

Diplomarbeit

# Thermische Auslegung und Validierung von Warmformwerkzeugen am Beispiel einer B Säulen- Geometrie

Verfasser  
Michael Machhammer

**Institut für Werkzeugtechnik & Spanlose Produktion**  
Technische Universität Graz  
Vorstand: Univ. Prof. Dr.- Ing. Ralf Kolleck  
Betreuer: Dipl.-Ing. Weiß Wolfgang

Graz, 21. April 2013

## Danksagung

Die vorliegende Diplomarbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit am Institut für Werkzeugtechnik & Spanlose Produktion. Besonderer Dank gilt Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ralf Kolleck, der mir die Möglichkeit gegeben hat, diese Diplomarbeit am Institut zu verfassen.

Für die ausgezeichnete Betreuung bei meiner Diplomarbeit bedanke ich mich sehr herzlich bei Herrn Dipl.-Ing. Wolfgang Weiß.

Ganz besonderer Dank gilt meinen Eltern, durch deren Unterstützung ich meine Ausbildung an der Technischen Universität Graz durchführen konnte.

## Eidesstattliche Erklärung

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

Graz, am 21. April 2013

.....

(Unterschrift)

## Statutory Declaration

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

Graz, April 21st, 2013

.....

(signature)

## Kurzfassung

Die Auslegung eines Warmumformwerkzeuges ist eine technische Herausforderung. In der Designphase dieser Werkzeuge ist die Simulation ein nicht mehr wegzudenkendes Hilfsmittel, um qualitativ gute Produkte zu erzielen. Die Abbildung eines Warmumformprozesses setzt mehr voraus, als ein konventioneller Kaltumformprozess. Es handelt sich nicht nur um eine Problemstellung der Strukturmechanik, sondern um einen thermisch-mechanisch gekoppelten Ansatz. Es gibt mehrere Strategien, um den Warmumformprozess in einem Simulationsmodell virtuell abzubilden. Die einfachste Variante ist das Erstellen eines thermisch-mechanisch gekoppelten Schalen-Modells, bei dem mit einer konstanten Werkzeugtemperatur gerechnet wird. Bei der Ermittlung des Erwärmungsverhaltens der Werkzeuge reicht der Einsatz des Schalenmodells nicht mehr aus. Um die thermische Werkzeugcharakteristik im Detail zu betrachten, wird ein thermisch-mechanisch gekoppeltes Volumenmodell benötigt.

*Einleitung*

In dieser Arbeit wird ein Schalen/Volumen-Modell erstellt. Des Weiteren werden Temperaturmessungen an einem realen Versuchswerkzeug mittels Thermoelementen und Pyrometern durchgeführt. Mit den aufgezeichneten Werten werden die Ergebnisse der Simulationsmodelle validiert.

*Inhalt der Arbeit*

Ziel ist es, die Effektivität und Effizienz der Simulation mit unterschiedlichen Modellvarianten in der Warmumformung darzustellen und die Ergebnisse mit Messungen an dem Versuchswerkzeug abzugleichen.

*Ziel der Arbeit*

## Abstract

The designing of a hot forming tool is a technical challenge. In the design phase of these tools, simulation is a crucial aid for obtaining high quality products. The imaging of a press hardening process requires more than just the conventional cold forming process. It is no longer simply about the presentation of a problem in the structural mechanics but rather about the thermal-mechanical procedure. There are several strategies for the virtual mapping of the hot forming process in a simulation model. The simplest method is to draft a coupled thermal-mechanical shell model, for which a constant cavity temperature is assumed.

*Introduction*

The shell model is, however, no longer sufficient when it comes to determining the tool's temperature rise. In order to evaluate the thermal characteristics of the tool in detail, a coupled thermal-mechanical volume model is required.

*Content*

This piece of work includes the creation of a shell-and a volume model. Temperature measurements of the actual experimental tool will also be carried out using thermo elements and pyrometers. The results from the simulation models will be validated by the recorded values.

The aim of this work is to present the effectiveness of simulation for heat forming.

*Aim*

## Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1-1
2	Stand der Technik.....	2-4
2.1	Werkzeugbau im Bereich Presshärten.....	2-4
2.2	Modellierungsansätze im Bereich Warmumformung.....	2-8
2.3	Verwendete Software.....	2-11
3	Zielsetzung und Vorgehensweise.....	3-12
4	Das Versuchswerkzeug.....	4-14
4.1	Aufbau des Werkzeuges.....	4-14
4.2	Versuchsaufbau und Prozessparameter des Werkzeugsystems.....	4-16
4.3	Positionierung der Messsysteme.....	4-17
4.4	Verwendete Messinstrumente.....	4-21
5	Das Simulationsmodell.....	5-25
5.1	Problemstellung des Warmumformprozesses.....	5-25
5.2	Modellierung der Werkzeuge.....	5-26
5.3	Elementformulierung.....	5-28
5.4	Kontaktformulierung.....	5-31
5.5	Materialformulierung.....	5-34
5.6	Thermische Modellierung.....	5-38
5.7	Mechanische Modellierung.....	5-42
5.8	Anfangs- und Randbedingungen.....	5-44
5.9	Explizites und implizites Lösungsverfahren.....	5-46
5.10	Massenskalierung und Zeitskalierung.....	5-48
5.11	Eingabeparameter.....	5-50
6	Ermittlung der Wärmeübergangskoeffizienten.....	6-51
6.1	Ermittlung des konvektiven Übergangskoeffizienten an der Kühlkanalwand.....	6-51
6.2	Ermittlung des Wärmeübergangskoeffizienten zwischen Platine und Umgebung.....	6-56
6.3	Ermittlung des effektiven Übergangskoeffizienten der Platine an die Umgebung.....	6-59
7	Vergleich von Simulations- und Messergebnissen.....	7-62
7.1	Validierung der Simulationsergebnisse des Schalen/Volumen-Modells in LS-Dyna.....	7-62
7.2	Vergleich des ermittelten Wärmeübergangskoeffizienten an der Kühlkanalwand.....	7-71
7.3	Vergleich der Simulationsergebnisse des Schalen-Modells in Ls-Dyna und AutoForm..	7-72
8	Zusammenfassung & Ausblick.....	8-76
9	Literaturverzeichnis.....	9-78

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Zugfestigkeit $R_m$ in Abhängigkeit der Bruchdehnung $\epsilon_B$ [8] .....	1-1
Abbildung 2	Stufen eines Presshärteprozesses [9] .....	1-2
Abbildung 3	Prinzip des Kühlsystems [10] .....	1-2
Abbildung 4	ZTU-Schaubild 1.5528 (22MnB5) [12] .....	1-3
Abbildung 5	Prinzip der Kanalführung [14] .....	2-5
Abbildung 6	segmentierte B-Säule mit gebohrten Kühlkanälen .....	2-5
Abbildung 7	Übergang von zwei Bohrungen .....	2-5
Abbildung 8	Prinzip Schalenbauweise [14] .....	2-6
Abbildung 9	Aufbauprinzip eines Lamelliertes Werkzeug [13] .....	2-7
Abbildung 10	Kühlkanalsystem [13] .....	2-7
Abbildung 11	Prototyp eines Werkzeuges mit eingegossene Kanälen [13] .....	2-7
Abbildung 12	Produktionsstufen der Oberflächennahen Kühlung[15] .....	2-8
Abbildung 13	Einschätzung der Modellierungsansätze[16] .....	2-10
Abbildung 14	Gesamtwerkzeug .....	4-14
Abbildung 15	Aufbau der gekühlten Matrize .....	4-15
Abbildung 16	Fertig montiertes Stempelwerkzeug .....	4-15
Abbildung 17	Aufbau Blechhalter .....	4-16
Abbildung 18	Versuchsaufbau .....	4-17
Abbildung 19	Position Mantelthermoelement .....	4-18
Abbildung 20	Schnitt Pyrometer und Einbauansicht .....	4-18
Abbildung 21	Pyrometermessfeld .....	4-19
Abbildung 22	Mantelthermoelement Abfluss .....	4-19
Abbildung 23	Pyrometer Platinentemperaturmessung .....	4-20
Abbildung 24	Infrarotkamera FLIR A305 .....	4-20
Abbildung 25	Mantelthermoelement K[19] .....	4-21
Abbildung 26	Pyrometer PQ26 AF[21] .....	4-22
Abbildung 27	Messfeldverlauf (Messkopf Durchmesser 16) und Einbausituation [21] .....	4-23
Abbildung 28	Einfluss von Strahlung aus der Umgebung (z. B. Ofen) [21] .....	4-24
Abbildung 29	Mechanische und thermische Einflussgrößen beim Presshärten [16] .....	5-25
Abbildung 30	Diskretisierung der Werkzeuge und der Platine .....	5-26
Abbildung 31	Vergleich feines Netz und grobes Netz .....	5-27
Abbildung 32	Aufbau der 2 Modellvarianten .....	5-28
Abbildung 33	Spannungen beim Membranansatz [23] .....	5-29
Abbildung 34	Spannungen beim Schalenansatz [23] .....	5-30
Abbildung 35	Wärmeleitung über die Blechdicke im Schalenelement .....	5-30
Abbildung 36	Einteilung der Elementtypen auf die unterschiedlichen Modelle .....	5-31
Abbildung 37	Penalty-Kontakt Elementnormale [24] .....	5-32
Abbildung 38	Darstellung des Gaps zwischen Werkzeug und Bauteil .....	5-32
Abbildung 39	Definition des Kontaktes im LSDyna [16] .....	5-33
Abbildung 40	Verlauf des Wärmeüberganges in Abhängigkeit des Kontaktes .....	5-33
Abbildung 41	Einteilung der Materialeigenschaften .....	5-34
Abbildung 42	Temperaturabhängigkeit der Fließkurve, 1.5528 (22MnB5 Stahl) [9] .....	5-35
Abbildung 43	Dehnratenabhängigkeit der Fließkurve, 1.5528 (22MnB5) [25] .....	5-35
Abbildung 44	Zeit-Temperaturverlauf des Bauteils beim Presshärten .....	5-37

Abbildung 45	Positionierung der Platine .....	5-39
Abbildung 46	Temperaturabhängiger Wärmeübergangskoeffizient [9] .....	5-40
Abbildung 47	Wärmefluss bei Kontakt von zwei Körpern [28] .....	5-40
Abbildung 48	Wärmestrom von Werkzeug und Kühlkanäle .....	5-41
Abbildung 49	Wärmeübertragung in der Regenerationsphase .....	5-42
Abbildung 50	Geschwindigkeit -Zeitverlauf Matrize .....	5-43
Abbildung 51	Geschwindigkeit -Zeitverlauf Blechhalter .....	5-43
Abbildung 52	Einteilung der thermischen Randbedingungen .....	5-45
Abbildung 53	Temperaturabhängiger Wärmeübergangskoeffizient .....	5-46
Abbildung 54	Einteilung der Lösungsverfahren in AutoForm und Ls-Dyna .....	5-48
Abbildung 55	Pumpenanlageplan .....	6-51
Abbildung 56	Pumpenkennlinie CR/CRE 15 [31] .....	6-52
Abbildung 57	gemessene Temperatur in Kühlkanalnähe (Matrize) .....	6-54
Abbildung 58	Vergleich Gnielinski mit Dittus und Boelter .....	6-56
Abbildung 59	Platine am Blechhalter .....	6-57
Abbildung 60	Fluidströmung Heiße Platte Position Oben [7] .....	6-57
Abbildung 61	Fluidströmung Heiße Platte Position Unten [7] .....	6-59
Abbildung 62	Position Thermokabel .....	7-62
Abbildung 63	Vergleich von Messung des Thermoelementes 1 und der Simulation .....	7-63
Abbildung 64	Vergleich von Messung des Thermoelementes 2 und Simulation .....	7-64
Abbildung 65	Messpunkt 2 in der Abkühlphase .....	7-65
Abbildung 66	Vergleich von Messung des Thermoelementes 3 und Knoten 313421 .....	7-66
Abbildung 67	Oberflächen-Temperatur-Verteilung der Matrize nach Blechhalterschluss .....	7-66
Abbildung 68	Oberflächen-Temperatur-Verteilung der Matrize in der Abkühlphase .....	7-67
Abbildung 69	Faltenbildung im Flanschbereich .....	7-67
Abbildung 70	Abkühlung der Platine im Knoten 2353115 .....	7-68
Abbildung 71	Abkühlung der Platine im Knoten 2352099 .....	7-69
Abbildung 72	Messrichtung des Pyrometers .....	7-69
Abbildung 73	Temperaturmessung mittels Thermocam .....	7-70
Abbildung 74	Simulationsergebnis Temperaturverteilung der Platine .....	7-70
Abbildung 75	Wärmeübergangskoeffizient von 9635 W/m <sup>2</sup> K .....	7-71
Abbildung 76	Wärmeübergangskoeffizient von 3500 W/m <sup>2</sup> K .....	7-72
Abbildung 77	Temperaturverteilung der Platine [Ls_Dyna] .....	7-73
Abbildung 78	Temperaturverteilung der Platine [AutoForm] .....	7-73
Abbildung 79	Knoten 1 .....	7-74
Abbildung 80	Knoten 2 .....	7-74
Abbildung 81	Knoten 3 .....	7-75
Abbildung 82	Erwärmungsbereich des Stempels .....	8-77



## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Prozessparameter .....	4-17
Tabelle 2	Emissionsgrade $\epsilon(T)$ unterschiedlicher Materialien [1] .....	4-22
Tabelle 3	Dehnrateparameter c und p bei unterschiedlichen Temperaturen, 1.5528 [26] .....	5-36
Tabelle 4	temperaturabhängige Werkstoffparameter 1.5528 (22MnB5) [26] .....	5-37
Tabelle 5	temperaturabhängige Werkstoffparameter CR7V-L [27] .....	5-38
Tabelle 6	Merklein Daten [29] .....	5-41
Tabelle 7	Prozesszeit des Versuchsablaufs .....	5-43
Tabelle 8	Eingabeparameter .....	5-50
Tabelle 9	Werte für die Berechnung der Verlusthöhe .....	6-52
Tabelle 10	Stoffwerte Wasser bei 18°C und Kanalgeometriewerte .....	6-53
Tabelle 11	Ergebnisse nach Gnielinski .....	6-55
Tabelle 12	Ergebnisse nach Dittus und Boelter .....	6-55
Tabelle 13	Werte für die Berechnung .....	6-56
Tabelle 14	Werte für die Berechnung .....	6-60

## Formelverzeichnis

Gleichung 1	Stefan-Boltzmann-Gesetz	4-21
Gleichung 2	Wärmestromdichte eines realen Strahlers [1]	4-22
Gleichung 3	Modell nach Cowper und Symonds [2]	5-36
Gleichung 4	Wärmestrom durch Kontakt [1]	5-40
Gleichung 5	Wärmestrom durch Konvektion [1]	5-44
Gleichung 6	Wärmestrom durch Strahlung [1]	5-44
Gleichung 7	Konvektive Randbedingung	5-44
Gleichung 8	Wärmestrom durch Strahlung und Konvektion	5-44
Gleichung 9	kritischer Zeitschritt [3]	5-46
Gleichung 10	Ausbreitung des Schalles in einem Werkstoff [3]	5-46
Gleichung 11	Erhöhung des kritischen Zeitschrittes durch Hinzugeben von Masse [4]	5-48
Gleichung 12	thermischer Zeitschritt [4]	5-49
Gleichung 13	Biot- Zahl und Fourier- Zahl [21]	5-49
Gleichung 14	Kontinuitätsgleichung [5]	6-52
Gleichung 15	Bernoulligleichung [5]	6-52
Gleichung 16	Förderhöhe der Anlage [5]	6-52
Gleichung 17	Querschnitt Kühlkanal	6-53
Gleichung 18	Summe aller Kühlkanalquerschnitte	6-53
Gleichung 19	Geschwindigkeit Kühlmedium [6]	6-53
Gleichung 20	Reynoldszahl [6]	6-54
Gleichung 21	Nusseltzahl [6]	6-54
Gleichung 22	Widerstandsbeiwert [6]	6-54
Gleichung 23	Nusseltzahl [6]	6-54
Gleichung 24	Nusseltzahl nach Dittus und Boelter [6]	6-55
Gleichung 25	Wärmeübergangskoeffizient Kühlkanal [6]	6-55
Gleichung 26	Wärmeübergangskoeffizient der oberen Platineschicht [7]	6-56
Gleichung 27	Rayleigh Zahl 750°C Platinetemperatur [7]	6-58
Gleichung 28	Nusseltzahl [7]	6-58
Gleichung 29	Filmtemperatur [7]	6-58
Gleichung 30	Wärmeausdehnungskoeffizient [7]	6-58
Gleichung 31	Charakteristische Länge [7]	6-58
Gleichung 32	Nusseltzahl [7]	6-59
Gleichung 33	Wärmeübergangskoeffizient der unteren Platinenschicht [7]	6-60
Gleichung 34	Wärmeübergangskoeffizienten Konvektion [7]	6-60
Gleichung 35	Wärmestrom Strahlung [1]	6-60
Gleichung 36	Wärmeübergangskoeffizient Strahlung [1]	6-61
Gleichung 37	Effektiver Wärmeübergangskoeffizient	6-61

## Formelzeichen

$\dot{q}$	W	Wärmestrom
$\alpha$	W/m <sup>2</sup> K	Wärmeübergangskoeffizient
$A$	m <sup>2</sup>	Fläche
$T_1$	°C	Temperatur
$T_2$	°C	Umgebungstemperatur
$\varepsilon$		Emissionskoeffizient
$\sigma$	W/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup>	Stefan-Boltzmann-Konstanten
$\sigma_{dyn}$	N/mm <sup>2</sup>	Dynamische Fließspannung
$\sigma_{stat}$	N/mm <sup>2</sup>	Statische Fließspannung
$C$		Cowper-Symonds C
$p$		Cowper-Symonds p
$\lambda$	W/mK	Wärmeleitfähigkeit
$c_p$	kJ/kgK	Spezifische Wärmekapazität
$L_{min}$	mm	Minimaler Gap
$L_{max}$	mm	Maximaler Gap
$\Delta t_{therm}$	s	Thermischer Zeitschritt
$L_{Element}$	m	Minimale Elementkantenlänge
$a$	m <sup>2/s</sup>	Temperaturleitfähigkeit
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	Dichte
$\Delta t$	s	Kritischer Zeitschritt
$v$	m/s	Wellenausbreitungsgeschwindigkeit
$E$	N/mm <sup>2</sup>	E-Modul
$Fo$		Fourier-Zahl
$Bi$		Biot-Zahl
$m$	kg	Masse
$\Delta m$	kg	Dazugegebene Masse
$z_1$	m	Höhe 1
$z_2$	m	Höhe 2
$p_1$	bar	Druck an der Stell 1
$p_2$	bar	Druck an der Stelle 2
$A_1$	m <sup>2</sup>	Querschnitt an der Stelle 1
$A_2$	m <sup>2</sup>	Querschnitt an der Stelle 2
$d$	m	Kanaldurchmesser
$\dot{Q}$	m <sup>3</sup> /s	Volumenstrom
$c$	m/s	Fluidgeschwindigkeit
$H_v$	m	Verlusthöhe
$H_{geo}$	m	Geodätische Höhe
$H_A$	m	Förderhöhe der Anlage
$\nu$	m <sup>2</sup> /s	kinematische Viskosität
$Pr$		Prandtl Zahl
$Re$		Reynolds Zahl

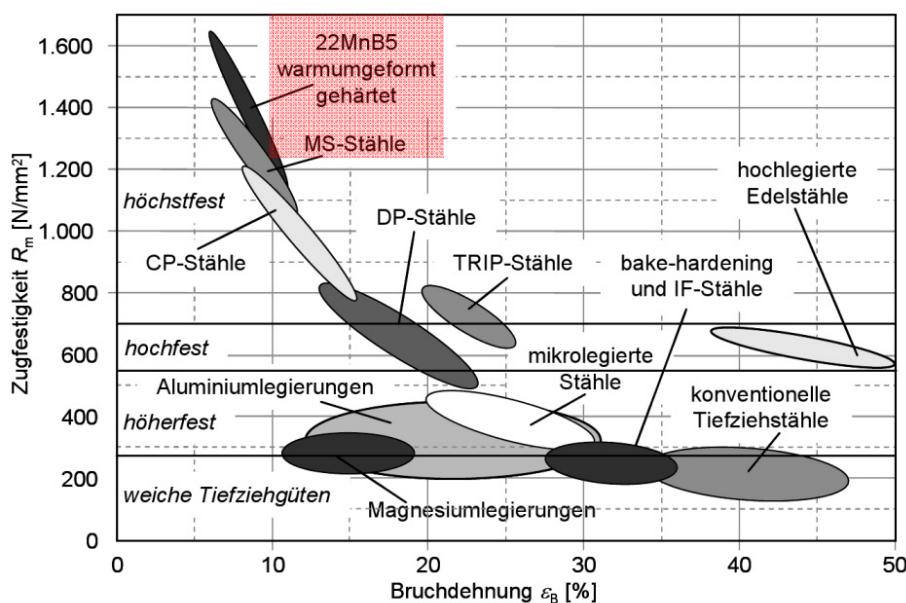
---

$\xi$		Widerstandsbeiwert
$Nu$		Nußelt Zahl
$U$	m	Umfang
$T_f$	°C	Filmtemperatur
$\beta$	K <sup>-1</sup>	Wärmeausdehnungskoeffizient
$R_{aL}$		Rayleigh Zahl
$g$	m/s <sup>2</sup>	Erdbeschleunigung
$\dot{q}_s$	W/m <sup>2</sup>	Wärmestromdichte

# 1 Einleitung

In den letzten Jahren hat die Technologie Warmumformung im Produktionssektor von Karosseriebauteilen immer mehr an Bedeutung gewonnen. Durch das Einsparen von Gewicht, bei gleichzeitiger Erhöhung der Fahrzeugsicherheit, findet speziell in der Automobilbranche die Warmumformung seine Anwendung. Dazu gehören insbesondere A- und B-Säulen, Stoßstangenfänger, Querträger für Boden und Dach, Seitenaufprallschutzträger und Rahmenteile.

*Einführung  
Warmumformung*

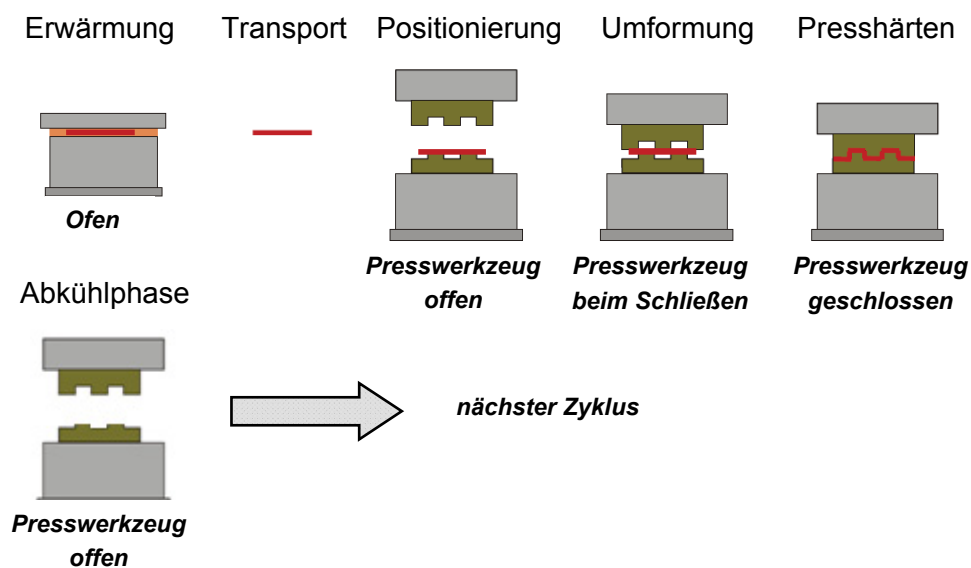


**Abbildung 1 Zugfestigkeit  $R_m$  in Abhängigkeit der Bruchdehnung  $\epsilon_B$  [8]**

Um die Materialcharakteristik eines höchstfesten Werkstoffes (siehe Abbildung 1) wie dem martensit-aushärtbaren Vergütungsstahl 22MnB5 zu erzielen, muss neben dem Umformen das Bauteil einer Wärmebehandlung unterzogen werden. Durch die Kombination von Umformen und Abschrecken (Presshärten) in einem Prozess, ist es möglich Bauteilfestigkeiten bis zu  $R_m > 1700 \text{ MPa}$  umzusetzen. Zusätzlich nützt die Fertigungstechnologie Presshärten den Vorteil der Warmumformung um Bauteile mit komplexer Geometrie mit geringer Rückfederung in einem Zug tiefzuziehen. Die Prozessführung des Presshärtens gliedert sich in mehrere Prozessstufen, von der Erwärmung der Platine bis zur Abkühlphase der Umformwerkzeuge (siehe Abbildung 2).

*22MnB5*

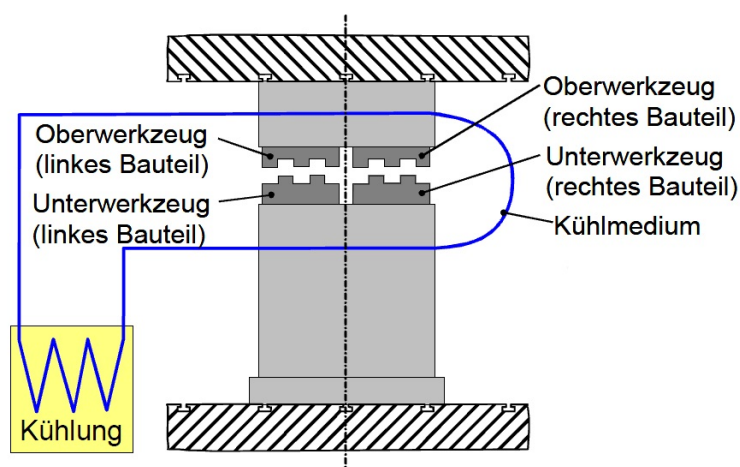
*Vorteil der Technologie  
Presshärten*



**Abbildung 2 Stufen eines Presshärteprozesses [9]**

Die Platine muss auf ca. 950 °C im Ofen erwärmt werden, um deutlich über Austenitisierungstemperatur (Ac3) zu gelangen (siehe Abbildung 4). Dabei wandelt sich das ferritische Ausgangsgefüge bei Raumtemperatur in ein homogenes austenitisches Gefüge um. Danach wird die erwärmte Platine des 22MnB5 in ein Presswerkzeug transportiert. Beim Schließen des mit einer internen Wasserkühlung ausgestatteten Werkzeuges wird das Bauteil umgeformt und zeitgleich abgeschreckt. Während des Umformprozesses müssen die Werkzeuge eine ausreichende Kühlleistung bereitstellen, um im Serienbetrieb durch die Wärmeaufnahme vom Bauteil nicht zu überhitzen. Ein prinzipieller Aufbau eines Kühlsystems ist in Abbildung 3 dargestellt. Durch Maßnahmen, wie das Aufbringen einer Al-Si-Beschichtung, wird das Verzundern der Oberfläche des Bauteils während des Prozesses unterbunden.

*Kurzbeschreibung  
Verfahrensprozess  
Presshärten*



**Abbildung 3 Prinzip des Kühlsystems [10]**

Qualitativ hochwertiges Presshärten kann nur dann realisiert werden, wenn das Umformwerkzeug die notwendige Kühlleistung garantiert und die nötige, Abkühlgeschwindigkeit von mindestens 27 °C/s bewerkstelligt. Hinzukommend darf die Werkzeugtemperatur nicht über 200 °C steigen, da andernfalls die Standzeit der Werkzeuge verkürzt wird und die Martensit-Finish-Temperatur nicht schnell genügend erreicht werden kann. In Abbildung 4 wird der Zeit-Temperaturverlauf und der jeweilige Gefügestand beim Presshärten dargestellt.[11]

Anforderungen an das Werkzeug

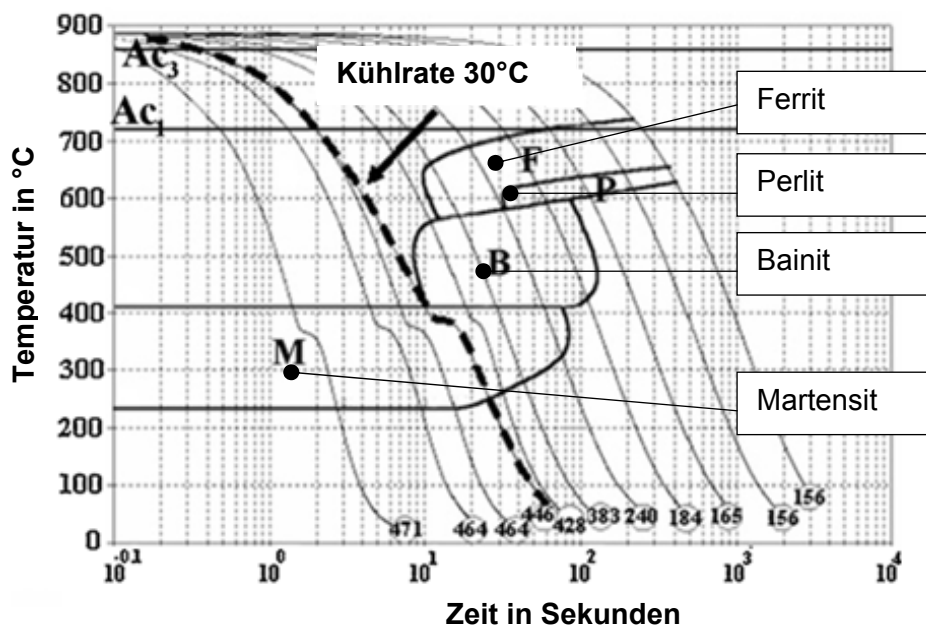


Abbildung 4 ZTU-Schaubild 1.5528 (22MnB5) [12]

Um diese Werkzeuganforderungen erfüllen zu können, stehen der Werkzeugentwicklung Simulationsmethoden und Versuchswerkzeuge für die Ermittlung des optimalen Kühlkanaldesigns zur Verfügung. Die Simulation ist aufgrund der hohen Ergebnisqualität ein wichtiges Werkzeug in der Entwicklungskette und wird ständig fokussiert weiterentwickelt.

Simulation als Hilfsmittel

## 2 Stand der Technik

In diesem Kapitel werden unterschiedliche Ausführungen der Kühlung von Presshärtewerkzeugen dargestellt. Des Weiteren werden die angewandten Modellierungsansätze im Bereich der Warmumformung erklärt. Abschließend werden Software-Produkte, mit denen die Umsetzung der Ansätze möglich ist, kurz beschrieben.

### 2.1 Werkzeugbau im Bereich Presshärten

In Kapitel 1 wurde erwähnt dass eine minimale Abkühlgeschwindigkeit von 27°C und eine kritische Werkzeugtemperatur von 200°C einzuhalten sind, daraus ist abzuleiten, dass die Kühlleistung neben der thermo-mechanischen Belastbarkeit die Qualität des Werkzeuges bestimmt. In dieser Arbeit wird ausschließlich die thermische Beanspruchung der Werkzeuge beachtet und keine weiteren Kriterien im Werkzeugbau. Unterschiedliche Konzepte zur Temperierung von Warmumformwerkzeugen werden weiter folgend erklärt.

- **Segmentbauweise**

Die Segmentbauweise ist die am meisten erprobte Variante und wird in der Produktionstechnik auch überwiegend eingesetzt. Das Werkzeug wird in einzelne Segmente geteilt und mit Sacklochbohrungen und Querlochbohrungen versehen. Konstruktionskriterien sind die maximale Bohrtiefe und die Komplexität der Geometrie. Die Aufteilung der Segmente richtet sich nach der Krümmung der Geometrie. Je komplexer die Geometrie, umso öfters muss das Werkzeug unterteilt werden. In Abbildung 5 wird die Ausführung von gebohrten Segmenten gezeigt. Die Öffnungen der Bohrungen an den Teilungsflächen werden mittels Stopfen verschlossen und abgedichtet. [13]

*Methodenbeschreibung  
Segmentbauweise*



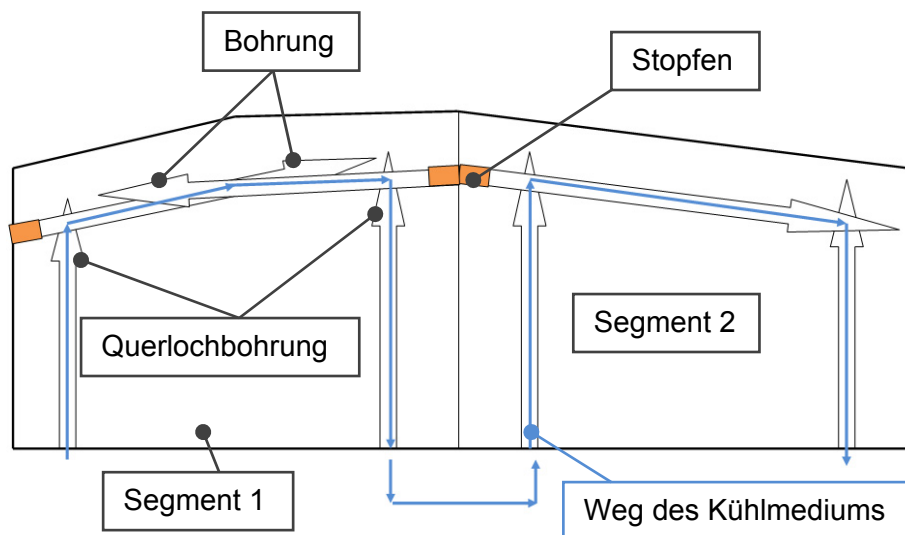


Abbildung 5 Prinzip der Kanalführung [14]

In Abbildung 6 wird ein segmentiertes Werkzeug mit gebohrten Kühlkanälen gezeigt.

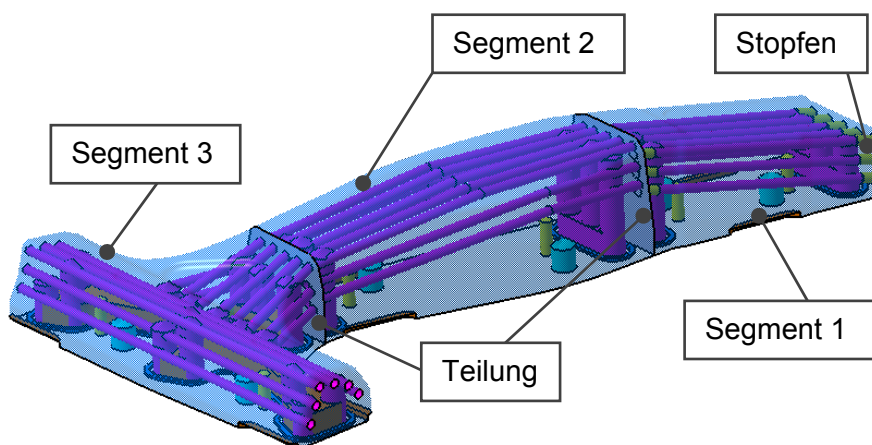


Abbildung 6 segmentierte B-Säule mit gebohrten Kühlkanälen

Im scharfkantigen Übergangsbereich von zwei aufeinandertreffenden Bohrungen kann es zu einem Totgebiet in der Strömung kommen, welche sich nachteilig auf die Wärmeabfuhr auswirken (siehe Abbildung 7). [14]

*Nachteil Querlochbohrung*

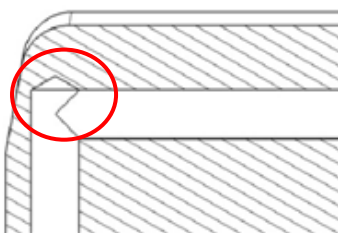


Abbildung 7 Übergang von zwei Bohrungen

- **Schalenbauweise**

Es werden Kühlkanäle in die Werkzeugoberfläche entlang der Kontur oberflächennah eingefräst und abschließend mit einer passgenauen Schale versiegelt. Somit sind ideale Voraussetzungen für eine homogene Wärmeabfuhr gegeben, da der Wärmeleitweg von Blech zum Kühlkanal minimiert wird (siehe Abbildung 8).

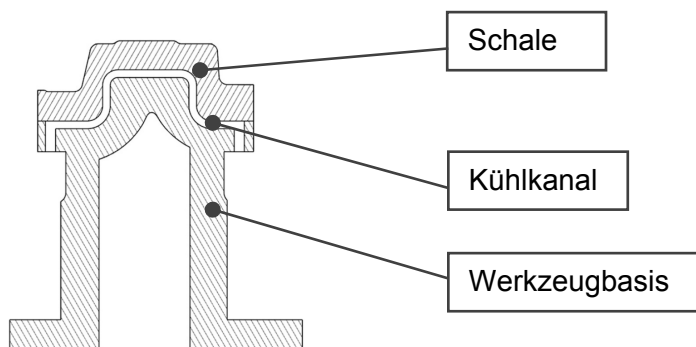
*Methodenbeschreibung  
Schalenbauweise*

Der hohe Fräsaufwand spiegelt sich in steigenden Kosten wider und darüber hinaus können Dichtheitsprobleme zwischen Werkzeugbasis und Schale auftreten.

*Nachteil*

Mit diesem Konzept wird auch bei komplexen Geometrien eine gleichmäßig homogene Wärmeverteilung erreicht.[14]

*Vorteil*



**Abbildung 8 Prinzip Schalenbauweise [14]**

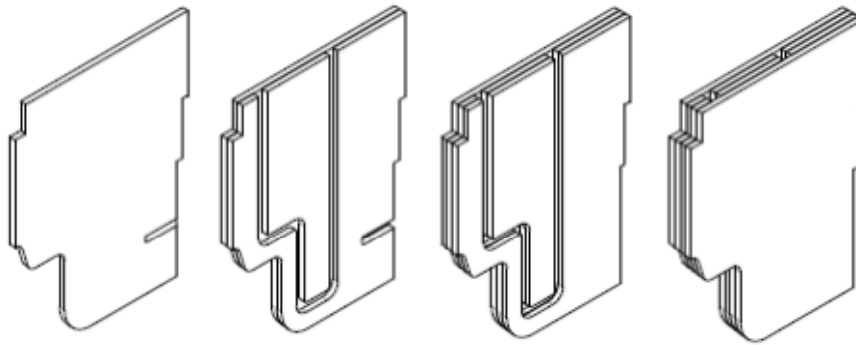
- **Lamellen-Konzept**

Es werden laserbeschnittene Bleche, welche die aufgeteilte Kontur und Kühlkanäle des gewünschten Werkzeuges verkörpern, verpresst. Die Schichten werden mit einem Zuganker montiert und mit Backlack im Ofen vereinigt. Danach wird das Werkzeug überfräst, um die Zielform zu erreichen (siehe Abbildung 9).

*Methodenbeschreibung  
Lamellenkonzept*

Die Vorteile liegen ausschließlich in kurzen Fertigungszeiten und in der genauen Anpassung der Kühlkanäle an die Form. Diese Art wird aufgrund der Temperaturbeständigkeit und der niedrigen Festigkeit des Backlackes meist im Prototypenbau eingesetzt. [13]

*Vorteil und Einsatzgebiet*



**Abbildung 9** Aufbauprinzip eines Lamelliertes Werkzeug [13]

- **Eingegossene Kühlkanäle**

Einzelne Rohrleitungen oder Rohrfittings werden passend zur Werkzeugkontur zusammengefügt und anschließend zu einem Kühlkanalsystem verschweißt (siehe Abbildung 10).

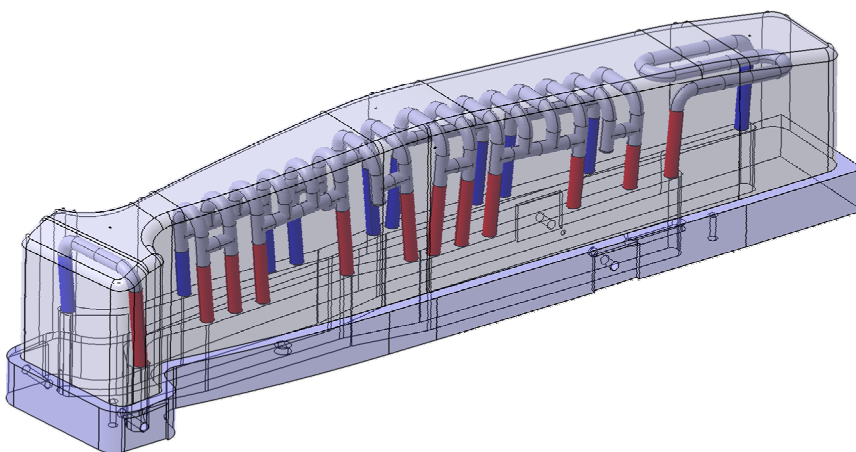
*Methodenbeschreibung  
Eingegossene Kühlkanäle*



**Abbildung 10** Kühlkanalsystem [13]

Anschließend werden die Kanäle in Grau- oder Sphäroguss eingegossen und die Oberfläche spanend auf Endform gebracht (siehe Abbildung 11). Durch Auftragen einer abrasionsbeständigen Laserauftragsschweißschicht kann die Standzeit des Werkzeuges verlängert. [13]

*Eingießen der Kühlkanäle*



**Abbildung 11** Prototyp eines Werkzeuges mit eingegossene Kanälen [13]

Es ist möglich, dieses Konzept für komplexe Konturen kostengünstig anzuwenden. Nur durch den minimalen Biegeradius der Rohre sind Grenzen gesetzt. Ein hoher Standard an „Know-How“ ist notwendig. [14]

*Vorteil*

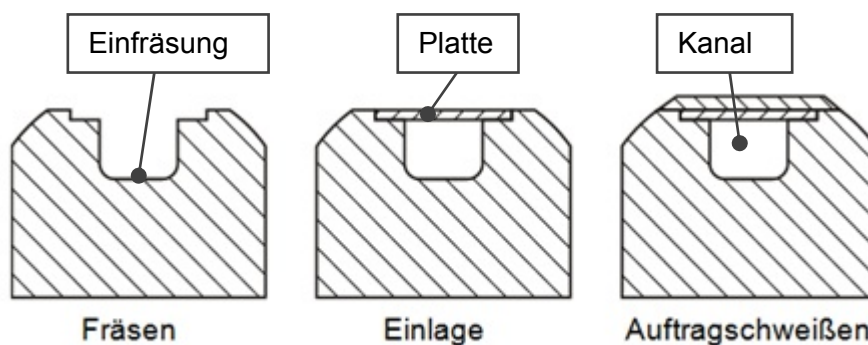
Beim Einschmelzen der Rohrleitungen kann es zur Aufschmelzungen der Schweißnähte durch Überhitzung kommen. [13]

*Nachteil*

- **Oberflächennahe Kühlung**

Ein neues Kühlprinzip ist das oberflächennahe Kühlen. Der erste Schritt ist das Einfräsen von Kühlnuten in die Oberflächenkontur, weiterfolgend werden diese mit Einlagen aus Baustahl abgedeckt. Im darauffolgenden Schritt wird mittels Auftragschweißen das Werkzeug mit einer abrasionsbeständigen, thermisch stabilen Schicht überzogen (siehe Abbildung 12).[15]

*Methodenbeschreibung  
Oberflächennahe Kühlung*



**Abbildung 12 Produktionsstufen der Oberflächennahen Kühlung[15]**

Durch das Auftragen der harten, thermisch und mechanisch stabilen Schicht, ist der Einsatz eines Grundwerkstoffes mit geringen Anforderungen an die Festigkeit möglich, wodurch die Kosten des Werkzeuges reduziert werden. Ein weiterer Vorteil ist die oberflächennahe Ausführung der Kühlkanäle, wodurch eine effiziente und gleichmäßige Kühlung der Werkzeuge zustande kommt.

*Vorteil*

## 2.2 Modellierungsansätze im Bereich Warmumformung

Bei der Simulation von Warmumformprozessen sind mehrere Methoden prinzipiell möglich. Ist primär der eigentliche Umformvorgang von Bedeutung, dann ist eine isotherme Umformsimulation mit einer angenommenen mittleren Umformtemperatur die einfachste virtuelle Annäherung. Dieser Ansatz ist jedoch durch das Vernachlässigen der hohen Abkühlrate, bei Kontakt zwischen Werkzeug und Blech, für die meisten Anwendungen ungeeignet. In den nächsten drei Punkten werden Modellierungsansätze beschrieben, welche einen Warmumformprozess mit einer guten Annäherung virtuell abbilden.

- **Thermisch-mechanisch gekoppeltes Schalen-Modell**

Bei dieser Methodik wird eine thermisch-mechanisch gekoppelte Simulation mit Wärmeübergang zwischen Werkzeug und Bauteil, bei Annahme einer mittleren Werkzeugtemperatur aufgebaut. Die Werkzeuge und die Platine werden mit Schalenelementen modelliert. Der Vorteil dieses Ansatzes gegenüber der isothermen Methodik ist das Einbeziehen der Abkühlung und somit das Berücksichtigen der inhomogenen Temperaturverteilung des Bleches während des Prozesses. Der Nachteil dieser Variante ist, dass die Werkzeugerwärmung nicht berücksichtigt wird. Durch die tatsächliche Erwärmung des Werkzeuges im Realprozess und der gleichzeitigen Abkühlung des Bleches sinkt der Temperaturgradient zwischen Werkzeug und Bauteil. Das bedeutet, dass auch der Wärmestrom zwischen Blech und Werkzeug abfällt. Bei der Annahme von konstanten Werkzeugtemperaturen die niedriger als die realen Temperaturen der Werkzeuge ist kommt es in diesem Ansatz zu einer Überschätzung des Temperaturgradienten und das führt zu einer schnelleren Abkühlung des Bleches. Speziell in der Werkzeugauslegung ist auch der Grad der Inhomogenität der Temperaturverteilung am Werkzeug ein wichtiger Punkt, da sogenannte „Temperatur Hotspots“ durch nicht effiziente Werkzeugkühlungen unerwünscht sind. Diese Inhomogenität der Werkzeugtemperaturen kann mit dem thermisch-mechanisch gekoppelten Schalen-Modell nicht berücksichtigt werden. Vielmehr muss die mittlere Werkzeugtemperatur aus Erfahrungswerten angenommen werden.

- **Thermisch-mechanisch gekoppeltes Volumen-Modell**

Um auch die Werkzeugerwärmung zu behandeln, können die Werkzeuge mittels Volumenelemente und die Platine mit Schalenelementen oder Volumenelemente modelliert werden. Der Vorteil dabei ist eine sehr gute Annäherung an das reale Ergebnis. Der Nachteil des thermisch-mechanisch gekoppelten Volumen-Modells ist die hohe Anzahl an Elementen und Knoten, wodurch es zu sehr lange Rechenzeiten bei komplexen Aufgabenstellungen kommt.

- **Thermisch-mechanisch gekoppeltes Schalen/Volumen - Modell**

Um die Rechenzeit zu verkürzen, gibt es die Möglichkeit die Werkzeuge im thermisch-mechanisch gekoppelten Volumen-Modell durch eine Kombination von Schalen- und Volumenelementen zu erweitern. Bei dem Ansatz des thermisch-mechanisch gekoppelten Schalen/Volumen Modells übernimmt das fein vernetzte Schalenmodell des Werkzeuges den mechanischen Teil der Simulation, während das grob vernetzte Volumenmodell des Werkzeuges nur die thermische Simulation abbildet. Beide Modelle sind über einen thermischen Kontakt miteinander gekoppelt. Der Vorteil dieser Variante ist die kürzere Rechenzeit gegenüber dem thermisch-mechanisch gekoppelten Volumen Modell bei annähernd gleicher Qualität der Ergebnisse. Im Vergleich zum thermisch-mechanisch gekoppelten Schalenmodell sind die Rechenzeiten noch sehr hoch.

In Abbildung 13 werden die zuvor genannten Modelle im Vergleich zur konventionellen Umformsimulation durch die Abhängigkeit von Vorhersagemöglichkeit und Komplexitätsgrad dargestellt. Mit steigenden Anforderungen an das Simulationsmodell steigt der Aufwand.

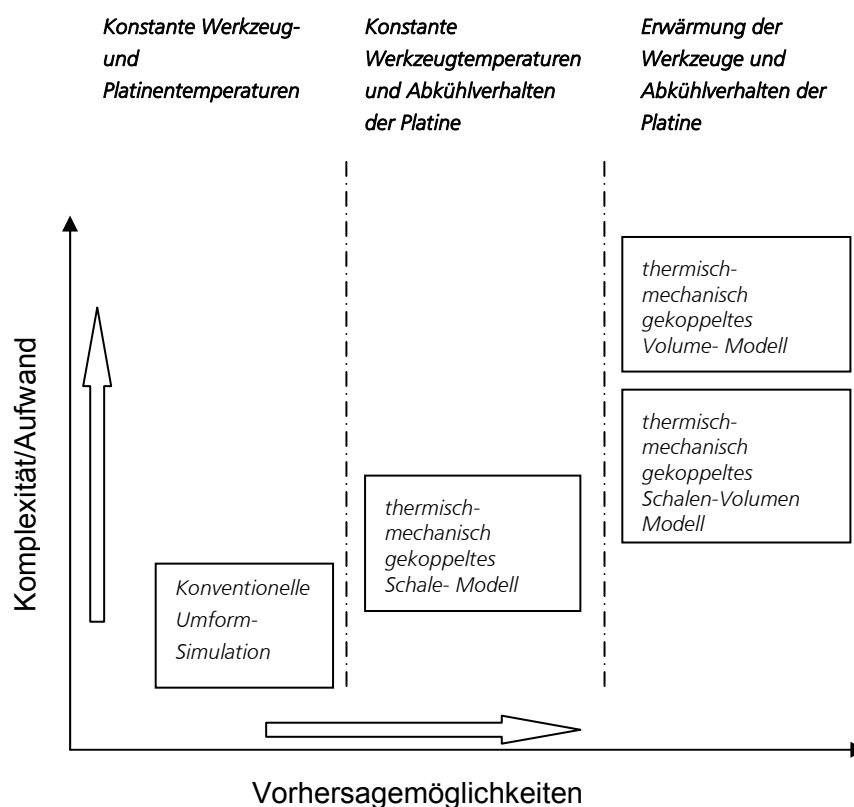


Abbildung 13 Einschätzung der Modellierungsansätze[16]

## 2.3 Verwendete Software

- **AutoForm**

AutoForm ist ein implizites FEM-Simulations-Programm im Bereich der Blechumformung. Mit der Applikation Thermo-Solver ist es möglich, mit wenig Aufwand einen Warmumformprozess durch die Erstellung eines thermisch-mechanischen gekoppelten Schalen-Modelles mit konstanten Werkzeugtemperaturen zu simulieren. AutoForm ist ein sehr gutes Hilfsmittel und Konstruktionswerkzeug in der Designphase. Es stößt aber bei genauer und komplexer Betrachtung von thermischen Prozessen an seine Grenzen, da die Möglichkeiten der Parametereingabe beschränkt ist. [17]

- **Ls-Dyna**

Die Software Ls-Dyna ist ein explizites FEM-Programm, welches zum Großteil zur Durchführung von Crash-Simulationen verwendet wird. Neben der Crash-Analyse bietet diese Software aber noch weitere Simulationsanwendungen an. Die Metallumformung, die in dieser Diplomarbeit relevant ist, ist eine weitere Domäne des Programms. In Ls-Dyna stehen neben dem expliziten-Solver noch weitere Gleichungslöser zur Auswahl:

- Thermischer Solver beliebig koppelbar mit implizitem und explizitem Solver
- impliziter Solver für die Modal- und Beulanalyse, sowie typische statische Aufgabenstellungen
- Arbitrary Lagrangian Eulerian Elemente in Kombination mit der Fluid-Struktur Interaktion
- Elementfreie Verfahren in Form von Smooth Partikel Hydrodynamics und Element Free Galerkin

Angesichts der Auswahlmöglichkeit eines koppelbaren thermischen Solver und die folgenden aufgelisteten Produktmerkmale, ist Ls-Dyna für das Erstellen eines thermisch-mechanisch gekoppelten Simulationsmodell sehr gut geeignet.

- automatische Kontaktdefinition
- Materialbibliothek mit mehr als 130 Modelle für verschiedenste Materialverhalten
- unterschiedliche Elementtypen
- spezielle Funktionen für die Metallumformung (zum Beispiel adaptive Vernetzung, spezielle Kontaktformulierungen).[16]

### 3 Zielsetzung und Vorgehensweise

In der vorliegenden Arbeit soll ein Warmumformprozess mit einem thermisch-mechanisch gekoppelten Schalen/Volumen-Modell simuliert werden. Ziel dieser Arbeit ist es, die Erwärmung der Werkzeuge und die Abkühlung des Bauteiles zu berechnen. Dafür wird ein am Institut für Werkzeugtechnik & Spanlose Produktion der TU Graz gefertigtes Versuchswerkzeug einer B-Säulengeometrie verwendet. Um die Genauigkeit der Simulationsergebnisse zu zeigen, werden Temperaturmessungen am Versuchswerkzeug während eines Warmumformzyklus durchgeführt und anschließend mit den Ergebnissen aus der Simulation validiert. Des Weiteren soll ein vereinfachtes thermisch-mechanisch gekoppeltes Schalen-Modell mit zwei unterschiedlichen Simulationsprogrammen erstellt werden. Weiterführend werden die Simulationsergebnisse beider Programme miteinander verglichen.

*Ziel der Arbeit*

Die Vorgehensweise dieser Arbeit gliedert sich kurz in folgende Bereiche:

Zuerst werden Temperaturmessungen an dem schon bestehenden Versuchswerkzeug durchgeführt. Es wird die Erwärmung der Matrize mittels Thermoelementen an einem Messpunkt im Zargenbereich, Flanschbereich und nahe am Kühlkanal gemessen. Außerdem wird die Platinenabkühlung in zwei Punkten, mittels zweier Spektralpyrometer welche im Werkzeug verbaut sind, aufgezeichnet. Mit einer IR-Kamera wird die Platinen-Temperaturverteilung nach dem Öffnen der Werkzeuge ermittelt.

*Temperaturmessung am Versuchswerkzeug*

Weiters wird ein thermisch-mechanisch gekoppeltes Schalen-Modell in Ls-Dyna und AutoForm erstellt. Das Modell in Ls-Dyna wird anschließend auf ein Schalen/Volumen-Modell erweitert. Die nötigen Eingabeparameter werden aus der Literatur oder von Datenblättern der jeweiligen Materialhersteller entnommen. Die konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten werden rechnerisch bestimmt. Bei der Auswertung der Simulationsergebnisse werden an den Positionen der Messpunkte im Versuchswerkzeug die Zeit-Temperaturverläufe aus den Knoten des Simulationsmodelles aufgenommen.

*Erstellen und auswerten der Simulationsmodelle*



Aus den Resultaten der Messungen am Versuchswerkzeug und der ausgewerteten Simulationsergebnisse wird eine Validierung der Werte durchgeführt. Unabhängig davon werden die thermisch-mechanisch gekoppelten Schalen-Modelle, aufgebaut in Ls-Dyna und AutoForm, durch einen Vergleich der Zeit-Temperaturverläufe in drei Knoten der Platine validiert.

*Validierung der Ergebnisse*

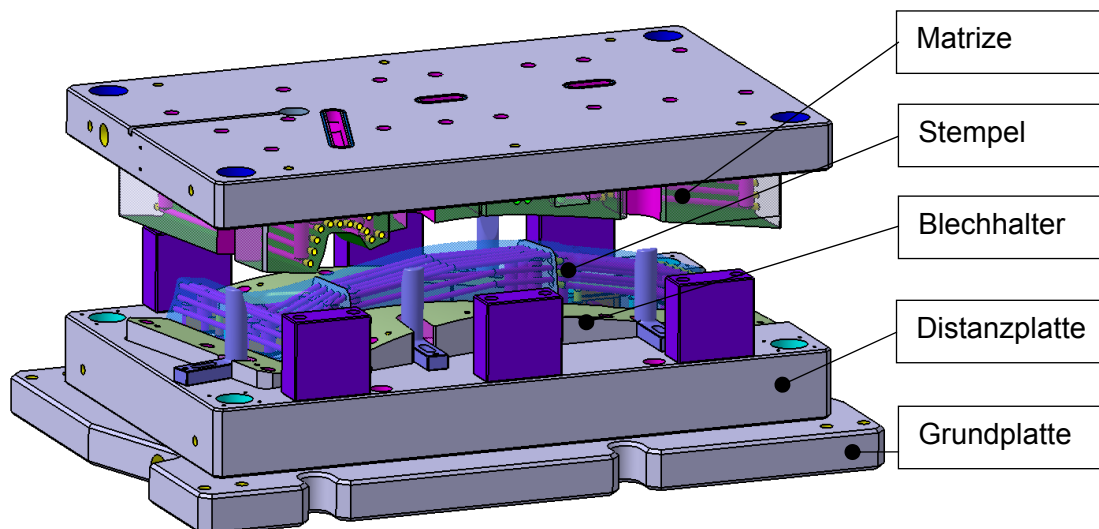
## 4 Das Versuchswerkzeug

Zur Validierung der Simulationsergebnisse wurde ein Versuchswerkzeug, welches einer B-Säulen-Geometrie mit verkürzter Länge gleicht, verwendet. Dieses Werkzeug wurde am Institut für Werkzeugtechnik & Spanlose Produktion konstruiert und gefertigt. In Zusammenarbeit mit WEBA Werkzeugbau wurde die Auslegung des Kühlsystems konzipiert. Das Werkzeug wurde aus dem Werkzeugstahl CR7V-L gefräst und anschließend auf 54 HRC gehärtet. Mit Hilfe von WEBA Werkzeugbau wurden die Fertigarbeiten und der Aufbau des Werkzeuges durchgeführt.

*Kurzbeschreibung des Versuchswerkzeuges*

### 4.1 Aufbau des Werkzeuges

In Abbildung 14 werden die Hauptkomponenten des Versuchswerkzeuges gezeigt.

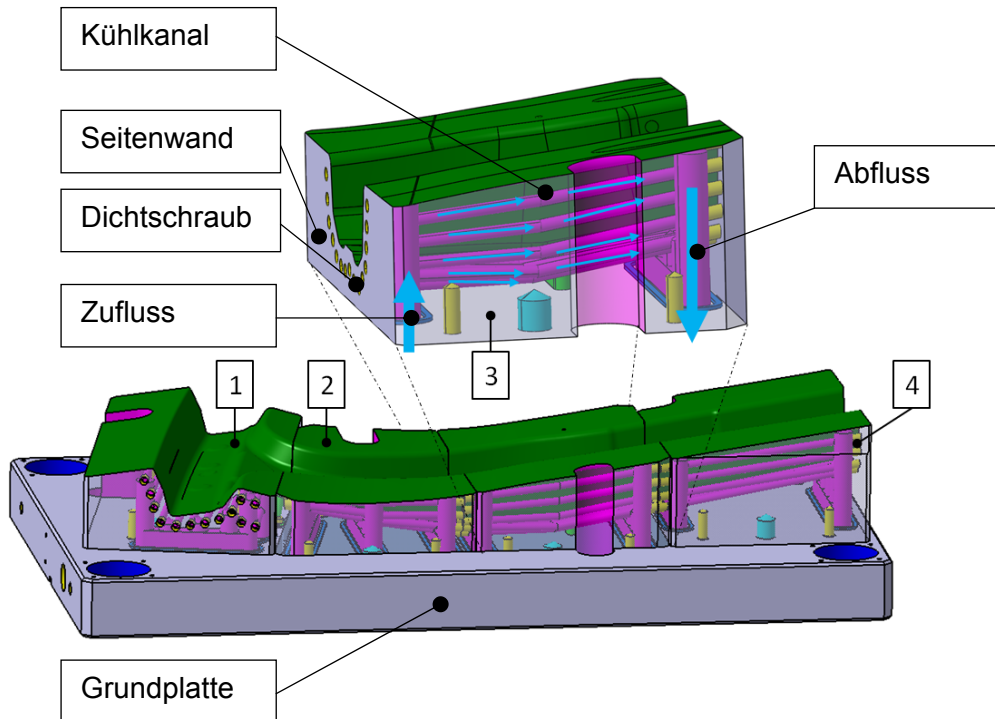


**Abbildung 14 Gesamtwerkzeug**

Im Stempel und in der Matrize ist ein Kühlsystem integriert. Die Kühlung ist mit gebohrten Kühlkanälen ausgeführt. Um die Position der Kanäle an die komplexe Geometrie oberflächennah anzupassen, ist das Werkzeug segmentiert aufgebaut. Durch die Segmentierung ist es möglich durch das Treffen von zwei Bohrungen, kommend von zwei Seiten, auch entlang einer stark ausgeprägten Krümmung einen Kanal auszulegen. Das Kühlmedium wird über den Zulauf den Kühlkanälen zugeführt und fließt über den Abfluss wieder ab (siehe Abbildung 15). Die Bohrungen an den Stoßflächen der Segmente werden mit Dichtschrauben versehen. Die Segmente werden

*Aufbau des Werkzeuges*

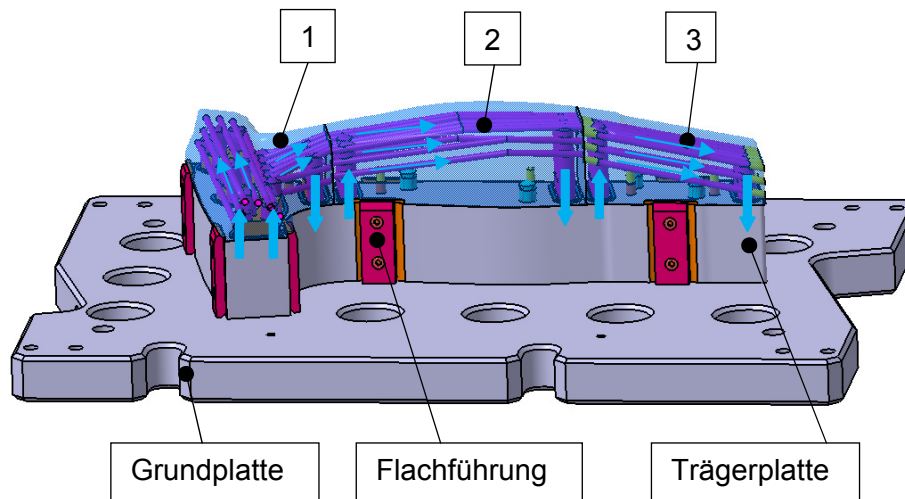
nacheinander auf die Grundplatte aufgesetzt, mit Passbolzen positioniert und abschließend verschraubt.



**Abbildung 15** Aufbau der gekühlten Matrize

Der Stempel ist ebenfalls mit der Variante „Segmentbauweise“ und mit gebohrten Kühlkanälen ausgestattet. In der Abbildung 16 wird der Aufbau dargestellt. Der Durchfluss im Stempelsegment verläuft gleich wie im Matrizensegment. Die in Abbildung 16 gezeigten Flachführungen dienen der Führung des Blechhalters.

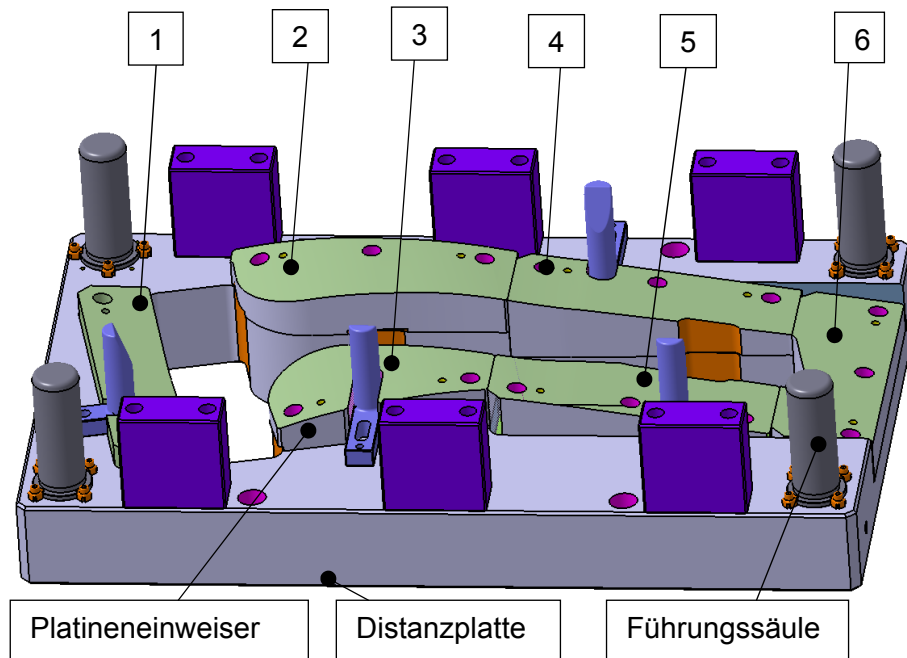
*Kühlsystem Stempel*



**Abbildung 16** Fertig montiertes Stempelwerkzeug

Die Blechhaltersegmente in Abbildung 17 sind ungekühlt ausgeführt. Die Segmente werden in die Grundplatte eingesetzt. Die Platineneinweiser definieren die Position der Platine beim Einlegen. Die Führungssäulen führen die Matrize zum Werkzeugschluss.

*Aufbau Blechhalter*



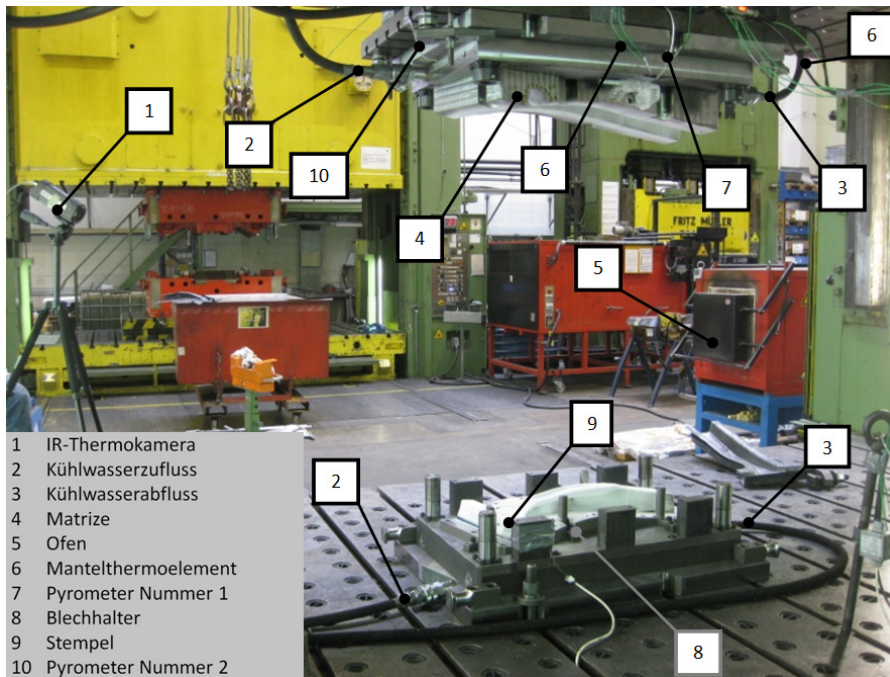
**Abbildung 17 Aufbau Blechhalter**

## 4.2 Versuchsaufbau und Prozessparameter des Werkzeugsystems

Der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführte Versuchsablauf besteht aus sieben Zyklen, in denen sieben Bauteile abgepresst werden. Während des Durchlaufes werden Temperaturmessungen an bestimmt ausgewählten Messpunkten aufgenommen und anschließend ausgewertet. Die Umformversuche wurden in Steyr bei WEBA Werkzeugbau mit einer Hydraulischen 12000 kN Presse durchgeführt. Der Blechhalter ist auf eine 2 mm Distanzierung eingestellt worden. Abbildung 18 zeigt den Versuchsaufbau. In Tabelle 1 sind die relevanten Prozessparameter aufgelistet.

Blechdicke	1,5 mm
Material Platine	1.5528 (22MnB5)
Anfangstemperatur Platine	ca. 730 °C
Anfangstemperatur Werkzeuge	ca. 20 °C
Presskraft	8000 kN

**Tabelle 1 Prozessparameter**

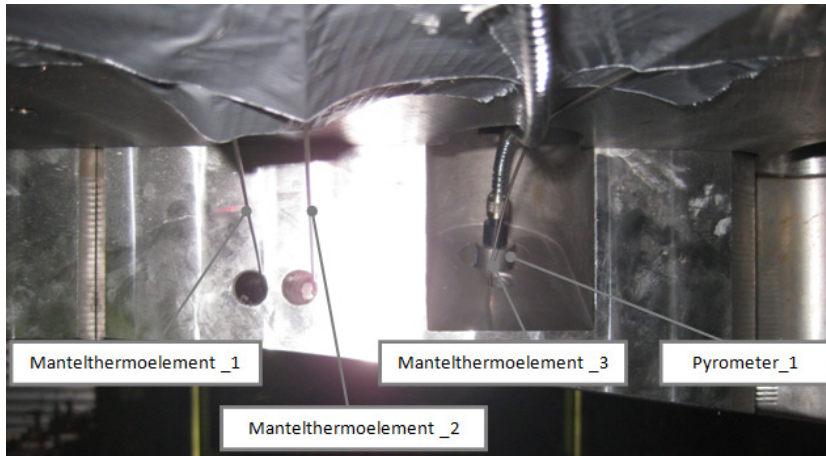


**Abbildung 18 Versuchsaufbau**

### 4.3 Positionierung der Messsysteme

Damit eine Beurteilung der Simulationsergebnisse, in Bezug auf das reale Ergebnis, gemacht werden kann, wurden die Versuchswerkzeuge mit Messeinheiten bestückt. In Abbildung 19 und 20 wird die Positionierung der Mantelthermoelemente und der Pyrometer für die Aufzeichnung der Werkzeugtemperaturen sowie der Platinentemperatur gezeigt.

*Einleitung Anbringung  
 Messeinheit*



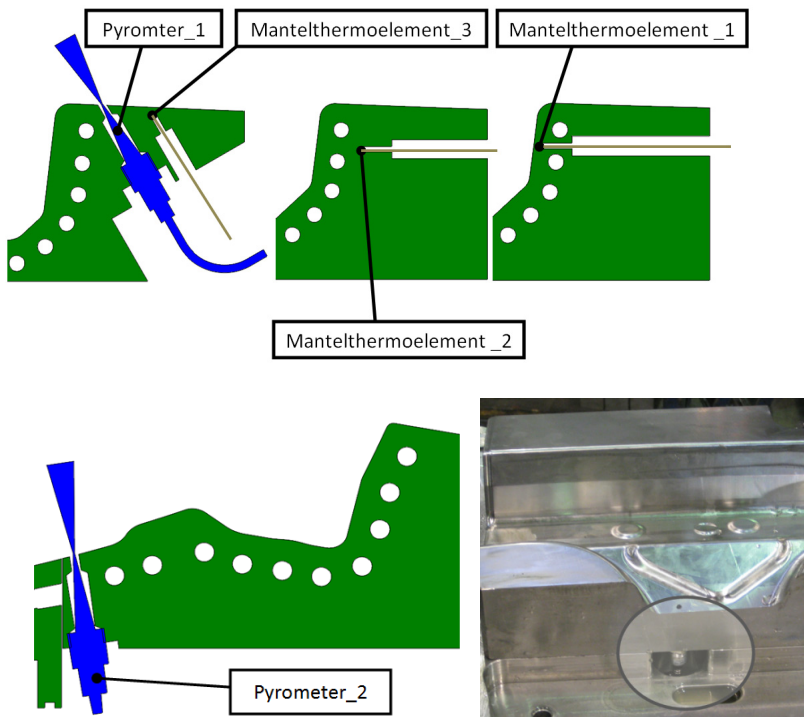
**Abbildung 19 Position Mantelthermoelement**

Die Mantelthermoelemente 1 und 2 messen die Temperatur im Zargenbereich der Matrice. Beide sind unterschiedlich weit von der Werkzeugoberfläche positioniert, um eine Aussage über die Temperaturverteilung zu bekommen. Das Mantelthermoelement 3 nimmt die Erwärmung des Messpunktes im Blechhalterbereich der Matrice auf (siehe Abbildung 20).

*Thermokabel und  
Pyrometermesskopfposition*

Die Pyrometer 1 und 2 übernehmen die Messungen der Platinenabkühlung. Die Distanz zur Oberfläche wurde so gering wie möglich gewählt, um das Ausbreiten des Messfeldkegels ohne Hindernisse zu erlauben (Siehe Abbildung 20).

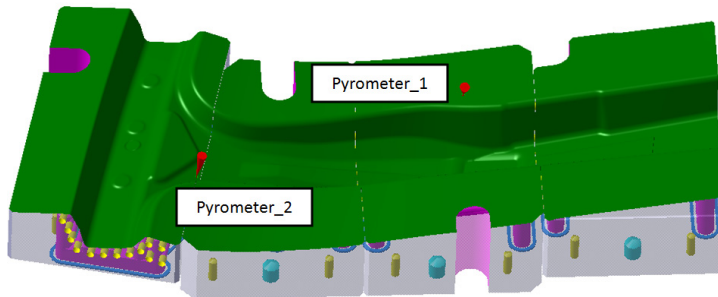
*Messkopfplatzierung,  
Messkegel*



**Abbildung 20 Schnitt Pyrometer und Einbauansicht**

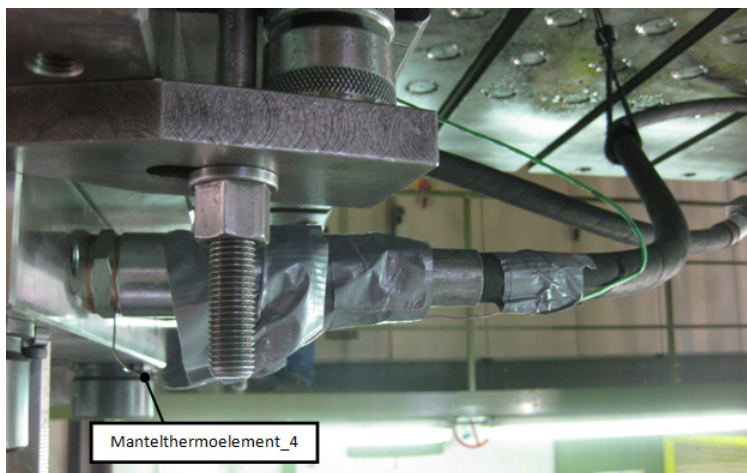
Der Messkopf des Spektral-Pyrometers 1 und 2 wird vom Matrizenboden ausgehend eingeschraubt. Durch die Bohrung an der Oberfläche misst das Spektral-Pyrometer die Platinentemperatur während des Umformprozesses (siehe Abbildung 20 und 21).

*Einbauansicht des  
Messkopfes*



**Abbildung 21 Pyrometermessfeld**

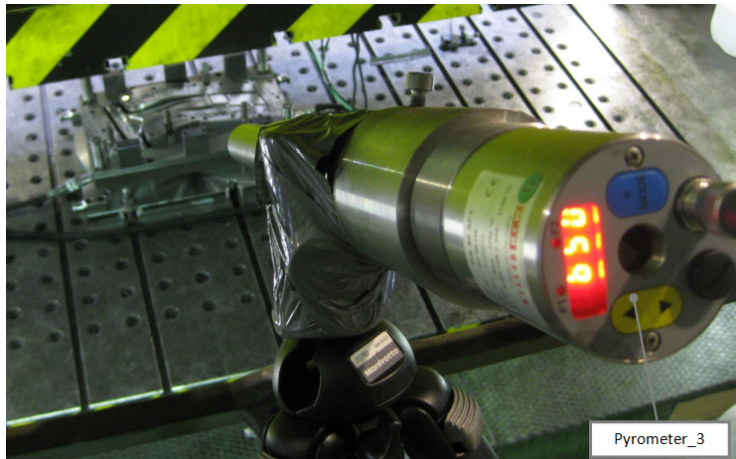
Um die Temperatur des Kühlmediums zu ermitteln, wurde das Mantelthermoelement Nummer 4 und 5 am Zu- und Abfluss positioniert (siehe Abbildung 22).



**Abbildung 22 Mantelthermoelement Abfluss**

Das Quotientenpyrometer, beschrieben im Kapitel 4.4, nimmt aus einer Entfernung von ca. 4 Meter die Platinenanfangstemperatur auf (siehe Abbildung 23).

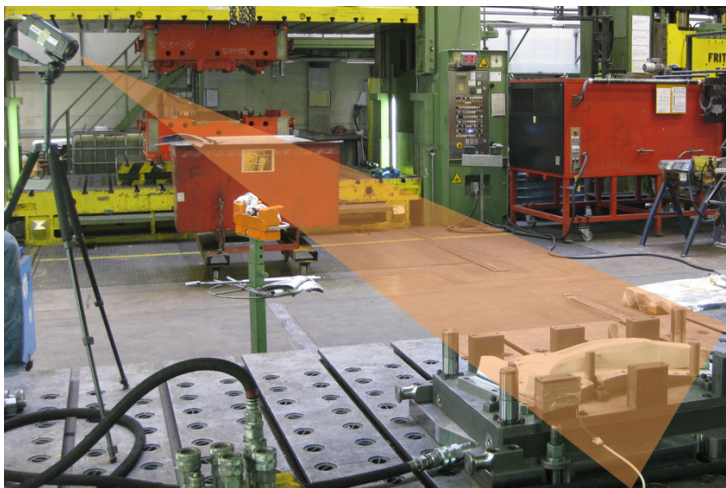
*Quotientenpyrometer*



**Abbildung 23 Pyrometer Platinentemperaturmessung**

Damit nicht nur punktuell eine Aussage über die Erwärmung und Abkühlung gemacht werden kann, wird mittels einer IR-Thermokamera die Temperaturverteilung der Platine während der Abkühlphase aufgezeichnet (siehe Abbildung 24).

*Aufzeichnung der  
Temperaturverteilung von  
Stempel und Blechhalter*



**Abbildung 24 Infrarotkamera FLIR A305**



#### 4.4 Verwendete Messinstrumente

- **Mantelthermoelement Typ K**

Mit dem Mantelthermoelement des Types K, sind Temperaturmessungen im Bereich von -200 °C bis 800 °C möglich. Die Kabeleinheit besteht aus zwei Drähten unterschiedlichen Werkstoffes (siehe Abbildung 25). Die Werkstoffe der Kabelpaarung sind Ni-CrNi. An den freien Enden wird eine Spannung gemessen, welche durch eine Temperaturdifferenz an den Kontaktstellen zwischen den zwei Leitern zustande kommt, auch genannt Seebeck-Effekt. Die gemessene Spannung wird als Thermospannung bezeichnet. Mit Hilfe des Software Tools Labview können die gemessenen Daten erfasst und aufgezeichnet werden.[18]

*Funktionsprinzip des  
Thermoelements*



**Abbildung 25 Mantelthermoelement K[19]**

- **IR-Thermokamera FLIR A305**

Infolge von Atom- und Molekülbewegungen emittiert jeder Körper Strahlung, wenn die Eigentemperatur über dem absoluten Nullpunkt liegt. Die ausgesendete Wärmestrahlung nimmt im elektromagnetischen Strahlenspektrum einen Bereich von 0,5 µm (sichtbarer Bereich) bis 40 µm (Infrarotbereich) Wellenlänge ein. Der Zusammenhang zwischen elektromagnetischer Strahlung und Temperatur wird durch das Stefan-Boltzmann-Gesetz beschrieben (siehe Gleichung 1).[20]

*Einleitung Wärmestrahlung*

$$\dot{q}_s = \sigma * T^4 \quad (1)$$

Ein Körper, der in der Lage ist, die maximal mögliche Energie zu emittieren, wird Schwarzer oder idealer Körper genannt. Ein realer Strahler emittiert nicht den gesamten Energieanteil, somit muss ein Korrekturfaktor  $\epsilon_{(T)}$  mit einberechnet werden.  $\epsilon_{(T)}$  wird als Emissionsgrad bezeichnet und ist von der Temperatur und Zustand der Oberfläche abhängig (siehe Tabelle 2).

*Schwarzer Strahler,  
Emissionsgrad*

$$\dot{q}_s = \epsilon_{(T)} * \sigma * T^4 \tag{2}$$

Material	T in °C	ε
Aluminium, walzblank	170	0,049
Eisen, blank geätzt	150	0,15
Ziegelstein, rot	20	0,93

**Tabelle 2 Emissionsgrade  $\epsilon_{(T)}$  unterschiedlicher Materialien [1]**

Die IR-Kamera misst die Oberflächenstrahlung und ist in der Lage durch das Stefan-Boltzmann-Gesetz und über den Emissionsgrad die Temperaturen des Körpers berührungslos zu bestimmen. Das Messergebnis wird in Form eines farblich unterteilten Bildes ausgegeben.[20]

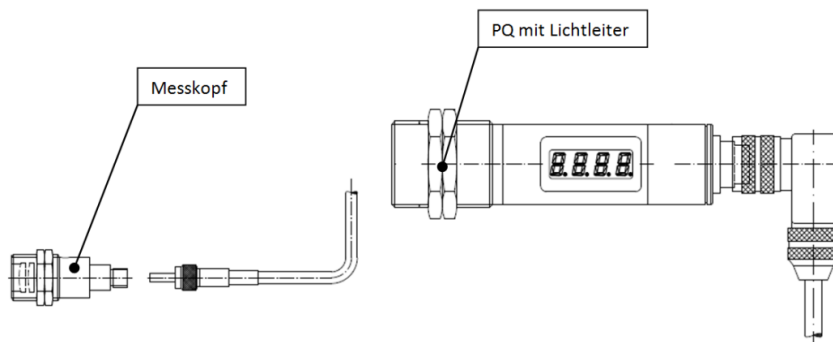
„Output“ Thermokamera

- **Spektral-Pyrometer CellaTemp PQ26**

Das berührungslose Messprinzip eines Spektral-Pyrometers beruht auf derselben Grundlage wie jenes der IR-Thermokamera.

Der Messkopf des Spektral-Pyrometers PQ26 wird direkt im Werkzeug verbaut und ist aufgrund der geringen Einbaugröße ideal für die Positionierung bei Platzmangel (siehe Abbildung 26).

Vorteil des PQ26



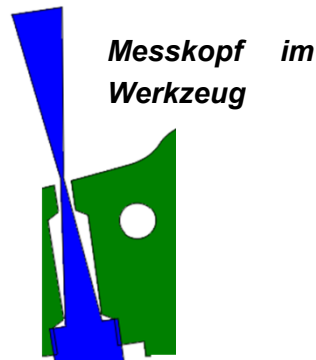
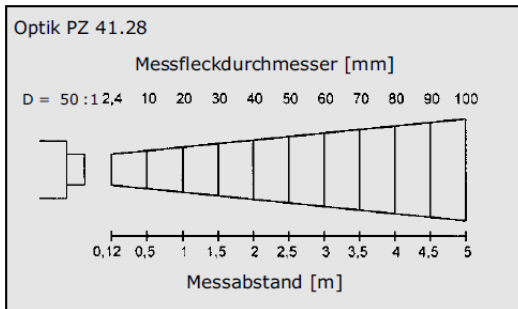
**Abbildung 26 Pyrometer PQ26 AF[21]**

Die Messeinheit besteht aus einem digitalen Pyrometer und einem optischen Messkopf, der über einen Lichtleiter verbunden ist. Der Messbereich liegt zwischen 300 °C und 2000 °C. Der Messkopf ist sehr temperaturbeständig und kann bei Umgebungstemperaturen bis zu 250°C eingesetzt werden.

Aufbau des PQ26

Der Verlauf des Messfeldes ist kegelig. Bei der Wahl der Position muss deshalb darauf geachtet werden, dass es zu keinen Behinderungen des Messfeldes kommt (siehe Abbildung 27).

*Kegeliges Messfeld*



**Abbildung 27 Messfeldverlauf (Messkopf Durchmesser 16) und Einbausituation [21]**

- **Quotienten-Pyrometer PA 40**

Das Quotienten-Pyrometer misst die Intensität von zwei benachbarten Wellenlängen. Aus dem Verhältnis beider Signale wird die Temperatur bestimmt.

*Allgemeine Beschreibung  
Funktionsprinzip*

Das verwendete Quotienten-Pyrometer CellaTemp Pa 4x hat einen Messbereich von 650 °C bis 3000 °C und ist in Abbildung 28 dargestellt.

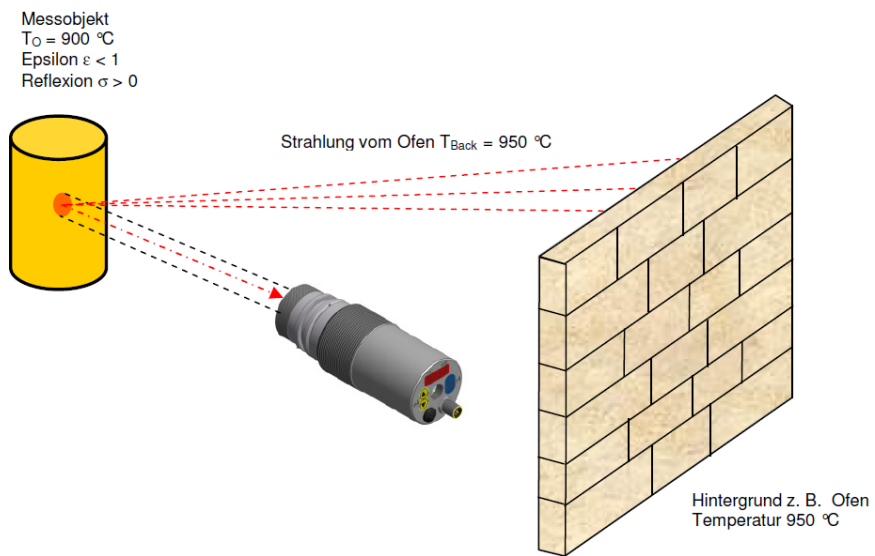
*Verwendete Pyrometer*

Ein wesentlicher Vorteil der berührungslosen Temperaturmessung mit dem Quotienten-Pyrometer ist, dass auch bei starkem Staub und Rauch im Sichtfeld eine qualitativ gute Messung möglich ist.

*Vorteile der Berührungslosen  
Messung*

Fehlerhafte Messungen können auftreten, wenn die reflektierende Hintergrundstrahlung im Vergleich zur Eigenstrahlung groß ist. Dieser Fall tritt ein, wenn das Bauteil einen niedrigen Emissionsgrad aufweist, oder die Eigentemperatur niedriger ist als die Umgebungstemperatur. Die Hintergrundstrahlung wird beeinflusst durch die Temperatur des Hintergrundes, durch die Größe des abstrahlenden Hintergrundes und durch sein Vermögen, Strahlung zu emittieren (siehe Abbildung 28). Das Pyrometer bietet eine Funktion an, um diesen Einfluss durch individuell ermittelte Werte zu kompensieren.

*Einfluss  
Hintergrundstrahlung*



**Abbildung 28 Einfluss von Strahlung aus der Umgebung (z. B. Ofen) [21]**

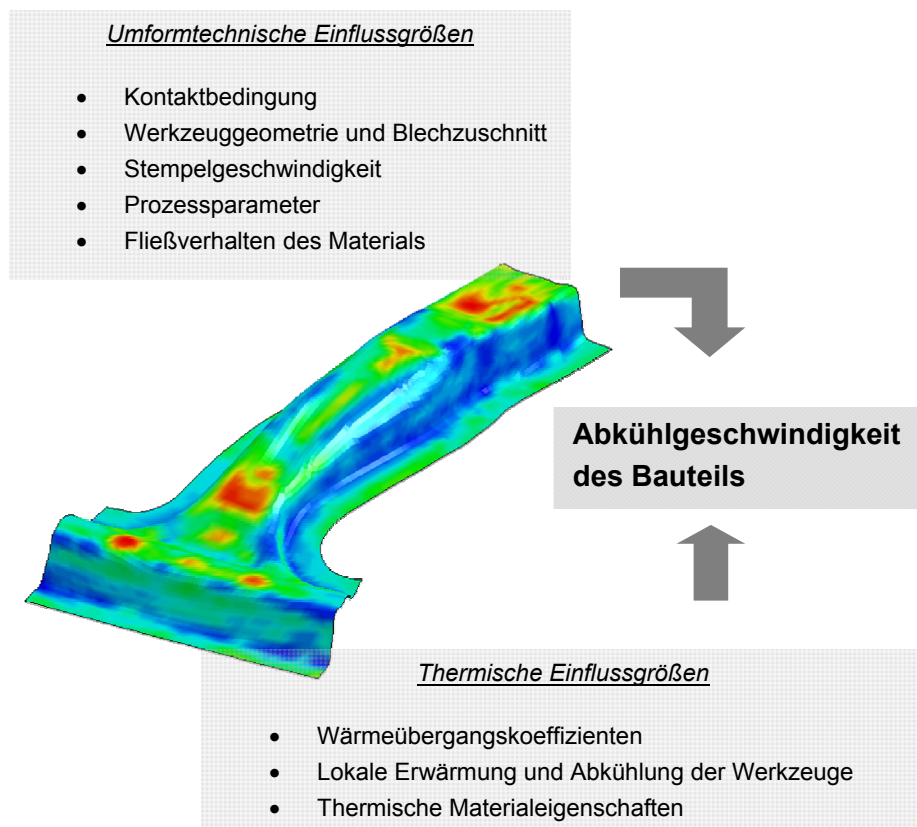
## 5 Das Simulationsmodell

Im Folgenden Kapitel wird die Modellbildung eines thermisch-mechanisch gekoppelten Schalen- und Schalen/Volumen-Modells beschrieben.

### 5.1 Problemstellung des Warmumformprozesses

Ein pressgehärtetes Bauteil wird durch thermische, mechanische und prozessspezifische Größen, welche in Abbildung 29 aufgelistet sind, beeinflusst. In einer Simulation eines Warmumformprozesses müssen diese Einflussgrößen und deren Zusammenspiel während des Prozesses berücksichtigt werden. Die Qualität des Simulationsmodelles hängt somit von der Genauigkeit der Annahme und Definition von den eingegebenen Parametern ab.

*Einflussgrößen eines Warmumformprozesses*



**Abbildung 29 Mechanische und thermische Einflussgrößen auf die Bauteileigenschaften beim Presshärten [16]**

## 5.2 Modellierung der Werkzeuge

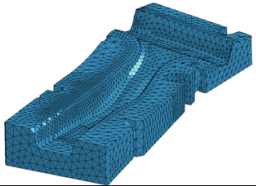
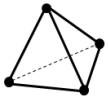
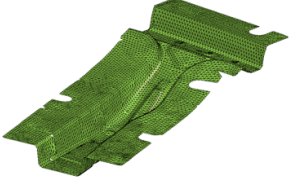

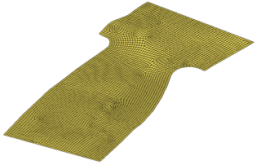

Um die physikalischen Phänomene in einem Warmumformprozess zu simulieren wird die Finite-Elemente-Methode (FEM) als Berechnungsverfahren verwendet. Die FEM ist eine numerische Methode, welche zur Lösung von partiellen Differentialgleichungen herangezogen wird. Mit diesem Verfahren wird eine Näherungsfunktion von der exakten Lösung der Differentialgleichungen geliefert. Die allgemeinen Grundlagen der Finite-Elemente-Methode sind in zahlreichen Lehrbüchern beschrieben, siehe hierzu Knothe & Wessels [22].

*Finite Elemente Methode*

- **Diskretisierung der Werkzeuge**

Bei der Anwendung der Finite-Elemente-Methode wird das zu berechnende Modell in kleine einfache Elemente aufgeteilt. In dieser Arbeit werden die Volumenwerkzeuge in Tetraeder Elementen (Volumenelemente), die Schalenwerkzeuge in Dreieckselementen und die Platine in Viereckselementen diskretisiert (siehe Abbildung 30).

*Geometrie der Elemente*

	<p><u>Volumenwerkzeuge:</u> Tetraederelemente</p> 
	<p><u>Schalenwerkzeuge:</u> Dreieckselemente</p> 
	<p><u>Platine:</u> Viereckselemente</p> 

**Abbildung 30** Diskretisierung der Werkzeuge und der Platine

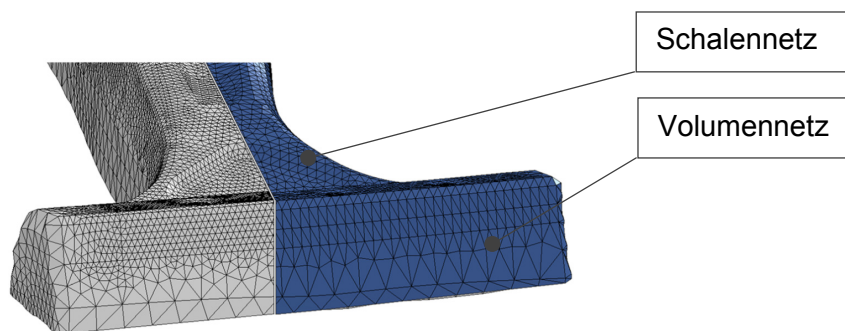
- **prinzipieller Modellaufbau des thermisch-mechanisch gekoppelten Modells**

Das thermisch-mechanisch gekoppelte Schalen-Modell ist aus Dreieck- und Viereckelementen aufgebaut. Bei der Analyse der thermischen Werkzeugcharakteristik wird das thermisch-mechanisch gekoppelte Schalen-Modell auf ein thermisch-mechanisch gekoppeltes Schalen/Volumen-Modell erweitert (siehe Kapitel Stand der Technik).

*Simulationsmodelle*

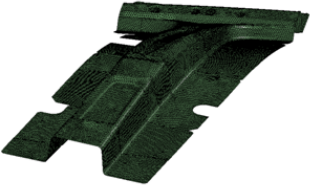
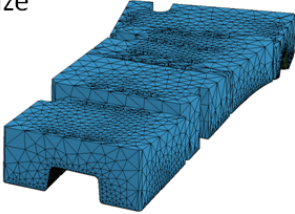
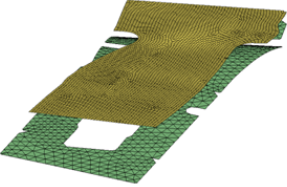
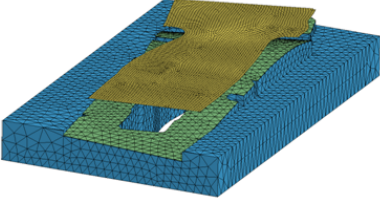
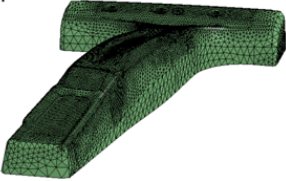
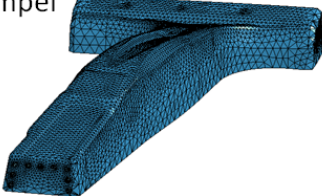
Um die Kühlung in den Werkzeugen realistisch abbilden zu können, wird ein Volumennetz benötigt. Da es sich um einen Umformprozess handelt, ist ein feines Netz im Kontaktbereich Voraussetzung. Bei einem Volumennetz, welches dieser Anforderung an Netzfeinheit um die Geometrieausprägungen abbilden zu können erfüllt, kommt es zu einer sehr hohen Anzahl von Elementen. Ein Modell mit vielen Elementen führt zu sehr langen Rechenzeiten. Um dieses Problem zu lösen, wird ein grobes Volumennetz erstellt, welches die thermische Rechnung durchführt. Über dem Volumennetz wird ein feines Oberflächennetz gelegt, um das mechanische Problem zu lösen (siehe Abbildung 31). Die beiden Netze sind durch einen thermischen Kontakt mit einem sehr hohen Wärmeübergangskoeffizienten gekoppelt. Durch die Verteilung des thermischen und strukturmechanischen Problems, wird Zeit eingespart. [4]

*Kombination von Volumennetz und Schalennetz*



**Abbildung 31 Vergleich feines Netz und grobes Netz**

Die thermisch-mechanisch-gekoppelten Modelle aufgebaut in AutoForm und Ls-Dyna werden in Abbildung 32 dargestellt.

Thermisch-mechanisch gekoppeltes Schalen-Modell in <b>AutoForm</b> und <b>Ls-Dyna</b>	Thermisch-mechanisch gekoppeltes Schalen/Volumen-Modell in <b>Ls-Dyna</b>
Matrize 	Matrize 
Blechhalter/Platine 	Blechhalter/Platine 
Stempel 	Stempel 

**Abbildung 32** Aufbau der 2 Modellvarianten

### 5.3 Elementformulierung

Nachdem die Werkzeuge in kleine Elemente unterteilt wurden, werden zusätzlich den Elementen Eigenschaften zugewiesen. Das Zuordnen von Elementeneigenschaften hat einen bedeutenden Einfluss auf das Simulationsergebnis. Die Charakteristik von Volumenelemente, Membranelemente und Schalenelemente werden in den nächsten Punkten erklärt.



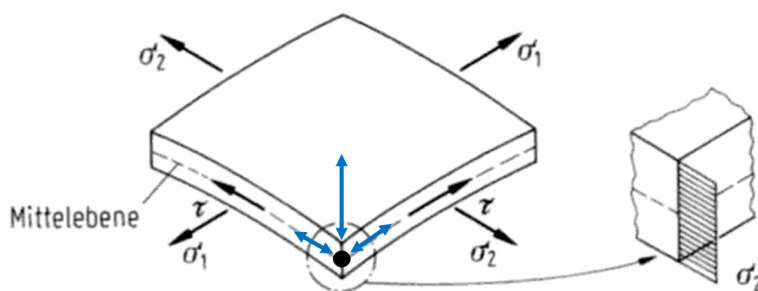
- **Modellieren des Strukturverhaltens der Platine**

Beim Aufbau der Platine mit Volumenelementen ist eine hohe Anzahl von Elementen nötig. Der Grund dafür ist, dass bei der Ermittlung eines genauen Spannungsverlaufes über die Blechdicke mehr als ein Element über die Dicke benötigt wird, wodurch sich die Anzahl der

*Volumenelement*

Elemente, wesentlich gegenüber dem Membran- und Schalenelement erhöht. Beim Membranelement und beim Schalenelement liegt kein dreidimensionales Problem vor, sondern der Umformvorgang wird auf eine zweidimensionale Problemstellung reduziert. Durch diese Vereinfachung des Ansatzes verkürzt sich der Rechenaufwand gegenüber dem Ansatz mit Volumenelementen. Die Abbildung der Platine bei konventionellen Umformprozessen wird deshalb zum Großteil mit Membran- und Schalenelementen definiert, da kürzere Rechenzeiten möglich sind. Das Membranelement gibt drei Verschiebungsfreiheitsgrade pro Knoten vor, weiteres werden die Normalspannungen und Schubspannungen in Dickenrichtung nicht berücksichtigt (Siehe Abbildung 33). Aufgrund dessen können in der Struktur keine Biegemomente berechnet werden.

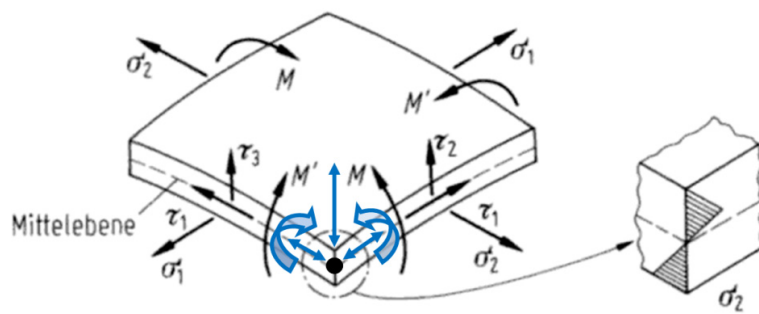
*Membranelement*



**Abbildung 33 Spannungen beim Membranansatz [23]**

Im Vergleich zum Membranelement werden mit dem Schalenelement Normalspannungen und Schubspannungen über die Blechdicke mit berücksichtigt. Aufgrund dieser Elementeigenschaft können Biegemomente übertragen werden (siehe Abbildung 34). Der dreidimensionale Vorgang wird bei der Elementformulierung mittels Schalenelement gleich wie beim Membranelement in eine zweidimensionale Problemstellung übergeführt. Aufgrund des zweidimensionalen Ansatzes wird das Modell über die Mittelfläche beschrieben, dadurch kann die Änderung der Blechdicke nur indirekt über ein virtuelles Dickenoffset berücksichtigt werden. Das Schalenelement gibt 3 Verschiebungsfreiheitsgrade und 3 Rotationsfreiheitsgrade vor. Durch die 6 Freiheitsgrade des Schalenelementes sind 6 Unbekannte zu lösen, wodurch es zu einem wesentlich höheren Rechenaufwand verglichen mit dem Membranelement kommt.

*Schalenelement*



**Abbildung 34 Spannungen beim Schalenansatz [23]**

Bei der Simulation von Blechumformprozessen ist eine Platine aufgebaut aus Membranelementen aufgrund der 3 Freiheitsgrade, prinzipiell nicht geeignet. AutoForm stellt daher für die Simulation von Blechumformprozessen eine biegeunterstützte Membran zur Verfügung mit der eine angenäherte Biegesteifigkeit abbildbar ist. Die integrierte Biegesteifigkeit ist als Modell mit einer Torsionsfeder gleichzusetzen, welche zwischen Knoten und Elementnormale liegt. Mit der biegeunterstützten Membran ist es möglich komplexe Blechumformprozesse mit guter Vorhersagegenauigkeit in sehr kurzer Rechenzeit zu simulieren.

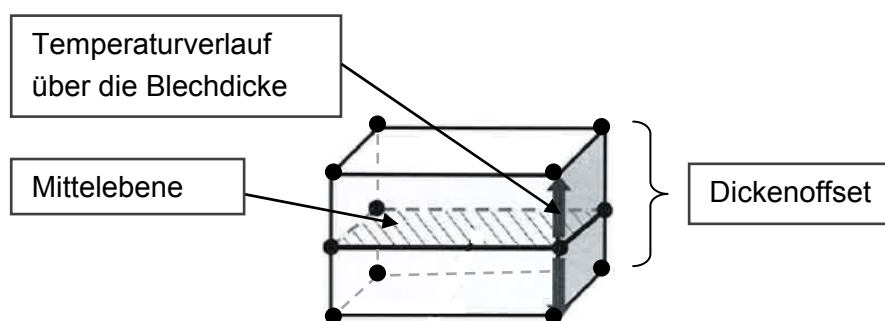
*Biegeunterstützte Membran*

- **Modellieren des thermischen Verhaltens der Platine**

In einem Warmumformprozess müssen die Elemente der Platine neben der Strukturmechanik auch das thermische Problem abbilden. Die Wärmeleitung in der Platine wird mit dem Schalenelement in Ls-Dyna, nichtlinear über das virtuelle Dickenoffset beschrieben (siehe Abbildung 35). Bei der biegeunterstützten Membran wird eine konstante Temperaturverteilung über das virtuelle Dickenoffset in AutoForm angenommen.

*Schalenelement Ls-Dyna*

*Biegeunterstützte Membran  
AutoForm*



**Abbildung 35 Wärmeleitung über die Blechdicke im Schalenelement**

- **Elementformulierung der modellierten Werkzeuge**

Die Werkzeuge werden in dieser Arbeit als starrer Körper auch „Rigid body“ genannt definiert. Das heißt, dass keine Verschiebungen der Knoten im Werkzeugmodell zugelassen werden. Aufgrund dieser Annahme sind auch keine Anforderungen an die strukturmechanischen Eigenschaften der Schalen- und Volumenelemente gestellt. Es wird nur das thermische Problem berücksichtigt.

„Rigid bodies“

- **Übersicht der Verwendeten Elemente**

In Abbildung 36 werden die verwendeten Elementen in den 3 unterschiedlichen Simulationsmodellen dargestellt.

<u>Software</u>	<u>Schalenwerkzeug</u>	<u>Volumenwerkzeug</u>	<u>Platine</u>
<b>AutoForm</b> thermisch-mechanisch gekoppeltes Schalenmodell	(Rigid Body) Schale	keine Volumenwerkzeuge	Biegeunterstützte Membran
<b>Ls-Dyna</b> thermisch-mechanisch gekoppeltes Schalen-Modell	(Rigid Body) Schale	keine Volumenwerkzeuge	Schale
<b>Ls-Dyna</b> thermisch-mechanisch gekoppeltes Schalen/Volumen-Modell	(Rigid Body) Schale	(Rigid Body) Volumenelement	Schale

**Abbildung 36 Einteilung der Elementtypen auf die unterschiedlichen Modelle**

## 5.4 Kontaktformulierung

- **Penalty Kontaktformulierung**

Bei einer Umformsimulation handelt es sich um eine Mehrkörpersimulation bei der das Übertragen von Kräften zwischen zwei Körpern durch den Kontakt definiert wird. Die FEM-Programme Ls-Dyna und AutoForm realisieren mit dem Penalty-Verfahren die Kontaktmodellierung. Das Penalty-Verfahren ermittelt die Knotenkräfte durch die Durchdringung von zwei Körpern. Die Kontaktsuche bezieht sich auf die Knoten. Wenn ein Knoten des

Finiten Elemente Netzes eines Körpers in den zweiten Körper eindringt, dann wird die Eindringtiefe in Richtung der Elementnormalen bestimmt (siehe Abbildung 37). Im Fall eines gefunden Penalty-Kontaktes wird eine Kraft proportional zur Eindringtiefe hinzugefügt, um als Widerstand die Durchdringung zu verhindern.

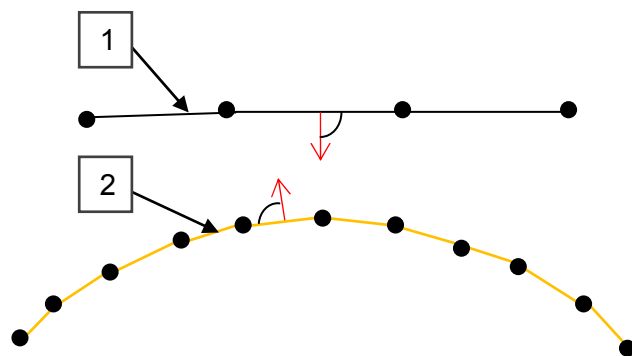


Abbildung 37 Penalty-Kontakt Elementnormale [24]

- **Thermische Kontaktformulierung**

Der thermische Kontakt wird in Ls-Dyna über den Kontaktwärmeübergang, als eine Funktion des Druckes und mittels eines Spaltwärmeübergangs, definiert. Ein definierter „Gap“ aktiviert den Spaltwärmeübergang zwischen zwei Körper, wenn deren Abstand (siehe Abbildung 38) kleiner oder gleich dem „Gap“ ist.

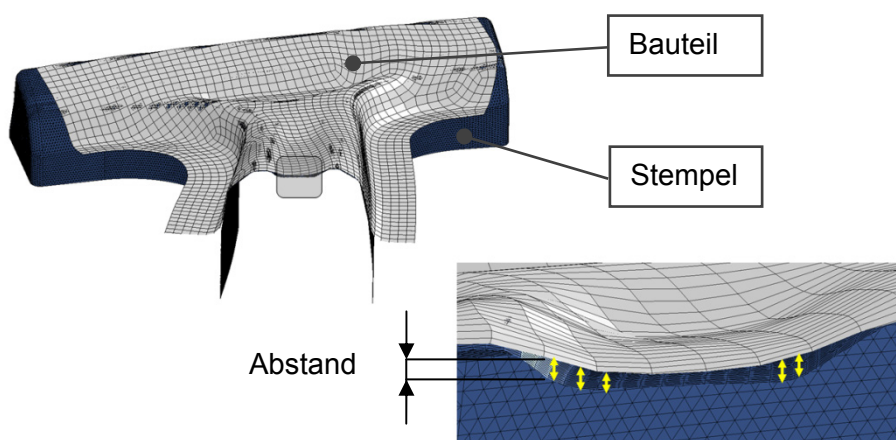
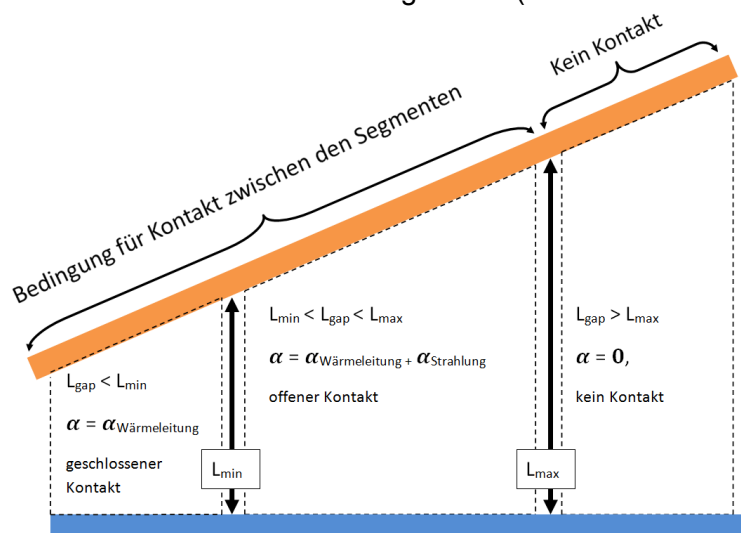


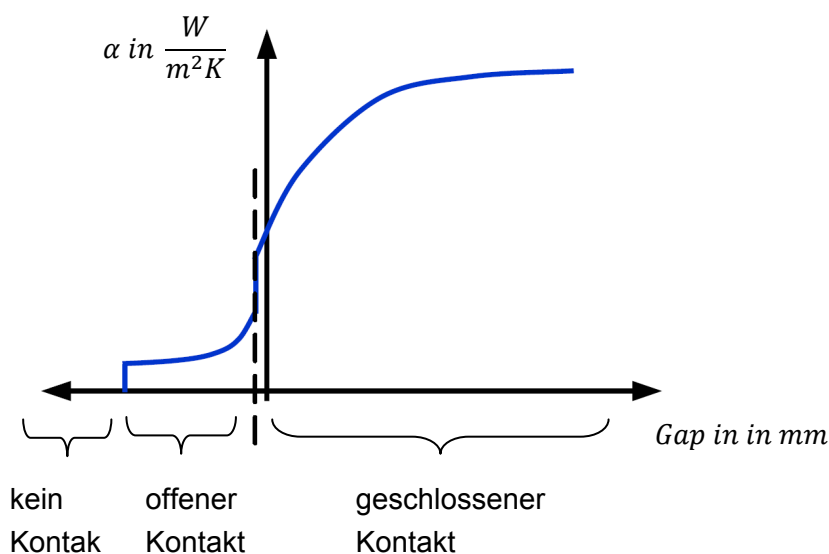
Abbildung 38 Darstellung des Gaps zwischen Werkzeug und Bauteil

Der Spaltwärmübergang wird wie folgt angegeben. Über ein  $L_{min}$  und ein  $L_{max}$  wird ein Bereich für geschlossenen Kontakt, offenen Kontakt und keinen Kontakt definiert. Ist der Gap kleiner als  $L_{min}$ , dann spricht man von geschlossenem Kontakt und es findet Wärmeübertragung nur über Wärmeleitung statt. Liegt der Gap zwischen  $L_{min}$  und  $L_{max}$  dann herrscht offener Kontakt durch den Wärme, sowohl durch Wärmeleitung als auch durch Strahlung, transportiert wird. Ist der Gap größer als  $L_{max}$  dann wird keine Wärme durch Kontakt übertragen (siehe Abbildung 39).



**Abbildung 39** Definition des Kontaktes im LSDyna [16]

Abbildung 40 zeigt den qualitativen Verlauf des Wärmeüberganges abhängig vom Abstand zweier Körper.



**Abbildung 40** Verlauf des Wärmeüberganges in Abhängigkeit des Kontaktes

In AutoForm ist keine detaillierte Definition des thermischen Kontaktes möglich. Wärmeübergang durch Kontakt wird in AutoForm gleich wie bei der Penalty-Kontaktformulierung über die Durchdringung zweier Körper aktiviert.

*Thermischer Kontakt in AutoForm*

## 5.5 Materialformulierung

Um realistische Simulationsergebnisse zu erzielen, ist eine realitätsnahe Materialmodellierung der Werkstoffcharakteristik des Platinenwerkstoffes und der Werkzeuge notwendig. In Abbildung 41 sind die Materialmodelle mit deren Eigenschaften grob dargestellt. Eine detailliertere Beschreibung erfolgt später.

<i>Software</i>	<i>Platine</i>	<i>Schalenwerkzeuge</i>	<i>Volumenwerkzeuge</i>
<b>AutoForm</b> thermisch-mechanisch gekoppeltes Schalenmodell	<i>temperaturabhängige Fließkurven</i> <i>dehnratenabhängige Fließkurven</i>	„rigid bodies“	„rigid bodies“
<b>Ls-Dyna</b> thermisch-mechanisch gekoppeltes Schalen-Modell	<i>temperaturabhängige Fließkurven</i> <i>Dehnratenabhängigkeit nach Cowper &amp; Symonds</i>	„rigid bodies“	„rigid bodies“
<b>Ls-Dyna</b> thermisch-mechanisch gekoppeltes Schalen/Volumen-Modell	<i>temperaturabhängige Fließkurven</i> <i>Dehnratenabhängigkeit nach Cowper &amp; Symonds</i> <i>latente Wärme</i>	„rigid bodies“ thermisch-isotrop	„rigid bodies“ thermisch-isotrop

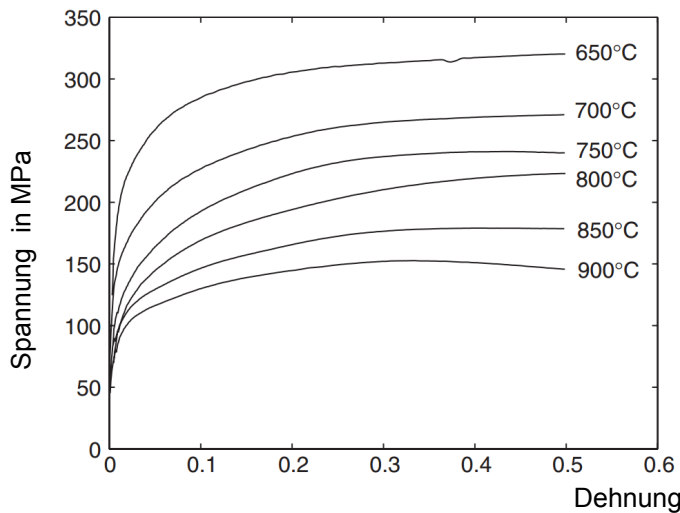
**Abbildung 41 Einteilung der Materialeigenschaften**

- **Modellierung der Fließkurven des Platinenwerkstoffes**

Im Kapitel 1 wurde schon erklärt, dass der Platinenwerkstoff im Warmumformprozess einen breiten Temperaturbereich während des Umformens durchläuft. Durch die Temperaturänderung ändert sich auch die Fließkurve über den Prozess. Um dieses Problem zu lösen, wird ein Materialmodell in Ls-Dyna und AutoForm auf Basis von ermittelten Fließkurven, bei unterschiedlichen Temperaturen, zur Berechnung verwendet (siehe Abbildung 42).

*Gefügeänderung beim Warmumformen*

*Temperaturabhängige Fließkurven*

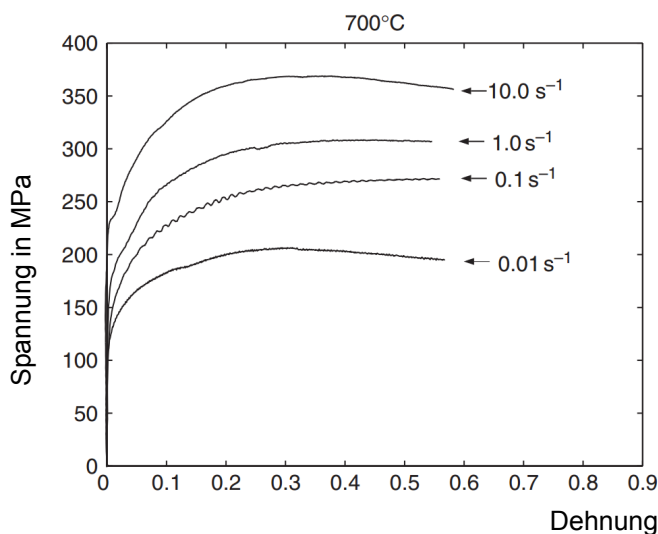


**Abbildung 42** Temperaturabhängigkeit der Fließkurve, 1.5528 (22MnB5 Stahl) [9]

- **Modellierung der Dehnratenabhängigkeit des Platinenwerkstoffes**

In der Warmumformung liegt eine hohe Formänderungsgeschwindigkeitsempfindlichkeit vor, das heißt dass die Fließspannung von der Dehnrade abhängig ist. Aufgrund dessen wird ein temperaturabhängiges elastisch-visko-plastisches [23] Materialmodell verwendet. In AutoForm werden durch Versuche ermittelte Fließkurven bei unterschiedlichen Dehnraten und Temperaturen verwendet (siehe Abbildung 43).

*temperaturabhängiges visko-plastisches Materialmodell*



**Abbildung 43** Dehnratenabhängigkeit der Fließkurve, 1.5528 (22MnB5) [25]

Eine Alternative zur Berücksichtigung der Viskoplastizität wird in Ls-Dyna mit dem Modell nach Cowper und Symonds [2], wie in Gleichung 8 gezeigt, bestimmt. Dabei wird die dynamische Fließspannung  $\sigma_{dyn}$  aus der statischen Fließspannung  $\sigma_{stat}$  der plastischen Vergleichsdehnung  $\dot{\epsilon}$  und den Dehnratenparametern C und p des verwendeten Materials berechnet. Die durch Versuche ermittelten Dehnratenparametern p und C sind von der Temperatur abhängig und werden deshalb als eine Funktion der Temperatur in das Modell implementiert.

*Cowper und Symonds*

$$\sigma_{dyn} = \sigma_{stat} * \left( 1 + \left( \frac{\dot{\epsilon}^p}{C} \right)^{\frac{1}{p}} \right) \quad (3)$$

In Tabelle 3 werden die verwendeten temperaturabhängigen Dehnratenparametern C und p aufgelistet.

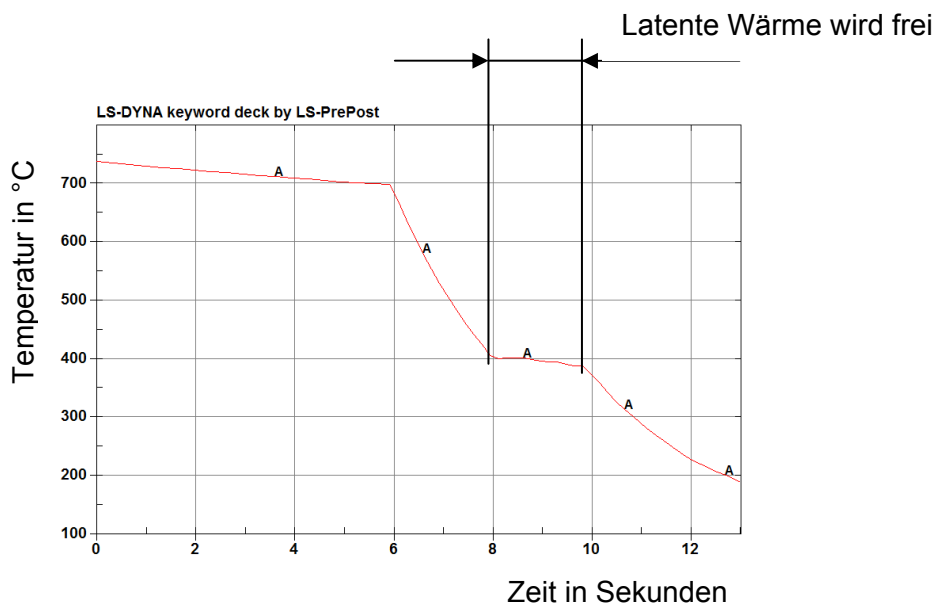
Temperatur in °C	p	c
20	4,28	6,20E+09
200	4,1	1,50E+04
400	3,83	258
600	3,53	35,4
800	3,21	22,2

**Tabelle 3 Dehnratenparameter c und p bei unterschiedlichen Temperaturen, 1.5528 (22MnB5) [26]**

- **Modellierung der latenten Wärme des Platinenwerkstoffes**

Bei der Transformation von Austenit zu Martensit wird Wärme freigesetzt. Um diese Wärme im Ls-Dyna Simulationsmodell zu implementieren, wird bei ca. 400°C (der Temperaturbereich der Umwandlung von Austenit in Martensit), 640 MJ/m<sup>3</sup>[16] für die freiwerdende latente Wärme im Modell berücksichtigt (siehe Abbildung 44). Dies ist mit dem Modell in AutoForm nicht möglich.





**Abbildung 44 Zeit-Temperaturverlauf des Bauteils beim Presshärten**

- **Modellierung temperaturabhängiger Werkstoffparameter des Platinewerkstoffes**

Die Materialkennwerte der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$ , Wärmekapazität  $c_p$  und des E-Moduls weisen einen hohe Temperaturabhängigkeit auf. Da das Bauteil einen Temperaturbereich von ca. 900°C bis 100°C im Prozess durchläuft, werden diese in den Modellen temperaturabhängig implementiert. In Tabelle 4 werden die verwendeten Werte dargestellt.

*Temperaturabhängige  
Wärmeleitfähigkeit und  
Spezifische Wärmekapazität*

Temperatur in °C	$\lambda$ in W/mK	$C_p$ in J/kgK	E in MPa
20	30,7	444	212
200	30	520	199
400	21,7	561	166
600	23,6	581	150
800	25,6	590	134

**Tabelle 4 temperaturabhängige Werkstoffparameter 1.5528 (22MnB5) [26]**

- **Materialformulierung der Werkzeuge**

Die Werkzeuge werden als „rigid bodies“ in den Simulationsmodellen definiert. Als thermisches Material wird im Volumenwerkzeug ein thermisch-isotropes Material [16] verwendet. Die Parameter der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  und Wärmekapazität  $c_p$  werden im Volumenwerkzeug temperaturabhängig implementiert. In Tabelle 5 werden die verwendeten Werte des Werkzeugstahles CR7V-L dargestellt.

*Temperaturabhängige  
Wärmeleitfähigkeit und  
Spezifische Wärmekapazität*

Temperatur in °C	$\lambda$ in W/mK	$C_p$ in J/kgK
20	23,8	437
100	26,0	483
200	27,2	522
300	27,9	560
400	28,1	605

**Tabelle 5 temperaturabhängige Werkstoffparameter CR7V-L [27]**

## 5.6 Thermische Modellierung

In Kapitel 5.6 wird der Prozess thermisch genau definiert und in das Modell überführt.

- **Erwärmung**

Der erste Schritt ist das Erwärmen der Platine von 25°C Raumtemperatur auf ca. 900 °C, um eine vollständig Austenitisierung zu erreichen. Die einfachste Möglichkeit, diese Stufe im Modell abzubilden, ist eine Anfangstemperatur des Bleches, die der Ofenentnahmetemperatur entspricht, zu definieren. In der vorliegenden Arbeit wird die thermische Expansion der Platine von 25°C auf 900°C, die beim Erwärmen auftritt, nicht berücksichtigt da die Differenz zwischen dem Volumen der erwärmten und nicht behandelten Platine in einem sehr kleinen Bereich liegt, kann die Expansion vernachlässigt werden.[16]

*Austenitisierung*

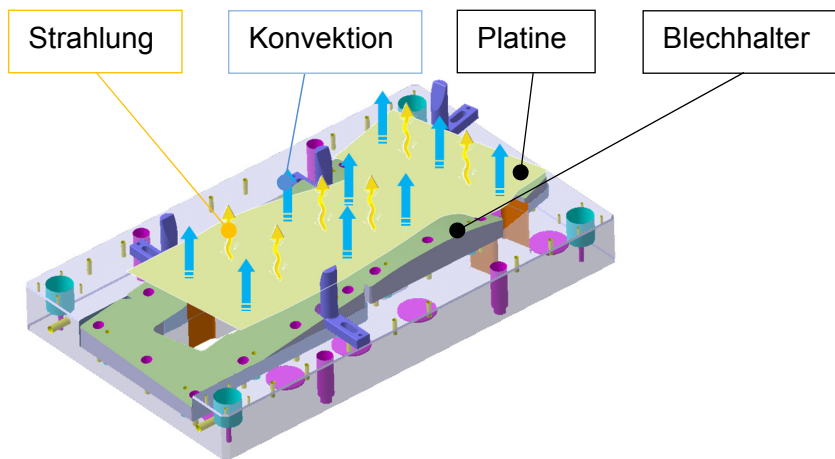
*Thermische Expansion*

- **Positionierung**

Im zweiten Schritt liegt die Platine am Blechhalter auf und verweilt für einen kurzen Zeitraum in dieser Position, bis die Matrize in Kontakt tritt. In dieser Phase herrscht freie Konvektion und Wärmestrahlung (siehe Abbildung 45) von der Platine zur Umgebung. In dem Bereich in dem die Platine Kontakt mit dem Blechhalter aufweist, wird Wärme durch Wärmeleitung abgeführt. In dieser Phase des Prozesses herrscht keine homogene Zuweisung der Wärmeübertragungsarten, deshalb müssen bei Kontakt Strahlung und Konvektion in diesem Teil des Werkzeuges deaktiviert werden.

*Wärmeübertragungsart*

*thermischer Kontakt*



**Abbildung 45 Positionierung der Platine**

Der Wärmeübergangskoeffizient der Konvektion, im Bereich zwischen 300 °C und 1000°C ist annähernd konstant (siehe Abbildung 46). Da die erwärmte Platine nicht unter 600°C im Prozess sinkt bevor Werkzeugkontakt herrscht kann dieser als konstanter Parameter im Modell eingegeben werden. Wärmestrahlung ist über den gesamten Temperaturbereich im Gegensatz zur Konvektion sehr stark temperaturabhängig (siehe Abbildung 57).

*Annahme des  
Wärmeübergangs-  
koeffizienten*

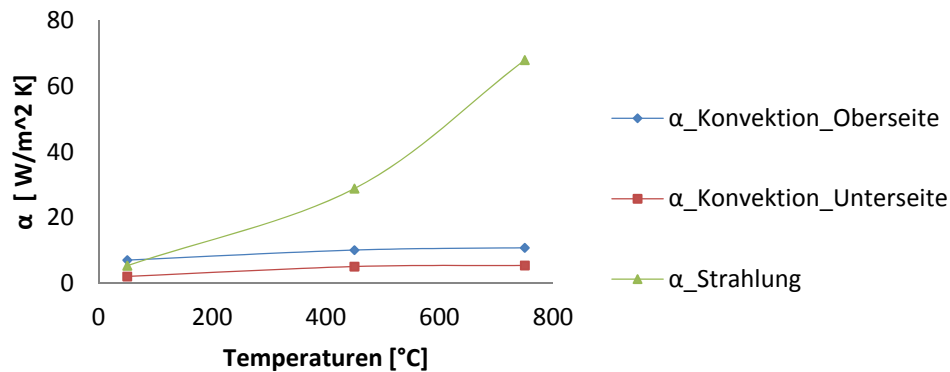


Abbildung 46 Temperaturabhängiger Wärmeübergangskoeffizient [9]

- **Umformung**

Während der Umformung weitet sich der Bereich, in dem Kontakt zwischen dem Bauteil und der Platine herrscht, immer weiter aus. Wärmeübertragung infolge von Kontakt nimmt zu, da der Wärmeübergangskoeffizient vom Druck abhängig ist. Wenn Kontakt zwischen zwei Körpern herrscht, stellt sich, aufgrund von Unregelmäßigkeiten in der Struktur der Oberfläche, Kontakt nur über einen kleinen Bereich ein (siehe Abbildung 47). Bei Zunahme des Druckes werden die Erhöhungen an der Auflagefläche zusammengedrückt, wodurch sich die Kontaktfläche erhöht, über die Wärmefluss stattfinden kann. [28]

*thermischer Kontakt beim Umformen*

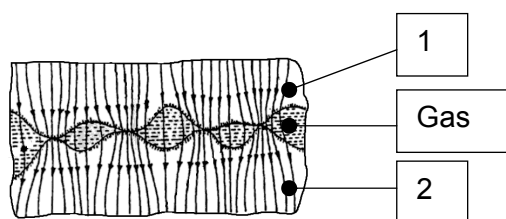


Abbildung 47 Wärmefluss bei Kontakt von zwei Körpern [28]

Der Wärmestrom, infolge Kontakt, wird durch den druckabhängigen Wärmeübergangskoeffizienten und der Temperatur beider Körper mit Gleichung 4 angegeben.

$$\dot{q} = A * \alpha_{\text{Kontakt}} * (T_1 - T_2) \quad (4)$$

In [29] wird für  $\alpha_{\text{Kontakt}}$  die Werte aus Tabelle 6 ermittelt.

*Druckabhängiger Wärmeübergangskoeffizient*

Druck in MPa	$\alpha$ in W/ m <sup>2</sup> K bei 550°C
20	750
100	1330
200	1750
300	2500
400	3830

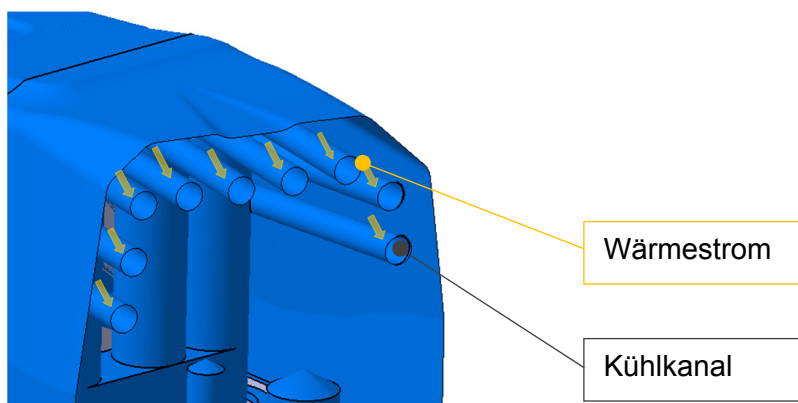
**Tabelle 6 Merklein Daten [29]**

- **Presshärten**

Beim Presshärten steht das Bauteil großflächig im Kontakt mit den Werkzeugen, es wird hauptsächlich Wärme durch den Kontaktübergang vom Bauteil abgeführt. Die integrierte Kühlung im Stempel und in der Matrize hat die Aufgabe, die Abkühlrate im Serienprozess zu gewährleisten. Speziell in der Kühlphase werden sich die Werkzeuge durch die Wärmeaufnahme vom Bauteil erwärmen. Um realistische Simulationsergebnisse zu bekommen, ist ein Volumennetz notwendig, um diese Wärmeleitung zum Kühlkanal überhaupt darstellen zu können. In Abbildung 48 ist der Wärmestrom des Werkzeuges zu den Kanälen dargestellt.

*Art der Wärmeübertragung*

*Volumennetz*



**Abbildung 48 Wärmestrom von Werkzeug und Kühlkanäle**

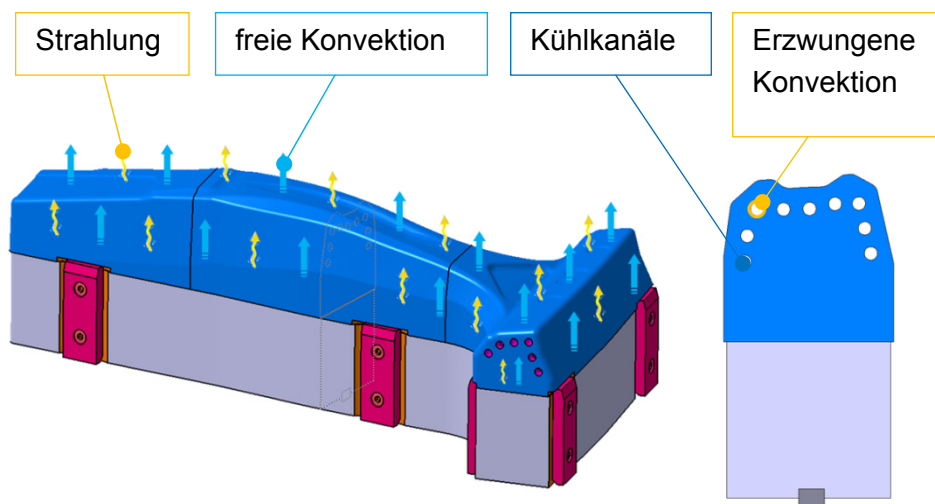
Der Wärmestrom vom Werkzeug in das Kühlmedium wird mit einem gemittelten Wärmeübergangskoeffizienten über den Prozess bestimmt. Über die Fluidgeschwindigkeit, die Stoffwerte des Wassers bei einer gemittelten Temperatur und dem Kanaldurchmesser, kann der Wärmeübergangskoeffizienten zwischen Wasser und der Werkzeugwand ermittelt werden (siehe Abschnitt 6.1).

*Wärmeübergangskoeffizient  
Werkzeug und  
Kühlkanalwand*

- **Abkühlphase**

In der Abkühlphase stehen die Werkzeuge im geöffneten Zustand nur mit der Umgebung und dem Kühlmedium in Wechselwirkung. In dieser Zeit wird eine neue Platine für den zweiten Zyklus bereit gestellt. Der Wärmeaustausch zwischen Werkzeug und Umgebung findet durch freie Konvektion und Wärmestrahlung an den Werkzeugoberflächen sowie erzwungene Konvektion an der Fläche des Kühlkanals statt (siehe Abbildung 49).

*Wärmeübertragungsart*



**Abbildung 49 Wärmeübertragung in der Regenerationsphase**

## 5.7 Mechanische Modellierung

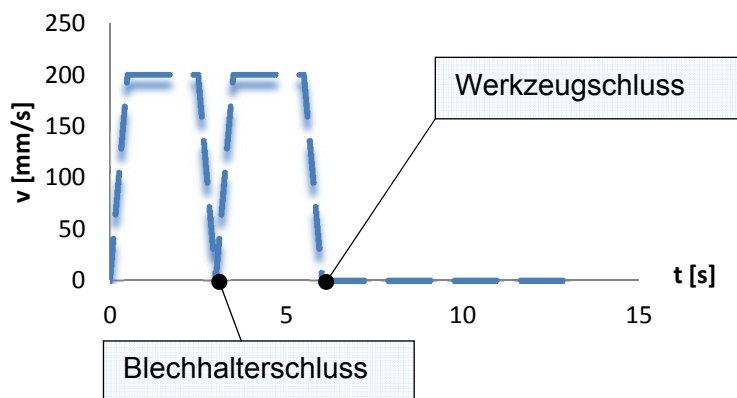
Neben den thermischen Einflüssen muss auch der umformtechnische Teil wie beim konventionellen Umformen im Simulationsmodell abgebildet werden. Da es sich um einen dynamischen Prozess handelt, wird die Kinematik der Werkzeuge in einem Prozesszyklus über die Geschwindigkeit und Zeit definiert. Ein Prozesszyklus mit dem verwendeten Versuchswerkzeug besteht aus dem Schließen von Matrize und Blechhalter sowie dem darauffolgenden Schließen von Stempel und Matrize. Nach dem vollständigen Schließen der Werkzeuge verweilt die Platine noch im geschlossenen Werkzeug. Der letzte Schritt eines Zyklus ist die Abkühlphase des offenen Werkzeuges, in der die Werkzeuge nicht mit einem erwärmten Blech bestückt sind. Währenddessen wird die nächste Platine für den folgenden Zyklus bereit gemacht und vom Ofen zum Werkzeug transportiert. Die Prozesszeiten sind in Tabelle 7 dargestellt.

*Prozesszyklusbeschreibung*

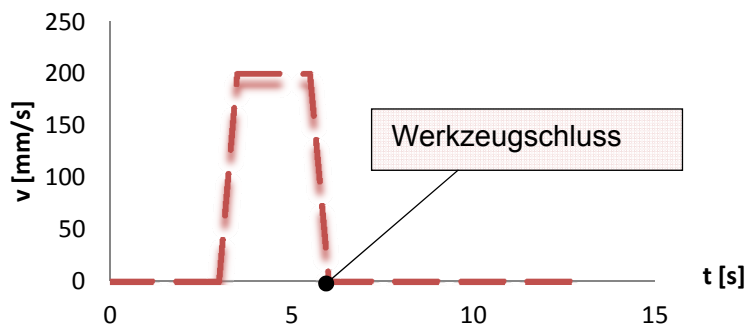
Zyklus	1
Schließen von [Matrize] – [Blechhalter]	3s
Schließen von [Matrize] – [Stempel]	3s
Verweilzeit	4s
Abkühlphase	14s

**Tabelle 7 Prozesszeit des Versuchsablaufs**

Die Geschwindigkeit der Matrize ist über die Zeit in Abbildung 50 dargestellt.


**Abbildung 50 Geschwindigkeit -Zeitverlauf Matrize**

Die Geschwindigkeit des Blechhalters ist über die Zeit in Abbildung 51 dargestellt.


**Abbildung 51 Geschwindigkeit -Zeitverlauf Blechhalter**

Neben der kinematischen Charakteristik des Prozesses wird auch die Pressenkraft in der Höhe von 8000kN in der Phase des Presshärtens implementiert.

## 5.8 Anfangs-und Randbedingungen

Zur Bestimmung der Temperaturentwicklung in einem Körper werden die thermischen Ausgangszustände durch Anfangsbedingungen und die Beeinflussung durch die Umgebung mittels Randbedingungen definiert.

- **Thermische Anfangsbedingungen**

Die Werkzeuge starten im Prozess zum Zeitpunkt  $t=0$  mit Raumtemperatur. Die Platine hat zum Zeitpunkt Null die gemessene Temperatur beim Positionieren.

*Raumtemperatur und  
gemessen  
Platinentemperatur*

- **Thermische Randbedingungen**

Der Einfluss der Umgebung auf die Temperaturverteilung wird mit Hilfe von Randbedingungen definiert. Im Ls-Dyna Modell wird der Wärmeaustausch durch Strahlung über eine universelle Konstante, die Stefan-Boltzmann-Konstante ( $\sigma$ ) und den Emissionsgrad ( $\varepsilon$ ) definiert (Siehe Gleichung 6). Die Wärmeübertragung durch Konvektion ist mit einer konvektiven Randbedingung implementiert (siehe Gleichung 5).

*Ls-Dyna*

$$\dot{q} = A * \alpha_{Konvektion} * (T_1 - T_2) \quad (5)$$

$$\dot{q} = A * \varepsilon * \sigma * (T_1^4 - T_2^4) \quad (6)$$

Strahlung und Konvektion können als Randbedingung dem Modell über Segmente, die den betreffenden Bereich definieren, zugewiesen werden.

*zuweisen der  
Randbedingungen*

Aufgrund der Größe des Modells und der Masse, die zwischen der Bauteilauflage liegt, wird die Annahme getroffen, dass die Temperatur im Boden konstant bleibt. Durch das Zuweisen einer konstanten Temperatur in den Konten des Werkzeugbodens, wird eine weitere Randbedingung gesetzt.

*zuweisen der konstanten  
Temperaturen*

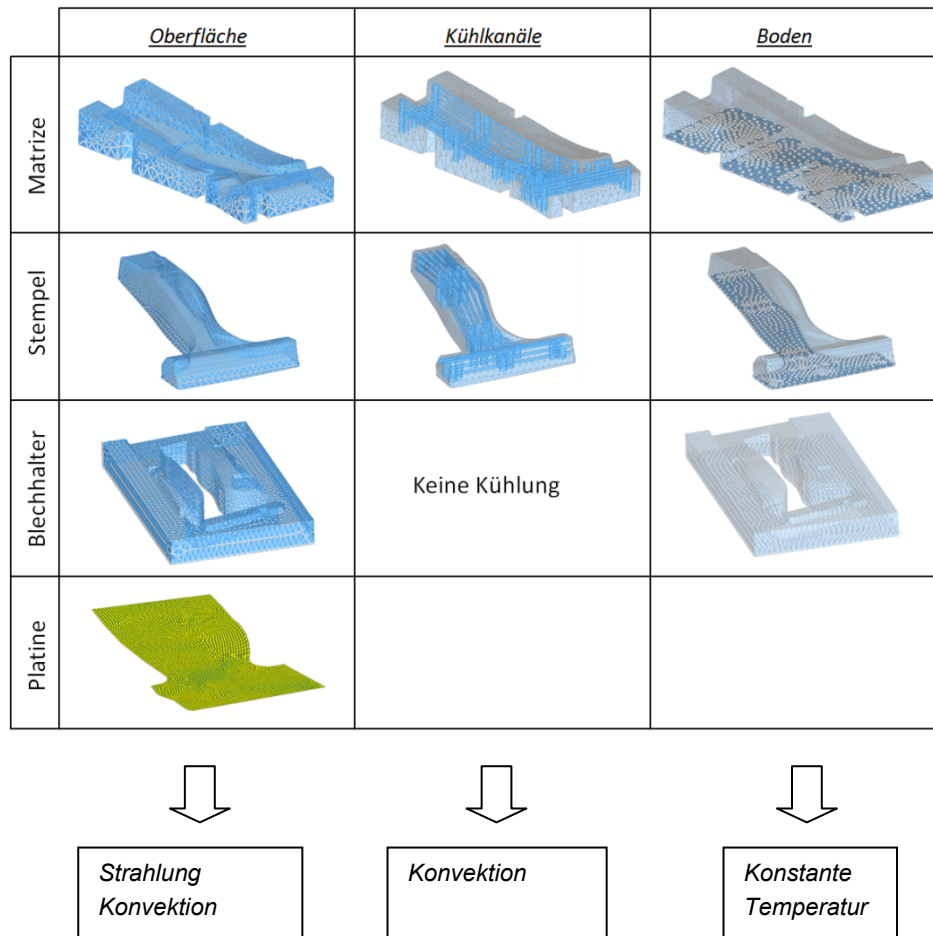
Der Wärmestrom vom Werkzeug in die Kühlkanäle wird mit einer konvektiven Randbedingung (siehe Gleichung 7) an der Kühlkanalwand berechnet.

$$\dot{q} = A * \alpha_{Wasser-Wand} * (T_1 - T_2) \quad (7)$$

In Abbildung 52 sind die Bereiche in denen die thermischen Randbedingungen der Werkzeuge und Platine, im thermisch-



mechanisch gekoppelten Schalen/Volumen-Modell gesetzt worden sind dargestellt.



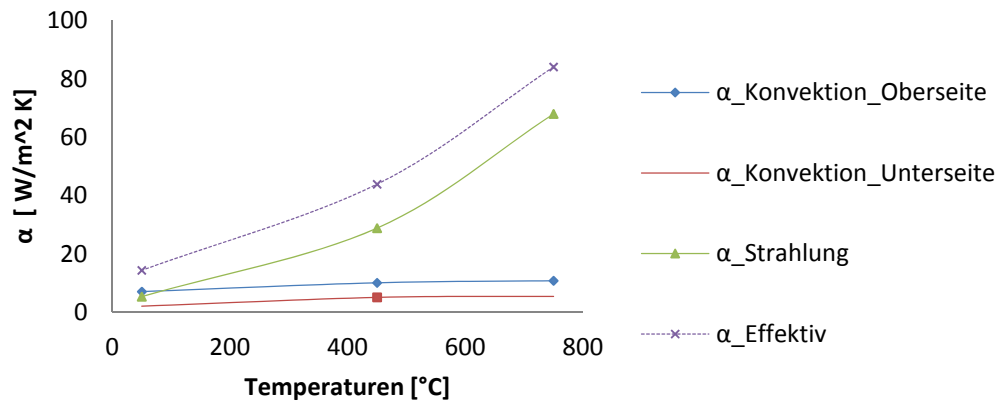
**Abbildung 52 Einteilung der thermischen Randbedingungen**

In AutoForm ist es nicht möglich, den Wärmeaustausch durch Strahlung über die Stefan-Boltzmann Konstante und den Emissionskoeffizienten zu definieren. Um den Wärmestrom (siehe Gleichung 8) der Platine an die Umgebung durch Strahlung im Modell mit einfließen lassen zu können, muss ein effektiver Wärmeübergangskoeffizient (siehe Abbildung 53) berechnet werden, der Konvektion und Strahlung berücksichtigt (siehe Abschnitt 6.4).

*AutoForm*

$$\dot{q} = A * \alpha_{Effektiv} * (T_1 - T_2) \quad (8)$$

Der Wärmeübergang durch Strahlung wird sehr stark von der Temperatur beeinflusst (siehe Abbildung 53). In AutoForm ist es möglich, einen minimalen und maximalen effektiven Wärmeübergangskoeffizienten zu definieren.



**Abbildung 53 Temperaturabhängiger Wärmeübergangskoeffizient**

## 5.9 Explizites und implizites Lösungsverfahren

Zur Lösung von partiellen Differenzialgleichungen bei der Anwendung der Finiten Elementen Methode gibt es zwei unterschiedliche Lösungsverfahren. Diese werden unterteilt in das explizite und implizite Lösungsverfahren.

- **Explizites Lösungsverfahren**

Bei der Anwendung des expliziten Verfahrens wird der zu lösende Umformprozess in Zeitschritte unterteilt und als dynamisches Problem betrachtet. Beim Lösen der Größe zum Zeitpunkt  $t + \Delta t$  werden die Werte des Zeitpunktes  $t$  herangezogen. Das explizite Verfahren ist im Vergleich zum impliziten Verfahren sehr effektiv und robust. Die Stabilität ist jedoch durch die Größe des Zeitschrittes beschränkt. Der maximal erlaubte Zeitschritt ist begrenzt durch die Zeit die eine longitudinale Schalwelle benötigt um die Elementkante mit dem kleinsten Abstand zu überschreiten (siehe Gleichung 9 und 10).  $v$  präsentiert die Wellenausbreitungsgeschwindigkeit und  $L_{\text{Element}}$  den minimalen Abstand zwischen zwei Konten. [3]

*Unterteilung in Zeitschritte*

*Prinzip des expliziten Verfahrens*

*Stabilitätskriterium*

$$\Delta t \leq \frac{L_{\text{Element}}}{v} \quad (9)$$

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (10)$$

Die Geschwindigkeit der Welle ist abhängig von der Dichte des Materials und des E-Moduls (siehe Gleichung 9). Daraus folgt, dass der maximal mögliche Zeitschritt vom E-Modul, der Dichte des Werkstoffes und der Elementgröße beeinflusst wird (siehe Gleichungen 9 und 10).

- **Implizites Lösungsverfahren**

Im Gegensatz zum expliziten Verfahren wird beim impliziten Verfahren das Lösen des Zeitpunktes  $t + \Delta t$  nicht nur die Werte des Zeitpunktes  $t$ , sondern auch die des vorangegangenen Zeitpunkt  $t + \Delta t$  zur Ermittlung der Lösung herangezogen. Aufgrund dessen stellt sich eine Nichtlinearität ein wodurch zum Lösen des nichtlinearen Gleichungssystem ein iteratives Lösungsverfahren (zum Beispiel NEWTON-Verfahren siehe Knothe & Wessels [22]) verwendet wird. Aufgrund des nichtlinearen Gleichungssystems ist das implizite Verfahren aufwendiger gegenüber dem expliziten, dennoch ist die Wahl eines bis um den Faktor 1000 größeren Zeitschrittes, bei Beibehaltung der Stabilität möglich. In Summe sind trotz höheren Rechenaufwandes pro Zeitschritt, bei Berücksichtigung des größeren Zeitschrittes bis zu einem Faktor von 1000, beim Impliziten Verfahren kürzere Rechenzeiten möglich.

*Prinzip des impliziten Verfahrens*

*Nichtlinearität*

*Vorteil*

- **Auswahl der Lösungsverfahren**

Für die Simulation in der Blechumformung hat sich das explizite Lösungsverfahren aufgrund seiner Robustheit am meisten bewährt. Für die Lösung von thermischen Problemen wird das implizite Lösungsverfahren empfohlen [30]. In dieser Arbeit wird in den Simulationsmodellen in Ls-Dyna für das mechanische Problem eine explizite Zeitintegration und für die thermische Berechnung eine implizite Zeitintegration gewählt. Durch den größeren möglichen Zeitschritt beim impliziten Verfahren wird Rechenzeit eingespart.

*Lösungsverfahren in Ls-Dyna*

In AutoForm ist keine individuelle Einstellung der Lösungsverfahren möglich. AutoForm gibt für die thermische und mechanische Rechnung das implizite Lösungsverfahren vor.

*Lösungsverfahren in AutoForm*

<u>Software</u>	<u>mechanisches Lösung</u>	<u>thermische Lösung</u>
AutoForm	implizit	implizit
Ls-Dyna	explizit	implizit

**Abbildung 54 Einteilung der Lösungsverfahren in AutoForm und Ls-Dyna**

## 5.10 Massenskalierung und Zeitskalierung

Bei einer thermisch-mechanisch gekoppelten Simulation kommt es bei komplexeren Problemstellungen meistens zu sehr langen Rechenzeiten. Um dies zu reduzieren gibt es zwei Methoden, die Massenskalierung und die Zeitskalierung.

- **Massenskalierung**

In der Simulation des mechanischen Problems kann sich eine Zeitschrittgröße im Mikrosekundenbereich einstellen, wodurch sehr lange Rechenzeiten resultieren. Um lange Rechenzeiten zu vermeiden gibt es die Möglichkeit bei der Anwendung des expliziten Lösungsverfahrens durch künstliche Erhöhung der Masse den Zeitschritt zu vergrößern. Diese Vorgangsweise wird als Massenskalierung bezeichnet (siehe Gleichung 11).

*Künstliche Erhöhung des Zeitschrittes*

$$\Delta t \approx \sqrt{\frac{m}{E * L_{Element}}} \quad \Delta t \approx \sqrt{\frac{m + \Delta m}{E * L_{Element}}} \quad (11)$$

Bei der Anwendung dieser Methode dürfen die Trägheitsenergien nur einen geringen Anteil an der Gesamtenergiebilanz besitzen, da sich die Trägheitskräfte mit zunehmender Massenskalierung und Zeitskalierung erhöhen, um den Fehler gering zu halten.

- **Zeitskalierung**

Der Zeitschritt der thermischen Analyse ist begrenzt durch die Wärmeleitfähigkeit und Elementgröße des Modells (siehe Gleichung 12). Das thermische Modell muss im Stande sein, mindestens gleich schnell zu reagieren wie in der Realität.

*Grenze des thermischen Zeitschrittes*

$$\Delta t_{therm} \leq \frac{1}{12} * \frac{L_{Element}^2}{a} \quad a = \frac{\lambda}{\rho * c_p} \quad (12)$$

Eine Methode, um die Zeitschrittweite zu erhöhen und die Rechenzeit der Simulation zu verkürzen, ist das Skalieren der Zeit. Beim Zeitskalieren werden die Geschwindigkeiten erhöht. Der Prozess wird künstlich beschleunigt, das heißt im weiteren Sinne, dass die dimensionslosen Kennzahlen Biot und Fourier (siehe Gleichung 13) mit dem realen Prozess übereinstimmen müssen.

*Künstliche Beschleunigung des Prozesses*

$$Fo = \frac{\lambda * t}{\rho * c_p * L^2} \quad Bi = \frac{\alpha * L}{\lambda} \quad (13)$$

Diese Veränderung wird durch die Skalierung der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$ , mit dem Verhältnis der Simulationsgeschwindigkeit zur realen Geschwindigkeit kompensiert, und führt schlussendlich zur Beibehaltung einer konstanten Fourier-Zahl. Auch alle Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha$  werden auf skaliert, um die Biotzahl ebenfalls konstant zu halten. [4]

*Beibehaltung der Kennzahlen*

### 5.11 Eingabeparameter

Um einen Überblick über die Eingabeparameter der drei Simulationsmodelle zu bekommen werden diese in der folgenden Tabelle gezeigt.

Parameter	AutoForm thermisch-mechanisch gekoppeltes Schalen-Modell		Ls-Dyna thermisch-mechanisch gekoppeltes Schalen- Modell		Ls-Dyna thermisch-mechanisch gekoppeltes Schalen/Volumen- Modell	
	Wert	Einheit	Wert	Einheit	Wert	Einheit
Wärmeübergangskoeffizient [Werkzeug - Umgebung]	.....	.....	.....	.....	5E-06	W/mm²K
Wärmeübergangskoeffizient [Werkzeug Platine]	$\alpha_{Kontakt}$	mW/mm²K	$\alpha_{Kontakt}$	W/mm²K	$\alpha_{Kontakt}$	W/mm²K
Wärmeübergangskoeffizient [Werkzeug - Kühlkanal]	.....	.....	.....	.....	0,0035	W/mm²K
Wärmeübergangskoeffizient [Platine - Umgebung] oben	750 °C: 0,084 450 °C: 0,043	mW/mm²K	10,7/E-35	W/mm²K	10,7/E-06	W/mm²K
Wärmeübergangskoeffizient [Platine - Umgebung] unten	750 °C: 0,084 450 °C: 0,043	mW/mm²K	5,37E-06	W/mm²K	5,37E-06	W/mm²K
Emissionsgrad Platine	.....	.....	0,8	.....	0,8	.....
Emissionsgrad Werkzeug	.....	.....	.....	.....	0,2	.....
Stefan-Boltzmann-Konstante	.....	.....	5,7E-14	W/mm²K⁴	5,7E-14	W/mm²K⁴
Spezifische Wärmekapazität Werkzeugstahl [CR7V-L]	.....	.....	.....	.....	Cp(T)	J/kgK
Wärmeleitfähigkeit Werkzeugstahl [CR7V-L]	.....	.....	.....	.....	$\lambda(T)$	W/mK
Materialmodell Platine	22MnB5	.....	mat106	.....	mat106	.....
Reibkoeffizient Blech - Werkzeuggestrichfläche	0,3	.....	0,3	.....	0,3	.....
konstante Werkzeugtemperaturen	70	°C	70	°C	.....	.....
Anfangstemperatur Werkzeuge	.....	.....	20	°C	20	°C
Anfangstemperatur Platine	750	°C	750	°C	750	°C
Materialmodell Werkzeuge	.....	.....	.....	.....	MAT_THERMAL_ISOTROPIC_ID	.....

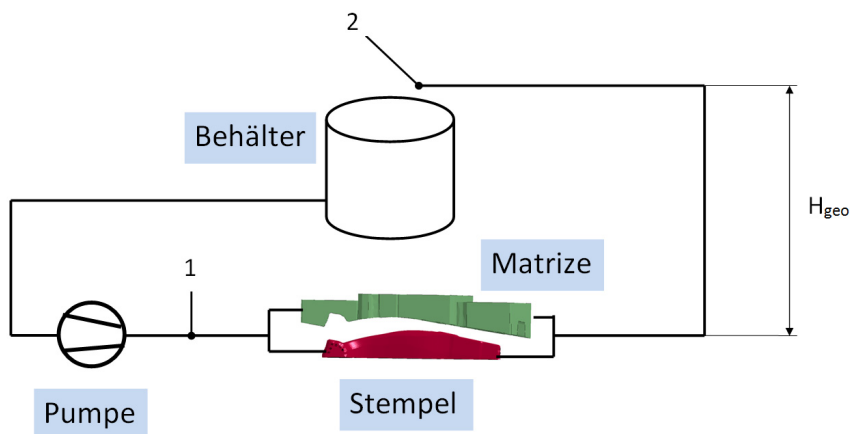
Tabelle 8 Eingabeparameter

## 6 Ermittlung der Wärmeübergangskoeffizienten

In diesem Kapitel werden die Wärmeübergangskoeffizienten, welche als Eingabeparameter in den Simulationsmodellen verwendet werden, berechnet.

### 6.1 Ermittlung des konvektiven Übergangskoeffizienten an der Kühlkanalwand

In Abschnitt 6.1 wird die Fluidgeschwindigkeit in den Kühlkanälen und anschließend der Wärmeübergangskoeffizient nach dem Ansatz von Gnielinski, sowie Dittus und Boelter zwischen Kühlmedium und Werkzeug ermittelt. Der Druck am Pumpenausstritt wurde gemessen, dadurch kann die Förderhöhe der Anlage berechnet und weiters der Volumenstrom mit Hilfe der Pumpenkennlinie abgelesen werden. In Abbildung 55 ist der Pumpenanlagenplan schematisch dargestellt.



**Abbildung 55 Pumpenanlageplan**

Zuerst wird gedanklich eine Systemgrenze zwischen Punkt 1 und Punkt 2 gezogen. Anschließend wird Bernoulligleichung von Punkt 1 bis zum Punkt 2 aufgestellt (siehe Gleichung 15).

In Tabelle 9 sind die Ausgangsparameter der Pumpenberechnung angegeben.

[z <sub>1</sub> ] Höhe Position 1	0	m
[z <sub>2</sub> ] Höhe Position 2	0	m
[p <sub>1</sub> ] Druck an Position 1	4,5	bar
[p <sub>2</sub> ] Druck an Position 2	1	bar
[A <sub>1</sub> , A <sub>2</sub> ] Querschnitt an Position 1 und 2	A <sub>1</sub> =A <sub>2</sub>	m <sup>2</sup>
[ρ] Roh Wasser bei 18 °C	998,6	kg/m <sup>3</sup>
[d] Durchmesser Kühlkanal	0,008	m

**Tabelle 9 Werte für die Berechnung der Verlusthöhe**

Das im Prozess verwendete Kühlmittel ist Wasser und kann als inkompressibles Fluid betrachtet werden. Die Querschnitte im Punkt 1 und 2 haben denselben Flächeninhalt, daraus resultiert, aufgrund des konstanten Massenstromes, dass die Geschwindigkeiten in beiden Punkten gleich sind (siehe Gleichung 14).

*Kontinuitätsgleichung*

$$\rho = konst \quad \dot{Q} = A * c = konst \quad c_1 = c_2 \quad (14)$$

Die Terme der Gleichung 15 repräsentieren die Lageenergie, Druckenergie, kinetische Energie und die Verlustenergie. [5]

*Erweiterte Energiegleichung für reale inkompressible Fluide*

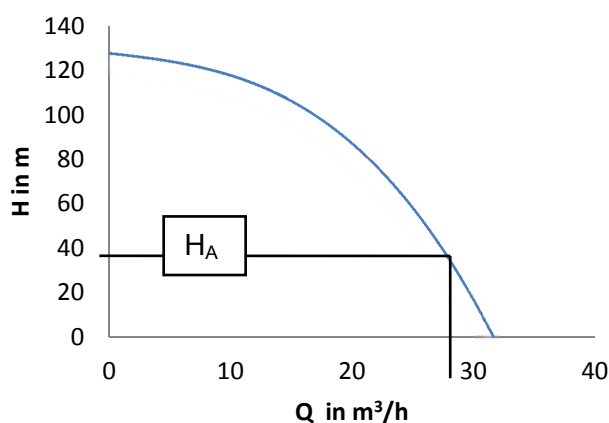
$$z_1 + \frac{p_1}{\rho * g} + \frac{c_1^2}{2 * g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho * g} + \frac{c_2^2}{2 * g} + H_v$$

$$H_v = \frac{p_1 - p_2}{\rho * g} \quad H_v = 35,7m \quad (15)$$

In diesem Fall ist die Geodätische Höhe Null, dadurch ist die Förderhöhe der Anlage gleich der Verlusthöhe (siehe Gleichung 16).

*Förderhöhe der Anlage*

$$H_A = H_v - H_{geo} = 35,7m \quad (16)$$


**Abbildung 56 Pumpenkennlinie CR/CRE 15 [31]**

Der Schnittpunkt von Förderhöhe und Pumpenkennlinie ergibt den Volumenstrom der Anlage (siehe Abbildung 56).



Der Volumenstrom der Anlage beträgt:

*Volumenstrom der Anlage*

$$\dot{Q} = 27,9 \text{ m}^3/\text{h}$$

Der Flächeninhalt wird mit Gleichung 17 berechnet.

$$A = \frac{d^2 \cdot \pi}{4} \quad A = 0,00005024 \text{ m}^2 \quad (17)$$

In den gekühlten Werkzeugen, Matrize und Stempel sind in Summe 68 Kanäle vorhanden.

*Summe der  
Kühlkanalquerschnitte*

$$\sum A = A * 68 \quad \sum A = 0,00432064 \text{ m}^2 \quad (18)$$

Über den Volumenstrom und der Summe aller Querschnitte wird die durchschnittliche Fluidgeschwindigkeit berechnet (siehe Gleichung 19).

*Geschwindigkeit des  
Kühlmediums*

$$\dot{Q} = \sum A * c$$

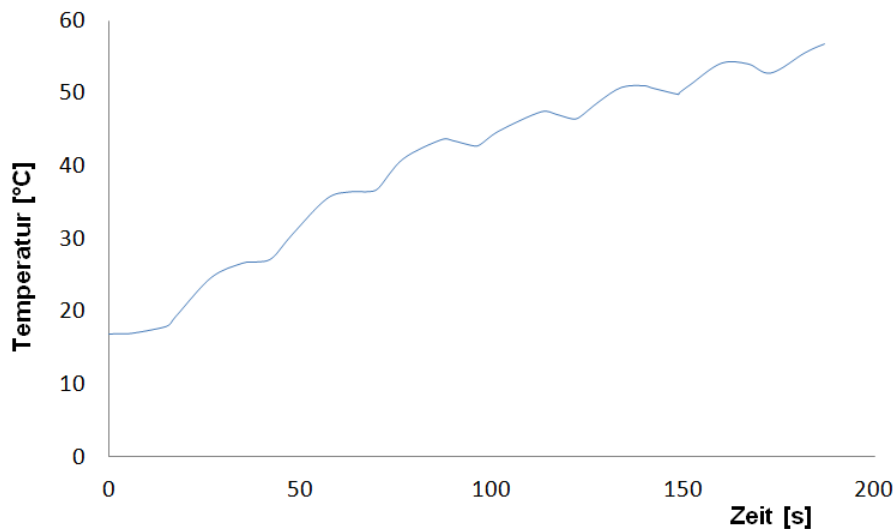
$$c = \frac{\dot{Q}}{\sum A} \quad c = 1,79 \text{ m/s} \quad (19)$$

Aus dem Mittelwert der Fluidtemperatur und der Wandtemperatur berechnet sich die Filmtemperatur. Mit der Filmtemperatur, der errechneten Geschwindigkeit und den Werten in Tabelle 10 kann der Übergangskoeffizient ermittelt werden.

[T] Filmtemperatur	18	[°C]
[d] Kanaldurchmesser	0,008	m
[λ] Wärmeleitfähigkeit bei 18°C	0,5949	[W/mK]
[ν] kinematische Viskosität bei 18°C	1,0541E-06	[m <sup>2</sup> /s]
[L] durchschnittliche Kanallänge	0,15	[m]
[Pr] Prandtl Zahl von Wasser bei 18°C	7,408	[--]

**Tabelle 10 Stoffwerte Wasser bei 18°C und Kanalgeometriewerte**

Bei der Berechnung des ersten Zyklus ist die Annahme von 18°C Filmtemperatur ausreichend, da sich das Werkzeug in Kühlkanalnähe kaum erwärmt. Bei der weiteren Betrachtung von mehreren aufeinander folgenden Zyklen muss der Wärmeübergangskoeffizient bei einer höheren Temperatur ermittelt werden. In Abbildung 57 ist der gemessene Temperaturanstieg in der Nähe der Kühlkanalwand abgebildet.



**Abbildung 57** gemessene Temperatur in Kühlkanalnähe (Matrize)

In Gleichung 20 wird die Reynoldszahl, das Verhältnis von Trägheits- zu Zähigkeitskräften, aufgestellt .

*Reynoldszahl*

$$Re = \frac{c \cdot d}{\nu} \quad Re = 13613,24 \quad 10^4 \leq Re \leq 10^6 \quad (20)$$

Die Reynoldszahl liegt zwischen  $10^4$  und  $10^6$ , es handelt sich somit um eine turbulente Strömung. In diesem Bereich sind die Gleichung 21 und 22 gültig.

*Turbulente Strömung*

In Gleichung 21 wird die Nußeltzahl nach Gnielinski [6] berechnet.

*Nußelt-Zahl nach Gnielinski*

$$Nu = \frac{\left(\frac{\xi}{8}\right) \cdot Re \cdot Pr}{1 + 12,7 \cdot \sqrt{\left(\frac{\xi}{8}\right) \cdot \left(Pr^{\frac{2}{3}} - 1\right)}} \cdot \left[1 + \left(\frac{d}{L}\right)^{\frac{2}{3}}\right] \quad Nu = 131,31 \quad (21)$$

Der Widerstandsbeiwert wird mit Gleichung 22 angenähert.

*Widerstandsbeiwert*

$$\xi = \frac{1}{[0,78 \cdot \ln(Re) - 1,5]^2} \quad \xi = 0,028488 \quad (22)$$

Mit der ermittelten Nußeltzahl (siehe Gleichung 23), der charakteristische Länge und dem Stoffwert Wärmeleitfähigkeit, wird der konvektive Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha$  berechnet.

*Wärmeübergangskoeffizient zwischen Kühlmittel und Werkzeug*

$$Nu = \frac{\alpha \cdot d}{\lambda} \quad (23)$$

In Tabelle 11 wird der Wärmeübergangskoeffizient bei unterschiedlichen Temperaturen nach dem Ansatz von Gnielinski angegeben.

Re	Widerst	Nusselt	$\alpha_{\text{Gnielinski}}$	°C
13752,6527	0,02841243	129,564343	9634,728441	18
1,44E+04	0,02804771	132,053169	9879,227671	20
1,52E+04	0,02770095	134,479386	10119,57378	22
1,59E+04	0,02737001	136,852056	10357,98998	24
1,66E+04	0,02705475	139,163598	10592,08932	26
3,06E+04	2,33E-02	170,704563	13963,63327	60

**Tabelle 11 Ergebnisse nach Gnielinski**

Eine einfachere Lösung ist mit dem Ansatz nach Dittus und Boelter möglich (siehe Gleichung 24). Das Ergebnis nach Dittus und Boelter unterscheidet sich sehr von dem des Gnielinski Ansatzes (siehe Abbildung 58).

*Ansatz Dittus und Boelter*

$$Nu = 0,023 * Pr^{\frac{1}{3}} * Re^{\frac{4}{5}} \quad (24)$$

$$\alpha = \frac{Nu * \lambda}{d} \quad (25)$$

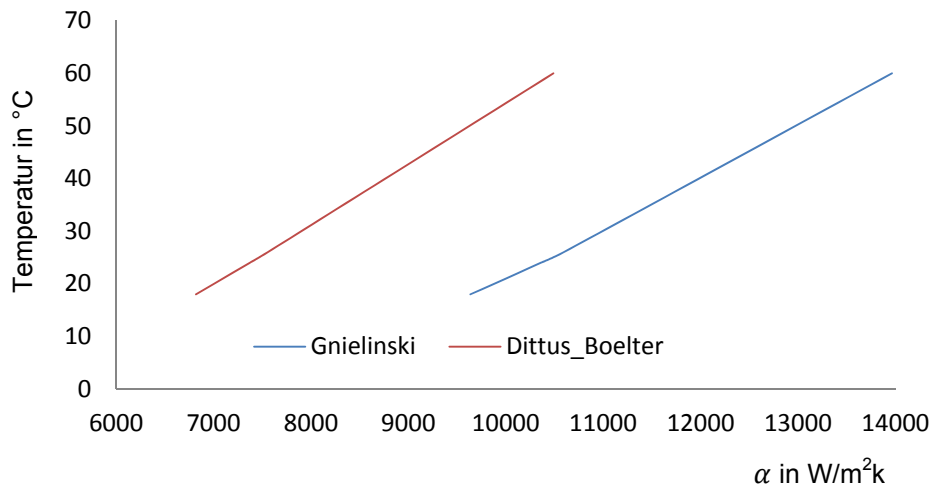
In Tabelle 12 wird der Wärmeübergangskoeffizient bei unterschiedlichen Temperaturen nach dem Ansatz von Dittus und Boelter angegeben.

Nusselt	$\alpha_{\text{Dittus_Boelter}}$	°C
91,6932445	6818,538895	18
93,6149554	7003,568852	20
95,5127826	7187,336889	22
97,3934251	7371,464862	24
99,2509337	7554,23669	26
128,217522	10488,19334	60

**Tabelle 12 Ergebnisse nach Dittus und Boelter**

Laut Erfahrungswerte [24] sollte der Wärmeübergangskoeffizient im Bereich zwischen 3000 und 4000 W/m<sup>2</sup>K an der Kühlkanalwand liegen. Laut der in Abschnitt 6.1 durchgeführten Rechnung hat der Koeffizient den doppelten und dreifachen Betrag, deshalb werden 2 Rechnungen mit einmal 3500 W/m<sup>2</sup>K und 9635 W/m<sup>2</sup>K (nach Gnielinski) durchgeführt und verglichen.

*Vergleich Erfahrungswert mit berechneten Wert*



**Abbildung 58 Vergleich Gnielinski mit Dittus und Boelter**

## 6.2 Ermittlung des Wärmeübergangskoeffizienten zwischen Platine und Umgebung

Die Parameter für die Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten zwischen Platine und Umgebung sind in Tabelle 13 angegeben.

[A] Flächeninhalt Platine	0,195	m <sup>2</sup>
[U] Umfang Platine	2,104	m
[T <sub>1</sub> ] Temperatur Platine Fall 1	750	[°C]
[T <sub>2</sub> ] Temperatur Platine Fall 2	450	[°C]
[T <sub>3</sub> ] Temperatur Umgebung	20	[°C]
[ρ] Dichte Luft 20 °C	1,188	[kg/m <sup>3</sup> ]
[c <sub>p</sub> ] spezifische Wärmekapazität Luft 20°C	1006,4	[J/kgK]
[λ] Wärmeleitfähigkeit Luft 20°C	0,0258	[W/mK]
[ν] kinematische Viskosität Luft 20°C	15,32E-06	[m <sup>2</sup> /s]
[a] Temperaturleitfähigkeit Luft 20°C	216,3E-07	[m <sup>2</sup> /s]
[Pr] Prandtl Zahl Luft 20°C	0,7081	[--]

**Tabelle 13 Werte für die Berechnung**

Die Platine liegt horizontal am Blechhalter auf. Der Blechhalter hat eine gewölbte Form, deshalb hat nur ein geringer Teil der Unterseite Kontakt mit dem Werkzeug (siehe Abbildung 59). Für die Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten gilt die Annahme, dass die gesamte Oberfläche in Wechselwirkung zur Umgebung steht.

*Platinenaufgabe Blechhalter*

Aufgrund der Tatsache, dass die Unterseite einen ineffizienteren Wärmeübergang besitzt als die Oberseite, müssen diese auf unterschiedliche Weise berechnet werden.[7]

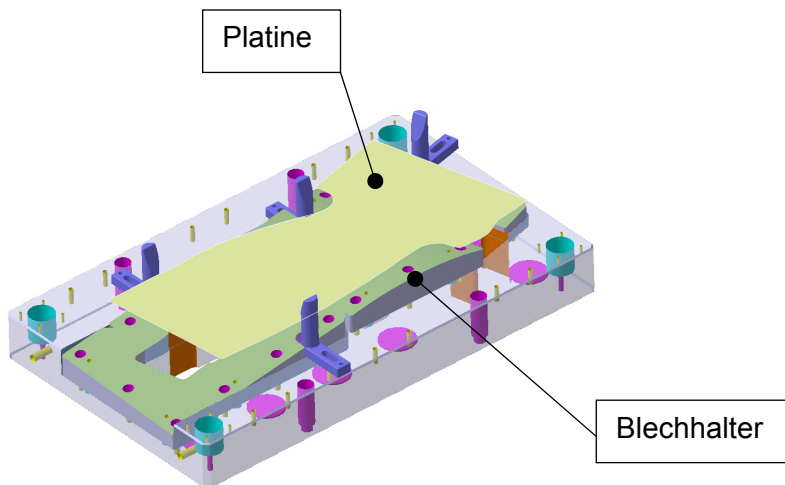


Abbildung 59 Platine am Blechhalter

- **Ermittlung des Wärmeübergangskoeffizienten der oberen Platinenschicht durch Konvektion**

Die durch Konvektion erwärmte Luft kann von der Oberseite frei nach oben hin abströmen (siehe Abbildung 60). Die Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten, zwischen Platinen Oberseite und der Umgebung, wird in den nächsten Schritten erklärt.

*Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten an der Oberseite der Platine*

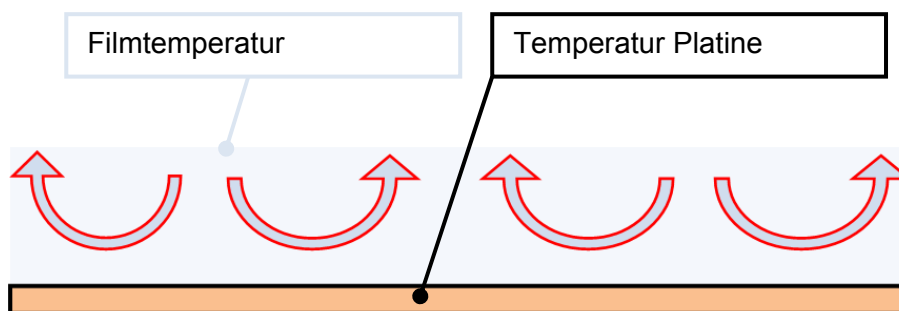


Abbildung 60 Fluidströmung Heiße Platte Position Oben [7]

Der Wärmeübergangskoeffizient kann über die Nusseltzahl ermittelt werden (siehe Gleichung 26)

*Wärmeübergangskoeffizient zwischen Platinen Oberseite und der Umgebung*

$$\alpha = \frac{N_{UL} \cdot \lambda}{L} \quad \alpha_1 = 10,751 \frac{W}{m^2 K} \quad (26)$$

Die dimensionslose Kennzahl welche die Art der Wärmeübertragung beschreibt, ist in Gleichung 27 angeführt.

*Rayleigh Zahl*

$$R_{aL} = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_1 - T_3) \cdot L^3}{a \cdot \nu} \quad R_{aL} = 2,6078562 \cdot 10^7 \quad (27)$$

Die kritische Rayleigh Zahl wird übertroffen, es findet Konvektion statt. Die Auftriebskräfte sind größer als die Zähigkeitskräfte, deshalb kommt es zu einer Strömung. Die Gleichung 28 ist somit gültig.

*Nusseltzahl*

$$10^4 \leq R_{aL} \leq 10^7$$

$$N_{UL} = 0,54 \cdot R_{aL}^{\frac{1}{4}} \quad N_{UL} = 38,589 \quad (28)$$

Die Filmtemperatur ist der Mittelwert zwischen Plattentemperatur und Umgebungstemperatur (siehe Gleichung 29).

*Filmtemperatur*

$$T_f = \frac{(T_1 - T_3)}{2} = 658K \quad (29)$$

Der Wärmeausdehnungskoeffizient wird bei einem idealen Gas mit dem reziproken Wert der Filmtemperatur bestimmt (siehe Gleichung 30).

*Wärmeausdehnungskoeffizient*

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \cdot \left( \frac{d\rho}{dT} \right)_p = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{p}{RT^2} \quad (30)$$

$$\beta = \frac{1}{T_f} = 0,0015197K^{-1}$$

Die charakteristische Länge bei einer horizontalen Platte ist das Verhältnis aus Flächeninhalt und Umfang (siehe Gleichung 31).

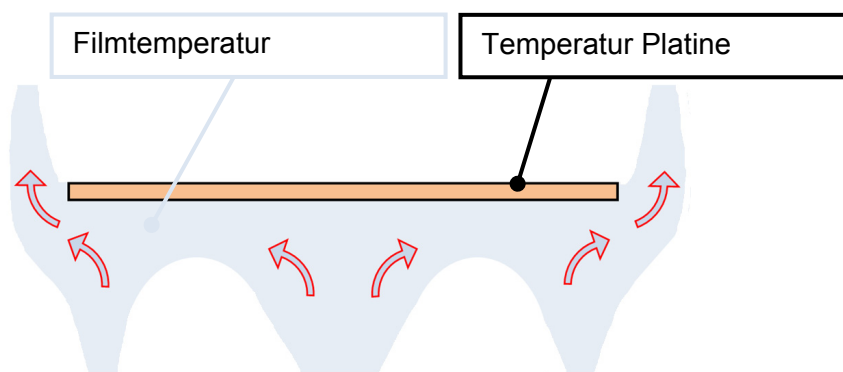
*Charakteristische Länge*

$$L = \frac{A}{U} \quad L = 0,0926 \text{ m} \quad (31)$$

- **Ermittlung des Wärmeübergangskoeffizienten der unteren Platinenschicht durch Konvektion**

Die durch Konvektion erwärmte Luft kann von der Unterseite anfangs nur horizontal abströmen, und erst ab Ende des Bleches vertikal nach oben hin strömen (siehe Abbildung 61). Diese Bedingung macht die Wärmeabfuhr von der Unterseite ineffizienter. Die Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten zwischen Platinen Unterseite und der Umgebung wird mit den Gleichung 32 und 33 berechnet.[7]

*Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten an der Unterseite der Platine*



**Abbildung 61 Fluidströmung Heiße Platte Position Unten [7]**

$$10^5 \leq R_{al} \leq 10^{10}$$

$$N_{UL} = 0,27 * R_{al}^{\frac{1}{4}} \quad N_{UL} = 19,29 \quad (32) \quad \text{Nusseltzahl}$$

$$\alpha = \frac{N_{UL} * \lambda}{L} \quad \alpha_2 = 5,3758 \frac{W}{m^2K} \quad (33) \quad \text{Wärmeübergangskoeffizient}$$

### 6.3 Ermittlung des effektiven Übergangskoeffizienten der Platine an die Umgebung

Um die Software AutoForm mit Ls-Dyna vergleichen zu können, müssen die Eingabeparameter genau aufeinander abgestimmt werden. In AutoForm ist es nur möglich einen effektiven Übergangskoeffizienten zu implementieren. Um den Wärmeverlust der Platine an die Umgebung durch Strahlung im Modell mit einfließen lassen zu können, muss ein Wärmeübergangskoeffizient berechnet werden, der Konvektion und Strahlung in Form eines nichtlinearen Koeffizienten berücksichtigt (siehe Abschnitt 5.8).

Die Werte für die Berechnung des effektiven Wärmeübergangskoeffizienten sind in Tabelle 14 angeführt.

[A] Flächeninhalt Platine Oberseite	0,195	m <sup>2</sup>
[U] Umfang Platine	2,104	m
[T <sub>1</sub> ] Temperatur Platine Fall 1	750	[°C]
[T <sub>2</sub> ] Temperatur Platine Fall 2	450	[°C]
[T <sub>3</sub> ] Temperatur Umgebung	20	[°C]
[ρ] Dichte Luft 20 °C	1,188	[kg/m <sup>3</sup> ]
[cp] spezifische Wärmekapazität Luft 20°C	1006,4	[J/kgK]
[λ] Wärmeleitfähigkeit Luft 20°C	0,0258	[W/mK]
[ν] kinematische Viskosität Luft 20°C	15,32E-06	[m <sup>2</sup> /s]
[a] Temperaturleitfähigkeit Luft 20°C	216,3E-07	[m <sup>2</sup> /s]
[ε] Emissionskoeffizient Platine 750 °C	0,8	
[σ] Stefan-Boltzmann-Konstante	5,7E-14	W/mm <sup>2</sup> K <sup>4</sup>
[Pr] Prandtl Zahl bei Luft 20°C	0,7081	[--]

**Tabelle 14 Werte für die Berechnung**

Der Wärmeübergang durch Strahlung wird sehr stark von der Temperatur beeinflusst (siehe Abbildung 53). In AutoForm ist es möglich, einen minimalen und maximalen effektiven Wärmeübergangskoeffizienten zu definieren. Das Blech wird erfahrungsgemäß in einem Temperaturbereich zwischen 800°C und minimal 600°C, einen Wärmeaustausch an die Umgebung durch Strahlung und Konvektion leisten, da nach wenigen Sekunden vollständiger Werkzeugkontakt herrscht. Um den Wärmestrom an die Umgebung korrekt abzubilden, wird ein effektiver Wärmeübergangskoeffizient bei 450°C und bei 750°C berechnet .

In Gleichung 34 und 35 werden die Wärmeübergangskoeffizienten durch Konvektion an der Oberseite und Unterseite der Platine angegeben.

$$\alpha_{750^{\circ}\text{C\_Unterseite}} = 5,3758 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \quad \alpha_{750^{\circ}\text{C\_Oberseite}} = 10,751 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \quad (34)$$

$$\alpha_{450^{\circ}\text{C\_Unterseite}} = 5,024 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \quad \alpha_{450^{\circ}\text{C\_Oberseite}} = 10,048 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

In Gleichung 36 wird der Wärmestrom durch Strahlung bei 450°C und 750°C berechnet.

$$\dot{Q}_{\text{Strahlung}} = \varepsilon * \sigma * A * (T_1^4 - T_3^4) \quad (35)$$

Durch den in Gleichung 35 berechneten Wärmestrom wird in Gleichung 36 der Wärmeübergangskoeffizient ermittelt.

*Wärmeübergangskoeffizient von Konvektion bei 450°C und 750°C*

*Wärmestrom durch Strahlung*

*Wärmeübergangskoeffizient von Strahlung bei 450°C und 750°C*



$$\alpha_{Strahlung} = \frac{\dot{Q}_{Strahlung}}{A \cdot (T_1 - T_3)} \quad \alpha_{Strahlung_{450}} = 28,8 \frac{W}{m^2 K} \quad (36)$$

$$\alpha_{Strahlung} = \frac{\varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_1^4 - T_3^4)}{(T_1 - T_3)} \quad \alpha_{Strahlung_{750}} = 68 \frac{W}{m^2 K}$$

In Gleichung 37 werden die ermittelten Koeffizienten zu einem effektiven Parameter aufsummiert.

*Effektiver  
Wärmeübergangskoeffizient*

$$\sum \alpha = \alpha_{Konvektion_{Oberseite}} + \alpha_{Konvektion_{Unterseite}} + \alpha_{Strahlung} \quad (37)$$

$$\sum \alpha_{Effektiv_{750^\circ C}} = 84,12 \frac{W}{m^2 K}$$

$$\sum \alpha_{Effektiv_{450^\circ C}} = 43,87 \frac{W}{m^2 K}$$

## 7 Vergleich von Simulations- und Messergebnissen

In diesem Kapitel werden die Simulationsergebnisse des thermisch-mechanisch gekoppelten Schalen/Volumen-Modells mit den Messergebnissen des Versuches validiert und analysiert. Die Ergebnisse des thermisch-mechanisch gekoppelten Schalen-Modells mit AutoForm und Ls-Dyna werden miteinander verglichen.

### 7.1 Validierung der Simulationsergebnisse des Schalen/Volumen-Modells in LS-Dyna

In diesem Abschnitt werden die gemessenen Temperaturdaten des Werkzeuges und der Platine mit den Knotentemperaturen an der Messposition verglichen. Des Weiteren wird die Temperaturverteilung des abgepressten Bauteiles mit dem Ergebnis der IR-Kamera verglichen. In Abbildung 62 wird noch einmal die Position der Thermokabel gezeigt.

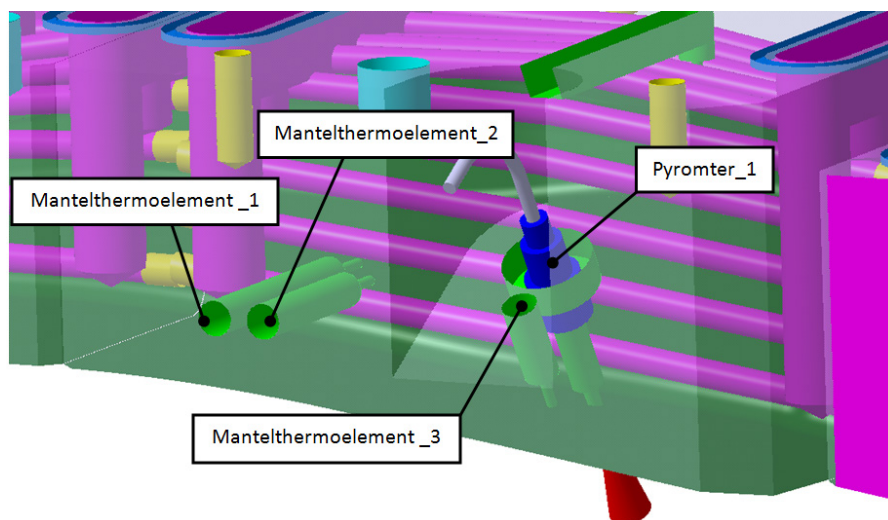


Abbildung 62 Position Thermokabel

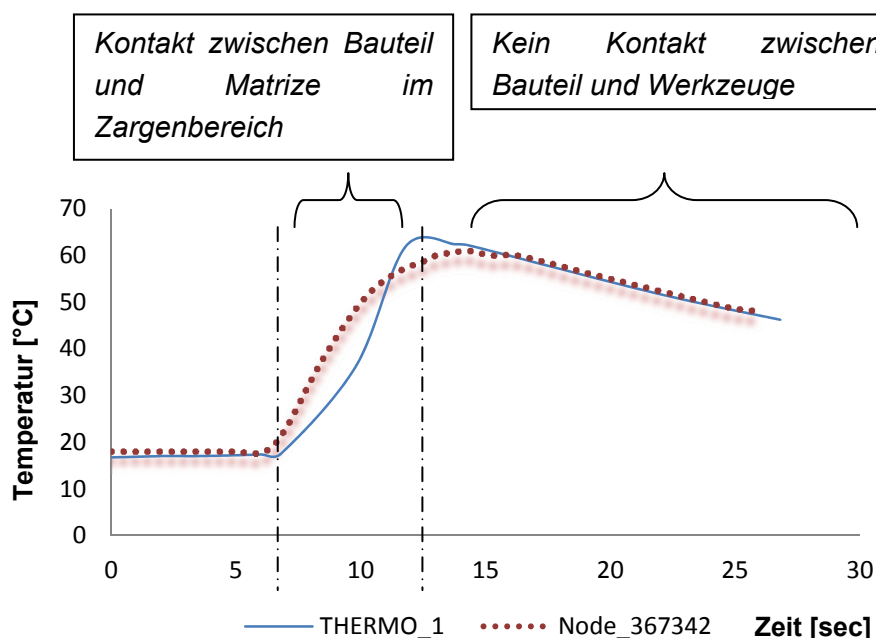
- **Ergebnis von Thermoelement 1 und Simulation**

In den ersten 2 Sekunden liegt die erwärmte Platine am Blechhalter auf, während sich die Matrize dem Blechhalter nähert. In dieser Phase findet nur Wärmeaustausch zwischen Bauteil und Werkzeug am Blechhalter, an der Auflagefläche, statt. Ab 5,5 Sekunden startet die Umformung des Bauteils bis zum Werkzeugschluss. Ab der 6. Sekunde steht der Zargenbereich der Matrize im Kontakt mit dem Bauteil, wodurch sich das Werkzeug in diesem Bereich erwärmt.

*Kurze Prozessklärung*

In der Simulation ist der Temperaturanstieg steiler als in der Messung (siehe Abbildung 63). Ein Grund für diese Abweichung ist der druckabhängige Wärmeleitkoeffizient. Da das reale Versuchswerkzeug durch Fertigungsabweichungen nicht exakt dem Simulationsmodell gleicht, ergibt sich auch eine andere Druckverteilung über die Werkzeug- und Bauteilgeometrie. Ein weiterer Grund könnte die Kontaktformulierung über ein  $L_{\min}$  und  $L_{\max}$  sein (siehe Abschnitt 5.4). In der Abkühlphase (siehe Abschnitt 5.2) stehen die Werkzeuge nur mit der Umgebung in Wechselwirkung. In dieser Periode ist eine Übereinstimmung der Ergebnisse von Messung und Simulation zu erkennen (siehe Abbildung 63). Daraus ist zu entnehmen, dass die Eingabeparameter, die Stoffkennwerte und die Randbedingungen richtig definiert worden sind.

*Interpretation der Ergebnisse*

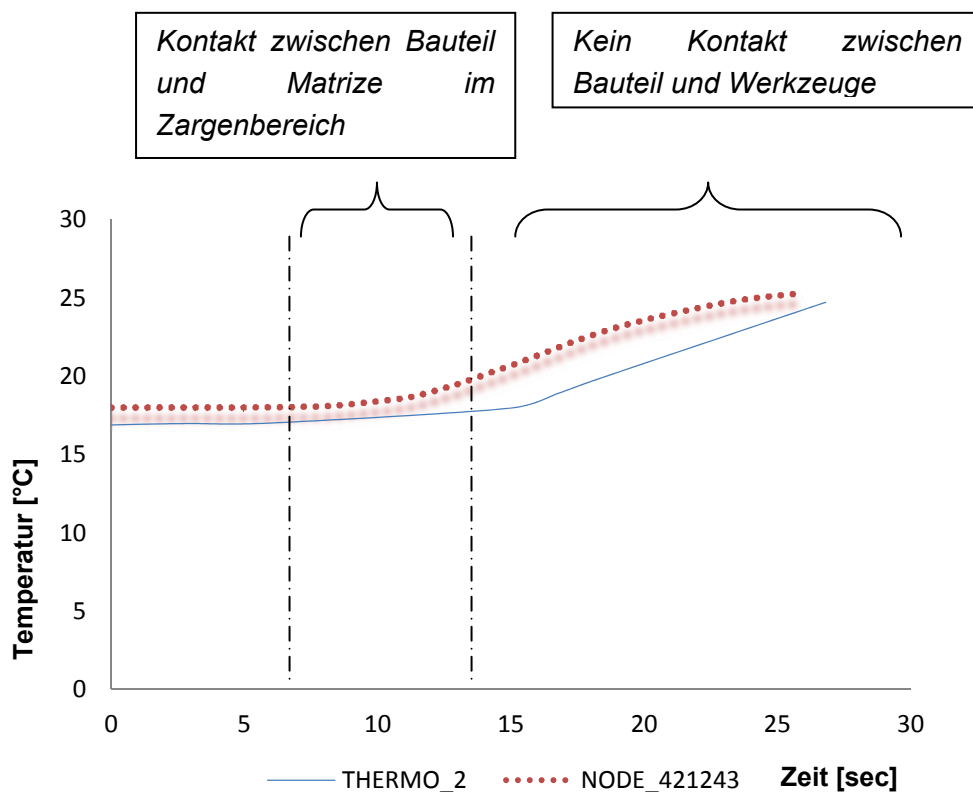


**Abbildung 63** Vergleich von Messung des Thermoelementes 1 und der Simulation

- **Ergebnis von Thermoelement 2 und Simulation**

Das Thermoelement 2 ist in der Nähe der Kühlkanäle positioniert und ist im Vergleich zum Thermoelement 1 20mm weiter von der Matrizenoberfläche entfernt. Aufgrund der Masse und des höheren Wärmeleitweges (siehe Abbildung 64), die zwischen Kontaktbereich und dem Messpunkt liegt, ist eine verzögerte Temperaturänderung erst in der Abkühlphase zu vermerken (siehe Abbildung 64). Der Temperaturgradient ist wie im Messpunkt 1 (siehe Abschnitt 7.1), im Simulationsergebnis höher als in der Messung. Ein Grund für diese Abweichung ist wie in Abschnitt 7.1 der druckabhängige Wärmeübergangskoeffizient. Der Verlauf der Simulationsergebnisse in Abbildung 64 zeigt dennoch eine gute Annäherung an die Messwerte.

*Interpretation der Ergebnisse*



**Abbildung 64 Vergleich von Messung des Thermoelementes 2 und Simulation**

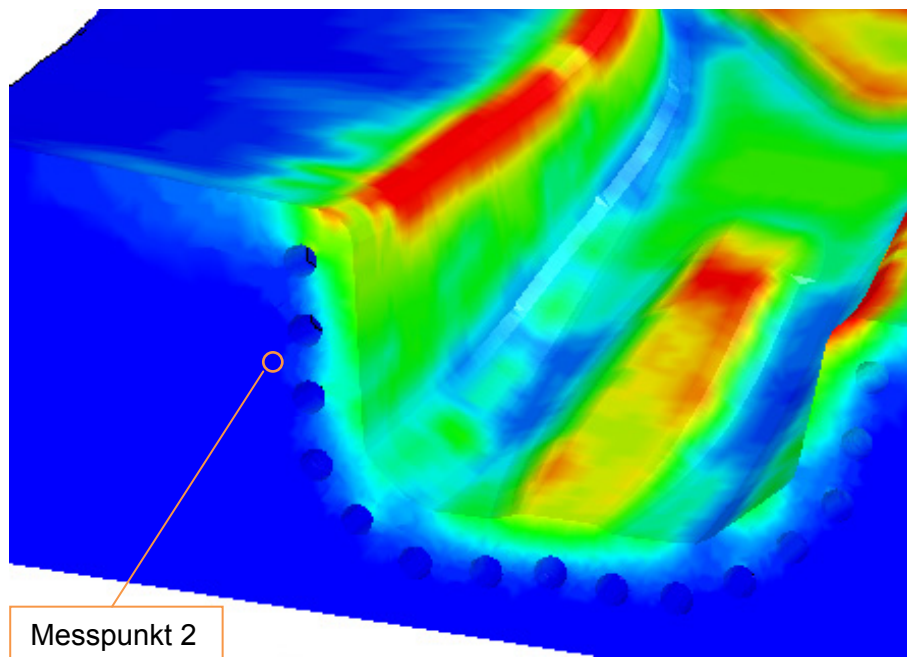


Abbildung 65 Messpunkt 2 in der Abkühlphase

- **Ergebnis von Thermoelement 3 und Simulation**

Das Thermoelement 3 wurde im Bereich des Blechhalters angebracht. Dieser Bereich erwärmt sich als erstes. Abbildung 66 zeigt, dass sich die Messung zu Beginn stark vom Simulationswert unterscheidet. Das liegt daran, dass ein Spalt von 2 mm zwischen Blechhalter und Matrize aufgrund der distanzierten Werkzeug-Kinematik vorliegt. Die Platine hat jedoch nur eine Dicke von 1,5 mm. Aufgrund des Freiraumes im Spalt, bilden sich Falten im Bauteil aus. Dadurch liegt das Blech nicht plan auf dem Werkzeug auf, sondern durch seine Faltenform (siehe Abbildung 69) ungleichmäßig auf der Matrize (siehe Abbildung 67 und 68). Diese, durch die Simulation nur ungenau abbildbare Ungleichmäßigkeit, zusammen mit der thermischen-Kontaktformulierung (siehe Abschnitt 5.4) ist eine Annäherung an die exakte Lösung schwer möglich. In der Abkühlphase (siehe Abschnitt 5.6) stehen die Werkzeuge nur mit der Umgebung in Wechselwirkung. In diesem Prozessschritt stimmen die Ergebnisse der Messung und Simulation sehr gut überein (siehe Abbildung 66).

*Interpretation der Ergebnisse*

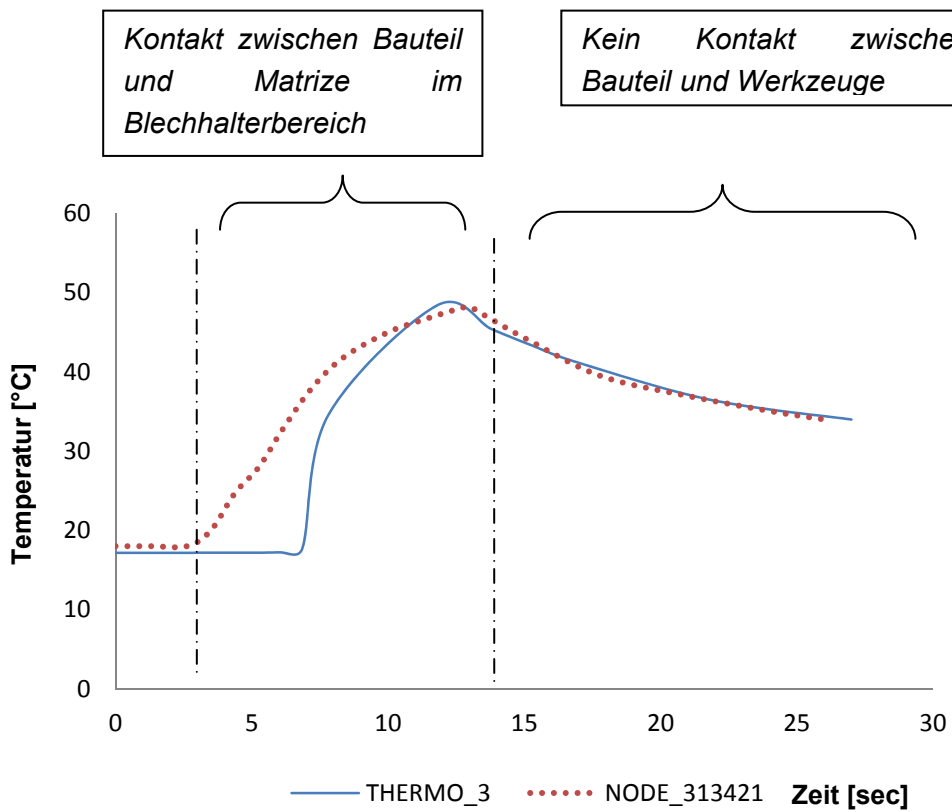


Abbildung 66 Vergleich von Messung des Thermoelementes 3 und Knoten 313421

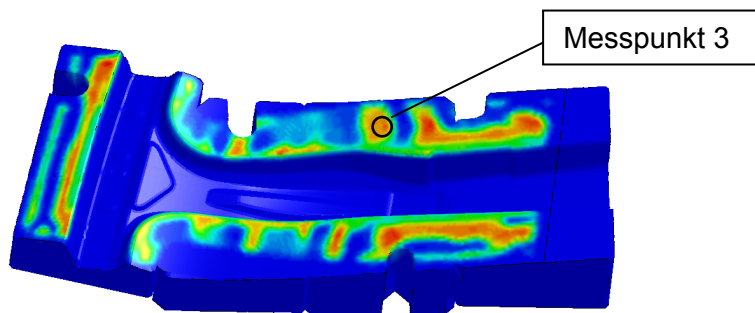
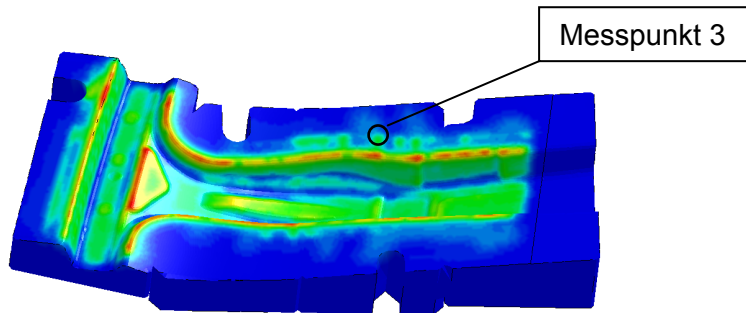
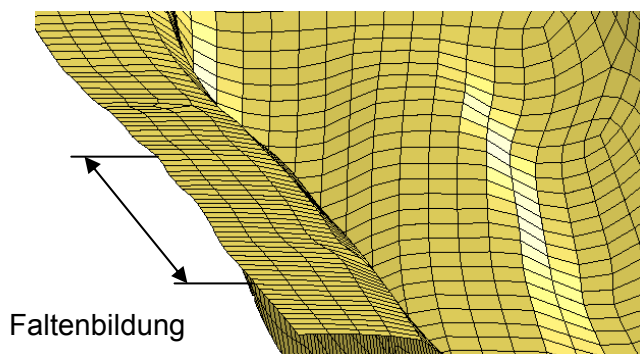


Abbildung 67 Oberflächen-Temperatur-Verteilung der Matrize nach Blechhalterschluss



**Abbildung 68 Oberflächen-Temperatur-Verteilung der Matrice in der Abkühlphase**



**Abbildung 69 Faltenbildung im Flanschbereich**

- **Ergebnis von Pyrometer 1 und Simulation**

Ein Vergleich zwischen den Messwerten von Pyrometer 1 und den Knoten in diesem Bereich ist nicht möglich, da die optische Messung keinen realistischen Verlauf entspricht. Grund dafür könnte das Ablösen von Zunder bei Kontakt mit dem Werkzeug sein, was weiterführend die Messung behindert. Nur in den ersten 2 Sekunden ist ein gleichmäßiger Verlauf erkennbar, welcher auch eine annähernd übereinstimmende Steigung wie in der Simulation aufweist (siehe Abbildung 70).

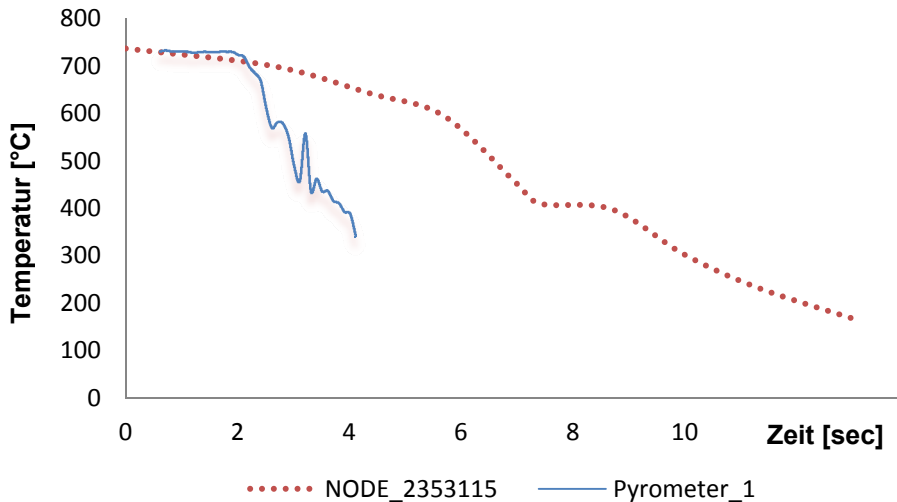


Abbildung 70 Abkühlung der Platine im Knoten 2353115

- **Ergebnis von Pyrometer 2 und Knotenpunkt 2352099**

Der Verlauf der Messergebnisse des Pyrometers 2 und der Knotentemperatur der Berechnung sind in Abbildung 71 dargestellt. Der Temperaturgradient in der Anfangsphase der Abkühlkurve ist in der Simulation etwas höher als der Gradient der gemessenen Kurve. Grund dafür könnte ein Messfehler der berührungslosen Messung sein oder eine zu geringere Wärmeübergangskoeffizient. Ebenfalls auffällig sind die unterschiedlichen Kontaktzeiten. Dieses Problem ist darauf zurückzuführen, dass die Knotentemperatur nur eines einzigen Knotens durch den Einzug des Bleches einen verfälschten Kontaktzeitpunkt in den ersten 6 Sekunden bis zum völligen Werkzeugschluss aufweist (siehe Abbildung 72). Die schnellere Abkühlung der Platine in der Simulation während des Presshärtens kann durch den druckabhängigen Wärmeübergangskoeffizienten zustande kommen. Da durch die Fertigungstoleranzen ein voneinander abweichender Kontaktdruck im Versuch und Simulation auftritt. Gut zu erkennen ist auch, dass ab ca. 400°C latente Wärme im Werkstoff frei wird (siehe Abbildung 71).

*Interpretation der Ergebnisse*



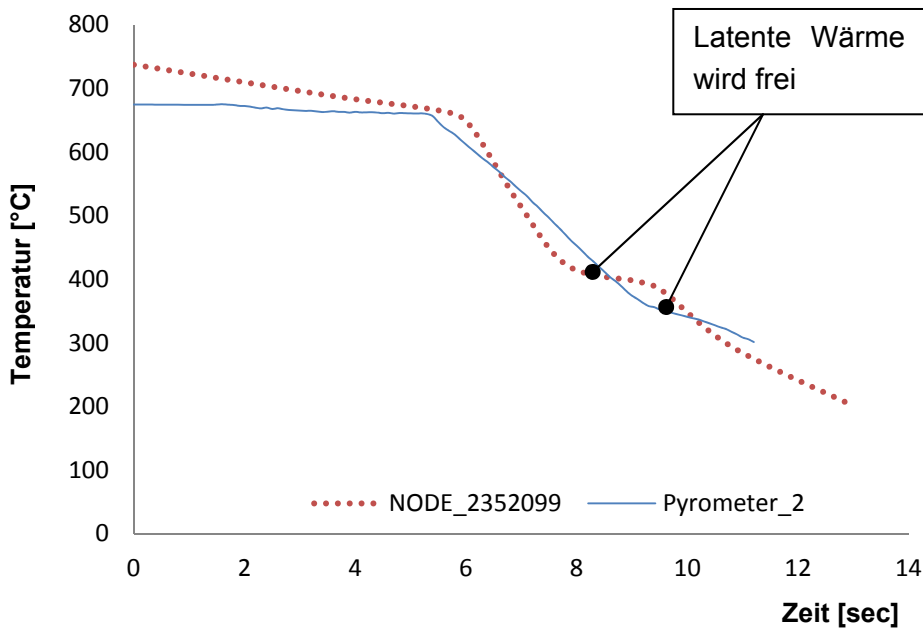


Abbildung 71 Abkühlung der Platine im Knoten 2352099

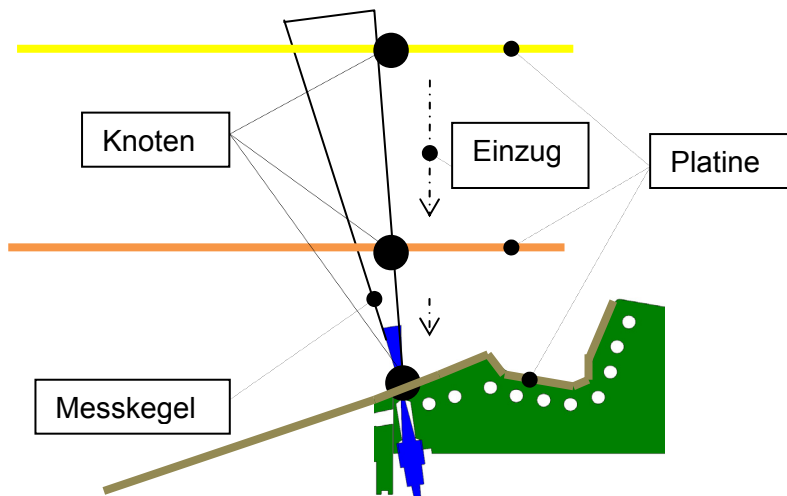


Abbildung 72 Messrichtung des Pyrometers

- Temperaturverteilung Platine

Mittels einer IR-Kamera wurde die Temperaturverteilung an der Platine nach dem Öffnen der Werkzeuge aufgezeichnet (siehe Abbildung 73). Eine Aussage über die Höhe der Platinentemperatur ist nicht aus der Abbildung 74 zu entnehmen, da der Emissionsgrad des Bleches nicht bekannt ist. Es kann nur eine Aussage über die

Qualität der Temperaturverteilung gemacht werden. Aus Abbildung 74 ist zu entnehmen, dass die Temperatur in der Simulation im Flanschbereich des Bauteils deutlich höher ist, als im restlichen Teil. Eine ähnliche Verteilung der Temperatur ist auch im Bild der IR-Kamera zu sehen (siehe Abbildung 73). Die kühleren Bereiche in Abbildung 73 sind auch im Simulationsbild zu erkennen (siehe Abbildung 74).

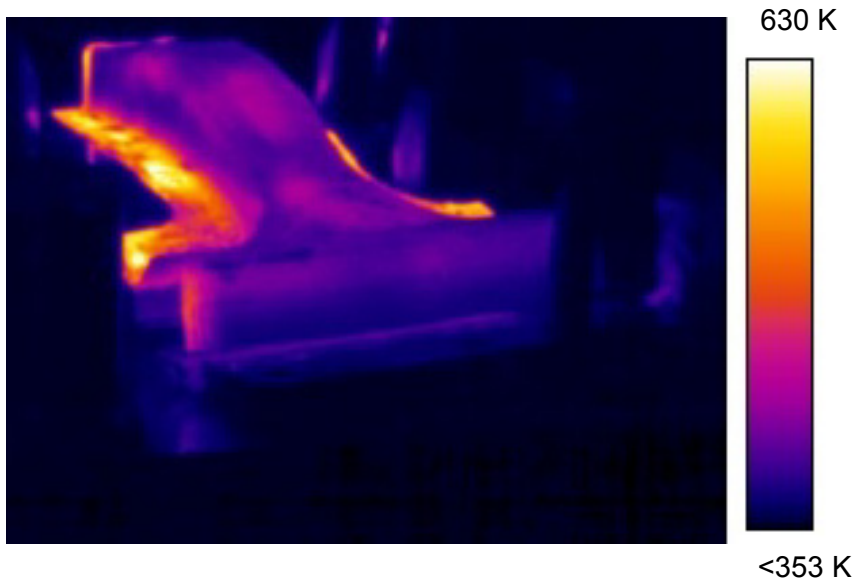


Abbildung 73 Temperaturmessung mittels Thermocam

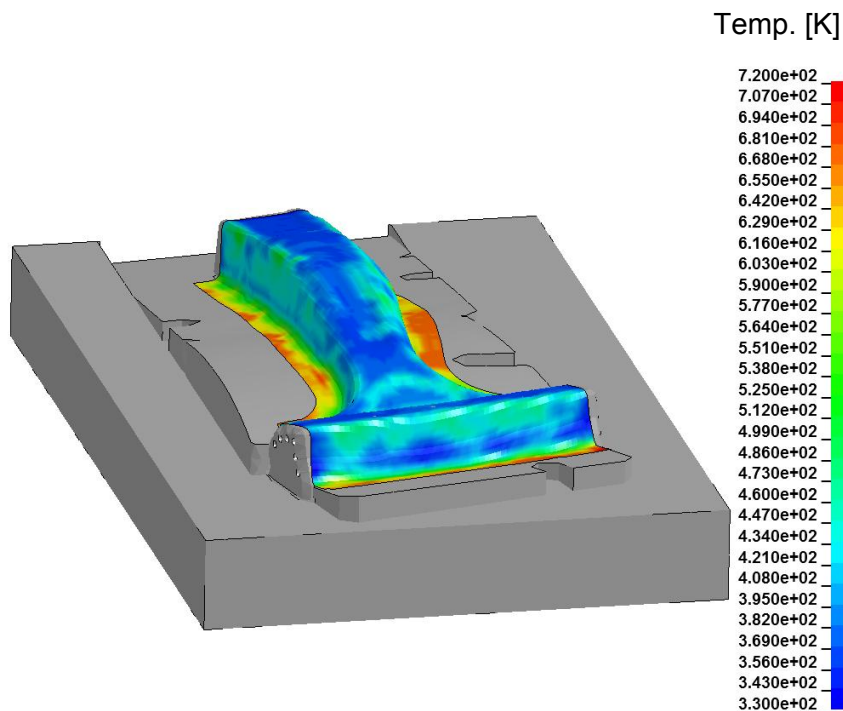


Abbildung 74 Simulationsergebnis Temperaturverteilung der Platine

## 7.2 Vergleich des ermittelten Wärmeübergangskoeffizienten an der Kühlkanalwand

Es wurden zwei Berechnungen mit je unterschiedlichen Wärmeübergangskoeffizienten (siehe Abschnitt 6.1) an der Kühlkanalwand durchgeführt. Die Simulationsergebnisse im Vergleich mit den Messergebnissen sind in Abbildung 75 und 76 dargestellt. Man erkennt deutlich bei der Analyse des Simulationsergebnisses, dass zu viel Wärme über die Kühlkanäle bei der durchgeführten Rechnung mit dem ermittelten konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten von  $9635 \text{ W/m}^2\text{K}$  abfließt. Bei der Rechnung mit dem konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten von  $3500 \text{ W/m}^2\text{K}$  (siehe Abschnitt 6.1) ergibt sich im Vergleich zu den Messresultaten ein sehr ähnlicher Temperaturverlauf in der Presshärtephase (siehe Abbildung 76). Aus dieser Analyse ist abzuleiten, dass die Ermittlung des Wärmeübergangskoeffizienten im Kühlkanalwandbereich wie, in Abschnitt 6.1, nicht empfehlenswert ist. Grund für den zu hohen Wert könnte die vereinfachte Berechnung der Fluidgeschwindigkeit sein.

*Interpretation der  
Simulationsergebnisse*

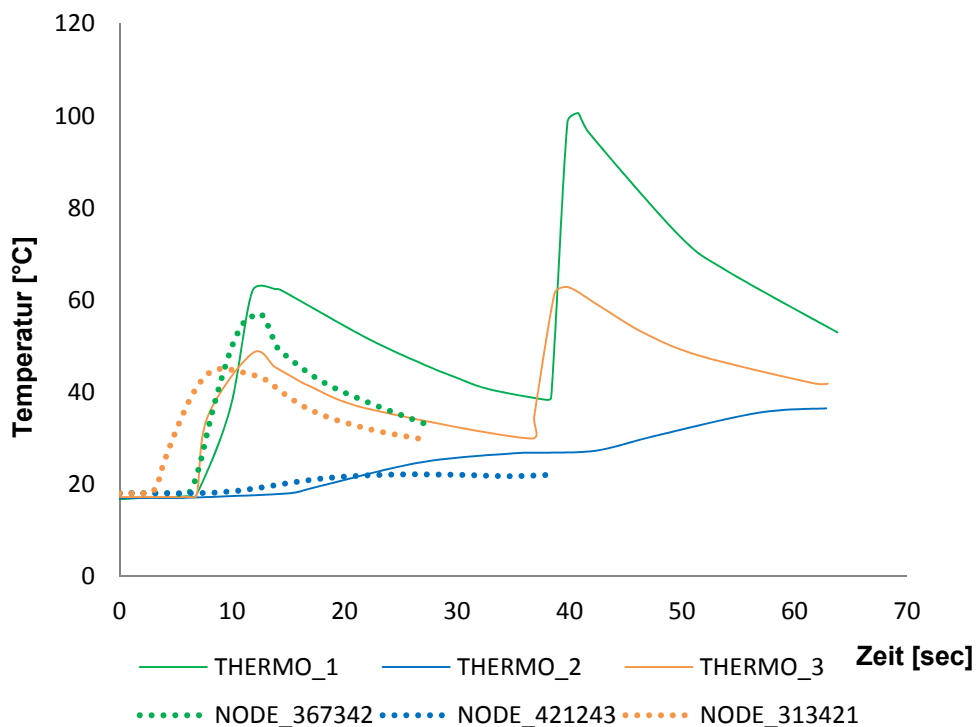
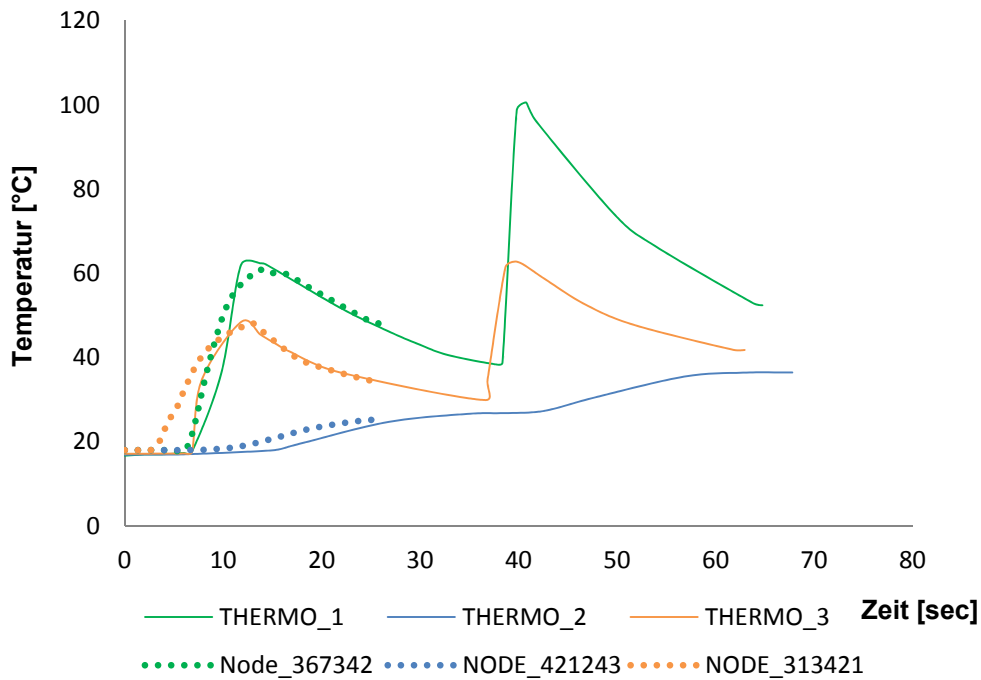


Abbildung 75 Wärmeübergangskoeffizient von  $9635 \text{ W/m}^2\text{K}$



**Abbildung 76 Wärmeübergangskoeffizient von 3500 W/m<sup>2</sup>K**

### 7.3 Vergleich der Simulationsergebnisse des Schalen-Modelles in Ls-Dyna und AutoForm

In Abbildung 101 und 102 werden die Ergebnisse der Platinentemperaturverteilung des Ls-Dyna und AutoForm Modelles dargestellt. Ein Vergleich der Resultate beider Ergebnisse zeigt, dass die Temperaturverteilung beider Varianten eine ähnliche Struktur aufweisen (siehe Abbildung 77 und 78). Die einzige deutliche Abweichung ist auf die Temperatur der „Hot Spots“ im Ergebnis des Ls-Dyna Modelles zurück zuführen (siehe Abbildung 77). Als Begründung wird auf die in Abschnitt 5.4 erklärte thermische-Kontaktformulierung verwiesen. Ein weiterer Grund könnte die grobe Vernetzung der Platine im Ls-Dyna Modell sein, um Rechenzeit zu sparen, was zu unregelmäßigen Kontaktabständen bei der Anpassung der Bauteilgeometrie auf die Werkzeuggeometrie führt.

*Interpretation der Temperaturverteilung*

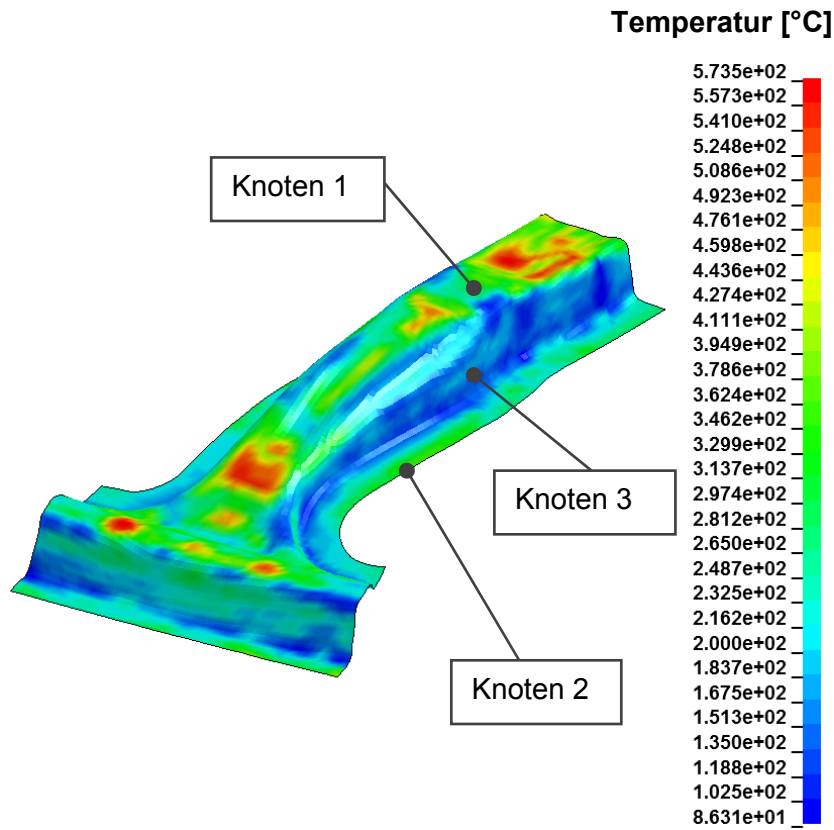


Abbildung 77 Temperaturverteilung der Platine [Ls\_Dyna]

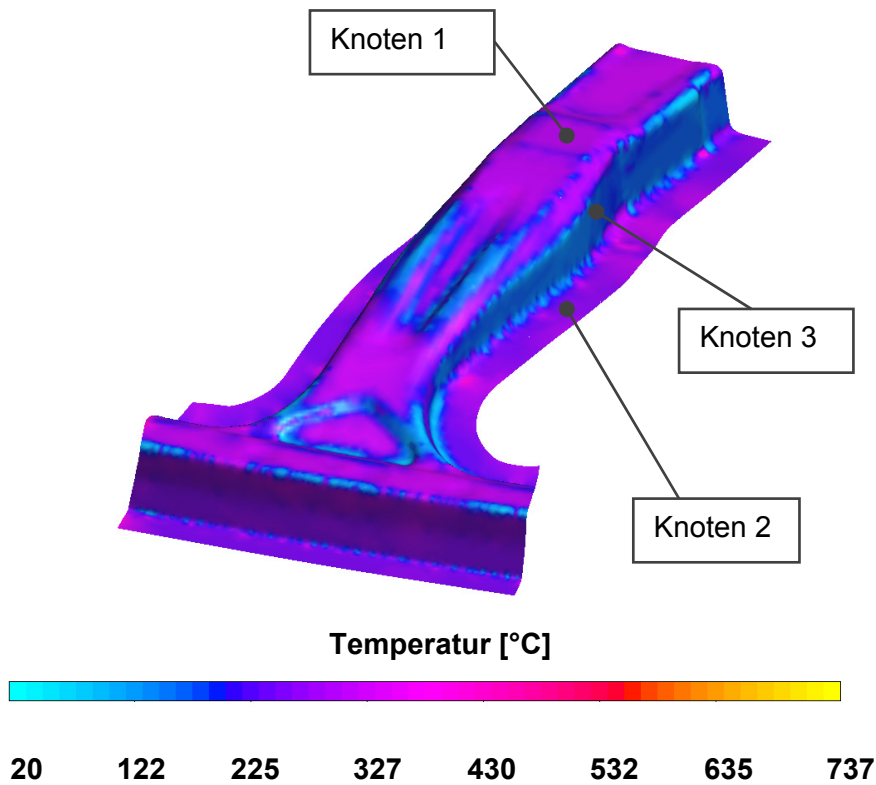
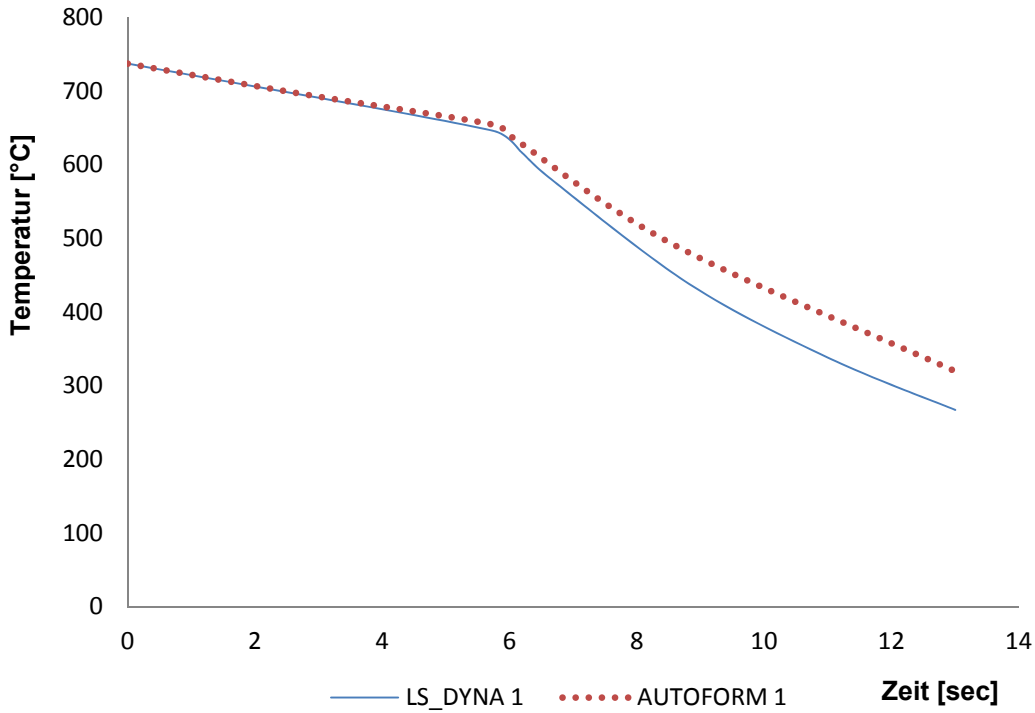


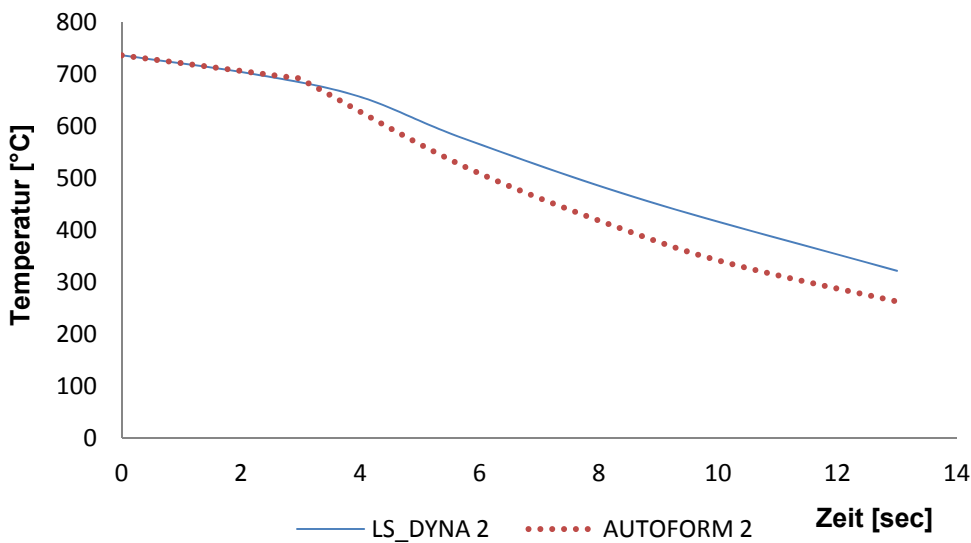
Abbildung 78 Temperaturverteilung der Platine [AutoForm]

In beiden Modellen sind 3 Knoten gleicher Position ausgewählt worden. Des Weiteren wurden die Werte der Temperatur über die Zeit in Abbildung 79, 80 und 81 dargestellt. Bei der Analyse der Ergebnisse ist zu erkennen, dass der Verlauf beider Modelle annähernd gleich ist.

*Interpretation der Messpunktergebnisse*



**Abbildung 79 Knoten 1**



**Abbildung 80 Knoten 2**

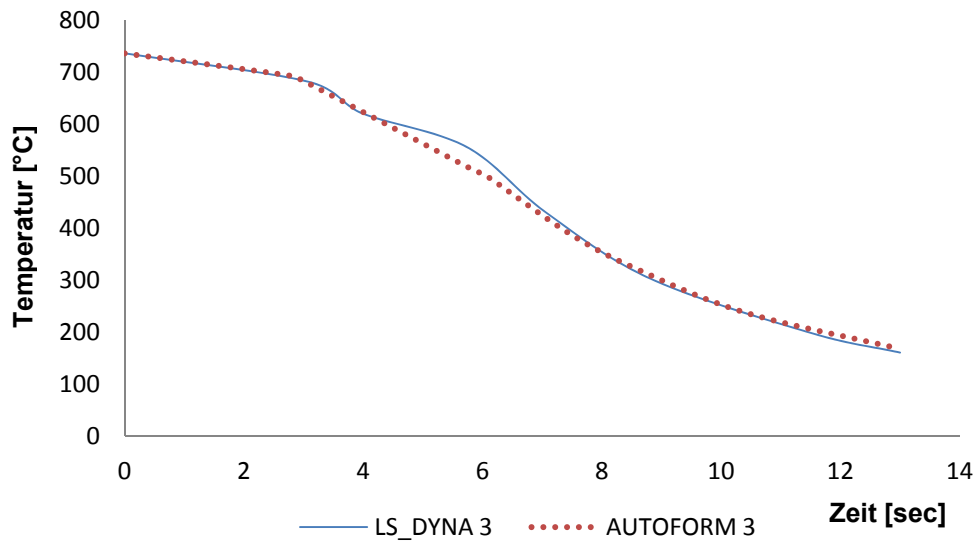


Abbildung 81 Knoten 3

## 8 Zusammenfassung & Ausblick

- Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde ein thermisch-mechanisch gekoppeltes Schalen-Modell in AutoForm und Ls-Dyna eines B-Säulenwerkzeuges modelliert. Anschließend wurde das thermisch-mechanisch gekoppelte Schalen-Modell in Ls-Dyna auf ein Schalen/Volumen-Modell erweitert. Es wurden Temperaturmessungen am realen Versuchswerkzeug durchgeführt. Abschließend wurde eine Validierung der Simulationsergebnisse mit den gemessenen Werten vollzogen.

*Kurze Zusammenfassung der Arbeit*

- Ergebnisse

Mit dem thermisch-mechanisch gekoppelten Schalen/Volumen-Modell in Ls-Dyna ist eine gute Annäherung an das reale Ergebnis der Temperaturmessungen möglich. Eine gute Abschätzung des thermischen und mechanischen Zeitschrittes ist notwendig, um Konvergenzprobleme zu vermeiden. Die größte Hürde ist die richtige Annahme der thermischen-Kontaktformulierung zwischen Bauteil und Werkzeug, um lokale Überhitzungen in der Platinen-temperaturverteilung zu vermeiden. Die Werkzeugerwärmung ist sehr gut virtuell abbildbar. Die Netzqualität spiegelt sich in der Qualität der Ergebnisse wider, wobei durch feine Netze sehr lange Rechenzeiten resultieren. Die Rechenzeit eines Zyklus des thermisch-mechanisch gekoppelten Schalen/Volumen Modells in Ls-Dyna betrug 127 Stunde und 9 Minuten bei einer Anzahl von 487635 Knoten.

*Ergebnis des thermisch-mechanisch gekoppelten Schalen/Volumen Modells in Ls-Dyna*

Das thermisch-mechanisch gekoppelte Schalen-Modell, aufgebaut in Ls-Dyna, ist eine gute Alternative, um eine Aussage über die Abkühlcharakteristik der Platine zu bekommen. Die Rechenzeit ist erheblich kürzer gegenüber dem Schalen/Volumen-Modell und es sind weniger Eingabeparameter nötig, um den Prozess abzubilden. Die Rechenzeit des thermisch-mechanisch gekoppelten Schalen-Modells in Ls-Dyna von einem Zyklus betrug 45 Stunden und 34 Minuten bei einer Anzahl von 175431 Knoten.

*Ergebnis des thermisch-mechanisch gekoppelten Schalen- Modelles in Ls-Dyna*

Das Modell, aufgebaut mittels AutoForm, liefert annähernd die gleiche Lösung wie das Ls-Dyna Modell. Der Benutzer ist sehr stark bei der Eingabe der Parameter sowie der Prozessdefinition eingeschränkt. Resultierend daraus ist die Modellierung eines Prozesses in sehr kurzer Zeit möglich. Des Weiteren sind die Rechenzeiten, verglichen mit dem Ls-Dyna Modell, beträchtlich kürzer. Die Rechenzeit des thermisch-mechanisch gekoppelten

*Ergebnis des thermisch-mechanisch gekoppelten Schalen- Modelles in AutoForm*



Schalen-Modells in AutoForm von einem Zyklus betrug 12 Minuten bei einer Anzahl von 175431 Knoten.

- Ausblick

Die Simulationsergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung im Vergleich zu den gemessenen Werten. Verbesserungspotential liegt eindeutig in Verkürzung der Rechenzeit des thermisch-mechanisch gekoppelten Schalen/Volumen-Modells, um es für Anwendungen in der Industrie interessant zu machen. Dies könnte durch eine geringere Anzahl an Elementen erreicht werden. In Abbildung 82 sieht man, dass sich das Werkzeug nur in der Nähe der Randzone erwärmt. Durch verkleinern des Volumen in dem Bereich wo mit hoher Wahrscheinlichkeit keine Erwärmung auftritt könnte die Anzahl von Elementen verringert werden.

*Verbesserungspotential und  
Bewertung der  
Simulationsergebnisse*

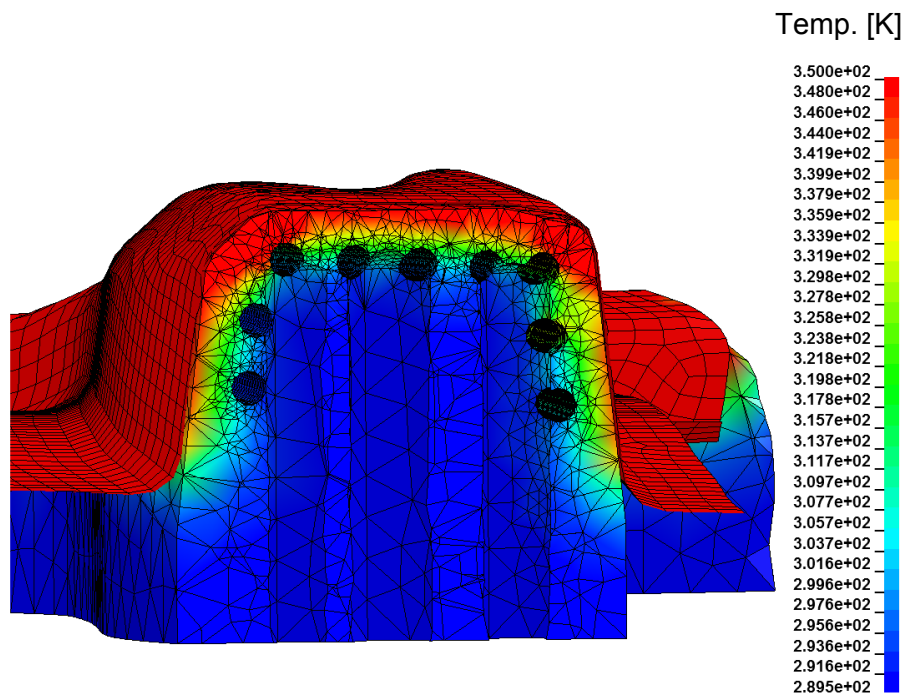


Abbildung 82 Erwärmungsbereich des Stempels

## 9 Literaturverzeichnis

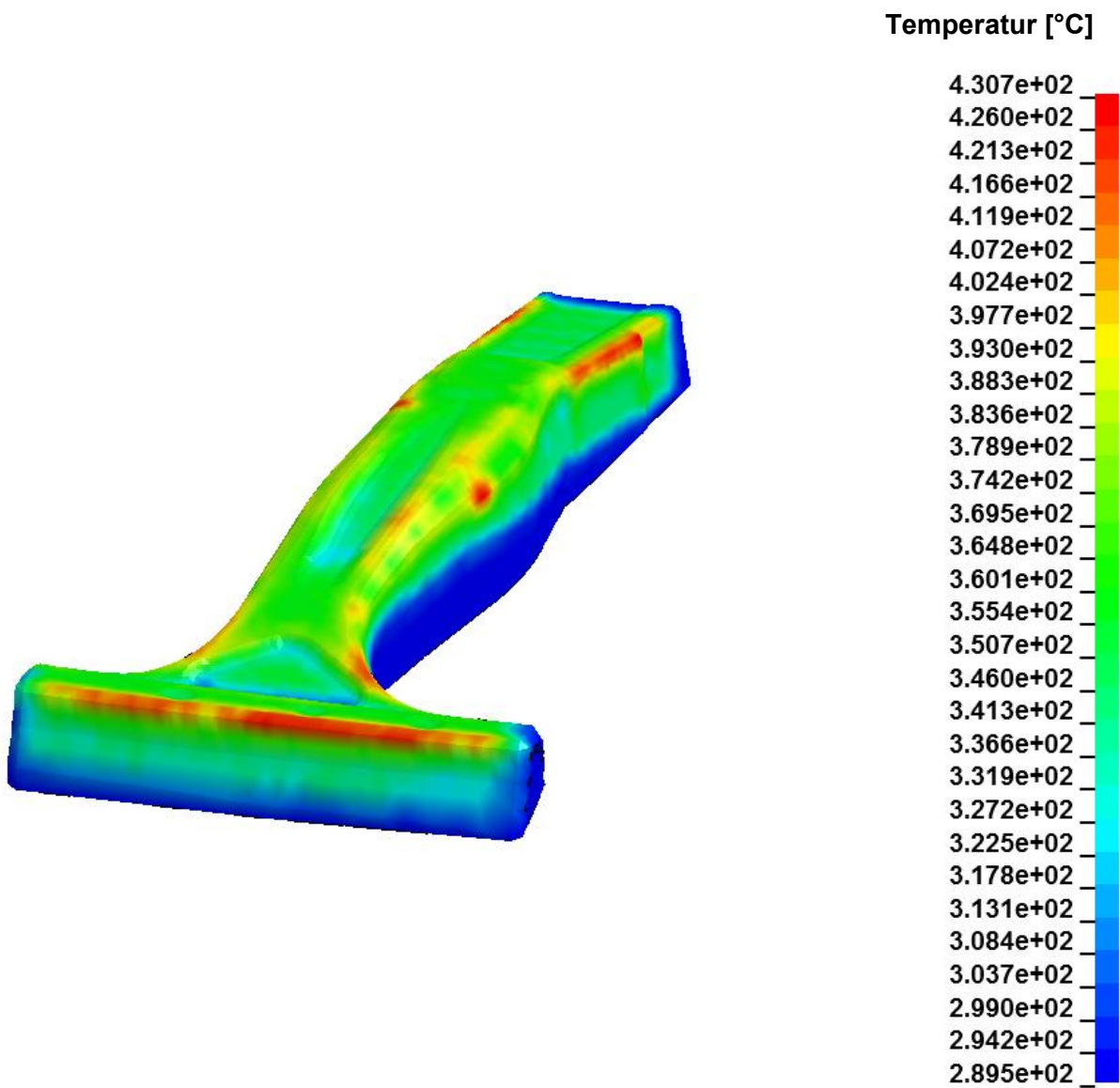
- [1] H. D. Baehr und K. Stephan, „Wärme- und Stoffübertragung,“ Bochum und Stuttgart, 2006, p. 390.
- [2] N. S. Ottosen und M. Ristinmaa, *The Mechanics of Constitutive Modeling*, Lund University of Sweden: Elsevier, 2005.
- [3] E.-L. Odenberger, „Concepts for Hot Sheet Metal,“ Luleå University of Technology, Luleå, Sweden, 2009.
- [4] Lorenz, David; Haufe, Andre; DYNAmore GmbH, „Recent Advances and New Developments in Hot Forming Simulation with LS\_Dyna,“ Industriestrasse 2, Deutschland, 2008.
- [5] H. Sigloch, „Technische Fluidmechanik,“ Springer, 2008, p. 131.
- [6] V. Gnielinski, *New equations for heat and mass transfer in turbulent pipe and channel flow*, 1976.
- [7] F. Incropera, D. Dewitt, T. Bergman und A. Lavine, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, John Wiley & Sons, 2007.
- [8] E. Doege und B.-A. Behrens, *Handbuch Umformtechnik*, Leibniz Universität Hannover: Springer -Verlag Berlin Heidelberg, 2010.
- [9] Shapiro, B; LS\_DYNA, *Using LS\_DYNA for Hot Forming*, Frankenthal, 2007.
- [10] P. Reinhold und U. Klasfauseweh, „Reduced weight and improved performance of automotive structural parts,“ in s *Werkstoffwoche*, München, 2001.
- [11] Hoffmann, S. Hyunwoo und Hartmut, „Design of Hot stamping Tools and Blanking Strategies of Ultra High Strength Steels,“ in s *EU-Korea conference on Science and Technology*, Heidelberg, Germany, 2008.
- [12] M. Abbasi, A. Saeed-Akbari und M. Naderia, *The effect of strain rate and deformation temperature on the characteristics of isothermally hot compressed boron-alloyed steel*, ELSEVIER, 2012.
- [13] R. Kolleck, R. Veit und H. Löscher, „Optimierung gekühlter Werkzeuge für das Presshärten borlegierter Stahlbleche,“ in s *Erlanger Workshop Warmblechumformung* , Meisenbach Bamberg, 2007.
- [14] F. Schieck, C. Hochmuth, S. Polster, A. Mosel, Fraunhofer Institut for Machine Tools

- and Forming Technology IWU, Modern tool design for component grading incorporating simulation models, Chemnitz: CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2011.
- [15] R. Kolleck, W. Weiß und R. Vollmer, „A New Method in Manufacturing Near-Surface Cooling Channels for Tempered Tools,“ in s *MetalForming*, Japan, 2010.
- [16] <http://www.dynamore.de/de/download/papers/forum07/metal-forming/using-ls-dyna-for-hot-forming>, „LS- Dyna,“ Abfrage: 10.09.2012.
- [17] <http://www.autoform.com/de/produkte/autoform-thermosolver>, „AutoForm,“ Abfrage: 10.09.2012.
- [18] [http://www.thermocoax.com/doc-Temperature\\_sensors/D193-0-TE-Auswahl-Anwendungen.pdf](http://www.thermocoax.com/doc-Temperature_sensors/D193-0-TE-Auswahl-Anwendungen.pdf), „Thermocoax,“ Abfrage: 14.09.2012.
- [19] <http://www.thermcable.de/de/herstellverfahren.html>, „Thermocabel,“ Abfrage: 14.09.2012.
- [20] <http://www.thermografie.co.at/files/infratec.pdf>, „InfraTec, Einführung in Theorie und Praxis der Infrarot-Thermografie,“ Abfrage: 14.09.2012.
- [21] K. MSR, „Bedienungsanleitung Pyrometer CellaTemp Pa4x,“ in s *Ident.-Nr.: 101 3031*, Juni, 2012.
- [22] K. Knothe und H. Wessels, Finite Elemente, Berlin: Springer-Verlag, 1991.
- [23] K. Lange, Umformtechnik, Springer-Verlag, 1993.
- [24] DYNAmore, „Thermal & Preprocessing Basics,“ 2010.
- [25] M. Eriksson, M. Oldenburg, M. C. Somani und L. P. Karjalainen, „Testing and evaluation of material data for analysis of forming and hardening of boron steel components,“ Lulea Swden, Oulun yliopisto Finland, 2002.
- [26] Medricky, M; Struck, R; Sunderkötter, C; Lorenz, D; Olle, P; Behrens, B.-A, Volkswage Group Research, „Thermo-mechanical coupled siumulation of hotforming processes considering the cooling,“ Wolfsburg, 2009, [http://www.dynamore.de/de/download/papers/forum09/papers-depr/13\\_Medricky\\_Volkswagen.pdf](http://www.dynamore.de/de/download/papers/forum09/papers-depr/13_Medricky_Volkswagen.pdf) Abfrage: 11.09.2012.
- [27] Kind und Co, Edelstahlwerk, „[http://www.kind-co.de/kc\\_2010/pdf/downloads\\_wz\\_s/CR7V\\_L.pdf](http://www.kind-co.de/kc_2010/pdf/downloads_wz_s/CR7V_L.pdf),“ Abfrage:22.01.2013.
- [28] C. Madhusudana, Thermal Contact Conductance, Sydney: Springer-Verlag, 1996.

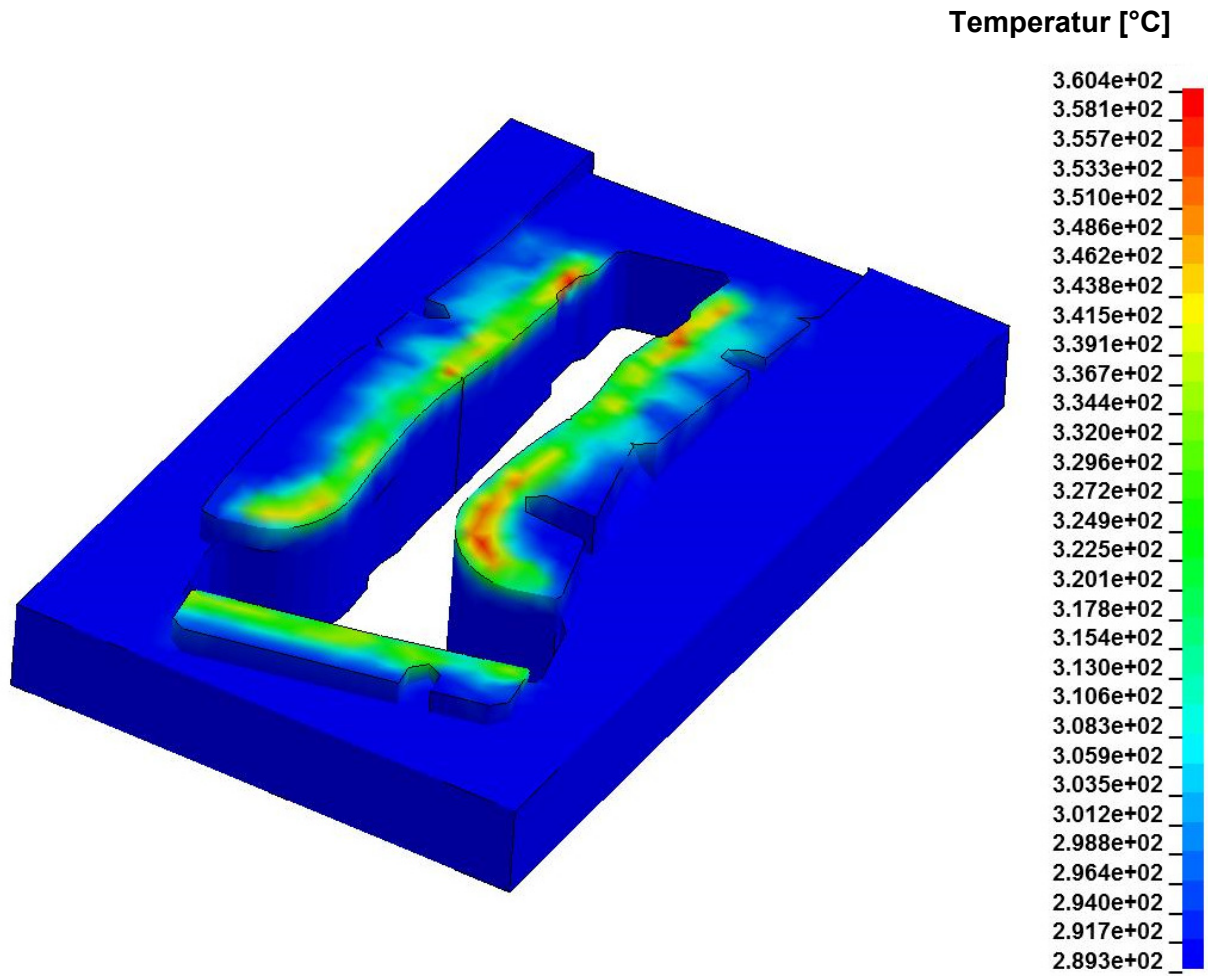
- [29] M. Merklin und J. Lechler, „Determination of Material and Process characteristics for Hot Stamping Processes of Quenchenable Ultra High Strength steel with Respect to a FE-based process design,“ in s *SAE Technical Paper Series*, 2008.
- [30] Karbassian, H; Brosius, A; DYNAmore GmbH, „Prozessnahe Umformsimulation des Presshärtens mit LS\_DYNA,“ 2007.
- [31] <http://www.grundfos.com/>, „GRUNDFOS DATENHEFT,“ Abfrage: 23.01.2013.
- [32] <http://www.esi-group.com/products/metal-forming/applications/hotforming/>, „ESI Group,“ Abfrage: 10.09.2012.
- [33] A. Brosius, E. Tekkaya und H. Karbasian, „Experimentelle und numerische Untersuchung der prozessabhängigen Eigenschaften pressgeharteter Bauteile,“ in s *Erlanger Workshop Warmumformung*, Dortmund, 2009.
- [34] ThyssenKrupp Steel, Jens Overath, „Schweißen von warmumgeformten Bauteilen,“ Technische Universität Braunschweig, 2007, <http://www.ifs.tu-bs.de/module.php?id=49&action=download&fileid=17> ,Abfrage:11.09.2012.
- [35] Megahed, Mustafa, M. Skrikerud, H. Porzner, ESI Group, „SIMULATION OF THE HOTFORMING PROCESS,“ Germany, 2010, <http://us.apgroup.com/19946/40358/ESIGroup.pdf> , Abfrage 11.09.2012.
- [36] H. Karbasian, A.E. Tekkaya, Institute of Forming Technology and Lightweight Construction, Dortmund University of Technology, A review on hot stamping, Dortmund: Journal of Materials Processing Technology, 2009.
- [37] M. Skrikerud, M. Megahed und H. Porzner, „SIMULATION OF THE HOTFORMING PROCESS,“ [http://www.esi-group.com/products/metal-forming/articles/NAFEMS\\_paper\\_hotforming.pdf](http://www.esi-group.com/products/metal-forming/articles/NAFEMS_paper_hotforming.pdf) , Abfrage: 11.09.2012.
- [38] Friberg, J AP&T, „AP&T,“ in s *Hot stamping seminar tour*, Detroit, 2008.
- [39] [http://nsm.eng.ohio-state.edu/cpf/2011-11\\_Hot\\_Stamping\\_2.pdf](http://nsm.eng.ohio-state.edu/cpf/2011-11_Hot_Stamping_2.pdf), „Marc,“ Abfrage: 13.09.2012.
- [40] [http://www.mts.ch/documents/TC\\_3.pdf](http://www.mts.ch/documents/TC_3.pdf), „Messtechnik Schaffhausen GmbH,“ Abfrage 14.09.2012.
- [41] <http://www.isel-germany.de/products/product.php?ID=p248&lang=de>, „ISEL Germany AG,“ Abfrage: 14.09.2012.
- [42] GEA Mechanical Equipment, Auslegung von Pumpen und Rohrsystemen, Am Industriepark 2-10, 21514 Büchen, 2008.

- 
- [43] Künzel, Markus; DynaMore GmbH, „Möglichkeiten zur Reduktion der Simulationszeiten,“ Stuttgart, 2011.
- [44] G. Bergman und M. Oldenburg, Finite Element Model for Thermo-mechanical Analysis for sheet Metal Forming, Luella Sweden: Luella University.
- [45] AutoForm Engineering GmbH, „Base Training "Process Design II",“ 2008.
- [46] I. David, Mathematische Numerische Modellierung Technischer Systeme, Göttingen: CUVILLIER Verlag, 2005.

Temperaturverteilung Stempel



Temperaturverteilung Blechhalter



Temperaturverteilung Matrize

