

**U N I K A S S E L  
V E R S I T Ä T**

Fachbereich 15  
Maschinenbau



Institut für  
Produktionstechnik und  
Logistik

Prof. Dr.-Ing. F. Tikal

Fachgebiet für  
Produktionstechnik und  
Werkzeugmaschinen

**Temperaturbestimmung  
beim  
Thermofließlochformen**

**Diplomarbeit II**

zur Erlangung des akademischen Grades  
*„Diplom-Ingenieur“*

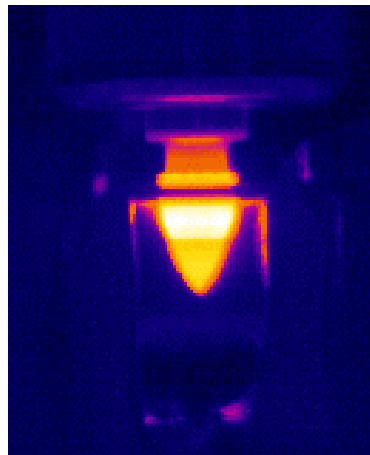
von

**Jandrey Maldaner**

**Mai 2004**

# Diplomarbeit II

Temperaturbestimmung beim Thermofließlochformen



Angefertigt von: Jandrey Maldaner  
Matrikelnummer: 1007141  
Fachgebiet: Institut für Produktionstechnik und Logistik  
Betreuer: Prof. Dr.-Ing. F. Tikal  
Dipl.-Ing. Christian Gies

## **Kurzzusammenfassung**

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Ermittlung der beim Thermofließlochformen entstehenden Temperaturen. Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Temperaturen während des Bearbeitungsprozesses mittels der berührungslosen Temperaturmesssysteme Pyrometer und Thermografiekamera in Abhängigkeit von Werkstoffsorte, Werkstoffdicke und Werkzeuggeometrie untersucht. Die Untersuchung beinhaltet die Auswertung der Ergebnisse unter Anwendung einer statistischen Versuchsplanung und -auswertung, den Vergleich der gewonnenen Temperaturen und Temperaturverläufe sowie die Darstellung einiger Vor- und Nachteile der eingesetzten Temperaturmesssysteme. Als Voraussetzung zu einer berührungslosen Temperaturmessung mit diesen Messsystemen fand weiterhin eine experimentelle Ermittlung der Emissionsgrade der untersuchten Werkstoffe statt. Abschließend wurde ein Zusammenhang zwischen der während der Bearbeitung entstehenden Prozesstemperaturen und der Momente untersucht.

## **Abstract**

The present work deals with the determination of the temperatures by the thermodrilling process. Temperatures were examined during the process by non-contact temperature measuring systems, pyrometer and thermography camera, depending on the material type, material thick and tool geometry. The investigation included the evaluation of the results under application of a statistical plan and evaluation, the comparison of the gained temperatures and the temperature course as well as a representation of some advantages and disadvantages of the used measuring systems. As condition for a non-contact temperature measurement with these measuring systems was occurred an experimental determination of the emissivity of the examined materials. Finally, a correlation between the process temperature and moment during the thermodrilling was examined.

## Vorwort

Die vorliegende Diplomarbeit entstand während meines Studiums an der Universität Kassel, Fachbereich Maschinenbau, am Institut für Produktionstechnik und Logistik (IPL).

Mein besonderer Dank gilt dem Leiter des Institutes für Produktionstechnik und Logistik Herrn Professor Dr.-Ing. Tikal, der meine Studien mit Vertrauen und Förderung unterstützte.

Ferner gilt mein Dank Herrn Dipl. Ing. Christian Gies für die kompetente Betreuung und Hilfeleistung zur Durchführung meiner Diplomarbeit.

Bei allen Mitarbeitern des Institutes möchte ich mich für die hilfreiche Unterstützung, Fachkenntnis und Freundschaft bedanken.

Meinem Freund Dr.-Ing. João Carlos Oliveira Lopes danke ich für die Gespräche, Vorschläge und die professionelle und persönliche Erfahrung, mit der er mich unterstützt hat.

Ein besonderer Dank geht an meine Eltern und Geschwister für ihre Unterstützung und Toleranz in diesen Jahren meines Studiums.

Schließlich danke ich meiner Freundin Helene Kaiser, die stets für mich da war und mich in allen Lebenslagen liebevoll unterstützt hat.

## Erklärung

*Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig durchgeführt und verfasst, keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel verwendet und sämtliche Stellen, die anderen Werken im Wortlaut oder dem Sinn nach entnommen sind, mit Quellenangaben kenntlich gemacht habe. Desgleichen gilt für Zeichnungen, Skizzen, bildliche Darstellungen oder Gleichungen.*

Kassel, den 27. März 2006

Jandrey Maldaner

## Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
2	Stand der Technik - Fließlochformen.....	3
2.1	Historischer Rückblick des Prozesses .....	3
2.2	Beschreibung des Prozesses.....	4
2.3	Das Werkzeug .....	6
2.4	Das Werkstück und der Werkstoff.....	8
2.5	Schmierung, Kühlung und Maschinen.....	8
2.6	Komponenten des Prozesses.....	9
2.6.1	Stellgrößen .....	9
2.6.2	Phasen beim Thermofließlochformen .....	10
2.6.3	Die Rotations- und Translationsarbeit.....	11
2.7	Temperatur beim Thermofließlochformen.....	14
2.8	Anmerkungen zu den Buchsen .....	17
2.8.1	Formen und Maße der Buchsen.....	17
2.8.2	Qualität der Buchsen.....	17
2.9	Anwendungen.....	18
3	Stand der Technik -Temperaturmessung .....	19
3.1	Grundlagen thermografischer Messsysteme.....	19
3.1.1	Die Strahlungsgesetze .....	19
3.1.1.1	Das radiometrische Grundgesetz.....	22
3.1.1.2	Der schwarze Strahler .....	23
3.1.1.3	Das Plancksche Strahlungsgesetz.....	24
3.1.2	Reale Strahler.....	25
3.1.2.1	Das Kirchhoffsche Gesetz.....	25
3.1.2.2	Der spektrale Emissionsgrad realer Messobjekte.....	26
3.1.2.3	Die Strahldichte realer Objekte .....	27
3.1.2.4	Einfluss des Emissionsgrades auf die Temperatur.....	29
3.1.2.5	Die Strahlungsübertragungsstrecke .....	32
3.1.2.6	Die Transmission der Atmosphäre.....	32

---

3.2	Temperaturmessverfahren .....	33
3.2.1	Thermoelement.....	33
3.2.2	Infrarot-Strahlungstemperaturmessung .....	35
3.2.2.1	Strahlungsthermometer – Pyrometer .....	36
3.2.2.2	Thermografiekameras .....	39
4	Experimentelle Vorversuche zur Ermittlung des Emissionsgrades.....	41
4.1	Verwendete Temperaturmesssysteme.....	41
4.1.1	Pyrometer.....	41
4.1.2	Thermografiekamera.....	42
4.2	Versuchsdurchführung in Blechstreifen mittels Pyrometer und Thermoelement	43
4.2.1	Ergebnisse.....	45
4.3	Versuchsdurchführung in Blechstreifen mittels Thermografiekamera .....	47
4.3.1	Ergebnisse.....	48
4.4	Versuchsdurchführung in fließlochgeformten Blechstreifen.....	51
4.4.1	Ergebnisse.....	52
4.5	Zusammenfassung .....	53
5	Versuchsaufbau und Durchführung .....	55
5.1	Maschine und Messtechnik .....	55
5.2	Versuchsaufbau.....	56
5.3	Versuchswerkstoffe .....	59
5.4	Versuchswerkzeuge .....	60
5.5	Vorversuche zur Erfassung der Messgenauigkeit des Pyrometers.....	61
5.5.1	Versuchsaufbau .....	62
5.5.2	Versuchsdurchführung.....	62
5.6	Versuchsdurchführung zur Ermittlung der Temperatur .....	63
5.6.1	Versuchsplan.....	63
5.6.2	Versuchsauswertung und Bearbeitungsparameter .....	64
6	Ergebnisse und Folgerungen .....	66
6.1	Ergebnisse der Vorversuche zur Erfassung der Messgenauigkeit des Pyrometers	66
6.2	Ergebnisse der Ermittlung der Temperatur .....	67
6.2.1	Problematik bei der Temperaturerfassung.....	67

---

6.2.2	Ergebnisse für St37 .....	69
6.2.2.1	Zusammenfassung.....	71
6.2.3	Ergebnisse für St52 .....	72
6.2.3.1	Zusammenfassung.....	74
6.2.4	Ergebnisse für X5CrNi18.10 .....	75
6.2.4.1	Zusammenfassung.....	76
6.2.5	Ergebnisse für AlMgSi1 .....	76
6.2.5.1	Zusammenfassung.....	80
6.3	Ermittlung der Temperatur des nach oben verdrängten Werkstoffvolumens und des Werkzeuges.....	80
6.4	Vor- und Nachteile der Temperaturmesssysteme.....	82
6.5	Ermittlung des Zusammenhanges zwischen Prozesstemperatur und Moment ..	86
6.5.1	Berechnung für St37 und St52.....	88
6.5.1.1	Blechdicke von 2 mm .....	88
6.5.1.2	Blechdicke von 3 mm .....	92
6.5.2	Berechnung für X5CrNi18.10.....	96
6.5.3	Berechnung für AlMgSi1 .....	97
6.5.4	Zusammenfassung.....	98
7	Zusammenfassung und Ausblick.....	100
8	Schrifttum .....	103

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Schema des Prozesses nach VDI 3359 .....	5
Abbildung 2-2: Grafische Darstellung des Thermofließlochformenprozesses /6/ .....	5
Abbildung 2-3: Geometrie des Werkzeuges zum Thermofließlochformen .....	6
Abbildung 2-4: Fließlochformer „Lang“, „Kurz“ und „Flach“ mit jeweiliger Durchzugsform /4/ .	7
Abbildung 2-5: Farbveränderung beim Thermofließlochformen /28/ .....	8
Abbildung 2-6: Axialkraft- und Drehmomentverlauf beim Thermofließlochformen .....	10
Abbildung 2-7: Rotationsarbeit $W_R$ .....	12
Abbildung 2-8: Translationsarbeit $W_T$ .....	13
Abbildung 2-9: Temperaturmessung mit Pyrometer .....	15
Abbildung 2-10: Temperaturmessung mit Thermoelementen /12/ .....	15
Abbildung 2-11: Temperaturen im Umformbereich .....	16
Abbildung 2-12: Hauptgröße der Buchse beim Thermofließlochformen .....	17
Abbildung 2-13: Einteilung der Buchsen durch die Risslänge am unteren Buchsenrand .....	18
Abbildung 3-1: Darstellung zum radiometrischen Grundgesetz /23/ .....	22
Abbildung 3-2: Erzeugung schwarzer Strahlung durch Vielfachreflektion /17/ .....	23
Abbildung 3-3: Spektrale spezifische Ausstrahlung verschiedener Strahler /21/ .....	24
Abbildung 3-4: Spektraler Emissionsgrad verschiedener Stoffe /27/ .....	27
Abbildung 3-5: Strahldichte eines stark reflektierenden Objektes /23/ .....	29
Abbildung 3-6: Spektrale Strahldichte nach Planck (Summe des emittierten und reflektierten .....	
Anteils entsprechend der Summenkurve in der Abbildung 3-5) /23/ .....	30
Abbildung 3-7: Strahlungstemperatur in Abhängigkeit vom eingestellten Emissionsgrad und der	
Messwellenlänge eines schwarzen Strahlers ( $\epsilon_\lambda = 1$ ). Bedingungen wie in der	
Abbildung 3-6 /23/ .....	30
Abbildung 3-8: Messwertverfälschung für unterschiedliche Emissionsgrade .....	31
Abbildung 3-9: Spektraler Transmissionsgrad der Atmosphäre /23/ .....	32
Abbildung 3-10: Beide Verbindungsstellen eines Thermopaars /2/ .....	34
Abbildung 3-11: Aufbau eines Pyrometers /20/ .....	36
Abbildung 3-12: Verlauf der Ansprechzeit von berührungslos und berührend Temperaturmessung	
/20/ .....	38
Abbildung 3-13: Funktionsschema einer Thermografiekamera /27/ .....	39
Abbildung 4-1: Verwendetes Pyrometer mit Thermoelement .....	42
Abbildung 4-2: Thermografiekamera Thermovision <sup>®</sup> A40-M .....	43
Abbildung 4-3: Skizze des Versuches zur Ermittlung des Emissionsgrades mittels Pyrometer und	
Thermoelement .....	44
Abbildung 4-4: Skizze des Versuches zur Ermittlung des Emissionsgrades mittels .....	
Thermografiekamera .....	48
Abbildung 4-5: Thermografiebild vom Werkstoff St37 .....	50
Abbildung 4-6: Schwarz lackierter fließlochgeformter Durchzug aus St52 .....	53



---

Abbildung 5-1: Bearbeitungszentrum Mahomat.....	55
Abbildung 5-2: Darstellung des Versuchsaufbaus .....	56
Abbildung 5-3: Skizze der Versuche zur Ermittlung der Temperatur beim .....	
Thermofließlochformen .....	57
Abbildung 5-4: Skizze der Markierung mit dem Laservisier des Pyrometers an dem .....	
Blechdurchzug.....	58
Abbildung 5-5: Fließlochformer - Standardgeometrie.....	60
Abbildung 5-6: Fließlochformer - Sondergeometrie .....	60
Abbildung 5-7: Gegenüberstellung der Standard- und der Sondergeometrie .....	61
Abbildung 5-8: Skizze der Versuche zur Einrichtung des Pyrometers .....	62
Abbildung 5-9: Skizze für das Auswerten der Temperaturen .....	65
Abbildung 6-1: Temperaturverteilung eines thermografischen Bildes am Durchzugbereich.....	85

## Diagrammverzeichnis

Diagramm 4-1: Ergebnisse der Emissionsgradbestimmung von schwarz lackierten Blechstreifen .	45
Diagramm 4-2: Ergebnisse der Emissionsgradbestimmung von unlackierten Blechstreifen .....	46
Diagramm 4-3 Ergebnisse der Emissionsgradbestimmung mittels Thermografiekamera .....	49
Diagramm 4-4: Ergebnisse der Emissionsgradbestimmung mittels Thermografiekamera mit .....	
Änderung des Emissionsgrades.....	50
Diagramm 4-5: Ergebnisse der Emissionsgradbestimmung von fließlochgeformten schwarz.....	
lackierten Blechstreifen .....	52
Diagramm 6-1: Ergebnisse des Vorversuches zur Erfassung der Messgenauigkeit des .....	
Pyrometers .....	66
Diagramm 6-2: Probleme bei den Temperaturverläufen der Thermografiekamera und.....	
Pyrometer.....	68
Diagramm 6-3: Einfluss auf die Temperatur im St 37.....	69
Diagramm 6-4: Einzelversuchsergebnisse vom St 37 .....	70
Diagramm 6-5: Temperaturverläufe des Pyrometers vom St 37 .....	71
Diagramm 6-6: Einfluss auf die Temperatur im St 52.....	72
Diagramm 6-7: Einzelversuchsergebnisse vom St 52 .....	73
Diagramm 6-8: Temperaturverläufe von St52 gemessen mit dem Pyrometer.....	74
Diagramm 6-9: Einzelversuchsergebnisse vom X5CrNi18.10 .....	75
Diagramm 6-10: Temperaturverläufe des Pyrometers im X5CrNi18.10 .....	76
Diagramm 6-11: Einfluss auf die Temperatur im AlMgSi1 .....	77
Diagramm 6-12: Einzelversuchsergebnisse vom AlMgSi1 .....	78
Diagramm 6-13: Temperaturverläufe mit Pyrometer und Thermografiekamera in AlMgSi1 .....	79
Diagramm 6-14: Ergebnis der Temperaturen des entgegen der Vorschubrichtung nach oben .....	
verdrängten Werkstoffvolumens .....	81
Diagramm 6-15: Ergebnis der Temperaturen der Werkzeuge .....	82
Diagramm 6-16: Maximale Temperaturen innerhalb der Durchzugfläche .....	85
Diagramm 6-17: Minimale Temperaturen innerhalb der Durchzugfläche.....	86
Diagramm 6-18: Zusammenhang zwischen Temperatur- und Rotationsarbeitsverlauf .....	88
Diagramm 6-19: Temperaturverläufe St37 von 2 mm Blechdicke mit Standardgeometrie .....	90
Diagramm 6-20: Temperaturverläufe St52 von 2 mm Blechdicke mit Standardgeometrie .....	90
Diagramm 6-21: Temperaturverläufe St37 von 2 mm Blechdicke mit Sondergeometrie.....	91
Diagramm 6-22: Temperaturverläufe St52 von 2 mm Blechdicke mit Sondergeometrie.....	91
Diagramm 6-23: Temperaturverläufe St37 von 3 mm Blechdicke mit Standardgeometrie .....	93
Diagramm 6-24: Temperaturverläufe St52 von 3 mm Blechdicke mit Standardgeometrie .....	94
Diagramm 6-25: Temperaturverläufe St37 von 3 mm Blechdicke mit Sondergeometrie.....	94
Diagramm 6-26: Temperaturverläufe St52 von 3 mm Blechdicke mit Sondergeometrie.....	95
Diagramm 6-27: Temperaturverläufe X5CrNi18.10 mit Standardgeometrie .....	96
Diagramm 6-28: Temperaturverläufe X5CrNi18.10 mit Sondergeometrie .....	97

Diagramm 6-29: Temperaturverläufe AlMgSi1 von 2 mm Blechdicke mit Standardgeometrie..... 98

**Tabellenverzeichnis**

Tabelle 3-1: Aufteilung des optischen Strahlungsspektrums.....	20
Tabelle 3-2: Thermoelemente mit jeweiligen Typen und Temperaturbereichen /2/ .....	35
Tabelle 5-1: Chemische Zusammensetzung der Versuchswerkstoffe /1/, /24/ .....	59
Tabelle 5-2: Mechanische, physikalische und thermische Eigenschaften der Versuchswerkstoffe /1/, /24/ .....	59
Tabelle 5-3: Geometrie der Versuchswerkzeuge .....	61
Tabelle 5-4: Versuchsplan eines vollfaktoriellen 2 <sup>3</sup> -Versuches .....	64

## Formelzeichen

Größe	Einheit	Bedeutung
$A_5$	%	Bruchdehnung
$A_E$	$\text{cm}^2$	Empfängerfläche
$A_S$	$\text{cm}^2$	Senderfläche
$c$	$\mu\text{m s}^{-1}$	Lichtgeschwindigkeit
$c_1$	$3,74184 \cdot 10^{-4} \text{ W}\mu\text{m}^2$	Konstante im Planckschen Strahlungsgesetz
$c_2$	$1,43883 \cdot 10^{-4} \mu\text{m K}$	Konstante im Planckschen Strahlungsgesetz
$c_p$	$\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$	Spez. Wärmekapazität
$d$	mm	Bohrungsdurchmesser
$D_{\max}$	mm	maximaler Werkzeugdurchmesser
$D_{\min}$	mm	minimaler Werkzeugdurchmesser
$D_N$	mm	Nenndurchmesser
$e_p$	mm	Wanddicke der Buchse
$E_\lambda$	$\text{W/cm}^2\mu\text{m}$	Spektrale Bestrahlungsstärke
$F$	N	Kraft in Vorschubrichtung
$F_f$	N	Axialkraft
$h$	$6,626196 \cdot 10^{-34} \text{ W s}^2$	Plancksches Wirkungsquantum
$H_\lambda$	$\text{W s/cm}^2\mu\text{m}$	Spektrale Bestrahlung
$I_\lambda$	$\text{W/sr}\mu\text{m}$	Spektrale Strahlstärke
$k$	$1,380622 \cdot 10^{-23} \text{ W s K}^{-1}$	Boltzmannkonstante
$K_T$		Proportionalitätsfaktor
$L_K$	mm	Länge des Konus
$L_S$	mm	Länge der Spitze
$L_Z$	mm	Länge Zylinder
$\ell$	mm	Länge des unteren Teils der Buchse
$L_\lambda$	$\text{W/sr cm}^2\mu\text{m}$	Spektrale Strahldichte
$M_t$	Nm	Drehmoment
$M_\lambda$	$\text{W/cm}^2\mu\text{m}$	Spektrale spezifische Ausstrahlung
$n$	U/min	Drehzahl
$P$	$\text{W/m}^2$	Strahlungsleistung
$P_{\text{Hub}}$	%	Polygonhubfunktion
$P_\lambda$	$\text{W}/\mu\text{m}$ oder $\text{J}/\mu\text{m}$	Spektraler Strahlungsfluss
$Q_\lambda$	$\text{W s}/\mu\text{m}$ oder $\text{J}/\mu\text{m}$	Spektrale Strahlungsenergie
$r$	mm	Abstand vom Bohrungszentrum

$r$	cm	Radius
$r_i$	mm	Entfernung der Position $i$ vom Bohrungszentrum
$r_j$	mm	Entfernung der Position $j$ vom Zentrum des Loches
$R$	$^{\circ}\text{C}$	Raumtemperatur
$R_{\text{KZ}}$	mm	Übergangsradius vom Konus zum Zylinder
$R_{\text{m}}$	$\text{N}/\text{mm}^2$	Zugfestigkeit
$r_o$	mm	Werkzeugradius
$R_{\text{p}0,2}$	$\text{N}/\text{mm}^2$	Streckgrenze
$R_{\text{SK}}$	mm	Übergangsradius von der Spitze zum Konus
$R_{\text{ZB}}$	mm	Übergangsradius vom Zylinder zum Bund
$s$	mm	Blechdicke
$T$	K oder $^{\circ}\text{C}$	Temperatur
$t$	s	Zeit
$T_i$	$^{\circ}\text{C}$	Temperatur im Punkt - $r_i$
$T_j$	$^{\circ}\text{C}$	Temperatur im Punkt - $r_j$
$T_{\text{M}}$	$^{\circ}\text{C}$	Temperatur der Messstelle
$T_o$	$^{\circ}\text{C}$	Temperatur an der Kontaktstelle zwischen Werkzeug und Werkstück
$T_{\text{V}}$	$^{\circ}\text{C}$	Temperatur der Vergleichsstelle
$U_{\text{T}}$	mV	Potentialdifferenz
$v_c$	mm/min	Schnittgeschwindigkeit
$v_f$	mm/min	Vorschubgeschwindigkeit
$W_{\text{F}}$	J	Umformungsarbeit
$W_{\text{R}}$	J	Rotationsarbeit
$W_{\text{T}}$	J	Translationsarbeit
$z$	mm	Vorschubweg
$\rho$	$\text{kg}/\text{cm}^3$	Dichte
$\delta$	%	Risslänge
$\varphi$	rad	Drehwinkel
$\lambda$	$\text{W}/\text{mK}$	Wärmeleitfähigkeit
$\lambda$	$\mu\text{m}$	Wellenlänge
$\alpha_{\text{S}}$	$^{\circ}$	Ausstrahlungswinkel
$\alpha_{\text{S}}$	$^{\circ}$	Spitzenwinkel
$\alpha_{\text{E}}$	$^{\circ}$	Einstrahlungswinkel
$\alpha_{\lambda}$		Spektraler Absorptionsgrad

---

$\beta_K$	$^\circ$	Konuswinkel
$\rho_\lambda$		Spektraler Reflexionsgrad
$\tau_\lambda$		Spektraler Transmissionsgrad
$\varepsilon_\lambda$		Spektraler Emissionsgrad
$\sigma$	$5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$	Stefan-Boltzmann-Konstante
$\Omega_s$	$\text{sr} = \text{m}^2\text{m}^{-2}$	Raumwinkeleinheit
$\omega$	$\text{s}^{-1}$	Winkelgeschwindigkeit
$\nu$	$\text{cm}^{-1}$	Wellenzahl

## 1 Einleitung

Die Temperatur spielt in vielen Fertigungsverfahren eine große Rolle. Von besonderer Bedeutung beim Thermofließlochformen ist die Temperatur, welche eine von den wichtigsten Kenngrößen des Verfahrens darstellt. Thermofließlochformen ist ein spanloses Fertigungsverfahren zur Herstellung von Blechdurchzügen, welche meist für Schraubverbindungen verwendet werden, indem in die Durchzüge Gewinde gefurcht werden. Die beim Thermofließlochformen entstehende Temperatur wird hauptsächlich von der Reibung zwischen Werkstück und Werkzeug hervorgerufen. Somit wird die erforderliche Wärme zur Reduzierung des Widerstandes und zur Erhöhung der Plastizität des Werkstoffes erzeugt, um eine leichtere Umformbarkeit zu erhalten.

Bisher wurden zur Temperaturbestimmung im wesentlichen Thermoelemente eingesetzt. Die Nachteile dieser Methode sind die Probleme bei der Fixierung und die Beschädigung des Thermoelementes am Werkstück auf der gewünschten Messstelle während der Umformung. Ein unerwünschter Effekt bei der berührenden Temperaturmessung besteht darin, dass durch den Kontakt zwischen Messmittel und Messobjekt ein abführender Wärmestrom durch den Messmittelsensor auftritt. Dieser Wärmestrom kann das Messergebnis beeinflussen. Bei einer berührungslosen Temperaturmessung entfällt dieser negative Effekt, da hierbei die vom Messobjekt abgestrahlte Energie zur Temperaturbestimmung verwendet wird.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden die beim Thermofließlochformen entstehenden Temperaturen mittels zweier berührungsloser Temperaturmesssysteme untersucht, einmal mittels Strahlungsthermometer – dem sogenannten Pyrometer – bei welchem eine punktuelle Messung der Oberflächentemperatur erfolgt und mit einer Thermografiekamera, die eine flächige und bildhafte Temperaturdarstellung erlaubt. Von besonderer Bedeutung ist dabei die Untersuchung der präzisen Temperaturermittlung.

Weiterhin sollen die Temperaturen an fließlochgeformten Blechdurchzügen in Abhängigkeit von Werkstoffsorte, Werkstoffdicke und Werkzeuggeometrie untersucht werden. Für eine grundsätzliche Bewertung der Ergebnisse werden die Versuche mit Hilfe einer statistischen Versuchsplanung und -auswertung durchgeführt. Um die verwendeten Temperaturmesssysteme beim Thermofließlochformen miteinander vergleichen zu können wird anschließend eine Gegenüberstellung der von beiden Systemen gewonnenen Temperaturen und Temperaturverläufe, die während des Prozesses auftreten, durchgeführt.

Der wichtigste Parameter für eine präzise und genaue Temperaturbestimmung bei diesen beiden Temperaturmesssystemen stellt der Emissionsgrad der zu untersuchenden Ob-



jekte dar. Dieser beeinflusst das Resultat der Messung sehr stark. Aus diesem Grund werden im ersten Teil dieser Arbeit Vorversuche beschrieben, um die Emissionsgrade der zu untersuchenden Werkstoffe zu bestimmen.

Die Thermografiekamera bietet im Gegensatz zur Temperaturmessung mit dem Pyrometer die Möglichkeit, die Temperaturverteilung um das Messobjekt zu bestimmen. Infolgedessen werden die während der Bearbeitung auftretenden Temperaturen des entgegen der Vorschubrichtung nach oben verdrängten Werkstoffvolumens und des Werkzeuges untersucht. Einige Vor- und Nachteile der in dieser Arbeit eingesetzten Temperaturmesssysteme beim Thermofließlochformen sollen folgend aufgezeigt werden.

Ferner wird der Zusammenhang zwischen der während der Bearbeitung entstehenden Prozesstemperaturen und der Momente untersucht, um den Temperaturverlauf aus dem erfassten Momentverlauf ohne Temperaturmessung mittels Gleichungen berechnen zu können. Den Abschluss der Arbeit bilden eine Zusammenfassung und Folgerungen der Ergebnisse.

## 2 Stand der Technik - Fließlochformen

### 2.1 Historischer Rückblick des Prozesses

Zum ersten Mal versuchte der Franzose Claude de Valliere im Jahr 1923 Durchzüge in dünnwandige Bleche durch die Erzeugung von Wärme mit dem Kontakt von einem rotierenden Werkzeug im Bauteil spanlos herzustellen. Aufgrund der Unzugänglichkeit eines geeigneten hochwarmfesten Werkstoffes für das Werkzeug, versagten nach wenigen Bohrungen die eingesetzten Werkzeuge. Aus dieser Zeit ist weder die Technologie der Herstellung noch die Geometrie des Werkzeuges bekannt /4/.

Das erste Patent im Bereich Fließlochformen stammt aus dem Jahr 1929 und wurde im Jahr 1933 patentiert. Der Erfinder, Winford L. Enghauser, verwendete das Thermofließlochformenverfahren zur Herstellung von Gasverteilerrohren. Er verwendete eine mit einer konventionellen Bohrmaschine eingebrachten Kernlochbohrung, um den Durchzug mit einem von ihm entwickelten Werkzeug herzustellen. Wie er im Patent darstellt, erfolgt die Bearbeitung durch die Reibungserzeugung zwischen Werkzeug und Werkstück und einer resultierenden Zunahme der Temperatur im Werkstück /7/.

In den sechziger Jahren wurde die erste industrielle Anwendung des Fließlochformenverfahrens vorgestellt, die vom Holländer J. van Geffen entwickelt wurde. Er gab dem Prozess den Namen *vloei-borens*. Eines von den ersten Patenten von van Geffen stammt aus dem Jahr 1971 und handelt von einem 3-formstolligen Werkzeug zur Herstellung von Durchzügen /10/.

Im Laufe der siebziger Jahre entwickelte van Geffen andere Arten von Werkzeugen mit geometrischen Variationen – mit Erfolg in praktischen Anwendungen. Seit diesen Werkzeugen wurden mehrere aus Holland stammende Patente bis zum Ende dieses Jahrzehnts registriert. Aus dieser Zeit weisen weitere Fälle in Holland und England auf Anwendungen dieses Verfahrens hin /16/.

Im Jahr 1981 wurde von der Fa. Flowdrill B.V. und vom Erfinder Aloysius J. Hoogenboom ein neues Patent [GB A 2 091 610] über dieses Verfahren veröffentlicht. Die wichtigste Neuerung in diesem Patent liegt in der Form des Arbeitsteils, welcher vier Polygone aufweist. Laut Patent werden diese benutzt, um eine höhere Stabilität bei der Zentrierung des Werkzeuges am Anfang des Prozesses zu erzielen. Eine Veränderung der Anzahl dieser Polygone oder Formstollen wurde jedoch nicht ausgeschlossen.

Seit Beginn der siebziger Jahre begannen die ersten akademischen Forschungen über Fließlochformen an der Universität Siegen, Deutschland. Im Jahr 1980 promovierte Kretschmer an dieser Universität mit dem Titel seiner Dissertation "Fließlochformen von Blechdurchzügen" /16/. Dabei geht es um die Zusammensetzung der Umformung bei der Bildung eines Durchzuges aus Rotations- und Translationsarbeit. Die Rotationsarbeit, welche die Drehbewegung des Werkzeuges erzeugt, wird in Reibungswärme umgewandelt, sodass die Festigkeit des Werkstoffes sinkt und er sich somit zu einem Durchzug umformen lässt.

In den achtziger Jahren wurde das Verfahren von anderen Forschungsinstituten weiter verbreitet, wie z.B. von der TU Twente, Holland, unter der Leitung von Prof. H. J. J. Kals sowie von der Firma British Steel. Im Jahr 1991 begannen in dieser Richtung Forschungen sowohl in Brasilien unter der Leitung von Prof. W. L. Weingaertner an der Bundesuniversität Santa Catarina, als auch unter der Leitung von Prof. F. Tikal am Institut für Produktionstechnik und Logistik an der Universität Kassel.

## 2.2 Beschreibung des Prozesses

Thermofließlochformen ist ein spanloses Fertigungsverfahren zur Herstellung von Durchzügen in Blech oder Rohr, bei dem ein konisch angespitzter, zylindrischer Hartmetalldorn in Rotation versetzt und mit einer Kraft auf das umzuformende Werkstück gepresst wird. Die Reibung zwischen Werkstück und Werkzeug wird durch die Rotation erzeugt (siehe Abbildung 2-1). Somit wird die erforderliche Wärme zur Reduzierung des Widerstandes und zur Erhöhung der Plastizität des Werkstoffes erzeugt und das Material wird besser umformbar. Hierbei entsteht auf der Unterseite des Bleches ein Durchzug. Das entgegen der Vorschubrichtung nach oben verdrängte Volumen kann je nach Werkzeugausführung entweder zu einem Kragen umgeformt oder durch angeschliffene Frässhneiden zerspant werden. In den in Vorschubrichtung entstehenden Durchzug lässt sich ein Gewinde spanlos furchen (siehe Abbildung 2-2) /16/, /25/.

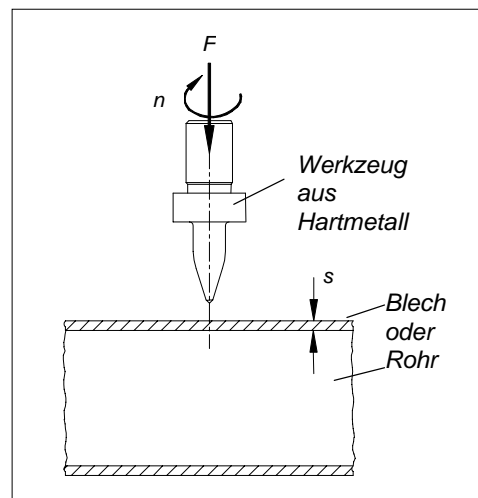
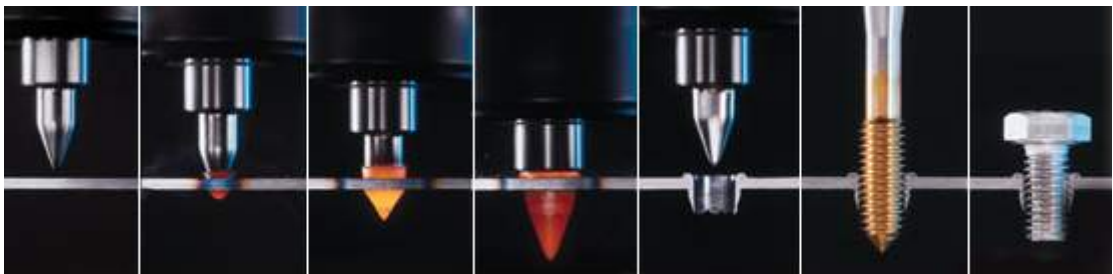


Abbildung 2-1: Schema des Prozesses nach VDI 3359

In das Fließlochformenverfahren wurde der Begriff „Thermo“ eingeführt, da die Erzeugung von Wärme und die Entwicklung der Temperatur wesentlichen Einfluss auf den Prozess hat. Zudem unterstützt er das Verständnis des Verhaltens von mehreren Phänomenen während all dieser Prozesse /19/.

Die Bohrverfahren werden von König als diejenigen definiert, die eine rotatorische Hauptbewegung ausführen, bei denen das Werkzeug lediglich einen Bewegungsvorschub in Achsrichtung aufweist. Nach dieser Definition kann das Fließlochformen einem Bohrverfahren zugeordnet werden. Es handelt sich aber um kein Zerspanungsverfahren, sondern um ein Verformungsverfahren, da kein Spanabtrag auftritt /14/.

Abbildung 2-2: Grafische Darstellung des Thermofließlochformenprozesses  
/6/

## 2.3 Das Werkzeug

Wie Abbildung 2-3 darstellt, kann ein Fließlochformer in drei Teilbereiche gegliedert werden: Den aktive Arbeitsteil, den Bund und den Schaft, der zur Befestigung des Werkzeuges in der Werkzeugaufnahme dient.

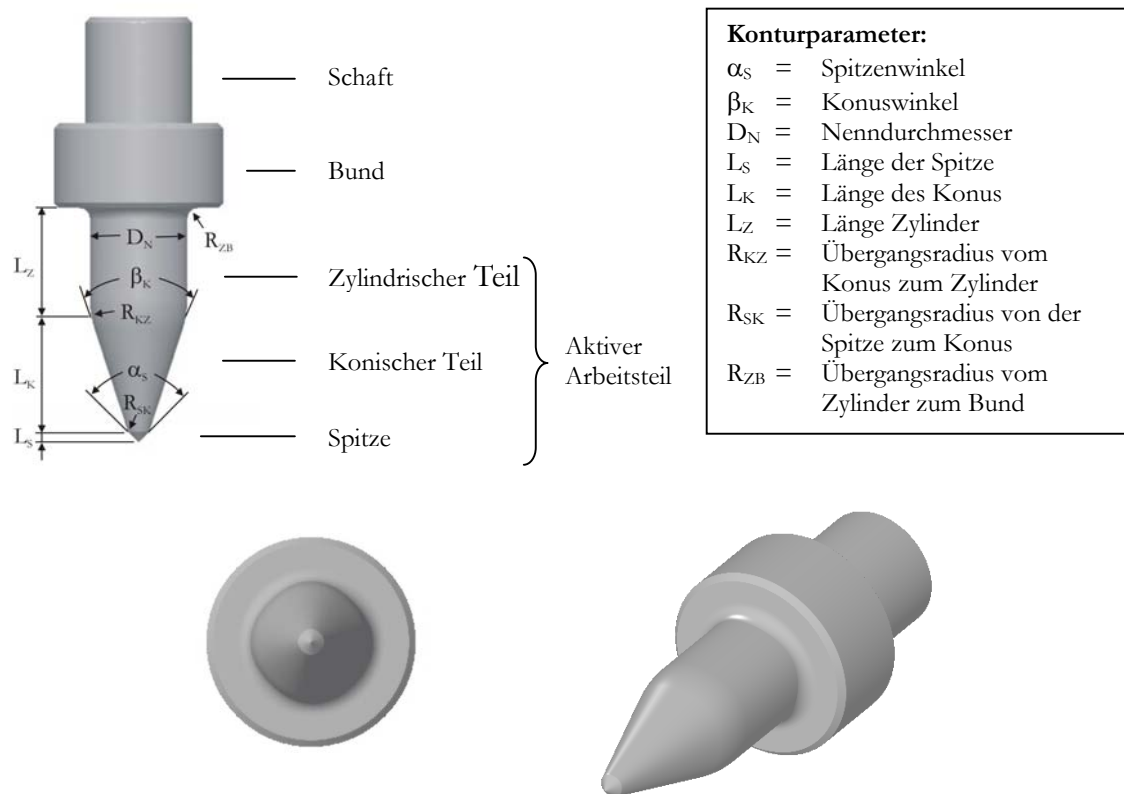


Abbildung 2-3: Geometrie des Werkzeuges zum Thermoflößlochformen

Der aktive Arbeitsteil besteht aus einer Spitze, einem konischen und anschließend zylindrischen Formteil.

Die Spitze dient zur Zentrierung des Werkzeuges und führt aufgrund ihrer relativ großen Reibfläche zu einer rapiden Erwärmung des Werkstückes zu Beginn des Bearbeitungsprozesses.

Der konische und zylindrische Formteil, welcher in Abhängigkeit der Bearbeitungsaufgabe unterschiedliche Längen aufweist, besitzt einen polygonförmigen Querschnitt. Die Polygonanzahl des konischen und zylindrischen Formteils liegt meist zwischen drei und sechs, der Polygonhub beträgt meist 96 %, der aus dem Quotient aus dem minimalen und maximalen Nenndurchmesser des Fließlochformers resultiert (Gl. 2-1).

$$P_{Hub} = \frac{D_{min}}{D_{max}} \quad (\text{Gl. 2-1})$$

Der Bund hat die Aufgabe, das entgegen der Vorschubrichtung nach oben geflossenen Volumen zu verdrängen oder durch Schneiden spanend zu entfernen.

Die Fließlochformer werden meist in den folgenden Formen angeboten (Abbildung 2-4):

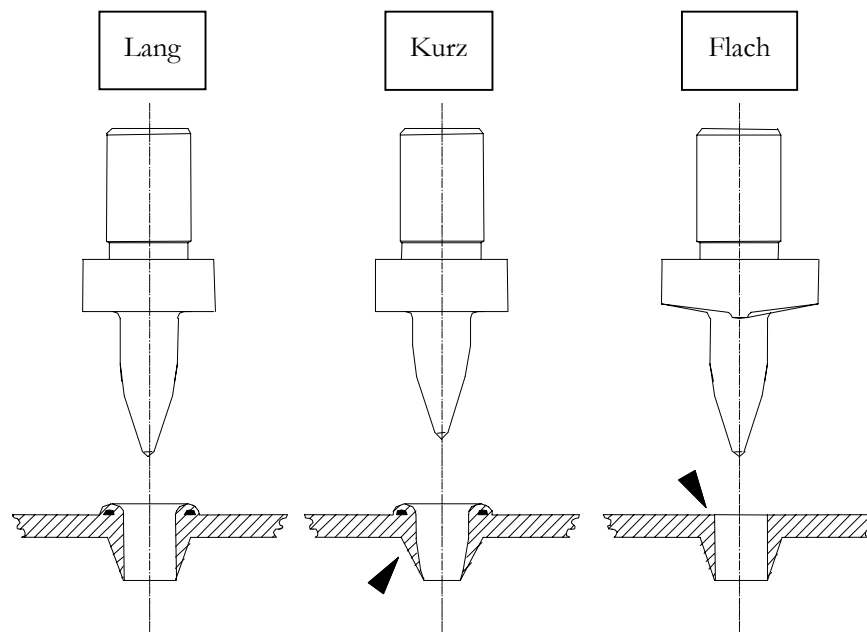


Abbildung 2-4: Fließlochformer „Lang“, „Kurz“ und „Flach“ mit jeweiliger Durchzugsform /4/

Bei der „Lang“ – Form bekommt der Durchzug die Gestalt einer zylindrischen Innenform, die als Lagerstelle, Lötverbindungsfläche oder als Durchgangsbohrung geeignet ist. Dieses Werkzeug ist für unterschiedliche Werkstoffdicke einsetzbar, die Länge des Werkzeuges hängt vom Werkzeugdurchmesser ab und ist je nach den unterschiedlichen Herstellern tabelliert /4/.

Die „Kurz“ – Form stellt Durchzüge her, deren Innenform eine konische Gestalt annimmt, die anschließend für eine Gewindeherstellung durch Furchen vorgesehen sind. Wie bei der „Lang“ – Form ist dieser Werkzeugtyp für verschiedene Materialstärken einzusetzen. Die Werkzeuglänge ist vom Durchmesser des Fließlochformers abhängig und katalogisiert /4/.

In der „Flach“ – Form wird der aus dem Prozess auf dem Blech entstehende Deckel durch ein eingeschliffenes Schneiden des Bundes abgefräst, der hier als Senker funktioniert, um eine glatte und freie obere Oberfläche der Buchse zu erzeugen. Laut Herstellerangaben werden diese Sorten von Fließlochformer zu ca. 70 % verwendet /4/.

Das Werkzeug zum Thermofließlochformen wird meist aus Hartmetall der Klassen P20 oder P40 hergestellt. Es werden auch Werkzeuge aus Cermet angeboten, welche aber aufgrund der höheren Produktionskosten eine Sonderausführung darstellen. Beschichtete Werkzeuge wie z.B. aus (TiAl)N und Diamant sind für die Bearbeitung von Edelstahl bzw. von Aluminium vorteilhaft /5/, /13/.

## 2.4 Das Werkstück und der Werkstoff

Generell können fast alle Werkstoffe beim Thermofließlochformenverfahren verwendet werden wie z.B. Aluminiumlegierungen, Kupfer, Bronze, Messing, Magnetwerkstoffe und dünne Bleche aus schweißbaren legierten und unlegierten Stählen. Anschließend sind sie auch für das Gewindefurchenverfahren anwendbar. Die Umformbarkeit verbessert sich mit der Erhöhung der Plastizität des Werkstückes /4/.

In bezug auf das Werkstück sollen der Werkstoff, die Geometrie, der Abstand zwischen den Bohrungen und die entsprechenden mechanischen und thermophysischen Eigenschaften berücksichtigt werden /18/. Zur Herstellung der Buchse liegt die minimale Dicke des Werkstückes im Bereich von 1,5 und 2,0 mm. In diesen Fällen lassen sich Werkzeuge für M6 und M8 einsetzen /28/, /9/. Die obere Grenze der Dicke beträgt 16 mm bei Werkzeugen mit einem Durchmesser größer als 20 mm /3/.

## 2.5 Schmierung, Kühlung und Maschinen

Während des Thermofließlochformenverfahrens entstehen je nach Temperatur mehr oder weniger starke Veränderungen der Farbe von Werkstück und Werkzeug. Abbildung 2-5 zeigt den Vorgang für Stahl.



Abbildung 2-5: Farbveränderung beim Thermofließlochformen /28/

Die Farben variieren zwischen einem dunklen und einem hellen Rot, d.h. es liegen hier Temperaturen im Bereich von ca. 600 bis 800 °C vor, ein Schmieren des Werkzeuges ist erforderlich /16/.

Die Hauptaufgaben der Schmierung sind das Verhindern der Adhäsion von Material am Werkzeug und die Verringerung von Verschleiß und Vibration. Aus diesen Gründen wurde bei den in dieser Arbeit beschriebenen Versuchen ein spezielles Schmiermittel auf der Basis von Zinksulfit verwendet /19/.

Es wird eine Verringerung der Temperatur an der Kontaktfläche zwischen Werkzeug und Werkstück mit gleichzeitiger Reduzierung der Reibung und folglich ein Anstieg der Standmenge des Werkzeuges durch den Einsatz dieses besonderen hochhitzefesten Schmiermittels erreicht.

Als Schutz der Werkzeugaufnahme gegen die hohe thermische Belastung wird ein Spannfutter mit Kühlrippen eingesetzt, welches für die Dispersion der von den hohen Temperaturen erzeugten Wärme verantwortlich ist /4/.

Die Werkzeuge für das Thermofließlochformen sind sowohl auf Bohrmaschinen, Fräsmaschinen als auch auf CNC-Bearbeitungszentren anwendbar. Es gibt aber auch einige Hersteller, die besondere Maschinen für die Bearbeitung von Rohren und Profilen mit vielen Bohrungen produzieren /6/. Andere Hersteller bieten Bohrmaschinen an, welche zum Teil mit Mehrfachköpfen ausgerüstet sind, um einen Werkzeugwechsel zum folgenden Gewindefurchen zu ermöglichen. Diese besitzen ausreichend hohe Drehzahlen und Vorschübe, die für das Thermofließlochformen geeignet sind /8/.

## 2.6 Komponenten des Prozesses

### 2.6.1 Stellgrößen

Die Stellgrößen beim Thermofließlochformen sind ähnlich denen beim konventionellen Bohren. Die Vorschubgeschwindigkeit  $v_f$  ist für die Eindringungsbewegung des Werkzeuges in das Werkstück verantwortlich, wie z.B. beim Bohren mit Spiralbohrer. Diese Größe ist äquivalent dem in konventionellen Maschinen verwendeten Vorschub [mm/U], der drehzahlabhängig ist. Bei der Anwendung auf konventionellen Maschinen lässt sich die Vorschubgeschwindigkeit während des Prozesses nicht verändern, wenn die Drehzahl konstant gehalten wird.

Bei CNC-Maschinen wird der Vorschub in mm/min angegeben und kann unabhängig von der Drehzahl programmiert werden. Somit wird eine Variation der Vorschubgeschwindigkeit und der Drehzahl während des Thermofließlochformens ermöglicht, sodass die Dynamik des Prozesses beeinflussen werden kann. Beim gestuften Vorschub wird bis zu einem bestimmten Umschaltzeitpunkt eine reduzierte Vorschubgeschwindigkeit verwendet, um ausreichende Wärme ins Werkstück einzubringen. Nach dem Erreichen des Umschaltzeitpunktes verringert sich die Festigkeit des Materials. Somit kann die Vorschubgeschwindigkeit



keit auf ein hohes Niveau umgeschaltet werden, was eine leichtere und schnellere Umformung des Werkstückes bewirkt /11/, /18/.

## 2.6.2 Phasen beim Thermofließlochformen

Die Kinematik des Thermofließlochformenverfahrens bezieht sich auf das Verhalten der Prozessgrößen Axialkraft und Drehmoment in Abhängigkeit der Eingangsvariablen. Der Prozess kann in drei Phasen (Abbildung 2-6) unterteilt werden: Startphase, Fließphase und Umformphase.

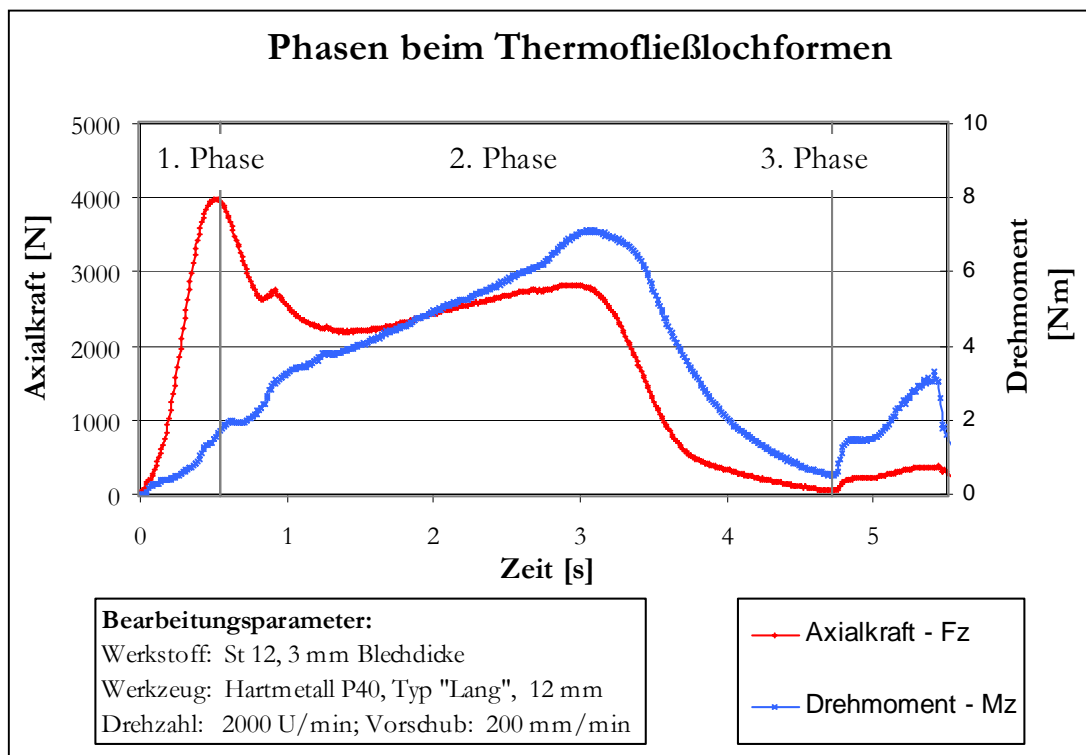
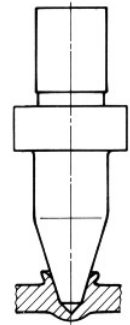


Abbildung 2-6: Axialkraft- und Drehmomentverlauf beim Thermofließlochformen

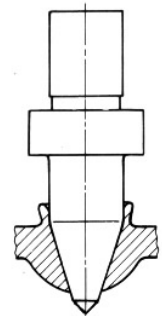
### 1. Phase - Startphase

Im vorigen Diagramm ist im Bereich der Startphase zu erkennen, dass mit dem Eindringen der Werkzeugspitze ins Werkstück die Axialkraft linear ansteigt. Anfänglich erfolgt dies mit einer Umformung des Werkstoffes entgegen der Vorschubrichtung. Der Grund für den starken Anstieg der Axialkraft liegt in der kleinen Reibfläche. Somit entsteht eine geringe Wärme durch die Reibung. Das Drehmoment nimmt am Anfang ebenfalls aufgrund der ansteigend Kontaktfläche zwischen Werkstück und Werkzeug kontinuierlich zu, jedoch nicht so steil und mit einem Versatz zur Axialkraft. Diese nimmt solange zu, bis der konische Teil des Werkzeuges in das Werkstück eingedrungen ist.



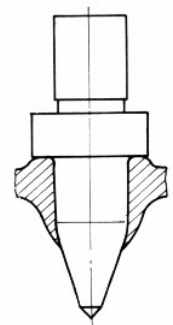
### 2. Phase - Fließphase

Nach dem Erreichen der maximalen Axialkraft beginnt die Fließphase. Zu diesem Zeitpunkt ist die Temperatur bereits hoch genug, um den Werkstoff zum Fließen zu bringen. Die Wärmeerzeugung erreicht in dieser Phase einen Maximalwert. Hier geschieht eine Umformung des Werkstoffes in Axial- und Radialrichtung. Die erforderliche Axialkraft, um den Werkstoff in Vorschubrichtung umzuformen, nimmt allmählich ab. Das Drehmoment nimmt mit der ansteigend Kontaktfläche zwischen Werkzeug und Werkstück zu. Mit dem Erreichen des Maximalwertes des Drehmoments dringt der zylindrische Teil des Werkzeuges in das Werkstück ein.



### 3. Phase - Umformphase

In dieser Phase wird der gegen die Vorschubrichtung geflossene Werkstoff vom Bund des Werkzeuges verdrängt, um den Deckel zu erzeugen. Bei den Werkzeugen mit angeschliffener Schneide am Bund wird dieser Deckel entfernt. Beim Aufsetzen des Werkzeuges auf das Material entstehen höhere Axialkräfte und Drehmomente. Bei der Entfernung des Materials an der Oberseite verringern sich Axialkraft und Drehmoment.



#### 2.6.3 Die Rotations- und Translationsarbeit

Für eine korrekte Auswertung des thermischen Einflusses dieses Verfahrens soll eine Ermittlung für den Eintrag der mechanischen Energie während des Thermofließlochformenverfahrens durchgeführt werden. Diese Energie besteht aus einem geringen Anteil von

dynamischer Reibung zwischen Werkzeug und Werkstück /16/. Der größte Teil wird von der Umformungsarbeit des Werkstoffes erzeugt, welcher aus den Komponenten Rotationsarbeit ( $W_R$ ) und Translationsarbeit ( $W_T$ ) besteht.

Die Arbeit beim Thermofließlochformen erfordert eine höhere Leistung als das konventionelle Bohren /16/. Der rotatorische Teil der Arbeit ist der Anteil, der von der Drehbewegung des Werkzeuges aufgebracht wird. In diesem Prozess ist durch die Reibungsarbeit und die Umformung für den größten Anteil der Transformation von mechanischer Energie in Wärme verantwortlich. Die Vorschubbewegung führt die Translationsarbeit aus, welche zur Verformung des Werkstoffes in axialer Richtung führt und zur Umformung der Buchse sorgt.

Die Fläche unter der Drehmomentkurve als Funktion des Drehwinkels  $\varphi$  (

Abbildung 2-7) charakterisiert die Rotationsarbeit  $W_R$ , die beim Thermofließlochformen erzeugt und nach Gleichung 2-2 berechnet wird /16/.

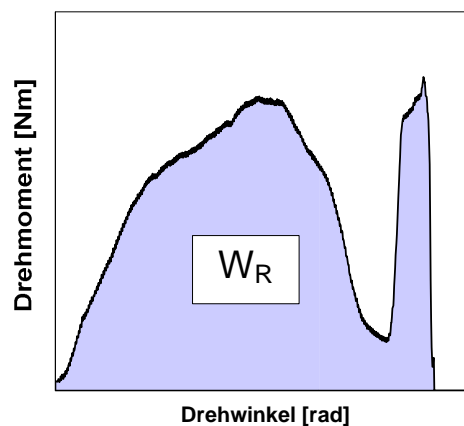


Abbildung 2-7: Rotationsarbeit  $W_R$

$$W_R = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} M t \, d\varphi \quad (\text{Gl. 2-2})$$

Der Drehwinkel  $\varphi$  ist von der Prozesszeit  $t$  und der Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  (Gleichung 2-3) abhängig.

$$\varphi = \omega \cdot t \quad (\text{Gl. 2-3})$$

Nach dieser Gleichung kann der Drehwinkel als Funktion der Drehzahl gewonnen werden:

$$\varphi = \frac{\pi}{30} \cdot n \cdot t \quad (\text{Gl. 2-4})$$

Die Rotationsarbeit  $W_R$  wird von dem modifizierten Integral (Gleichung 2-5) als Funktion der Zeit erzeugt.

$$W_R = \frac{\pi}{30} \cdot n \int_{t_1}^{t_2} M_t \cdot dt \quad (\text{Gl. 2-5})$$

Am Anfang des Prozesses wirkt der Widerstand des Werkstoffes der Translationsbewegung des Werkzeuges entgegen, welche annähernd nur aus der Axialkraft besteht. In dieser Phase erfährt der Werkstoff einen ähnlichen Prozess wie die Kaltumformung, und wird in entgegengesetzter Richtung der Durchdringung des Werkzeuges gezogen. In diesem kurzen Zeitintervall wird die erforderliche Energie zur Werkstoffumformung lediglich von der Translationsarbeit  $W_T$  erzeugt (siehe Abbildung 2-8).

Die Translationsarbeit  $W_T$  wird durch die Fläche unter der Axialkraftkurve als Funktion des Vorschubweges  $z$  in Richtung Eindringen des Werkzeuges dargestellt, welche nach der Gleichung 2-6 zu berechnen ist.

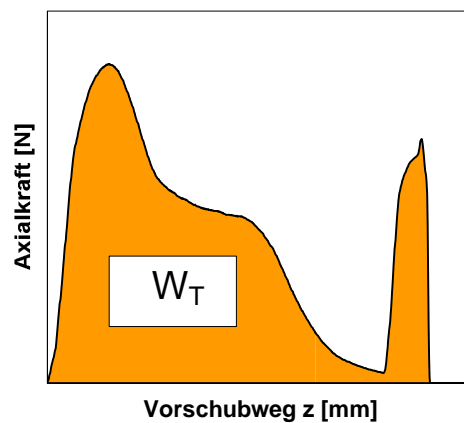


Abbildung 2-8: Translationsarbeit  $W_T$

$$W_T = \int_{z_1}^{z_2} F_f \, dz \quad (\text{Gl. 2-6})$$

Die Transformation des Weges  $z$  in Zeit  $t$  lässt sich durch die Gleichung 2-7 generieren.

$$z = \frac{v_f \cdot t}{6 \cdot 10^4} \quad (\text{Gl. 2-7})$$

Die Berechnung der Translationsarbeit  $W_T$  wird somit nach der modifizierten Gleichung 2-8 bestimmt.

$$W_T = \frac{v_f}{6 \cdot 10^4} \int_{t_1}^{t_2} F_f \, dt \quad (\text{Gl. 2-8})$$

Die gesamte Umformungsarbeit  $W_F$ , welche die angewandete Energie in Joules in der Buchseverformung repräsentiert, ist durch die Summe der Rotations- und Translationsarbeit gegeben. Nach Gleichung 2-9 folgt:

$$W_F = W_R + W_T \quad (\text{Gl. 2-9})$$

## 2.7 Temperatur beim Thermofließlochformen

Für den Thermofließlochformenprozess ist die Temperatur von großer Relevanz, aufgrund ihres Einflusses auf die Eigenschaften des Werkstückes (Grenzformänderungsvermögen, Fließspannung), auf den Verschleiß des Werkzeuges und auf das Mikrogefüge des Werkstoffes /18/.

Die ersten Temperaturmessungen beim Thermofließlochformen wurden von Kretschmer /16/ durchgeführt. Messungen wurden im Bereich der Buchse durch verschiedene Methoden realisiert, wie Farbstab, Infrarotpyrometer und Thermoelement. Laut Kretschmer kann der Farbstab durch andere physikalischen Methoden wie Schwermetallsalze oder Flüssigkeitskristalle ersetzt werden.

Zu Beginn führte man Versuche mit Farbstäben durch, deren Farben sich veränderten, wenn eine bestimmte Temperatur erreicht wurde. Anhand dieser Methode wurden Temperaturen der Größe von 560 °C im Bereich der Buchse in Stahlblech nach DIN St37 von 2 mm Blechdicke und einem Werkzeugdurchmesser von 5,07 mm gemessen. An der Oberseite der Bohrung, in der Nähe der Berührungsfläche zwischen Werkzeug und Werkstück erreichte man Werte um die 715 °C. Diese Methode ist sehr unzuverlässig, da der Einfluss des Bedieners auf das Ergebnis sehr groß ist. Außerdem sind die Farben in Bohrungen mit kleinen Durchmessern sehr schwierig zu beobachten, und die niedrige Erhitzung und die kurze Dauer keine deutliche Farbeveränderung erlauben /16/.

Die berührungslose Temperaturmessung mit Hilfe eines Infrarotpyrometers war die zweite verwendete Methode von Kretschmer. Mit diesem Messgerät wurden Temperaturen von 680 bis 710 °C in St37 aufgenommen (siehe Abbildung 2-9). Mit dieser Methode wurde keine ausreichende Genauigkeit aufgrund der komplizierten Justierung des Messgerätes und des nicht konstanten Emissionsgrades des strahlenden Objektes (Werkstück) /15/.

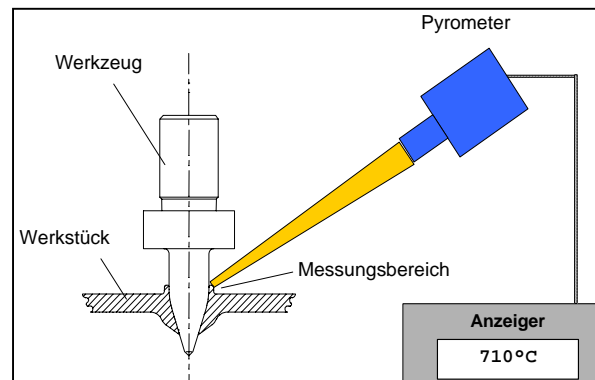


Abbildung 2-9: Temperaturmessung mit Pyrometer

Da die Temperaturmessung beim Thermofließlochformen von den hohen Temperaturgradienten von 300 °C/s erschwert wird, ist die Anwendung von Thermoelementen die präzisere Methode, um die Zustände im Prozess zu ermitteln /12/.

Bei den Versuchen mit Thermoelementen (Abbildung 2-10) wurden solche vom Typ NiCr - Ni in geringem Abstand zueinander außerhalb der Fließzone eingebracht.

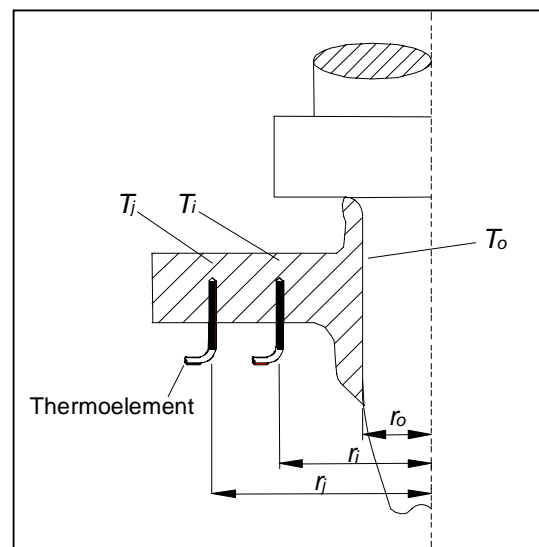


Abbildung 2-10: Temperaturmessung mit Thermoelementen /12/

Über ein mathematisches Modell kann der Maximalwert der Temperatur an der Kontaktstelle zwischen Werkzeug und Werkstück berechnet werden, ausgehend von dem gemessenen Maximalwert der Temperatur an einem Radialpunkt in Richtung Bohrungsmitte. Bei der Entwicklung dieses Modells wurde eine eindimensionale Wärmeausbreitung mit radial-symmetrischer Verteilung in Vorschubrichtung berücksichtigt. In Gleichung 2-10 wird das Problem als stationäres System behandelt und die Wärmeübertragung durch Konvektion und Strahlung nicht beachtet.

$$T_o = T_i + \ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right) \cdot \frac{T_j - T_i}{\ln\left(\frac{r_j}{r_i}\right)} \quad (\text{Gl. 2-10})$$

Nach dieser Formel (Gl. 2-11) kann die Temperatur  $T_o$  am Innendurchmesser der Buchse  $r_o$  berechnet werden, sofern man von den maximalen Temperaturen  $T_i$  und  $T_j$  ausgeht, welche an den Punkten  $r_i$  und  $r_j$  zu messen sind (vgl. Abbildung 2-10).

Bei einem Versuch in Stahlblech von 2,0 mm Blechdicke und einem Werkzeugdurchmesser von 5,07 mm konnte mit Hilfe dieser Gleichung eine Temperatur von 470 °C an der Kontaktfläche berechnet werden.

Ein ähnliches Experiment wird in der Literatur /19/ beschrieben. Bei der Anwendung eines Bleches mit niedrigem Kohlenstoffgehalt und 3,0 mm Blechdicke konnte dabei die Temperatur an der Kontaktfläche für ein Werkzeug mit Durchmesser von 11,7 mm mit 770 °C bestimmt werden.

Auch Kretschmer /15/ hat Temperaturen durch Thermoelemente bestimmt. In diesen Fällen wurden die Temperaturen beim Durchgang des Werkzeuges direkt in der Fließzone gemessen. Dieses Verfahren sollte bessere Resultate liefern. Die Abbildung 2-11 zeigt die Anordnung des Thermoelementes bei diesem Experiment. Für einen Versuch in Stahlblech St37 von 2 mm Blechdicke und einem Werkzeugdurchmesser von 12 mm sind die Ergebnisse rechts in der Grafik zu sehen. In diesem Fall liegt der Maximalwert der Temperatur bei ca. 800 °C.

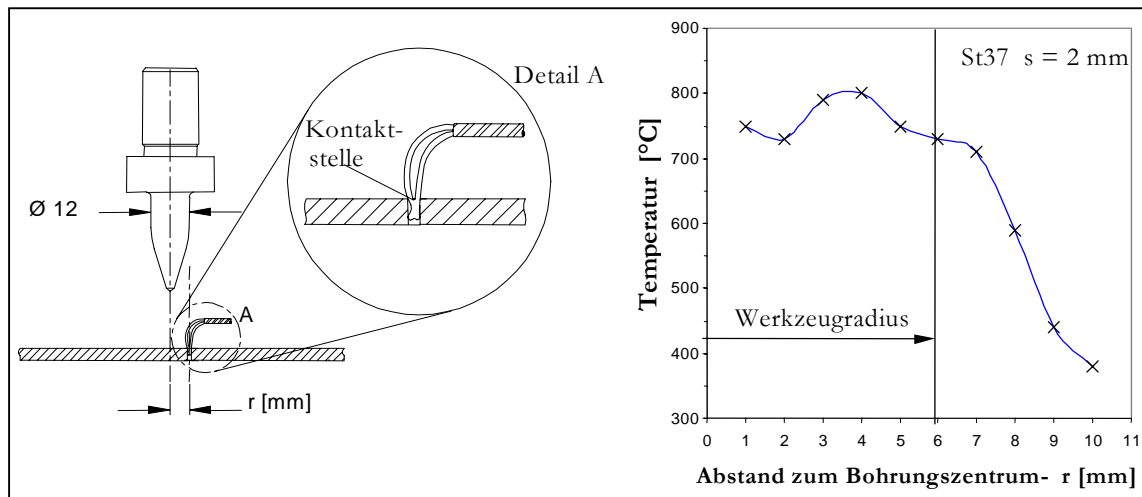


Abbildung 2-11: Temperaturen im Umformbereich

Im obigen Diagramm ist auch zu sehen, dass die gemessene Temperatur einen besonderen Verlauf zeigt: Der Maximalwert der Temperatur wird erreicht, bevor das Thermoelement mit dem Werkzeug in Kontakt kommt. Mit zunehmendem Abstand  $r$  vom Bohrungszentrum tritt eine Reduzierung der Temperatur auf /15/.

## 2.8 Anmerkungen zu den Buchsen

### 2.8.1 Formen und Maße der Buchsen

Im Grunde wird die Form der gefertigten Buchse durch die verwendete Werkzeugform definiert, wobei eine kurze Werkzeugform eine konische Innenform und eine langen Werkzeugform eine zylindrische Innenform der Buchse erzeugt /4/.

Die Form der Buchse ist für das folgende Gewindefurchen wichtig: In Buchsen mit dickeren Wänden und kürzeren Längen mit konischer Innenform kann eine höhere Anzahl von ausgeprägten Gewindegängen erzeugt werden und somit die Zugfestigkeit der Gewinde erhöht werden. Längere Buchsen, d.h. Buchsen mit dünneren Wänden, erhalten weniger ausgeprägte Gewindegänge, da die Radialverformung der Buchse mit dünneren Wänden während der Gewindeherstellung intensiver ist /11/.

Als Hauptmaße der Buchse sind die Wanddicke  $e_p$ , der Bohrungsdurchmesser  $d$  und die Länge des unteren Teils der Buchse  $\ell$  zu nennen, wie in der folgenden Abbildung verdeutlicht wird.

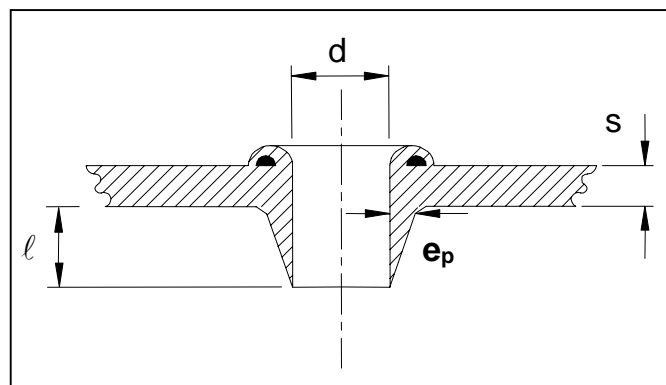


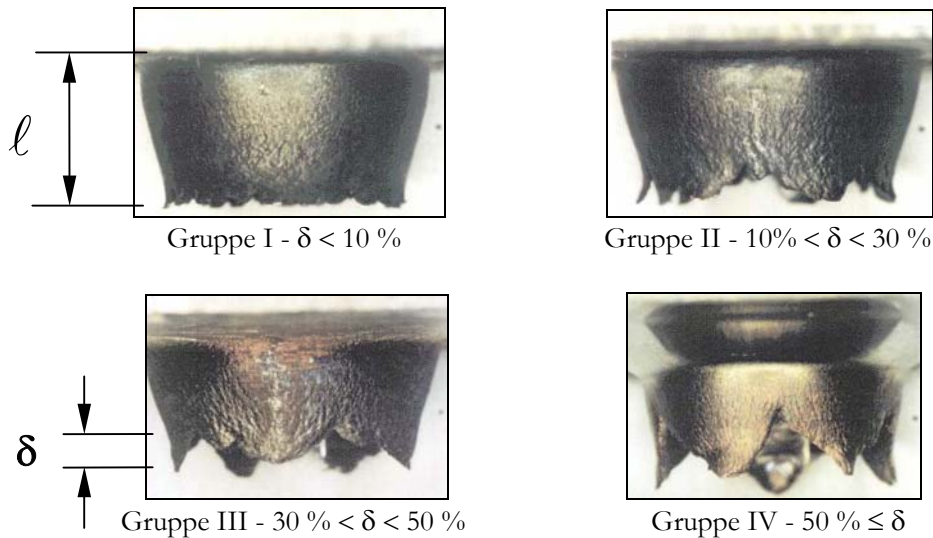
Abbildung 2-12: Hauptgröße der Buchse beim Thermofließlochformen

### 2.8.2 Qualität der Buchsen

Für die Bewertung der Buchsenqualität werden die Hauptparameter zur Auswertung herangezogen. Dafür wurde ein Klassifizierungssystem /19/ entwickelt, bei dem die Qualität der Buchse dem Prozentsatz  $\delta$  der Länge der Buchse  $\ell$  entspricht. Diese wird durch die Risslänge am unteren Buchsenrand bestimmt.



Durch Modifizierung der maximalen erlaubten Risslänge jeder Qualitätsgruppe wurde die vorangegangene Klassifizierung einer optimierten Form /11/ angepasst, wie in der Abbildung 2-13 gezeigt wird.



**Abbildung 2-13: Einteilung der Buchsen durch die Risslänge am unteren Buchsenrand**

Mit den Gruppen I und II können die besten Ausgangsformen erreicht werden und die hier hergestellten Durchzüge sind zu bevorzugen. Eine industrielle Anwendung der Buchsen der Gruppen III und IV, z.B. bei einem anschließenden Gewindefurchen ist nicht zu empfehlen /19/, /11/.

## 2.9 Anwendungen

Heutzutage gibt es viele Beispiele für die Anwendungen des Thermofließlochformens. In der Automobilindustrie werden beispielsweise angeschweißte Muttern und Bohrungen in Bauteilen aus Profilen und Rohren durch dieses Verfahren ersetzt. Auch bei Kfz-Sicherheitslenksäulen und Lambda-Sonden wird das Verfahren angewendet.

Ferner finden Anwendungsmöglichkeiten in der Möbel- und Büromöbelindustrie, Bauingenieurwesen, Rohrleitungs- und Heizungsbau, Landmaschinenbau, Fahrradindustrie, Industrie für hydraulische und pneumatische Ausrüstungen und Verbraucherindustrie statt.

## **3 Stand der Technik -Temperaturmessung**

### **3.1 Grundlagen thermografischer Messsysteme**

Die beim Thermofließlochformen entstehenden Temperaturen haben einen starken Einfluss auf das Fertigungsverfahren. Die Temperaturmessung mittels Thermoelmenten hat einige Nachteile /12/ aufgezeigt, wie die komplizierte und umständliche Installierung und die dabei immer wieder auftretende Zerstörung des Thermoelmentes. Die berührungslose Messung der Temperatur mit Hilfe der Thermografie ermöglicht eine direkte Messung der Temperatur auf der Werkstückoberfläche sowie auf dem Werkzeug.

Die vom Objekt emittierende Strahlung ist ein System von drei Komponenten /23/:

- das Messobjekt als Strahlungsquelle
- die Strahlungsübertragungsstrecke
- das Strahlungsmessgerät

Das Verständnis der Eigenschaften in bezug auf die Strahlungsmessung ist für die Entwicklung des anvisierten Messgeräts von fundamentaler Bedeutung. Eine kurze Erläuterung des Inhaltes der Strahlungsgesetze ist zu einem besseren Verständnis hilfreich, da die Messmethode auf diesen basieren.

#### **3.1.1 Die Strahlungsgesetze**

Der infrarote Spektralbereich ist nach DIN 5031 dem Bereich der optischen Strahlung zugeordnet, der auch die ultraviolette, die sichtbare und die infrarote Strahlung umfasst. Dabei handelt es sich um Strahlung im von 780 nm bis 1 mm Wellenlänge.

In der Tabelle 3-1 sind verschiedene Strahlungsarten und ihre entsprechenden Wellenlängen dargestellt.

Strahlungsart	Wellenlänge
Optische Strahlung	100 nm ... 1 mm
Ultraviolettstrahlung (UV)	100 ... 380 nm
UV-C	100 ... 280 nm
UV-B	280 ... 315 nm
UV-A	315 ... 380 nm
Sichtbare Strahlung (Licht)	380 ... 780 nm
Infrarotstrahlung (IR)	780 nm ... 1 mm
IR-A	780 nm ... 1,4 $\mu\text{m}$
IR-B	1,4 ... 3,0 $\mu\text{m}$
IR-C	3,0 $\mu\text{m}$ ... 1 mm

**Tabelle 3-1: Aufteilung des optischen Strahlungsspektrums**

In DIN 5496 sind einige strahlungsphysikalische Größe und Einheiten definiert:

- Die Wellenlänge  $\lambda$  [ $\mu\text{m}$ ] der Strahlung wird definiert als die Länge einer Schwingungsperiode.
- Die Wellenzahl  $\nu$  [ $\text{cm}^{-1}$ ] ist eine äquivalent Größe der Wellenlänge und beschreibt die Anzahl der Perioden pro Zentimeter.

Beide Größen lassen sich nach der folgenden Gleichung umrechnen:

$$\nu = \frac{1}{\lambda} \quad (\text{Gl. 3-1})$$

- Je Zeit und Wellenlängeneinheit stellt die spektrale Strahlungsleistung oder der spektrale Strahlungsfluss  $P_\lambda$  [ $\text{W}/\mu\text{m}$  oder  $\text{J}/\mu\text{m}$ ] eine von einer Fläche abgetretene oder auf eine Fläche aufstoßende spektrale Strahlungsenergie  $Q_\lambda$  [ $\text{Ws}/\mu\text{m}$  oder  $\text{J}/\mu\text{m}$ ] dar. Der mathematische Zusammenhang zwischen spektralem Strahlungsfluss  $P_\lambda$  und spektraler Strahlungsenergie  $Q_\lambda$  erfolgt nach:

$$Q_\lambda = \int P_\lambda dt \quad (\text{Gl. 3-2})$$

Empfangene und ausgesandte Strahlung kann sich durch die Verwendung der Strahlungsenergie  $Q_\lambda$  auch durch den Strahlungsfluss  $P_\lambda$  beschreiben lassen.

Die Bezeichnung der drei folgenden Größen erstreckt sich ausnahmslos auf die ausgesandte Strahlung:

- Die spektrale spezifische Ausstrahlung  $M_\lambda$  [W/cm<sup>2</sup>μm] ist der je Flächen- und Wellenlängeneinheit von der Strahlung ausgesandte spektrale Strahlungsfluss  $P_\lambda$ .

Es ergibt sich:

$$M_\lambda = \frac{dP_\lambda}{dA_S} \quad (\text{Gl. 3-3})$$

Der Term  $dA_S$  charakterisiert die Flächeneinheit des strahlenden Objektes und der Index S steht für den (Strahlungs-) Sender.

- Der von einem Objekt je Wellenlängeneinheit in die Raumwinkeleinheit ausgesandte spektrale Strahlungsfluss  $P_\lambda$  ist die spektrale Strahlstärke  $I_\lambda$  [W/sr μm].

Es ergibt sich:

$$I_\lambda = \frac{dP_\lambda}{d\Omega_S} \quad (\text{Gl. 3-4})$$

Der Term  $d\Omega_S$  gibt die Raumwinkeleinheit an.

- Der von einer Strahlungsquelle je Flächen- und Wellenlängeneinheit in die Raumwinkeleinheit ausgesandte Strahlungsfluss  $P_\lambda$  ist die spektrale Strahldichte  $L_\lambda$  [W/sr cm<sup>2</sup> μm].

Es ergibt sich:

$$L_\lambda = \frac{d^2 P_\lambda}{dA_S d\Omega_S} \quad (\text{Gl. 3-5})$$

Die folgenden beiden Größen beziehen sich ausschließlich auf die empfangene Strahlung:

- Der je nach Wellenlängen- und Flächeneinheit auf eine Empfangsfläche auftreffende spektrale Strahlungsfluss  $P_\lambda$ , wie z.B. auf die Pyrometeroptik, ist die spektrale Bestrahlungsstärke  $E_\lambda$  [W/cm<sup>2</sup> μm].

Es ergibt sich:

$$E_\lambda = \frac{dP_\lambda}{dA_E} \quad (\text{Gl. 3-6})$$

Der Term  $dA_E$  ist die Flächeneinheit der Empfangsfläche und der Index E der (Strahlungs-) Empfänger.

- Die spektrale Strahlungsenergie  $Q_\lambda$ , die je Wellenlängen- und Flächeneinheit auf eine Empfangsfläche auftrifft ist die spektrale Bestrahlung  $H_\lambda$  [Ws/cm<sup>2</sup> μm].

Es ergibt sich:

$$H_\lambda = \int E_\lambda dt \quad (\text{Gl. 3-7})$$

### 3.1.1.1 Das radiometrische Grundgesetz

Eine erforderliche Voraussetzung für eine quantitative Messung der Strahlung ist das Verständnis von der Ausbreitung der Strahlung. Das radiometrische Grundgesetz beschreibt die Gesetzmäßigkeiten der Strahlungsausbreitung im infraroten Spektralbereich.

Die Strecke der Übertragung zwischen dem Strahlungssender und Strahlungsempfänger wird als ideal angenommen, d.h. es besteht kein Einfluss auf deren Ausbreitung. Der spektrale Strahlungsfluss  $P_\lambda$  ist nach dem radiometrischen Grundgesetz, „den ein Flächenelement  $dA_S$  einer Strahlungsquelle (Sender) mit der Strahldichte  $L_\lambda$  unter dem Ausstrahlungswinkel  $\alpha_S$  dem von ihm im Abstand  $r$  befindlichen Flächenelement  $dA_E$  (Empfänger) unter dem Einstrahlungswinkel  $\alpha_E$  zustrahlt gegeben durch“ /23/.

$$d^2 P_\lambda = L_\lambda \frac{dA_S \cos \alpha_S dA_E \cos \alpha_E}{r^2} \quad (\text{Gl. 3-8})$$

Die Winkel  $\alpha_S$  und  $\alpha_E$  besitzen einen gemeinsamen Schenkel, die Abstandstrecke  $r$  zwischen Sender und Empfänger. Beide Winkel haben einen zweiten Schenkel, der die entsprechende Flächennormale von  $dA_S$  bzw.  $dA_E$  ist.  $dA_S \cos \alpha_S$  und  $dA_E \cos \alpha_E$  stellen Projektionen der Flächenelemente vertikal zur Strahlungsrichtung dar (Abbildung 3-1).

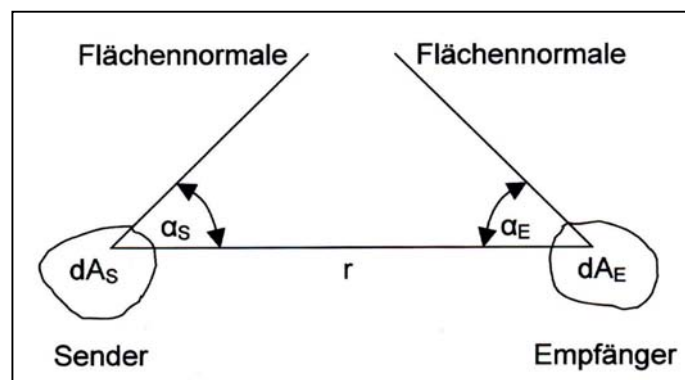


Abbildung 3-1: Darstellung zum radiometrischen Grundgesetz /23/

### 3.1.1.2 Der schwarze Strahler

Aus Gleichung 3-8 ergibt sich durch Integration über die Fläche  $A_E$  unter senkrechter Strahlung auf die Flächenelemente  $dA_E$  einer Empfängerfläche  $A_E$  die Gleichung 3-9 /23/:

$$dP_\lambda(\alpha) = L_\lambda \frac{dA_S \cos \alpha_S dA_E}{r^2} \quad (\text{Gl. 3-10})$$

Damit ergibt sich eine Proportionalität zwischen dem spektralen Strahlungsfluss  $P_\lambda$  in Richtung  $\alpha_S$  und  $\cos \alpha_S$ . Dieser Zusammenhang wird auch als „Lambertsche Gesetz“ bezeichnet. Dieses gilt nur für „Schwarze Körper“, für andere nur in grober Näherung. Ein schwarzer Strahler absorbiert die auf ihn treffende Strahlung unabhängig von deren Wellenlänge vollständig. Das bedeutet, dass keinerlei Verluste durch Transmission und Reflektion vorhanden sind. Einen schwarzen Strahler kann man sich wie eine Öffnung in der Wand eines Hohlraums vorstellen, vorausgesetzt dass der Durchmesser der Öffnung vergleichsweise klein gegen die Fläche der Hohlraumsinnenwand und groß gegen die Wellenlänge der betrachteten Strahlung ist. Durch mehrfache Emission und Reflektion innerhalb dieses Hohlraumes entsteht nur „schwarze Strahlung“, wenn sie über die Öffnung austritt. Der Absorptionsgrad der Hohlraumstrahlung kann durch eine Vergrößerung des Durchmessers des Hohlraumes bei gleich bleibender Öffnung (Ö) und einer Reduzierung des Reflexionsgrades durch Schwärzen der Innenwand dem Wert 1 angenähert werden (siehe Abbildung 3-2). Mit Hilfe dieser austretenden „Schwarzen Strahlung“ werden Thermografiesysteme justiert.

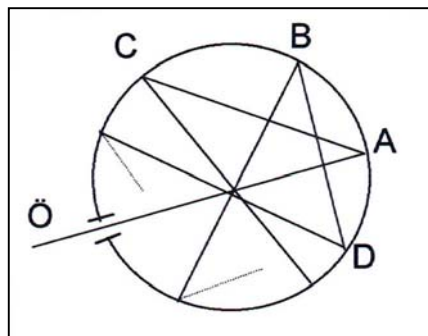


Abbildung 3-2: Erzeugung schwarzer Strahlung durch Vielfachreflektion /17/

### 3.1.1.3 Das Plancksche Strahlungsgesetz

Den Zusammenhang zwischen der spektralen spezifischen Ausstrahlung eines Objektes, der Wellenlänge der ausgesandten Strahlung und der Temperatur des Objektes wird durch das Plancksche Strahlungsgesetz erklärt. Für die berührungslose Temperaturmessung stellt dieses Gesetz somit die Basis dar. Nach Planck gilt /23/:

$$M_{\lambda} = L_{\lambda} \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5 (\exp[hc/k\lambda T] - 1)} \quad (\text{Gl. 3-11})$$

Wenn die Lichtgeschwindigkeit  $c$  [ $2,997925 \cdot 10^{14} \mu\text{ms}^{-1}$ ] ebenfalls mit eingesetzt wird, ergibt sich die Einheit der spektralen spezifischen Ausstrahlung  $M_{\lambda}$  [ $\text{W}/\text{cm}^2\mu\text{m}$ ].

Es empfiehlt sich, einzelne Konstanten durch  $c_1$  und  $c_2$  einfachshalber zusammenzufassen:

$$M_{\lambda} = L_{\lambda} \frac{c_1}{\lambda^5 (\exp[c_2/\lambda T] - 1)} \quad (\text{Gl. 3-12})$$

Mit der Gleichung 3-11 wird das Plancksche Strahlungsgesetz ausschließlich für schwarze Strahler geltend gemacht.

Die nachfolgende Abbildung stellt die spektrale spezifische Ausstrahlung  $M_{\lambda}$  verschiedener Strahler mit dem Parameter der absoluten Temperatur als Funktion der Wellenlänge  $\lambda$  dar.

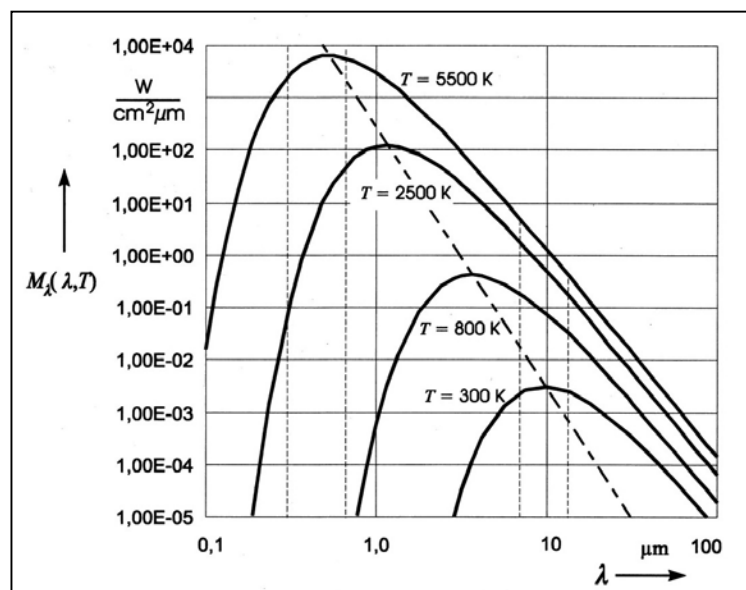


Abbildung 3-3: Spektrale spezifische Ausstrahlung verschiedener Strahler  
/21/

In Abbildung 3-3 wird sichtbar, dass sich die spektrale Zusammensetzung der ausgesandten Strahlung mit der Objekttemperatur verändert. So emittieren z.B. Körper mit Temperaturen oberhalb von ca. 823 K auch Strahlungsanteile im sichtbaren Bereich. Weiterhin ist festzustellen, dass bei jeder Wellenlänge die Strahlungsintensität bei zunehmender Temperatur steigt.

Aus der grafischen Darstellung des Planckschen Strahlungsgesetzes wird ersichtlich, dass sich das Maximum der Wellenlänge der ausgesendeten Strahlung eines Schwarzen Strahlers bei veränderlicher Temperatur verschiebt. Durch Differenzieren der Planckschen Gleichung ist das Wiensche Verschiebungsgesetz abzuleiten /27/.

$$\lambda_{\max} \cdot T = 2896 [\mu\text{m K}] \quad (\text{Gl. 3-13})$$

Das Strahlungsmaximum des Messobjektes verschiebt sich mit geringerer Temperatur hin zu größeren Wellenlängen, es liegt bei ca. 10  $\mu\text{m}$  in Nähe der Raumtemperatur.

### 3.1.2 Reale Strahler

Während schwarze Strahler den ideale Strahler repräsentieren, müssen beim realen Strahler die Einflüsse der material- bzw. oberflächentypischen Eigenschaften der Objekte auf ihr Strahlungsverhalten berücksichtigt werden. Nur so wird eine Anwendung der theoretischen Zusammenhänge auf die berührungslose Temperaturmessung ermöglicht.

#### 3.1.2.1 Das Kirchhoffsche Gesetz

Wenn Strahlung auf ein Objekt auftrifft, kann diese von ihm absorbiert, reflektiert oder transmittiert werden. Das Verhalten des Objektes wird in bezug auf die Anteile der ankommenden Strahlung bestimmt, die in drei wellenlängenabhängige Größen angegeben sind:

- Spektraler Absorptionsgrad  $\alpha_\lambda$
- Spektraler Reflexionsgrad  $\rho_\lambda$
- Spektraler Transmissionsgrad  $\tau_\lambda$

Aufgrund der Energieerhaltung muss für jede Wellenlänge  $\lambda_i$  gelten /23/:

$$\alpha_{\lambda_i} + \rho_{\lambda_i} + \tau_{\lambda_i} = 1 \quad (\text{Gl. 3-14})$$

Definitionsgemäß absorbiert ein schwarzer Strahler die auf ihn fallende Strahlung vollständig, somit gilt (Index S steht für schwarzen Strahler):

$$\alpha_{\lambda_s} = 1 \quad (\text{Gl. 3-15})$$



Damit gilt:

$$\rho_{\lambda s} = \tau_{\lambda s} = 0 \quad (\text{Gl. 3-16})$$

Unter Einbeziehung des Absorptionsgrades  $\alpha_\lambda$  stellt das Kirchhoffsche Gesetz die Beziehung zwischen den Eigenschaften eines schwarzen und eines realen Körpers her. Nach einer experimentellen Ermittlung dieses Gesetzes gilt:

$$\frac{M_\lambda}{\alpha_\lambda} = M_{\lambda s} \quad (\text{Gl. 3-17})$$

Diese Formel besagt, dass die spektrale spezifische Ausstrahlung  $M_{\lambda s}$  eines schwarzen Körpers gleicher Temperatur der spektralen spezifischen Ausstrahlung  $M_\lambda$  eines nicht schwarzen Körpers dividiert durch den spektralen Absorptionsgrad  $\alpha_\lambda$  des Körpers (für jede Wellenlänge) ist.

Der spektrale Emissionsgrad  $\varepsilon_\lambda$  eines Körpers ist als Quotient aus der spektralen spezifischen Ausstrahlung  $M_\lambda$  eines nicht schwarzen Körpers und der spektralen spezifischen Ausstrahlung  $M_{\lambda s}$  eines schwarzen Körpers gleicher Temperatur definiert durch:

$$\varepsilon_\lambda = \frac{M_\lambda}{M_{\lambda s}} \quad (\text{Gl. 3-18})$$

Daraus ergibt sich, dass der spektrale Absorptionsgrad gleich dem spektralen Emissionsgrad ist:

$$\varepsilon_\lambda = \alpha_\lambda \quad (\text{Gl. 3-19})$$

Aus dieser Beziehung leitet sich ab:

$$\varepsilon_\lambda + \rho_\lambda + \tau_\lambda = 1 \quad (\text{Gl. 3-20})$$

### 3.1.2.2 Der spektrale Emissionsgrad realer Messobjekte

Ein grauer Strahler ist neben dem schwarzen Strahler definiert als /23/:

$$\alpha_{\lambda G} = (\text{konst.}) < 1 \quad (\text{Index G steht für grauen Strahler}).$$

Ein grauer Strahler ist ein Körper, der die auf ihn auftreffenden Strahlung bei jeder Wellenlänge im gleichen Anteil absorbiert. Dementsprechend sind der Absorptionsgrad  $\alpha$  und der Emissionsgrad  $\varepsilon$  für schwarze und graue Strahler unabhängig von der Wellenlänge.

$$\alpha_{\lambda s} = \alpha_s = \varepsilon_{\lambda s} = \varepsilon_s = 1$$

$$\alpha_{\lambda G} = \alpha_G = \varepsilon_{\lambda G} = \varepsilon_G = (\text{konst.}) < 1$$

Im Allgemeinen handelt es sich bei den natürlichen und künstlichen Objekten unserer Umgebung weder um graue noch um schwarze Strahler. Ihr Emissionsgrad  $\varepsilon$  ist von der Wellenlänge abhängig und demnach werden sie als selektive Strahler bezeichnet, für diese gilt:

$$\varepsilon_\lambda = f(\lambda) < 1$$

Der Emissionsgrad realer Objekte variiert in Abhängigkeit der Wellenlänge. Die Abbildung 3-4 zeigt im Bereich von ca. 0,5 bis 16  $\mu\text{m}$  Wellenlänge den spektralen Verlauf des Emissionsgrades unterschiedlicher Stoffe.

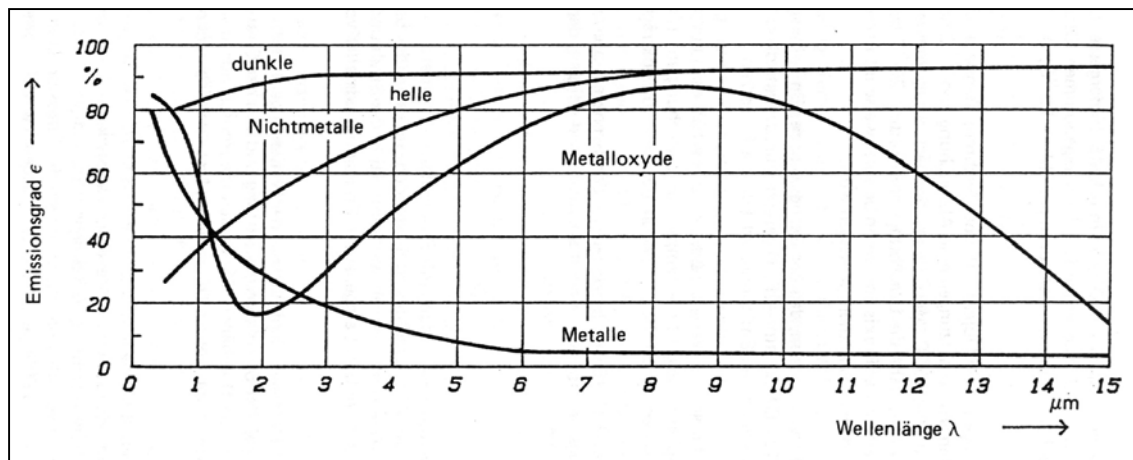


Abbildung 3-4: Spektraler Emissionsgrad verschiedener Stoffe /27/

Bei der Mehrzahl der Stoffe ist der Emissionsgrad für Wellenlängen  $\lambda < 6 \mu\text{m}$  stark abweichend. Eine Ausnahme machen die dunklen Nichtmetalle, bei denen sich der Emissionsgrad nahezu über den gesamten Wellenlängenbereich konstant verhält und sich dem Emissionskoeffizienten eines schwarzen Strahlers annähert. Metalle wie z.B. Eisen, Silber und Wolfram weisen annähernd einen Emissionsgrad des grauen Strahlers auf, wobei sich der Emissionskoeffizient ab etwa 7  $\mu\text{m}$  (für Silber ab ca. 2  $\mu\text{m}$ ) stabilisiert und konstant bleibt.

### 3.1.2.3 Die Strahldichte realer Objekte

Für die spektrale spezifische Ausstrahlung  $M_\lambda$  eines selektiven Strahlers der Temperatur  $T_0$  gilt nach Gleichung 3-11 und 3-18 :

$$M_\lambda = \varepsilon_\lambda M_{\lambda S} = \frac{\varepsilon_\lambda c_1}{\lambda^5 (\exp[c_2 / \lambda T_0] - 1)} \quad (\text{Gl. 3-21})$$

Auf diese Weise ist der Strahlungsanteil beschrieben, welcher vom Körper selbst ausgestrahlt wird und charakteristisch für dessen Temperatur ist. Da sich aber jeder Körper in einer Strahlung emittierender Umgebung befindet, sind zwei weitere Strahlungsanteile zu

berücksichtigen. Neben der vom Objekt ausgesendeten Strahlung nimmt ein Messgerät auch die an diesem reflektierte Strahlung der Umgebung und die von diesem transmittierte Hintergrundsstrahlung auf. Alle drei Anteile der Strahlung gehen von der Oberfläche des Objektes aus, aber nur der erste Anteil wird von ihm selbst emittiert.

Unter der Voraussetzung, dass es sich bei dem Messobjekt um einen Planckschen Strahler handelt, der sich vor einem schwarzen Hintergrund mit der Temperatur  $T_H$  befindet und von der Vorderseite, an der die Strahlungsmessung erfolgt, von einer schwarzen Umgebung der Temperatur  $T_U$  bestrahlt wird, ergibt sich seine Strahldichte  $L_{\lambda O}$  zu /23/:

$$L_{\lambda O} = \frac{c_1}{\pi \lambda^5} \left( \frac{\varepsilon_\lambda}{(\exp[c_2 / \lambda T_O] - 1)} + \frac{\rho_\lambda}{(\exp[c_2 / \lambda T_U] - 1)} + \frac{\tau_\lambda}{(\exp[c_2 / \lambda T_H] - 1)} \right) \quad (\text{Gl. 3-22})$$

Umgebung und Hintergrund sind in der Realität keine schwarzen Strahler, sondern besitzen gewisse Emissions-, Reflektions- und Transmissionseigenschaften, die bei einer genauen Untersuchung eine umfassenderen Beschreibung als in Gleichung 3-21 verlangen. Die Gleichung 3-21 beschreibt jedoch in einer thermisch weitgehend einheitlichen Umgebung (geschlossener, homogener, temperierter Raum) in guter Approximation die Verhältnisse.

Da  $T_H = T_U$ , vereinfacht sich die Formel 3-22:

$$L_{\lambda O} = \frac{c_1}{\pi \lambda^5} \left( \frac{\varepsilon}{(\exp[c_2 / \lambda T_O] - 1)} + \frac{1 - \varepsilon}{(\exp[c_2 / \lambda T_U] - 1)} \right) \quad (\text{Gl. 3-23})$$

Diese Gleichung stellt im ersten Term der Klammer den emittierten Strahlungsanteil, im zweiten die Summe des Anteiles der am Objekt reflektierten und transmittierten Umgebungsstrahlung dar.

Abbildung 3-5 zeigt für ein Objekt mit dem Emissionsgrad von  $\varepsilon = 0,1$  - welcher äquivalent dem Emissionsgrad von Eisen nach Abbildung 3-4 (siehe Kurve der Metalle) ist, sowohl die reflektierten als auch die emittierten Strahlungsanteile sowie deren Summe nach Gleichung 3-22.

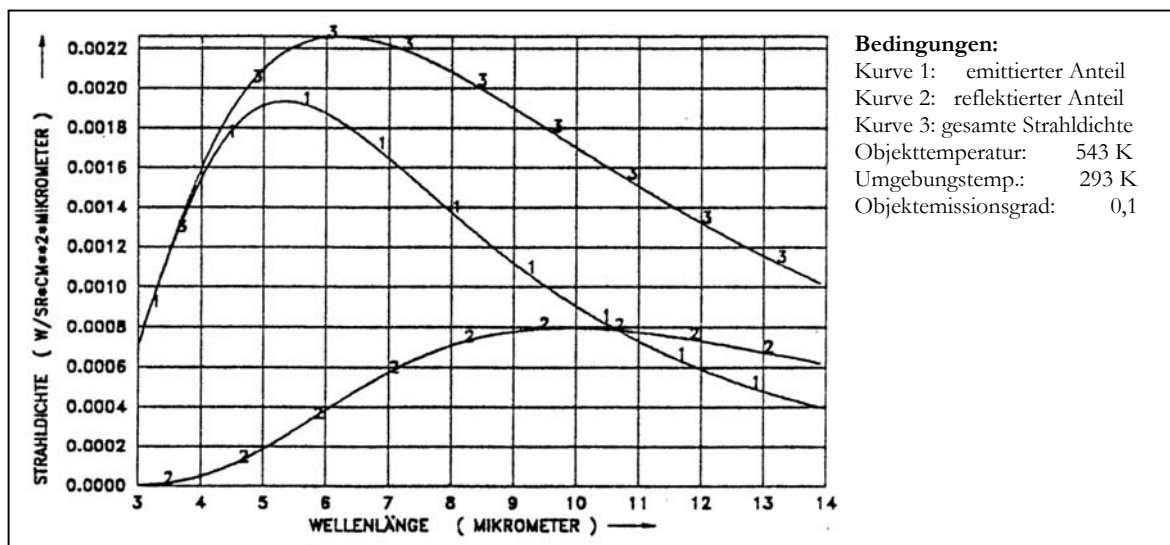


Abbildung 3-5: Strahlendichte eines stark reflektierenden Objektes /23/

Dass der reflektierte Strahlungsanteil im langwelligen Bereich größer ist als der emittierte, veranschaulicht die obige Grafik. Aufgrund des Maximalwertes der Gesamtstrahlung zwischen 6 und 7  $\mu\text{m}$  ist eine Temperaturmessung oberhalb des Bereichs von 10 bis 11  $\mu\text{m}$  nicht anzuwenden.

### 3.1.2.4 Einfluss des Emissionsgrades auf die Temperatur

Ein essentieller Parameter für eine präzise Erfassung der Temperatur des Messobjektes ist der Emissionsgrad. Eine unkorrekte Ermittlung des Emissionskoeffizienten wird immer zu einer irrtümlichen Temperaturmessung führen, da das Infrarotmesssystem den Temperaturwert anhand des Emissionskoeffizienten ermittelt.

Der Emissionsgrad eines Materials ist sowohl von der Wellenlänge und der Temperatur als auch von der Strahlaustrittsrichtung und der Oberflächenbeschaffenheit abhängig, dessen Oberflächen sich mit dem Grad möglicher Verschmutzung, Verwitterung und Befuchtung ändern können /23/. Für homogene Oberflächen der meisten Materialien wird der Emissionsgrad als unabhängig von der Emissionsrichtung angesehen, wenn das zu messende Objekt unter einem Winkel unter  $45^\circ$  zur Flächennormalen anvisiert wird /26/. Darüber hinaus ist er meistens experimentell und nur in den wenigsten Fällen theoretisch bestimmbar /2/.

Die Differenz (der Messfehler) zwischen Strahlungstemperatur und echter Temperatur vergrößert sich, je höher der Einfluss der vom Objekt reflektierten und transmittierten Strahlung und je kleiner sein Emissionsgrad ist. Abbildung 3-5 zeigt, wie stark sich der Fehler bei kleinen Emissionsgraden erhöht. Die Strahlendichte eines schwarzen Strahlers ist 10 mal größer als der im Bild dargestellte emittierte Anteil.

Abbildung 3-6 und Abbildung 3-7 zeigen, wie ein falscher Emissionsgrad die ermittelte Objekttemperatur zu beeinflussen vermag. Sie präsentieren die ermittelte Strahlendichte und Strahlungstemperatur als Funktion der Wellenlänge für einen grauen Körper mit fünf verschiedenen Emissionsgraden.

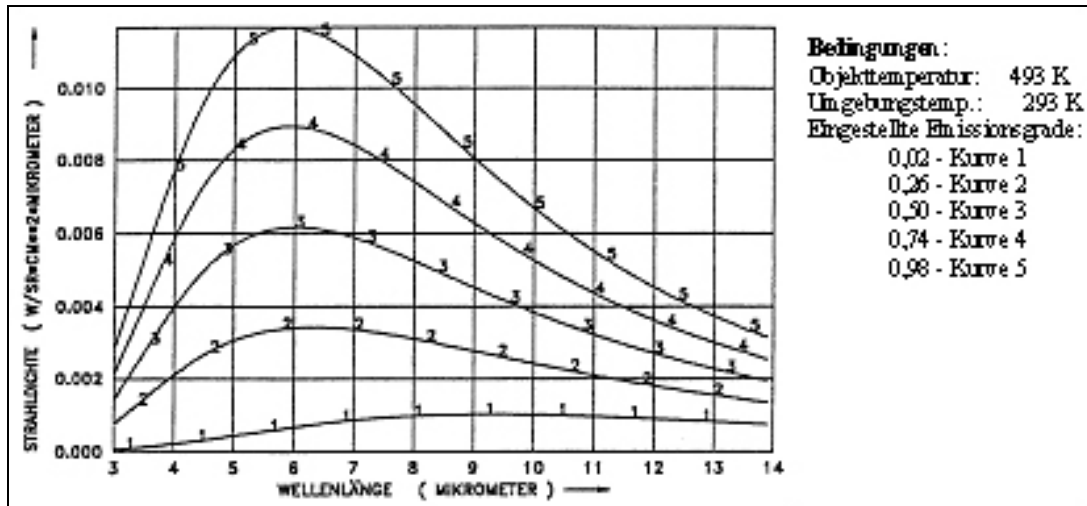


Abbildung 3-6: Spektrale Strahlendichte nach Planck (Summe des emittierten und reflektierten Anteils entsprechend der Summenkurve in der Abbildung 3-5) /23/

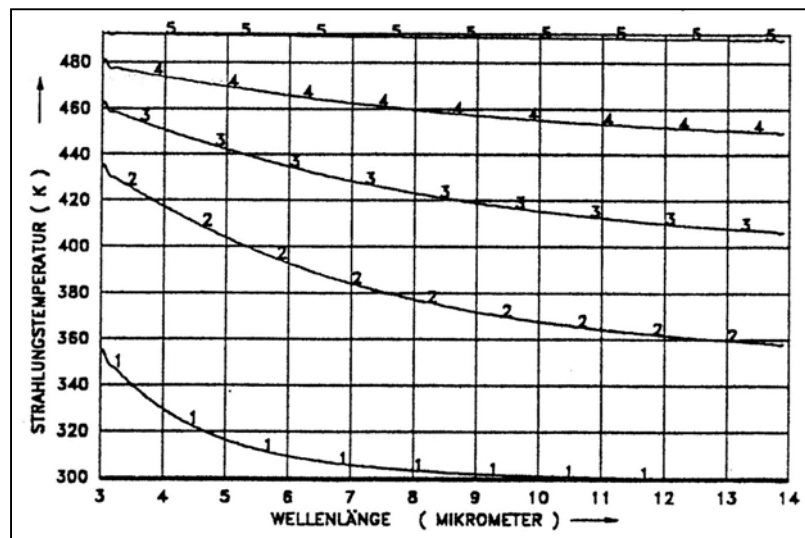


Abbildung 3-7: Strahlungstemperatur in Abhängigkeit vom eingestellten Emissionsgrad und der Messwellenlänge eines schwarzen Strahlers ( $\epsilon_\lambda = 1$ ). Bedingungen wie in der Abbildung 3-6 /23/.

Mit Hilfe der Abbildung 3-7 ist bei einer realen Temperatur von 493 K und einer Wellenlänge von 3  $\mu\text{m}$  eine Temperaturdifferenz von über 130 K festzustellen. Beide obigen Abbildungen lassen erkennen, dass die erfasste Temperatur überwiegend vom Strahlungsanteil bestimmt wird. Während bei niedrigem Emissionsgrad Umgebungsstrahlung und -temperatur dominieren (Kurve 1), herrschen Objektstrahlung und -temperatur bei großem

Emissionsgrad vor. Daraus ist abzuleiten, dass der entstehende Messfehler mit sinkendem Emissionsgrad des Objektes steigt.

Um zu verdeutlichen, wie das Messergebnis von einem falschen Emissionsgrad beeinflusst wird, wurde im Rahmen dieser Arbeit eine Darstellung der Messwertverfälschung für unterschiedliche Emissionsgrade konzipiert.

Bei einer konstanten emittierten Strahlung verändert sich die Temperatur im Vergleich zum Emissionsgrad um die vierte Potenz, laut des Stefan-Boltzmannschen Gesetzes (Gl. 3-24).

$$P = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (\text{Gl. 3-24})$$

Je kleiner der Emissionsgrad wird, desto größer wird die Variation der Temperatur. Die folgende Abbildung stellt ein dreidimensionales Diagramm des Kelvintemperaturfaktors als Funktion der Emissionsgrad-Fehler für die Emissionsgrade von 0 bis 1 dar.

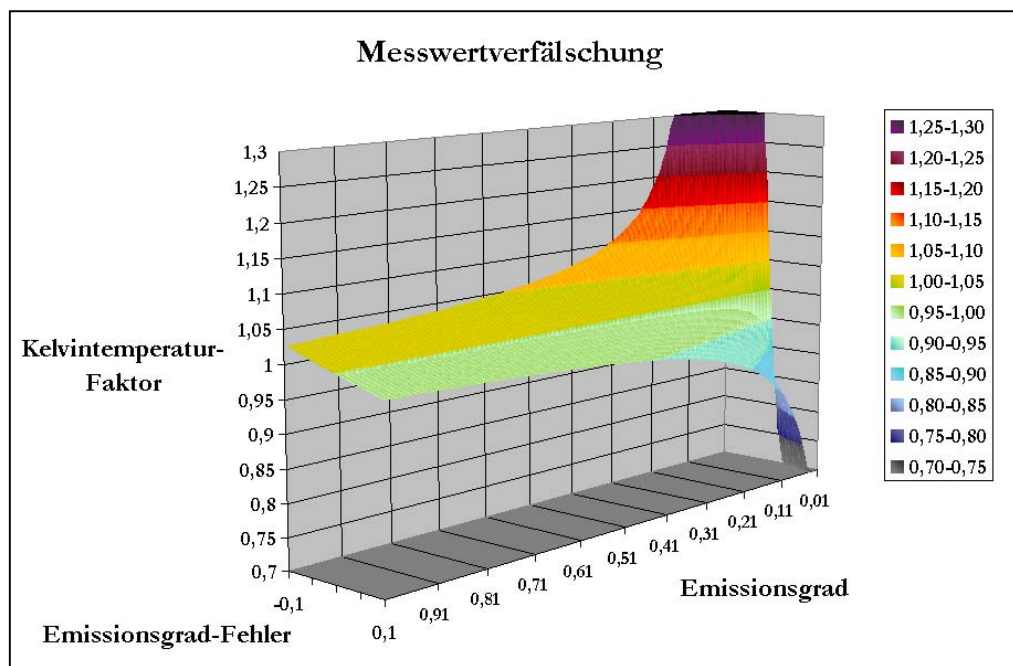


Abbildung 3-8: Messwertverfälschung für unterschiedliche Emissionsgrade

Bei einer Einstellung des Emissionsgrades unter ca. 0,6 wird der Kelvintemperaturfaktor für sinkende Emissionsgrad-Fehler höher und für steigende Emissionsgrad-Fehler kleiner. Das bedeutet, dass der Messwert bei niedrigen Emissionsgraden stärker verfälscht wird. Bei höheren Emissionsgraden ist der Faktor zur Korrektur der Temperatur für steigende oder sinkende Abweichungen des Emissionsgrades niedriger. Somit ist ein höherer Emissionsgrad auszuwählen, um eine geringere Temperaturverfälschung zu erhalten.

### 3.1.2.5 Die Strahlungsübertragungsstrecke

Eine Strahlungsausbreitung existiert nur im Vakuum, wenn sie nach dem radiometrischen Grundgesetz (Gl. 3-8) erfolgt. Im Vakuum lautet der Transmissionsgrad /23/:

$$\tau_\lambda = \text{konst.} = 1$$

Diese Gültigkeit der Beziehung kommt für andere Übertragungsmedien nur in begrenzten Wellenlängenintervallen und für endliche Übertragungsstrecken vor. Im Allgemeinen wird die Strahlungsübertragung dementsprechend mehr oder weniger stark gestört durch die Absorption ( $\alpha_\lambda \neq 0$ ) und die Reflektion ( $\rho_\lambda \neq 0$ ) der Übertragungsmedien. Andere Störung entsteht durch die eigene Strahlungsemission des Mediums (also  $\varepsilon_\lambda \neq 0$ ). Die miterfasste Objektstrahlung wird von dieser Strahlung überlagert. Zur Kompensation der Einflüsse des Übertragungsmediums bei einer kontaktlosen Temperaturmessung soll im weiteren eine Untersuchung des Mediums Luft stattfinden.

### 3.1.2.6 Die Transmission der Atmosphäre

Bei der berührungslosen Temperaturmessung muss die Infrarotstrahlung auf dem Weg vom Messobjekt zum Temperaturmessgerät eine bestimmte Strecke durch ein Übertragungsmedium, in den meisten Fällen Luft, zurücklegen, welche sich hauptsächlich aus den Bestandteilen  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  und  $\text{CO}$  zusammensetzt. Die Strahlungseigenschaften der Luft können das Messergebnis sowie ihre Durchlässigkeit gegenüber der Infrarotstrahlung beeinflussen.

Abbildung 3-9 zeigt den Transmissionsgrad der Atmosphäre als Funktion der Wellenlänge und wie dieser von den zuvor genannten Gasen beeinflusst wird.

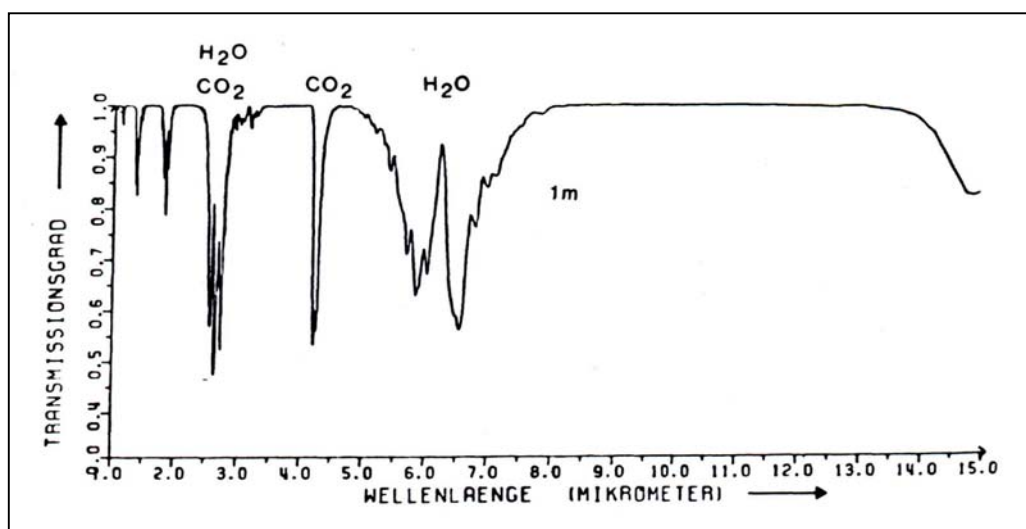


Abbildung 3-9: Spektraler Transmissionsgrad der Atmosphäre /23/

Die sehr starke Wellenabhängigkeit der Transmission der Atmosphäre wird anhand dieser Grafik deutlich dargestellt. Im infraroten Spektralbereich befinden sich zwei Bereiche hoher Durchlässigkeit – von 3 bis 5  $\mu\text{m}$ , ausgenommen die  $\text{CO}_2$  Absorption, und von 8 bis 14  $\mu\text{m}$ . Die Bereiche geringerer Transmission (etwa von 2,5 bis 7  $\mu\text{m}$ ) werden insbesondere von den Luftkomponenten  $\text{CO}_2$  und  $\text{H}_2\text{O}$  hervorgerufen.

Um eine starke Beeinflussung der Transmission durch diese Elemente vermeiden zu können gilt es, einerseits eine niedrige Konzentration der Stoffe aufrecht zu erhalten, andererseits einen Wellenlängenbereich des Thermografiesystems oberhalb von 8  $\mu\text{m}$  zu wählen /23/.

Während sich für Temperaturmessungen über 1000  $^{\circ}\text{C}$  die sichtbaren Wellenlängen und der nahe Infrarotbereich um 1  $\mu\text{m}$  eignen, ist der Wellenlängenbereich von 2 bis 2,5  $\mu\text{m}$  sowie von 4,5 bis 5,6  $\mu\text{m}$  bei Temperaturen zwischen 500 und 1000  $^{\circ}\text{C}$  und bei Messungen von niedrigen Temperaturen der Spektralbereich von 8 bis 14  $\mu\text{m}$  empfehlenswert /27/.

## 3.2 Temperaturmessverfahren

In diesem Kapitel wird eine Übersicht der Temperaturmessverfahren der in dieser Arbeit verwendeten Temperaturmesssysteme gegeben. Weiter werden Thermoelement (taktile Temperaturbestimmung) und Pyrometer sowie Thermografiekamera (berührungslose Messung) beschrieben.

### 3.2.1 Thermoelement

Thermoelemente können je nach Typ zur Temperaturbestimmung im Bereich von etwa  $-273$  bis 2400  $^{\circ}\text{C}$  eingesetzt werden. Ein wesentlicher Vorteil des Thermoelementes ist, dass die Anzeige und die Aufnahme der Temperatur außerhalb der Messstelle ermöglicht wird, ohne die Forderung einer speziellen Hilfsstromquelle in Anspruch nehmen zu müssen /27/.

#### Messprinzip

Das Phänomen der Thermoelektrizität wurde 1821 von Seebeck entdeckt und wird mittels Thermoelementen zur Temperaturmessung verwendet. Ein Thermoelement wird als ein elektrisches Thermometer betrachtet, dessen Temperaturfühler von einem Thermopaar gebildet wird. Das Thermopaar besteht aus zwei Drähten aus verschiedenen Metallen oder Metallegierungen, die an den Enden durch Lötung oder Schweißung verbunden werden (Abbildung 3-10).



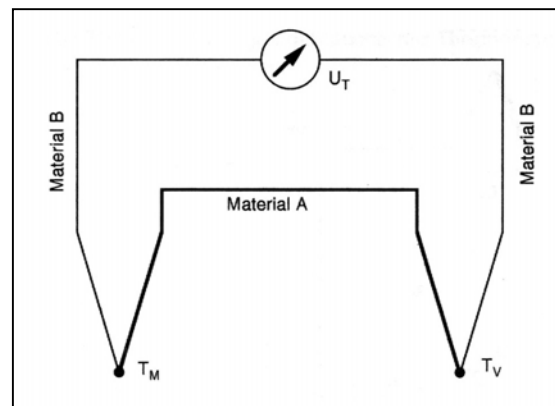


Abbildung 3-10: Beide Verbindungsstellen eines Thermopaars /2/

Eine Verbindungsstelle des Thermopaars wird als Messstelle mit der Temperatur  $T_M$ , die andere als Vergleichsstelle mit der Temperatur  $T_V$  charakterisiert. Eine Potentialdifferenz  $U_T$  wird generiert, wenn Messstelle und Vergleichsstelle auf verschiedene Temperaturen gesetzt werden. In einer Approximation der Temperaturdifferenz  $T_M - T_V$  steht diese Potentialdifferenz unter einer Proportionalität zwischen Messstelle und Vergleichsstelle /2/.

$$U_T = K_T (T_M - T_V) \quad (\text{Gl. 3-25})$$

Der Proportionalitätsfaktor  $K_T$  wird hier als Thermoempfindlichkeit bezeichnet und ist von der Höhe der absoluten Temperaturen abhängig.

Wird die Temperatur der Vergleichsstelle konstant gehalten, ist folglich die erzeugte Spannung ein Maß für die Temperatur der Messstelle. Durch einen angeschlossenen Spannungsmesser (z.B. Millivoltmeter) kann die Spannung in Celsiusgraden justiert werden.

### Materialien für Thermoelemente

Einige Anforderungen an die Werkstoffe für die Thermopaare sollen nun betrachtet werden. Empfehlenswert für die Metalle oder Legierungen der Drähte ist es, einen hohen Schmelzpunkt zu haben sowie widerstandsfähig gegen aggressive Umgebungen, wie reduzierende oder oxidierende Medien, zu sein und Fremdlegierungsbildung durch existierende Verschmutzungen standhalten zu können. Eine Kaltversprödung bei tiefsten Temperaturen ist nicht erwünschenswert. Die Drähte sollten eine gute Verarbeitungsfreundlichkeit zur Lötung und Schweißung zeigen, ohne spröde zu werden und die Spannung, bei hoher elektrischer Leitfähigkeit der Drähte, einen steilen und linearen Verlauf mit der Temperatur aufweisen. Somit besitzen sie einen geringen Innenwiderstand der Konstantspannungsquelle /2/.

In der folgenden Tabelle sind die gängigsten Thermoelemente nach Typ (DIN) und Temperaturbereich dargestellt.

Thermoelemente	Typ	Temperaturbereich [°C]
Au-Fe-Chromel	-	-273 – 0
Cu-Konst.	T, U	-250 – 100 (600)
Fe-Konst	J, L	-250 – 700 (900)
NiCr-Ni	K	-200 – 1000 (1300)
PtRh-Pt	R, S	0 – 1300 (1600)
PtRh 70/30 – PrRh 94/6	B	0 – 1500 (1800)
WRe 75/25 – WRe 97/3	D	0 – 2000 (2400)

**Tabelle 3-2: Thermoelemente mit jeweiligen Typen und Temperaturbereichen**  
/2/

Das in industriellem Messprozess gebräuchlichste Thermoelement ist das NiCr-Ni-Element. In der Literatur ist es oft als Chromel-Alumel zu finden. Um Oxydation des Ni-Drahtes an der Luft möglichst zu vermeiden, wird dem Nickel neben Zuständen von Mn und Si gegen Angriff von Schwefel ca. 3 % Al zugesetzt. Diese Sorte von Thermoelementen besitzen die beste Temperaturbeständigkeit /2/.

### 3.2.2 Infrarot-Strahlungstemperaturmessung

Die Verfahren der Strahlungstemperaturmessung im Infrarotbereich, welche auch als Thermografie und Pyrometrie bezeichnet werden, stammen aus dem physikalischen Phänomen, dass Körper mit einer Temperatur oberhalb des absoluten Nullpunktes von 0 K (-273,15 °C) elektromagnetische Strahlungen emittieren. Wird deren Intensität bestimmt, ist es möglich, daraus die Temperatur des aussendenden Körpers berührungslos zu ermitteln /17/.

Die Strahlung im Infrarotbereich wurde 1800 durch W. Herschel entdeckt. Herschel wusste, dass das Tageslicht aus Spektralfarben besteht und wollte herausfinden, welche dieser Farben für die Wärmeausstrahlung verantwortlich ist. In seinem Experiment verwendete er eine Papierwand und ein Thermometer mit schwarzen Hüllen. Beim Verschieben des Thermometers vom violetten hin zum roten Spektralbereich beobachtete er, dass die Temperatur zunahm. Dabei stellte er fest, dass die höchste Temperatur im unsichtbaren Bereich hinter dem roten Spektralbereich lag. Herschel bezeichnete diese nicht sichtbare Strahlung als "Kalorifische Strahlung", heute wird sie "Infrarot - Strahlung" genannt /22/.

### 3.2.2.1 Strahlungsthermometer – Pyrometer

Wie schon im vorherigen Abschnitt erwähnt wurde, wird zur berührungslosen Temperaturbestimmung eines Körpers ihre abgestrahlte Energie verwendet. Messgeräte, die in der Lage sind, auf diese Weise die Temperatur zu ermitteln, nennt man Strahlungsthermometer oder auch einfach Pyrometer. Bei der Temperaturmessung mit einem Pyrometer wird die mittlere Temperatur eines bestimmten Messfeldes ermittelt /26/.

#### Aufbau eines Pyrometers

Die wesentlichen Bestandteile sind das Objektiv, die Blende, der Filter, der Detektor und die Auswerteeinheit (Abbildung 3-11).

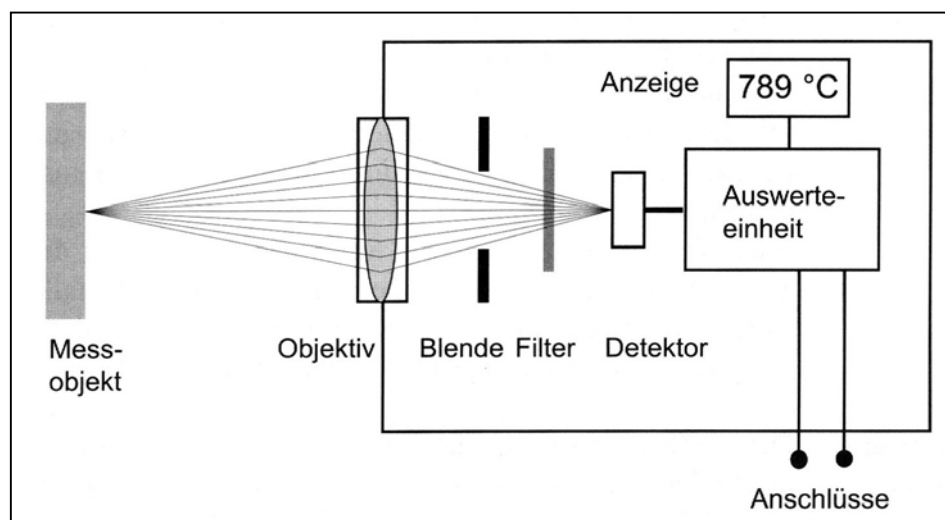


Abbildung 3-11: Aufbau eines Pyrometers /20/

Das Objektiv sammelt die vom Messobjekt emittierte Strahlung im Infrarotbereich. Die Blende hat die Funktion, störende Randstrahlen auszublenden. Ein bestimmter Spektralbereich wird durch den Filter ausgewählt. Der Detektor wird von dem Anteil, der das Filter passiert, getroffen. Er konvertiert die Strahlung im Infrarotbereich in ein elektrisches Signal, welches in der Auswerteeinheit linearisiert und in ein Ausgangssignal übersetzt wird, das zur Anzeige oder zur Steuerung und Regelung verwendet werden kann.

#### Einteilung der Bauarten

Die verschiedenen Pyrometerarten unterscheiden sich hauptsächlich durch ihren spektralen Empfindlichkeitsbereich. Die Pyrometer können in Gesamtstrahlungs-, Bandstrahlungs-, Spektralstrahlungs- und Verhältnispyrometer unterteilt werden /27/:

- Die Gesamtstrahlungspyrometer besitzen eine Messempfindlichkeit, die unabhängig von der Wellenlänge im Spektralbereich von null bis unendlich ist. In der Praxis werden von ihnen mehr als 90 % der emittierten Strahlung eines Messobjektes detektiert.

Aufgrund ihrer großen Fehler, z.B. von der Transmission der Atmosphäre, findet heute diese Bauart lediglich nur noch in besonderen Fällen Anwendung.

- Die Bandstrahlungs-pyrometer messen die Strahlung in einem breiten Wellenlängenbereich, z.B. von 8 - 14  $\mu\text{m}$ . Durch Anpassung der Breite und Lage des Wellenlängenbereiches an den spektralen Emissionsgrad des zu messenden Objektes stimmen Strahlungstemperatur und echten Temperatur gut überein. Aufgrund kurzer Ansprechzeiten von ca. 1 bis 100 ms ist dieser Typ für schnelle Temperaturverläufe geeignet.
- Die Spektralpyrometer werden zum Messen in einem engen Spektralband eingesetzt, z.B. für die Temperaturmessung an Glas bei 5,14  $\mu\text{m}$ . Sie finden weiterhin Anwendung in der Temperaturbestimmung von Metallen, da die Emissionsgrade dieser Stoffe nur in einem eng begrenzten Bereich liegen /20/.
- Bei den Verhältnis- oder Quotientenpyrometern wird die Temperatur aus dem Verhältnis der Strahlungen in mindestens zwei verschiedenen Spektralbereichen des Messobjektes ermittelt. Es ist dadurch unabhängig vom Emissionsgrad, wenn sich das zu messende Objekt in beiden Spektralbereichen wie ein grauer Strahler ( $\varepsilon = \text{Konst.}$ ) verhält und die reflektierte und transmittierte Strahlung außerordentlich gering bleibt. Diese erwähnten Bedingungen werden bei den Temperaturmessungen an Metalloberflächen nicht vollständig erreicht, deshalb können Metalloberflächen nicht als grauer Strahler angesehen werden. Ebenso ist die reflektierte Strahlung zu berücksichtigen /23/.

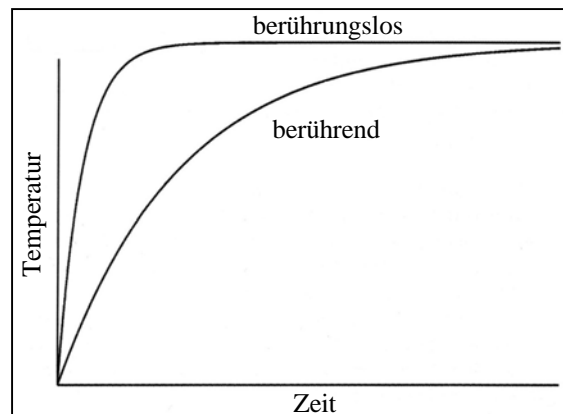
In Rahmen dieser Arbeit wurde ein Bandstrahlungs-pyrometer im Wellenlängenbereich 8 - 14  $\mu\text{m}$  für die Temperaturmessungen verwendet. Eine Beschreibung dieses Temperaturmessgerätes wird im Kapitel 4.1.1 dargestellt.

### **Vorteile**

Die kontaktlose Temperaturmessung mit Strahlungsthermometern bietet gegenüber der Messung mit Berührungsthermometern viele Vorteile:

- Ermittlung der Temperatur von der ausgesandten Strahlung des Messobjektes. Somit wird das Temperaturfeld des zu messenden Körpers nicht durch diese Messgeräte verändert /2/.
- Messungen von sehr hohen Temperaturen, bei denen die Thermo-elemente aufgrund der Metallurgie nicht mehr einzusetzen sind /2/.
- Erfassung der Temperatur von Körpern mit einer geringen Wärmeleitfähigkeit oder geringer Wärmekapazität /2/.

- Temperaturmessung an ansonst unzugänglichen Stellen oder sich bewegenden Objekten /2/.
- Temperaturbestimmung von sehr kleinen Flächen und von Situationen, die eine Ansprechzeit unter 1s erfordern, aufgrund der sehr kurzen Einstellzeit der Pyrometer (Abbildung 3-12).



**Abbildung 3-12: Verlauf der Ansprechzeit von berührungslos und berührend Temperaturmessung /20/**

- Keine Schädigung oder Zerstörung des Messobjektes und des Sensors während der kontaktlosen Temperaturmessung. Infolgedessen zeigt ein Strahlungsthermometer eine höhere Lebensdauer als ein Thermoelement, welches dem Verschleiß unterliegt /20/.
- Aggressive Stoffe sind ebenfalls durch die berührungslose Messung ohne Schädigung des Sensors zu messen, z.B. Säuren in der chemischen Verarbeitung /20/.

### Nachteile

Einige Nachteile der Temperaturbestimmung mit Pyrometer sind dennoch zu benennen:

- Fehler bei der Temperaturmessung von Objekten, deren Emissionsgrade nicht bekannt sind, hauptsächlich bei der Gruppe der Metalle (siehe Kapitel 3.1.2.2).
- Beeinflussung der Messergebnisse durch Verschmutzung, Oxidation und Befeuchtung der zu messenden Oberfläche, da diese Oberflächenveränderungen den Emissionsgrad beeinflussen können /23/.
- Fehler bei der Messung von zu stark reflektierenden Oberflächen, wie z.B. zusätzlich reflektierte Strahlung von Objekten in der Umgebung des Messobjektes /17/.
- Heiße Gegenstände hinter dem zu messenden Objekt können die Messung bei strahlungsdurchlässigen Messobjekten beeinflussen /20/.

- Starker Einfluss von Staub, Rauch, Zunder, Wasserdampf und Kohlendioxid auf dem Temperaturmessgerät führen zu einer Schwächung der vom Messobjekt ausgesandter Strahlung, hauptsächlich bei Messungen in kurzen Wellenlängenbereichen, wie es im Kapitel 3.1.2.6 geschildert wurde /23/.

### 3.2.2.2 Thermografiekameras

Im Gegensatz zu den Pyrometern, bei denen ausschließlich die Durchschnittstemperatur der Fläche eines Körpers gemessen wird, erzeugen Thermografiekameras Bilder der unsichtbaren Infrarot- bzw. Wärmestrahlung, auf denen das gesamte Temperaturfeld des Objektes zu erkennen ist. Damit werden sehr präzise berührungslose Temperaturmessungen ermöglicht /22/.

Im Jahr 1840 fanden die ersten Experimente in bezug auf die Umwandlung eines unsichtbaren Infrarotbildes in ein sichtbar optisches Bild von J. Herschel, Sohn des Entdeckers der Infrarotstrahlung W. Herschel, statt. Er versuchte mit dünnen Ölfilmen, welche je nach infraroter Wärmestrahlung unterschiedlich verdampften, herauszufinden, was ihre Farbe änderte und als Folge ein Wärmebild darstellte /22/.

#### Aufbau einer Thermografiekamera

Das Funktionsprinzip einer Infrarotkamera wird in der folgenden Abbildung in ihren wesentlichen Elementen dargestellt.

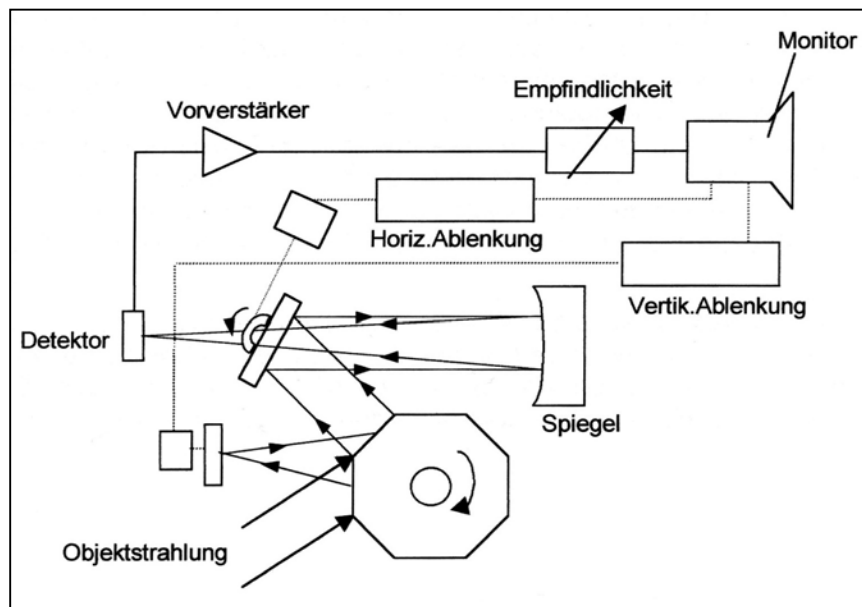


Abbildung 3-13: Funktionsschema einer Thermografiekamera /27/

Die Objektstrahlung trifft über eine rotierende Trommel, die ein senkrecht abtastet des Messobjektes auf einen Schwingenspiegel ermöglicht. Über diesen erfolgt eine senkrech-

te Zerstreung der abgetasteten Zeilen. Die Strahlung gelangt über den Schwingspiegel auf die abbildende Optik in Form eines sphärischen Hohlspiegels und erreicht den Detektor, indem die Strahlung schließlich durch eine Öffnung in der Mitte des Schwingspiegels auf ein Umlenkprisma tritt. In der Regel besteht dieser Detektor aus Indium-Antimon und wird mit flüssigem Stickstoff gekühlt. Nach der Verstärkung wird das Signal auf einen Monitor übertragen. Hier kann der Temperaturverlauf zeilenweise aufgezeichnet werden. Sowohl die Sensibilität als auch der Schwarzpegel, d.h. die untere Temperaturgrenze, können über einen Regler eingestellt werden. Auf dem Monitor stellen die helleren Grautöne höhere Temperaturen und die dunkleren Grautöne niedrigere Temperaturen dar /27/.

### **Vor- und Nachteile**

Die prinzipiellen Vor- und Nachteile einer berührungslosen Temperaturbestimmung die für das Pyrometer beschrieben worden sind (siehe Kapitel 3.2.2.1), gelten auch für die Thermografiekamera, die auf dem gleichen Prinzip basiert. Thermografiegeräte sind hinsichtlich der spektralen Kennzeichnung als Bandstrahlungs-pyrometer einzuordnen /26/.

Wie bei der Temperaturbestimmung mit einem Pyrometer ist bei der Messung mit einer Thermografiekamera die genaue Kenntnis des Emissionsgrades vom zu messenden Objekt erforderlich. Blanke Oberflächen können durch Spiegelungen und starke Schwankungen der Emissionsgrade das Wärmebild verfälschen. Solche Fehler lassen sich im Wärmebild gut erkennen und durch günstige Standortwahl reduzieren. Beim Pyrometer ist dies schwieriger, auch wenn die Markierung des Messfleckes mit einem Laserpunkt exakt erfolgt /22/.

Je kurzwelliger die Thermografiekamera (z.B. zwischen 2 - 5,5  $\mu\text{m}$ ) ist, desto näher kommt sie unserem Sehempfinden nahe, wird aber auch anfälliger gegen kurzwellige Störstrahlung ( $\text{CO}_2$ , Rauch, Dampf) als eine langwelligere, die im Spektralbereich zwischen 8 - 14  $\mu\text{m}$  misst. Das bedeutet, die kurzwelligen Kameras reagieren auf kurzwellige Störstrahlung (Sonne) und unterschiedliche Oberflächenbeschichtungen empfindlicher als langwellige /21/.

In Rahmen dieser Arbeit wurde eine Thermografiekamera im Wellenlängenbereich 7,5 - 13  $\mu\text{m}$  bei den Ermittlungen der Temperatur verwendet, welche im Kapitel 4.1.2 beschreibt wird.

## **4 Experimentelle Vorversuche zur Ermittlung des Emissionsgrades**

Als Vorbereitung zur Messung der Temperaturen mit dem Pyrometer und der Thermografiekamera beim Thermofließlochformen war es notwendig, alle Störfaktoren zu eliminieren oder zu kompensieren. Eine entscheidende Größe stellt dabei der Emissionsgrad des zu untersuchenden Objektes dar. Dieser ist ein wesentlicher Parameter, um die genaue Temperatur ermitteln zu können. Ein falscher Emissionsgrad wird immer zu einer falschen Temperaturmessung führen, da die Messsysteme den Temperaturwert anhand des Emissionsgrades errechnen.

In Rahmen dieser Arbeit wurden die Emissionsgrade für vier verschiedene Versuchswerkstoffe, einen konventionellen Baustahl St37 und St52, einen austenitischen Edelstahl X5CrNi18.10 und eine Aluminiumlegierung AlMgSi1 mittels Pyrometer und Thermoelement untersucht. Die wichtigsten Kennwerte dieser Werkstoffsorten sind in Kapitel 5.3 dokumentiert.

Anschließend wurde die Thermografiekamera verwendet, um die ermittelten Emissionsgraden der vorherigen Untersuchungen mit Thermoelement und Pyrometer zu kontrollieren und zu vergleichen. Danach wurden die Emissionsgrade für fließlochgeformte Blechstreifen mittels Pyrometer und Thermoelement untersucht, um die Resultate der vorherigen Untersuchung zu vergleichen. Eine Zusammenfassung der Ergebnisse aller Versuche ist am Ende des Kapitels 4 zu finden.

Bei dieser Untersuchung wurde zur Erhitzung des Materials eine Induktionsanlage der Firma Hüttinger vom Typ TIG 5/300 verwendet. Sie liefert eine Ausgangsleistung von 5 kW und hat eine Betriebsfrequenz von 300 kHz.

### **4.1 Verwendete Temperaturmesssysteme**

#### **4.1.1 Pyrometer**

Als erstes Temperaturmesssystem verwendete man ein Bandstrahlungs-pyrometer der MXTD Serie von Raytek (siehe Abbildung 4-1). Damit ist es möglich, berührungslos Temperaturen im Bereich von 30 bis 900°C in Echtzeit zu messen. Der spektrale Wellenlängenbereich des Messgerätes beträgt 8 bis 14  $\mu\text{m}$ . Dank der Präzisionsoptik mit einem Laservisier zur Markierung des Messflecks können Messobjekte unabhängig von ihrer Größe, der Messentfernung oder dem Messwinkel anvisiert werden. Weitere Optionen des



Pyrometers sind vorwählbare fixierte oder einstellbare Emissionsgrade, wahlweise Anzeige der Minimal- und Maximaltemperatur sowie deren Differenz.



Abbildung 4-1: Verwendetes Pyrometer mit Thermoelement

### Thermoelement

An das Pyrometer kann ein NiCr-Ni Thermoelement vom Typ K (Abbildung 4-1) angeschlossen werden, welches sich besonders zur Oberflächenmessung eignet. Somit kann unabhängig vom Emissionsgrad des Werkstoffes eine genaue Temperaturbestimmung vom Thermoelement auf die Anzeige des Pyrometers übertragen werden. Weitere Eigenschaften eines Thermoelementtyps sind im Kapitel 3.2.1 zu finden.

#### 4.1.2 Thermografiekamera

Als zweites verwendetes Temperaturmesssystem stand eine Thermografiekamera Thermovision<sup>®</sup> A40-M von FLIR Systems zur Verfügung (siehe Abbildung 4-2). Mit dieser kann der Temperaturmessbereich in drei Stufen ausgewählt werden. Der Temperaturmessbereich 1 reicht von -40 bis 120 °C, Messbereich 2 von 0 bis 500 °C und Messbereich 3 von 350 bis 1500 °C. Die Thermografiekamera liefert Bilder in einer Auflösung von 320 x 240 Pixel und die Bildfrequenz beträgt 50 Hz, d.h. berührungslos Temperaturen können in Echtzeit gemessen werden. Der spektrale Wellenlängenbereich der Kamera beträgt von 7,5 bis 13 µm.



Abbildung 4-2: Thermografiekamera Thermovision® A40-M

Die Thermografiekamera lässt sich über den Monitor eines PCs überwachen. Die gemessenen Temperaturwerte werden als Videosequenz gespeichert. Diese aufgezeichneten Temperaturwerte werden in der Videosequenz farbig dargestellt. Für hohe Temperaturbereiche werden helle Farben, für niedrige Temperaturzonen dunkle Farben verwendet.

Die Kamerasoftware ThermaCAM Researcher ermöglicht eine detaillierte Auswertung und Darstellung der gespeicherten Thermografiebildsequenzen, wie z.B. durch die Setzung von Messpunkten und Messfeldern (Linie, Ellipse, Kreis, Rechteck und Polygon). Für jedes dieser Messfelder kann der Emissionsgrad separat gewählt werden, weiterhin die Korrektur der Aufnahmenparameter, wie Objektentfernung, Umgebungstemperatur, relative Luftfeuchtigkeit und die Transmission der Messstrecke. Eine wahlweise Anzeige der Stellen mit der Minimal- und Maximaltemperatur sowie der Temperaturmittelwert und die Differenz von Minimal- und Maximaltemperatur lassen sich auf jeden Bereich der thermografischen Bilder erfassen. Die aufgenommenen Thermografiebilder können in Bildformat exportiert und die erfassten Temperaturwerte in Tabellen dargestellt werden.

## 4.2 Versuchsdurchführung in Blechstreifen mittels Pyrometer und Thermoelement

Die Blechstreifen wurden vor der Induktorspule der Induktionsanlage platziert, anschließend erhitzt und die Temperatur auf einen erwünschten Wert konstant gehalten. Das Laservisier des Pyrometers wurde so nah wie möglich neben der Messstelle am Blechstreifen justiert, an welchem das Thermoelement ausgerichtet wurde, um die Vergleichbarkeit der gemessenen Temperaturwerte zu gewährleisten. Somit war sichergestellt, dass die vom Thermoelement gemessene Temperatur auch vom Pyrometer erfasst wurde. Bei einer Abweichung zwischen den Messwerten vom Thermoelement und Pyrometer erfolgte eine Korrektur des Emissionsgrades am Pyrometer, bis beide Messsysteme identische Temperaturen anzeigten. Abbildung 4-3 zeigt eine Skizze dieses Experimentes.

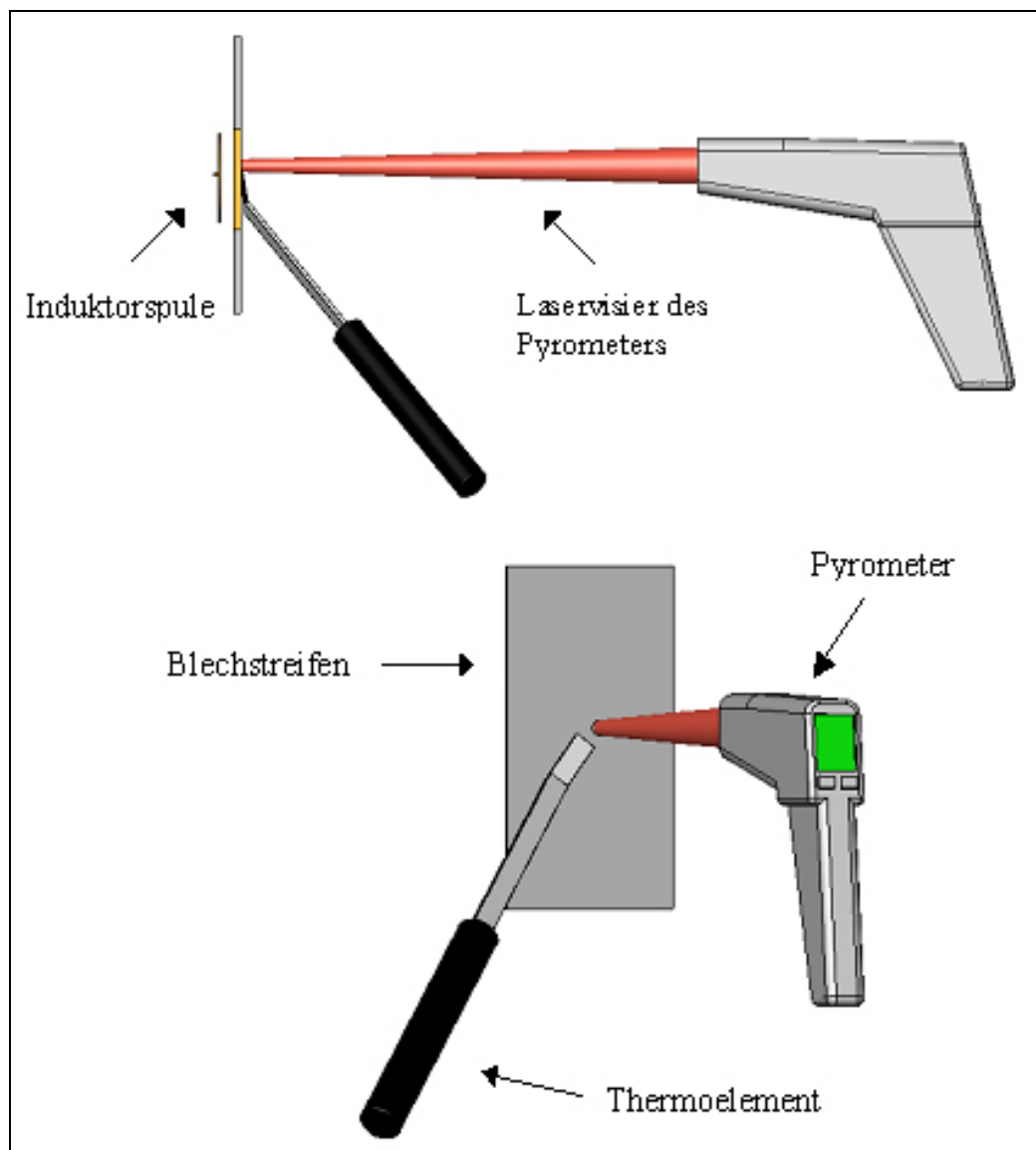


Abbildung 4-3: Skizze des Versuches zur Ermittlung des Emissionsgrades mittels Pyrometer und Thermoelement

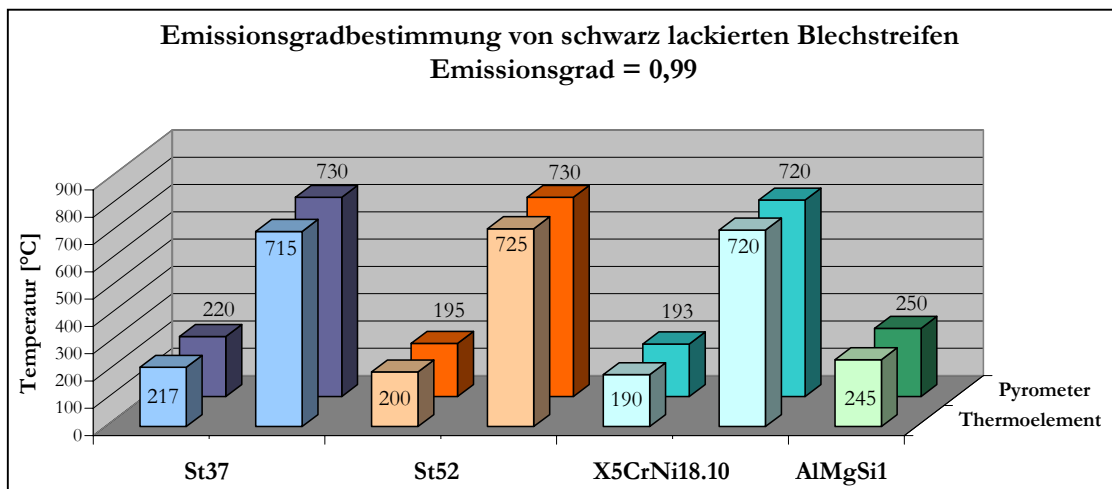
Da die Oberflächen der zu untersuchenden Werkstoffe zum Glänzen oder Spiegeln neigen konnten, was zu einer Verzerrung der Ergebnisse führen würde, wurde der Emissionsgrad von Blechstreifen untersucht, welche man zuvor mit einem schwarzen Hochtemperaturlack lackierte, fast dem eines schwarzen Strahlers identisch. Die Erläuterung zu den möglichen Einflüssen des Emissionsgrades auf die Temperatur ist in Kapitel 3.1.2.4 nachzulesen.

Um zu prüfen, wie groß die Variation des Emissionsgrades von schwarz und unlackierten Werkstoffen ist, fand anschließend eine Untersuchung des Emissionsgrades in ungeschwärzten Blechstreifen statt.

Aufgrund der zu erwartenden hohen Temperaturen beim Thermofließlochformen, wurden die Blechstreifen auf höhere Temperaturen (über 600 °C) aufgeheizt. Um festzustellen, ob eine Änderung des Emissionsgrades bei niedrigen Temperaturen auftritt, wurde dieser auch in den Temperaturbereichen von 180 - 250°C ermittelt.

#### 4.2.1 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Untersuchung mit einem schwarz lackierten Blechstreifen sind unten in Form eines Diagrammes dargestellt.



**Diagramm 4-1: Ergebnisse der Emissionsgradbestimmung von schwarz lackierten Blechstreifen**

Das Diagramm zeigt, dass die gemessenen Temperaturen zwischen beiden Temperaturmesssystemen in den hohen Temperaturbereichen maximal 2 %, in den niedrigen maximal 2,5 % für einen eingestellten Emissionsgrad von 0,99 für alle schwarz lackierte untersuchte Werkstoffsorten abweichen. Daraus ist abzuleiten, dass der Fehler des Pyrometers bei einer Einstellung des Emissionsgrades von 0,99 sehr niedrige ist. Um die gemessenen Temperaturen vom Thermoelement und Pyrometer für die Werkstoffe St37 und St52 vergleichen zu können, müsste man den Emissionsgrad über 0,99 einstellen. Nach physikalischen Gesetzen kann der Emissionsgrad maximal 1,0 betragen, was einer 100 % emittierten Strahlung entspricht, jedoch in der Praxis unerreichbar ist (vergl. Kapitel 3.1.2.1 und 3.1.2.2).

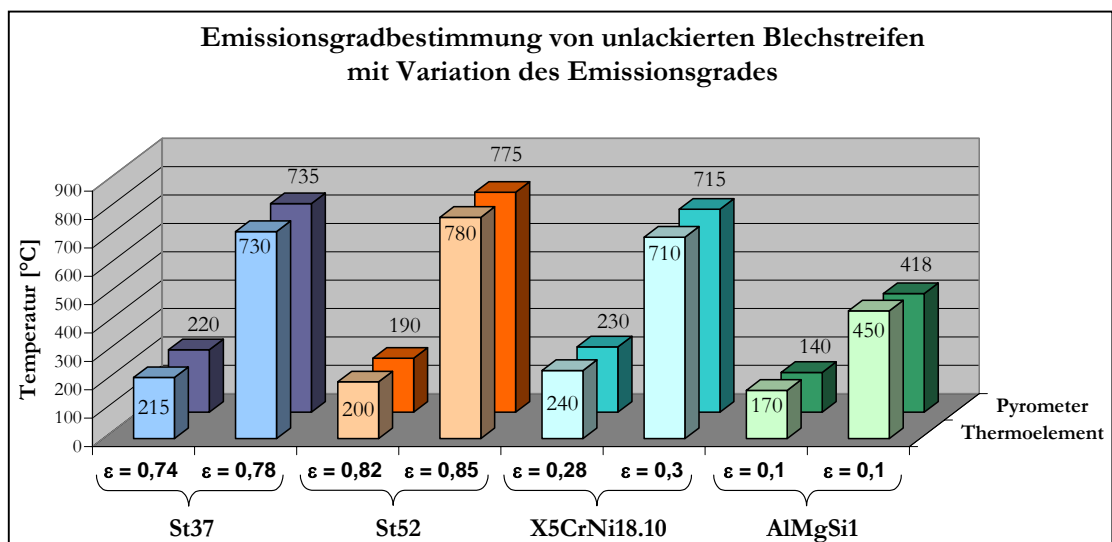
Aufgrund folgender Probleme ist keine Untersuchung des Emissionsgrades für Aluminium für Temperaturen über 250 °C durchgeführt worden:

- Durch Induktionsprobleme und die Schwierigkeit, Aluminium zu erhitzen, ist das Konstanthalten der Temperatur nur schwer möglich.
- Starke elektromagnetische Störströme im Sensor des Thermoelementes.

- Schwankung der Temperatur während der Messung.
- Probleme mit Adhäsion des schwarzen Lackes auf der Sensoroberfläche des Thermoelementes.

Die Ermittlung des Emissionsgrades für die anderen Werkstoffe bereitete keine weiteren Schwierigkeiten.

Bei der Untersuchung der unlackierten Blechstreifen variierte die Temperatur beim eingestellten Emissionsgrad von 0,99 in ähnlichen Temperaturbereichen erheblich. Aus diesem Grund musste der Emissionsgrad korrigiert werden. Die Resultate der Versuche mit unlackierten Blechstreifen sind unten in der Abbildung zu sehen.



**Diagramm 4-2: Ergebnisse der Emissionsgradbestimmung von unlackierten Blechstreifen**

Um die Temperaturen von Pyrometer und Thermoelement am besten angleichen zu können, musste für den Werkstoff St37 der Emissionsgrad für höhere Temperaturbereiche auf 0,78 und für niedrige Temperaturbereiche auf 0,74 eingestellt werden. Die Senkung des Emissionsgrades der schwarz lackierten Blechstreifen von 0,99 auf 0,74 - 0,78 für die unlackierten Blechstreifen ist notwendig, da die unlackierten Werkstoffe eine etwas hellere Oberfläche besitzen, welche größere Reflektionseigenschaften bzw. einen hohen Reflektionsanteil aufweisen. Mit steigendem Reflektionsgrad wird der Emissionsgrad kleiner. (vergl. Gl. 3-20, mit  $\tau = 0$ ).

Ebenso war eine Änderung des Emissionsgrades für den Werkstoff St52 notwendig. Für beide Temperaturbereiche lag der Emissionsgrad zwischen 0,82 und 0,85. Da die unlackierte Oberfläche dieses Werkstoffes etwas dunkler ist als die des St37, wurde ein höherer Emissionsgrad für diesen Werkstoff bestimmt.

Eine starke Veränderung des Emissionsgrades trat bei Edelstahl und Aluminium auf, deren Oberfläche etwas heller als St37 und St52 ist. Der Reflektionsanteil von diesen Werkstoffen ist sehr hoch, was eine Senkung des Emissionsgrades verursacht. Für unlackierte Edelstahl-Blechstreifen wählt man einen Emissionsgrad von 0,3 für höhere und 0,28 für niedrige Temperaturbereiche sowie bei unlackierten Aluminium-Blechstreifen für beide Temperaturbereiche einen Emissionskoeffizienten von 0,1. Um die Temperaturen des Pyrometers mit denen des Thermoelementes für Aluminium am besten angleichen zu können, musste der Emissionsgrad unter 0,1 eingestellt werden. Dies war aber unmöglich, da das Pyrometer keine Einstellung unter 0,1 ermöglicht. Für die nicht geschwärzten Aluminium-Blechstreifen ergaben sich bei dieser Untersuchung höhere Temperaturen (bis 450 °C). Zugleich traten einige Probleme durch elektromagnetische Störströme im Sensor (Thermoelement) und Schwankung der Temperatur während der Messung auf.

### **4.3 Versuchsdurchführung in Blechstreifen mittels**

#### **Thermografiekamera**

Um die Ergebnisse der vorherigen Untersuchung des Emissionsgrades von schwarz und unlackierten Blechstreifen zu kontrollieren, versuchte man nun den Emissionsgrad von den gleichen Versuchswerkstoffen anhand der Thermografiekamera zu ermitteln.

Da auf einem mit der Thermografiekamera erzeugten thermografischen Bild das ganz Temperaturfeld des Messobjektes zu erkennen ist, lackierte man bei dieser Untersuchung nur die Hälfte einer Seite der Blechstreifen schwarz. Damit ergibt sich die Möglichkeit, gemeinsam in einem Bild den Emissionsgrad beider Seiten zu ermitteln. Der Emissionsgrad wurde an der Kamera laut den Ergebnissen der vorherigen Versuche (Kapitel 4.2.1) auf 0,99 eingestellt. Als Versuchswerkstoffe setzte man die Materialien der vorangegangenen Versuche in Form von Blechstreifen ein. Diese wurden vor der Induktorspule der Induktionsanlage angebracht und auf einen bestimmten Temperaturwert erhitzt.

Die Abbildung 4-4 stellt eine Skizze des Versuches dar.

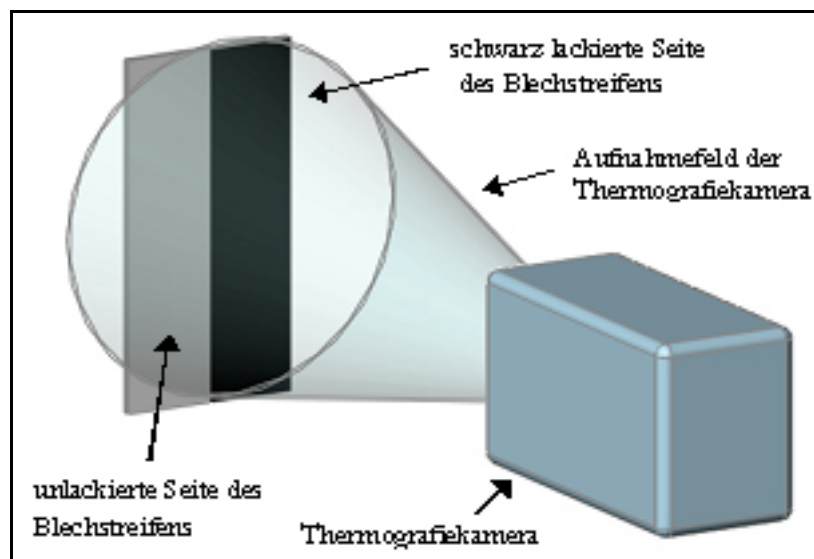
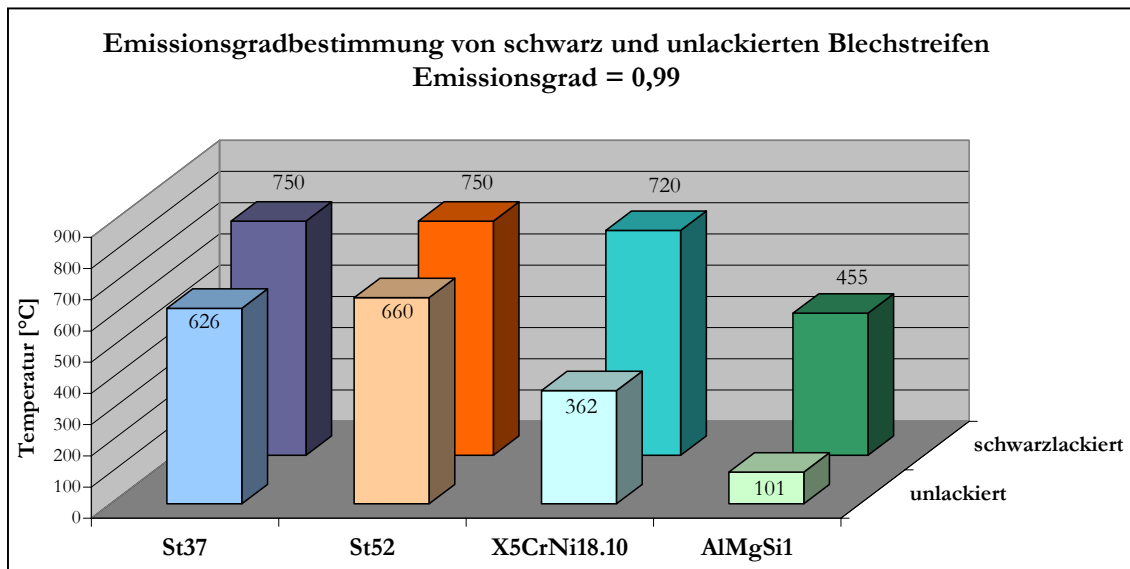


Abbildung 4-4: Skizze des Versuches zur Ermittlung des Emissionsgrades mittels Thermografiekamera

Zur Kontrolle der Temperatur während der Erhitzung der Werkstoffe wurde das Pyrometer neben der Kamera platziert und auf die schwarz lackierte Seite eingerichtet. Den Emissionsgrad stellte man auf 0,99 ein, da das Pyrometer mit dieser Einstellung sehr niedrige Fehler aufzeigte (siehe Ergebnisse Kapitel 4.2.1). Während der Messung wichen die Temperaturen an den schwarz lackierten Seiten von beiden Messsystemen nicht über 3 % voneinander ab.

#### 4.3.1 Ergebnisse

Mit Hilfe der Kamerasoftware ThermaCAM Researcher war es möglich, die Temperaturwerte in verschiedenen Bereichen der aufgezeichneten Thermografiebilder zu ermitteln. Somit errechnete man den Temperaturmittelwert aus dem Bereich der Oberfläche des Werkstoffes, an welchem die Induktorspule positioniert wurde. Das Diagramm 4-3 stellt die Ergebnisse dar.



**Diagramm 4-3 Ergebnisse der Emissionsgradbestimmung mittels Thermografiekamera**

Dem Diagramm ist eine große Differenz von den Temperaturwerten zwischen schwarz und unlackierten Seiten der Blechstreifen zu entnehmen. Die Differenz der gemessenen Temperatur beider Seiten bei Einstellung des Emissionsgrades auf 0,99 ist für St52 geringer als für St37, da die Oberfläche der unlackierten Seite von St52 etwas dunkler ist. Diese Oberfläche weist einen geringeren Reflektionsanteil auf. Bei sinkendem Reflektionsgrad steigt der Emissionsgrad (vergl. Gl. 3-20, mit  $\tau = 0$ ), damit sinkt der Fehler bei der Temperaturbestimmung (siehe Kapitel 3.1.2.4).

Für die Werkstoffe Edelstahl und Aluminium ist die Temperaturdifferenz beider Seiten größer, da deren unlackierten Oberflächen sehr hell sind. Demzufolge besitzen sie einen höheren Reflektionsanteil bzw. niedrigen Emissionsgrad, was die Temperaturmessung stark beeinflusst (siehe Kapitel 3.1.2.4).

Die Abbildung 4-5 zeigt als Beispiel ein Thermografiebild vom Werkstoff St37. Die hellere Seite des Blechstreifens auf dem Bild zeigt die schwarz lackierte und die etwas dunklere Seite die unlackierte.



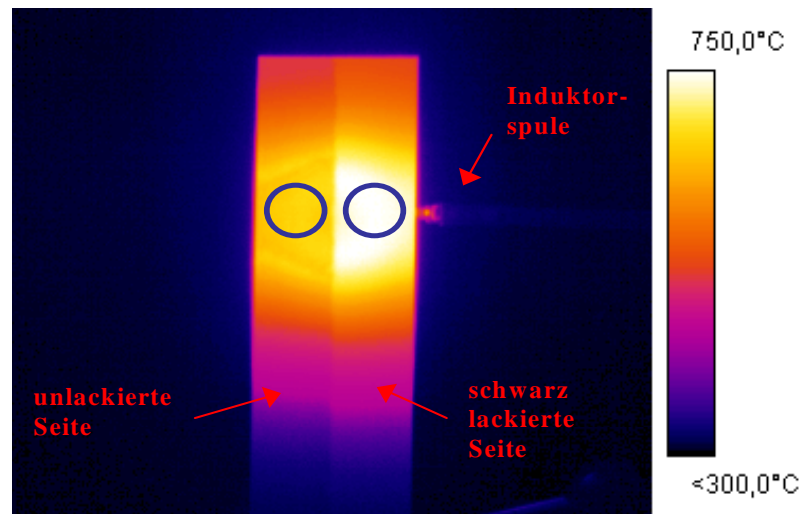


Abbildung 4-5: Thermografiebild vom Werkstoff St37

Mit der Kamerasoftware kann ein beliebig markierter Bereich des thermografischen Bildes hinsichtlich des Emissionsgrades korrigiert werden. Somit kann man den Temperaturmittelwert der unlackierten Seite mit dem der schwarz lackierten Seite durch die Variation des Emissionsgrades der unlackierten Seite des Blechstreifens angleichen. Die Auswertung erfolgt hier innerhalb der beiden Kreisen, in denen durch die Induktorspule die größte Erhitzung der Bleche erzeugt wird (siehe Abbildung 4-5). Das Diagramm 4-4 stellt die Resultate dar.

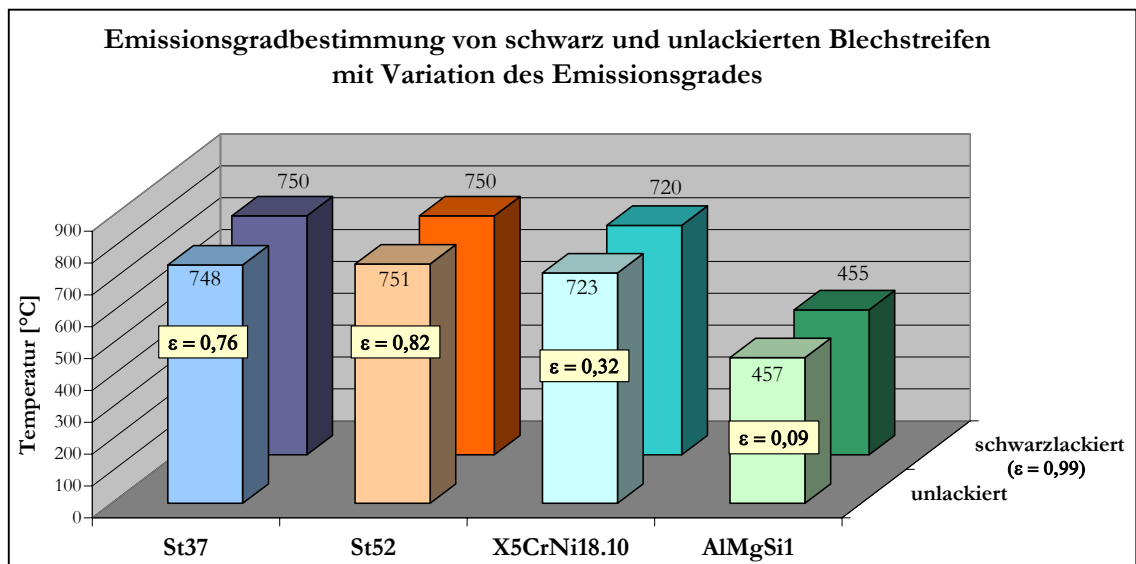


Diagramm 4-4: Ergebnisse der Emissionsgradbestimmung mittels Thermografiekamera mit Änderung des Emissionsgrades

Das Diagramm 4-4 zeigt, dass eine große Änderung des Emissionsgrades erforderlich ist, um die Temperaturen beider Seiten der Werkstoffe angleichen zu können. Je heller die Oberfläche des Materials ist, desto stärker variiert der Emissionsgrad.

Der Emissionsgrad der unlackierten Seite des Werkstoffes St37 wich ca. 21 % von dem der schwarz lackierte Seite ab, während er für den Werkstoff St52 um ca. 17 % variierte. Der Werkstoff Edelstahl wies etwa 67 % und Aluminium über 90 % Abweichung des Emissionsgrades zwischen der schwarz und unlackierten Seite auf.

Die Versuche mit der Thermografiekamera zeigen deutlich, dass die Temperaturmessung durch die Auswahl des falschen Emissionsgrades stark beeinflusst wird, was auch bei den Untersuchungen mit dem Pyrometer festgestellt wurde. Die Temperaturmesssysteme Thermografiekamera und Pyrometer zeigten bei der Ermittlung des Emissionsgrades ähnliche Ergebnisse.

#### **4.4 Versuchsdurchführung in fließlochgeformten Blechstreifen**

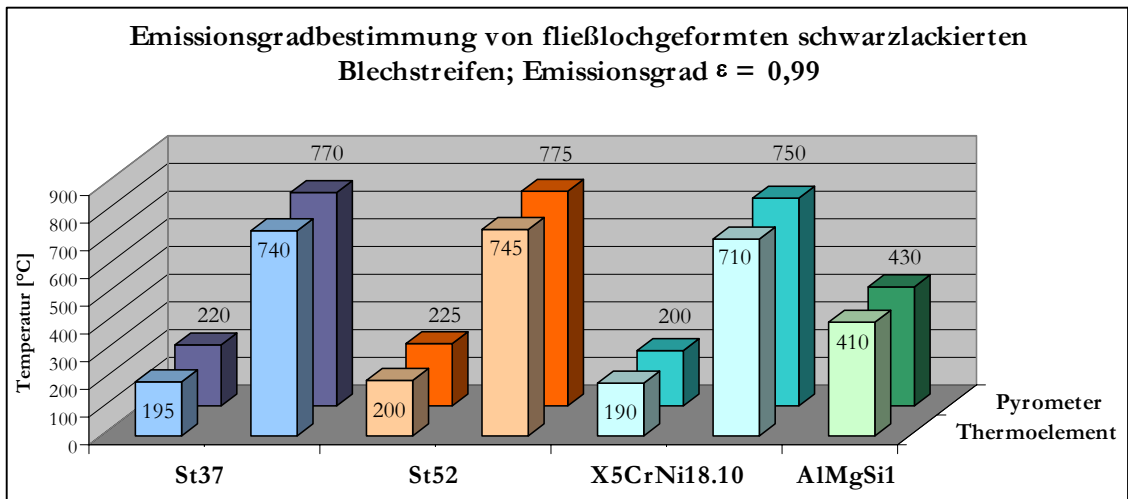
Um die Ergebnisse der Emissionsgradbestimmung für das Thermofließlochformen in Blechstreifen zu überprüfen, sind im folgenden Versuch Streifen aus St37, St52, X5CrNi18.10 und AlMgSi1 schwarz lackiert und fließlochgeformt. Die Fertigung der Durchzüge erfolgte auf einem Bearbeitungszentrum Typ Mahomat (siehe Kapitel 5.1). Die Blechstreifen wurden auf eine spezielle Aufspannung platziert. Als Werkzeug kam einen Standard-Fließlochformer von der Firma Flowdrill<sup>®</sup>, Typ „Lang“, mit einem Durchmesser von 9,2 mm zum Einsatz. Als Herstellungsparameter wurden eine Drehzahl von 2000 U/min und ein gestufter Vorschub von 50 und 200 mm/min verwendet.

Anschließend wurden die Emissionsgrade der gefertigten Blechdurchzüge mit Hilfe von Pyrometer und Thermoelement nach der gleichen Methode wie in Kapitel 4.2 bestimmt. Der eingestellte Emissionsgrad am Pyrometer von 0,99 entsprach der gleichen Einstellung wie bei den schwarz lackierten Blechstreifen (siehe Ergebnisse - Kapitel 4.2.1).

Aufgrund des zur Fokussierung erforderlichen geringen Abstandes zwischen Thermografiekamera und den Durchzügen konnten keine Versuche mit der Thermografiekamera durchgeführt, um eine Schädigung der Kamera durch den Einfluss der Induktionsanlage zu vermeiden.

#### 4.4.1 Ergebnisse

Die Versuchsergebnisse der fließlochgeformten schwarz lackierten Blechstreifen ist im folgenden Diagramm zu sehen.



**Diagramm 4-5: Ergebnisse der Emissionsgradbestimmung von fließlochgeformten schwarz lackierten Blechstreifen**

Das Diagramm zeigt für den gewählten Emissionsgrad von 0,99 eine deutliche Abweichung der gemessenen Temperaturen zwischen den fließlochgeformten Blechdurchzügen und den schwarz lackierten Blechstreifen. Die Temperaturdifferenzen betragen bis zu 40 K im hohen Temperaturbereich, das entspricht ca. 5,3 % bezogen auf die mittels Thermoelement gemessene Temperatur in °C. Im niedrigen Temperaturbereich kommt es zu einer Abweichung bis ca. 15,5 %.

Ein möglicher Grund für die gemessene Temperaturdifferenz beider Temperaturmesssystemen besteht darin, dass der Schwarzlack im Fertigungsprozess nicht durchgängig auf der Werkstoffoberfläche der Durchzüge haftet (siehe Abbildung 4-6), da er mit der Erhöhung der Temperatur teilweise verbrennt und mit der Vergrößerung der Oberfläche des Bleches in Vorschubrichtung zerplatzt. Somit ist die Oberfläche des Durchzuges heller als die schwarz lackierte Oberfläche der Probestreifen und hat folglich einen höheren Reflektionsanteil, was eine Veränderung des Emissionsgrades verursacht.



Abbildung 4-6: Schwarz lackierter fließlochgeformter Durchzug aus St52

Eine weitere Ursache für die gemessene Temperaturdifferenz der fließlochgeformten Blechstreifen für beide Temperaturmesssysteme liegt in der genauen Platzierung des Thermoelementes auf der Buchsenoberfläche, da die Buchsenlängen zu kurz für eine ideale Messung mit dem Thermoelement sind.

#### 4.5 Zusammenfassung

Es wurden die Emissionsgrade verschiedener Werkstoffsorten mittels der Temperaturmesssysteme Thermoelement, Pyrometer und Thermografiekamera untersucht. Eine korrekte Eingabe des Emissionsgrades am Temperaturmessgerät ist von großer Bedeutung, da ein falscher Emissionsgrad die Temperaturmessung sehr stark beeinflussen kann.

Die Einstellung des Emissionsgrades auf 0,99 am Pyrometer führt zu Fehlern von maximal 2,5 % für schwarz lackierte Blechstreifen im hohen (715 - 730 °C) und niedrigen (190 - 220 °C) Temperaturbereich. Bei diesen Messungen gab es bei den untersuchten Werkstoffsorten keine Probleme mit der Erhitzung. Lediglich bei Aluminium traten Probleme mit der Adhäsion des Schwarzlackes auf der Sensoroberfläche des Thermoelementes auf.

Bei der Untersuchung der unlackierten Blechstreifen ist eine Korrektur der Emissionsgrade unbedingt erforderlich, um die Temperaturen vom Thermoelement und Pyrometer angleichen zu können. Während bei den Baustahlorten ein Emissionsgrad von über 0,74 ermittelt wurde, beträgt der Emissionsgrad bei den Werkstoffen Edelstahl und Aluminium weniger als 0,3.

Mit der Anwendung einer Thermografiekamera bei der Untersuchung des Emissionsgrades konnte man die Differenz der angezeigten Temperaturwerte von schwarz und unlackierten Werkstoffen auf den thermografischen Bildern sehr deutlich erkennen. Durch eine Korrektur des Emissionsgrades mit Hilfe der Kamerasoftware ließen sich die Temperaturwerte von beiden Seiten sehr gut gegenüberstellen und die entsprechenden Ergebnisse mit denen von Pyrometer und Thermoelement vergleichen.

In anschließenden Untersuchungen konnte der Emissionsgrad in fließlochgeformte und schwarz lackierte Blechstreifen bestimmt werden. Diese Versuche zeigten eine etwas

größere Abweichung zwischen den erfassten Temperaturen vom Thermoelement und Pyrometer mit der Auswahl des Emissionsgrades 0,99 als bei der Untersuchung mit schwarz lackierten Blechstreifen auftraten. Diese sind auf Probleme bei der exakten Platzierung des Thermoelementes auf dem Durchzug und der Farbveränderung durch Erhitzen des Schwarzlackes im Prozess zu erklären, die eine Veränderung des Emissionsgrades bzw. der angezeigten Temperatur bewirken.

Für eine Temperaturbestimmung von schwarz lackierten Messobjekten mittels Thermofließlochformen ist die Auswahl eines Emissionsgrades von 0,99 am Temperaturmesssystem empfehlenswert.

## 5 Versuchsaufbau und Durchführung

In diesem Kapitel werden Maschine, Messtechnik und Versuchsaufbau zur Durchführung der Temperaturmessung sowie die eingesetzten Werkstoffe und Werkzeuge beschrieben. Zur Vorbereitung der Temperaturmessung mit dem Pyrometer werden Versuche zur Erfassung der Messgenauigkeit des Pyrometers durchgeführt. Dabei soll dessen beste Einstellung zur genauen Fokussierung am Messobjekt gefunden werden, um die genaue Temperatur der Blechdurchzüge erfassen zu können. Am Ende des Kapitels werden die Versuche zur Temperaturbestimmung beim Thermofließlochformen mit dem Pyrometer und der Thermografiekamera dargestellt.

### 5.1 Maschine und Messtechnik

Die Fertigung der Durchzüge erfolgte auf einem vertikalen CNC- Bearbeitungszentrum der Fa. Maho vom Typ Mahomat (siehe Abbildung 5-1). Die Untersuchungen zur Einrichtung des Pyrometers und zur Temperaturbestimmung mit dem Pyrometer und der Thermografiekamera fanden ebenso auf diesem Bearbeitungszentrum statt.



Abbildung 5-1: Bearbeitungszentrum Mahomat

Die Fixierung der Blechstreifen erfolgte in einer speziellen Aufspannung, in der ein U-Profil den Blechstreifen gleichmäßig gegen eine Deckplatte drückte. Diese Aufspannung ist mit einem Vierkomponenten- Dynamometer der Firma Kistler Typ 9273 gekoppelt, die eine online Messung der Kräfte und Momente ermöglichte. Das Dynamometer wandelte die beim Thermofließlochformen entstehenden Axialkräfte und Drehmomente in elektrische Spannung um und leitete diese zum Messverstärker, dessen Ausgangssignale in einem

Analog/Digital-Wandler im PC digitalisiert werden. Die Auswertung und Speicherung der Messwerte erfolgte mit Hilfe der Messsoftware Diadem.

Zur Erfassung der Temperaturwerte wurde das Pyrometer über einen Messverstärker an einem PC angeschlossen. Die Evaluierung und Aufzeichnung der Messwerte entstanden gleichfalls unter Anwendung der Messsoftware Diadem. Die Messgrößen Axialkraft, Drehmoment und Temperatur ließen sich dabei direkt über die Zeit erfassen. Die in diesen Versuchen erfassten Drehmomentwerte werden zur Untersuchung des Zusammenhanges zwischen den Prozesstemperaturen und Momenten verwendet.

Für die Erfassung der Temperaturverläufe mit der Thermografiekamera ist ein weiterer PC mit der Kamerasoftware ThermoCAM Researcher nötig, in dem die Temperaturwerte gespeichert und ausgewertet werden können. Die grafische Darstellung und Weiterverarbeitung der Daten erfolgte mit der integrierten Programmiersprache Visual Basic unter Microsoft Excel.

## 5.2 Versuchsaufbau

Das Pyrometer und die Thermografiekamera wurden auf dem Bearbeitungszentrum Mahomat installiert und so eingerichtet, dass die Temperaturen der geformten Blechdurchzüge von beiden Messsystemen gleichzeitig erfasst werden konnten. In Abbildung 5-2 ist auf dem Bearbeitungszentrum der Versuchsaufbau mit den beiden Geräten, der Aufspannung zum Fixieren der Blechstreifen und dem Werkzeug zum Thermofließlochformen zu sehen.

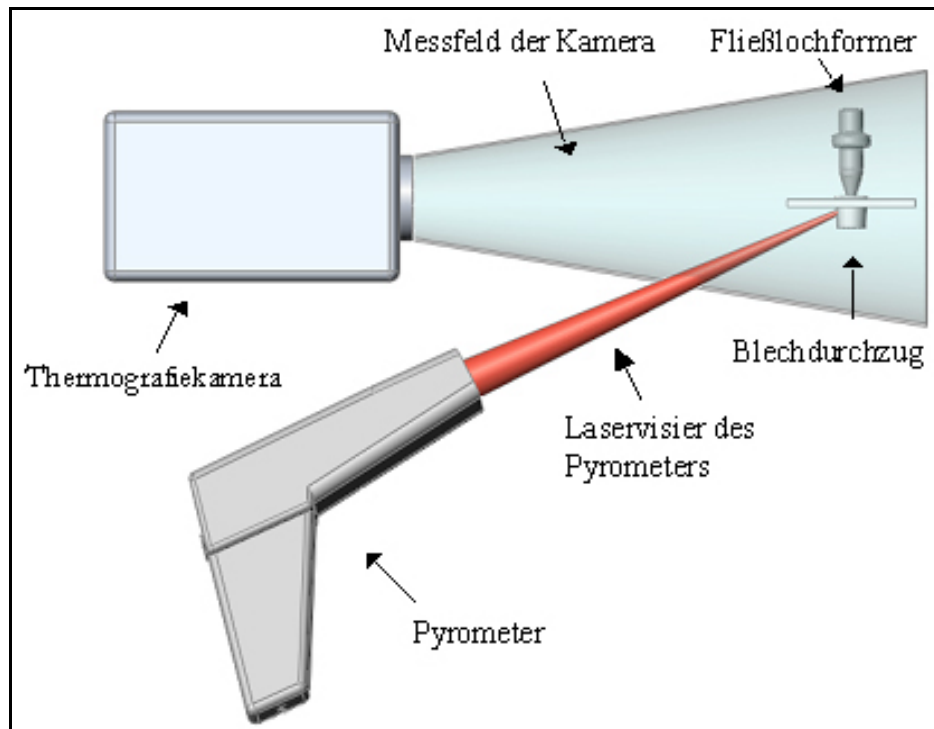


Abbildung 5-2: Darstellung des Versuchsaufbaus

Neben der Schwarzlackierung der inneren Seite der Aufspannung wurde auch die vordere Seite mit einem Klebeband abgedeckt, um mögliche Einflüsse von Reflektionen bei der Temperaturmessung zu vermeiden. Die Hinterseite des Versuchsaufbaus ist mit einer

Abschirmung aus geschwärztem Karton versehen, um die Strahlungen der Umgebung zu verhindern und damit die Temperaturmessung von Störeinflüssen weitgehend frei zu halten.

Die Abbildung 5-3 zeigt eine Skizze des Versuchsaufbaus.

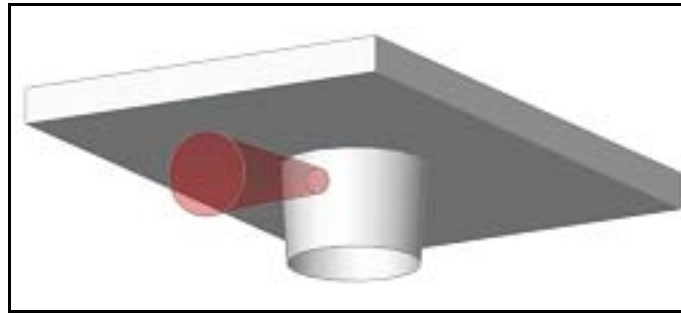


**Abbildung 5-3: Skizze der Versuche zur Ermittlung der Temperatur beim Thermofließlochformen**

Durch die obige Skizze ist deutlich zu erkennen, dass mit der Thermografiecamera ein großflächigeres Messfeld als mit dem Pyrometer erfasst werden kann. Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass auch die Temperaturen des entgegen der Vorschubrichtung nach oben verdrängten Werkstoffvolumens und des Werkzeuges erfasst werden können. Weiter zeigt die Skizze (Abbildung 5-3), dass das Pyrometer durch eine optische Anordnung eines festgelegten Messfeldes am Durchzug eingerichtet ist, um dessen Temperatur zu erfassen.

Für die Justierung des Pyrometers wurde zunächst ein Blechstreifen von 2 mm Blechdicke und bereits vorhandenem Durchzug auf der Aufspannung befestigt. Das Laservisier des Pyrometers ist auf eine Stelle ausgerichtet, die zwischen der Unterseite des Blechstreifens und der Mitte des gefertigten Durchzuges lag (siehe Abbildung 5-4).





**Abbildung 5-4: Skizze der Markierung mit dem Laservisier des Pyrometers an dem Blechdurchzug**

Bei der Justierung des Pyrometers für die Blechstreifen von 3 mm Blechdicke verwendete man einen fließlochgeformten Durchzug mit einer Blechdicke von 3 mm, bei dem in gleicher Weise verfahren worden ist. Die Größe des angezeigten Lasermessfleckes in Abbildung 5-4 beträgt in der Realität ca. 5 mm.

### 5.3 Versuchswerkstoffe

Als Versuchswerkstoffe kamen Blechstreifen aus den konventionellen Baustählen St37 und St52 und der Aluminiumlegierung AlMgSi1 mit Blechdicke von 2 und 3 mm, sowie aus dem austenitischen Edelstahl X5CrNi18.10 mit 2 mm zum Einsatz. Die folgenden Tabellen geben einen Überblick über die wichtigsten Kennwerte dieser Werkstoffe.

#### St37:

C	P	S	N
0,17 %	0,04%	0,04%	0,009%

#### St52:

C	Si	Mn	P	S
0,2 %	0,55 %	1,6 %	0,035 %	0,035 %

#### X5CrNi18.10:

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	N
0,07 %	1,0 %	2,0 %	0,045 %	0,03 %	18,25 %	9,25 %	0,11 %

#### AlMgSi1:

Al	Si	Mg
99 %	1 %	nur geringe Anteile

Tabelle 5-1: Chemische Zusammensetzung der Versuchswerkstoffe /1/, /24/

Eigenschaften	St37	St52	X5CrNi18.10	AlMgSi1
Streckgrenze $R_{p0,2}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	> 215	355	>= 190	85 – 240
Zugfestigkeit $R_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	min. 480	510	500	205 - 295
Bruchdehnung $A_5$ [%]	28	22	>= 35	18 - 8
E-Modul [N/mm <sup>2</sup> ]	$2 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^5$	
Dichte $\rho$ [kg/cm <sup>3</sup> ]	7,85	7,83	7,92	2,7
Wärmeleitfähigkeit $\lambda$ [W/m · K]	43 - 56	36 - 43	15	121 - 237
Spez. Wärmekapazität $c_p$ [kJ/kg · K]	0,5	0,5	0,5	0,921

Tabelle 5-2: Mechanische, physikalische und thermische Eigenschaften der Versuchswerkstoffe /1/, /24/

## 5.4 Versuchswerkzeuge

Im Rahmen der Untersuchungen kamen zwei am IPL geschliffene Vollhartmetall-Fließlochformer unterschiedlicher Geometrie zum Einsatz.

Der erste Fließlochformer besaß eine Standardform (Abbildung 5-5), Typ „Lang“, ähnlich einer von der Fa. Flowdrill® angebotenen Standardgeometrie. Dieser Fließlochformer besteht aus einer Spitze, dem konischen und zylindrischen Teil und besitzt vier Formstollen.

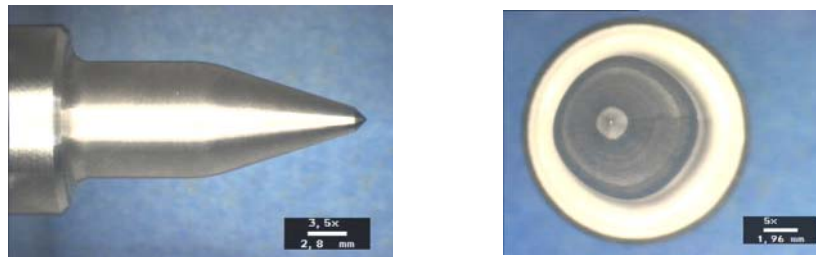


Abbildung 5-5: Fließlochformer - Standardgeometrie

Beim zweiten Werkzeug handelt es sich um einen Former mit Sondergeometrie (Abbildung 5-6), welches im Gegensatz zur Standardgeometrie keinen konischen Teil besitzt. Der Übergang zwischen Spitze und zylindrischem Teil hat hier die Form einer Ellipse.

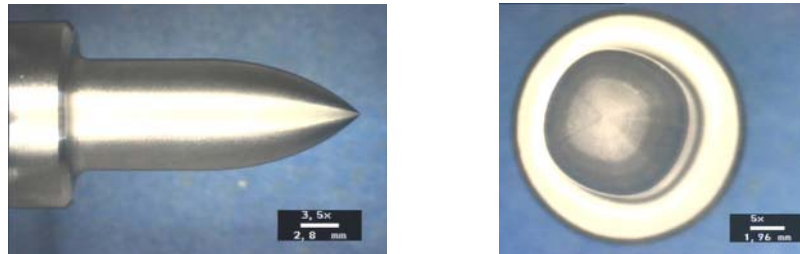


Abbildung 5-6: Fließlochformer - Sondergeometrie

Durch den harmonischen Übergang der beiden Bereiche erreicht man im Gegensatz zu einem Werkzeug mit konischem Bereich eine Qualitätsverbesserung der gefertigten Durchzüge.

Die Abbildung 5-7 zeigt beide verwendete Fließlochformer im Vergleich.

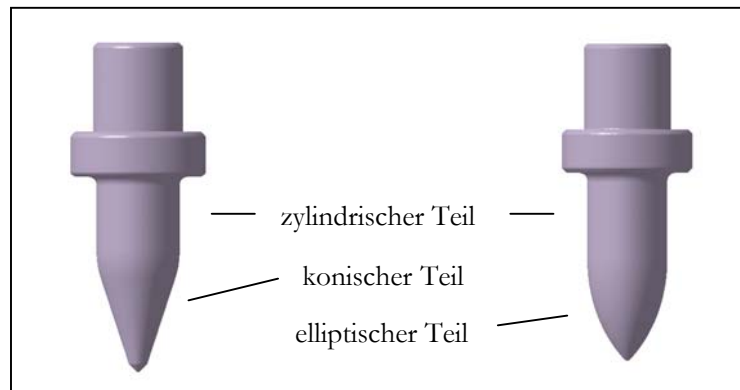


Abbildung 5-7: Gegenüberstellung der Standard- und der Sondergeometrie

Die Maße der Versuchswerkzeuge sind der folgenden Tabelle zu entnehmen.

Abmessung	Standardgeometrie	Sondergeometrie
Nenn Durchmesser [mm]	9,2	9,2
Anzahl der Formstollen	4	4
Übergangsradius von der Spitze zum Konus [mm]	0,1	-
Übergangsradius vom Konus zum Zylinder [mm]	10	-
Übergangsradius vom Zylinder zum Bund mm]	1,1	1
Spitzenwinkel [°]	90	90
Konuswinkel [°]	36	-
Gesamtlänge bis zum Bund [mm]	22,3	22,1
Länge der Spitze [mm]	0,92	-

Tabelle 5-3: Geometrie der Versuchswerkzeuge

## 5.5 Vorversuche zur Erfassung der Messgenauigkeit des Pyrometers

Bei der Temperaturmessung mit einem Pyrometer ist eine starre Fixierung des Messgerätes sowie eine exakte Ausrichtung des Laservisiers auf den Messbereich von großer Bedeutung. Während der Versuchsdurchführung kann es durch ein ‚Verwackeln‘ des Pyrometers zu einer Verfälschung der Messwerten kommen. Aus diesem Grund soll die Abhängigkeit der gemessenen Temperaturen von der Positionierungsgenauigkeit des Pyrometers untersucht werden. Ein Vorversuch zur Erfassung der Messgenauigkeit der Thermografiekamera ist nicht erforderlich, da durch eine einfache Fokussierung der Messstelle die Temperatur des gesamten Objektes erfasst werden kann.

### 5.5.1 Versuchsaufbau

Das Pyrometer wurde auf dem Bearbeitungszentrum Mahomat mittels eines Stativs installiert. Die Justierung des Pyrometers am Durchzug ist im Kapitel 5.2 beschrieben. Die Abbildung 5-8 zeigt eine Skizze des Versuchsaufbaus mit der Markierung des Lasermessflecks zwischen der Unterseite des Blechstreifens und der Mitte der Länge des gefertigten Durchzuges.

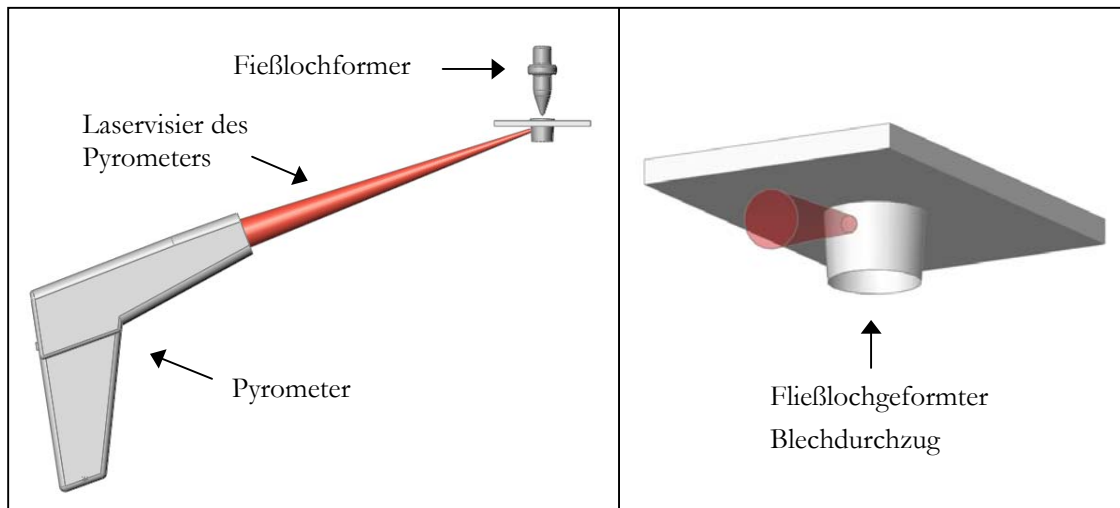


Abbildung 5-8: Skizze der Versuche zur Einrichtung des Pyrometers

### 5.5.2 Versuchsdurchführung

Um die Positionierungsgenauigkeit des Pyrometers zu untersuchen, erfolgte die Durchführung dieses Experimentes anhand zweier Methoden.

Bei der ersten Methode wurde die Temperatur am Durchzug nur mit einer starren Einrichtung des Pyrometers gemessen, d.h. die Justierung des Pyrometers wurde vor einer erneuten Temperaturmessung nicht verändert oder kontrolliert. Somit konnte man ermitteln, ob eine genaue Temperaturbestimmung an den Durchzügen ohne große Schwankungen der Messwerte mit der starren Einrichtung des Pyrometers garantiert ist.

Bei der zweiten Methode wurde die Temperatur am Durchzug an dem gleichen Punkt gemessen, jedoch wurde vor jedem Versuch das Pyrometer neu eingerichtet. Somit lassen sich die Ergebnisse beider Temperaturmessung direkt vergleichen.

Nach dem Vergleich beider Methoden sollte herausgefunden werden, welche zu geringeren Messfehlern führt. Diese wird nachfolgend für die Durchführung weiterer Versuche in dieser Arbeit verwendet. Die Anzahl der durchgeführten Versuche sollte sich an der Schwankung der Messergebnisse orientieren, d.h. bei nur geringen Unterschieden zwischen den beiden Methoden konnte die Versuchsanzahl klein gehalten werden.

Für beide Versuche kam als Versuchswerkstoff ein konventioneller Baustahl St52 in Form von Blechstreifen zum Einsatz. Sowohl die Blechstreifen als auch die innere Seite der Aufspannung zur Arretierung der Blechstreifen wurde mit einem hochtemperaturbeständigen Schwarzlack lackiert, um die Einflüsse von Reflektionen bei der Temperaturmessung zu verringern. Den Emissionsgrad am Pyrometer war 0,99 (siehe Kapitel 4.2.1).

In beiden Experimenten kam ein Standard-Fließlochformer vom Typ „Lang“ der Fa. Flowdrill<sup>®</sup> mit einem Durchmesser von 9,2 mm zum Einsatz, der vor jedem Durchzug mit einer hochtemperaturbeständigen Temperaturleitpaste geschmiert wurde. Die Oberfläche der Fließlochformer kann durch Verschmutzungen und Materialaufschweißungen die Messung beeinflussen. Um diesen Einfluss zu reduzieren, wurde das Werkzeug vor jedem Durchzug gereinigt. Die Versuche wurden mit einer Drehzahl von 2000 U/min und einem gestuften Vorschub von 50 und 200 mm/min durchgeführt.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind im Kapitel 6.1 zu finden.

## 5.6 Versuchsdurchführung zur Ermittlung der Temperatur

Für eine grundsätzliche Bewertung der Temperaturen an den Durchzügen in Abhängigkeit von Werkstoffsorte, Werkstoffdicke und Werkzeuggeometrie werden die Versuche mit Hilfe einer statistischen Versuchsplanung und -auswertung durchgeführt. Um die verwendeten Temperaturmesssysteme miteinander zu vergleichen, sind die an den Durchzügen entstehenden Temperaturen und die Temperaturverläufe, die sich während des Thermofließlochformens einstellen, von beiden Temperaturmesssystemen gleichzeitig zu ermitteln und anschließend gegenüber zu stellen.

### 5.6.1 Versuchsplan

Im Rahmen dieser Arbeit wird die an den Durchzügen erfassten Temperaturen mittels Pyrometer und Thermografiekamera für jede verwendete Werkstoffsorte statistisch ausgewertet. Dabei sollten die Einflussgrößen Werkzeug, Temperaturmesssystem und Blechdicke in bezug auf ihren statistischen Einfluss auf die Zielgröße Temperatur ermittelt werden. Diese Zielgröße Temperatur entsteht aus dem Mittelwert der maximalen erfassten Temperaturen beider Temperaturmessgeräte.

Dazu wird mit Hilfe der statistischen Versuchsplanung und -auswertung ein vollfaktorieller Versuchsplan mit drei Faktorstufen für die Werkstoffe St37, St52 und AlMgSi1 verwendet. Man spricht hier von einem 2<sup>3</sup>-Versuch. Daraus ergeben sich acht verschiedene Kombinationsmöglichkeiten der einzelnen Einflussgrößen auf jeweils einem niedrigen und einem hohen Niveau.

Für den Werkstoff X5CrNi18.10 wird ein vollfaktorieller Versuchsplan mit zwei Faktorstufen verwendet, dies entspricht einem  $2^2$ -Versuch. Hier werden nur die Einflussgrößen Werkzeug und Temperaturmesssystem untersucht, weil der Werkstoff lediglich in der Blechdicke von 2 mm untersucht wurde. Der Versuchsplan setzt sich aus vier verschiedenen Kombinationsmöglichkeiten – einzelnen Einflussgrößen auf einem niedrigen und einem hohen Niveau – zusammen.

Einflussgrößen sind:

- Werkzeug: Standard- und Sondergeometrie
- Temperaturmesssystem: Pyrometer und Thermografiekamera
- Blechdicke: 2 und 3 mm

Die folgende Tabelle stellt eine Zusammenfassung der Kombinationsmöglichkeiten der Einflussgrößen des durchgeführten  $2^3$ -Versuches dar.

Nummer	Einflussgrößen		
	Werkzeug	Temperaturmesssystem	Blechdicke [mm]
1	Standardgeometrie	Pyrometer	2
2	Sondergeometrie	Pyrometer	2
3	Standardgeometrie	Thermografiekamera	2
4	Sondergeometrie	Thermografiekamera	2
5	Standardgeometrie	Pyrometer	3
6	Sondergeometrie	Pyrometer	3
7	Standardgeometrie	Thermografiekamera	3
8	Sondergeometrie	Thermografiekamera	3

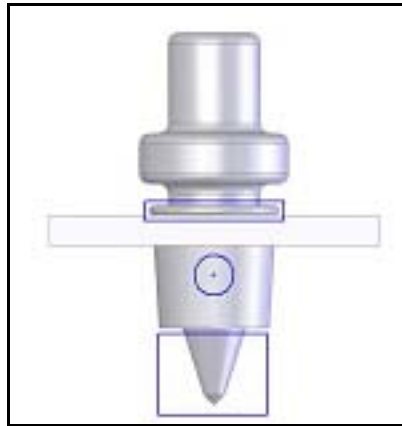
**Tabelle 5-4: Versuchsplan eines vollfaktoriellen  $2^3$ -Versuches**

Anschließend werden die Ergebnisse der Versuchspläne in Abhängigkeit der Zielgröße Temperatur der Durchzüge dargestellt. Dabei werden die statistisch nachweisbaren hoch signifikanten Effekte der Einflussgrößen sowie deren statistischen Wechselwirkungen registriert.

### 5.6.2 Versuchsauswertung und Bearbeitungsparameter

Mit Hilfe der Kamerasoftware werden die mit der Thermografiekamera erfassten Temperaturen in den thermografischen Bildern in einem kreisförmigen Bereich ausgewertet (siehe Abbildung 5-9), der ähnlich der Markierung des Laservisiers vom Pyrometer am Blechdurchzug (siehe Abb. 5-4) ist. Dies ermöglicht einen direkten Vergleich der gemessenen Temperaturen beider Messsysteme. Bei der Evaluierung der Temperaturen des entge-

gen der Vorschubrichtung nach oben geflossenen Werkstoffvolumens und des Werkzeuges verwendete man ein rechteckiges Messareal, wie die Abbildung 5-9 darstellt.



**Abbildung 5-9: Skizze für das Auswerten der Temperaturen**

Der Einfluss der Fertigungsparameter auf die Qualität der Durchzüge wurde in dieser Arbeit nicht untersucht. Die Durchführung der Versuche erfolgte mit einer Drehzahl von 4000 U/min und mit einem gestuften Vorschub. Hiermit sollen die Ergebnisse verglichen und durch die statistische Versuchsplanung ausgewertet werden. Der Vorschub wird bei dem Umschaltzeitpunkt von 50 auf 300 mm/min erhöht. Der Umschaltzeitpunkt für 2 mm Blechdicke liegt bei 2,6 mm und von 3 mm bei 3,9 mm. Für jede Versuchskombination werden zwei Durchzüge hergestellt.

Alle Versuchsblechstreifen wurden mit einem Hochtemperaturlack schwarz lackiert. Der Emissionsgrad von 0,99 wurde für Pyrometer und Thermografiekamera gewählt, gemäß der Ergebnisse Kapitels 4. An der Kamera wählte man den Temperaturmessbereich 2 (von 0 bis 500 °C) für die Versuche in Aluminium und den Temperaturmessbereich 3 (von 350 bis 1500°C) für die Versuche in Baustahl St37, St52 und in Edelstahl. Um die Temperaturverläufe der Anfangsphase des Umformprozesses von Bau- und Edelstahl untersuchen zu können, wurden die Versuche auch im Temperaturmessbereich 2 ausgeführt.

Vor jeder Versuchsdurchführung ist es erforderlich, die Fließlochformer mit einer hochtemperaturbeständigen Paste zu schmieren und die Werkzeuge von Verschmutzungen und Materialaufschweißungen zu reinigen. Diese könnten eine Verfälschung der Temperaturmessung zur Folge haben.



## 6 Ergebnisse und Folgerungen

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Untersuchungen aus dem Kapitel 5 beschrieben und erläutert. Diese umfassen sowohl die Ergebnisse der Vorversuche zur Erfassung der Messgenauigkeit des Pyrometers, als auch die Resultate zur Ermittlung der Temperatur. Einer Darstellung der Ergebnisse der Temperaturuntersuchung des nach oben verdrängten Werkstoffvolumens und des Werkzeuges mit der Thermografiekamera folgt anschließend eine Gliederung der Vor- und Nachteile beider Temperaturmesssysteme. Am Ende werden die Zusammenhänge zwischen Prozesstemperatur und Moment während der Bearbeitung im Thermofließlochformen vorgestellt.

### 6.1 Ergebnisse der Vorversuche zur Erfassung der Messgenauigkeit des Pyrometers

Das Diagramm 6-1 stellt die Ergebnisse der Untersuchung der Messgenauigkeit des Pyrometers dar.

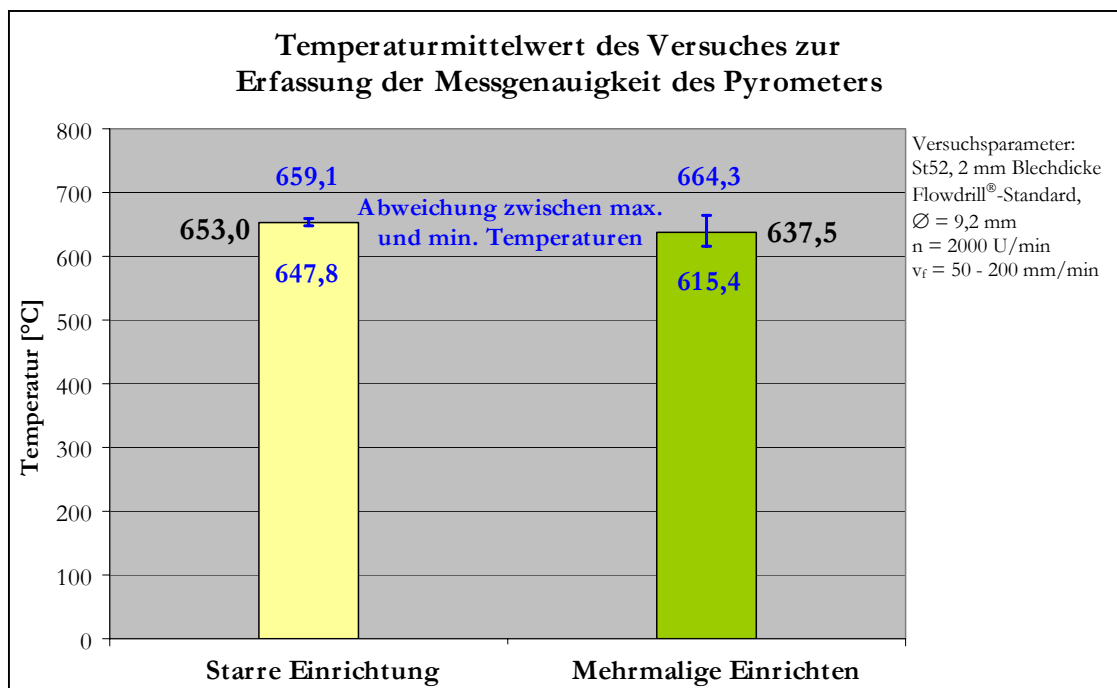


Diagramm 6-1: Ergebnisse des Vorversuches zur Erfassung der Messgenauigkeit des Pyrometers

Bei der Untersuchung mit starrer Einrichtung des Pyrometers wurde aus fünf gefertigten Buchsen ein Temperaturmittelwert von 653 °C gemessen. Der maximale Temperatur-

wert betrug 659,1 °C, der minimale 647,8 °C. Aufgrund der geringen Schwankungsbreite der Messergebnisse waren nur fünf Messungen nötig.

Beim Versuch mit mehrmaligem Einrichten des Pyrometers lag der Temperaturmittelwert von zehn gefertigten Buchsen bei 637,5 °C. Der maximale Temperaturwert betrug 664,3 °C, der minimale 615,4 °C. Da in diesem Experiment eine größere Abweichung der Temperaturmessung auftrat, wurde der Versuchsumfang auf mehr als fünf Buchsen erweitert.

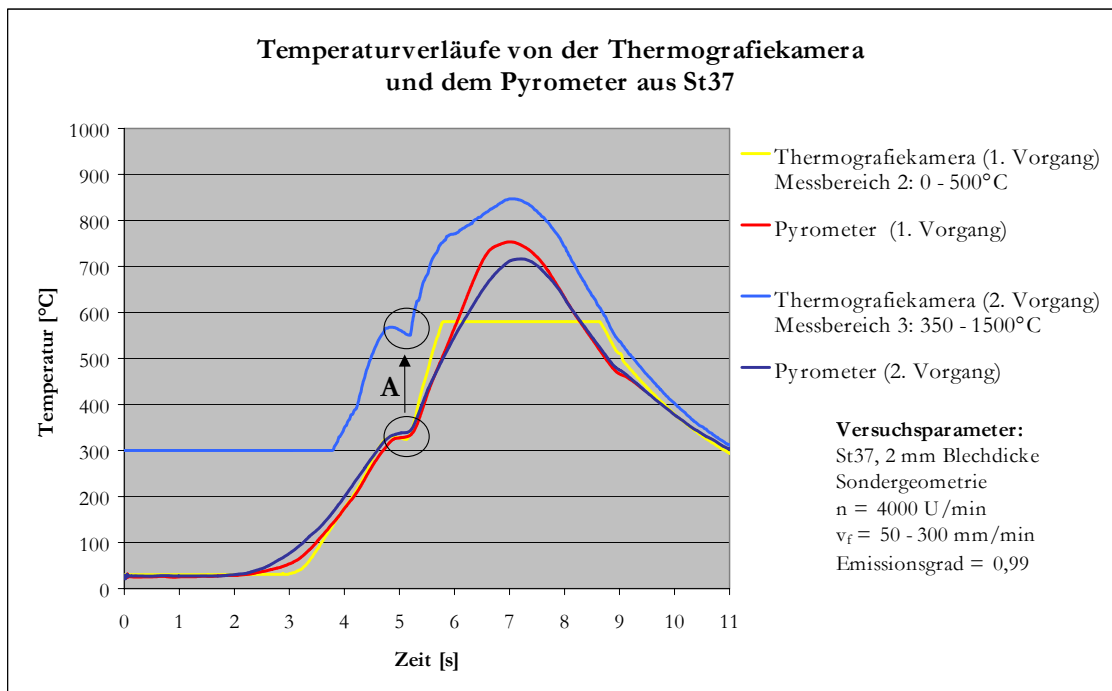
Die Untersuchung mit starrer Einrichtung zeigt eine geringere Abweichung zwischen dem maximalen- und minimalen Temperaturwert der Buchsen als im vorangegangenen Versuch, gleichzeitig ist ein höherer Temperaturmittelwert zu beobachten. Aus den genannten Gründen wird in dieser Arbeit bei den weiteren Untersuchungen der Temperaturen beim Thermofließlochformen die starre Einrichtung des Pyrometers bevorzugt.

## 6.2 Ergebnisse der Ermittlung der Temperatur

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Temperaturermittlung an den fließlochgeformten Blechdurchzügen mit dem Pyrometer und der Thermografiekamera präsentiert. Dabei werden die Ergebnisse für jeden der Versuchswerkstoffe separat ausgewertet und dargestellt. Aufgrund eines unerwarteten Problems mit den von der Thermografiekamera erfassten Temperaturen wird dieses Problem vorweg erläutert. Anschließend werden die Ergebnisse durch die Anwendung einer statistischen Versuchsplanung sowie die Einzelversuchsergebnisse vorgestellt und die Resultate der Temperaturverläufe im Vergleich aufgezeigt.

### 6.2.1 Problematik bei der Temperaturerfassung

Die von dem Pyrometer und der Thermografiekamera erfassten Temperaturen der fließlochgeformten Blechdurchzügen wurden als Funktion der Zeit dargestellt. Das Diagramm 6-2 zeigt die gemessenen Temperaturverläufe von zwei Versuchsreihen vom Werkstoff St37 mit 2 mm Blechdicke und einem Werkzeug mit Sondergeometrie.



**Diagramm 6-2: Probleme bei den Temperaturverläufen der  
Thermografiekamera und Pyrometer**

Die Temperaturen wurden an den Durchzügen mit der Thermografiekamera in den Temperaturmessbereichen 2 (0 bis 500 °C) und 3 (350 bis 1500 °C) erfasst. Die Werte des Temperaturverlaufes der Thermografiekamera fallen aufgrund des an der Kamera gewählten Temperaturbereiches im Messbereich 2 zwischen ca. 5,6 und 9 s und im Messbereich 3 vor ca. 300 °C weg.

Bei der Auswertung der mittels Thermografiekamera erfassten Messwerte zeigte sich ein erheblicher Unterschied der Temperaturverläufe beider Messbereiche. Im Diagramm 6-2 ist zu sehen, dass die Temperaturverläufe des Pyrometers (rote Linie) und der Thermografiekamera im Messbereich 2 (gelbe Linie) nahezu identisch sind. Vergleicht man jedoch die Temperaturverläufe des Pyrometers und der Thermografiekamera im Messbereich 3, so unterscheiden sich diese erheblich (siehe blaue Linien). Die im Diagramm gekennzeichnete Stelle A zeigt die Thermografiekamera im Messbereich 3 ca. 560 °C und im Messbereich 2 ca. 330 °C, übereinstimmend mit dem Pyrometer. Im Bereich A kommt es zu einem Knick, der durch die Erhöhung des Vorschubes im Umschaltpunkt hervorgerufen wird. Im Maximalbereich der Temperatur tritt eine Differenz von über 90 K zwischen den Temperaturverläufen der Thermografiekamera im Messbereich 3 und dem Pyrometers auf.

Dieses Phänomen war sowohl bei den Temperaturverläufen der anderen Werkzeuggeometrie, bei der Blechdicke von 3 mm, als auch bei den Versuchswerkstoffen St52 und X5CrNi18.10 zu beobachten. Der Grund für dieses Problem liegt in einer falschen Kenn-

linie der Thermografiekamera im Temperaturmessbereich 3, der vom Hersteller der Kamera nicht korrekt kalibriert wurde.

Aus diesem Grund wurde auf die gemessenen Temperaturen mit der Thermografiekamera im Messbereich 3 für weitere Auswertungen in dieser Arbeit verzichtet. Angenommen werden die erfassten Temperaturwerte des Pyrometers, da dieses Messsystem eine sehr guter Reproduzierbarkeit der Messwerte erreicht hat.

### 6.2.2 Ergebnisse für St37

Aufgrund des Problems mit den Temperaturen der Thermografiekamera (siehe Kapitel 6.2.1) entfällt die Einflussgröße Temperaturmesssystem, da nun ausschließlich die Werte des Pyrometers zur Auswertung herangezogen werden. Somit wird für den Werkstoff St37 ein vollfaktorieller Versuchsplan mit den zwei Faktorstufen Werkzeug und Blechdicke verwendet. Das entspricht einem 2<sup>2</sup>-Versuch.

Folgende konkrete Aussagen über die Beeinflussung der Temperatur resultieren aus dem statistischen Versuchsplan:

Ein Erhöhen der Blechdicke von 2 auf 3 mm führt zu einer statistisch nachweisbaren Steigerung der maximalen Temperatur der fließlochgeformten Blechdurchzüge von 111,8 K. Weitere Effekte und Wechselwirkungseffekte sind nicht statistisch nachweisbar.

Das folgende Diagramm zeigt den auf den größten Effekt normierten Einfluss auf die Zielgröße Temperatur.

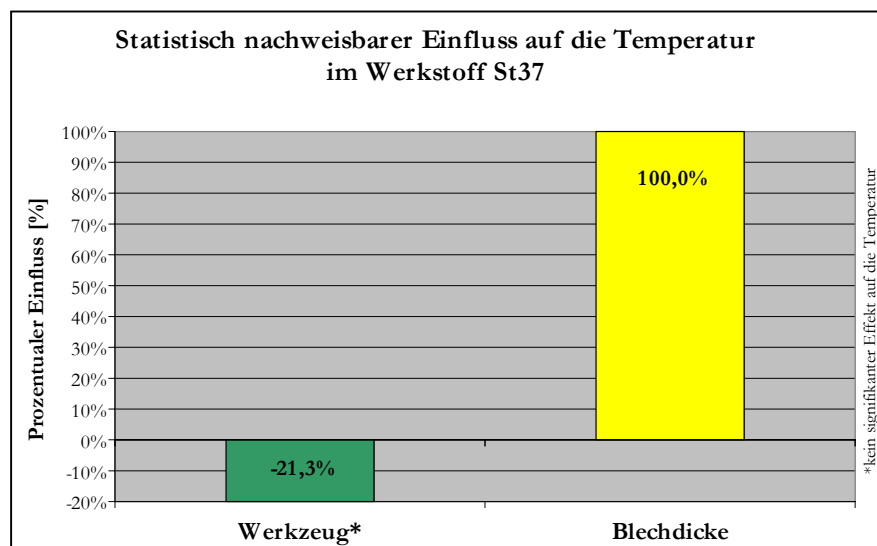


Diagramm 6-3: Einfluss auf die Temperatur im St 37

Aus dem Diagramm ist ersichtlich, dass die maximale Temperatur der fließlochgeformten Blechdurchzüge in St37 von der Blechdicke abhängt. Mit einem absoluten pro-

zentualen Einfluss von 21,3 % ist der Faktor Werkzeug in bezug auf die Temperatur statistisch nicht nachweisbar. Mit dem Wechsel des Werkzeuges einer Standardgeometrie auf eine Sondergeometrie sinken die Maximaltemperaturen der Durchzüge in St37.

Um einen Einblick in die Einzelversuchsergebnisse vom Werkstoff St37 zu erhalten, folgt eine grafische Darstellung der Ergebnisse der Temperaturermittlung an den fließlochgeformten Blechdurchzügen durch das Pyrometer.

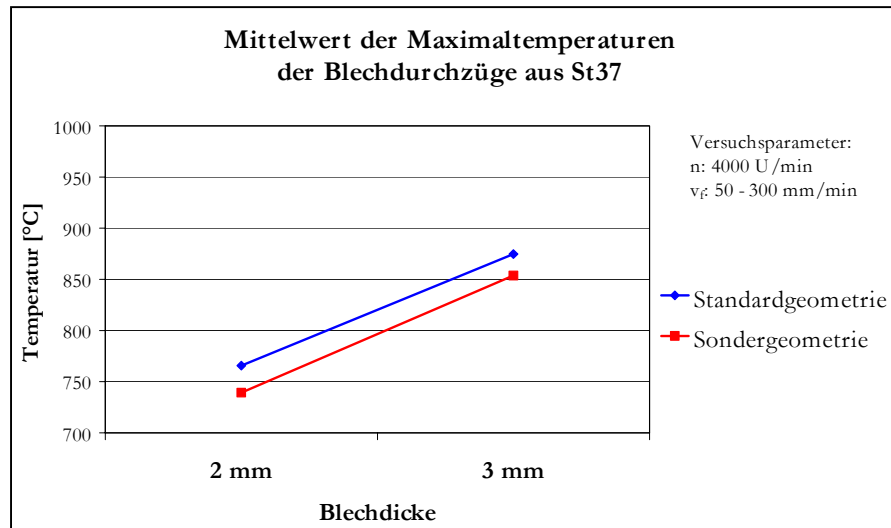
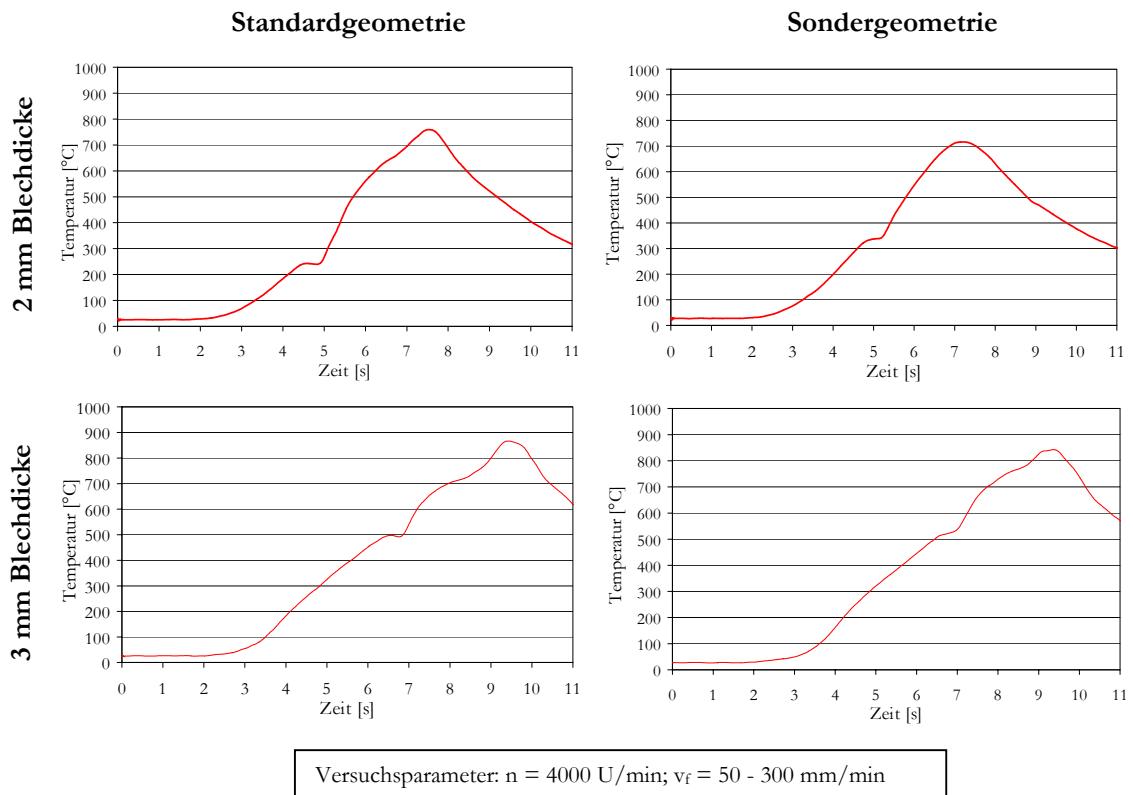


Diagramm 6-4: Einzelversuchsergebnisse vom St 37

Wie anhand der statistischen Versuchsauswertung festgestellt wurde, sind aus dem Diagramm 6-4 höhere Maximaltemperaturen mit dem Pyrometer für eine Blechdicke von 3 mm gemessen worden. Die Erhöhung der Eingriffszeit des Fließlochformers und die größere Reibfläche führen zu einem Anstieg der Temperatur mit steigender Blechdicke.

Eine Reduzierung der Temperaturen ist mit dem Wechsel von der Standardgeometrie zur Sondergeometrie für beide Blechdicken zu erkennen. Die Differenz der Maximaltemperaturen zwischen beiden Werkzeugen beträgt bei 2 mm Blechdicke 26,5 K, bei 3 mm ca. 21 K.

In den folgenden Diagrammen sieht man die Temperaturverläufe des Pyrometers bei einer durchgeführten Versuchsreihe.



**Diagramm 6-5: Temperaturverläufe des Pyrometers vom St 37**

Aus den Temperaturverläufen beider Werkzeuge ist zu erkennen, dass in der Anfangsphase des Umformprozesses, beim Eindringen des konischen Teils vom Werkzeug ins Werkstück, die Temperaturen fast linear bis zu einem Maximum ansteigen. Ab diesem Punkt beginnt die Abkühlungsphase. Der Knick in der Anfangsphase wird durch die Erhöhung des Vorschubes verursacht.

Beim Vergleich der Maximaltemperaturbereiche verlaufen diese bei den Temperaturen der Sondergeometrie für die 2 mm Blechdicke etwas harmonischer als bei der Standardgeometrie.

### 6.2.2.1 Zusammenfassung

Die vorangegangenen Untersuchungen haben ergeben, dass die an den fließlochgeformten Blechdurchzügen gemessenen Temperaturen mit steigender Blechdicke ansteigen. Unter Anwendung einer statistischen Versuchsplanung und -auswertung wurde hier ein Ansteigen der Maximaltemperatur von 111,8 K statistisch nachgewiesen.

Es hat sich gezeigt, dass die mit dem Pyrometer erfassten Maximaltemperaturen an den Durchzügen mit dem Wechsel von der Standardgeometrie zur Sondergeometrie bei beiden Blechdicken sinken.

Weiterhin ist anzumerken, dass sich mit der Geometrievariation der Werkzeuge die Temperaturverläufe verändern. Im Bereich der Maximaltemperatur ist der Verlauf bei der Sondergeometrie für die 2 mm Blechdicke etwas harmonischer als bei der Standardgeometrie.

### 6.2.3 Ergebnisse für St52

Aufgrund der auftretenden Probleme beim Messbereich 3 der Thermografiekamera (vergl. Kapitel 6.2.1) musste die statistische Versuchsplanung auch für den Baustahl St52 geändert werden.

Folgende konkrete Aussagen über die Beeinflussungsmöglichkeiten der Temperatur resultieren aus dem statistischen Versuchsplan:

Beim Werkstoff St52 sind statistisch keine Effekte und Wechselwirkungen der Faktoren auf die Temperatur nachweisbar.

Das folgende Diagramm zeigt den auf den größten Effekt normierten Einfluss auf die Zielgröße Temperatur.

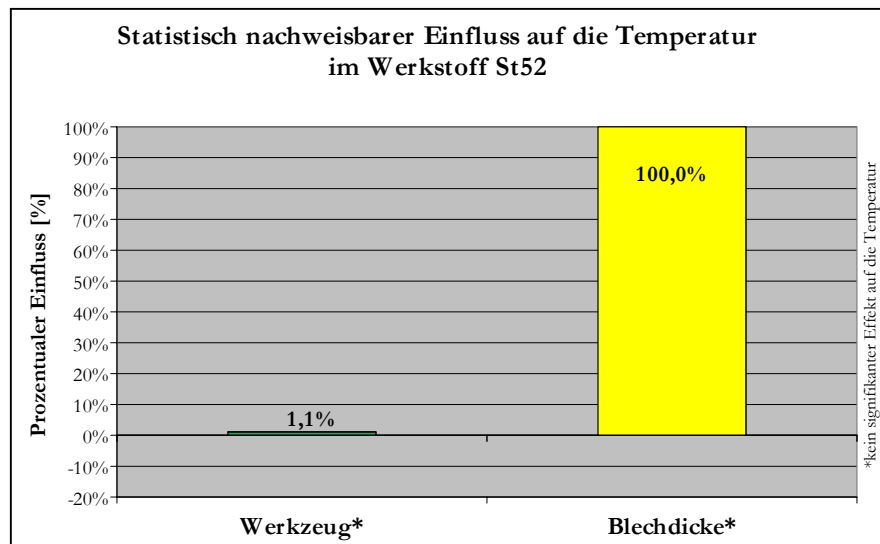


Diagramm 6-6: Einfluss auf die Temperatur im St 52

Dem Diagramm ist zu entnehmen, dass durch den Wechsel einer Blechdicke von 2 auf 3 mm und mit dem Wechsel des Werkzeuges einer Standard- auf eine Sondergeometrie nur ein geringer Einfluss von 1,1 % auf die Temperatur entsteht.

Um einen Einblick in die Einzelversuchsergebnisse vom Werkstoff St52 zu erhalten, werden nun die Ergebnisse der Temperaturermittlung an den fließlochgeformten Blechdurchzügen mittels Pyrometer grafisch dargestellt.

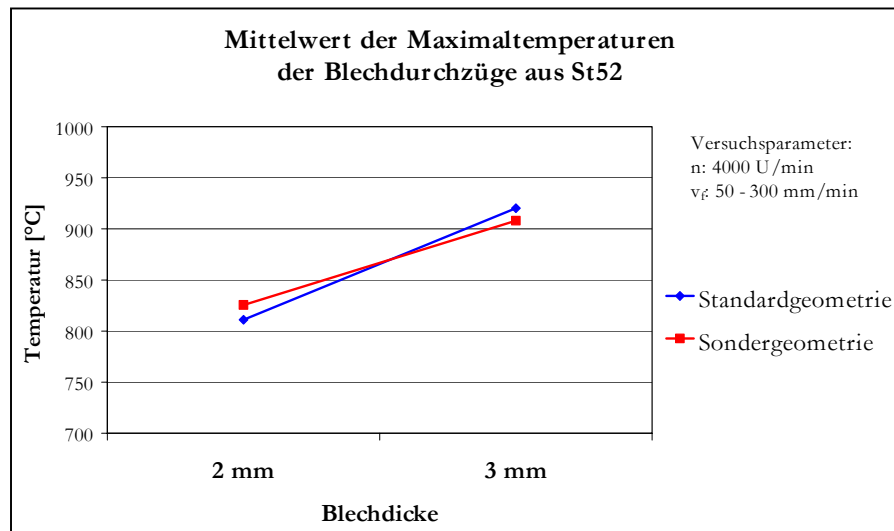


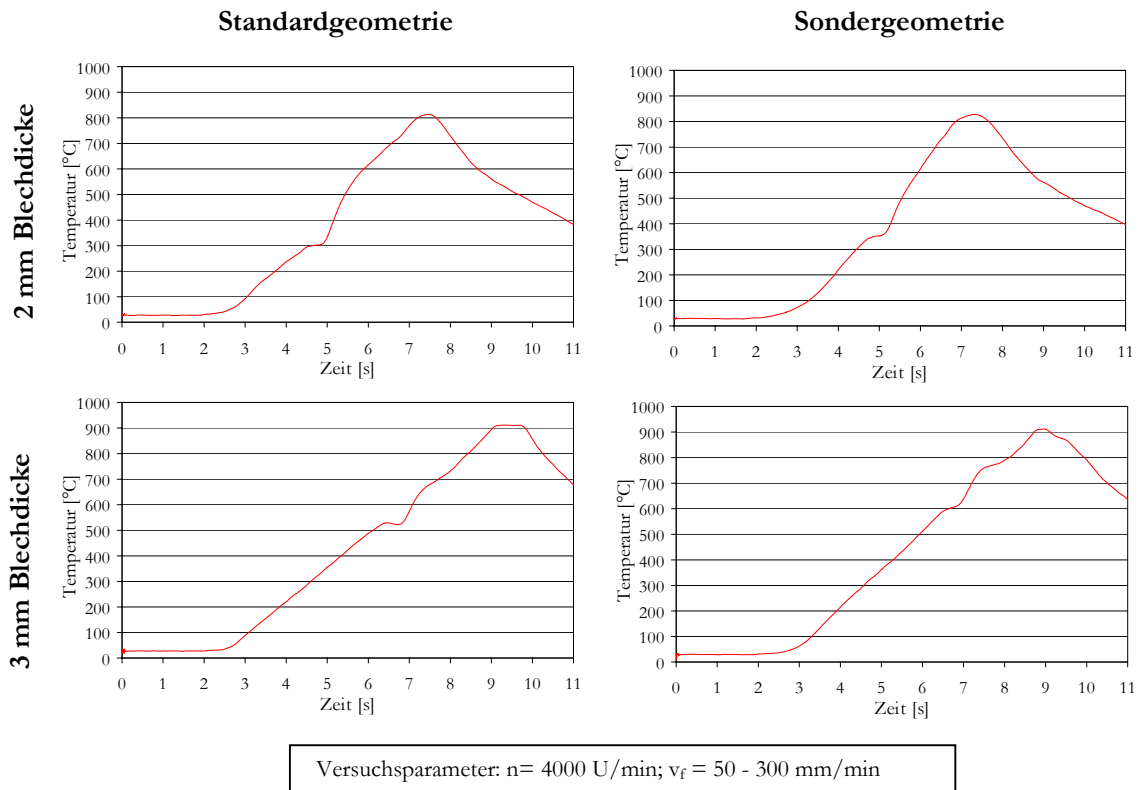
Diagramm 6-7: Einzelversuchsergebnisse vom St 52

Wie schon bei St37 zeigen die Ergebnisse ebenfalls höhere Temperaturen bei dickeren Blechen (3 mm). Mit dem Wechsel von Standardgeometrie zur Sondergeometrie kommt es bei einer Blechdicke von 2 mm zu einem Ansteigen der Temperatur um 14,5 K, bei 3 mm Blechdicke dagegen zu einer Absenkung um 12,3 K.

Im Vergleich zu den Einzelversuchsergebnissen des Baustahls St37 liegen alle an den Durchzügen des Baustahls St52 gemessenen Maximaltemperaturen mindestens 45 K höher.



Die folgenden Diagrammen zeigt die mit dem Pyrometer gemessenen Temperaturverläufe bei einer durchgeführten Versuchsreihe.



**Diagramm 6-8: Temperaturverläufe von St52 gemessen mit dem Pyrometer**

Die Temperaturverläufe beider Baustahlsorten sind ähnlich. In der Anfangsphase des Umformprozesses, in der der konische Arbeitsteil des Werkzeuges ins Werkstück eindringt, steigen die Temperaturen fast linear bis zu einem Maximum an, bis die Abkühlungsphase beginnt. In der Anfangsphase ist ebenso deutlich ein Knick durch Erhöhung des Vorschubes zu erkennen.

Im Vergleich zum Maximaltemperaturbereich der Temperaturverläufe der Werkzeuge ist dieser ebenso bei der Blechdicke von 2 mm der Sondergeometrie etwas harmonischer als bei der Standardgeometrie.

### 6.2.3.1 Zusammenfassung

Die vorangegangenen Untersuchungen zeigen, dass sich mit Hilfe der statistischen Versuchsplanung und -auswertung keine Effekte und Wechselwirkungen aus den Faktoren Werkzeug und Blechdicke auf die Temperatur ergeben.

Wie auch bei den Versuchen mit St37 zeigt es sich, dass die mit dem Pyrometer erfassten Maximaltemperaturen an den Durchzügen mit größerer Blechdicke ansteigen. Ein

Wechsel der Werkzeuge von Standard- zur Sondergeometrie bewirkt ein Ansteigen der Temperaturen bei der Blechdicke von 2 mm dagegen ein Absinken bei 3 mm Blechdicke.

Weiterhin ist anzumerken, dass die mit dem Pyrometer erfassten Maximaltemperaturen an den fließlochgeformten Blechdurchzügen aus St52 höher sind als bei St37. Die Geometrievariation zwischen den verwendeten Fließlochformern ist bei den Temperaturverläufen bemerkbar, wobei im Maximaltemperaturbereich der Verlauf bei der Sondergeometrie wieder harmonischer verläuft als bei der Standardgeometrie.

#### 6.2.4 Ergebnisse für X5CrNi18.10

Die Untersuchung des Werkstoffes X5CrNi18.10 wurde nur mit 2 mm Blech und dem Pyrometer (vergl. Kapitel 6.2.1) durchgeführt. Aus diesen Gründen konnte keine statistische Versuchsplanung durchgeführt, weil von den drei Faktoren nur noch einer übrig geblieben ist.

Um einen Einblick in die Einzelversuchsergebnisse des Werkstoffes X5CrNi18.10 zu erhalten, folgt eine grafische Darstellung der Ergebnisse der Temperaturermittlung an den fließlochgeformten Blechdurchzügen mit dem Pyrometer.

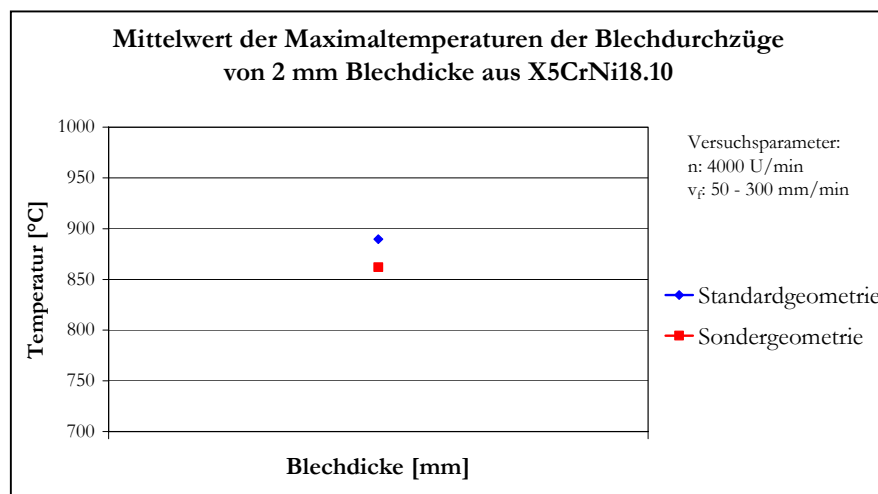
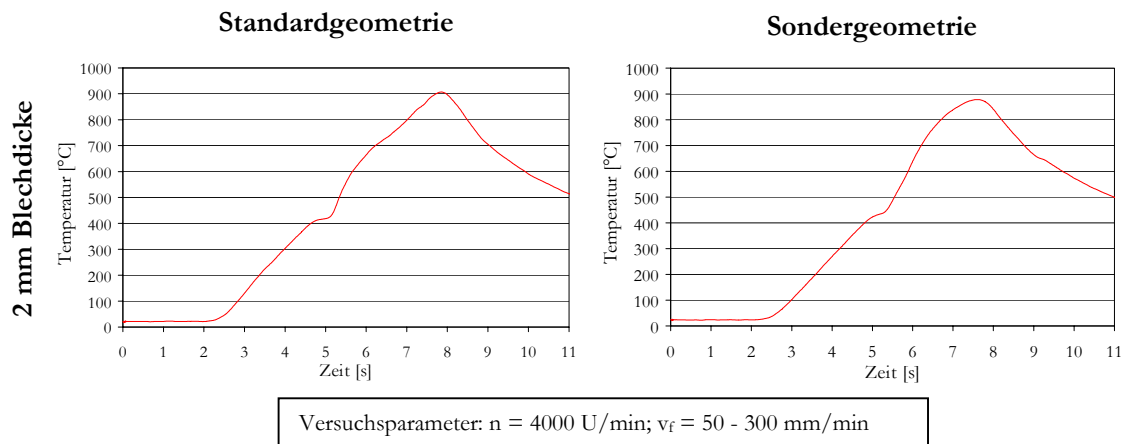


Diagramm 6-9: Einzelversuchsergebnisse vom X5CrNi18.10

Das Diagramm zeigt auch hier höhere Maximaltemperaturen beim Einsatz von Werkzeugen mit Standardgeometrie im Vergleich mit der Sondergeometrie. Diese Maxima liegen deutlich über den Maximalwerten bei der Bearbeitung von Baustahl in 2 mm. Im Vergleich zu den Versuchswerkstoffen St37 und St52 besitzt der austenitische Edelstahl X5CrNi18.10 neben einer wesentlich geringeren Wärmeleitfähigkeit eine höhere Wärmeleitfähigkeit. Die durch Reibung und Umformung erzeugte Wärme wird langsamer aus der Wirkzone abgeleitet. Somit erfolgt die Umformung auf höherem Temperaturniveau.

In den folgenden Diagrammen sieht man die mittels Pyrometer gemessenen Temperaturverläufe einer durchgeführten Versuchsreihe.



**Diagramm 6-10: Temperaturverläufe des Pyrometers im X5CrNi18.10**

Die Temperaturverläufe des Pyrometers für den Edelstahl sind in Form ebenso ähnlich wie die der untersuchten Baustahlversuchswerkstoffe. Mit Blick auf die Maximaltemperatur zeigen sich die Temperaturverläufe der Sondergeometrie harmonischer als die der Standardgeometrie. Dieses Verhalten ist vergleichbar mit den Kurven der untersuchten Baustähle.

#### 6.2.4.1 Zusammenfassung

Durch die vorangegangenen Untersuchungen konnte festgestellt werden, dass die mit dem Pyrometer erfassten Maximaltemperaturen mit dem Wechsel der Werkzeuge von Standard- zur Sondergeometrie an den gefertigten Durchzügen sinken. Die erfassten Temperaturen sind allerdings höher als bei den Versuchen in Baustahl.

Weiterhin ist auch hier eine harmonischere Tendenz der Temperaturverläufe im Maximaltemperaturbereich bei der Sondergeometrie festzustellen.

#### 6.2.5 Ergebnisse für AlMgSi1

Da für die Temperaturmessung der Aluminiumlegierung nur der Messbereich 2 (0 – 500 °C) der Thermografiekamera benötigt wird, ergeben sich aus den im Kapitel 6.2.1. beschriebenen Problemen bei der Auswertung der Ergebnisse keine Einschränkungen.

Aus dem statistischen Versuchsplan ergeben sich die folgenden Einflüsse auf den Temperaturverlauf:

Eine Veränderung der Blechdicke von 2 auf 3 mm führt zu einer statistisch nachweisbaren Steigerung der maximalen Temperatur der fließlochgeformten Blechdurchzüge von

22,1 K. Weitere Effekte und Wechselwirkungseffekte sind darüber hinaus nicht statistisch nachweisbar.

Das folgende Diagramm zeigt den auf den größten Effekt normierten Einfluss auf die Zielgröße Temperatur.

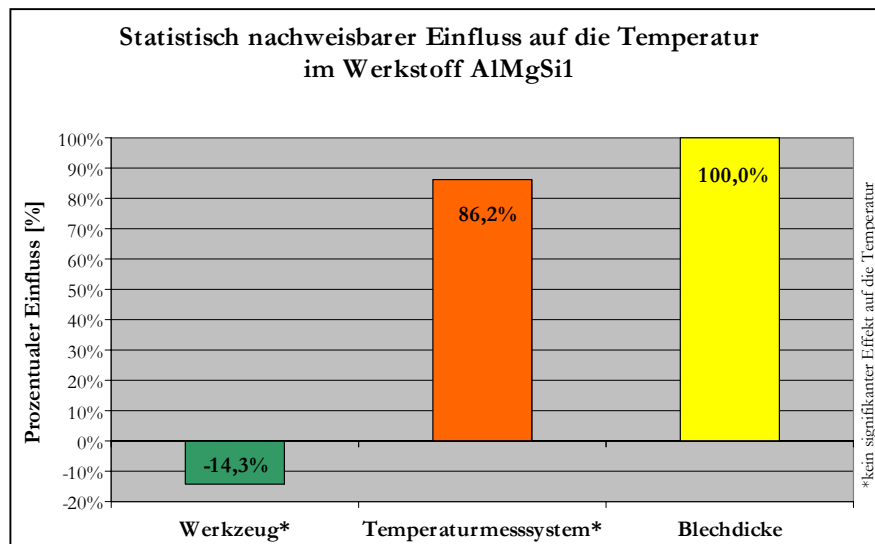
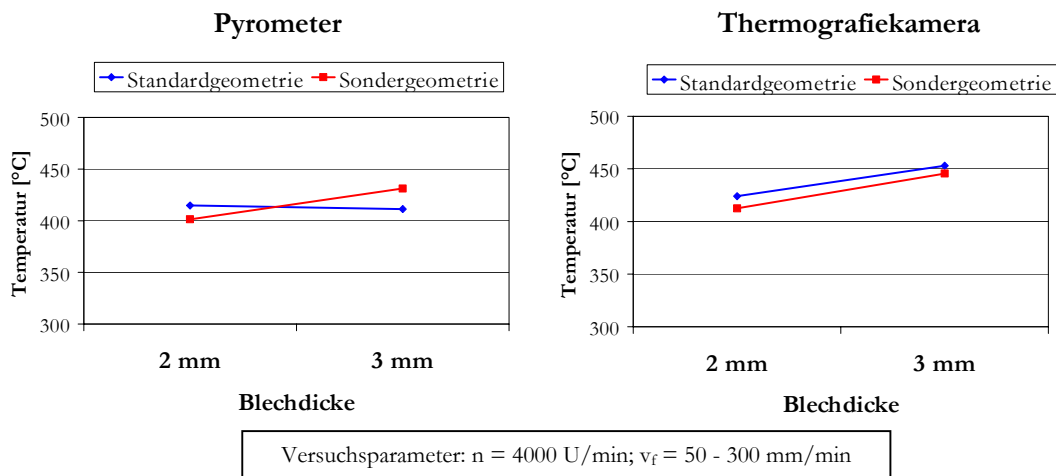


Diagramm 6-11: Einfluss auf die Temperatur im AlMgSi1

Den größten Einfluss auf die maximale Temperatur der fließlochgeformten Durchzüge in Aluminium hat die Blechdicke. Der Faktor Temperaturmesssystem mit einem prozentualen Einfluss von 86,2 % ist statistisch nicht nachweisbar. Dieser prozentuale Wert sagt lediglich aus, dass die gemessene maximale Temperatur mit dem Wechsel des Temperaturmesssystems vom Pyrometer auf die Thermografiekamera steigt. Mit einem absoluten prozentualen Einfluss von 14,3 % ist der Faktor Werkzeug in bezug auf die Temperatur statistisch nicht nachweisbar. Der Wechsel von der Standardgeometrie zur Sondergeometrie verursacht in diesem Fall eine Senkung der Temperatur.

Folgend werden die Einzelversuchsergebnisse der Temperaturermittlung an den fließlochgeformten Blechdurchzügen aus AlMgSi1 grafisch dargestellt.



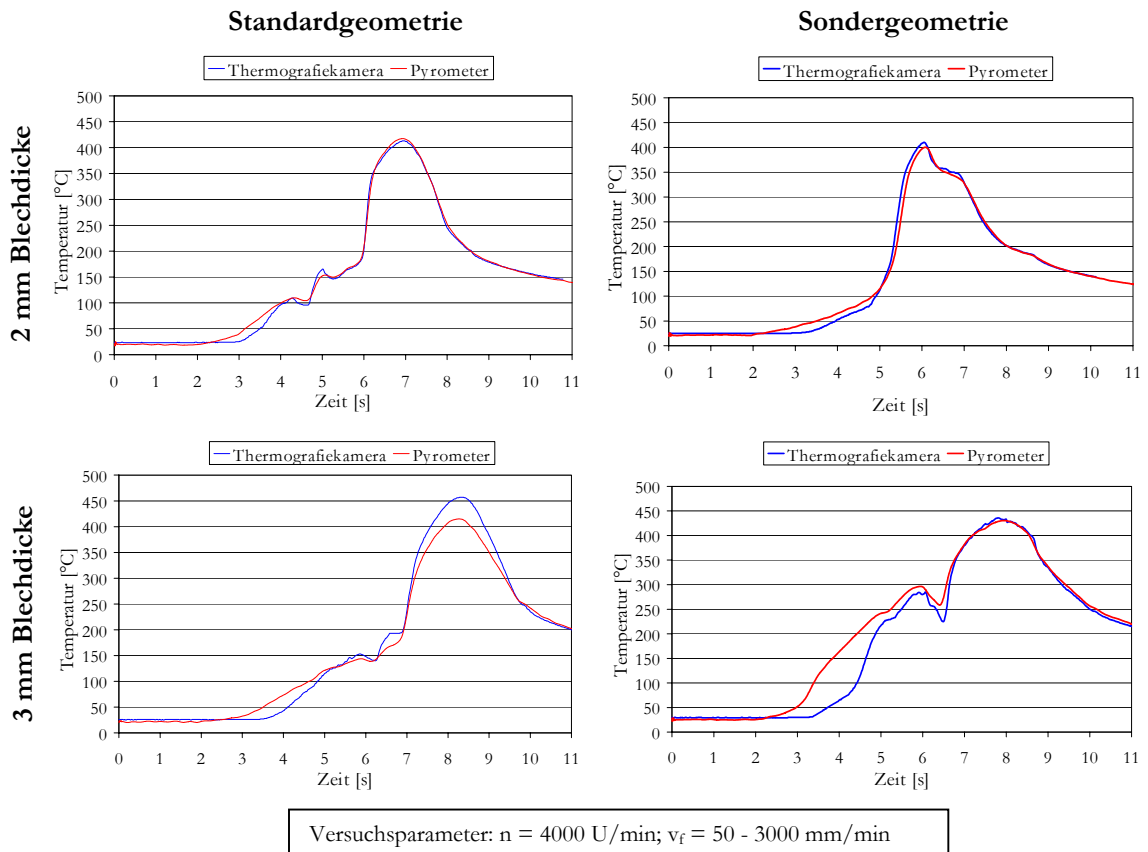
**Diagramm 6-12: Einzelversuchsergebnisse vom AlMgSi1**

Das Diagramm zeigt wesentlich niedrigere Mittelwerte der Maximaltemperaturen bei Aluminium als beispielsweise bei der Baustahl- und Edelstahlbearbeitung zu sehen, da der Werkstoff eine höhere Wärmeleitfähigkeit, eine geringere Festigkeit sowie einen geringeren Schmelzpunkt besitzt. Alle mit beiden Messsystemen gemessenen Temperaturwerte sind bei der Blechdicke von 3 mm höher als bei der Blechdicke von 2 mm, ausgenommen die vom Pyrometer mit der Standardgeometrie erfassten Temperaturen, welche lediglich eine Temperaturdifferenz von 3,4 K zeigen.

In bezug auf die Maximaltemperaturen beim Einsatz der Werkzeuge sind die mit der Thermografiekamera erfassten Temperaturen beider Blechdicken bei der Standardgeometrie etwas höher als bei der Sondergeometrie. Die aufgezeichneten Temperaturen des Pyrometers sind hingegen bei der Standardgeometrie für 2 mm Blechdicke höher, für 3 mm Blechdicke allerdings geringer.

Mit dem Einsatz der Thermografiekamera sind im Gegensatz zur Anwendung des Pyrometers höhere Temperaturen an den fließlochgeformten Blechdurchzügen beider Blechdicken erkennbar. Dies ist damit zu erklären, dass das Pyrometer nicht auf den Stellen ausgerichtet wurden, bei denen die Maximaltemperaturen auftraten. Dies zeigt einen klaren Vorteil der Kamera, denn sie kann auf das Messobjekt viel einfacher und genauer ausgerichtet werden.

Die von dem Pyrometer und der Thermografiekamera aufgenommenen Maximaltemperaturen an den fließlochgeformten Blechdurchzügen wurden als Funktion der Zeit dargestellt. Die folgende Abbildung zeigt die Temperaturverläufe während der Herstellung eines Durchzuges für jede Bearbeitungsparameterkombination der Aluminiumlegierung AlMgSi1.



**Diagramm 6-13: Temperaturverläufe mit Pyrometer und Thermografiekamera in AlMgSi1**

Die Temperaturverläufe der thermographischen Aufnahmen zeigen eine sehr gute Übereinstimmung mit denen des Pyrometers. Bei beiden Temperaturverläufen steigen die Temperaturen zunächst langsam. Nach dem Eindringen des konischen Arbeitsteiles des Werkzeuges erfolgt eine stärkere Steigung der Temperaturkurve bis zu einem Maximum, ab dem die Abkühlungsphase beginnt. In der Anfangsphase des Temperaturverlaufes ist ein Knick zu erkennen, welcher durch die Erhöhung des Vorschubes hervorgerufen wird.

Aus den obigen Diagrammen ist fast keine Abweichung im Maximaltemperaturbereich beider Temperaturmesssysteme für beide Blechdicken zu erkennen, ausgenommen der Kurven der Standardgeometrie mit einer Blechdicke von 3 mm, bei welcher eine Abweichung zwischen den Maximaltemperaturen von 42 K ermittelt wurde. Mit dem Erreichen von hohen Temperaturen wird die Temperatur sehr schnell im Werkstück verteilt, da die Wärmeleitfähigkeit von Aluminium sehr hoch ist. Somit entsteht während der Bearbeitung

durch die hohen Temperaturen am Durchzug aus Aluminium eine fast homogene Temperaturverteilung.

In bezug auf die Temperaturverläufe zwischen Standard- und Sondergeometrie ist kein deutlicher Trend zu erkennen. Einerseits zeigen sich die Temperaturverläufe der Standardgeometrie im Maximaltemperaturbereich für 2 mm Blechdicke, andererseits die Temperaturverläufe der Sondergeometrie für 3 mm Blechdicke etwas harmonischer.

#### **6.2.5.1 Zusammenfassung**

Die vorangegangenen Untersuchungen haben ergeben, dass die an den fließlochgeformten Blechdurchzügen gemessenen Temperaturen mit steigender Blechdicke höher sind, wobei unter Anwendung einer statistischen Versuchsplanung und -auswertung eine Steigung der Maximaltemperatur von 22,1 K statistisch nachgewiesen wurde.

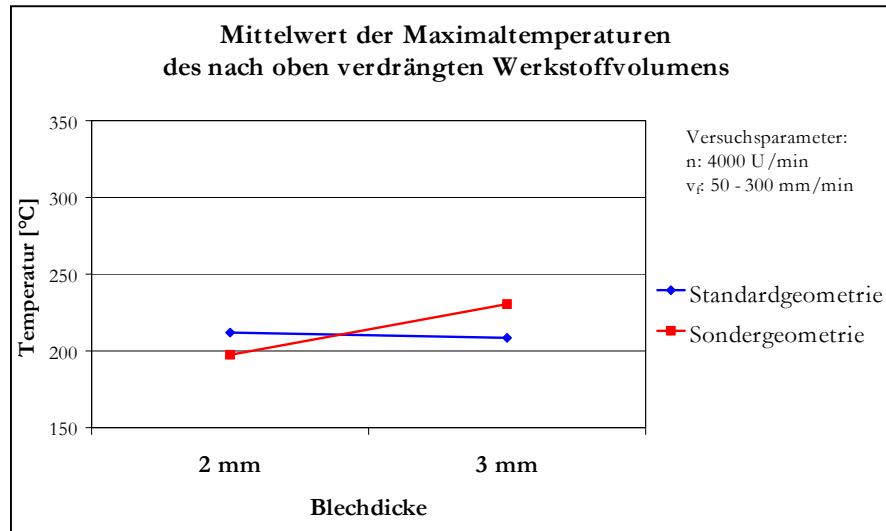
Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die gemessenen Maximaltemperaturen mit dem Wechsel des Temperaturmesssystems Pyrometer auf die Thermografiekamera steigen, wobei die maximale Abweichung zwischen den Maximaltemperaturen von beiden Messgeräten nicht über 9,5 % liegt. Mit dem Einsatz der Sondergeometrie sanken die Temperaturen mit der Thermografiekamera beider Blechdicken, während sich die Temperaturwerte bei Änderung der Blechdicke mit der Standardgeometrie teilweise unterscheiden. Die Temperaturverläufe der verwendeten Temperaturmesssysteme zeigten eine sehr gute Übereinstimmung.

Aus den dargestellten Ergebnissen ist zu schließen, dass die Temperaturen mit der Thermografiekamera präziser zu bestimmen sind, was im wesentlichen durch die bessere Ausrichtung der Kamera auf das Messobjekt bedingt ist.

### **6.3 Ermittlung der Temperatur des nach oben verdrängten Werkstoffvolumens und des Werkzeuges**

Aufgrund des Problems der Thermografiekamera im Messbereich 3 (siehe Kapitel 6.2.1) wurde auf weitere Auswertungen der Werkstoffe St37, St52 und X5CrNi18.10 verzichtet. Deshalb ist bei allen Versuchsreihen mit diesen Werkstoffen keine Untersuchung der Temperaturen des entgegen der Vorschubrichtung nach oben verdrängten Werkstoffvolumens und der eingesetzten Werkzeuge durchgeführt worden. Diese Untersuchung fand nur bei den Versuchsreihen des Werkstoffes AlMgSi1 statt. Aufgrund der geringeren Temperaturen bei Aluminium konnte im Messbereich 2 der Thermografiekamera problemlos gemessen werden.

Das Diagramm 6-14 stellt die Ergebnisse der Temperaturermittlung des entgegen der Vorschubrichtung nach oben verdrängten Werkstoffvolumens für den Werkstoff AlMgSi1 dar.



**Diagramm 6-14: Ergebnis der Temperaturen des entgegen der Vorschubrichtung nach oben verdrängten Werkstoffvolumens**

Aus dem Diagramm ist zu sehen, dass mit steigender Blechdicke die Maximaltemperaturen von Aluminium bei der Sondergeometrie um 33 K steigen und die bei der Standardgeometrie um ca. 3,5 K sinken. Die Temperaturen lagen bei der Standardgeometrie in 2 mm Blechdicke 14,5 K höher und in 3 mm 22 K niedriger als bei der Sondergeometrie. Im Vergleich zu den Ergebnissen der Temperaturen an den gefertigten Durchzügen (Kapitel 6.2.5) sind die Maximaltemperaturen des nach oben geflossenen Volumens wesentlich niedriger.

Da der Emissionsgrad an der Thermografiekamera auf 0,99 für die schwarz lackierten Versuchswerkstoffe eingestellt (vergl. Kapitel 6.1) und nur die Unterseite der Blechstreifen zur Herstellung der Durchzüge schwarz lackiert wurde, ist daher mit einer Unsicherheit der gemessenen Temperaturwerte zu rechnen. Mit der Kamerasoftware können die Temperaturwerte bei der Auswertung durch eine Änderung der Emissionsgrade korrigiert werden. Als neue Emissionsgrade verwendete man die, welche mit der Thermografiekamera in Kapitel 4.3.1 ermittelt wurden. Die Ergebnisse der Korrektur zeigten keine Verbesserung der neu errechneten Temperaturen, welche fast über dem Werkstoffschmelzpunkt lagen. Ein möglicher Grund dafür ist, dass während der Bearbeitung eine hochtemperaturbeständige Paste verwendet wurde, welche auch noch nach der Bearbeitung an der Oberseite der Werkstoffoberfläche vorhanden war. Dies ermöglichte keine Korrektur der Temperaturen durch die Veränderung des Emissionsgrades.



Das Diagramm 6-15 stellt die Ergebnisse der Temperaturemittlung an den eingesetzten Werkzeugen bei AlMgSi1 dar.

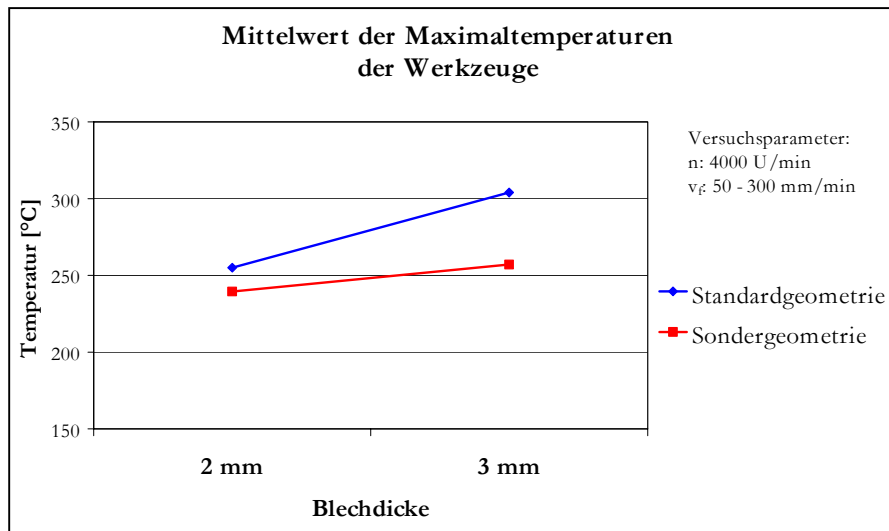


Diagramm 6-15: Ergebnis der Temperaturen der Werkzeuge

Die Maximaltemperaturen der beiden eingesetzten Werkzeuge erhöhen sich mit steigender Blechdicke, sie betragen bei der Standardgeometrie 49 K und bei der Sondergeometrie ca. 17,5 K. Bei der Standardgeometrie lagen die Temperaturen in 2 mm Blechdicke um 15,5 K und in 3 mm ca. 47 K höher als bei der Sondergeometrie.

Im Vergleich zu den Ergebnissen der Maximaltemperaturen an den gefertigten Durchzügen (Kapitel 6.2.5) sind die Maximaltemperaturen der beiden Werkzeuge niedriger, aber höher als die des nach oben verdrängten Volumens.

Da der Emissionsgrad der beiden verwendeten Fließlochformer nicht bestimmt wurde, ist mit einer Unsicherheit der gemessenen Temperatur bei einer Einstellung des Emissionsgrades von 0,99 an der Thermografiekamera zu rechnen.

## 6.4 Vor- und Nachteile der Temperaturmesssysteme

In diesem Kapitel werden einige Vor- und Nachteile der in dieser Arbeit verwendeten Thermografiekamera (siehe Kapitel 4.1.2) und des verwendeten Pyrometers (siehe Kapitel 4.1.1) dargestellt.

### \* Positionierung und Messfeld

#### Vorteil:

- Mittels der Thermografiekamera löst sich das Problem der Messmittelpositionierung auf einfache Weise. Am Monitor eines PCs kann die Ausrichtung des Messmittels auf

die für die Untersuchung wichtige Stelle überprüft werden. Durch das erweiterte Messfeld der Thermografiekamera ist beispielsweise beim Thermofließlochformen die Ermittlung der Temperaturen am Werkstückstoff und am Werkzeug an verschiedenen Stellen möglich.

**Nachteil:**

- Mit dem Pyrometer wird die mittlere Temperatur eines durch die optische Justierung festgelegten Messfeldes erfasst. Somit ist die Messgenauigkeit von der Ausrichtgenauigkeit des Pyrometers abhängig.

**\* Einflüsse bei der Temperaturmessung****Nachteile:**

- Einfluss des Emissionsgrades: Sowohl bei der Thermografiekamera, als auch bei der Temperaturmessung mit dem Pyrometer, ist eine genaue Kenntnis vom Emissionsgrad des zu messenden Objektes erforderlich. Ein falscher Emissionsgrad wird immer zu einem falschen Messergebnis führen, da das Temperaturmesssystem den Temperaturwert anhand des Emissionsgrades errechnet (vergl. Ergebnisse vom Kapitel 4.2.1 und 4.3.1).
- Einfluss der Umgebung: Zusätzlich reflektierte Strahlungen von Objekten in der Umgebung des Messobjektes können die Messung mit der Thermografiekamera beeinflussen. Der Einfluss der Umgebung ist bei der Messung von hohen Temperaturen und hoch gewählten Emissionsgraden sehr gering (siehe Kapitel 3.1.2.4).

**\* Auswertung der Temperaturmessung****Vorteile:**

- Mit der Thermografiekamera wird die Temperaturverteilung auf dem Messobjekt durch eine Vielzahl von Messpunkten bildlich dargestellt. Dabei wird die lokal unterschiedliche Temperaturverteilung in Form eines Bildes wiedergegeben. Die Messdaten werden als Videosequenz aufgenommen, was die Visualisierung und Auswertung der Ergebnisse enorm vereinfacht. Um die Genauigkeit bei der Temperaturbestimmung zu erhöhen, bietet die Kamerasoftware die Möglichkeit, ein Fenster innerhalb eines Bildes festzulegen. Somit kann die Temperatur innerhalb dieses Fensters angezeigt werden.
- Um eine detaillierte Untersuchung der gemessenen Temperaturen durchzuführen, bietet die Kamerasoftware auch die Möglichkeit einer nachträglichen Auswertung gespeicherter Bilder mit frei wählbarem Emissionsgrad.
- Die Temperaturmessungen an den fließlochgeformten Blechdurchzügen mit dem Pyrometer und der Thermografiekamera lieferten einen sehr ähnlichen Temperaturverlauf

für den Versuchswerkstoff Aluminium (siehe Kapitel 6.2.5). Bei den anderen in dieser Arbeit eingesetzten Werkstoffen, bei welchen wesentlich höhere Temperaturen entstanden, trat ein unerwartetes Problem (siehe Kapitel 6.2.1) aufgrund eines fehlerhaft kalibrierten Messbereiches auf. Somit wurde auf diesen Temperaturbereich der Thermografiekamera verzichtet. Ohne Berücksichtigung dieses Problems kann man feststellen, dass beide Messgeräte für eine Temperaturbestimmung geeignet sind.

**Nachteile:**

- Mit dem Pyrometer ist eine Veränderung des eingestellten Emissionsgrades während der Temperaturmessung nur möglich, um die angezeigten Temperaturwerte zu korrigieren.
- Mit dem Pyrometer können die Temperaturwerte tabellarisch und grafisch nur als Linienschrieb dargestellt werden.

**\* Beispiel für eine Anwendung der Thermografiekamera**

Mittels der durch die Thermografiekamera entstehenden thermografischen Videoaufnahme einer fließlochgeformten Blechdurchzugherstellung wird eine Untersuchung der Temperaturverteilung innerhalb des Durchzugbereiches auf einer beliebigen Stelle des Messobjektes ermöglicht. Dieses Beispiel wurde ohne Berücksichtigung des in Kapitel 6.2.1 beschriebenen Problems mit dem Messbereich der Thermografiekamera durchgeführt. Die Abbildung 6-1 zeigt ein thermografisches Bild eines Durchzuges mit der Stelle der maximalen auftretenden Temperatur. Der verwendete Werkstoff war St52 mit 2 mm Blechdicke und das eingesetzte Werkzeug hatte die Sondergeometrie. Die helleren Farben auf dem Bild entsprechen höheren Temperaturwerten und die dunkleren Farben niedrigeren. Mit Hilfe der Kamerasoftware ThermaCAM Researcher wurde das thermografische Bild am Durchzugbereich in 12 Flächen geteilt, um die Temperaturen innerhalb dieser Flächen untersuchen zu können.

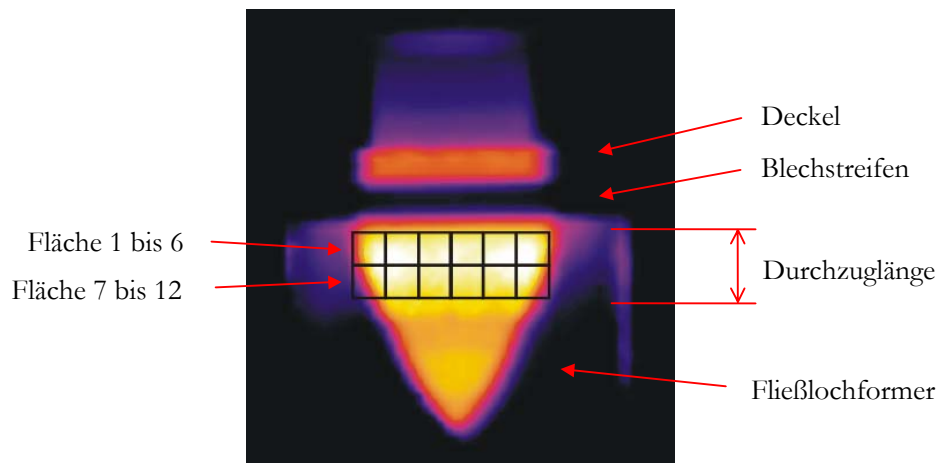


Abbildung 6-1: Temperaturverteilung eines thermografischen Bildes am Durchzugbereich

Die Diagramm 6-16 und Diagramm 6-17 zeigen die maximalen und minimalen gemessenen Temperaturen innerhalb der Durchzugfläche.

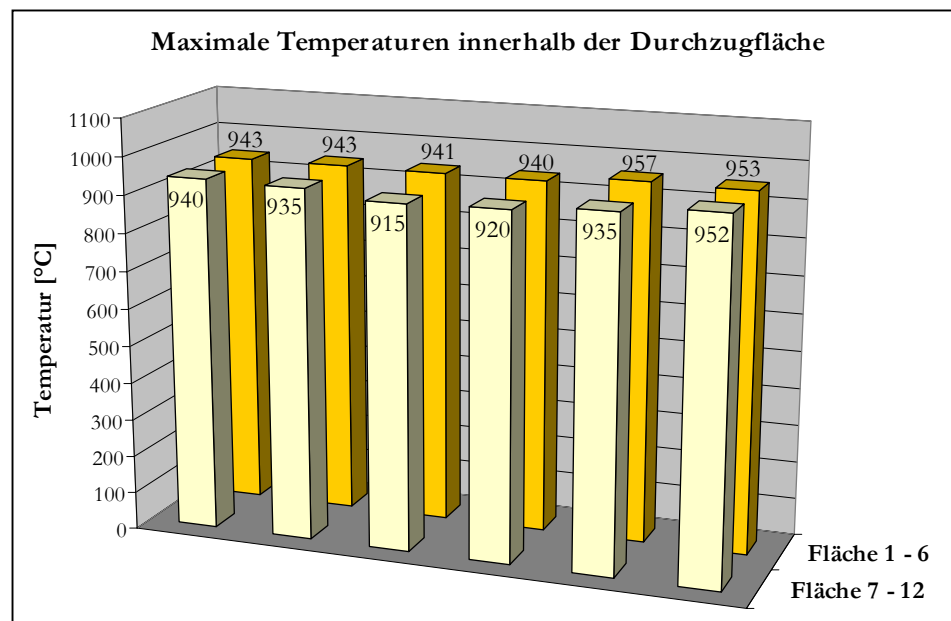


Diagramm 6-16: Maximale Temperaturen innerhalb der Durchzugfläche

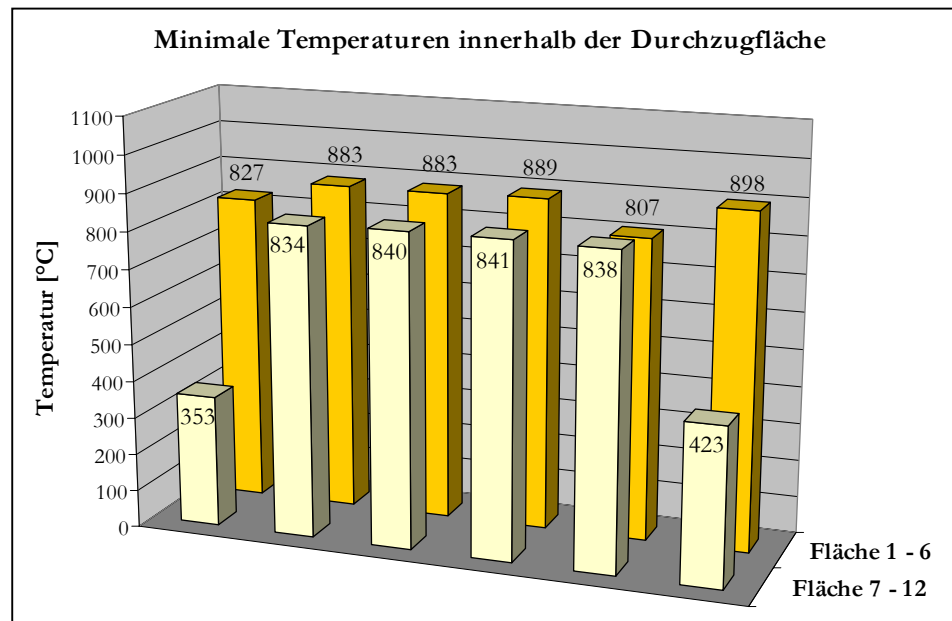


Diagramm 6-17: Minimale Temperaturen innerhalb der Durchzugfläche

Aus den Diagrammen ist eine maximale Temperatur von 957 °C und eine minimale Temperatur von 807 °C am Blechdurchzug an dieser Stelle zu sehen. Das entspricht einer Abweichung von 15,7 % in bezug auf die maximale Temperatur. Beide Temperaturwerte entstanden in diesem Fall auf der Fläche 5. Der Mittelwert aller maximalen Temperaturen innerhalb der Fläche beträgt 939,5 °C und der Mittelwert aller minimalen Temperaturen 854,0 °C, das entspricht einer Abweichung von ca. 10 % bezüglich des Mittelwertes der maximalen Temperaturen. Die minimalen Temperaturwerte der Fläche 7 und 12 sind in dem Diagramm 6-17 zu vernachlässigen, da diese Temperaturen außerhalb des Durchzugbereiches liegen.

Aus der Untersuchung geht hervor, dass die Temperaturen an dem Durchzug über den ermittelten Bereich nicht homogen sind. In solchen Fällen ist die Anwendung einer Thermografiekamera die förderlichste Möglichkeit, um eine genaue Temperatur beim Thermofließlochformen ermitteln zu können.

## 6.5 Ermittlung des Zusammenhanges zwischen Prozesstemperatur und Moment

Ein Zusammenhang zwischen der entstehenden Prozesstemperatur und der Momente während der Bearbeitung beim Thermofließlochformen wurde in dieser Arbeit mit dem Ziel untersucht, eine gemeinsame Gleichung zu erhalten, um die Temperatur aus dem Moment ohne Temperaturmessung berechnen zu können.

Dazu wurden vorerst die Temperaturen an den fließlochgeformten Blechdurchzügen mittels der Thermografiekamera und des Pyrometers erfasst und die Drehmomente mit einem Dynamometer gemessen (siehe Kapitel 5.1). Aufgrund des in Kapitel 6.2.1 beschriebenen Problems mit der Thermografiekamera wurden, außer in Aluminium, nur die mit dem Pyrometer gemessenen Werte für die Berechnung der Gleichungen für die Werkstoffe St37, St52 und X5CrNi18.10 verwendet. Für AlMgSi1 nutzte man die Temperaturen von beiden Temperaturmesssystemen.

Um Gleichungen für die Berechnung der Temperatur zu bekommen, versuchte man zuerst die Temperatur- mit den Drehmomentverläufen für jeden der Versuchswerkstoffe zu vergleichen. Ein direkter Vergleich zwischen beiden Größen wurde jedoch nicht ersichtlich. Wichtige Bearbeitungsparameter, wie die Drehzahl, die Bearbeitungszeit und der Vorschubweg müssen bei der Berechnung miteinbezogen werden. Somit ist kein Zusammenhang zwischen Temperatur und Moment festzustellen.

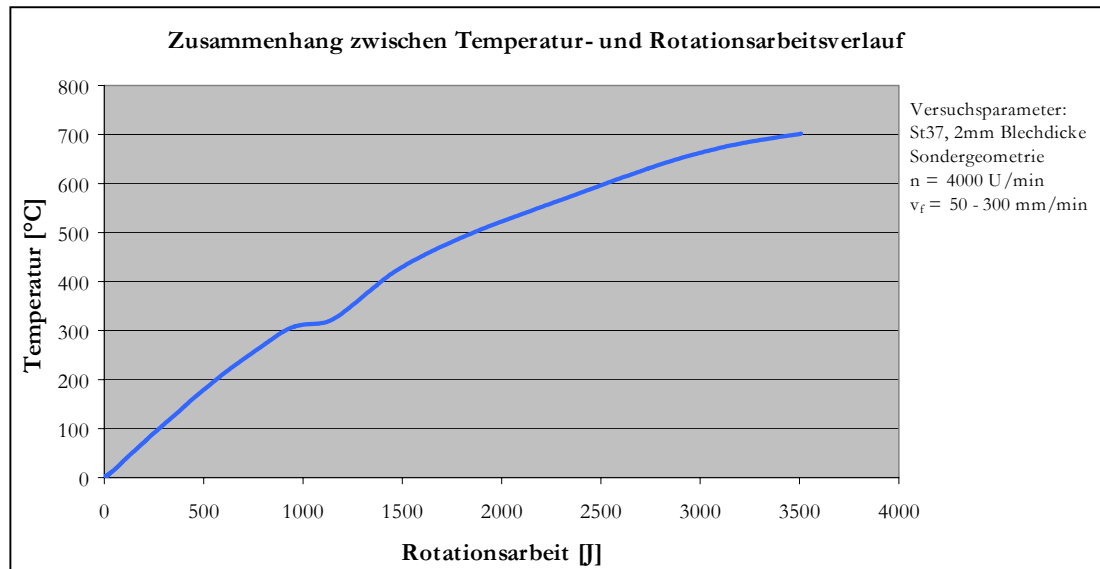
Diese vorher genannten Bearbeitungsparameter beeinflussen die gesamte Umformungsarbeit. Aus diesem Grund sollte der Zusammenhang zwischen der Temperatur und der eingebrachten Umformungsarbeit untersucht werden.

Die gesamte Umformungsarbeit ist durch die Summe der Rotations- und Translationsarbeit gegeben (siehe Gl. 2-9). Die Rotationsarbeit ( $W_R$ ) für die Umformung kann über den erfassten Drehmomentverlauf ermittelt und nach der Gleichung 2-5 berechnet werden. Die Translationsarbeit ( $W_T$ ), welche hauptsächlich den Werkstückstoff erwärmt, wird von dem erfassten Verlauf der Axialkraft bestimmt und nach der Gleichung 2-8 berechnet.

Aufgrund der vergleichsweise kurzen Vorschubwege in axialer Richtung ist die axialkraftbedingte eingetragene Translationsarbeit kleiner als die drehmomentbedingte eingetragene Rotationsarbeit. Um dies zu belegen, wurden die Translations- und Rotationsarbeit bei einer Versuchsreihe im Werkstoff St37 mit einer Blechdicke von 2 mm und unter Verwendung einer Sondergeometrie bestimmt. Bei diesem Versuch brachte man eine Translationsarbeit von ca. 21,5 J und einen Rotationsarbeit von ca. 4300 J ein. Das bedeutet, dass die Rotationsarbeit fast das 200fache der Translationsarbeit beträgt. Somit ergibt sich die gesamte Umformungsarbeit fast ausschließlich aus der Rotationsarbeit. Daraufhin wurden nur die Verläufe der Rotationsarbeit von jedem Versuchswerkstoff berechnet, um diese anschließend mit den entsprechenden Temperaturverläufen vergleichen zu können.

Nach der Bestimmung der Rotationsarbeit wurden diese als x-Achse und die Temperaturverläufe der gemessenen Maximaltemperaturen als y-Achse in Diagrammen bis zum Erreichen des Temperaturmaximums dargestellt. Die übrigen Werte beider Größen konnten vernachlässigt werden. Es wurden je zwei Versuchsreihen mit jeder Bearbeitungsparameterkombination durchgeführt. Der Mittelwert der zwei gemessenen Rotationsarbeits- bzw. Temperaturverläufe ist im Diagramm dargestellt. Die resultierenden Kurven

zeigen einen erkennbaren Zusammenhang zwischen beiden untersuchten Größen. Das Diagramm 6-18 zeigt die Kurve aus dem Mittelwert der zwei gemessenen Temperatur- und Rotationsarbeitsverläufe vom Werkstoff St37 von 2 mm Blechdicke und Sondergeometrie.



**Diagramm 6-18: Zusammenhang zwischen Temperatur- und Rotationsarbeitsverlauf**

Durch ein Regressionsverfahren sollen die Kurven möglichst genau den Messwerten angepasst werden, um daraus einen mathematischen Zusammenhang aus den zugrundeliegenden Werte herzustellen. Das Ergebnis zwischen Temperatur- und Rotationsarbeitsverlauf wird durch ein Polynom 3.Grades beschrieben.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Berechnungen für die untersuchten Werkstoffe dargestellt.

### 6.5.1 Berechnung für St37 und St52

Als erstens werden die Ergebnisse der Berechnung für die Blechdicke von 2 mm und anschließend die für die von 3 mm dargestellt.

#### 6.5.1.1 Blechdicke von 2 mm

Mit den folgenden Polynomen wird der Temperaturverlauf  $T$  über die eingebrachte Rotationsarbeit  $W_R$  für die Werkstoffe St37 und St52 von 2 mm Blechdicke für jedes eingesetzte Werkzeug berechnet.

- **Standardgeometrie - St37 und St52**

$$T(W_R) = 1,097 \cdot 10^{-8} \cdot W_R^3 - 1,183 \cdot 10^{-4} \cdot W_R^2 + 0,4882 \cdot W_R + R \quad (\text{Gl. 6-1})$$

- **Sondergeometrie - St37**

$$T(W_R) = \left( 4,60 \cdot 10^{-9} \cdot W_R^3 - 6,850 \cdot 10^{-5} \cdot W_R^2 + 0,3938 \cdot W_R + R \right) \cdot K_1 \quad (\text{Gl. 6-2})$$

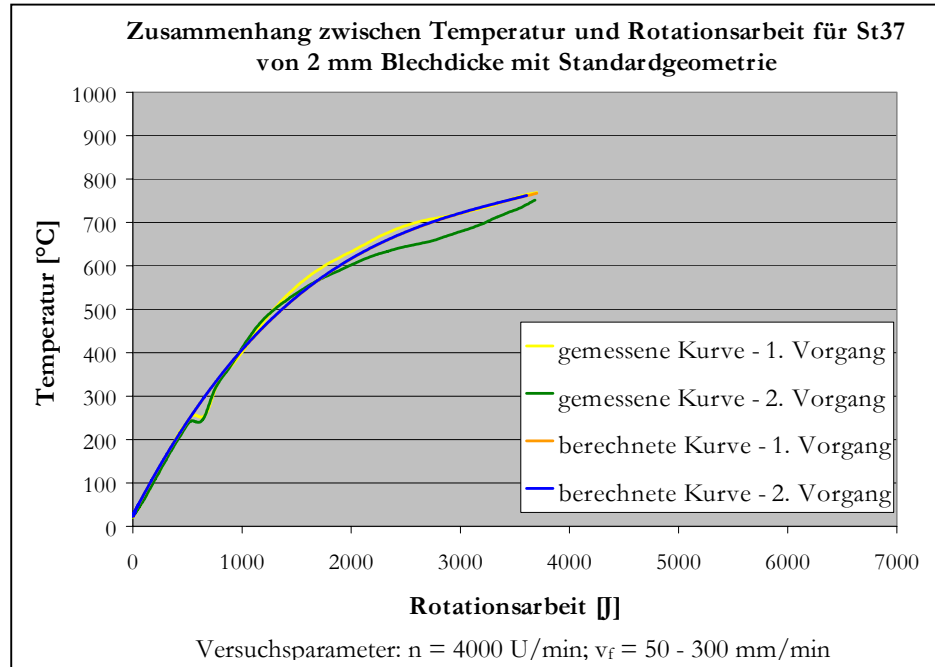
- **Sondergeometrie - St52**

$$T(W_R) = 4,60 \cdot 10^{-9} \cdot W_R^3 - 6,850 \cdot 10^{-5} \cdot W_R^2 + 0,3938 \cdot W_R + R \quad (\text{Gl. 6-3})$$

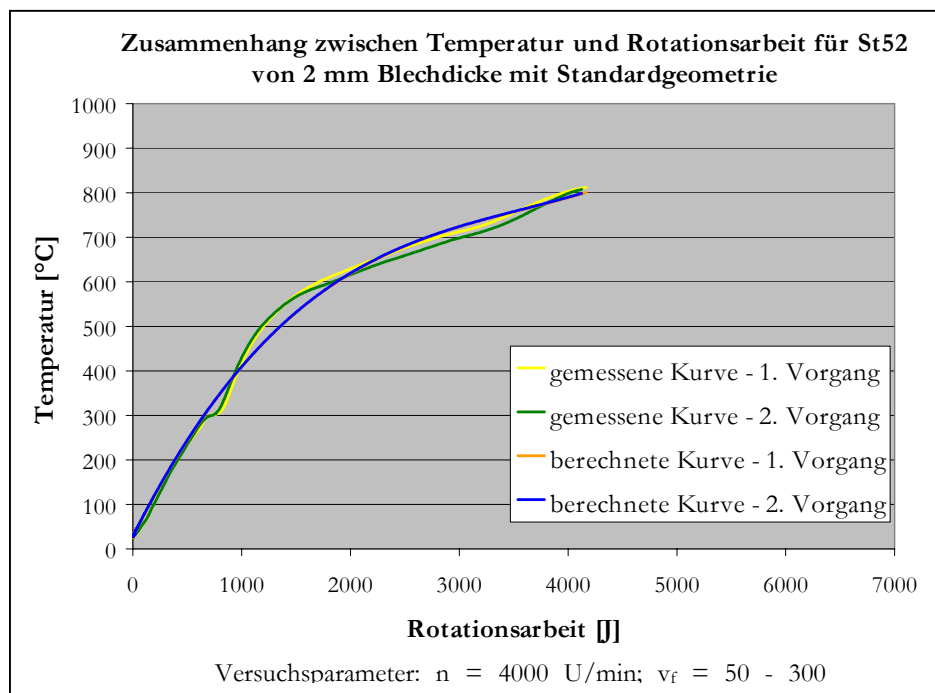
Wobei  $K_1 = 0,9524$  ein Korrekturfaktor für die Gleichung 6-2 und  $R$  die Raumtemperatur in °C ist.



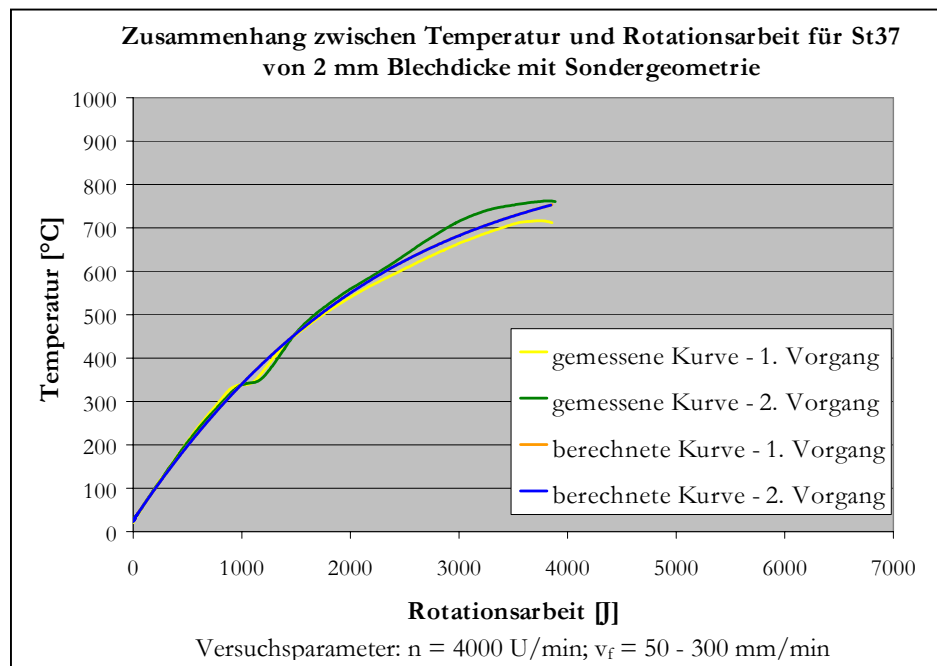
Die folgenden Diagramme zeigen die Verläufe der gemessenen und obigem Polynomen berechneten Temperaturen in Abhängigkeit der Rotationsarbeit für St37 und St52 mit beiden Werkzeugen.



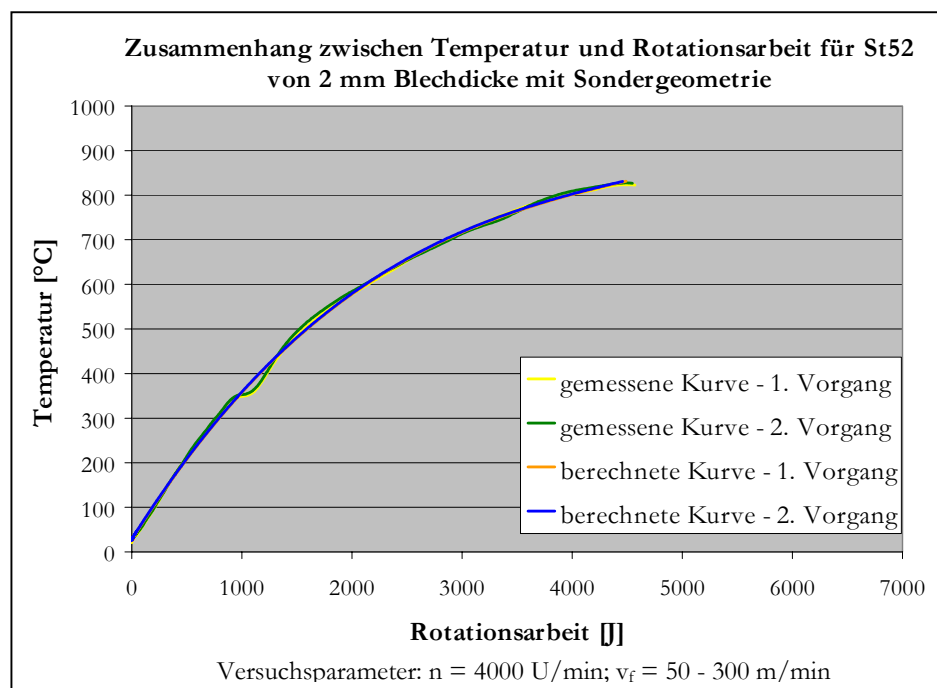
**Diagramm 6-19: Temperaturverläufe St37 von 2 mm Blechdicke mit Standardgeometrie**



**Diagramm 6-20: Temperaturverläufe St52 von 2 mm Blechdicke mit Standardgeometrie**



**Diagramm 6-21: Temperaturverläufe St37 von 2 mm Blechdicke mit Sondergeometrie**



**Diagramm 6-22: Temperaturverläufe St52 von 2 mm Blechdicke mit Sondergeometrie**

Die oben dargestellten Kurven zeigen eine gute Übereinstimmung der gemessenen mit den berechneten Temperaturwerten. Die sichtbaren Knicke bei den gemessenen Kurven an den Stellen zwischen 700 und 1100 J werden durch die Erhöhung des Vorschubes her-

vorgerufen. In der Anfangsphase besteht eine maximale Abweichung von  $\pm 10$  K für St37 und  $\pm 20$  K für St52 bei 2 mm Blechdicke und der Standardgeometrie. Für die Sondergeometrie ist die Abweichung  $\pm 10$  K für beide Werkstoffe. Am Umschaltpunkt und im Bereich der Maximaltemperaturen entstehen Abweichungen zwischen den Kurven bei der Standardgeometrie von  $\pm 40$  K für beide Werkstoffe und bei der Sondergeometrie von  $\pm 30$  K für St37 und  $\pm 25$  K für St52.

Ferner ist zu berücksichtigen, dass die Durchzugsfertigungen in dieser Arbeit mit festen Bearbeitungsparametern durchgeführt wurden. Für eine genauere Betrachtung der berechneten Gleichungen sind weitere Untersuchungen erforderlich, wie z.B. die Variation der Bearbeitungsparameter Drehzahl und Vorschubgeschwindigkeit. Eine Berechnung der Gleichungen mit Berücksichtigung der Geometrie der verwendeten Werkzeugen wäre ebenso sinnvoll. Somit könnte die Temperatur aus der Rotationsarbeit ebenfalls unabhängig von der Werkzeuggeometrie ermittelt werden.

#### 6.5.1.2 Blechdicke von 3 mm

Mit den folgenden Polynomen wird der Temperaturverlauf  $T$  über die eingebrachte Rotationsarbeit  $W_R$  für die Baustahlwerkstoffe St37 und St52 von 3 mm Blechdicke für jedes eingesetzte Werkzeug berechnet.

- **Standardgeometrie - St37**

$$T(W_R) = (1,097 \cdot 10^{-8} \cdot (K_2 \cdot W_R)^3 - 1,183 \cdot 10^{-4} \cdot (K_2 \cdot W_R)^2 + 0,4882 \cdot (K_2 \cdot W_R) + R) \cdot K_3$$

(Gl. 6-4)

- **Standardgeometrie - St52**

$$T(W_R) = (1,097 \cdot 10^{-8} \cdot (K_4 \cdot W_R)^3 - 1,183 \cdot 10^{-4} \cdot (K_4 \cdot W_R)^2 + 0,4882 \cdot (K_4 \cdot W_R) + R) \cdot K_5$$

(Gl. 6-5)

- **Sondergeometrie - St37**

$$T(W_R) = (4,60 \cdot 10^{-9} \cdot (K_6 \cdot W_R)^3 - 6,850 \cdot 10^{-5} \cdot (K_6 \cdot W_R)^2 + 0,3938 \cdot (K_6 \cdot W_R) + R) \cdot K_7$$

(Gl. 6-6)

- **Sondergeometrie - St52**

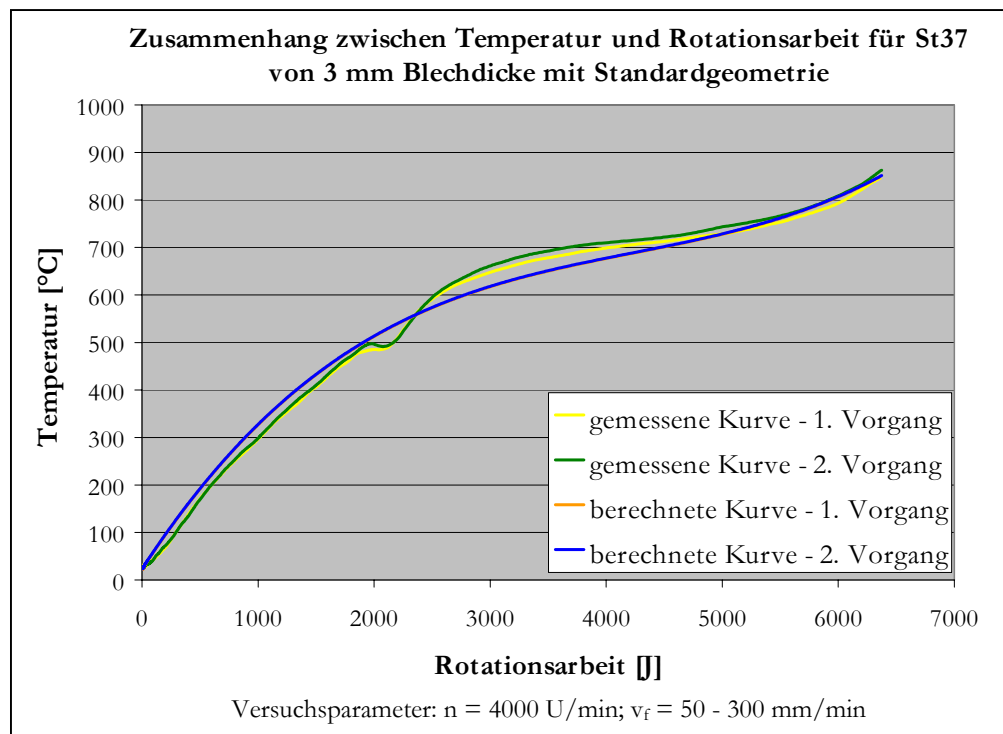
$$T(W_R) = 4,60 \cdot 10^{-9} \cdot (K_8 \cdot W_R)^3 - 6,850 \cdot 10^{-5} \cdot (K_8 \cdot W_R)^2 + 0,3938 \cdot (K_8 \cdot W_R) + R$$

(Gl. 6-7)

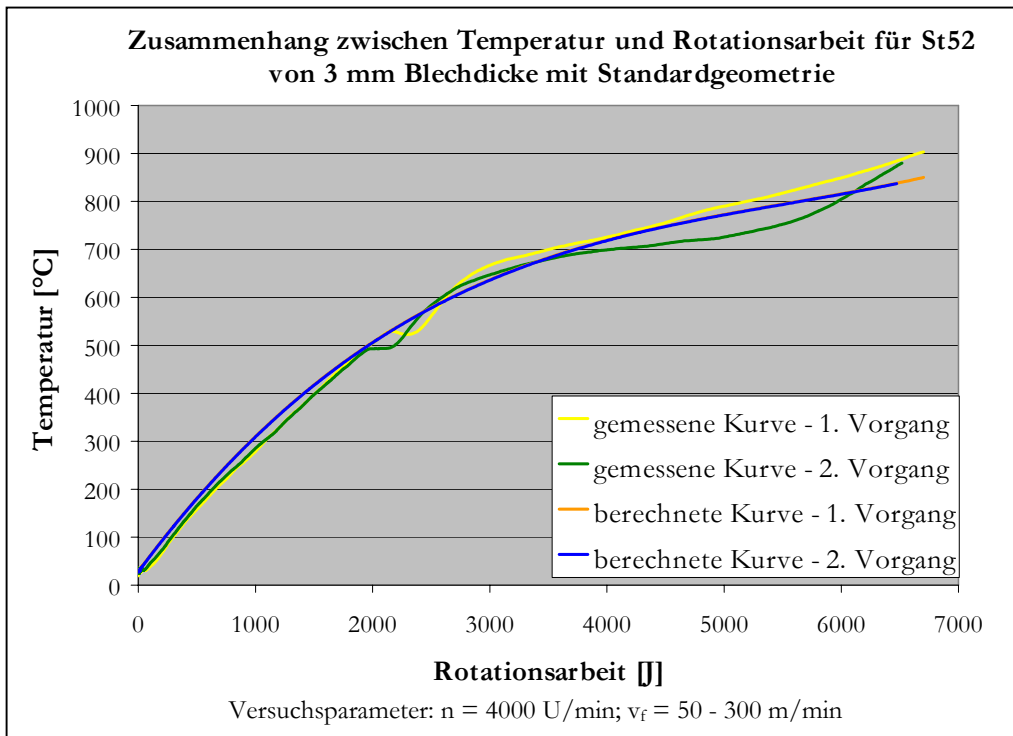
Wobei  $K_2 = 0,8490$ ,  $K_3 = 0,905$ ,  $K_4 = 0,6466$ ,  $K_5 = 1,0818$ ,  $K_6 = 0,7121$ ,  $K_7 = 0,9524$  und  $K_8 = 0,7285$  Korrekturfaktoren und  $R$  die Raumtemperatur in °C sind.

Die berechneten Gleichungen für beide Blechdicken unterscheiden sich lediglich durch die Korrekturfaktoren.

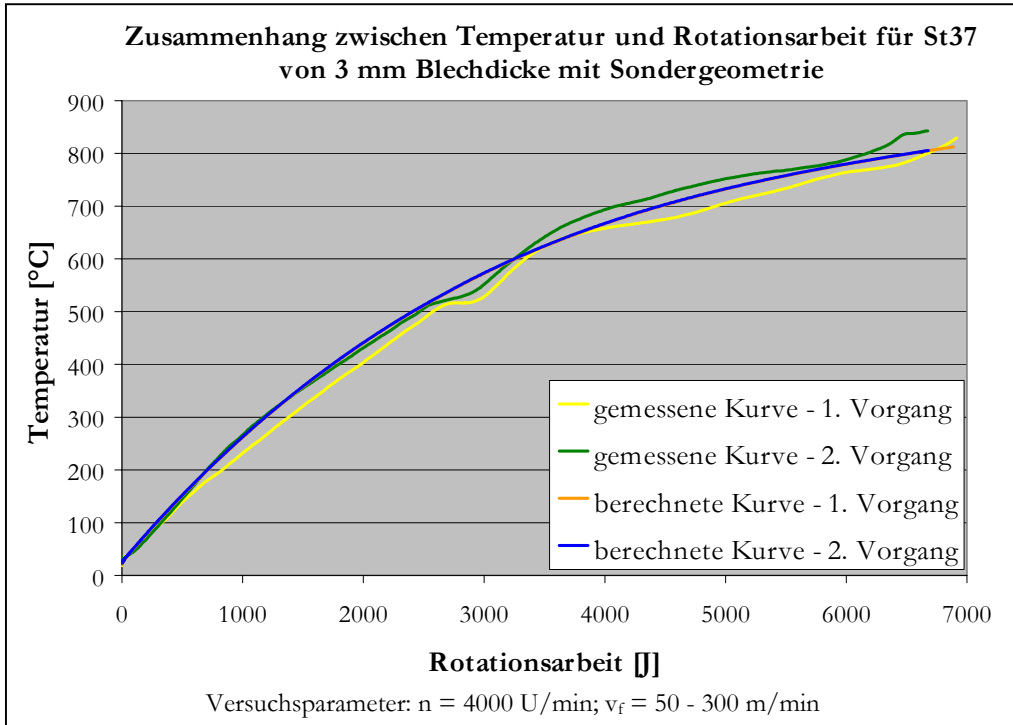
Die folgenden Diagramme zeigen die Verläufe der gemessenen und der mit den obigen Polynomen berechneten Temperaturen in Abhängigkeit von der Rotationsarbeit für St37 und St52 mit beiden Werkzeugen.



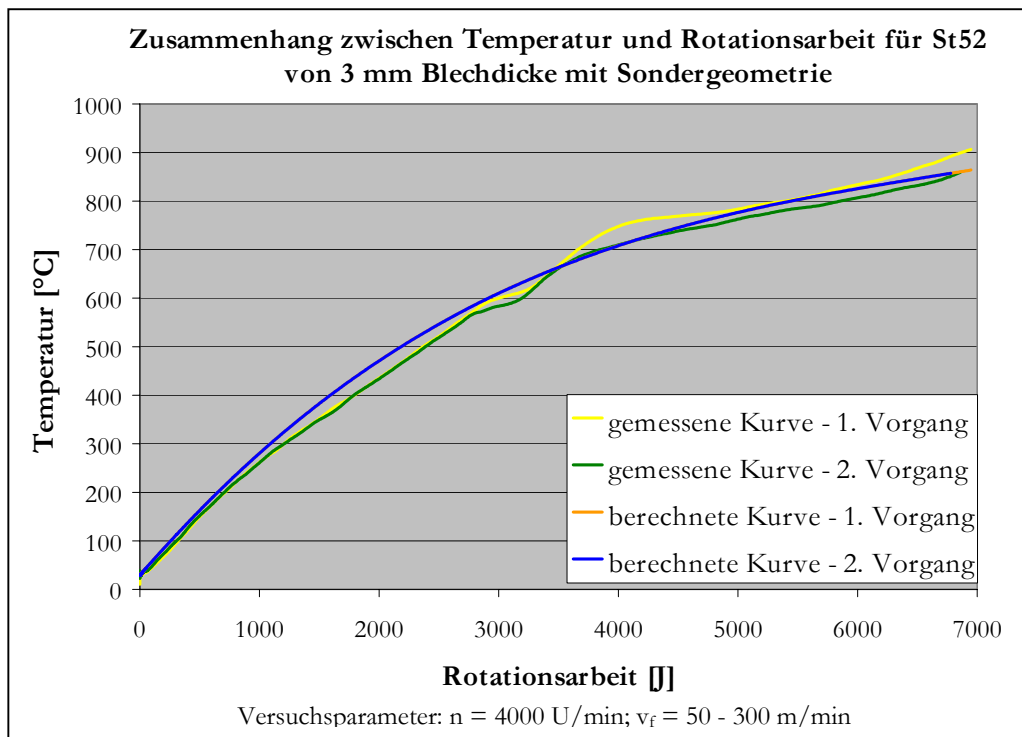
**Diagramm 6-23: Temperaturverläufe St37 von 3 mm Blechdicke mit Standardgeometrie**



**Diagramm 6-24: Temperaturverläufe St52 von 3 mm Blechdicke mit Standardgeometrie**



**Diagramm 6-25: Temperaturverläufe St37 von 3 mm Blechdicke mit Sondergeometrie**



**Diagramm 6-26: Temperaturverläufe St52 von 3 mm Blechdicke mit Sondergeometrie**

Die vorliegenden Diagramme zeigen ebenfalls eine gute Übereinstimmung der gemessenen mit den berechneten Temperaturwerten. In der Anfangsphase wurde bei einer Blechdicke von 3 mm und der Standardgeometrie eine maximale Abweichung zwischen den gemessenen und berechneten Kurven von  $\pm 25 \text{ K}$  und bei der Sondergeometrie von  $\pm 30 \text{ K}$  für beide Werkstoffe ermittelt. In der Umgebung des Umschaltpunktes betragen die Abweichungen zwischen den Kurven bei der Standardgeometrie  $\pm 40 \text{ K}$  für St37 und  $\pm 30 \text{ K}$  für St52, bei der Sondergeometrie  $\pm 35 \text{ K}$  für beide Werkstoffe. Im Bereich der Maximaltemperaturen (ab ca. 5000 J) beträgt die Abweichungen zwischen den Kurven bei der Standardgeometrie  $\pm 15 \text{ K}$  für St37 und  $\pm 35 \text{ K}$  für St52, bei der Sondergeometrie  $\pm 25 \text{ K}$  für St37 und  $\pm 20 \text{ K}$  für St52.

Für eine genauere Betrachtung der berechneten Gleichungen sind weitere Untersuchungen wie im Falle von 2 mm Blechdicke erforderlich.

### 6.5.2 Berechnung für X5CrNi18.10

Nach der Berechnung näherte man sich ebenfalls einem Polynom 3. Grades für den Werkstoff Edelstahl X5CrNi18.10 an. Der Verlauf der Temperatur in Abhängigkeit der Rotationsarbeit berechnet sich nach folgenden Gleichungen:

- **Standardgeometrie:**

$$T(W_R) = 1,582 \cdot 10^{-8} \cdot W_R^3 - 1,578 \cdot 10^{-4} \cdot W_R^2 + 0,5886 \cdot W_R + R \quad (\text{Gl. 6-8})$$

- **Sondergeometrie:**

$$T(W_R) = 1,032 \cdot 10^{-8} \cdot W_R^3 - 1,134 \cdot 10^{-4} \cdot W_R^2 + 0,4964 \cdot W_R + R \quad (\text{Gl. 6-9})$$

Wobei R die Raumtemperatur in °C ist.

Die folgenden Diagramme zeigen die Verläufe der gemessenen und mit den obigen Gleichungen berechneten Temperaturen in Abhängigkeit der Rotationsarbeiten für Edelstahl beider Werkzeuge.

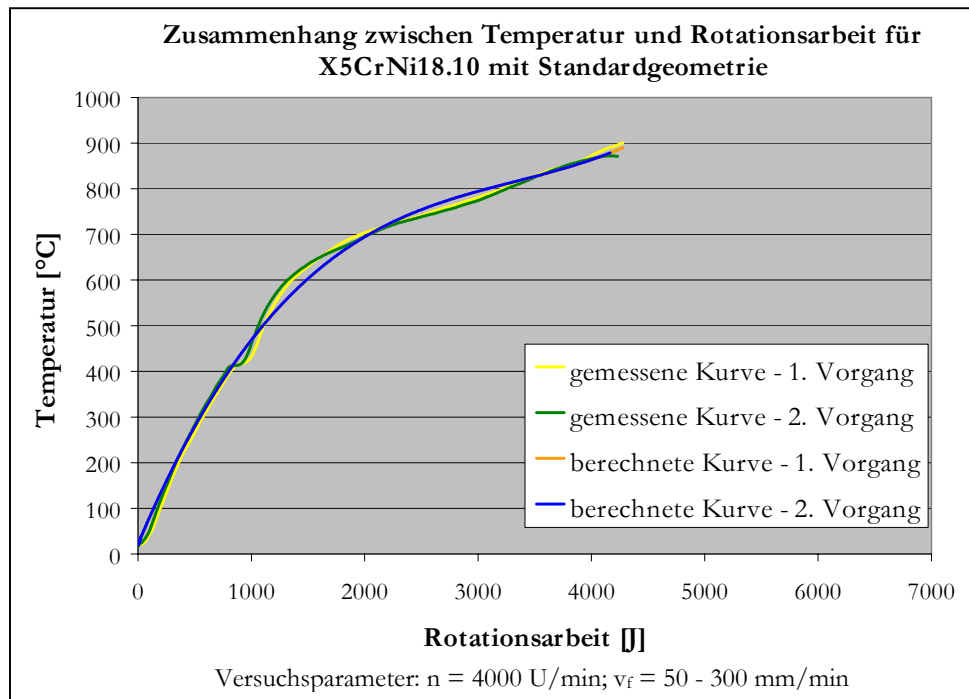
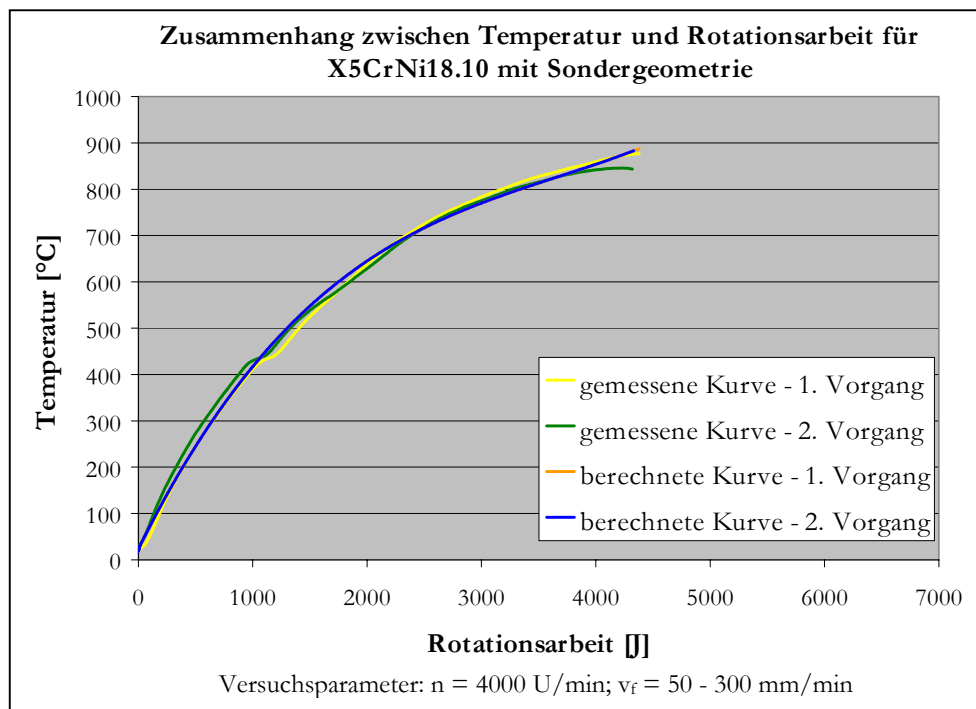


Diagramm 6-27: Temperaturverläufe X5CrNi18.10 mit Standardgeometrie



**Diagramm 6-28: Temperaturverläufe X5CrNi18.10 mit Sondergeometrie**

Aus den vorigen Kurven erkennt man, wie bereits bei der Untersuchung in Baustahl, eine gute Übereinstimmung der gemessenen mit den berechneten Temperaturverläufen. In der Anfangsphase ist eine maximale Abweichung zwischen den gemessenen und berechneten Kurven von ca.  $\pm 10$  K für beide Werkzeuge zu sehen. Auf der Stelle des Umschaltpunktes (bei ca. 1000 J) und im Bereich der Maximaltemperaturen wurden Abweichungen zwischen den Kurven von  $\pm 40$  K und von  $\pm 30$  K bei der Standard- bzw. Sondergeometrie ermittelt.

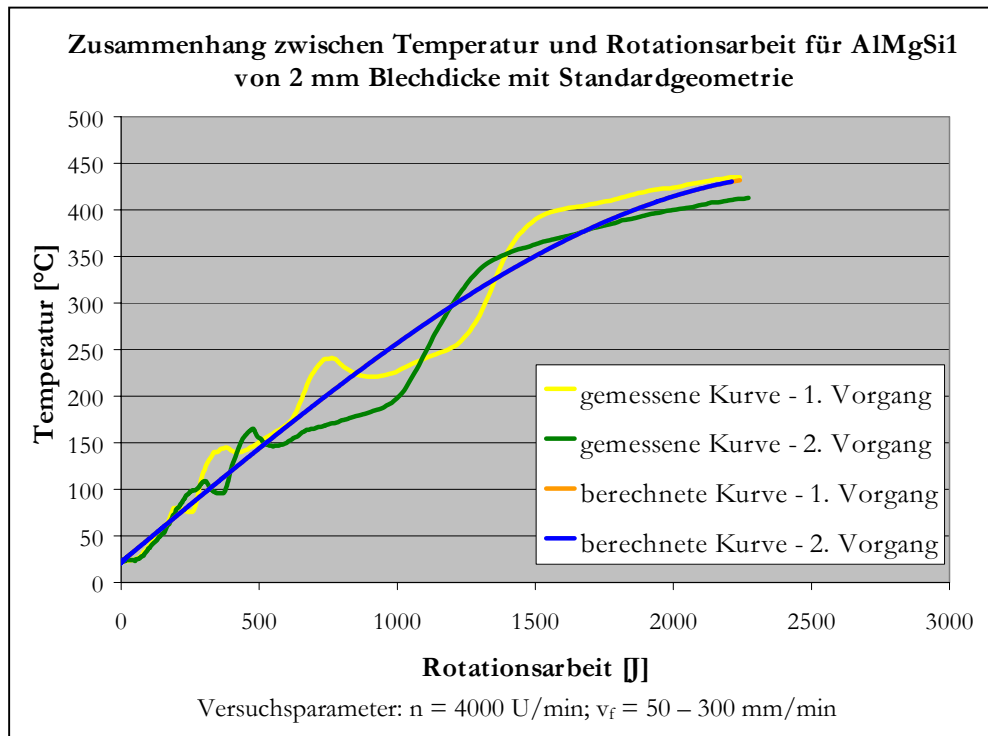
Gleich der Berechnung in Baustahl sind bei Edelstahl weitere Untersuchungen mit variierten Bearbeitungsparametern empfehlenswert.

### 6.5.3 Berechnung für AlMgSi1

Für diesen Werkstoff wurden zur Untersuchung des Zusammenhanges zwischen Temperatur und Rotationsarbeit die erfassten Temperaturen von beiden, in dieser Arbeit eingesetzten Messsysteme, verwendet. Die Ergebnisse zeigen zwischen den unterschiedlichen Blechdicken und Werkzeugen bei den theoretisch berechneten und von beiden Messsystemen gemessenen Temperaturverläufen erhebliche Unterschiede.



Das Diagramm 6-29 zeigt die Verläufe der gemessenen und mit einem Polynom 3. Grades berechneten Temperaturen, in Abhängigkeit der Rotationsarbeit für Aluminium von 2 mm Blechdicke und Standardgeometrie.



**Diagramm 6-29: Temperaturverläufe AlMgSi1 von 2 mm Blechdicke mit Standardgeometrie**

Dem vorigen Diagramm ist zu entnehmen, dass die realen Temperaturen wesentlich niedriger oder höher waren als die Berechneten. Die gemessenen Kurven stellen sich als zu unkonstant dar, das hauptsächlich an dem Umschaltplatz liegt. Die mathematische Berechnung der Temperaturen durch das Regressionsverfahren war für diese Kurven nicht möglich. Somit ist kein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Temperatur- und Rotationsarbeit für Aluminium festzustellen. Eine Variation der Bearbeitungsparameter und Durchzugfertigung ohne gestuften Vorschub wäre in weiteren Untersuchungen sinnvoll, um Gleichungen aus dem Verhältnis zwischen Temperatur und Rotationsarbeit ermitteln zu können.

#### 6.5.4 Zusammenfassung

Aus der in diesem Kapitel durchgeführten Untersuchungen ist festzustellen, dass kein direkter Vergleich zwischen der Prozesstemperatur und der Momente für die in dieser Arbeit verwendete Werkstoffe erkennbar ist. Die Temperaturen an den Blechdurchzügen aus Baustahl und Edelstahl wurden nur mittels Pyrometer bestimmt, aus Aluminium mit beiden Temperaturmesssystemen. Aus dem Vergleich der Verläufe der Temperatur und der

Rotationsarbeit war ein Zusammenhang festzustellen, der sich in den Gleichungen zur Berechnung der Temperaturen durch Polynomregressionen hohen Grades darstellen.

Für die Baustahlwerkstoffe St37 und St52 mit 2 mm Blechdicke wurde eine gemeinsame Gleichung für jedes eingesetzte Werkzeug berechnet, durch welche die gemessenen und berechneten Temperaturwerte, mit Abweichungen nicht über 40 K, gut übereinstimmen. Bei der Blechdicke von 3 mm erreichte man mit den Gleichungen für 2 mm unter Korrekturfaktoren ebenso gute Ergebnisse.

Ebenso stimmen die gemessenen und mit einer Gleichung für jedes Werkzeug berechneten Temperaturen für Edelstahl X5CrNi18.10 überein. Der Vergleich zwischen den theoretischen Berechnungen des Temperaturverlaufes und den gemessenen Versuchen zeigte für die Aluminiumlegierung AlMgSi1 erhebliche Unterschiede, dadurch war kein Zusammenhang zwischen Temperatur und Rotationsarbeit erkennbar.

Weiterhin ist festzuhalten, dass für eine genauere Berechnung der Temperatur aus der Rotationsarbeit mit den ermittelten Gleichungen weitere Untersuchungen erforderlich sind, wie Durchzugfertigung mit Variation der Fertigungsparameter Drehzahl und Vorschubgeschwindigkeit. Eine Betrachtung bei der Ermittlung der Gleichungen durch die Geometrie der verwendeten Werkzeuge wäre in weiteren Studien ebenfalls sinnvoll, wobei die Temperatur aus der Rotationsarbeit unabhängig der Werkzeuggeometrie berechnet werden könnte.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Diplomarbeit befasste sich mit der Ermittlung der beim Thermofließlochformen entstehenden Temperaturen. Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Temperaturen während der Bearbeitung mit den berührungslosen Temperaturmesssystemen Pyrometer und Thermografiekamera in Abhängigkeit der Werkstoffsorte, Werkstoffdicke und Werkzeuggeometrie untersucht. Als Versuchswerkstoffe kamen die Baustähle St37, St52 und die Aluminiumlegierung AlMgSi1 mit den Blechdicken von 2 und 3 mm sowie der austenitische Edelstahl X5CrNi18.10 mit einer Blechdicke von 2 mm zum Einsatz. Als Versuchswerkzeuge wurden zwei am IPL geschliffene Fließlochformer in Form einer Standard- und einer Sondergeometrie verwendet.

Als Voraussetzung einer berührungslosen Temperaturmessung mit den Messsystemen Pyrometer und Thermografiekamera wurde eine experimentelle Ermittlung der Emissionsgrade der untersuchten Werkstoffe durchgeführt. Zu Beginn wurden die Emissionsgrade in schwarzlackierten Blechstreifen mit dem Pyrometer und dem Thermoelement ermittelt. Das Pyrometer lieferte bei dieser Untersuchung mit der Einstellung des Emissionsgrades auf 0,99 sowie bei hohen als auch bei niedrigen Temperaturbereichen eine sehr niedrige Fehlerquote. Während der Untersuchung mit unlackierten Blechstreifen musste der Emissionsgrad der Versuchswerkstoffe korrigiert werden, um die Temperaturen des Thermoelementes und Pyrometers gleichen zu können. Bei den Baustahlwerkstoffen wurde ein Emissionsgrad zwischen 0,74 und 0,85, bei den Werkstoffen Edelstahl und Aluminium unter 0,3 ermittelt.

Die Anwendung der Thermografiekamera in der Untersuchung des Emissionsgrades von schwarz- und unlackierten Werkstoffen lieferte ähnliche Resultate wie die des Pyrometers. Im Gegensatz zu der Untersuchung der schwarzlackierten Werkstoffe, zeigte die Untersuchung des Emissionsgrades in fließlochgeformten schwarz lackierten Blechstreifen eine etwas größere Abweichung zwischen den gemessenen Temperaturen mit dem Thermoelement und Pyrometer bei der Einstellung des Emissionsgrades auf 0,99. Faktisch ist die Einstellung des Emissionsgrades von 0,99 am Messsystem bei der Anwendung der Temperaturbestimmung beim Thermofließlochformen von schwarz lackierten Messobjekten empfehlenswert.

Des Weiteren wurden im Rahmen dieser Arbeit die Temperaturen an den fließlochgeformten Blechdurchzügen mit der Thermografiekamera und dem Pyrometer ermittelt. Aufgrund des Problems mit den von der Thermografiekamera erfassten Temperaturwerten, welche sich in unterschiedlichen Messbereichen erheblich unterschieden, wurden nur die mit dem Pyrometer gemessenen Temperaturen bei der Auswertung der Werkstoffe

St37, St52 und X5CrNi18.10 berücksichtigt. Aus demselben Grund wurden die Temperaturen des entgegen der Vorschubrichtung nach oben verdrängten Werkstoffvolumens und des eingesetzten Werkzeuges in diesen genannten Werkstoffen nicht untersucht.

Die Untersuchung in Baustahl St37 ergab, dass von der statistischen Versuchsplanung und -auswertung eine Steigerung der maximalen Temperatur der Durchzüge mit steigender Blechdicke statistisch nachgewiesen wurde. Für den Baustahl St52 sind keine Effekte und Wechselwirkungen der Faktoren auf die Temperatur statistisch nachweisbar. Für den austenitischen Edelstahl X5CrNi18.10 wurde kein statistischer Versuchsplan durchgeführt.

Es ist weiterhin festzuhalten, dass die mit dem Pyrometer erfassten Maximaltemperaturen an den Durchzügen aus beiden Baustahlwerkstoffen mit dem Erhöhen der Blechdicke steigen. Dennoch nahmen die Maximaltemperaturen an den Durchzügen aus St37 und Edelstahl mit dem Wechsel der Standardgeometrie zur Sondergeometrie ab. Bei St52 stiegen die mit dem Wechsel zur Sondergeometrie bei 2 mm Blechdicke und sanken bei 3 mm. Die Temperaturverläufe von beiden Baustahlwerkstoffen und Edelstahl im Maximaltemperaturbereich zeigten eine etwas harmonischere Tendenz bei der Sondergeometrie als bei der Standardgeometrie.

Im Rahmen der Untersuchung in Aluminiumlegierung AlMgSi1 konnten die mit beiden Messsystemen erfassten Temperaturen an den Durchzügen miteinander verglichen werden, da nur der niedrige Temperaturmessbereich in der Thermografiekamera gewählt wurde, welcher nicht von dem Problem des Messbereiches der Thermografiekamera für höhere Temperaturen beeinflusst wurde. Unter Anwendung einer statistischen Versuchsplanung und -auswertung wurde eine Steigerung der Maximaltemperatur mit steigender Blechdicke statistisch nachgewiesen. Es ließ sich ebenso belegen, dass die gemessenen Maximaltemperaturen mit dem Wechsel vom Temperaturmesssystem Pyrometer auf Thermografiekamera steigen. Mit der Sondergeometrie sanken die Temperaturen mit der Thermografiekamera für beide Blechdicken, bei der Standardgeometrie unterscheiden sie sich bei Änderung der Blechdicke nur teilweise. Die erfassten Temperaturverläufe mit beiden Temperaturmesssystemen stimmen sehr gut überein.

Aus der Untersuchung der mit der Thermografiekamera erfassten Temperaturen des entgegen der Vorschubrichtung nach oben verdrängten Werkstoffvolumens und des Werkzeuges in Aluminium stellte sich heraus, dass die auftretenden Temperaturen an den Werkzeugen höher sind als an dem nach oben geflossenen Material, aber beide sind niedriger als die entstehenden Temperaturen an den Durchzügen.

Ausgehend der dargestellten Ergebnisse ist zu folgern, dass sich das Pyrometer als das präziseste und vertraulichste Messsystem für die Temperaturermittlung an den fließlochgeformten Blechdurchzügen gezeigt hat, da die eingesetzte Thermografiekamera unerwartete Probleme bei den erfassten Temperaturwerten vorwies. Gleichwohl besitzt sie gegenüber

des Pyrometers deutliche Vorteile bei der Ausrichtung auf das Messobjekt. Somit können eventuelle Fehler bei der Ausrichtung des Messsystems vermindert werden. Weitere Versuchsreihen mit der Thermografiekamera wären in folgenden Arbeiten erforderlich, um die Ergebnisse der Temperaturbestimmung mit dem Pyrometer zu bestätigen.

Aus dem Vergleich der Prozesstemperatur- mit den Drehmomentverläufen wurde kein Zusammenhang zwischen beiden Größen ersichtlich. Durch die Umformungsarbeit in Form der Rotationsarbeit fand man eine gute Übereinstimmung mit der Temperatur. Durch das Regressionsverfahren wurden Gleichungen berechnet, welche es ermöglichen, die Temperatur aus der Rotationsarbeit zu berechnen. Die aus den Gleichungen resultierenden Temperaturverläufe stimmen mit denen des Pyrometers bei allen Versuchswerkstoffen, außer bei Aluminium, mit tolerierbaren Abweichungen überein.

In zukünftigen Studien sind weitere Untersuchungen der in dieser Arbeit berechneten Gleichungen durchzuführen, wie die Änderungen der Bearbeitungsparameter Drehzahl und Vorschubgeschwindigkeit. Eine Betrachtung der Gleichungen über die Werkzeuggeometrie ist ebenso zu empfehlen, sodass ein direkter Zusammenhang zwischen Temperatur und Rotationsarbeit unabhängig des Werkzeuges ermittelt werden kann.

## 8 Schrifttum

- /1/ Beitz, W., Grote, K.-H.: DUBBEL, Taschenbuch für den Maschinenbau, 20. Auflage, Springer-Verlag, 2001.
- /2/ Bonfig, W.: Temperatursensoren – Prinzipien und Applikationen. Expert Verlag, 6. Band, Renningen-Malmsheim, 1995.
- /3/ British Stell, Tubes & Pipes: Flowdrill jointing system for hollow section connections - extension - draft final report. (Interiur Report), Corby: British Stell. Corby, England, Jul. 1994, 76 s.
- /4/ Dekkers, J. D.: Flowdrilling – a new manufacturing process. Utrecht, Flowdrill B.V., Holland, 1988.
- /5/ Dieter, G. E.: Mechanical Metallurgy. SI Metric ed./ adapted by David Bacon. London, McGraw-Hill, 1988.
- /6/ Drabus: Katakog. Ruelzheim: Belgium, 1996.
- /7/ Enghauser, W. L.: Method of Forming Manifolds. US 1.906. 953, 2 Jun. 1931, 2 May 1932.
- /8/ Flott: Fließform-Technik zur Herstellung von Buchsen in dünnwandige metallische Werkstoffe. Informationsbroschüre. Deutschland, 1994.
- /9/ Formdrill : International catalogue. Belgium, 1997.
- /10/ Geffen, B. V.: Apeldoorn, Netherlands, Johannes Andrianus Van Geffen. Piercing Tools.Int. Cl. B 21 D 28/36 US 3.939.683, 19 Dez. 1974, 24 Feb. 1976.
- /11/ Heiler, R.: Fließlochformen auf NC-Maschinen. Kassel: Institut für Produktionstechnik und Logistik. Kassel, Set. 1997.
- /12/ Kals, H. J. J., Streppel, A. H.: Flowdrilling - a preliminary analysis of a new bush-making operation. Annals of the CIRP, v. 32, n. 1, 1983.
- /13/ Kerthofs, M., Van Stappen, M., Olieslaeger, M. D., et al.: The performance of (Ti,Al)N coated flowdrills. Surface and technologie, 69/69, p. 741-746, 1994.
- /14/ König, W.: Fertigungsverfahren: Drehen, Fräsen, Bohren. Düsseldorf, VDI, 1981, Band I.
- /15/ Kretschmer, G.: Fließlochformen - Das Verfahren. Seminar - Fließlochformen und Gewinden. Berichte aus Wissenschaft und Praxis, 1. Kassel, 12 Okt. 1995.

- 
- /16/ Kretschmer, G.: Fließlochformen von Blechdurchzügen. Siegen: Universität Siegen, 1980, 70 s. Thesis (Maschinenbau) - Universität Gesamthochschule - Siegen, 1980.
- /17/ Lieneweg, F.: Handbuch Technische Temperaturmessung. Vieweg & Sohn Verlag GmbH, Braunschweig, 1976.
- /18/ Lopes, J. C. O.: Beitrag zur Weiterentwicklung der Technologie des Fließlochformens. Kassel: Institut für Produktionstechnik und Logistik. Kassel, Set. 1999.
- /19/ Lopes, J. C. O.: Furação por escoamento e rosqueamento por conformação. Florianópolis, SC, abr. 1994. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica - UFSC, 212 s.
- /20/ Pauly, H., Engel, F.: Das Pyrometer-Kompodium. IMPAC Eletronics GmbH, Frankfurt am Main, 1999.
- /21/ Schuster, N., Kolobrodov V. G.: Infrarotthermographie. 1. Auflage. WILEY-VCH Verlag, Berlin, 2000.
- /22/ Silverman, J., Mooney J. M., Shephard F. D.: Infrarot-Videokameras, Spektrum der Wissenschaft, Heft 5, 1992.
- /23/ Tank, V.: Infrarottemperaturmessungen mit selbsttätiger Berücksichtigung des Emissionsgrades. Deutsche Forschungs- und Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt e.V., Oberpfaffenhofen, 1988.
- /24/ Verein Deutscher Eisenhüttenleute (VDEh), Hg.: Taschenbuch der Stahl-Eisen-Werkstoffblätter. 9. Aufl. Düsseldorf: Verlag Stahleisen, 1997.
- /25/ Verein Deutscher Ingenieure: Blechdurchzüge Fertigungsverfahren und Werkzeuggestaltung. VDI-Richtlinie 3359, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1996.
- /26/ Verein Deutscher Ingenieure: Technische Temperaturmessung - Strahlungsthermometrie. VDI-Richtlinie 3511, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1995.
- /27/ Weichert, L.: Temperaturmessungen in der Technik. Auflage 5. Expert Verlag, Böblingen, 1992.
- /28/ Zecha Centerdrill: Informationsbroschüre. Pforzheim, Germany, 1996.