl der Anbieter überschaubar. Die Anzahl von Firmen die Kameras und Bildverarbeitungsalgorithmen vertreiben ist um ein Vielfaches größer.

Das Handling für die Sensorik ist ein nicht zu unterschätzender Posten. Beim Laser-Scanner muss das Handling den Sensor mit einer definierten gleichbleibenden Geschwindigkeit über das Objekt bewegen. Das könnte ein Roboterarm oder eine Linearverschiebeeinheit sein. Kommt eine Kamera zum Einsatz, sind nur feste Positionen anzufahren, um ein Bild von der Messszene aufzunehmen bzw. die Kamera könnte fest installiert sein und das Teil wird an die entsprechende Position gelegt.

Software:

Neben der Hardware ist eine geeignete Software Voraussetzung zur Erzielung der geforderten Genauigkeiten. Durch die Sensorhersteller werden entsprechende Schnittstellen bereitgestellt, die es erlauben die Messdatenerfassung und Datenübernahme aus der Sensorik in gängige Software-Produkte einzubinden. Zur Ermittlung der gewünschten Maße im inline-Modus ist eine spezielle Software zu erstellen. Sie dient zur Berechnung der Abmessungen des Bauteils. Dabei muss die Temperatur des Teils während der Datenaufnahme entsprechen einfließen, um die Bauteildehnung zu berücksichtigen. Die im Kapitel 3.6 erläuterten systematischen Abweichungen, die durch physikalische Phänomene hervorgerufen werden, können durch

Korrekturalgorithmen minimiert bzw. kompensiert werden. Allgemeingültige Lösungen sind hier nicht zu erwarten. Die Auswirkungen sind abhängig von der Temperatur, von der Geometrie und vom Messverfahren. Die Entwicklung dieser Algorithmen muss somit auf den konkreten Anwendungsfall angepasst werden.

Zeiten:

Die erforderlichen Messzeiten sind abhängig von Größe und Geometrie des Schmiedeteils und vom Messverfahren. Bei Kameras beträgt die Bildaufnahmezeit nur wenige Millisekunden. Wird ein Laserlinien-Scanner genutzt, muss mit einer konstanten Geschwindigkeit über das Bauteil gefahren werden. Die Linienscan-Rate ist einstellbar und kann bis mehrere 1000 Linien/Sekunde betragen. Damit sind relativ große Vorschubgeschwindigkeiten möglich. Bei einem Linienabstand von z. B. 0,1 mm, was bei vielen Anwendungen ausreichen sollte, einer Bauteillänge von 300 mm in Vorschubrichtung und einer Linienscan-Rate von 1000 Linien/s ist diese Bauteil in 3 s vermessen. Hinzu kommt noch eine Zeit, die entsprechend der Gestaltung des Messplatzes für die Ablage und Entnahme des Schmiedeteils eingeplant werden muss.

Die Zeit für die Datenauswertung sollte in der Regel weniger als eine Sekunde beanspruchen. Die verfügbare Rechentechnik arbeitet mit modernen parallel ablaufenden Algorithmen, so dass auch eine größere Datenmenge in dieser Zeit verarbeitet werden kann. Für extrem umfangreiche Auswertungen, z. B. CAD-Vergleiche großer Schmiedeteile, bewegt sich der Berechnungsaufwand im Sekundenbereich. Diese Auswertung kann aber parallel zur bereits nächsten Messung erfolgen.

Schutzmaßnahmen:

Unter Punkt 3.1.1 wurde bereits eine Zusammenstellung von Schutzmaßnahmen vorgenommen. Für die Lasersensorik werden von einigen Firmen bereits sehr gute Schutzgehäuse angeboten. Hierzu zählen der Schutz vor Überhitzung durch aktive Kühlung, der Einsatz von austauschbaren Schutzgläsern, die verhindern, dass Schmutz, Funken oder andere Partikel an die optisch aktiven Flächen gelangen können und Sperrlufteinrichtungen, die diese Gläser sauber blasen. Ähnliche Schutzgehäuse sollten auch für Kameras eingesetzt werden, entsprechende industrielle Gehäuse wurden nicht ermittelt. Vor einer Belastung schützen die Gehäuse jedoch nicht. Treten im Bereich des Messplatzes starke Schwingungen und Stöße auf, sind entsprechende Vorkehrungen zu treffen um die Sensoren vor zu starken Erschütterungen zu schützen. Die ist besonders während des Messablaufs für eine fehlerfreie Datenerfassung erforderlich.

3.8 Ökologische, technologische und ökonomische Bewertung der Ergebnisse

Bisher existiert in der Schmiedeindustrie noch kein inline-System, das direkt nach dem Schmiedeprozess komplexe glühende Teile dimensional bewertet. Wie im Punkt 2 aufgezeigt, erfolgt z. Z. die Vermessung erst im kalten Zustand, nachdem bereits eine Vielzahl weiterer Teile produziert wurde und bei auftretenden Qualitätsproblemen Material- und Energieressourcen verlorengehen.

In der Studie konnte gezeigt werden, dass Sensoren verfügbar sind, um glühende Teile direkt nach dem Schmieden mit der benötigten Genauigkeit zu vermessen. Mit den untersuchten Sensoren können solche inline-Messsysteme realisiert werden. Potentielle Anwender sollen mit dieser Studie bestärkt werden den Fertigungsprozess in Richtung automatisierter Qualitätssicherung weiter auszubauen.

Die in der Einleitung (Punkt 2) genannten Einsparungen von Material, Energieressourcen (Elektroenergie) und Arbeitszeit sowie die CO₂-Vermeidung und Optimierung der Maschinenauslastung könnten bei Einsatz solcher System realisiert werden. Im Hinblick auf die Klimaerwärmung kommt hierbei der Vermeidung von CO₂ eine immer größer werdende Bedeutung zu. Der Einsatz von inline-Systemen mit dieser Sensorik wäre somit ein Beitrag zur nachhaltigen Produktion (Sustainable Production).

Der Einsatz von inline-Messsystemen hat in vielen Industriezweigen bereits Einzug gehalten. Durch die Digitalisierung stehen Schnittstellen und Software zur Verfügung, die die Einbindung von Messtechnik zur Prozessüberwachung möglich macht. Der Einsatz von solchen Geometrieüberwachungssystemen wäre ein Schritt in Richtung Industrie 4.0 und ein Beitrag zu Erhöhung der Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Schmiedeindustrie.

Wie das aufgeführte Szenario zeigt (Punkt 2), kann bereits die Maßabweichung eines Gesenks zu Kosten von mehreren 10 T€ führen. Die Kosten für die Realisierung eines inline-Messplatzes sollten somit in relativ kurzer Zeit durch die Vermeidung von Ausschuss zurückfließen.

3.9 Maßnahmen zur Verbreitung der Projektergebnisse

Der Versuchstand wurde bereits bei der im Fraunhofer IWU Chemnitz durchgeführten Triple-Konferenz, 25. Sächsischen Fachtagung Umformtechnik SFU, 6. Internationale Konferenz Accuracy in Forming Technology ICAFT und 6. AutoMetForm [SFU25], die unter dem Motto »Wertschöpfung sichern – Innovationen der Umformtechnik« vom 6. bis 7. November 2018 stattfand, gezeigt. In einer Poster-Präsentation wurden das Anliegen und die ersten Ergebnisse vorgestellt. Die live-Vorführungen, bei denen glühende Teile vermessen wurden, fanden reges Interesse bei vielen Konferenzteilnehmern.

Im IWU wurden bereits für mehrere Industriepartner Qualitätsüberwachungssysteme entwickelt und realisiert. Hierbei wurden unterschiedliche Bauteile, z. B. umgeformte Blechteile, verschiedene Kleinteile und Schweißnähte, mit optischen Verfahren bewertet. Aufbauend auf den Ergebnissen dieser Studie besteht das Interesse dieses Themenfeld weiter zu führen und Industrielösungen zu entwickeln. Es ist geplant, die im IWU entwickelte Datenanalyse-Software XEIDANA® [Xeid17] in Richtung Bewertung von 3D-Datensätzen auszubauen. Eine Implementierung von Korrekturalgorithmen für die Bewertung der Messdaten heißer Teile ist ebenfalls denkbar.

Die Abteilung Warmmassivumformung im IWU steht mit einer Reihe von Schmiedebetrieben im ständigen Kontakt. Dort werden die Ergebnisse publiziert und die Chancen für die Qualitätssicherung und Umweltentlastung aufgezeigt. Folgenden potentiellen Anwendern werden die technischen Möglichkeiten dargelegt und gegebenenfalls Vorschläge zur Realisierung konkreter Industrielösungen solcher Messplätze unterbreitet:

- | | |
|---|-----------------------------|
| 1. Frauenthal Powertrain GmbH, Roßwein | Schmiedebetrieb |
| 2. Frauenthal Powertrain GmbH, Plettenberg | Schmiedebetrieb |
| 3. GSA Gesenkschmiede Schneider GmbH, Aalen | Schmiedebetrieb |
| 4. voestalpine BWG GmbH | Schmiedebetrieb |
| 5. OTTO FUCHS KG, Meinerzhagen | Schmiedebetrieb |
| 6. LASCO Umformtechnik GmbH | Anlagentechnik |
| Massivumformung | |
| 7. SMS Group GmbH | Anlagentechnik |
| Massivumformung | |
| 8. SWB Seidel Werkzeugbau GmbH | WZB und Sondereinrichtungen |
| 9. Hirschvogel Automotive Group, Denklingen | Schmiedebetrieb |
| 10. Gesenk- und Freiformschmiede GmbH,
Großenhain | Schmiedebetrieb |
| 11. Bharat Forge Aluminiumtechnik,
Brand-Erbisdorf | Schmiedebetrieb. |

Es ist geplant in der Herbstausgabe der Fachzeitschrift „massivUMFORMUNG“ des Industrieverbandes Massivumformung e. V. die Ergebnisse der Studie zu veröffentlichen.

4. Fazit

Die inline-Vermessung glühender Schmiederohteile direkt nach dem Umformprozess wird z. Z. nicht durchgeführt, hätte aber in der Schmiedeindustrie ein erhebliches Einsparpotential zur Folge. Mit diesem Förderprojekt war die Möglichkeit gegeben, Sensoren hinsichtlich ihrer Eignung für diesen Einsatzfall zu bewerten. Es konnten experimentelle Untersuchungen durchgeführt werden, die aufzeigen, dass spezielle Lasersensoren und Kameratechnik geeignet sind in inline-Systemen glühende Teile zu vermessen. An Hand von Genauigkeitsbetrachtungen wurde ermittelt, dass die vorgegebenen Genauigkeitsanforderungen über einen weiten Temperaturbereich bis 950°C eingehalten werden. Bei hohen Temperaturen treten physikalische Effekte (Schlierenbildung) auf, die zu Maßabweichungen führen, welche aber durch Korrekturalgorithmen minimiert werden können. Der Umfang der Studie ermöglichte die Untersuchung der o. g. Sensorik. Die Ergebnisse zeigen, dass auch Kameratechnik prinzipiell geeignet ist. Um die Beschränkung auf 2D-Geometrien zu überwinden wäre die Untersuchung von Stereo-Kamerasystemen ein weiteres Feld. Bei dieser Technik wird das Messobjekt gleichzeitig mit zwei oder drei Kameras aus unterschiedlichen Richtungen aufgenommen und aus diesen Bildern ein 3D-Datenfeld erzeugt. Vorteil dieser Methode ist eine sehr kurze Datenerfassungszeit von wenigen Millisekunden. Das System BLAZE 600M [Hex18] sollte neben weiteren Stereokamera-Systemen näher betrachtet werden.

Mit den Ergebnissen dieser Studie sollen potentielle Anwender bestärkt werden den Fertigungsprozess in Richtung automatisierter Qualitätssicherung weiter auszubauen.

Literaturverzeichnis

- [Aic18] Artikel: *3D-Daten für Gesenkkorrektur* in Umformtechnik, Massiv+Leichtbau, https://www.umformtechnik.net/fachartikel/3d-daten-fuer-die-gesenkkorrektur-%7C-umformtechnik_30186_de/, Abgerufen am 24.01.2018
- [Bra91] BRANDENBURG, W.; AEHLING, H.; NOLL, R.: *Einflussgrößen bei der laseroptischen Geometrievermessung heißer Werkstücke*. Vortrag: Laser in der Technik, 10. Internationaler Kongress 1991, Aachen, Fraunhofer-Institut für Lasertechnik, Aachen.
- [Dia18] Homepage: Firma DIAS Infrared GmbH, Dresden, <https://www.dias-infrared.de/anwendungen/metallindustrie>, Abgerufen am 24.01.2018
- [Fli18] Homepage: Firma FLIR Systems, Inc., http://www.flir-infrarotkameras.de/epages/61587589.sf/de_DE/?ObjectPath=/Shops/61587589/Categories/Thermografie/Industriethermografie, Abgerufen am 10.01.2018
- [Flu18] Homepage: Firma Fluke Deutschland GmbH, Glottertal, <https://www.fluke.com/de/de/produkte/thermografie/waermebildkameras/professional-serie>, Abgerufen am 11.01.2018
- [Goc18] Datenblatt: *DATASHEET_Gocator_2410_2420_DE_WEB.pdf*, Firma LMI Technologies GmbH, Teltow/Berlin, <https://lmi3d.com/products/gocator/g2/2400-series/laser-line-profile-sensors>, Abgerufen am 11.01.2018
- [GOM16] GOM Seminar: *3D-Koordinatenmesstechnik für Bauteilinspektion und Werkzeugbau 05.07.2016*, Firma GOM GmbH, Braunschweig, www.gom.com/events/gom.../gom-seminar-bauteilinspektion-und-werkzeugbau.html, Abgerufen am 16.01.2018
- [GOM18] Auswertesoftware für Form- und Maßanalyse: GOM Inspect, Firma GOM GmbH, Braunschweig, <https://www.gom.com/de/3d-software/gom-inspect.html>, Abgerufen 10.12.2018
- [Gro16] Groche, P.: *Industrie 4.0 - eine industrielle Revolution auch für Unternehmen der Massivumformung?* Jahrestagung Industrieverband Massivumformung. Abgerufen am 03.08.2016
- [Herb11] Hertz, R.; Licht, W.; Fuss, F.: *Schmiede-Journal September 2011* http://www.massivumformung.de/fileadmin/user_upload/6_Presse_und_Media/Veroeffentlichungen/Schmiede-Journal/September_2011/Report.pdf, Abgerufen am 12.05.2017
- [Hex18] Produktbroschüre: *BLAZE 600M*, Firma Hexagon metrology GmbH, Wetzlar, <https://www.hexagonmi.com/de-DE/products/white-light-scanner-systems/blaze-600m>, Abgerufen am 13.04.2018
- [HMP18] Datenblatt: *DISC-inspect*, Firma HMP technologie GmbH, <https://www.hmp-tec.de/prueftechnik/3d-pruefung-fuer-die-guss-und-schmiedetechnik/>, Abgerufen am 23.01.2018

- [Inf18] Produktflyer: *SLAG_DETECT*
<https://www.infratec.de/downloads/de/thermografie/flyer/automation/infratec-slag-detect-h-de-mail.pdf>, Produktflyer: *LHSD (Gießpfannenüberwachung)*
<https://www.infratec.de/downloads/de/thermografie/flyer/automation/infratec-lhsd-h-de-mail.pdf>, Abgerufen am 22.01.2018
- [Kem18] Homepage: Firma Kempf GmbH & Co. KG,
<https://loke.de/index.php/de/heissanwendungen/lmc-l-heisse-oberflaechen>,
 Abgerufen am 24.01.2018
- [Ker18] Homepage: Firma KerCon GmbH & Co. KG, <https://www.kercon.eu/3d-scan.html>, Abgerufen am 22.01.2018
- [Key18] Katalog: *Berührungslose Messtechnik* (Download über Anfrage), Firma Keyence Deutschland GmbH, Neu-Isenburg, <https://www.keyence.de/Katalog>, Abgerufen am 11.01.2018
- [LIM18] Homepage: Firma Limab GmbH, Puchheim, www.limab.de, Abgerufen am 22.01.2018
- [LMI18] Broschüre: *3D-Smart-Sensoren für die inline-Inspektion*, Firma LMI Technologies, <https://lmi3d.com/de>, Abgerufen am 26.07.2018
- [Log18] Homepage: Firma LogoTek, Gesellschaft für Informationstechnologie,
<http://www.logotek-gmbh.de/cms/index.php?id=80&L=0>, Abgerufen am 23.01.2018
- [Lum18] Broschüre: *Temperaturmessung in der Stahlindustrie*, Firma LumaSense Technologies GmbH, Frankfurt,
https://www.lumasenseinc.com/uploads/Solutions/Industrial_Materials/Steel_and_Metals/pdf/DE-Stahlindustrie_Broschuere.pdf, Abgerufen am 24.01.2018
- [MEp18_1] *Datenblatt thermoIMAGER Mikroskopoptik*: Firma Micro-Epsilon Messtechnik GmbH & Co. KG, <https://www.micro-epsilon.de/download/products/dat--thermoIMAGER-Mikroskopoptik--de.pdf>, Abgerufen am 10.01.2018
- [MEp18_2] *Datenblatt: scanCONTROL // 2D/3D Laser-Scanner (Laser-Profil-sensoren)*, Firma Micro-Epsilon Messtechnik GmbH & Co. KG, <https://www.micro-epsilon.de/download/products/cat--scanCONTROL--de.pdf>, Abgerufen am 10.01.2018
- [MEp18_3] Artikel: *Der blaue Vorteil* in konstruktionspraxis 06.12.12,
<https://www.konstruktionspraxis.vogel.de/der-blaue-vorteil-a-344195/>,
 Abgerufen am 10.01.2018
- [MIT18] Broschüre; *ProTrak-HD-v201711.pdf*, Firma MTI Instruments, Inc.325 Washington, www.mtiinstruments.com, Abgerufen am 11.01.2018
- [Nik18] Broschüre: *mcax-mm-de.pdf*, Firma Nikon Metrology NV,
<https://www.nikonmetrology.com/de/product/modelmaker-mmdx>, Abgerufen am 12.01.2018

- [Nor18] Normalverteilung, <https://de.wikipedia.org/wiki/Normalverteilung>. Abgerufen am 12.12.2018
- [Qell18] Homepage: Firma QuellTech GmbH, <https://www.quelltech.de/portfolio-item/schmiedeteile-inspektion/>, Abgerufen am 26.01.2018
- [SFU25] Triple-Konferenz 25. Sächsischen Fachtagung Umformtechnik SFU, 6. Internationalen Konferenz »Accuracy in Forming Technology ICAFT, 6. AutoMetForm, vom 6. bis 7. November 2018, <https://www.vemas-sachsen.de/event-details/id-6-icaft-25-sfu-6-autometform-2018-wertschoepfung-sichern-innovationen-der-umformtechnik.html?day=20181106×=1541458800,1541631599>, Abgerufen am 10.12.2018
- [Ste18] Datenblatt: *Stellite 6*® ALLOY: Firma Doloro Stellite, www.deloro.com, Abgerufen am 14.03.2018.
- [Tes18_1] Bedienungsanleitung Wärmebildkamera: Firma Testo: <https://media.testo.com/media/3e/01/6029eeb9a928/testo-885-Bedienungsanleitung.pdf>
Abgerufen am 10.01.2018
- [Tes18_2] Whitepaper: Firma Testo: <https://media.testo.com/media/f9/99/094362eeb32f/Whitepaper-Pixelzahl-Qualittskriterium.pdf>
Abgerufen am 10.01.2018
- [Tri18] Homepage: Firma Triple_IN GmbH, <https://www.triple-in.de/produkte/2d-ht-sensoren-fuer-heisse-oberflaechen/>, Abgerufen am 24.01.2018
- [W+R18] Homepage: Firma Automation W+R GmbH, <http://www.automationwr.de/de/loesungen/oberflaechenpruefung/3d-oberflaechenpruefung/advic/>, Abgerufen am 24.01.2018
- [VDMA17] VDMA: *Industrielle Bildverarbeitung 2015/16 – Anwendungen. Produkte, Bezugsquellen*. http://ibv-vdma.org/documents/256550/0/IBV_2014_D_LR-pdf, Abgerufen am 09.05.2017.
- [Xeid17] Software XEIDANA®: <http://www.xeidana.de/>; Abgerufen am 09.05.2017
- [Zeiss18] Broschüre: *GageMax Die flexible Lehre.pdf*, Firma Zeiss Deutschland <https://www.zeiss.de/messtechnik/produkte/systeme/koordinatenmessgeraete/fertigungsmessgeraete/gagemax.html> und Artikel *GageMax im Schmiedewerk* in Umformtechnik, Massiv+Leichtbau Februar 2012, https://www.umformtechnikmagazin.de/umformtechnik-fachartikel/gagemax-im-schmiedewerk_5544_de/, Abgerufen am 24.01.2018

[Zum18] Artikel: *Inline-Messgeräte für das Warmwalzen, Schmieden, Schleifen usw.*, Firma Zumbach Electronic AG, Schweiz, <http://www.expometals.net/de-de/produkteigenschaften-zumbach-electronic-ag/inline-messger%C3%A4te-f%C3%BCr-das-warmwalzen-schmieden-schleifen-usw>, Abgerufen am 23.01.2018

Anhänge A1: Zusammenstellung der Recherche zum Stand der Technik

Rubrik	Bewertungsart	bewertete Bauteile	Messverfahren	Bemerkung	Quelle
kalt	3D	Guß- und Schmiedeteile	optische 3D-Koordinatenmesstechnik (Streifenlichtverfahren)	hauptsächlich Modell- und Werkzeugbau, Erstmusterprüfung	[GOM16]
	3D	rotatorische Schmiede- und Gußwerkstücke	optischen 2D/3D-messtechnik (Kamera, Laserlinien-Scanner)	Inline-Messplatz DISC-inspect	[HMP18]
	3D	Guß- und Schmiedeteile, Formwerkzeuge	optischer 3D-Scan, Projektion gekreuzter Laserlinien, Kameraaufnahme	Handscanner	[Ker18]
	3D	Schmiedeteile	Laserlinien-Scanner	Inlineprüfung	[Qell18]
höhere Temperatur	3D	Schmiedeteile	Koordinatenmessgerät GageMax	für Einsatz in rauher Umgebung bis 40°C	[Zeiss18]
	3D	Gesenke 9m Länge	Streifenlichtverfahren	Messung in industrieller Schmiede, Teile bis 200°C	[Aic18]
heiß (keine genaue Spezifikation)	3D	Stahlschmiedereifen	Laserlinien-Scanner, Laser blau	Sensorschutzgehäuse mit Freiblaseinrichtung, Messung inline	[MEp18_2]
	2D	Profilmessung von Drähten, Rohren, Stangen	Laserlichtvorhang	Inline-Messung schwierige Umgebungsbedingungen	[Zum18]
Temperatur größer 1000°C	3D (OF Inspektion, Vermessung)	Stranggussteile	Laserlinie auf OF projiziert, Bildaufnahme mit Hochleistungskamera	Prüfzelle Steelinspekt bis 1200°C	[W+R18]
	3D	Stabstahl, Brammen, Grobbleche, Billets	Lasertriangulation	Systeme HotProfiler, SlabProfiler, bis 1300°C	[LIM18]
	2D (Abstands-, Profilmessung)	Oberflächen	Impulslaufzeit-, Laser-doppler-Verfahren Punktlaser	bis 1500°C	[Kem18]

Rubrik	Bewertungsart	bewertete Bauteile	Messverfahren	Bemerkung	Quelle
	2D (Abstands-, Profil- messung)	Brammen, Coils	Phasenvergleichs- messung, Punktlaser Rot	Genauigkeit ± 1 mm (für große Reichweiten) bis 1200°C	[Log18]
	2D (Abstands-, Profil- messung)	Oberflächen	Puls-Laufzeit- verfahren, Punktlaser Infrarot	bis 1200 °C Genauigkeit 3 mm (für große Reichweiten) bis 1200 °C	[Tri18]
Thermo- bzw. Wärme- bild- kamera	Temperatur- messung	Applikationen bei Stahlherstellung	Infrarot- Thermographie	System SLAG- DETECT und Gießpfannen- überwachung	[Inf18]
			Infrarot- Thermographie	100°C bis 3000°C	[Dia18]
			Thermographie- kameras, Pyrometer	bis 2600°C	[Lum18]
		keine spezielle Applikation für Stahlindustrie genannt	Thermographie- kameras, Pyrometer	Hochauflösend bis 28 μ m (kleine Messfelder)	[MEp18_1]
			Infrarotkameras		[Fli18]
			Wärmebildkameras		[Flu18]
ge- eignete Sensorik für die Messung heißer Bauteile	3D	--	Laserlinien- Scanner, Laser blau	Schutzgehäuse über Drittanbieter	[Key18]
		--	Laserlinien- Scanner, Laser blau	kein Schutzgehäuse	[Goc18]
		--	Laserlinien- Scanner, Laser blau	Schutzgehäuse mit Freiblas- einrichtung und	[MIT18]
		--	Laserlinien- Scanner, Laser blau	handgeführt, an KMG adaptierbar	[Nik18]
		--	Stereo-Vision- Technologie BLAZE 600M	Beleuchtung mit blauem Licht	[Hex18]

Tabelle 7: Zusammenstellung der Ergebnisse der Recherche zur Messtechnik