

# Konstruktion einer Vorrichtung und Entwicklung einer Methode zur Ermittlung des thermischen Kontaktwiderstandes

Diplomarbeit  
an der  
Technischen Universität Graz

vorgelegt von  
**Florian Krall**



Institut für Werkzeugtechnik & Spanlose Produktion  
Technische Universität Graz  
A-8010 Graz, Österreich

Betreuer: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ralf Kolleck  
Dipl.-Ing. Wolfgang Weiss

9. September 2012



© Copyright Florian Krall 2012



## **EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG**

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Florian Krall  
Graz, Österreich, März 2012



## Kurzfassung

Im Presshärtprozess stellt der thermische Kontaktwiderstand zwischen gekühltem Werkzeug und erwärmter Platine einen bestimmenden Faktor für die Qualität des Umformteils dar. Seine exakte Kenntnis ermöglicht eine gezielte Temperaturführung des Platinenwerkstoffes und die daraus resultierende Vorhersage der Materialeigenschaften durch Gefügewandlungen. Als Resultat können Umformbauteile mit den gewünschten Festigkeitseigenschaften hergestellt werden.

Die aktuellen Anforderungen zur Senkung des Kraftstoffverbrauchs der Automobile, infolge der Reduzierung des Fahrzeuggewichts, erfordert konsequenten Leichtbau in der Konstruktion von modernen Karosserien. Durch Anwendung der Richtlinien des Leichtbaus werden die Wandstärken der herkömmlichen Bauteilen nach Möglichkeit verringert. Der dadurch entstandene Festigkeitsverlust aufgrund der Querschnittsabnahme wird in der Regel durch Umgestaltung der Geometrien bzw. durch die Verwendung von Stahlwerkstoffen mit höheren Festigkeitseigenschaften egalisiert. Höhere Festigkeitseigenschaften der Stähle bedeuten aber schlechte Umformeigenschaften aufgrund von niedrigen Bruchdehnungen und stellen somit die Bauteilfertigung vor neue Herausforderungen. Der Presshärtprozess schafft dabei einen Brückenschlag in der Fertigung von komplexen Bauteilgeometrien bei gleichzeitig hohen Festigkeitseigenschaften der Werkstücke.

Der Kern dieser Arbeit besteht in der Bestimmung des thermischen Kontaktwiderstandes für die Anwendung in der Warmumformung. Dazu wird ein geeigneter Versuchsaufbau konstruiert und aufgebaut und eine Mess- und Auswertemethodik entwickelt um diesen äußerst wichtigen Prozessparameter zu bestimmen. Das Phänomen des thermischen Kontaktwiderstandes findet auch in zahlreichen anderen Bereichen der Technik Anwendung. Die in dieser Arbeit vorgestellte Methode und Vorgehensweise erlaubt quantitative und qualitative Aussagen über den thermischen Kontaktwiderstand für das Presshärten und physikalisch benachbarte Bereiche.



## **Abstract**

The thermal contact resistance between a cooled forming tool and the according heated metal blank is a determining factor in any press hardening process, as it highly influences the quality of all processed parts. Knowing its exact value enables a systematic temperature control of the sheet material and therefore the reliable anticipation of material properties that are influenced by microstructural transformations. As a consequence, parts can be formed that feature specific strength properties.

Continuous efforts to lower the overall fuel consumption often focus on the reduction of the vehicle's weight. This necessitates a consistent light-weight concept of modern car bodies. One way to meet these ambitious requirements is to decrease the wall thicknesses of conventional parts. The loss of strength, caused by this diminution of the cross-section, is either compensated by an alteration of geometries or the application of high-strength materials. The latter coping mechanism imposes high demands on the overall forming process, as increased strength properties of sheet materials implicate smaller breaking elongations and therefore a significantly lower formability. Press hardening bridges the gap between the production of complex parts and high-strength components.

The main part of this diploma thesis emphasizes the determination of the thermal contact resistance during hot forming operations. In order to record this highly important process parameter, a suitable test configuration is designed and realized. In addition, a specifically adapted measuring and evaluation method is developed. The thermal contact resistance is not confined to hot forming processes only - it is also applied in many other technical fields. It therefore has to be noted, that the presented procedural method gives quantitative and qualitative information on the thermal contact resistance for press hardening processes and physically adjacent fields.



## Vorwort

Mit Abschluss meines Studiums geht ein, vor allem lehrreicher als auch sehr erfreulicher, Lebensabschnitt für mich dem Ende zu. Ich möchte in dieser Arbeit all jenen danken, die mich auf diesem Weg begleitet und unterstützt haben. Es war eine wunderbare Zeit, an die ich mich schon jetzt gerne zurück erinnere.

Ich möchte mich bei Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ralf Kolleck dafür bedanken, mir die Arbeit am Institut für Werkzeugtechnik und spanlose Produktion zu ermöglichen. Das hervorragende Arbeitsklima, die kompetente Unterstützung und die freie Entfaltungsmöglichkeit bildeten für mich die Grundlage für diese Arbeit.

Meinem Betreuer Herrn Dipl.-Ing. Wolfgang Weiss gilt besonderer Dank für die kompetente Hilfe und die Geduld, die er mir während dieser Arbeit zukommen ließ. In der Zusammenarbeit mit Herrn Weiss war es mir möglich, einzelne Themengebiete aus dem Maschinenbaustudium anzuwenden und teilweise praktisch umzusetzen. Aus gutem Gewissen kann ich behaupten, dadurch die eine oder andere Verständnislücke beseitigt zu haben.

Ein großes Dankeschön auch an meine Kollegen am Institut für Werkzeugtechnik und spanlose Produktion, ohne deren Gesellschaft die Zeit am Institut wohl nicht annähernd so interessant und lehrreich gewesen wäre. Besonders möchte ich an dieser Stelle Herrn Robert Vollmer, Frau Marina Kofler, Herrn Ralph Kutschera, und Herrn Heinz Fasching für die tatkräftige Unterstützung bei dieser Arbeit herausheben. Spezieller Dank geht an Herrn Manuel Fauri für die großartige Hilfe im Endstadium der Arbeit, ohne die eine fristgerechte Fertigstellung nicht möglich gewesen wäre.

Im privaten Bereich bedanke ich mich bei meiner wunderbaren Familie. Vielen Dank meinen Eltern, Rudi und Sissi sowie meinen Geschwistern Kathi, Rudi, Fritzi und Pauli. Ohne die finanzielle Unterstützung meiner Eltern und dem motivierenden Zuspruch der ganzen Familie, wäre ein Studium in weite Ferne gerückt.

Abschließend möchte ich mich bei all meinen Freunden, die mir auf meinem bisherigen Lebensweg sehr ans Herz gewachsen sind, für die erbauende Freundschaft und schöne Zeit bedanken. Ich freue mich schon auf zahlreiche weitere schöne Zeiten mit: Kreimson, Kerstin, Angi, Ziggo, Strome, Fasche, Ope, Michi und Andrea, Boxe, Wiede, Faba, Jesse, Gernot, Lex, Richi und Rebecca, Rainer, Stephan und Lisbeth. Und danke Claudschi für die Fröhlichkeit!



# Symbole und Abkürzungen

## Symbolverzeichnis

$A$	geometrische Kontaktfläche	[mm <sup>2</sup> ]
$c$	spezifische Wärmekapazität	[J/kgK]
$e$	Elementarbatteryesspannung	[V]
$L$	charakteristische Länge	[m]
$p$	Druck	[Pa]
$r$	radiale Koordinate	[m]
$t$	Zeit	[sec]
$T$	thermodynamische Temperatur	[K]
$z$	axiale Koordinate	[m]
$Q$	Wärme	[J]
$\dot{Q}$	Wärmestrom	[W]
$\dot{q}$	Wärmestromdichte	[W/m <sup>2</sup> ]
$R_{tc}$	thermischer Kontaktwiderstand	[m <sup>2</sup> K/W]
$I_{th}$	Strom im Thermokreis	[A]
$\alpha$	Wärmeübergangskoeffizient	[W/m <sup>2</sup> K]
$\alpha_{konv}$	konvektiver Wärmeübergangskoeffizient	[W/m <sup>2</sup> K]
$\lambda$	Wärmeleitfähigkeit	[W/(Km)]
$\Delta$	Differenz	[–]
$\phi$	Winkel	[rad]
$\rho$	Dichte	[kg/m <sup>3</sup> ]

# Abkürzungen

A	Austenit
B	Bainit
BH	Bake Hardening Stahl
CAD	Computer Aided Design
CMn	Kohlenstoff-Mangan Stahl
Cr	Element Chrom
DP	Dual-Phasen Stahl
F	Ferrit
FEM	Finite Elemente Methode
HSLA	High Strength, Low Alloy (hochfester, niedrig legierter Stahl)
HSS	High Strength Steel (hochfester Stahl)
HV	Härteprüfung nach Vickers
IF	Interstitial Free (hochreiner Stahl)
IS	Isotropischer Stahl
kfz	kubisch-flächenzentrierter Kristall
krz	kubisch-raumzentrierter Kristall
Mart	martensitischer Stahl
MP	Messpunkt
MW	Mittelwert
Ni	Element Nickel
OWz	Oberwerkzeug
P	Perlit
Si	Element Silicium
T&F	Institut für Werkzeugtechnik und Spanlose Produktion
TKW	Thermischer Kontaktwiderstand
TRIP	Transformation Induced Placity (Stahl)
UHSS	Ultra High-Strength Steel (höchsthafte Stähle)
UWz	Unterwerkzeug
ZTU	Zeit-Temperatur-Umwandlung

# Inhaltsverzeichnis

<b>Symbole und Abkürzungen</b>	<b>iii</b>
<b>1 Stand der Technik</b>	<b>1</b>
1.1 Thermischer Kontaktwiderstand . . . . .	1
1.2 Temperaturmessung mit Thermoelementen . . . . .	3
1.2.1 Theorie der Thermokraft . . . . .	4
1.2.2 Gesetzmäßigkeiten . . . . .	5
1.2.3 Arten von Thermoelementen und ihre Einsatzbereiche . . . . .	6
1.2.4 Messtechnische und systematische Fehler beim Messen mit Thermoelementen . . . . .	8
<b>2 Ausgangssituation</b>	<b>11</b>
2.1 Stahlwerkstoffe für den Leichtbau . . . . .	11
2.2 Warmumformung . . . . .	12
2.3 Thermische Prozessparameter für die Warmumformung . . . . .	14
2.4 Bedeutung des Wärmeübergangskoeffizienten für die Warmumformung . . . . .	15
<b>3 Methodik und Versuchsaufbau</b>	<b>19</b>
3.1 Das Inverse Wärmeleitproblem . . . . .	19
3.2 Methodik zur Ermittlung des TKW . . . . .	20
3.3 Vorversuche . . . . .	21
3.3.1 Ermittlung der spezifischen Wärmekapazität $c_p$ . . . . .	22
3.3.2 Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit . . . . .	25
3.4 Versuchsaufbau . . . . .	29
3.4.1 Anforderungen an den Versuchsaufbau . . . . .	29
3.4.2 Konstruktion . . . . .	30
<b>4 Messung</b>	<b>37</b>
4.1 Vorbereitung der Messung . . . . .	37
4.1.1 Kalibrierung der Thermoelemente . . . . .	38
4.1.2 Vorkehrungen am Versuchsstand . . . . .	39
4.2 Ablauf der Messung . . . . .	40
4.3 Ergebnis der Messung . . . . .	42
<b>5 FEM Simulation</b>	<b>45</b>
5.1 Ablauf der Simulation . . . . .	45

5.1.1	FE-Netz . . . . .	45
5.1.2	Parameter für das FE-Modell . . . . .	46
5.2	Ergebnis der Simulation . . . . .	48
<b>6</b>	<b>Auswertung</b>	<b>53</b>
6.1	Vergleich Messung und Simulation . . . . .	53
<b>7</b>	<b>Ausblick</b>	<b>57</b>
<b>8</b>	<b>Anhang A - Auswertungsergebnisse</b>	<b>59</b>
<b>9</b>	<b>Anhang B - Thermospannungen</b>	<b>67</b>
9.1	Grundwerte der Thermospannungen . . . . .	68
<b>10</b>	<b>Anhang C - Konstruktionszeichnungen</b>	<b>69</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>72</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>73</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>75</b>

# Kapitel 1

## Stand der Technik

Das Phänomen des thermischen Kontaktwiderstandes (TKW) ist im Alltag der Menschen allgegenwärtig. Sobald Gegenstände berührt werden, spürt man an der Hautoberfläche den Wärmeaustausch zwischen menschlichem Körper und berührtem Objekt. Um diesen Sachverhalt zu veranschaulichen, stelle man sich ein Wasserbad mit beispielsweise 25°C Wassertemperatur und einen Holzblock mit derselben Temperatur vor. Taucht man nun die Hand in das Wasser, so empfindet man eine zum Holzblock scheinbar unterschiedliche Temperatur. Dies begründet sich hauptsächlich auf den unterschiedlichen thermischen Kontaktwiderständen zwischen menschlicher Hand/Wasser bzw. Hand/Holzblock.

Diese Arbeit beschäftigt sich mit dem TKW zwischen gekühltem Umformwerkzeug und erwärmter Blechplatte im Prozess des Presshärtens. Dabei handelt es sich um eine spezielle Form der Warmumformung. Dieses Verfahren wird im Kapitel 2.2 näher beschrieben.

### 1.1 Thermischer Kontaktwiderstand

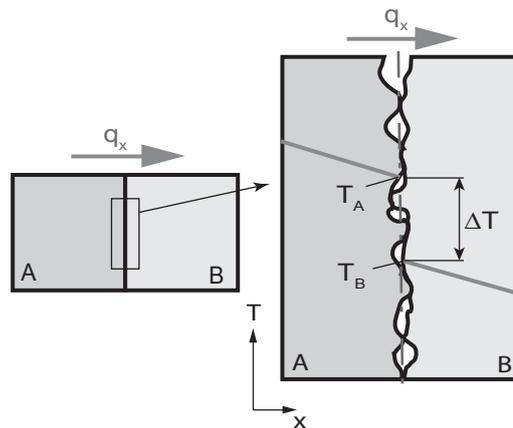
Berühren sich zwei Körper mit unterschiedlicher Temperatur, dann findet ein Wärmetransport über die Grenzflächen statt. Dabei kommt es an der Kontaktfläche zu einer Unstetigkeit im Temperaturverlauf (Abbildung 1.1) Der auftretende Temperatursprung ist auf den thermischen Kontaktwiderstand  $R_{tc}$  [ $m^2K/W$ ] zurückzuführen (siehe Formel 1.1).

$$R_{tc} = \frac{A \cdot \Delta T}{\dot{Q}} \quad (1.1)$$

Der Wärmeübergangskoeffizient (WÜK)  $\alpha$  [ $W/m^2K$ ] errechnet sich aus Formel 1.2 als der Kehrwert des thermischen Kontaktwiderstandes (TKW).

$$\alpha = \frac{1}{R_{tc}} \quad (1.2)$$

Das Auftreten eines solchen Kontaktwiderstandes begründet sich hauptsächlich durch die Oberflächenrauheiten der beiden Kontaktflächen. Dadurch berühren sich die beiden Körper nicht an der gesamten, nominellen Kontaktfläche, sondern lediglich an den Rauheitsspitzen der beiden Oberflächen. Der Wärmetransport setzt sich somit aus der Wärmeleitung über die



**Abbildung 1.1:** Temperatursprung aufgrund des thermischen Kontaktwiderstandes  
[Incropera et al., 2007, S. 102]

effektive Berührfläche und der Wärmeleitung und Wärmestrahlung über die Zwischenräume zusammen. Da die Wärmeleitfähigkeit von Festkörpern in der Regel größer ist als die Wärmeleitfähigkeit des Übertragungsmediums in den Oberflächenunebenheiten, kann der thermische Kontaktwiderstand durch Vergrößerung der tatsächlichen Berührfläche verringert werden. Eine solche Vergrößerung der Berührfläche kann beispielsweise durch glattere Oberflächen oder Erhöhung des Kontaktdruckes erfolgen. [Incropera et al., 2007, S. 102]

In Tabelle 1.1 sind thermische Kontaktwiderstände unterschiedlicher metallischer Werkstoffe aufgelistet. Der TKW tritt in einer Vielzahl von technischen Bereichen auf. Deshalb ist

<b>Thermischer Kontaktwiderstand, <math>R_{tc} \cdot 10^4 (m^2 K/W)</math></b>		
Kontaktdruck	0.1 MPa	10 MPa
Rostfreier Stahl	6-25	0.7-4.0
Kupfer	1-10	0.1-0.5
Magnesium	1.5-3.5	0.2-0.4
Aluminium	1.5-5.0	0.2-0.4

**Tabelle 1.1:** Thermische Kontaktwiderstände für metallische Oberflächen unter Vacuum [Incropera et al., 2007, S. 102]

seine Ermittlung an die jeweiligen Einflussparameter der technischen Anwendung gebunden. Für das spezielle Anwendungsgebiet der Tiefziehprozesse sind die Haupteinflussgrößen der Kontaktdruck, die Oberflächenrauheit, die Zwischenstoffkonfiguration zwischen Werkzeug und Formplatte, die Härte und die Wärmeleitfähigkeit der Werkstoffpaarung. Untersuchungen des Wärmeüberganges in Abhängigkeit diverser Parameter wurden bereits bei vielen Anwendungen durchgeführt. Die dazugehörigen mathematischen Formulierungen erfassen einzelne der oben genannten Einflussgrößen. Dabei existieren aber nur wenige Modelle welche

auch eine plastische Verformung der Kontaktflächen bei hohen Anpressdrücken und Temperaturen berücksichtigen. Dieser Umstand und die Tatsache, dass diese Versuche auf teilweise sehr komplexen Versuchsaufbauten basieren, machten eine wirtschaftliche Abschätzung der Einflussparameter auf den thermischen Kontaktwiderstand und dessen Bestimmung kaum möglich.[C. Fieberg, 2008, S.6]

In einem vorangegangenen Projekt wurde am Institut für Werkzeugtechnik und spanlose Produktion bereits ein Versuchsaufbau realisiert, der die Einflussgrößen bei der Warmumformung berücksichtigt. Ziel dabei war ein qualitativer und quantitativer Vergleich des Wärmeüberganges zwischen Werkzeug und Blech. Es wurden unterschiedliche Werkstoffpaarungen und Abhängigkeiten (Rauheit, Beschichtung, Flächenpressung, Temperatur) auf den Wärmeübergang berücksichtigt. Die Versuche ergaben qualitative Aussagen für bestimmte Werkstoffpaarungen. Weiterführende Untersuchungen bezüglich des thermischen Kontaktwiderstandes waren mit dieser Versuchsanordnung aber nicht möglich, da das physikalische Prinzip der Warmumformung nicht korrekt abgebildet wurde.

## 1.2 Temperaturmessung mit Thermoelementen

Die Temperatur ist eine sogenannte thermodynamische Zustandsgröße<sup>1</sup> und ein Maß für die mittlere kinetische Energie der Atome oder Moleküle eines Systems. Die Einheit der thermodynamischen Temperatur  $T$  ist das Kelvin<sup>2</sup> und das Einheitszeichen ist das K. Die thermodynamische Temperatur ist nach Formel 1.3 definiert. [Ch. Lüdecke and D. Lüdecke, 2000]

$$1K = \frac{T_T}{273,16} \quad (1.3)$$

Hierin bedeutet  $T_T$  die thermodynamische Temperatur des Tripelpunktes<sup>3</sup> von reinem Wasser. Der Nullpunkt der thermodynamischen Temperatur fällt mit dem sogenannten absoluten Nullpunkt der Temperatur zusammen. Da sich aufgrund von Formel 1.3 bei Temperaturen im Bereich der Raumtemperatur unbequem hohe Zahlenwerte ergeben, definiert man die Celsius<sup>4</sup> Temperatur  $t$ . Es gilt die Beziehung aus Formel 1.4.

$$T - T_0 = t \quad (1.4)$$

Hierin ist  $T_0 = 273,15K$  und entspricht dem Eispunkt von Wasser. [U. Grigull, 1977, S.15]

Die Temperatur ist die zentrale Größe in der Betrachtung des thermischen Kontaktwiderstandes und es gibt verschiedene Methoden um sie zu bestimmen. Dabei werden physikalische Effekte und Verfahren herangezogen, die reproduzierbare und eindeutige Messungen ermöglichen. Das hier angewandte Verfahren beruht auf der Änderung des elektrischen Widerstan-

---

<sup>1</sup>Ist eine physikalische Größe zur eindeutigen Beschreibung des Zustands eines thermodynamischen Systems. Weitere Zustandsgrößen: Druck, Volumen, etc.

<sup>2</sup>William Thomson Kelvin (1824-1907) britischer Physiker

<sup>3</sup>Tripelpunkt = Gleichgewichtstemperatur des dreiphasigen Systems: Eis, Wasser, Dampf

<sup>4</sup>Anders Celsius (1701-1744) schwedischer Astronom

des von Stoffen durch die Temperatur. Seebeck<sup>5</sup> beschrieb 1821 als Erster den Begriff Thermoelement und führte somit die Temperaturmessung mittels elektrischem Messprinzip ein. Bemerkenswert dabei ist, dass das Thermoelement älter ist als die elektrische Stromerzeugung (1861 mit Hilfe des Dynamo-Prinzips), das Telefon (1876) oder die Glühlampe (1879). Im Jahre 1826 erfand Becquerel<sup>6</sup> das Platin-Palladium-Thermoelement. Platin wird bis heute für die Temperaturmessung mittels Thermoelementen eingesetzt. Seit über 150 Jahren findet das Thermoelement Anwendung in verschiedensten technischen Bereichen. [v. Körtvelyesy, 1981, S.4]

### 1.2.1 Theorie der Thermokraft

Bei Thermoelementen kommt der Seebeck-Effekt zu tragen. Dieser gehört zur Gruppe der thermoelektrischen Effekte. Dabei handelt es sich um einen Volumendiffusionseffekt der Ladungsträger und nicht um ein Kontaktphänomen zwischen zwei Materialien. [Bonfig, 1995, S.47]

Der Seebeck-Effekt äußert sich folgendermaßen: tritt in einem metallischen Leiter ein Temperaturgradient auf Grund eines Temperaturfeldes auf, stellt sich dadurch ein elektrisches Feld vom heißen zum kalten Ende hin ein. Dies kann man sich wie eine Elementarbatte vorstellten. Praktisch kann man diese Spannung aber nicht messen, da die Messleitungen die zu messende Spannung verfälschen würden. Deshalb verwendet man die sogenannte Thermokette. Im einfachsten Fall besteht sie aus zwei geeigneten Materialien, welche an der Messstelle miteinander verbunden sind. Das Messgerät zeigt somit die Differenz zweier Elementarbatte-Spannungen<sup>7</sup> an. Diese ist nur vom auftretenden Temperaturgradienten und von den Materialeigenschaften (Reinheit, Homogenität, etc.) der Thermodrähte abhängig. Da aber die einzelnen Materialien mit der Temperatur ein unterschiedliches Verhalten zeigen, ist selbst die gemessene Spannungsdifferenz temperaturabhängig. Somit ergibt sich aus dem Temperaturverlauf dieser Spannungsdifferenz der Thermospannungsverlauf für ein bestimmtes Thermopaar (siehe Kapitel 9). Schließt man beide Leiterenden zu einem sogenannten Thermokreis, so fließt elektrischer Strom. Der Strom errechnet sich aus der Spannungsdifferenz und den Drahtwiderständen. In Abbildung 1.2 ist ein solcher Thermokreis dargestellt. [Bonfig, 1995, S.49]

Bei der Temperaturmessung mittels Thermoelement bzw. Thermopaar wird eine Anord-

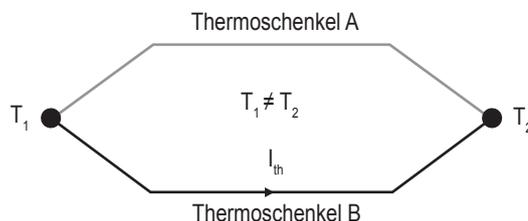


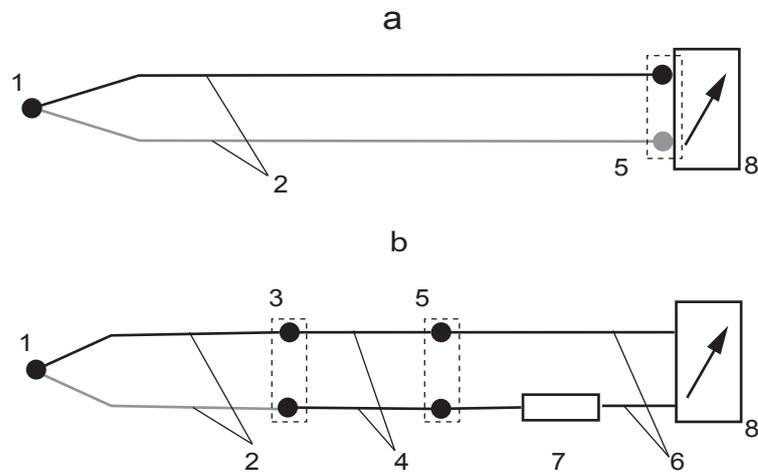
Abbildung 1.2: Thermokreis [Bonfig, 1995, S. 49]

<sup>5</sup>Thomas Johann Seebeck (1770-1831) deutsch-baltischer Physiker

<sup>6</sup>Antoine Cesar Becquerel (1788-1878) französischer Physiker

<sup>7</sup>Elementarbatte (1857) - Zwei Bleibplatten in einem Gefäß mit verdünnter Schwefelsäure.

nung wie in Abbildung 1.3 verwendet. Dabei kann die Verbindung zwischen den beiden Thermodrähten auf verschiedene Arten erfolgen. (z.B. löten, schweißen, verdrillen, ect.)



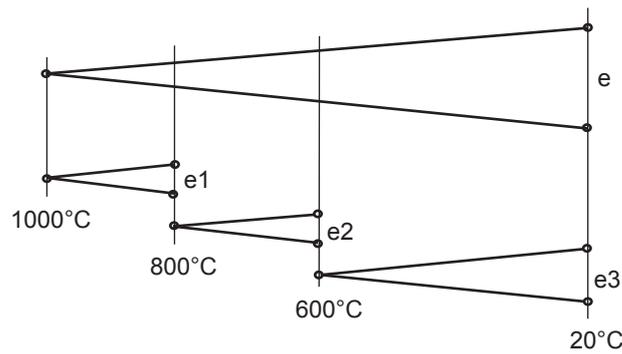
**Abbildung 1.3:** Thermoelement a. ohne Ausgleichsleitung b. mit Ausgleichsleitung (1 Messstelle, 2 Thermopaar, 3 Anschlussstelle, 4 Ausgleichsleitung, 5 Vergleichsstelle 6 Verbindungsleitung, 7 Abgleichwiderstand, 8 Anzeigergerät) [Bonfig, 1995, S. 64]

## 1.2.2 Gesetzmäßigkeiten

Bedingt durch die physikalischen Zusammenhänge ergeben sich einheitliche Gesetzmäßigkeiten für den Umgang mit Thermoelementen verschiedenster Zusammensetzungen. Diese müssen eingehalten werden, da ansonsten beachtliche Messfehler auftreten können.

### Gesetz der linearen Superposition

Ein beliebiges Thermoelement kann in seine Einzelelemente zerlegt werden. Berücksichtigt man die jeweiligen Messstellen- und Vergleichsstellentemperaturen, dann ergibt ein Thermoelement die selbe Spannung wie die Summe der Spannungen der einzelnen Elemente. Durch das Gesetz der linearen Superposition ergibt sich, dass ein weiterer Heißbereich zwischen Messstelle und Vergleichsstelle (Kaltstelle) die resultierende Thermospannung nicht beeinflusst. [Bonfig, 1995, S.49]



**Abbildung 1.4:** Superposition von Thermospannungen [Bonfig, 1995, S.50]

Aus Abbildung 1.4 geht eindeutig hervor, dass sich die Elementarthermospannungen  $e_n$  vom Normalniveau zum Überhitzungsbereich und zurück exakt aufheben.

### Gesetz der homogenen Temperatur

In einem homogenen Temperaturfeld sind die einzelnen Thermospannungen von verschiedenen Materialien null. Somit ergibt sich auch als Summe aller Thermospannungen in einem Thermokreis null, wenn alle Teile des Kreises dieselbe Temperatur haben. Dies ist bei der Anwendung von großer Wichtigkeit. Inhomogene Thermodrähte, Stecker oder Übergangsbereiche bleiben in der Messkette ohne Auswirkung, solange dort kein Temperaturgradient auftritt. Eine gute Kapselung solcher Bereiche sorgt für eine Temperaturhomogenisierung. [Bonfig, 1995, S.50]

### Gesetz des homogenen Stromkreises

Sind die Leitermaterialien zwischen den Messstellen homogen, dann hat ihre Temperatur zwischen der Messstelle und der Vergleichsstelle auf das Resultat keinen Einfluss. Werden die Thermodrähte durch mechanische oder thermische Überbelastungen beschädigt, dann entstehen Inhomogenitäten im Leitermaterial. Diese bleiben solange ohne Auswirkungen auf das Messergebnis, solange diese Bereiche in einem homogenen Temperaturfeld liegen. [Bonfig, 1995, S.50]

## 1.2.3 Arten von Thermoelementen und ihre Einsatzbereiche

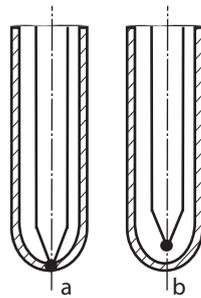
In der Praxis kommen verschiedene Materialpaarungen als Thermoelemente zum Einsatz. Bei der Auswahl eines geeigneten Thermopaars strebt man eine hohe Thermospannung, sowie eine hohe Linearität der Thermospannungen und hohe Korrosionsfestigkeit bei den auftretenden Temperaturen an. Diese Ziele können nicht von einer einzigen Materialpaarung erfüllt werden. Am häufigsten werden Thermoelemente der Typen T,J,E,K,N,R mit unterschiedlichen Legierungszusammensetzungen verwendet. Ihre Grundwertreihen werden in der Norm IEC 584-1 aufgelistet. Tabelle 1.2 zeigt eine Aufstellung der Temperaturbereiche

Typ	Temperaturbereich °C	Toleranzklasse 1	IEC Farbcode
K	-40 bis +1100	$\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ zwischen (-40 bis $375^{\circ}\text{C}$ ) $\pm 0.004 \cdot T$ (375 bis $1100^{\circ}\text{C}$ )	Grün
N	0 bis +1100	$\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ zwischen (-40 bis $375^{\circ}\text{C}$ ) $\pm 0.004 \cdot T$ (375 bis $1100^{\circ}\text{C}$ )	Rosa
J	-40 bis +750	$\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ zwischen (-40 bis $375^{\circ}\text{C}$ ) $\pm 0.004 \cdot T$ (375 bis $750^{\circ}\text{C}$ )	Schwarz
T	-185 bis +300	$\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ zwischen (-40 bis $125^{\circ}\text{C}$ ) $\pm 0.004 \cdot T$ (125 bis $350^{\circ}\text{C}$ )	Braun
E	-40 bis +800	$\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ zwischen (-40 bis $375^{\circ}\text{C}$ ) $\pm 0.004 \cdot T$ (375 bis $800^{\circ}\text{C}$ )	Violett
R	0 bis +1600	$\pm 1^{\circ}\text{C}$ zwischen (0 bis $1100^{\circ}\text{C}$ ) $\pm (1 + 0.003 \cdot (T - 1100))$ zwischen ( $1100$ bis $1600^{\circ}\text{C}$ )	Orange

**Tabelle 1.2:** Toleranzklassen für Thermoelemente [Bonfig, 1995]

und Einsatzgebiete der gängigsten Thermoelementtypen. Für die Temperaturmessungen der vorliegenden Arbeit wurden die Typen N und K verwendet. Bei dem Thermoelement vom Typ NiCrSi-NiSi zeigen sich geringere Alterungseigenschaften als beim Typ NiCr-Ni. Bei der Alterung von Thermoelementen tritt der sog. Drift-Effekt auf, welcher auf Seite 9 näher erklärt wird. Durch Diffusionsvorgänge bei hohen Temperaturen im Thermoelementmaterial verändert sich die Materialzusammensetzung und somit die Thermospannung des Elements.

Weiters kommen zwei verschiedene Ausführungen von Elementen zur Anwendung. Bei der Standardausführung werden die Thermodrähte direkt an die Messstelle durch eine Punktschweißung aufgebracht. Dadurch sind die Drähte fix mit der Messstelle verbunden und können in ihrer Position nicht mehr verändert werden. Bei der Ausführung der Thermoelemente als Mantelthermoelemente werden die Thermodrähte miteinander metallisch verbunden und in einer Mantelhülse mit Keramikfüllung platziert. Dadurch ergibt sich ein für die Anwendung sehr praktischer Thermofühler. Dabei wird zwischen zwei Bauarten, wie in Abbildung 1.5 ersichtlich, unterschieden. Die Ansprechgeschwindigkeit erhöht sich bei Verwendung von Bauform a (Abbildung 1.5) wesentlich. Durch die Verschweißung von Thermoelement und Mantel ist die Messstelle geerdet. Deshalb ist beim nachfolgenden Transmitter darauf zu achten, dass seine Eingänge potentialfrei sind. Ansonsten kann es zu Brummspannungen kommen. Bei Verwendung mehrerer solcher Messstellen ist Störspannung vorprogrammiert. [Bonfig, 1995, S.64]



**Abbildung 1.5:** Ausführungsformen von Mantelthermoelementen (a Mantel mit der Messstelle verschweißt, b Mantel gegen Messstelle isoliert)

## 1.2.4 Messtechnische und systematische Fehler beim Messen mit Thermoelementen

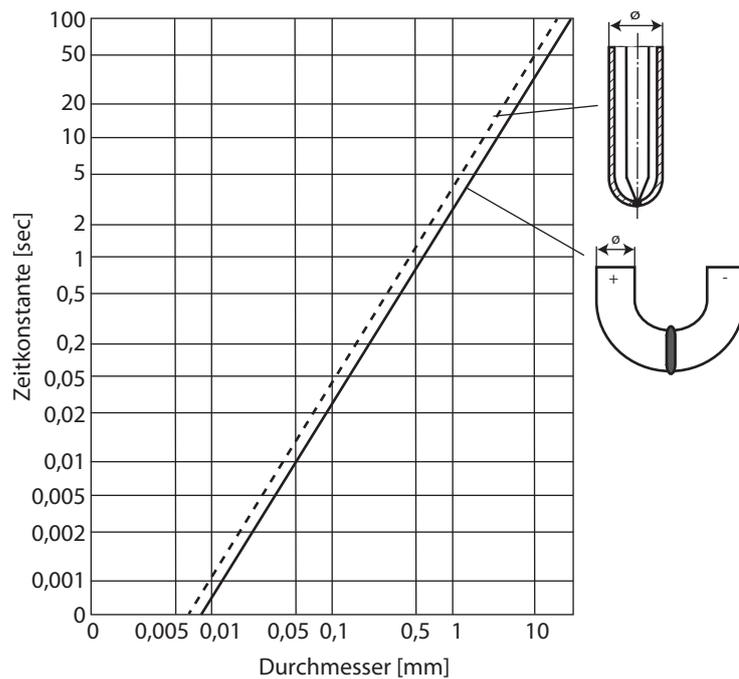
Der Gesamtfehler addiert sich aus den Abweichungen der einzelnen Elemente der Messkette nach dem Gesetz der Fehlerfortpflanzung auf. Der Systemfehler ergibt sich aus physikalischen, chemischen, metallurgischen oder sonstigen Gegebenheiten die sich auf das Messergebnis auswirken. [Bonfig, 1995, S.67]

### Fehler durch die Ausgleichsleitung

Durch das Gesetz des homogenen Stromkreises darf das Material des Thermodrahtes zwischen Heiß- und Kaltstelle nicht gewechselt werden. Dies ist aber durch die Edelmetallthermoelemente bei größeren Längen zwischen diesen beiden Stellen wirtschaftlich unrentabel. Die sogenannten Ausgleichsleitungen stellen preisgünstige Verlängerungen der Thermoelemente dar. Diese besitzen laut Definition bis 200°C die gleiche Thermospannung wie das Elementmaterial selbst. Durch die Anwendung falscher bzw. verpolt geklemmter Ausgleichsleitungen können beträchtliche Messfehler entstehen. [Bonfig, 1995, S.68]

### Fehler durch unterschiedliches Zeitverhalten

Grundsätzlich bestimmt der Durchmesser der Thermodrähte und der Messstelle die Zeitkonstante des Ansprechverhaltens eines Thermoelements. Die Zeitkonstante eines Thermoelements gibt an, welche Zeit benötigt wird, um die Masse des Thermodrahtes im Bereich der Messstelle so zu erwärmen, dass die tatsächliche Temperatur erfasst wird. Erst nach vollständigem Temperatúrausgleich zwischen Messstelle und warmem Bauteil ist dies der Fall. Folglich haben dünne Thermodrähte mit geringer Masse, eine kleine Zeitkonstante. Diagramm 1.6 zeigt den Zusammenhang zwischen Thermoelementdurchmesser und Ansprechverhalten. [v. Körtvelyessy, 1981, S.93]



**Abbildung 1.6:** Zeitkonstante in Abhängigkeit des Messstellendurchmessers [v. Körtvelyessy, 1981, S. 94]

Im Versuch werden die Thermoelemente einem Luftstrom mit einer Temperatur von 25°C und einer Geschwindigkeit von 20m/s ausgesetzt. Dabei entspricht die Wärme, die bei diesen Bedingungen an die Messstelle übertragen wird, etwa der Wärme, die durch die erhöhte Temperaturstrahlung bei 1000°C und ruhender Atmosphäre an die Messstelle übertragen wird. Die Messstelle eines Mantelthermoelementes hat im Vergleich zur Messstelle von nackten Thermodrähten eine um 50% größere Zeitkonstante (Im Diagramm 1.6 durch die strichlierte Linie dargestellt).

### Fehler durch Alterung der Thermomaterialien

Durch diesen Effekt verändern sich die Thermospannungen der einzelnen Thermodrähte. Bei der Alterung von Thermoelementen treten sowohl metallurgische, als auch chemische und physikalische Vorgänge in den Metallen in Erscheinung. Dabei spielt der Vorgang des Eindiffundierens von Fremdatomen (Verunreinigungen) in die Gitterstruktur eine wesentliche Rolle. Dies tritt besonders bei reinen Metallen, wie Kupfer, Platin oder Eisen, auf. Diese Vorgänge laufen nach den Gesetzmäßigkeiten der metallurgischen Phasendiagramme ab und werden durch die Aktivierungsenergie der Temperatur getrieben. [Bonfig, 1995, S.74]

Speziell bei NiCrSi-NiSi Thermoelementen (Typ N) zeigt sich aber ein relativ geringes Alterungsverhalten über eine lange Betriebszeit. Dies ist bedingt dadurch, dass der Alterungsmechanismus, bezogen auf die Thermospannung der beiden Schenkel, in die gleiche Richtung erfolgt. Dadurch hebt sich dieses Driften beim Messen auf. Abhilfe geben eine bestimmte Stahllegierung und eine Mineralisolierung des Schutzmantels. Dadurch bildet sich eine

schützende Oxidhülle um die Drähte, die eine wesentliche Verlängerung der Standzeit des Mantelthermoelementes bewirkt. [Bonfig, 1995, S.75]

### **Fehler an der Vergleichsstelle**

Ein Thermoelement erfasst stets Temperaturdifferenzen, d.h. es wird eine Bezugstemperatur benötigt um die Differenzspannung berechnen und so den gesuchten Temperaturwert bestimmen zu können. Das geschieht entweder über eine konstant gehaltene Vergleichsstelle (Kaltstelle) oder über eine im Messaufnehmer integrierte Kaltstellenkompensation. Ansonsten kann die Vergleichsstelle beispielsweise ein Eisbad darstellen, welches auf konstanten 0°C gehalten wird. Bei der Kaltstellenkompensation wird die Umgebungstemperatur herangezogen um die Temperaturdifferenz zu bestimmen. Problem dabei ist aber, dass Wärmeströme auf das Messgerät oder Veränderungen der Umgebungsbedingungen zu Abweichungen bzw. fehlerhaften Messergebnissen führen. Abhilfe dagegen verschaffen Temperatursensoren, die Umgebungstemperaturen erfassen und dadurch die Temperaturänderungen der Kaltstelle berücksichtigen. Eine solche Kaltstellenkompensation beinhaltet auch das hier zur Temperaturaufnahme verwendete Modul von National Instruments NI9211. Dabei ist trotzdem darauf zu achten, dass kein Temperaturgradient zwischen der Anschlussstelle des Thermoelementes und dem Thermosensor entsteht. Dies würde zu einem relativen Fehler zwischen den einzelnen Messkanälen führen. Die Thermoelemente bilden dabei selbst die Ursache dafür, da sie Wärme auf die Anschlussstellen leiten. Der Effekt kann durch Beachtung folgender Richtlinien minimiert bzw. verhindert werden [National Instruments Corporation, 2005-2007, S.18]:

- Einsatz von Thermoelementen mit möglichst kleinem Drahtdurchmesser. Dünner Draht leitet weniger Wärme von der Messstelle zum Anschluss.
- Die Thermoelemente sollen möglichst nahe beieinander geführt werden um sie auf der selben Temperatur zu halten.
- Die Thermoleitungen sollen nicht in der Nähe von kalten oder warmen Objekten verlegt werden.
- Bei der Verwendung von Verlängerungen oder Ausglerichsleitungen müssen diese aus dem selben Leitermaterial bestehen.

# Kapitel 2

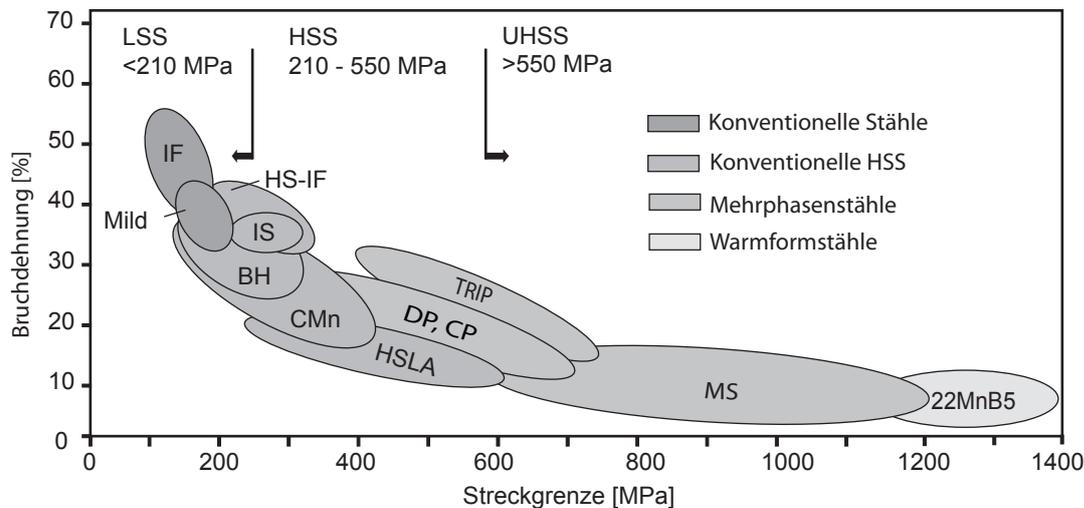
## Ausgangssituation

Das Verfahren des Presshärtens stellt den zentralen Ausgangspunkt für diese Arbeit dar. In diesem Prozess werden Stahlbleche bei Temperaturen von ca. 900°C tiefgezogen und anschließend zwischen den gekühlten Werkzeughälften rasch abgekühlt, um das gewünschte hochfeste Härtegefüge zu erreichen. Erst die Kenntnis über die wesentlichen Prozessparameter macht den Prozess beherrschbar. Diese Arbeit liefert einen wesentlichen Beitrag dafür und kann mit ihren Ergebnissen und Erkenntnissen direkt für den Prozess angewandt werden.

### 2.1 Stahlwerkstoffe für den Leichtbau

Der Trend im modernen Karosseriebau hinsichtlich der Reduzierung des Fahrzeuggewichtes wird durch konsequenten Leichtbau realisiert. Dies bedingt eine Minimierung der Blechstärken von Karosseriebauteilen. Gleichzeitig muss der Festigkeitsverlust, der mit der geringeren Blechstärke einhergeht, durch höhere Werkstofffestigkeiten kompensiert werden. Das Problem einer höheren Werkstofffestigkeit bei Stahlwerkstoffen ist aber ein Abfallen, sowohl der Bruchdehnung als auch der Verformungsfähigkeit, des Materials. Daraus ergeben sich große Einschränkungen für die Fertigung sowie der machbaren Bauteilgeometrien.

Einen Brückenschlag zwischen ausreichender Umformbarkeit und guter Festigkeit bei Stahlwerkstoffen schafft die Familie der Mehrphasenstähle. Bei diesen werden die Werkstoffigenschaften durch die Koexistenz von harten und weichen Gefügebestandteilen erzielt. Durch bestimmte Umform- und Abkühlungsbedingungen bei der Verarbeitung der Mehrphasenstähle lassen sich unterschiedliche Gefügestrukturen in den Bauteilen erzielen. Mit den geeigneten Herstellverfahren, in Kombination mit Mehrphasenstählen, können komplexe Bauteile mit sehr hohen Werkstofffestigkeiten produziert werden. [Hoff, 2007]



**Abbildung 2.1:** Streckgrenze und Bruchdehnung von Stahlwerkstoffen

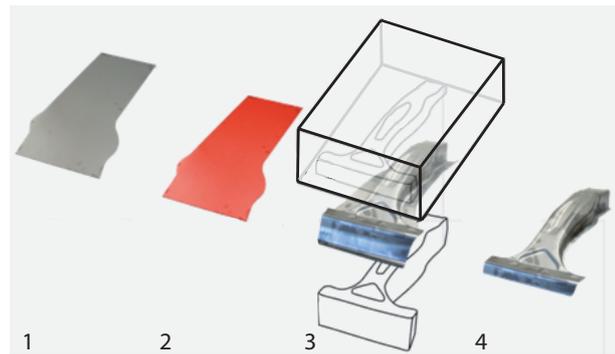
Zu den Mehrphasenstählen zählen:

- Dualphasenstähle (DP-Stähle)
- Complexphasenstähle (CP-Stähle)
- Martensitphasenstähle (MS-Stähle)
- Transformation Induced Plasticity Stähle (TRIP-Stähle)
- Twinning Induced Plasticity Stähle (TWIP-Stähle)

Eine Zuordnung der Stahlsorten zu Dehnungs- und Streckgrenzenwert ist in Abbildung 2.1 ersichtlich. Aus der Darstellung geht eindeutig hervor, dass mit steigender Festigkeit des Stahlwerkstoffes die Bruchdehnung und somit die Umformbarkeit sinkt.

## 2.2 Warmumformung

Das Verfahren der konventionellen Kaltumformung von Blechen ist durch die verminderte Zähigkeit und hohe Rückfederung von Stahlwerkstoffen mit hoher Festigkeit nicht mehr ziel führend. Die niedrigen Bruchdehnungen der Mehrphasenstähle reichen nicht mehr aus um komplexe Bauteilgeometrien umzuformen. Es tritt schon bei relativ geringen Umformgraden Bauteilversagen durch Risse ein. Außerdem würden die Prozesskräfte, bedingt durch die hohen Ausgangsfestigkeiten der Platinen, sehr groß werden und durch die Kaltverfestigung weiter ansteigen. Deshalb kommt hier das Verfahren der Warmumformung zum Einsatz, wofür hauptsächlich die niedriglegierte Stahlsorte 22MnB5 eingesetzt wird. Durch thermische Aktivierung der Formplatte erhöht sich die Duktilität des Materials und damit das Formänderungsvermögen für die Umformung. Gleichzeitig sinken die benötigten Prozesskräfte, da

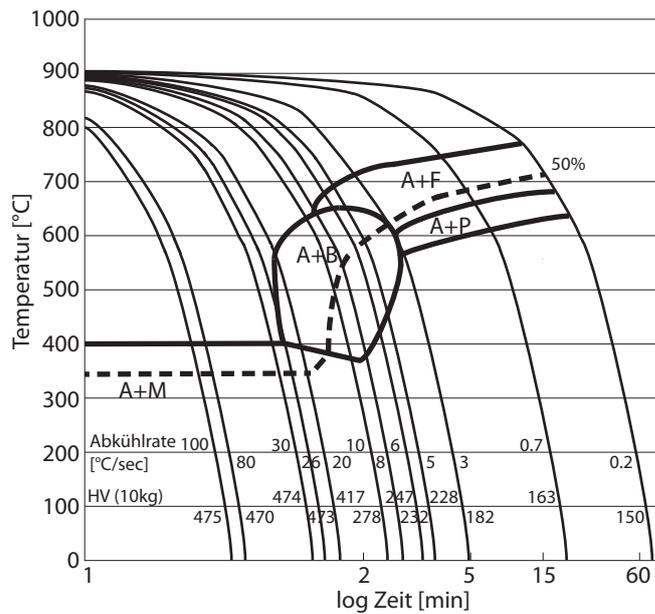


**Abbildung 2.2:** Prozessschritte beim Presshärten

auch der Fließwiderstand mit steigender Temperatur des Werkstoffes sinkt. Komplexe Bauteilgeometrien können ausgeformt werden und die Prozesskräfte bleiben, verglichen mit der Kaltumformung, gering. [Hoff, 2007]

Man unterscheidet zwischen der Halbwarmumformung von Mehrphasenstählen und der Warmumformung von Vergütungsstählen. Die Halbwarmumformung findet bei einer Temperatur zwischen  $600^{\circ}\text{C}$  und  $700^{\circ}\text{C}$ , d.h. unterhalb von  $A_{c3}$ , statt. Im Gegensatz dazu werden bei der Warmumformung von Vergütungsstählen Temperaturen von ca.  $900^{\circ}\text{C}$  angestrebt, um eine allotrope Gefügeumwandlung in Austenit zu erzielen. Man spricht speziell von dem Verfahren des Presshärtens oder auch Formhärtens, wenn der Warmumformung eine rasche Abkühlung des Bauteils im geschlossenen Werkzeug folgt. Durch diesen Vorgang erreicht man bei Vergütungsstählen eine Steigerung der Härte und der Festigkeit im Endzustand. Eine schematische Darstellung der Prozessschritte ist in Abbildung 2.2 dargestellt. Das Verfahren startet mit dem Platinenzuschnitt (1). Danach wird die Platine auf Austenitisierungstemperatur erwärmt (2) und anschließend umgeformt und gehärtet (3). Im letzten Prozessschritt erfolgt noch der Platinenbeschnitt (4) [Hoff, 2007].

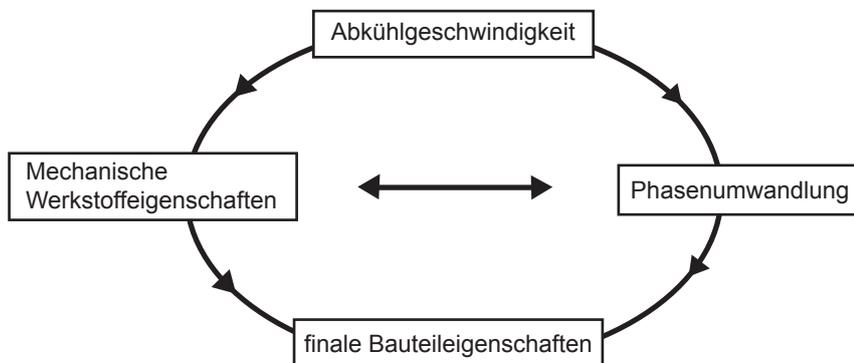
Für das Warmumformen hat sich der Vergütungsstahl 22MnB5 durchgesetzt. Dieser wird bei  $900^{\circ}\text{C}$  austenitisiert und umgeformt. Die rasche Abkühlung erfolgt durch den Kontakt mit gekühlten Werkzeugoberflächen. Der Abschreckvorgang muss mit einer Abkühlgeschwindigkeit von mindestens  $27\text{K/s}$  erfolgen. Im ZTU-Schaubild in Abbildung 2.3 sind Temperaturkurven mit verschiedenen Abkühlgeschwindigkeiten dargestellt. Mit dieser Abkühlrate klappt bei der Martensitstarttemperatur  $M_s$  bei etwa  $400^{\circ}\text{C}$  das austenitische in ein martensitisches Gefüge um. Je nach Abkühlrate bilden sich verschiedene Hauptgefügebestandteile aus und sind für die mechanischen Eigenschaften des Bauteils verantwortlich. Im Ausgangszustand besitzt der Werkstoff 22MnB5 eine Zugfestigkeit im Bereich von  $600\text{MPa}$ . Diese Zugfestigkeit erhöht sich durch das Presshärten im Endzustand auf bis zu  $1500\text{MPa}$  (siehe Abbildung 2.1 auf Seite 12) [Hoff, 2007].



**Abbildung 2.3:** Kontinuierliches Zeit-Temperatur-Umwandlungsschaubild von 22MnB5 [Burkhardt, 2008, S.18]

## 2.3 Thermische Prozessparameter für die Warmumformung

Für den Presshärtprozess ist somit die Temperatur-Zeit-Historie der Platine in jedem Prozessschritt von wesentlicher Bedeutung für das letztendlich erzielte Ergebnis. In Abbildung 2.4 ist die Wechselwirkung der Einflussgrößen im Presshärtprozess dargestellt. Ein gezielter Prozessablauf gelingt nur durch die genaue Kenntnis der thermischen Prozessrandbedingungen. Die Abkühlgeschwindigkeit des Bauteils ergibt sich aufgrund der Wärmestrahlung und des Wärmeübergangs zwischen Platine und Werkzeug. Der Emissions- und der Wärmeüber-



**Abbildung 2.4:** Wechselwirkungen der Einflussgrößen im Presshärtprozess

gangskoeffizient stellen die Größen zur Berechnung der Abkühlung des Warmumformbauteiles dar. [Hoff, 2007]

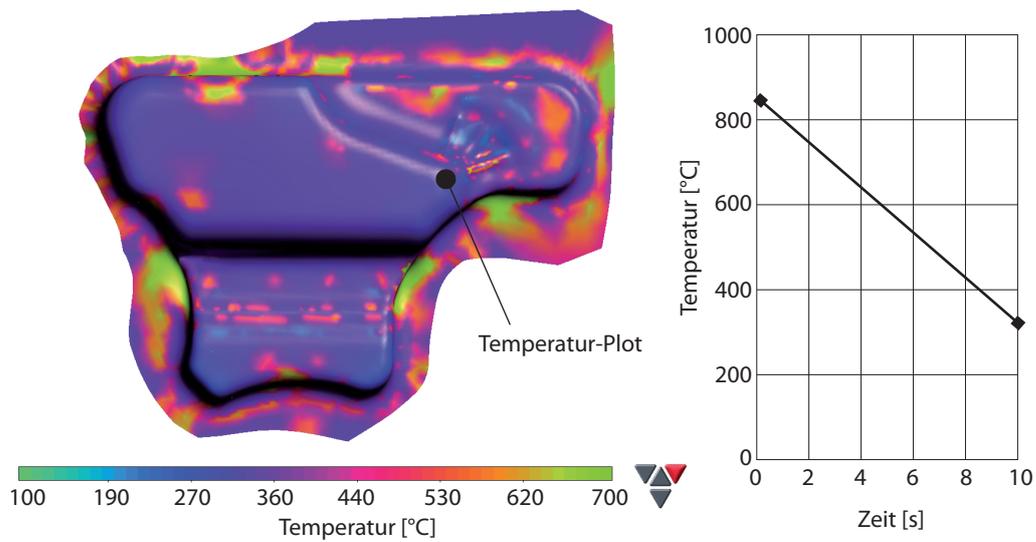
Diese Arbeit beschränkt sich auf die Bestimmung eines wichtigen Prozessparameters. Dabei handelt es sich um den Wärmeübergangskoeffizienten zwischen Platine und Werkzeug. Dazu wird der Abkühlvorgang im geschlossenen Umformwerkzeug genau betrachtet. Die Versuchsanordnung zielt darauf ab, den Zustand nach dem Umformen abzubilden, um daraus Kenntnisse über den Wärmeübergangskoeffizienten unter Realbedingungen zu gewinnen.

## 2.4 Bedeutung des Wärmeübergangskoeffizienten für die Warmumformung

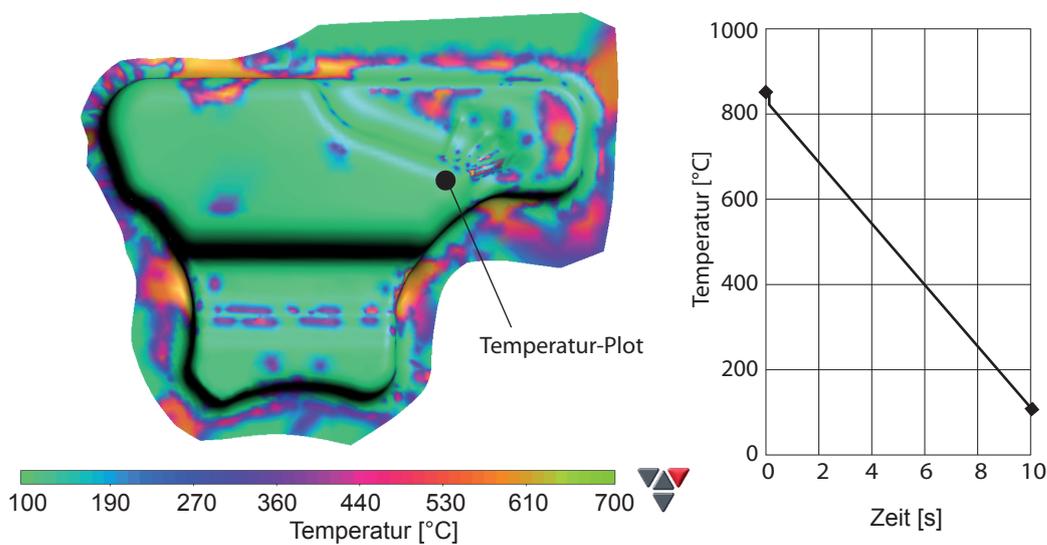
In den letzten zehn Jahren hat die Anwendung von Finite Elemente Simulationen für die Warmumformung stark an Bedeutung gewonnen. Hierbei werden bereits in der Planungsphase des Umformprozesses wichtige Erkenntnisse für die darauffolgende Werkzeuggestaltung gewonnen. Weiters wird mittels der Finite Elemente Simulation die Herstellbarkeit der Blechformteile überprüft und auch Vorhersagen über die Bauteileigenschaften für die spätere Anwendung getroffen. [Hoff, 2007]

Der Wärmeübergangskoeffizient zwischen dem Umformwerkzeug und der Formplatine spielt als wichtiger Eingabeparameter bei Finiten Elemente Simulationsprogrammen eine erhebliche Rolle. Durch ihn ist die Berechnung des Temperatur-Zeit Verlaufes des Materials an beliebigen Stellen der Platine und zu beliebigen Zeiten durch die Simulation möglich. Dieser Temperatur-Zeit Verlauf in Verbindung mit den Zeit-Temperatur-Umwandlungsschaubildern (siehe Abbildung 2.3) der jeweiligen Platinenmaterialien lässt Rückschlüsse auf das erzielte Bauteilgefüge an verschiedenen Stellen der Formplatine zu. Das jeweilige Bauteilgefüge ist repräsentativ für Bauteileigenschaften wie Festigkeit und Zähigkeit.

An dieser Stelle wird anhand einer Finite-Elemente Simulation veranschaulicht, wie der thermische Kontaktwiderstand den Temperatur-Zeitverlauf einer Platine bei der Warmumformung beeinflusst. Es werden zwei Umformsimulationen mit unterschiedlichem Wärmeübergangskoeffizienten durchgeführt. Das Ergebnis soll veranschaulichen, wie sich dieser Parameter auf die Abkühlung des Bauteils in der Simulation auswirkt.



**Abbildung 2.5:** links: Temperaturverteilung nach der Umformung mit  $\alpha = 1000\text{W}/\text{m}^2\text{K}$   
rechts: Temperatur an markierter Stelle zu Simulationstart und Simulationsende



**Abbildung 2.6:** links: Temperaturverteilung nach der Umformung mit  $\alpha = 10000\text{W}/\text{m}^2\text{K}$   
rechts: Temperatur an markierter Stelle zu Simulationstart und Simulationsende

Abbildung 2.5 und Abbildung 2.6 zeigen die Temperaturverteilungen von zwei Tank-Halbschalen nach der Warmumformung. Die Anfangstemperatur der Platine liegt für beide Bauteile bei 870°C und die Dauer der Abkühlung im geschlossenen Werkzeug beträgt 10 Se-

kunden. Durch die farbliche Darstellung der Temperaturfelder ist gut zu erkennen, dass das Temperaturniveau nach der Abkühlung mit dem geringen  $\alpha$  in Abbildung 2.5 im Durchschnitt höher liegt als im Bauteil mit dem höheren  $\alpha$  in Abbildung 2.6. Daraus geht hervor, dass in Simulation 2 innerhalb der 10 Sekunden dem Bauteil mehr Wärmeenergie entzogen wird als in Simulation 1.

In Abbildung 2.5 auf der rechten Seite und Abbildung 2.6 auf der rechten Seite sind jeweils die Temperaturen zu Simulationsstart und Simulationsende an der markierten Position am Bauteil aufgetragen. Ordnet man nun den Bauteilen einen Stahlwerkstoff zu, kann man aufgrund der werkstoffkundlichen Zusammenhänge im dazugehörigen ZTU-Diagramm eine Prognose bezüglich der Gefügebestandteile an der betrachteten Körperstelle anstellen. Die damit Verbunden Kenntnisse über die Härte der Gefügestrukturen geben Auskunft über die Festigkeitseigenschaften und Zähigkeitseigenschaften des Umformteils.



# Kapitel 3

## Methodik und Versuchsaufbau

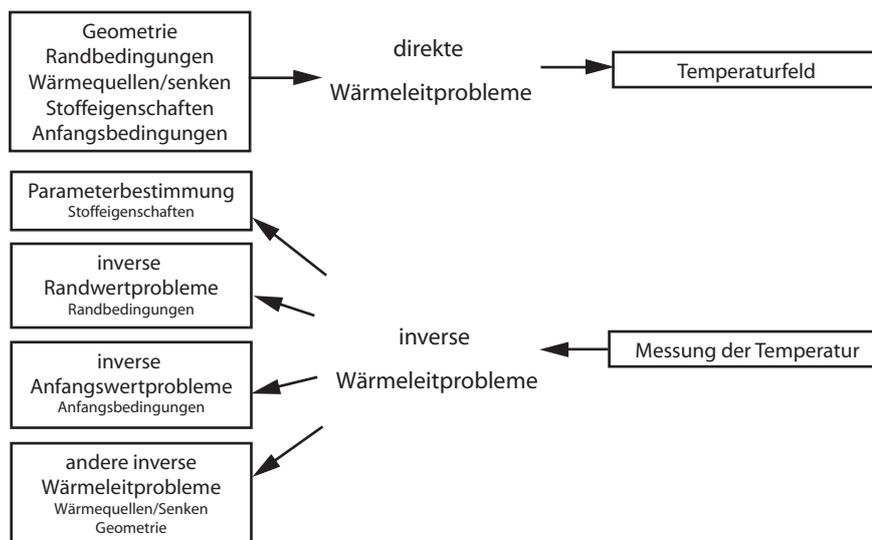
Im ersten Teil des Kapitels wird die Methodik zur Ermittlung des TKWs beschrieben. Zur Lösung des Problems wird ein Versuchsaufbau realisiert, aus dem Messergebnisse gewonnen werden. In einer anschließenden Simulation wird der Versuch abgebildet und berechnet. Die Ermittlung erfolgt durch einen manuell iterativen Vorgang, bei dem durch Variation eines Parameters, die Simulation mit den Ergebnissen aus einem Realversuch in Übereinstimmung gebracht werden. Dieser Parameter, der in der Simulation variiert wird, ist der gesuchte TKW. Stimmen die Ergebnisse aus Simulation und Realversuch letztendlich überein, so ist die Lösung gefunden. Im zweiten Teil des Kapitels wird der Versuchsaufbau näher beschrieben, der die Abkühlung in der geschlossenen Presse, ohne Reaktivbewegung zwischen Platine und Werkzeug, abbildet. Daraus erhält man gemessene Temperatur-Zeit-Verläufe, die als Randbedingungen für die Simulation dienen.

### 3.1 Das Inverse Wärmeleitproblem

In der Wärmelehre unterscheidet man direkte von inversen Problemstellungen. Um den Unterschied zu veranschaulichen, bietet sich die Vorstellung der Ursache-Wirkung-Abbildung an. Charakteristisch für direkte Problemstellungen sind vollständig bekannte Ursachen und die dazugehörigen Wirkungsweisen auf das System. Daraus ergibt sich dann die Wirkung als Resultat. Der eindeutige kausale Zusammenhang besagt dann, dass eine bestimmte Ursache genau eine bestimmte Wirkung zur Folge hat. Alle Parameter müssen für diese Bedingung vollständig gegeben sein um das Ergebnis zu erhalten.

Kehrt sich aber die Ursache-Wirkung-Abbildung der Problemstellung in beliebiger Weise um, so erhält man ein inverses Problem. Bei inversen Aufgaben stellt sich die Frage nach fehlenden Parametern, Ursachen oder Auswirkungen eines beobachteten Systems. Damit aber das Bedingungsgefüge erfüllt ist, muss der Rest als bekannt angenommen werden. In Abbildung 3.1 wird eine Klassifikation nach den verschiedenen Typen der zu suchenden Ursachen vorgenommen. [Dontchev, 2007, S. 19]

Im allgemeinen fällt die Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten unter die Gruppe der inversen Randwertprobleme. Bei diesen teilt sich die Lösung des Problems in zwei Schrit-



**Abbildung 3.1:** Schematische Darstellung der inversen Wärmeleitprobleme [Dontchev, 2007, S. 19]

te auf. Im ersten löst man das sogenannte Vorwärtsproblem mittels Realversuch. Dafür wird ein Versuchsaufbau realisiert, aus dem man bestimmte Messergebnisse erhält. Daraufhin wird per Simulation ein Modell des Versuches abgebildet und über die physikalischen Zusammenhänge berechnet. Das inverse Wärmeleitproblem kann mittels Optimierungsmethoden (z.B. LS-OPT) numerisch iterativ gelöst werden. Dazu wird ein Finite Elemente (FE) Modell als Metamodell eingesetzt.

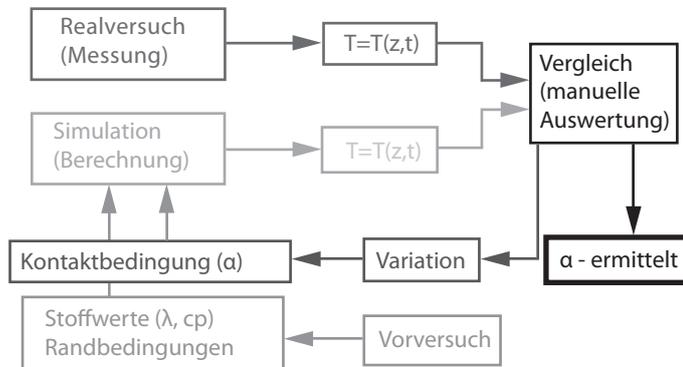
In dieser Arbeit erfolgt die Lösung des Problems, im Unterschied zur allgemeinen Lösung des inversen Randwertproblems, durch eine manuelle Iteration der Simulation. Die Simulation erfolgt mittels Finite Elemente Methode (FEM). Dabei wird durch Variation eines Parameters, die Simulation so oft wiederholt, bis eine Deckung zwischen Ergebnissen aus Realversuch und Simulation gefunden ist. Der letztendlich eingesetzte Parameter in der Simulation ergibt das endgültige Resultat der Ermittlung.

### 3.2 Methodik zur Ermittlung des TKW

Die Vorgehensweise zur Lösung des Problems beinhaltet Realversuch und Simulation. Im Versuch wird eine Probe (Platine) erwärmt und anschließend zwischen zwei Versuchszylindern (Ober- und Unterwerkzeug) unter definierter Flächenpressung abgekühlt. Dieser Vorgang stellt den Zustand nach dem Umformen und während dem Abkühlen im geschlossenen Werkzeug beim Warmumformen dar. Durch die Messung der Stempeltemperatur an verschiedenen Positionen erhält man Temperatur-Zeit-Verläufe (Abbildung 3.2) als Ergebnis aus dem Realversuch.

Bei der Simulation wird die Versuchsanordnung durch die physikalischen Zusammenhänge mathematisch und geometrisch abgebildet. Durch die Berechnung der Temperatur, in

den entsprechenden Positionen der Versuchszylinder, erhält man aus der Simulation ebenfalls Temperatur-Zeit-Verläufe. Um die Berechnung der Temperaturverläufe zu ermöglichen,



**Abbildung 3.2:** Methodik zur Ermittlung des TKW

müssen sämtliche Randbedingungen und Materialkennwerte, die dem Realversuch entsprechen, bekannt sein. Dafür werden geeignete Vorversuche durchgeführt, in denen diese Simulationsparameter ermittelt werden. In der Kontaktbedingung der Simulation legt man den thermischen Kontaktwiderstand für das Modell fest. Anfänglich wird dieser mit einem Erfahrungswert festgelegt. In der Auswertung werden die Temperaturverläufe aus Simulation und Messung verglichen. Stimmen die Ergebnisse nicht überein, wird die Simulation, unter Änderung der Kontaktbedingung ( $R_{tc}$  bzw.  $\alpha$ ), erneut durchgeführt. Der Vorgang der Auswertung und der Simulation wiederholt sich solange, bis sich eine Übereinstimmung der Temperaturverläufe einstellt. Dieser iterative Prozess wird manuell durchgeführt. Ist eine Übereinstimmung der Ergebnisse gefunden, so stellt die zugehörige Kontaktbedingung das gesuchte Ergebnis der Ermittlung dar.

### 3.3 Vorversuche

Die unbekanntenen Simulationsparameter werden durch geeignete Vorversuche ermittelt. Um eine Simulation aufsetzen zu können, sind folgende Informationen über die jeweilige Versuchsanordnung notwendig:

- Geometrie des Versuchsaufbaus
- Materialkennwerte
- thermische Anfangs- und Randbedingungen
- Einlegezeit der Platine
- Flächenpressung

Die Geometrie der Versuchsanordnung beschränkt sich auf das Ober- bzw. Unterwerkzeug und die Versuchsplatine. Bei den Stempeln handelt es sich um Zylinder mit einem Durchmesser von 20mm und einer Höhe von 60mm. Die Abmessungen und Positionen der Messstellen entnimmt man den Konstruktionszeichnungen.

Die Materialkennwerte beschränken sich für ein Wärmeleitproblem auf die Wärmeleitfähigkeit und die Wärmekapazität. Zur Ermittlung dieser beiden bestimmenden Größen werden eigens Versuchsanordnungen konstruiert. Für die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit ist eine ähnliche Vorgehensweise notwendig, wie bei der Bestimmung des TKWs.

Als thermische Anfangsbedingung wird der Zustand zu Beginn der Messung verstanden. Dafür wird eine homogene Temperaturverteilung in der Versuchsanordnung angestrebt. Die Stempeltemperatur sowie die Platinentemperatur, zu Beginn der Messung, stellen die thermischen Anfangsbedingungen dar. Bei den thermischen Randbedingungen handelt es sich um Verluste an den Systemgrenzen. Diese dienen in der Simulation zur Abgrenzung des Modells zur Umgebung. Es werden entweder adiabate Randbedingungen, konvektive Verluste und Verluste durch Wärmestrahlung als Randbedingungen definiert. Um diese zu bestimmen, werden Abkühlversuche der erwärmten Versuchskomponenten bei Umgebungsbedingungen durchgeführt. Diese lassen Rückschlüsse auf die auftretenden Verluste der einzelnen Komponenten zu.

Die Einlegezeit der Platine lässt sich aus der Temperaturmessung aus dem Versuch bestimmen. Die Platinenentnahme aus der Erwärmung ist mit einem Sinken der Platinentemperatur verbunden und das Schließen der Presse wird durch einen Näherungsschalter registriert.

Die Kraftmessung wird durch einen Ringkraftaufnehmer zwischen Werkzeug und Stößel gewährleistet. Die auftretende Flächenpressung errechnet sich aus der Prozesskraft und der Kontaktfläche zwischen Platine und Werkzeug.

### 3.3.1 Ermittlung der spezifischen Wärmekapazität $c_p$

Führt man einem Körper (z.B. Versuchsstempel) Wärme zu, dann steigt dessen Temperatur  $T$  in erster Näherung linear mit der zugeführten Wärmemenge  $Q$  an. Es gilt dabei die kalorische Grundgleichung Formel 3.1

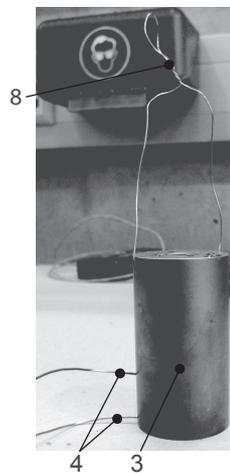
$$Q = c \cdot m \cdot \Delta T \quad (3.1)$$

Hierin bedeutet  $m$  die Masse des erwärmten Körpers und  $c$  seine spezifische Wärmekapazität. Die SI-Einheit von  $c$  ist  $J/(kgK)$ . Die spezifische Wärmekapazität ist nicht nur stoffabhängig, sondern je nach Aggregatzustand (fest, flüssig, gasförmig) des Stoffes verschieden. Einige Beispiele für Wärmekapazitäten von Stoffen sind in Tabelle 3.1 angeführt. [Walcher, 2006]

Im Versuch zur Ermittlung der Wärmekapazität des Versuchsstempelmateriale wird eine bestimmte Menge destillierten Wassers in einen isolierten Behälter gegeben und ein Magnetrührstab am Behälterboden positioniert. Nach ausreichender Temperaturlausgleichszeit befinden sich sowohl Behälter, Wasser und Magnetrührstab auf derselben Temperatur. Die Temperatur des Wassers wird an zwei Stellen mittels Thermoelementen nahe der Wasseroberfläche und am Behältergrund erfasst. Homogenität der Temperaturverteilung im Wasser wird durch den Magnetrührer gewährleistet, der für gleichmäßige Durchmischung im Behälter sorgt. Die Wärmegenerierung durch innere Reibung im Wasser aufgrund des Rührvorgangs bleibt vernachlässigbar klein. Abbildung 3.3 zeigt den verwendeten Versuchskörper mit Thermoelementen (4) an der Zylinderachse, als auch am Zylindermantel. Dieser wird nun in einem Ofen auf  $90^\circ\text{C}$  erwärmt und solange auf konstanter Temperatur gehalten, bis sich eine homogene Temperaturverteilung im Körper einstellt. Die Temperatur des Körpers

Stoff	c in $J/kgK$
Wasser (20°C)	$4,18 \cdot 10^3$
Eis (0°C)	$2,09 \cdot 10^3$
Wasserdampf (100°C)	$1,94 \cdot 10^3$
Aluminium	$0,896 \cdot 10^3$
Eisen	$0,450 \cdot 10^3$
Kupfer	$0,383 \cdot 10^3$

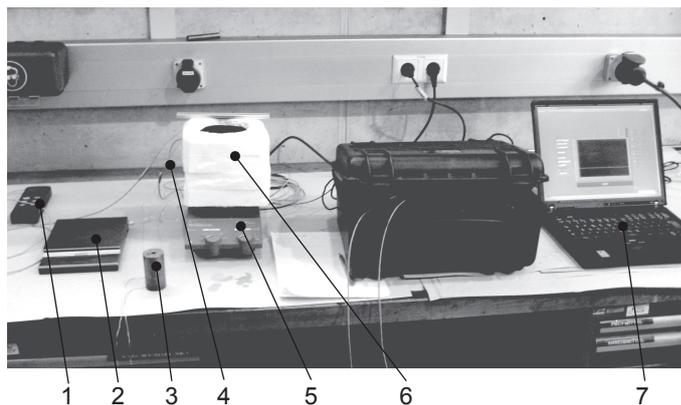
**Tabelle 3.1:** Spezifische Wärmekapazität verschiedener Stoffe bei konstantem Druck  
Walcher [2006]



**Abbildung 3.3:** Versuchskörper zur Ermittlung der Wärmekapazität

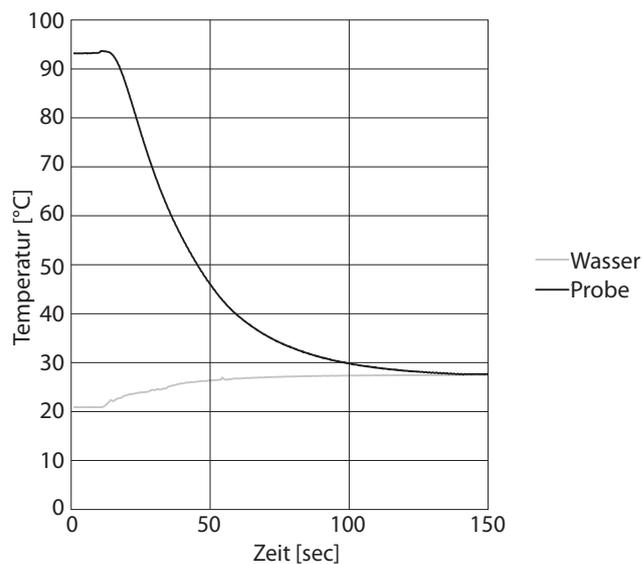
soll 100°C nicht erreichen, da sonst Teile des Wassers beim Eintauchen des Stempels verdampfen und so die Verdampfungswärme das Ergebnis verfälschen würde. Im Anschluss wird die erwärmte Probe aus dem Ofen entnommen und vollständig in das destillierte Wasser getaucht. Über die Aufhängung (8) wird der Körper in der Abkühlposition unter der Wasseroberfläche gehalten. Der Versuch endet, sobald sämtliche Thermoelemente die gleiche Temperatur erreichen und somit der Ausgleichsvorgang abgeschlossen ist. Durch die kurzen Versuchszeiten, die Behälterisolierung und die geringen Temperaturdifferenzen des Wassers werden die Wärmeverluste an die Umgebung minimiert und können dadurch in der Auswertung vernachlässigt werden. Berücksichtigung in der Auswertung findet der Magnetführstab, der sich um die Temperaturdifferenz des Wassers mit erwärmt.

In Abbildungen 3.4 ist der Versuchsaufbau dargestellt. Er setzt sich aus folgenden Komponenten zusammen: Isolierter Wasserbehälter (6) auf Magnetführer (5), Thermoelemente (4) und Messdatenerfassung (7), Prüfstück (3), Präzisionswaage zur Bestimmung der Massen (2), Kalibriergerät (1). Für die Auswertung erhält man die Temperatur-Zeit-Verläufe von Stempel und Wasser. Durch den Ausgleichsvorgang im Versuchsbehälter nähern sich diese



**Abbildung 3.4:** Versuchsaufbau zur Ermittlung der spezifischen Wärmekapazität

beiden Temperaturen unter Abgabe bzw. Aufnahme von Wärmeenergie einer gemeinsamen Endtemperatur an. Ist diese erreicht, ist die Messung abgeschlossen. In Abbildung 3.5 sind die Messkurven aufgetragen. Die Berechnung der Wärmekapazität der Probe erfolgt nach



**Abbildung 3.5:** Temperaturkurven Versuch: Wärmekapazität

Formel 3.1. Die mittels Präzisionswaage ermittelten Massen betragen  $m_{Zylinder} = 727g$  und  $m_{Wasser} = 780g$ . Die Wärmekapazität für Wasser bei  $20^{\circ}C$  nach H.D. Baehr [2006, S.466] beträgt  $c_p = 4181 \frac{J}{kgK}$ . Die Ermittelten Temperaturdifferenzen aus der Messung betragen:  $\Delta T_{Wasser} = 6,9^{\circ}C$  bzw.  $\Delta T_{Probe} = 65,8^{\circ}C$ . Unter Berücksichtigung der zusätzlichen Erwärmung des metallischen Rührstabes, ergibt sich eine Wärmekapazität für die Probe von  $c_{Probe} = 472 \frac{J}{kgK}$ .

### 3.3.2 Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit

Die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  mit der SI-Einheit  $[W/mK]$  hat wesentlichen Einfluss bei der Wärmeleitung sowie der Wärmeübertragung zwischen Festkörpern bei Kontakt. Sie ist Temperatur- und Druckabhängig und in isotropen Werkstoffen richtungsunabhängig (Formel 3.2). Jedoch kann man bei Festkörpern die Druckabhängigkeit vernachlässigen. Allgemein haben Metalle sehr hohe Leitfähigkeiten, während Flüssigkeiten und vor allem Gase besonders kleine Werte von  $\lambda$  aufweisen. [H.D. Baehr, 2006]

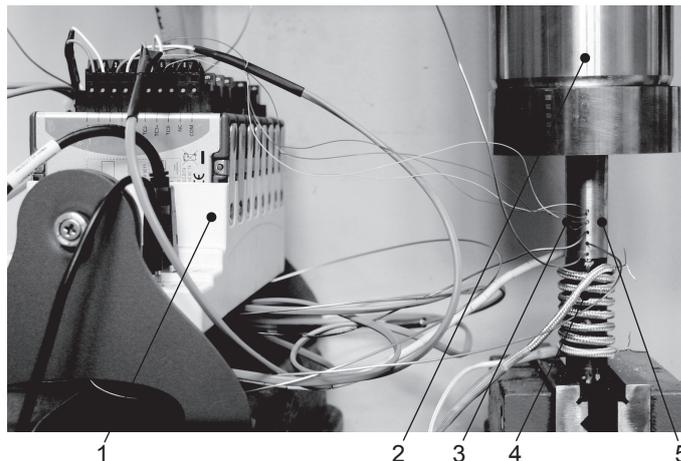
$$\lambda = \lambda(T, p) \quad (3.2)$$

In Tabelle 3.2 sind Wärmeleitfähigkeiten von verschiedenen Materialien angeführt. Die Er-

Stoff	$\lambda$ in $W/mK$
Silber	427
Kupfer	399
Aluminium 99,2	209
Legierte Stähle	13...48
Eisen	81
Mauerwerk	0,5...1,3

**Tabelle 3.2:** Wärmeleitfähigkeit ausgewählter Stoffe bei 20°C und 100kPa  
[H.D. Baehr, 2006]

mittlung der Wärmeleitfähigkeit stellt ebenso wie die Ermittlung des TKW ein inverses Wärmeleitproblem dar. Die in dieser Arbeit angewandte Ermittlungsmethodik beschränkt sich, wie bei der Ermittlung des TKW, auf die manuelle Iteration der Simulation an die Messergebnisse. Die geeigneten Messkurven für die Simulation erhält man aus der Versuchsanordnung in Abbildung 3.6. Beim diesem Versuch wird das Unterwerkzeug (4) mittels Widerstandsheizspule temperiert. Befindet sich der beheizte Teil auf der gewünschten Temperatur, so wird die Presse geschlossen. Dadurch drückt der Versuchsstempel (5) auf den beheizten Zylinder. Es findet ein Wärmeübergang und somit ein Wärmetransport innerhalb des Versuchsstempels statt, der sich durch einen Temperaturanstieg im Stempel äußert. Mittels Thermoelementen wird der Temperaturverlauf an der Körperachse erfasst und aufgezeichnet. Daraus erhält man Messkurven  $T(t, z)$  in verschiedenen Körperpunkten entlang der z-Achse des Versuchsstempels. Anschließend wird dieser Versuch mittels FEM-Simulation abgebildet. Als Randbedingung wird neben den Wärmeverlusten auch der Temperaturverlauf an der Stelle des Modells vorgegeben, der dem ersten Messpunkt am Versuchszylinder entspricht. D.h. dem Modell wird ein Temperaturverlauf als Randbedingung aus dem Versuch vorgegeben und die Temperaturverteilung berechnet sich im Körper aus Formel 3.5. Die Wärmekapazität ist bereits aus Kapitel 3.3.1 bekannt. Die Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit erfolgt hier ebenfalls durch manuell iterative FEM Simulation. Aus dem Versuch erhält man Temperaturkurven über die Zeit in fünf Positionen in regelmäßigen Abständen an der Zylinderachse (Abbildung 3.8 zeigt die Messstellenbezeichnung bzw. -anordnung am Zylinder).



**Abbildung 3.6:** Versuchsaufbau zur Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit des Stempels

Die Grundlage für die Simulation stellt die allgemeine Wärmeleitungsgleichung im Zylinderkoordinatensystem in Formel 3.3 dar.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \phi} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial \phi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.3)$$

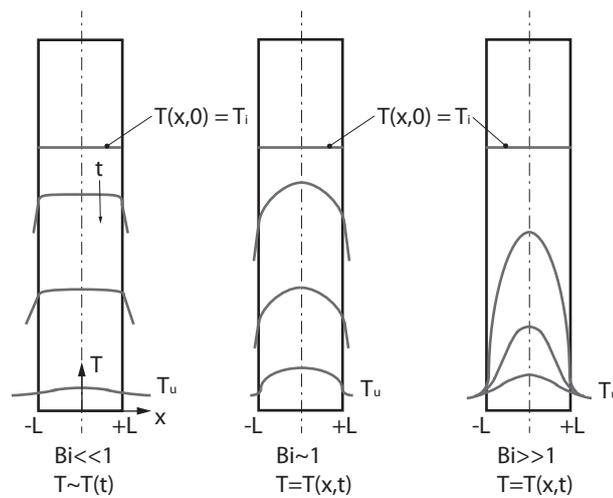
Durch die hohe Wärmeleitfähigkeit von Metall im Vergleich zur Umgebungsluft bildet sich ein homogenes Temperaturfeld in radialer Richtung aus ( $\frac{\partial T}{\partial r} = 0$ ). Dies wird durch die BIOT-Zahl beschrieben. Sie ist ein dimensionsloser Parameter und stellt ein Maß für den Temperaturabfall im Körper relativ zur Umgebung dar. In Formel 3.4 ist die Berechnung der BIOT zahl angegeben. [Incropera et al., 2007, S.260]

$$Bi = \frac{\alpha_{konv} \cdot L}{\lambda} \quad (3.4)$$

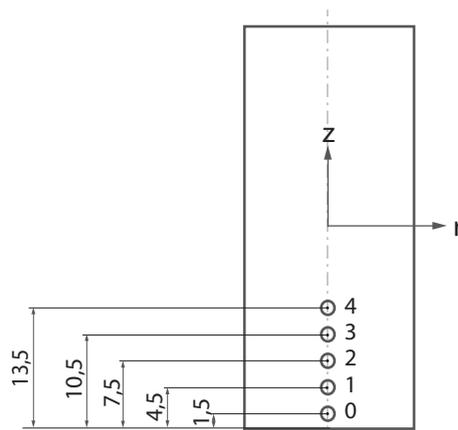
In Formel 3.4 stellt L eine charakteristische Länge dar und entspricht hier dem Zylinderradius r ( $L=0.01m$ ). Mit dem konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha_{konv} = 18 W/m^2K$  und einer Wärmeleitfähigkeit des Zylinders von  $\lambda = 18 W/mK$  ergibt sich für diesen Fall eine Biot-Zahl von  $Bi = 0.009$ . Die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  wird aus dem Werkstoffdatenblatt des Herstellers entnommen. Wenn  $Bi \ll 1$ , dann kann nach Abbildung 3.7 eine homogene Temperaturverteilung im Körper angenommen werden. In Abbildung 3.7 sind die Temperaturverteilungen in einer ebenen Wand bei beidseitiger Abkühlung durch Konvektion für verschiedene Biot-Zahlen angegeben.

D.h. im Zylinder herrscht ein vernachlässigbarer Temperaturabfall zum Rand hin. Durch diesen Umstand und der rotationssymmetrischen Geometrie des Stempels ( $\frac{\partial T}{\partial \phi} = 0$ ) kann das Problem auf den eindimensionalen Fall reduziert werden. Es tritt lediglich in z-Richtung ein Temperaturgradient auf. Weiters findet keine Wärmegenerierung im Körper statt, sodass  $\dot{q} = 0$  ist. Dies führt zur instationären, eindimensionalen Gleichung für Wärmeleitung (Formel 3.5).

$$\frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.5)$$

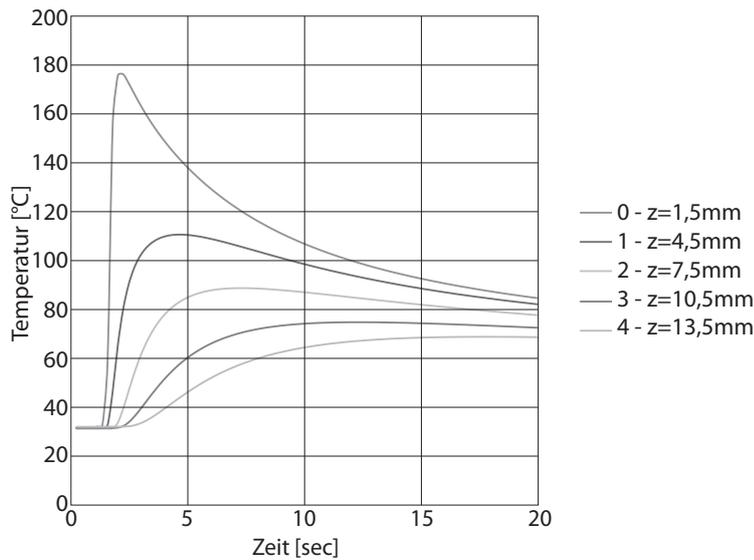


**Abbildung 3.7:** Instationäre Temperaturverteilungen für verschiedene Biot-Zahlen in ebener Wand bei beidseitiger Abkühlung durch Konvektion [Incropera et al., 2007, S.260]

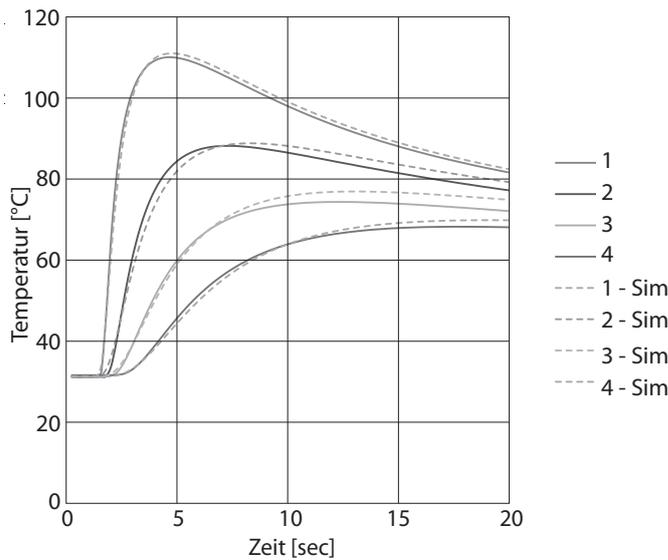


**Abbildung 3.8:** Messstellen Versuchszyylinder

Der Versuch liefert die Messkurven an fünf Punkten in regelmäßigen Abständen entlang der Zylinderachse (Abbildung 3.9). Die Bezeichnung der Messpunkte und deren Abstände von der Stirnfläche sind in Abbildung 3.8 dargestellt.



**Abbildung 3.9:** Messkurven Versuch Wärmeleitfähigkeit



**Abbildung 3.10:** Ergebnis Auswertung Messung/Simulation Wärmeleitfähigkeit

Die Temperaturkurve 0 in Abbildung 3.9 dient in der Simulation als Randbedingung an dieser Stelle. Dadurch wird der Temperaturverlauf an dieser Zylinderposition vorgegeben. Der Temperaturgradient bewirkt einen Wärmestrom im Zylinder. Die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  und die Wärmekapazität  $c_p$  bestimmen die Temperaturverteilung im Zylinder. Als unbekannter und damit gesuchter Parameter in der Simulation tritt in diesem Fall die Wärmeleitfähigkeit auf. Nach manueller Iteration der Simulation unter Variation von  $\lambda$  (siehe Abschnitt 3.2) ergibt sich für den Werkstoff 1.2379 eine Wärmeleitfähigkeit von  $\lambda = 22 \frac{W}{m^2 K}$ . Das Resultat der Annäherung ist in Abbildung 3.10 grafisch dargestellt.

## 3.4 Versuchsaufbau

Im folgenden wird der Versuchsaufbau zur Bestimmung des TKW beschrieben. Der Aufbau spiegelt die tatsächliche, physikalische Situation während des Presshärtens im geschlossenen Werkzeuge wieder. Die Versuchsplatine wird in einer Ofenmuffel erwärmt und mittels Handlungseinrichtung in das Abkühlwerkzeug transferiert. Dort findet die Abkühlung der Platine unter definierter Flächenpressung statt. Dadurch erwärmen sich Ober- und Unterwerkzeug und die Messanordnung erlaubt es, die Temperatur der Platine und der Werkzeuge während dieses Vorganges zu erfassen. Als Ergebnis erhält man Temperatur-Zeit-Verläufe von Platine und Werkzeugen in verschiedenen Positionen entlang der z-Achse. Die Anordnung und Bezeichnung der Messpunkte im Versuch sind in Abbildung 3.11 dargestellt.

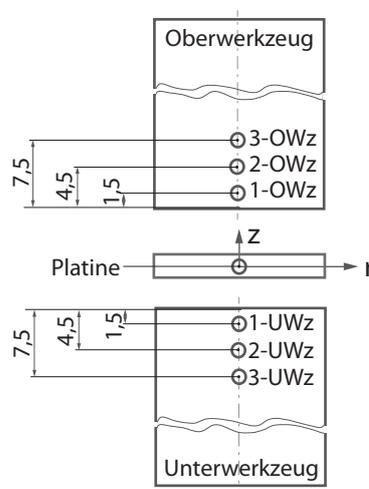


Abbildung 3.11: TKW Versuch Messpunktbezeichnung

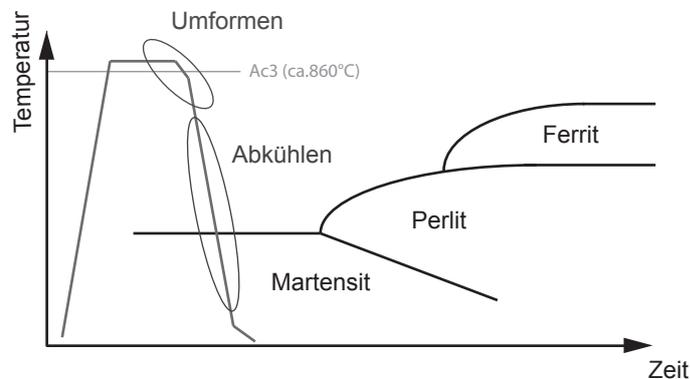
### 3.4.1 Anforderungen an den Versuchsaufbau

Während des Versuchs erfährt die Platine keine Relativbewegungen zwischen Stempel und Matrize. Dadurch beschränkt sich die Betrachtung auf den Abkühlvorgang der Platine. Die Anforderungen, die sich aus der Prozessnähe zur Warmumformung ergeben, beinhalten folgende wichtige Punkte:

- Homogene Durchwärmung der Versuchsplatine im Temperaturbereich von 100-1000°C
- Temperaturmessung in der Platine
- homogene Flächenpressungsverteilung zwischen Platine und Stempel
- kurze Transferzeiten von Ofen in Werkzeug
- Flächenpressungen bis 50MPa
- temperierbarer Versuchsstempel

Beim Presshärten erfolgt die plastische Verformung der Platine bei hoher Temperatur. Dabei soll durch eine rasche Umformung, möglichst wenig Wärme aus der Platine abgeführt

werden, um die Plastizität der Platine während des Umformvorganges hoch zu halten. In Abbildung 3.12 ist die Temperaturführung beim Presshärtprozess vereinfacht dargestellt.



**Abbildung 3.12:** Temperaturführung der Platine beim Presshärten

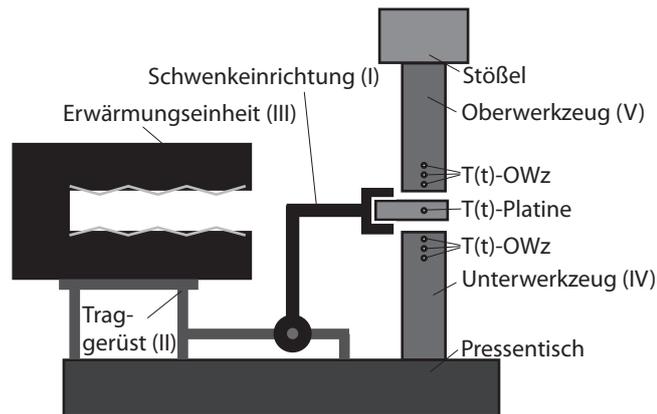
Die anschließende Abkühlung erfolgt bei vollständig geschlossenem Werkzeug. Hier wird der Blechplatine gezielt die Wärme mit hoher Geschwindigkeit entzogen um die gewünschten Gefügeeigenschaften zu erreichen. Bei Bor-legierten Stählen, die für den Presshärtprozess eingesetzt werden, beträgt die Mindestabkühlrate 27 K/s (siehe Abbildung 2.3). Werden diese Abkühlgeschwindigkeiten nicht erreicht, bildet sich ein Zwischenstufengefüge mit geringerer Festigkeit aus. Für die Bestimmung des TKWs ist der Temperaturverlauf von Platine und Werkzeug während der Abkühlung von wesentlichem Interesse. Dies stellt einige Ansprüche an die Messtechnik wie z.B. möglichst kleine Zeitkonstanten der Thermoelemente (siehe Kapitel 1.2.4).

### 3.4.2 Konstruktion

Als Basis für den Versuchsaufbau steht eine hydraulische 4t Presse der Firma Schuler am Institut für Werkzeugtechnik (T&F) und spanlose Produktion zur Verfügung. Somit sind die verfügbaren Kräfte und das Platzangebot für den Versuchsstand beschränkt und bilden die Eckpfeiler der Auslegung. Weiters wird auf die kompakte und modulare Bauweise großen Wert gelegt, da bei Stillstandszeiten des Versuchsaufbaus die Presse für anderwärtige Zwecke in Verwendung ist und somit der Aufbau abnehmbar sein soll.

In erster Phase der Konstruktion wird ein Konzept des Versuchsaufbaus ausgearbeitet, der die grundlegenden Funktionen beschreibt. Die Skizze in Abbildung 3.13 gibt einen Überblick über die erforderlichen Hauptkomponenten. Der gesamte Versuchsaufbau wurde als Teil dieser Arbeit in CAD konstruiert und im Labor T&F gefertigt. Im folgenden werden die einzelnen Baugruppen mit ihren Funktionen beschrieben und als CAD-Part bzw. als reales Teil gezeigt.

In Abbildung 3.14 und Abbildung 3.15 ist der Versuchsstand bzw. die Versuchsanordnung dargestellt. Als Basis dient eine Hydraulikpresse (1) mit einer maximalen Stößelkraft von 40kN. Das Gestell (6) trägt Grundplatte (7) und Lagerplatte (8) und wird auf den Pressen-



**Abbildung 3.13:** Konzept Versuchsaufbau

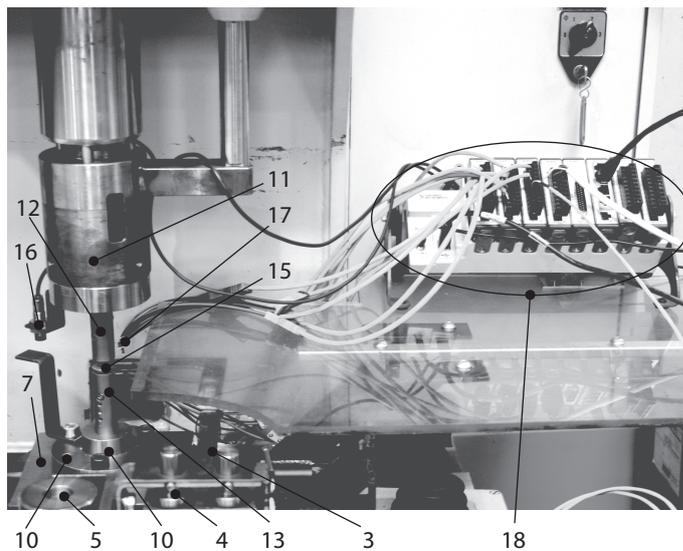
tisch aufgeschraubt. Die Lagerplatte (8) nimmt die Achse mit Drehlager (5) auf. An das Drehlager schließt das Ausgleichselement (4) mit Ausleger (3) an. Auf der Grundplatte wird die Werkzeugaufnahme-unten (10) mit dem Werkzeug-unten (12) montiert. Zusammen bilden die Komponenten (6), (7) und (8) das Traggerüst (I), die Komponenten (3), (4) und (5) bilden die sogenannte Schwenkeinrichtung (I) und die Einzelteile (10) mit (11) die Baugruppe Unterwerkzeug (IV). (siehe Abbildung 3.13). Die Baugruppe Oberwerkzeug (V) (Abbildung 3.13) besteht aus den Einzelteilen Werkzeugaufnahme-oben (11) und Werkzeug-oben (12). Zur Platinenerwärmung dient eine Heizmuffel (2). Diese wird durch die Ofenaufleger (9) auf dem Gestell (6) befestigt. Zusammen bilden sie mit dem Versorgungstrafo (19) und dem Ofenthermostat (24) die Baugruppe Erwärmungseinheit (III) in Abbildung 3.13. Die Sensorik besteht aus den Thermoelementen (18), Kraftmessdose (23) und dem Näherungsschalter (16). Zur Messdatenerfassung wird das National Instruments Compact DAQ System (17) zusammen mit einem Messrechner eingesetzt (21). Der Näherungsschalter wird über das Netzgerät (22) versorgt und die Thermoelemente werden mittels Multifunktionskalibrator (20) kalibriert.

Im folgenden werden die Hauptkomponenten näher beschrieben und dargestellt.

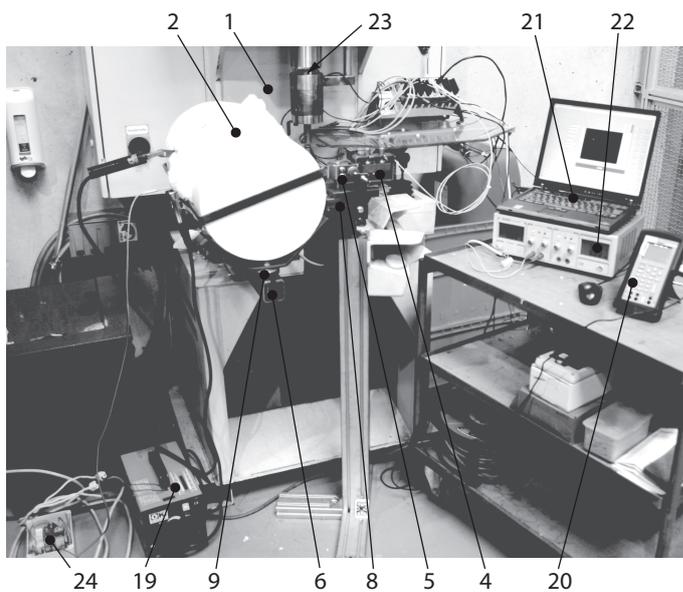
### Schwenkeinrichtung (I)

Abbildung 3.16 zeigt die Schwenkeinrichtung, welche die Bauteilprobe vom Ofen in die Presse befördert. Die Drehbewegung der Baugruppe wird durch das Hauptlager (c) gewährleistet. Dadurch wird eine kompakte Bauform ermöglicht. In den beiden Stellungen wird der Schwenkarm jeweils über einen Anschlag in seiner Position definiert.

Der Ausleger ist so ausgeführt, dass das Vorderende des Armes (b) möglichst schmal ausgeführt ist. Die Erwärmung der Platine im Ofen erwärmt gleichzeitig den vorderen Bereich des Auslegers. Durch die schmale Ausführung bleiben die erwärmten Massen klein und somit der Einfluss auf die Messstellen durch strahlende Teile vernachlässigbar gering. Die Forderung einer homogenen Flächenpressung über die gesamte Platinenfläche während der Messung erfordert ein Ausgleichselement (a) in z-Richtung. Dadurch werden der Verfahrensweg des Schwenkarms in vertikaler Richtung, bedingt durch das Niederfahren des Oberwerkzeuges

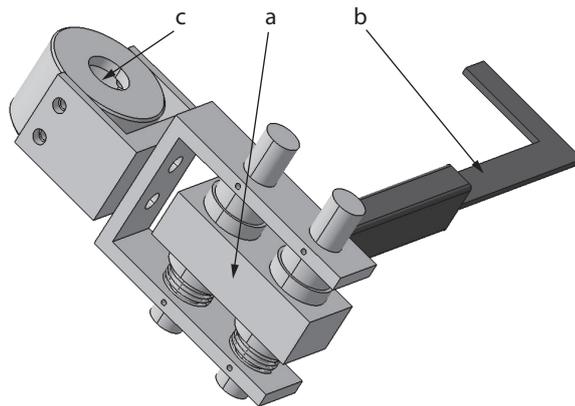


**Abbildung 3.14:** Versuchsanordnung

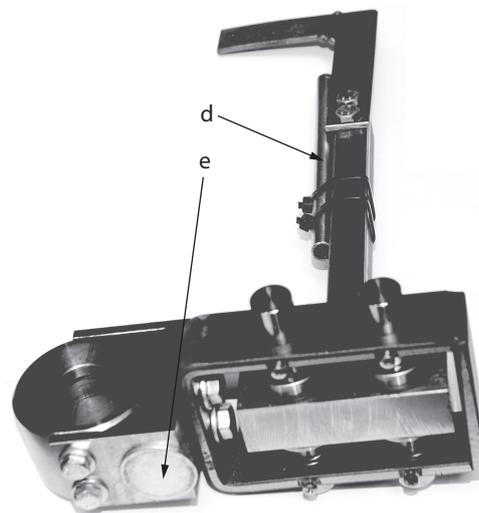


**Abbildung 3.15:** Versuchsstand TKW

und der Mitnahme der Platine durch eine Linearführung ausgeglichen. Ein Verkanten der Messflächen wird dadurch vermieden. Die gesamte Schwenkeinrichtung ist für eine Feinabstimmung des Spaltes zwischen Platine und Stempelpaar höhenverstellbar ausgeführt. In Abbildung 3.17 ist die gefertigte Baugruppe dargestellt. Zusätzlich wird ein Magnetanschlag (e) und eine Schutzhülse (d) zum Schutz des Thermoelements während die Messung angebracht.



**Abbildung 3.16:** Schwenkeinrichtung CATIA V5R19

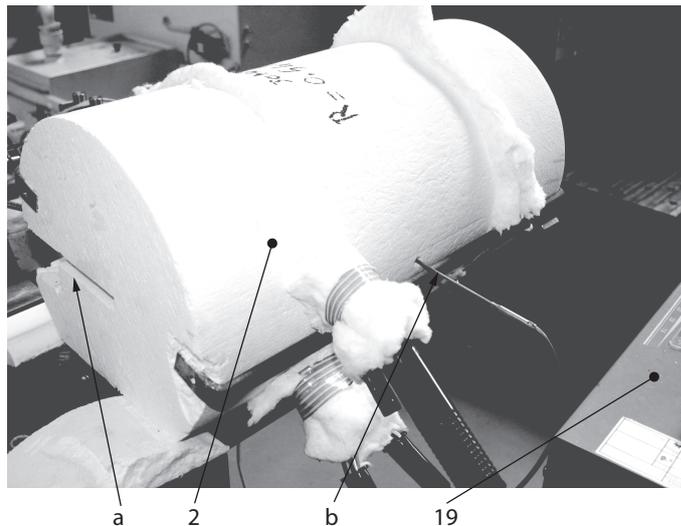


**Abbildung 3.17:** Realbauteil Schwenkarm

## Erwärmungseinheit (II)

Zur Erwärmung der Versuchsplatine stehen verschiedene Erwärmungstechnologien zur Auswahl. Wichtigstes Kriterium ist die homogene Durchwärmung über den gesamten Platinenquerschnitt und zugleich eine gezielte Erwärmung auf eine bestimmte Temperatur. Die Erwärmung soll gut regelbar sein, damit verschiedene Temperaturniveaus eingestellt werden können. Zugleich soll die Anwesenheit des Erwärmungsequipments keinen Einfluss auf die sensible Sensorik zur Temperaturerfassung der Messung haben. Als letzte Anforderung gilt noch die Integrierbarkeit in den kompakten und modularen Versuchsaufbau.

Aus diesem Anforderungsprofil heraus erweist sich eine elektrisch beheizte Ofenmuffel (Abbildung 3.18) als geeignetste Methode. Dabei handelt es sich um eine widerstandsbeheizte Muffel mit einem Innendurchmesser von 150mm. Durch die große Wandstärke der Isolierung ist eine ausreichende Kapselung zur Messstelle gegeben. Die Spannungsversor-



**Abbildung 3.18:** Ofenmuffel mit Spannungsversorgung

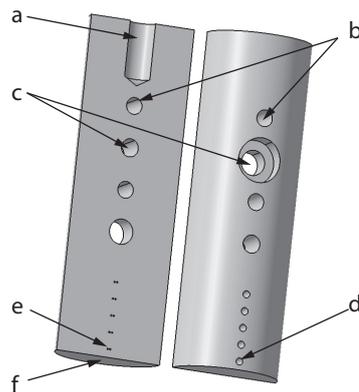
gung der Heizmuffel (2) erfolgt über einen handelsüblichen Transformator (19). Die Regelung der Erwärmungsstrecke wird durch ein Thermostat realisiert, der die Muffelinnentemperatur mittels Thermoelement (b) überwacht.

Die homogene Durchwärmung durch Konvektion ist bei dünnwandigen Bauteilen schon nach kurzen Haltezeiten gewährleistet. Eine geeignete Ausführung der Ofenabdeckung (a) ermöglicht die Abschirmung der Messstellen von der Ofenöffnung und lässt aber gleichzeitig das Einschwenken der Versuchsplatte in die Muffel zu.

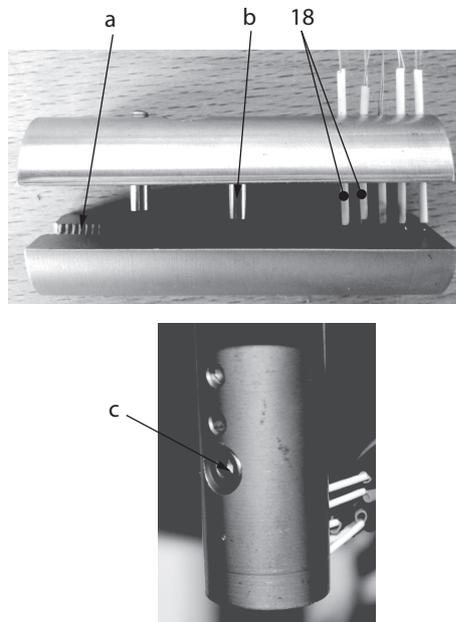
### **Unter- und Oberwerkzeug (IV), (V)**

Bei der Konstruktion des Versuchsstempels ergab sich ein evolutiver Prozess bedingt durch verschiedene Schwierigkeiten in der Umsetzung der Anforderungen. Die genaue Positionierung der Thermoelemente sowie deren Fixierung an der Zylinderachse stellte die größte Herausforderung dar. Herkömmliche Mantelthermoelemente in Bohrungen waren aufgrund der Zeitkonstante der Elemente (siehe Kapitel 1.2.4) und der Fixierung an den Messstellen nicht zielführend, sodass die Thermoelemente direkt auf die Messstellen aufgeschweißt werden müssen. Dies geschieht mittels Mikro-Laserschweißung. Die genauen Messpositionen werden vorerodiert (Abbildung 3.19 Bohrungen (e)) um die Thermodrähte exakt einsetzen zu können. Dies ist aber nur durch eine Teilung des Stempels möglich, um dadurch die Messstellen für das Schweißen und das Erodieren zugänglich zu machen. Mit dem Verfahren des Erodierens wird lediglich eine Schnittbreite von 0,2mm abgetragen und der Stempeldurchmesser verringert sich dadurch nur unwesentlich. Durch die Bohrungen (d) in der zweiten Stempelhälfte werden die aufgeschweißten Thermoelemente (18) nach außen geführt (Siehe Abbildung 3.20).

Der Stempeldurchmesser wird von der Presskraft bestimmt. Die zur Verfügung stehende Presse kann maximal 40kN Kraft am Stößel liefern. Um die Prozessnähe des Versuches zum



**Abbildung 3.19:** Versuchsstempel CATIA V5 R19



**Abbildung 3.20:** oben: Geteilter Stempel mit aufgeschweißten Thermoelementen  
unten: Verschraubter Stempel im eingebauten Zustand

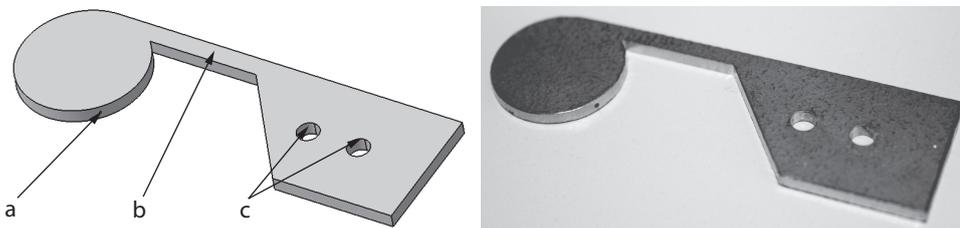
Presshärten zu bewahren, müssen Flächenpressungen an der Kontaktfläche bis zu 50MPa erreicht werden. Da aber Grenzwerte der Sättigung des TKWs hinsichtlich der Flächenpressung ermittelbar sein sollen, werden auch Kontaktdrücke bis zu 100MPa benötigt. Dies ist nur mit einem Stempeldurchmesser kleiner 22mm realisierbar. Der gewählte Durchmesser von 20mm erfüllt diese Bedingung.

Um beim Zusammenbau die Positioniergenauigkeit einhalten zu können, sind die beiden Stempelhälften zweifach miteinander über Passungen (b) verstiftet und verschraubt (c). An der oberen Stirnfläche ist eine Gewindebohrung (a) zur Aufnahme des Bauteils am Pressenstößel vorgesehen. Der Werkstoff als auch die Oberflächenqualität der Kontaktfläche (f) des

Versuchstempels variieren je nach Versuchskonstellation und darf daher bei der Fertigung nicht beschädigt oder unkontrolliert verändert werden.

### Versuchsplatine (15)

Beim Design der Platine steht der Umstand im Vordergrund, dass sich der auskragende Bereich der Platine auch bei Temperaturen jenseits von 900°C, bedingt durch sein Eigengewicht, nicht nach unten verbiegen darf. Gleichzeitig sollte aber der Steg (b) (Abbildung 3.21) möglichst schmal ausgeführt sein, um einen Wärmetransport vom Schwenkarm zum Kopfteil der Platine während der Messung klein zu halten. Ansonsten wären zusätzliche Wärmeströme in der Simulation zu berücksichtigen bzw. die Auswertung würde verfälscht.



**Abbildung 3.21:** links: Versuchsplatine CATIA V5R19

rechts: Platine mit Bohrung zur Aufnahme des Mantelthermoelements

Um die Stegbreite (b) zu minimieren wurden Versuche durchgeführt die zeigen, dass verschiedene für die Versuche relevanten Platinenwerkstoffe, bei den geforderten Temperaturen, durch die Erwärmung unverformt bleiben. Außerdem ist noch eine Messbohrung (a) mit Durchmesser 0,3mm zur Aufnahme eines Mantelthermoelements vorhanden. Die Bohrung wird erodiert.

Bei der Fertigung der Platinen ist darauf zu achten, dass die ursprüngliche Rohmaterialoberfläche unverändert bleibt. Sie darf keinesfalls durch spanende Bearbeitung oder durch Oxidation verändert werden, denn der Zustand der Oberfläche hat wesentlichen Einfluss auf den TKW der Versuchskonstellation.

# Kapitel 4

## Messung

An dieser Stelle wird der Ablauf zur Ermittlung der Temperaturverläufe aus Unter- bzw. Oberwerkzeug und der Platine beschrieben. Als Randbedingungen für die Simulation dienen die Temperaturmessdaten aus dem Realversuch. Wie in Kapitel 1.2 bereits erläutert, erfolgt die Erfassung der Temperaturverläufe mittels Thermoelementen. Um die Reproduzierbarkeit und Genauigkeit der Messung zu gewährleisten, müssen wichtige Regeln im Umgang mit dem Messequipment vor und während der Messung eingehalten werden. In weiterer Folge werden der Ablauf der Messung sowie eine Anleitung zum richtigen Ablauf der Messung beschrieben.

### 4.1 Vorbereitung der Messung

Die wichtigsten Punkte in der Vorbereitung betreffen die Kalibrierung der Messgeräte und die Konfiguration der gewünschten Versuchskonstellation. Alle in Kapitel 1.1 angeführten Haupteinflussparameter auf den TKW müssen beachtet werden um eine gezielte Aussage über das erhaltene Ergebnis treffen zu können. Die Haupteinflussparameter auf den TKW soll an dieser Stelle noch einmal aufgelistet werden:

- Flächenpressung
- Oberflächenrauigkeit
- Zwischenstoffkonfiguration
- Härte der Werkstoffe
- Wärmeleitfähigkeit

Aus dem Prozess der Warmumformung resultieren weitere Einflussgrößen, die bei der Versuchskonstellation beachtet werden müssen. Die Messungen werden gezielt auf die gewünschten Anforderungen hin durchgeführt. Eine Messung vereint somit folgende spezifische Einflussparameter:

- Platinenwerkstoff
- Platinenbeschichtung
- Platinenoberflächenqualität
- Platinentemperatur

- Werkzeugwerkstoff
- Werkzeugoberflächenqualität
- Werkzeugtemperatur
- Flächenpressung/Kontaktdruck

Zusammen ergeben die Einflussparameter die Versuchskonstellation für eine gewünschte Anwendung in der Warmumformung. In der Versuchsvorbereitung wird der gewünschte Versuch mit all seinen spezifischen Parametern vorbereitet.

### 4.1.1 Kalibrierung der Thermoelemente

Die Kalibrierung der Thermoelement dient zum Abgleich der tabellierten Thermospannung mit jener des Messelements. Dadurch wird die Reproduzierbarkeit des Anzeigewertes für das kalibrierte Thermoelement bei richtiger Handhabung innerhalb der Genauigkeitstoleranz gewährleistet. Gleichzeitig kann der Fehler der Messstrecke überprüft werden. Für die Kalibrierung wird ein Multifunktionskalibrator mit hoher Genauigkeit des Types PCL1200 vom Hersteller OMEGA verwendet. Dieser kann sowohl gewünschte Spannungswerte vorgeben als auch über einen Messeingang die Temperatur direkt erfassen. Die Kalibrierung erfolgt über die definierten Thermospannungen für den jeweiligen Thermoelementtyp. Eine festgestellte Abweichung der Thermoelementspannung kann anschließend in der Programmierung der Messdatenerfassung berücksichtigt werden.



**Abbildung 4.1:** Multifunktionskalibrator PCL-1200

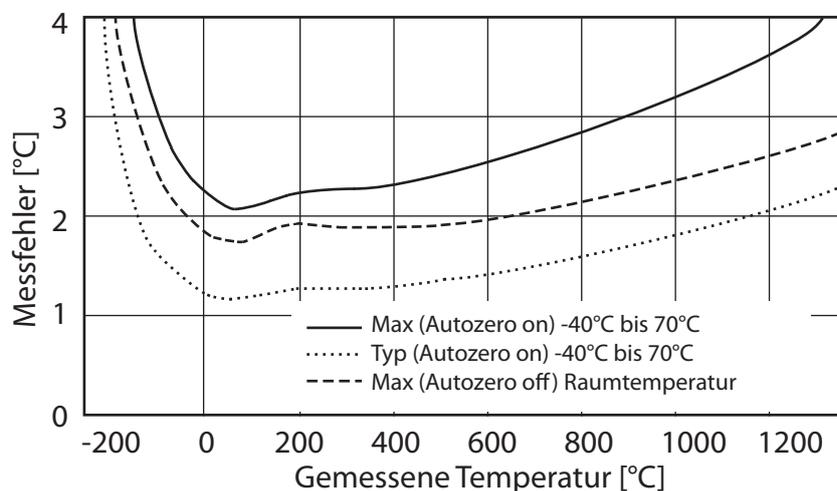
In Anhang B befinden sich die Thermospannungstabellen für die Thermoelementtyp K. Die Genauigkeit der Temperaturmessung setzt sich aus den Einzelkomponentengenauigkeiten der Messkette zusammen. Hier werden Thermoelemente der Klasse 1 verwendet, welche der höchsten Genauigkeit entsprechen. Aus der Literatur gelten die Genauigkeiten für Thermoelemente aus Tabelle 4.1.

Für die Erfassung der Thermospannungen wird das System NI-CompactDAQ-USB-Chassis NIcDAQ-9178 zusammen mit vier Thermoelementeingangsmodulen NI-9211 von National

Klasse	1	2	3
Grenzabw. ( $\pm$ )	$1,5^{\circ}\text{C}$ oder $0,004 \cdot T$	$2,5^{\circ}\text{C}$ oder $0,0075 \cdot T$	$2,5^{\circ}\text{C}$ oder $0,015 \cdot T$
Typ E	$-40^{\circ}\text{C}$ bis $800^{\circ}\text{C}$	$-40^{\circ}\text{C}$ bis $900^{\circ}\text{C}$	$-200^{\circ}\text{C}$ bis $40^{\circ}\text{C}$
Typ J	$-40^{\circ}\text{C}$ bis $750^{\circ}\text{C}$	$-40^{\circ}\text{C}$ bis $750^{\circ}\text{C}$	-
Typ K	$-40^{\circ}\text{C}$ bis $1000^{\circ}\text{C}$	$-40^{\circ}\text{C}$ bis $1200^{\circ}\text{C}$	$-200^{\circ}\text{C}$ bis $40^{\circ}\text{C}$

**Tabelle 4.1:** Auszug aus Toleranzklassen für Thermoelemente (nach DrN IEC 584-2)  
[Bonfig, 1995, S.58]

Instrumente verwendet. Der Hersteller gibt für die Messung mit dem Thermoelement Typ K einen Gesamtfehler nach Abbildung 4.2 von ca. 2K an.



**Abbildung 4.2:** Messfehler mit Thermoelementtyp K [National Instruments Corporation, 2005-2007, S.17]

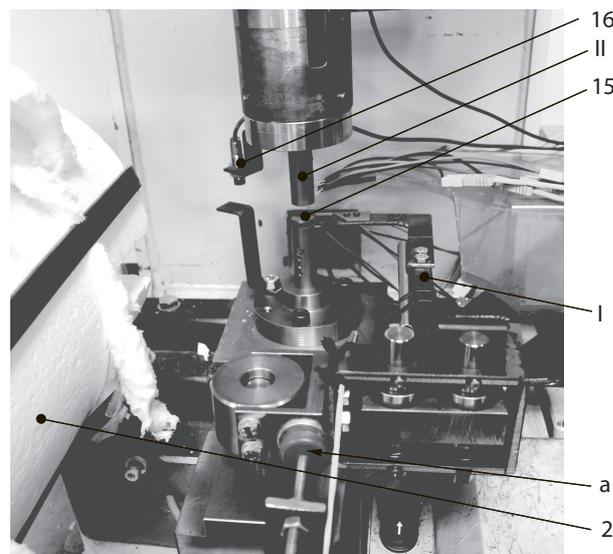
### 4.1.2 Vorkehrungen am Versuchsstand

Vor Versuchsstart wird die Offenmuffel auf die gewünschte Temperatur vorgeheizt. Die Spannungsversorgung für den Näherungsschalter erfolgt über ein Netzteil und das Ausgangssignal wird über das Spannungseingangsmodul NI-9201 erfasst. Der Näherungsschalter detektiert die Endposition des Oberwerkzeuges im geschlossenen Zustand (Messposition). Er gibt ein Spannungssignal aus, sobald die Position erreicht ist. Er ist höhenverstellbar montiert (Abbildung 3.14 - Position (13)) damit eine Feineinstellung der Distanz vorgenommen werden kann. Die Versorgung und Datenerfassung der Kraftmessdose (Abbildung 3.14 - Position (6)) erfolgt ebenfalls über das NIcDAQ-9178 Chassis und NI-9237 Brückenmodul. Im Anschluss wird die gewünschte Pressenkraft eingestellt und mittels Kraftmessdose im geschlossenen Zustand der Presse überprüft. Vor Beginn jeder Messung wird noch der Zustand

der homogenen Temperaturverteilung in den Versuchskomponenten abgewartet. Ist der Temperaturengleichprozess abgeschlossen und befinden sich die Temperaturen der Bauteile auf dem gewünschten Niveau, kann eine Messung durchgeführt werden. Die Abtastfrequenz der Temperaturerfassung ist laut Hersteller mit  $14\text{Samples}/\text{sec.}$  angegeben. Diese bezieht sich auf die Verwendung eines Messmoduls pro Thermoelement. Die integrierte Kaltstellenkompensation (Cold Junction CJC) des NI9211 Moduls benötigt bei Aktivierung der Funktion einen Messkanal. Die Abtastfrequenz des Gerätes halbiert sich mit jedem zusätzlichen Eingangskanal. Bei der Verwendung von vier NI9211 Modulen (Zwei Messkanäle plus der Kaltstellenkompensation pro Modul für sieben Messstellen im Versuch) ergibt sich eine maximale Abtastfrequenz für die Temperaturmessung von  $4,5\text{Samples}/\text{ses.}$  Das entspricht einer zeitlichen Auflösung von  $0,2222$  Sekunden.

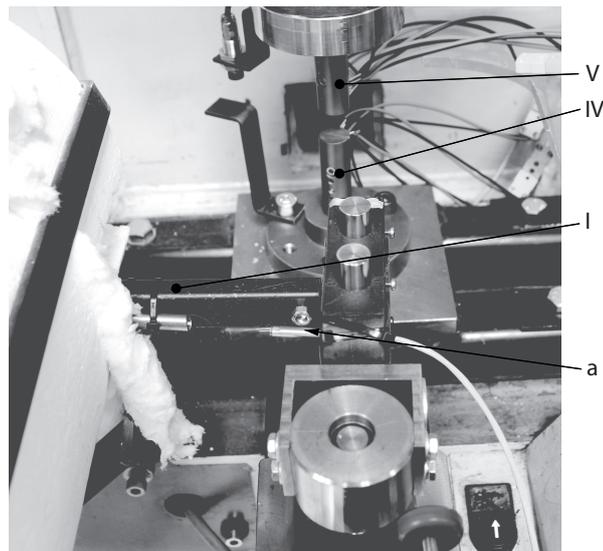
### 4.2 Ablauf der Messung

In Abbildung 4.3 ist der Versuchsaufbau in seiner Ausgangsposition ersichtlich. Der Schwenkarm (I) mit Versuchsplatine (15) wird vom Haltemagnet (II) in seiner Grundstellung fixiert. Das Oberwerkzeug (V) befindet sich im oberen Totpunkt d.h. der Näherungsschalter (16) ist geöffnet. Die Heizmuffel (2) befindet sich auf Versuchstemperatur.



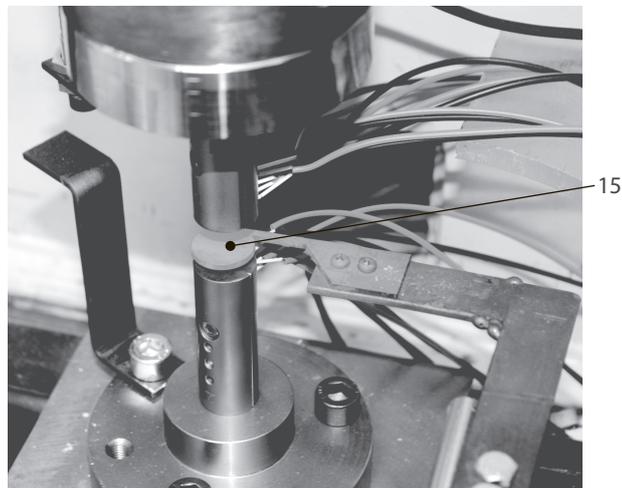
**Abbildung 4.3:** Ausgangsposition der Messung

Am Beginn der Messung wird der Schwenkarm (I) manuell um  $90^\circ$  geschwenkt und platziert die Platine (15) zwischen Ober- und Unterwerkzeug (IV),(V). Der Schwenkarm (I) dreht um  $90^\circ$  und schwenkt die Platine (15) in die Muffel (2) ein. Dort wird die Platine durch Konvektion und Wärmestrahlung der Heizelemente auf die Versuchstemperatur aufgeheizt. Das Thermoelement (a) erfasst während dem Aufheizvorgang die Platinentemperatur. (Abbildung 4.4)



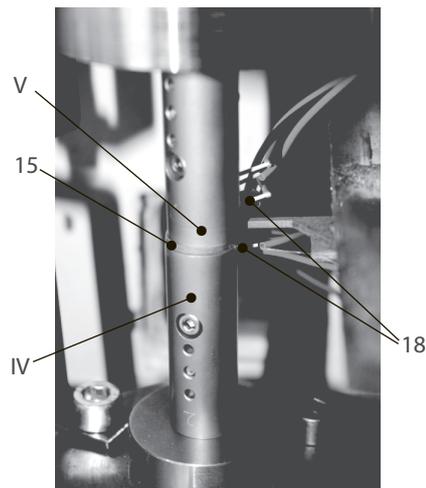
**Abbildung 4.4:** Versuchsplatine in eingeschwenkter Position (Erwärmung)

Nach Erreichen der Versuchstemperatur wird die Schwenkeinrichtung händisch wieder in die Grundstellung zurückgeschwenkt. Die Transferzeit von der Erwärmung bis in die Messposition wird gemäß dem Realprozess bemessen. Dadurch erfährt die Platine (15) eine vergleichbare Abkühlung durch Konvektion und Wärmestrahlung an die Umgebung. Die erwärmte Platine (15) vor dem Schließen der Presse ist in Abbildung 4.5 dargestellt.



**Abbildung 4.5:** Grundstellung der erwärmten Platine für die Messung

Die Presse schließt und der Wärmeübergang von der Platine (15) auf Unter- und Oberwerkzeug (IV),(V) beginnt. Der Wärmestrom erwärmt die Werkzeuge und die Thermoelemente (18) erfassen die Temperaturentwicklung an der Zylinderachse von Unter- und Oberwerkzeug (IV),(V). Ist der Temperaturengleich über sämtliche Versuchsbauteile erfolgt, endet



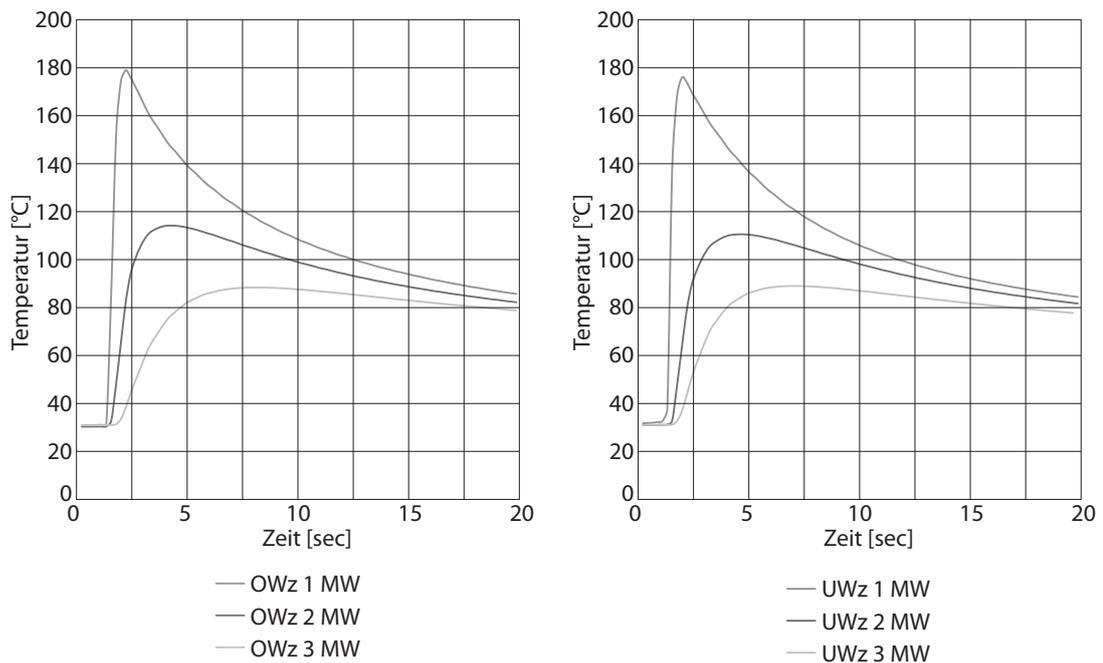
**Abbildung 4.6:** Geschlossenes Werkzeug während der Messung

die Messung. Die abgekühlte Platine (15) wird vom Schwenkarm entfernt, beschriftet und eine neue wird auf den Schwenkarm (I) aufgespannt.

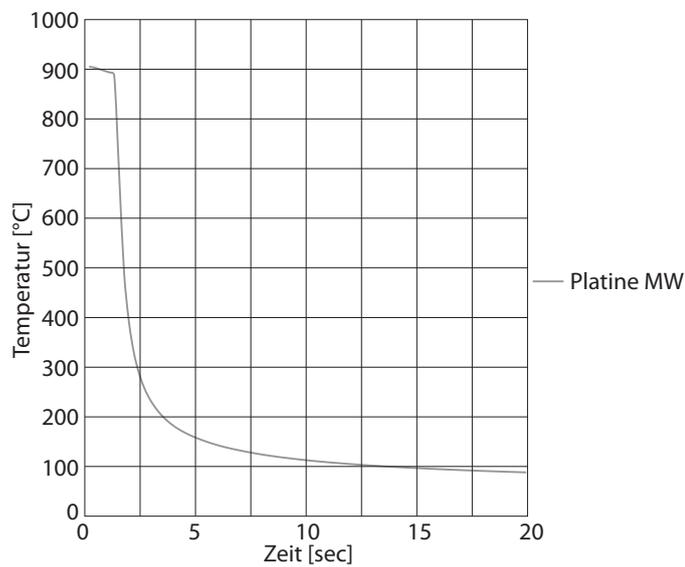
### 4.3 Ergebnis der Messung

Mit drei Messdurchgängen pro Versuchskonstellation wird die Reproduzierbarkeit der Messung nachgewiesen. Die Zeiten werden dabei über das Signal des Näherungsschalters beim Schließen synchronisiert.

Hier wurde als Platinenwerkstoff der austenitische Stahl 1.4301 verwendet. Im Presshärtprozess wird der Bor-legierte Stahl 22MnB5 eingesetzt. Im Gegensatz zum austenitischen 1.4301 findet bei der Abkühlung des 22MnB5 eine allotrope Umwandlung des Gefüges statt. Für den hier beschriebenen Versuch wurde bewusst ein Stahl ohne allotroper Umwandlung durch Abkühlung gewählt, um die innere Wärmegenerierung durch die Gefügeumwandlung zu vermeiden. Diese latente Wärme äußert sich in den Temperaturverläufen der Platine, als auch in der Temperaturentwicklung der Werkzeuge. Um die Auswertung der Ergebnisse für die Validierung der Messung, wie es für diese Arbeit vorgesehen ist, zu vereinfachen, wurde der austenitische Stahl 1.4301 für die ersten Versuche herangezogen. Als Ausblick werden aber Versuche mit dem Bor-legierten Stahl durchgeführt. Das Ergebnis ist in Abbildung 4.7 für das Ober- und Unterwerkzeug und in Abbildung 4.8 für die Platine dargestellt. Durch die kurze Schließzeit der Presse ergeben sich zwischen Ober- und Unterwerkzeug beinahe symmetrische Messkurvenverläufe. In Abbildung 4.8 sieht man die hohe Abkühlrate der Versuchsplatine im geschlossenen Werkzeug.

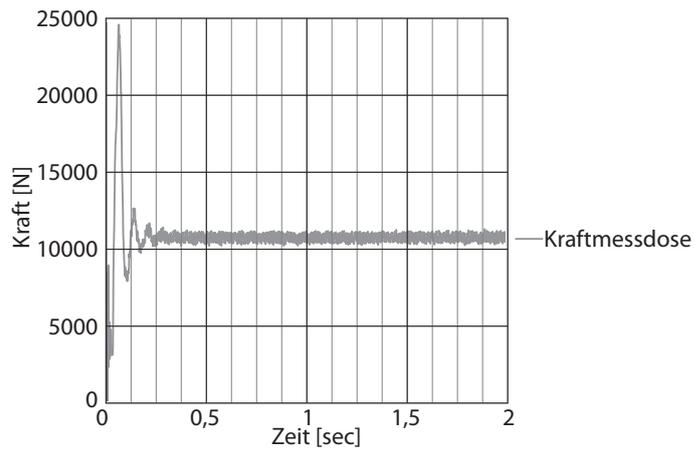


**Abbildung 4.7:** links: gemessener Temperatur-Zeit Verlauf im Oberwerkzeug  
rechts: gemessener Temperatur-Zeit Verlauf im Unterwerkzeug



**Abbildung 4.8:** Temperatur-Zeit Verlauf der Platine

Abbildung 4.9 zeigt die Pressenkraft in den ersten zwei Sekunden nach dem Schließen der Presse. Im Diagramm ist deutlich das Einschwingverhalten der Kraftmessung zu erkennen. Nach 0,25 sec ist ein stationäres Kraftniveau in der Presse erreicht. Das Rauschen der Kraft-



**Abbildung 4.9:** Kraftmessung

messdose rührt vom großen Messbereich her. Der Ringkraftaufnehmer vom Typ tecsis F6210 ist für Kräfte von 0 bis 80kN ausgelegt. Das Rauschen beträgt ca.  $\pm 500\text{N}$  und liegt daher mit 1,25% des Endwertes innerhalb der vom Hersteller angegebenen Genauigkeit [tecsis GmbH, 2000].

# Kapitel 5

## FEM Simulation

In der Finiten Elemente Methode (FEM) Simulation wird der Realversuch durch ein mathematisches Modell abgebildet und die Temperaturentwicklung berechnet. Es handelt es sich um ein numerisches Näherungsverfahren, das bereichsweise angewendet wird. Die Ansatzfunktionen zur Lösung der Differentialgleichungen werden nicht über eine ganze Struktur gewählt, sondern nur für kleine Teilgebiete. Dadurch ergibt sich als Näherungsfunktion für das Gesamtgebiet, die Summe der einzelnen Lösungsansätze der Teilgebiete. Solche Teilgebiete werden Finite Elemente genannt und diese sind über Knoten mit den Nachbarelementen verbunden. Das Gesamtkonstrukt wird als Mesh (Netz) bezeichnet und bildet das gewünschte FE-Modell. In dieser Arbeit wird zur Modellierung und Berechnung des Problems MSC Marc eingesetzt. [Groth and Müller, 2000, S.27]

Zu Beginn des Kapitels werden der Aufbau und die Parameter des verwendeten Modells beschrieben. In weiterer Folge werden die Simulationsergebnisse dargestellt und diskutiert. Auf die manuelle Iteration des Parameters in der Simulation wird erst in Kapitel 6 - Auswertung näher eingegangen.

### 5.1 Ablauf der Simulation

Für die versuchsrelevanten Bauteile Oberwerkzeug, Unterwerkzeug und Platine muss ein FEM-Modell erstellt werden. Um das Modell von der Umgebung abzugrenzen, werden in weiterer Folge Anfangs- und Randbedingungen definiert. Vernachlässigungen sind solange zulässig, solange der Einfluss auf die Ergebnisse klein bleibt.

#### 5.1.1 FE-Netz

Die rotationssymmetrische Geometrie der Versuchskomponenten wird ausgenutzt und ein zweidimensionales FE-Modell erstellt. Die Größe der Elemente im FE-Netz hat wesentlichen Einfluss auf die Genauigkeit der Simulation, andererseits steigt der Rechenaufwand für die Berechnung mit steigender Anzahl der Elemente stark an. Aus diesem Grund wird die Maschenweite des FE-Netzes entsprechend der zu erwartenden Temperaturgradienten

gestaltet. Das bedeutet, dass im Bereich großer Temperaturveränderungen, engmaschiger vernetzt wird als in Bereichen mit geringeren Temperaturgradienten. Das rotationssymmetrische 2D-Netz ist in Abbildung 5.1 dargestellt. In Tabelle 5.1 sind die Parameter für das FE-Netz angegeben.

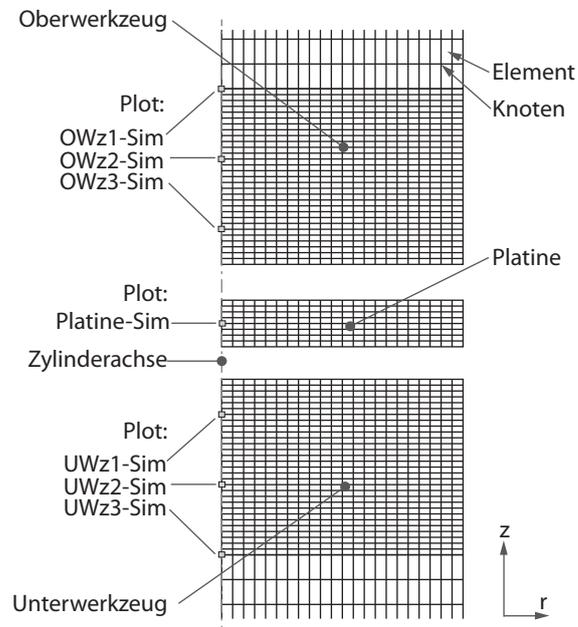


Abbildung 5.1: FE-Modell (kleinste Elementkantenlänge 0,25mm)

## 5.1.2 Parameter für das FE-Modell

Für das FE-Modell müssen sämtliche Parameter der Versuchskomponenten und der Laborumgebung zum Zeitpunkt der Messung bekannt sein. Diese fließen als Materialeigenschaften, Rand-, Kontakt- und Randbedingungen in die Simulation ein. Im folgenden wird kurz auf diese Simulationsparameter eingegangen.

### Materialien

Werkzeug und Platine bestehen aus verschiedenen Werkstoffen. Die für eine mechanothermisch gekoppelte Simulation notwendigen Parameter zur Beschreibung der Materialien sind die Dichte, E-Modul, Wärmeleitfähigkeit und die Wärmekapazität. Die Werkstoffeigenschaften der Werkstoffe in der Versuchskonstellation sind in Tabelle 5.2 angeführt.

Die Wärmeleitfähigkeit und die Wärmekapazität des Werkstoffes 1.2379 wurden in den Vorversuchen (Kapitel 3.3) ermittelt. Die restlichen Werkstoffkennwerte entstammen den jeweiligen Werkstoffdatenblättern der Hersteller.

Bezeichnung	Wert
Analyse Class	Thermal/Structural
Analyse Dimension	Axissymmetric
Finite Stiffness	Solid
Element Class	Quad 4
Element Type	10
Anzahl Elemente Werkzeug	1896
Anzahl Elemente Platine	176
Gesamtanzahl Elemente	4144
Anzahl Knoten Werkzeug	2019
Anzahl Knoten Platine	207
Gesamtanzahl Knoten	4245
kleinste Elementkantenlänge in [mm]	0,25

**Tabelle 5.1:** Parameter FE-Netz

## Randbedingungen

Die Randbedingungen dienen zur Abgrenzung des Modells zur Umgebung hin. Als thermische Randbedingung

können die Wärmeverluste der Werkzeuge in die Simulation vernachlässigt werden (siehe Kapitel 3.3.2). Die Wärmeverluste der Platine sind aufgrund der hohen Temperaturdifferenz zur Umgebung nicht zu vernachlässigen.

Durch die mechanischen Randbedingungen werden Stempel und Platine in ihren Positionen zu den jeweiligen Zeitpunkten definiert. Zu Beginn der Messung entspricht dies dem Zustand bei geöffneter Presse im oberen Totpunkt. Es werden alle Freiheitsgrade der Teile gesperrt bis auf die Translation in Zylinderachsenrichtung. Der Schließvorgang der Presse wird für Oberwerkzeug und Platine weggesteuert festgelegt, sodass die Kinematik jener des Realprozesses entspricht. Das Unterwerkzeug bleibt fest eingespannt. Die thermischen Randbedingungen sind in Tabelle 5.3 angeführt.

## Anfangsbedingungen

Als thermische Anfangsbedingung gilt die Temperatur der Versuchskomponenten zu Beginn der Messung. Die Temperaturverteilung in den Stempeln ist sowohl bei der Simulation, als auch bei der Messung homogen. Die Starttemperatur der Platine entspricht der jeweiligen Versuchstemperatur. Im gezeigten Beispiel wird die Platine auf 900°C erwärmt. Tabelle 5.4 listet die thermischen Anfangsbedingungen des konkreten Versuches auf.

## Kontaktbedingung

In der Kontaktbedingung wird der Wärmeübergang zwischen den Versuchskomponenten beschrieben. Den Zusammenhang zwischen Wärmestrom und Temperaturdifferenz stellt der

Eigenschaft	Einheit	Wert
Bez.: X155CrVMo12-1 Nr.: 1.2379		
Dichte	$[kg/m^3]$	7700
E-Modul	$[N/mm^2]$	205000
Wärmeleitfähigkeit	$[W/mK]$	22
Wärmekapazität	$[J/kgK]$	420
Bez.: X5CrNi18-10 Nr.: 1.4301		
Dichte	$[kg/m^3]$	7900
E-Modul	$[N/mm^2]$	200000
Wärmeleitfähigkeit	$[W/mK]$	23
Wärmekapazität	$[J/kgK]$	460

**Tabelle 5.2:** Werkstoffeigenschaften FE-Modell [Arcelor Tenasteel, 2002; Thyssen-Krupp NIROSTA, 2004]

Beschreibung	Art	Einheit	Wert
Verluste Zylinder bei (UT=29°C)	Konvektion	$[W/m^2K]$	18
Verluste Platine bei (UT=29°C)	Konvektion	$[W/m^2K]$	18
	Emissionsgrad	-	0,8

**Tabelle 5.3:** thermische Randbedingungen (UT...Umgebungstemperatur)

thermische Kontaktwiderstand (Formel 1.1) her. Es kann zusätzlich ein Nahkontaktwiderstand eingegeben werden, der den Wärmestrom bei der Annäherung der Grenzflächen bestimmt. Dieser Nahkontakt wird hier nicht berücksichtigt. In Tabelle 5.5 sind die Kontaktbedingungen und der Kontaktwiderstand angegeben. Das Simulationsprogramm MSC Marc verlangt als Eingabeparameter den Wärmeübergangskoeffizienten  $\lambda$  anstatt den thermischen Kontaktwiderstand  $R_{tc}$ . Diese beiden stehen über Formel 1.2 miteinander in Beziehung.

## 5.2 Ergebnis der Simulation

Als Ergebnis der Simulation erhält man zu beliebigen Zeiten die entsprechende Temperaturverteilung in den einzelnen Bauteilen. Die Abbildung 5.2 und Abbildung 5.3 zeigen die Temperaturentwicklung in den Versuchskomponenten zu verschiedenen Zeitpunkten der Simulation. Die Temperaturskala gibt die farbliche Zuordnung der Knotentemperaturen zu den dargestellten Farben.

Zu Beginn der Simulation verharrt das System eine Sekunde im oberen Totpunkt (Abbildung 5.2) um die Zeit des Einlegevorganges des Realversuches zu berücksichtigen. In dieser Zeit treten Verluste der Platine durch Konvektion und Wärmestrahlung auf.

Beschreibung	Einheit	Wert
Anfangstemperatur OWz	[°C]	29,8
Anfangstemperatur UWz	[°C]	30,1
Anfangstemperatur Platine	[°C]	904,4

**Tabelle 5.4:** thermische Anfangsbedingungen

Parameter	Einheit	Wert
Contact Bodies	-	Deformable
Contact Type	-	Touching
Contact Areas	-	Potential Contact
Wärmeübergangskoeffizient OWz/Platine	[W/m <sup>2</sup> K]	8000
Wärmeübergangskoeffizient UWz/Platine	[W/m <sup>2</sup> K]	6000

**Tabelle 5.5:** Kontaktbedingung FE-Modell

Beschreibung	Parameter	Einheit	Wert
Simulationszeit	Loadcase Time	[s]	20
Zeitschrittweite	Stepping Procedure	-	Multi-Criteria

**Tabelle 5.6:** Jobparameter Simulation)

Nach dem Schließen der Presse tritt Kontakt zwischen der Platine und den Werkzeugen auf und der Wärmeübergang findet statt (Abbildung 5.2). Für die Zeitdiskretisierung wird eine adaptive Zeitschrittweite in Abhängigkeit des größten Temperaturgradienten verwendet. Dadurch kann die Temperaturentwicklung, auch bei sehr hohen Temperaturgradienten, sehr gut aufgelöst werden.

Plottet man die Temperaturverläufe in den der Messpunkte entsprechenden Knoten, erhält man die der Messung entsprechenden Ergebnisse. Diese sind in Abbildung 5.4 (links) für das Oberwerkzeug, in Abbildung 5.4 (rechts) für das Unterwerkzeug und in Abbildung 5.5 für die Platine dargestellt.

Die Kurven OWz1-Sim/UWz1-Sim bilden das Äquivalent zur Messstelle mit 1,5mm Abstand von der Kontaktfläche. OWz2-Sim/UWz2-Sim und OWz3-Sim/UWz3-Sim sind die jeweils den Abständen 4,5mm bzw. 7,5mm entsprechenden Knoten. Dies ist aus Abbildung 5.1 bzw. Abbildung 3.11 ersichtlich.

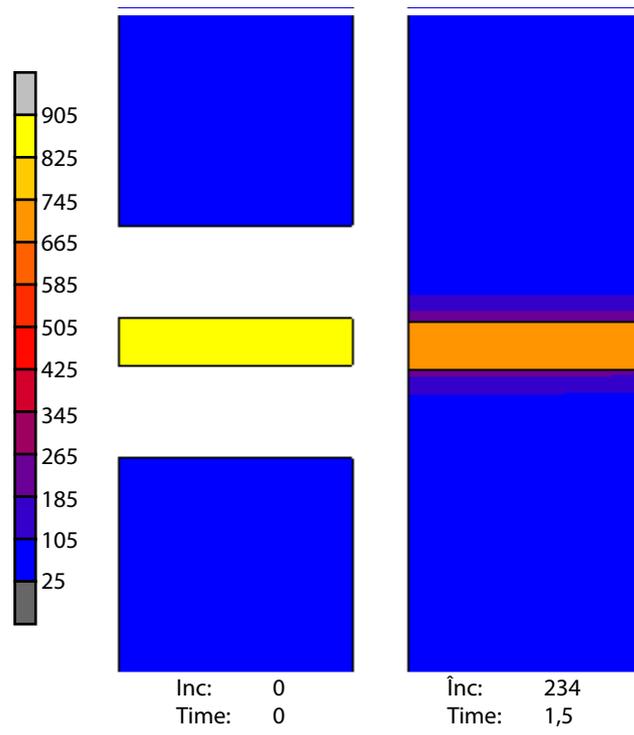


Abbildung 5.2: links: Simulationszeit=0sec; rechts: Simulationszeit=1,5sec

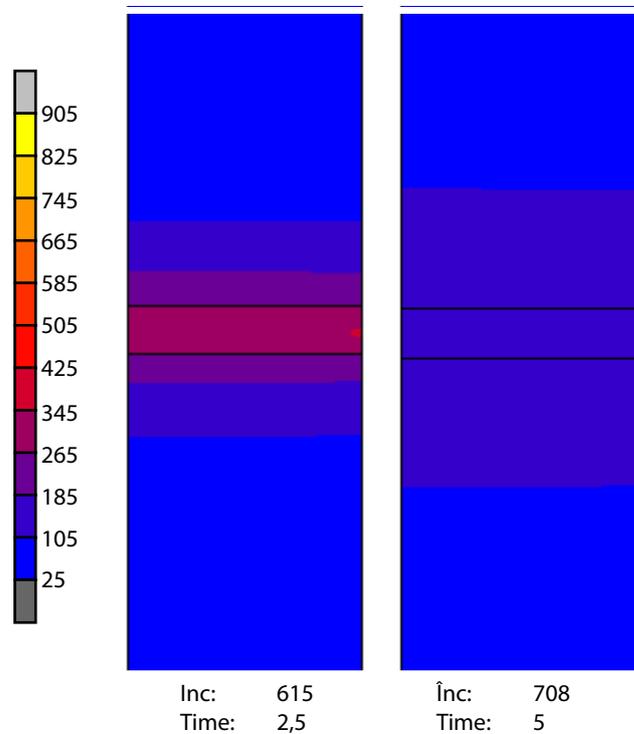
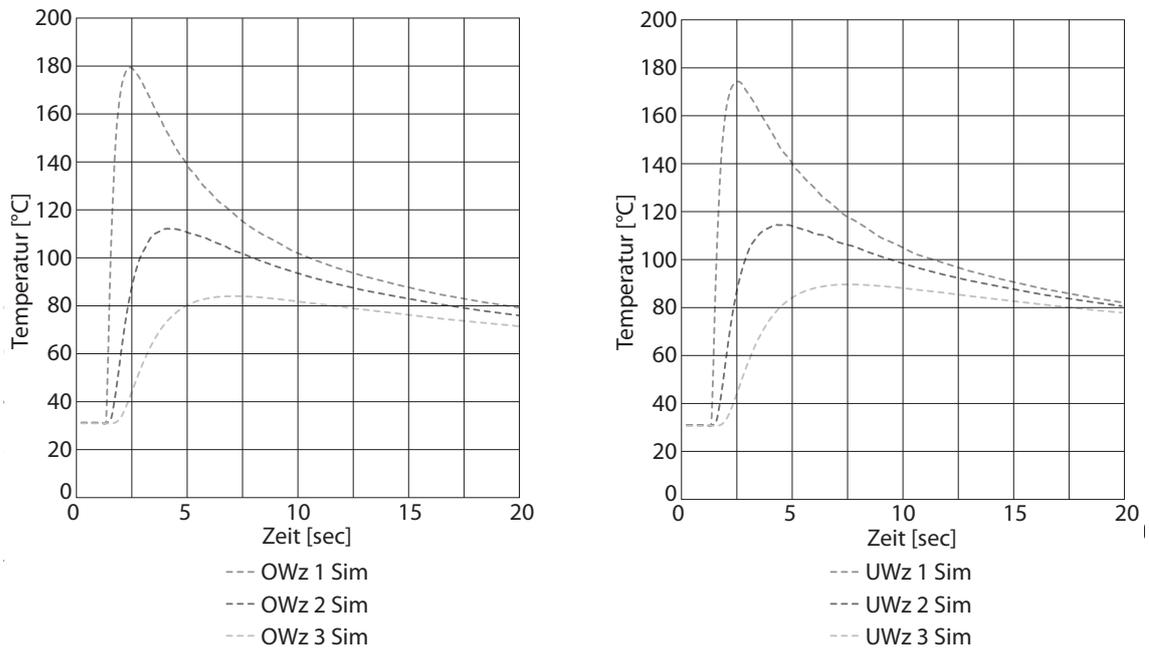
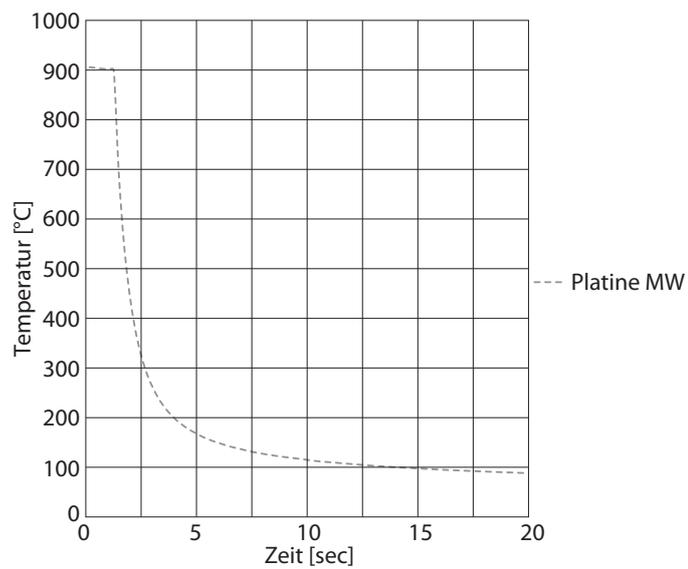


Abbildung 5.3: links: Simulationszeit=2,5sec; rechts: Simulationszeit=5sec



**Abbildung 5.4:** links: Temperatur-Zeit-Verlauf aus Simulation im Oberwerkzeug  
rechts: Temperatur-Zeit-Verlauf aus Simulation im Unterwerkzeug



**Abbildung 5.5:** Temperatur-Zeit-Verlauf Simulation in der Platine



# Kapitel 6

## Auswertung

An dieser Stelle werden die aus der entwickelten Ermittlungsmethodik erhaltenen Ergebnisse dargestellt und beurteilt. Es wird gezeigt, dass die beschriebene Methode geeignet ist, den thermischen Kontaktwiderstand mit dieser Vorrichtung zu ermitteln. Abschließend werden Verbesserungsmöglichkeiten aufgezeigt, um die Genauigkeit des ermittelten TKWs zu optimieren.

### 6.1 Vergleich Messung und Simulation

Um die Qualität der Übereinstimmung von Simulation zu Realversuch zu beurteilen, wird die Abweichung zwischen den Temperaturkurven berechnet. Daraus ergibt sich eine mittlere Abweichung, welche als Maß für die Aussagekraft des erhaltenen TKWs des Versuches verstanden werden kann. Die Abweichung errechnet sich nach Formel 6.1, wobei  $t_n$  der n-te Zeitschritt bedeutet und die Messung bzw. Simulation  $m$  Zeitschritte lang ist. Der Mittelwert folgt aus Gleichung 6.2.

$$\Delta T(t_n) = |T_{Mess}(t_n) - T_{Sim}(t_n)| \quad (6.1)$$

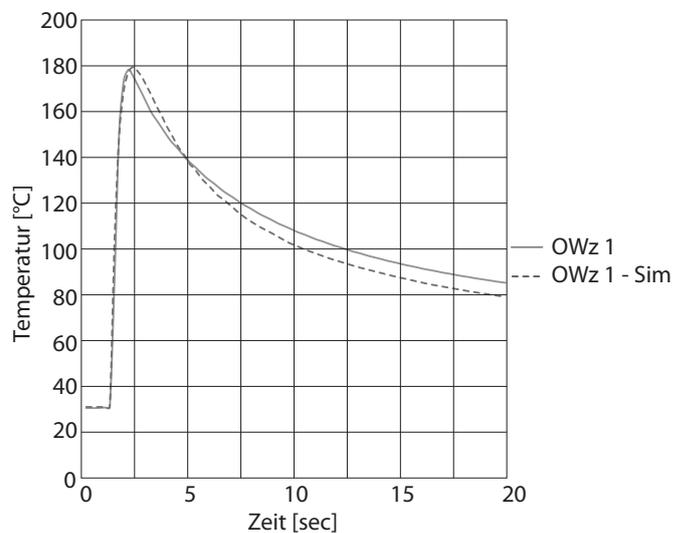
$$\bar{T} = \frac{\sum_{n=0}^m \Delta T(t_n)}{m} \quad (6.2)$$

Die Versuchskonstellation in der hier beschriebenen Ermittlung setzt sich aus den Versuchsparametern in Tabelle 6.1 zusammen. In einer Konstellation werden sämtliche Einflüsse auf den TKW berücksichtigt, d.h. das Resultat bezieht sich eindeutig auf die eingestellten Parameter. Als Beispiel der Auswertung wird im folgenden das Oberwerkzeug betrachtet. Betrachtet wird der Messpunkt 1 (siehe Grafik 3.11 bzw. Grafik 5.1). Die Darstellung der Ergebnisse der restlichen Messpunkte erfolgt in Anhang A. Abbildung 6.1 zeigt die Temperaturkurven aus der Messung und der Simulation zusammen in einem Diagramm dargestellt.

Aus Diagramm 6.1 ist ersichtlich, dass die Kurven, im Bereich schneller Temperaturänderungen, stärker voneinander abweichen, als im restlichen Verlauf. Mitgrund dafür ist die dafür geringe Abtastrate der Temperaturmessung. Die Abtastfrequenz des Messmoduls liegt bei  $4,5 \text{ Samples/sec}$ . Dies entspricht einer zeitlichen Auflösung von  $0,22222 \text{ sec}$ . (siehe Kapitel 4.1.2). Zusätzlich weisen Thermoelemente, je nach Drahtdurchmesser, eine Verzögerung

Parameter	Einheit	Wert
Prozess		
Pressenkraft	[N]	11000
Flächenpressung	[MPa]	35
Zwischenstoff	-	keiner
Ofentemperatur	[°C]	920
Platine		
Oberfläche	-	gewalzt
Beschichtung	-	keine
Werkstoff	-	1.4301
Temperatur	[°C]	900
Werkzeug		
Oberfläche	[ $\mu\text{m}$ ]	3,6
Beschichtung	-	keine
Werkstoff	-	1.2379
Temperatur	[°C]	30

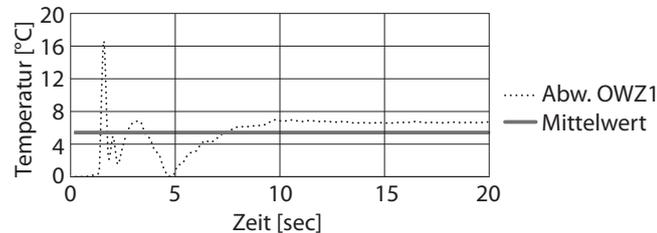
**Tabelle 6.1:** Parameter der Versuchskonstellation



**Abbildung 6.1:** Auswertung für Messpunkt UWz1

im Ansprechverhalten auf. Die Trägheit der Temperaturfühler wird mittels Zeitkonstante beschrieben (siehe Kapitel 1.2.4). Die Zeitkonstante und die begrenzte Abtastfrequenz hat zur Folge, dass große Temperaturgradienten nicht ausreichend aufgelöst werden können. Die Simulation hingegen löst mit Hilfe der variablen Zeitschritte in der Berechnung solche Temperaturentwicklungen sehr genau auf.

Die Abweichung im Temperaturanstieg liegt im wesentlichen in den genannten Umständen begründet. Folglich ist eine Erhöhung der Abtastrate der Temperaturerfassung sinnvoll. Der restliche Kurvenverlauf stimmt gut überein. Das lässt die Schlussfolgerung zu, dass das Modell für die Simulation ausreichend gut dem Realversuch angepasst wurde. Abbildung 6.2



**Abbildung 6.2:** Abweichung der Auswertung für Messpunkt OWz1

zeigt den Verlauf der Abweichung der beiden verglichenen Kurven. Die Darstellung spiegelt den bereits beschriebenen Sachverhalt noch deutlicher wieder. Es treten zu Beginn der Messung/Simulation kurzzeitige Spitzenwerte auf. Der berechnete Mittelwert, bei einer Simulationszeit von 20 Sekunden, liegt bei  $\bar{T} = 5,5^{\circ}\text{C}$ . Die Messgenauigkeit beträgt  $\pm 2^{\circ}\text{C}$  (siehe Kapitel 4.1.1).

Nach Auswertung aller Messpunkte ergibt für die Versuchskonstellation aus Tabelle 6.1 ein thermischer Kontaktwiderstand nach Tabelle 6.2. Das Resultat lässt einen Unterschied zwischen den TKWs von OWz/Platine und UWz/Platine erkennen.

Ermittelter thermischer Kontaktwiderstand [ $R_{tc} \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$ ]	
Oberwerkzeug/Platine	0,000125
Unterwerkzeug/Platine	0,000167
Wärmeübergangskoeffizient [ $\alpha \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$ ]	
Oberwerkzeug/Platine	8000
Unterwerkzeug/Platine	6000

**Tabelle 6.2:** Ermittelter TKW

Ein Grund für die Abweichungen der Temperaturkurven ist auf die Zeitkonstante (siehe Kapitel 1.2.4) und der Abtastung der Thermolemente bei der Messung zurückzuführen. Durch weiterführende Optimierungen am Versuchsaufbau hinsichtlich der Verbesserung des Messequipments wird dem Problem zukünftig begegnet.

Abschließend sei noch auf mögliche Fehlerursachen im Versuch, auf die nur bedingt Einfluss zur Beseitigung genommen werden kann, hingewiesen:

- Inhomogenitäten in der Werkstoffzusammensetzung d.h. Heterogenität der thermischen Eigenschaften in den Komponenten. In dieser Arbeit werden konstante Materialeigenschaften angenommen.
- geometrische Abweichungen der Messpositionen von den Sollpositionen durch Fertigungsungenauigkeit
- Abweichung der Messpunktgeometrie durch seine Ausdehnung d.h. keine punktuelle Temperaturmessung (im Vergleich zum Knoten in der Simulation)

# Kapitel 7

## Ausblick

Zukünftige Entwicklungsschritte dieser Arbeit betreffen die Optimierung des Versuchsaufbaus und der Simulation, um bereits erläuterte Ungenauigkeiten in der Ermittlung des TKWs zu beseitigen. Aber auch der ständige Fortschritt auf dem Gebiet der Warmformung gibt Anlass dazu, den Versuch auf neue Anforderungen hin zu adaptieren.

Die vollständige Optimierung der Messung bzw. der Simulation hätte den Rahmen der Arbeit überschritten. An dieser Stelle werden aber die noch notwendigen Änderungen beschrieben, um etwaige Ungenauigkeiten in der Auswertung zu beseitigen. Außerdem werden Anregungen über mögliche Potentiale der Versuchseinrichtung aufgezeigt.

Die Optimierungsmaßnahmen betreffen folgende Bereiche:

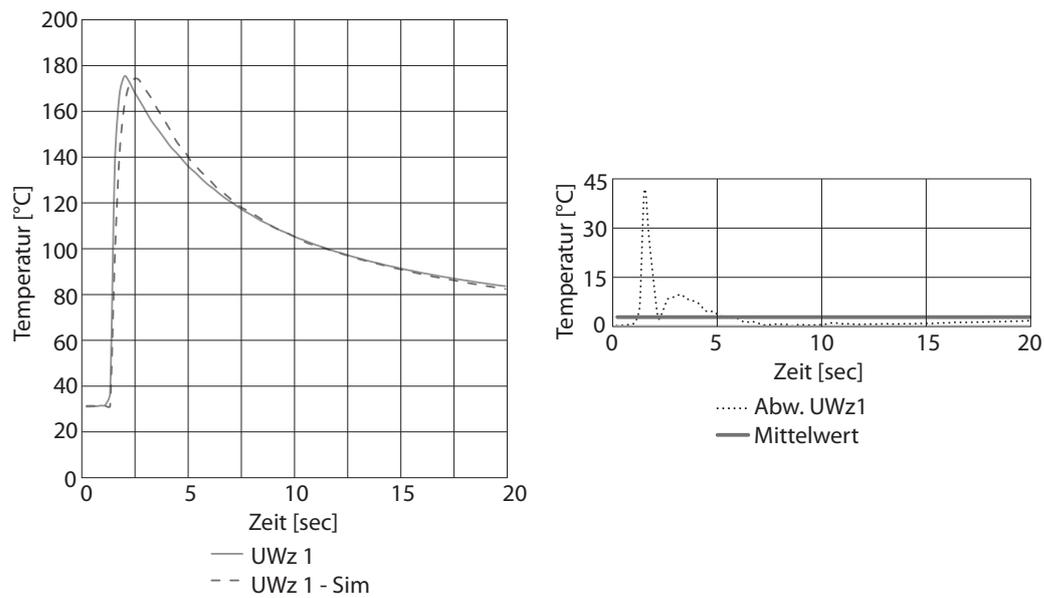
1. **Messequipment:** Die Auflösung der Temperaturerfassung reicht im Bereich der ersten Zehntelsekunden nach Kontakt der Versuchskomponenten nicht aus, um die tatsächliche Temperaturentwicklungen zu erfassen. Ausschlaggebend sind die hohen Aufheiz- bzw. Abkühlraten, welche im vordersten Messpunkt der Werkzeuge und der Platine auftreten. Die Trägheit der Thermoelemente (Kapitel 1.2.4) einerseits und eine zu geringe Abtastrate des Spannungseingangsmodul für die Erfassung der Thermospannungen lassen keine höhere Auflösung zu. Abhilfe bietet ein separates Thermospannungserfassungsmodul IPAQ-4L. Zusätzlich bietet es einen sehr hochwertigen Thermosensor für einen präzisen Temperatenausgleich bei Schwankungen der Umgebungstemperaturen (Kaltstellenkompensation).
2. **Auswertung mittels Optimierungsalgorithmen:** In Kapitel 6 wurde bereits der manuelle Vorgang der Auswertung näher beschrieben. Bei der Lösung von inversen Problemen sorgt ein Optimierungsalgorithmus dafür, dass die Fehlerfunktion minimal wird. Somit kann eine numerisch iterative Lösung (z.B. LS-OPT) gefunden werden. Die Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit einerseits und besonders die Optimierung des TKW sollte softwaregestützt erfolgen, um die Reproduzierbarkeit der Auswertung zu gewährleisten

3. **Adaptierung des Versuchsaufbaus:** Hierbei wird die Möglichkeit zur Durchführung von Spaltversuchen geschaffen. Bei diesen Experimenten besteht nach dem Schließen der Presse ein definierter Spalt zwischen erwärmtem Blech und den Werkzeughälften. So wird durch die gleiche Messmethodik ein Wärmestrom auf das Werkzeug rein durch Wärmestrahlung und Konvektion erfasst. Die so gewonnenen Erkenntnisse bezüglich Werkzeugenerwärmung während dem Einlegevorgang und Niederfahren der Presse sind relevant für die Warmformtechnik. Für spezielle Anwendungsfelder soll eine Kapselung des Messbereiches erfolgen um Messungen unter Schutzgasatmosphäre zu ermöglichen. Das Schutzgas verhindert die Zunderbildung an der Platinenoberfläche und nimmt damit direkten Einfluss auf den TKW des Versuchs.
  
4. **Automatisation im Messablauf:** Um den Messablauf zu vereinfachen und die Reproduzierbarkeit der Einzelversuche zu perfektionieren werden noch einzelne Verbesserungen am Versuchsaufbau vorgenommen. Durch ein automatisches Einschwenken der Versuchsplatine aus der Erwärmungsmuffel in die Messposition werden reduzierbare Transferzeiten beim Einlegevorgang ermöglicht. Durch einen Endschalter in der Messposition wird der Schließvorgang der Presse automatisiert.

Das Thema der Warmumformung birgt große Potentiale für die Herstellung von höchstfesten Bauteilen. Aktuelle Trends für die nächsten Jahre in der Automobilbranche lassen darauf schließen, dass eine ständige Weiterentwicklung der Technologie stattfindet. Um noch präzisere Festigkeitseigenschaften durch eine gezielte Wärmebehandlung der Stahlwerkstoffe in der Warmumformung prognostizieren zu können, ist das Thema des thermischen Kontaktwiderstandes ein zentraler Ansatzpunkt. Diese Umstände lassen noch viel Spielraum für Gedanken, Ideen, Konzepte und Innovationen für die Evolutionen auf dem Gebiet der Warmumformung.

## **Kapitel 8**

### **Anhang A - Auswertungsergebnisse**



**Abbildung 8.1:** links: Vergleich der Temperaturkurven UWz1.  
rechts: Abweichung und mittlere Abweichung UWz1

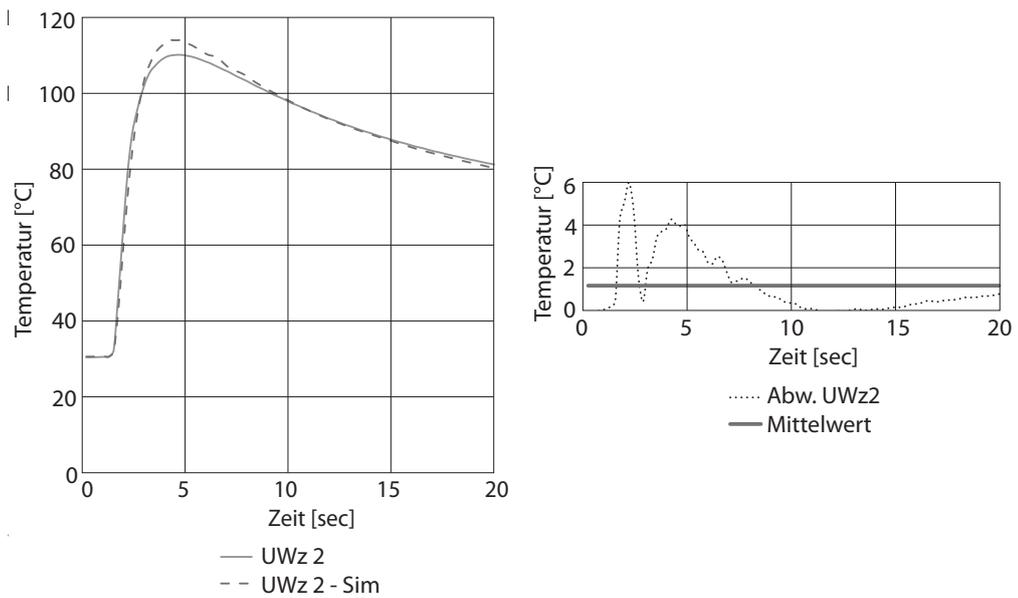
Zahlenwerte für Position UWz1	
Beschreibung	Wert
Maximale Temperatur Messung [°C]	175,5
Maximale Temperatur Simulation [°C]	174
mittlere Abweichung [°C]	2,7

**Tabelle 8.1:** Zahlenwerte UWz1

Abbildung 8.1 zeigt die Auswertung in Position UWz1. Die entsprechenden Zahlenwerte sind in Tabelle 8.1 angeführt.

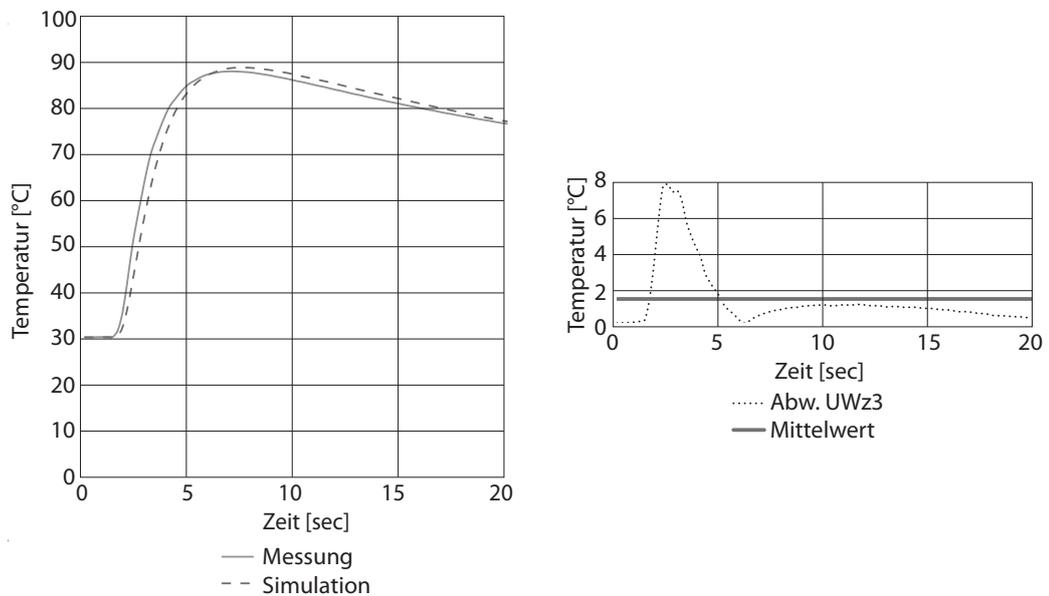
Zahlenwerte für Position UWz2	
Beschreibung	Wert
Maximale Temperatur Messung [°C]	110
Maximale Temperatur Simulation [°C]	114
mittlere Abweichung [°C]	1,25

**Tabelle 8.2:** Zahlenwerte UWz2



**Abbildung 8.2:** links: Vergleich der Temperaturkurven UWz2.  
rechts: Abweichung und mittlere Abweichung UWz2

Abbildung 8.2 zeigt die Auswertung in Position UWz2. Die entsprechenden Zahlenwerte sind in Tabelle 8.2 angeführt.

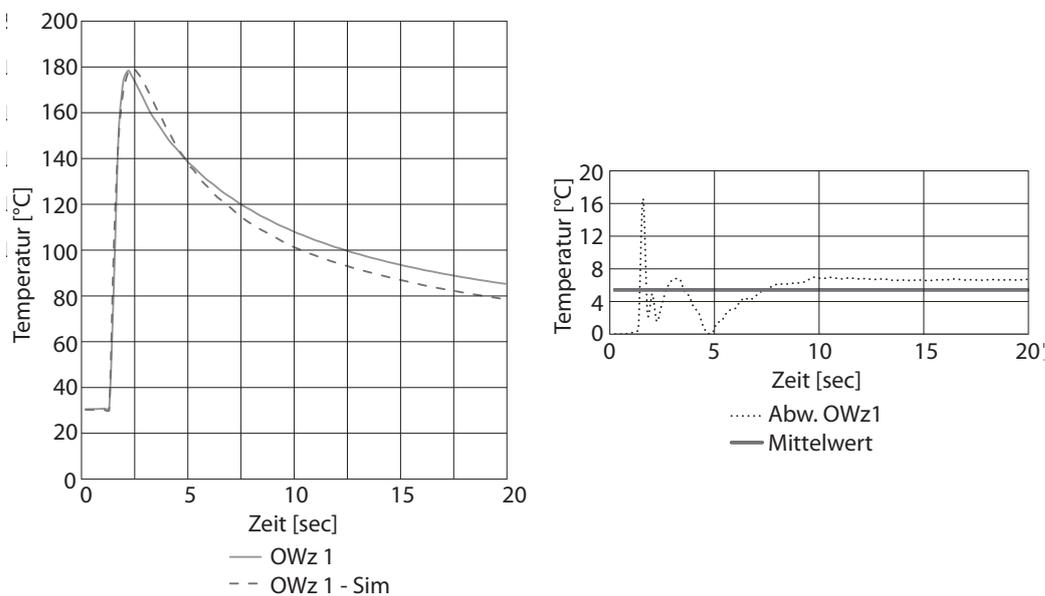


**Abbildung 8.3:** links: Vergleich der Temperaturkurven UWz3  
rechts: Abweichung und mittlere Abweichung UWz3

Zahlenwerte für Position UWz3	
Beschreibung	Wert
Maximale Temperatur Messung [ $^{\circ}C$ ]	88
Maximale Temperatur Simulation [ $^{\circ}C$ ]	88,7
mittlere Abweichung [ $^{\circ}C$ ]	1,47

**Tabelle 8.3:** Zahlenwerte UWz3

Abbildung 8.3 zeigt die Auswertung in Position UWz3. Die entsprechenden Zahlenwerte sind in Tabelle 8.3 angeführt.

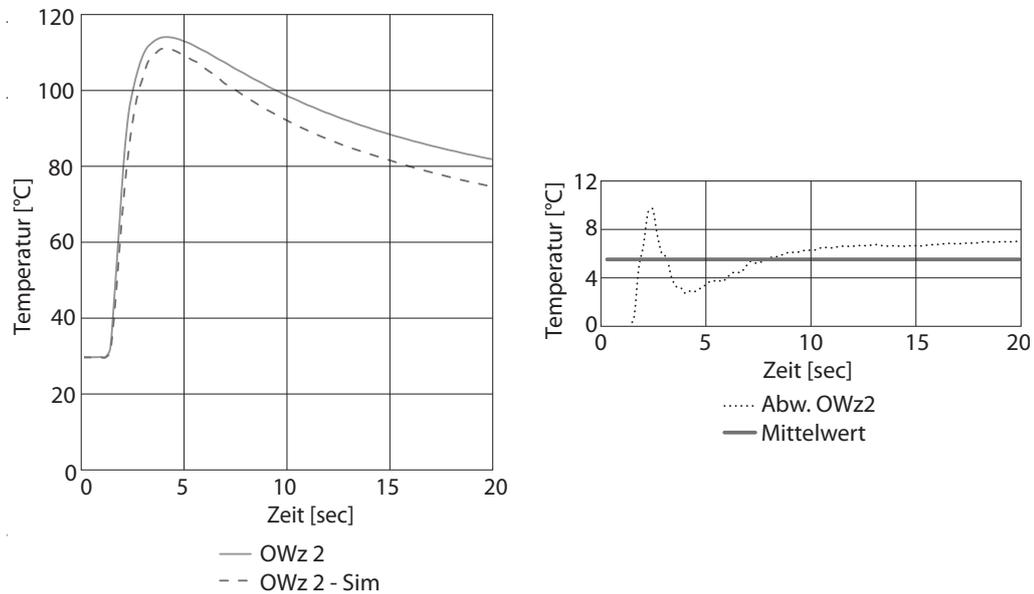


**Abbildung 8.4:** links: Vergleich der Temperaturkurven OWz1  
rechts: Abweichung und mittlere Abweichung OWz1

Zahlenwerte für Position OWz1	
Beschreibung	Wert
Maximale Temperatur Messung [ $^{\circ}C$ ]	178,6
Maximale Temperatur Simulation [ $^{\circ}C$ ]	179
mittlere Abweichung [ $^{\circ}C$ ]	5,5

**Tabelle 8.4:** Zahlenwerte OWz1

Abbildung 8.4 zeigt die Auswertung in Position OWz1. Die entsprechenden Zahlenwerte sind in Tabelle 8.4 angeführt.



**Abbildung 8.5:** links: Vergleich der Temperaturkurven OWz2  
rechts: Abweichung und mittlere Abweichung OWz2

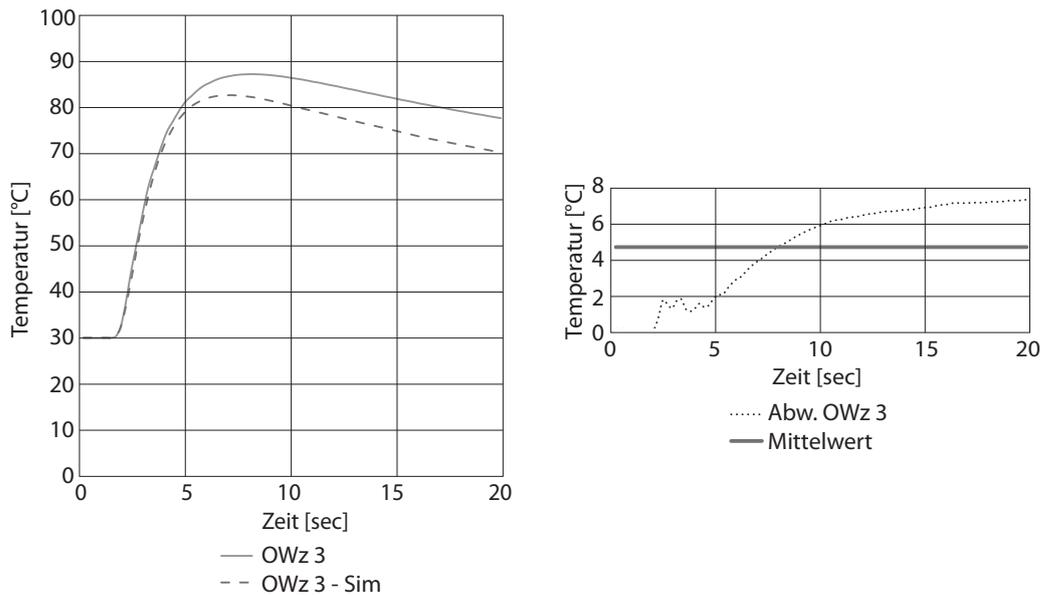
Zahlenwerte für Position OWz2	
Beschreibung	Wert
Maximale Temperatur Messung [°C]	113,9
Maximale Temperatur Simulation [°C]	111
mittlere Abweichung [°C]	5,5

**Tabelle 8.5:** Zahlenwerte OWz2

Abbildung 8.5 zeigt die Auswertung in Position OWz2. Die entsprechenden Zahlenwerte sind in Tabelle 8.5 angeführt.

Abbildung 8.6 zeigt die Auswertung in Position OWz3. Die entsprechenden Zahlenwerte sind in Tabelle 8.6 angeführt.

Abbildung 8.7 zeigt die Auswertung in der Platine. Die entsprechenden Zahlenwerte sind in Tabelle 8.7 angeführt.



**Abbildung 8.6:** links: Vergleich der Temperaturkurven OWz3  
rechts: Abweichung und mittlere Abweichung OWz3

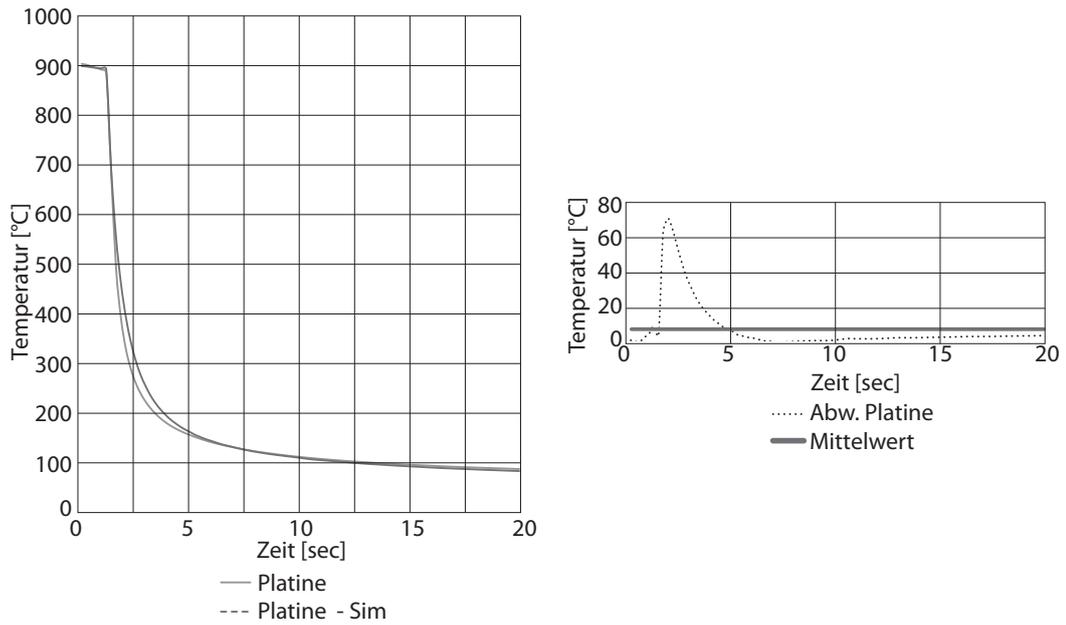
Zahlenwerte für Position OWz3	
Beschreibung	Wert
Maximale Temperatur Messung [°C]	87,3
Maximale Temperatur Simulation [°C]	82,8
mittlere Abweichung [°C]	4,7

**Tabelle 8.6:** Zahlenwerte OWz3

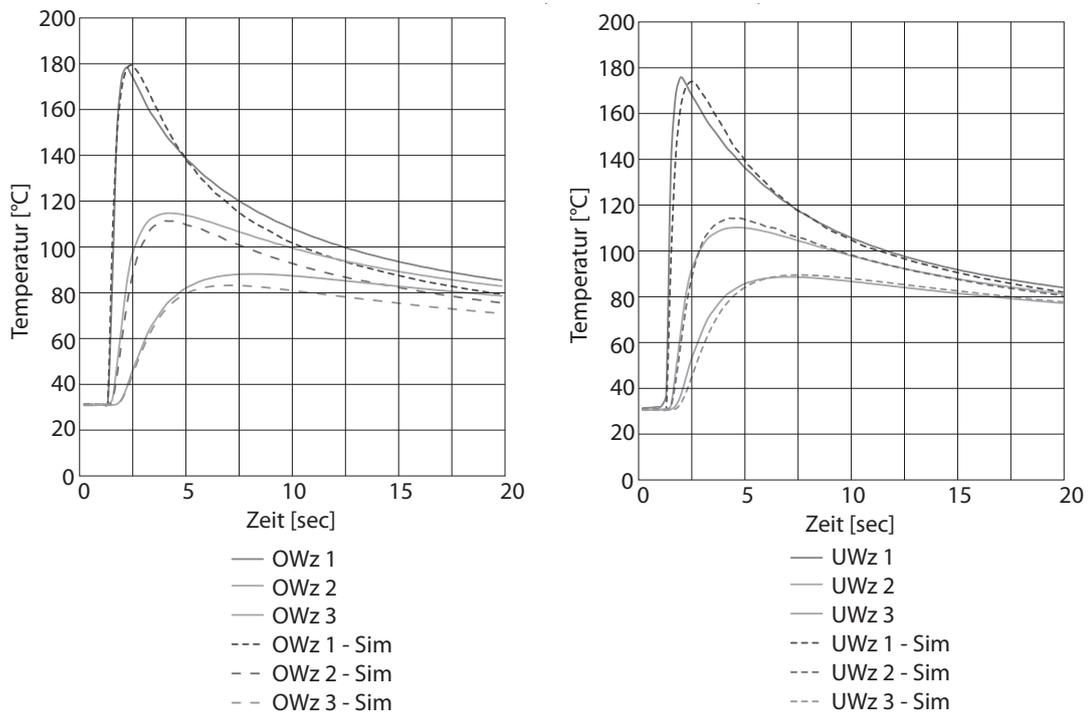
Zahlenwerte für Position Platine	
Beschreibung	Wert
Minimale Temperatur Messung [°C]	85,3
Minimale Temperatur Simulation [°C]	81,2
mittlere Abweichung [°C]	7,86

**Tabelle 8.7:** Zahlenwerte Platine

In Abbildung 8.8 zeigt als Abschluss eine Gegenüberstellung der Ergebnisse beider Werkzeughälften mit allen Positionen der Temperaturerfassung.



**Abbildung 8.7:** links: Vergleich der Temperaturkurven Platine  
rechts: Abweichung und mittlere Abweichung Platine



**Abbildung 8.8:** links: Temperaturkurven im Oberwerkzeug. rechts: Temperaturkurven im Unterwerkzeug.



# **Kapitel 9**

## **Anhang B - Thermospannungen**

## 9.1 Grundwerte der Thermospaltungen

**NiCr/Ni, Typ K gem. DIN IEC 584-1**  
 Grundwerte von -200°C bis 1300°C in 10°C-Schritten, Angaben in mV

°C	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
-200	-5,891									
-100	-3,553									
0	0,000	0,397	0,798	1,203	1,611	2,022	2,436	2,850	3,266	3,681
100	4,095	4,508	4,919	5,327	5,733	6,137	6,539	6,939	7,338	7,737
200	8,137	8,537	8,938	9,341	9,745	10,151	10,560	10,969	11,381	11,793
300	12,207	12,623	13,039	13,456	13,874	14,292	14,712	15,132	15,552	15,974
400	16,395	16,818	17,241	17,664	18,088	18,513	18,938	19,363	19,788	20,214
500	20,640	21,066	21,493	21,919	22,346	22,772	23,198	23,624	24,050	24,476
600	24,902	25,327	25,751	26,176	26,599	27,022	27,445	27,867	28,288	28,709
700	29,128	29,547	29,965	30,383	30,799	31,214	31,629	32,042	32,455	32,866
800	33,277	33,686	34,095	34,502	34,909	35,314	35,718	36,121	36,524	36,925
900	37,325	37,724	38,122	38,519	38,915	39,310	39,703	40,096	40,488	40,879
1000	41,269	41,657	42,045	42,432	42,817	43,202	43,585	43,968	44,349	44,729
1100	45,108	45,486	45,863	46,238	46,612	46,985	47,356	47,726	48,095	48,462
1200	48,828	49,192	49,555	49,916	50,276	50,633	50,990	51,344	51,697	52,049
1300	52,398	52,747	53,093	53,439	54,125	54,125	54,466	54,807		

**Tabelle 9.1:** Grundwerte der Thermospaltung NiCr/Ni, Typ K

# Kapitel 10

## Anhang C - Konstruktionszeichnungen

**Tabelle 10.1:** Stückliste zu Zusammenstellungszeichnung:  
Versuchsaufbau TKW - Einzelteile

15	Sechskantschraube M16x70	6.8	4		ISO 4017
14	Platine	1.4301	6	2mm Blech	
13	Werkzeug oben	1.2379	1	Ø25x70	
12	Werkzeug unten	1.2379	1	Ø25x70	
11	Werkzeugaufnahme oben	S235	1	Ø100x130	
10	Werkzeugaufnahme unten	S235	1	Ø100x130	
9	Ofenhalterung	S235	3	Flachstahl 30x5x1000	
8	Lagerplatte	S235	1	105x105x45	
7	Grundplatte	S235	1	155x155x25	
6	Gestell	S235	1	Formrohr 60x60x2500	
5	Drehlager mit Schwenkachse	S235	1		
4	Ausgleichselement	S235	1		
3	Ausleger	S235	1	Formrohr 15x25x150	
2	Ofenmuffel	KF-Faser	1	Ø330x345	FIBROTHAL
1	4t Hydraulikpresse		1		SCHULER
<b>Pos</b>	<b>Benennung</b>	<b>Werkstoff</b>	<b>Anz.</b>	<b>Halbzeug</b>	<b>Bemerkung</b>

Anmerkung: Einzelteilzeichnungen für die Versuchsrelevanten Bauteile „Werkzeug oben“, „Werkzeug unten“ und „Platine“ befinden sich im Anhang C. Diese Bauteile werden für verschiedene Versuchskonstellationen aus verschiedenen Werkstoffen, Blechstärken und mit unterschiedlichen Oberflächenqualitäten gefertigt. Die Konstruktionsdaten der restlichen Baugruppen befinden sich auf der beigelegten CD.



# Abbildungsverzeichnis

1.1	Temperatursprung aufgrund des thermischen Kontaktwiderstandes . . . . .	2
1.2	Thermokreis . . . . .	4
1.3	Thermoelement . . . . .	5
1.4	Superposition von Thermospannungen . . . . .	6
1.5	Ausführungsformen von Mantelthermoelementen . . . . .	8
1.6	Zeitkonstante bei Thermoelementen . . . . .	9
2.1	Streckgrenze und Bruchdehnung von Stahlwerkstoffen . . . . .	12
2.2	Prozessschritte beim Presshärten . . . . .	13
2.3	Kontinuierliches Zeit-Temperatur-Umwandlungsschaubild von 22MnB5 . . . . .	14
2.4	Wechselwirkungen der Einflussgrößen im Presshärtprozess . . . . .	14
2.5	Temperaturverteilung nach der Umformung $\alpha = 1000W/m^2K$ . . . . .	16
2.6	Temperaturverteilung nach der Umformung $\alpha = 10000W/m^2K$ . . . . .	16
3.1	Schematische Darstellung der inversen Wärmeleitprobleme . . . . .	20
3.2	Methodik zur Ermittlung des TKW . . . . .	21
3.3	Versuchskörper zur Ermittlung der Wärmekapazität . . . . .	23
3.4	Versuchsaufbau zur Ermittlung der spezifischen Wärmekapazität . . . . .	24
3.5	Temperaturkurven Versuch: Wärmekapazität . . . . .	24
3.6	Versuchsaufbau zur Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit des Stempels . . . . .	26
3.7	Instationäre Temperaturverteilungen für verschiedene Biot-Zahlen . . . . .	27
3.8	Messstellen Versuchszyylinder . . . . .	27
3.9	Messkurven Versuch Wärmeleitfähigkeit . . . . .	28
3.10	Ergebnis Auswertung Messung/Simulation Wärmeleitfähigkeit . . . . .	28
3.11	TKW Versuch Messpunktbezeichnung . . . . .	29
3.12	Temperaturführung der Platine beim Presshärten . . . . .	30
3.13	Konzept Versuchsaufbau . . . . .	31
3.14	Versuchsanordnung . . . . .	32
3.15	Versuchsstand TKW . . . . .	32
3.16	Schwenkeinrichtung CATIA V5R19 . . . . .	33
3.17	Realbauteil Schwenkarm . . . . .	33
3.18	Ofenmuffel mit Spannungsversorgung . . . . .	34
3.19	Versuchsstempel CATIA V5 R19 . . . . .	35
3.20	Stempel mit aufgeschweißten Thermoelementen . . . . .	35
3.21	Versuchsplatine . . . . .	36

4.1	Multifunktionskalibrator PCL-1200 . . . . .	38
4.2	Messfehler mit Thermoelementtyp K . . . . .	39
4.3	Ausgangsposition der Messung . . . . .	40
4.4	Versuchsplatine in eingeschwenkter Position (Erwärmung) . . . . .	41
4.5	Grundstellung der erwärmten Platine für die Messung . . . . .	41
4.6	Geschlossenes Werkzeug während der Messung . . . . .	42
4.7	gemessener Temperatur-Zeit Verlauf im Ober- und Unterwerkzeug . . . . .	43
4.8	Temperatur-Zeit Verlauf der Platine . . . . .	43
4.9	Kraftmessung . . . . .	44
5.1	FE-Modell . . . . .	46
5.2	FE-Simulation zum Zeitpunkt $t=0\text{sec.}$ und $t=1,5\text{sec.}$ . . . . .	50
5.3	FE-Simulation zum Zeitpunkt $t=2,5\text{sec.}$ und $t=5\text{sec.}$ . . . . .	50
5.4	Temperatur-Zeit-Verlauf aus Simulation im Ober- und Unterwerkzeug . . . . .	51
5.5	Temperatur-Zeit-Verlauf Simulation in der Platine . . . . .	51
6.1	Auswertung für Messpunkt UWz1 . . . . .	54
6.2	Abweichung der Auswertung für Messpunkt OWz1 . . . . .	55
8.1	Auswertung UWz1 . . . . .	60
8.2	Auswertung UWz2 . . . . .	61
8.3	Auswertung UWz3 . . . . .	61
8.4	Auswertung OWz1 . . . . .	62
8.5	Auswertung OWz2 . . . . .	63
8.6	Auswertung OWz3 . . . . .	64
8.7	Auswertung Platine . . . . .	65
8.8	Temperaturkurven in allen Ermittlungspositionen . . . . .	65

# Tabellenverzeichnis

1.1	Thermische Kontaktwiderstände für metallische Oberflächen . . . . .	2
1.2	Toleranzklassen für Thermoelemente . . . . .	7
3.1	Spezifische Wärmekapazität verschiedener Stoffe . . . . .	23
3.2	Wärmeleitfähigkeit ausgewählter Stoffe . . . . .	25
4.1	Auszug aus Toleranzklassen für Thermoelemente . . . . .	39
5.1	Parameter FE-Netz . . . . .	47
5.2	Werkstoffeigenschaften FE-Modell . . . . .	48
5.3	thermische Randbedingungen . . . . .	48
5.4	thermische Anfangsbedingungen . . . . .	49
5.5	Kontaktbedingung FE-Modell . . . . .	49
5.6	Jobparameter Simulation . . . . .	49
6.1	Parameter der Versuchskonstellation . . . . .	54
6.2	Ermittelter TKW . . . . .	55
8.1	Zahlenwerte UWz1 . . . . .	60
8.2	Zahlenwerte UWz2 . . . . .	60
8.3	Zahlenwerte UWz3 . . . . .	62
8.4	Zahlenwerte OWz1 . . . . .	62
8.5	Zahlenwerte OWz2 . . . . .	63
8.6	Zahlenwerte OWz3 . . . . .	64
8.7	Zahlenwerte Platine . . . . .	64
9.1	Grundwerte der Thermospannung NiCr/Ni, Typ K . . . . .	68
10.1	Stückliste zu Zusammenstellungszeichnung . . . . .	69



# Literaturverzeichnis

- Bonfig, K. W. (1995). *Temperatursensoren, Prinzipien und Applikationen*. Expert Verlag.
- Burkhardt, L. (2008). *Eine Methodik zur virtuellen Beherrschung thermo-mechanischer Produktionsprozesse bei der Karosserieherstellung*. PhD thesis, Eidgenössische technische Hochschule Zürich.
- C. Fieberg, R. K. (2008). *Determination of Thermal Contact Resistance from Transient Temperature Measurements*. International Journal of Heat and Mass Transfer.
- Ch. Lüdecke and D. Lüdecke (2000). *Thermodynamik*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York.
- Dontchev, D. (2007). *Untersuchung inverser Probleme zur Bestimmung von Wärmeübergangskoeffizienten bei der Sprühkühlung*. PhD thesis, Fakultät für Verfahrens- und Systemtechnik der Otto-von-Guericke-Universität.
- Groth, C. and Müller, G. (2000). *FEM für Praktiker - Band 3: Temperaturfelder*. Expert Verlag.
- H.D. Baehr, K. S. (2006). *Wärme- und Stoffübertragung*. Springer Verlag.
- Hoff, C. (2007). *Untersuchung der Prozesseinflussgrößen beim Presshärten des höchstfesten Vergütungsstahls 22MnB5*. PhD thesis, Technische Fakultät der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg.
- Incropera, F. P., DeWitt, Bergman and Lavine (2007). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. John Wiley and Sons.
- National Instruments Corporation (2005-2007). *NI USB-9211/9211A User Guide and Specifications*.
- tecsis GmbH (2000). Ringkraftaufnehmer für Schraubenkräfte. Website. <http://www.tecsis.de/filestore.aspx/Ad921.pdf>.
- U. Grigull (1977). *Technische Thermodynamik*. De Gruyter Berlin New York.
- v. Körtvelyessy, L. (1981). *Thermoelement Praxis*. Vulkan Verlag Essen.
- Walcher, W. (2006). *Praktikum der Physik*. Teubner Verlag.

## **Online Ressourcen**

Arcelor Tenasteel (2002). Kaltarbeitsstahl TENASTEEL. Website. [http://www.stahlnetz.de/files/deu/Tenasteel\\_Datenblatt.pdf](http://www.stahlnetz.de/files/deu/Tenasteel_Datenblatt.pdf).

ThyssenKrupp NIROSTA (2004). Nichtrostender, austenitischer Stahl. Website. <http://www.thyssenkrupp-nirosta.de/fileadmin/scripts/wbbreitband/de/blaetter/4301.pdf>.