

# **Temperierung von Schmiedewerkzeugen zur Erhöhung der Bauteilgenauigkeit**

Vom Fachbereich Maschinenbau  
der Universität Hannover  
zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktor-Ingenieur  
genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Phys. Bernd Müssig  
geboren am 2.8.1971 in Wolfratshausen

2002

1. Referent: Prof. Dr.-Ing. E. Doege

2. Referent: Prof. Dr.-Ing. E.-G. Paland

Tag der Promotion: 23.04.2002

## **Vorwort**

Diese Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am IPH – Institut für Integrierte Produktion Hannover gemeinnützige GmbH.

Meinem Doktorvater, Herrn Prof. Doege, danke ich für die Unterstützung meines Themas und die Förderung meiner Promotion. Herrn Prof. Paland möchte ich meinen Dank für die Übernahme des Koreferats aussprechen und Herrn Prof. Haferkamp für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Mein besonderer Dank gebührt den Mitarbeitern des IPH, allen voran Marc Bisping, Dirk Czechowski, Stefan Franzke, Peter Hustedt, Jörg Kohlstette und Sven Voges, die mich stark beim Entstehen meiner Arbeit unterstützt haben. Ebenfalls bedanken möchte ich mich bei den Kollegen des IFUM Christian Hornhardt und Frank Meiners, die mir wertvolle Hinweise zu meiner Arbeit gegeben haben, sowie bei den Herren Bauer und Dreier der Firma Regloplas, die mich bei allen Fragen der Temperierung unterstützt haben.

Ohne die großartige Unterstützung meiner Familie wäre für mich das Durchstehen der teilweise anstrengenden Zeit der Promotion sicherlich nicht so leicht von der Hand gegangen. Aus diesem Grund widme ich diese Arbeit mit großer Dankbarkeit meiner Frau und meiner Tochter.

Geretsried, Mai 2002

Bernd Müssig

für Claudia und Emma

---

## Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>2 Zielsetzung</b> .....	<b>6</b>
<b>3 Stand der Kenntnisse</b> .....	<b>8</b>
3.1 Qualität bei Schmiedeprodukten .....	8
3.1.1 Qualitätsrelevante Produktparameter .....	8
3.1.2 Höhere Produktgenauigkeit durch Präzisionsschmieden .....	9
3.2 Eigenschaften des Schmiedeprozesses .....	10
3.2.1 Einflussfaktoren beim Schmieden .....	11
3.2.2 Beanspruchung der Werkzeuge .....	12
3.2.3 Zusammenwirken von Maschine und Werkzeug .....	13
3.3 Einflussmöglichkeiten auf den Schmiedeprozess .....	14
3.3.1 Beeinflussung einzelner Parameter beim Schmieden .....	14
3.3.2 Prozessüberwachung .....	16
3.3.3 Prozessregelung .....	20
3.4 Temperierung bei Gießverfahren .....	23
3.4.1 Temperierung beim Spritzguss .....	23
3.4.2 Temperierung beim Druckguss .....	24
3.5 Temperiergeräte .....	24
<b>4 Thermische Analyse des Schmiedeprozesses</b> .....	<b>27</b>
4.1 Thermodynamisches Modell .....	27
4.1.1 Wärmebilanz .....	27
4.1.2 Wärmeübergang .....	29
4.1.3 Temperaturverteilung .....	31
4.2 Zeitliches Verhalten der Werkzeugtemperatur .....	33
4.3 Abschätzung der Wärmebilanz .....	35
4.3.1 Wärmeverluste durch Konvektion und Strahlung .....	36
4.3.2 Wärmeleitung im Werkzeug .....	39
4.3.3 Wärmeströme durch Kontakt des Werkstücks mit dem Werkzeug .....	39
4.3.4 Temperaturprofil im Werkzeug .....	41
4.3.5 Wärmebeeinflussung .....	43
4.3.6 Ausgleich der Wärmebilanz .....	47
4.4 Analyse des thermischen Verhaltens mit Hilfe der FEM .....	49

---

4.5 Anforderungsprofil an eine Temperierung.....	51
<b>5 Konzeption der Temperierung von Schmiedewerkzeugen .....</b>	<b>54</b>
5.1 Beeinflussung der Werkzeugtemperatur.....	54
5.2 Kombination – Oberflächensprühkühlung und Temperierung.....	55
5.3 Regelkreis zur Temperierung .....	57
5.3.1 Regelungstechnische Grundlagen.....	57
5.3.2 Regelung der Wärmeträgertemperatur .....	60
5.3.3 Regelung der Werkzeugtemperatur.....	61
5.3.4 Kaskadenregelung.....	62
5.4 Zusatzelemente eines temperierten Werkzeugs.....	64
5.4.1 Temperaturmessung.....	65
5.4.2 Temperierkanäle.....	66
<b>6 Realisierung eines temperierten Schmiedeprozesses .....</b>	<b>69</b>
6.1 Wahl der Versuchsgeometrien.....	69
6.2 Auslegung der externen Wärmebeeinflussung .....	70
6.2.1 Oberflächensprühkühlung.....	70
6.2.2 Temperierung.....	71
6.3 Auslegung der temperierten Gesenke.....	73
6.4 Modularer Werkzeugaufbau.....	77
<b>7 Anwendung und Ergebnisse der Temperierung .....</b>	<b>80</b>
7.1 Planung der Versuche.....	80
7.2 Durchführung der Versuche .....	81
7.3 Temperaturverlauf während eines Umformzyklus.....	83
7.4 Referenztemperaturverlauf im stationären Betrieb.....	86
7.5 Temperaturverlauf in der Startphase.....	87
7.5.1 Werkzeug ohne Temperaturbeeinflussung.....	87
7.5.2 Werkzeug mit Temperierung.....	89
7.6 Maßhaltigkeit der Schmiedeteile in der Startphase.....	90
7.7 Einfluss der Oberflächensprühkühlung in der Startphase .....	91
7.7.1 Werkzeug ohne Temperierung .....	92
7.7.2 Werkzeug mit Temperierung.....	93
7.8 Absenkung der Gravurtemperatur durch Temperierung.....	94
7.9 Temperaturverlauf während Unterbrechungen.....	95
7.9.1 Werkzeug ohne Temperaturbeeinflussung.....	95

---

7.9.2 Werkzeug mit Temperierung .....	96
7.10 Einfluss der Geometrie.....	97
7.11 Diskussion der Ergebnisse.....	98
<b>8 Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>100</b>
<b>9 Anhang .....</b>	<b>102</b>
<b>10Literatur .....</b>	<b>107</b>

## Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen und Formelzeichen

### Abkürzungen

FEM	Finite-Elemente-Methode
IT	ISO Grundtoleranz
Nu	Nußelt-Zahl
Re	Reynolds-Zahl
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
We	Weber-Zahl

### Formelzeichen

$\alpha_d$	Wärmeausdehnungskoeffizient
$\alpha_k$	Konvektiver Wärmeübergangskoeffizient
$\alpha_w$	Kontaktwärmeübergangskoeffizient
$\varepsilon$	Emissionsgrad
$\lambda$	Wärmeleitkoeffizient
$\nu$	Kinematische Viskosität
$\rho$	Dichte
$\sigma$	Stefan-Boltzmann-Konstante
$\sigma_{vM}$	v. Mises Vergleichsspannung
A	Fläche
$c_p$	Spezifische Wärmekapazität
d	Durchmesser
$\Delta d$	Durchmesserdifferenz
D	Diffusionskonstante
e	Regeldifferenz
$E_s$	Strahlungsleistung pro Fläche
$h_T$	Förderhöhe (Pumpe)
l	Anströmlänge
p	Kontaktdruck
$\Delta p$	Druckabfall
P	Leistung
$P_T$	Temperierleistung
q	Wärmequellendichte
$\dot{Q}$	Wärmestrom
t	Zeit

---

$t_z$	Zykluszeit
$T$	Temperatur
$T_0$	Grundtemperatur
$T_G$	Gravurtemperatur
$T_K$	Kerntemperatur
$T_O$	Oberflächentemperatur
$T_R$	Rohteiltemperatur
$T_R$	Rücklauftemperatur (Wärmeträger)
$T_V$	Vorlauftemperatur (Wärmeträger)
$T_W$	Werkzeugtemperatur
$T_U$	Umgebungstemperatur
$\Delta T$	Temperaturdifferenz
$u$	Tropfengeschwindigkeit
$v$	Umformgeschwindigkeit
$v$	Strömungsgeschwindigkeit (Wärmeträger)
$w$	Tropfengeschwindigkeit
$w$	Führungsgröße (beim Regler)
$x$	x-Koordinate
$x$	Regelgröße
$\Delta x$	Differenzlänge
$y$	Stellgröße (beim Regler)
$z$	Störgröße (beim Regler)
$V$	Volumen
$\dot{V}$	Volumenstrom (Fördermenge Pumpe)

## **Abstrakt**

Der Trend zu genaueren Bauteilen erfordert eine kontinuierliche Weiterentwicklung geeigneter Fertigungsprozesse. In der Produktion von Schmiedeteilen kann die Temperierung wie in den Bereichen Spritzguss oder Druckguss einen wichtigen Beitrag dazu liefern.

In dieser Arbeit wird ein System zur Temperierung, das heißt zur geregelten Heizung und Kühlung, von Schmiedegesenken mit Hilfe von Wärmeträgerölen vorgestellt. Die Temperierung wird durch einen gezielten Wärmeaustausch zwischen Werkzeug und Wärmeträger in Kanälen im Werkzeug erzielt. Hierbei spielt zum einen das schnelle Erreichen und Halten eines stationären Temperaturniveaus im Werkzeug und zum anderen die Wechselwirkung mit anderen temperaturbeeinflussenden Maßnahmen wie einer Oberflächensprühkühlung eine Rolle. Die Temperierung kann unabhängig von Schmiedeteilgröße und -geometrie eingesetzt werden, was eine Voraussetzung für den wirtschaftlichen Einsatz des Systems ist.

## **Abstract**

The trend to more precise parts requires a continuous development of suitable manufacturing processes. Tempering can contribute this in the production of forging parts as in the areas of injection molding or die-casting.

In this report a system for tempering of forging tools, that is controlled heating and cooling, by means of heat carrier fluids is presented. The tempering is achieved by well-directed heat exchange between tool and heat carrier flowing in conduits. Here it is important to reach and uphold a steady state temperature level in the tool and to manage the interaction with other temperature influences as a surface spray cooling. The tempering is independent of the size and geometry of the forging part in its use, which is a prerequisite for an economic operation of the system.

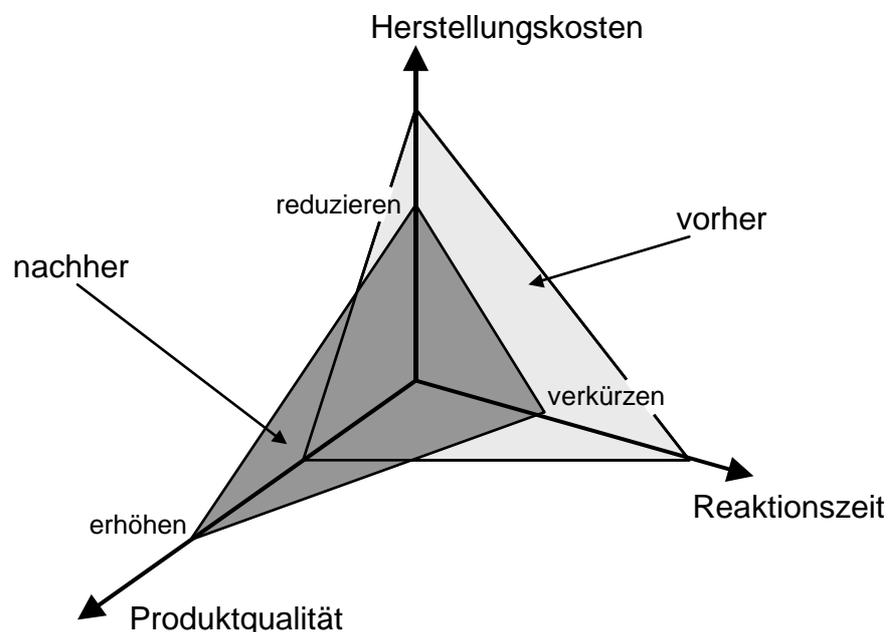
## **Schlagwörter**

Temperierung, Schmiedeteilqualität, Werkzeugtemperatur

Tempering, forging part quality, tool temperature

# 1 Einleitung

Die Warmmassivumformung ist eines der ältesten Verfahren der Metallbearbeitung. Aufgrund der Vorteile hinsichtlich der guten erzielbaren Produkteigenschaften und der hohen Produktivität besitzt das Schmieden als Fertigungsverfahren auch heute einen hohen Stellenwert [RUD00]. Es steht aber mit anderen Verfahren wie Gießen oder Sintern in Konkurrenz. Damit das Schmieden als Fertigungsverfahren auch in Zukunft noch eine wichtige Rolle spielen kann, muss es einem kontinuierlichen Verbesserungsprozess unterworfen werden. Hierbei ist neben einer Erhöhung der Produktqualität vor allem eine Reduzierung der Herstellungskosten sowie eine Verkürzung der Reaktionszeiten auf Kundenanfragen notwendig (Bild 1-1).



*Bild 1-1: Anforderungen an die Schmiedeindustrie*

Dem stehen Hemmnisse entgegen (vgl. Bild 1-2), die einerseits in fehlenden Lösungsansätzen, andererseits aber auch in der aufwendigen und kostenintensiven Umsetzung von Innovationen begründet liegen. Sowohl im Hinblick auf die Produktqualität als auch auf die Lieferbedingungen (Kosten, Zeit etc.) muss ein Schmiedeunternehmen die Anforderungen des Kunden erfüllen, um als Lieferant in Frage zu kommen.

Ein entscheidender Wettbewerbsfaktor ist die Wirtschaftlichkeit der Schmiedeunternehmen [ADL98]. Eine Verbesserung der Wirtschaftlichkeit ist zum einen durch eine Optimierung der Schmiedeprodukte und zum anderen durch eine Optimierung der Fertigung zu erreichen. In der vorliegenden Arbeit wird die Temperierung von Schmiedegesenken als Teilaspekt der Fertigungsoptimierung betrachtet. Es wird gezeigt, dass eine geregelte Temperatur einen Beitrag zur Erfüllung der Anforderungen leisten kann (Bild 1-2).

Ein Hauptfaktor hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit der Schmiedeteilproduktion sind die Herstellungskosten. Hoher Ausschuss, eine schlechte Anlagen- und Materialausnutzung sowie aufwendige und teure Prozesse (vgl. Bild 1-2) erfordern eine Optimierung des Fertigungsprozesses.

Anforderungen	Hemmnisse	Lösungsansätze	Einflussnahme durch Werkzeugtemperierung
Niedrige Herstellungskosten	Hoher Ausschuss	• Ausschussvermeidung	Voreinstellung stabiler Temperaturniveaus Temperaturregelung
	Schlechte Anlagenausnutzung	• Taktzeitverkürzung • Rüstzeitverkürzung • Verkürzung von Unterbrechungen	Voreinstellung stabiler Temperaturniveaus Halten stabiler Temperaturniveaus
	Hoher Materialanteil	• Gratreduzierung • Reduzierung des Bearbeitungsaufmaßes	
	Lange Prozesskette	• Adaption, Integration und Substitution von Prozessschritten	
	Teure Prozesse	• Reduzierung von Anlagen- und Werkzeugkosten	Reduzierung temperaturbedingten Verschleißes
Hohe Produktqualität	Schwierig messbare Qualitätsmerkmale	• Berührungsfreie Messmethoden • Prozessüberwachung und -regelung	Temperaturregelung
Niedrige Reaktionszeit	Lange Rüstzeiten	• Anlaufzeitverkürzung • Umbauzeitverkürzung	Voreinstellung stabiler Temperaturniveaus
	Große Lose	• Losverkleinerung • Große Lager	Rüstzeitverkürzung (siehe lange Rüstzeiten)

*Bild 1-2: Anforderungen, Hemmnisse und Lösungsansätze in der Schmiedebbranche*

Entwicklungen der letzten Jahre bezüglich einer endkonturnahen Umformung zur Reduzierung der Bearbeitungszugaben sowie eines gratlosen Präzisionsschmiedens ermöglichen nicht nur die Einsparung von Rohmaterial, sondern zusätzlich die Einsparung von Prozessschritten, vor allem im spanabhebenden Bereich. Dies führt aber zu höheren Kosten in der Schmiede aufgrund steigender Anforderungen an die Maschinen und die Prozesstechnik. Zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit müssen diese zusätzlichen Kosten so gering wie möglich gehalten werden. Ausschussvermeidung und ein Verkürzen der Stillstandzeiten der Anlage infolge von Unterbrechungen oder Produkt-

wechselaktivitäten stellen dabei ein großes Optimierungspotential dar. Das Voreinstellen und Halten stabiler Prozessbedingungen mittels einer geregelten Temperaturbeeinflussung kann einen Beitrag dazu liefern, dieses Potential zu erschließen.

Die Produktqualität spielt gerade bei Schmiedeteilen, die in der Regel in sicherheitsrelevanten Bereichen eingesetzt werden, eine entscheidende Rolle. Dies hat einen hohen Aufwand bei der Prüfung der qualitätsrelevanten Merkmale zur Folge (vgl. Bild 1-2). Die Schmiedeindustrie steht dem Dilemma gegenüber, dass sich die wichtigsten Qualitätsmerkmale aufgrund der hohen Temperatur des Schmiedeprozesses nicht direkt während der Fertigung (online), sondern erst nach einer Abkühlzeit (offline) prüfen lassen. Die Folgen hiervon sind erhöhter Ausschuss aufgrund des zeitlichen Verzuges der Fehlererkennung und hohe Prüfkosten. Lösungsansätze sind Online-Messverfahren von Produktparametern, wie die berührungsfreie optische Vermessung warmer Bauteile [REP94], oder Systeme zur Prozessüberwachung [BEH97] und -regelung, beispielsweise der Werkzeugtemperatur. Sie sind in der Lage, eine Fehlerfrüherkennung und einen stabilen Prozess zu ermöglichen.

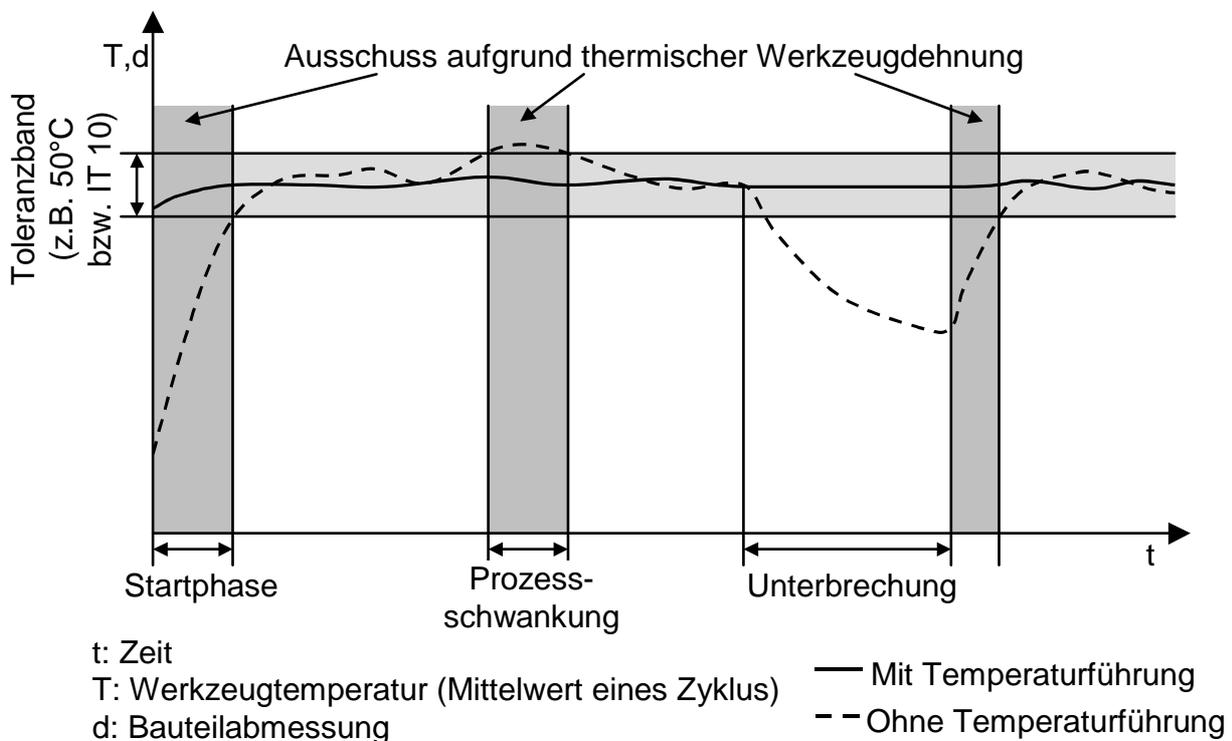
Den Kundenforderungen hinsichtlich einer hohen Reaktionsschnelligkeit und einer Just-in-Time-Lieferung von Zulieferteilen kann entweder durch eine umfangreiche Lagerhaltung oder durch eine Just-in-Time-Produktion begegnet werden (vgl. Bild 1-2). Während eine umfangreiche Lagerhaltung mit hohen Kosten verbunden ist, steht einer Just-in-Time-Produktion aufgrund der geringen Flexibilität des Schmiedeprozesses die Notwendigkeit gegenüber, Mindestlosgrößen zu definieren, die eine wirtschaftliche Produktion ermöglichen. Um dieses Dilemma zu lösen, müssen Anstrengungen unternommen werden, diese Mindestlosgrößen zu senken. Einfluss auf die Mindestlosgröße hat das Verhältnis der Gutteile zu den Schlechteilen sowie die unproduktive Zeit während eines Produktwechsels. Eine Verkürzung der Umbauzeiten während des Rüstens sowie die Voreinstellung eines stabilen Schmiedeprozesses nach dem Rüstvorgang zur Vermeidung von Anfahrausschuss, beispielsweise durch eine Temperierung der Werkzeuge, stellen Lösungen zur Reduzierung der Losgrößen dar.

Die Temperatur spielt als Parameter beim Schmieden hinsichtlich der Anforderungen an den Prozess eine herausragende Rolle, da viele Eigenschaften des fertigen Produkts, wie beispielsweise die Geometrie aufgrund der thermischen Dehnung, hiervon abhängen. Im Rahmen einer Prozessüberwachung und -regelung wird das Augenmerk bisher allerdings hauptsächlich auf die Temperatur des Schmiederohteils gelegt [BÖR97] und weniger auf die Temperatur des Werkzeugs.

Die Temperatur des Schmiederohteils hat einen entscheidenden Einfluss auf die Fließfähigkeit des Materials und die Festigkeit des Bauteils aufgrund der temperaturabhängigen Gefügestruktur. Des Weiteren beeinflusst sie chemische Prozesse und damit die Struktur der Oberfläche sowie die geometrischen Abmessungen des Schmiedeteils aufgrund der Wärmeausdehnung [LAN88]. Die Abmessungen werden aber nicht nur durch die Temperatur des Rohteils, sondern auch durch die Temperatur des Werk-

zeugs bestimmt, da die Werkzeugabmaße ebenfalls temperaturabhängig sind. Zusätzlich beeinflusst die Temperatur des Werkzeugs den Wärmeverlust des Werkstücks, die Reibung zwischen Werkzeug und Werkstück [LÖH69] sowie die Standmenge des Werkzeugs [HEI76].

Während moderne Erwärmungsanlagen die Temperatur des Rohteils in einem sehr engen Toleranzfenster halten können, wird eine Temperierung der Werkzeuge beim Schmieden bisher nicht eingesetzt. Es gibt allerdings Ansätze, die Werkzeugtemperatur gezielt durch eine geregelte Oberflächensprühkühlung [DOH00] oder durch elektrische Heizelemente [KLE80] zu beeinflussen. Um eine genaue Temperaturregelung zu gewährleisten, müssen temperaturerhöhende und -erniedrigende Maßnahmen kombiniert werden.



#### Zusammenhang zwischen T und d

Erhöhung der Werkzeugtemperatur T

⇒ Erhöhung des Gravurdurchmessers aufgrund thermischer Dehnung

⇒ Erhöhung des Bauteildurchmessers d

*Bild 1-3: Prozessstabilität durch Temperaturführung*

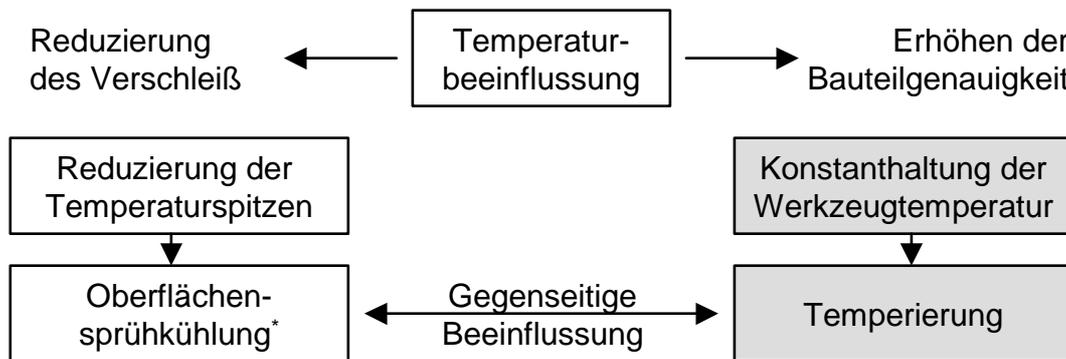
Dass eine geregelte Temperaturführung der Schmiedewerkzeuge bisher nicht zum Einsatz kommt, liegt zum großen Teil daran, dass die Genauigkeitsanforderungen bisher nicht hoch sind. Toleranzen beim konventionellen Schmieden liegen bei IT 12 bis IT 16 [LAN88], was den zusätzlichen Aufwand einer Temperierung der Werkzeuge nicht rechtfertigt. Wird eine höhere Genauigkeit gefordert, sind Temperaturschwankungen des Werkzeugs nicht mehr zu vernachlässigen (Bild 1-3). Es wird gezeigt, dass

aufgrund der thermischen Dehnung bei einer Temperaturabweichung von 25 bis 50°C eine Toleranz von IT 8 bis 10 nicht mehr erreicht werden kann.

Diese Arbeit liefert einen Beitrag dazu, Werkzeugtemperaturschwankungen zu verhindern und einen stabilen Schmiedeprozess während der Anlaufphase, im Betrieb und nach Unterbrechungen aufgrund einer geregelten Temperaturführung der Schmiedewerkzeuge zu ermöglichen. Die Temperaturführung wird hierbei durch eine Flüssigkeitstemperierung verwirklicht (Ölkreislauf im Gesenk), die sowohl das geregelte Erwärmen als auch das geregelte Abkühlen der Werkzeuge ermöglicht. Dies hat einen reduzierten Ausschuss und eine Verkürzung von Anlauf- und Wiederanfahrzeiten zur Folge und trägt somit zu einer Verbesserung der Wirtschaftlichkeit des Schmiedeprozesses bei.

## 2 Zielsetzung

Das Ziel dieser Arbeit ist es, ein Konzept zur geregelten Beeinflussung der Werkzeugtemperatur zu entwickeln (Bild 2-1), das sowohl eine Reduzierung von Temperaturspitzen an der Oberfläche als auch eine Konstanthaltung der Durchschnittstemperatur beinhaltet.

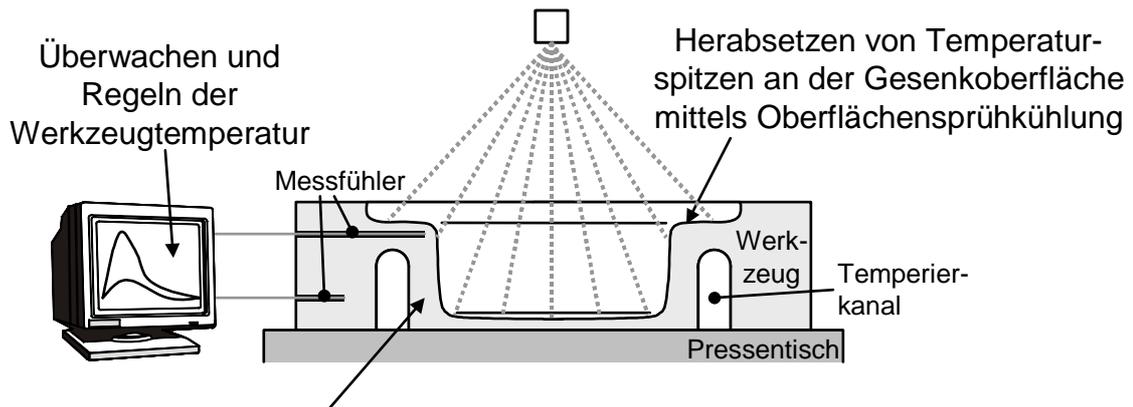


\* Wird bereits in der Schmiedeindustrie eingesetzt

*Bild 2-1: Ziele der Beeinflussung der Werkzeugtemperatur*

Unter Berücksichtigung der Anforderungen, die in Bild 1-2 dargestellt sind, soll eine Temperierung realisiert werden, die die Temperatur des Schmiedewerkzeugs bereits vor Beginn der Produktion auf ein stabiles Prozessniveau einstellt und in Unterbrechungsphasen hält. Des Weiteren soll dargelegt werden, dass die Regelung der Werkzeugtemperatur in Verbindung mit einer geregelten Rohteilerwärmung zum Erreichen eines stabilen Schmiedeprozesses beiträgt und somit den Schmiedebetrieb in die Lage versetzt, eine hohe Produktqualität hinsichtlich gleichbleibender geometrischer Abmessungen zu garantieren. Temperaturspitzen, die den Verschleiß am Werkzeug begünstigen, sollen mit Hilfe einer Oberflächensprühkühlung reduziert werden (Bild 2-2).

Entscheidend dabei ist, dass das Temperiersystem eine einfache Auslegung und Bedienung begünstigt und universell für alle Schmiedeteilgeometrien, die auf einer Anlage hergestellt werden, eingesetzt werden kann. Die Solltemperatur muss variierbar sein, um unterschiedlichen Anforderungen gerecht zu werden, und schnell erreicht werden, um eine möglichst hohe Anlagenausnutzung zu ermöglichen.



Einstellen und Halten eines stabilen Temperaturniveaus im Werkzeug mittels Temperierung

*Bild 2-2: Umsetzung der Ziele der Temperaturbeeinflussung*

In dieser Arbeit werden auf Basis theoretischer Modelle und numerischer Berechnungen des thermischen Verhaltens von Schmiedewerkzeugen Konzepte zu einer gezielten Beeinflussung der Temperatur erarbeitet. Aufbauend auf diesen Konzepten soll für einfache Beispielgeometrien eine geregelte Temperaturbeeinflussung mittels einer Temperierung der Werkzeuge realisiert sowie deren Ergebnisse dokumentiert werden. Zum Abschluss wird ein Ausblick über Einsatzmöglichkeiten der Temperierung in der Schmiedeteilfertigung gegeben.

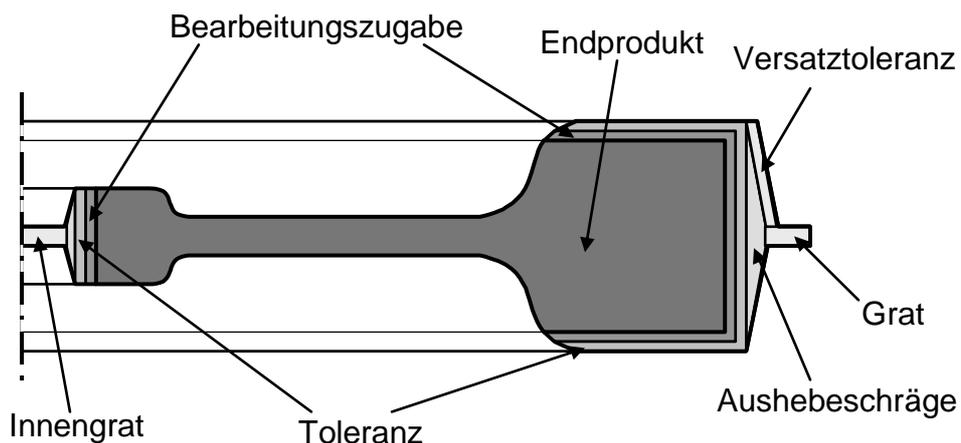
### 3 Stand der Kenntnisse

#### 3.1 Qualität bei Schmiedeprodukten

Schmiedeprodukte werden in der Automobilindustrie und im Maschinenbau häufig als Sicherheitsbauteile eingesetzt. Beispiele aus der Automobilindustrie sind Pleuel, Kurbelwellen und Zahnräder im Bereich des Antriebsstrangs sowie Achsschenkel, Schwenklager und Lenkhebel im Fahrwerk [IDS99]. Aufgrund der geforderten Ausfallsicherheit kommt der Produktqualität eine sehr hohe Bedeutung zu. Entscheidend ist vor allem die Festigkeit der Bauteile im Dauerbetrieb [SCA98].

##### 3.1.1 Qualitätsrelevante Produktparameter

Der primär qualitätsrelevante Parameter bei Sicherheitsbauteilen ist sowohl die statische als auch die dynamische mechanische Festigkeit. Zur Vermeidung eines plötzlichen Versagens infolge hoher Belastung spielt die Verformungsfähigkeit eine wichtige Rolle [GAR87]. Die dauerhaften Produkteigenschaften können in Langzeittests erfolgreich geprüft werden, sind jedoch als Qualitätsparameter in der Produktion nicht messbar. Hier wird vielmehr nach Produktfehlern gesucht, die in der Fertigung entstehen und ein Versagen des Schmiedeteils bewirken. Dies sind zum einen Materialfehler, die aus der Materialherstellung resultieren, also in der Fertigung gar nicht beeinflusst, sondern nur entdeckt werden können. Zum anderen sind es Fehler im Gefüge sowie Risse, die durch Prüfverfahren im Anschluss an die Fertigung identifiziert werden können [STÜ99].



*Bild 3-1: Schmiedeteil mit verfahrensspezifischen Aufmaßen und Toleranzen nach [LAN77]*

Neben der Festigkeit kommt der geometrischen Maßhaltigkeit eine entscheidende Bedeutung zu. Die größte Relevanz besitzen hierbei die Funktionsflächen der Endprodukte, die im Regelfall aufgrund ihrer engen Toleranzen einer mechanischen Bearbei-

tung unterzogen werden. Bei der Auslegung eines Schmiedeteils ist es daher notwendig, dem Endprodukt verfahrensspezifische Aufmaße und Toleranzen (Bild 3-1) aufzuschlagen. Neben den geometrischen Toleranzen ist die Maßhaltigkeit für das Erreichen der geforderten Produktmasse wichtig. Gerade bei bewegten Teilen ist die Gesamtmasse und wie beispielsweise beim Pleuel die Masseverteilung entlang der Hauptachse [BRO99] ein wichtiges Qualitätskriterium.

### 3.1.2 Höhere Produktgenauigkeit durch Präzisionsschmieden

Aus wirtschaftlichen Gründen und aufgrund verbesserter Produkteigenschaften – Zahnflanken sind 15% bis 20% stärker belastbar [SCA98] – wird der Forderung nach hoher Genauigkeit bei Schmiedeteilen durch neuartige Technologien des Near Net Shape Formens oder Präzisionsschmiedens begegnet [ADL98]. Weltweit werden diesbezüglich große Anstrengungen unternommen [DOU98, KUD90, THA94, XIE98]. Forschungsseitig erstreckt sich das Teilespektrum präzisionsgeschmiedeter Produkte von rotationssymmetrischen Teilen wie Kegeln, Kegeleisen, Kegeleisen, Zahnrädern und Gangrädern bis hin zu Langteilen wie beispielsweise Pleuel [DOE00, DOE01] (Bild 3-2). Während das Präzisionsschmieden von rotationssymmetrischen Teilen vielfach schon industriell angewandt wird [GUT98, SCA98], befinden sich Technologien zur Präzisionsumformung von Langteilen noch im Entwicklungsstadium.



Bild 3-2: Präzisionsgeschmiedete Teile (kleines Bild: PKW-Gangrad [DRE01])

Die Realisierung neuartiger Umformverfahren ist mit einem neuen Anforderungsprofil an den Formgebungsprozess verbunden. Eine höhere Genauigkeit beim Schmiedeprodukt erfordert genauere Schmiedeanlagen und -werkzeuge sowie engere Toleranzen bei den Prozessparametern. Am Beispiel des Prozessparameters Temperatur soll dies verdeutlicht werden.

Wie Tabelle 1 zu entnehmen ist, spielt die Wärmeausdehnung, die sich sowohl auf das Schmiederohteil als auch auf das Werkzeug auswirkt, bei kleinen Toleranzen bereits eine große Rolle. Der Trend zu einer höheren Produktgenauigkeit erfordert daher Maßnahmen, um Temperaturschwankungen über die Zyklen möglichst zu vermeiden und somit die Wärmeausdehnung konstant zu halten. Betrachtet man als Extremfall das Präzisionsschmieden im Toleranzbereich IT 8 bis IT 10, so darf die Toleranzbreite der Temperatur maximal 25°C bzw. 50°C betragen.

Tabelle 1: Geometrietoleranzen gegenüber Wärmedehnung (Werte: [DUB90])

Größe	d=100 mm	$\Delta d$
ISO Grundtoleranzen	IT 8	0,054 mm
	IT 10	0,14 mm
	IT 12	0,35 mm
	IT 16	2,2 mm
Wärmeausdehnung	$\Delta T = 25^\circ\text{C}$	0,043 mm
	50°C	0,085 mm
	100°C	0,17 mm
	200°C	0,34 mm
	$\Delta d = d \cdot \alpha_d \cdot \Delta T$	$\alpha_d = 17 \cdot 10^{-6} (1/\text{K})$ Werkstoff 1.2365 T=200°C

Aufgrund der engen Toleranzen ist neben einer bereits existierenden Regelung der Rohteilerwärmung zusätzlich eine Überwachung und im Idealfall eine Regelung der Temperatur der Schmiedewerkzeuge notwendig. Ein erhöhter Aufwand für eine Prozessüberwachung und -regelung ist somit die Voraussetzung, um Teile zu schmieden, die hohen Genauigkeitsanforderungen entsprechen.

### 3.2 Eigenschaften des Schmiedeprozesses

Die erreichbare Wirtschaftlichkeit des Verfahrens ist ein nicht zu vernachlässigender Faktor, der die industrielle Fertigung von Schmiedeteilen prägt [ADL98]. Dies bedeutet, dass bei einer möglichst guten Ausnutzung der zur Verfügung stehenden Ressourcen eine möglichst hohe Produktqualität erreicht werden soll. Im Serienbetrieb ist dies nur mit einem beherrschten, stabilen Fertigungsprozess möglich. Eine Aufgabe in der Fertigung ist es daher, den Prozess so auszulegen und einzustellen, dass die nötige Stabilität gewährleistet werden kann. Störpotentiale müssen hierzu systematisch beseitigt werden. Ist eine Beseitigung aus technischen oder wirtschaftlichen Gründen

nicht möglich, so müssen Prozessparameter, die fehleranfällig sind, überwacht und nachgeregelt werden [HER99]. Um die relevanten Prozessparameter beim Schmieden identifizieren zu können, werden im Folgenden die Einflussfaktoren untersucht.

### 3.2.1 Einflussfaktoren beim Schmieden

Stabile und reproduzierbare Bedingungen sind beim Schmieden nur schwer zu erreichen, da der Prozess einem komplexen Kollektiv an physikalischen Einflüssen unterworfen ist. Die Formänderungseigenschaften sind im Wesentlichen von thermischen (z.B. Werkstücktemperatur) und mechanischen (z.B. Stößelgeschwindigkeit) Parametern abhängig. Die Temperatur des Werkstücks sowie die Umformkraft und Umformgeschwindigkeit wirken sich direkt auf das Formfüllungsverhalten des Materials aus.

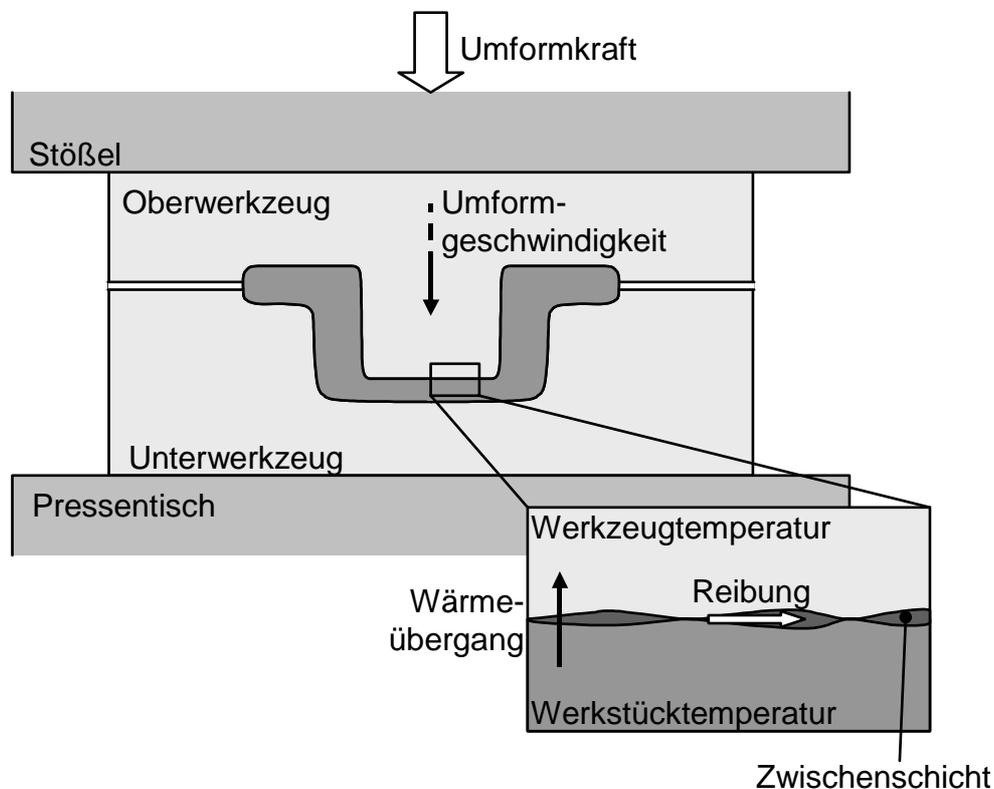


Bild 3-3: Einflusskollektiv auf den Schmiedeprozess

Beim Gesenkschmieden kommen komplexe Randeffekte hinzu, da der Materialfluss an der Gravuroberfläche behindert und umgelenkt wird. Reibung und Wärmeübergang zwischen Werkstück und Werkzeug sind die Folge (Bild 3-3). Sie werden neben der Oberflächenstruktur und der Temperatur des Werkzeugs und des Werkstücks von der Zwischenschicht, die aus Schmierstoff, Zunder und Abriebteilchen besteht, beeinflusst [SCN84].

Der Wärmeübergangskoeffizient und der Reibwert der Zwischenschicht sind über die Gravuroberfläche inhomogen verteilt. Eine genaue Messung dieser Werte und damit

des lokalen Wärmeübergangs und der lokalen Reibung ist nicht möglich. Mit Hilfe der numerischen Identifikation können diese Parameter allerdings bestimmt werden. Hierzu wird der reale Umformprozess mittels der Finite-Elemente-Methode nachgebildet, wobei die Simulationsparameter soweit verändert werden, dass die Simulationsergebnisse mit den realen Messwerten übereinstimmen [WER96].

### 3.2.2 Beanspruchung der Werkzeuge

Die Werkzeuge unterliegen in der Warmmassivumformung einer sehr hohen thermischen und mechanischen Wechselbelastung. Die Werkzeugoberfläche kann dabei Maximaltemperaturen im Bereich von 700°C bis 750°C annehmen [SEI92]. Als weitere Belastung kommen eine tribologische Beanspruchung durch Reibung zwischen Werkstück, Zwischenschicht und Werkzeug sowie chemische Reaktionen der Werkzeugoberfläche mit der Zwischenschicht und der Umgebungsluft hinzu. Diese auf das Gesenk einwirkenden zyklischen Belastungen bewirken bei einer längeren Beanspruchung eine Schädigung der Werkzeuge. Im Wesentlichen sind das mechanische und thermische Rissbildung, plastische Verformung und Verschleiß [LUI90, SCL94] (Bild 3-4).

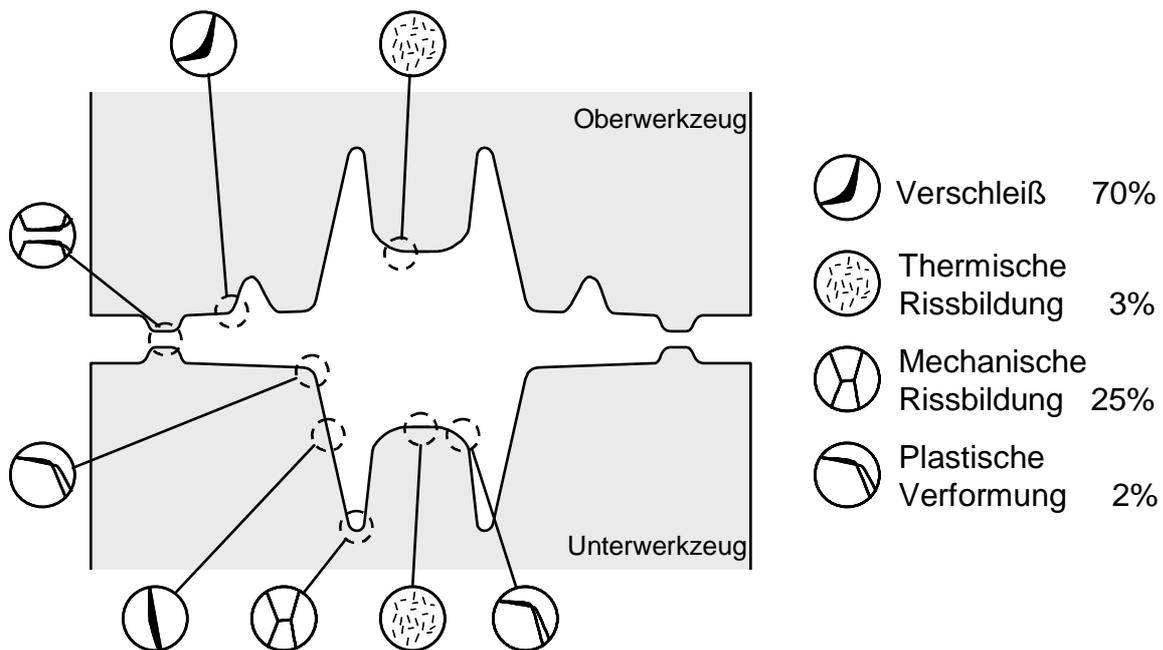


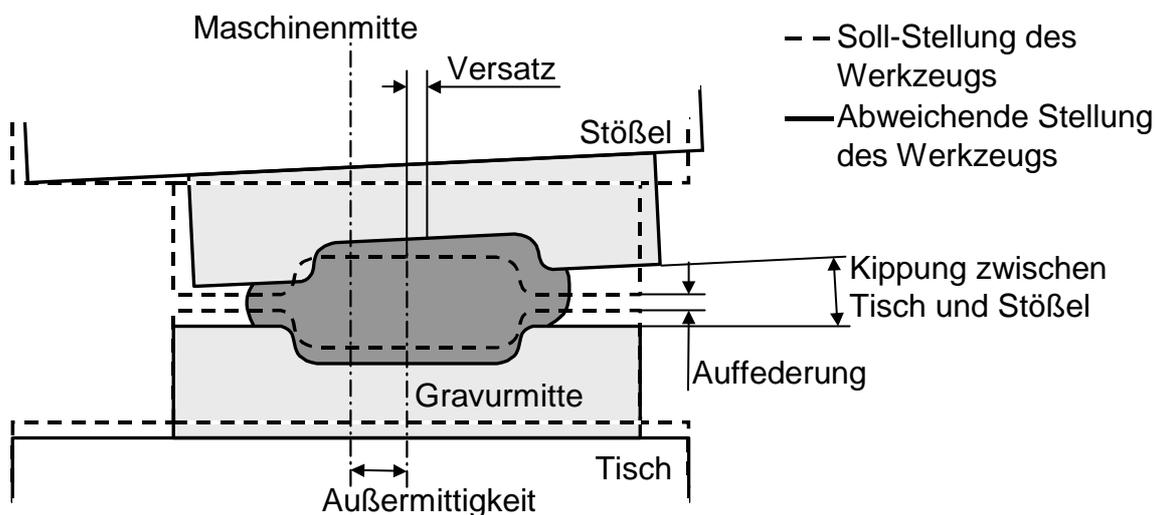
Bild 3-4: Schadensarten an Schmiedegesenken [KAN69, HEI76]

Einer Schädigung der Werkzeuge kann nach Bobke [BOB91] vorgebeugt werden, indem an der Geometrie kleine Radien vermieden werden, Schmierstoffe mit einer hohen mechanischen und thermischen Trennwirkung eingesetzt werden sowie eine Kühlung der Gesenkoberfläche verwirklicht wird. Des Weiteren kann die Anlassempfindlichkeit durch die Auswahl geeigneter Werkzeugwerkstoffe gesenkt und die Adhäsions- bzw. Abrasionsneigung durch Beschichtung der Werkzeuge herabgesetzt werden.

Das Senken der Schmiedetemperatur oder der Werkzeuggrundtemperatur verringert zudem Temperaturspitzen [LUI93].

### 3.2.3 Zusammenwirken von Maschine und Werkzeug

Eine Ursache geometrischer Abweichungen sind maschinen-, werkzeug- oder prozessseitige Störungen und Fehler. Der außermittige Einbau von Werkzeugen, das unsymmetrische Fließverhalten bei asymmetrischen Schmiedeteilen oder eine ungenaue Positionierung der Rohteile im Gesenk führen zum Auftreten von Kippung und Versatz der Presse (Bild 3-5). Dies beeinflusst die horizontale Genauigkeit der Schmiedeteile, wie zum Beispiel den Seitenversatz zwischen oberer- und unterer Hälfte. Die Elastizität der im Kraftfluss der Maschine liegenden Elemente wie Gestell, Tisch, Stößel, Triebwerk und das elastische Verhalten der Werkzeuge führen in vertikaler Richtung zur Auffederung zwischen Tisch und Stößel. Hierdurch wird die vertikale Genauigkeit der Schmiedeteile beeinflusst, wie zum Beispiel die Dickenschwankung der Teile [THA95].



*Bild 3-5: Verlagerung, Kippung und Auffederung beim Schmieden mit Grat [WIT86]*

Durch die Verwendung entkoppelter Werkzeugführungsgestelle (Bild 3-6) können maschinenbedingte Kippungs- und horizontale Verlagerungseffekte an den Werkzeugen vermieden werden [HAR83, WIT86]. Diese Systeme haben sich aber in der Praxis nicht durchgesetzt, weil die zwischen Stößel und Werkzeugoberseite eingebrachte Kalotte die vertikale Steifigkeit der Presse nachteilig beeinflusst, wodurch sich die Druckberührzeit erhöht und damit die Lebensdauer der Werkzeuge nachteilig beeinflusst wird. Das vertikale Genauigkeitsverhalten kann nur durch möglichst steife Elemente im Kraftfluss der Presse gesteigert werden.

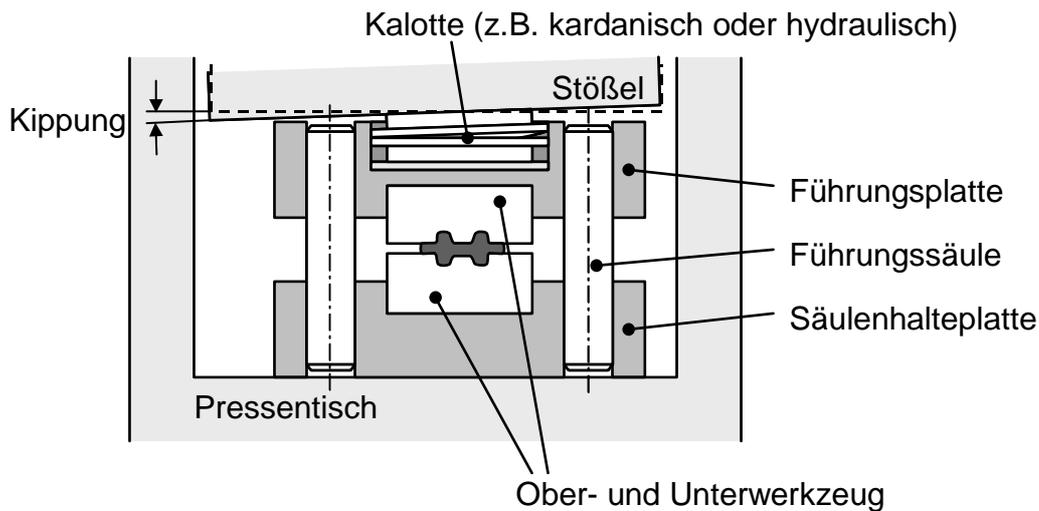


Bild 3-6: Entkoppeltes Werkzeugführungsgestell [WIT86]

Da sich die Effekte bezüglich der Abmessungen aus prozessbedingten Abweichungen wie Temperaturschwankungen und maschinenseitigen Abweichungen überlagern, müssen zum Erreichen einer hohen Produktqualität Maßnahmen gegen beide getroffen werden. Auf eventuelle Korrelationen ist zu achten.

### 3.3 Einflussmöglichkeiten auf den Schmiedeprozess

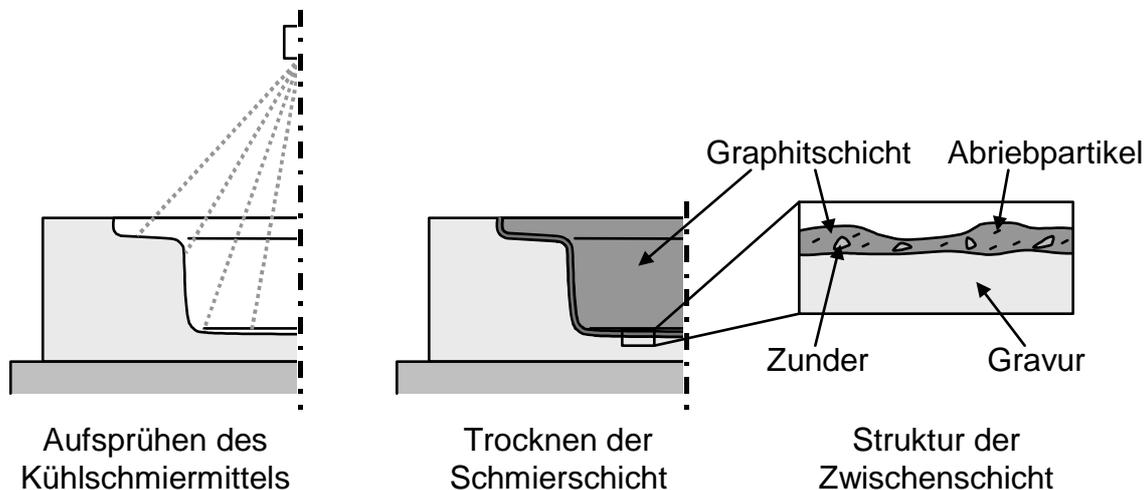
Wie im vorangegangenen Abschnitt beschrieben, haben die Aggregate einer Schmiedelinie, die Werkzeuge und die Prozessparameter einen großen Einfluss auf die Qualität eines Schmiedeteils. Maschinen- und werkzeugseitige Einflüsse lassen sich oft konstruktiv beeinflussen (z.B. Lage und Art der Pressen- und Werkzeugführung). Die Beeinflussung von Prozessparametern erfordert meist einen zusätzlichen Aufwand in Form von Zusatzaggregaten oder Regelkreisen. Im Folgenden sollen gängige Beeinflussungsmöglichkeiten aufgezeigt und die Überwachung und Regelung von Prozessparametern dargestellt werden.

#### 3.3.1 Beeinflussung einzelner Parameter beim Schmieden

Die Beeinflussung der Werkzeugtemperatur ist beim Schmieden ein gängiger Prozess. Häufig werden die Werkzeuge vor Schmiedebeginn in einem Ofen oder mittels einer Flamme vorgewärmt und kommen im warmen Zustand zum Einsatz. Während einer Unterbrechung des Schmiedeprozesses werden die Werkzeuge mit Hilfe eines Gasbrenners, der in den Pressenraum gebracht wird, warmgehalten. Die Temperatur, die sich auf diese Art der Erwärmung einstellt, ist im Regelfall nicht genau spezifiziert und schlecht reproduzierbar.

Neben dem Aufheizen und Warmhalten wird in Schmiedeunternehmen in der Regel eine Oberflächensprühkühlung verwendet, bei der das Kühlmittel Schmierstoffe enthält.

Das Kühlschmiermittel, beim Schmieden meist ein Wasser-Graphit-Gemisch, wird hierbei mit einer Düse zerstäubt und verdampft auf der warmen Werkzeugoberfläche. Zurück bleibt ein Graphitschmierfilm, der neben Zunder und Abriebrückständen die Zwischenschicht zwischen Werkstück und Werkzeug ausbildet [SEI96] (Bild 3-7).



*Bild 3-7: Wirkungsweise der Kühlschmierung*

Aufgetragen wird das Kühlschmiermittel mit einem manuellen oder einem automatischen Kühlschmierer. Während beim manuellen Auftragen die Menge variiert, was zu einer nicht reproduzierbaren Temperaturverringerung am Werkzeug führt, ermöglicht ein automatisiertes System das Auftragen einer gleichbleibenden Kühlschmiermittelmenge.

Einen Sonderfall stellen horizontal arbeitende Schmiedepressen beispielsweise der Firma Hatebur dar. Bei diesen Umformmaschinen wird mit einer Wasserflutung des Werkzeugs, das teilweise mit Kühlkanälen durchzogen ist, gearbeitet. Die Flutung ermöglicht es, große Wärmemengen abzutransportieren und somit die Werkzeugtemperatur stark zu reduzieren [TSC92]. Bei einer Flutung besteht die Notwendigkeit, das Kühlmittel aus dem Gesenk abfließen zu lassen, da Wasserrückstände im Gesenk bei der Berührung mit dem Schmiedeteil verdampfen. Wenn ein Entweichen des Wasserdampfes nicht möglich ist, kann es infolge des Dampfdrucks zu Fehlern bei der Formfüllung kommen. Bei Vertikalpressen ist ein Abfließen des Flutwassers nur durch zusätzliche Abflussmaßnahmen möglich, so dass das Verfahren der Flutkühlung bei Vertikalpressen in der Praxis keine Verwendung findet (Bild 3-8).

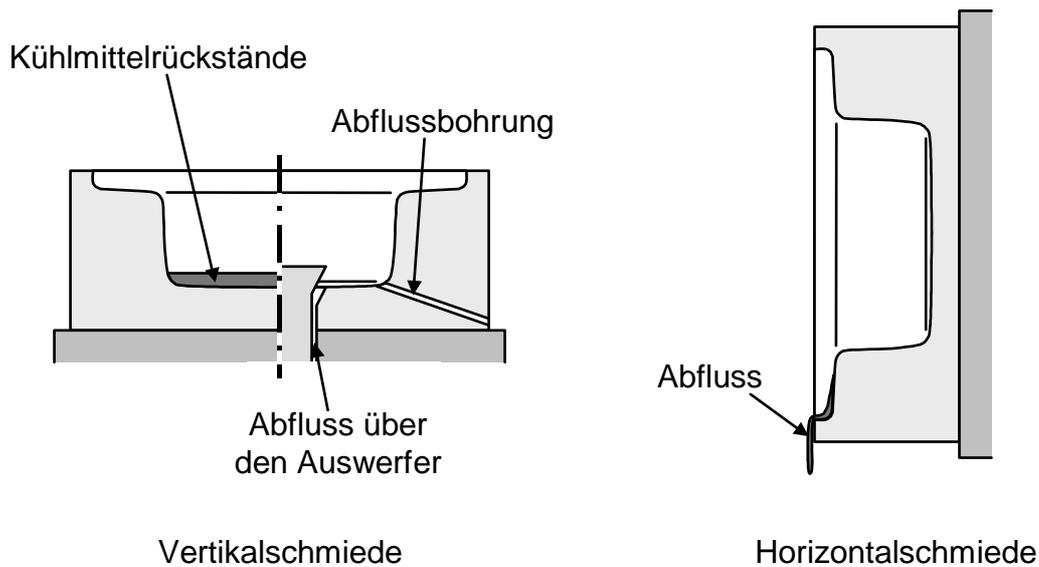


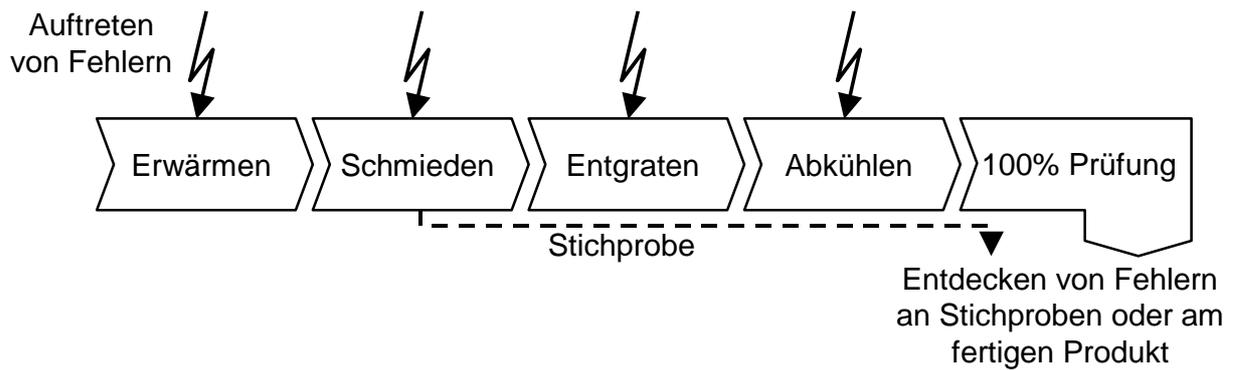
Bild 3-8: Kühlung durch Flutung

In Ausnahmefällen werden hochtemperaturbelastete Bereiche auch über Kanäle im Werkzeug mit Wasser gekühlt [KOL80, HER80] oder Werkzeuge, die nicht im Ofen vorgewärmt werden können, mit elektrischen Heizelementen aufgeheizt [KLE80].

Die eingesetzten Kühlschmiermittel müssen neben der Kühlung der Werkzeugoberfläche auch die Aufgabe der Schmierung zwischen Werkstück und Werkzeug erfüllen [SEI98]. Den größten Anteil unter den Schmiermitteln hat im praktischen Einsatz Graphit, das mit Wasser vermischt wird. Es werden aber auch Phosphorverbindungen (weißer Schmierstoff) und Polymere eingesetzt [LAC00, NAK00]. Bei Schmiermitteln, die flüssig auf das Gesenk aufgetragen werden, wie beispielsweise Graphit-Wasser, ist es nötig, eine Trocknung der Schicht zu gewährleisten. Ist dies nicht der Fall, erfolgt das Verdampfen des Flüssiganteils bei Berührung mit dem Schmiederohteil und es kann aufgrund des Gasdrucks zu mangelnder Formfüllung kommen. Aus diesem Grund ist eine Mindesttemperatur der Werkzeugoberfläche, die im Falle einer wasserbasierten Schmierung über 100°C liegt, erforderlich.

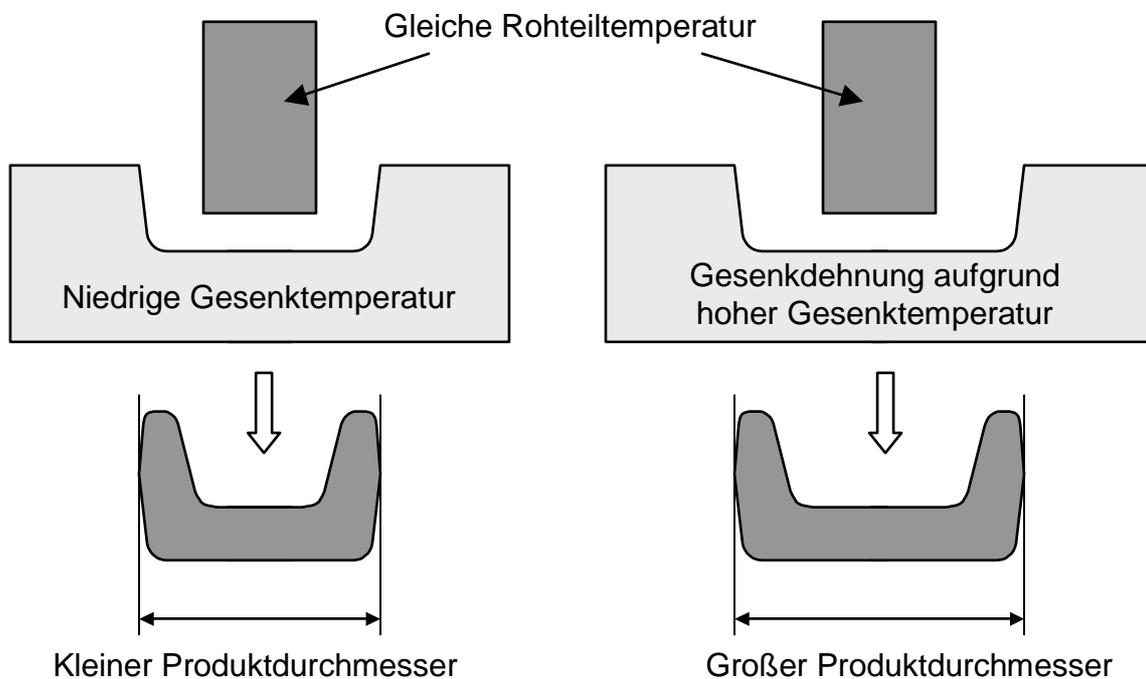
### 3.3.2 Prozessüberwachung

Im Rahmen einer funktionierenden Qualitätssicherung beim Schmieden kommt der Überwachung und Regelung der Prozessparameter eine entscheidende Bedeutung zu [SAS96, RÜS00]. Gerade bei Schmiedeprodukten können Fehler bei einer offline Überwachung der Produktparameter erst mit erheblicher Zeitverzögerung nachgewiesen werden, da insbesondere geometrische Messungen am Produkt aufgrund der hohen Umformtemperaturen erst nach einer Abkühlphase durchgeführt werden können [BEU91] (Bild 3-9).



*Bild 3-9: Fehlerentdeckung erst nach der Fertigung*

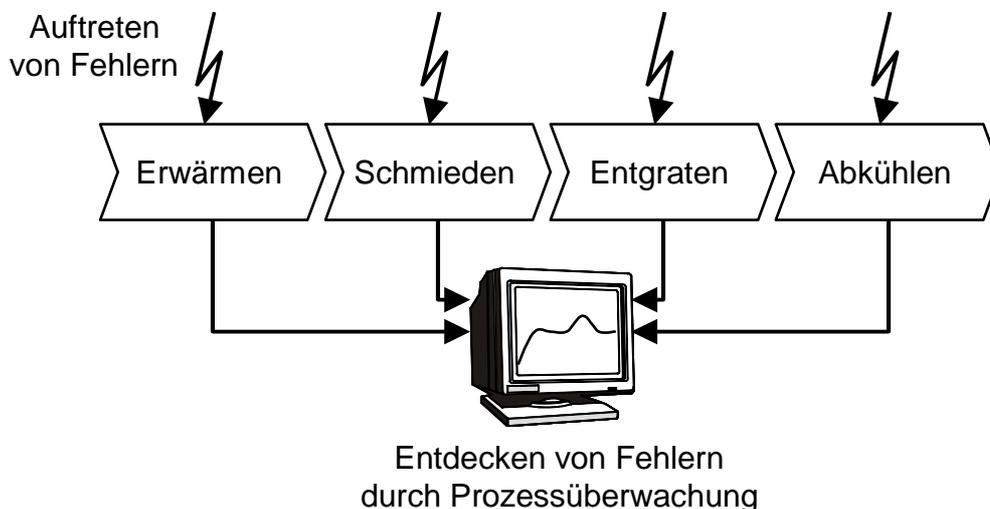
Dies hat zur Folge, dass bei einer Qualitätskontrolle nur über die Produktparameter bei der Entdeckung eines Fehlers bereits eine größere Menge an Ausschuss hergestellt worden ist. Bei der Fertigung von Schmiedeteilen kann davon ausgegangen werden, dass die meisten Produktparameter, die nicht in direktem Zusammenhang mit der Materialbeschaffenheit stehen, mit Parametern des Fertigungsprozesses korrelieren (Bild 3-10). So hängt beispielsweise die Rundlaufeigenschaft von Zahnrädern von den Haupteinflussfaktoren Rohteilmasse, Erwärmungstemperatur und Wegbegrenzung der Maschine ab [WEB94]. Eine Beurteilung der Produktqualität anhand von Prozesswerten oder -kennfeldern ist somit möglich [WAC92].



*Bild 3-10: Korrelation Produkt- und Prozessparameter (Beispiel)*

Aufgrund der Korrelation zwischen Produkt- und Prozessparametern besteht die Möglichkeit, die Qualität von Schmiedeprodukten anhand der Prozessparameter zu überprüfen. Reproduzierbare und stabile Prozessgrößen lassen auf die Produktion

qualitativ hochwertiger Produkte schließen. Mit Hilfe der online Überwachung von Prozessparametern lassen sich Fehler, die sich auf die Qualität des Produkts auswirken, bereits frühzeitig während des Fertigungsprozesses erkennen [HIN98] (Bild 3-11).



*Bild 3-11: Fehlerentdeckung während der Fertigung*

Die Vorteile einer online Prozessüberwachung liegen neben der schnellen Fehlererkennung vor allem in der Vollständigkeit der Prüfung – 100% der Produkte werden im Prozess überwacht – sowie in einer Minimierung der Kosten und Aufwände einer nachfolgenden Produktprüfung. Die schnelle Identifizierung von Fehlern ermöglicht eine Senkung der Ausschussrate und somit eine höhere Wirtschaftlichkeit des Schmiedeprozesses.

Von besonderem Interesse ist eine online Überwachung beim Einsatz automatisierter Prozesse in der Schmiede. Da der Fertigungsprozess nicht mehr durch den Werker an der Maschine kontinuierlich überprüft wird, muss diese Funktion, die der Werker zusätzlich zu seiner Handhabungsfunktion ausführt, ebenfalls durch einen Automatismus ersetzt werden. Hierbei erfolgt eine Analyse der online überwachten Prozessparameter, die auf Basis hinterlegter Regeln Rückschlüsse über die Fertigungsqualität erlaubt. Fehlerhaft gefertigte Teile können bei einem automatisierten Betrieb unmittelbar ausgeschleust werden [BEH97].

In der Regel wird die Prozessüberwachung dazu benutzt, den zeitlichen Verlauf der Prozessparameter darzustellen. Anhand einer Qualitätsregelkarte (Bild 3-12), in der sowohl Toleranzgrenzen als auch Eingriffsgrenzen für einen Prozessparameter definiert sind, kann der Bediener erkennen, wie der Prozess verläuft und ob ein Eingriff erforderlich ist.

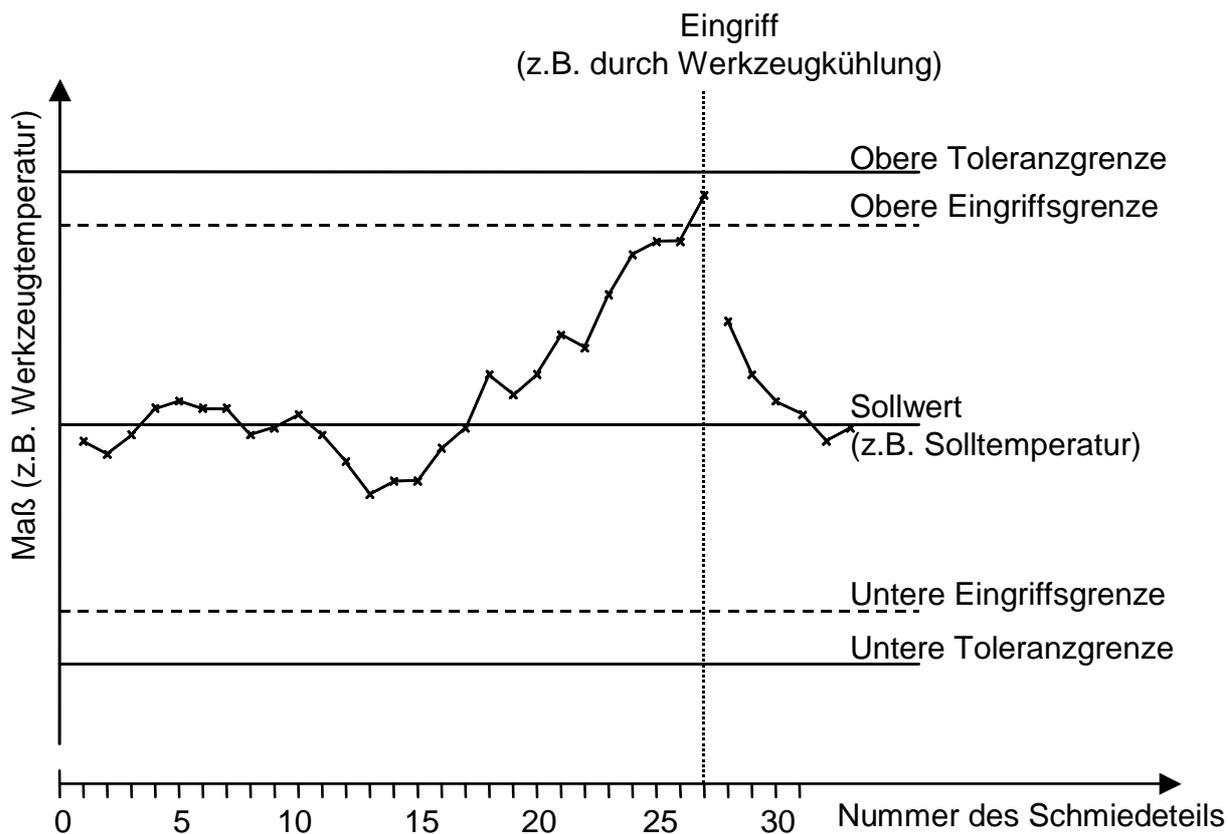


Bild 3-12: Qualitätsregelkarte (Beispiel)

Bei Betrachtung der Vielzahl prozessrelevanter Parameter muss geprüft werden, inwieweit eine gegenseitige Beeinflussung oder Überlagerung der Effekte stattfindet. Am Beispiel der Parameter Rohteiltemperatur und Werkzeugtemperatur ist zu erkennen, dass sich die Einflüsse in Bezug auf die Produktabmessungen infolge thermischer Dehnung addieren (Bild 3-13).

		Werkzeugtemperatur	
		niedrig	hoch
Rohteiltemperatur	niedrig	↑ ↓ Effekte heben sich auf	↑ ↑ Effekte verstärken sich
	hoch	↓ ↓ Effekte verstärken sich	↓ ↑ Effekte heben sich auf

↑ größerer Produktdurchmesser  
 ↓ kleinerer Produktdurchmesser

Bild 3-13: Überlagerung der Einflüsse der Prozessparameter (Beispiel)

Bei Parametern, die sich gegenseitig stark beeinflussen, müssen entweder die Eingreif- und Toleranzintervalle für jeden Parameter sehr klein gehalten werden oder mehrere

Parameter müssen durch geeignete Algorithmen zusammengeführt und durch Kennzahlen abgebildet werden [HUX95].

### 3.3.3 Prozessregelung

Mit Hilfe der Prozessüberwachung ist es möglich, diejenigen Schmiedeteile zu identifizieren, die aufgrund auftretender Abweichungen vom Sollprozess fehlerbehaftet sind. Des Weiteren besteht die Möglichkeit, bei Abweichungen den Bediener der Anlage zu warnen, so dass dieser schnellst möglich eingreifen kann, um den Prozess zu stoppen oder nachzuregeln. Sind die Stellglieder zum Nachregeln eines Prozesses bekannt, kann eine automatische Prozessregelung erfolgen. In Bild 3-14 sind beispielhaft Regelkreise unterschiedlicher Größe, die im Schmiedebereich eingesetzt werden können, dargestellt.

Der Schmiedeprozess als formgebundener Prozess ist nicht direkt regelbar, da das Werkzeug einen analogen Formspeicher darstellt [GEI91]. Bei Maß- oder Formfehlern, die auf die Werkzeugkontur zurückzuführen sind, ist nur ein Wechsel des Werkzeugs möglich. Fehler an der Werkzeugkontur treten entweder durch eine fehlerhafte Werkzeugauslegung und -fertigung oder durch Verschleiß am Werkzeug auf. Das erforderliche Ersetzen der fehlerhaften Werkzeuge im Prozess kann dabei durch automatische Werkzeugschnellwechselsysteme erfolgen, die kurze Rüstzeiten und somit eine erhöhte Anlagenverfügbarkeit ermöglichen [WIL90].

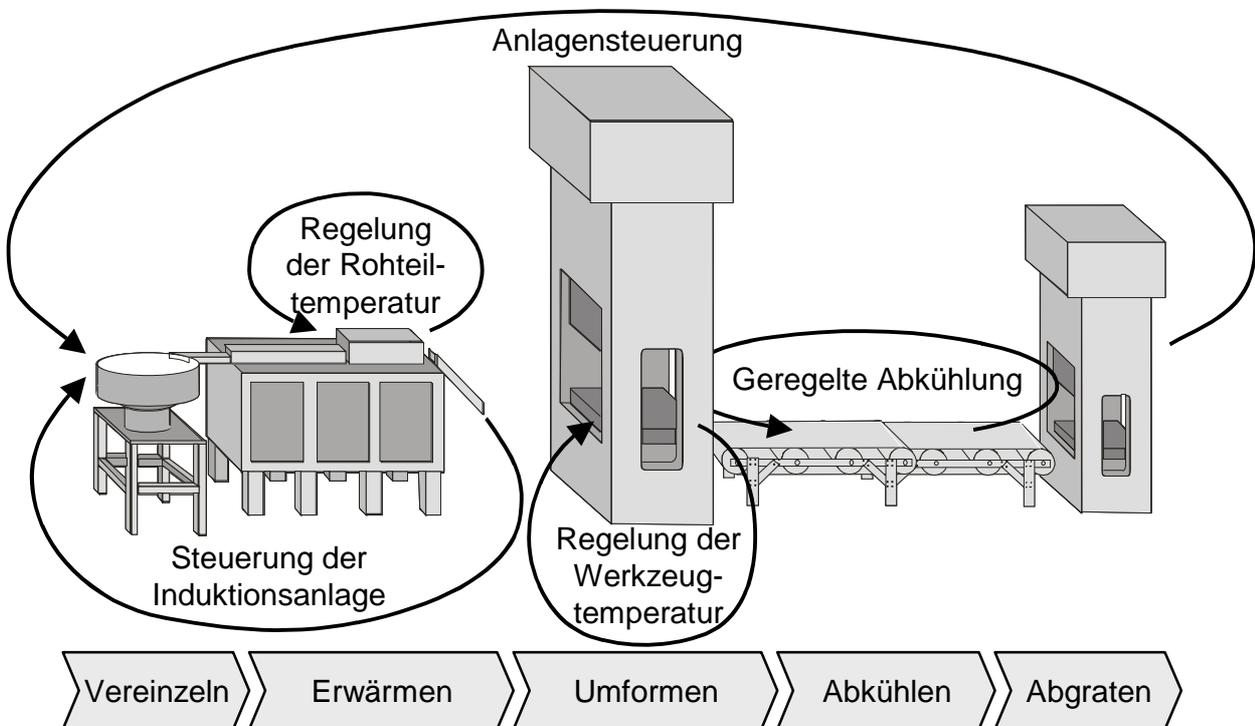


Bild 3-14: Regelkreise beim Schmieden

Bei einer Schmiedeteilfertigung können verschiedene Regelkreise betrachtet werden. Die niedrigste Hierarchie nehmen die Prozessparameter ein, die wie beispielsweise die Rohteiltemperatur in einer definierten Bandbreite begrenzt werden müssen. Diese Aufgabe erfüllt eine Prozessregelung, die aus einem Messglied zur Aufnahme des Ist-Zustandes, einem Regler zur Ermittlung eines Stellwertes sowie einem Stellglied zum Anpassen der Regelstrecke an den Sollwert besteht (Bild 3-15).

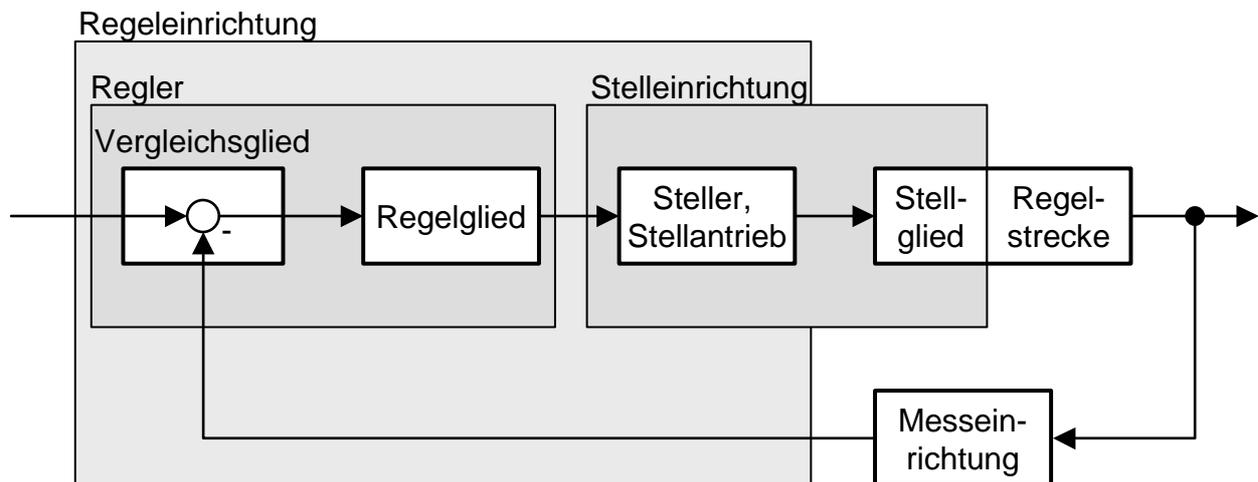


Bild 3-15: Aufbau einer Regelung [MAN00]

Ein Produktionssystem besteht normalerweise aus mehreren Maschinen oder Aggregaten, die die Prozessparameter beeinflussen. Diese Aggregate vereinen meist mehrere Funktionen wie im Beispiel eines Induktionsofens die Vereinzelnung, den Transport und die Erwärmung der Rohteile. Die Maschinensteuerung, beispielsweise die Steuerung des Induktionsofens, kontrolliert, steuert oder regelt hierbei die einzelnen Funktionen und Parameter des Prozesses, zum Beispiel die Rohteiltemperatur.

Da die einzelnen Aggregate als Subsysteme meist unabhängig voneinander sind, erfolgt die Prozessregelung separat. Eine Schmiedeanlage stellt somit nicht das Gesamtoptimum des Prozesses dar, sondern nur die Summe der lokalen Optima. Mit Hilfe der Automatisierungs- und Steuerungstechnik werden die einzelnen Aggregate verknüpft und einer Mastersteuerung unterstellt (Bild 3-16). Erst im Rahmen einer derartigen Steuerung ist es möglich, alle Prozessparameter jedem Subsystem zur Verfügung zu stellen und Regelkreise über den Gesamtprozess aufzubauen [MÜS99, WIL90]. Die Regelung der gesamten Prozesskette stellt die höchste Hierarchie dar. Ein entscheidender Vorteil einer Steuerung der Gesamtprozesskette ist die Möglichkeit, Regelkreise für alle qualitätsrelevanten Parameter aufzubauen [BEH97]. Hierbei können Prozessparameter, die an einer Stelle einer Anlage online erfasst werden, als Messwerte an einer anderen Stelle zur Verfügung gestellt werden. Durch das Erkennen langfristiger Trends aufgrund einer anlagenüberspannenden Prozessüberwachung ist es möglich, die qualitätsrelevanten Parameter aufeinander abzustimmen und zu regeln [RÜS00].

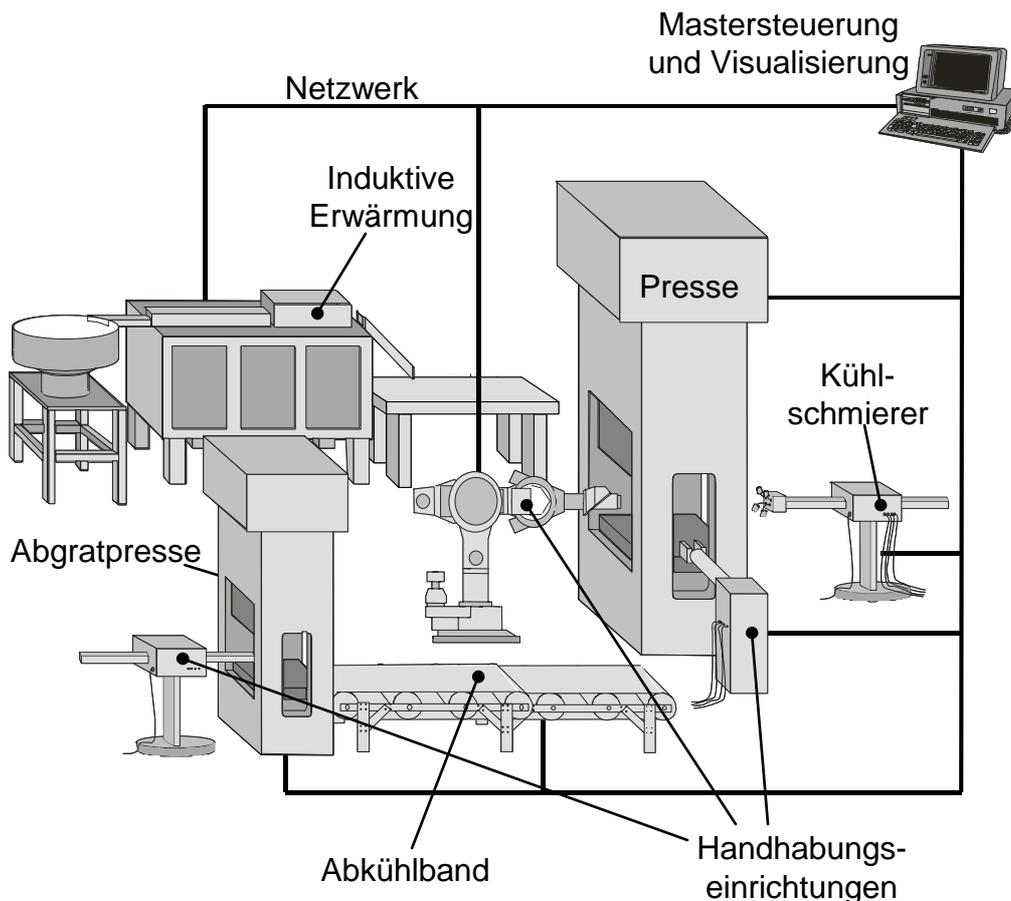


Bild 3-16: Automatisierte Schmiedelinie [MÜS99]

In der realen Schmiedeteilproduktion werden automatische Regelkreise nur bedingt eingesetzt. Die induktive Erwärmung ist hierbei einer der am weitesten verbreiteten Regelkreise. Elektrische Ströme im Rohteil, die durch eine Spule induziert werden, führen aufgrund des Widerstands zu einer Erwärmung des Materials. Die Frequenz sowie der Spulenstrom beeinflussen die Temperatur und dienen als Stellglieder. Gemessen wird die Ist-Temperatur des erwärmten Rohteils mittels eines Pyrometers [SCU95, SEV95, KNO92].

Ein weiteres Einsatzgebiet einer Regelung in der Schmiedeteilproduktion ist die geregelte Abkühlung oder Abschreckung aus der Schmiedewärme. Hierbei wird mittels gasförmiger oder flüssiger Medien ein gezielter konvektiver Wärmeverlust des fertigen Schmiedeteils erzeugt, der maßgeblich die mechanischen Eigenschaften wie beispielsweise die Härte beeinflusst. Durch dieses Verfahren kann auf eine nachgeschaltete Wärmebehandlung mit nochmaligem Erwärmen verzichtet werden [NIE97].

Aufgrund der hohen Sensitivität der geometrischen Abmessungen gegenüber der Werkzeugtemperatur, ist eine Reproduzierbarkeit dieses Parameters bedeutend für die Schmiedeteilqualität. Für eine Regelung der Werkzeugtemperatur gibt es Grundüberlegungen und Ansätze, wie beispielsweise geregelte elektrische Heizpatronen [KLE80]

oder eine Zwei-Punkt Regelung der Oberflächensprühkühlung [DOH00]. Eine Flüssigkeitstemperierung könnte hier neue Potentiale eröffnen [MÜS00].

### **3.4 Temperierung bei Gießverfahren**

In den Bereichen Spritzguss und Druckguss wird eine Temperierung der Form schon seit langer Zeit erfolgreich angewandt. Neben einer besseren Produktqualität trägt eine Temperierung des Werkzeugs maßgeblich zu Verbesserung des Prozesses insbesondere zu einer Reduzierung der Taktzeiten bei. Im Folgenden werden die Anforderungen an den jeweiligen Prozess erläutert und der Einsatz von Temperiersystemen dargelegt.

#### **3.4.1 Temperierung beim Spritzguss**

Beim Spritzgießen wird in Abhängigkeit der chemischen und physikalischen Eigenschaften der Werkstoffe zwischen Thermoplasten und vernetzenden Formmassen unterschieden. Während des Prozessablaufs beim Spritzgießen von Thermoplasten wird dem Material soviel Wärme entzogen, bis ein formstabiler Zustand eintritt, in dem ein Entformen möglich ist. Duroplastischen und elastomeren Formmassen muss im Gegensatz dazu Wärme in dem Maße zugeführt werden, dass eine Vernetzung des Materials stattfinden kann. Die Temperatur des Werkzeugs hat aufgrund des geforderten Wärmeaustauschs zwischen Werkzeug und Spritzgießteil einen entscheidenden Einfluss auf den Prozess. Abkühlprozesse können zwar, da die Umgebungstemperatur unterhalb der Werkzeugtemperatur liegt, auch unbeeinflusst ablaufen, eine kontrollierte Abkühlung beschleunigt allerdings den Vorgang und ermöglicht eine höhere Prozessstabilität und damit Produktgenauigkeit [ZEP97]. Die Erwärmung der Werkzeuge kann nur durch externe Maßnahmen erreicht werden.

Eine kontrollierte Temperaturführung ist bei Spritzgießwerkzeugen von großem Vorteil [GRI98]. Im Regelfall werden die Spritzgussteile nicht mehr nachgearbeitet, das heißt, alle Flächen müssen Endmaß besitzen. Aufgrund des temperaturabhängigen chemischen Verhaltens sowie der thermischen Werkzeug- und Werkstückdehnung muss die Temperatur des Werkzeugs räumlich auf einem homogenen Niveau sowie zeitlich über alle Prozesszyklen konstant gehalten werden. Während eines Zyklus ändert sich die Temperatur zum Teil stark und wird im Bedarfsfall aktiv entlang einer Kennlinie geführt [GRI97].

Aufgrund dieser Anforderungen muss eine externe Temperaturbeeinflussung homogene Temperaturen auf der gesamten Formoberfläche ermöglichen und eine genaue und schnelle Regelung der Temperatur aufweisen. Für Temperieraufgaben, das heißt kombiniertes Heizen und Kühlen, werden in der Praxis Temperiergeräte eingesetzt, bei denen ein flüssiger Wärmeträger durch Temperierkanäle geleitet wird und Wärme im Werkzeug aufnimmt oder abgibt. Als Flüssigkeiten werden neben Wasser synthetische

Öle oder Mineralöle eingesetzt. Bei reinen Heizaufgaben werden Widerstandsheizelemente verwendet, die über die Werkzeugfläche verteilt werden [MEN99].

Die Temperierung wird meistens als eigenständiges System betrieben. Bei einer kennliniengeführten Regelung ist aber eine Kopplung der Temperaturregelung an die Steuerung des gesamten Fertigungssystems sinnvoll. Neuere Ansätze verfolgen diesen Weg, indem sie den Regler mittels einer Software im Steuerungscomputer der SPS (Speicherprogrammierbare Steuerung) integrieren und nicht nur den Sollwert der Temperiergerätesteuerung vorgeben [PAP00].

### **3.4.2 Temperierung beim Druckguss**

Bei Druckgusswerkzeugen kommt es ähnlich wie beim Spritzguss von Thermoplasten darauf an, dem Werkstück so viel Wärme zu entziehen, dass ein Entformen möglich ist. Aufgrund des natürlichen Wärmeübergangs von der Aluminiumschmelze auf die Druckgussform kommt es beim Einschuss zu Temperaturen von über 600°C an der Formwand. Dieser Wert liegt bereits in der Größenordnung der Anlasstemperatur des Warmarbeitsstahls der Werkzeuge. Um große Temperaturunterschiede zwischen der Schmelze und dem kalten Werkzeug und damit Thermoschockrisse zu vermeiden, wird die Druckgussform in der Regel vorgeheizt. Um eine hohe Standzeit der Werkzeuge zu erreichen, ist neben der Vorwärmung eine Kühlung während der Fertigung sinnvoll. Hierbei wird meist eine Kühlung von außen durch Aufsprühen eines Trennmittels mit einer Wasserkühlung von innen kombiniert. Die Schwierigkeit einer Wasserkühlung besteht in der schlechten Regelbarkeit und damit in der Gefahr einer Unterkühlung, die die Ursache von Thermoschocks und dadurch bedingten Rissen ist. Eine Temperierung mittels Wärmeträgeröl stellt eine sinnvolle Alternative ohne diesen Nachteil dar [KLE90, MEI94].

Neben längeren Standzeiten bewirkt eine Temperierung außerdem eine Verbesserung der Produktqualität. Die Effizienz und Qualität einer Temperierung hängen dabei wesentlich von der Auslegung des gesamten Temperiersystems ab. Relevante Faktoren sind die Leistung des Temperieraggregates, die Dimension, Lage und Form der Temperierbohrungen oder -kanäle sowie das Regelverhalten und die Regelgenauigkeit [SEI92].

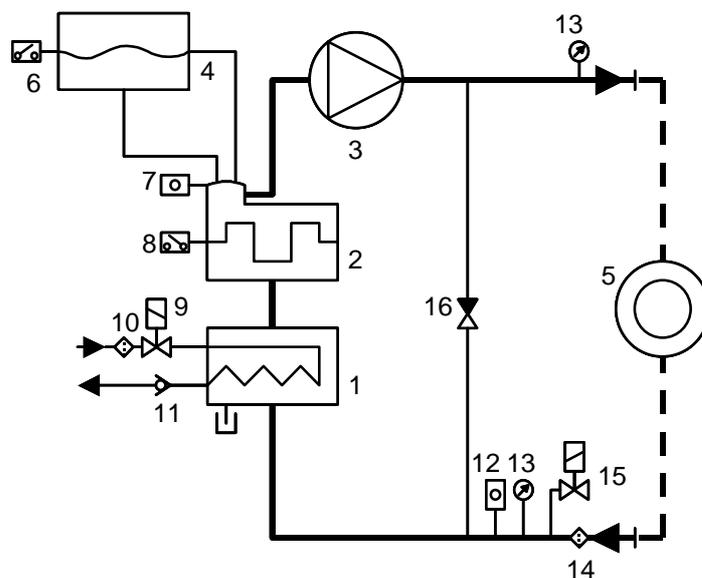
### **3.5 Temperiergeräte**

Temperiergeräte werden dazu eingesetzt, Produktionsmittel auf eine gewünschte Soll-Temperatur zu bringen und diese durch Heizen oder Kühlen konstant zu halten. Zum Einsatz kommen dabei elektrische Temperiersysteme, die durch Heizen die Wärmeverluste an die Umgebung ausgleichen, Flüssigkeitstemperiersysteme, die mittels eines geheizten bzw. gekühlten Mediums die Werkzeugtemperatur verändern, und pulsierende Temperiersysteme, bei denen elektrische Heiz- und Kühlwasserimpulse abwechseln

[FRI93]. Die Flüssigkeitstemperierung ist das am häufigsten eingesetzte System und soll im Weiteren detailliert betrachtet werden.

Bei einer Temperierung mittels flüssiger Medien wird ein Wärmeträger in einem Kreislauf, bestehend aus dem Temperiergerät und einem Verbraucher, dem Schmiedewerkzeug, von einer Pumpe (3) umgewälzt und ermöglicht so einen kontinuierlichen Wärmeaustausch mit dem Werkzeug (5) (Bild 3-17). Im Temperiergerät wird die Temperatur des Wärmeträgers gezielt durch eine elektrische Beheizung (2) und einen Kühlwasserkreislauf (1) beeinflusst. Die Soll-Temperatur des Wärmeträgers wird hierbei von einer Regeleinrichtung auf Basis der Ist-Temperatur, die durch einen internen (7) oder externen Temperaturfühler ermittelt wird, vorgegeben.

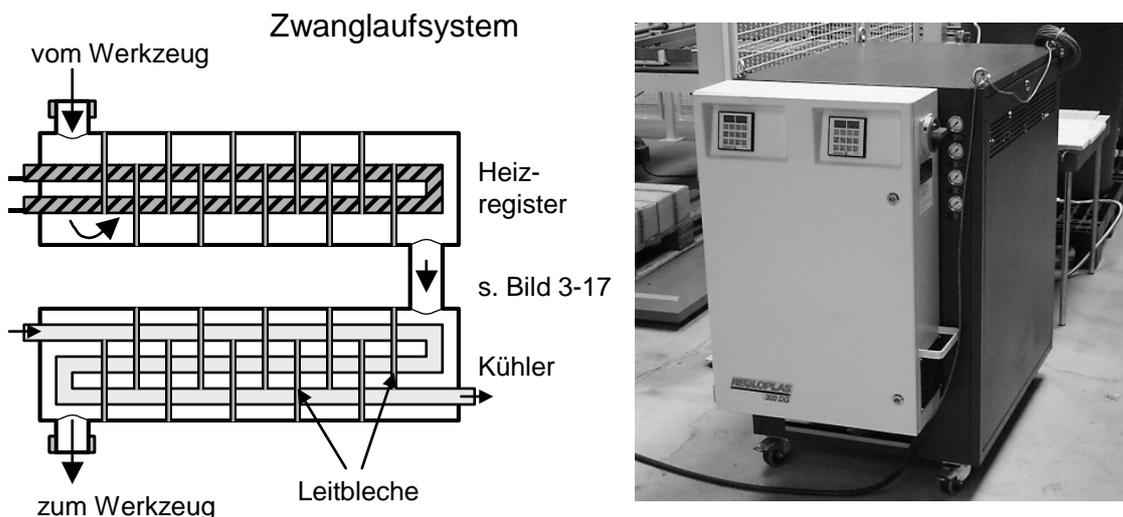
Bei Temperiergeräten wird nach dem Betriebsmedium, entweder Wasser oder Wärmeträgeröl, unterschieden. Geräte für Wasserbetrieb werden druckfrei mit einer maximalen Vorlauftemperatur von etwa 90°C oder drucküberlagert auch mit höheren Temperaturen betrieben. Bei Geräten mit Ölbetrieb beträgt die maximale Betriebstemperatur etwa 350°C. Ferner werden Temperiergeräte mit Badbeheizung oder Zwanglaufsystem, direkter oder indirekter Kühlung sowie einem oder mehreren Temperierkanälen unterschieden [GOR97].



- |                                     |                            |                              |
|-------------------------------------|----------------------------|------------------------------|
| 1 Kühler                            | 6 Niveauekontrolle         | 12 Temperaturfühler Rücklauf |
| 2 Heizregister                      | 7 Temperaturfühler Vorlauf | 13 Manometer                 |
| 3 Pumpe                             | 8 Sicherheitsthermostat    | 14 Filter Kreislauf          |
| 4 Ausdehnungsgefäß/<br>Tankbehälter | 9 Magnetventil Kühlung     | 15 Magnetventil Absaugung    |
| 5 Schmiedewerkzeug                  | 10 Filter Wassernetz       | 16 Bypass                    |
|                                     | 11 Rückschlagventil        |                              |

Bild 3-17: Aufbau eines Temperiergerätes (Beispiel Regloplas Typ 300) [REG98]

Temperiergeräte mit Badbeheizung stellen die einfachste Bauart dar. Beheizung und Kühlung sind im Tankbehälter integriert. Da der gesamte Tankinhalt erwärmt oder gekühlt werden muss, resultiert aus diesem Aufbau eine thermische Trägheit des Systems. Wasserbasierte Temperiergeräte können bei dieser Bauart mit Hilfe eines Sekundärkühlwasserkreises indirekt oder durch Ablassen von Warmwasser und Nachfüllen von Kaltwasser direkt gekühlt werden.



*Bild 3-18: Temperiergerät mit Zwanglaufsystem (Beispiel Regloplas Typ 300)*

Bei Geräten mit Zwanglaufsystem (Bild 3-18) fließt der Wärmeträger unter definierten Strömungsverhältnissen durch ein vom Tank separiertes Heizregister und einen Kühler. Aufgrund der geringeren Flüssigkeitsmenge im Heizregister und Kühler ist die Wärmeträgheit gering und somit ein gutes Regelverhalten gegeben. Nachteil dieses Systems ist die aufwendige und damit teure Bauweise. Temperiergeräte für hohe Temperaturen sind aus Sicherheitsgründen in der Regel als Zwanglaufsysteme aufgebaut.

Ein entscheidender Faktor beim Einsatz von Temperiergeräten ist das Aufrechterhalten definierter Strömungsverhältnisse, um einen bestmöglichen Wärmeaustausch im Verbraucher zu garantieren. Aus diesem Grund muss bei der Aufgabenstellung der Temperierung von Werkzeugen das Gesamtsystem, bestehend aus Temperiergerät, Wärmeträgermedium, Zu- und Ableitungen sowie dem Werkzeug als Verbraucher, betrachtet werden. Um nahezu druckfrei arbeiten zu können, dürfen keine größeren Widerstände oder Engpässe im Temperiersystem vorliegen. Der Wirkungsgrad eines Temperiersystems hängt im Wesentlichen von der Auslegung des Werkzeugs, dem Wärmeträgermedium und der thermischen Kopplung zwischen Werkzeug und Temperiersystem ab. Die thermische Kopplung spielt hierbei sowohl bei der Messwerterfassung als auch beim Wärmeübergang zwischen Wärmeträger und Werkzeug eine wichtige Rolle.

## 4 Thermische Analyse des Schmiedeprozesses

Um Einfluss auf den Schmiedeprozess nehmen zu können, ist es nötig, die physikalischen Abläufe genau zu verstehen. Im Folgenden soll ausgehend von einem thermodynamischen Modell das zeitliche Temperaturverhalten abgeleitet werden. Die im Folgenden verwendeten Begriffe für Temperaturen sind in Bild 4-1 definiert.

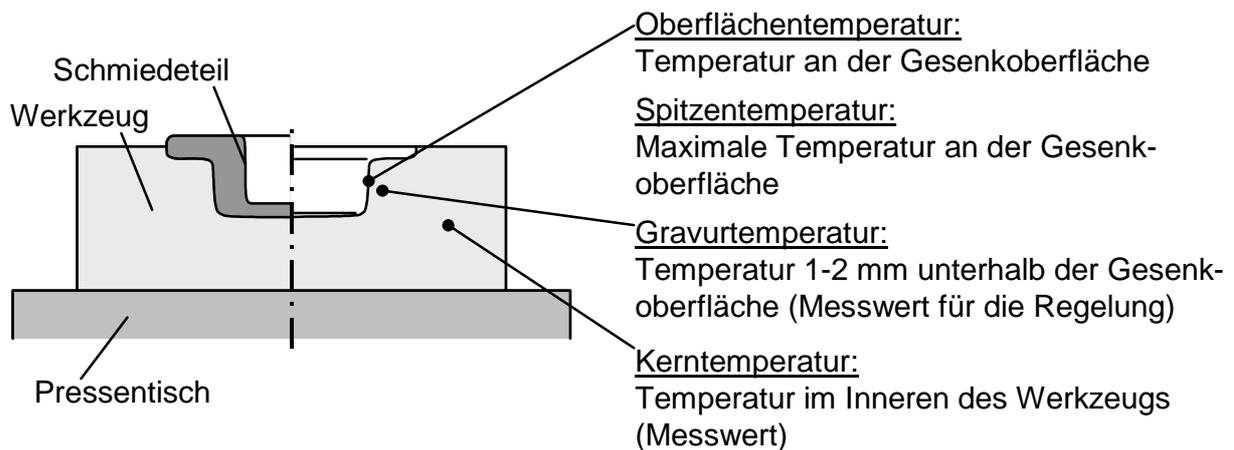


Bild 4-1: Definition der verwendeten Temperaturbegriffe

Mit Hilfe einer Abschätzung der Wärmeströme, der zugeführten und abgegebenen Energien und der Temperaturverteilung ist es möglich, die Anforderungen und Randbedingungen einer Temperaturbeeinflussung anzugeben. Unter Berücksichtigung der theoretisch ermittelten Randbedingungen können mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode quantitative Aussagen getroffen werden, die als Basis zur Lösungsfindung für die Temperierung von Schmiedewerkzeugen dienen.

### 4.1 Thermodynamisches Modell

#### 4.1.1 Wärmebilanz

Der Schmiedeprozess unterliegt komplexen thermischen Abläufen. Körper unterschiedlicher Temperaturen werden in Kontakt gebracht und wieder getrennt, wobei Wärmeströme auftreten. Zusätzlich spielt die Wärmeabgabe durch Strahlung und Konvektion eine bedeutende Rolle. Zur Verdeutlichung sind in Bild 4-2 die auftretenden Wärmeströme bei Kontakt eines Schmiedeteils mit dem Werkzeug und nach Entfernen des Schmiedeteils beispielhaft abgebildet. Eine Abschätzung der Wärmeströme erfolgt in Abschn. 4.3.

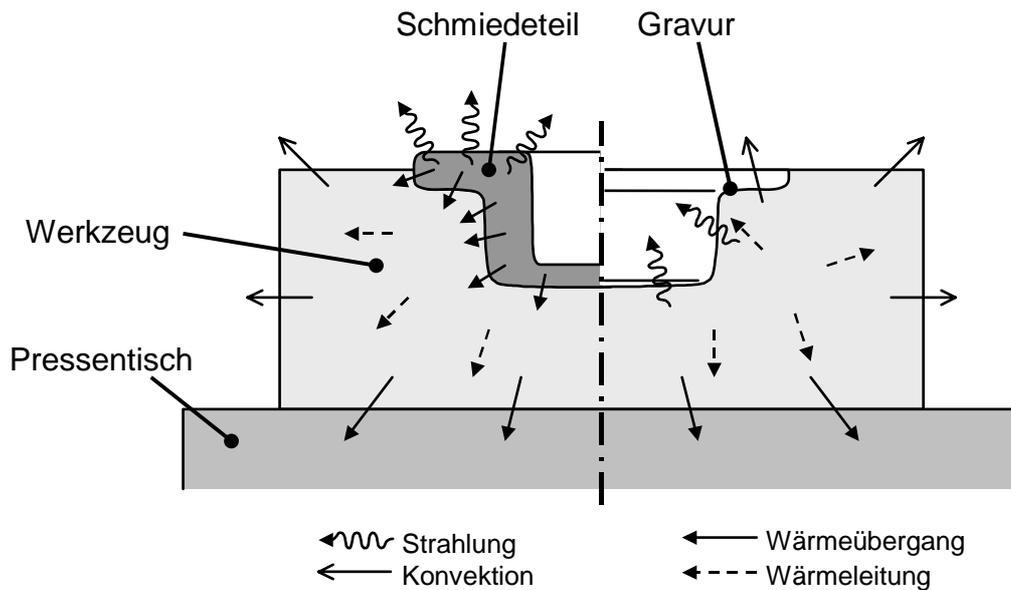


Bild 4-2: Wärmeströme beim Schmieden

Die Wärmebilanz eines Schmiedeteils setzt sich dabei aus verschiedenen zeitlich veränderlichen Wärmemengen zusammen:

$$\frac{dQ}{dt} = \dot{Q} = \dot{Q}_e + \dot{Q}_u + \dot{Q}_r + \dot{Q}_w + \dot{Q}_k + \dot{Q}_s \quad (4-1)$$

- $\dot{Q}_e$  : Wärmeänderung durch extern zugeführte Energie (z.B. induktive Erwärmung)
- $\dot{Q}_u$  : Wärmeänderung durch Umformarbeit
- $\dot{Q}_r$  : Wärmeänderung durch Reibung an der Oberfläche
- $\dot{Q}_w$  : Wärmestrom Werkstück – Werkzeug
- $\dot{Q}_k$  : Wärmestrom durch Konvektion
- $\dot{Q}_s$  : Wärmestrom durch Strahlung

Bei der induktiven Erwärmung wird dem Schmiederohteil die externe Wärmemenge  $Q_e$  durch induzierte Ströme zugeführt. Beim Schmiedevorgang wird durch die Umformarbeit im Inneren des Werkstücks die Wärmemenge  $Q_u$  und durch die Reibung mit dem Werkzeug an der Oberfläche die Wärmemenge  $Q_r$  erzeugt. Durch Kontakt mit dem Werkzeug wird die Wärmemenge  $Q_w$  übergeben. An die Umgebung wird durch Konvektion die Wärmemenge  $Q_k$  sowie durch Strahlung die Wärmemenge  $Q_s$  abgeführt.

Mit Gleichung (4-1) lässt sich ebenfalls die Wärmebilanz des Werkzeugs beschreiben, wobei  $Q_e$  einer durch Beheizung zugeführten oder durch Kühlung abgeführten externen Wärmemenge entspricht und im Term  $Q_w$  sowohl der Wärmeübergang Werkstück – Werkzeug als auch der Wärmeübergang Werkzeug – Pressentisch enthalten sind.

### 4.1.2 Wärmeübergang

Die Wärmeströme durch Kontaktwärmübergang, Konvektion und Strahlung sind folgendermaßen definiert [VDI91]:

$$\dot{Q}_w = \alpha_w \cdot A \cdot (T_1 - T_2) \quad (4-2)$$

$$\dot{Q}_k = \alpha_k \cdot A \cdot (T_1 - T_2) \quad (4-3)$$

$$\dot{Q}_s = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad (4-4)$$

$\alpha_i$  beschreibt hierbei die Wärmeübergangskoeffizienten, die eine Material- und Geometrieabhängigkeit aufweisen,  $A$  die wirksame Fläche,  $T_1$  und  $T_2$  die Temperatur zweier Körper bzw. eines Körpers und der Umgebung.  $\varepsilon$  ist der Emissionsgrad der strahlenden Fläche und  $\sigma$  die Stefan-Boltzmann-Konstante. Im Folgenden werden die einzelnen Wärmeübergänge genauer beschrieben.

#### Kontaktwärmübergang

Ein Wärmeübergang bei Kontakt tritt bei Berührung zweier unterschiedlich warmer Festkörper auf. Der Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha_w$  bei Kontakt ist hierbei in großem Maße vom Kontaktdruck  $p$  abhängig. Dies ist dadurch begründet, dass die Kontaktflächen nicht exakt eben sind und eine Oberflächenrauigkeit aufweisen (Bild 4-3). Hierdurch ist bei der Berührung zweier Festkörper nur eine Teilfläche in direktem Kontakt während sich über die restliche Fläche Hohlräume ausbilden.

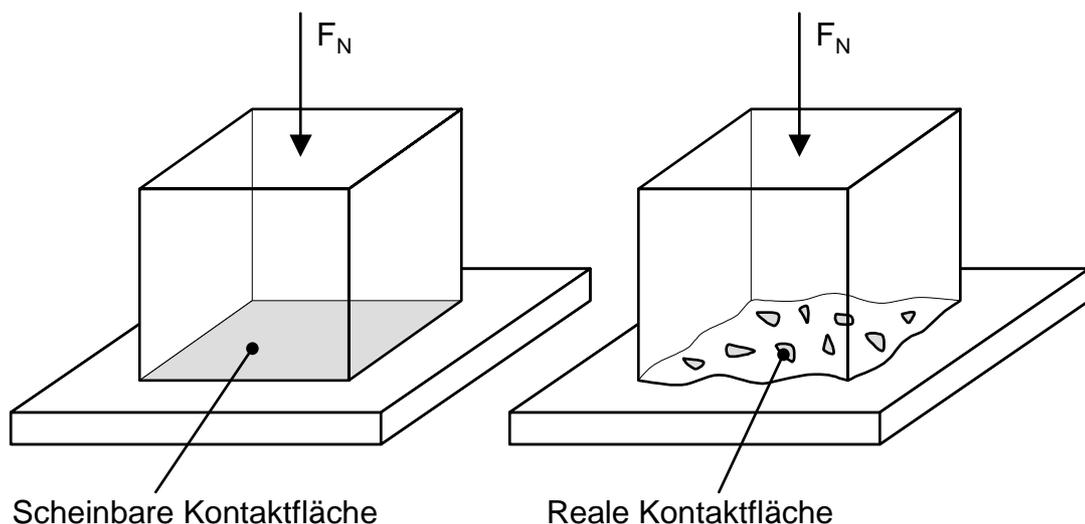


Bild 4-3: Modell des Kontaktwärmübergangs [NÄG94]

Der Wärmeübergang entlang der Kontaktfläche setzt sich somit aus den Teilwärmübergängen an den Kontaktstellen, durch die Hohlraumzwichenschicht und durch die

Strahlung im Hohlraum zusammen. Bei Erhöhung des Kontaktdrucks nimmt die Teilfläche des direkten Kontaktes zu, während die Teilfläche der Hohlräume abnimmt.

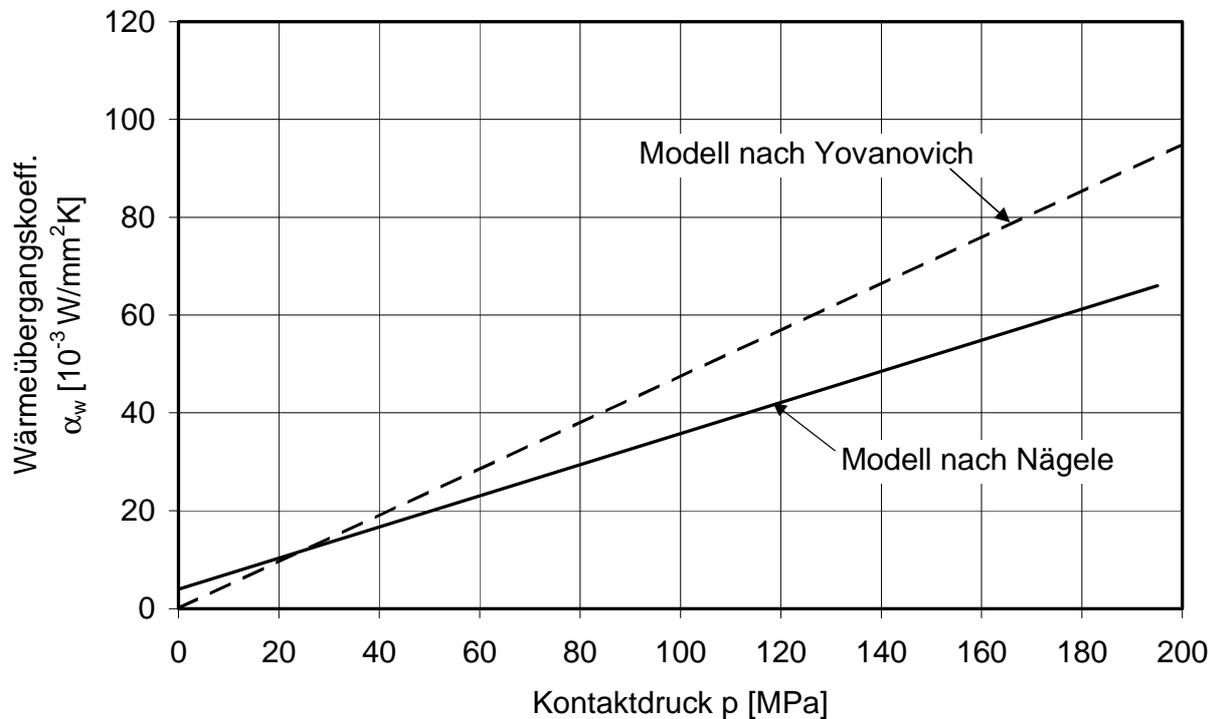


Bild 4-4: Druckabhängigkeit des Wärmeübergangskoeffizienten [NÄG94]

Die Modelle, die den druckabhängigen Kontaktwärmeübergang beschreiben (Bild 4-4), berücksichtigen die oben beschriebenen Teilwärmeübergänge. Im Modell nach Yovanovich wird Luft als den Hohlraum füllendes Gas angenommen. Im Modell nach Nägele wird zusätzlich der Schmierstoff zwischen Werkstück und Werkzeug berücksichtigt. Da Schmierstoffe im Allgemeinen eine gewollt schlechte Wärmeleitung im Verhältnis zum Übergang Werkstückmetall – Werkzeugmetall aufweisen, ist der Kontaktwärmeübergangskoeffizient im Modell nach Nägele kleiner als im Modell nach Yovanovich [NÄG94].

## Konvektion

Beim Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha_k$  wird zwischen freier und erzwungener Konvektion unterschieden. Erzwungene Konvektion liegt vor, wenn eine Fluidströmung von außen aufgeprägt wird, wie zum Beispiel beim Ausblasen der Gesenke. Bei freier Konvektion stellt sich aufgrund der Temperaturunterschiede zwischen dem warmen Körper und dem kalten Fluid eine unbeeinflusste Strömung ein. Beim Aufsprühen von Kühlwasser kommt zur Konvektion zusätzlich der Anteil der Erwärmung der Wassertropfen und die Änderung des Aggregatzustandes durch Verdampfen hinzu.

Der Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha_k$  setzt sich aus der dimensionslosen, den konvektiven Wärmeübergang charakterisierenden Nußelt-Zahl  $Nu$ , der Anströmlänge  $l$  und dem Wärmeleitkoeffizienten  $\lambda$  des umgebenden Fluids zusammen:

$$\alpha_k = \frac{Nu \cdot \lambda}{l} \quad (4-5)$$

Die Nußelt-Zahl sowie die Anströmlänge sind stark von der Geometrie und der Größe des Körpers abhängig. Des Weiteren spielt es eine Rolle, ob sich eine turbulente oder laminare Strömung ausbildet. Für eine genaue Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten sei auf die Literatur verwiesen [STE92, VDI91].

### Wärmestrahlung

Die Oberfläche von Festkörpern absorbiert und emittiert bei Temperaturen über dem absoluten Nullpunkt von 0 K Energie in Form elektromagnetischer Strahlung. Befinden sich zwei Körper auf unterschiedlichen Temperaturniveaus, so wird durch die Strahlung Wärme übertragen. Eine ideale schwarze Oberfläche strahlt einen Maximalwert an Energie ab ( $\varepsilon = 1$ ). Die Strahlungsleistung je Flächeneinheit berechnet sich gemäß des Stefan-Boltzmann-Gesetzes folgendermaßen:

$$E_s = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (4-6)$$

Die Stefan-Boltzmann-Konstante  $\sigma$  hat dabei den Wert  $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$ . Technische Oberflächen emittieren weniger Energie als eine ideale schwarze Oberfläche. Zu diesem Zweck wird der Emissionsgrad  $\varepsilon < 1$  als Faktor in Gleichung (4-6) eingefügt.

Der Emissionsgrad ist abhängig vom Material und der Oberflächenbeschaffenheit. Des Weiteren weist er eine Temperaturabhängigkeit auf. Dies ist dadurch begründet, dass die Intensität der Strahlung von der Wellenlänge abhängt und die spektrale Intensitätsverteilung der Strahlung bei unterschiedlichen Temperaturen verschoben ist. Weiterhin besteht eine Richtungsabhängigkeit, die durch den Winkel zur Oberfläche beschrieben werden kann. Als Messwert wird meist der Emissionsgrad zur Flächennormale oder der Emissionsgrad der Gesamtstrahlung über die Halbkugel angegeben [STE92, VDI91].

### 4.1.3 Temperaturverteilung

Die Gleichungen (4-2) bis (4-4) beschreiben den Wärmeübergang für Flächen gleicher Temperatur. In der Realität weisen die am Schmiedeprozess beteiligten Körper – Werkstück, Werkzeug und Presse – ein zeitabhängiges Temperaturfeld auf, so dass für die Wärmeströme mit infinitesimalen Flächen gerechnet werden muss. Beispielhaft wird dies für Gleichung (4-2) gezeigt:

$$d\dot{Q}_w(x, y, z, t) = \alpha_w(p(x, y, z, t)) \cdot (T_1(x, y, z, t) - T_2(x, y, z, t)) \cdot dA \quad (4-7)$$

Das Temperaturfeld innerhalb eines Körpers wird über die instationäre Wärmeleitungsgleichung

$$c_p \rho \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda \cdot \text{grad}T) + q \quad (4-8)$$

berechnet, wobei die Wärmekapazität pro Volumen  $c_p \rho$  und die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  abhängig von der Temperatur sind [KNE90].  $q$  beschreibt die Wärmequellendichte und resultiert aus der Wärmeentwicklung, die beispielsweise durch die induktive Erwärmung im Schmiederohteil auftritt. Der Zusammenhang zwischen  $q$  und der Wärmemenge  $Q$  lautet folgendermaßen:

$$d\dot{Q} = q \cdot dV \quad (4-9)$$

Aufgrund der komplexen gekoppelten mechanischen und thermischen Vorgänge sowie der nichtlinearen Materialgesetze besteht keine Möglichkeit, die thermischen Differentialgleichungen analytisch zu lösen. Mit Hilfe numerischer Lösungsverfahren wie der Finite-Elemente-Methode lassen sich dennoch angenäherte Ergebnisse erzielen. In Bild 4-5 ist als Beispiel nach [BÖR97] die Temperaturverteilung dargestellt, die sich durch induktive Erwärmung und Wärmeverluste aufgrund Konvektion und Strahlung in einem Schmiederohteil einstellt. Die Zeiten geben dabei die Dauer des Erwärmungsvorganges wieder.

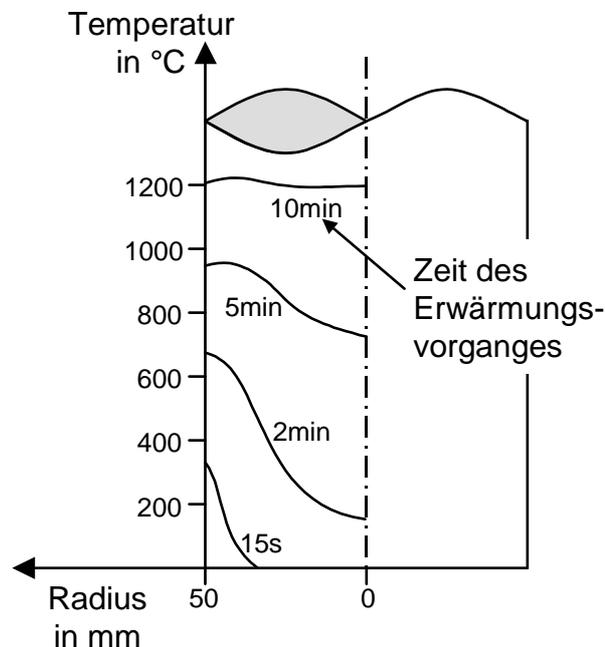


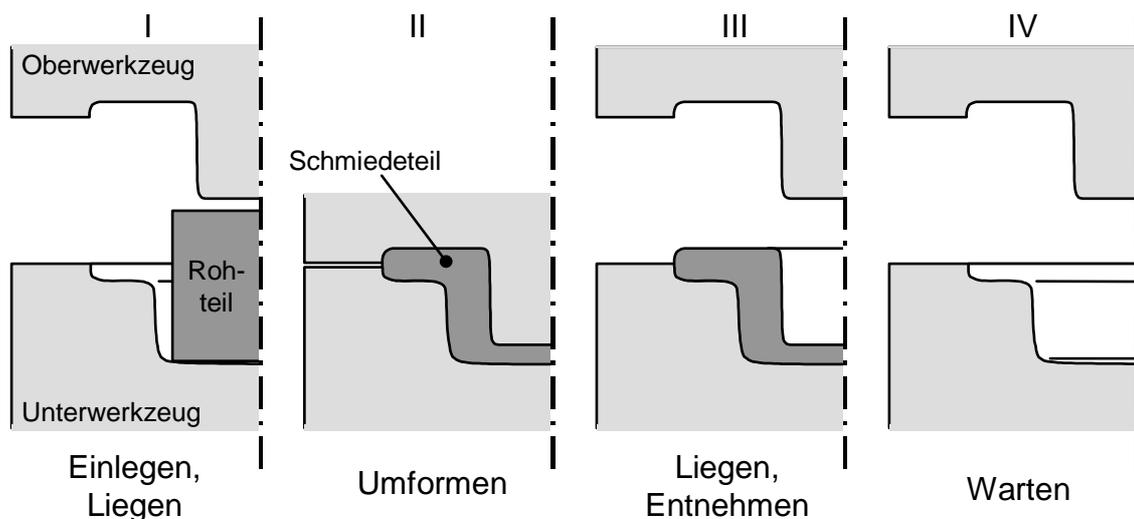
Bild 4-5: Temperaturverteilung im Schmiedestück durch induktives Erwärmen [BÖR97]

Die Genauigkeit der numerischen Berechnungen hängt sehr stark von den gewählten Randbedingungen ab. Eine größenmäßige Abschätzung der physikalischen Effekte soll

helfen, die Randbedingungen so zu definieren, dass der Nutzen im Verhältnis zum Aufwand möglichst groß ist.

## 4.2 Zeitliches Verhalten der Werkzeugtemperatur

Zeitlich lässt sich der Schmiedeprozess oder -zyklus in vier Phasen unterteilen (Bild 4-6). In der ersten Phase wird das Schmiederohrteil ins Gesenk eingelegt, wobei es nur eine Teilfläche des Gesenks berührt. Der Wärmeübergang vom Rohteil in das Werkzeug ist aufgrund der kleinen Fläche und des geringen Kontaktdrucks nur mäßig. Wärmeverluste in Folge von Strahlung überwiegen. In der zweiten Phase findet das Umformen des Materials statt. Große Kontaktdrücke ermöglichen ein Fließen des Materials, das sich an die Gesenkwände anlegt und zu einem sehr großen Wärmeübergang führt. Während der dritten Phase liegt das ausgeformte Schmiedeteil bis zur Entnahme im Gesenk. Es fließt weiterhin ein Wärmestrom vom Schmiedeteil in das Werkzeug, der aber aufgrund des geringen Kontaktdrucks und des nicht mehr so großen Temperaturunterschieds wesentlich kleiner ist als in Phase zwei. Wärmeleitung im Werkzeug und Strahlungsverluste haben nur einen geringen Einfluss.



*Bild 4-6: Vier Phasen des Schmiedeprozesses*

Die Phase des Wartens auf das nächsten Rohteil beendet den Zyklus. Die Wärmespitzen an der Gravuroberfläche werden durch Wärmeleitung in den Werkzeugkern sowie durch Konvektion und Strahlung abgeführt. Nur in dieser Phase, während die Presse offen ist, kann die Temperatur der Gravuroberfläche durch eine Oberflächensprühkühlung beeinflusst werden.

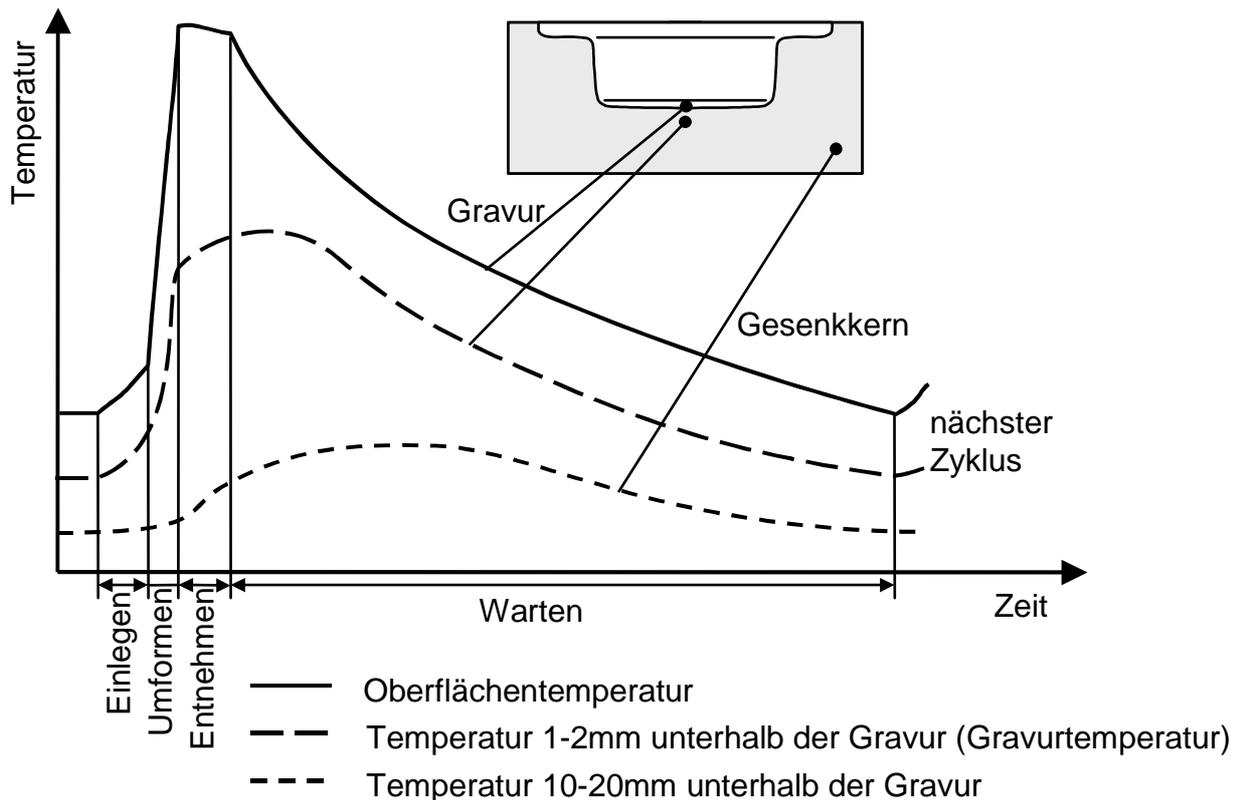


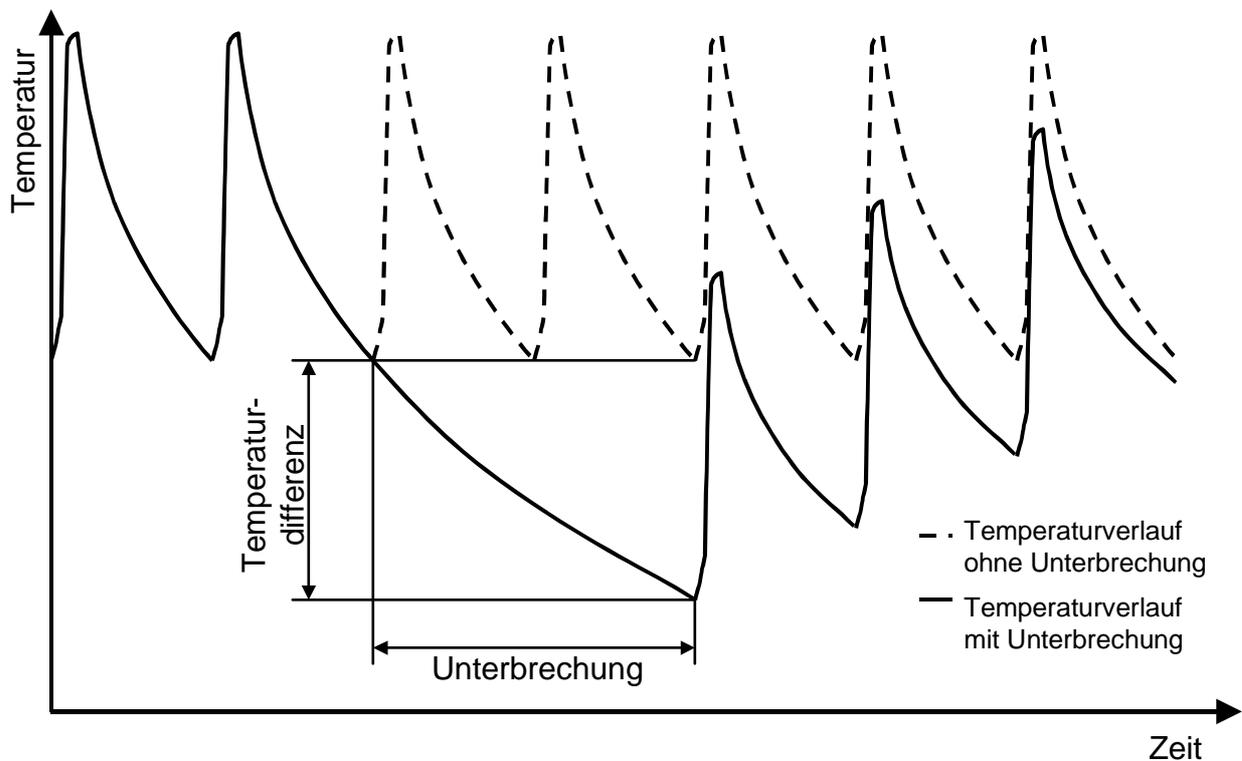
Bild 4-7: Temperaturverlauf während eines Schmiedezyklus

Der zeitliche Temperaturverlauf eines Zyklus ist in Bild 4-7 qualitativ dargestellt. Die durchgezogene Linie entspricht der Oberflächentemperatur eines Punktes in der Gravur und die langgestrichelte Linie der Gravurtemperatur ein bis zwei Millimeter unterhalb der Oberfläche, die mit Temperaturfühler gemessen werden kann. Die kurzgestrichelte Linie stellt die Kerntemperatur etwa zehn bis zwanzig Millimeter unterhalb der Oberfläche an einer Stelle dar, an der temperaturbeeinflussende Maßnahmen angebracht werden können.

Da beim Schmieden der Temperaturunterschied zwischen dem Schmiederohteil und der Umgebung sehr groß ist, ist der Prozess durch starke Wärmeströme geprägt. Den größten Einfluss hat der Wärmeübergang bei der Druckberührung des Rohteils mit dem Werkzeug. Das Auftreten großer Wärmeströme bedeutet allerdings, dass sich der Prozess weit entfernt von einem thermischen Gleichgewichtszustand befindet. Ein stabiler Produktionsbetrieb ist hierbei nur zu erreichen, wenn sich während eines Zyklus die zugeführte und die abgeführte Wärmemenge ausgleichen. Der Zustand ausgeglichener Wärmeströme soll in dieser Arbeit „stationär“ genannt werden.

Die zugeführte und die abgeführte Wärmemenge in den vier Phasen sind stark zeitabhängig. Dies bedeutet, dass z.B. Schwankungen in der Wartezeit, die sich beim manuellen Zuführen nicht vermeiden lassen, zu Veränderungen des Temperaturniveaus führen. Gerade Unterbrechungen bewirken ein signifikantes Absinken des

Temperaturniveaus (Bild 4-8) mit dem Resultat, dass Schmiedeteile, die direkt nach der Unterbrechung produziert werden, geometrische Abweichungen aufweisen.



*Bild 4-8: Veränderung des Temperaturniveaus aufgrund einer Unterbrechung*

Quantitative Aussagen hinsichtlich des zeitlich und räumlich variablen Temperaturfeldes und der damit verbundenen thermisch bedingten Gesenkdehnungen lassen sich mit Hilfe numerischer Methoden machen. Eine grobe Abschätzung der Wärmebilanz ermöglicht es aber, geeignete Maßnahmen zum Erreichen oder Halten eines stationären Zustandes zu konzipieren sowie die Randbedingungen wie beispielsweise Anfangstemperaturen für eine genaue numerische Simulation festzulegen.

### 4.3 Abschätzung der Wärmebilanz

Der Einfluss der verschiedenen Wärmeströme in Gleichung (4-1) ist stark abhängig von den Prozessbedingungen insbesondere der Werkzeugtemperatur sowie von der Größe und Geometrie des Schmiedeprodukts. Ein kompaktes großes Schmiedeprodukt speichert beispielsweise mehr Wärme und kühlt langsamer aus als ein filigranes kleines. Im Folgenden soll eine Abschätzung der Größenordnung der verschiedenen Wärmeströme und Energien an einer Beispielgeometrie gegeben werden, die für die Experimente dieser Arbeit Verwendung fand, um erste Anhaltspunkte für die Auslegung einer Temperierung zu erhalten.

### 4.3.1 Wärmeverluste durch Konvektion und Strahlung

Einen wichtigen Beitrag zur Wärmebilanz liefert der kontinuierliche Wärmeverlust durch Strahlung und Konvektion. Zur Abschätzung soll die Werkzeugoberfläche in die formgebende Gravurfläche und die restliche kontaktfreie Fläche unterteilt werden.

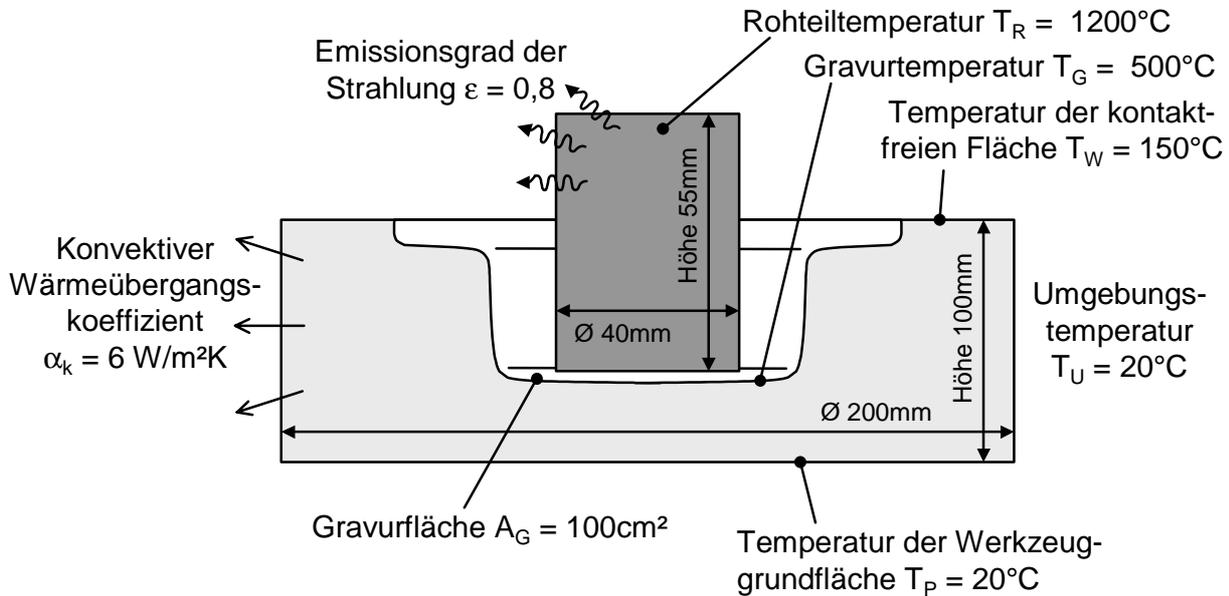


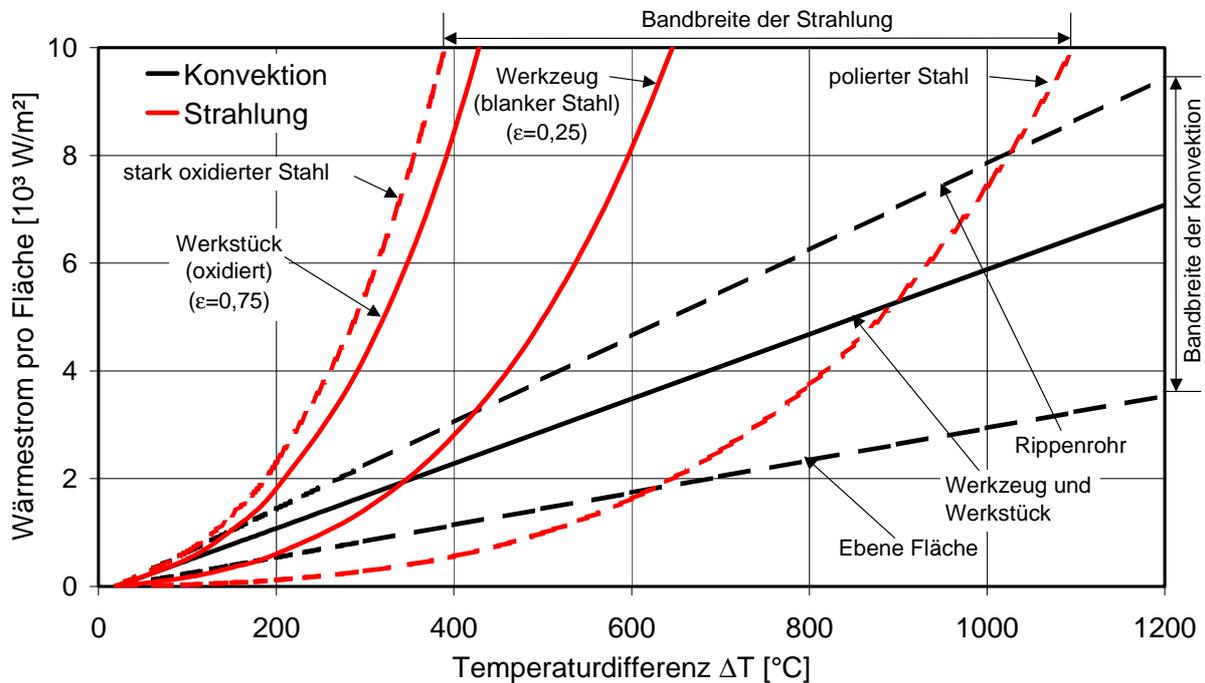
Bild 4-9: Annahmen zur Abschätzung der Wärmeverluste

Als Oberflächentemperatur wird für die Gravur ein Durchschnitt von  $T_G = 500^\circ\text{C}$ , für die Werkzeugoberfläche  $T_W = 150^\circ\text{C}$ , für die Werkzeuggrundfläche, die im Kontakt zur Presse steht,  $T_P = 20^\circ\text{C}$  sowie für das Schmiederohrteil  $T_R = 1200^\circ\text{C}$  angenommen. Die Umgebungstemperatur beträgt  $T_U = 20^\circ\text{C}$  (Bild 4-9).

Wie in Abschn. 4.1.2 beschrieben sind die Wärmeverluste durch Strahlung und Konvektion von einer Reihe nicht reproduzierbarer Parameter wie beispielsweise der Oberflächenbeschaffenheit abhängig. Eine Größenabschätzung der charakteristischen Materialkoeffizienten kann jedoch der Literatur entnommen werden. Der Emissionsgrad für Eisenwerkstoffe variiert über eine große Bandbreite und liegt etwa bei  $\varepsilon = 0,05$  für polierte Oberflächen, bei etwa  $0,25$  für blanke Oberflächen und im Bereich von  $0,6$  für leicht bis  $0,95$  für stark oxidierte Oberflächen. Der konvektive Wärmeübergangskoeffizient liegt im Bereich von  $\alpha_k = 3\text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$  für eine ebene Fläche bis etwa  $8\text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$  für ein geripptes Rohr [MEN99, VDI91].

In Bild 4-10 sind die Wärmeverluste durch Strahlung und Konvektion in Abhängigkeit der Temperatur aufgetragen. Die durchgezogenen Linien entsprechen den angenommenen Schätzwerten  $\alpha_k = 6\text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$  für den konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten und  $\varepsilon = 0,25$  für den Emissionsgrad des relativ blanken Werkzeugs sowie  $0,75$  für das oxidierte Schmiedeteil. Um diese Schätzwerte ist eine Bandbreite in Form gestri-

chelter Linien eingezeichnet, die die Abhängigkeit der Koeffizienten von der Körpergeometrie und -größe sowie von der Oberflächenbeschaffenheit wiedergibt.



*Bild 4-10: Abschätzung der Wärmeströme durch Strahlung und Konvektion eines warmen Stahlkörpers gegenüber 20°C Umgebungsluft*

Unter Berücksichtigung der in Bild 4-9 angegebenen Temperaturen kann davon ausgegangen werden, dass für den Wärmeverlust bei dem erwärmten Schmiederohrteil hauptsächlich die Wärmestrahlung verantwortlich ist, während beim Werkzeug die konvektiven Wärmeverluste überwiegen. Lediglich in der Gravur, die während der Umformung Maximaltemperaturen von etwa 700 bis 750°C [SEI96] erreichen kann, ist die Wärmestrahlung dominierend.

### Geschätzter Wärmeverlust des Schmiederohrteils

Bei einem auf 1200°C erwärmten Schmiederohrteil von 40 mm Durchmesser und 55 mm Länge liegt die anfängliche Wärmeverlustleistung  $\dot{Q}$  in einer Größenordnung von etwa 2 kW. Unter Berücksichtigung der gespeicherten Wärme des Körper

$$\Delta Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T = \rho \cdot V \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (4-10)$$

entspricht dies einem anfänglichen Temperaturverlust von etwa 4 bis 5°C in einer Sekunde (Bild 4-11 / Berechnungen siehe Anhang). Die spezifische Wärmekapazität von Ck45 beträgt bei 1200°C etwa  $c_p = 0,78 \text{ kJkg}^{-1}\text{K}^{-1}$  [WEI88], die Dichte von Eisenwerkstoffen  $\rho = 7,87 \cdot 10^3 \text{ kgm}^{-3}$  [DUB90].

### Geschätzter Wärmeverlust des Werkzeugs

Die Wärmeverlustleistung durch Konvektion und Strahlung eines Werkzeugeinsatzes mit einem Durchmesser von 200 mm und einer Höhe von 100 mm beträgt bei einer gleichmäßigen Oberflächentemperatur von 150°C nur etwa 140 W und ist wesentlich geringer als die Verlustleistung beim Schmiedeteil. Direkt nach dem Umformvorgang beträgt die Verlustleistung des Werkzeugs aufgrund der warmen Gravuroberfläche von 100 cm<sup>2</sup> etwa 320 W. Der Temperaturverlust, der durch freie Konvektion und Wärmestrahlung beim Werkzeug hervorgerufen wird, beträgt nur etwa 1,4°C in einer Minute (Bild 4-11).

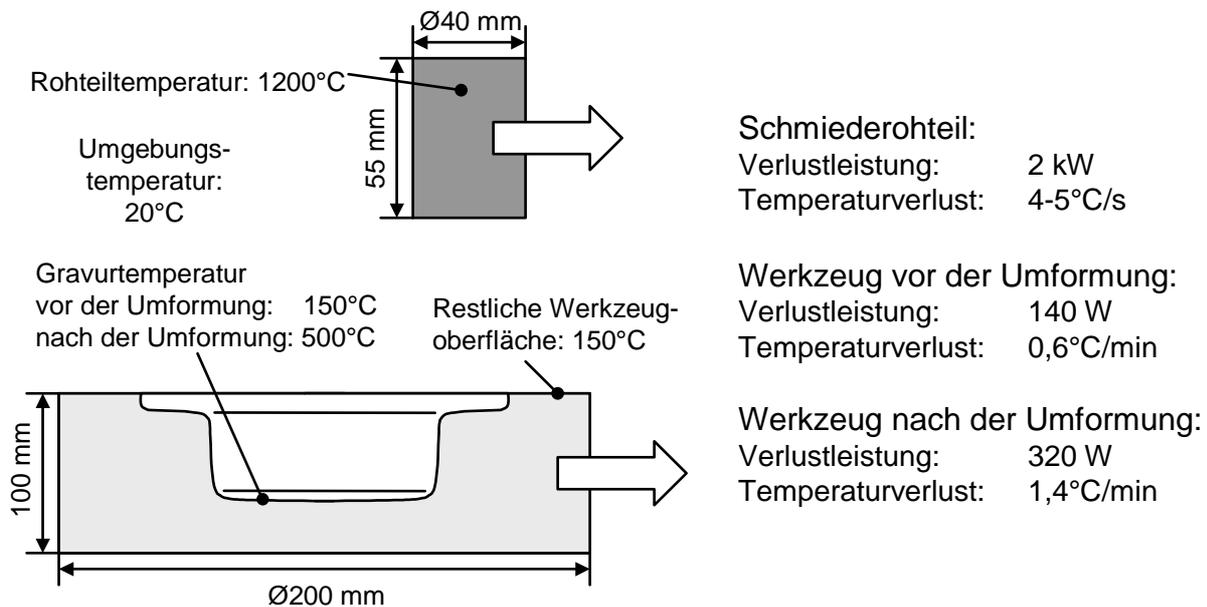


Bild 4-11: Geschätzte Wärmeverluste durch Konvektion und Strahlung beim Werkstück und Werkzeug

Die Wärmekapazität des Werkzeugwerkstoffs 1.2365 (32CrMoV12-28) beträgt bei 150°C etwa 0,55 kJkg<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup> [WEI88]. Unter der vereinfachten Annahme einer linearen zeitlichen Abnahme der Gravurtemperatur von 500°C auf die Ausgangstemperatur von 150°C während einer Zykluszeit von 10 s bzw. 1 min verliert das Werkzeug eine Wärmemenge von etwa 2,3 kJ bzw. 14 kJ. Bei einer nichtlinearen Betrachtung des Temperaturverlaufs fällt der Wärmeverlust etwas geringer aus, da die Temperatur anfangs schneller absinkt als gegen Ende. Bei einer parabolischen Näherung des Temperaturverlaufs beträgt der Wärmeverlust bei einer Zykluszeit von 10 s etwa 2 kJ. Dies entspricht einer Abweichung von 13% gegenüber dem linearen Verlauf. Der reale Temperaturverlauf liegt zwischen diesen beiden Annahmen (s. Anhang).

### 4.3.2 Wärmeleitung im Werkzeug

Aufgrund der Wärmeströme, die ein Körper durch Strahlung, Konvektion und Kontakt aufweist, entsteht ein Temperaturgradient. Dieses Temperaturungleichgewicht führt im Körper zu Wärmeströmen durch die Eigenschaft der Wärmeleitung. Für die folgende Abschätzung wird nur die eindimensionale Wärmeleitung betrachtet. Im stationären Zustand, das heißt, Temperaturgradienten werden nicht abgebaut, vereinfacht sich die Wärmeleitungsgleichung (4-8) zu [KNE90]:

$$\dot{Q} = \lambda \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (4-11)$$

Die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  des Stahls 1.2365 liegt bei etwa  $30 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$  [WEI88].  $A$  gibt die Fläche und  $\Delta x$  die Strecke des Wärmestroms wieder. Zwei Fälle werden im Folgenden für die Abschätzung der Wärmeleitung betrachtet, zum einen die abgeleitete Wärme, während ein Schmiederohteil im Gesenk liegt, und zum anderen die abgeleitete Wärme nach der Umformung.

Für den ersten Fall beträgt der Wärmestrom zwischen der  $150^\circ\text{C}$  warmen Kontaktfläche des Schmiederohteils mit dem Werkzeug und der  $20^\circ\text{C}$  warmen Werkzeuggrundfläche etwa  $50 \text{ W}$ . Im zweiten Fall liegt der abgeleitete Wärmestrom ausgehend von der  $500^\circ\text{C}$  warmen Gesamtoberfläche der Gravur von  $100 \text{ cm}^2$  bei etwa  $1,4 \text{ kW}$  (Bild 4-12). Der Vergleich mit den Wärmeströmen durch Strahlung und Konvektion zeigt, dass nach dem Umformen wesentlich mehr Wärme ins Werkzeuginnere abgeführt wird als an die Umgebung.

### 4.3.3 Wärmeströme durch Kontakt des Werkstücks mit dem Werkzeug

In der Gravur kommt es während der Berührung des Werkstücks mit dem Werkzeug zu einem Wärmeübergang aufgrund des Kontaktes der beiden Festkörper. Dieser Wärmeübergang ist, wie in Abschn. 4.1.2 beschrieben, abhängig vom Kontaktdruck.

#### Wärmeübergang beim Einlegen

In der Phase des Einlegens und Liegens im Gesenk wirkt nur die Gewichtskraft des Schmiederohteils auf die Kontaktfläche, die maximal der Stirnfläche des Rohteils entspricht. Der Wärmeübergangskoeffizient liegt nach Weiss für verschiedene Werkstoffe in einem Bereich von  $0,58 \cdot 10^{-3} \text{ Wmm}^{-2}\text{K}^{-1}$  bis  $0,87 \cdot 10^{-3} \text{ Wmm}^{-2}\text{K}^{-1}$  [WEI88]. Der Wert ist abhängig von der Oberflächenbeschaffenheit des Werkzeugs und des Werkstücks, insbesondere von der Oxidation der Oberfläche. Ausgehend von einer Oberflächentemperatur des Werkzeugs von  $150^\circ\text{C}$  und einer Werkstücktemperatur von  $1200^\circ\text{C}$  beträgt der Wärmestrom zwischen  $750$  und  $1150 \text{ W}$  und liegt damit mehr als um Faktor zehn über der durch Wärmeleitung abgeleiteten Wärmeleistung von  $50 \text{ W}$

(Bild 4-12). Bei einer Liegezeit von 2 s wird etwa die Wärmemenge 1,5 bis 2 kJ übertragen.

### Wärmeübergang bei der Umformung

Während der Umformung erhöht sich der Wärmestrom signifikant. Zum einen steigt der Wärmeübergangskoeffizient aufgrund des größer werdenden Kontaktdrucks an und zum anderen nimmt die Kontaktfläche zu.

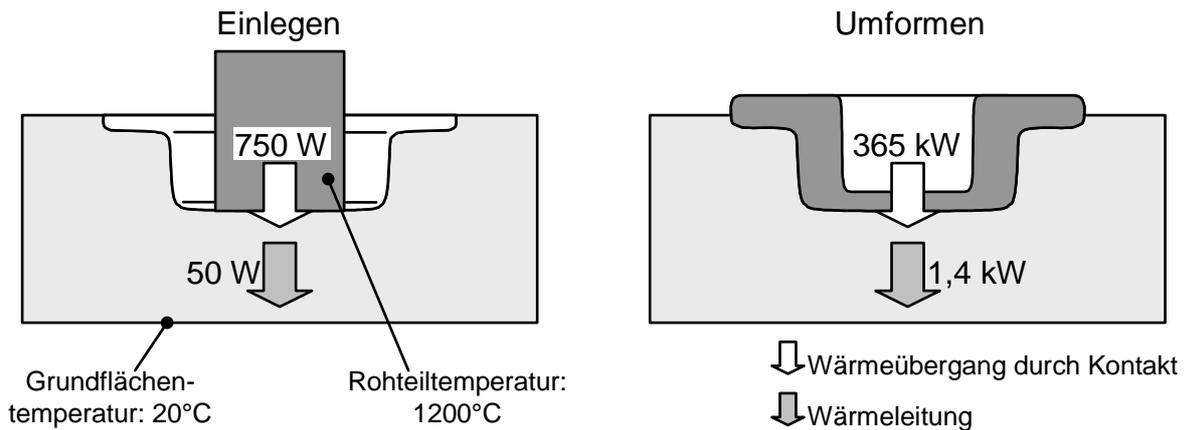


Bild 4-12: Geschätzte maximale Wärmeströme bei Kontakt mit dem Werkstück

In der einschlägigen Literatur werden sehr unterschiedliche Werte für den Wärmeübergangskoeffizienten genannt. Bei einer Flächenpressung von  $50 \text{ Nmm}^{-2}$  und einer Kontaktzeit von 640 ms beträgt er nach Saiki  $0,0276 \text{ Wmm}^{-2}\text{K}^{-1}$  [SAI83]. Bei deutlich kürzeren Kontaktzeiten und höheren Kontaktdrücken ermittelte Weiss mittels der Finite-Elemente-Simulation einen Wert von  $0,0348 \text{ Wmm}^{-2}\text{K}^{-1}$  [WEI88]. Unter Berücksichtigung der Druckabhängigkeit des Wärmeübergangskoeffizienten variieren die Werte zwischen  $0,02 \text{ Wmm}^{-2}\text{K}^{-1}$  bei  $50 \text{ Nmm}^{-2}$  und  $0,07 \text{ Wmm}^{-2}\text{K}^{-1}$  bei  $200 \text{ Nmm}^{-2}$  [NÄG94]. Für die Abschätzung soll der Durchschnittswert nach Weiss verwendet werden, der etwa auch dem Wert im Modell nach Nägele bei  $100 \text{ Nmm}^{-2}$  entspricht (Bild 4-4).

Der Wärmestrom, der sich anfänglich bei einer Gravurtemperatur von  $150^\circ\text{C}$  und einer Werkstückoberflächentemperatur von  $1200^\circ\text{C}$  einstellt, beträgt etwa 365 kW und ist signifikant höher als der durch Wärmeleitung abgeführte Wärmestrom von etwa 1,4 kW (Bild 4-12). Beim Vergleich der Größenordnung der Wärmeströme ist ersichtlich, dass der Einfluss der Wärmeleitung wesentlich kleiner als der des Kontaktwärmeübergangs ist und somit in erster Näherung vernachlässigt werden kann. Geht man von einer im Experiment bestimmten Druckberührzeit von etwa 120 ms und einem linearen Verlauf der Oberflächentemperaturen des Werkzeugs und des Werkstücks aus (Bild 4-13), so lässt sich die übertragene Wärmemenge quantitativ abschätzen.

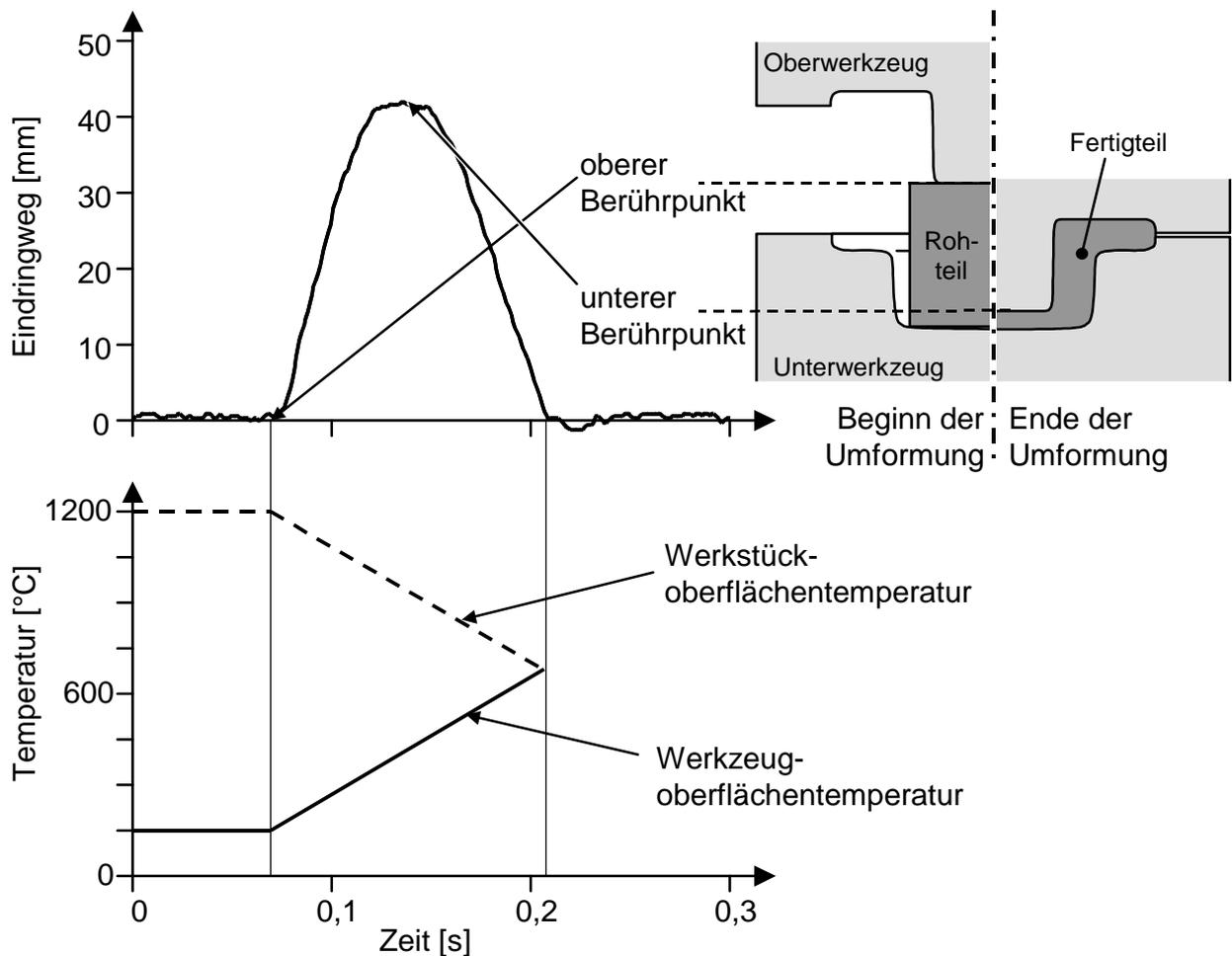


Bild 4-13: Annahmen zur Abschätzung des Wärmeübergangs

Die Endtemperatur der Werkstückoberfläche und der Gravur wird mit 675°C, dem Mittelwert der anfänglichen Temperaturen, angenommen. Der Wärmestrom, der direkt proportional zur Temperaturdifferenz ist, beträgt am Ende der Druckberührzeit null. Die Wärmemenge, die dem Werkzeug vom Werkstück zugeführt wird, liegt nach dieser Berechnung bei etwa 22 kJ. Da diese Abschätzung auf sehr vereinfachten Annahmen beruht, sei darauf hingewiesen, dass reale Werte deutlich davon abweichen können und nur die Größenordnung aussagekräftig ist.

#### 4.3.4 Temperaturprofil im Werkzeug

Eine genauere Berechnung des Temperaturverlaufs, der Wärmeströme und der Wärmemenge ist nur durch die Lösung der instationären Wärmeleitungsgleichung (4-8) zu erreichen. Im eindimensionalen Fall ohne Wärmequellen und -senken wird die Gleichung zu:

$$\frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = D \cdot \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} \quad \text{mit} \quad D = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \quad (4-12)$$

Der allgemeine Lösungsansatz für diese Wärmediffusionsgleichung

$$T = T_0 \cdot e^{i(\omega t - kx)} \quad (4-13)$$

mit der Grundtemperatur  $T_0$  führt zu einer komplexen Dispersionsrelation:

$$\omega = iD \cdot k^2 \quad (4-14)$$

Die einfachste spezielle Lösung der Gleichung stellt der eindimensionale Wärmepol dar. In diesem Fall wird zu einer Zeit  $t = 0$  über eine Fläche  $A$  eine Wärmemenge  $Q$  an einer Stelle  $x = 0$  zugeführt. Das Temperaturprofil, der sich ausbreitenden Wärme, entspricht einer Gauß-Verteilung [KNE90]:

$$T(x,t) = T_0 + \frac{\frac{Q}{A}}{\rho \cdot c_p \cdot \sqrt{4\pi \cdot D \cdot t}} \cdot e^{-\frac{x^2}{4 \cdot D \cdot t}} \quad (4-15)$$

In Bild 4-14 ist die Gauß-Verteilung des eindimensionalen Wärmepols für die Grundtemperatur von  $150^\circ\text{C}$  und verschiedene Zeiten aufgetragen.

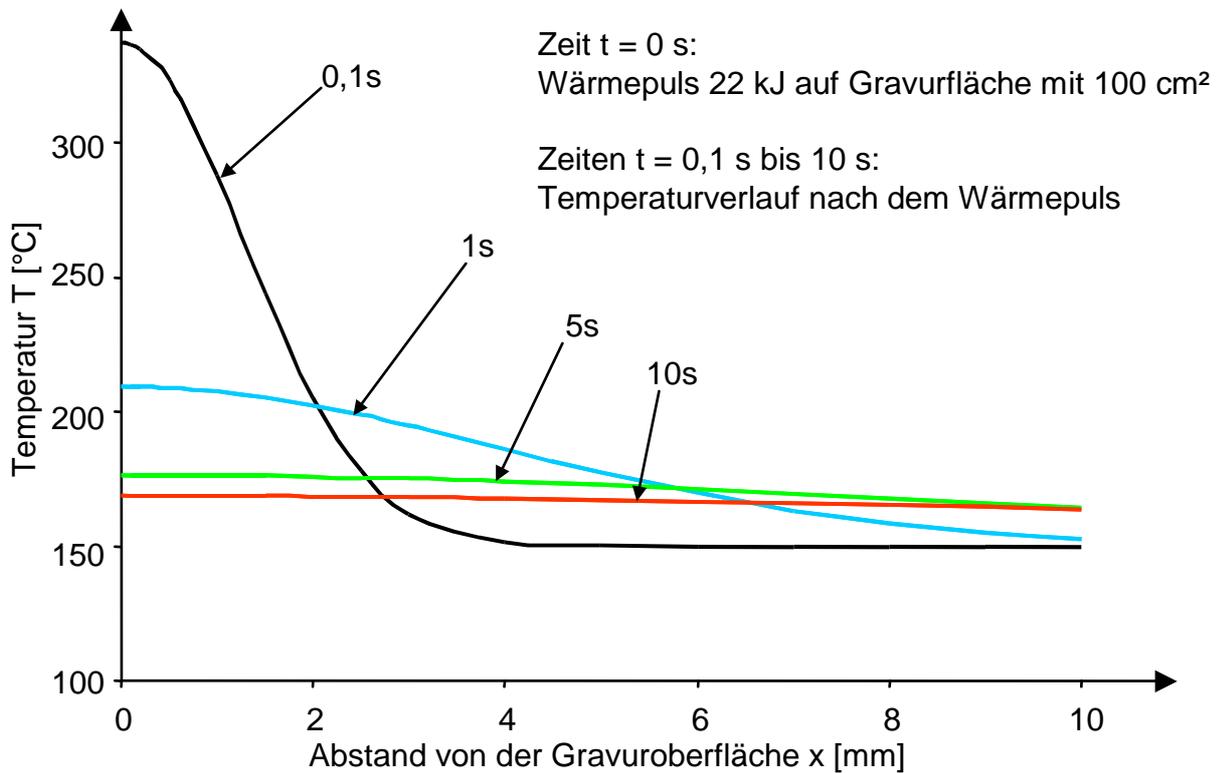


Bild 4-14: Abklingende Gauß'sche Temperaturverteilung eines eindimensionalen Wärmepols (Kurven berechnet nach Gleichung (4-15))

Die verwendeten Konstanten entsprechen den oben angegebenen Werten des Werkzeugstahls 1.2365 (32CrMoV12-28). Für die Wärmemenge wurde der Wert 22 kJ, für

die Fläche  $100 \text{ cm}^2$  und für die Grundtemperatur  $150^\circ\text{C}$  verwendet. Wie in Bild 4-14 zu erkennen ist, liegt in einem Zeitbereich von  $0,1 \text{ s}$ , der etwa der Druckberührzeit entspricht, ein sehr starker Temperaturgradient vor. An Messpunkten, die etwa  $1$  bis  $2 \text{ mm}$  unterhalb der Gravur liegen, ist das Temperaturniveau bereits stark abgesenkt. Nach etwa  $5 \text{ s}$  ist der Temperaturpuls nahezu verlaufen, das heißt eine nahezu konstante Temperatur erreicht.

Qualitativ können diese Aussagen gut auf den realen Schmiedeprozess übertragen werden. Für die Abschätzung kann der reale Wärmepuls, der während der Druckberührung im Werkzeug auftritt, und die sich ergebende Temperaturverteilung mit der Gauß-Verteilung des eindimensionalen Wärmepols angenähert werden. Bei realistischen Zykluszeiten über  $5 \text{ s}$  hat sich die Wärme bereits so im Gesenk verteilt, dass sie durch kühlende Maßnahmen im Gesenk abgeführt werden kann. Zum Erreichen von kürzeren Zykluszeiten muss ein Kältepol in der Nähe der Gravur eingesetzt werden, um das Gesamttemperaturniveau zu senken.

### **4.3.5 Wärmebeeinflussung**

Bei einer Abschätzung der Wärmebilanz muss neben den natürlich auftretenden Wärmeströmen auch die gezielte Wärmebeeinflussung durch Heiz- oder Kühlmaßnahmen berücksichtigt werden. Im Folgenden soll eine Abschätzung für die in Abschn. 3.3.1 beschriebene Oberflächensprühkühlung, die in der Schmiede bereits Stand der Technik ist, und die in Abschn. 3.4 beschriebene Flüssigkeitstemperierung, die bei den Fertigungsverfahren Spritzguss und Druckguss eingesetzt wird, durchgeführt werden.

#### **Oberflächensprühkühlung**

Bei der Oberflächensprühkühlung wird, wie in Abschn. 3.3.1 beschrieben, ein Fluid, im Weiteren soll Wasser betrachtet werden, mittels einer Düse auf das Werkzeug gesprüht. Durch Verdampfen des auftreffenden Wassers auf einer warmen Oberfläche entsteht ein Kühleffekt.

Bei einer vollständig benetzten, warmen Oberfläche lassen sich je nach Oberflächentemperatur vier Bereiche des Wärmeübergangs unterscheiden (Bild 4-15). Bei niedrigen Oberflächentemperaturen liegt der Bereich der freien Konvektion, in dem noch keine Verdampfung des Wassers stattfindet. Bei einer höheren Temperatur schließt sich der Bereich der Blasenverdampfung an. Durch Bildung von Gasblasen, die nach oben steigen, kommt es zu einer Rührwirkung, die eine Verbesserung des Wärmeübergangs bewirkt. Blasenverdampfung setzt bei Wasser etwa bei  $106^\circ\text{C}$  ein. Am sogenannten Burn-out-Punkt bei etwa  $130^\circ\text{C}$  wird ein lokales Maximum des Wärmeübergangs erreicht. Ab dieser Temperatur bewirkt ein Dampffilm, der sich zwischen der Flüssigkeit und der warmen Oberfläche bildet, einen Wärmewiderstand. Der Dampffilm

in diesem Bereich ist noch instabil und verändert seine Lage und Größe. Ab etwa 200°C tritt stabiles Filmsieden auf [SCÜ82].

Nach Jeschar [JES89] lassen sich die oben beschriebenen Effekte auch auf den Wärmeübergang einzelner Tropfen übertragen, die bei einer Oberflächensprühkühlung auftreten. Die Burn-out-Temperatur sowie die Leidenfrost-Temperatur liegen jedoch höher als bei einer vollständigen Benetzung der Oberfläche [JES94].

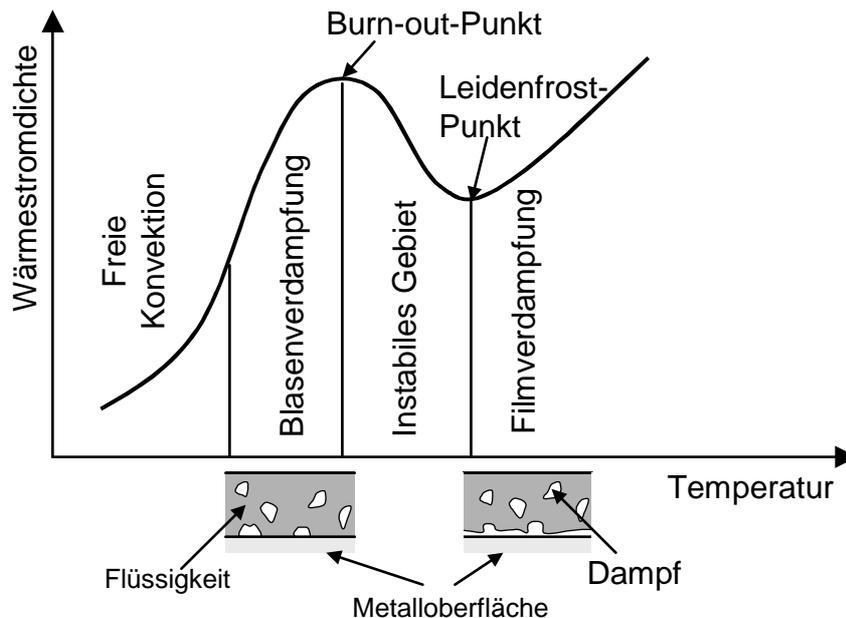


Bild 4-15: Verdampfungskurve von Wasser [SCÜ82]

Der Wärmeübergang ist bei einem Tropfenaufprall abhängig von seiner Benetzungskinetik. Die Weberzahl  $We$  stellt hierbei eine Vergleichsgröße der kinetischen Energie des Tropfens und des Energiegehalts seiner Oberflächenspannung dar. Einfluss darauf haben die Tropfengeschwindigkeit  $u$ , die Dichte  $\rho$  und der Durchmesser  $d$  des Tropfens sowie die Oberflächenspannung  $\sigma$  [BOL81, WRU99]:

$$We = \frac{u^2 \cdot \rho \cdot d}{\sigma} \quad (4-16)$$

Abhängig von der Weberzahl gibt es nach Wachters [WAC96] drei Zerfallskriterien für den Tropfenaufprall. Bei  $We < 30$  kommt es zu einem Rückprall des Tropfens, bei  $We > 80$  zum Entstehen eines Flüssigkeitsfilms, da der Tropfen aufgrund der hohen kinetischen Energie bis auf das warme Metall vordringt. Dazwischen liegt ein Übergangsbereich. Der Zerfall eines Tropfens für  $We > 80$  und einer Oberflächentemperatur von  $T_G > 400^\circ\text{C}$  ist in Bild 4-16 dargestellt.

Der Wärmeübergangskoeffizient von der warmen Gravuroberfläche auf die Tropfen der Oberflächensprühkühlung ist wie beschrieben von einer Reihe an Parametern abhän-

gig. Für den praktischen Anwendungsfall sind je nach Düsenform und Druck Experimente zum Abkühlverhalten durchzuführen und mit der Theorie abzugleichen.

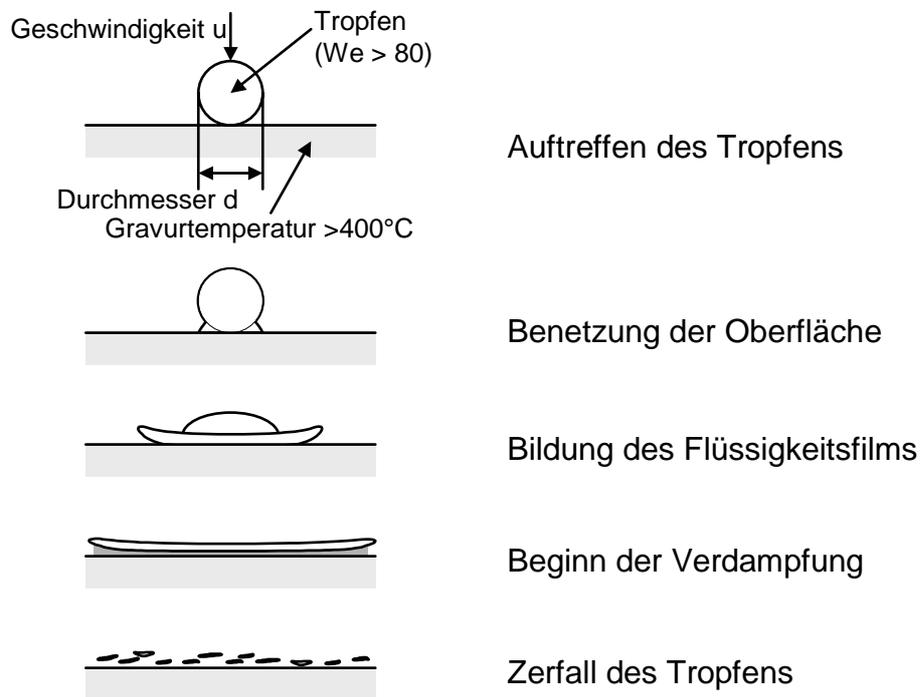


Bild 4-16: Tropfenzerfall bei der Oberflächensprühkühlung [BOL81, WAC96]

Eine grobe Abschätzung der Energie, die dem Werkzeug durch Wasserkühlung entzogen werden kann, lässt sich über die Betrachtung der Erwärmung des Wassertropfens auf Verdampfungstemperatur sowie der Umwandlungswärme vom flüssigen in den gasförmigen Zustand durchführen [DOH00]. Die Erwärmungsenergie beträgt nach Gleichung (4-10) für Wasser mit einer spezifischen Wärmekapazität von  $4,19 \text{ kJkg}^{-1}\text{K}^{-1}$  [DUB90] einer Wassertemperatur von  $20^\circ\text{C}$  und einer Verdampfungstemperatur von  $100^\circ\text{C}$  etwa  $335 \text{ kJkg}^{-1}$ . Die Umwandlungswärme berechnet sich gemäß der Gleichung von Clausius-Clapeyron aus dem Volumen des Dampfes  $V_D$  und des Wassers  $V_W$  sowie der Verdampfungstemperatur  $T_S$  und der Ableitung der Dampfdruckkurve [KNE90]:

$$\Delta Q = (V_D - V_W) \cdot T_S \cdot \frac{dp}{dT} \quad (4-17)$$

Für einen Umgebungsdruck von etwa 1 bar und einer Verdampfungstemperatur von  $100^\circ\text{C}$  beträgt die Verdampfungswärme etwa  $2257 \text{ kJkg}^{-1}$  [DUB90]. Legt man die in Abschn. 4.3.3 geschätzte Wärmemenge von 24 kJ (Liegen 2 kJ plus Umformen 22 kJ) zu Grunde müssen etwa 9,2 g Wasser mit einer Temperatur von  $20^\circ\text{C}$  verdampft werden, um die komplette Wärme abzuleiten.

Da ein Teil der Wärme in den Werkzeugkern und von dort weiter in die Presse abgeleitet wird und ein Teil der Wärme durch freie Konvektion und Strahlung des Werkzeugs abgeführt wird, ist die real benötigte Wassermenge kleiner.

### Flüssigkeitstemperierung

Die Flüssigkeitstemperierung ist eine Wärmebeeinflussung durch erzwungene Konvektion. Demzufolge lässt sie sich durch Gleichung (4-3) mit dem Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha_k$  beschreiben. Der Wärmeübergangskoeffizient hängt dabei stark von der Ausprägung der Strömung ab, die durch die dimensionslose Reynoldszahl  $Re$  beschrieben wird:

$$Re = \frac{w \cdot d_r}{\nu} \quad (4-18)$$

Die Reynoldszahl setzt sich aus der Strömungsgeschwindigkeit  $w$ , dem Rohrdurchmesser  $d_r$  und der Viskosität  $\nu$  des strömenden Mediums zusammen. Bei Werten von  $Re < 2300$  ist die Strömung laminar, bei Werten von  $Re > 10000$  ist die Strömung turbulent, dazwischen liegt ein Übergangsbereich.

Ausgehend von einem maximalen Temperierkanaldurchmesser von  $d_k = 16 \text{ mm}$  (Bild 4-17) und einer Viskosität des in den Experimenten verwendeten Wärmeträgeröls Dibenzyltoluol von  $\nu = 3,3 \text{ mm}^2\text{s}^{-1}$  bei  $100^\circ\text{C}$  sowie einer Pumpleistung von  $60 \text{ l/min}$  liegt die Reynoldszahl etwa bei  $24000$  und damit deutlich im turbulenten Bereich. Der Wärmeübergangskoeffizient für turbulente Strömungen liegt bei Wärmeträgerölen im Bereich von  $1100$  bis  $1700 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ , für Wasser zwischen  $2300$  und  $3500 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$  [GOR97].

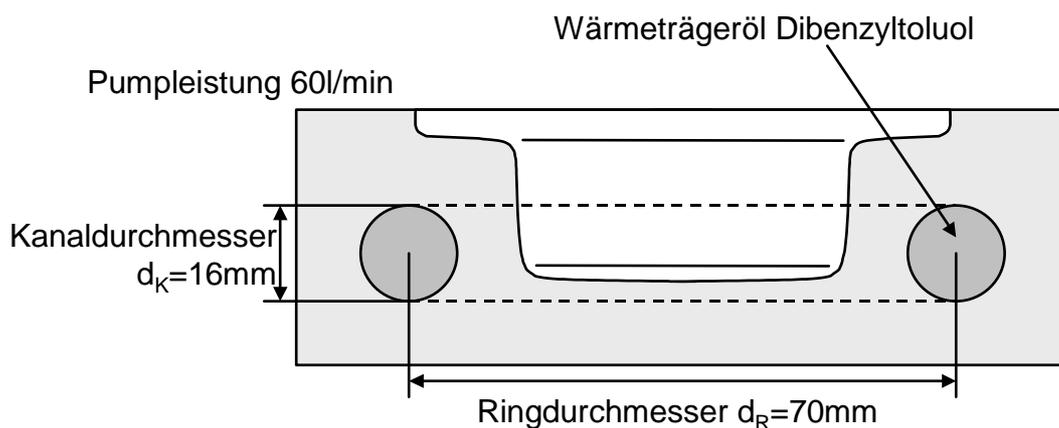


Bild 4-17: Abschätzung der Temperierleistung

Gemäß Gleichung (4-3) ist die abgeführte Wärmemenge proportional zur wärmeübertragenden Oberfläche. Temperierkanäle sollten daher für eine gute Temperierwirkung so groß wie möglich ausgelegt werden. Dem entgegen steht allerdings die mechani-

sche Festigkeit des Werkzeugs, die bei größeren Temperierkanälen abnimmt. Bei einer Werkzeugtemperatur von etwa 170°C, die sich spätestens 5 s nach der Umformung einstellt (s. Bild 4-14), kann bei einem Temperierkanal mit einem Ringdurchmesser von 70 mm und einem Kanaldurchmesser von 16 mm sowie einer Wärmeträgertemperatur von 20°C eine Kühlleistung von 1,8 bis 2,8 kW je nach Wärmeübergangskoeffizient aufgebracht werden.

Eine Energie von 24 kJ, die vom Werkstück in das Werkzeug eingebracht wird (s. Abschn. 4.3.3), kann bei einem Wärmeentzug ausschließlich über die Temperierung in 8,5 bis 13 s abgeführt werden. Da zusätzlich Wärme durch natürliche Konvektion und Strahlung sowie durch eine Oberflächensprühkühlung abgeführt wird, kann die Zykluszeit eines Umformprozesses deutlich unter diesen Werten liegen.

### 4.3.6 Ausgleich der Wärmebilanz

Die minimal realisierbare Zykluszeit richtet sich aus thermischer Sicht nach der maximal abführbaren Wärme. Die Beeinflussung der Temperatur des Werkzeugs durch externe Maßnahmen ist in Gleichung (4-1) in der Wärmemenge  $Q_e$  enthalten. Je nach Art der Wärmequelle oder -senke, das heißt Heizung bzw. Kühlung, kann die Wärmebilanz beim Umformen gezielt verändert werden.

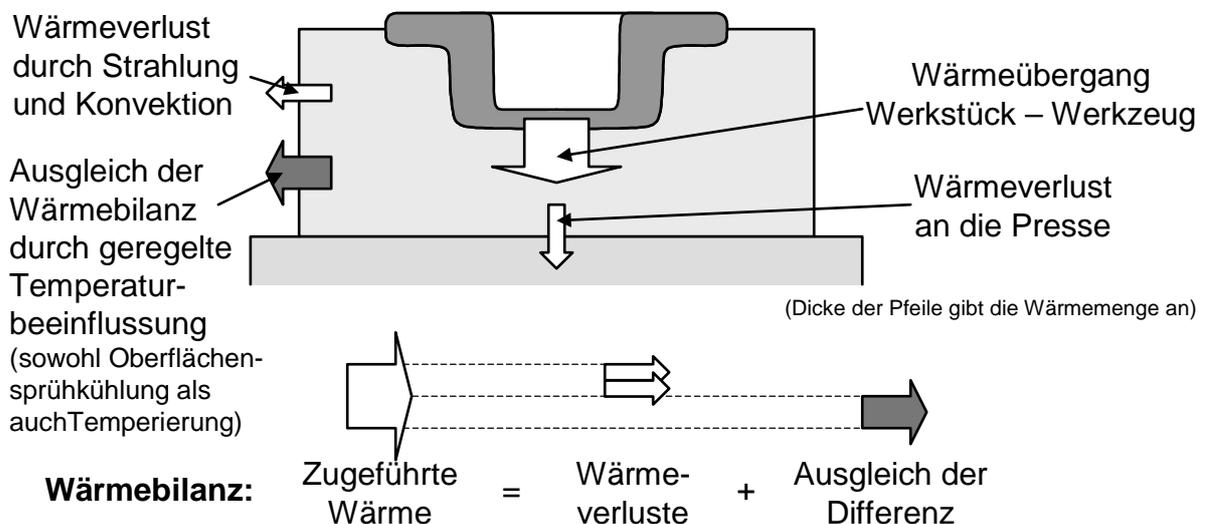


Bild 4-18: Ausgleich der Wärmebilanz

Um einen stationären Prozess zu erhalten, muss die extern zugeführte bzw. abgeführte Wärmemenge so dimensioniert sein, dass über die Umformzykluszeit  $t_z$  die Wärmebilanz ausgeglichen ist (Bild 4-18), das heißt, die Summe der zugeführten und abgegebenen Wärmemengen gleich null ist:

$$\int_0^{t_z} (\sum_i \dot{Q}_i) \cdot dt = 0 \quad (4-19)$$

Am Beispiel des in Abschn. 4.3 beschriebenen Schmiedeprozesses soll im Folgenden für eine Soll-Zykluszeit von 10 s eine Abschätzung der Gesamtwärmebilanz durchgeführt werden. Während des Liegens erfolgt im Werkzeug eine Wärmezufuhr von 2 kJ. Bei der Umformung mit einer Druckberührzeit von 120 ms beträgt die Energiezufuhr 22 kJ. Diese Wärme muss in der Zykluszeit wieder abgeführt werden.

Der natürliche Wärmeverlust des Werkzeugs infolge Konvektion und Strahlung beläuft sich bei einer Zykluszeit von 10 s auf maximal 2,3 kJ (s. Abschn. 4.3.1). Er trägt damit nur einen geringen Anteil zum Ausgleich der Wärmebilanz bei. Einen größeren Beitrag liefert die Wärmeleitung. Sie führt die Wärme von der Gravur in den Werkzeugkern und weiter in die Presse ab. Der Maximalwert direkt nach der Umformung beträgt etwa 1,4 kW. Die Gesamtenergie, die in die Presse übertragen wird, errechnet sich aus der Wärmeleitungsgleichung (4-12) und beträgt maximal 4,8 kJ.

Tabelle 2: Zusammenfassung der Wärmebilanzabschätzung

	max. Wärme- strom	Wärmemenge	Bemerkungen
Kontaktwärmeübergang beim Einlegen	750 W	2 kJ	2 s Liegen
Kontaktwärmeübergang bei der Umformung	365 kW	22 kJ	0,12 s Druckberührung
Gesamtwärme		24 kJ	
Wärmeverlust durch Konvektion und Strahlung	320 W	-2,3 kJ	
Wärmeleitung in die Presse	1,4 kW	-4,8 kJ	
Restwärme		16,9 kJ	
Oberflächensprühkühlung		-8,45 kJ	3,3 g Sprühwasser
Wärmeabführung durch Temperierung		-8,45 kJ	max. 47% Leistungsausnut-

Soll sich das Temperaturniveau des Werkzeugs nicht erhöhen, so muss durch temperaturbeeinflussende Maßnahmen eine Energie von etwa 17 kJ abgeleitet werden. Bei einer gleichmäßigen Aufteilung dieses Betrages auf die Oberflächensprühkühlung und die Temperierung muss eine Wassermenge von etwa 3,3 g verdampft werden. Die restlichen 8,5 kJ, die von der Temperierung bewältigt werden müssen, können je nach

Leistung (s. Abschn. 4.3.5) in 3 bis 4,7 s abgeführt werden. Bei einer Zykluszeit von 10 s entspricht dies einer Leistungsausnutzung von weniger als 50 Prozent. Es besteht daher noch ein genügend großer Sicherheitsfaktor bei der Auslegung. In Tabelle 2 sind die abgeschätzten Werte der Wärmebilanz zusammengefasst dargestellt.

Zusätzlich zur Wärmebilanz ist beim Schmieden die maximale Oberflächentemperatur interessant. Sie hat einen wesentlichen Einfluss auf die Lebensdauer der Werkzeuge. Zwei Faktoren haben auf die Oberflächentemperatur, die sich während der Druckberührung einstellt, einen erheblichen Einfluss. Dies ist zum einen die Druckberührzeit, in der Wärme vom Werkstück auf das Werkzeug übertragen wird. Je kürzer sie gewählt wird, um so geringer ist der Temperaturanstieg. Zum anderen spielt die bereits vorhandene Kerntemperatur des Werkzeugs eine wichtige Rolle, da bei einem höheren Temperaturniveau des Werkzeugs die Temperaturspitzen auch höher werden.

$$T_O \approx \frac{T_K + T_R}{2} \quad (4-20)$$

Die Oberflächentemperatur  $T_O$  entspricht nach Seidel [SEI96] etwa der halben Summe der Rohteiltemperatur  $T_R$  und der Kerntemperatur  $T_K$ .

Als Abschätzung kann somit angenommen werden, dass bei einer Reduzierung der Kerntemperatur des Werkzeugs um 100°C bei gleichbleibender Rohteiltemperatur die Oberflächentemperatur um 50°C abgesenkt werden kann.

Die Abschätzung der Wärmemengen, Kühlleistung und Temperaturen kann nur ein größenordnungsmäßiger Anhaltspunkt bei der Auslegung des thermodynamischen Schmiedesystems sein. Es ist ausreichend, um eine Dimensionierung der Oberflächen-sprühkühlung und der Temperierung vorzunehmen. Detaillierte Angaben zum Temperaturverhalten können nur durch eine numerische Berechnung gemacht werden.

#### 4.4 Analyse des thermischen Verhaltens mit Hilfe der FEM

Die Finite-Elemente-Methode ist aufgrund der hohen Leistungsfähigkeit hinsichtlich Detailgenauigkeit, Variabilität und kommerzieller Verfügbarkeit ein prädestiniertes numerisches Verfahren zur Analyse und Auslegung von Fertigungsprozessen. Das thermische Verhalten kann mit Hilfe dieser Technologie für jeden beliebigen Punkt im Werkstück und Werkzeug berechnet werden. Durch das Einbinden von CAD-Modellen sowie Vorgabe beliebiger Randbedingungen ist die Finite-Elemente-Methode sehr flexibel bei der Abbildung beliebiger Umformproblemstellungen.

Zur Auslegung einer Temperierung sind detaillierte Kenntnisse der thermischen Abläufe im Werkzeug notwendig. An einem Schnitt durch das Umformwerkzeug lässt sich das inhomogene Temperaturprofil, das sich beim Schmieden einstellt, darstellen. Am Beispiel eines Napfuntergesenks wird in Bild 4-19 dieses Temperaturprofil nach 2, 30

und 100 Schmiedezyklen sowie 30-fach überhöht die Gesenkdehnung dargestellt. Anhand der Helligkeit lässt sich die Temperatur im Werkzeug ablesen. Im vergrößerten Ausschnitt ist anhand der Kontur des kalten Werkzeugs die Dehnung des warmen Werkzeugs zu erkennen.

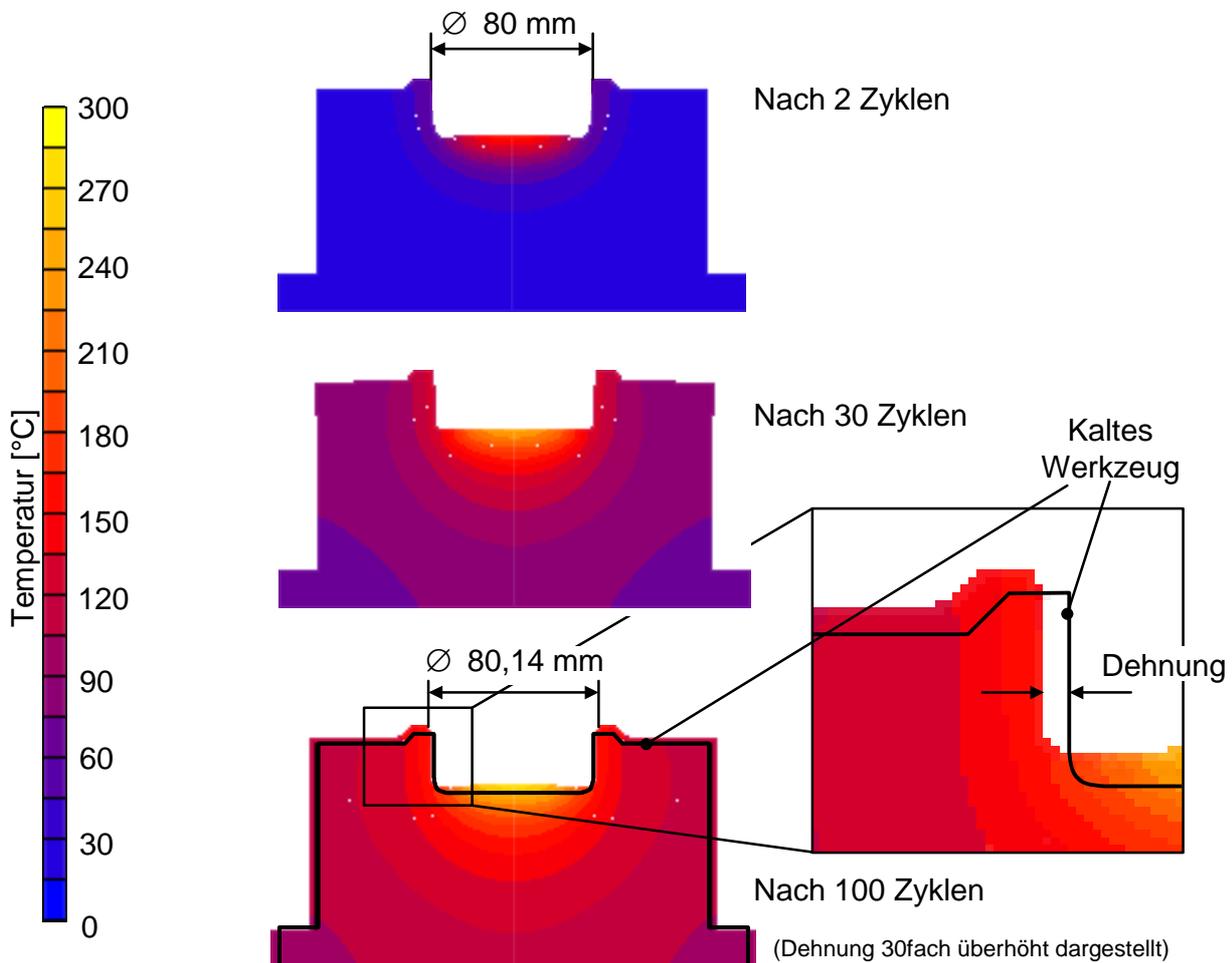
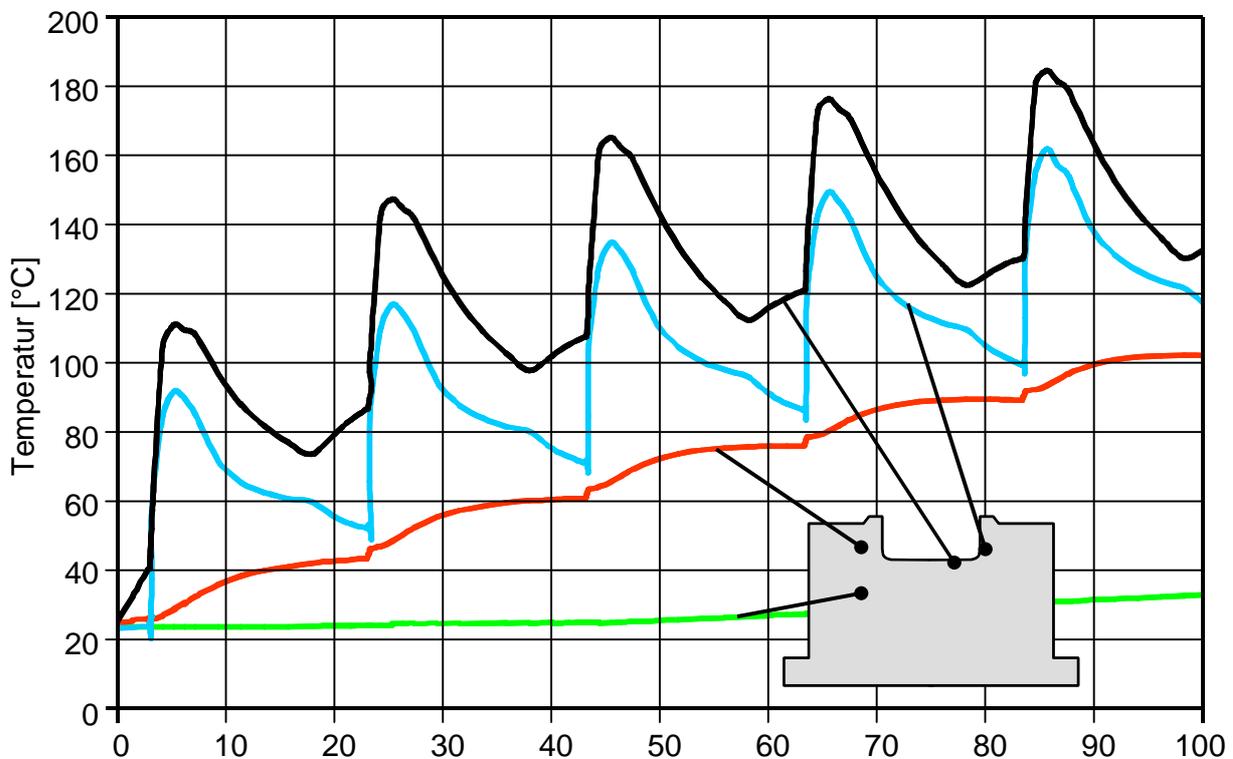


Bild 4-19: FEM – Temperaturverteilung und Dehnung im Gesenk [AWI97]

Bei einer Betrachtung des zeitlichen Temperaturverlauf verschiedener Messpunkte im Werkzeug (Bild 4-20) ist zu erkennen, dass an der Gravuroberfläche die Temperaturschwankungen sehr groß sind. Im Werkzeugkern sind die Schwankungen nur noch sehr gering.

Da die dargestellten Zyklen die Startphase des Schmiedeprozesses abbilden, ist ein ansteigender Trend der Durchschnittstemperatur zu sehen. Nach 100 Schmiedezyklen bei einer Zykluszeit von 20 s hat sich beim vorliegenden Modell ein stationärer Zustand eingestellt, das heißt, das Temperaturniveau bleibt bei den folgenden Schmiedezyklen nahezu konstant. Ausgehend vom kalten Zustand hat sich der Durchmesser des Werkzeugs nach 100 Schmiedezyklen um 0,14 mm gedehnt. Die Gesenkdehnung wirkt sich neben der Werkzeugelastizität auf den Durchmesser des Schmiedeteils aus. Im

realen Prozess spielen zusätzlich noch die Temperaturen des Umformaggregates und der Umgebung eine Rolle. Im Modell werden diese Parameter jedoch vernachlässigt.



*Bild 4-20: Zeitliches Temperaturprofil an verschiedenen Messpunkten (Berechnung mit Hilfe der FEM) [AWI97]*

Mit Hilfe der Modelldaten lassen sich die Bereiche, in denen eine Temperaturbeeinflussung angreifen soll, identifizieren. Bei Betrachtung des Untergesenks aus Bild 4-19 liegt die größte thermische Belastung am Gesenkboden vor. Eine effiziente Reduzierung der Temperaturspitzen ist in diesem Bereich nötig. Des Weiteren lässt sich beobachten, dass die Isothermen etwa halbkreisförmig von der Gravur ausgehen. Eine Temperierung des Werkzeugs sollte somit nicht lokal an einer Stelle wirken, sondern einen möglichst großen Bereich des Werkzeugs abdecken.

## 4.5 Anforderungsprofil an eine Temperierung

Aus dem theoretischen und mit Hilfe der FEM simulierten Temperaturverhalten von Schmiedewerkzeugen lässt sich ein Anforderungsprofil an eine Temperierung erstellen. Hierbei sollen Erfahrungen bei der Temperierung in anderen Fertigungsbereichen einfließen. Der Vergleich der Randbedingungen beim Schmiedeprozess mit denen beim Spritzguss und Druckguss ermöglicht es, Gemeinsamkeiten und Unterschiede aufzuzeigen (Bild 4-21).

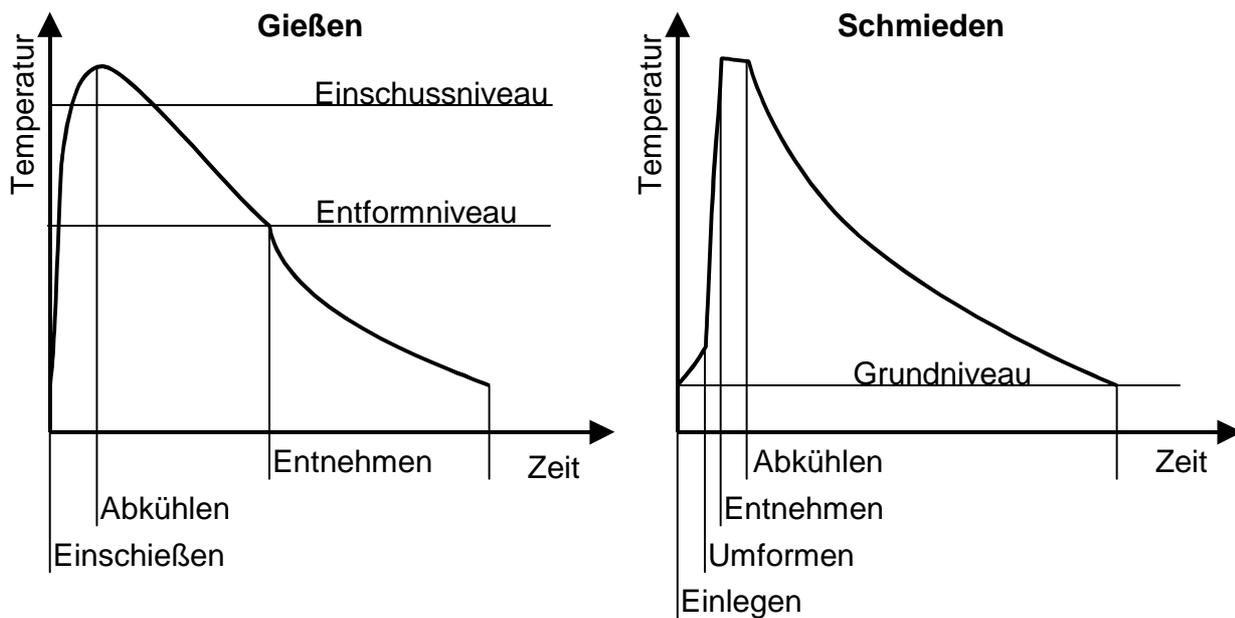


Bild 4-21: Unterschied beim Temperaturverlauf Gießen – Schmieden

Bei Betrachtung der thermodynamischen Verhältnisse im Werkzeug besteht zwischen den Verfahren Gießen und Schmieden kaum ein Unterschied. Im Wesentlichen kann das thermische Verhalten der Fertigungsverfahren mit den Schritten

- Kontakt eines erwärmten Rohmaterials mit dem meist kälteren Werkzeug,
- Wärmeübertragung zwischen Werkstück und Werkzeug,
- Entnahme des geformten Produkts sowie
- Kühlung des Werkzeugs vor und/oder nach der Entnahme

beschrieben werden. Die Reproduzierbarkeit der Werkzeug- und Prozesstemperatur über alle Zyklen sowie die Vermeidung einer thermischen Schädigung des Werkzeugs sind die Hauptaufgaben einer kontrollierten Temperatureinflussung.

Die Randbedingungen der Temperaturführung sind bei den verschiedenen Verfahren jedoch unterschiedlich. Beim Gießen ist die Änderung des Aggregatzustandes eine wesentliche Eigenschaft des Verfahrens. Beim Einschuss des Materials soll ein Aushärten möglichst vermieden werden, um eine vollständige Füllung der Form zu gewährleisten, während im Anschluss eine möglichst schnelle Abkühlung des Materials im Werkzeug erfolgt, um ein entformbares und maßhaltiges Teil zu erhalten. Aus diesem Grund spielen beim Gießen im wesentlichen zwei Temperaturen eine Rolle, die Einschusstemperatur und die Entformungstemperatur. Wenn die Erwärmung des Werkzeugs durch das Rohmaterial nicht ausreichend ist, muss das Werkzeug zum Einschuss zusätzlich geheizt werden. Um die niedrigen Entformungstemperaturen zu erreichen, werden Gießwerkzeuge normalerweise gekühlt.

Beim Schmieden stehen die Umformbedingungen im Vordergrund. Ein Wärmeübergang vom Rohteil auf das Werkzeug bedeutet einen Temperaturverlust und damit ein Zunehmen der Fließspannung. Der Temperaturverlust kann sich somit negativ auf die Formfüllung auswirken. Aus diesem Grund sollte die Werkzeugtemperatur möglichst nahe der Umformtemperatur des Rohteils sein. Dem steht allerdings die thermische Belastung des Werkzeugs gegenüber. Gerade beim Schmieden von Eisenwerkstoffen liegt die Umformtemperatur deutlich über der Anlasstemperatur von Warmarbeitsstahl. Das Temperaturniveau des Schmiedewerkzeugs stellt somit immer einen Kompromiss zwischen einer Begrenzung des Wärmeverlustes im Schmiedeteil und einer Vermeidung der Werkzeugschädigung dar. Die Wahl des Temperaturniveaus des Schmiedewerkzeugs ist stark abhängig von der Geometrie des Schmiedeteils, insbesondere seiner Feingliedrigkeit, und anderen die Fließspannung beeinflussenden Faktoren wie der Umformgeschwindigkeit und der Umformkraft. Mit Hilfe einer Temperierung besteht die Möglichkeit, ein für den Prozess sinnvolles Werkzeugtemperaturniveau einzustellen.

Anders als beim Gießen sind beim Schmieden Temperaturschwankungen nicht erwünscht, da im Gegensatz zu den zwei prozessrelevanten Temperaturniveaus nur eines existiert. Die Temperaturschwankungen treten beim Schmieden allerdings an der Oberfläche der Gravur deutlich in Erscheinung. Das Werkstück wird daher sofort nach der Umformung entnommen, um die übertragene Wärmemenge klein zu halten. Zu einer weiteren Reduzierung der Temperaturschwankungen müssen zusätzliche Maßnahmen der Temperaturbeeinflussung unternommen werden. Eine Verkürzung der Druckberührzeit kann beispielsweise diese Schwankungen verringern.

## 5 Konzeption der Temperierung von Schmiedewerkzeugen

Nachdem die Einflussfaktoren auf die Werkzeugtemperatur bekannt sind und der thermische Ablauf eines Schmiedeprozesses analysiert wurde, sollen in diesem Kapitel die Möglichkeiten der Beeinflussung der Werkzeugtemperatur aufgezeigt sowie das erfolgsversprechendste Konzept detailliert werden.

### 5.1 Beeinflussung der Werkzeugtemperatur

Grundsätzlich lassen sich die Möglichkeiten der Temperaturbeeinflussung des Werkzeugs in zwei Bereiche aufteilen: die Beeinflussung der Oberflächentemperatur und die Beeinflussung der Grund- oder Kerntemperatur. Ferner lassen sich temperaturerhöhende und -erniedrigende Maßnahmen unterscheiden. In Bild 5-1 sind verschiedene Möglichkeiten der Temperaturbeeinflussung dargestellt.

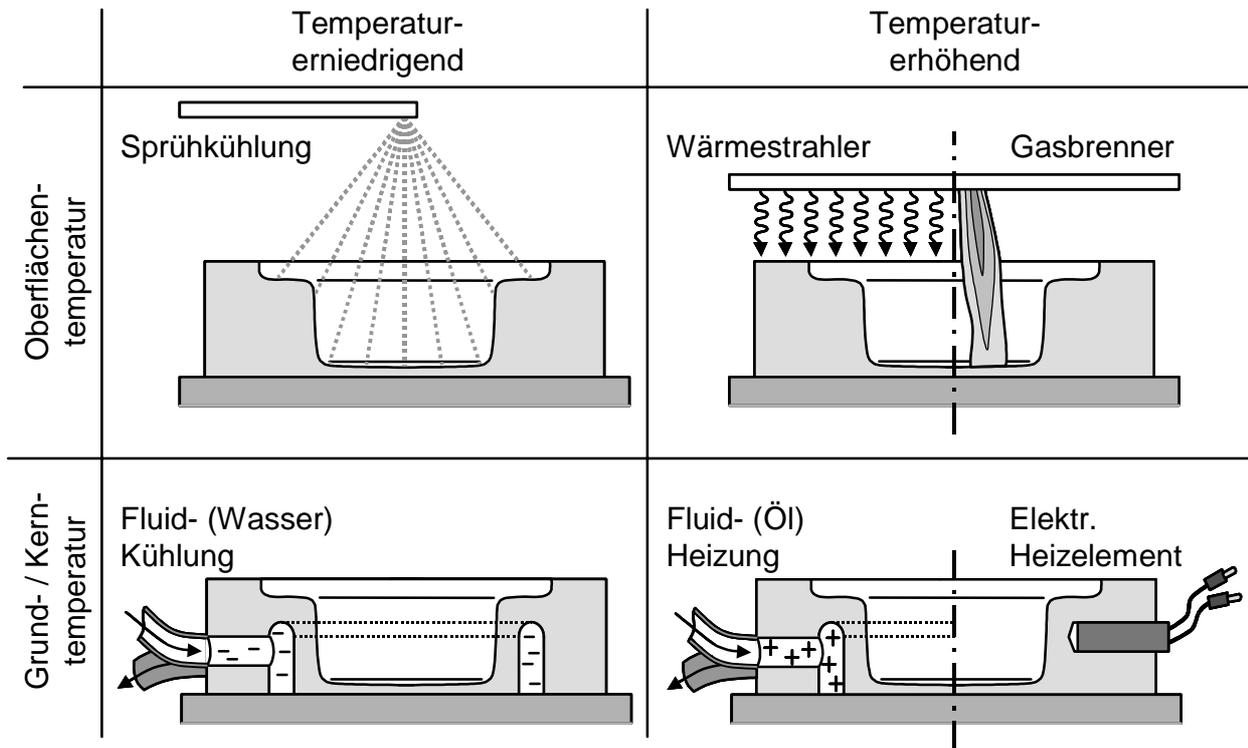


Bild 5-1: Möglichkeiten der Temperaturbeeinflussung

Wie in Abschn. 3.2 beschrieben, werden die Möglichkeiten der Oberflächentemperaturbeeinflussung in Schmiedeunternehmen vielfach angewandt, während eine Kerntemperaturbeeinflussung nahezu nicht stattfindet. Um gezielte thermische Effekte zu erreichen, muss die Wirkungsweise der verschiedenen Möglichkeiten der Temperierung verstanden werden.

Eine Kühlung an der Oberfläche verändert kurzfristig gesehen nur die Oberflächentemperatur. Erst mit einer zeitlichen Verzögerung breitet sich ein Kühlimpuls in Folge der

Wärmeleitung ins Innere des Gesenks aus (Bild 5-2). Der Vorteil der Oberflächen-sprühkühlung besteht darin, dass die Wärme dem Werkzeug an der Stelle entzogen wird, an der sie auch eingebracht wurde. Der Nachteil besteht darin, dass die Oberflächen-sprühkühlung erst zeitlich versetzt nach dem Entnehmen des Werkstücks stattfinden kann und die Wärme sich zu diesem Zeitpunkt bereits ins Innere des Gesenks ausgebreitet hat.

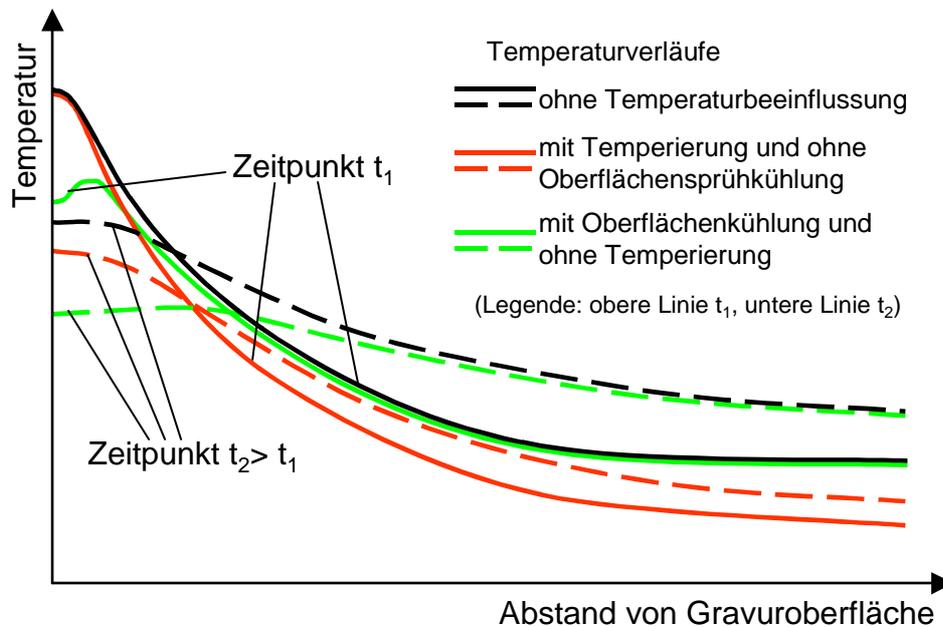


Bild 5-2: Qualitative Temperaturverläufe mit und ohne Temperaturbeeinflussung zu verschiedenen Zeitpunkten

Diesen Nachteil weist eine im Kern angreifende Kühlung nicht auf. Sie ist in der Lage, dauerhaft Wärme abzuführen und so ein generell niedrigeres Niveau der Kerntemperatur zu ermöglichen. Im Gegenzug wirkt sie allerdings im Inneren des Gesenks und kann Temperaturspitzen an der Oberfläche nicht so schnell abbauen.

## 5.2 Kombination – Oberflächen-sprühkühlung und Temperierung

Um eine hohe Präzision zu erreichen und kurze Zykluszeiten zu ermöglichen, müssen beide Wege weiterverfolgt werden. Zum einen müssen die Temperaturspitzen an der Oberfläche, die zu einer großen thermischen Belastung führen, möglichst schnell abgebaut werden. Am Besten hierfür geeignet ist die Kühlung über die Verdampfung eines flüssigen Mediums. Zum anderen muss die Werkzeugkerntemperatur auf ein Soll-Niveau eingestellt und gehalten werden, wobei große Wärmemengen transportiert werden müssen. Die Temperierung mittels eines Wärmeträgermediums stellt hierbei die geeignetste Lösungsmöglichkeit dar (Bild 5-3).

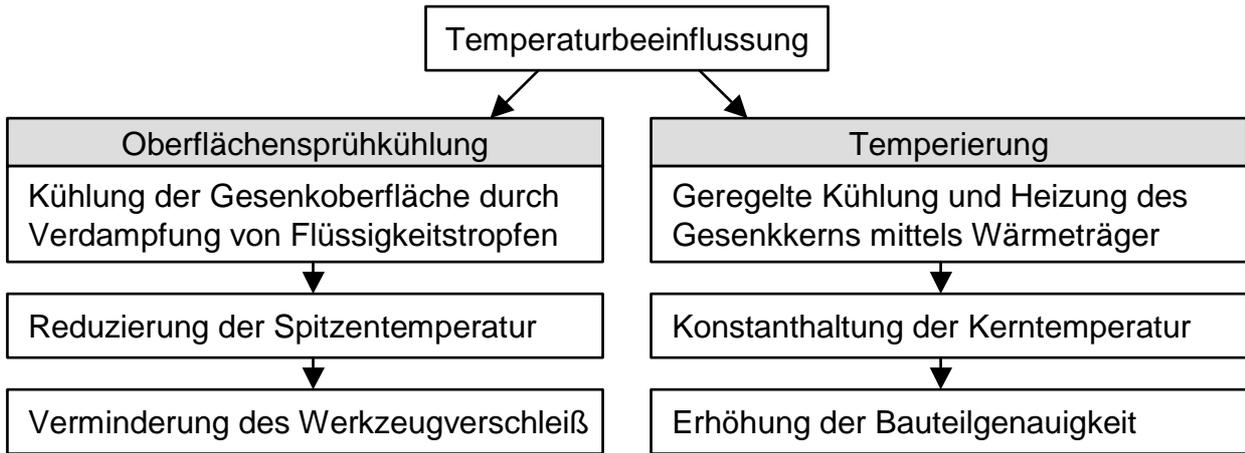


Bild 5-3: Kombination – Oberflächensprühkühlung und Temperierung

Herkömmliche Schmiedeanlagen werden meistens mit einer Oberflächensprühkühlung, die in der Regel mit einem Schmierstoff-Wasser-Gemisch arbeitet, betrieben. Eine Temperierung ist somit eine zusätzliche Funktion und sollte gemeinsam mit einer Oberflächensprühkühlung ohne gegenseitige negative Beeinflussung eingesetzt werden. In Bild 5-4 ist der zeitliche Prozessablauf und Temperaturverlauf unter Einbeziehung einer Oberflächensprühkühlung und Temperierung dargestellt.

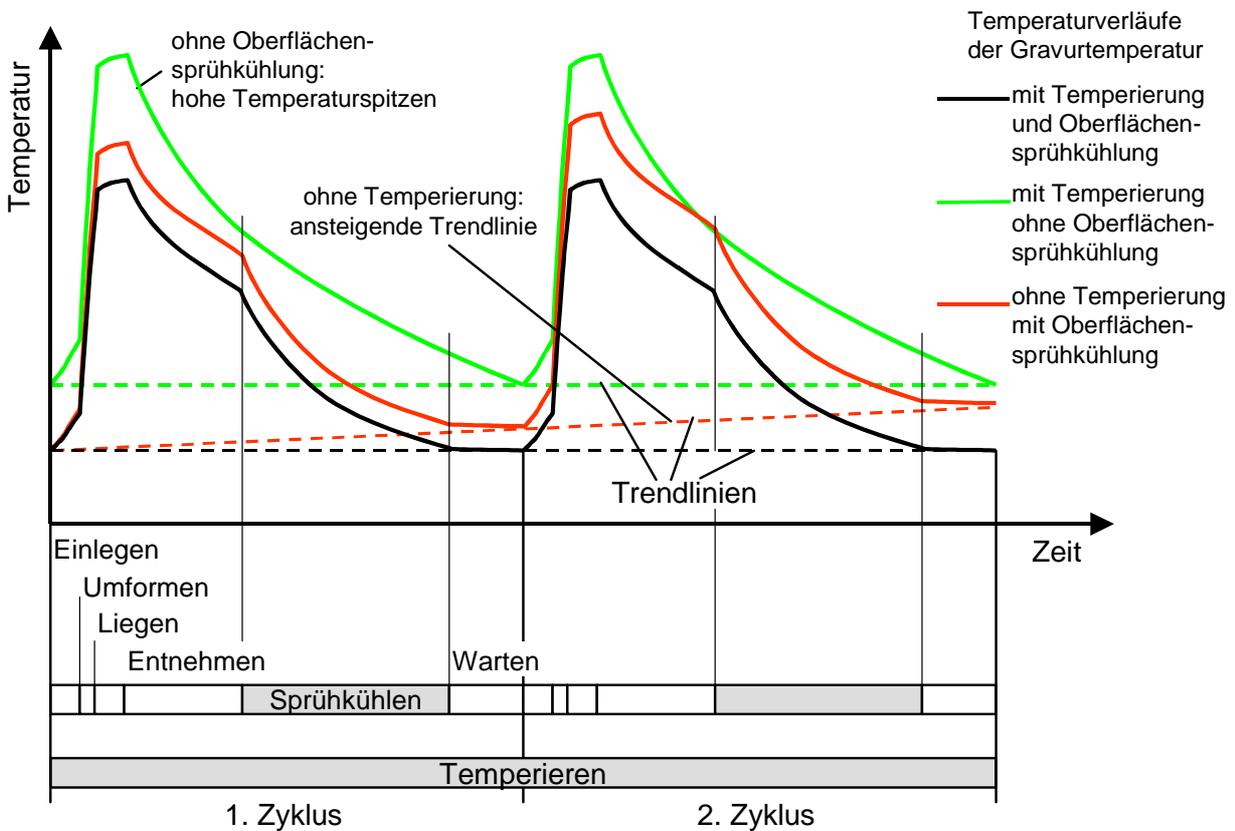
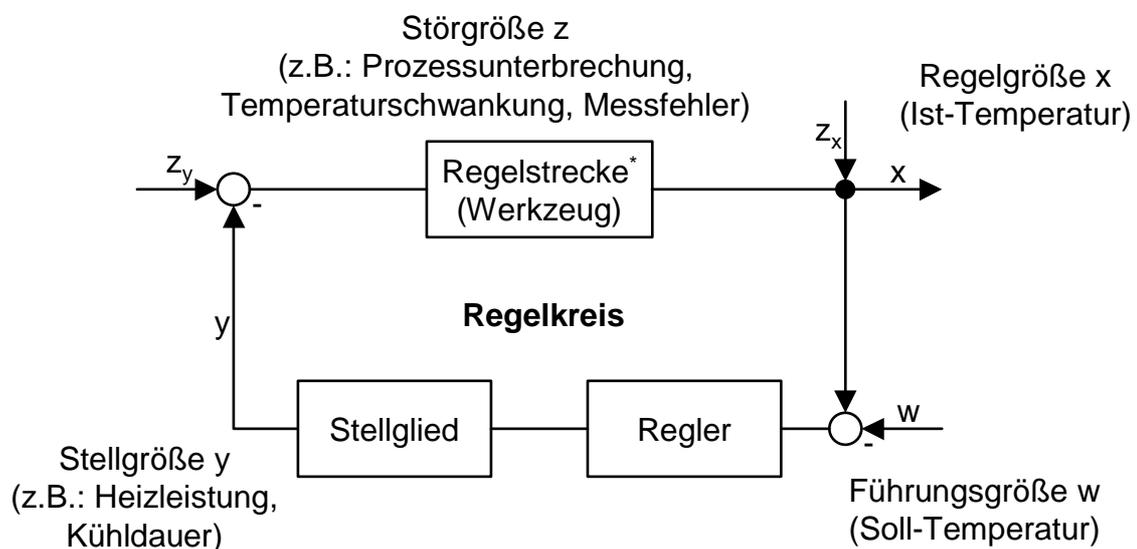


Bild 5-4: Qualitativer Prozessablauf und Temperaturverlauf mit und ohne Temperierung und Oberflächensprühkühlung

Die Kombination der Oberflächensprühkühlung und der Temperierung vereinigt die Vorteile einer Temperaturspitzenabsenkung bzw. einer Niveauregelung. Der Aufwand, zwei Systeme einzusetzen, ist zwar hoch, allerdings gewährleistet dies die Erfüllung der Anforderungen an eine stationäre Temperaturführung mit geringer thermischer Belastung der Gesenke.

### 5.3 Regelkreis zur Temperierung

Ein wichtiger Punkt bei der Realisierung eines Systems zur gezielten Beeinflussung der Werkzeugtemperatur ist der Aufbau einer einfachen und robusten Regelung. Zu diesem Zweck muss ein Regelkreis (Bild 5-5) entworfen werden.



\* Die Regelstrecke ist i.A. tozeitbehaftet

Bild 5-5: Elemente eines Regelkreises

Die Bestandteile des Regelkreises sind ein Messglied zur Aufnahme der Ist-Temperatur, ein Regler, der auf Basis der Differenz der Ist- und der Soll-Temperatur einen Stellwert berechnet, und ein Stellglied, das die Temperatur gemäß dem Stellwert einstellt.

#### 5.3.1 Regelungstechnische Grundlagen

Regeleinrichtungen lassen sich nach der Art der möglichen Stellgrößenänderungen in stetige und unstetige Regler einteilen. Stetige Regler können in einem Intervall, dem Stellbereich, beliebige Werte annehmen, während unstetige Regler zwischen einer begrenzten Anzahl von Stellwerten umschalten. Das Beispiel des Kühlschmierers nach Dohmann [DOH00] (vgl. Abschn. 3.3.3), der zwischen zwei unterschiedlichen Sprühmengen wechseln kann, ist gemäß eines unstetigen Reglers aufgebaut. Der Nachteil

einer derartigen Regelung ist das Schwanken der Regelgröße um den Sollwert [MAN00].

Eine genaue Temperierung lässt sich nur mit einem stetigen Regler verwirklichen. Der stetige Standardregler ist der sogenannte PID-Regler, der sich aus einem proportional, einem integral und einem differenzial wirkenden Anteil zusammensetzt. Im stationären Zustand verschwindet die Regeldifferenz  $e = w - x = 0$  ( $x$ : Regelgröße;  $w$ : Führungsgröße; s. Bild 5-5). Kommt es infolge einer Stör- oder Führungsgrößenänderung zu einer Regeldifferenz  $e = w - x \neq 0$ , muss der Regler eine Stellgrößenveränderung  $\Delta y$  veranlassen, so dass  $e$  möglichst klein bleibt. Diese ist im Fall des PID-Reglers

$$\Delta y = K_{PR} \cdot e + K_{IR} \cdot \int e \cdot dt + K_{DR} \cdot \dot{e} \quad (5-1)$$

Die Übertragungsfunktion, die sich aus dem Quotienten der Laplace-Transformierten der Ausgangs- und Eingangsgröße berechnet, ist

$$\frac{\Delta y(s)}{e(s)} = G_R(s) = K_{PR} + \frac{K_{IR}}{s} + K_{DR} \cdot s \quad (5-2)$$

Hierbei stellen  $K_{PR}$ ,  $K_{IR}$  und  $K_{DR}$  die Übertragungsbeiwerte des proportionalen, integralen bzw. differenzialen Regleranteils dar. Der PID-Regler lässt sich als Parallelschaltung eines P-, I- und D-Gliedes darstellen (Bild 5-6).

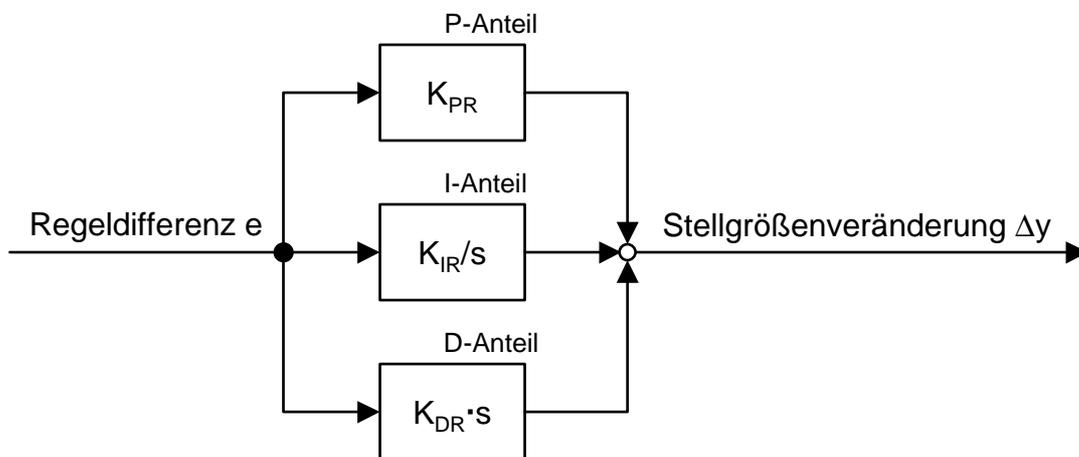


Bild 5-6: Wirkungsplan eines PID-Reglers [MAN00]

Bei der Auswahl eines Reglers stellt der proportionale oder P-Anteil die einfachste Möglichkeit der Regelung dar. Hierbei besteht in einem Intervall  $X_P$  eine Proportionalität zwischen Ausgangs- (Stellgrößenveränderung  $\Delta y$ ) und Eingangsgröße (Regeldifferenz  $e$ ). Dieser Proportionalbereich ist am Beispiel einer Temperierung auf der Ausgangseite durch die maximale Kühl- oder Heizleistung begrenzt (Bild 5-7).

Die Eigenschaft eines Proportionalreglers ist, dass bei einer Regeldifferenz von Null keine Stellgrößenveränderung vorgenommen wird. Da bei einem Schmiedewerkzeug

aufgrund von Abstrahlung und Konvektion eine kontinuierliche Störgröße vorhanden ist, tritt bei reiner P-Regelung eine bleibende Regelabweichung  $e_b$ , die sogenannte P-Abweichung, auf. Diese Regelabweichung kann nur verhindert werden, wenn die Wärmeverluste durch eine kontinuierliche Leistungszufuhr kompensiert werden. Dies widerspricht allerdings der Proportionalität.

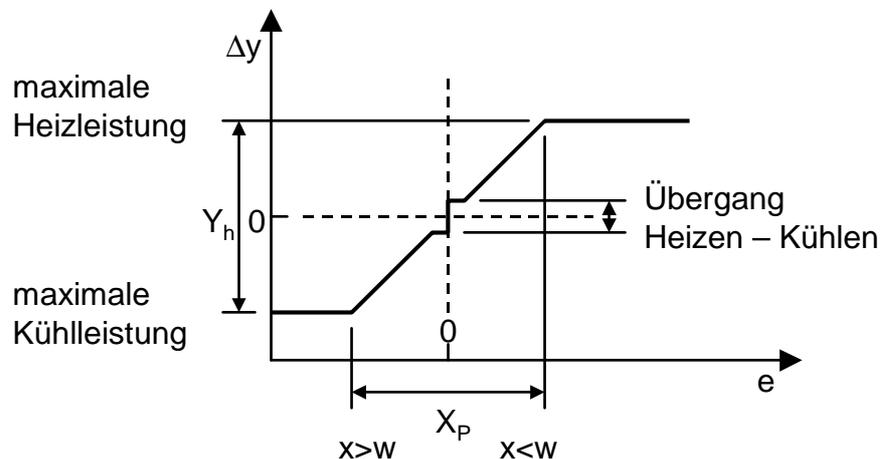


Bild 5-7: Kennlinie des P-Anteils [MAN00]

Um die P-Abweichung zu korrigieren, bedarf es bei der Temperierung von Schmiedegesenken zusätzlich eines weiteren Regleranteils, dem integralen oder I-Anteil. Wie Gleichung (5-1) zu entnehmen ist, ist bei einem I-Regler die Änderungsgeschwindigkeit der Stellgröße proportional zur Regeldifferenz (Bild 5-8).

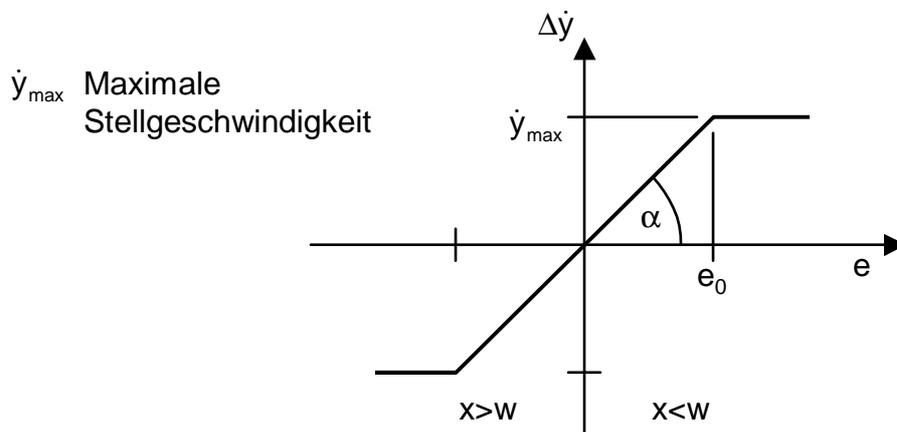


Bild 5-8: Kennlinie des I-Anteils [MAN00]

Das Verhalten des I-Reglers ist verzögert, da die Stellgrößenveränderung  $\Delta y$  von Null beginnend mit einer maximalen Stellgeschwindigkeit  $\dot{y}_{max}$  erfolgt, während beim P-Regler die Stellgrößenveränderung sprunghaft auf eine Regeldifferenz reagiert. Im Gegenzug ermöglicht der I-Regler das exakte Einregeln auf einen Sollwert. Eine Verbindung dieser beiden Regelungsarten zu einem PI-Regler kombiniert die Vorteile

der sprunghaften Reaktion eines P-Reglers und der Genauigkeit eines I-Reglers, das heißt die Vermeidung von bleibenden Regeldifferenzen.

Der Vorteil der schnellen Reaktion des P-Anteils auf Regelabweichungen kann durch einen zusätzlichen differentiellen oder D-Anteil noch verbessert werden. Der D-Anteil reagiert gemäß Gleichung (5-1) auf die Änderungsgeschwindigkeit der Regeldifferenz  $\dot{e}$ . Das heißt, selbst bei anfänglich noch kleinen Regelabweichungen wird bereits eine signifikante Stellgrößenveränderung erzielt. Die Wirkung des D-Anteils in einem PD- oder PID-Regler wird als Vorhalt bezeichnet. Der D-Anteil muss richtig dimensioniert werden, um zu vermeiden, dass die Stellgrößenveränderung sofort den Maximalwert erreicht. Im Falle der Temperierung wäre der Maximalwert die maximale Heiz- oder Kühlleistung.

Bei dem gegebenen regelungstechnischen Problem der Temperierung von Schmiedewerkzeugen, ist der PID-Regler die einzig sinnvolle Regelungsform. Der D-Anteil ist notwendig, da die Regelung aufgrund des Temperaturzyklus mit großen Temperaturveränderungen (s. Abschn. 4.2) schnell reagieren muss. Der kontinuierliche Wärmeverlust durch Strahlung und Konvektion erfordert zum Erreichen und Halten der Soll-Temperatur einen I-Anteil. PID-Regler, die den beschriebenen Anforderungen der Temperierung von Schmiedewerkzeugen entsprechen, sind kommerziell verfügbar.

Bei der Umsetzung eines Regelkreises gibt es im Bereich von Spritz- und Druckguss unterschiedliche Regelstrategien. Dies sind die Regelung der Wärmeträgertemperatur, die direkte Regelung der Werkzeugtemperatur und eine Kombination dieser beiden mittels Kaskadenregelung [KRU97]. Unter Berücksichtigung der besonderen Anforderungen im Schmiedeeinsatz muss die hierfür geeignete Strategie ermittelt werden. Darauf soll im Folgenden eingegangen werden.

### 5.3.2 Regelung der Wärmeträgertemperatur

Die einfachste Variante ist, da sie ohne eine direkte Messung der Werkzeugtemperatur auskommt, die Regelung der Wärmeträgertemperatur (Bild 5-9). Hierbei wird die Ist-Temperatur im Vorlauf des Temperiermediums gemessen.

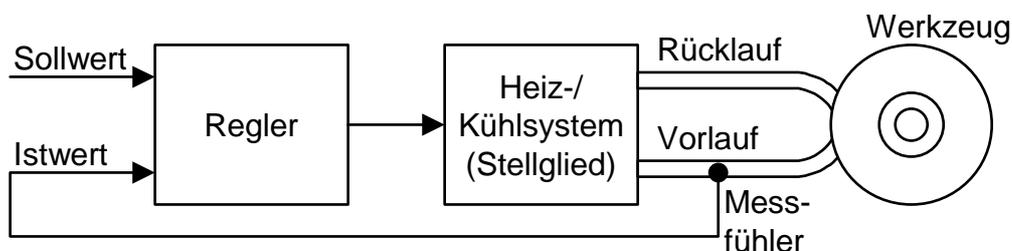


Bild 5-9: Regelung der Wärmeträgertemperatur

Da die thermische Ankopplung eines flüssigen Wärmeträgers an das Werkzeug nicht sehr gut ist, ist der Wärmeaustausch in der Regel träge. Bei der Regelung der Wärmeträgertemperatur hat dies den Vorteil, dass eine hohe Stabilität der Regelung gewährleistet werden kann, die Reaktion auf Temperaturschwankungen aber nur langsam ist (Bild 5-10). Gerade bei schnellen Temperaturänderungen oder -schwankungen kann es zu größeren Abweichungen der Ist- von der Soll-Temperatur kommen.

Da die Regelung der Wärmeträgertemperatur ohne Temperaturfühler im Werkzeug auskommt, ist sie unempfindlich gegen Versagen. Aufgrund der Trägheit ist sie nur für Prozesse mit langsamen Temperaturschwankungen geeignet. Für eine Regelung des Schmiedeprozesses, bei dem Schwankungsspitzen von mehreren hundert Grad an der Oberfläche auftreten, ist sie nicht einsetzbar.

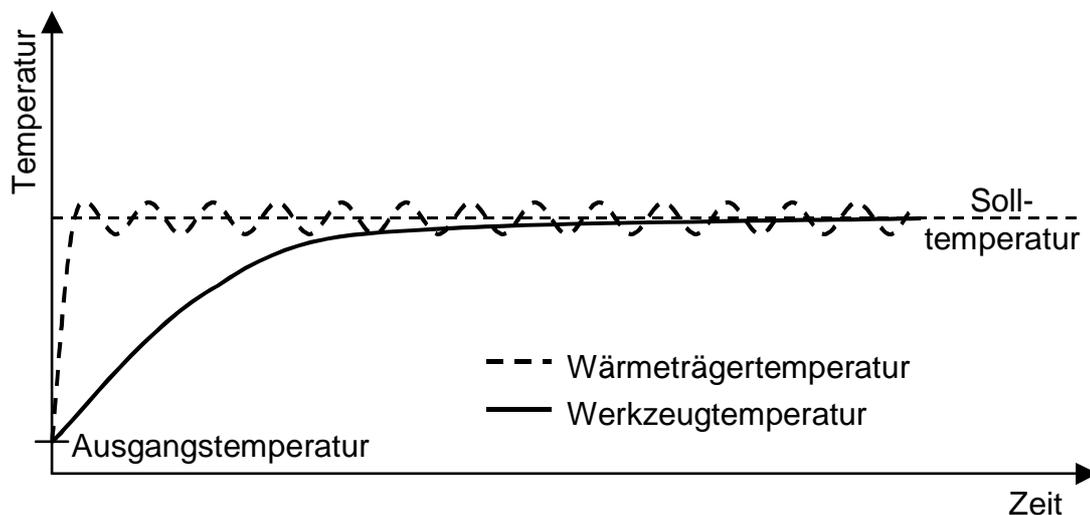


Bild 5-10: Temperaturverlauf bei Regelung der Wärmeträgertemperatur

### 5.3.3 Regelung der Werkzeugtemperatur

Die zweite Möglichkeit besteht in der direkten Regelung der Formtemperatur. Hierbei wird die Temperatur des Werkzeugs gemessen und als Istwert berücksichtigt (Bild 5-11). Von entscheidender Bedeutung bei einer derartigen Regelstrategie ist die Wahl des Messpunkts im Werkzeug (s. Abschn. 5.4.1).

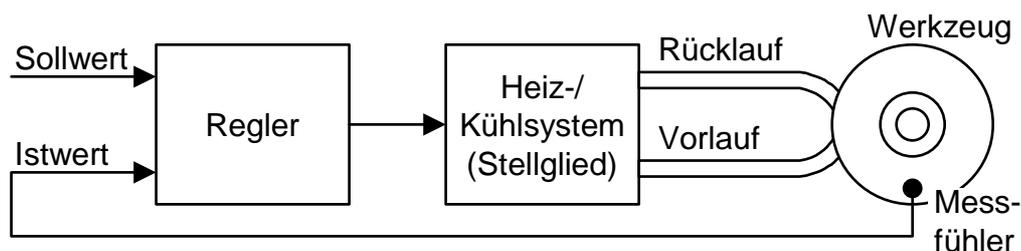


Bild 5-11: Regelung der Werkzeugtemperatur

Der Vorteil dieser Regelung ist das schnelle Kompensieren der Ist-Sollwert-Differenz, da der Wärmeträger soweit aufgeheizt oder gekühlt wird, bis sich die Soll-Temperatur am Werkzeug eingestellt hat. Aufgrund der Trägheit des thermischen Systems Wärmeträger – Werkzeug kann der Wärmeträger dabei überhitzen. Dies würde bei Wärmeträgern zum Verkoken und damit zu einem Defekt des Temperiersystems führen. Eine Begrenzung der Vorlauftemperatur verhindert diese Möglichkeit. Der Temperaturverlauf bei einer Regelung der Werkzeugtemperatur ist in Bild 5-12 dargestellt.

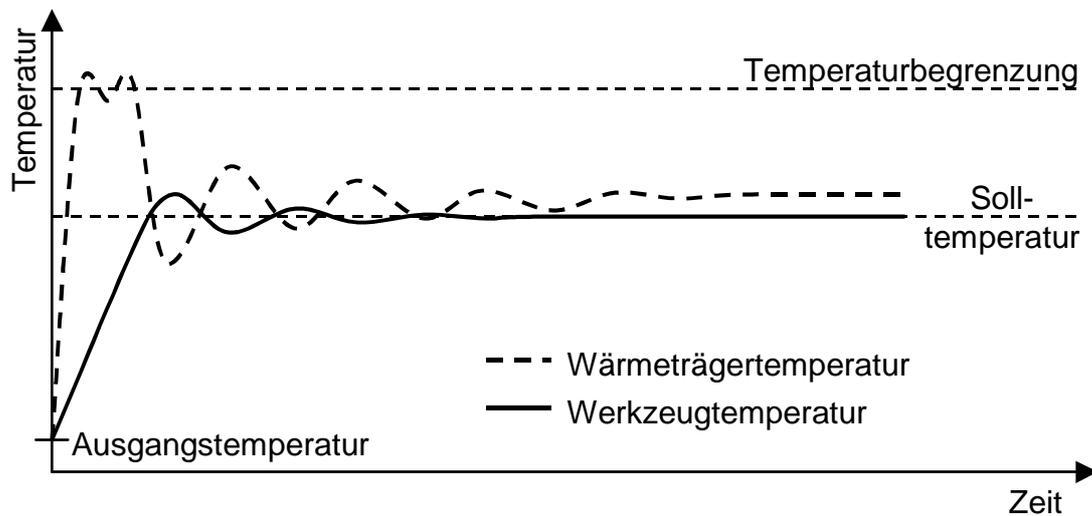


Bild 5-12: Temperaturverlauf bei Regelung der Werkzeugtemperatur

Problematisch bei der Regelung der Werkzeugtemperatur ist die Anfälligkeit gegen ein Überschwingen. Wenn die Regelstrecke und der Regler nicht gut aufeinander abgestimmt sind, geht dies auf Kosten der Regelstabilität und kann zu Schwankungen der Werkzeugtemperatur führen, die außerhalb der Toleranzen liegen. Eine genaue Abstimmung zwischen Regler und Werkzeug (Regelstrecke) hat den Nachteil, dass das System nicht mehr universell eingesetzt werden kann, sondern für jedes Werkzeug eigene Regelparameter gefunden werden müssen.

### 5.3.4 Kaskadenregelung

Eine optimale Variante stellt eine Kombination der beiden oben genannten Regelungsarten dar. Eingesetzt wird sie in Bereichen, in denen die Reaktionszeit des Verbrauchers wesentlich höher ist als diejenige des Wärmeträgers. Dies tritt aufgrund der hohen Masse des Werkzeugblocks bei allen Schmiedegesenken auf. Des Weiteren ist die Kaskadenregelung relativ unempfindlich gegenüber schlecht angekoppelter Temperaturfühler, was bei bewegten Werkzeugen und rauen Umgebungsbedingungen einen großen Vorteil darstellt.

Das Prinzip der Kaskadenregelung ist die Kopplung zweier oder mehrerer Regelkreise. Diese Regelkreise können ein unterschiedliches Regelverhalten aufweisen. Zur

Temperierung von Schmiedegesenen soll eine Kaskadenregelung mit einem PID-Hauptregler und einem PD-Hilfsregler betrachtet werden (Bild 5-13).

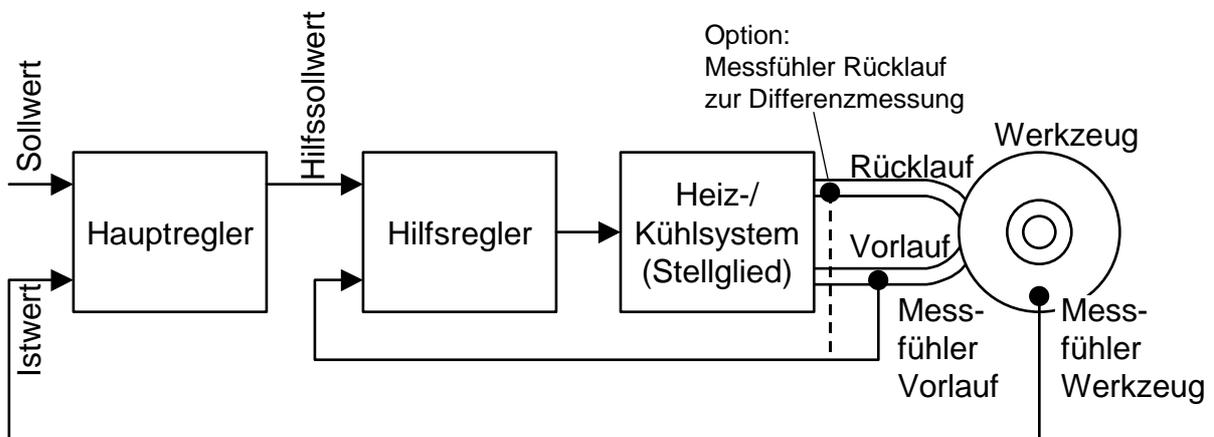


Bild 5-13: Kaskadenregelung

Im Hauptregler wird das Messsignal des Werkzeugs mit dessen Sollwert verglichen. Aus der Differenz errechnet der Hauptregler einen Hilfssollwert für die Regelung der Vorlauftemperatur durch den Hilfsregler. Im Hilfsregler wird hierzu der Hilfssollwert mit dem Messsignal der Vorlauftemperatur verglichen und ein Sollwert an das Stellglied gegeben. Da der Hilfssollwert ein veränderlicher Wert ist, der ständig angepasst wird, kann beim Hilfsregler auf einen I-Anteil verzichtet werden. Die P-Abweichung durch Wärmeverluste beim Werkzeug wird vom I-Anteil des Hauptreglers kompensiert. Der Vorteil dieser Regelung liegt darin, dass die Solltemperatur des Werkzeugs schnell erreicht wird, aber trotzdem kein Überschwingen auftritt (Bild 5-14).

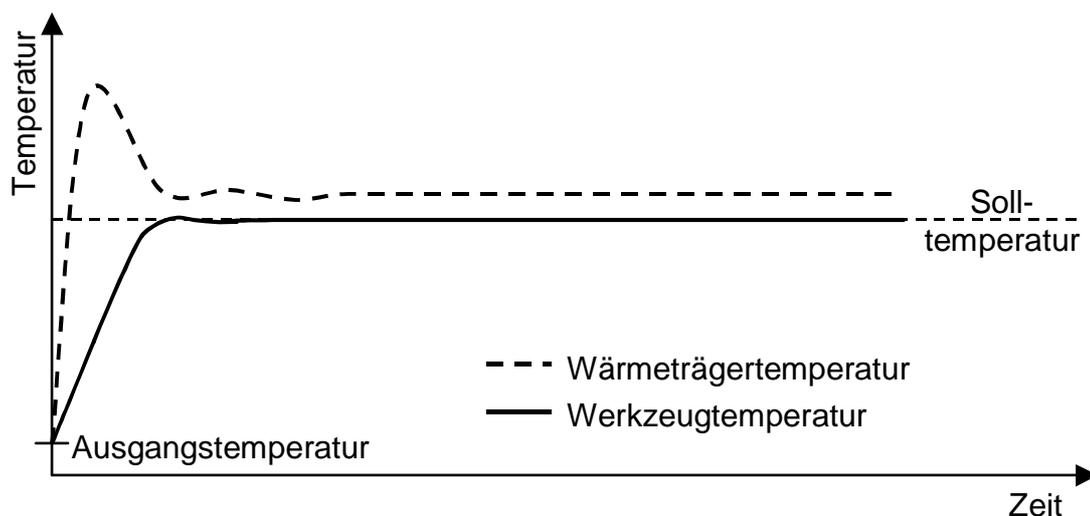


Bild 5-14: Temperaturverlauf Kaskadenregelung

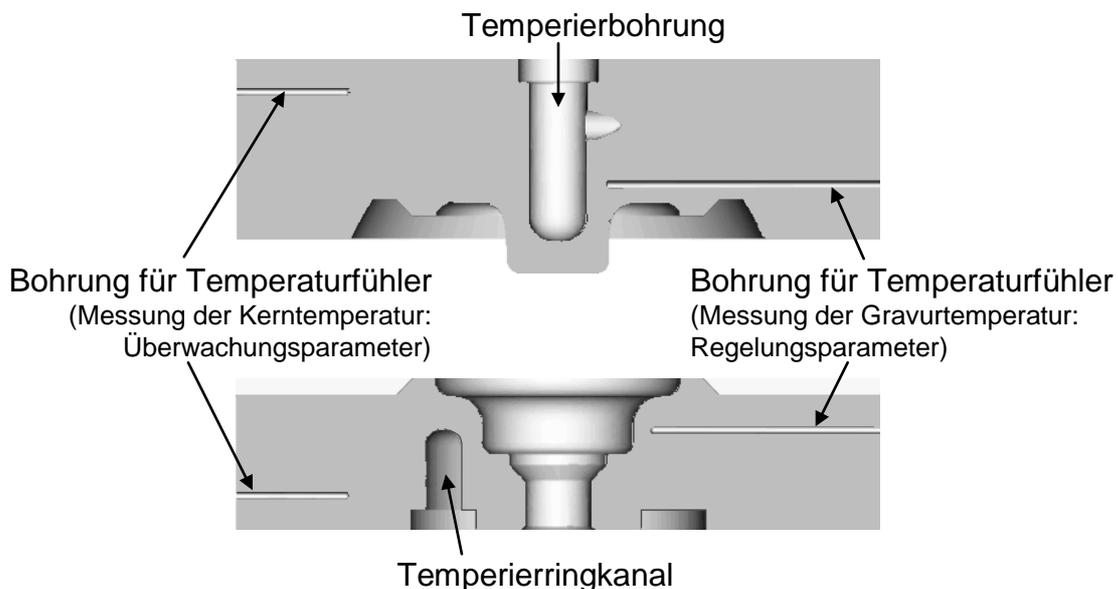
Nachteilig an dieser Art der Regelung ist die Tatsache, dass sie nicht aus einfachen Reglerelementen aufgebaut werden kann, sondern ein Mikroprozessor benötigt wird,

um den Hilfswert gemäß einer Kennkurve zu berechnen. Bei kommerziellen digitalen Industrieregler ist die Kaskadenregelung größtenteils standardmäßig verfügbar.

Des Weiteren stellt der Temperaturfühler im Werkzeug eine Ausfallursache dar. Bei den schnell bewegten Schmiedewerkzeugen, die großen Belastungen ausgesetzt sind, müssen deshalb Maßnahmen ergriffen werden, den Temperaturfühler so zu fixieren und die Verkabelung so flexibel und sicher zu gestalten, dass Ausfälle infolge einer schlechten thermischen Ankopplung oder eines unterbrochenen elektrischen Kontaktes vermieden werden. Der Ausfall des Temperaturfühlers im Werkzeug führt allerdings nicht zu einem Gesamtausfall, da immer noch eine Regelung der Wärmeträgertemperatur möglich ist.

## 5.4 Zusatzelemente eines temperierten Werkzeugs

Nach der Konzeption des Regelkreises ist die Anpassung der Werkzeuge an die Anforderungen einer Temperierung nötig. Es müssen ein oder mehrere Messpunkte für die Temperatureaufnahme sowie Temperierkanäle zum Einstellen der Temperatur durch einen temperierten Wärmeträger vorgesehen werden (Bild 5-15).



*Bild 5-15: An eine Temperierung angepasstes Schmiedegesenk*

Entscheidend dabei ist, dass das Werkzeug den Anforderungen an den Schmiedebetrieb gerecht wird. Das bedeutet, dass die Stabilität des Werkzeugs gewährleistet sein muss, ein Wechsel des Werkzeugs ohne großen Aufwand möglich ist und die Werkzeugkosten niedrig gehalten werden können.

### 5.4.1 Temperaturmessung

Bei der Temperaturmessung muss zwischen Messwerten, die der Prozesskontrolle dienen, und zwischen Messwerten, die als Istwert für die Prozessregelung herangezogen werden, unterschieden werden (Bild 5-15). Für eine Prozessüberwachung ist zum einen die Grund- oder Kerntemperatur des Werkzeugs interessant, die ein Indiz für das Erreichen und Halten eines stationären Prozesszustandes und somit ein Maß für die Gesenkdehnung ist. Zum anderen ist die Überwachung temperaturkritischer Stellen im Gesenk sinnvoll, da so Schädigungspotentiale frühzeitig entdeckt und mit geeigneten Gegenmaßnahmen abgebaut werden können.

Für das Temperaturregeln einer Temperierung ist die Position des Temperaturfühlers entscheidend [THI97]. Die Kriterien für die Positionierung des Temperaturfühlers sind der Abstand von der Gravuroberfläche sowie die Lage im Werkzeug (Bild 5-16). Der Abstand von der Gravuroberfläche korreliert hierbei mit der Amplitude der Temperaturschwankung während eines Zyklus. Ein sinnvolles Maß für den Abstand des Temperaturfühlers von der Gravuroberfläche sind 1 bis 2 mm, wobei eine maximale Amplitude der Temperaturschwankungen von 30 bis 50°C auftritt. Der Abstand stellt hierbei einen Kompromiss zwischen dem Erfassen und Nachführen der entscheidenden Oberflächentemperatur, die über mehrere hundert Grad variiert, und einer für regelungstechnische Zwecke geeigneteren schwankungsfreien Temperatur im Werkzeuginneren dar, die aber aus gleichem Grund unempfindlich gegen Störungen ist.

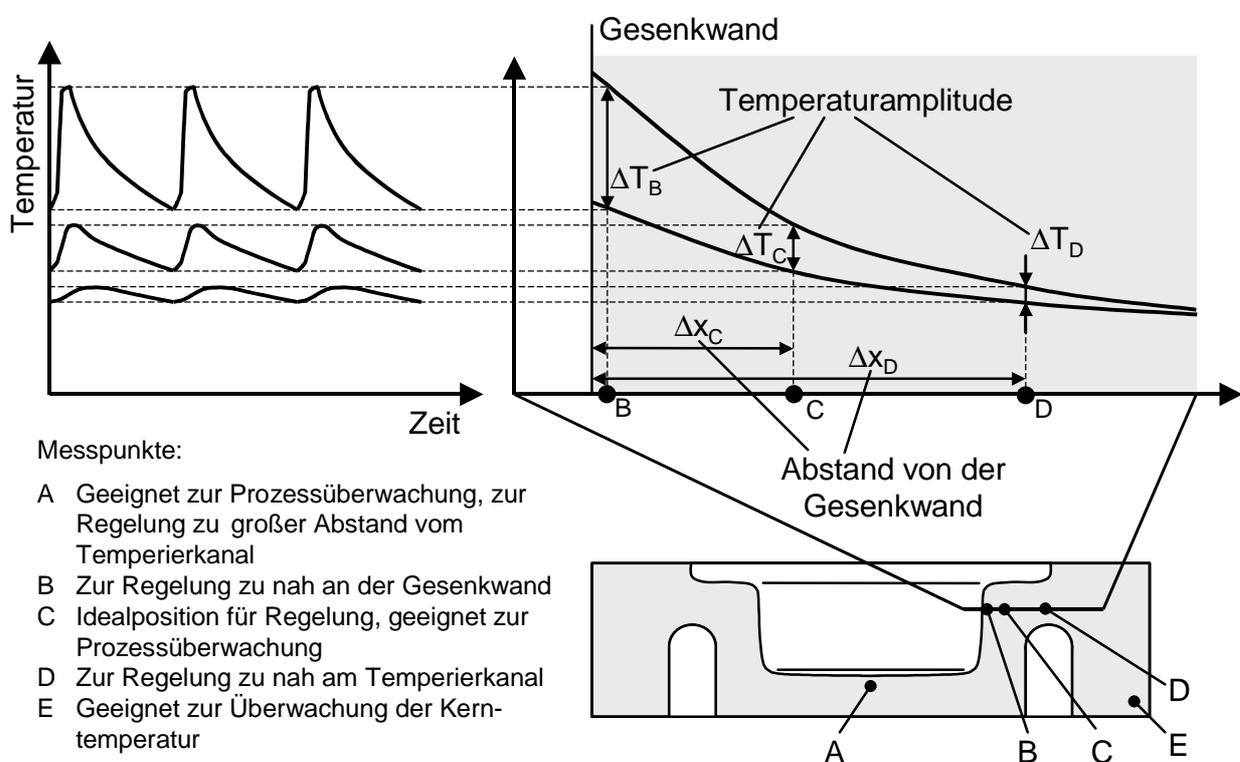


Bild 5-16: Positionierung der Temperaturfühler

Die Lage des Temperaturfühlers zur Messung der Ist-Temperatur für die Regelung muss infolgedessen so gewählt werden, dass Störungen schnell erfasst werden können, gleichzeitig aber die Trägheit des Regelkreises möglichst klein gehalten wird. Das bedeutet, dass die Messung nahe des Temperierkanals durchgeführt werden muss, wobei die am besten geeignete Stelle zwischen Gravur und Temperierkanal liegt.

### 5.4.2 Temperierkanäle

Bei der Anordnung der Temperierkanäle (Bild 5-17) gibt es mehrere Anforderungen, die beachtet werden müssen. Temperierkanäle sollten möglichst nah an den Stellen liegen, die die größte thermische Belastung aufweisen. Ferner sollten sie so angeordnet werden, dass sie das Werkzeug nicht nachhaltig schwächen. Hierzu sollte eine detaillierte Belastungssimulation der Werkzeuge mit Temperierkanälen durchgeführt werden. Die Dimension der Temperierkanäle sollte so gewählt werden, dass ein möglichst guter Wärmeübergang gewährleistet werden kann. Der Wärmeübergang wird durch die Oberfläche und auch durch die Strömungsverhältnisse in den Temperierkanälen bestimmt, die wiederum von der Form und Größe der Kanäle abhängen. Neben den technischen Anforderungen müssen die Temperierkanäle so konzipiert sein, dass sie leicht und kostengünstig zu fertigen sind und im Betrieb gut gegen Leckagen abgedichtet werden können.

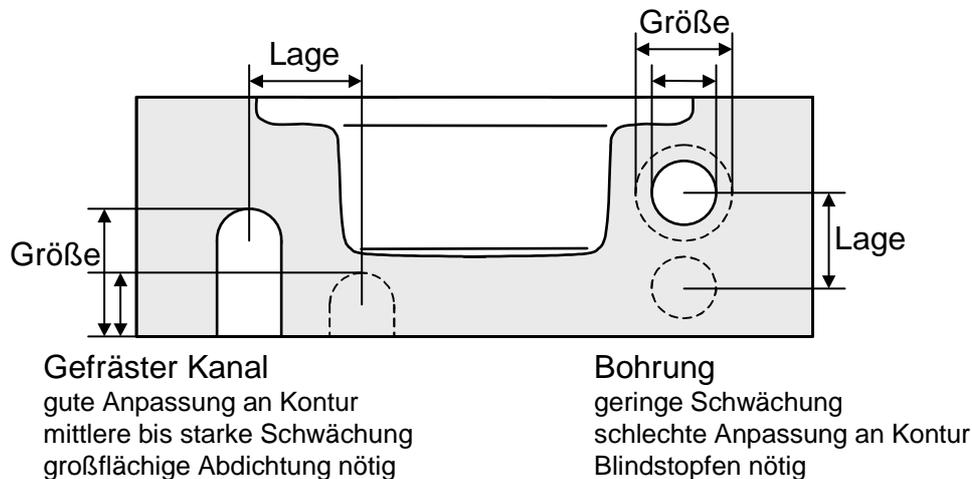


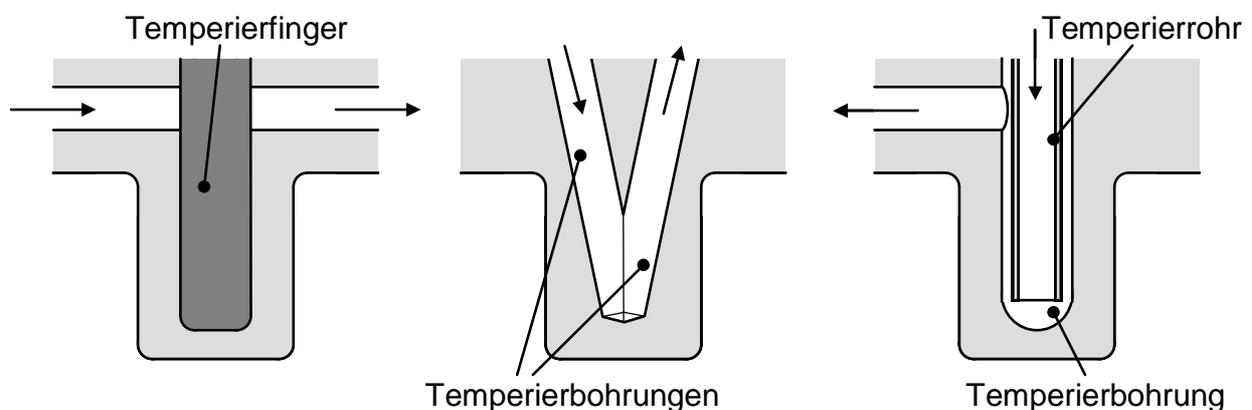
Bild 5-17: Anordnung von Temperierkanälen

In Bild 5-18 sind Beispiele für die Temperierung von Dornen und Stempeln am Gesenk dargestellt. Da in diesen Werkzeugbereichen der Wärmeabtransport nur eindimensional möglich ist, sind sie besonders stark thermisch beansprucht.

Die Gestalt der Temperierkanäle richtet sich vor allem nach den Dimensionen des Dorns hinsichtlich des Durchmessers und der freien Länge. Stempel oder Dorne, die einer sehr hohen mechanischen Beanspruchung ausgesetzt sind, dürfen häufig nicht durch Bohrungen geschwächt werden. Hier bietet sich die Möglichkeit an, einen

Temperierfinger aus einem besser wärmeleitenden Metall, bevorzugt Kupfer, der die Wärme aus dem Dorn herausleiten kann, in den Stempel einzupassen. Dieser Kupferfinger kann dann selbst gekühlt werden. Diese indirekte Art der Kühlung kann auch bei sehr dünnen oder langen Stempeln verwendet werden, bei denen Temperierbohrungen nicht angebracht werden können.

Eine kostengünstige Möglichkeit stellen V-förmig gefertigte Sackbohrungen dar. Der Nachteil dieser Ausführung liegt in der fehlenden Symmetrie, die bei sehr genauer Temperaturführung relevant werden kann, und in der Gefahr einer Kerbwirkung im Bereich der Bohrspitzen. Die beste Alternative stellt eine unten gerundete Temperierbohrung dar, in deren Mitte ein Temperierrohr platziert ist. Das Temperiermedium dringt durch das Rohr in die Bohrung ein und wird seitlich abgeleitet, wodurch eine sehr gleichmäßige Temperierung erfolgt.



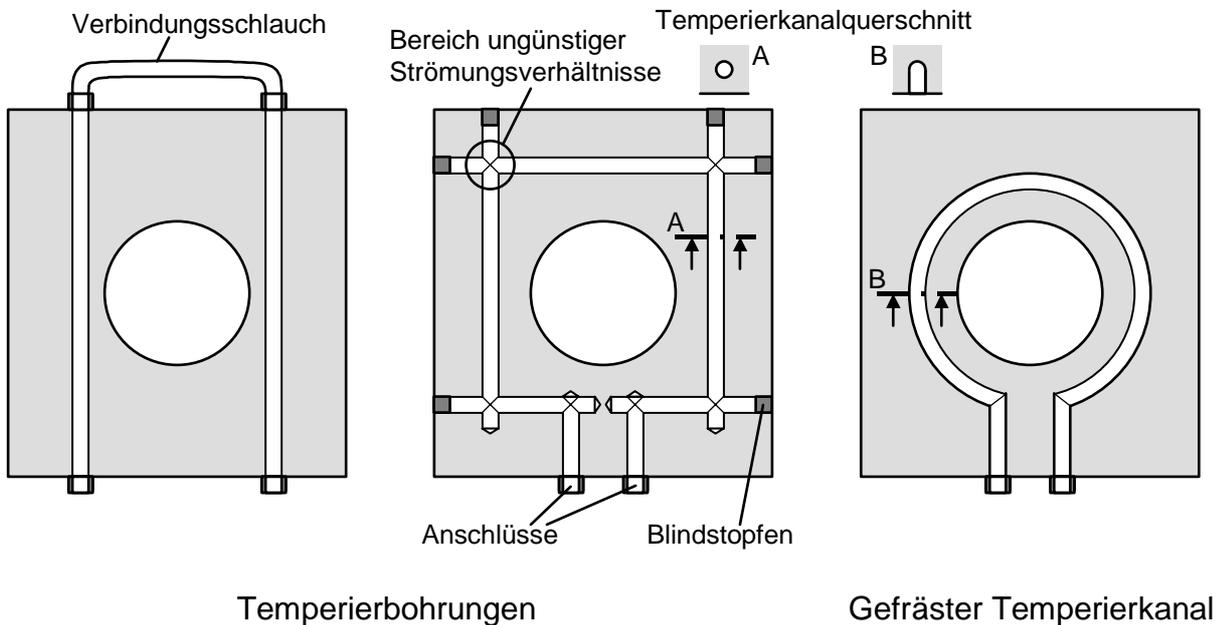
*Bild 5-18: Beispiele für die Temperierung (geregeltes Heizen und Kühlen) von Gesenkdnornen*

Möglichkeiten der Temperierung von Werkzeugkavitäten sind in Bild 5-19 dargestellt. Auch in diesem Fall muss ein Kompromiss zwischen der Belastbarkeit der Werkzeuge und der Genauigkeit der Temperaturführung eingegangen werden.

Die einfachste Lösung stellen Temperierbohrungen dar, die das Werkzeug komplett durchziehen und die untereinander mit Schläuchen verbunden sind. Diese Art der Temperierkanäle führt zu einer geringen Schwächung des Werkzeugs, ermöglicht aber nur ein inhomogenes Temperaturprofil. Für rotationssymmetrische Teile, bei denen beispielsweise die Rundlaufeigenschaft eine Rolle spielt, ist diese Anordnung nicht geeignet.

Eine ideale rotationssymmetrische Temperaturverteilung ist mit Hilfe gefräster Ringkanäle zu realisieren. Sie entsprechen sowohl hinsichtlich der Gleichmäßigkeit der Temperaturverteilung als auch hinsichtlich des maximierten Wärmeübergangs aufgrund der Strömungsverhältnisse den Anforderungen. Einsetzbar ist diese Art von Temperierkanälen allerdings nur bei mäßig belasteten Schmiedewerkzeugen, da die Schwächung

durch die gefräste Nut hoch ist. Zur Auslegung ist eine genaue Festigkeitsanalyse erforderlich, die mit Hilfe der FEM durchgeführt werden kann.



*Bild 5-19: Beispiele für die Temperierung (geregeltes Heizen und Kühlen) von Kavitäten*

Eine Kompromisslösung stellt ein Netz aus Temperierbohrungen dar, das sowohl hohen Festigkeitsanforderungen entspricht, andererseits aber auch ein annähernd gleichmäßiges Temperaturprofil ermöglicht. Der Nachteil dieser Lösung liegt in den ungünstigen Strömungsverhältnissen, da bei der Fertigung dieser Lösung scharfe Kanten und Staustellen im Strömungsfluss nicht vermieden werden können.

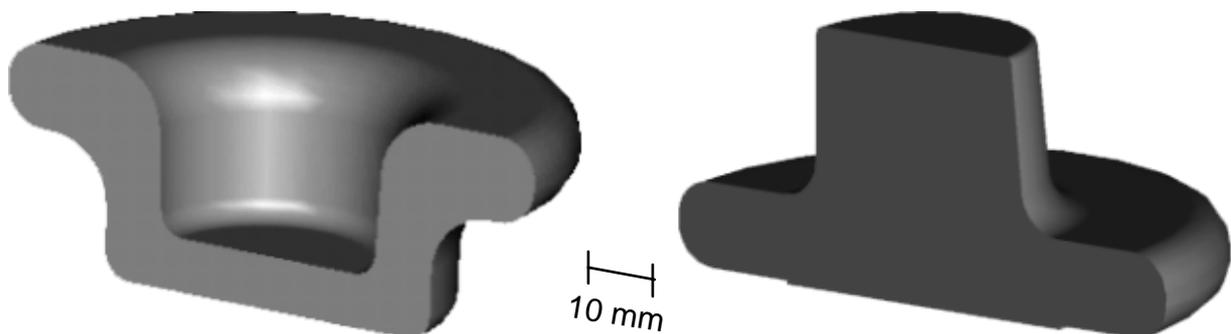
Ausgehend von den Anforderungen an die Produktqualität und damit den Schmiedeprozess muss im Einzelfall entschieden werden, wie die Form und Anordnung der Temperierkanäle ausgelegt wird. Entscheidend bei der Größendimensionierung der Temperierkanäle ist die Berücksichtigung des gesamten Temperiersystems insbesondere des Temperiergerätes (s. Abschn. 3.5). Im Vergleich zum Spritzguss spielt die Homogenität der Temperaturverteilung entlang der gesamten Gravuroberfläche beim Schmieden keine so große Rolle, so dass aufwendige Temperierkanalsysteme nicht benötigt werden. Wichtig ist eine gleichmäßige Temperaturverteilung vor allem im Bereich von Funktionsflächen. Wichtigstes Augenmerk bei der Konzeption von Temperierkanälen bei Schmiedewerkzeugen ist die zulässige Schwächung des Werkzeugs.

## 6 Realisierung eines temperierten Schmiedeprozesses

In diesem Kapitel wird die Realisierung einer Temperierung von Schmiedewerkzeugen mit kombinierter Oberflächensprühkühlung beschrieben. Unter Berücksichtigung der theoretischen und konzeptionellen Vorarbeiten wird die Auswahl zweier Beispielgeometrien, die Auslegung der temperierten Umformgesenke sowie die Struktur des Gesamtwerkzeugs dargestellt. Des Weiteren ist die Wahl eines Temperieraggregates sowie die Ermittlung der Parameter der Temperierung ein entscheidender Punkt in der Realisierung des Gesamtsystems.

### 6.1 Wahl der Versuchsgeometrien

Da die Geometrie der Schmiedeprodukte einen starken Einfluss auf das Temperaturverhalten des Schmiedewerkzeugs hat, wurden zwei Produkte gegensätzlicher Geometrie, aber gleicher Masse gewählt. Um einen großen Wärmeübergang zu erreichen wurde bei den Produkten auf ein großes Verhältnis von Oberfläche zu Volumen geachtet. In Bild 6-1 sind die verwendeten Beispielgeometrien Napf und Zapfen abgebildet.



*Bild 6-1: Beispielgeometrien: links Napf; rechts Zapfen*

Als erste Geometrie wurde ein Napf gewählt, für dessen Umformung ein Gesenkorn oder -stempel verwendet wird. Bei einem Stempel tritt thermisch das Problem der Überhitzung auf, da Wärme nur in einer Richtung abgeführt werden kann. Hier kann eine Kombination aus Temperierung und Oberflächensprühkühlung zu deutlich niedrigeren Betriebstemperaturen führen.

Als zweite Geometrie wurde ein Zapfen verwendet, bei dem die Gefahr der Auskühlung des Werkstücks und damit eine herabgesetzte Fließfähigkeit besteht, da das Schmiedeteil aufgrund der großen Oberfläche viel Wärme ins Gesenk abgibt, aber aufgrund des geringen Volumens nur wenig Wärme speichern kann. Hier eignet sich eine Temperierung dazu, die Betriebstemperatur trotz der großen Wärmeverluste auf einem konstanten Niveau zu halten.

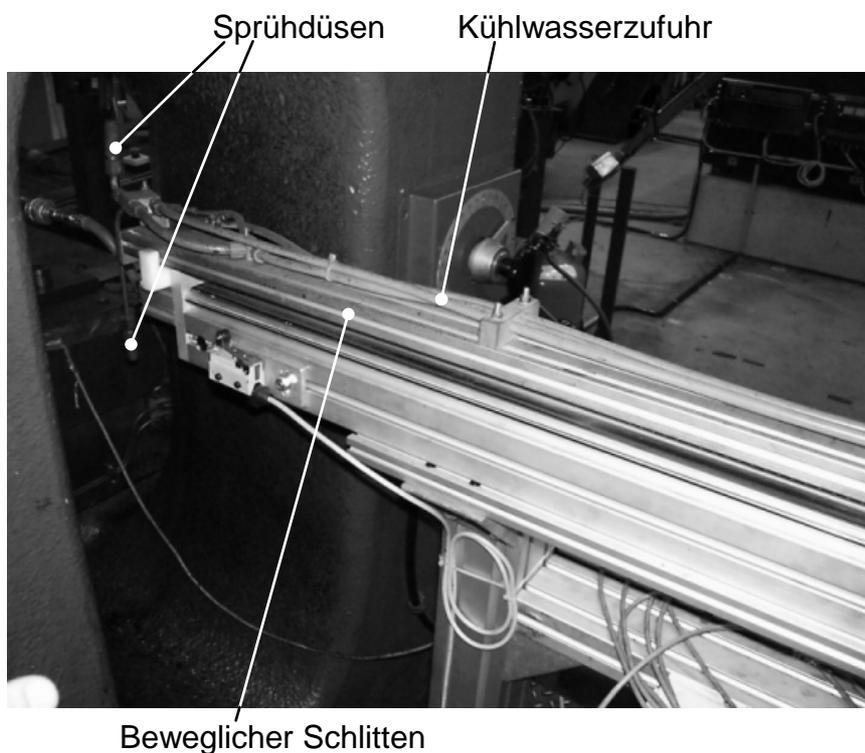
Die Richtwerte für die Gestaltung der Schmiedeteile sowie Seitenschrägen, Kantenrundungen, Bodendicke und Wanddicke sind DIN 7523 Teil 2 entnommen [KLE97]. Als Schmiederohteil wird für beide Geometrien Rundmaterial des Werkstoffs C45 mit einem Durchmesser von 40 mm und einer Länge von 55 mm verwendet.

## 6.2 Auslegung der externen Wärmebeeinflussung

Ausgehend von der Abschätzung der Wärmebilanz in Abschn. 4.3 und den Ergebnissen der thermischen Berechnungen mittels der Finite-Elemente-Methode in Abschn. 4.4 wird im Folgenden die Oberflächensprühkühlung sowie das Temperiersystem ausgelegt.

### 6.2.1 Oberflächensprühkühlung

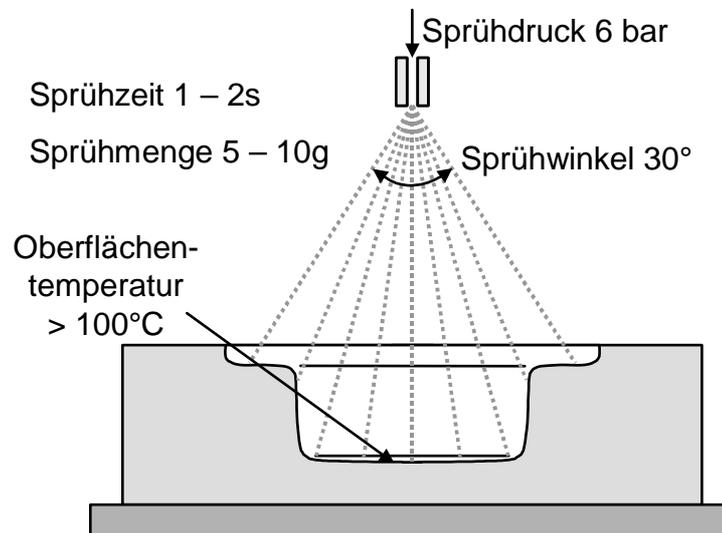
Die Oberflächensprühkühlung (Bild 6-2) ist ein wichtiges Mittel zur Reduzierung der thermischen Belastung in Schmiedewerkzeugen, die durch hohe Temperaturen an der Gravuroberfläche hervorgerufen wird. Hierbei kann dem Werkzeug bei einer genügend großen aufgesprühten Kühlmittelmenge die gesamte während des Umformens eingebrachte Wärmemenge entzogen werden.



*Bild 6-2: Oberflächensprühkühler*

Die Wärme geht dabei durch Erwärmung und Verdampfung vom Werkzeug auf das Kühlmittel über. Zu beachten ist bei einer Oberflächensprühkühlung, dass keine

Kühlmittelreste im Werkzeug bleiben, da sie bei Kontakt mit dem warmen Werkstück verdampfen und aufgrund des ansteigenden Drucks zu einer mangelnden Formfüllung führen würden. Das Niveau der Werkzeugtemperatur sollte aus dem gleichen Grund so gewählt werden, dass es deutlich über dem Siedepunkt des Kühlmittels liegt.



*Bild 6-3: Auslegung der Oberflächensprühkühlung*

Für die Auslegung der Oberflächensprühkühlung (Bild 6-3) bedeutet das, dass die Sprühmittelmenge so dosiert werden muss, dass eine genügend große Kühlwirkung ohne Kühlmittelrückstände ermöglicht wird. Als Kühlmittel wird für den Schmiedeprozess Wasser verwendet. Die Oberflächentemperatur des Werkzeugs muss demnach 100°C übersteigen. Geht man von der Abschätzung der benötigten Kühlenergie in Abschn. 4.3.6 aus, so muss die Oberflächensprühkühlung eine Wassermenge im Bereich von 3 bis 9 g fördern und zerstäuben können. Die Sprühzeit sollte aus Gründen einer kurzen Zykluszeit möglichst klein sein. Sie wird in einem Bereich von 1 bis 2 s gewählt. Bei den Versuchen wird nur mit einer Düsenform und einem gleichbleibenden Sprühdruck gearbeitet. Dies führt zu einer konstanten Sprührate. Der variable Parameter der Oberflächensprühkühlung bei den Versuchen ist die aufgesprühte Wassermenge. Eine Regelung der Oberflächensprühkühlung wird nicht vorgenommen.

## 6.2.2 Temperierung

Ein Temperiersystem besteht aus den Elementen Verbraucher (Werkzeug), Vor- und Rücklauf, dem Heiz- und Kühlaggregat als Stellglied sowie einer Regeleinrichtung (Bild 6-4). Diese Komponenten müssen zum Erreichen einer optimalen Temperierung aufeinander abgestimmt sein. Für die Auslegung des Temperiersystems sind gemäß Abschn. 4.3.5 die wirksame Oberfläche der Temperierkanäle, der Wärmeübergangskoeffizient des Wärmeträgermediums sowie das Temperaturverhalten des Verbrauchers entscheidend. Dazu muss eine geeignete Regelstrategie sowie ein Regler gewählt werden. Zur Anwendung kommt die in Abschn. 5.3.4 beschriebene Kaskadenregelung

mit einem PID-Hauptregler und einem PD-Hilfsregler. Das eingesetzte Regelsystem RT45 der Firma Regloplas entspricht dabei den Anforderungen der Temperierung von Schmiedewerkzeugen.

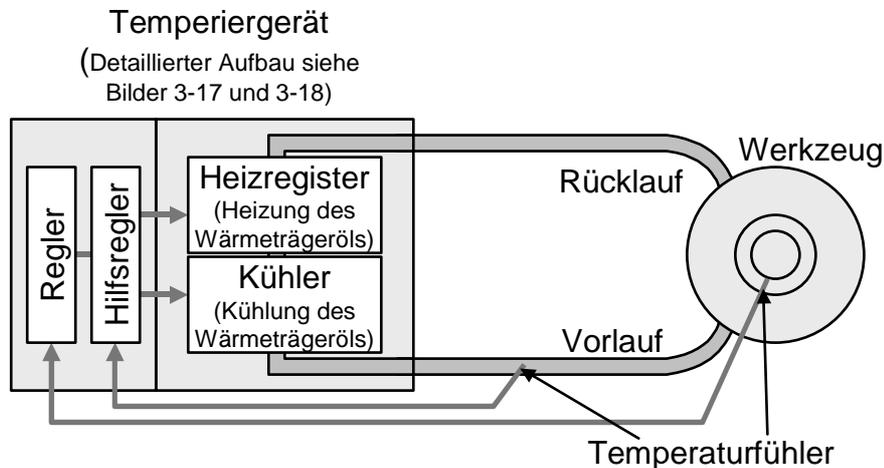


Bild 6-4: Aufbau des Temperiersystems (geregelt Heizen und Kühlen)

Da im Inneren der Werkzeuge Temperaturen über 200°C erreicht werden, ist der Einsatz von Wasser als Temperiermedium aufgrund des hohen benötigten Drucks nicht mehr sinnvoll. Zum Einsatz kommen in diesem Temperaturbereich Wärmeträgeröle. Für die Versuche wurde das synthetische Öl Dibenzyltoluol eingesetzt, dessen Betrieb bis 350°C möglich ist. Der Wärmeübergangskoeffizient ist im Verhältnis zu Wasser etwa um den Faktor zwei kleiner (s. Abschn. 4.3.5). Aus diesem Grund müssen die Temperierkanäle entsprechend groß ausgelegt werden, um einen guten Wärmeübergang zu gewährleisten.

Bei einer abzuführenden Temperierleistung  $P_T$  von 1,8 bis 2,8 kW (s. Abschn. 4.3.5) berechnet sich die minimal benötigte Fördermenge  $\dot{V}$  der Pumpe des Temperiergerätes folgendermaßen [GOR97]:

$$\dot{V} = \frac{P_T}{c_w \cdot \rho_w \cdot (T_V - T_R)} \quad (6-1)$$

Hierbei stellt  $c_w$  die spezifische Wärmekapazität  $\rho_w$  die Dichte des Wärmeträgers,  $T_V$  die Vorlauftemperatur und  $T_R$  die Rücklauftemperatur dar. Der Temperaturunterschied zwischen Vorlauf und Rücklauf stellt einen Kompromiss zwischen einer homogenen Temperierung und einer wirtschaftlichen Auslegung der Pumpenleistung dar. Bei einem Temperaturunterschied von 5°C beträgt die maximale Pumpenleistung etwa 18 l/min.

Die Strömungsgeschwindigkeit

$$v = \frac{\dot{V}}{A} \quad (6-2)$$

des Wärmeträgers im Temperierkanal belüftet sich bei einem Durchmesser von 10 mm auf etwa 3,9 m/s, bei 16 mm auf etwa 1,5 m/s. Eine hohe Strömungsgeschwindigkeit zieht zwar einen hohen Druckabfall  $\Delta p$  nach sich, der einer Pumpe mit entsprechendem Förderdruck bedarf, führt aber insbesondere bei Wärmeträgeröl aufgrund zunehmender Turbulenz zu einem verbesserten Wärmeübergangskoeffizienten. Der Druckabfall bei einer 5 m langen und 10 mm dicken Temperierleitung (Vor-, Rücklauf zur Presse und Temperierkanäle) beträgt bei einem Volumenstrom von 18 l/min etwa 4 bar [GOR97]. Da bei Pumpen meist die Förderhöhe

$$h_T = \frac{\Delta p}{\rho_w \cdot g} \quad (6-3)$$

angegeben wird, muss der Druckabfall umgerechnet werden.  $g$  stellt die Erdbeschleunigung mit  $9,81 \text{ m/s}^2$  dar. 4 bar entspricht etwa einer Förderhöhe von 41 m.

Für die Auswahl eines Temperiergerätes sind mit dem Temperaturbereich, der Leistung und dem Förderdruck die entscheidenden Größen bestimmt. Das Gerät 300 DG der Firma Regloplas erfüllt mit einer maximalen Fördermenge von 60 l/min und einer maximalen Förderhöhe von 65 m die Anforderungen an die Pumpenleistung. Des Weiteren ist das Gerät bis zu einer maximalen Vorlauftemperatur von  $300^\circ\text{C}$  einsetzbar. Da bei den Versuchen sowohl das Untergesenk als auch das Obergesenk temperiert werden sollen, wird ein Zweikreisgerät gewählt.

### 6.3 Auslegung der temperierten Gesenke

Ein temperiertes Schmiedewerkzeug hat neben der formgebenden Funktion auch die Funktion eines Wärmetauschers. Für die Auslegung der Gesenke muss daher sowohl das Formfüllungsverhalten des Schmiedematerials als auch der Wärmeaustausch durch die Temperierkanäle berücksichtigt werden. Als Werkzeugwerkstoff wird der Stahl 1.2365 (32CrMoV12-28) mit einer Härte von HRC 55 gewählt.

Da die Formgebung die primäre Funktion des Schmiedewerkzeugs ist, wird zuerst die Gravur, die Gesenkteilung sowie das Rohteil ausgelegt. Am Beispiel der Napfgeometrie soll dies im Folgenden beschrieben werden. Da es sich um ein rotationssymmetrisches Schmiedeteil handelt, soll als Rohteil ein Stangenabschnitt eines Rundstahls verwendet werden. Die Abmessungen werden gemäß des Volumens des fertigen Schmiedeteils zusätzlich eines Gratanteils vorgegeben. Der Durchmesser des Rohteils richtet sich hierbei nach einer sinnvollen Einlegemöglichkeit im Gesenk. Das Werkzeug wird so in der Presse orientiert, dass der Gesenkeinsatz mit dem Dorn für die Kavität des Napfes am Stößel angebracht wird. Der Durchmesser des Rohteils entspricht etwa der ebenen Auflagefläche im Untergesenk und beträgt 40 mm, die resultierende Höhe 55 mm. Die

Gesenkteilung sowie die Gratbahn befinden sich am größten Durchmesser des Schmiedeteils.

Die Überprüfung des Materialflusses und des Formfüllungsverhaltens wird mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode durchgeführt (Bild 6-5). Als Hilfe für die Entnahme des fertigen Schmiedeteils soll ein Auswerfer integriert werden.

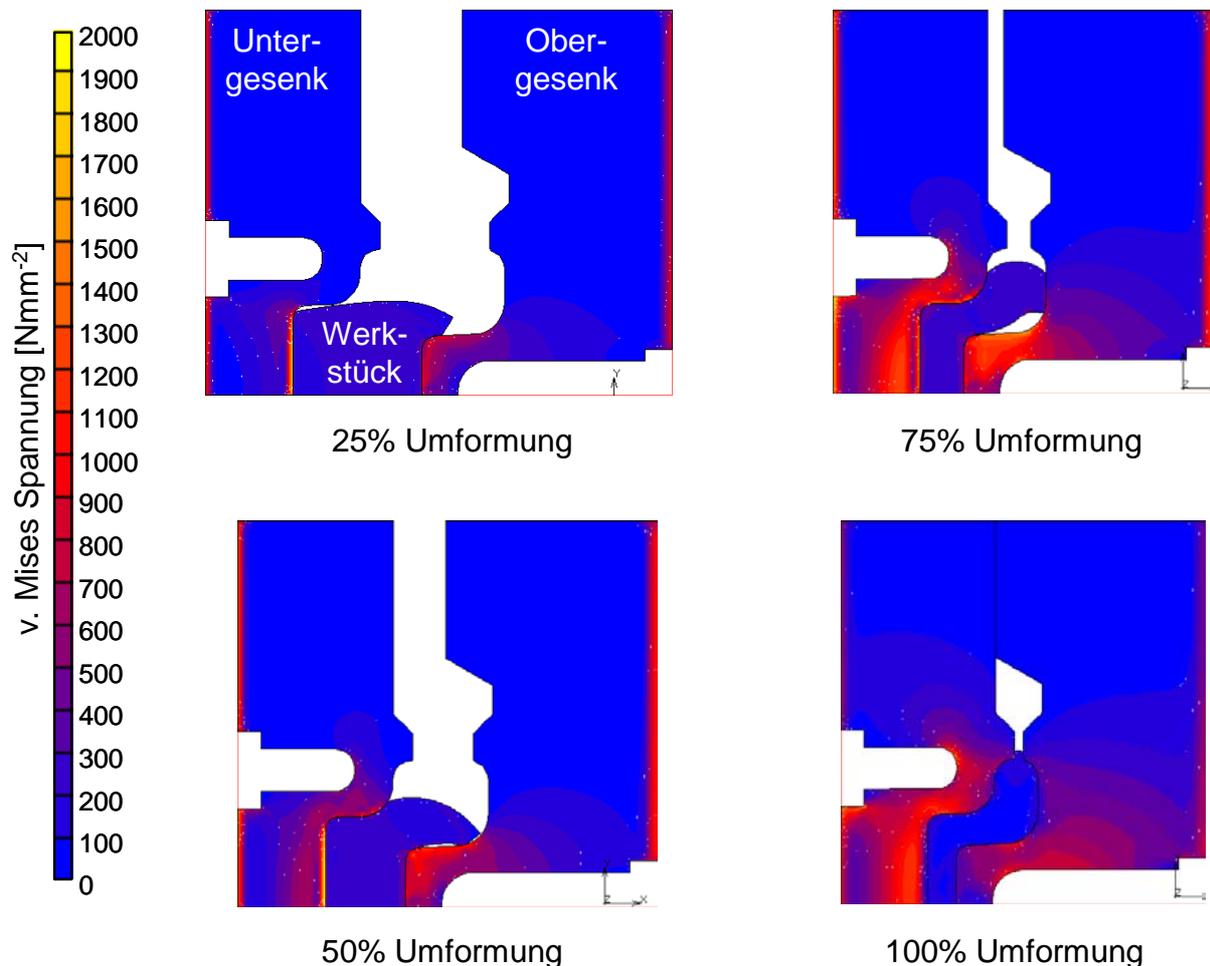


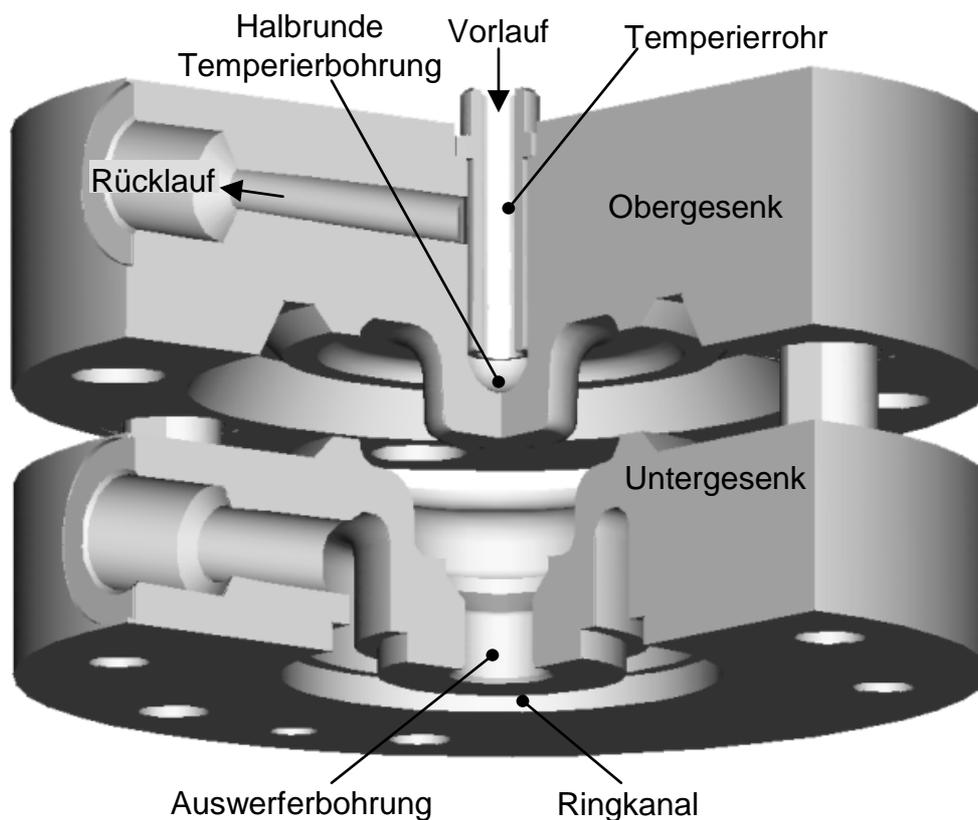
Bild 6-5: Materialfluss bei der Umformung des Napfes (Ausschnitt um  $90^\circ$  gedreht)

Die Festlegung der Kanäle, die die Temperierfunktionalität des Werkzeugs darstellen, richtet sich zum einen nach den Anforderungen an die Temperierleistung (s. Abschn. 6.2.2) und zum anderen nach der nötigen Stabilität des Werkzeugs. Die Größe der Temperierkanäle stellt, wie beschrieben, einen Kompromiss zwischen der Temperierleistung und der Festigkeit des Werkzeugs dar. Eine Auslegung hierfür erfolgt iterativ.

Nach der groben Abschätzung der benötigten Temperierleistung in Abschn. 4.3.6 stellen die Oberfläche und die Lage der Temperierkanäle aufgrund des bereits feststehenden Wärmeübergangskoeffizienten die Variationsparameter dar. Aufgrund der

Festigkeit und der thermischen Schwankungsbreite (die Maximaltemperaturen des Wärmeträgers dürfen nicht überschritten werden) wird ein Mindestabstand der Temperierkanäle von der Gravur von 5 mm festgelegt.

Wie in Abschn. 5.4.2 beschrieben eignen sich unterschiedliche Kanalgeometrien zur Temperierung der Gesenke. Um für die rotationssymmetrischen Schmiedeteile eine möglichst homogene Temperaturverteilung zu ermöglichen, wird für den Gesenkorn die Variante des Temperierrohres und für die Gesenkkavität die Variante des Ringkanals gewählt (Bild 6-6).



*Bild 6-6: Napfwerkzeug mit Temperierkanälen zur geregelten Heizung und Kühlung*

Diese Varianten zeichnen sich durch den bestmöglichen Temperiereffekt aus, stellen jedoch eine nicht zu vernachlässigende Schwächung des Gesenks dar. Es muss aus diesem Grund vorzeitig geprüft werden, inwieweit die Schwächung des Gesenkeinsatzes zu einem kritischen Belastungszustand führt. Ein geeignetes Hilfsmittel hierfür stellt die Simulation der Belastung mittels der Finite-Elemente-Methode dar.

Nach der Festlegung der Gestalt der Temperierkanäle muss deren Größe definiert werden. Da eine Anpassung der Kanäle an das Temperiergerät erfolgen sollte, wird für deren Größe sowohl für das Obergesenk als auch für das Untergesenk unter Berücksichtigung der bisherigen Randbedingungen das Maximum gewählt. Das bedeutet für

das Untergesenk, dass der Querschnitt des Ringkanals dem Auslassquerschnitt des Temperiergerätes von 16 mm entspricht.

Für das Obergesenk ist der Abstand des Temperierkanals von der Gravur entscheidend. Der Innendurchmesser des Temperierrohrs wird aus diesem Grund mit 10 mm festgelegt, was bei einer Wanddicke von etwa 2 mm bei gleichem Vorlauf- und Rücklaufquerschnitt einer Temperierbohrung von 18 mm entspricht.

Nach der Konstruktion der Temperierkanäle muss zur Überprüfung der maximalen Belastung des Werkzeugs eine FEM-Simulation (Bild 6-7) durchgeführt werden. Die berechnete maximale Vergleichsspannung nach von Mises liegt hierbei unter  $\sigma_{vM} = 1500 \text{ N/mm}^2$ . Dieser Wert liegt etwas unterhalb der Belastungsgrenze des verwendeten Werkzeugsstahls 1.2365 von  $\sigma_{max} = 1700 \text{ N/mm}^2$ , stellt aber schon eine Grenzbelastung dar.

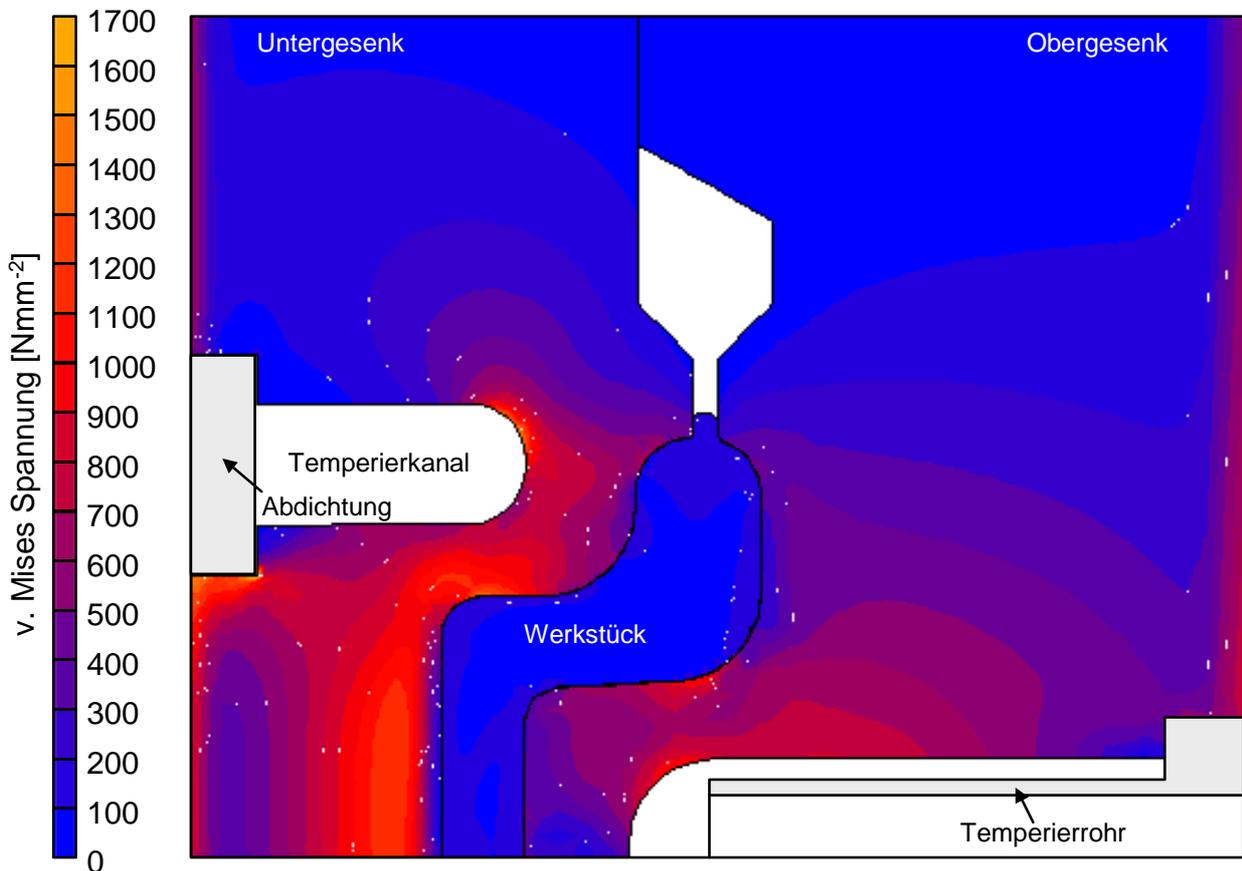


Bild 6-7: FEM-Simulation des Werkzeugs mit Temperierkanälen (Spannung nach v. Mises / Ausschnitt um 90° gedreht)

Neben den Gesenken muss ein temperiertes Schmiedewerkzeug auch aus einem Vor- und Rücklauf für das Temperiermedium sowie den nötigen Modulen zur Befestigung der Gesenke und Abdichtung der Kanäle bestehen.

## 6.4 Modularer Werkzeugaufbau

Der in Bild 6-8 dargestellte modulare Gesenktaufbau ermöglicht die Erfüllung der Randbedingungen bezüglich der Temperierung (s. Abschn. 6.3) und stellt gleichzeitig eine hohe Flexibilität beim Versuchsaufbau dar.

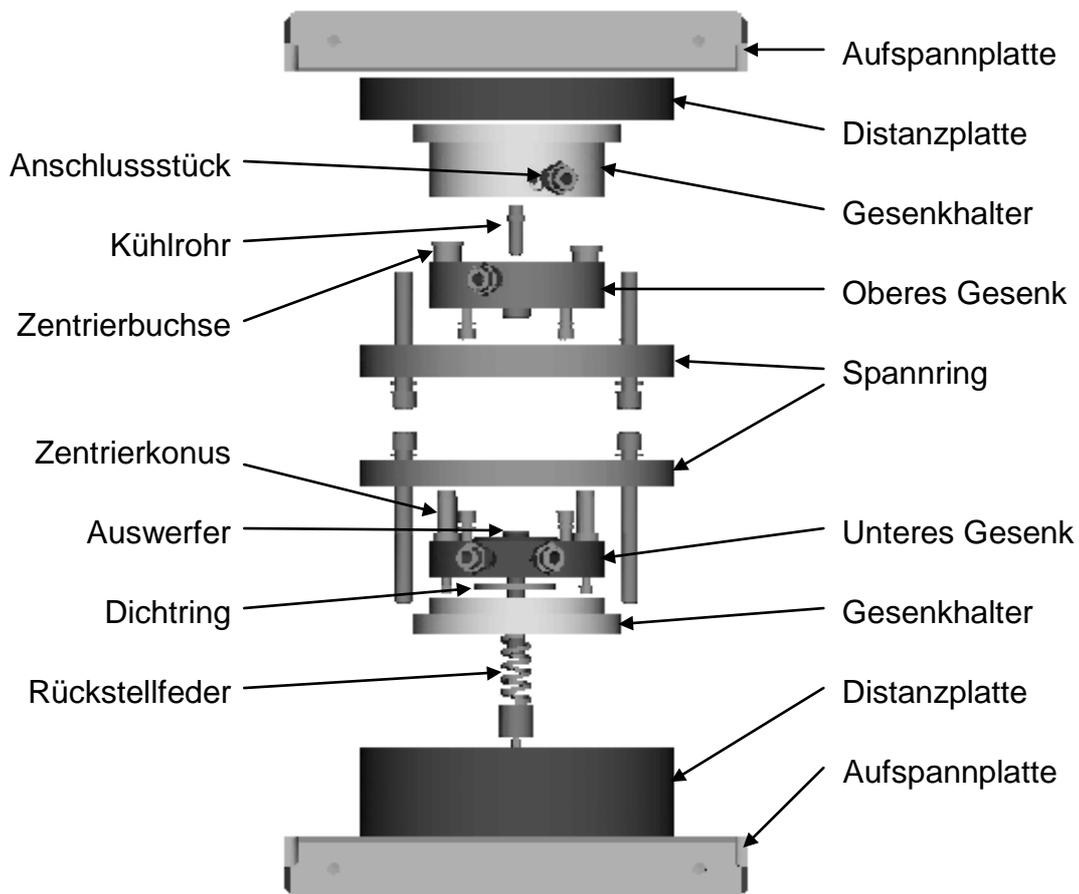
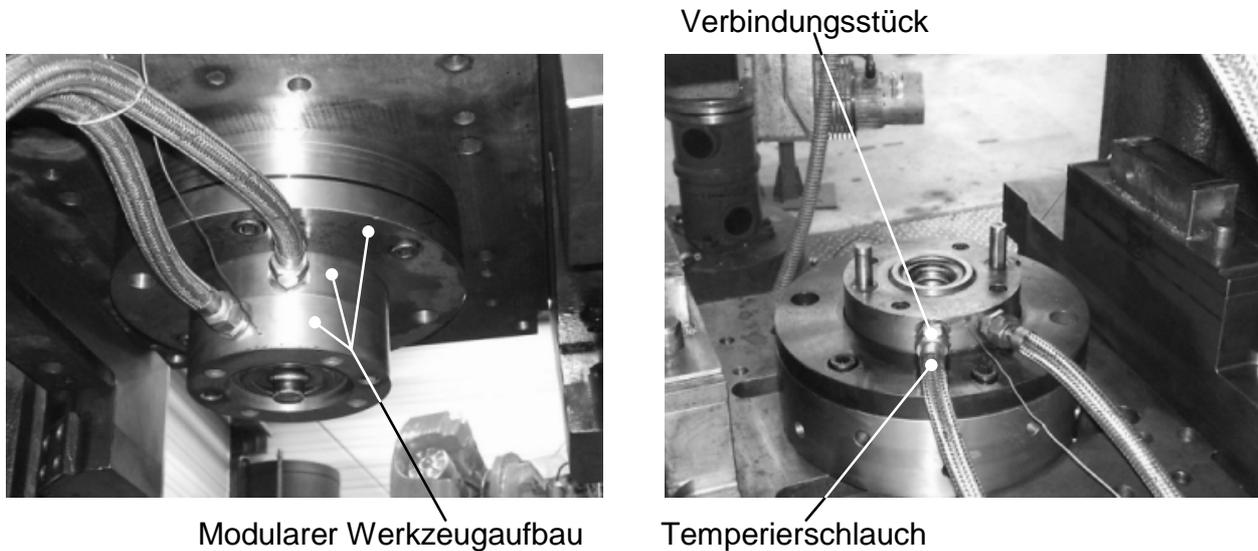


Bild 6-8: Explosionszeichnung des Napfwerkzeugs

Die Verwendung nach hinten geöffneter, gefräster Temperierkanäle erfordert aufgrund der begrenzten sinnvollen Höhe aus fertigungs- und temperiertechnischen Gründen (begrenzter Querschnitt der Kanäle) die Teilung des Gesenkblocks in den formgebenden Teil des Gesenks und den Gesenkhalter. Da die Schmiedelinie mit einem Werkzeugschnellwechselsystem ausgerüstet ist, wird das Werkzeug nicht direkt in der Presse montiert, sondern auf einer Aufspannplatte. Zur Vorgabe der Arbeitshöhe müssen Distanzplatten zwischen dem Gesenk und der Aufspannplatte vorgesehen werden. Dieser Aufbau ist in Bild 6-9 zu sehen.

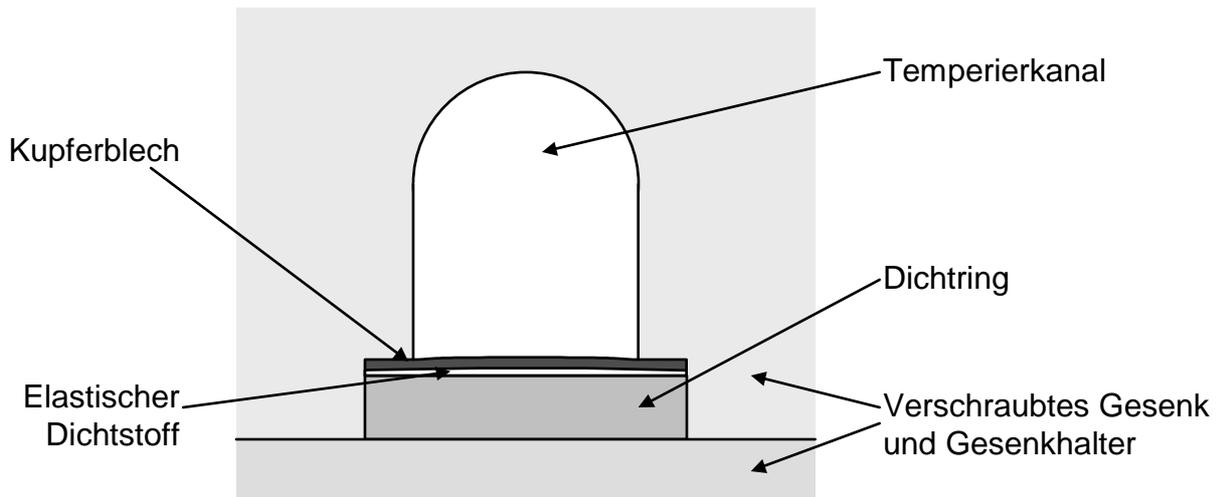
Im Rahmen der Temperierfunktionalität werden zusätzliche Module benötigt. Aufgrund des bewegten Oberwerkzeugs müssen Vor- und Rücklauf des Temperiermediums flexibel ausgelegt werden. Hierfür eignen sich Schlauchverbindungen. Da die Temperatur des Wärmeträgeröls bis zu 350°C betragen kann, muss aus Gründen der Arbeitssicherheit eine Rissicherheit sowie eine Isolation der Schläuche gegeben sein. Diese

Forderungen erfüllen isolierte, stahlummantelte Schläuche. Die Verbindung der Schläuche mit dem Werkzeug wird mit selbstdichtenden Verbindungsstücken realisiert.



*Bild 6-9: Temperiertes Napfwerkzeug (links Obergesenk, rechts Untergesenk)*

Die Abdichtung der Temperierkanäle erfolgt mittels eines Dichtrings, der einen elastischen Dichtstoff sowie ein Kupferblech an das Gesenk drückt (Bild 6-10). Die Elastizität der Dichtung ist beim Schmieden von großer Bedeutung, da sowohl eine thermische als auch eine mechanische Wechselbelastung entlang der abzudichtenden Fläche auftreten. Eine reine Kupferdichtung wird auf Dauer soweit verformt, dass Leckagen auftreten.



*Bild 6-10: Abdichtung der Temperierkanäle*

Als Dichtstoff wurde Therm-Paper, ein anorganisches papierähnliches Produkt mit hoher Hitzebeständigkeit, guten Isoliereigenschaften und beständigen physikalischen Eigenschaften verwendet. Der Faserwerkstoff wird hierfür von einer Dicke von 2 mm

auf etwa 1 mm zusammengedrückt und behält seine elastischen Eigenschaften trotz der hohen Wechselbelastung bei. Das Kupferblech zwischen dem Therm-Paper dichtet den Temperierkanal gegen Leckage ab.

## 7 Anwendung und Ergebnisse der Temperierung

Die Temperatur im Werkzeug kann auf verschiedene Weise beeinflusst werden. Wie in Abschn. 5.1 beschrieben, eignet sich eine Oberflächensprühkühlung zur Reduzierung der Oberflächentemperatur und eine Temperierung zur Einstellung und Regelung der Werkzeugtemperatur. An zwei Beispielgeometrien, einem Napf und einem Zapfen, wird das in Kap. 6 beschriebene Konzept der Temperierung verifiziert.

### 7.1 Planung der Versuche

Die werkzeug- und systemgebundenen Parameter wie die geometrischen Abmessungen der Gravur und der Temperierkanäle, die Sprühcharakteristik des Kühlschmierers, die Eigenschaften des Wärmeträgermediums sowie die maximale Heiz- und Kühlleistung des Temperiergerätes wurden bereits in Kap. 6 festgelegt. Als Prozessparameter sind die Zykluszeit des Umformprozesses, die Soll-Temperatur des Werkzeugs, die Soll-Temperatur des Schmiederohteils, die Kühlleistung der Oberflächensprühkühlung und die Schmierung variierbar. Des Weiteren lassen sich verschiedene Szenarien wie der Prozessverlauf in der Startphase, nach Unterbrechungen und im stationären Zustand untersuchen.

#### Zykluszeit

Zur besseren Vergleichbarkeit wurde die Zykluszeit für alle Versuche auf 1 min festgelegt. In diesem Zeitraum lässt sich durch manuelle Handhabung die für die Versuche notwendige Reproduzierbarkeit hinsichtlich der Handhabungs- und Liegezeiten, der Temperaturen und der Schmierung erzielen. Prinzipiell ist das Vorgehen bei kürzeren Zykluszeiten das Gleiche, nur die Heiz- und Kühlleistung muss entsprechend höher gewählt werden, um die Wärme schneller abzutransportieren.

#### Soll-Temperatur des Werkzeugs

Für die Soll-Temperatur des Werkzeugs, die mit dem Temperiergerät eingestellt werden kann, wurde in der Mehrzahl der Versuche 100°C gewählt. Vergleichsmessungen wurden mit der Temperatur 150°C und 200°C durchgeführt.

#### Soll-Temperatur des Schmiederohteils

Die Soll-Temperatur des Schmiederohteils betrug in allen Versuchen 1200°C, was einem typischen in der industriellen Produktion eingesetzten Wert entspricht.

#### Oberflächensprühkühlung

Die Variationsmöglichkeiten einer Oberflächensprühkühlung sind zum einen die Sprühmenge pro Zeit, die Sprühdauer sowie der Sprühkegel. Der Sprühkegel lässt sich

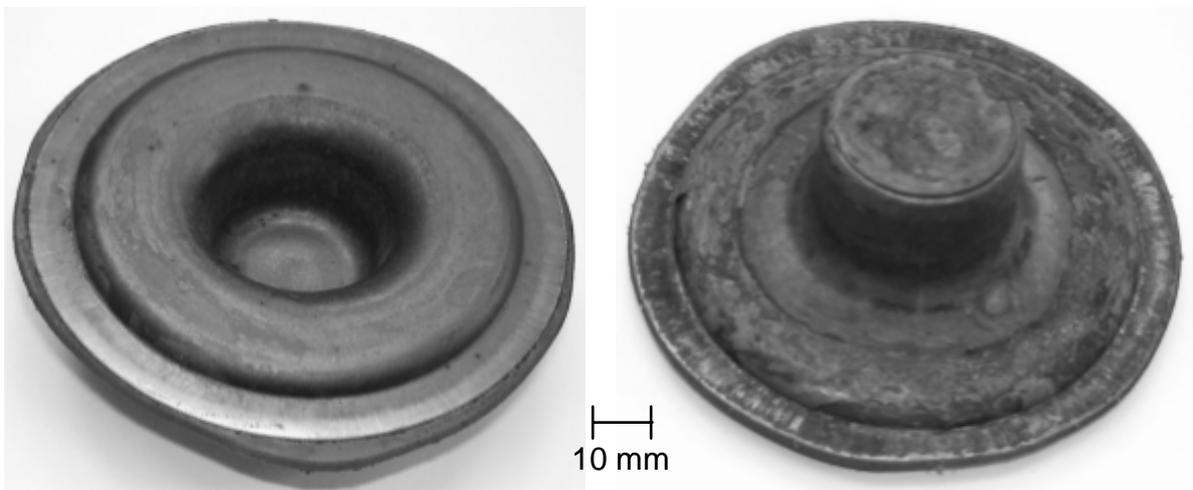
charakterisieren durch seinen Öffnungswinkel sowie den Grad der Zerstäubung, das heißt, die Tropfengröße und -dichte. Da im Wesentlichen die Temperierung und deren Zusammenspiel mit der Oberflächensprühkühlung untersucht werden soll und nicht die Oberflächensprühkühlung selbst, wurde nur die Gesamtwassermenge, die auf der Oberfläche verdampft, variiert. Bei den Versuchen wurde aus diesem Grund nur mit einer Düsenform gearbeitet und die Sprühdauer verändert, wobei die Sprühmenge pro Zeit konstant blieb.

### **Schmierung**

Die Schmierung, die den Schmiedeprozess und damit auch das thermische Verhalten im Werkzeug beeinflusst, wurde bei allen Versuchen konstant gehalten. Um die Temperatur des Werkzeugs möglichst wenig zu beeinflussen, wurde das Schmiermittel (Graphit) mit einem Pinsel auf das Werkzeug aufgetragen, wobei der Wasseranteil sehr gering gehalten wurde. Auf ein Aufsprühen von Schmiermittel wurde aus Gründen der Trennung von Oberflächensprühkühlung und Schmierung verzichtet.

## **7.2 Durchführung der Versuche**

Die Versuche wurden beispielhaft an zwei unterschiedlichen Geometrien durchgeführt. Es handelt sich hierbei um einen Napf und einen Zapfen (Bild 7-1).



*Bild 7-1: Geschmiedeter Napf und Zapfen*

Der Versuchsaufbau für die Temperaturmessung und -regelung umfasst Temperaturfühler, Messumformer zur Umwandlung der Signale der Temperaturfühler in EDV-verarbeitbare Signale, einen Mess- und Auswertecomputer sowie eine Visualisierung und Sicherung der Messdaten. Des Weiteren werden die Signale der Temperaturmessung dem Temperiergerät zur Verfügung gestellt (Bild 7-2).

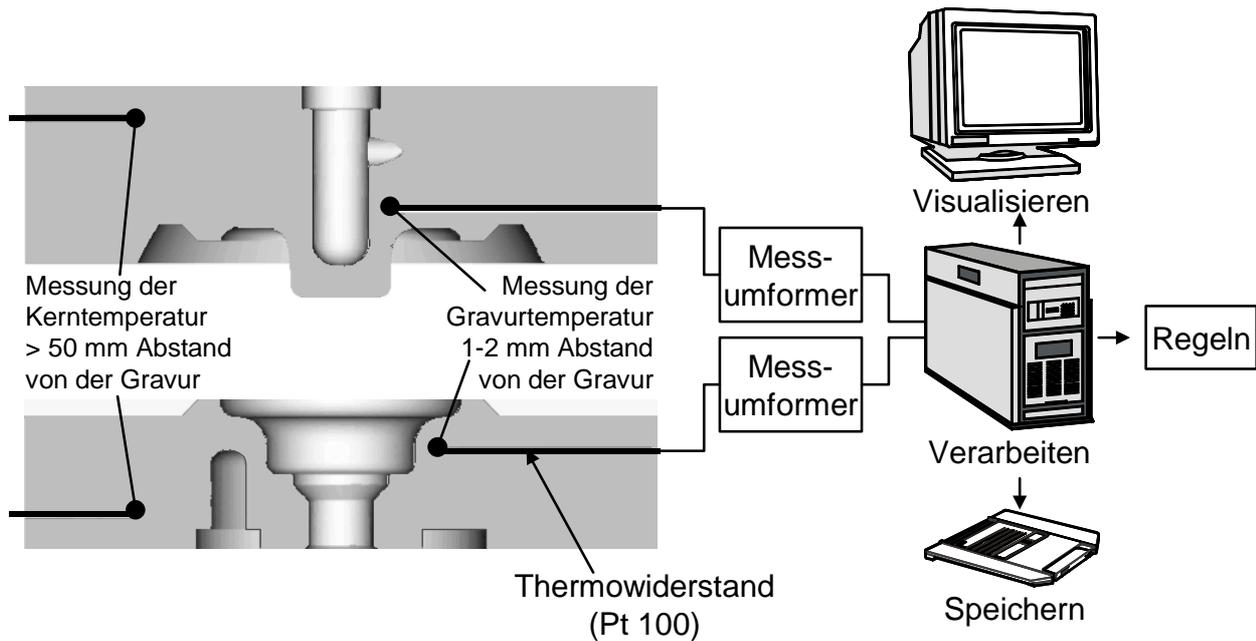


Bild 7-2: Durchführung der Temperaturmessung

Die Temperatur im Werkzeug wurde mit Pt 100 Thermowiderständen gemessen, wobei im Oberwerkzeug und im Unterwerkzeug je ein Temperaturfühler nahe der Gravur und im Kern des Gesenks angebracht wurden. Die gemessenen Temperaturen sind die Kerntemperatur, die der Prozessüberwachung dient, sowie die Gravurtemperatur etwa ein bis zwei Millimeter unterhalb der Oberfläche, die neben einer Prozessüberwachung als Eingang für die Temperaturregelung durch das Temperiergerät herangezogen wird.

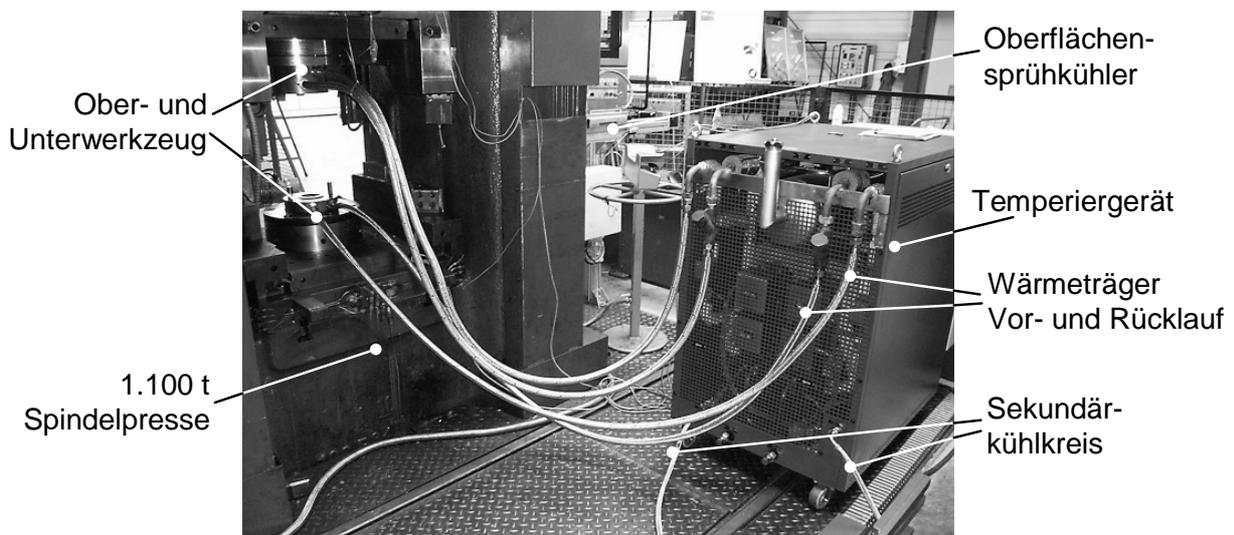


Bild 7-3: Aufbau des Versuchsstandes

Für die Versuche standen eine 1.100 t Spindelpresse, ein Kammerofen zur Erwärmung der Rohteile, ein Zweikreistemperiergerät zur Regelung der Temperaturen des Ober- und des Unterwerkzeugs sowie eine Oberflächensprühkühlvorrichtung zur Verfügung

(Bild 7-3). Die Handhabung der Schmiedeteile sowie die Schmierung wurden manuell durchgeführt.

Experimentell wurden verschiedene Szenarien, die in der realen Produktion auftreten, mit und ohne Temperaturbeeinflussung untersucht. Im Folgenden wird nur eine Auswahl der Ergebnisse der durchgeführten Versuche beschrieben, die für den vollständigen Nachweis der Erreichung der Ziele ausreichend sind (Bild 7-4). Verschiedene Vorlauftemperaturen des Wärmeträgers sowie die Variation der Geometrie bestätigen die beschriebenen Ergebnisse, führen aber zu keinen neuen Erkenntnissen.

	Ohne Temperierung	Mit Temperierung
Stationärer Betrieb	Kap. 7.4	
Startphase		
Keine Oberflächensprühkühlung	Kap. 7.5.1	Kap. 7.5.2
Oberflächensprühkühlung 5 g	Kap. 7.7.1	
Oberflächensprühkühlung 10 g	Kap. 7.7.1	Kap. 7.7.2
Unterbrechungsphase	Kap. 7.8.1	Kap. 7.8.2

*Bild 7-4: Versuche zur Untersuchung der Einflüsse einer Temperaturbeeinflussung*

Als Ergebnisse sind sowohl der Temperaturverlauf eines Zyklus als auch das Temperaturtrendverhalten über mehrere Zyklen interessant. In den folgenden Abschnitten werden die relevanten Ergebnisse vorgestellt.

### 7.3 Temperaturverlauf während eines Umformzyklus

Betrachtet man das thermische Verhalten des Schmiedewerkzeugs, so sind zwei Zeitskalen von Bedeutung. Die kurze Zeitskala zeigt den Temperaturverlauf während eines Zyklus, während die lange Zeitskala den Trend der Durchschnittstemperatur über mehrere Zyklen widerspiegelt.

Der zeitliche Verlauf der Temperatur während eines Umformzyklus ist in Bild 7-5 am Beispiel der Umformung des Napfes dargestellt. Aufgrund der Messungenauigkeit ist die Kurve nicht glatt sondern sehr kurzfristigen Schwankungen unterworfen. Die vier Phasen, die in Abschn. 4.2 beschrieben wurden, lassen sich in der Abbildung erkennen. Beim Ober- und Untergesenk wurden jeweils die Gravur- und die Kerntemperatur gemessen. Als Gravurtemperatur wird in den Versuchen der einfacheren Beschreibung wegen diejenige Temperatur bezeichnet, die 1 bis 2 mm unterhalb der Gravuroberfläche gemessen wird. Die Gravurtemperatur weicht von der Oberflächentemperatur in

der Gravur deutlich ab. Die Kerntemperatur liegt ebenfalls deutlich unter der Gravurtemperatur und weist auf einen starken Temperaturgradienten im Werkzeug hin.

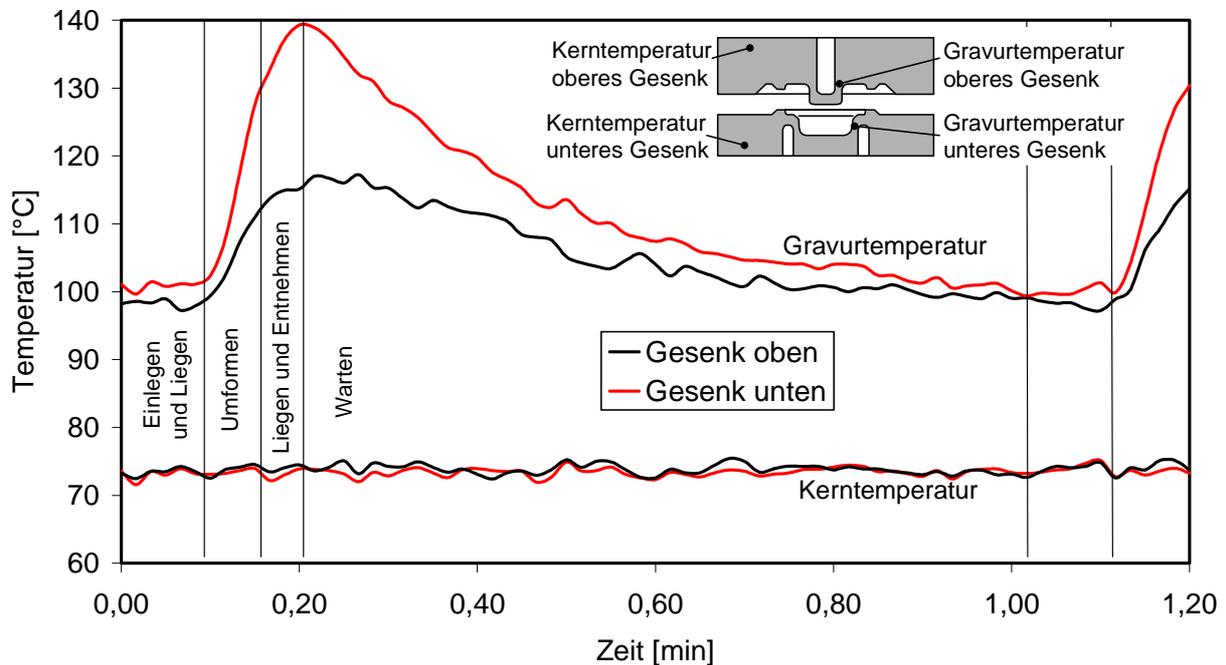


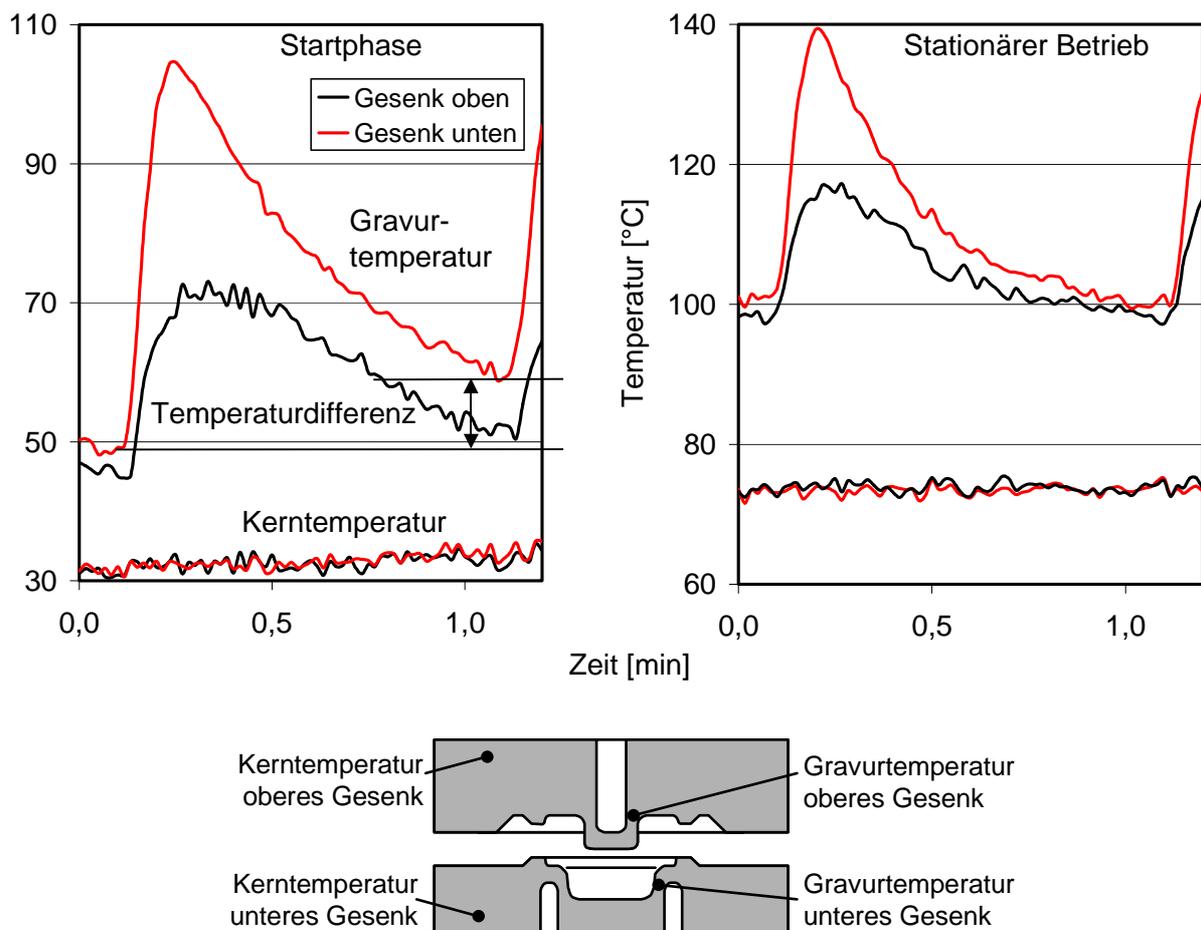
Bild 7-5: Temperaturverlauf des Zyklus eines Umformvorganges beim Napf

Beim Kontakt des Werkstücks mit dem Werkzeug tritt eine Erhöhung der Temperatur im Untergesenk auf. Die übertragene Wärmemenge ist hierbei aber aufgrund der geringen Kontaktfläche des Rohteils mit dem Werkzeug und des geringen Drucks – es wirkt nur die Gewichtskraft – niedrig. Beim Umformvorgang steigt die Werkzeugtemperatur wegen der großen Druckberührung rapide an. Der Temperaturgradient zwischen der Gravur und dem Gesenkkern vergrößert sich.

Nach der Umformung ist am Temperaturfühler noch ein Temperaturanstieg zu erkennen, der durch Wärmeleitung von der Gravuroberfläche zustande kommt. Zusätzlich wird im Untergesenk durch das Liegen bis zur Entnahme auch nach der Umformung vom Werkstück noch Wärme an das Werkzeug abgegeben. Während der Wartezeit auf das nächste Schmiederohteil kühlt das Gesenk ab, wobei sich der Temperaturgradient zwischen Gravur und Gesenkkern wieder verringert.

Dass der Temperaturanstieg beim Untergesenk größer als beim Obergesenk ausfällt, hat zwei Gründe. Zum einen ist das Untergesenk längere Zeit mit dem Werkstück in Kontakt, während das Obergesenk nur während der Druckberührung Wärme aufnimmt. Zum anderen legt sich das Material in der Nähe des Temperaturfühlers am Obergesenk relativ spät an, während es in der Nähe des Temperaturfühlers am Untergesenk sehr früh Kontakt hat (s. Materialfluss Bild 6-5).

Der Temperaturgradient im Werkzeug resultiert aus dem thermischen Ungleichgewicht, das aufgrund der zeitlich veränderlichen Wärmeströme, die durch Kontakt mit dem Werkstück und durch Wärmeverluste entstehen (s. Abschn. 4.1), auftritt. Der Temperaturverlauf eines Zyklus ist abhängig vom bestehenden Temperaturprofil des Werkzeugs und somit von der Historie der Wärmeströme. Zur Verdeutlichung der Unterschiede ist in Bild 7-6 links ein Zyklus während der Startphase abgebildet, bei dem eine Temperaturdifferenz zwischen Anfang und Ende des Zyklus auftritt, und rechts ein Zyklus während des stationären Betriebs, bei dem das Temperaturniveau erhalten bleibt.

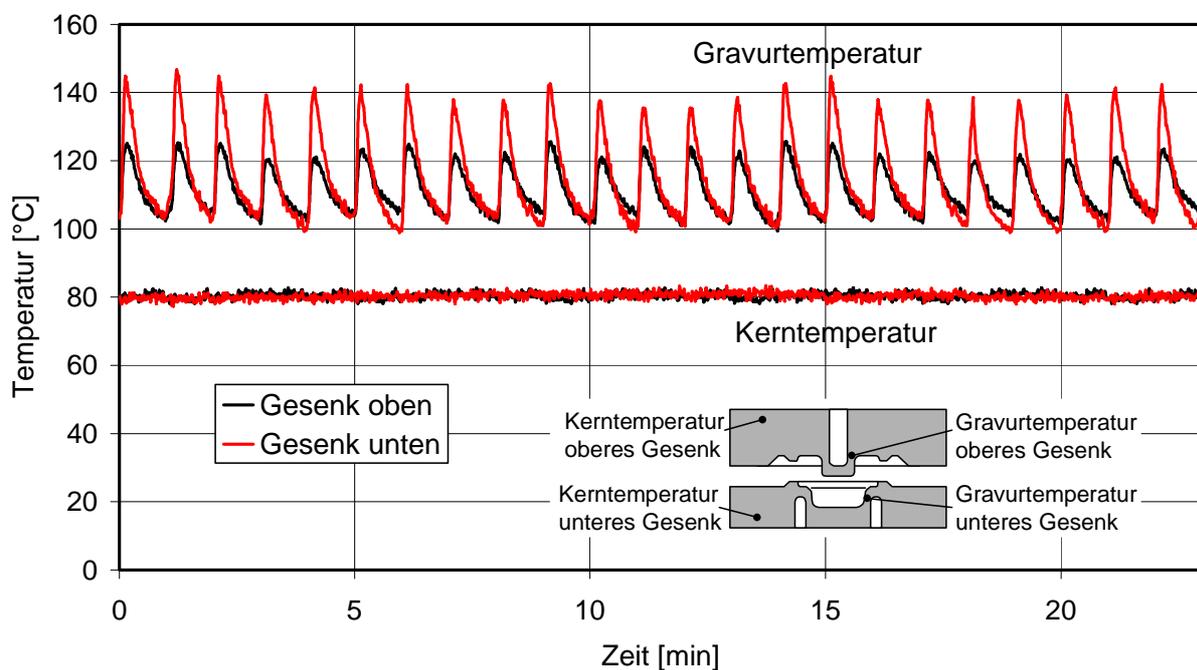


*Bild 7-6: Temperaturverläufe der Zyklen während der Startphase und im stationären Betrieb beim Napf*

Das oben beschriebene Trendverhalten der Temperatur kann nur bei der Betrachtung mehrerer Umformzyklen verfolgt werden. Die Ergebnisse in den folgenden Abschnitten sind bei der Umformung des Napfes entstanden. Auf die geometriebedingten Unterschiede wird in Abschn. 7.10 eingegangen.

## 7.4 Referenztemperaturverlauf im stationären Betrieb

Um die Auswirkungen einer Temperaturbeeinflussung auf Schmiedewerkzeuge bestimmen zu können, ist es nötig, einen Referenztemperaturverlauf ohne eine externe Temperaturbeeinflussung aufzunehmen und mit beeinflussten Temperaturverläufen zu vergleichen. Für den Referenztemperaturverlauf wird sowohl auf eine Oberflächen-sprühkühlung als auch auf eine Temperierung verzichtet. Zur direkten Vergleichbarkeit beträgt die Zykluszeit wie in den anderen Versuchen 1 min. In Bild 7-7 sind die Temperaturverläufe, die an den in Abschn. 7.2 beschriebenen Stellen im Werkzeug gemessen wurden, im stationären Zustand dargestellt.



*Bild 7-7: Referenztemperaturverlauf im stationären Betrieb ohne Temperierung und ohne Oberflächensprühkühlung*

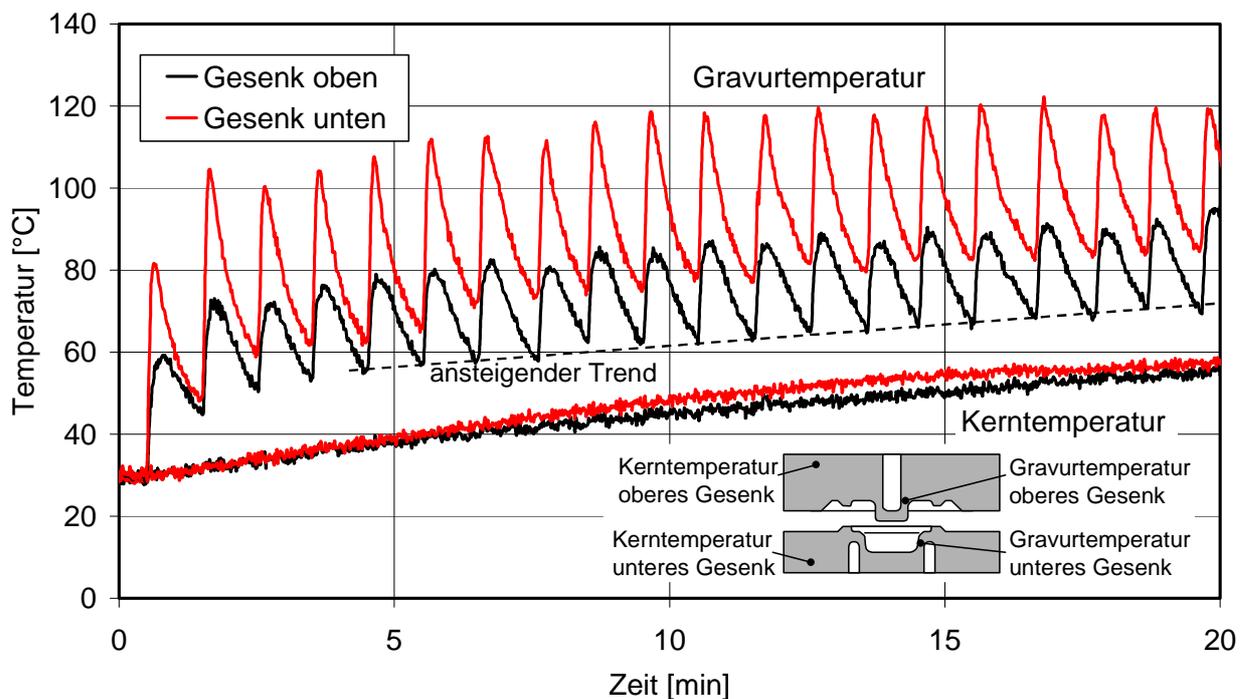
Hierbei ist zu erkennen, dass die Mittelwerte der Gravurtemperatur sowie der Kerntemperatur über die gesamte Versuchsdauer konstant bleiben. Von einem Zyklus zum nächsten treten allerdings kleine Schwankungen auf, die bei der Gravurtemperatur unter 10°C betragen. Sie sind aufgrund der manuellen Handhabung und der Erwärmung in einem Kammerofen auf Abweichungen der Zykluszeit, der Liegezeiten im Gesenk, der Rohteiltemperatur und -verzunderung sowie der Schmierung zurückzuführen. Der Teiledurchmesser (Messpunkt s. Bild 7-9) beträgt im stationären Betrieb 74,75 mm bei einer Schwankungsbreite von unter 0,1 mm (Bild 7-12). Nach DIN 7151 [DUB90] entspricht dies einer ISO-Grundtoleranz von IT 9 bis 10. Die Genauigkeit liegt somit am oberen Ende der Spanne des Präzisionsschmiedens. Zum Erreichen einer höheren Genauigkeiten ist es nötig, alle prozessrelevanten Parameter zu kontrollieren und den Prozess zu automatisieren.

## 7.5 Temperaturverlauf in der Startphase

Befindet sich der Schmiedeprozess im stationären Zustand, bedarf es normalerweise nur eines geringen Aufwands, diesen zu halten. Es existieren aber zu Beginn der Schmiedeteilproduktion oder während Unterbrechungen Phasen, in denen sich der Prozess nicht im stationären Zustand befindet. In diesen Phasen kann eine Gutteilproduktion nicht garantiert werden. Das Ziel in der Schmiedeteilproduktion ist es, den stationären Zustand so schnell wie möglich zu erreichen und zu halten.

### 7.5.1 Werkzeug ohne Temperaturbeeinflussung

In der Startphase kommt es beim unbeeinflussten Temperaturverlauf zu großen Abweichungen vom Soll-Zustand. Die Werkzeugausgangstemperatur liegt im Versuch bei etwa 30°C und entspricht einem Werkzeug, das vor Schmiedebeginn in unbeheiztem Zustand vorliegt. In Bild 7-8 ist der zeitliche Verlauf der Temperatur aufgetragen.



*Bild 7-8: Temperaturverlauf während der Startphase ohne Temperierung und ohne Oberflächensprühkühlung*

Wie deutlich zu erkennen ist, wird ein stationärer Bereich sowohl für die Gravurtemperatur als auch für die Kerntemperatur selbst nach 20 Zyklen noch nicht erreicht. Die Korrelation zwischen der Temperatur des Werkzeugs und den Schmiedeteilmaßen aufgrund der thermischen Dehnung des Werkzeugs führt im Falle eines unbeeinflussten Temperaturverlaufs dazu, dass selbst nach den 20 Umformzyklen noch keine reproduzierbare Maßhaltigkeit erreicht wird. Wie in Bild 7-9 dargestellt, ist der Durch-

messer der Schmiedeteile am Ende des Versuchs im Mittel etwa 0,3 mm größer als am Anfang.

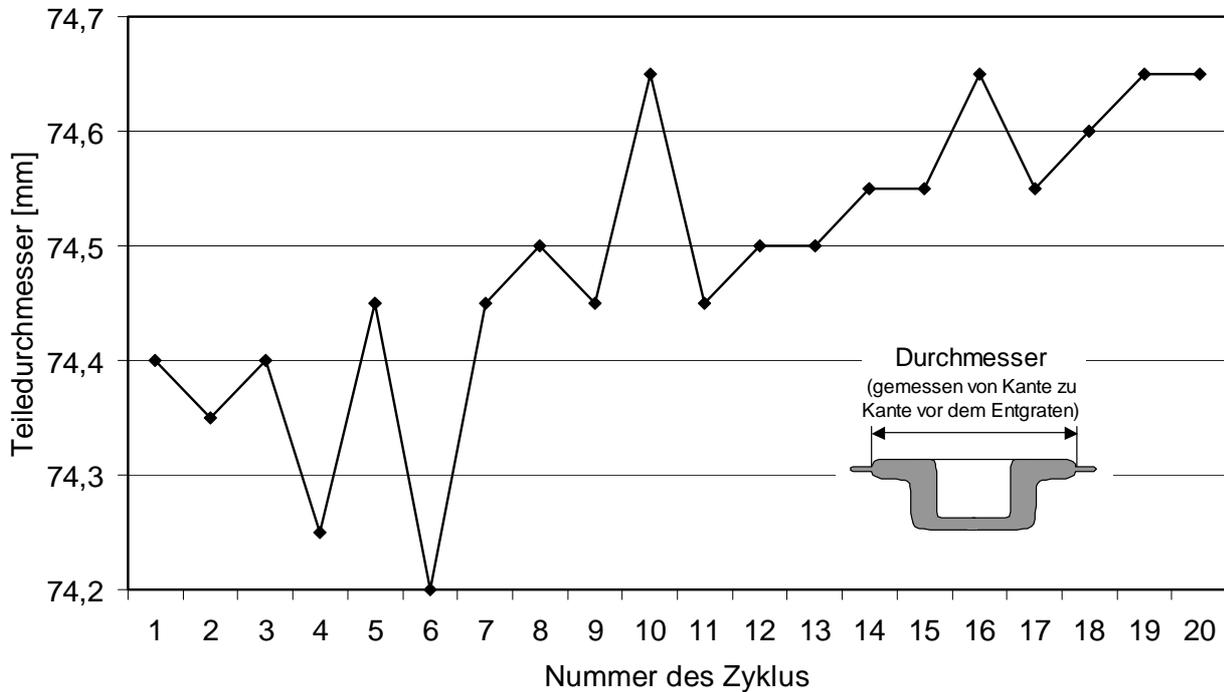


Bild 7-9: Anstieg des Schmiedeteildurchmessers über die Zyklen

Die Schwankungsbreite des Gesamtdurchmesser von 74 bis 75 mm beträgt im Vergleich zum stationären Zustand etwa 0,6 mm. Nach DIN 7151 [DUB90] entspricht dies einer ISO-Grundtoleranz von IT 13 bis 14. Für die Anforderungen an einen konventionellen Schmiedeprozess ist dies ausreichend. Auf der Basis der Toleranzen eines Präzisionsschmiedeprozesses entspricht im vorliegenden Fall keines der 20 Teile den Anforderungen.

Im realen Produktionseinsatz bedeutet dies, dass die Toleranzen der Schmiedeteile entweder so groß gewählt werden müssen, dass alle Schmiedeteile im Soll liegen oder dass die Schmiedeteile vermessen und Schlechteile aussortiert werden müssen. In der Startphase oder nach Unterbrechungen ist es in der Praxis üblich, die ersten Teile nach dem Anfahren bis zu einer bestimmten Nummer direkt als Ausschuss zu deklarieren, um das geometrische Vermessen aller Teile zu vermeiden.

Beim Einsatz einer Prozessdiagnose ist es möglich, in Vorversuchen die Prozessparameter zu bestimmen, die eine Gutteilproduktion garantieren, und die Parameter während der Produktion zu überwachen, um Abweichungen rechtzeitig zu detektieren, den Prozess nachzustellen und so den Ausschuss zu reduzieren. Eine Vermeidung des Ausschusses ist der nächste logische Schritt, der durch eine aktive Beeinflussung der Prozessparameter, wie in den vorangegangenen Abschnitten beschrieben, erreicht werden kann.

## 7.5.2 Werkzeug mit Temperierung

Ein entscheidender Vorteil einer aktiven Temperaturbeeinflussung des Schmiedewerkzeugs ist es, innerhalb weniger Zyklen einen stationären Zustand der Gutteilproduktion zu erreichen. Außerdem lässt sich ein beliebiges Werkzeugtemperaturniveau einstellen. Die beschriebenen Versuche wurden bei einem voreingestellten Grundniveau der Gravurtemperatur von 100°C, gemessen 2 mm unterhalb der Gravuroberfläche, durchgeführt. Niedrigere Temperaturen sind nicht sinnvoll, da bei diesen ein Trocknen des Schmiermittels in der Gravur nicht mehr gewährleistet werden kann. Da das Verhalten bei einem höheren Temperaturniveau analog zu dem bei 100°C ist, werden die Ergebnisse nicht näher beschrieben. Aus der Sicht einer Standmengenoptimierung sind hohe Temperaturniveaus zu vermeiden. Die untere Begrenzung des Temperaturniveaus ist zum einen durch die Notwendigkeit der Trocknung des Schmiermittels und zum anderen durch die Leistung des Temperiergeräts bedingt.

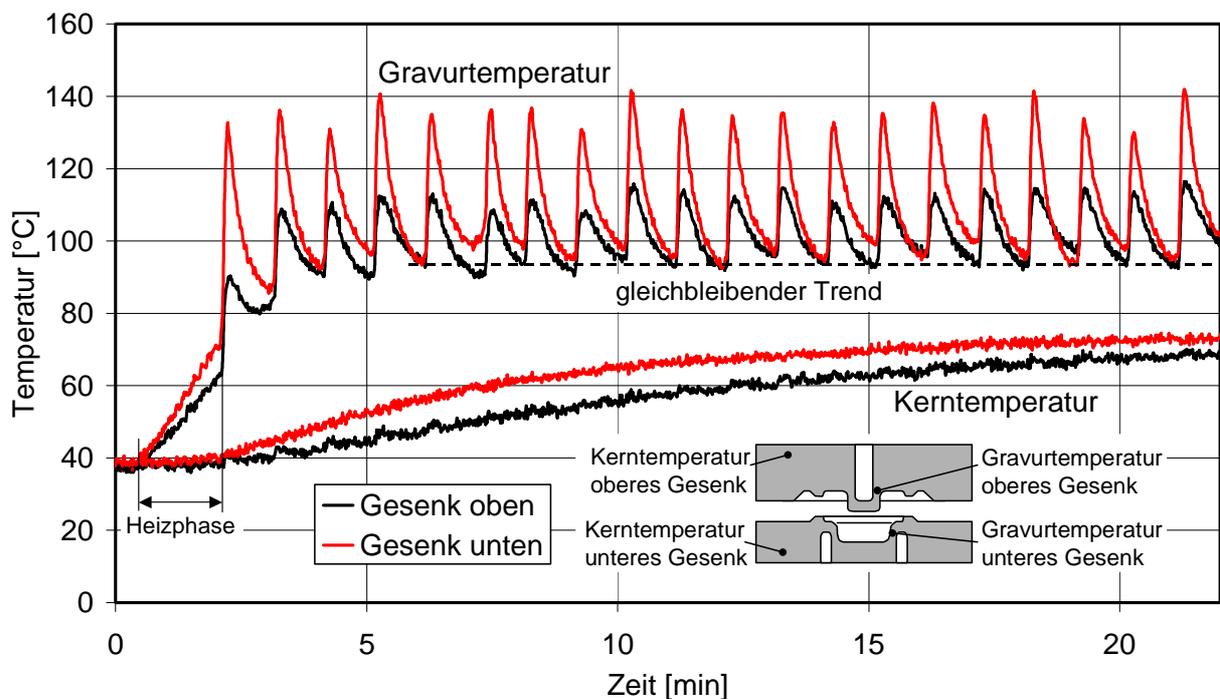


Bild 7-10: Temperaturverlauf während der Startphase mit Temperierung und ohne Oberflächensprühkühlung

Für die Versuche während der Startphase wurde das kalte Werkzeug 2 min mit dem Temperiergerät vorgeheizt. In Bild 7-10 ist der Temperaturverlauf über die Umformzyklen aufgetragen. Hierbei ist zu erkennen, dass die Gravurtemperatur bereits nach drei Zyklen auf einem stationären Niveau verläuft, während die Kerntemperatur bis zum Ende des Versuches ansteigt. Nur ein längeres Aufheizen von etwa 4 min ermöglicht es, mit einer bereits konstanten Gravurtemperatur zu starten. Ein stationärer Zustand mit einer konstanten Kerntemperatur stellt sich selbst nach 10 min noch nicht ein (Bild 7-11). Nach 10 min Vorheizen können allerdings bereits nach dem zweiten Umformzyk-

lus Gutteile hergestellt werden, die den Abweichungen beim stationären Zustand entsprechen.

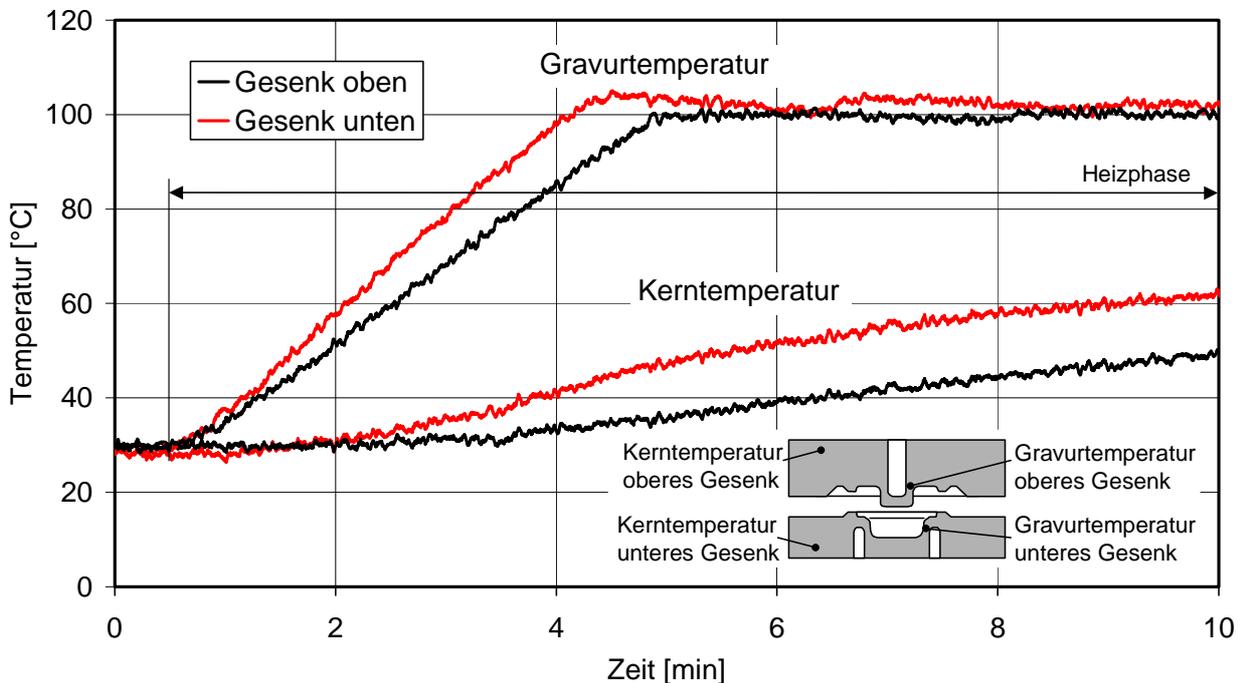


Bild 7-11: Vorheizen der Gesenke mit dem Temperiergerät

In der realen Produktion muss anhand der Kosten erwogen werden, ob eine längere Heizzeit, zusätzliche Heizvorkehrungen oder ein verzögertes Eintreten des stationären Zustandes die bessere Variante darstellt. An zusätzlichen Vorkehrungen für den Heizbetrieb ist ein separates Programm für das Aufheizen des Gesenks möglich, bei dem sowohl die Gravur als auch die Kerntemperatur als Messgröße für den Reglereingang herangezogen werden. Eine weitere Möglichkeit stellt das zusätzliche Heizen durch Heizpatronen dar.

Entscheidend für die Produktion ist hierbei allerdings nicht das Erreichen einer stationären Kerntemperatur. Nur die Maßhaltigkeit der Schmiedeteile kann Aufschluss darüber geben, ab welchem thermischen Zustand eine reproduzierbare Gutteilproduktion eintritt.

## 7.6 Maßhaltigkeit der Schmiedeteile in der Startphase

Die ansteigende Trendlinie der Werkzeugtemperatur, die in Abschn. 7.5.1 beschrieben wurde, bewirkt aufgrund der Korrelation zwischen Temperatur und Materialdehnung ebenfalls eine ansteigende Trendlinie in den Bauteilabmessungen. Am Beispiel des Teiledurchmessers sind die Abmessungen der geschmiedeten Näpfe für den stationären Betrieb ohne Temperaturbeeinflussung, für die Startphase ohne Temperierung und

für die Startphase mit Temperierung jeweils ohne Oberflächensprühkühlung aufgetragen (Bild 7-12).

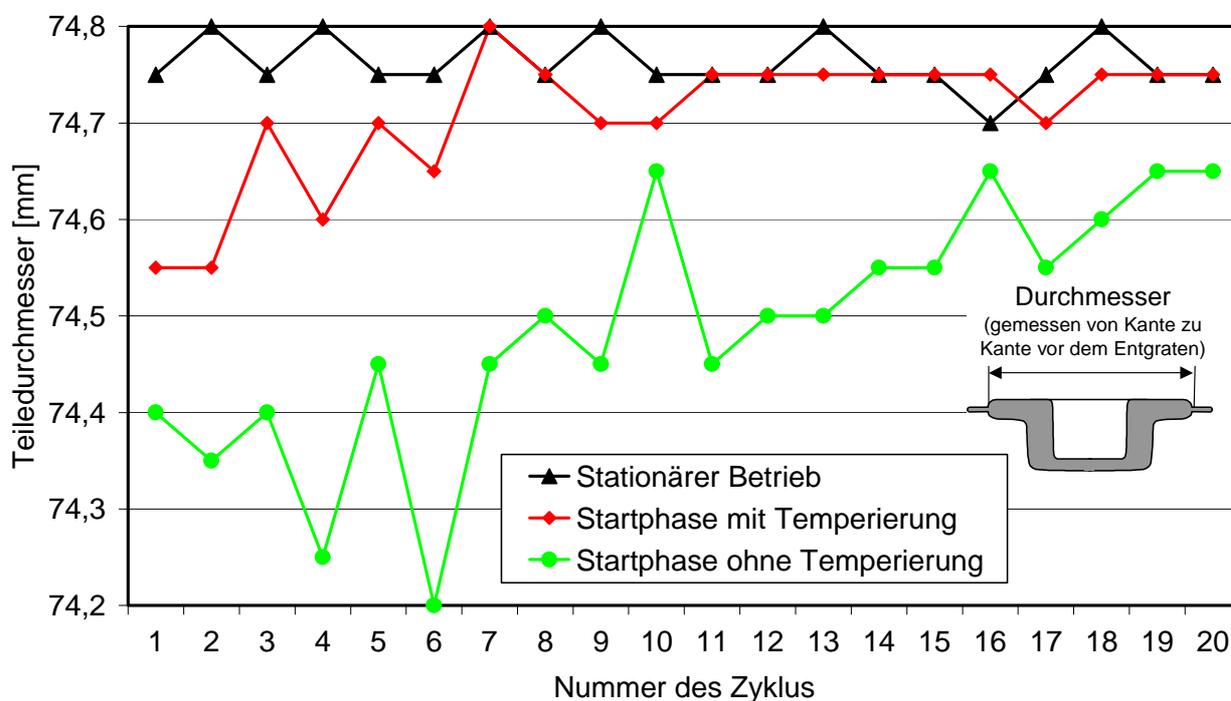


Bild 7-12: Durchmesservergleich

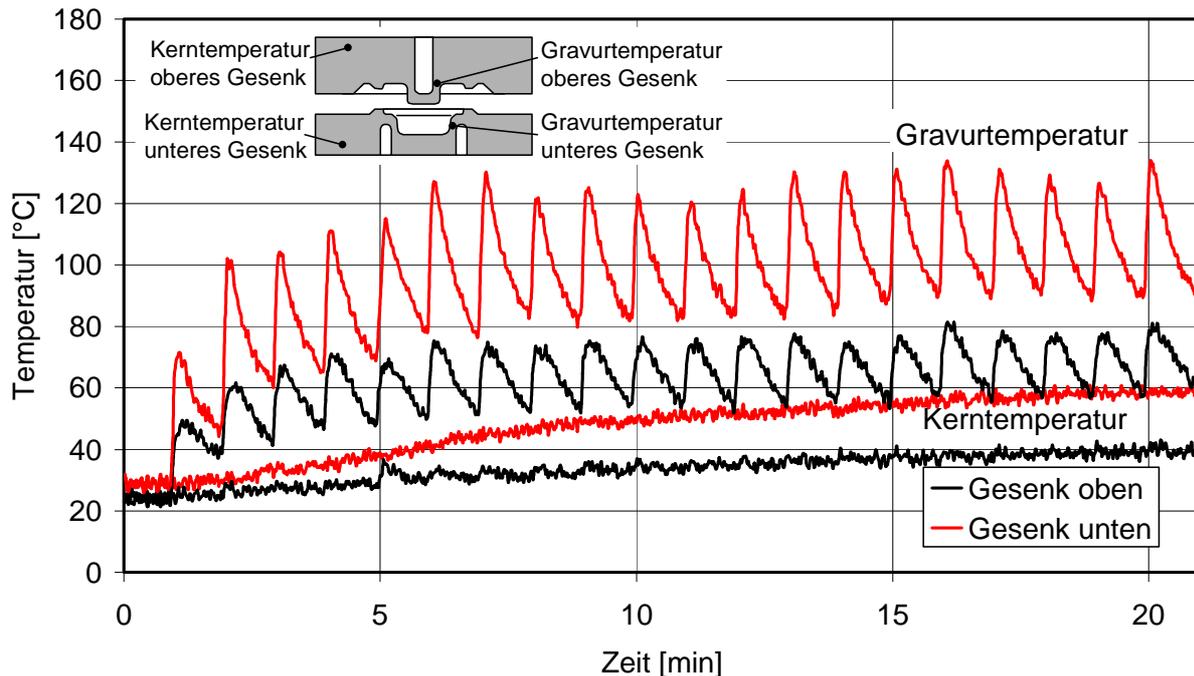
Wie in den Abschn. 7.4 und 7.5.1 beschrieben, entspricht die Durchmesserabweichung beim stationären Betrieb etwa der ISO-Grundtoleranz IT 9 bis 10, während die Durchmessergenauigkeit in der Startphase ohne Temperierung lediglich eine Toleranz von IT 13 bis 14 erreicht. Zum Vergleich hierzu liegt die Genauigkeit bei einer Temperierung in der Startphase, wie sie in Abschn. 7.5.2 beschrieben wurde, bei einer ISO-Grundtoleranz von IT 12 für alle Teile. Betrachtet man die ersten sechs Teile als Schlechteile, entspricht die Genauigkeit beim Start mit Temperierung der des stationären Prozesses.

## 7.7 Einfluss der Oberflächensprühkühlung in der Startphase

Da die Oberflächensprühkühlung in Bezug auf eine Verlängerung der Werkzeugstandzeiten beim Schmieden eine entscheidende Rolle spielt, muss deren Einfluss und Wechselwirkung mit der Temperierung untersucht werden. Aus diesem Grund wurden Versuche mit einer Oberflächensprühkühlung mit zwei Variationsparametern, einer Beaufschlagung von 5 g und 10 g Wasser mit einer Temperatur von 20°C, durchgeführt. Im Folgenden sind die Ergebnisse der Versuche ohne und mit einer zusätzlichen Temperierung dargestellt.

### 7.7.1 Werkzeug ohne Temperierung

Eine Oberflächensprühkühlung führt zu einer deutlichen Senkung der Temperaturen im Gesenk. In Bild 7-13 ist der Temperaturverlauf während der Startphase abgebildet, wobei das Obergesenk mittels Aufsprühen von 5 g Wasser pro Zyklus gekühlt wurde. Das Untergesenk wurde thermisch nicht beeinflusst. Bei einem Vergleich des Temperaturverlaufs des Werkzeugs mit Oberflächensprühkühlung mit dem Temperaturverlauf des ungekühlten Werkzeugs (Bild 7-8) ist eine Absenkung der Temperatur um etwa 10°C festzustellen.

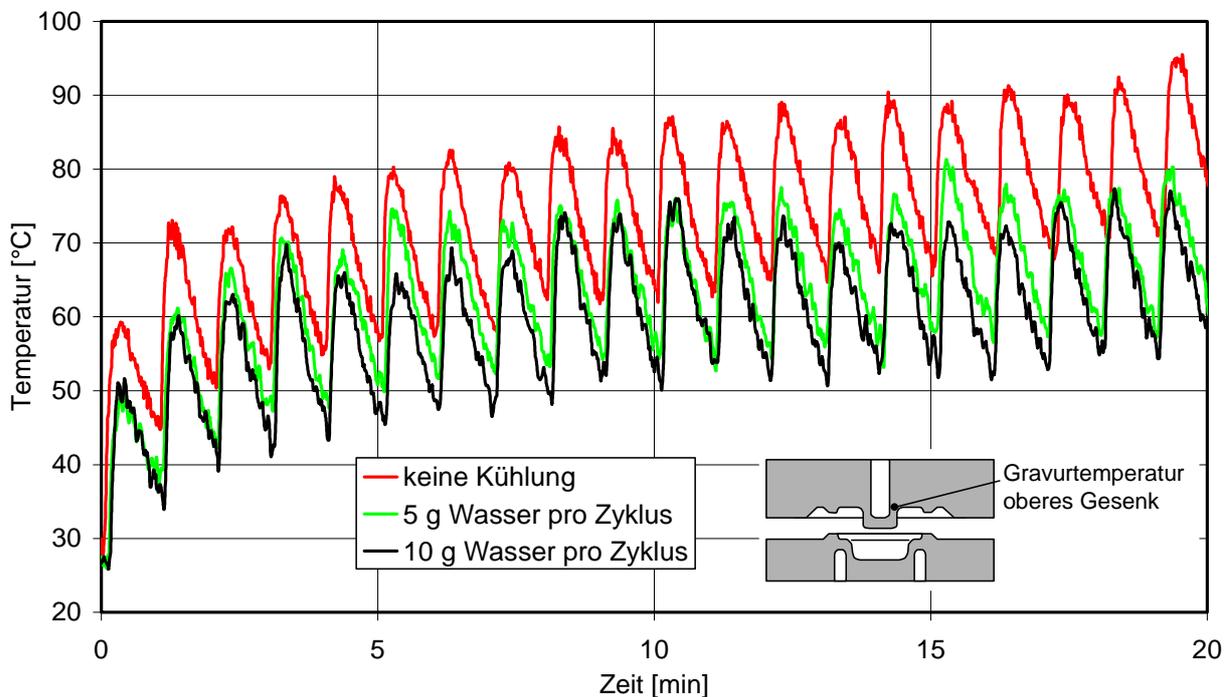


*Bild 7-13: Temperaturverlauf während der Startphase mit Oberflächensprühkühlung des Obergesenks (5 g Wasser pro Zyklus) und ohne Temperierung*

Die Wärmemenge, die dem Gesenk mit Hilfe der Oberflächensprühkühlung entzogen werden kann, hängt von der aufgesprühten Wassermenge ab. In den Versuchen wurde Wasser mit einer konstanten Rate aufgesprüht. Aus diesem Grund wird eine Vergrößerung der Sprühmenge durch eine Verlängerung der Sprühzeit erreicht. In Bild 7-14 ist der Vergleich der Gravurtemperaturen des Obergesenks bei Beaufschlagung mit 5 g und 10 g Wasser pro Zyklus dargestellt. Hierbei ist zu erkennen, dass bei der größeren Sprühmenge eine zusätzliche Temperaturreduzierung um etwa 5°C eintritt.

Eine Verdopplung der Kühlwassermenge führt nicht zu einer Verdopplung der Temperaturabsenkung. Dies ist dadurch zu erklären, dass bei einer Sprühmenge von 10 g die Temperatur durch die ersten 5 g Kühlwasser bereits stark abgesenkt wird und die

Temperaturdifferenz, die dem Wärmestrom proportional ist, bei den zweiten 5 g somit wesentlich kleiner ausfällt.



*Bild 7-14: Vergleich der Gravurtemperatur des Obergesenks bei einer Oberflächensprühkühlung mit 5 g und 10 g Wasser pro Zyklus und ohne Temperierung*

Der Trendverlauf der Temperatur, der über den gesamten Messzeitraum ansteigend ist, wird durch eine Oberflächensprühkühlung qualitativ nicht verändert. Mit einer reinen Oberflächensprühkühlung lässt sich somit der stationäre Zustand nicht schneller erreichen als ohne Kühlung. Aus diesem Grund ist es sinnvoll, die Oberflächensprühkühlung mit der Temperierung zu kombinieren, um die positiven Effekte beider Beeinflussungsmöglichkeiten zu nutzen.

### 7.7.2 Werkzeug mit Temperierung

Der Verlauf der Gravurtemperatur über mehrere Zyklen ist bei einer Zykluszeit von 60 s mit und ohne Oberflächensprühkühlung nahezu der gleiche. Da bei den langen Zykluszeiten das Temperiergerät in der Lage ist, das Temperaturniveau auf ein nahezu beliebiges Maß einzustellen, tritt ein Effekt der Oberflächensprühkühlung nur direkt an der Gravuroberfläche auf. Bei kürzeren Zykluszeiten, die an die Leistungsgrenze des Temperiergerätes gehen, ist eine Oberflächensprühkühlung zur Reduzierung des Temperaturniveaus unumgänglich. Wie in der theoretischen Abschätzung der Leistungsfähigkeit gezeigt, tritt dieser Fall bereits bei Zykluszeiten im Bereich von 10 s auf (s. Abschn. 4.3).

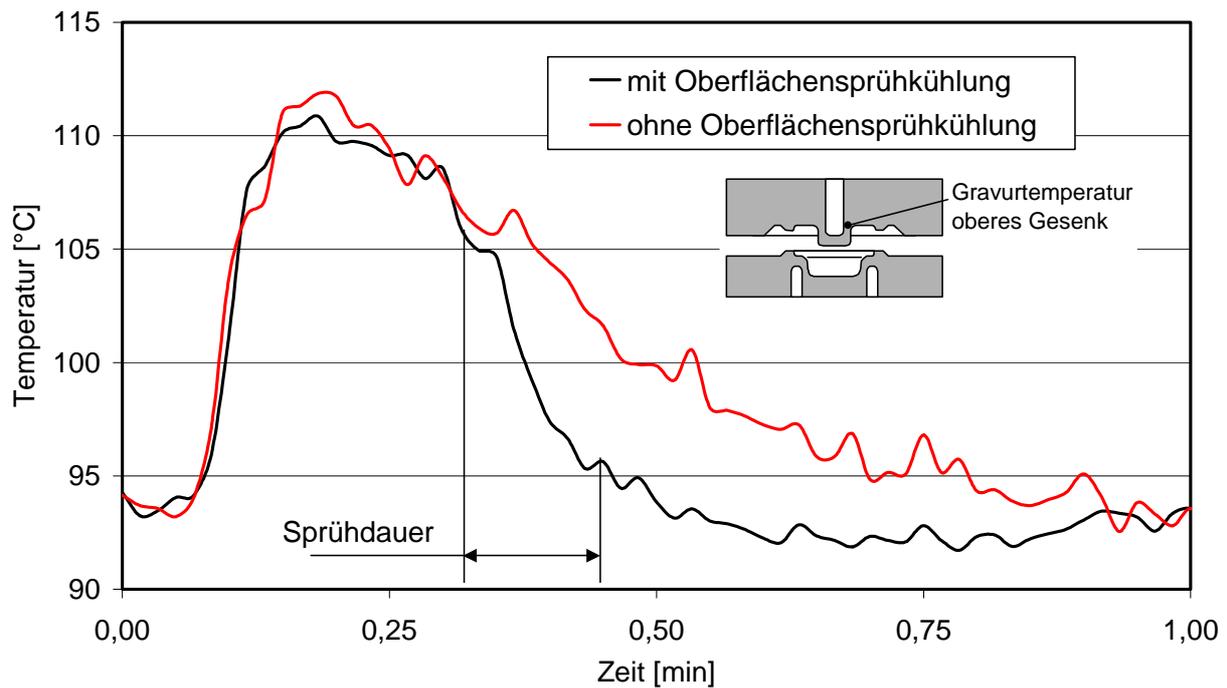


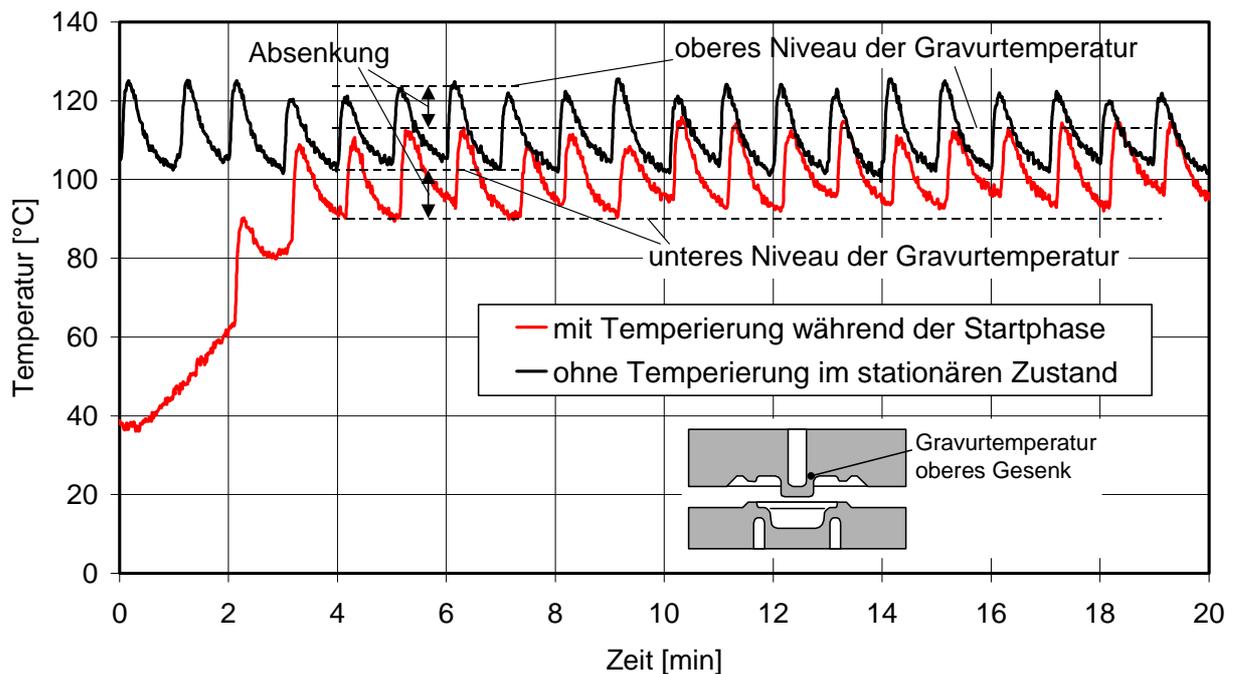
Bild 7-15: Verlauf der Gravurtemperatur des Obergesenks mit Temperierung mit und ohne Oberflächensprühkühlung (5 g Wasser pro Zyklus)

Der Temperaturverlauf während eines Zyklus wird von der Oberflächensprühkühlung, wie in Bild 7-15 dargestellt, dagegen schon beeinflusst. Mit Einsetzen der Kühlmittelbeaufschlagung ist ein stärkeres Abfallen der Gravurtemperatur zu erkennen. Nach der Sprühdauer wird die Temperatur wieder maßgeblich von der Temperierung beeinflusst.

## 7.8 Absenkung der Gravurtemperatur durch Temperierung

Mit Hilfe der Temperierung kann das Temperaturniveau des Werkzeugs auf einen Sollwert eingestellt werden. Wie in Bild 7-16 zu erkennen ist, reduziert sich bei einer Verringerung des unteren Niveaus der Gravurtemperatur ebenfalls das obere Niveau der Gravurtemperatur.

Verglichen werden im Bild der Gravurtemperaturverlauf im Obergesenk ohne temperaturbeeinflussende Maßnahmen und mit Temperierung. Bei der Messkurve des temperierten Verlaufs stellt sich der stationäre Zustand nach etwa 4 bis 5 Zyklen ein. Die Messkurve ohne Temperaturbeeinflussung wurde bei erreichtem stationären Zustand aufgezeichnet.



*Bild 7-16: Vergleich der Gravurtemperatur im Obergesenk mit und ohne Temperierung und ohne Oberflächensprühkühlung*

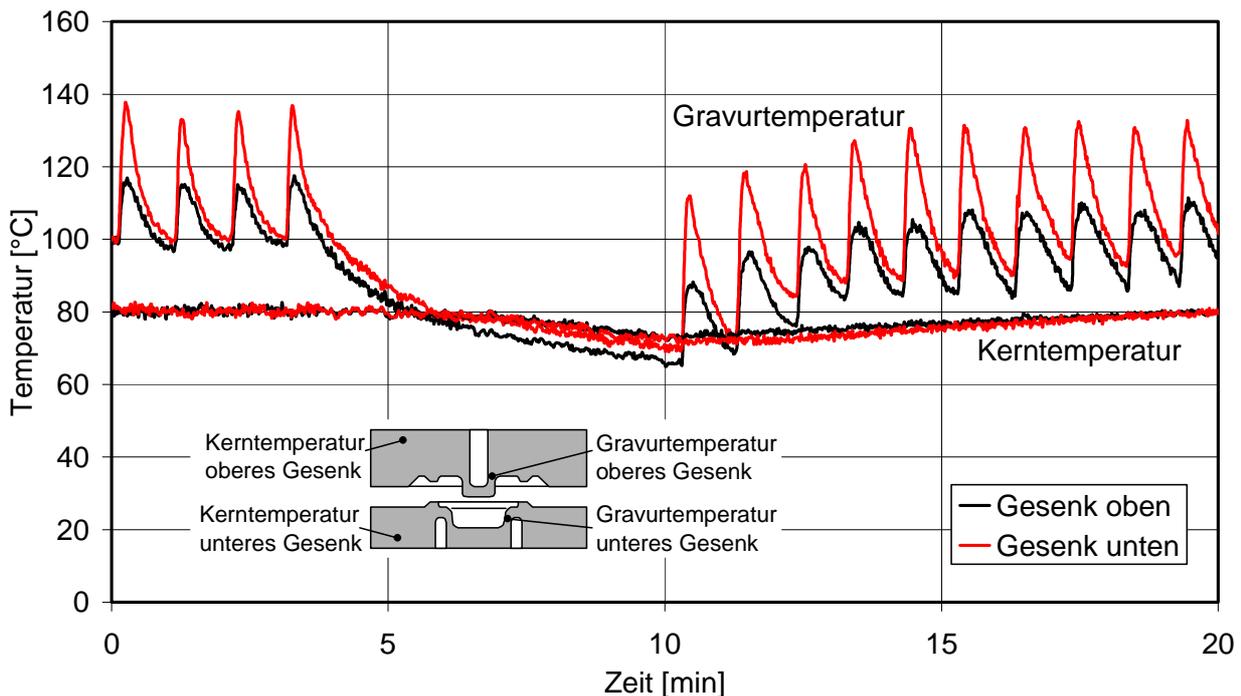
Da die Versuche mit sehr langen Zykluszeiten durchgeführt wurden, ist das unbeeinflusste Temperaturniveau bereits niedrig. Bei einer Verkürzung der Zykluszeit wird viel weniger Wärme durch Konvektion, Strahlung und Wärmeübergang in die Presse abgegeben, was zu einem deutlich höheren Temperaturniveau führt. In diesem Fall lässt sich durch die Temperierung sowohl das untere als auch das obere Niveau der Gravurtemperatur wesentlich stärker absenken.

## 7.9 Temperaturverlauf während Unterbrechungen

Neben der Startphase existiert in der Produktion eine weitere Phase instationärer thermischer Zustände. Während einer Unterbrechung wird dem Werkzeug keine Wärme mehr zugeführt, Wärmeverluste treten allerdings weiterhin auf. Auf diese Weise entsteht ebenfalls eine unausgeglichene Wärmebilanz.

### 7.9.1 Werkzeug ohne Temperaturbeeinflussung

Aufgrund der fehlenden Wärmezufuhr durch die erwärmten Rohteile sinkt die Temperatur im Werkzeug ab. Die Höhe des Wärmeverlustes ist dabei von der Unterbrechungszeit abhängig. Am Anfang sind die Wärmeverluste aufgrund der hohen Temperaturdifferenz zur Umgebung sehr hoch, so dass bereits nach wenigen Minuten das Temperaturniveau zum Schmieden maßhaltiger Teile verlassen wird.



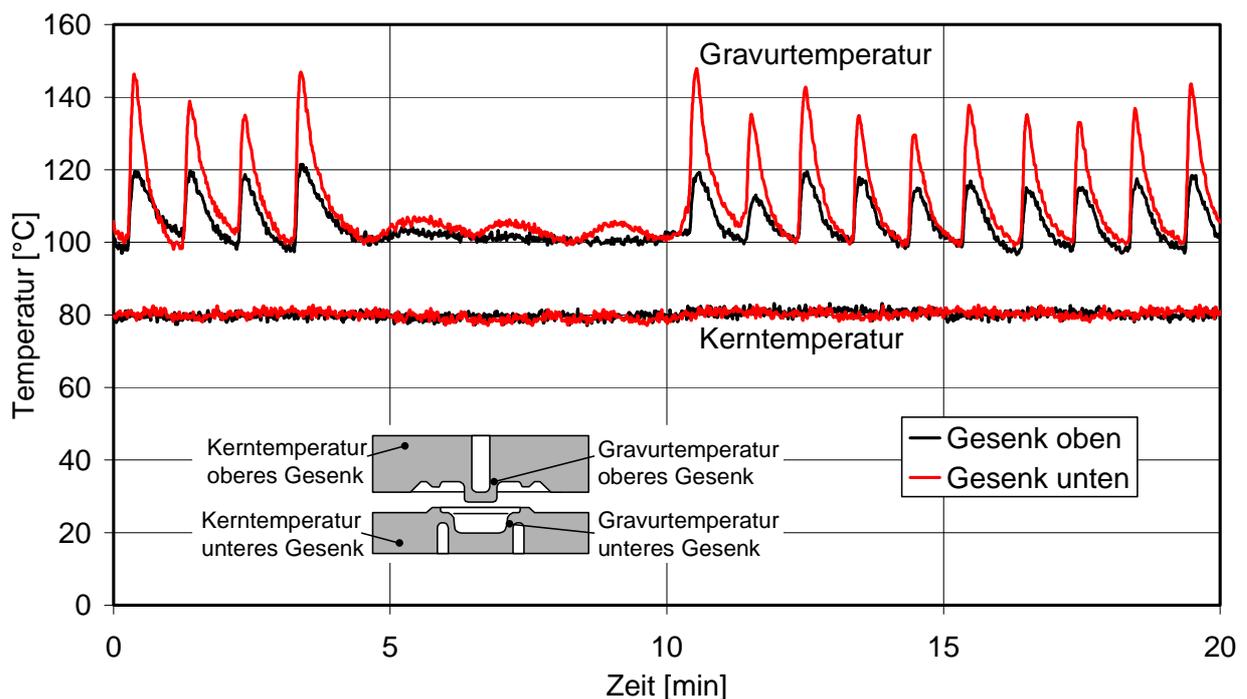
*Bild 7-17: Temperaturverlauf während einer Unterbrechung ohne Temperierung und ohne Oberflächensprühkühlung*

In Bild 7-17 ist der Temperaturverlauf während einer Unterbrechung ohne eine Temperaturbeeinflussung dargestellt. Hierbei ist zu erkennen, dass das Temperaturniveau der Gravur bereits nach 5 min um mehr als 30°C gefallen ist. Somit treten in Bezug auf die Maßgenauigkeit der Schmiedeteile beim Wiederauffahren nach einer Unterbrechung die gleichen Probleme wie in der Startphase auf.

### 7.9.2 Werkzeug mit Temperierung

Aktiv beeinflussen lässt sich das Absinken der Temperatur nur durch Beheizen des Werkzeugs. Die in Schmieden meist gebräuchliche Methode der Oberflächenbeheizung mittels eines Gasbrenners ist für das Aufrechterhalten des stationären Gesenkzustandes nicht in der Lage. Es wird zwar gewährleistet, dass die Temperatur nicht signifikant abfällt, das für die Gutteilproduktion nötige Temperaturprofil, das mit der Gesenkdehnung korreliert, ändert sich aber.

Zum Beibehalten des Temperaturprofils muss das Werkzeug temperiert werden. Hierzu wird die Temperatur nahe der Gravur auf dem stationären Niveau gehalten. Aufgrund der Wärmeleitung und des Wärmeübergangs in die Presse ändern sich der Temperaturgradient und damit die Kerntemperatur nur unwesentlich.



*Bild 7-18: Temperaturverlauf während einer Unterbrechung mit Temperierung und ohne Oberflächensprühkühlung*

In Bild 7-18 ist der zeitliche Temperaturverlauf während einer Unterbrechung aufgetragen. Es ist zu erkennen, dass sowohl die Gravurtemperatur als auch die Kerntemperatur auf dem stationären Niveau verweilen. Beim Wiederaufstart können sofort maßhaltige Teile gefertigt werden.

## 7.10 Einfluss der Geometrie

Das unterschiedliche thermische Verhalten bei verschiedenen Geometrien wurde anhand der oben beschriebenen Napfgeometrie und einer Zapfengeometrie untersucht (s. Abschn. 7.2). Bei den Versuchen hat sich herausgestellt, dass das thermische Verhalten mit Temperierung innerhalb eines Zyklus unterschiedlich ist, aber über mehrere Zyklen hinweg von der aufgezwungenen Temperatur der Temperierung dominiert wird.

Die unterschiedlichen Temperaturverläufe während eines Zyklus sind Bild 7-19 zu entnehmen. Vergleicht man den Temperaturanstieg bei beiden Schmiedeteilen, so ist zu erkennen, dass er beim Zapfen wesentlich größer ausfällt als beim Napf. Dies lässt sich durch die Lage der Temperaturfühler zur Temperaturmessung im Gesenk erklären, da bereits bei geringer räumlicher Abweichung große Temperaturunterschiede zu verzeichnen sind.

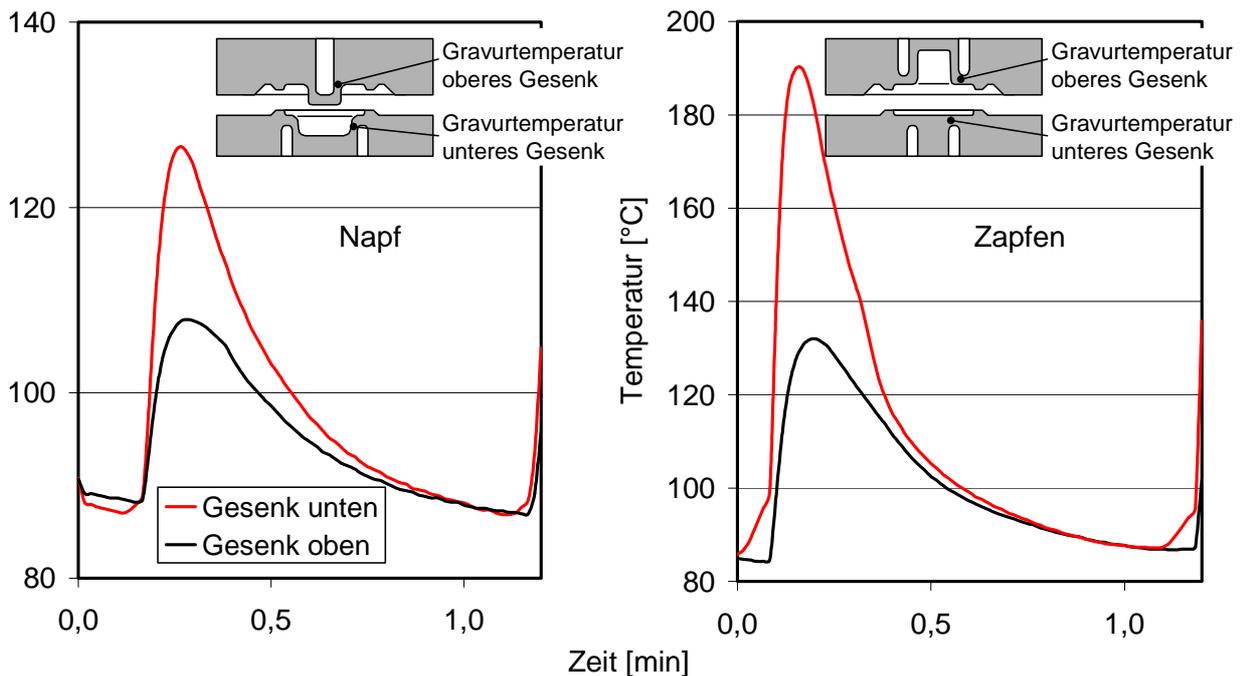


Bild 7-19: Zyklus beim Napf (links) und beim Zapfen (rechts)

Ein weiterer Unterschied ist die Rate mit der die Temperatur abfällt. Sie ist beim Zapfen ebenfalls größer als beim Napf. Dies hängt zum einen vom Wärmeabtransport ab, der sowohl durch die Geometrie als auch durch die Lage und Ankopplung der Temperierkanäle bestimmt ist, und zum anderen von der Wärmemenge, die beim Umformvorgang auf das Werkzeug übergeht. Von diesem Effekt abgesehen wurden keine signifikanten Unterschiede zwischen der Napf- und der Zapfengeometrie festgestellt. Von einer detaillierten Darstellung der Ergebnisse beim Zapfen wird deshalb abgesehen.

Entscheidend für eine erfolgreiche Temperierung des Schmiedeprozesses ist, dass die durch Temperierung und Oberflächensprühkühlung abgeführte Wärme genau so groß ist wie die beim Schmiedeprozess eingebrachte Wärme. Zusätzlich sollten noch Leistungsreserven übrig sein. Auf diese Weise ist es möglich, ein beliebiges Temperaturniveau einzustellen, das unabhängig von der Geometrie des umzuformenden Schmiedeteils ist. Diese Eigenschaft bietet den Vorteil, dass eine Temperaturbeeinflussung nicht für jedes Produkt neu ausgelegt werden muss, sondern dass nur die maximale Leistung der Temperierung und Oberflächensprühkühlung an das Produkt, das den größten Wärmestrom ins Gesenk aufweist, angepasst werden muss.

## 7.11 Diskussion der Ergebnisse

Die Versuche zur Temperaturbeeinflussung von Schmiedewerkzeugen an zwei Beispielprodukten haben gezeigt, dass die Gravurtemperatur mit Hilfe einer Oberflächensprühkühlung gesenkt (Abschn. 7.7) und mit Hilfe einer Flüssigkeitstemperierung auf

einem konstanten Niveau gehalten werden kann (Abschn. 7.5.2 und 7.9.2). Das Ziel, die Werkzeugtemperatur bereits vor Schmiedebeginn auf ein stationäres Niveau einstellen und dieses Niveau während Unterbrechungen halten zu können, wurde erreicht.

Aufgrund der Korrelation der Werkzeugtemperatur und der geometrischen Maße der Schmiedeteile ist ein stabiles Temperaturniveau gleichbedeutend mit der Maßhaltigkeit der Schmiedeteile. In den Versuchen mit einem temperierten Werkzeug konnte nachgewiesen werden, dass Toleranzen, die den Anforderungen des Präzisions schmiedens genügen, schon während der Startphase und nach Unterbrechungen sowie während des laufenden Betriebs erreicht werden können.

Ausschließlich mit einer Oberflächensprühkühlung und ohne eine Temperierung ist es dagegen nicht möglich, ein konstantes Niveau einzustellen. Die Oberflächensprühkühlung ermöglicht es nur, dem Werkzeug schnell größere Mengen an Wärme zu entziehen. Auf diese Weise unterstützt sie die Temperierung, um das vorgegebene Temperaturniveau schneller zu erreichen.

Die Kombination der Temperierung mit der Oberflächensprühkühlung bietet die Möglichkeit, ein beliebiges Temperaturniveau der Umformwerkzeuge zu wählen. Im Gegensatz zum unbeeinflussten stationären Niveau der Werkzeugtemperatur ist das beeinflusste Temperaturniveau unabhängig von den Prozessparametern wie beispielsweise der Zykluszeit, der Umgebungstemperatur oder den Schmierparametern.

Im Fall einer Verkürzung der Zykluszeit würde das unbeeinflusste Niveau der Werkzeugtemperatur ansteigen und aufgrund der thermischen Dehnung zu einer Veränderung der geometrischen Maße der Schmiedeprodukte führen. Bei Einsatz einer Temperierung kann ein Ansteigen der Werkzeugtemperatur dadurch kompensiert werden, dass die Wärmebilanz in der kürzeren zur Verfügung stehenden Zeit ausgeglichen wird. Der begrenzende Faktor hierbei sind die Kühl- und/oder Heizleistungen der temperaturbeeinflussenden Maßnahmen.

Da das Temperaturniveau des Werkzeugs durch die Temperierung aufgeprägt werden kann, haben neben den prozessspezifischen auch die geometriespezifischen Aspekte keinen Einfluss mehr darauf. Das bedeutet, dass eine Temperierung der Werkzeuge, wie sie in dieser Arbeit beschrieben wird, universell für alle Produkte einsetzbar ist. Der einzige begrenzende Faktor ist die maximale Kühlleistung der temperaturbeeinflussenden Maßnahmen, die so ausgelegt werden muss, dass die gesamte dem Werkzeug zugeführte Wärme entzogen werden kann.

## 8 Zusammenfassung und Ausblick

Der Trend zu genaueren Bauteilen erfordert eine kontinuierliche Weiterentwicklung geeigneter Fertigungsprozesse. Die Temperierung von Schmiedewerkzeugen kann ähnlich wie in den Bereichen Spritzguss oder Druckguss einen wichtigen Beitrag dazu liefern. In dieser Arbeit wurde ein System zur Temperierung von Schmiedegesenken mit Wärmeträgerölen vorgestellt.

Bei der Beeinflussung der Temperatur von Schmiedewerkzeugen wurden zwei Ansätze unterschieden:

- Die Oberflächensprühkühlung bietet den Vorteil, die Gravurtemperatur soweit zu reduzieren, dass die thermische Belastung des Werkzeugs deutlich verringert wird. Des Weiteren ist sie in der Lage, ein Absenken des gesamten Temperaturniveaus des Werkzeugs zu unterstützen. Wasser als Sprühmittel kann gleichzeitig als Träger für das Schmiermittel dienen.
- Die Temperierung bietet den Vorteil, ein stabiles Temperaturniveau, das für eine reproduzierbare Maßhaltigkeit der Schmiedeteile nötig ist, einzustellen und zu halten. Eine schnelle Regelung wie die Kaskadenregelung ermöglicht es, sowohl in der Startphase als auch nach Unterbrechungen innerhalb weniger Zyklen einen stationären Betrieb zu erreichen.

Durch eine Kombination dieser temperaturbeeinflussenden Ansätze lassen sich beide Vorteile nutzen. Im Rahmen einer Gesamtprozessoptimierung muss beim Einsatz temperaturbeeinflussender Maßnahmen deren Wechselwirkung mit anderen prozessrelevanten Parametern, Konstruktionsmerkmalen und Eigenschaften berücksichtigt werden:

- Die Beeinflussung der Oberflächentemperatur und die Beeinflussung der Reibung im Gesenk durch Schmierung sind kaum zu trennen. Da bei jedem Schmiedezyklus eine gleichbleibende Schmiermittelmenge aufgetragen wird, sind bei Verwendung eines Kühlschmierers keine Variationen der Kühlung möglich. Eine Regelung der Gesenktemperatur kann dann nur durch die Temperierung erfolgen.
- Temperierkanäle stellen neben der Formgebung eine zusätzliche Funktionalität des Werkzeugs dar. Die Festigkeit des Werkzeugs wird durch die Temperierkanäle beeinflusst. Aus diesem Grund müssen sie so ausgelegt werden, dass es während der Produktion nicht zum Versagen des Werkzeugs kommt.
- Die Temperaturbeeinflussung stellt einen zusätzlichen Prozessschritt dar, der in die Gesamtsteuerung der Anlage integriert werden muss. Die Oberflächensprühkühlung muss hierzu an den Umformzyklus angepasst werden. Die Temperierung stellt einen kontinuierlichen Prozess dar.

- Die geometrischen Parameter der Schmiedeteile beeinflussten bei den Versuchen die Wirkung der Temperierung nur mäßig. Allein die Gesamtwärme, die vom Werkstück in das Werkzeug eingebracht wird, hat einen Einfluss auf die Auslegung des Temperiersystems. Aus diesem Grund kann das System universell für verschiedene Produkte eingesetzt werden. Die Gesamtleistung muss sich an demjenigen Produkt mit dem größten Wärmeübergang orientieren.

Für den industriellen Einsatz einer Temperierung muss das Aufwand-Nutzen-Verhältnis abgeschätzt werden. Dies hängt im Wesentlichen von den Anforderungen an die Schmiedeprodukte, wie beispielsweise Toleranzen, ab. Zum Erreichen einer hohen Schmiedeteilpräzision, zur Verringerung von Losgrößen oder zur Reduzierung von Ausschuss ist die Temperierung in der Lage, einen wichtigen Beitrag leisten.

Hierzu sind Anpassungen der Temperiergeräte an die speziellen Anforderungen des Schmiedeprozesses und eine Optimierung der Peripherie, wie Schlauchsysteme, Abdichtungen und Kühlwasserversorgung, nötig. Das Temperieraggregat darf im industriellen Einsatz keine anderen Funktionen der Schmiedelinie behindern, sondern muss sinnvoll integriert werden. Untersuchungen bezüglich eines Dauereinsatzes im Schmiedebetrieb müssen durchgeführt werden, die eine Beseitigung von Schwachstellen, die im Laborbetrieb nicht entdeckt werden können, ermöglichen.

In den Bereichen Spritzguss und Druckguss hat die flächendeckende Einführung von Temperiersystemen viele Jahre gedauert. In der heutigen Fertigung von Kunststoffteilen ist eine Temperierung nicht mehr wegzudenken. Wenn im Rahmen der Schmiedeteilgenauigkeit die Anforderungen steigen, wird auch die Temperaturbeeinflussung der Schmiedewerkzeuge einen maßgeblichen Beitrag liefern.

## 9 Anhang

### Abschätzung der Wärmeverluste durch Konvektion und Strahlung (Abschn. 4.3.1)

Wärmestrom Schmiederohteil – Umgebung

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{\text{Rohling}} &= \alpha_k \cdot A \cdot (T_1 - T_2) + \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_1^4 - T_2^4) \\ &= \left[ 6 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \cdot (1473\text{K} - 293\text{K}) + 0,75 \cdot 5,7 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}^4} \cdot ((1473\text{K})^4 - (293\text{K})^4) \right] \\ &\quad \cdot (2 \cdot (20\text{mm})^2 + 40\text{mm} \cdot 55\text{mm}) \cdot \pi \\ &= 1950\text{W}\end{aligned}$$

Temperaturverlust Schmiederohteil

$$\dot{T}_{\text{Rohling}} = \frac{\dot{Q}}{\rho \cdot V \cdot c_p} = \frac{1950\text{W}}{7,87 \cdot 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot (20\text{mm})^2 \cdot \pi \cdot 55\text{mm} \cdot 780 \frac{\text{J}}{\text{kgK}}} = 4,6 \frac{\text{K}}{\text{s}}$$

Wärmestrom Werkzeug – Umgebung

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{\text{Werkzeug}} &= \left[ 6 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \cdot (423\text{K} - 293\text{K}) + 0,25 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}^4} \cdot ((423\text{K})^4 - (293\text{K})^4) \right] \cdot ((0,1\text{m})^2 + 0,2\text{m} \cdot 0,1\text{m}) \cdot \pi \\ &= 142\text{W}\end{aligned}$$

Wärmestrom Gravur – Umgebung (hoher Emissionskoeffizient da graphitiert)

$$\dot{Q}_{\text{Gravur}} = \left[ 6 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \cdot (773\text{K} - 293\text{K}) + 0,75 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}^4} \cdot ((773\text{K})^4 - (293\text{K})^4) \right] \cdot 100\text{cm}^2 = 178\text{W}$$

Temperaturverlust Werkzeug vor der Umformung

$$\dot{T}_{\text{min}} = \frac{142\text{W}}{7,87 \cdot 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot (0,1\text{m})^2 \cdot \pi \cdot 0,1\text{m} \cdot 550 \frac{\text{J}}{\text{kgK}}} = 0,63 \frac{\text{K}}{\text{min}}$$

Temperaturverlust Werkzeug nach der Umformung

$$\dot{T}_{\text{max}} = \frac{142\text{W} + 178\text{W}}{7,87 \cdot 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot (0,1\text{m})^2 \cdot \pi \cdot 0,1\text{m} \cdot 550 \frac{\text{J}}{\text{kgK}}} = 1,4 \frac{\text{K}}{\text{min}}$$

Wärmeverlust Werkzeug bei linearer Temperaturabnahme in der Gravur von 500°C auf 150°C in 10 s

$$\Delta Q = \left( \dot{Q}_{\text{Werkzeug}} + \frac{\dot{Q}_{\text{Gravur}}}{2} \right) \cdot \Delta t = \left( 142\text{W} + \frac{178\text{W}}{2} \right) \cdot 10\text{s} = 2,3\text{kJ}$$

Wärmeverlust Werkzeug bei parabolischer Temperaturabnahme in der Gravur von 500°C auf 150°C in 10 s

$$\Delta Q = \left( \dot{Q}_{\text{Werkzeug}} + \frac{\dot{Q}_{\text{Gravur}}}{3} \right) \cdot \Delta t = \left( 142 \text{ W} + \frac{178 \text{ W}}{3} \right) \cdot 10 \text{ s} = 2,01 \text{ kJ}$$

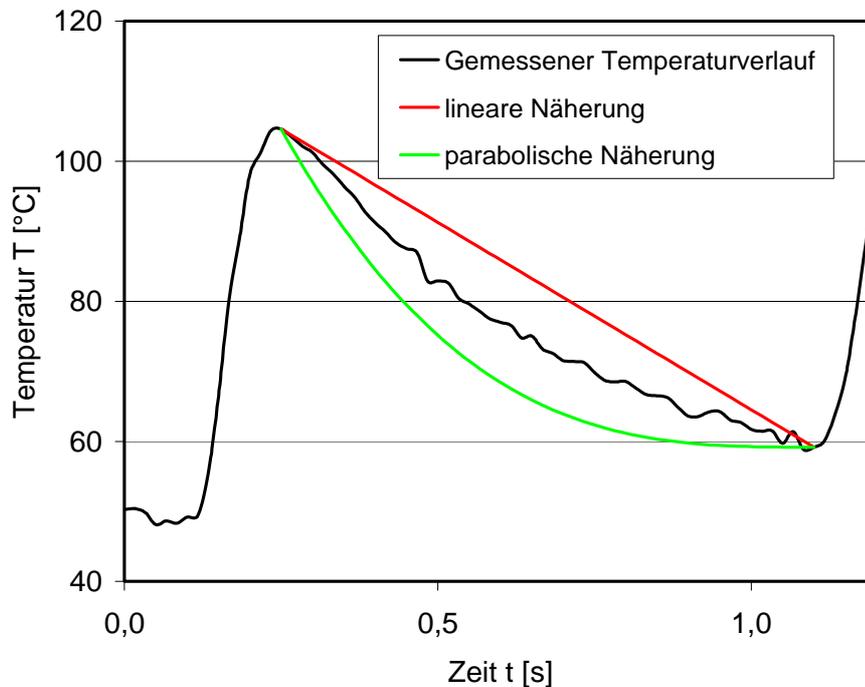


Bild 9-1: Näherungsfunktionen zur Abschätzung des Temperaturverlaufs

### Abschätzung der Wärmeleitung (Abschn. 4.3.2)

Wärmestrom während des Kontakts mit eingelegten Rohteil

$$\dot{Q} = \lambda \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{\Delta x} = 30 \frac{\text{W}}{\text{mK}} \cdot (20 \text{ mm})^2 \cdot \pi \cdot \frac{423 \text{ K} - 293 \text{ K}}{0,1 \text{ m}} = 49 \text{ W}$$

Wärmestrom aufgrund der Temperaturüberhöhung während der Umformung

$$\dot{Q} = 30 \frac{\text{W}}{\text{mK}} \cdot 100 \text{ cm}^2 \cdot \frac{773 \text{ K} - 293 \text{ K}}{0,1 \text{ m}} = 1,44 \text{ kW}$$

### Abschätzung des Wärmeübergangs durch Kontakt (Abschn. 4.3.3)

Wärmestrom beim Einlegen

$$\dot{Q}_{\text{Einlegen}} = \alpha_w \cdot A \cdot (T_1 - T_2) = 0,58 \cdot 10^{-3} \frac{\text{W}}{\text{mm}^2 \text{ K}} \cdot (20 \text{ mm})^2 \cdot \pi \cdot (1473 \text{ K} - 423 \text{ K}) = 765 \text{ W}$$

Wärmestrom bei der Umformung

$$\dot{Q}_{\text{Umformen}} = \alpha_w \cdot A \cdot (T_1 - T_2) = 0,0348 \frac{\text{W}}{\text{mm}^2\text{K}} \cdot 100\text{cm}^2 \cdot (1473\text{K} - 423\text{K}) = 365\text{kW}$$

Übertragene Wärmemenge bei linearem Temperaturverlauf

$$Q_{\text{Kontakt}} = \frac{\dot{Q}_{\text{Umformen}}}{2} \cdot \Delta t = \frac{365\text{W}}{2} \cdot 0,12\text{s} = 22\text{kJ}$$

### Abschätzung der externen Wärmebeeinflussung (Abschn. 4.3.5)

Erwärmung und Verdampfung des Wassers der Oberflächensprühkühlung

$$q = \frac{\Delta Q}{m} = c_p \cdot \Delta T + q_{\text{Verdampfung}} = 4,19 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \cdot (373\text{K} - 293\text{K}) + 2257 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 2592 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Benötigte Wassermenge

$$m = \frac{\Delta Q}{q} = \frac{22\text{kJ}}{2592 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} = 8,4\text{g}$$

Wärmestrom Wärmeträger – Werkzeug

$$\dot{Q}_{\text{min}} = \alpha_{k_{\text{min}}} \cdot A \cdot (T_1 - T_2) = 1100 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \cdot 4\pi^2 \cdot 8\text{mm} \cdot 35\text{mm} \cdot (443\text{K} - 293\text{K}) = 1,8\text{kW}$$

$$\dot{Q}_{\text{max}} = \alpha_{k_{\text{max}}} \cdot A \cdot (T_1 - T_2) = 1800 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \cdot 4\pi^2 \cdot 8\text{mm} \cdot 35\text{mm} \cdot (443\text{K} - 293\text{K}) = 2,8\text{kW}$$

Temperierdauer

$$t_{\text{max}} = \frac{\Delta Q}{\dot{Q}_{\text{min}}} = \frac{22\text{kJ}}{1,8\text{kW}} = 12\text{s}$$

$$t_{\text{min}} = \frac{\Delta Q}{\dot{Q}_{\text{max}}} = \frac{22\text{kJ}}{2,8\text{kW}} = 7,8\text{s}$$

### Abschätzung des Wärmebilanzausgleichs für eine Zykluszeit von 10 s (Abschn. 4.3.6)

Wärmeverlust durch Konvektion und Strahlung

$$Q_{\text{Konv.-Strahl.}} = 2,3\text{kJ} \quad (\text{s. 102})$$

Wärmeverlust durch Wärmeleitung in die Presse

$$Q_{\text{Wärmeleitung}} = \int \dot{Q} \cdot dt = \lambda \cdot A \cdot \frac{\int (T_1(t) - T_2(t)) \cdot dt}{\Delta x} = 4,8\text{kJ}$$

(numerisch berechnet nach Temperaturverteilung in Bild 4-14)

## Extern abzuführende Wärme

$$Q_{\text{extern}} = Q_{\text{Kontakt}} - Q_{\text{Konv.-Strahl.}} - Q_{\text{Wärmeleitung}} = 21,9\text{kJ} - 2,3\text{kJ} - 4,8\text{kJ} = 14,8\text{kJ}$$

## Datenblatt Temperiergerät

Temperiergerät 300DG der Firma Regloplas

Regelsystem		RT45
Vorlauftemperatur max.	°C	300
Wärmeträger		Öl
Füllmenge	l	15
Ausdehnungsraum max.	l	14
Heizleistung bei 400V	kW	12
Kühlleistung	kW	160
bei Vorlauftemperatur	°C	280
Anzahl Kühler		ein Kühler
Pumpenleistung/Typ		FM30
Fördermenge max.	l/min	60
Förderhöhe max.	m	65
Leistungsaufnahme	kW	13,5
Messart		Pt100
Anschlussspannung	V/Hz	400/50
Anschlüsse		
Vor-/Rücklauf		M18 x 1,5
Kühlwassernetz		3/4"
Abmessungen	mm	400/1150/1155
Gewicht ca.	kg	235
Umgebungstemperatur max.	°C	40
Dauerschalldruckpegel	DB(A)	<70

**Datenblatt Wärmeträgeröl**

Synthetischer Wärmeträger Syntex 350 MH

Bezeichnung		Dibenzyltoluol
Einsatzbereich	°C	-14 bis +350
Filmtemperatur max.	°C	370
Siedebeginn ca.	°C	390°C
Stockpunkt	°C	-35
Flammpunkt	°C	190
Spez. Wärmekapazität bei 20°C	kJ/kg·K	1,58
Dichte bei 20°C	kg/dm <sup>3</sup>	1,03

## 10 Literatur

- ADL98 Adlof, W.W.: Schmiedeteile im Fahrzeugbau. Umformtechnik, Band 32 (1998) Heft 4, S. 20-22.
- AWI97 Awiszus, B.; Doege, E.: Prozessführung beim Gesenkschmieden zum Ausgleich thermischer Einflüsse auf das Werkzeug. DFG – Forschungsbericht, Aw 6/1-1 und Doe 190/104-1, 1997.
- BEH97 Behrens, B.-A.: Entwicklung eines automatisierten Präzisionsschmiedeprozesses mit integrierter Qualitätsprüfung. VDI-Fortschrittsberichte, Reihe 2, Nr. 445. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1997.
- BEU91 Beuscher, K.: Moderne Qualitätssicherung in der Gesenkschmiedeindustrie. Neuere Entwicklungen in der Massivumformung, Stuttgart, 28.-29.05.1991, S. 277-288.
- BOB91 Bobke, T.: Randschichtphänomene bei Verschleißvorgängen an Gesenkschmiedewerkzeugen. VDI-Fortschrittsberichte, Reihe 2, Nr. 237. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1991.
- BOL81 Bolle, L.; Moureau, H.: Spray Cooling of Hot Surfaces. Monographie Multiphase, Science and Technology (1981), S. 1-97.
- BÖR97 Börderding, R.: Optimierung des Betriebs induktiver Schmiedeblockerwärmer. VDI-Fortschrittsberichte, Reihe 2, Nr. 451. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1997.
- BRO99 Broß, G.: Entwicklung eines Verfahrens zum Schmieden von PKW-Pleuel. VDI-Fortschrittsberichte, Reihe 2, Nr. 508. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1999.
- DOE92 Doege, E.; Schulz, H.-P.; Brüning, J.: Prozessregelung für das Schmieden flacher Teile mit genauer Masseverteilung. Abschlussbericht DFG-Forschungsvorhaben Do 190/86, Hannover, 1992.
- DOE98 Doege, E. et al.: Präzisionsschmieden schräg verzahnter Zahnräder. Umformtechnik, Band 32 (1998) Heft 1, S. 30-34.
- DOE00 Doege, E.; Flüß, A.; Kohlstette, J.; Müssig, B.: Hot Flashless Precision Forging of Long Pieces – Development, Realisation, Benefits. Proceedings of the Second International Conference on Advanced Manufacturing Technology, Johor Bahru, 16.-17.08.2000.
- DOE01 Doege, E.; Dittmann, J.; Silbernagel, C.: Neue Wege beim Präzisions-schmieden von PKW-Gangrädern. UTF science I (2001), S. 32-38.
- DOH00 Dohmann, J.: Reduzierung instationärer Betriebszustände beim Gesenkschmieden. VDI-Fortschrittsberichte, Reihe 2, Nr. 533. VDI-Verlag, Düsseldorf, 2000.

- DOU98 Douglas, R.; Kuhlmann, D.: Guidelines for precision hot forging with applications. *Journal of Materials Processing Technology*, 98 (2000), S. 182-188.
- DRE01 Dreyer, G.: Präzisionsgeschmiedetes PKW-Gangrad. Unveröffentlichtes Bild, 2001.
- DUB90 Dubbel: Taschenbuch für den Maschinenbau. Beitz, W. (Hrsg.); Küttner, K.-H., 17. Auflage, Springer Verlag 1990.
- FRI93 Friel, P.: Die Werkzeugtemperatur – eine Herausforderung an Temperiersysteme. Konferenz-Einzelbericht, 5. Würzburger Werkzeugtage, Würzburg, 05.-06.10.1993, S. 67-105.
- GAR87 Garz, E.: Forged workpiece properties and quality. *Giornale dell Officina*, Band 32 (1987) Heft 11, S. 69-72.
- GEI91 Geiger, R.: Prozessregelung und Prozessüberwachung in der Kaltumformung. Neuere Entwicklungen in der Massivumformung, Stuttgart, 28.-29.05.1991, S. 259-275.
- GOR97 Gorbach, P.: Temperiergeräte. In: *Handbuch der Temperierung mittels flüssiger Medien*, 5. Auflage, Hüthig Verlag 1997.
- GRI97 Gries, H.; Hinzpeter, U.; Sass, R.: Zyklisches Temperieren von Spritzgießwerkzeugen erhöht Formteilqualität. *Maschinenmarkt*, Band 103 (1997) Heft 25, S. 34-35.
- GRI98 Gries, H.: Exakte Temperierung garantiert Qualität. *Kunststoffberater*, Band 43 (1998) Heft 11, S. 20-43.
- GUT98 Gutmann, P.: Precision Forging of Syncromesh Parts. *Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Precision Forging Conference*, Columbus, 12.-14.10.1998.
- HAR83 Hartke, G.; Witte, H.P.: Führungsgenauigkeit verbessert – Versatz- und kippungsarme Werkzeugführungsgestelle. *Industrie Anzeiger*, Band 105 (1983) Heft 27/28, S. 31-34.
- HEI76 Heinemeyer, D.: Untersuchungen zur Frage der Haltbarkeit von Schmiedegesenen. Dr.-Ing.-Diss., TU-Hannover 1976.
- HER80 Herrmann, K.H.: Kühlen und Schmierer von Stempeln für das Warmfliesspressen. *WT-Werkstattstechnik*, Band 70 (1980) Heft 2, S. 111-113.
- HER99 Herberitz, R.: Prozessstabilität im Gesenkschmiedeprozess – eine Maßnahme zur Kostenreduzierung. *Schmiede-Journal* März 1999, S. 6-8.
- HIN98 Hingwe, A.K.: The Quality Function's Role in the Forging Industry of the Future. *International Conference on Forging and Related Technology (ICFT'98)*, Birmingham, 27.-28.04.1998, S. 9-11.

- HUX95 Huxholl, L.: Darstellung umformtechnisch relevanter Größen durch Kennzahlen. VDI-Fortschrittsberichte, Reihe 2, Nr. 342. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1995.
- IDS99 IDS-Informationsstelle Schmiedestück-Verwendung im Industrieverband Deutscher Schmieden e.V. (IDS), Hagen, 1999.
- JES89 Jeschar, R.; Maaß, R.; Köhler, C.: Wärmeübertragung beim Kühlen heißer Metalle mit verdampfenden Flüssigkeiten. Härtereitechnische Mitteilungen – HTM, Band 44 (1989) Heft 3, S. 133-137.
- JES94 Jeschar, R.; Specht, E.: Abschreckwirkung durch Aufspritzung von Gas-Wasser-Gemischen. ATT/AWT Tagungsbericht, Strasbourg, 20.-21.04.1994, S. 161-167.
- KAN69 Kannappan, A.: Wear in forging dies. Metal forming 36 (1969), S. 335-343 und 37, S. 6-21.
- KLE80 Kleiner, F.J. et al.: Temperaturführung von Schmiedegesenken. HFF-Bericht Nr. 6 (1980), S. 3.1-3.15.
- KLE90 Klein, F.; Hrnak, P.: Thermische Verhältnisse in einer Druckgießform. Konferenz-Einzelbericht, 11. Aalener Gießereisymposium, Aalen, 11.05.1990, S. 1-29.
- KLE97 Klein, M.: Einführung in die DIN-Normen. 12. Auflage, Teubner-Verlag 1997.
- KNE90 Kneubühl, F.K.: Repetitorium der Physik. 4. Auflage, Teubner-Verlag 1990.
- KNO92 Knoch, U.: On-Line-Temperaturmessung und Temperaturregelung bei der induktiven Erwärmung von Gesenkschmiederohtteilen. VDI-Fortschrittsberichte, Reihe 2, Nr. 268. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1992.
- KOL80 Kolesnikov, M.S. et al.: Erhöhung der Standmenge von Gesenken. Kuznecnostampovocnoe Proizvodstvo (Abstract), Band 22 (1980) Heft 4, S. 13-14.
- KRU97 Kruijssen, T.: Regelungstechnik. In: Handbuch der Temperierung mittels flüssiger Medien, 5. Auflage, Hüthig Verlag 1997.
- KUD90 Kudo, H.: Towards Net-Shape Forming. Journal of Material Processing Technology, 22 (1990), S. 307-342.
- LAC00 Lacki, P.: The role of technological lubricants and hardening layers in heat exchange process between a forging and a tool. Tribology 2000 – Plus, 12<sup>th</sup> International Colloquium, Ostfildern, 12.-13.01.2000, Band 2 (2000), S. 1211-1217.

- LAN77 Lange, K.; Meyer-Nolkemper, H.: Gesenkschmieden. 2. Auflage, Springer-Verlag 1977.
- LAN88 Lange, K.: Umformtechnik Band 2: Massivumformung. Handbuch für Industrie und Wissenschaft, 2. Auflage, Springer-Verlag 1988.
- LÖH69 Löhr, D.: Über die Wechselwirkung von Reibung, Schmierung, Wärmeübertragung und Temperaturfeld bei der Warmumformung. Dr.-Ing.-Diss., TU-Clausthal 1969.
- LUI90 Luig, H.; Bobke, T.: Beanspruchung und Schadensarten an Schmiedegeesenken. Tribologie und Schmierungstechnik, Band 37 (1990) Heft 2, S. 76-81.
- LUI93 Luig, H.: Einfluss von Verschleißschutzschichten und Rohteilverzunderung auf den Verschleiß beim Schmieden. VDI-Fortschrittsberichte, Reihe 5, Nr. 315. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1993.
- MAN00 Mann, H.; Schiffelgen, H.; Froriep, R.: Einführung in die Regelungstechnik. 8. Auflage, Carl Hanser Verlag 2000.
- MEI94 Meilgen, R.: Einfluss der Temperierung auf die Lebensdauer von Druckgießformen. Gießerei-Erfahrungsaustausch, Band 38 (1994) Heft 10, S. 491-493.
- MEN99 Menges, G.; Michaeli, W.; Mohren, P.: Anleitung zum Bau von Spritzgießwerkzeugen. 5. Auflage, Carl Hanser Verlag 1999.
- MÜS99 Müssig, B.; Tracht, K.: Advanced Manufacturing System for Forging Products. Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Conference on Manufacturing Technology, Beijing, 31.10.-03.11.1999.
- MÜS00 Müssig, B.: Bauteilgerechte Temperaturführung erhöht die Reproduzierbarkeit. Maschinenmarkt, Band 106 (2000) Heft 23, S. 48-51.
- NÄG94 Nägele, H.: Simulation des Herstellungsprozesses präzisionsgeschmiedeter Zahnräder mit der Finite-Elemente Methode. VDI-Fortschrittsberichte, Reihe 20, Nr. 160. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1994.
- NAK00 Nakamura, T.; Tanaka, S.; Hayakawa, K.; Fukai, Y.: A study of the lubrication behaviour of solid lubricants in the upsetting process. Transactions of the ASME, Journal of Tribology, Band 122 (2000) Heft 4, S. 803-808.
- NIE97 Niemeyer, F.: Beitrag zur Wärmebehandlung von Zahnrädern durch flüssige und gasförmige Abschreckmedien. VDI-Fortschrittsberichte, Reihe 2, Nr. 458. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1997.
- PAP00 Papenfort, J.: In die SPS gepackt. Computer und Automation, (2000) Heft 10, S. 70-72.

- REG98 Regloplas-Temperiergeräte. Produktinformationen der Firma Regloplas AG, St. Gallen, 1998.
- REP94 Repenning, F.: Berührungsloses Vermessen von warmen Schmiedeteilen mit Hilfe der Lasertriangulation. VDI-Fortschrittsberichte, Reihe 2, Nr. 419. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1994.
- RUD00 Rudau, E.: Deutsche Gesenkschmiedeindustrie gerüstet für die Zukunft. Schmiede-Journal September 2000, S. 32-33.
- RÜS00 Rüschi, S.; Schneider, H.: Prozessintegrierte Qualitätsprüfung und Regelung beim Gesenkschmieden. Umformtechnik, Band 34 (2000) Heft 2, S. 37-41.
- SAI83 Saiki, H.; Shimizu, S.; Tsuru, E.; Matsuo, T.: Deformation and Temperature Distribution in Hot Forging. 23<sup>rd</sup> Int. MTDR Conf. Manchester 1992, MacMillan Press (1983), S. 405-412.
- SAS96 Sasse, J.: System zur anlagenübergreifenden Prozessüberwachung beim Gesenkschmieden. VDI-Fortschrittsberichte, Reihe 2, Nr. 405. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1996.
- SCA98 Schacher, H.-D.: Entwicklungstendenzen in der Massivumformung für die Automobilindustrie. Neuere Entwicklungen in der Umformtechnik, Stuttgart/Fellbach, 3.-4. Juni 1997. Siegert (Hrsg.), 1998, Nachtrag.
- SCL94 Schliephake, U.: Analyse des Werkzeugverschleißes beim Gesenkschmieden. VDI-Fortschrittsberichte, Reihe 2, Nr. 306. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1994.
- SCN84 Schneider, R.: Untersuchungen der Einflussgrößen des tribologischen Systems Werkzeug-Schmierstoff-Schmiedestück. VDI-Fortschrittsberichte, Reihe 2, Nr. 78. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1984.
- SCÜ82 Schüler, P.: Untersuchungen über Wärmeaustauschvorgänge bei der Abkühlung von Stahlplatten durch Spritzwasserbeaufschlagung. Thyssen Edelstahl, Technische Berichte, Band 8 (1982) Heft 1.
- SCU95 Schulze, D.: Steuerung getakteter induktiver Erwärmungsprozesse. Elektrowärme International, Edition B, Band 53 (1995) Heft B2, S. B110-B115.
- SEI92 Seidel, J.: Good temperature control of the pressure die casting die ensures high productivity. Casting Plant and Technology, Band 8 (1992) Heft 2, S. 34-39.
- SEI96 Seidel, R.: Reduzierung der thermischen Schädigung von Schmiedewerkzeugen durch Kühlschmierung. VDI-Fortschrittsberichte, Reihe 2, Nr. 399. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1996.

- SEI98 Seidel, H.: Tribologie bei der Massivumformung. Industrial and Automotive Lubrication, 11<sup>th</sup> International Colloquium, Ostfildern, 13.-15.01.1998, Band 11,3 (1998), S. 2339-2346.
- SEV95 Severin, H.: Moderne Konzepte der induktiven Schmiedeerwärmung. Elektrowärme International, Edition B, Band 53 (1995) Heft B2, S. B98-B103.
- STE92 Stephan, K.; Mayinger, F.: Thermodynamik. 14. Auflage, Springer-Verlag, 1992.
- STÜ99 Stühler, W.; Keil, M.: Identifikation von Rissen in Schmiedeteilen durch schwingungstechnische Systemanalysen. Konferenz-Einzelbericht: VDI-Schwingungstagung 99, Frankenthal, 27.-28.5.1999, S. 355-361.
- THA94 Thalemann, J.: Ohne Span – Mit dem Präzisionsschmieden lassen sich endkonturnahe Bauteile herstellen. Maschinenmarkt Band 100 (1994) Heft 20, S. 20-22.
- THA95 Thalemann, J.: Rechnergestützte Führungsverstellung an Genauigkeitsführungsgestellen zum Präzisionsschmieden. Dr.-Ing.-Diss., Universität Hannover 1995.
- THI97 Thienel, P.: Rechnereinsatz (CAE) in der Spritzgiesstechnik – thermische Auslegung von Spritzgießwerkzeugen. In: Handbuch der Temperierung mittels flüssiger Medien, 5. Auflage, Hüthig Verlag 1997.
- TSC92 Tschudin, U.: Präzisionsschmiedeteile schneller und flexibler produzieren. Umformtechnik, Band 26 (1992) Heft 1, S. 45-48.
- VDI91 VDI-Wärmeatlas: Berechnungsblätter für den Wärmeübergang. VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (Hrsg.), Sechste, erweiterte Auflage, VDI-Verlag 1991.
- WAC92 Wack, P.: Bauteilbeurteilung anhand von Prozessfeldern beim Schmieden. VDI-Fortschrittsberichte, Reihe 2, Nr. 254. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1992.
- WAC96 Wachters, L.H.; Westerling, N.A.: The Heat Transfer from a Hot Wall to Impinging Water Drops in the Spheroidal State. Chemical Engineering Science, Band 21 (1996), S. 1231-1238.
- WEB94 Weber, Frank.: Beurteilung der Prozess- und Produktqualität beim Präzisionsschmieden von Verzahnungen. VDI-Fortschrittsberichte, Reihe 2, Nr. 310. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1994.
- WEI88 Weiss, U.: Numerische Simulation von Präzisionsschmiedeprozessen mit der Finite-Elemente-Methode. VDI-Fortschrittsberichte, Reihe 2, Nr. 146. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1988.

- WER96 Werner, N.: Algorithmisierte Kalibrierung von Finite-Elemente-Simulationsmodellen für Schmiedeprozesse. VDI-Fortschrittsberichte, Reihe 20, Nr. 242. VDI-Verlag, Düsseldorf 1996.
- WIL90 Williamson, I.R.: Controlling the forging process and achieving fast tool changes. Metallurgia, Redhill, Band 57 (1990) Heft 6, S. S6-S8.
- WIT86 Witte, H.P.: Momentenfreie Kraftübertragung und Werkzeugführungsstelle für die kippungs- und versatzarme Massivumformung. VDI-Fortschrittsberichte, Reihe 2, Nr. 111. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1986.
- WRU99 Wruck, N.: Transientes Sieden von Tropfen beim Wandaufprall. Diss. RWTH Aachen D82. Shaker-Verlag, Aachen, 1999.
- XIE98 Xie, T.: Development of Precision Forged Gear Technology in China. International Conference on Forging and Related Technologies (ICFT '98), Birmingham, 27.-28.04.1998, S. 323-331.
- ZEP97 Zeppenfeld, R.: Temperierung beim thermoplastischen Spritzgießen. Kunststoffberater, Band 42 (1997) Heft 1/2, S. 21-24.

# Lebenslauf

## Persönliche Daten

Name	Bernd Müssig
Geburtsdatum und -ort	02.08.1971 in Wolfratshausen
Familienstand	Verheiratet, ein Kind

## Schulbildung

09/77 – 08/81	Karl-Lederer-Grundschule Geretsried
09/81 – 06/90	Gymnasium Geretsried

## Wehrdienst

07/90 – 06/91	Grundwehrdienst als Kraftfahrer Klasse 2 in Mittenwald
---------------	--

## Studium

10/91 – 05/96	Technische Universität München Studiengang: Technische Physik
---------------	--

## Berufstätigkeit

11/96 – 06/97	Prozessingenieur bei Procter & Gamble, Werk Euskirchen
08/97 – 08/01	Wissenschaftlicher Mitarbeiter der Abteilung Prozesstechnik am IPH - Institut für Integrierte Produktion Hannover gemeinnützige GmbH
Seit 10/01	Consultant bei Siemens CT