

Entwicklung prozessoptimierter Werkzeugtechnologien anhand eines seriennahen Zielbauteiles beim Thixoschmieden von Stahl

Von der Fakultät für Georessourcen und Materialtechnik
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen

zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften

genehmigte Dissertation

vorgelegt von Diplom-Ingenieur

Christophe Jean Daniel Beyer

aus Annweiler am Trifels

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Dr.-Ing. E.h. Reiner Kopp
Univ.-Prof. Dr.rer.nat. Rainer Telle
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gerhard Hirt

Tag der mündlichen Prüfung: 15.02.2006

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Hochschulbibliothek online verfügbar.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner drei-jährigen Tätigkeit in der Abteilung RBP/MM (Forschung Fahrzeugaufbau und Antrieb, Metalle) der Fa. DaimlerChrysler im Forschungszentrum Ulm.

Mein Dank gilt in erster Linie Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Dr.-Ing. E.h. Reiner Kopp, dem ehemaligen Direktor des IBF der RWTH Aachen für seine hilfreichen Anregungen sowie die Übernahme des Hauptberichtes.

Ich danke Herr Prof. Dr.-Ing. Telle vom Lehrstuhl für Gesteinshüttenkunde der RWTH Aachen und Herrn Prof. Dr.-Ing. Hirt, Direktor des IBF der RWTH Aachen für das Interesse an meiner Arbeit und die Übernahme des Koreferates.

Herrn Dr. Karl-Heinz Füller gilt mein besonderer Dank für die Initiierung und effiziente Betreuung der Arbeit seitens DaimlerChrysler.

Desweiteren danke ich Herrn Dr. T. Haug, Abteilungsleiter von RBP/MM der DaimlerChrysler AG und Herrn Dr. Thalemann, Ansprechpartner der Schmiede von DaimlerChrysler, und allen Kollegen, die mich bei meiner Arbeit unterstützt haben, insbesondere Herrn Dipl.-Ing. Knüppel, Herrn Dipl. Ing. Schneider, Herrn Dipl.-Ing. Pol sowie allen Praktikanten und Diplomanden.

Ich möchte mich bei den Partnern vom BMBF- Projekt „Thixoschmieden von Stahl“ für die ständige Unterstützung und die angenehme Zusammenarbeit bedanken, insbesondere Herrn Steinhof der Fa. Hammerwerk Fridingen, Herrn Zimmer der Fa. Saarstahl AG, Herrn Shimahara des IBF der RWTH Aachen und Herrn Haller des IFUM Hannover.

Mein persönlicher Dank gilt meiner Familie für ihre Unterstützung und den Rückhalt während des Studiums und der Promotion.

Ganz besonders möchte ich mich bei meiner lieben Freundin Catherine bedanken, die mich zu jeder Zeit unterstützt hat.

Ulm, im Juli 2005

Kurzzusammenfassung

Durch das Thixoschmieden können die Verfahrensvorteile von Schmieden und Gießen genutzt werden. So können beispielsweise komplexe Geometrie, die bislang in 4 bis 5 Arbeitsgängen hergestellt werden, in ein bis zwei Arbeitsgängen dargestellt werden.

Im Gegensatz zur Formgebung von Aluminiumlegierungen im teilerstarrten Zustand bestanden beim Thixoschmieden von Stählen bei den derzeit verfügbaren Formwerkzeugen noch beträchtliche Probleme bezüglich der mechanischen, tribologischen, chemischen und thermischen Leistungsfähigkeit aufgrund der erheblich höheren Verarbeitungstemperaturen. Die herkömmlichen Stahlwerkzeuge weisen durch Benetzung, Klebeneigung und Schmelzreaktionen einen hohen Verschleiß auf, woraus sehr geringe Werkzeugstandzeiten resultieren.

Zielsetzung dieser Arbeit war die Entwicklung von prozessgerechten Werkzeugen zum Thixoschmieden von Stahl. Um geeignete Werkzeugtechnologien zu entwickeln, musste die gesamte Prozesskette des Verfahrens „Thixoschmieden von Stahl“ analysiert und optimiert werden.

Grundsatzuntersuchungen, Formgebungsversuche und FEM- Simulationen zeigen, dass die Keramik Si_3N_4 sehr gut als Werkzeugwerkstoff geeignet ist. Durch Verwendung von vorgewärmten keramischen Werkzeugen, Optimierung der Bolzenerwärmung mit Schutzgas und vor allem durch die Entwicklung der Methode der gezielten Bolzenabkühlung können thixogeschmiedete Bauteile auf dem Qualitätsniveau von geschmiedeten Bauteilen hergestellt werden.

Das Verfahren Thixoschmieden von Stahl bietet sehr große Einsparpotentiale, da der Zerspanungsaufwand stark reduziert werden kann und die Prozesskette durch zum Beispiel eine Umformung mit integrierter Fügung [KAL-02] oder Oberflächenvergütung [BEY-05] reduziert werden kann.

Abstract

In the process Thixoforging (forging in the semi-solid state) the advantages of the processes forging and casting can be combined. For example, complex geometries, which are normally produced in 4 or 5 steps, can be realised in one or two steps.

In contrast to the forming of aluminium alloys in the semi-solid state, the forming of steel in the semi-solid state is much more difficult, because of the higher forming temperature. Common tools out of steel show a very important wear due to wetting, bonding and melting processes, which result in a very short tool life.

The aim of this work was the development of appropriate tools for the thixoforming of steel. To develop appropriate tool technologies the entire process chain had to be analysed and optimised.

Principle studies, forming tests and FEM-simulations show that the ceramic Si_3N_4 is very suitable as a material tool. The use of preheated tools of ceramic, the optimisation of the heating of billets with inert gas and particularly the development of the method of the aimed cooling before forming made possible the thixoforming of components with the same quality as forged ones.

The process of thixoforming of steel offers very large potentials of cost savings, since the amount of machining work can be reduced and the process chain can be shortened for example by forming with an integrated joining process [KAL-02] or surface hardening.

Inhaltsverzeichnis

SYMBOLVERZEICHNIS

1	EINLEITUNG	1
2	STAND DER TECHNIK	4
2.1	Vom Schmieden und Gießen zum Thixoschmieden	4
2.2	Eigenschaften geschmiedeter, gegossener und thixogeformter Bauteile	9
2.3	Werkzeugtechnologien beim Schmieden und Gießen	12
2.3.1	Werkzeugwerkstoffe	12
2.3.2	Werkzeugkonzepte zum Thixoforming von Stahl	15
2.4	Simulationen der Formgebung und der Werkzeugbelastung	17
3	AUFGABENSTELLUNG UND VORGEHENSWEISE	21
4	STOFF- UND RANDGRÖßEN	23
4.1	Untersuchte Werkstück- und Werkzeugwerkstoffe	23
4.2	Prozessunabhängige Größen	24
4.2.1	Allgemeine Größen	24
4.2.2	Prozessrelevante Größen	29
5	ENTWICKLUNG VON SIMULATIONSMETHODEN	34
5.1	Das FEM- Simulationsprogramm MSC Superform	34
5.2	Entwicklung und Implementierung eines thixotropen Materialmodelles	34
6	ENTWICKLUNG VON PROZESSGERECHTEN WERKZEUGEN	40
6.1	Auswahl der Werkzeugwerkstoffe	40
6.2	Werkzeugkonzepte	44
6.3	Thermomechanische Auslegung von Armierungsverbänden	50

7	EXPERIMENTELLE UND THEORETISCHE ERGEBNISSE	59
7.1	Bolzenerwärmung- und Abkühlung	59
7.2	Untersuchungen der Formgebungsparameter	62
7.2.1	Untersuchungen im Labormaßstab	62
7.2.2	Untersuchungen am seriennahen Bauteil	66
7.2.3	Prozessoptimierung durch eine gezielte Abkühlung vor der Umformung	68
7.3	Werkzeugabnutzung- und Standzeiten	70
7.4	Theoretisch ermittelte Umformkräfte und Werkzeugbelastungen im Einzelhub	73
7.4.1	Einfluss des Wärmeübergangskoeffizienten auf die Simulationsergebnisse	73
7.4.2	Umformkraft in Abhängigkeit von Bolzentemperatur, von Umformgeschwindigkeit, von Werkzeugwerkstoff und von Werkzeugtemperatur	76
7.4.3	Bauteiltemperatur in Abhängigkeit von Bolzentemperatur, von Werkzeugwerkstoff und von Umformgeschwindigkeit	83
7.4.4	Thermomechanische Werkzeugbelastungen	84
7.5	Einfluss der Abkühlzeit auf die Umformkraft	88
7.6	Ermittlung der Werkzeugbelastungen im Dauerbetrieb	89
7.6.1	Ausgewählte Produktionszyklen	89
7.6.2	Simulierte Umformkräfte und thermomechanische Werkzeugbelastungen	90
8	CHARAKTERISIERUNG VON THIXOGESCHMIEDETEN RADNABEN	94
8.1	Sichtprüfung und makroskopischer Befund	94
8.2	Mechanische Untersuchungen	97
8.3	Metallographische Untersuchungen	103
8.4	Bewertung von optimierten thixogeschmiedeten Radnaben	109
9	WIRTSCHAFTLICHKEITSBETRACHTUNGEN	111
9.1	Einsparpotentiale	111
9.2	Kostenberechnungen	113
9.3	Ausblick	117
10	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	119
11	LITERATURVERZEICHNIS	123
12	ANHANG	129

Symbolverzeichnis

Zeichen	Einheit	Bedeutung
$\dot{\gamma}$	[1/s]	Schergeschwindigkeit
$\dot{\phi}$	[1/s]	Umformgeschwindigkeit
$\dot{\phi}$	[1/s]	Umformgeschwindigkeit
λ_1	[W/(K.m)]	Wärmeleitfähigkeit des Körpers Nr.1
$\lambda_{1/2}$	[W/(K.m)]	harmonisches Mittel der Wärmeleitfähigkeiten von zwei Körpern
λ_2	[W/(K.m)]	Wärmeleitfähigkeit des Körpers Nr.2
A	[mm ²]	Fläche
A ₅	[%]	Bruchdehnung
c _p	[W/(kg.K)]	Spezifische Wärmekapazität
E	[GPa]	Elastizitätsmodul
F	[kN]	Kraft
F _L	[%]	Flüssigkeitsanteil
h	[W/(K.m ²)]	Wärmeübergangskoeffizient
h ₀	[W/(K.m ²)]	Wärmeübergangskoeffizient im Idealen Fall (Optimale Fläche)
k _{1/2}	[W/(K.m)]	Harmonisches Mittel der Wärmeleitfähigkeiten
k _f	[N/mm ²]	Fließspannung
m	[m ² /s]	Oswald-de Waele Koeffizient m
n	[-]	Oswald-de Waele Koeffizient n
n _p , D _p	[-]	Dimensionslose Koeffiziente
P _N	[N/mm ²]	Kontaktdruck
R _{awz}	[m]	arithmetischer Mittenrauwert des Werkzeugs

Zeichen	Einheit	Bedeutung
Re	[-]	Reynolds-Zahl
R _m	[N/mm ²]	Zugfestigkeit
R _{p0,2}	[N/mm ²]	Elastizitätsgrenze
T	[°C]	Temperatur
T _L	[°C]	Liquidustemperatur
T _{Ob}	[°C]	Oberflächentemperatur
T _S	[°C]	Solidustemperatur
T _{Umg}	[°C]	Umgebungstemperatur
T _{ws}	[°C]	Werkstücktemperatur
T _{wz}	[°C]	Werkzeugtemperatur
v _{St}	[m/s]	Stempelgeschwindigkeit
W _K	[-]	Wahre Kontaktfläche
Z	[%]	Brucheinschnürung
α	[1/K]	Wärmeausdehnung
α _K	[W/m ²]	Wärmeübergangskoeffizient durch Konvektion
ΔT	[°C]	Temperaturunterschied
ε	[-]	Emissionsgrad (Strahlungszahl)
η	[Pa/s]	Dynamische Viskosität
κ _{el}	[1/(Ω.m)]	Elektrische Leitfähigkeit
λ	[W/(m.K)]	Wärmeleitfähigkeit
μ	[-]	Reibungskoeffizient
ν	[m ² /s]	Kinematische Viskosität
ρ	[g/cm ³]	Dichte
σ	[W/(K ⁴ .m ²)]	Stefan Boltzmann Konstante
σ _N	[N/mm ²]	Normaldruck
τ	[N/mm ²]	Scherspannung

Zeichen	Einheit	Bedeutung
φ	[-]	Umformgrad

Abkürzung	Bedeutung
2D	2-dimensional
3D	3-dimensional
ADI	Austempered Ductile Iron
AFP- Stähle	Ausscheidungshärtende ferritisch- perlitische Stähle
BY-Zustand	Von der Umformhitze gezielt abgekühlt
DSC- Analyse	Dynamische Differenz-Kalorimetrie Analyse
FEM	Finite Elemente Methode
IBF	Institut für Bildsame Formgebung, RWTH Aachen
IFUM	Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen der Universität Hannover
Si ₃ N ₄	Siliziumnitrid, Hochleistungskeramik
TZM	Titanium-Zirconium-Molybdenum

1 Einleitung

Im Fahrzeugbau werden Stahlschmiedeteile vor allem im Fahrwerk und im Antrieb eingesetzt, da durch die Umformung und anschließende Wärmebehandlung in vieler Hinsicht herausragende Werkstoffeigenschaften eingestellt werden können. Durch den Einsatz von neuen Gusswerkstoffen setzte aufgrund niedriger Produktionskosten eine teilweise Substitution von Schmiedeteilen durch Gussteile ein. Den qualitativen Vorteilen von Schmiedeteilen stehen jedoch als Nachteile eine eingeschränkte Formvielfalt, ein oft lange dauernder und teurer Verfahrensablauf in der Prozesskette [HIR-99] sowie ein hoher Werkzeugverschleiß gegenüber. Es stellt sich nun die Frage, ob sich hier ein neues Verfahren wie das "Thixoforming" von Aluminium [KOP-99], [TIE-93], [WIT-99], [HIR-99] auf die Herstellung von Schmiedeteilen aus hochschmelzenden Stahllegierungen übertragen lässt. Durch das Schmieden thixotroper Vormaterialien könnten komplexe Geometrien mit den zu erwartenden Eigenschaften eines Schmiedeteils in ein bis zwei Arbeitsgängen (derzeit bis zu 7 Arbeitsgängen) hergestellt werden (Abb. 1.1), wobei eine Kombination der Verfahrensvorteile sowohl des Gießens als auch des Schmiedens genutzt werden kann.

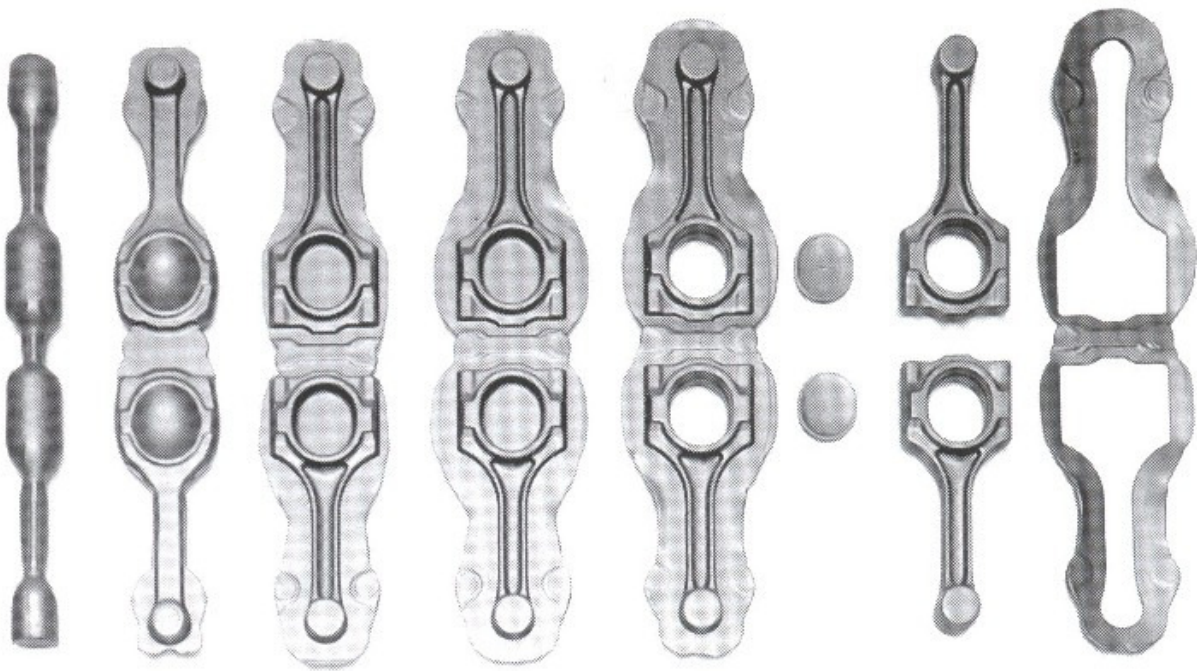


Abb. 1.1: Stadienfolge beim Gesenkschmieden von Pleuelstangen [Quelle: SMS- Eumuco]

In jedem Pkw der DaimlerChrysler AG befinden sich je nach Modell ca. 80 Schmiedeteile (d.h. ca. 70 kg pro Fahrzeug), die in mehreren Umformstufen und mit aufwendiger Zerspanarbeit hergestellt werden. Jährlich werden davon ca. 75 000 t Stahl zu verschiedenen Schmiedeteilen wie z.B. Achs-, Getriebe- und Motorteilen in der eigenen Schmiede von DaimlerChrysler umgeformt (Abb. 1.2).

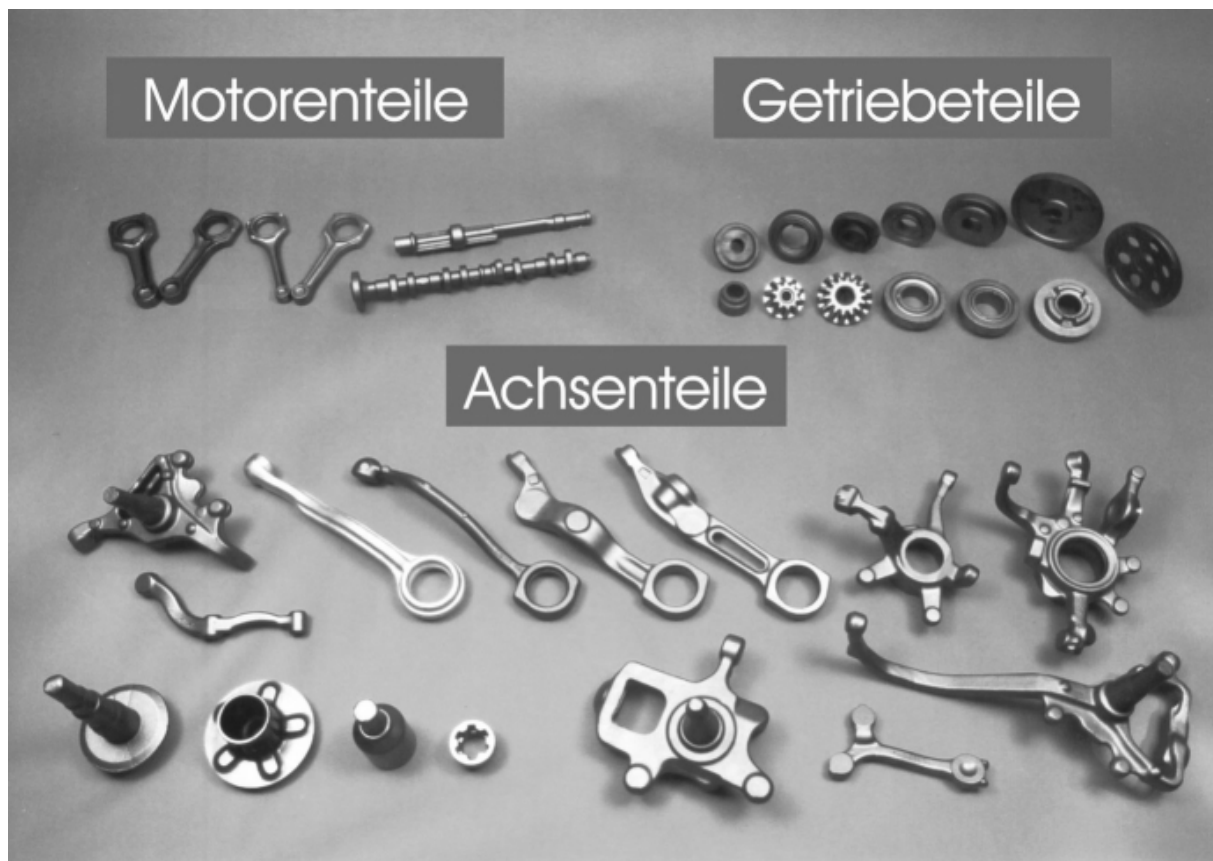


Abb. 1.2: Teilspektrum der DaimlerChrysler Schmiede

Die Vorteile des Thixoschmiedens von Stählen sollen hier nochmals hervorgehoben werden. Der grundsätzliche Schmiedeprozess kann in seinen Stufen wesentlich verringert werden, wobei in einem Dauerformgebungsverfahren endformnahe Serienbauteile mit ausreichend hoher Qualität gefertigt werden können. Geringere Investitionen im Anlagenbereich, reduzierter Kühl- und Trennmittelverbrauch sowie verringerte Fertigungszeiten lassen wesentliche Einsparungen bei den Produktionskosten erwarten (Abb. 1.3).

Im Gegensatz zur Formgebung von Aluminiumlegierungen im teilerstarten Zustand sind beim Thixoschmieden von Stählen derzeit bei verfügbaren Formwerkzeugen

noch beträchtliche Probleme bezüglich der mechanischen, tribologischen, chemischen und thermischen Anforderungen aufgrund erheblich höherer Verarbeitungstemperaturen vorhanden. Die herkömmlichen Stahlwerkzeuge weisen durch Benetzung, Klebeneigung und Schmelzreaktionen einen hohen Verschleiß auf, wodurch sehr geringe Werkzeugstandzeiten resultieren [ABS-99]. Die Wärmeabfuhr beeinflusst ebenfalls den Formgebungsprozess. Hier haben neuartige keramische Werkzeuge [KOP-04-2], [MÜN-04], [MEY-04], [KUR-04] und keramische Beschichtungen [KYR-03] das Potential die Werkzeugstandzeiten beim Thixoschmieden signifikant zu verbessern, so dass ein wirtschaftlicher Serienprozess ermöglicht wird [KOP-02],[KÜT-04].

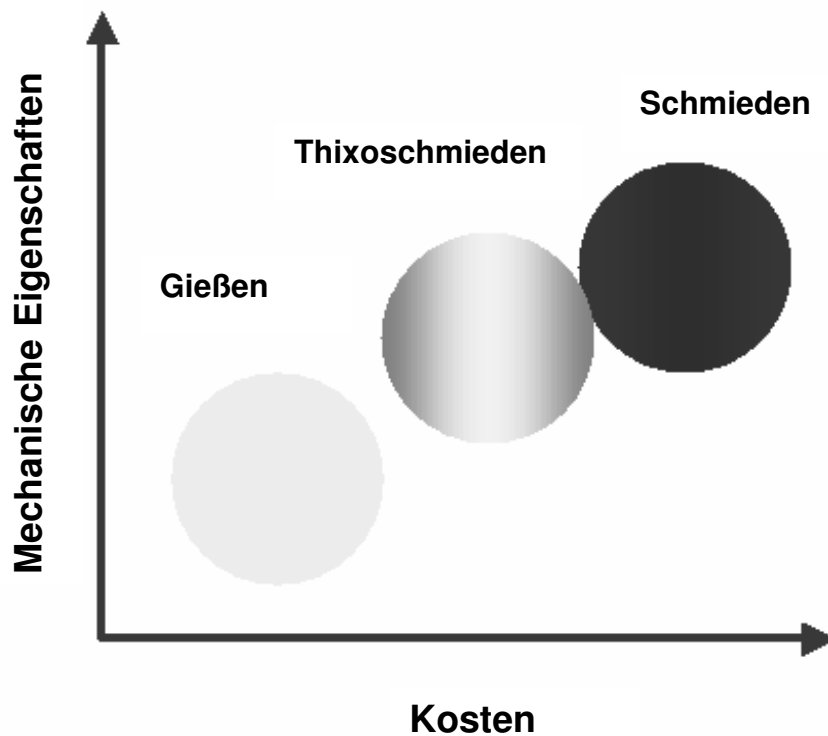
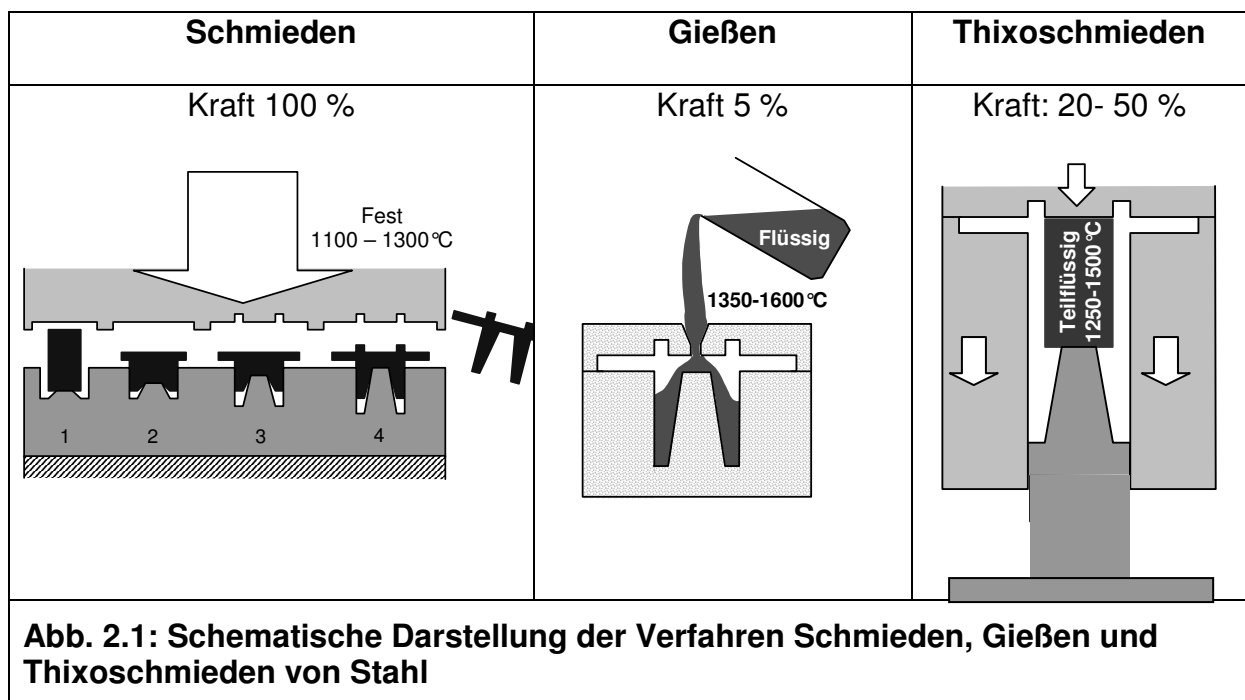


Abb. 1.3: Thixoschmieden im Verfahrenswettbewerb

2 Stand der Technik

2.1 Vom Schmieden und Gießen zum Thixoschmieden

Schmieden ist ein Verfahren der Umformtechnik, bei dem ein Werkstück in einem Gesenk oder frei geformt wird. Üblicherweise erfolgt das Schmieden mit einer Temperatur um die Rekristallisationstemperatur. Die Herstellung der Bauteile bei typischen Temperaturen zwischen 1100 °C und 1300 °C für Stahlwerkstoffe erfolgt in mehreren Umformstufen und unter hohen Umformkräften (Abb. 2.1). Die auf dieser Weise hergestellten Bauteile weisen hervorragende mechanische Eigenschaften auf.



Beim Gießverfahren wird ein Werkstoff auf eine Temperatur ca. 100 °C oberhalb der Liquidus-Temperatur erwärmt und dann in eine Form gegossen.

Beim Gießen können durch das hohe Fließvermögen des flüssigen Stahles komplexe Geometrien in einem Umformschritt abgebildet werden. Zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften werden gegossene Bauteile nachträglich

wärmebehandelt. Bauteile mit stark schwankenden Wandstärken können Poren aufweisen.

Demgegenüber besitzt der Stahl im teilflüssigen Zustand ein hohes Fließvermögen und lässt sich in einer Umformstufe mit wenig Kraft zu einem Fertigbauteil umformen. Durch die hohe Formgenauigkeit der hergestellten Bauteile können die Bearbeitungszugaben und somit die Zerspanungskosten stark reduziert werden.

Das Thixoformen wird in zwei Hauptverfahrensvarianten unterteilt, das Thixoschmieden und das Thixogießen (Abb. 2.2). Beim Thixoschmieden werden geringere Flüssigkeitsanteile als beim Thixogießen angestrebt. Bauteile werden in einer Umformstufe hergestellt. Ein Materialverlust in Form von Anguss entsteht nicht. Das Risiko auf Erstarrungsporosität wird aufgrund des geringen Flüssigkeitsanteils im Vergleich zum Thixogießen reduziert.

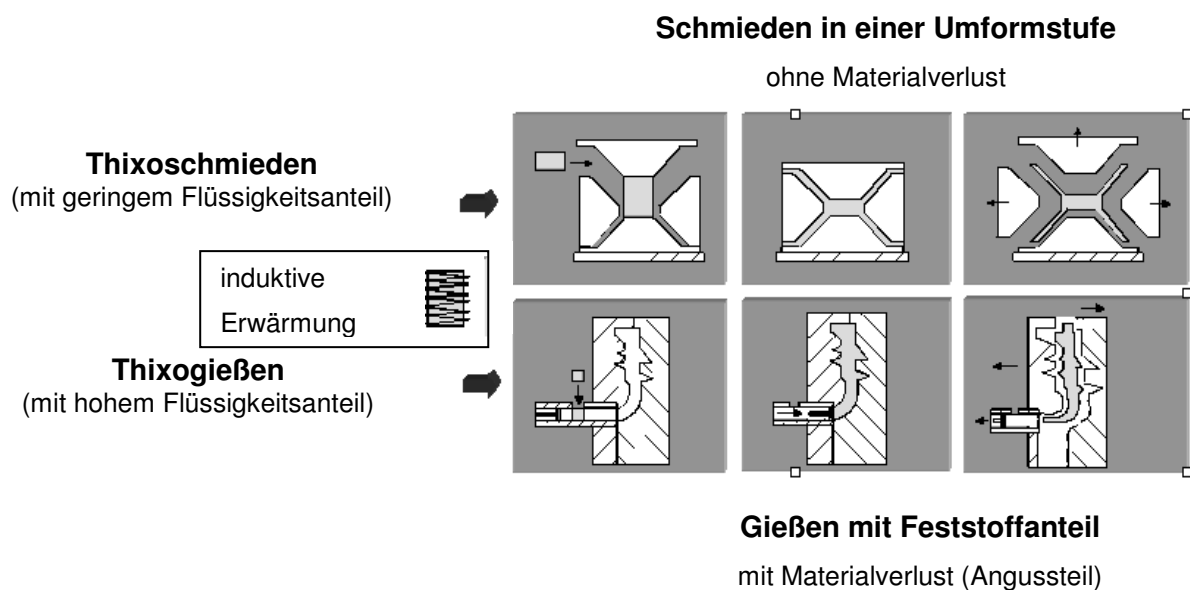


Abb. 2.2: Verfahrensvariante beim Thixoforming

Die Vorteile des Thixoformings ergeben sich aus der Kombination der verfahrensspezifischen Vorteile von Gießen und Schmieden:

- Drastische Verkürzung der Prozesskette, da auch sehr komplexe Geometrien in einer Umformstufe hergestellt werden können. [KOP- 00] [HIR-99], [DOE-03],
- Möglichkeit zur Herstellung nicht schmiedbarer Geometrien, wie z. B. Hinterschneidungen und dünne Rippen mit langen Fließwegen,
- Near Net Shape- fähige Werkstücke mit verringerter nachträglicher Nacharbeit (Zerspanung),
- Herstellung auf einfachen Maschinen mit geringer Kraft und Automatisierungsgrad [DOE-03],
- Schnelle Entformung der Werkstücke aufgrund des geringen Flüssigkeitsanteiles,
- Hohe mechanische Eigenschaften auf Qualitätsniveau von geschmiedeten Bauteilen mit sehr geringer Erstarrungsporosität und wenigen Einschlüssen.

Demgegenüber treten folgende Probleme auf:

- Verfügbarkeit geeigneter Werkzeugwerkstoffe, die den hohen mechanischen und thermischen Beanspruchungen gerecht werden,
- Enges Prozessfenster bei der Wiedererwärmung des Rohlings.
- Geeignete Thixostahlsorten müssen entwickelt werden.

Das Thixoforming ist ein Formgebungsverfahren, bei dem sogenannte „thixotrope“ Stähle im teilflüssigen Zustand zwischen der Solidus- und Liquidustemperatur verarbeitet werden (Abb. 2.3). Der Temperaturbereich für die Verarbeitung liegt zwischen dem vom Schmieden und vom Gießen.

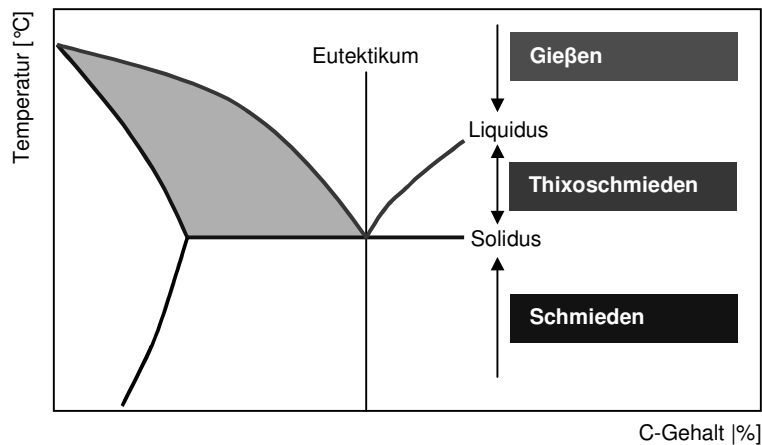


Abb. 2.3: Schematischer Vergleich der Temperaturarbeitsbereiche beim Schmieden, Gießen und Thixoschmieden

Die bisher untersuchten Stahlsorten sind der Tab. 2.1 zu entnehmen.

Tab. 2.1: Durch Thixoforming bisher verarbeitete Stahlsorten

Stahlsorten	Verarbeitungstemperaturen	Quelle
HS6-5-2	1350 °C	[KAL-02], [ABS-99], [KAP-94], [MID-92], [KIR-96], [MID-92]
HS2-9-2	1300 °C	[KAP-94]
X5CrNi18-9C	1450 °C	[MID-92], [YOU-79]
X5CrNiMo18-10	1425 °C	[MID-92], [YOU-79]
X210CrW12	1235 °C	[KAL-02],
100Cr6	1425 °C	[KAL-02]
C60	1458 °C	[KAL-02]
41Cr4	1471 °C	[KAL-02], [ABS-99]
C70 S6	1450 °C	[ABS-99]
C45R	1450 °C	[ABS-99]

Um ein möglichst großes Temperaturverarbeitungsfenster zu haben und die thermischen Werkzeugbelastungen zu minimieren, wurden bisher hauptsächlich

Stähle mit einem hohen Legierungszustand untersucht. Mit steigendem Legierungsgehalt nimmt die Solidus- und die Liquidustemperatur ab.

Thixotrope Metalle haben die Eigenschaft, bei steigender Scherbelastung mit einer starken Abnahme der Viskosität zu reagieren, wenn sie auf eine Temperatur zwischen der Solidus- und Liquidustemperatur erwärmt werden [FLE-78]. Im unbelasteten Zustand liegt dagegen im teilflüssigen Werkstoff ein fester Zusammenhalt vor (Abb. 2.4).

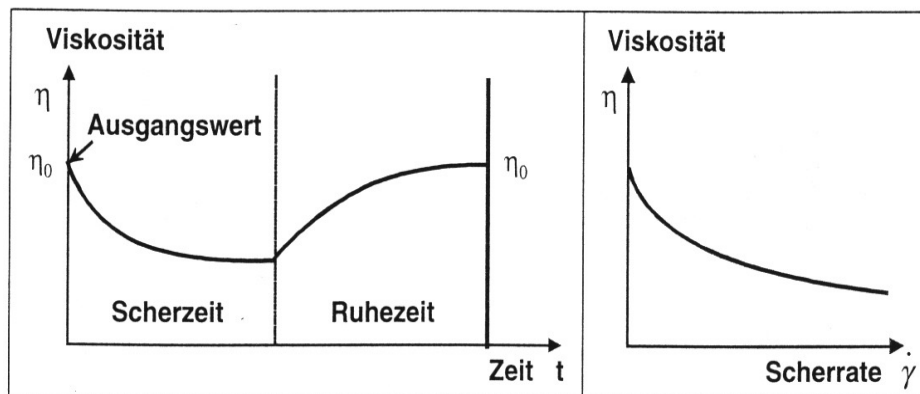


Abb. 2.4: Viskosität in Abhängigkeit der Scherrate und der Scherzeit [KOP-00]

Um ein thixotropes Verhalten vorweisen zu können, müssen Werkstoffe ein globulitisches Gefüge (Abb. 2.5) besitzen und müssen sich auf einer Temperatur zwischen Solidus und Liquidus befinden.

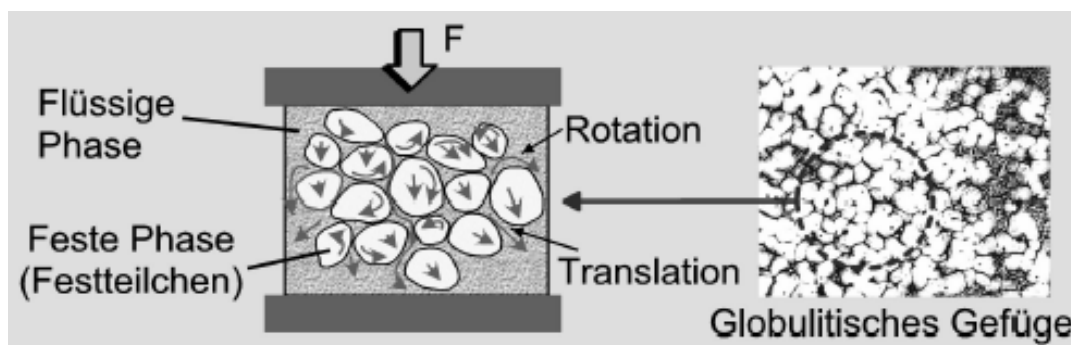


Abb. 2.5: Schematisches Gefüge und Verformungsmechanismen [ABD-02]

2.2 Eigenschaften geschmiedeter, gegossener und thixogeformter Bauteile

Das Schmieden und das Gießen sind zwei konkurrierende Formgebungsverfahren. Den ausgezeichneten mechanischen Eigenschaften geschmiedeter Bauteile stehen geringere Herstellkosten durch Near- Net Shape gegossene Bauteile gegenüber.

Zur Reduzierung der Herstellkosten beim Schmieden wurden mikrolegierte AFP-Stähle entwickelt. Diese Werkstoffe benötigen keine zusätzliche Wärmebehandlung nach der Umformung sondern werden einer kontrollierten Abkühlung der Umformhitze unterzogen.

Im Vergleich zu vergüteten Bauteilen können die Kosten bei vergleichbaren mechanischen Eigenschaften um ca. 10% reduziert werden [WEG-98].

In Tab. 2.2 und Abb. 2.6 sind für ein mittelschweres Pleuel die mechanischen Anforderungen bzw. ein Kostenvergleich von AFP Stählen im BY Zustand im Vergleich zum vergüteten Stahl 41CrS4 dargestellt.

Tab. 2.2: Mechanische Anforderungen an ein mittelschweres Pleuel in Abhängigkeit zum eingesetzten Werkstoff [WEG-98]

Werkstoff	R_{p0,2} [N/mm²]	R_m [N/mm²]	A₅ [%]	Z [%]
41CrS4	≥ 530	730 / 860	≥ 14	≥ 50
38MnVS5 BY	≥ 550	820 / 1000	≥ 12	≥ 25
C70S6 BY	530	820 / 1000	≥ 12	≥ 25

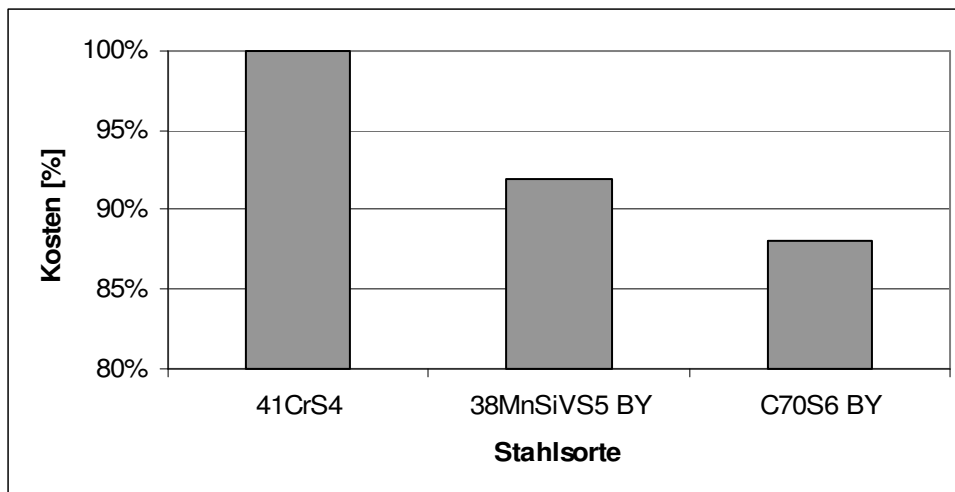


Abb. 2.6: Kostenvergleich an geschmiedeten Pleueln bei Einsatz verschiedener Werkstoffe [WEG-98]

Im Verfahrenswettbewerb steht das Verfahren Gießen. Durch den Einsatz der ADI – Technologie (Austempered Ductile Iron) können Schmiedeteile durch gegossene Bauteile ersetzt werden [CRO-97].

Ein ADI -Werkstoff bezeichnet einen wärmebehandelten, duktilen Sphäroguss, der eine doppelt so hohe Festigkeit wie Gusseisen mit Kugelgraphit besitzt. Sein E-Modul ist um etwa 20 - 30 % niedriger als der von Stahl. Durch vergleichbar niedrigere Zerspanungskosten und hohe mechanische Eigenschaften erweisen sich ADI- Werkstoffe damit konkurrenzfähig zu Schmiedestahl und Stahlguss [CRO-97].

ADI wird durch eine mehrstufige Wärmebehandlung hergestellt. Ziel der Wärmebehandlung ist die Einstellung eines Gefüges aus nadeligem Ferrit in einer mit Kohlenstoff übersättigten Austenitmatrix, die durch den hohen Kohlenstoffgehalt stabilisiert wird. Das Gussstück wird im Schutzgasofen mindestens zwei Stunden lang bei einer Temperatur von 840 bis 950 °C austenitisiert. Im zweiten Behandlungsschritt erfolgt eine rasche Abkühlung, in der Regel im bewegten Salzbad, auf eine Umwandlungstemperatur in die Bainitstufe zwischen 235 und 425°C. [CRO-97]

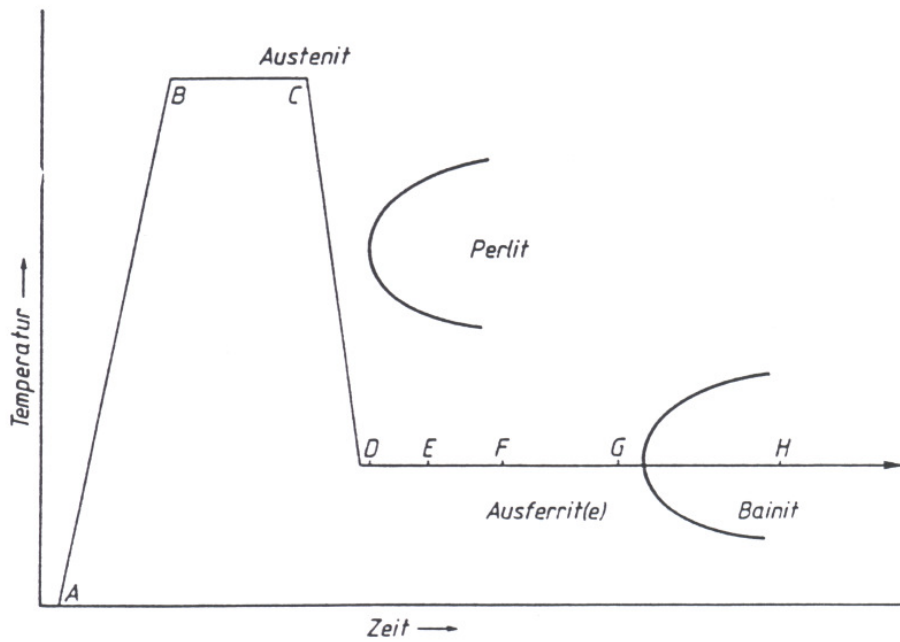


Abb. 2.7: Schematische Darstellung einer ADI- Wärmebehandlung [CRO-97]

In Abb. 2.8 sind typische, industriell erreichte Festigkeits- und Zähigkeitswerte in Abhängigkeit von der Härte aufgetragen.

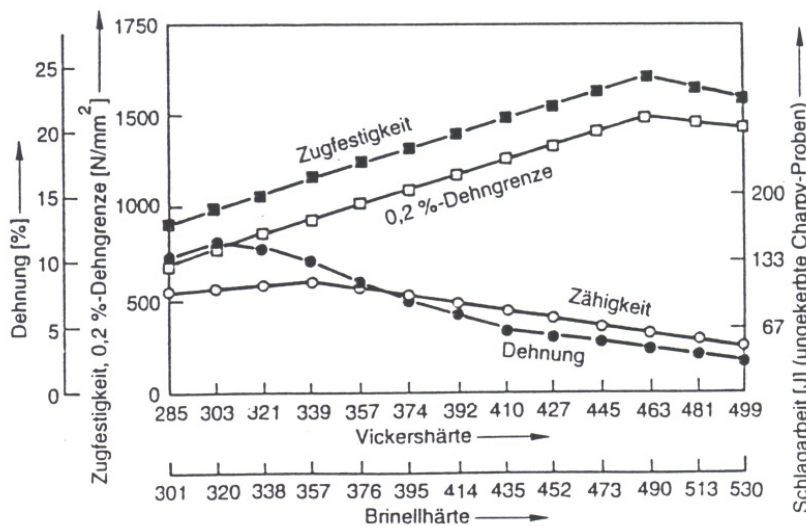


Abb. 2.8: Typische Eigenschaften von ADI- Werkstoffen in Abhängigkeit von der Härte [CRO-97]

Erste Untersuchungen thixogeschmiedeter Bauteile aus dem Stahl C70S6 von [ABS-99] ergeben schlechte mechanische Eigenschaften ($R_m = 400\text{-}550\text{ N/mm}^2$, $R_{p0,2} = 300\text{-}450\text{ N/mm}^2$, $A = 1\text{-}3\%$).

Metallographische Untersuchungen zeigen folgende Gefügefehler:

- Mikroporosität des Gefüges,
- Verstärkte Ausscheidungen von Mangansulfiden auf den Korngrenzen,
- Gefügeheterogenitäten (Separation von Fest- und Flüssigphase),
- Erstarrungsrisse,
- Lunker und
- Zundereinschlüsse.

2.3 Werkzeugtechnologien beim Schmieden und Gießen

2.3.1 Werkzeugwerkstoffe

Aufgrund der hohen thermomechanischen Belastungen beim Thixoschmieden von Stahl scheinen konventionelle Werkzeugwerkstoffe, die beim Schmieden oder beim Gießen verwendet werden, nicht geeignet.

Beim Stahlschmieden werden Werkzeuge hauptsächlich aus Warmarbeitsstählen hergestellt. Durch eine Nitrierung (bzw. Nitrokarburierung) oder den Auftrag einer kobalthaltigen Schicht (Stellit) kann die Standzeit dieser Werkzeuge erhöht werden. Schmiedewerkzeuge unterliegen hohen thermomechanischen Wechselbeanspruchungen. Aufgrund der hohen maximalen Temperaturen an den Werkzeugoberflächen (700 bis 750 °C) [SEI-92] sind die Hauptausfallursachen Verschleiß (70 %) und mechanische Rissbildungen (Abb. 2.9).

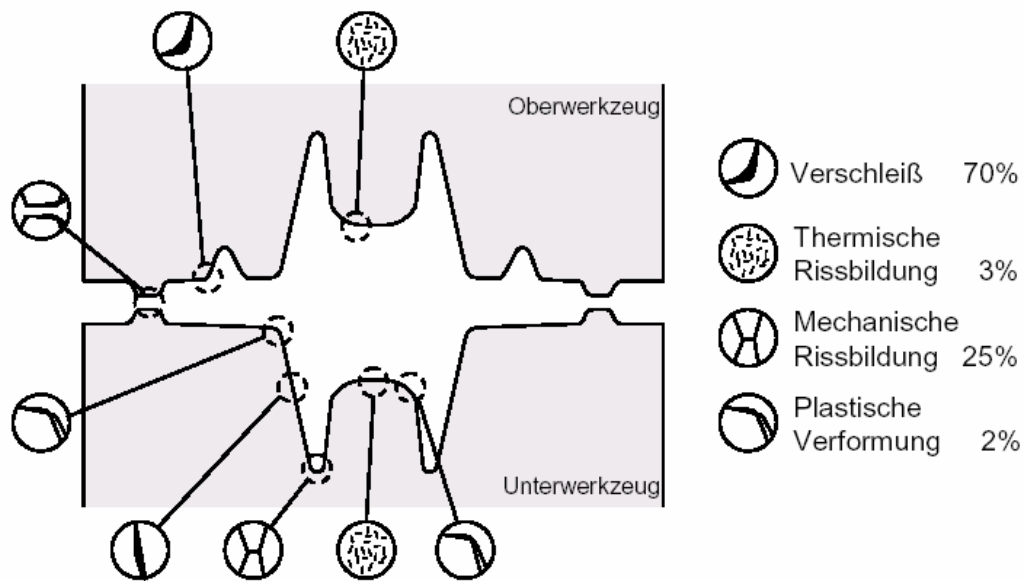


Abb. 2.9: Schadensarten an Schmiedegesenken [KAN-69], [HEI-76]

Beim Gießen von unlegierten Stahlguss bei Temperaturen um 1600 °C werden meist Formsande benutzt. Diese bestehen aus Quarzsand SiO_2 (80 bis 90 %), Formbindemitteln (silikatische Binder, Kohlehydratbinder) für die erforderliche Festigkeit der Form und aus Zuschlagstoffen. [MÄL-93]

In Tab. 2.3 sind konventionelle Werkzeugwerkstoffe für Schmiede- und Gießwerkzeuge für die Bearbeitung von hochschmelzenden Stahllegierungen dargestellt.

Tab. 2.3: Thermomechanische Belastungen und typische Werkzeugwerkstoffe beim Schmieden und Gießen von Stahllegierungen

	Mechanische Belastung	Verarbeitungstemperatur	Werkzeugwerkstoffe
Schmieden	100 – 400 N/mm ²	1100 – 1300 °C	1.2714 mit/ohne Stellite Schicht 1.2367 mit/ohne Nitrierung 1.2365 mit/ohne Nitrierung
Gießen	< 10 N/mm ²	1200 – 1600 °C	Formsand

Um den Verschleiß von konventionellen Schmiedewerkzeugen zu reduzieren, wurden bereits Grundsatzuntersuchungen mit einfachen Werkzeugen aus unterschiedlichen keramischen Werkstoffen wie Siliziumnitrid (Si_3N_4) [MÜN-04], [KOP-04-2], Aluminiumoxid (Al_2O_3), Siliziumcarbid und Sialone durchgeführt [DOE-02]. Obwohl Verschleißverbesserungen im Vergleich zu Warmarbeitsstahl erreicht werden können, weisen diese Werkzeuge aufgrund von thermomechanischen Wechselbelastungen nur geringe Standzeiten auf.

In der Literatur finden sich verschiedene Hinweise auf Arbeiten zum Thixoforming von Stählen. Dabei werden als Werkstoffmaterialien erwähnt:

- Keramiken (Aluminiumoxid und Zirkonoxid) [RAU-98]
- Warmarbeitsstähle (hochlegierte CrMoV- Stähle H13, H21) [ABS-99]
- Graphit [KAP-93]
- Beton (Zementwerkstoff“ Sinanyo M41“) [KAP-96]
- Kupferbasierte Legierungen („Elbrodur RS“) [FLE-78]

Mit Ausnahme der Kupfer-Legierung „Elbrodur RS“ sind keine genauen Angaben zur Lebensdauer bzw. zum Verschleißverhalten der eingesetzten Werkzeuge verfügbar. Mit diesen Werkzeugen wurden in einer amerikanischen Studie 2200 Thixoforming-Versuche zur Herstellung eines Gewehr-Hammers durchgeführt. Die geschätzte Werkzeuglebensdauer wird hier mit 10 000 Hüben angegeben.

In [ABS-99] werden die Verschleißerscheinungen an dem Werkzeugstahl X38CrMoV5 3 (1.2367) nach 120 Hüben folgendermaßen beschrieben (Abb. 2.10):

- Risse,
- Anschmelzungen,
- Erosion / Abrasion,
- Plastische Deformationen.

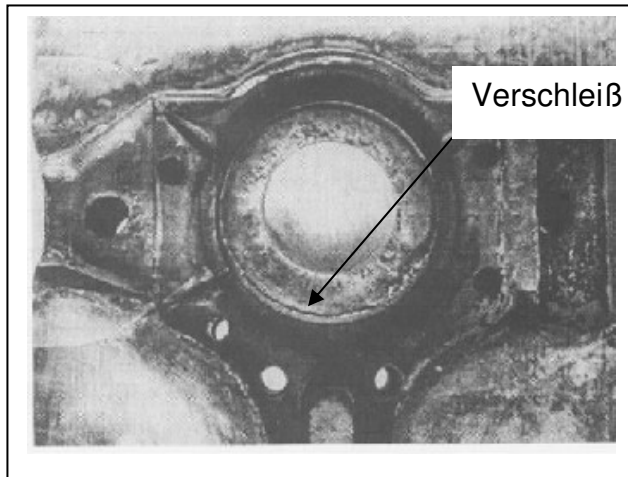


Abb. 2.10: Verschleiß an einem Werkzeug aus 1.2367 nach 120 Hieben [ABS-99]

2.3.2 Werkzeugkonzepte zum Thixoforming von Stahl

Beim Thixoforming werden teilflüssige Bolzen umgeformt oder gegossen. Konventionelle Werkzeugkonzepte können nicht oder nur bedingt eingesetzt werden. Vorgestellte Werkzeugkonzepte zum Thixoforming wurden vom IBF RWTH Aachen [KOP-01], [KOP-04-1] (Abb. 2.11), vom IFUM –Hannover [DOE-01], [CES-03] (Abb. 2.12) und von der ehemaligen Fa. EFU, Simmerath vorgestellt [ABS-99] (Abb. 2.15). Diese Werkzeugkonzepte bieten Lösungen, um ein Austreten von Stahlschmelze (Spritzer) und ein Oxidieren des Gefüges während der Umformung zu vermeiden.

In den ersten Werkzeugkonzepten des IBF [KOP-01] (Abb. 2.11) und des IFUM [DOE-01] (Abb. 2.12) wurde zunächst die induktive Erwärmungsanlage unterhalb der Brücke in den Werkzeugaufbau integriert. Mit diesem Konzept kommt der Bolzen nach der Erwärmung nicht mehr in Kontakt mit Luft. Die oxydischen Einschlüsse im Gefüge können somit sehr stark reduziert werden. Diese ersten entwickelten Werkzeugkonzepte erscheinen für einen Produktionsprozess als wenig wirtschaftlich und berücksichtigen zudem Risiken wie den Transport des Bolzens nicht.

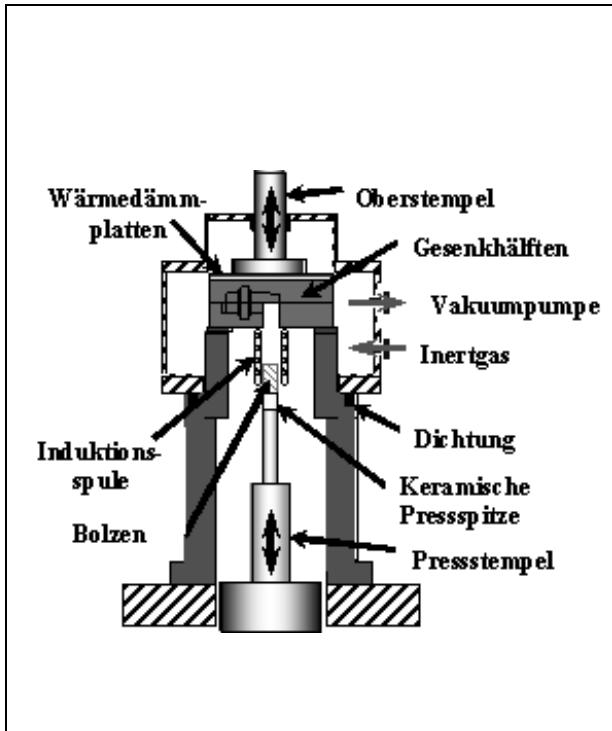


Abb. 2.11: Werkzeugkonzept des IBF RWTH Aachen zum Thixoschmieden von Stahl [KOP-01]

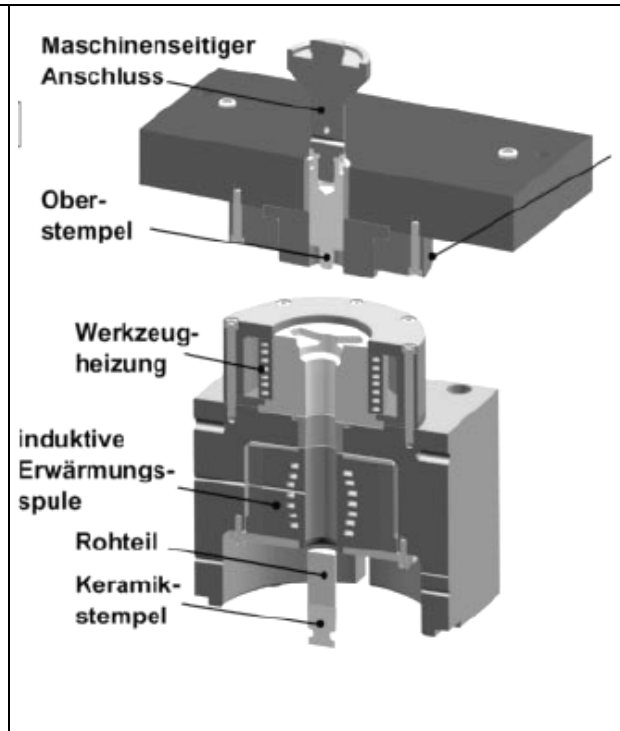


Abb. 2.12: Werkzeugkonzept des IFUM – Hannover zum Thixoschmieden von Stahl [ABD-02]

Neue Werkzeugkonzepte dieser Institute sind in den Abb. 2.13 und Abb. 2.14 dargestellt. Dabei werden unterschiedliche Werkzeugwerkstoffe wie TZM, Si_3N_4 und Beschichtungen untersucht [KYR03], [KUR-04], [MÜN-04], [MEY-05]. Mit diesen Werkzeugen können nur kleinere Bauteile (Gewicht bis 600 g) hergestellt werden.

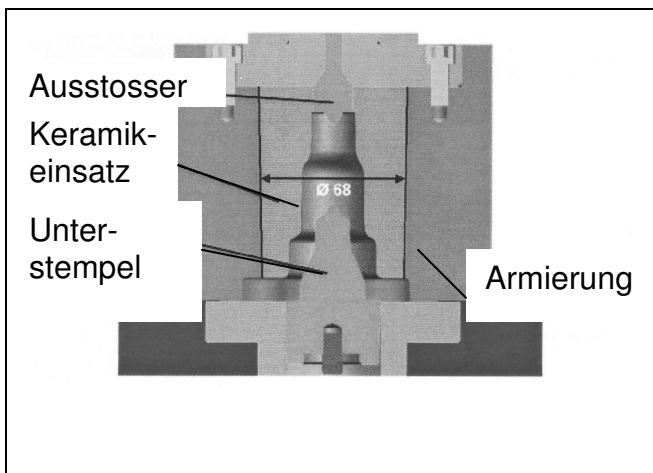


Abb. 2.13: Werkzeugkonzept des IFUM-Hannovers [DES-03]

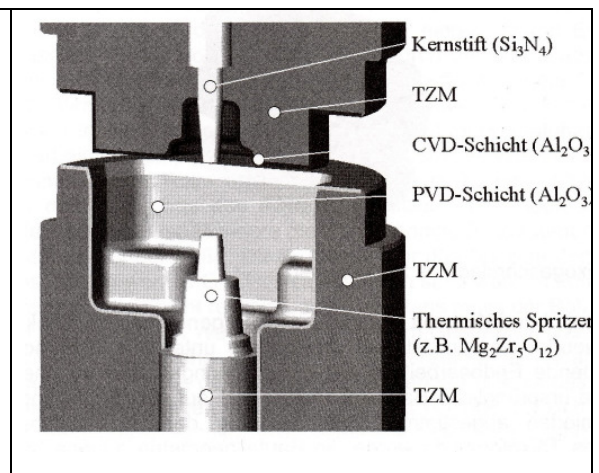


Abb. 2.14: Werkzeugkonzept des IBF [KOP-04-1]

Die Problematik des Wärmehaushaltes bei der Herstellung von seriennahen Bauteilen mit einem höheren Einsatzgewicht (mehrere Kilogramm) wird hier nicht untersucht.

Das von der Fa. EFU vorgestellte Werkzeugkonzept zum Thixofforming ist ein Werkzeug zum Thixogießen [HIR-99]. Mit diesem Werkzeug können auch hohe Taktzeiten gefahren werden, da die Erwärmung in einer oder mehreren separaten induktiven Erwärmungsanlagen durchgeführt werden kann. Oxide werden durch eine Oxidrückhaltung vermieden.

Das Verfahren Thixogießen weist folgende Nachteile auf:

- Eine schwierige Erwärmung des Bolzens bis zu hohen Flüssigkeitsanteilen,
- Gießtypische Gefügefehler (nicht metallische Einschlüsse, Seigerungen, verschweißte Bahnen...)
- Materialverlust durch das verlorene Angussstück.

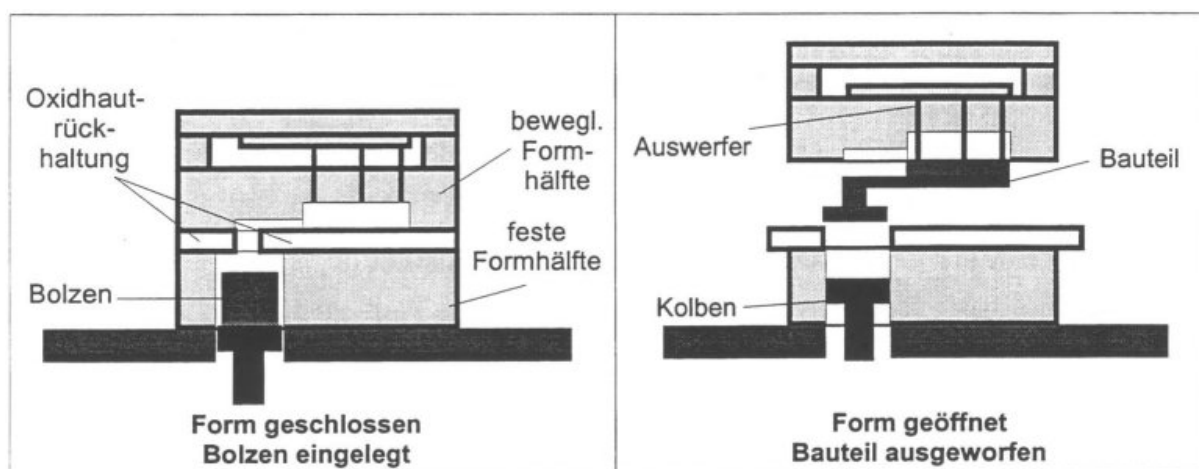


Abb. 2.15: Werkzeugkonzept der Fa. EFU zum Thixogießen von Stahl [HIR-99]

2.4 Simulationen der Formgebung und der Werkzeugbelastung

Schmiede- und Gießverfahren können mit der FEM- Methode simuliert werden. Im festen und im flüssigen Zustand existieren Modelle, die das Werkstoffverhalten beschreiben. Thermophysikalische Größen wie Wärmeleitfähigkeit, Wärmekapazität, Wärmeausdehnung, Dichte in Abhängigkeit von der Temperatur sind erforderlich.

Im festen Zustand bzw. bei Schmiedeverfahren wird das Material durch seine Fließspannung beschrieben.

$$k_f = k_f(\text{Werkstoff}, T, \varphi, \dot{\varphi}) \quad (\text{Gl. 2.1})$$

Diese Festigkeitsdaten enthalten den E- Modul und die Fließkurven, die bei der Modellierung eingegeben werden. Die Festigkeitsmatrize wird direkt mittels der Fließkurven und dem E-Modul berechnet.

Im flüssigen Zustand, bzw. bei Gießverfahren wird die Flüssigkeit durch ihre Viskosität beschrieben. Die Viskosität kann in Abhängigkeit von der Temperatur angegeben werden.

Anhand der Viskosität werden eine Scherspannung und eine Fließspannung wie folgt berechnet:

$$k_f = 2 \cdot \tau = 2 \cdot \eta \cdot \dot{\gamma} \quad (\text{Gl. 2.2})$$

Die Simulation im teilflüssigen Zustand, wo sowohl eine feste als auch eine flüssige Phase vorliegt, bereitet noch Probleme.

Zur numerischen Simulation der Formfüllung und der Erstarrung des Thixo-Gießverfahrens werden [HIR-99] die Viskositäten aus Werten der MAGMA Datenbank für Aluminium- Legierungen für Stahl umgerechnet. Die Viskositäten werden dann nach dem Oswald de Waele Gesetz beschrieben:

$$\tau = -\rho \cdot m_o(T) \cdot \dot{\gamma}^{n_o(T)} \quad (\text{Gl. 2.3}) \quad \Leftrightarrow \quad \eta = \rho \cdot m_o(T) \cdot \dot{\gamma}^{n_o(T)-1} \quad (\text{Gl. 2.4})$$

m_o Oswald-de Waele Koeffizient, temperaturabhängig,

n_o Oswald-de Waele Koeffizient, temperaturabhängig.

Entscheidend für die Umrechnung der Aluminiumviskositäten in Stahlviskositäten ist der jeweilige Oswald de Waele Koeffizient und –Exponent. Die Oswald de Waele Koeffizienten und –Exponenten werden für den jeweiligen Feststoffanteil von Aluminium für Stahl übernommen. Dabei wurden die entsprechenden Dichten für Stahl eingesetzt [HAR-01].

In [KOK-99] wird ein Stoffmodell dargestellt, welches die Scherraten- und Zeitabhängigkeit des Materials berücksichtigt. Die Beschreibung der Viskosität geht auf einen Ansatz von Moore [MOO-59] zurück.

Der Ansatz von Modigell, Koke und Petra [KOK-99] lautet:

$$\eta = \left(\frac{\tau}{\dot{\gamma}} + k \cdot \dot{\gamma}^{m-1} \right) \cdot \kappa \quad (\text{Gl. 2.5})$$

$$\dot{\kappa} = c_R \cdot (\kappa_e - \kappa) \quad (\text{Gl. 2.6})$$

τ Scherspannung

$\dot{\gamma}$ Schergeschwindigkeit

κ Strukturparameter

κ_e Strukturparameter bei stationärem Zustand

c_R Reaktionsgeschwindigkeitskonstante in Abhängigkeit von der Schergeschwindigkeit

k, m Materialparameter

Keines der bekannten Materialmodelle kann mit einer teilflüssigen und mit einer festen Phase(, die sich z.B. am Bauteilrand bildet), arbeiten.

Die Werte für die Randbedingungen oder die Stoffwerte des Werkstückstahles C70 S6 sind für den Temperaturbereich der Formgebung nicht definiert.

In [ABS-99] werden Thixogießsimulationen mit den Werkzeugwerkstoffen X38CrMOV5-1, CuBe2CoNi, und Haynes 230 durchgeführt.

Der verwendete Wärmeübergangskoeffizient zwischen Werkzeug und Umformgut wird auf $10 \text{ kW/m}^2\text{K}$ konstant gehalten.

Bei allen drei Werkzeugwerkstoffen werden nach einem Schuss in den oberflächennahen Bereichen kritische Temperaturen erreicht. Maximale Temperaturen von über 800 °C werden z.B. beim Stahlwerkzeug erreicht.

In [SFB-04] wird anhand der Software MAGMAsoft die Wärmeausbreitung in einer Gießkammer im Dauerbetrieb dargestellt. Der hier angenommene Wärmeübergangskoeffizient liegt bei $1 \text{ kW/m}^2\text{K}$. Nach 9 Zyklen wird noch kein stationärer Zustand erreicht.

3 Aufgabenstellung und Vorgehensweise

Die bisher untersuchten niedrigschmelzenden Legierungen wie z. B. Aluminium oder Magnesium [HIR-98], [KOP-98] sind für den Einsatz im Automobilbau bisher in den meisten Fällen noch zu kostspielig. 90 % der geschmiedeten Bauteile werden bisher aus Stahl hergestellt. Die hohen Herstellungskosten beim konventionellen Schmieden werden durch eine Fertigung in mehreren Umformstufen, hohe Investkosten und durch hohe Zerspanungsarbeiten verursacht.

Frühere Untersuchungen zeigen, dass die Prozesskette sowie die Bearbeitungszugaben an den Bauteilen stark reduziert werden können, aber auch, dass konventionelle Schmiedewerkstoffe wie Warmarbeitsstahl [ABD-02] und hochschmelzende Molybdänlegierungen [ABS-99] große Werkzeug- und Prozessprobleme bereiten.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, prozessoptimierte verschleißfeste Werkzeuge zu entwickeln, mit denen Bauteile hoher Qualität unter Serienbedingungen erzeugt werden können. Zur Durchführung der Untersuchungen soll eine seriennahe einfachwirkende Presse mit geringer Umformgeschwindigkeit verwendet werden.

Als Zielbauteil wird eine bisher in der DaimlerChrysler Schmiede in vier Stufen geschmiedete Radnabe für die aktuelle Mercedes S-Klasse der Baureihe W220 ausgewählt (Abb. 3.1 und Abb. 3.2). Dieses Bauteil weist eine komplexe Geometrie auf. Durch die Reduzierung des Zerspanungsaufwandes, die Reduzierung der Umformstufen und die Reduzierung der Umformkräfte bis zu 90 % sind hohe Einsparungen zu erwarten.



Abb. 3.1: Zielbauteil (Radnabe für die Mercedes S-Klasse BR W220)



Abb. 3.2: Fertigbauteil nach dem Zerspanen

Aufgrund der Komplexität der Aufgabe wurde wie folgt vorgegangen:

- Vorauswahl von geeigneten Werkstoffwerkstoffen anhand von Grundsatzuntersuchungen und Formgebungsversuchen mit Modellradnaben im Labormaßstab,
- Entwicklung von Simulationsmethoden insbesondere durch Implementierungen von Materialfließgesetzen und Randbedingungen zur Auslegung von Werkzeugen und zur Berechnung von thermomechanischen Belastungen im Einzelhub und im Dauerbetrieb,
- Entwicklung von thixogerechten Werkzeugen und Herstellung von großformatigen Werkzeugen (insbesondere aus Keramik),
- Prozessoptimierung durch geeignete Erwärmung, geeignete Werkstückwerkstoffe und Werkzeugtemperaturen zur Erzeugung von thixogeschmiedeten Bauteilen mit guten mechanischen Eigenschaften,
- Untersuchung der mechanischen Eigenschaften thixogeschmiedeter Bauteile,
- Durchführung von einer wirtschaftlichen Bewertung der gesamten Prozesskette.

4 Stoff- und Randgrößen

4.1 Untersuchte Werkstück- und Werkzeugwerkstoffe

Tab. 4.1 zeigt die Zusammensetzung der von der Fa. Saarstahl zur Verfügung gestellten thixofähigen Stählen 46MnVS3 und 70MnVS5 im Vergleich zum konventionellen Schmiedestahl 38MnVS5 für die Herstellung von Radnaben.

Tab. 4.1: Chemische Zusammensetzung der Thixostähle 70MnVS5 und 46MnVS3 im Vergleich zu dem Schmiedestahl 38MnVS5 [Angaben der Fa. Saarstahl]

Güte	C[%]	Si[%]	Mn[%]	P[%]	S[%]	Cr[%]	Mo[%]	V[%]	N[%]
38MnVS5 (konv. Schmieden)	0,39	0,60	1,38	0,013	0,046	0,153	0,014	0,087	0,014
46MnVS3 (Thixoschmieden)	0,45	0,35	0,95	<0,025	0,045	<0,30	<0,08	0,08	0,01
70MnVS5 (Thixoschmieden)	0,695	0,692	1,34	0,001	0,039	0,235	0,002	0,099	0,0183

Der Stahl 46MnVS3 weist ähnliche Legierungsgehalte wie der Referenzstahl 38MnVS5 auf. Für Schmiedebauteile mit hohen Festigkeits- und Dehnungswerte scheint dieser Stahl gut geeignet. Der Stahl 70MnVS5 hat dagegen einen wesentlich höheren Kohlenstoffgehalt. Sehr hohe Festigkeitswerte und ein sprödes Verhalten sind für diesen typischen Pleuelstahl zu erwarten. Durch den erhöhten Legierungsgehalt sind die Temperaturen des Solidus und Liquidus geringer und das Schmelzintervall größer als die des niedriglegierten Stahles 46MnVS3.

Für Formgebungsversuche im Labormaßstab am IFUM wurden die Varianten aus Si_3N_4 , TZM und Warmarbeitsstahl als Werkzeugwerkstoff eingesetzt.

Bei den seriennahen Formgebungsversuchen wurden nur die vielversprechenden Varianten aus Si_3N_4 und Warmarbeitsstahl eingesetzt.

4.2 Prozessunabhängige Größen

4.2.1 Allgemeine Größen

Um eine realitätsnahe Simulation des temperaturempfindlichen Verfahrens Thixoschmieden von Stahl durchzuführen, müssen alle Größen in Abhängigkeit der Temperatur vorhanden sein. In der Abb. 4.1 sind die Werte der spezifischen Wärme, der Dichte und der Wärmeleitfähigkeit in einem Temperaturbereich von 20 °C bis 1600 °C des für die Simulationen ausgewählten Stahl 46MnVS3 dargestellt.

Die thermische Ausdehnung wurde mittels eines NETZSCH-Schubstangen-Dilatometers - Modell 402 C - bestimmt.

Die Wärmetönungseffekte wurden mit einem Wärmestrom-Differenz-Kalorimeter NETZSCH-DSC 404 C *Pegasus*[®] gemessen. Die Aufheizrate der Proben betrug 20 K/min.

Die Temperaturleitfähigkeit wurde mit einer Laser-Flash-Apparatur NETZSCH- LFA 427 gemessen.

Aus diesen Daten wurde unter Verwendung folgender Gleichung die Wärmeleitfähigkeit berechnet:

$$\lambda(T) = \rho(T) \cdot c_p(T) \cdot a(T). \quad \text{(Gl. 4.1)}$$

mit λ = Wärmeleitfähigkeit
 ρ = Dichte
 c_p = Spezifische Wärme
 a = Temperaturleitfähigkeit
 T = Temperatur

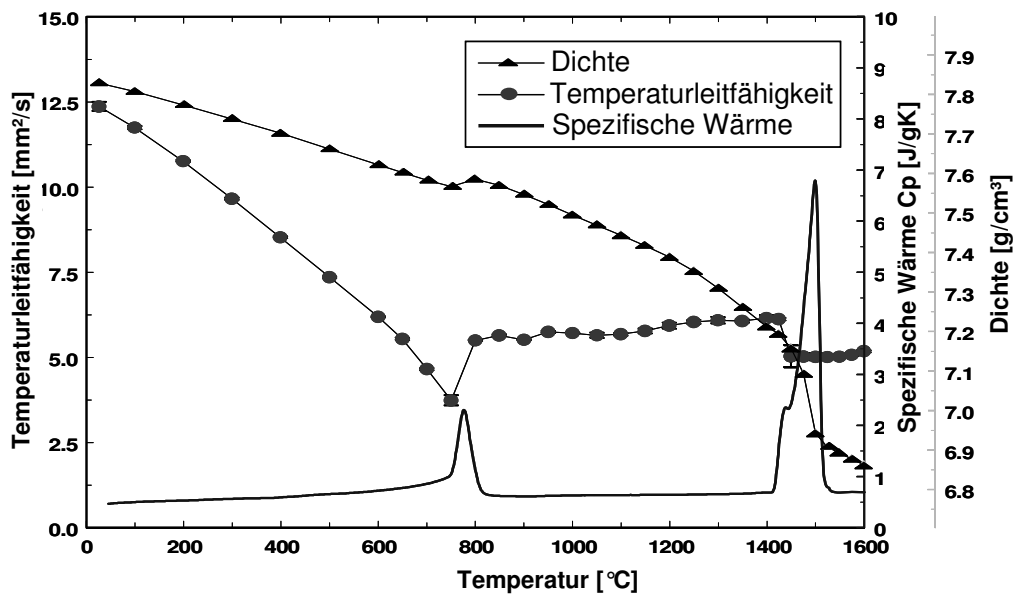


Abb. 4.1: Gemessene spezifische Wärme, Dichte und Wärmeleitfähigkeit des Stahles 46MnVS3

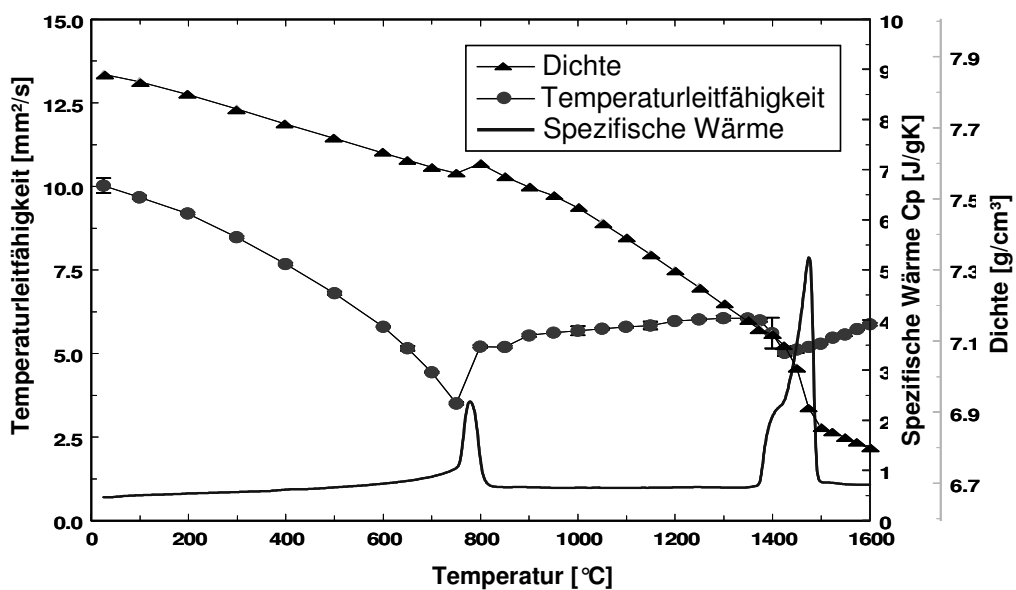


Abb. 4.2: Gemessene spezifische Wärme, Dichte und Wärmeleitfähigkeit des Stahles 70MnVS5

In den Abb. 4.1 und Abb. 4.2 dargestellten temperaturabhängigen Größen ist die Curie-Umwandlung und der Übergang zur flüssigen Phase an deren Größen klar zu erkennen.

Für die theoretischen Untersuchungen, anhand von FEM- Simulationen wurde der Warmarbeitsstahl 1.2999 und eine Si_3N_4 - Keramik verglichen. Zum Vergleich wurden auch die Eigenschaften des von [ABS-99] und [KOP-99] untersuchte Molybdän-basierenden Werkstoffes dargestellt.

Die in Abb. 4.3 dargestellten E-Module zeigen hohe Werte für den Werkstoff TZM und Si_3N_4 . Der E-Modul der Si_3N_4 -Keramik ist bis zu einer Temperatur von 1000 °C quasi konstant und nimmt dann aufgrund von chemischen Gefügeänderungen ab.

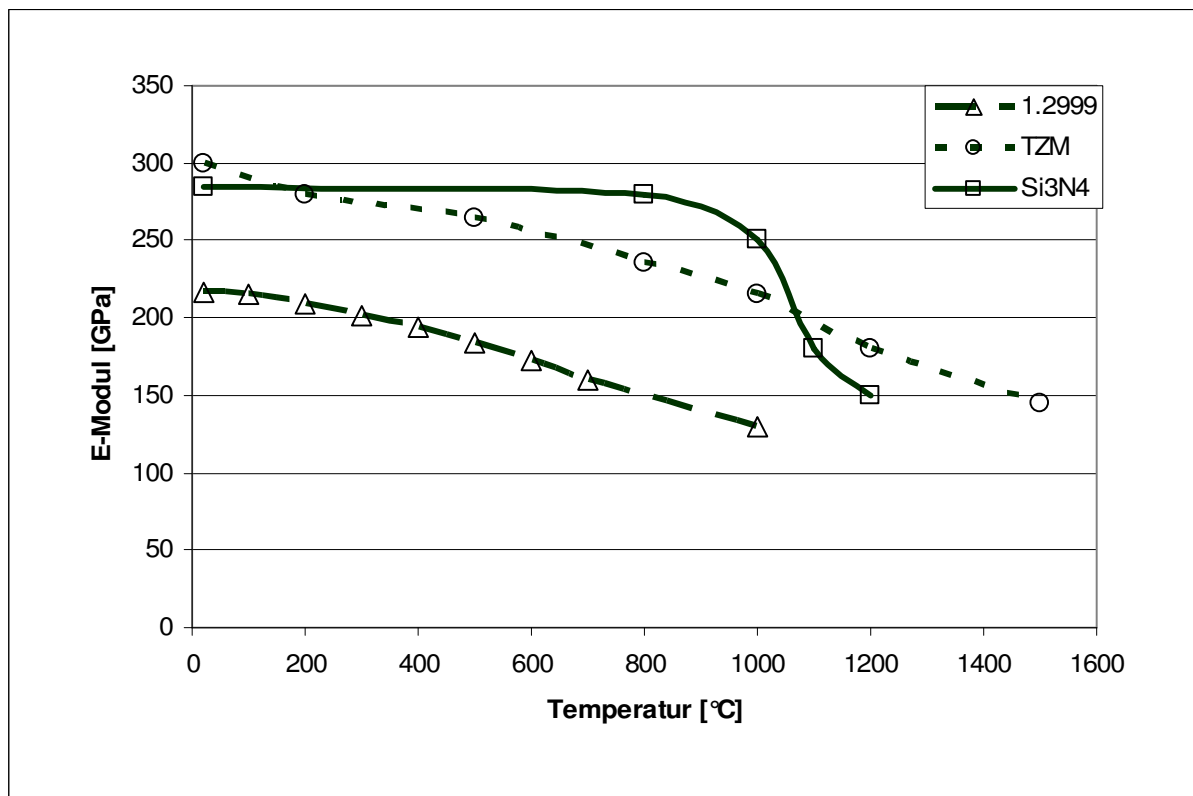


Abb. 4.3: E-Modul der Werkstoffe 1.2999, TZM und Si_3N_4

Warmarbeitsstahl (1.2999) unterliegt einer starken Abnahme dessen Festigkeit oberhalb der Temperatur der Sekundärhärtung über 590 °C (Abb. 4.4). Der auf Molybdänbasierende Werkstoff TZM besitzt bei hohen Temperaturen eine höhere Festigkeit als Warmarbeitsstahl. Si_3N_4 Keramik besitzt die höchste Warmfestigkeit. Bei einer Temperatur von 1000 °C beträgt diese noch 600 N/mm².

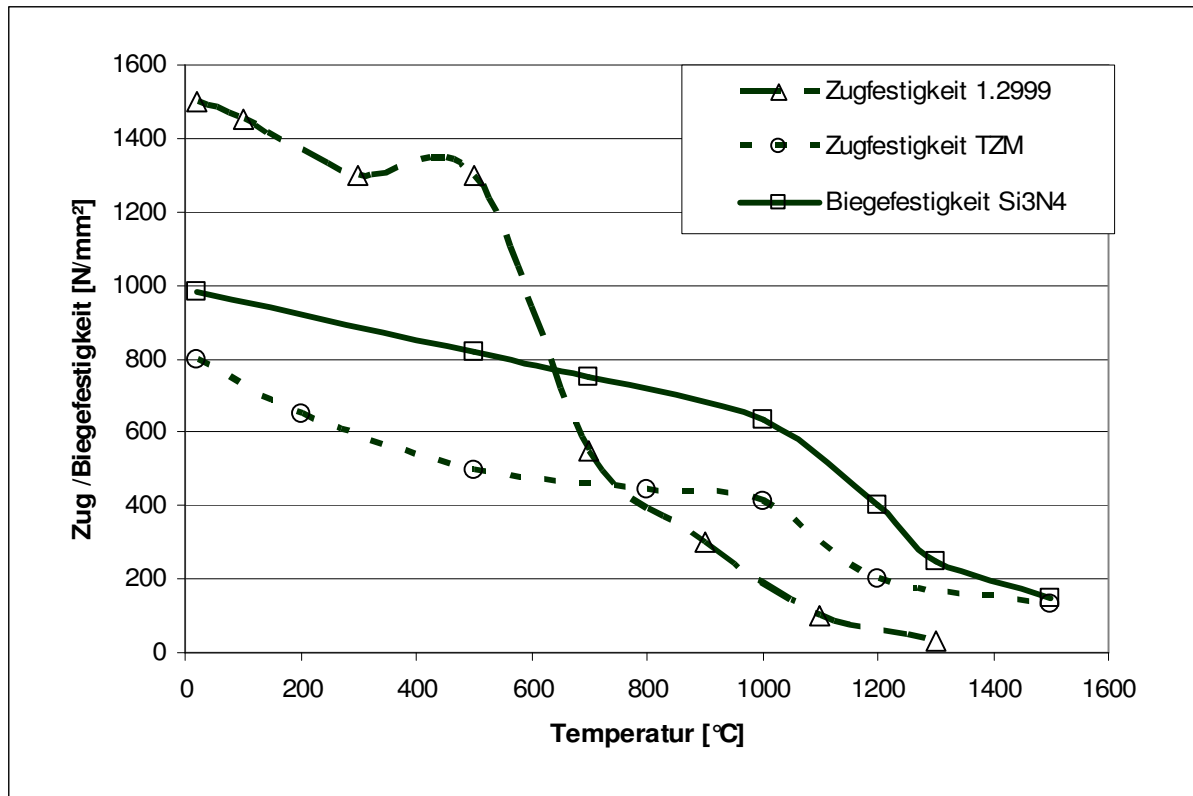


Abb. 4.4: Zug- bzw. Biegefestigkeit der Werkstoffe 1.2999, TZM und Si₃N₄

Der viermal höhere Wärmeausdehnungskoeffizient vom Stahl 1.2999 kann zu großen Maßänderungen (Abb. 4.5) während des Prozesses führen. Werkzeugprobleme können besonders bei engen Führungen auftreten. Die Kenntnis der Wärmeausdehnungskoeffizienten ist besonders für die Auslegung von thermisch beanspruchten Armierungsverbänden wertvoll.

Der Mo-basierende Werkstoff TZM weist im gesamten Temperaturbereich eine sehr geringe spezifische Wärme (Abb. 4.6) im Vergleich zu Warmarbeitsstahl und Si₃N₄ Keramik auf. Nur wenig Energie wird zur Temperaturerhöhung benötigt. Die Folge davon ist ein schnelles Erwärmen des Werkzeuges während der Formgebung und ein schnelles Abkühlen zwischen zwei Hüben.

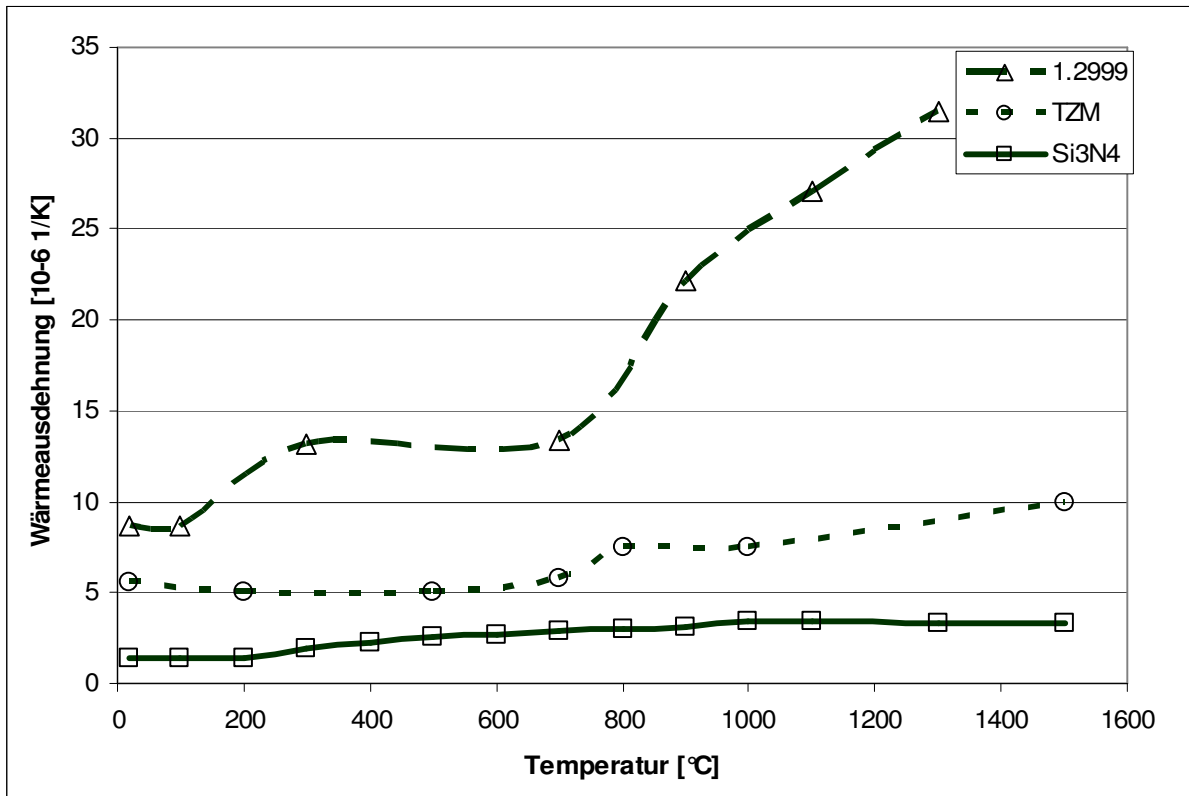


Abb. 4.5: Wärmeausdehnung der Werkstoffe 1.2999, TZM und Si₃N₄

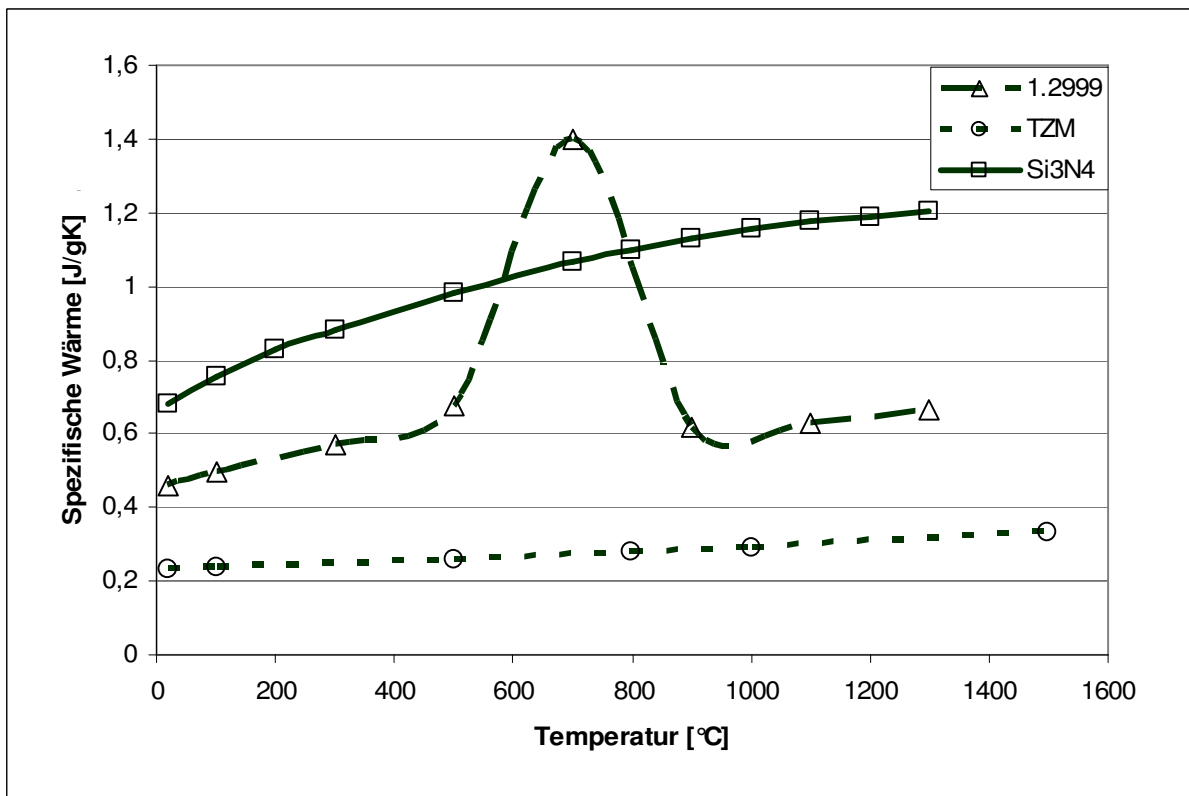


Abb. 4.6: Spezifische Wärme der Werkstoffe 1.2999, TZM und Si₃N₄

Die Wärmeleitfähigkeit (Abb. 4.7) des Werkstoffes TZM ist ca. 7-mal (bzw. dreimal) höher als die der Si_3N_4 -Keramik (bzw. dreimal höher als die vom Stahl 1.2999). Die Folge davon ist eine schnelle Wärmeabfuhr aus dem Werkstück während der Umformung, aber auch geringe thermoinduzierte Spannungen im Werkzeug.

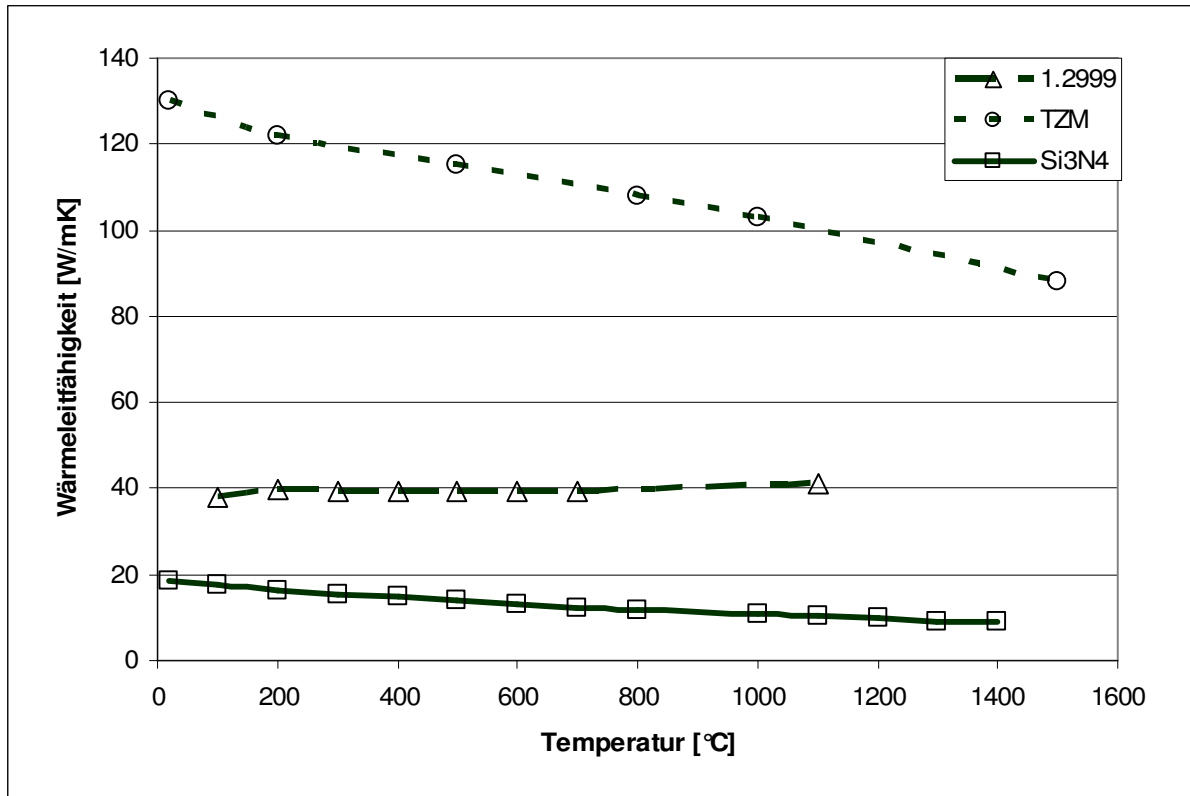


Abb. 4.7: Wärmeleitfähigkeit der Werkstoffe 1.2999, TZM und Si_3N_4

4.2.2 Prozessrelevante Größen

Das Thixoschmieden von Stahl erfordert die Kenntnis vom Schmelzintervall des Werkstückwerkstoffes zur gezielten Bolzenwiedererwärmung.

Das Schmelzintervall wurde anhand von DSC-Analysen ermittelt. Die Solidus- und Liquidus-Temperaturen und der Verlauf der Feststoffanteile in Abhängigkeit der Temperatur ist in Abb. 4.8 dargestellt. Die mit einer Aufheizrate von 20 K/min ermittelten Temperaturen können nur als Anhaltswerte dienen, da sie auch geringfügig von der Aufheizgeschwindigkeit abhängig sind.

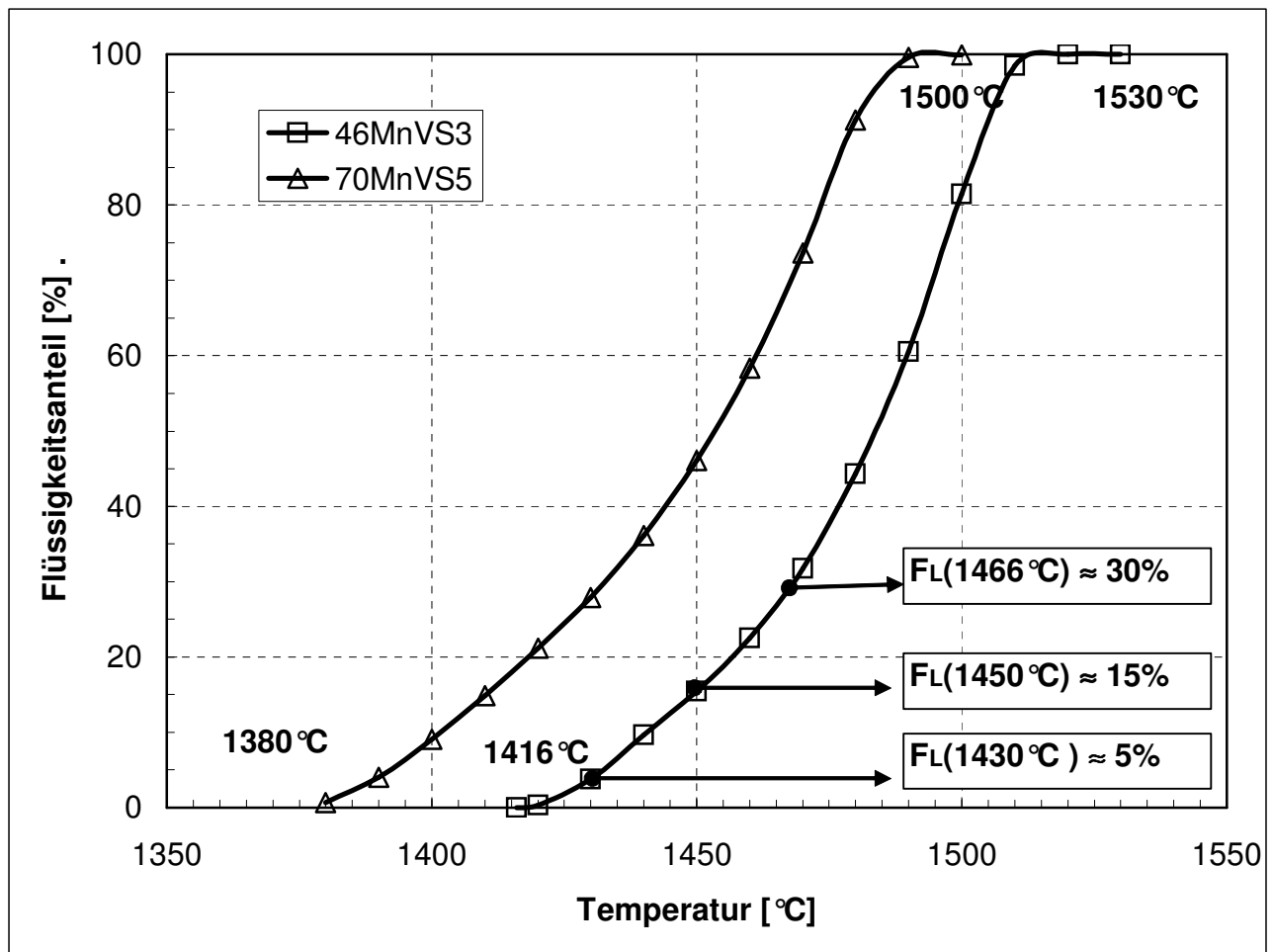


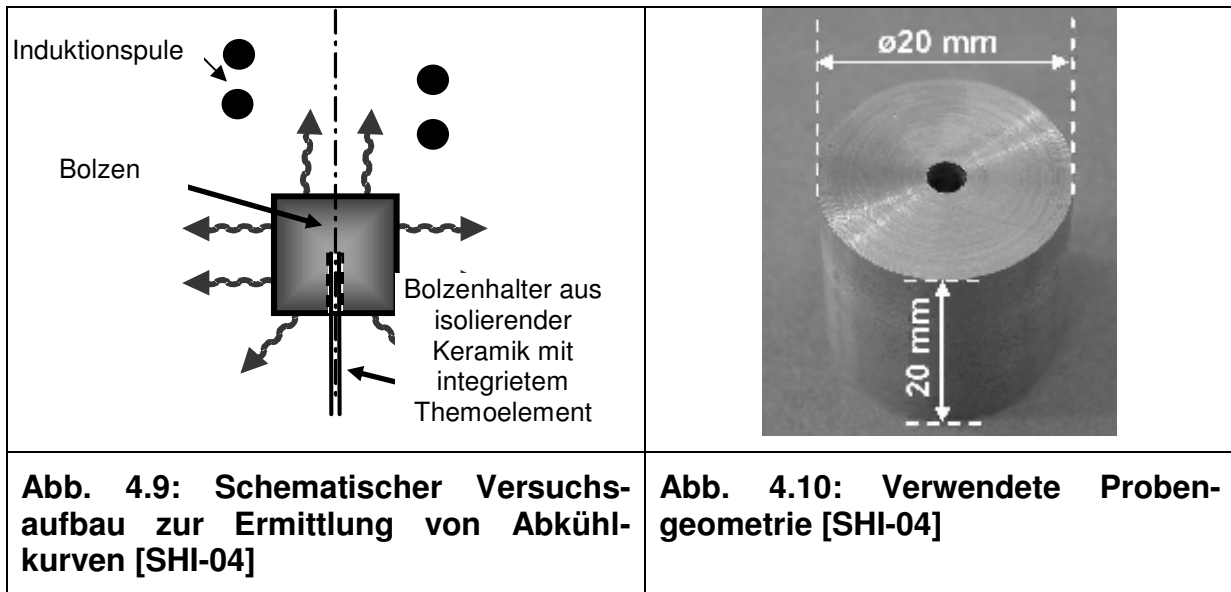
Abb. 4.8: Flüssigkeitsanteile der Stähle 46MnVS3 und 70MnVS5 in Abhängigkeit von der Temperatur

Aufgrund des geringeren Kohlenstoffgehaltes besitzt der Stahl 46MnVS3 eine höhere Solidus- und Liquidustemperatur als der Stahl 70MnVS5.

Das Erstarrungsintervall beträgt ca. 114 °C für den Stahl 46MnVS3 und ca. 120 °C für den höherlegierten Stahl.

Zur Optimierung und Berechnung der Wärmeverluste bei der Bolzenerwärmung und bei der Formgebung ist die Kenntnis der Strahlungszahl sehr wichtig.

Untersuchungen zur Bestimmung der Strahlungszahl wurden am IBF der RWTH Aachen beauftragt [SHI-04]. Kleine zylindrische Proben wurden induktiv auf unterschiedliche Zieltemperaturen erwärmt und anschließend in einer oxidierenden und nicht oxidierenden Atmosphäre durch reine Wärmestrahlung abgekühlt. Der schematische Versuchsaufbau ist in Abb. 4.9 dargestellt.



Die Strahlungswerte werden mit den ermittelten Abkühlungskurven durch eine inverse FEM-Modellierung bestimmt (Abb. 4.11).

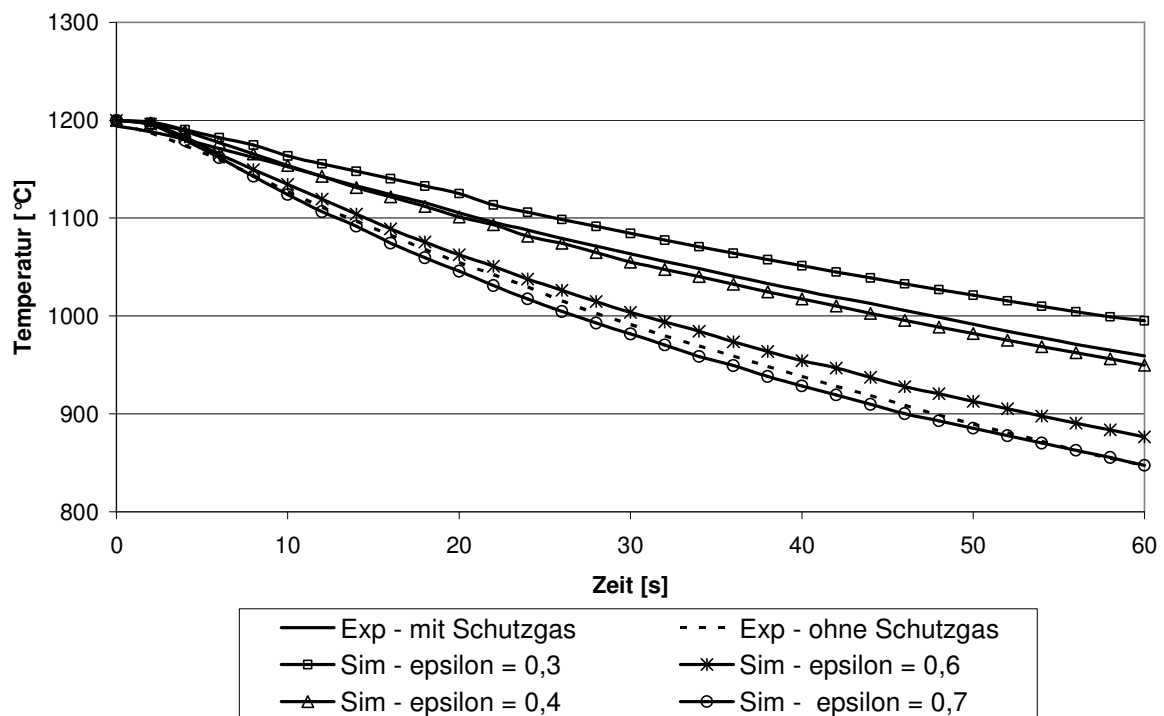


Abb. 4.11: Bestimmung der Strahlungszahl durch inverse FEM- Modellierung [SHI-04]

Die Ergebnisse der Untersuchungen zum Einfluss von Schutzgas (Argon) auf die Strahlungszahl sind in Abb. 4.12 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Abkühl-

geschwindigkeit und die Strahlungszahl von nicht oxidierten Bolzen geringer sind als die, die ohne Schutzgas erwärmt wurden.

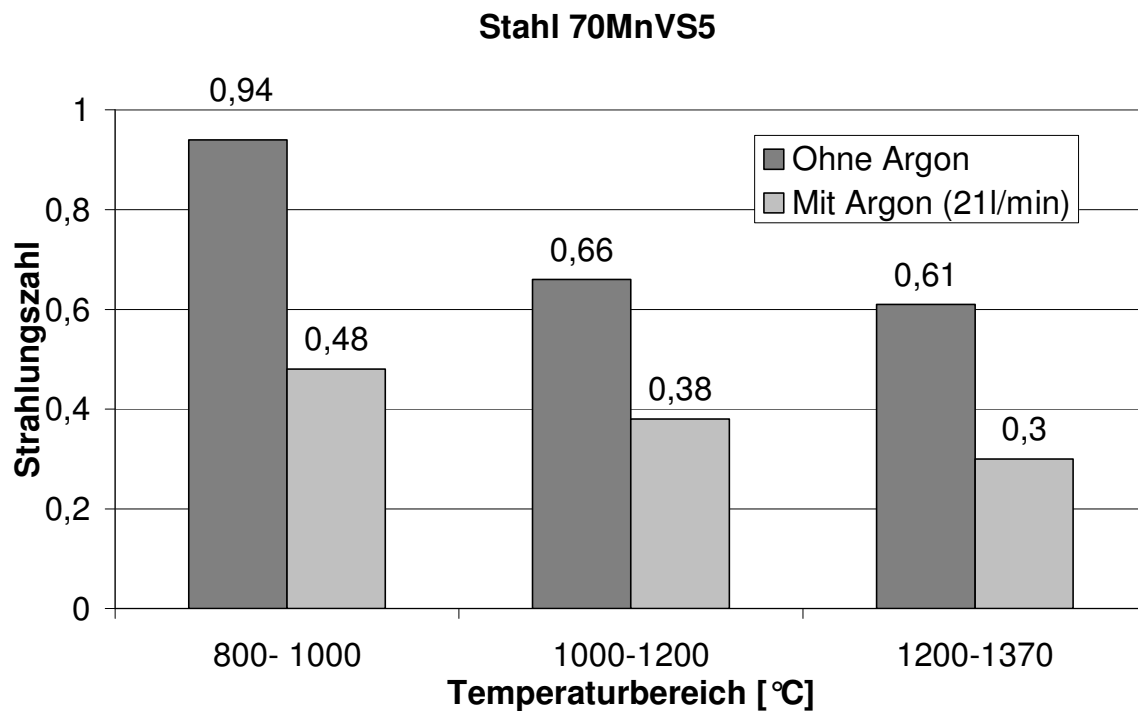




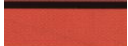



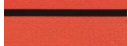
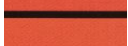




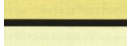
Abb. 4.12: Strahlungszahl vom Stahl 70MnVS5 in Abhängigkeit von der Temperatur

Die Reduzierung der Wärmeverluste durch Strahlung wird durch zwei Parameter beeinflusst:

- Die Verwendung von Schutzgas zur Vermeidung von dunkleren Oxiden an der Werkstückoberfläche
- Die Farbänderung zu helleren Farben bei steigender Temperatur (Tab. 4.2).

Beide Effekte können mit dem Strahlungsgesetz nach Boltzmann erklärt werden, wonach schwarze Körper höhere Strahlungswerte als helle Körper aufweisen.

Tab. 4.2: Glühfarben von Stahl [TAB-99]

	550 °C	Dunkelbraun
	630 °C	Braunrot
	680 °C	Dunkelrot
	740 °C	Dunkelkirschrot
	780 °C	Kirschrot
	810 °C	Hellkirschrot
	850 °C	Hellrot
	900 °C	Gut Hellrot
	950 °C	Gelbrot
	1000 °C	Hellgelbrot
	1100 °C	Gelb
	1200 °C	Hellgelb
	>1300 °C	Gelbweiß

5 Entwicklung von Simulationsmethoden

5.1 Das FEM- Simulationsprogramm MSC Superform

Mit der expliziten Software MSC Superform können sowohl 2D als auch 3D komplexe Formgebungssimulationen durchgeführt werden. Dabei können wärmeleitende verformbare Werkzeuge verwendet werden. Diese Eigenschaften sind für eine realitätsnahe Formgebungssimulation sehr wichtig.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein neues Materialgesetz für thixotropes Material entwickelt und implementiert. Das Gesetz nach [NEU-03] zu druckabhängigen Wärmeübergangskoeffizienten wurde zur Abschätzung des Wärmeüberganges genutzt.

5.2 Entwicklung und Implementierung eines thixotropen Materialmodelles

Da nach dem Erwärmen und während der Formgebung sowohl eine feste als auch eine teilflüssige Phase im Umformgut vorhanden sind, wurde ein Materialmodell zur Simulation der Formgebung durch Thixoschmieden mit folgenden Fließgesetzen entwickelt:

- Fließspannungen der Umformtechnik für die feste Phase (hauptsächlich am Rand)
- Fließgesetze der Gießtechnik (Oswald de Waele Gesetz) für den teilflüssigen Bereich (Gl.2.1 bis Gl.2.4).

Das Fließverhalten im festen Zustand kann durch die in der Umformtechnik bekannten Fließkurven beschrieben werden (Abb. 5.1).

Die Fließspannung k_f ist von folgenden Parametern abhängig:

- Werkstoff
- Temperatur T
- Umformgeschwindigkeit $\dot{\varphi}$
- Umformgrad φ

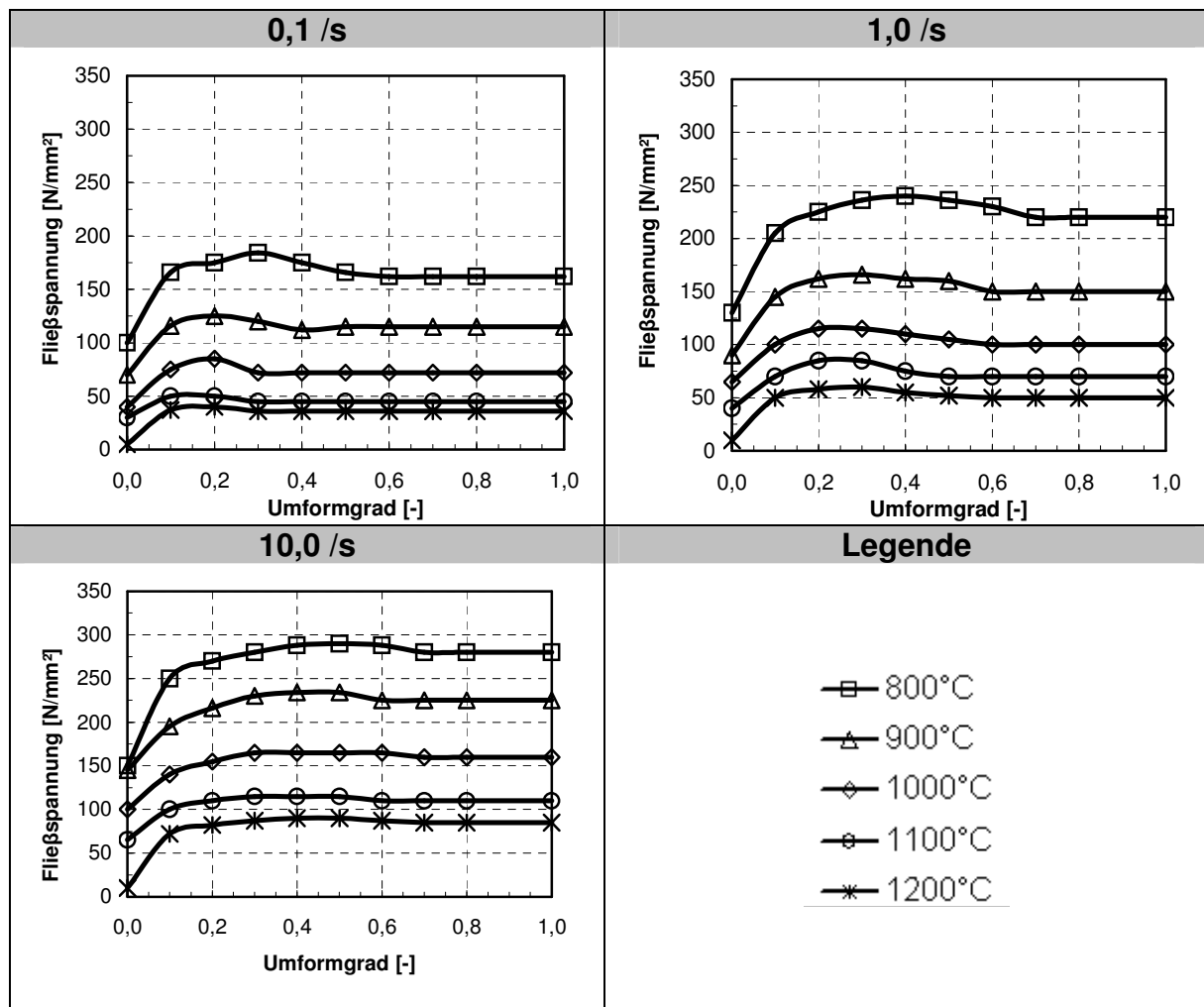


Abb. 5.1: Am IBF der RWTH Aachen ermittelte Fließkurven der Stahlsorte 46MnVS3 [BMB-04]

Das Fließverhalten im teilflüssigen Zustand kann durch das in der Gießtechnik bekannten Oswald de Waele Gesetz beschrieben werden.

Oswald de Waele Koeffizienten für den teilflüssigen Bereich sind für Aluminium bekannt [BMB-01]. Durch eine Anpassung der Erstarrungstemperaturbereiche

können die Größenordnungen dieser Koeffizienten abhängig zum Feststoffanteil berechnet werden. Die ermittelten m und n Koeffizienten sind in Abb. 5.3 und Abb. 5.4 dargestellt.

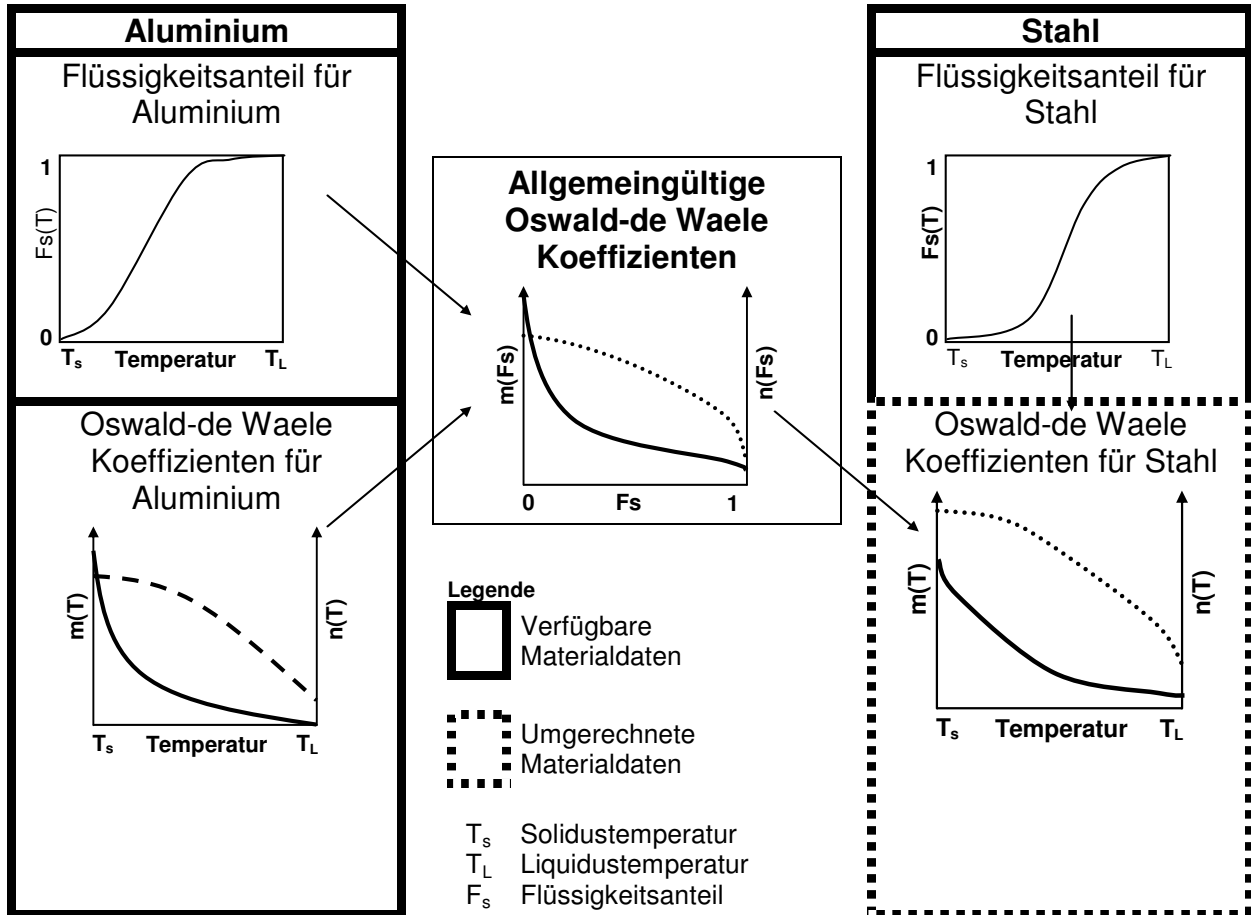


Abb. 5.2: Prinzip der Umrechnung der Oswald-de Waele Koeffizienten $m(T)$ und $n(T)$ von Aluminium auf Stahl

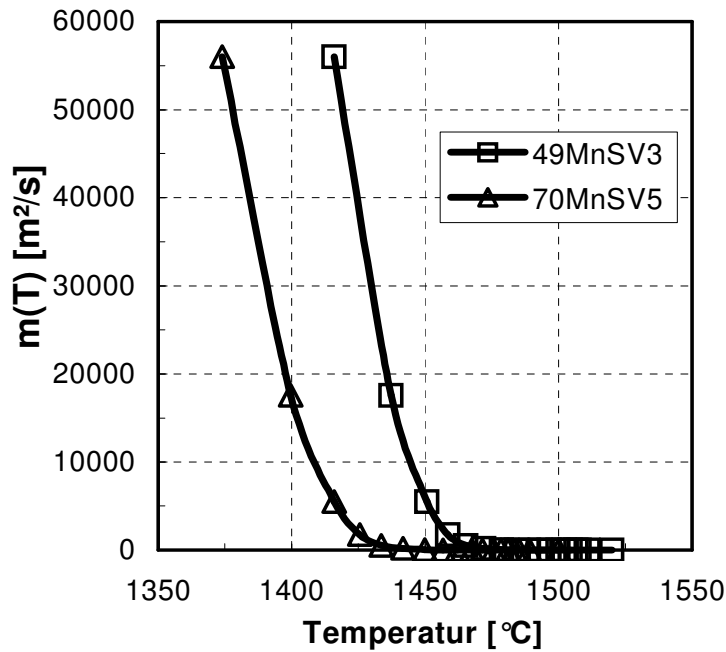


Abb. 5.3: Ermittelte Oswald de Waele m-Koeffizienten für die Stähle 46MnVS3 und 70MnVS5

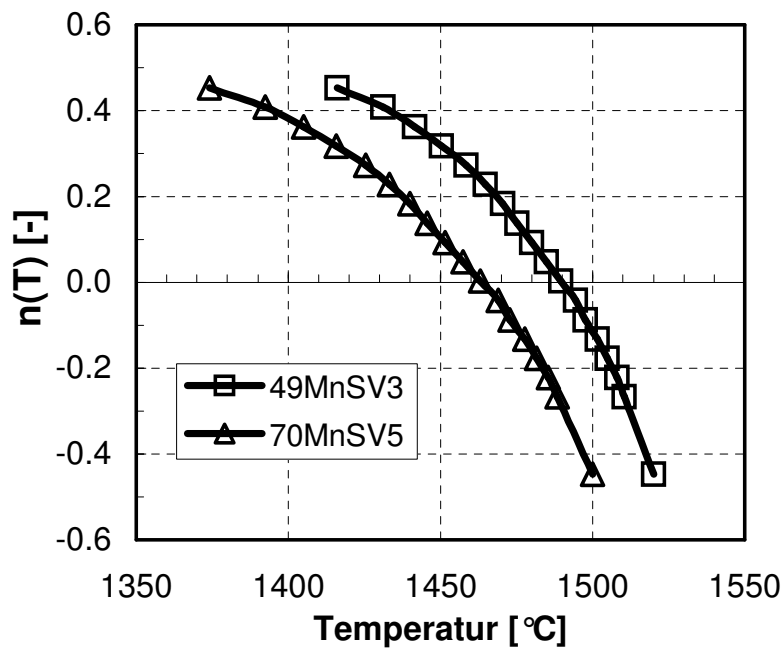


Abb. 5.4: Ermittelte Oswald de Waele n-Koeffizienten für die Stähle 46MnVS3 und 70MnVS5

Die Fließspannungen des Stahles 46MnVS3 sind Abb. 5.5 zu entnehmen.

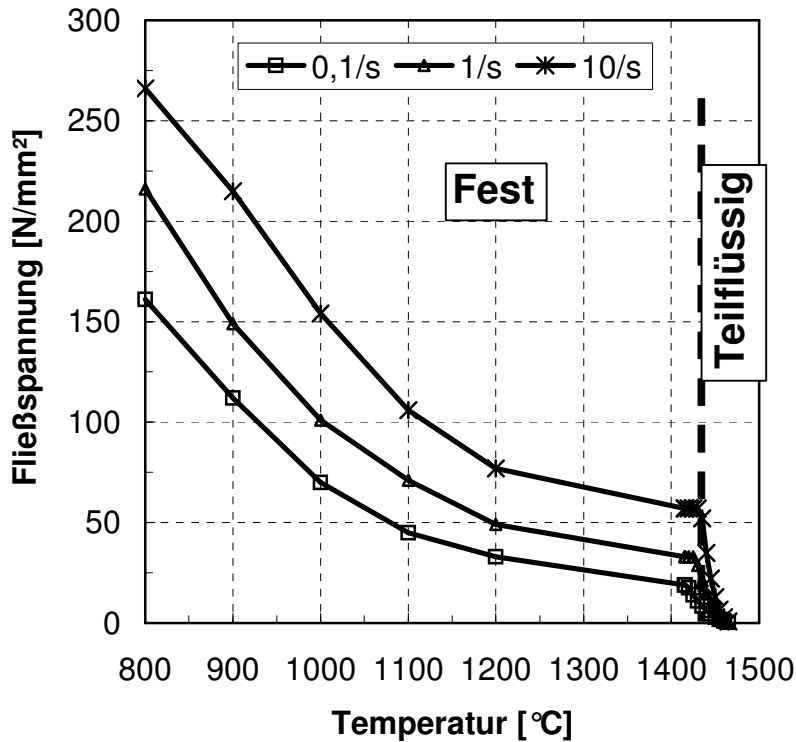


Abb. 5.5: Verwendete Fließspannungen im festen und teilflüssigen Bereich.

Zur Simulation der Umformung im teilflüssigen Bereich müssen folgende Daten des thixofähigen Stahles in das Materialmodell implementiert werden:

- $m(T)$ und $n(T)$ Oswald de Waele Koeffiziente für das Fließverhalten im teilflüssigen Bereich (Gl. 2.1 bis Gl. 2.4)
- Fließspannungen $k_f(T)$ für das Fließverhalten im festen Zustand (bereits erstarrte Bereiche)
- Thermische Materialdaten wie Wärmeleitfähigkeit $\lambda(T)$, Dichte $\rho(T)$ und spezifische Wärme $C_p(T)$

Zur Überprüfung der Gültigkeit des entwickelten Materialmodelles werden experimentelle mit simulierten Ergebnissen verglichen. Abb. 5.6 und Abb. 5.7 zeigen eine relativ gute Übereinstimmung der Kraftverläufe und des Umformverhaltens bis zum Aufbrechen des Bolzens. Das Aufbrechen des Bolzens kann allerdings mit diesem Modell nicht nachgebildet werden.

Mit diesem neuentwickelten Materialmodell kann das Umformverhalten teilflüssiger Stähle im makroskopischen Bereich sowie die thermomechanischen Werkzeugbelastung relativ gut simuliert werden.

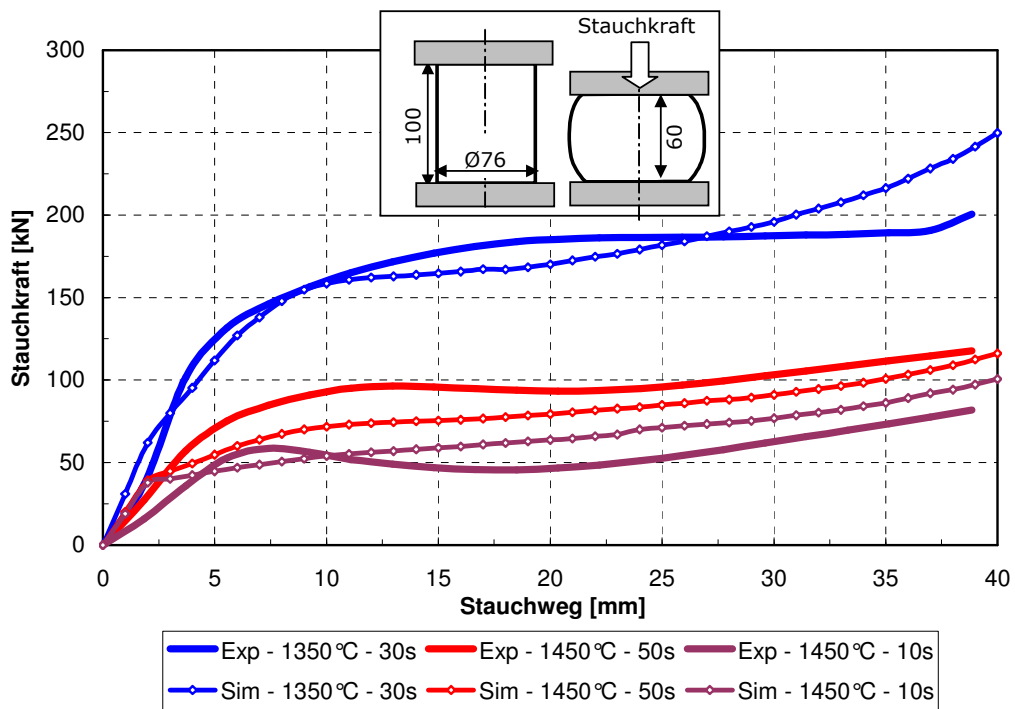


Abb. 5.6: Experimentell und simulierte Kraftstoffverläufe

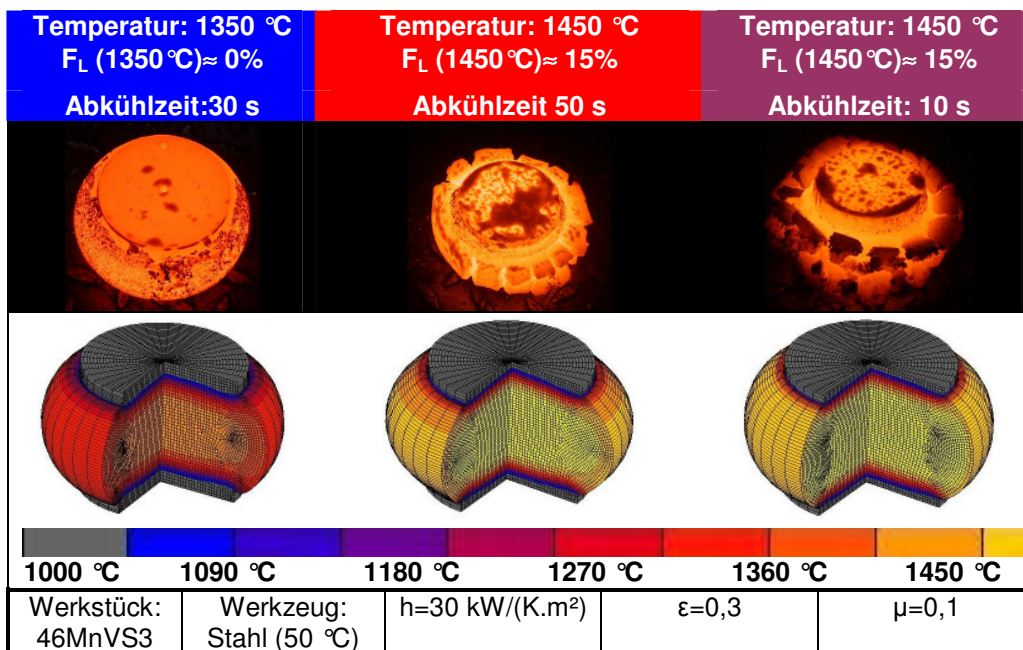


Abb. 5.7: Experimentell und simulierte gestauchte Bolzen

6 Entwicklung von prozessgerechten Werkzeugen

6.1 Auswahl der Werkzeugwerkstoffe

Aufgrund der hohen Verarbeitungstemperaturen von Stahl werden hohe Anforderungen an die Werkzeugwerkstoffe gestellt:

- hohe Temperaturwechselbeständigkeit,
- gute Korrosionsbeständigkeit,
- hohe Festigkeit und Härte auch bei hohen Temperaturen,
- hohe Verschleißbeständigkeit,
- geringe Klebeneigung gegenüber teilflüssigem Stahl,
- eine geringe Wärmeleitfähigkeit,
- geringe thermische Ausdehnung.

Der Werkstoff ist während der Umformung einem komplexen Beanspruchungsprofil unterworfen, das sich aus mechanischen Belastungen, Korrosion, schroffen Temperaturwechseln und abrasivem Verschleiß zusammensetzt.

Zur Vorauswahl werden die Werkstoffe anhand von Herstellerangaben bewertet (Tab. 6.1)

Der keramische Werkstoff Si_3N_4 weist das größte Potential vor dem Mo- basierenden Werkstoff TZM der Fa. Plansee und einem typischen Warmarbeitsstahl auf. Schwachpunkte bei der Si_3N_4 Keramik sind vor allem hohe Bearbeitungskosten.

Bei sehr gut beherrschten Herstellungsverfahren kann die Werkzeugform schon im grünen Zustand, d.h. im weichen Zustand vor dem Sintern der Si_3N_4 - Keramik, mit hoher Genauigkeit eingebracht werden. Die Bearbeitungskosten können somit stark reduziert werden.

Tab. 6.1: Bewertungsmatrix zur theoretischen Auswahl optimaler Werkzeugwerkstoffe zum Thixoschmieden von Stahl

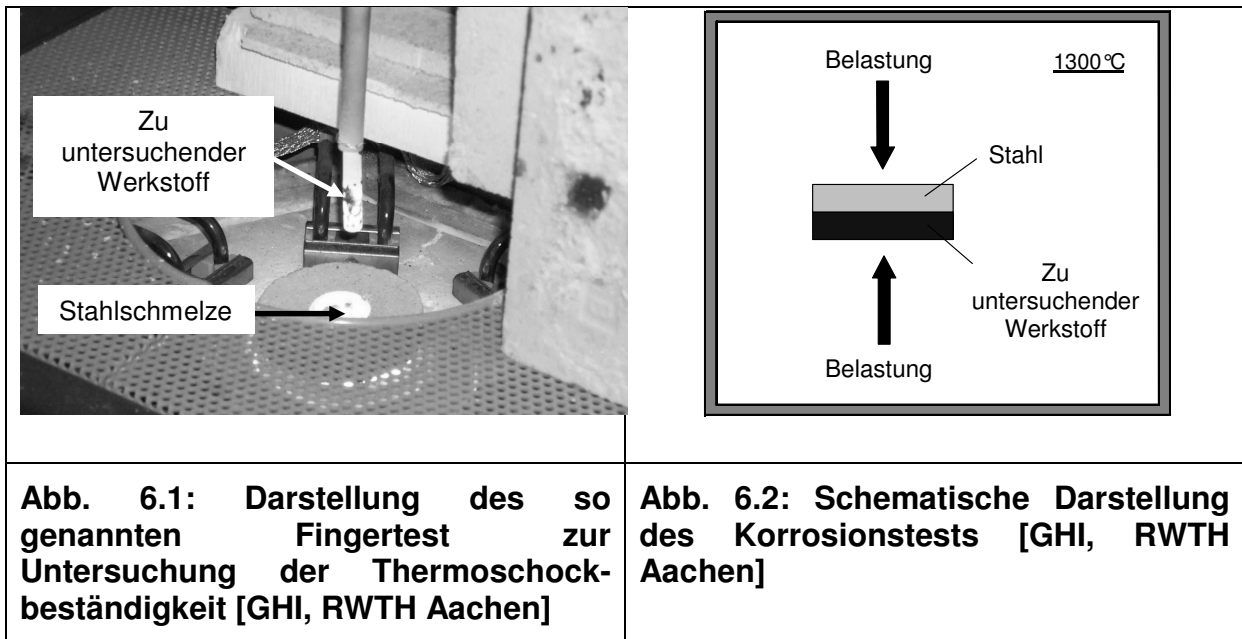
Anforderungen bei T>1000 °C	Warmarbeits- stahl (Fa. Edelstahl Witten-Krefeld)	TZM (Fa. Plansee)	Si₃N₄ (Fa. Ceramtec)
Hohe Festigkeit/ Härte	- -	+	+ +
Hohe Thermoschock- beständigkeit	+ +	+ +	0
Geringe Klebeneigung	- -	+	+ +
Hohe Korrosionsbeständigkeit	-	0	+ +
Geringe Leitfähigkeit	0	- -	+ +
Kosten	+ +	- -	- -
RANKING:	3	2	1

Legende: ++: Sehr gut, +: gut, 0: Mittel, -: Schlecht, - - Sehr schlecht

Der Werkstoff TZM weist neben einem hohen Werkstoffpreis ein schlechtes Korrosionsverhalten bei oxidierender Atmosphäre (Oxidation ab einer Temperatur von ca. 350 °C) und eine extrem hohe Wärmeleitfähigkeit, die zu einem schnellen Bauteilabkühlen während der Formgebung führt, auf.

Warmarbeitsstahl weist eine schlechte Warmfestigkeit, eine hohe Klebeneigung gegenüber teilflüssigem Stahl und eine mäßige Korrosionsbeständigkeit auf.

Für die experimentelle Auswahl des geeignetsten Werkzeugwerkstoffes wurden mehr als 30 Werkstoff / Beschichtungsvarianten in Laboruntersuchungen am GHI der RWTH Aachen untersucht. Zur Untersuchung der Thermoschockbeständigkeit wurden die Proben zyklisch in flüssige Schmelze getaucht (Abb. 6.1). Zur Untersuchung der Korrosionsbeständigkeit wurden Proben des Werkzeugwerkstoffes zusammen mit der Stahlprobe unter Druck mehrere Stunden in einem auf 1300 °C erwärmten Ofen erhitzt (Abb. 6.2). Die Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse ist in Tab. 6.2 zu sehen.



Die besten Ergebnisse zeigen die Si_3N_4 -Keramiken der Fa. DaimlerChrysler und Ceramtec. Die Molybdän-Legierung TZM der Fa. Plansee sowie der neuentwickelte Warmarbeitsstahl weisen wie die anderen metallischen Werkstoffe eine hohe Thermoschockbeständigkeit aber eine geringe Korrosionsbeständigkeit auf.


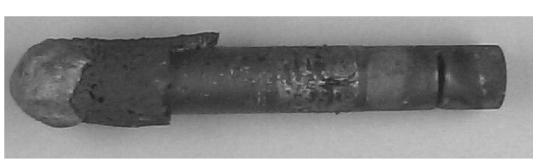

Tab. 6.2: Auf Thermoschock- und Korrosionsuntersuchungen basierende Bewertungsmatrix zur Auswahl des bestgeeigneten Werkzeugwerkstoffes

Werkstoff (Hersteller)	Fingertest (Thermoschock- beständigkeit)	Korrosionstest	Ranking
Si_3N_4 - Keramik (Fa. DaimlerChrysler oder Fa. Ceramtec)	Gut ($> 700 \text{ }^\circ\text{C}$)	Gut	1
TZM- Molybdän Legierung (Fa. Plansee)	Sehr gut ($> 1000 \text{ }^\circ\text{C}$)	schlecht	2
1.2999 Warmarbeitsstahl (Fa. Edelstahl Witten-Krefeld)	Sehr gut ($> 1000 \text{ }^\circ\text{C}$)	schlecht	3
ZPTA- Keramik (Fa. Ceramtec)	Schlecht ($< 200 \text{ }^\circ\text{C}$)	Sehr gut	4

Im Gegensatz zu Proben aus Si_3N_4 leiden die metallischen Proben aus Warmarbeitsstahl (1.2999, 1.2367 und 1.2343) und TZM unter einer hohen Klebe-
neigung (Abb. 6.3 und Abb. 6.4).

Die ZrO_2 basierende ZPTA-Keramik der Fa. Ceramtec weist eine sehr gute Korrosionsbeständigkeit bei sehr geringer Thermoschockbeständigkeit.

Die Proben aus ZPTA zerplatzen aber aufgrund thermoinduzierter Spannungen bereits nach dem ersten Zyklus.

	
<p>Abb. 6.3: Fingertestprobe aus dem Warmarbeitsstahl 1.2999 mit hohen Stahlanhaftungen nach 10 Zyklen</p>	<p>Abb. 6.4: Fingertestprobe aus TZM mit Stahlanhaftungen nach 10 Zyklen</p>
	
<p>Abb. 6.5: Fingertestprobe aus Si_3N_4 ohne Stahlanhaftungen nach 10 Zyklen</p>	

Mit Hilfe von PVD oder CVD Beschichtungen können keine Verbesserungen erzielt werden. Bei den metallischen Proben zerplatzt die Schicht sehr schnell aufgrund der sehr unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten. Bei keramischen Proben aus speziell entwickelten elektrisch leitenden Si_3N_4 -Sorten kann trotz der guten Schichthftung keine Verbesserung im Vergleich zu unbeschichteten Proben festgestellt werden. Diese Schicht wird nach wenigen Zyklen ausgewaschen.

6.2 Werkzeugkonzepte

Basierend auf Untersuchungen zur Auswahl des optimalen Werkzeugwerkstoffes am GHI der RWTH Aachen werden folgende Werkzeugkonzepte mit armierten Einsätzen aus Stahl und Si_3N_4 Keramik zum Thixoschmieden von Stahl entwickelt:

- Werkzeug mit integrierter induktiver Erwärmung zur Herstellung von vereinfachten und verkleinerten Modellradnaben (Abb. 6.6) im Labormaßstab für Standzeituntersuchungen (Gewicht ca. 610 g),
- Werkzeug mit Gasfedern zur Herstellung einer vereinfachten (Abb. 6.7) und einer seriennahen (Abb. 6.8) Radnabe (Gewicht 3500 g),
- Konventionelles Schmiedewerkzeug zur Herstellung eines Antriebswellenkopfes (Abb. 6.9) (Gewicht 3200 g).



Abb. 6.6: Vereinfachte und verkleinerte Modellradnabe (610 g)



Abb. 6.7: Vereinfachte Radnabe (3500g)



Abb. 6.8: Seriennahe Radnabe (3500g)



Abb. 6.9: Antriebswellenkopf (3200g)

Das Werkzeug zur Herstellung der Modellradnabe (Abb. 6.6) im Labormaßstab wird am IFUM Hannover mit einer zweifachwirkenden Presse mit einer maximalen Stößelgeschwindigkeit von 1000 mm/s und einer maximalen Kraft von 500 kN eingesetzt.

In Abb. 6.10 sind Stempel, Obergesenk, Untergesenk und induktive Heizung abgebildet. Das Gesenk besteht aus Armierungsverbänden mit Einsätzen aus Si_3N_4 Keramik (Abb. 6.11) oder Warmarbeitsstahl (Abb. 6.12). Die Zeichnung des Werkzeuges im Zusammenbau ist Abb. A- 1 zu entnehmen.

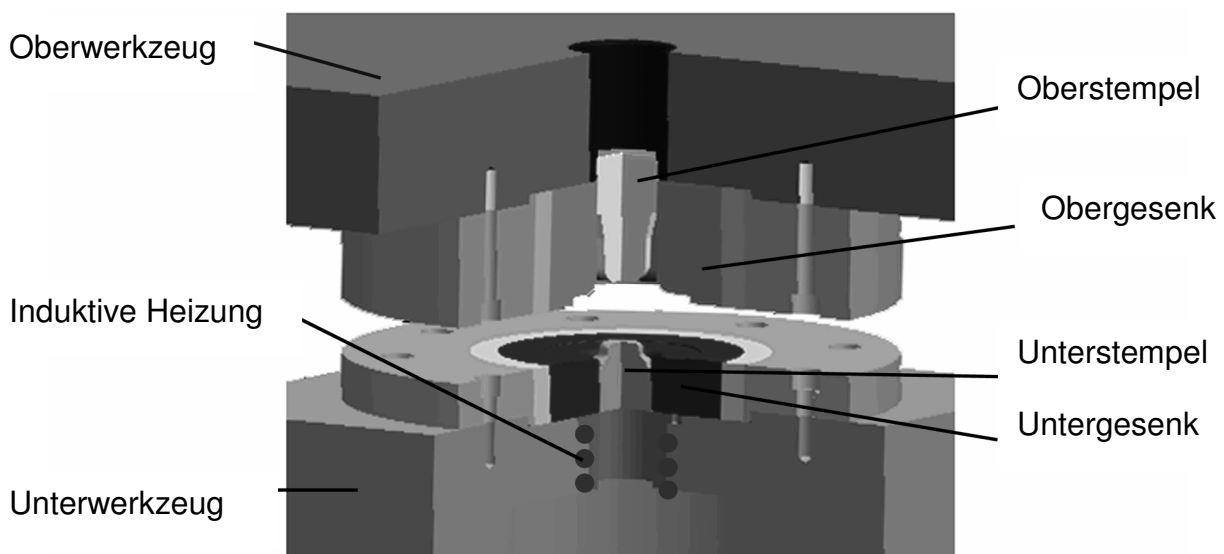


Abb. 6.10: Entwickeltes Werkzeug zum Thixoschmieden von Stahl für Formgebungsversuche im Labormaßstab



Abb. 6.11: Obergesenk aus Si_3N_4

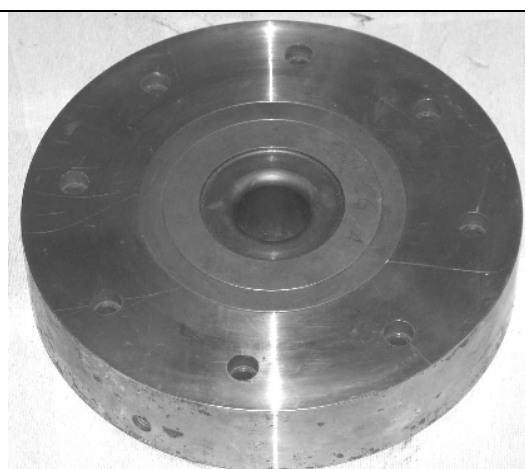


Abb. 6.12: Obergesenk aus 1.2999

Zur Erhöhung der Steifigkeit und zur Reduzierung der Atmung während des Umformprozesses wird der mittlere Armierungsring aus Hartmetall gefertigt.

Bei dem verwendeten Werkzeug handelt es sich um ein Gesenk ohne Grat. Die Rohteile müssen deshalb vor der Umformung auf das exakte Volumen gebracht werden. Zur Erwärmung des Werkstücks wird eine induktive Erwärmungsanlage verwendet, die in das Werkzeug integriert ist. Das hat den Vorteil, dass nur wenig Zeit zwischen dem Erwärmen und dem Umformen liegt und das Bauteil nicht abkühlen kann. Andererseits wird dadurch der Unterstempel höheren Temperaturen ausgesetzt.

Zu Beginn eines Hubes wird das Gesenk geschlossen und der Unterstempel fährt zur Werkstückerwärmung nach unten. Dann fährt er wieder in seine Ausgangsposition. Anschließend erfolgt die eigentliche Umformung durch den Oberstempel (Abb. 6.13).

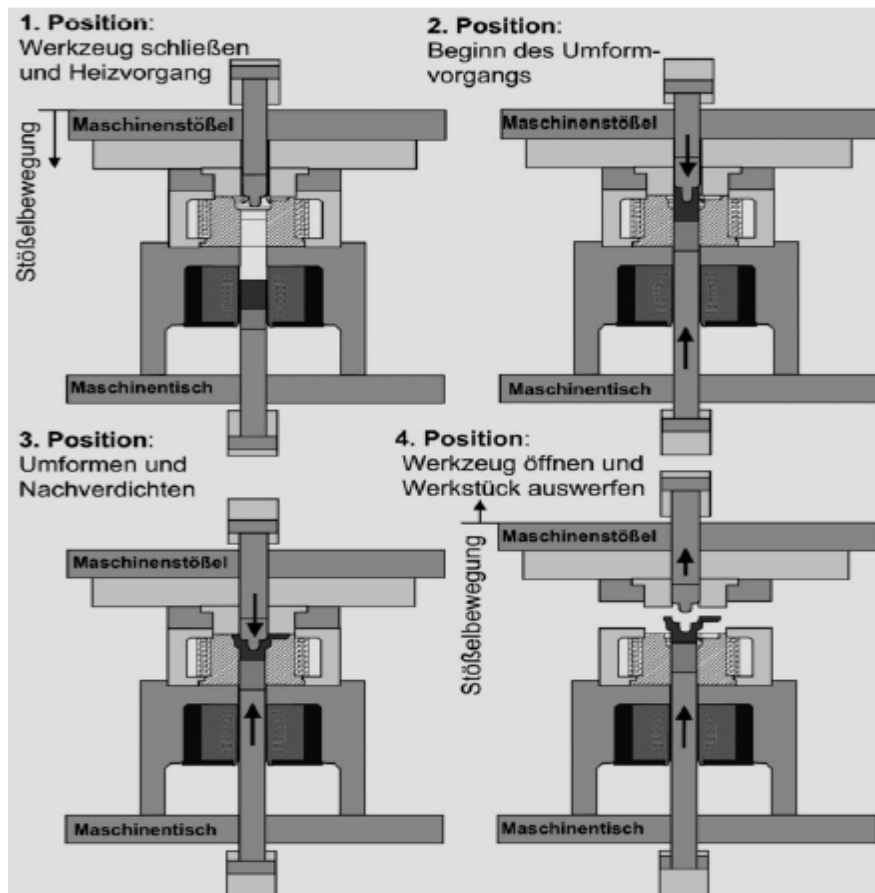


Abb. 6.13: Schematischer Formgebungsablauf [ABD-02]

Da die Taktzeit bei einem solchen Konzept nur sehr klein ist, ist es kaum denkbar, ein solches Werkzeugkonzept in die Serienfertigung einzusetzen.

Bei der Entwicklung des Werkzeug- und Anlagenkonzeptes zur Herstellung von seriennahen Radnaben wurde darauf Wert gelegt, dass eine seriennahe Prototypenfertigung hergestellt werden kann. Der neue Prozess soll in das Umfeld eines konventionellen Schmiedebetriebs passen. Die an Instituten bisher aufgebauten Versuchseinrichtungen haben eine im Werkzeug integrierte Bolzenerwärmung, welche für einen Produktionsprozess nicht wirtschaftlich ist und zudem Risiken wie den Transport des Bolzens bisher nicht betrachten. Ferner sollten vorhandene Schmiedepressen einsetzbar sein.

Das Oberwerkzeug besteht aus einem Grundwerkzeug in dem der Armierungsverband und der Oberstempel fest integriert sind. Das Obergesenk wird für den Betrieb mit dem Obersattel der Presse verbunden.

Das Untergesenk besteht aus einem Grundwerkzeug (Abb. 6.14) in dem ein mit vier Führungssäulen geführter Armierungsverband (Abb. 6.15) montiert ist. Der Armierungsverband wird während des Thixoschmiedevorganges gegen 8 autonome Gasfedern (Abb. 6.16) nach oben gedrückt (Abb. 6.17), die die Schließkraft aufbringen. Um die Gasfeder vor Zerstörung zu schützen sind am Untergesenk vier Aufschlagplatten angebracht. Der Unterstempel ist ortsfest mit dem Grundwerkzeug verbunden. Die Zeichnung der seriennahen Radnabe und des Werkzeuges im Zusammenbau sind Abb. A- 2 und Abb. A- 3 zu entnehmen.

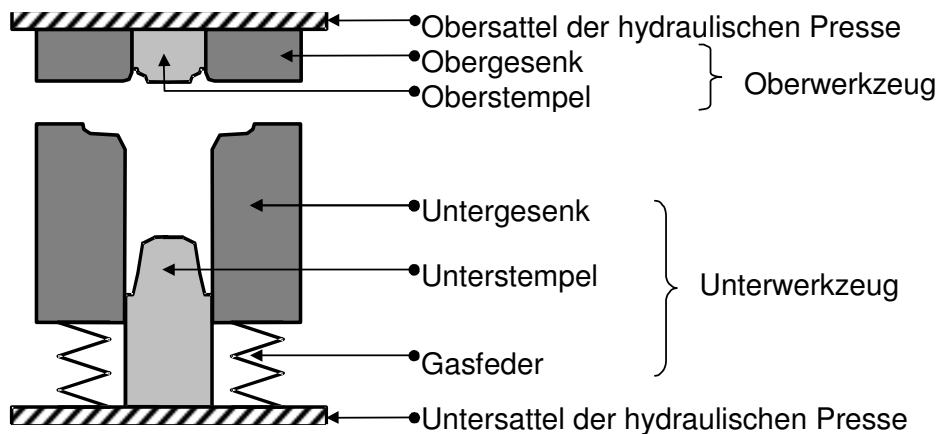
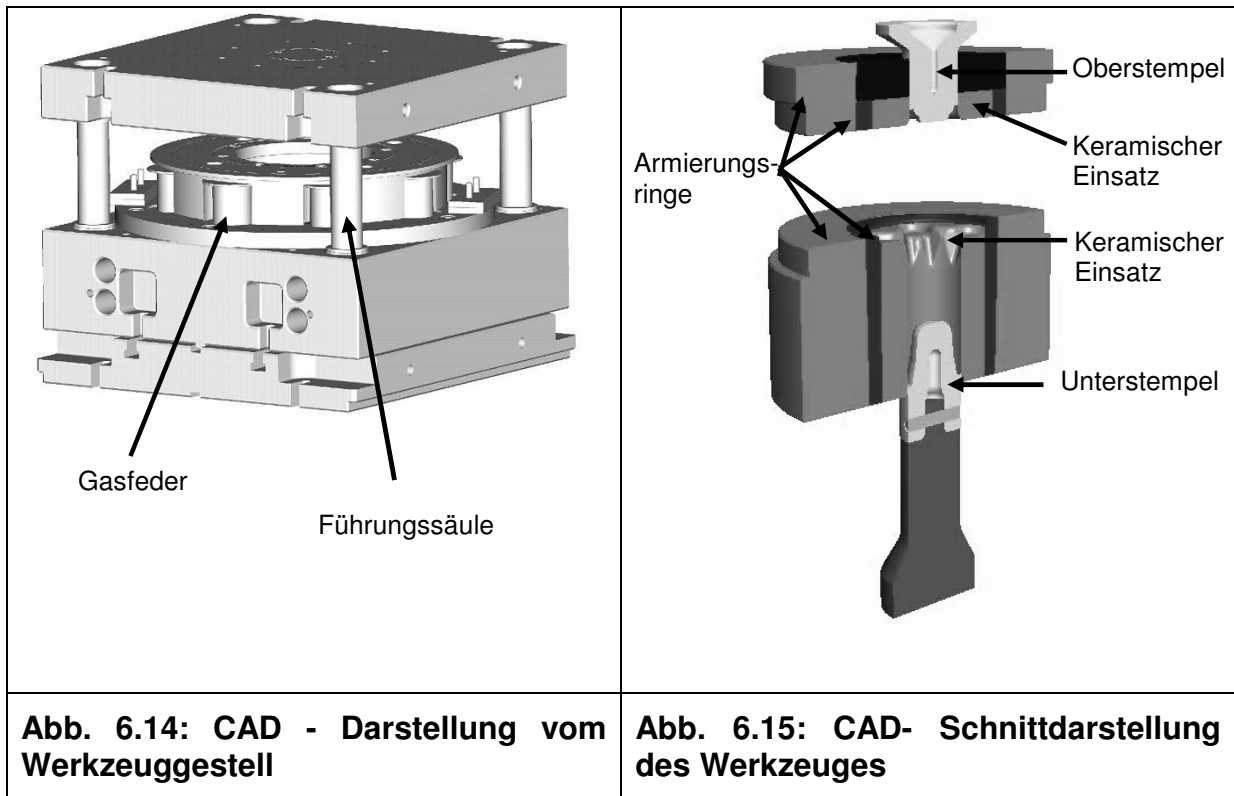


Abb. 6.16: Schematische Darstellung des entwickelten Werkzeuges zum Thixoschmieden von Stahl

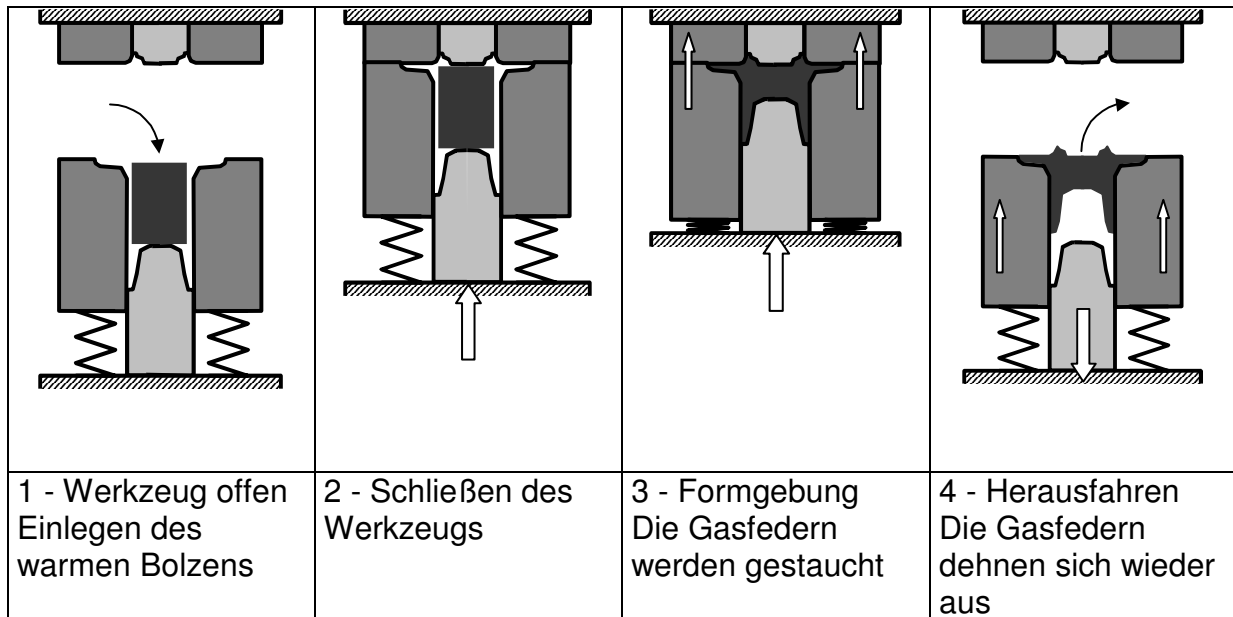


Abb. 6.17: Schematischer Formgebungsverlauf

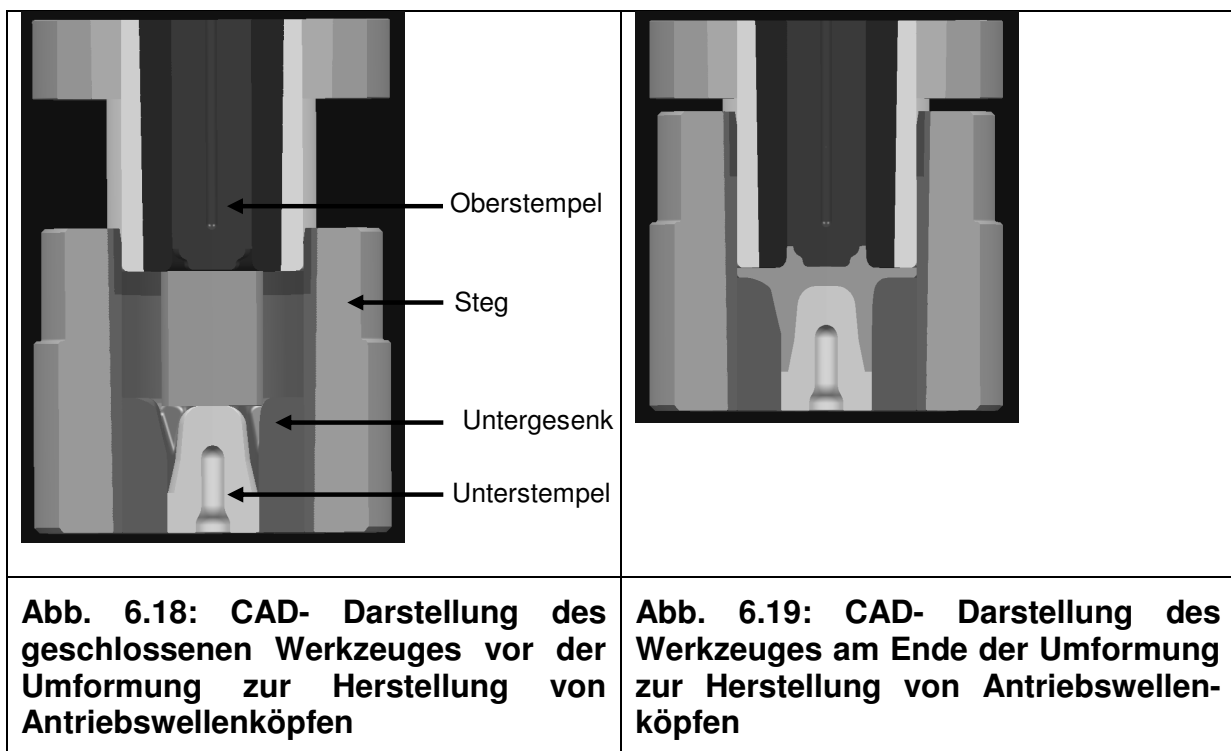
Die Untersuchungen am Werkzeug zur Herstellung einer vereinfachten und einer seriennahen Radnabe haben folgende Ziele:

- Entwicklung eines prozessgerechten Werkzeuges mit hoher Ausbringung,
- Formgebung mit extrem geringer Umformgeschwindigkeit,
- Herstellbarkeit von großformatigen keramischen Einsätzen aus Si_3N_4 ,
- Einfluss der Erwärmungsparameter auf die Prozessführung,
- Untersuchungen der mechanischen Eigenschaften thixogeschmiedeter Bauteile,
- Standzeituntersuchungen komplexer Werkzeuggeometrien.

Zum Thixoschmieden von Antriebswellenköpfen (Abb. A- 4) wurde ein weiteres Werkzeug entwickelt. Es handelt sich um ein konventionelles Schmiedewerkzeug (Abb. 6.18 und Abb. 6.19). Das Werkzeug besteht aus zwei Hälften, die jeweils an dem Untersattel und Obersattel der Presse verbunden sind. Die untere Werkzeughälfte ist mit einem Steg versehen, die beim Absenken der oberen Werkzeughälfte zusammenwirkt, so dass ein geschlossener Hohlraum gebildet wird. Das Entweichen des thixotropen Werkstoffes wird somit vermieden.

Im Gegensatz zu dem Werkzeug zur Herstellung der Radnabe (Abb. 6.14) besitzt dieses Werkzeug zur Herstellung von Antriebswellenköpfen folgende Vorteile:

- Einfache Gesenkvorwärmung in einem Gasofen möglich (keine temperatur empfindliche Gasfeder)
- Geringere Herstellkosten
- Geringer benötigter Einbauraum und geringeres Gewicht
- Geringerer Auswerferweg



6.3 Thermomechanische Auslegung von Armierungsverbänden

Die keramischen Einsätze aus Si_3N_4 werden zur Vermeidung von Zugspannungen in radialer und tangentialer Richtung mit zwei Armierungsringen vorgespannt. Die Armierungsverbände des Obergesenkes bzw. des Untergesenkes sind in Abb.6.20 und Abb. 6.21 zu erkennen.

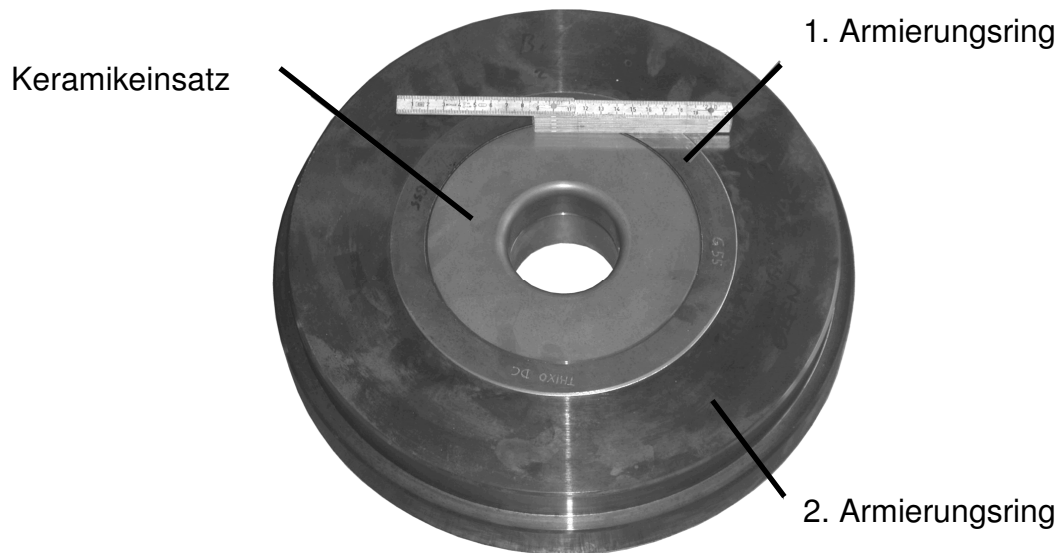


Abb.6.20: Armierungsverband mit keramischem Einsatz für das Obergesenk

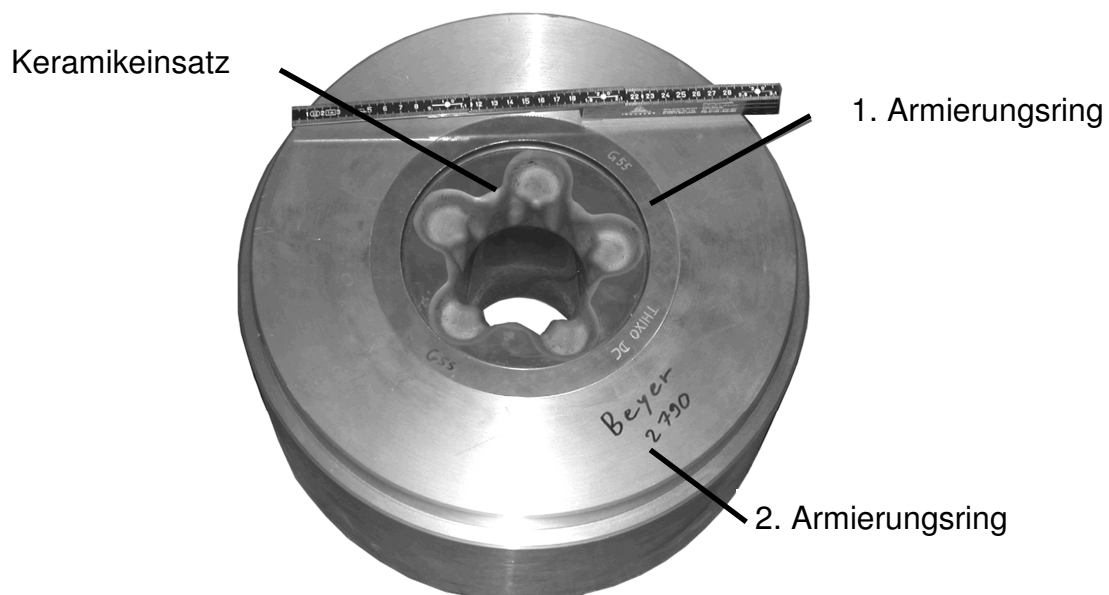


Abb. 6.21: Armierungsverband mit keramischem Einsatz für das Untergesenk

Die Armierungsverbände werden zunächst mit dem Berechnungsprogramm der Fa. Schweers ausgelegt. Dabei können die tangentialen und die radialen Spannungen von rotationssymmetrischen Zylindern in einem Zwei-, Drei oder Vierringsystem mit hoher Genauigkeit ermittelt werden (Abb. 6.22).

Die entstehenden Axialspannungen durch das Armieren können aber mit dieser Software nicht berechnet werden.

Zwei unterschiedliche Armierungsverbände wurden ausgelegt. Untersucht konnte im Zeitrahmen des Projektes allerdings nur die erste Ausführung mit hoher Vorspannung werden.

Mit der ersten Armierungsausführung (Abb. 6.22) bestehend aus einem Armierungsring aus Hartmetall und einem aus Warmarbeitsstahl soll eine hohe tangentialer Vorspannung von ca. -1165 N/mm^2 im keramischen Einsatz erzeugt werden. Aufgrund der hohen Steifigkeit des Hartmetallringes soll die Atmung während der Umformung klein gehalten werden.

Mit der zweiten Armierungsausführung (Abb. 6.23) bestehend aus zwei Armierungsringen aus Warmarbeitsstahl soll der keramische Einsatz mit ca. -275 N/mm^2 Tangentialspannung armiert werden. Das Ziel dieser Ausführung ist es, die von der radialen Vorspannung verursachten Axialspannungen gering zu halten.

Konstruktionsbüro Karl Schweers, Lessingstr.8, D-41061 Mönchengladbach

MatriA3.3

D1	80,1 mm		<Ps2	<Ps1	<Pi = Innendruck	Innenring	Mitterring	Außenring	
D2	158,9 mm	OZ	S2	S1	Sprache	D1	D2	D3	D4
D3	195 mm	Schweers-Dreiringsystem			Innenring	Mitterring	Außenring		
D4	370 mm	Werkstoffbenennung			SiN	G55	X38CrMoV51		
Pi	0 N/mm ²	Werkstoffnummer					1.2343		
S1	1,3 0/00	Poissonsche-Zahl			0,26	0,25	0,28		
S1	0,2 mm	E-Modul kN/mm²			300	450	216		
S2	5,6 0/00	Anlaßtemperatur °C					550		
S2	1,1 mm	Streckgrenze N/mm²					1600		
		Bruchfestigkeit N/mm²					1800		
		Vergleichsspannung N/mm²			1165	469	1220		
		Tangentialspannung N/mm²			-1165	-469	779		
					Druck	Druck	Zug		
Fügefolge					IA	von Innen nach Außen			
Daimler Chrysler Ulm					Fugendruck Ps1 = 435 N/mm ²				
Atmung D1 f(Pi) = 0 mm					Fugendruck Ps2 = 440 N/mm ²				
Verengung D1 f(S1+S2) = 0,311 mm					Datum 26.10.2004 Time 11:42:36				

Bemerkung

OK Ende Grafik S-Opt D-Opt D3-Opt Print Werkstoff Oberfläche

Abb. 6.22: Auslegung nach der Software MatriA3.3 des Armierungsverbandes mit -1165 N/mm^2 tangentialer Vorspannung (Ausführung Nr.1 mit hoher Vorspannung)

Konstruktionsbüro Karl Schweers, Lessingstr.8, D-41061 Mönchengladbach

MatriA3.3

D1	<input type="text" value="80"/>	mm		<Ps2	<Ps1	<Pi = Innendruck	Innenring	Mitterring	Außenring	
D2	<input type="text" value="158,9"/>	mm	<input type="text" value="OZ"/>	S2	S1	<input type="text" value="Sprache"/>	D1	D2	D3	D4
D3	<input type="text" value="195"/>	mm	Schweers-Dreiringsystem			Innenring	Mitterring	Außenring		
D4	<input type="text" value="369,8"/>	mm	Werkstoffbenennung			SiN	X38CrMoV51	X38CrMoV51		
Pi	<input type="text" value="0"/>	N/mm ²	Werkstoffnummer				1.2343	1.2343		
S1	<input type="text" value="1,3"/>	0/00	Poissonsche-Zahl			0,26	0,28	0,28		
S1	<input type="text" value="0,2"/>	mm	E-Modul kN/mm ²			300	216	216		
S2	<input type="text" value="1"/>	0/00	Anlaßtemperatur °C				550	550		
S2	<input type="text" value="0,2"/>	mm	Streckgrenze N/mm ²				1600	1600		
			Bruchfestigkeit N/mm ²				1800	1800		
			Vergleichsspannung N/mm ²			307	237	207		
			Tangentialspannung N/mm ²			-307	123	132		
			Druck				Zug	Zug		

Fügefolge von Innen nach Außen

Daimler Chrysler Ulm

Atmung D1 f(Pi) = 0 mm

Verengung D1 f(S1+S2) = 0,082 mm

Fugendruck Ps1 = 115 N/mm²

Fugendruck Ps2 = 75 N/mm²

Datum 26.10.2004 Time 20:42:39

Bemerkung

Abb. 6.23: Auslegung nach der Software MatriA3.3 des Armierungsverbandes mit -307 N/mm² tangentialer Vorspannung (Ausführung Nr.2 mit geringer Vorspannung)

Zur genauen Beschreibung des Spannungszustandes werden FEM- Modelle entwickelt. Damit können die tangentialen, radialen und auch axialen Spannungen von nicht rotationssymmetrischen Bauteilen nach dem Armieren und während der Umformung ermittelt werden. Der Einfluss der Werkzeugtemperatur auf die Werkzeugspannungen (durch eine gezielte Vorwärmung vor der Umformung oder im Dauerbetrieb) kann ebenso untersucht werden.

Mit der Software MSC Superform werden die Spannungen anhand eines 2D- (Abb. 6.24) und eines 3D- Modells (Abb. 6.25) untersucht. Da die Berechnungsdauer von 3D-Modellen sehr aufwendig ist, wird für die Untersuchung der Werkzeugtemperaturen und Spannungen im Dauerbetrieb mit einem 2D-Modell gearbeitet.

Der Vergleich der Ergebnisse von 2D- (Abb. 6.26) und 3D- (Abb. 6.27) Berechnungen zeigt eine gute Übereinstimmung der tangentialen Spannungen an den rotationssymmetrischen Bereichen wie zum Beispiel am Innendurchmesser des Einsatzes. Dennoch werden bei der Betrachtung der 3D- simulierten Ergebnisse

Schwachstellen mit geringen tangentialen Druckspannungen und hohen axialen Spannungen besonders an den Stegen deutlich.

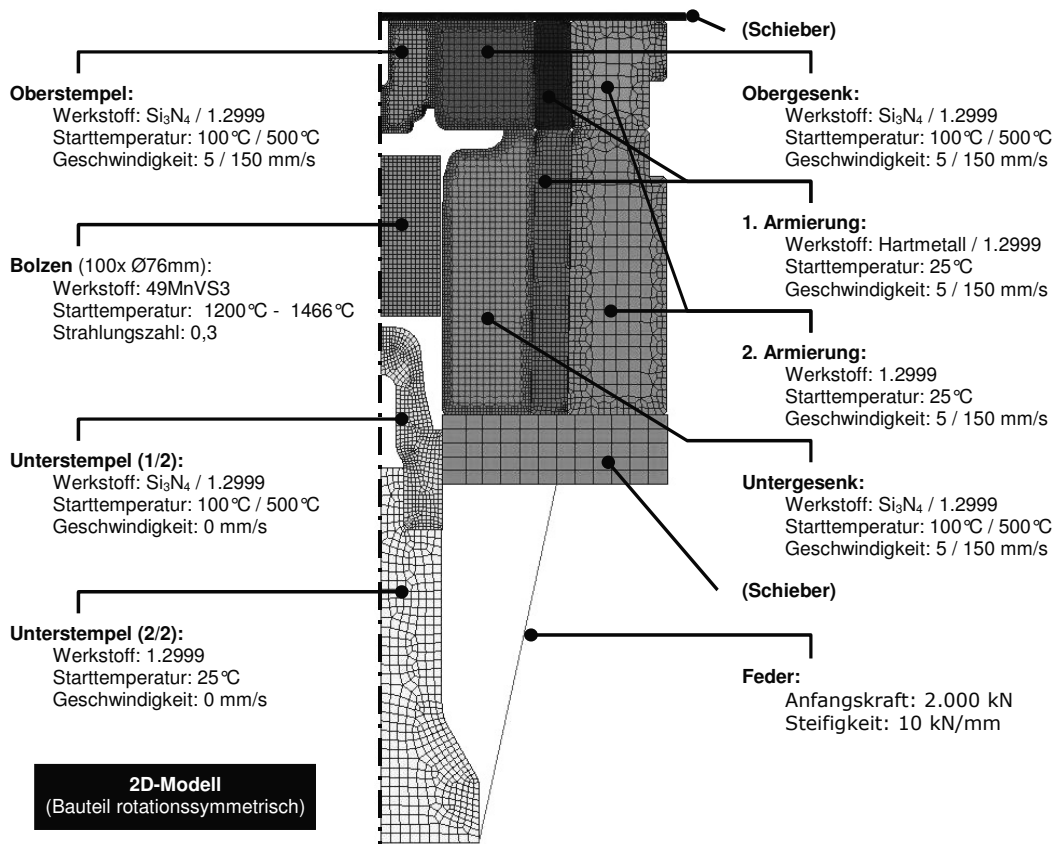


Abb. 6.24: Darstellung des 2D- Simulationsmodells

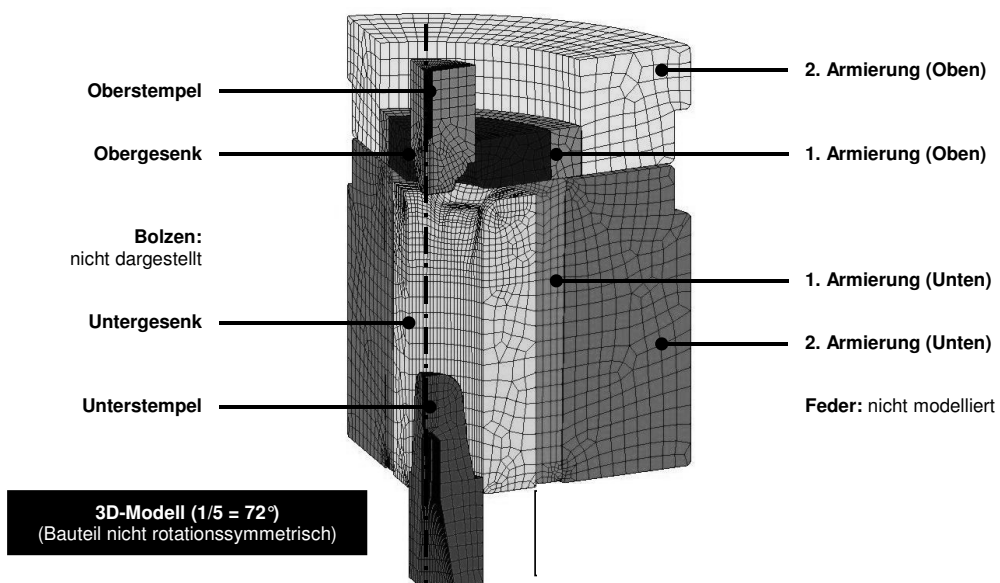


Abb. 6.25: Darstellung des 3D- Simulationsmodells

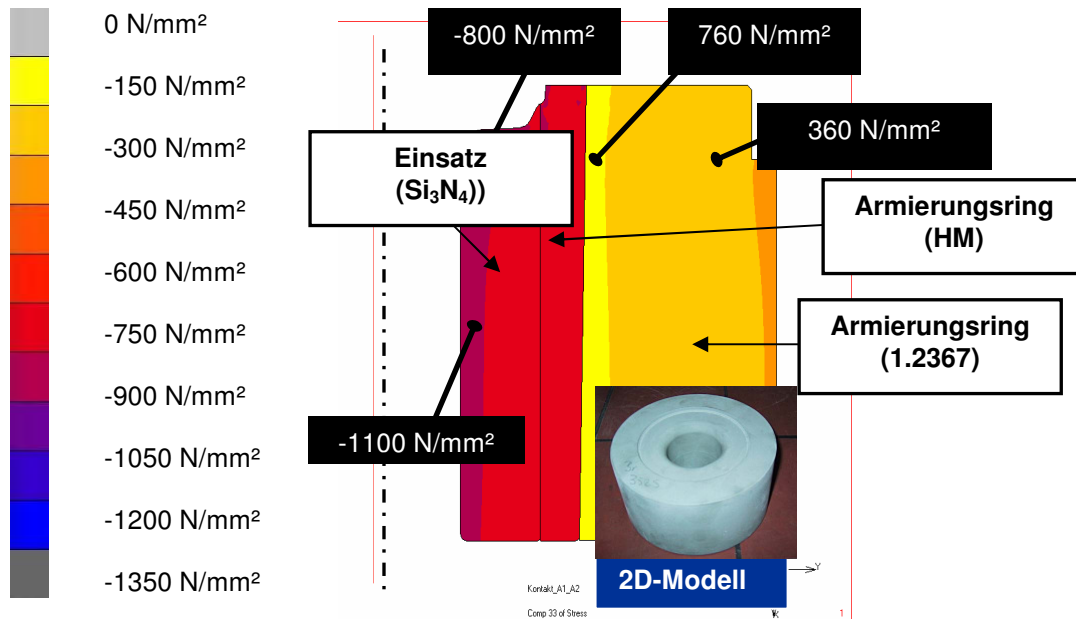


Abb. 6.26: Mit einem 2D-Modell simulierte Tangentialspannungen nach dem Armieren

Bei der Ausführung mit hoher tangentialer Vorspannung (Abb. 6.27) werden min. tangentiale Spannungen von bis zu -1438 N/mm^2 in den Nuten erreicht, während die Stege mit -52 N/mm^2 kaum vorgespannt sind.

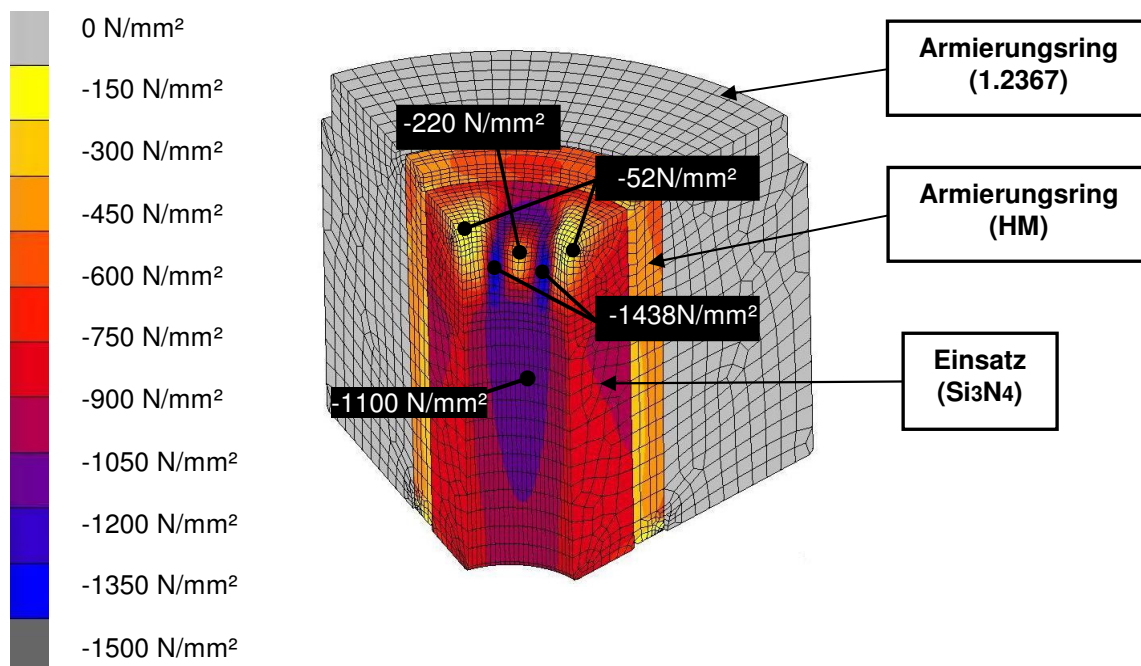


Abb. 6.27: Mit einem 3D-Modell simulierte Tangentialspannungen nach dem Armieren (Ausführung mit hoher Vorspannung)

Die hohen tangentialen Druckspannungen verursachen hohe axiale Zugspannungen bis zu 144 N/mm^2 (Abb. 6.29), die zum Bruch des keramischen Einsatzes schon beim Armieren führen können.

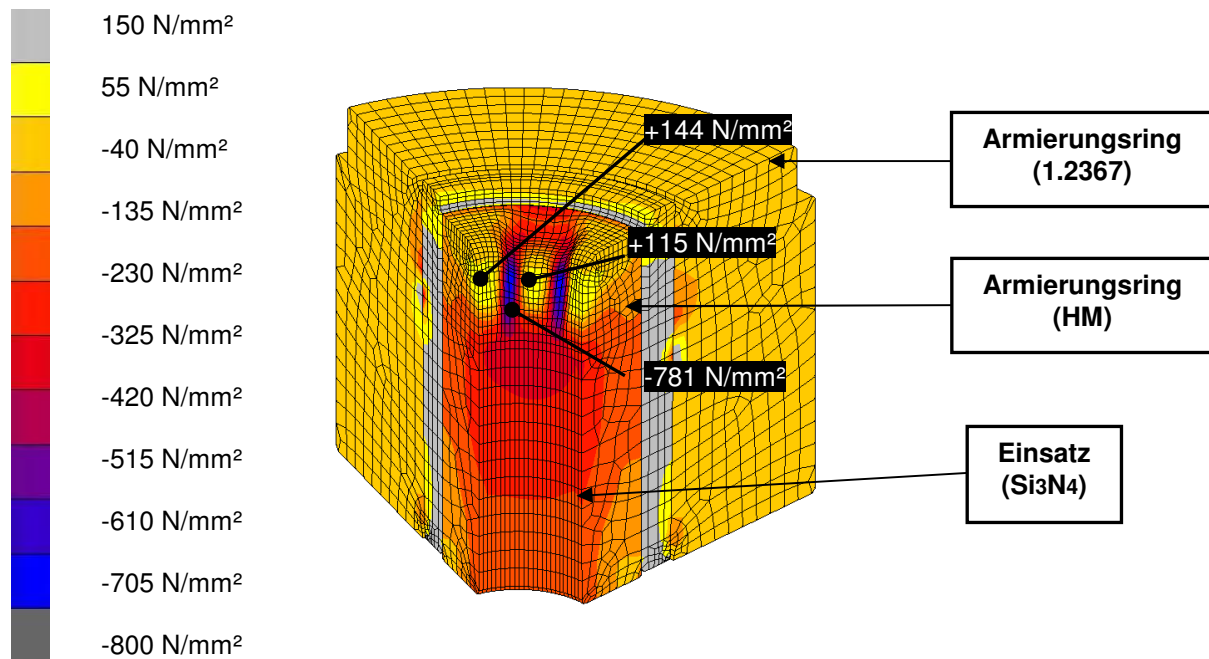


Abb. 6.28: Mit einem 3D-Modell simulierte Axialspannungen nach dem Armieren (Ausführung mit hoher Vorspannung)

Bei der Ausführung mit geringer Vorspannung (Abb. 6.29) wird eine tangentiale Druckspannung von ca. -300 N/mm^2 im Innendurchmesser des Kernes und eine max. Druckspannung von -450 N/mm^2 in den Nuten erreicht. Die Stege werden kaum vorgespannt.

Durch diese Auslegung treten beim Armieren keine kritischen axialen Zugspannungen auf (Abb. 6.30).

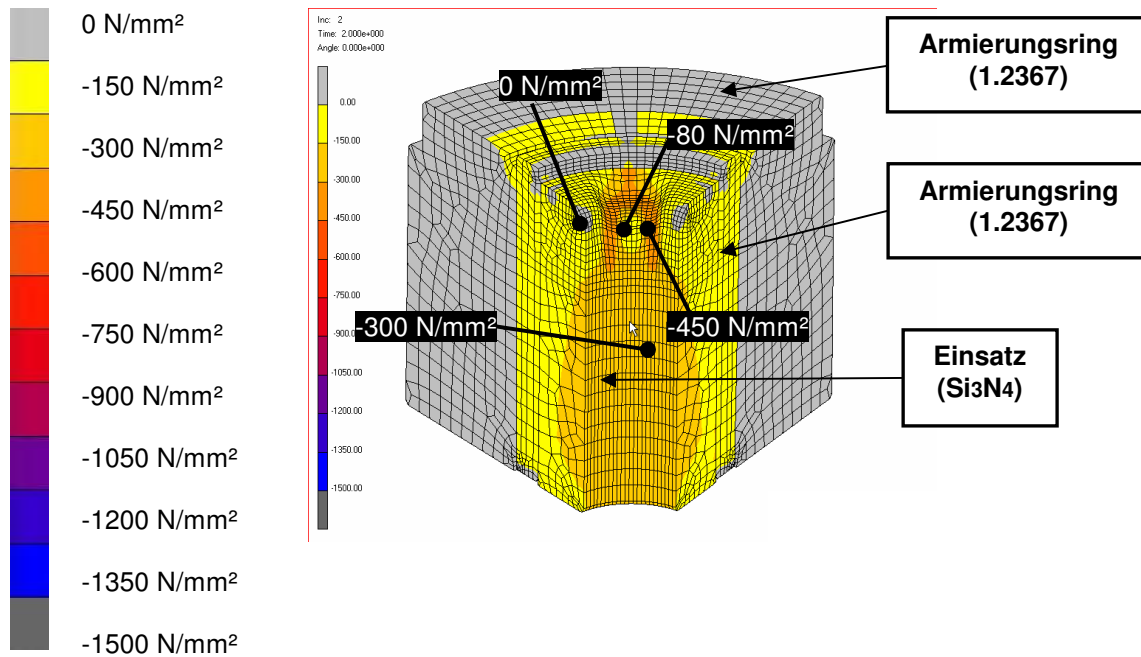


Abb. 6.29: Mit einem 3D-Modell simulierte Tangentialspannungen nach dem Armieren (Ausführung mit geringer Vorspannung)

In Tab. 6.3 wird deutlich gezeigt, dass eine Auslegung mit der Software Matri A-3 für die Auslegung von nichtrotationssymmetrischen Bauteilen nicht geeignet ist. Damit können die kritischen axialen Zugspannungen, die bei der Ausführung mit hoher Vorspannung auftreten, nicht bestimmt werden.

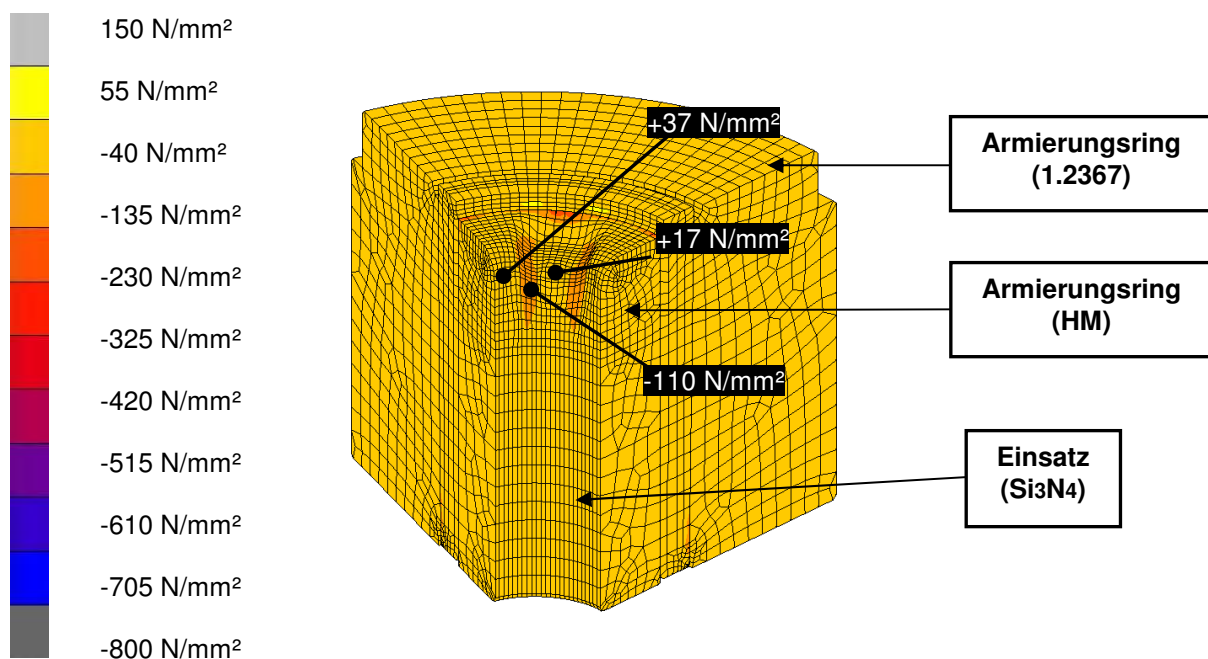


Abb. 6.30: Mit einem 3D-Modell simulierte Axialspannungen nach dem Armieren (Ausführung mit geringer Vorspannung)

Die Ausführung mit geringer Vorspannung weist keine kritischen axialen Zugspannungen auf. Da der interne Druck während der Thixoschmiedung geringer als 250 N/mm² ist, sollte eine tangentielle Vorspannung von ca. 300 N/mm² ausreichend sein.

Einen tabellarischen Überblick der ausgelegten Armierungsverbände zeigt Tab. 6.3.

Tab. 6.3: Vergleich der mit der Software Matri A3 und mit der FEM-Simulationssoftware berechneten Spannungen im keramischen Einsatz nach dem Armieren.

		Ausführung mit hoher Vorspannung	Ausführung mit geringer Vorspannung
Matri A3	Tang. Spannung bei D158,9 mm	-1165 N/mm ²	-307 N/mm ²
	max. axiale Spannung	k.A	k.A
3D-Simulationen mit MSC Superform	Tang. Spannung bei D158,9 mm	-1100 N/mm ²	-300 N/mm ²
	max. tang. Vorspannung	-1438 N/mm ²	-450 N/mm ²
	min. tang. Vorspannung	-52 N/mm ²	5 N/mm² (kritisch!)
	max. axiale Spannung	144 N/mm² (kritisch)	37N/mm ²

7 Experimentelle und theoretische Ergebnisse

7.1 Bolzenerwärmung- und Abkühlung

Der Untersuchung und der Optimierung des thermischen Zustandes eines Stahlbolzens vor der Umformung kommt eine hohe Bedeutung zu. Die genaue Ermittlung der Temperatur und somit des Flüssigkeitsanteils in einem Stahlbolzen ist für eine gezielte Einstellung der Eigenschaften ausschlaggebend.

Die von Fa. EFU erworbene induktive Erwärmungsanlage (Abb. 7.1) mit einer Leistung von 50 kW wurde von einer Frequenz von 200- 300 Hz (Erwärmung von Aluminium) auf eine Frequenz von 1000 Hz umgerüstet.

Die Messung der Temperaturen in diesem Bereich ist nur noch mit teureren Thermo- elementen aus Platin Rhodium (Typ S) zu erreichen. Die Temperaturkurven werden an einer Steuerungseinheit aufgezeichnet.

Um eine Oxidbildung bei der Erwärmung zu verhindern, wurde diese Anlage mit einer Schutzgaszufuhr ergänzt. Aufgrund des so genannten Kamineffektes ist die Zufuhr von unten am effektivsten (Abb. 7.2).

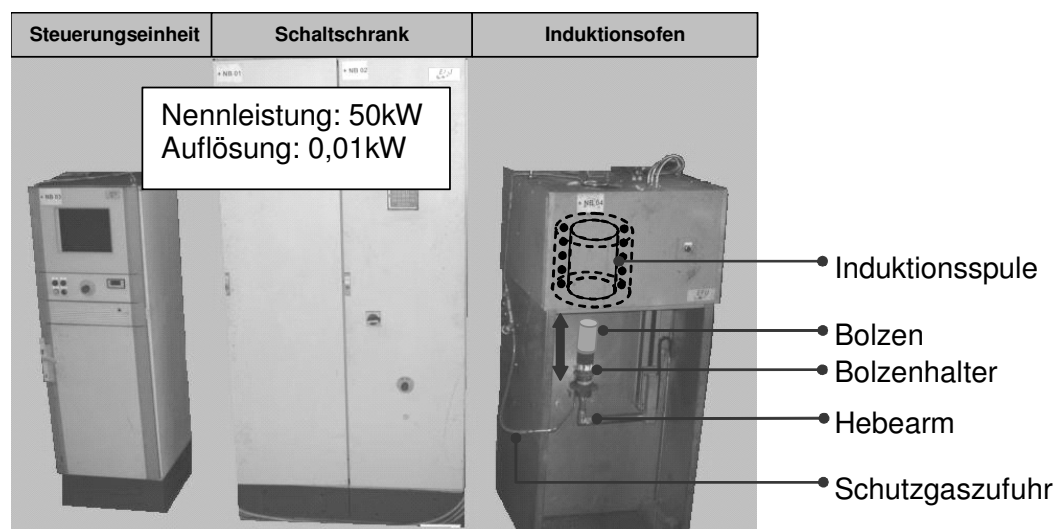


Abb. 7.1: Verwendete Erwärmungsanlage (für seriennahe Bauteile)

Ohne Verwendung von Schutzgas bildet sich an der Bolzenoberfläche eine dunkle Oxidschicht. Eine oxidierte Stahloberfläche weist einen höheren Emissionswert (ca. 0,6 bei 1400 °C) als eine nicht oxidierte Oberfläche (ca. 0,3 bei 1400 °C) auf. Der Einfluss der Wärmeverluste durch Konvektion (4%) ist gegenüber durch Strahlung (51%) und Wärmeleitung (46%) bei hohen Temperaturen zu vernachlässigen.

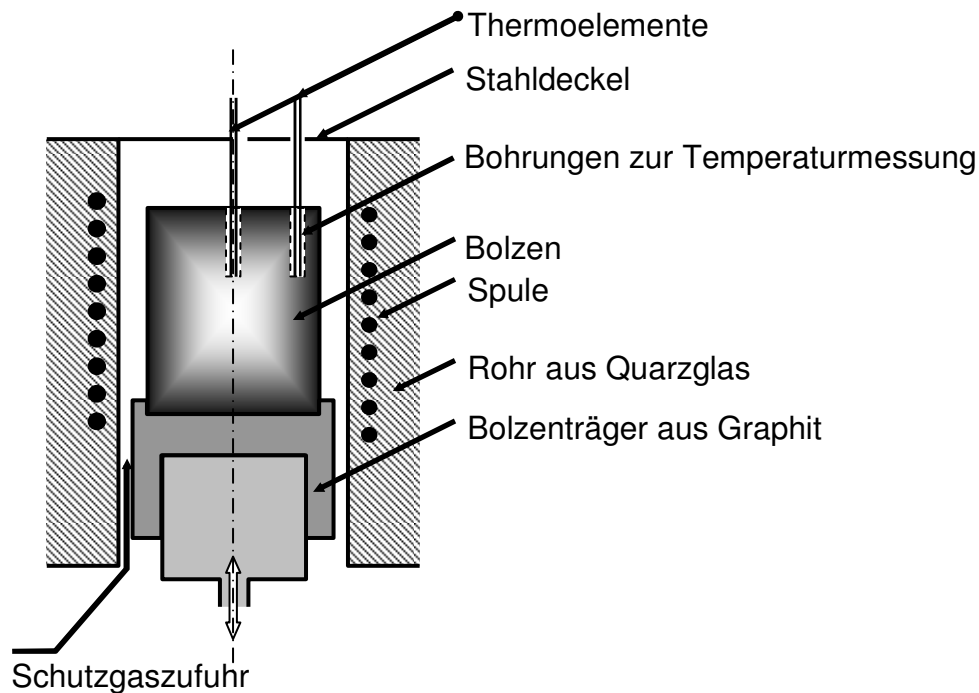


Abb. 7.2: Schematische Darstellung der Wärmeverluste beim induktiven Bolzenerwärmen

Bei der Erwärmung mit dem selben Erwärmungszyklus weist ein oxidiertes Bolzen eine ca. 80 °C geringere Temperatur als ein nicht oxidiertes Bolzen (Abb. 7.3) auf.

In dem optimierten Erwärmungszyklus wird mit 50 kW Anfangsleistung der Stahlbolzen zunächst mit der maximalen Spulenleistung erwärmt. In einem zweiten Schritt mit einer Leistung von 30 kW soll der Temperaturunterschied zwischen Kern und Rand reduziert werden. Im letzten Schritt wird eine Rampe von 17 auf 18 kW gefahren, die zur Temperaturhomogenisierung dient. Die Wärmeverluste vom Bolzen entsprechen circa der eingebrachten Energie von der Spule.

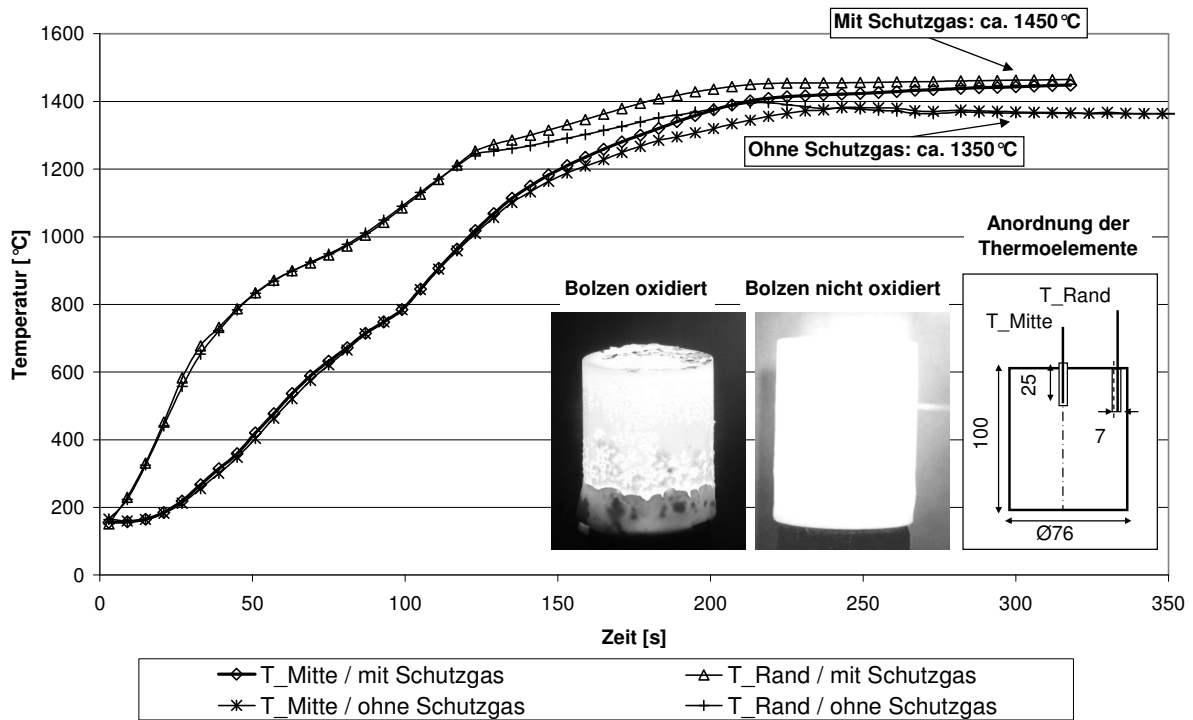


Abb. 7.3: Einfluss von Schutzgas beim induktiven Erwärmen von Stahlbolzen

Nachdem der Bolzen erwärmt wurde, wird dieser von der Erwärmungsanlage bis zu den Werkzeugen transportiert. Um die Temperaturverluste abzuschätzen, wurde die Abkühlgeschwindigkeit eines Bolzens ermittelt (Abb. 7.4).

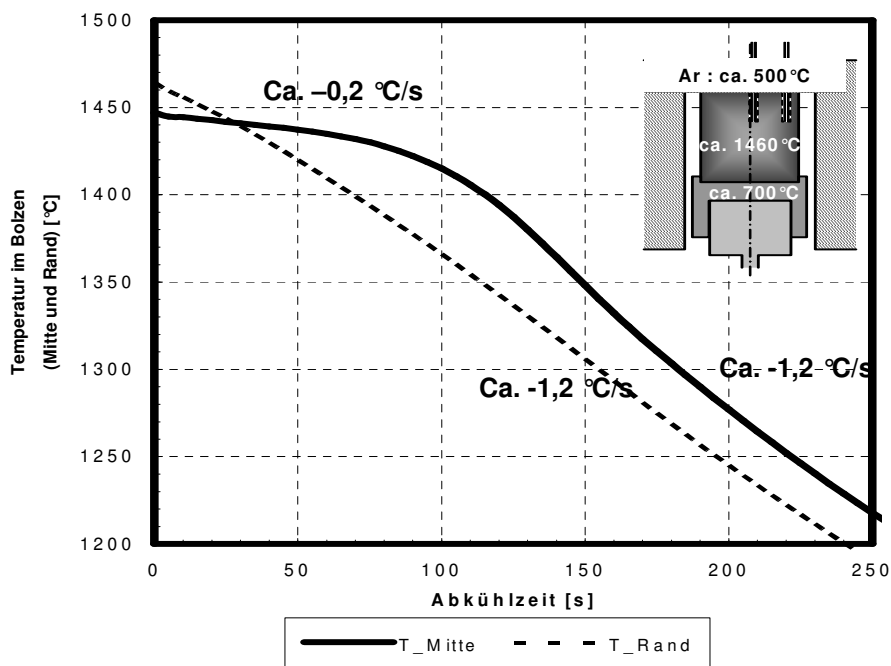


Abb. 7.4: Experimentell ermittelten Abkühlkurven eines Stahlbolzens.

Die Temperatur am Rand nimmt sofort nach Ende der Erwärmung schnell ab (1,2 °C/s). In der Mitte des Bolzens nimmt die Temperatur aufgrund der latenten Wärme der teilflüssigen Phase zunächst sehr langsam ab (ca. 0,2 °C/s). Nach ca. 100 - 110 s ist der Bolzen vollständig erstarrt. Die Abkühlgeschwindigkeit beträgt dann für den gesamten Bolzen 1,2 °C/s.

7.2 Untersuchungen der Formgebungsparameter

7.2.1 Untersuchungen im Labormaßstab

Durch Untersuchungen im Labormaßstab am IFUM Hannover soll der Einfluss folgender Parameter besser verstanden werden:

- Werkzeugwerkstoff
- Werkzeugtemperatur
- Umformgeschwindigkeit

Zur Verfügung stehen jeweils ein Werkzeug aus Warmarbeitsstahl 1.2999 und aus Si₃N₄-Keramik. Abb. 7.5 zeigt die mit tiefen Rissen behaftete Oberfläche einer mit kalten Werkzeugen hergestellten Modellradnabe. Durch Verwendung von weniger wärmeleitenden keramischen Werkzeugen kann die Oberflächengüte wesentlich verbessert werden (Abb. 7.6).

Trotz der Verwendung von Trennmittel (Bornitrid) können die Radnaben aus den metallischen Werkzeugen nur sehr schwer entnommen werden. Bei keramischen Werkzeugen ist die Bauteilentnahme sogar ohne Trennmittel problemlos.

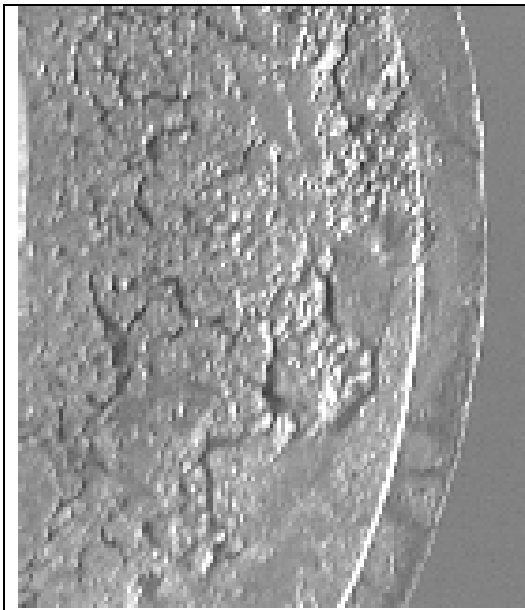


Abb. 7.5: Mit kalten Stahlwerkzeugen thixogeschmiedete Modellradnabe (Stempelgeschwindigkeit 300 mm/s)

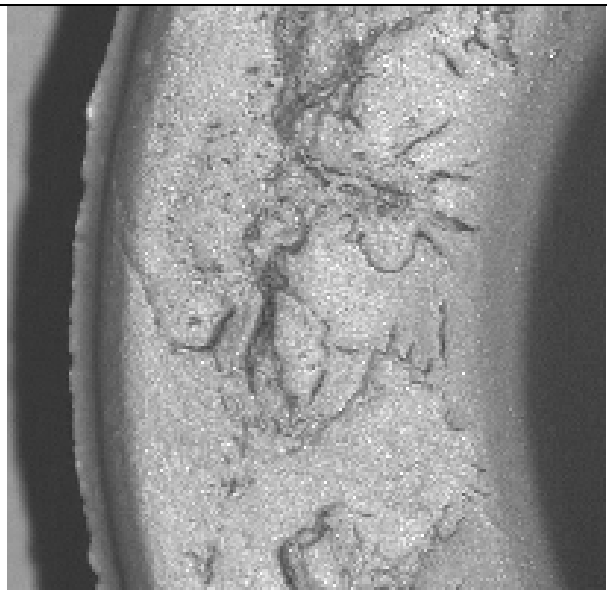


Abb. 7.6: Mit kalten Si₃N₄ Werkzeugen thixogeschmiedete Modellradnabe (Stempelgeschwindigkeit 300 mm/s)

Das Gesenk wird dann bei den folgenden Versuchen auf Temperaturen zwischen Raumtemperatur und 170 °C vorgewärmt und die Stempelgeschwindigkeit wird zwischen 150 mm/s und 500 mm/s variiert.

Es werden starke Qualitätsunterschiede an der Bauteiloberfläche festgestellt, die hauptsächlich von der Gesenktemperatur abhängig sind und in geringerem Maße auch von der Stempelgeschwindigkeit (Abb. 7.7). Bei einer Gesenktemperatur von 170 °C und einer Stempelgeschwindigkeit von 500 mm/s werden in den Versuchen die besten Ergebnisse erzielt.

Die Porenbildung im Bauteil ist auch von der Stempelgeschwindigkeit und der Werkzeugvorwärmung abhängig (Abb. 7.8). Werkzeuge aus Si₃N₄ Keramik erwärmen sich aufgrund der geringeren spezifischen Wärme und der geringeren Wärmeleitfähigkeit an der Gesenkoberfläche schneller.

Die Bauteilqualität kann beim Thixoschmieden durch folgende Parameter verbessert werden:

- Die Verwendung von einem Werkzeugwerkstoff mit geringer Wärmeleitfähigkeit und spezifischen Wärme,
- Die Umformung bei höherer Geschwindigkeit,
- Die Vorwärmung der Werkzeuge.

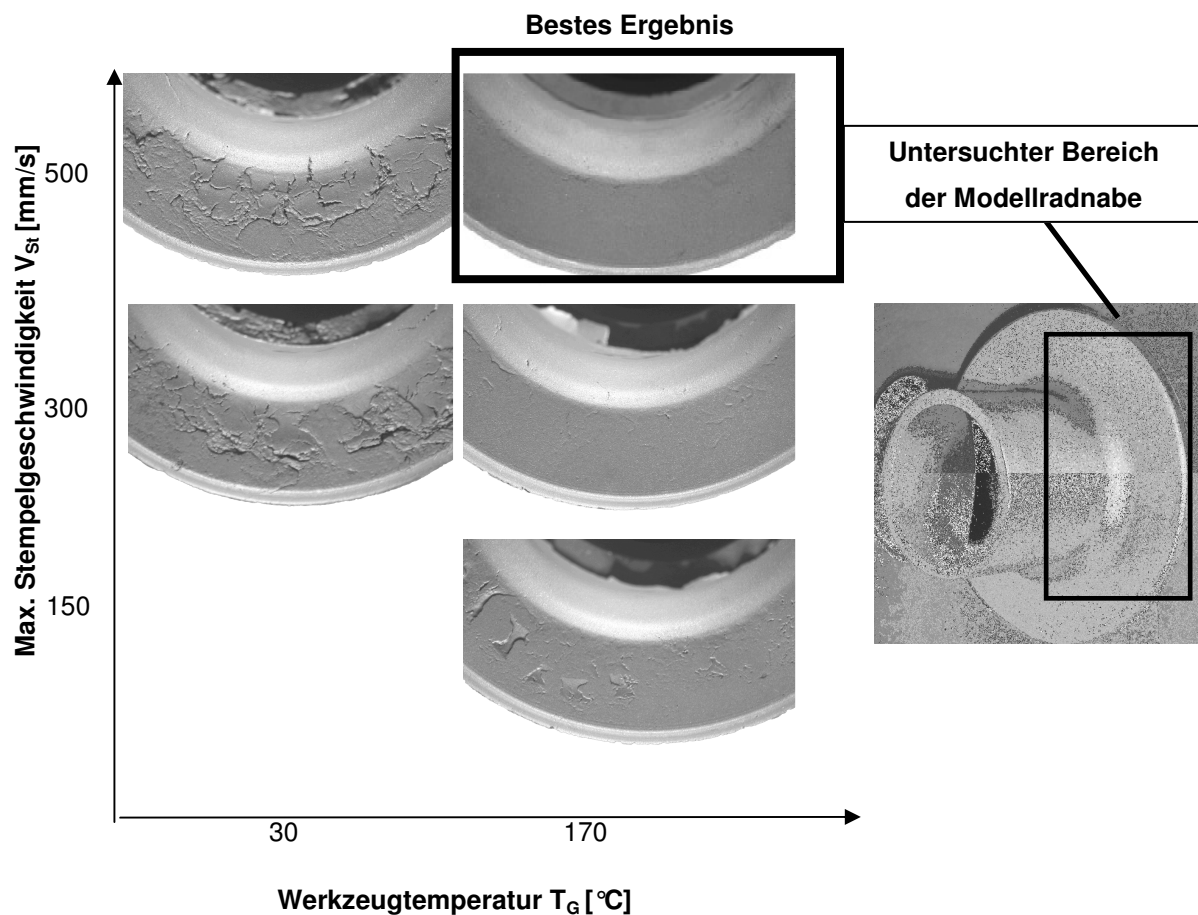


Abb. 7.7: Abhängigkeit der Oberflächenqualität von Werkzeugtemperatur und der max. Stempelgeschwindigkeit mit keramischen Werkzeugen

In Abb. 7.9 und Abb. 7.10 sind die Bilder einer mit vorgewärmten keramischen Werkzeugen, bei einer max. Stempelgeschwindigkeit von 500 mm/s hergestellten Radnabe dargestellt. Sie weist augenscheinlich eine sehr gute Formfüllung und keine Risse auf.

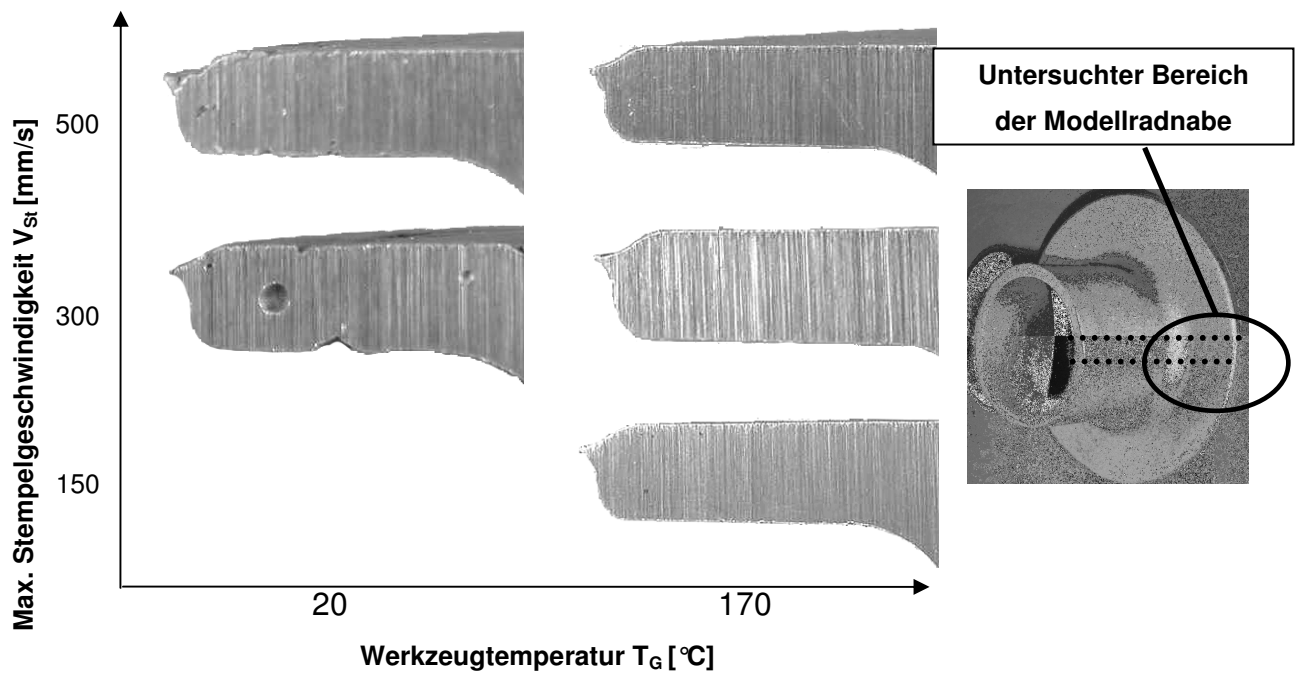
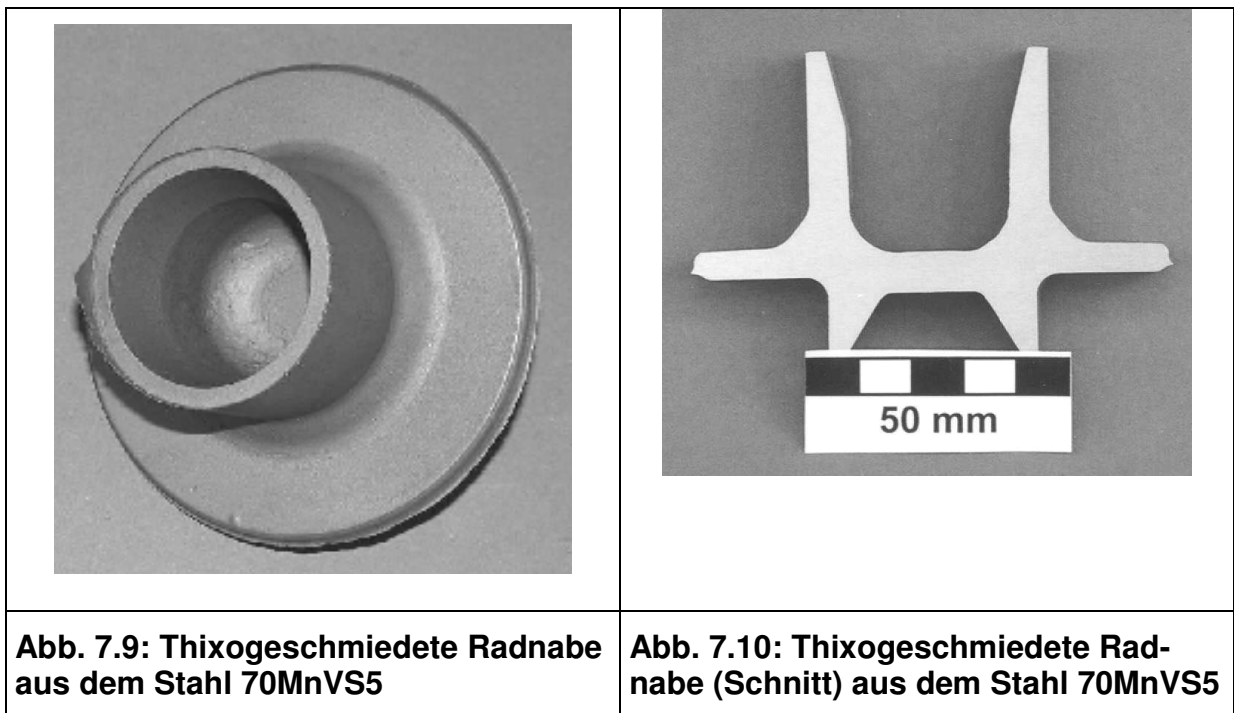


Abb. 7.8: Porenbildung im Flansch mit keramischen Werkzeugen



Zum besseren Verständnis des Formfüllungsablaufs im thixotropen Zustand sowie zum Abgleich von FEM- Simulationen werden Teilfüllungsversuche durchgeführt (Abb. 7.11). Die Farben der Simulation zeigen die Formänderungsgeschwindigkeit im Umformgut.

Das Material fließt zunächst hauptsächlich entgegen der Stempelbewegungsrichtung. Danach fließt es quer zur Stempelbewegungsrichtung in den Flanschbereich. Erst dann werden alle Kanten voll ausgeformt.

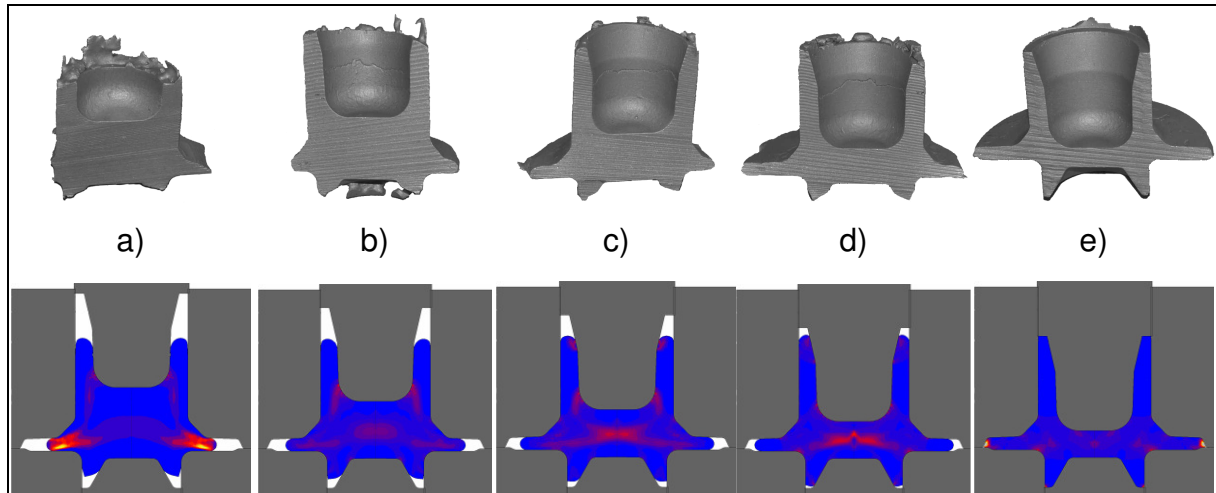


Abb. 7.11: Teilfüllungsversuche der Modellradnabe und Vergleich mit der Simulation

7.2.2 Untersuchungen am seriennahen Bauteil

In Versuchen an dem seriennahen Bauteil werden folgende Einflussgrößen untersucht:

- Werkzeugwerkstoff (Vergleich Warmarbeitsstahl/ Si_3N_4 Keramik),
- Werkzeugtemperatur,
- Bolzentemperatur.

Es soll mit diesen Versuchen untersucht werden, ob Bauteile mit den vorgeschriebenen hohen mechanischen Eigenschaften mit einer einfachwirkenden und langsamen Presse (Abb. 7.12) hergestellt werden können.

Für die Formgebungsversuche stehen zur Verfügung ein Stahlwerkzeug und Werkzeuge aus unterschiedlichen Si_3N_4 Keramiksorten.

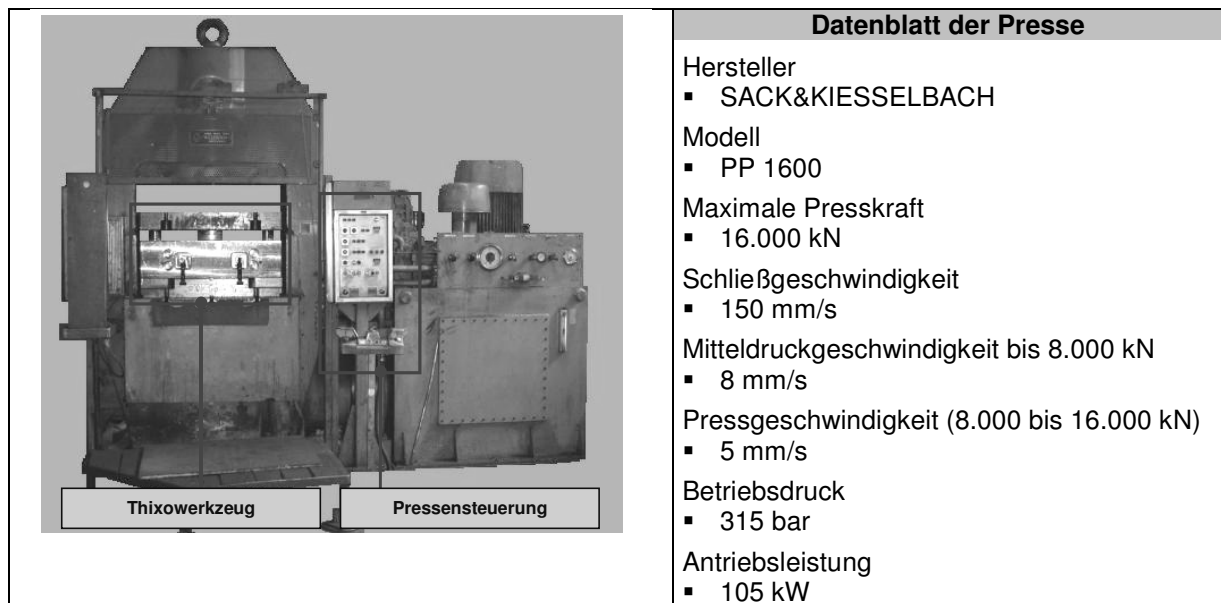


Abb. 7.12: Einfachwirkende hydraulische Presse bei Fa. Hammerwerk Fridingen

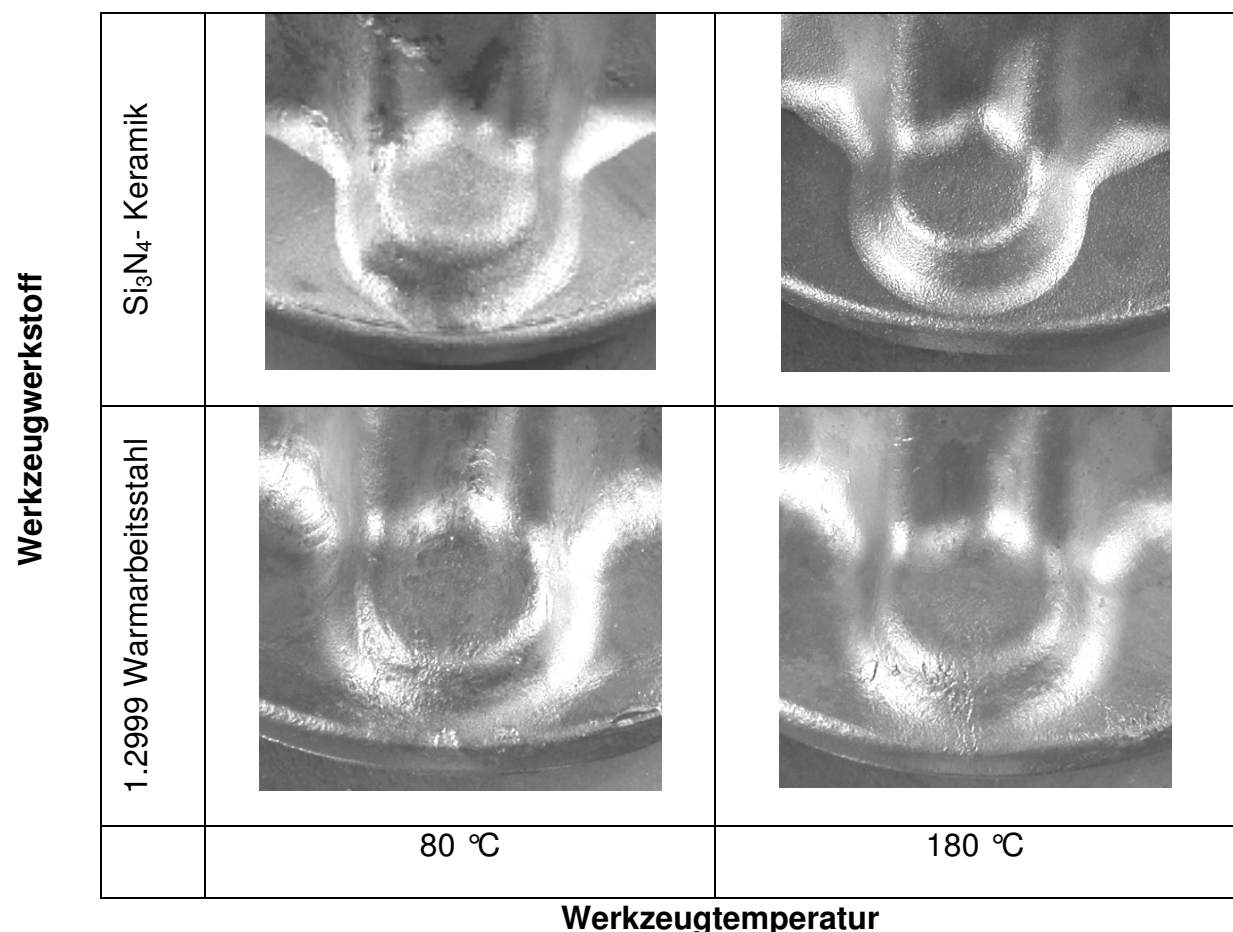


Abb. 7.13: Einfluss der Werkzeugtemperatur und des Werkzeugwerkstoffes auf die Bauteiloberfläche

In Abb. 7.13 ist zu erkennen, dass der Werkzeugwerkstoff den größten Einfluss auf die Oberflächenqualität hat. Durch Erhöhung der Gesenkttemperatur von 80 °C auf 180 °C und durch Verwendung von keramischen Gesenken können thixogeschmiedete Bauteile mit einer vergleichbaren Oberflächengüte wie geschmiedete Bauteile hergestellt werden.

7.2.3 Prozessoptimierung durch eine gezielte Abkühlung vor der Umformung

Bei der Umformung von extrem hoch erwärmten Bolzen tritt ein Entmischungseffekt auf. Flüssige Phase tritt aus dem Bolzen heraus.

Um den Austritt der flüssigen Phase zu vermeiden, wird eine dickere äußere feste Schale durch gezieltes Abkühlen erzeugt. Es wird nach dem „Blechdosensprinzip“ umgeformt (Abb. 7.14).

Das Abkühlen kann im Ofen unter Schutzgas oder durch Eintauchen in eine Flüssigkeit durchgeführt werden.

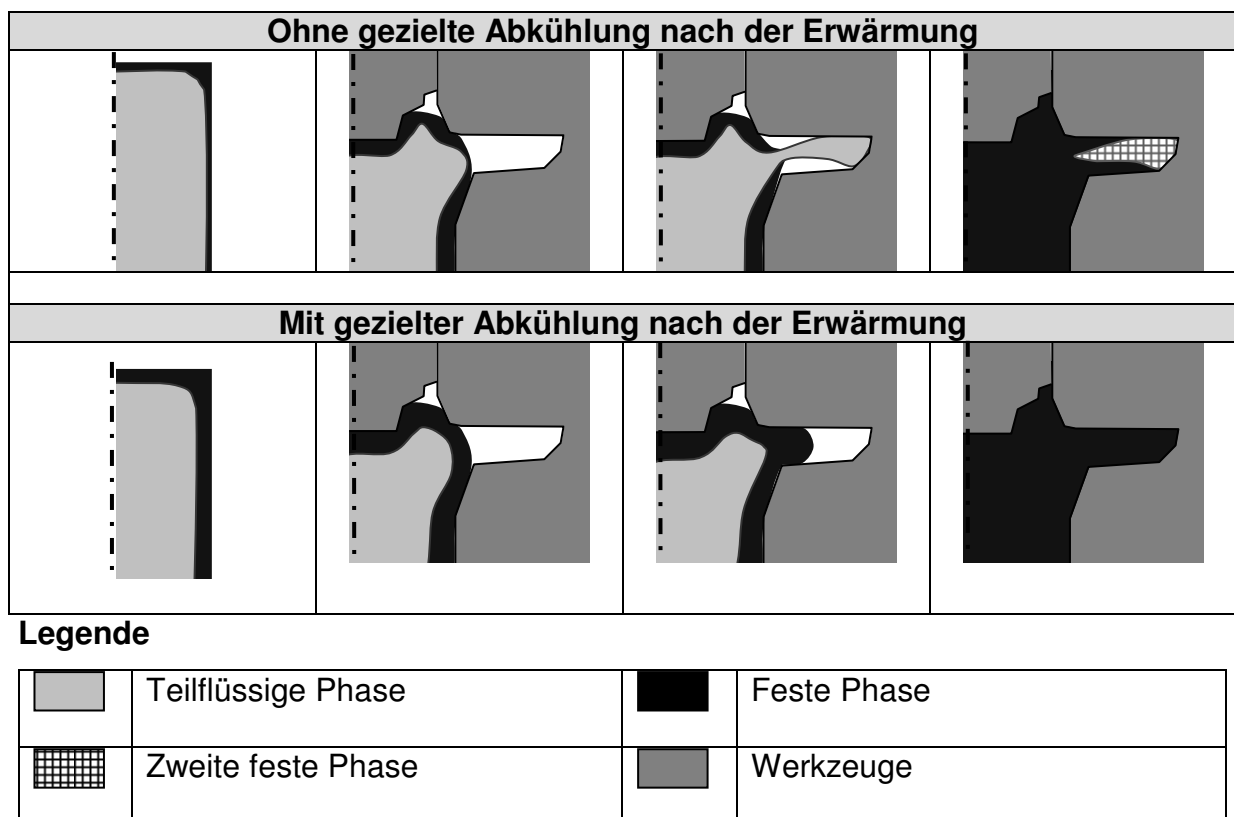


Abb. 7.14: Schematische Darstellung des Umformverhaltens von Stahlumformgut mit und ohne gezielte Abkühlung nach dem Erwärmen

In Abb. 7.15 und Abb. 7.16 werden Bauteile von Formfüllungsversuchen mit und ohne gezielt abgekühltem Bolzen dargestellt. Bereits nach einem geringen Umformgrad tritt unkontrolliert Schmelze aus, wenn das Bauteil zuvor nicht gezielt abgekühlt wurde.

Diese hoch-kohlenstoffhaltige austretende Schmelze kühlt sich am Werkzeug ab und wird am Ende der Umformung umflossen. Es entsteht eine Fehlstelle im Bauteil.

Durch die Erzeugung einer festen Außenschale werden folgende Vorteile erzielt:

- Verringerung der Entmischungseffekte und somit der Bildung von grob-zweiphasigen Bereichen im Bauteil
- kein Eintreten von nicht metallischen Einschlüssen (Oxide) ins Bauteil, da die Außenhaut während des gesamten Umformprozesses geschlossen bleibt
- Kein Transportproblem aufgrund eines zu weichen Bolzens
- Schonung der Werkzeuge, da kein Kontakt zwischen Werkzeug und flüssiger Stahl stattfindet

Weiterhin wird die Bolzenerwärmung vereinfacht, da die Bolzen nur mit wenig Flüssigkeitsanteil erwärmt und umgeformt werden.

Die experimentellen Untersuchungen zeigen, dass die benötigte Kraft zur Formgebung eines gezielt abgekühlten Bolzens ca. 30-40 % höher als bei einem extrem erwärmten Bolzen liegt, dennoch aber ca. 50 % geringer als beim konventionellen Schmieden.

Durch diese einfache Maßnahme können Bauteile mit vorgeschriebenen mechanischen Eigenschaften hergestellt werden. Dabei ist zu achten, dass das Umformvermögen der festen Schale nicht erschöpft wird.



7.3 Werkzeugabnutzung- und Standzeiten

Die Werkzeuge für die Radnabe im Labormaßstab wurden auf Verschleiß untersucht (Abb. 7.17). Die Werkzeuge aus Warmarbeitsstahl weisen schon nach wenigen Bauteilen (8 Bauteile) eine große Veränderung ihrer Kontur auf. Ein Abtrag von bis zu ca. 0,07 mm, sowie ein Auftrag bis zu 0,12 mm wurden gemessen.

Bei keramischen Werkzeugen bleibt die Kontur im Vergleich zu Stahlwerkzeugen sehr lange (50 hergestellte Bauteile) unverändert. Die in Abb. 7.17 dargestellten Unterschiede kleiner als 0,01 mm sind vermutlich sowohl auf Verschleiß als auch auf Messfehler zurückzuführen.

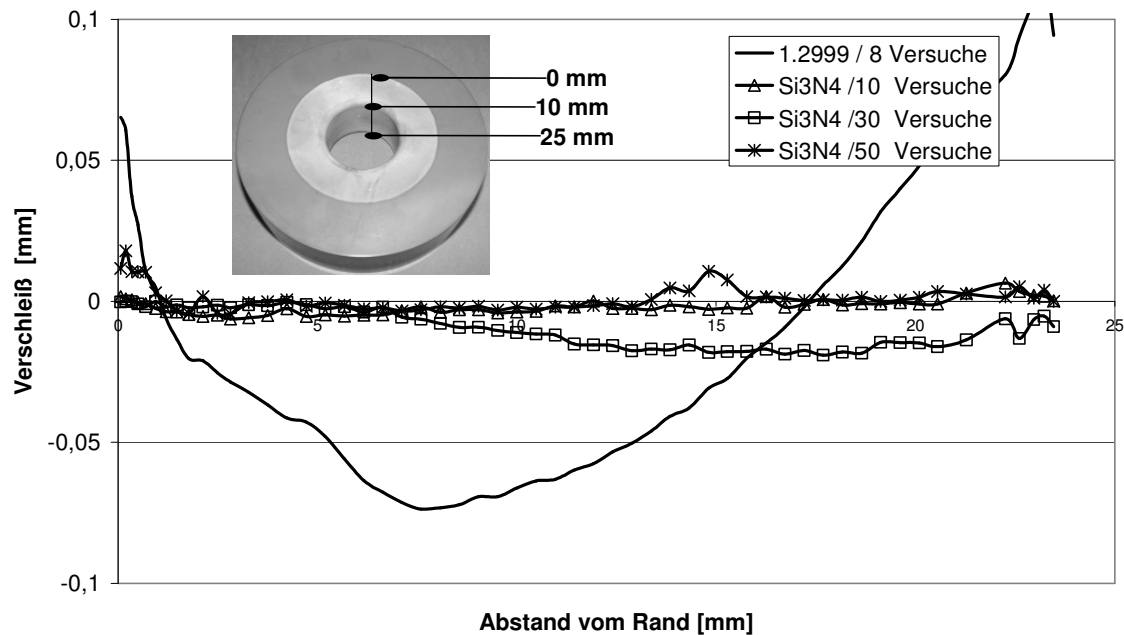
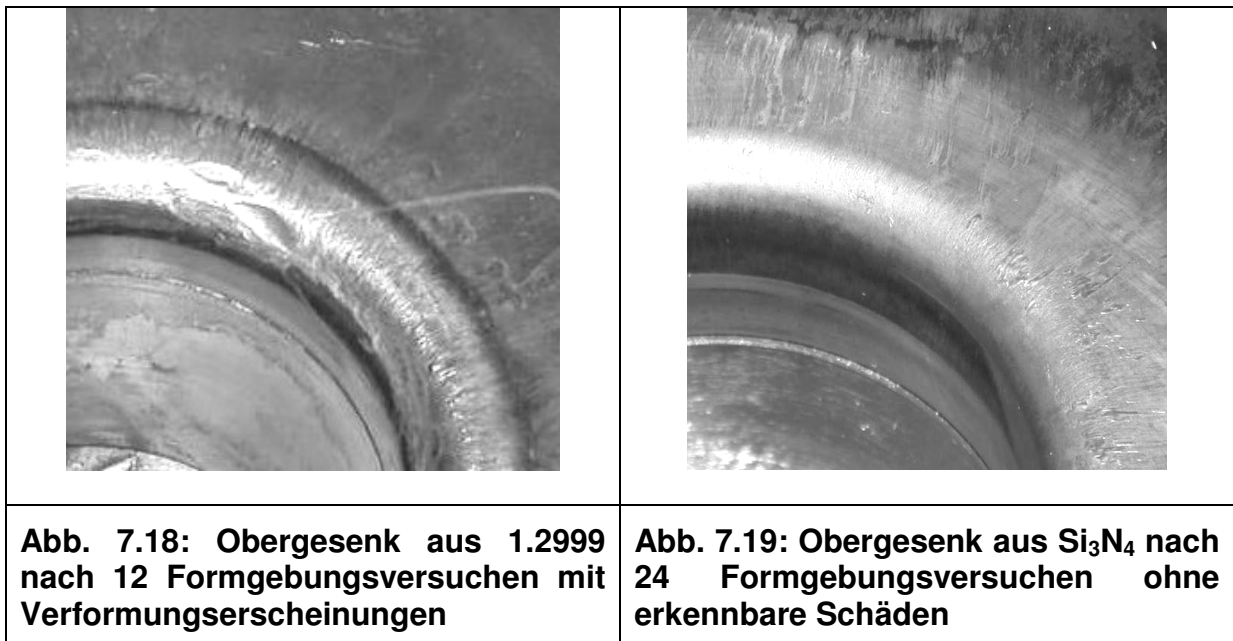


Abb. 7.17: Verschleißmessungen an Untergesenken aus Stahl 1.2999 und Si_3N_4 Keramik

In Abb. 7.18 und Abb. 7.19 ist die Kontur eines Obergesenkes für die Herstellung einer seriennahen Radnabe, jeweils aus Warmarbeitsstahl 1.2999 und Si_3N_4 -Keramik dargestellt. Die Kontur des Stahlwerkzeuges unterliegt schon nach 12 Bauteilen so großen überhitzungsbedingten Verformungen, dass das Werkzeug ausgewechselt werden muss.



Dagegen sind bei dem keramischen Werkzeug nach 24 Bauteilen keine erkennbaren Schäden zu erkennen. Bis zum Ende des Projektes konnten mehr als 60 Bauteile, ohne messbaren Verschleiß des keramischen Obergesenkes hergestellt werden.

Bei der komplexen Geometrie des Untergesenkes spielt die Biegefestigkeit der eingesetzten Keramiksorte eine große Rolle. Bei einer Si_3N_4 Keramiksorte mit einer geringen Biegefestigkeit von ca. 590 N/mm^2 treten schon beim Armieren der Bauteile Risse auf (Abb. 7.20). Bei einer höherfesten Si_3N_4 Keramiksorte mit einer Festigkeit von ca. 900 N/mm^2 treten nur kleinere Ausbrüche beim Umformen auf (Abb. 7.21).

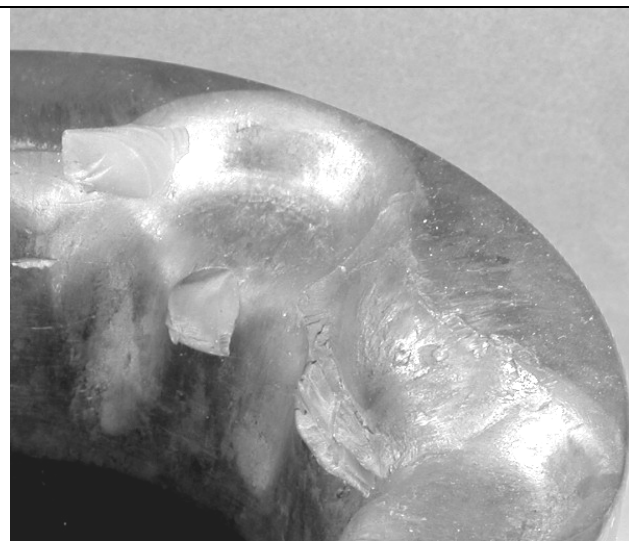


Abb. 7.20: Untergesenek aus Si_3N_4 mit einer geringen Biegefestigkeit (Bruch nach dem Armieren)



Abb. 7.21: Untergesenek mit einer hohen Biegefestigkeit (Bruch nach 7 Bauteilen)

Die Werkzeugbrüche sind vermutlich auf die hohen axialen Zugspannungen zurückzuführen, die durch die Überlagerung folgender Phänomene entstehen:

- radiales Armieren (Berechnete Zugspannungen von ca. 144 N/mm^2 Abb. 7.22)
- mechanische Belastung während der Formgebung (Innendruck)
- Thermoschock

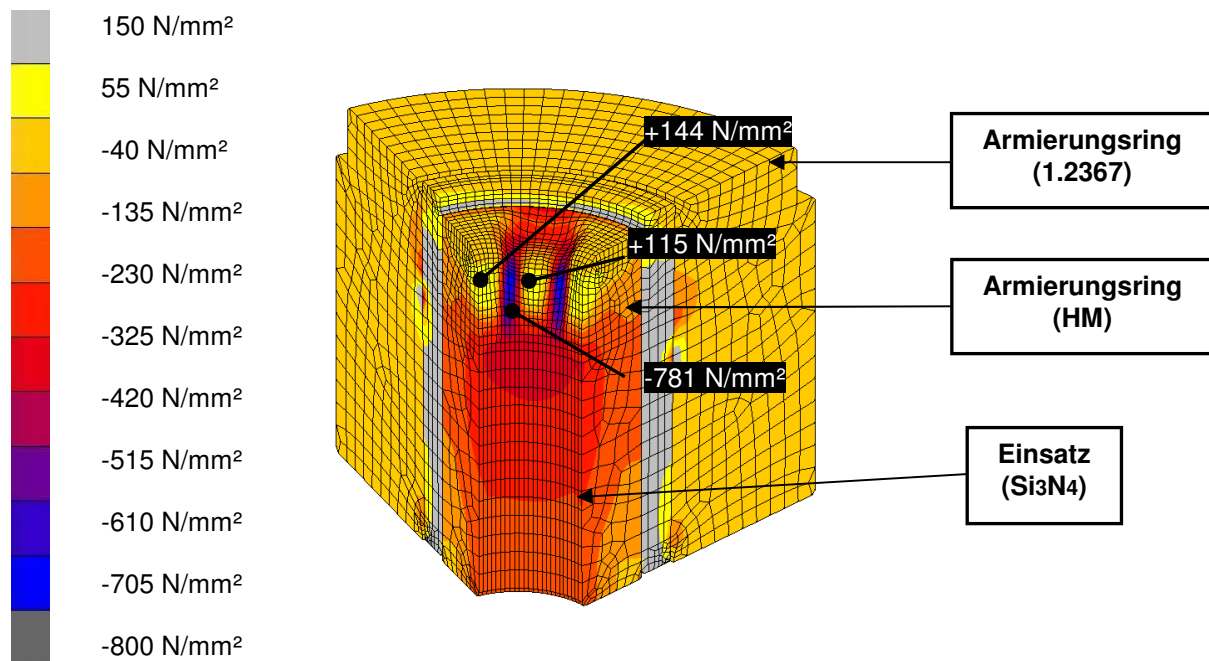


Abb. 7.22: Mit einem 3D-Modell simulierte Axialspannungen nach dem Armieren (Ausführung mit hoher Vorspannung)

Nicht rotationssymmetrische Bauteile aus Si₃N₄ weisen eine sehr geringe Standzeit auf und können in dieser Form nicht verwendet werden. Neue Werkzeugkonzepte, wie geteilte Einsätze und neue Armierungskonzepte müssen noch entwickelt werden.

Ohne große Werkzeug- und Prozessprobleme sind zur Zeit rotationssymmetrische Bauteile mit langen Fließwegen und dünnen Wandungen.

7.4 Theoretisch ermittelte Umformkräfte und Werkzeugbelastungen im Einzelhub

7.4.1 Einfluss des Wärmeübergangskoeffizienten auf die Simulationsergebnisse

Die richtige Wahl der Wärmeübergangskoeffizienten spielt eine besonders große Rolle bei der Simulation der Formgebung durch Thixoschmieden. Bei einem hohen Wärmeübergangskoeffizient wird ein Bauteil sehr stark abgekühlt, so dass es sich außerhalb der optimalen Verarbeitungstemperatur befinden kann.

Bei Formgebungssimulationen vom konventionellen Schmieden mit Stahlwerkzeugen wird in der Regel [ABS-99, NEU-03] ein konstanter Wärmeübergangskoeffizient von 20.000 bis 40.000 W/m².K angenommen.

Nach [NEU-03] kann der Wärmeübergangskoeffizient auch druck- und fließspannungsabhängig für unterschiedliche Werkstoffpaarungen berechnet werden. In Abb. 7.23 sind die nach [NEU-03] berechneten Wärmeübergangskoeffizienten dargestellt.

$$h = h_0 \cdot \left[1 - \exp\left(-D_p \cdot \frac{P_N}{k_f}\right) \right]^{n_p} \quad (\text{Gl. 7.1})$$

mit

h Wärmeübergangskoeffizient in W/(K.m²)

h_0 Wärmeübergangskoeffizient im idealen Fall (optimale Kontaktfläche) in W/(K.m²)

P_N Kontaktdruck in N/mm²

n_p, D_p Dimensionslose Koeffiziente, die durch Parameteridentifikation mit FEM-Simulation zu ermitteln sind

und

$$h_0 = c_{b0} \cdot \frac{\lambda_{1/2}}{R_{awz}} \quad (\text{Gl. 7.2})$$

mit

c_{b0} dimensionsloser Koeffizient

R_{awz} arithmetischer Mittenrauwert des Werkzeugs in m

$\lambda_{1/2}$ harmonisches Mittel der Wärmeleitfähigkeiten der beiden Kontaktkörper in W/(K.m)

$$\lambda_{1/2} = 2 \cdot \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2} \quad (\text{Gl. 7.3})$$

mit

λ_1 Wärmeleitfähigkeit des Werkstücks in W/(K.m)

λ_2 Wärmeleitfähigkeit des Werkzeugs in W/(K.m)

Der Zusammenhang zwischen Normaldruck und Kontaktdruck kann wie folgt definiert werden:

$$P_N = \frac{\sigma_N}{W_K} \quad (\text{Gl. 7.4})$$

Bei der Warmumformung können für die Koeffizienten c_{b0} , n_p , D_p folgende Werte angenommen werden: $c_{b0} = 0,0016$; $n_p = 1,5$; $D_p = 0,34$.

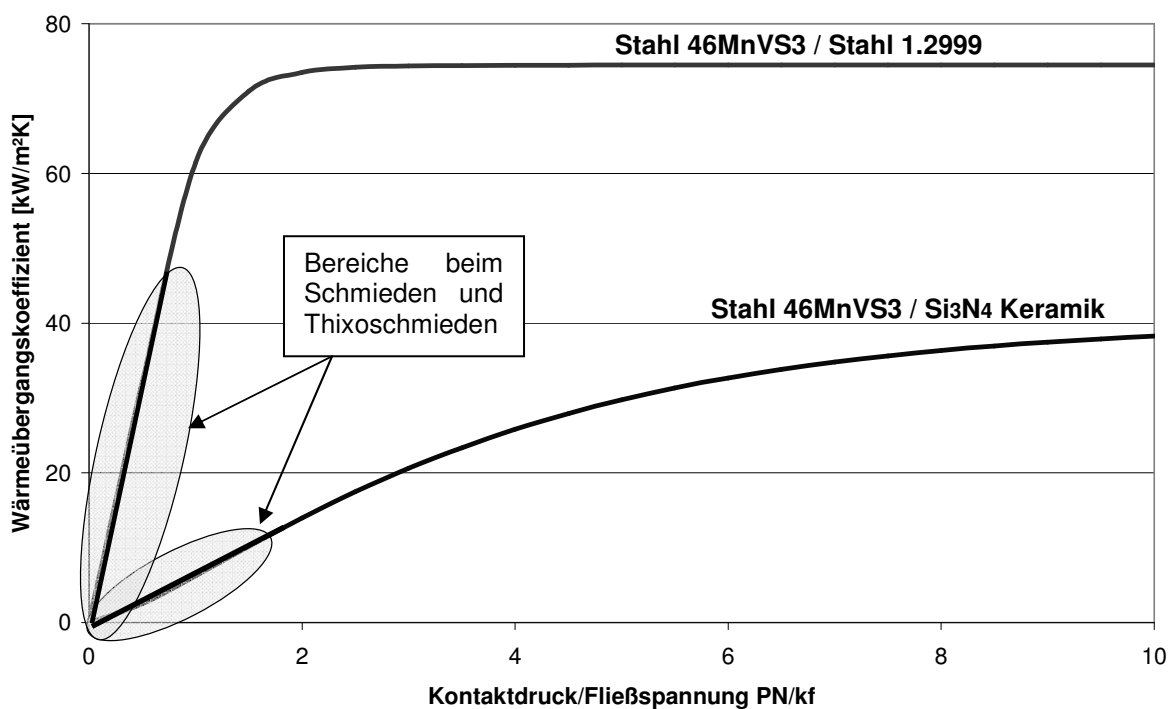


Abb. 7.23: Nach [NEU-03] berechnete Verläufe der Wärmeübergangskoeffizienten in Abhängigkeit von dem Verhältnis Kontakt/ Fließspannung

Der höhere Wärmeübergangskoeffizient bei Stahlwerkzeugen aus dem Warmarbeitsstahl 1.2999 ist auf die doppelt bis dreimal höhere Wärmeleitfähigkeit dieses Stahles im Vergleich zu Si_3N_4 Keramik zurückzuführen.

Die in den Simulationen verwendeten Wärmeübergangskoeffizienten sind der Tab. 7.1 zu entnehmen.

Tab. 7.1: Für Simulationen verwendete werkzeugwerkstoffabhängige Wärmeübergangskoeffizienten

		Formgebungsverfahren	
		Schmieden	Thixoschmieden
Werkzeugwerkstoff	Warmarbeitsstahl 1.2999	• 30 kW/m ² K	• 30 kW/m ² K
	Si ₃ N ₄ -Keramik	• 10 kW/m ² K	• 10 kW/m ² K

7.4.2 Umformkraft in Abhängigkeit von Bolzentemperatur, von Umformgeschwindigkeit, von Werkzeugwerkstoff und von Werkzeugtemperatur

Der thermische Zustand des Umformgutes während der Umformung hat einen entscheidenden Einfluss auf die benötigte Umformkraft. Oberhalb der Solidus - Temperatur nimmt die benötigte Umformkraft schlagartig ab.

Folgende Prozessparameter haben einen großen Einfluss auf den Wärmeaustausch zwischen Umformgut, Werkzeug und Umgebung:

- Die Bolzenausgangstemperatur,
- Die Umformgeschwindigkeit, d.h. die Kontaktzeiten,
- Der Werkzeugwerkstoff mit werkstoffeigenen Wärmeleitfähigkeiten und spezifischen Wärmekapazitäten,
- Die Werkzeugvorwärmtemperatur.

Abb. 7.24 und Abb. 7.25 zeigen den Vergleich zwischen den experimentellen und simulierten Umformkräften beim Stauchen und bei der Formgebung der rotations-symmetrischen Radnabe.

Die Untersuchung der Abhängigkeit der oben genannten Parameter wurde anhand eines rotationssymmetrischen FEM- Modells durchgeführt. Als Referenz wurde eine theoretisch benötigte Schmiedekraft zur Herstellung des Bauteiles in einem Hub berechnet.

Hierfür wurden folgende Parameter angenommen:

- Umformtemperatur 1200 °C
- Verfahrgeschwindigkeit 150 mm/s
- Stahlwerkzeuge vorgewärmt auf 100 °C

Die Ergebnisse der Stauchversuche können nur bis zu einem Umformweg von 40 mm vernünftig ausgewertet werden. Nach diesem Umformweg platzt der teilflüssige Bolzen.

Trotz existierenden Messungenauigkeiten und bisher noch wenig erforschten Fließspannungen im teilflüssigen Bereich ist eine gute Übereinstimmung der simulierten und der experimentellen Werte sowohl beim Stauchen als auch bei einer komplexeren Formgebung einer rotationssymmetrischen Radnabe festzustellen (Abb. 7.24).

Die benötigte Stauchkraft bei einer Warmschmiedetemperatur von 1350 °C ist mehr als doppelt so hoch als die von einem auf 1450 °C erwärmten und leicht abgekühlten Bolzen im teilflüssigen Bereich. Wird ein Bolzen auf 1450 °C erwärmt und relativ lange abgekühlt (50 s) bleibt die Stauchkraft gering. Es erscheint, als ob nur ein geringer Anteil an Flüssigkeitsphase im Bolzen zur Reduzierung der Umformkraft nötig ist.

Bei der Formgebung einer rotationssymmetrischen Radnabe liegen die experimentell ermittelten Kräfte am Ende der Umformung der Bolzen mit einer Warmschmiedetemperatur von 1350 °C und 1430 °C auf einem ähnlichen Kraftniveau. Die benötigte Energie bei der Thixiformgebung ist aber viel geringer.

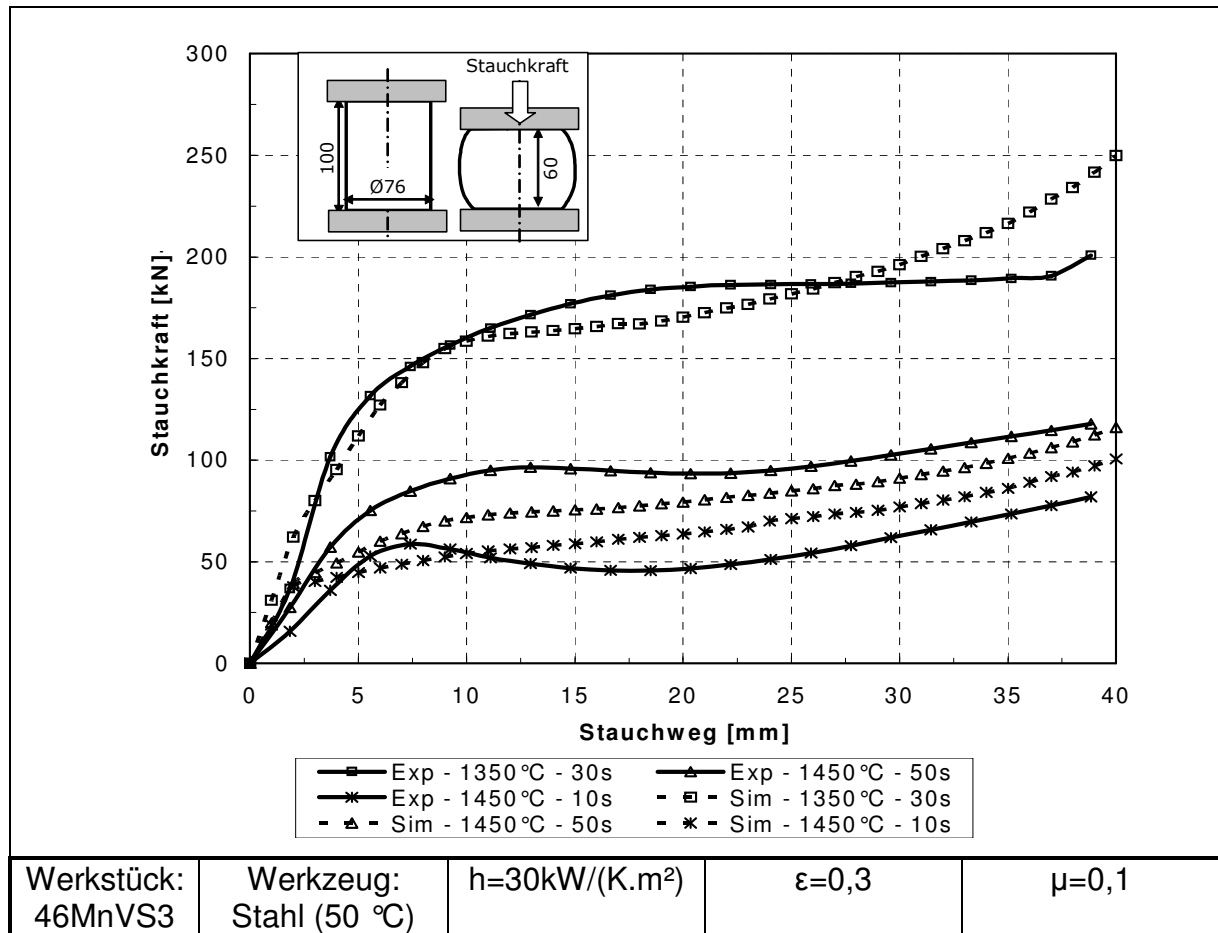


Abb. 7.24: Vergleich der experimentellen und der simulierten Staukräfte ($v_{St}= 5\text{mm/s}$)

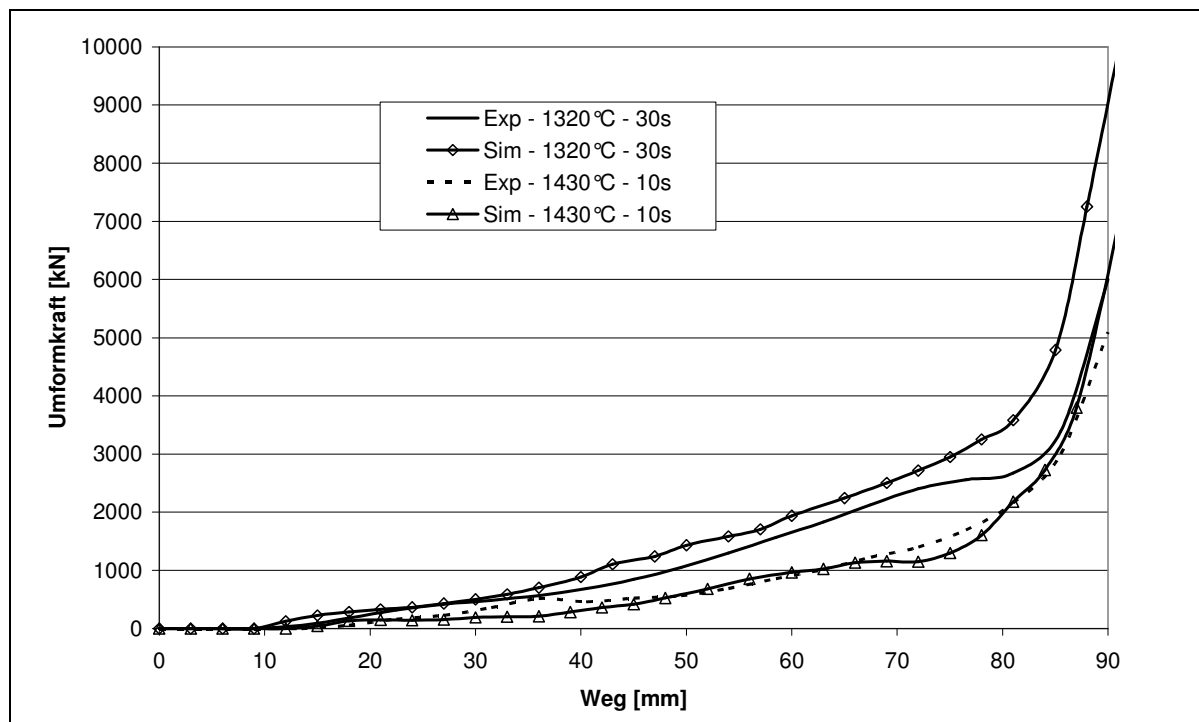


Abb. 7.25: Vergleich der simulierten und experimentellen Kraftverläufe bei der Formgebung rotationssymmetrischer Radnaben ($v_{St}= 5\text{mm/s}$)

Tab. 7.2: Verwendete Parameter für den Abgleich der experimentellen und der simulierten Ergebnisse der Formgebung rotationssymmetrischer Radnaben

Versuch	Werkstück-temperatur	Werkzeug-werkstoff	Werkzeug-temperatur	Verfahr-geschwindigkeit	Abkühlung
1	1320 °C	Stahl	100 °C	5 mm/s	30 s
2	1430 °C	Stahl	100 °C	5 mm/s	10s
Werkstück: 46MnVS3		Wärmeübergang: $h=30\text{kW}/(\text{K}\cdot\text{m}^2)$		Strahlung: $\epsilon=0,3$	
				Reibung: $\mu=0,1$	

Bis zu einem Verfahrensweg von ca. 80 mm weisen die Kraftverläufe eine regelmäßige Steigung auf. Hauptgrund dieser Krafterhöhung ist die Abkühlung des Werkstücks während der Formgebung beim Kontakt mit dem kalten Werkzeug. Diese Abkühlung ist besonders bei dieser kleinen Verfahrensgeschwindigkeit ausgeprägt (Formgebungszeit: ca. 19 s), wie in Abb. 7.26 dargestellt. Die Kraftverläufe in der Hauptformgebungsphase (vor der Nachverdichtung) unterscheiden sich für Keramikwerkzeuge um einen Faktor ca. 2.

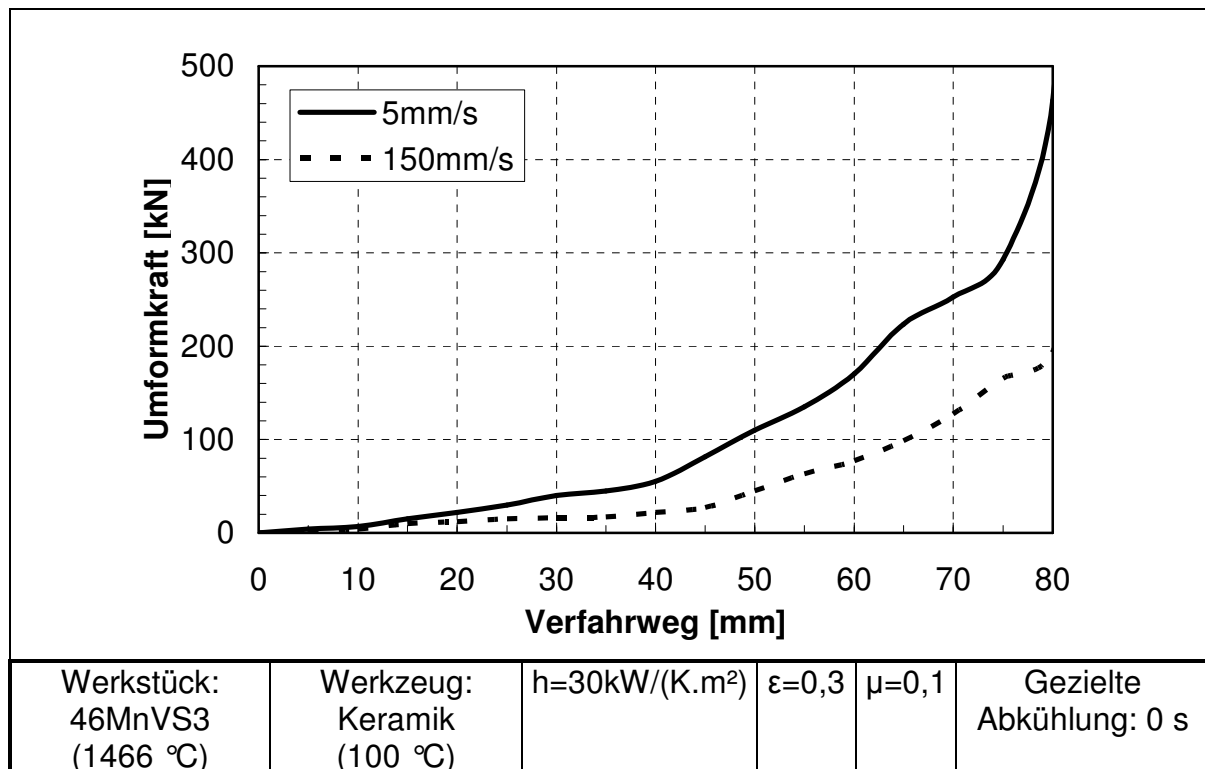


Abb. 7.26: Simulierte Umformkraft in Abhängigkeit von der Verfahrensgeschwindigkeit bei der Herstellung der vereinfachten Radnabe (M 1:1)

In der Nachverdichtungsphase der Formgebung ab ca. 80 mm ist die Kraftsteigung deutlich steiler. Das Material wird in die letzten, noch nicht gefüllten Bereiche

gedrückt. Aufgrund der hohen erreichten Drücke werden Verhältnisse von Kontaktspannung zu Fließspannung größer als 1 erreicht und entsprechend große Wärmeübergangskoeffizienten bis zu 30.000 W/(m².K).

Nach Überprüfung des Materialmodells durch Vergleiche von experimentellen und simulierten Ergebnissen, wurden die Umformkräfte zur Formgebung einer rotations-symmetrischen Radnabe mit einem Gewicht von ca. 3,5 kg in Abhängigkeit folgender Parameter untersucht:

- Bolzenausgangstemperatur (1200 °C, 1430 °C und 1466 °C),
- Werkzeugwerkstoff (Warmarbeitsstahl 1.2999 und Keramik Si₃N₄),
- Werkzeugtemperatur (100 °C und 500 °C),
- Verfahrgeschwindigkeit (v_{St} 5 mm/s und 150 mm/s).

Die gewählten Bolzenausgangstemperaturen von 1200 °C, 1430 °C und 1466 °C entsprechen beim gewählten thixofähigen Stahl einem Flüssigkeitsanteil von 0 %, 5 % und 30 %.

Als Referenz für die Kraft wurde eine theoretische benötigte Schmiedekraft zur Herstellung des Bauteiles in einem Hub simuliert.

Hierfür wurden folgende Parameter angenommen:

- Umformtemperatur 1200 °C
- Verfahrgeschwindigkeit $v_{St}= 150$ mm/s
- Stahlwerkzeuge vorgewärmt auf 100 °C

Die mit diesen Parametern ermittelte Kraft von ca. 5900 kN (für die Schmiedung einer Radnabe in einem Hub) entspricht 100 % in den Diagrammen.

Zur Durchführung von realitätsnahen Simulationen mit den ausgewählten Werkzeugwerkstoffen 1.2999 und Si₃N₄ mussten werkstoffabhängige Kennwerte in Abhängigkeit zur Temperatur wie Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärme verwendet werden. Aufgrund dieser Eigenschaften wurden auch unterschiedliche

Wärmeübergangskoeffiziente für den Warmarbeitsstahl 1.2999 (30 kW/m²K) und Si₃N₄ (10 kW/m²K) angenommen.

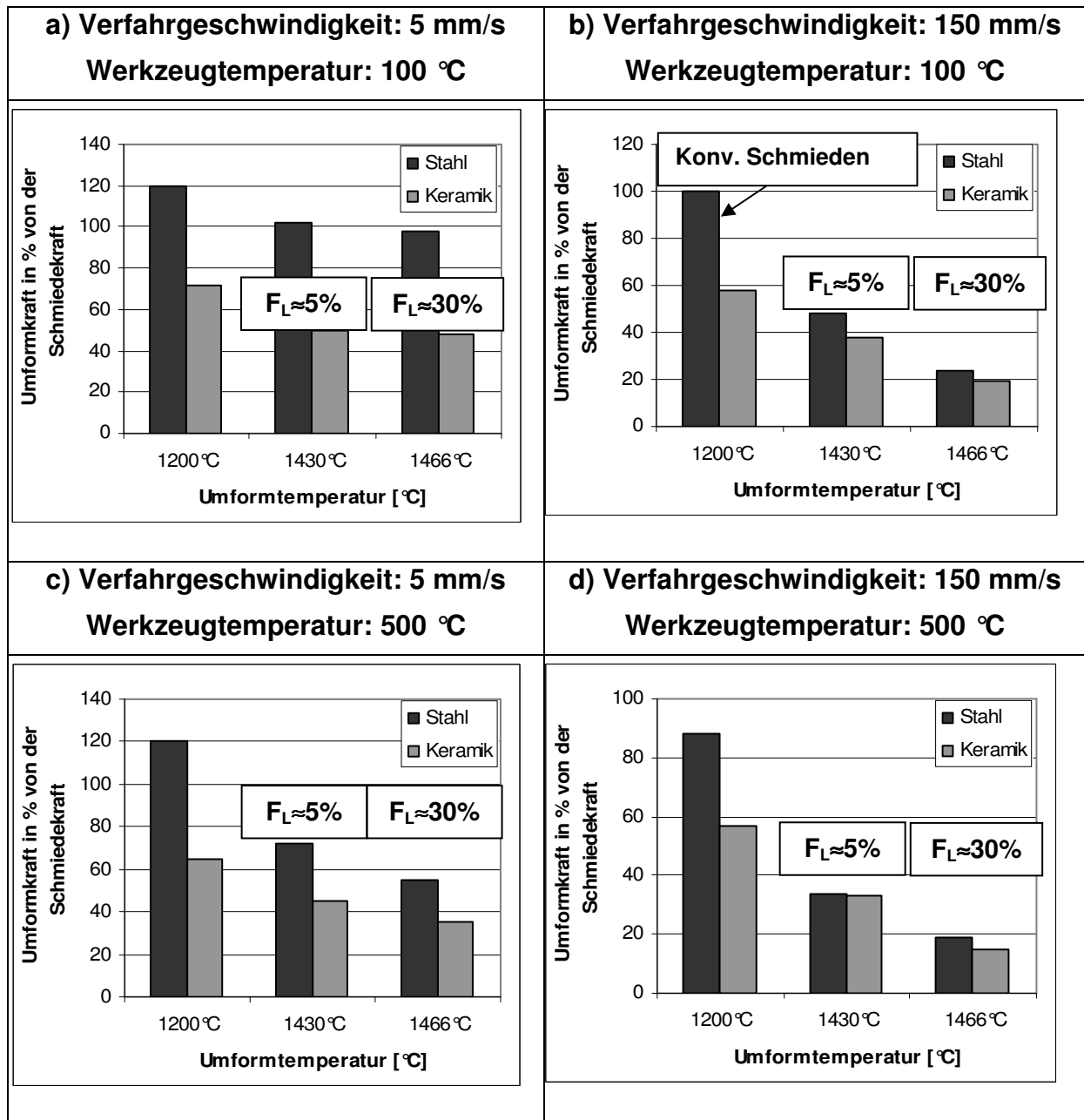


Abb. 7.27: Einfluss des Werkzeugwerkstoffes, der Umformtemperatur und der Umformgeschwindigkeit auf die Umformkraft mit unterschiedlichen Wärmeübergangskoeffizienten nach 95 % des Verfahrensweges.

Bei einer geringen Umformgeschwindigkeit von 5 mm/s kann durch Verwendung von keramischen Werkzeugen die benötigte Umformkraft signifikant um bis zu 35 % reduziert werden (Abb. 7.27 a und c). Durch eine zusätzliche Erhöhung der

Werkzeugausgangstemperatur von 100 °C auf 500 °C kann die benötigte Umformkraft weiter um bis zu weiteren 10 % verringert werden.

Die geringen Kräfte des Thixoschmiedens sind bei der geringen Umformgeschwindigkeit von 5 mm/s und den geringen Werkzeugtemperaturen nur mit keramischen Werkzeugen zu erzielen. Mit auf 500 °C erwärmten Stahlwerkzeugen können dann aber auch Kräfteinsparungen von 25 bis 45 %, je nach Bolzenausgangstemperaturen, erreicht werden.

Die Schmiedekraft bei 1200 °C wird aufgrund der hohen Bolzenabkühlung während der langen Umformzeit auf 120 %, im Vergleich zum Schmieden mit einer Geschwindigkeit von 150 mm/s, erhöht.

Bei einer hohen Umformgeschwindigkeit von 150 mm/s ist die Bolzenausgangstemperatur der wichtigste Parameter zur Verringerung der Umformkraft (Abb. 7.28 b).

Bei einer geringen Werkzeugvorwärmung von 100 °C kann die benötigte Umformkraft bei einem geringen Flüssigkeitsanteil von 5 % (1430 °C) um ca. 60 % reduziert werden. Bei einem Flüssigkeitsanteil von 30 % (1466 °C) kann die Umformkraft sogar bis zu 80 % mit keramischen Werkzeugen reduziert werden.

Durch Verwendung von vorgewärmten Werkzeugen auf 500 °C können noch zusätzlich bis zu 10 % Kraft eingespart werden (Abb. 7.28 d).

Die Umformkraft beim Thixoschmieden im Vergleich zum konventionellen Schmieden kann bei Verwendung von keramischen Werkzeugen bei einer hohen Umformgeschwindigkeit mit vorgewärmten Werkzeugen und einer hohen Bolzenausgangstemperatur um ca. 85 % reduziert werden.

7.4.3 Bauteiltemperatur in Abhängigkeit von Bolzentemperatur, von Werkzeugwerkstoff und von Umformgeschwindigkeit

Die Temperatur des Umformgutes hat auf die Umformkräfte einen entscheidenden Einfluss beim Thixoschmieden von Stahl.

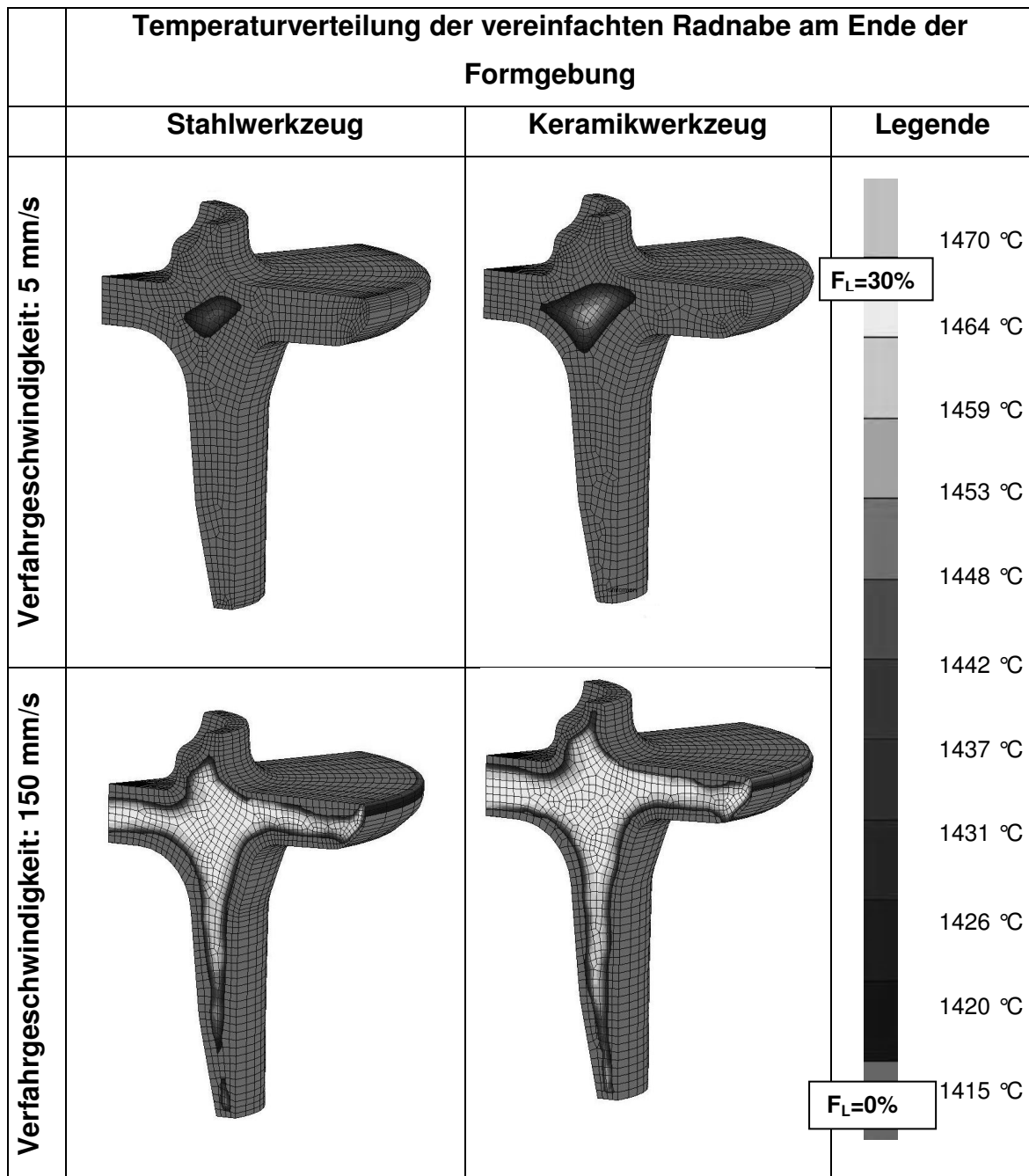


Abb. 7.28: Einfluss der Verfahrensgeschwindigkeit und des Werkzeugwerkstoffs auf die Temperaturverteilung in der vereinfachten Radnabe am Ende der Formgebung

In Abb. 7.28 wird die Bauteiltemperatur am Ende der Umformung bei einer Bolzenausgangstemperatur von 1466 °C in Abhängigkeit vom Werkzeugwerkstoff und von der Verfahrensgeschwindigkeit dargestellt.

Bei einer geringen Verfahrensgeschwindigkeit von 5 mm/s ist das Bauteil am Ende der Formgebung fast vollständig erstarrt. Die benötigte Umformkraft ist sehr hoch. Weiterhin ist ein sehr rissbehaftetes Bauteil zu erwarten, da das Bauteil an der Oberfläche sehr stark abgekühlt wird.

Bei einer höheren Umformgeschwindigkeit von 150 mm/s befinden sich nach der Umformung noch große Bereiche im teilflüssigen Bereich. Die Umformkraft im Vergleich zum konventionellen Schmieden ist bis zu 75 % geringer. Eine gute Oberflächengüte ist in dem Fall zu erwarten. Vor der Bauteilentnahme aus den Gesenken muss aber eine zusätzliche Abkühlzeit eingeplant werden.

7.4.4 Thermomechanische Werkzeugbelastungen

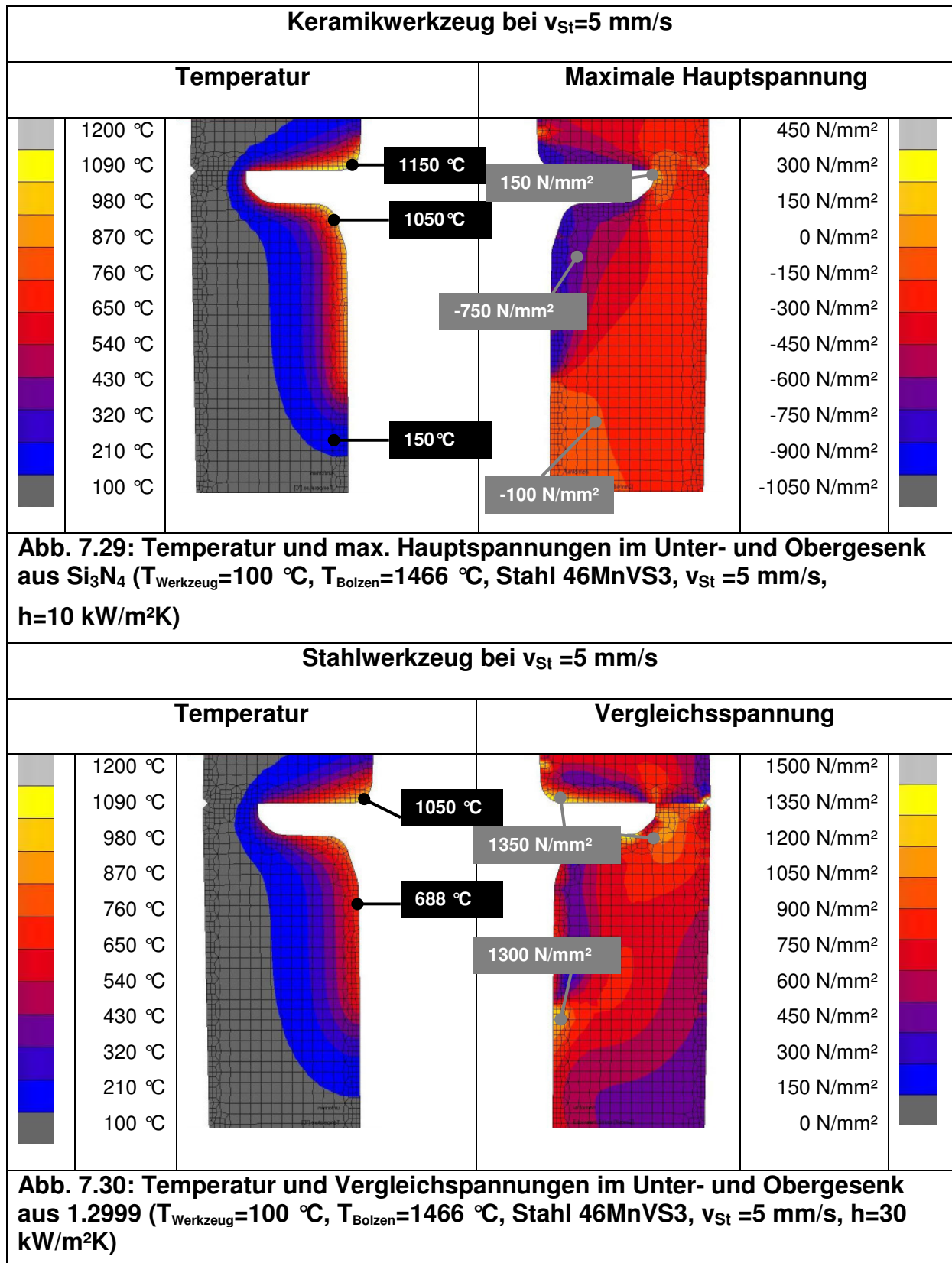
Zur Beschreibung der thermomechanischen Werkzeugbelastungen wurden die Werkzeugtemperaturen und die Spannungen gegenübergestellt. Für metallische Werkzeuge wie Warmarbeitsstahl sind die Vergleichsspannungen nach von Mises eine wichtige Größe. Für keramische Werkstoffe, die zu Sprödbrüchen neigen, sind die maximalen Hauptspannungen relevant.

Zum direkten Vergleich werden die simulierten Ergebnisse von Temperatur und Spannung der Werkzeuge am Ende der Formgebung gegenübergestellt (Abb. 7.29 bis Abb. 7.30).

Bei einer geringen Verfahrensgeschwindigkeit von 5 mm/s mit Si_3N_4 Werkzeugen sind aufgrund der kleinen spezifischen Wärme des Werkstoffes hohe Temperaturen bis ca. 1150 °C vorhanden. Da die Wärmeleitfähigkeit gering ist, bildet sich ein großer Temperaturgradient (Abb. 7.29). Die maximale Einsatztemperatur von Si_3N_4 wird nicht überschritten.

Bei einer geringen Verfahrensgeschwindigkeit von 5 mm/s liegen die maximalen Temperaturen der Stahlwerkzeuge unterhalb der von keramischen Werkzeugen

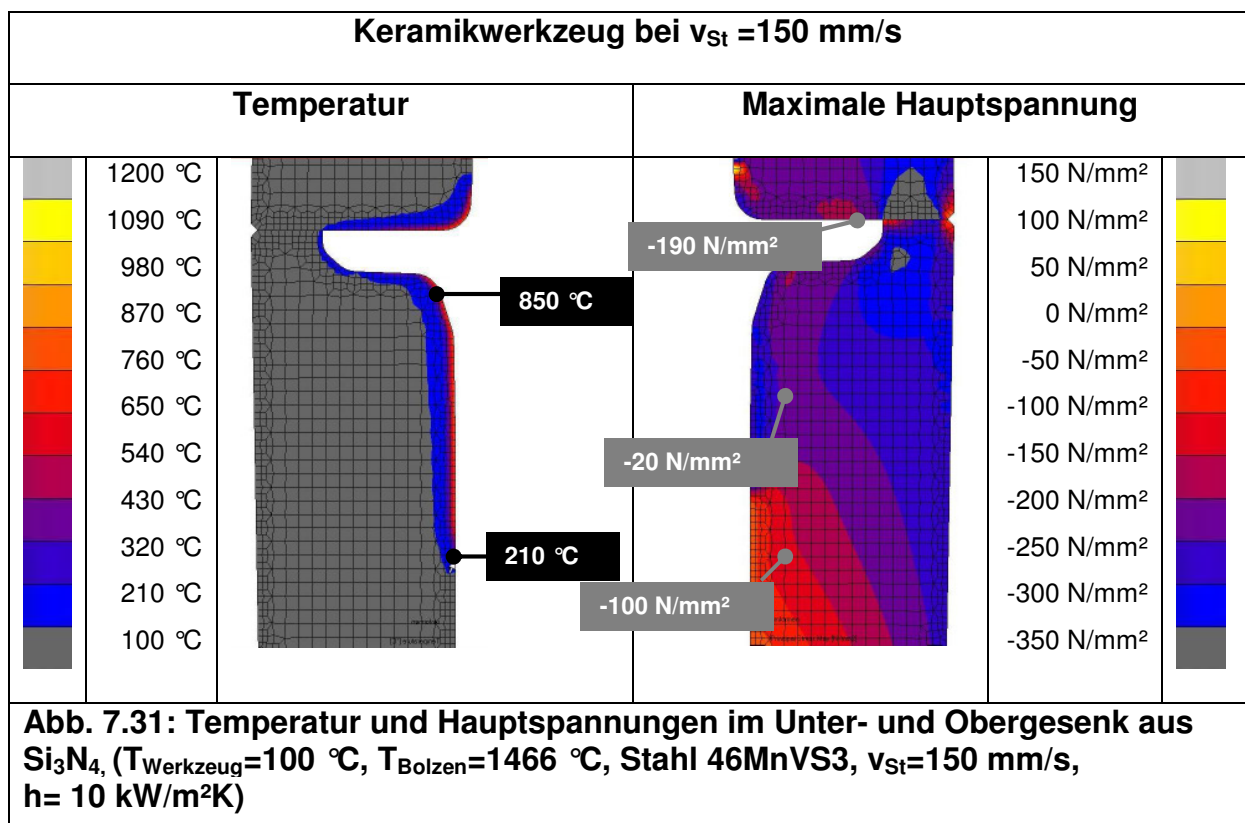
(Abb. 7.30). Die Oberflächentemperatur beträgt bis zu 1050 °C. Die maximale Einsatztemperatur von Warmarbeitsstahl (ca. 550 °C) wird bei weitem überschritten.



Durch die radiale Vorspannung und die mechanische Belastung durch den Innendruck beim Umformen entstehen hohe Vergleichspannungen bis 1400 N/mm^2 in Verbindung mit hohen Temperaturen. Diese führen zu starken plastischen Umformungen und letztendlich zu Rissen. Bei Verformungen in zylindrischen Bereichen des Werkzeuges können sich Hinterschnitte bilden, die die Entnahme des Umformgutes aus dem Werkzeug erschweren.

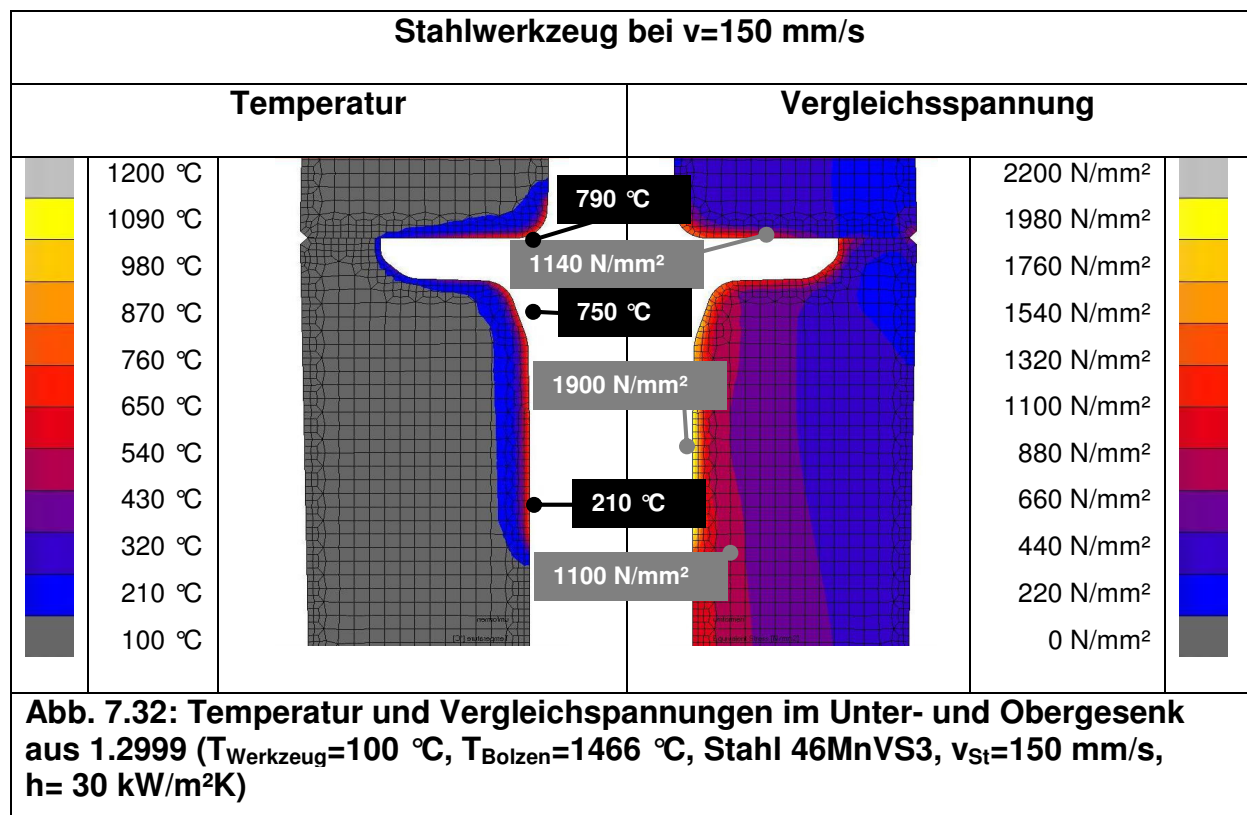
Bei einer hohen Verfahrgeschwindigkeit von 150 mm/s ist die thermische Werkzeugbelastung geringer (Abb. 7.31 und Abb. 7.32).

Die max. Temperatur mit keramischen Werkzeugen liegt bei 850 °C . Die geringe Wärmeeinfuhr in den Gesenken führt zu unkritischen max. Hauptspannungen (Abb. 7.31).



Die thermische Belastung von Stahlwerkzeugen bei einer hohen Verfahrgeschwindigkeit von 150 mm/s liegt bei 790 °C . Diese Temperatur liegt deutlich oberhalb der maximalen Einsatztemperatur von Warmarbeitsstählen (ca.

550 °C). Es treten hohe kritische Vergleichsspannungen auf, die zur Verformung der Werkzeuge führen können (Abb. 7.32).



Tab. 7.3 stellt eine Zusammenfassung der simulierten Temperaturen und Werkzeugbelastungen dar

Tab. 7.3: Zusammenfassende Tabelle der simulierten thermomechanischen Werkzeugbelastungen im Einzelhub

	Stahlwerkzeug aus 1.2999		Keramikwerkzeug aus Si ₃ N ₄	
	Vergleichs- spannung	Temperatur	Max. Hauptspannung	Temperatur
$V_{\text{St}}= 5\text{mm/s}$	1350 N/mm ² (kritisch)	1050 °C (kritisch)	150 N/mm ²	1150 °C
$V_{\text{St}}= 150\text{mm/s}$	1900 N/mm ² (kritisch)	790 °C (kritisch)	-20 N/mm ²	850 °C

7.5 Einfluss der Abkühlzeit auf die Umformkraft

Durch eine gezielte Abkühlung kann die Qualität von thixogeschmiedeten Bauteilen verbessert werden (Siehe Kapitel 8), da verhindert wird, dass die Schmelze unkontrolliert aus dem Bolzen austritt.

In Abb. 7.33 wird die benötigte Stauchkraft bei einer Stauchgeschwindigkeit von 5 mm/s bei unterschiedlichen Bolzenausgangstemperaturen nach definierten Abkühlzeiten untersucht. Die FEM Berechnungen wurden mit zwei Stahlplatten, einer Anfangstemperatur von 50 °C und einem Wärmeübergangskoeffizient von 30 kW/m²K durchgeführt. Die Geometrie des zu stauchenden Bolzens aus dem Stahl 46MnVS3 beträgt D76 x100 mm.

Als Referenz wurde das Stauchen eines Bolzens bei Schmiedetemperatur 1200 °C genommen. Durch das Stauchen bei einer Temperatur von 1350 °C soll die Stauchkraft bei einer Warmschmiedetemperatur (Solidustemperatur 1415 °C) berechnet werden. Die Temperaturen von 1450 °C und 1466 °C entsprechen jeweils einem Flüssigkeitsanteil im Bolzen von ca. 15 und 30 %.

Durch die Erhöhung der Temperatur wird die benötigte Stauchkraft drastisch reduziert. Wird bei 1200 °C nach einer kurzen Abkühlungszeit von 10 s ca. 600 kN (ca. 60 Tonnen) benötigt, so beträgt diese beim Warmstauchen bei 1350 °C nur noch ca. 200 kN.

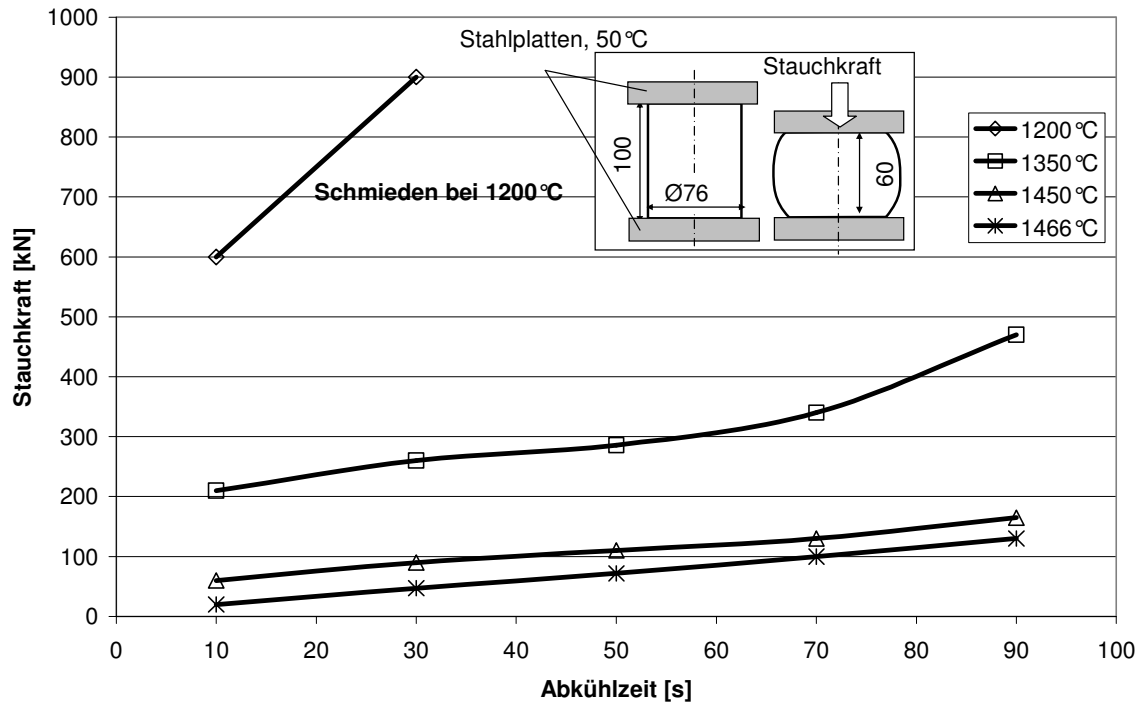


Abb. 7.33: Simulierte Stauchkräfte in Abhängigkeit der Bolzenausgangstemperatur und Abkühlzeit bei einer Stauchgeschwindigkeit von 5 mm/s

Die benötigte Umformkraft zum Thixostauchen (bei 1450 °C oder 1466 °C) fällt wesentlich kleiner aus. Im Vergleich zur Schmiedetemperatur beträgt diese nur noch ein 1/10 bis 1/30.

Durch eine gezielte Abkühlung steigt die benötigte Umformkraft. Bei einer Bolzenausgangstemperatur von 1466 °C bzw. 1450 °C steigt durch eine Abkühlung von 50 s die benötigte Umformkraft von 20 kN auf ca. 70 kN bzw. von 60 auf 110 kN. Diese Umformkraft liegt immer noch um den Faktor 5 bis 10 geringer als beim Stauchen eines Bolzens bei Schmiedetemperatur (1200 °C).

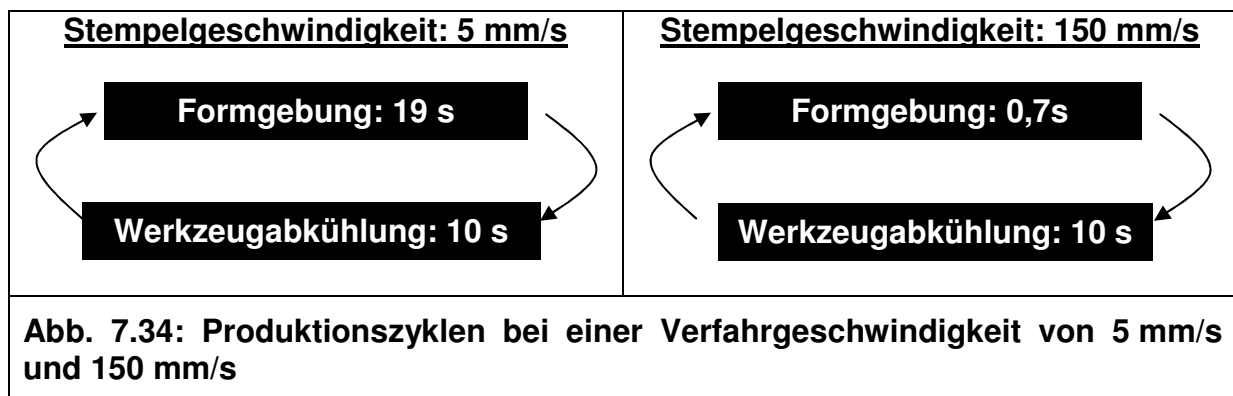
7.6 Ermittlung der Werkzeugbelastungen im Dauerbetrieb

7.6.1 Ausgewählte Produktionszyklen

Zur Simulation der thermomechanischen Werkzeugbelastungen wurden zwei produktionsnahe Zyklen (Abb. 7.34) mit unterschiedlichen Umformgeschwindigkeiten 5 mm/s und 150 mm/s mit FEM nachgebildet. Eine zusätzliche Abkühlzeit der

thixogeformten Bauteile in den geschlossenen Werkzeugen wurde nicht berücksichtigt, da die experimentellen Untersuchungen gezeigt haben, dass diese nicht notwendig ist.

In beiden Fällen wird mit einer Stempelgeschwindigkeit von 150 mm/s und einem angenommenen Wärmeübergangskoeffizienten von 10 kW/m²K für keramische Werkzeuge bzw. 30 kW/m²K für Stahlwerkzeuge umgeformt.



7.6.2 Simulierte Umformkräfte und thermomechanische Werkzeugbelastungen

Abb. 7.35 zeigt die Temperaturentwicklung des am höchsten thermisch beanspruchten Werkzeuges, des Unterstempels, bei einer Umformgeschwindigkeit von 5 mm/s und einer Abkühlphase von 10 s zwischen zwei Hüben. Als Werkzeugwerkstoff wird ein Warmarbeitsstahl und eine Si₃N₄-Keramik verwendet.

Die Keramik erwärmt sich in den ersten Hüben aufgrund ihrer kleineren spezifischen Wärme mehr als der Stahl. Nach ca. 10 Hüben wird ein stationärer Bereich erreicht. Sowohl das Stahlwerkzeug als das Keramikwerkzeug würden eine Temperatur um 1400 °C aufweisen. Diese Temperatur ist sowohl für Warmarbeitsstahl (Schmelzpunkt ab ca. 1200 °C) als auch bei Si₃N₄-Keramik zu hoch (Oxidation und Phasenumwandlung).

Ohne weitere Maßnahmen zur Abkühlung der Werkzeuge zwischen zwei Hüben ist bei diesen langen Kontaktzeiten (19 s) sowohl Stahl als Keramik für einen Serienbetrieb als auch Werkzeugwerkstoff ungeeignet.

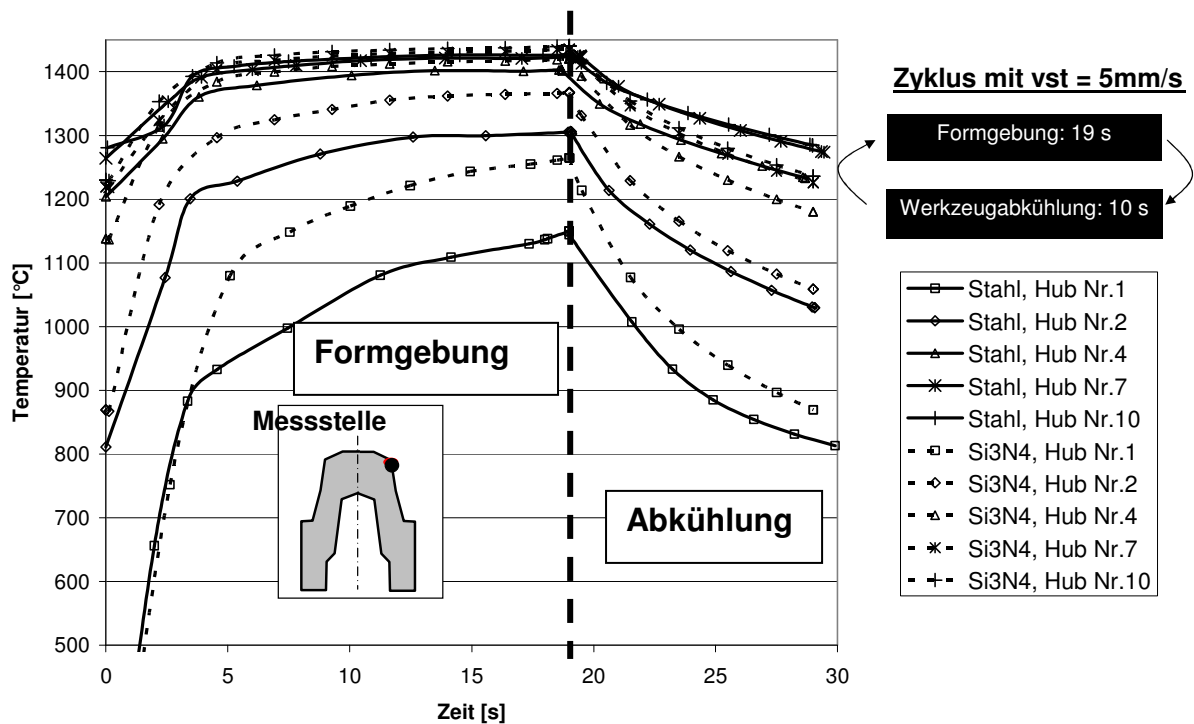


Abb. 7.35: Simulierte Temperaturentwicklung an einer kritischen Stelle des Unterstempels aus Si_3N_4 – Keramik und Stahl bei einer Stempelgeschwindigkeit von 5 mm/s im Dauerbetrieb

Bei einer höheren Verfahrensgeschwindigkeit von 150 mm/s (Abb. 7.36) sind die Kontaktzeiten zwischen Werkzeug und Bauteil gering (ca. 0,7 s) und die Werkzeugabkühlzeit dagegen relativ gesehen groß.

Wie bei einer langsamen Umformung erwärmt sich das keramische Werkzeug bei einer schnelleren Umformung mehr als das Stahlwerkzeug.

Nach dem ersten Hub wird eine maximale Werkzeugtemperatur von ca. 780 °C im Stahlwerkzeug und ca. 900 °C im Keramikwerkzeug erreicht. Nach der Abkühlphase von 10 s liegen die Werkzeugtemperaturen von Stahl- und Keramikwerkzeug wieder auf ähnlichem Niveau. Aufgrund der geringen spezifischen Wärmekapazität erwärmt sich die Keramik schnell kühlt aber auch schnell ab.

Nach 10 Hüben sind die maximalen Temperaturen an der Oberfläche des Unterstempels bei Stahl und Keramik ähnlich hoch (ca. 1200 °C). Bei dieser Temperatur kann Si_3N_4 noch verwendet werden, wogegen sich Warmarbeitsstahl

bereits im Schmelzbereich befindet. Da Warmarbeitsstahl bei Temperaturen um ca. 1250 – 1300 °C schmilzt wurden die Simulationen bei Erreichen dieser Temperatur (Hub Nr.30) angehalten.

Nach 40 Hügen (ca. 7 min) wird die maximale Temperatur von 1300 °C für keramische Werkzeuge erreicht. Die Temperatur nach der Abkühlphase liegt oberhalb von 1000 °C.

In Abb. 7.37 sind die maximalen Temperaturen an der Oberfläche des Unterstempels zusammenfassend dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass Stahlwerkzeuge für die Thixoumformung nicht geeignet sind. Die besten Ergebnisse werden mit keramischen Werkzeugen und hohen Umformgeschwindigkeiten erreicht.

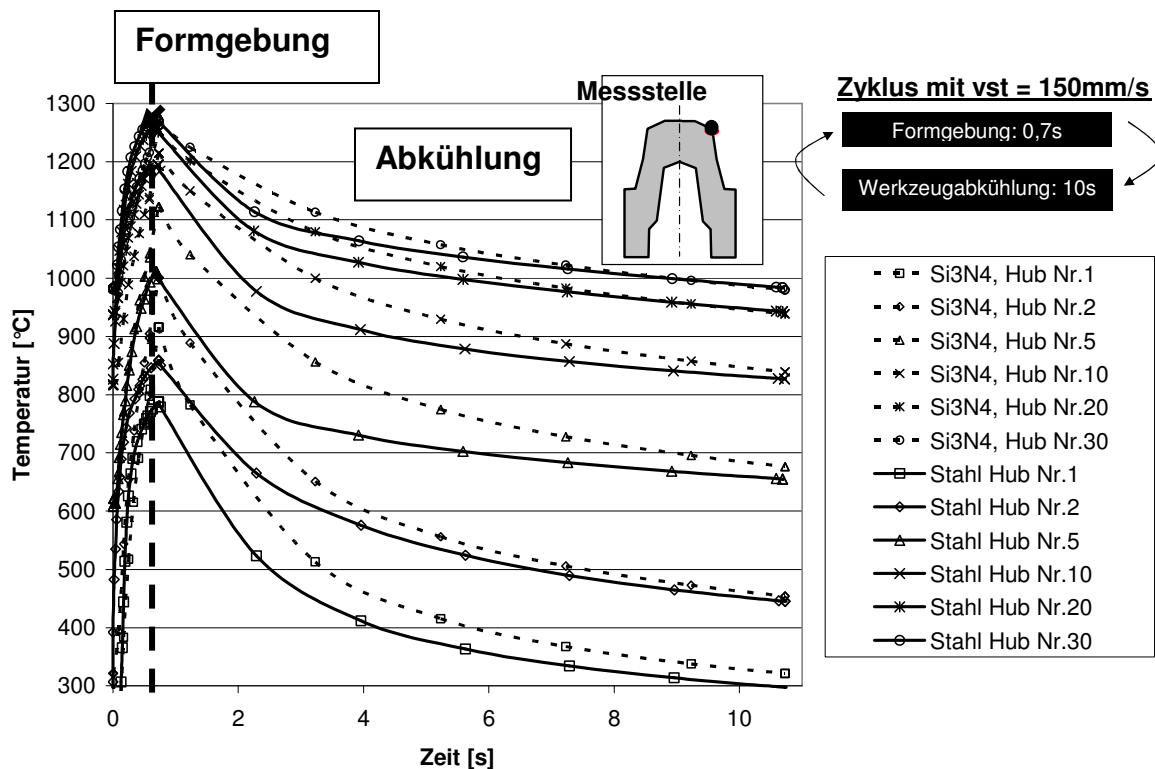


Abb. 7.36: Simulierte Temperaturentwicklung an einer kritischen Stelle des Unterstempels aus Si_3N_4 – Keramik und Stahl bei einer Verfahrensgeschwindigkeit von 150 mm/s nach mehreren Hügen

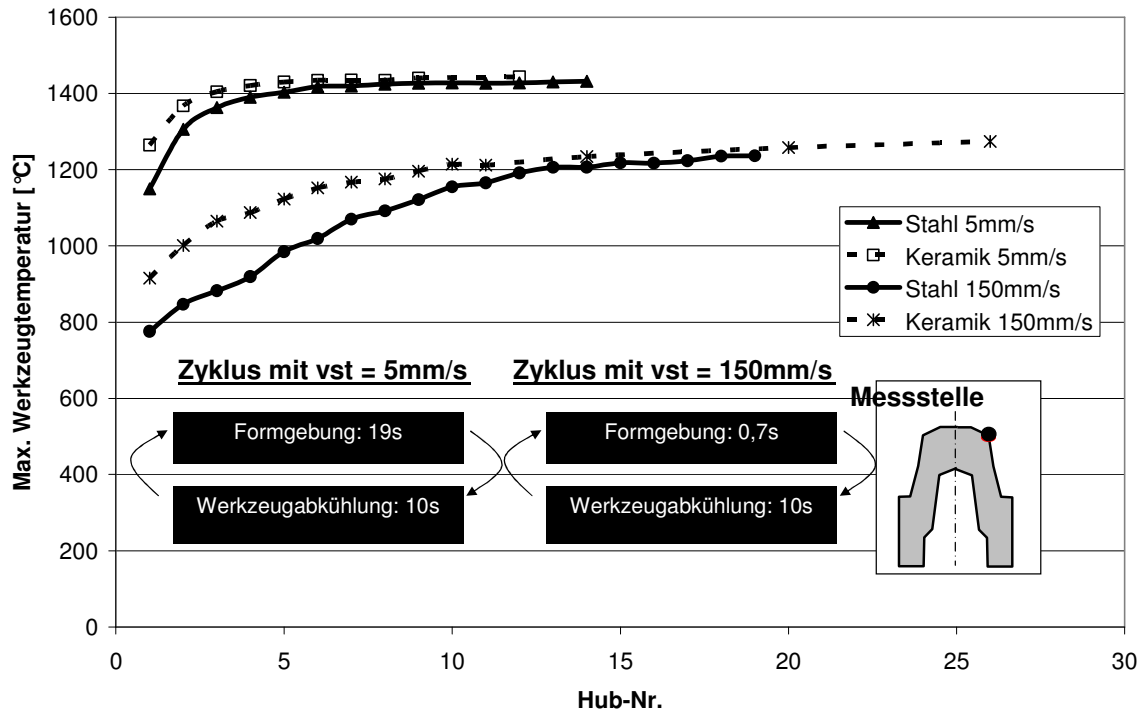


Abb. 7.37: Maximale Temperatur im Unterstempel in Abhängigkeit von dem Werkzeugwerkstoff, von der Verfahrensgeschwindigkeit und von der Hubzahl.

Zur Verbesserung der Werkzeugstandzeiten müssen Werkzeuge mit integrierten Kühlsystemen entwickelt werden. Abkühlungen durch Sprühen von flüssigen Medien an der Oberfläche der keramischen Werkzeuge sollte vermieden werden, da Keramik gegen zyklische thermische Schwankungen sehr empfindlich ist.

8 Charakterisierung von thixogeschmiedeten Radnaben

In diesem Kapitel werden die Eigenschaften von thixogeschmiedeten Bauteilen (Tab. 8.1) verglichen, die mit und ohne Prozessoptimierungen (gezieltes Abkühlen nach dem Erwärmen) hergestellt wurden.

Tab. 8.1: Prozessparameter der untersuchten thixogeschmiedeten Bauteile aus dem Stahl 46MnVS3

Bauteil-Nr.	Bauteilart	Gezielte Abkühlung	Temperatur		Werkzeug	
			Rand [°C]	Mitte [°C]	Werkstoff	Temperatur [°C]
4	Seriennahe Radnabe	Nein	1459	1445	1.2999	40
6	Seriennahe Radnabe	Nein	1473	1459	Si ₃ N ₄	80
10	Seriennahe Radnabe	Nein	1470	1460	Si ₃ N ₄	180
11	Seriennahe Radnabe	Nein	1450	1435	Si ₃ N ₄	180
24	Seriennahe Radnabe	Nein	1440	1420	1.2999	150
34	Rotationssymmetrische Radnabe	Ja	1420	1400	1.2999 beschichtet	130

8.1 Sichtprüfung und makroskopischer Befund

Auffälligster Fehler bei Bauteilen, die ohne gezielter Abkühlung hergestellt wurden, ist die makroskopische Porosität bzw. eine ungenügende Formfüllung im Tellerbereich und ein grob zweiphasiger Bereich vor allem im oberen Randbereich des Schaftes (Abb. 8.1).

Die ohne gezielte Abkühlung hergestellten Bauteile (Nr. 4 bis 24) zeigen folgende gravierende makroskopische Fehler:

- Lunker (Abb. 8.2)
- Poren (Abb. 8.3)
- Eine ungenügende Formfüllung (Abb. 8.4)
- Grob zweiphasige Bereiche (Abb. 8.5)

Die ohne gezielte Abkühlung thixogeschmiedeten Bauteile weisen typische Gussbauteilfehler auf. Die am Anfang der Umformung aus dem Bolzen herausgepressten Schmelze wird zum Ende der Formgebung wieder umflossen. Es entstehen grob zweiphasige Bereiche und Lufteinschlüsse im Bauteil.

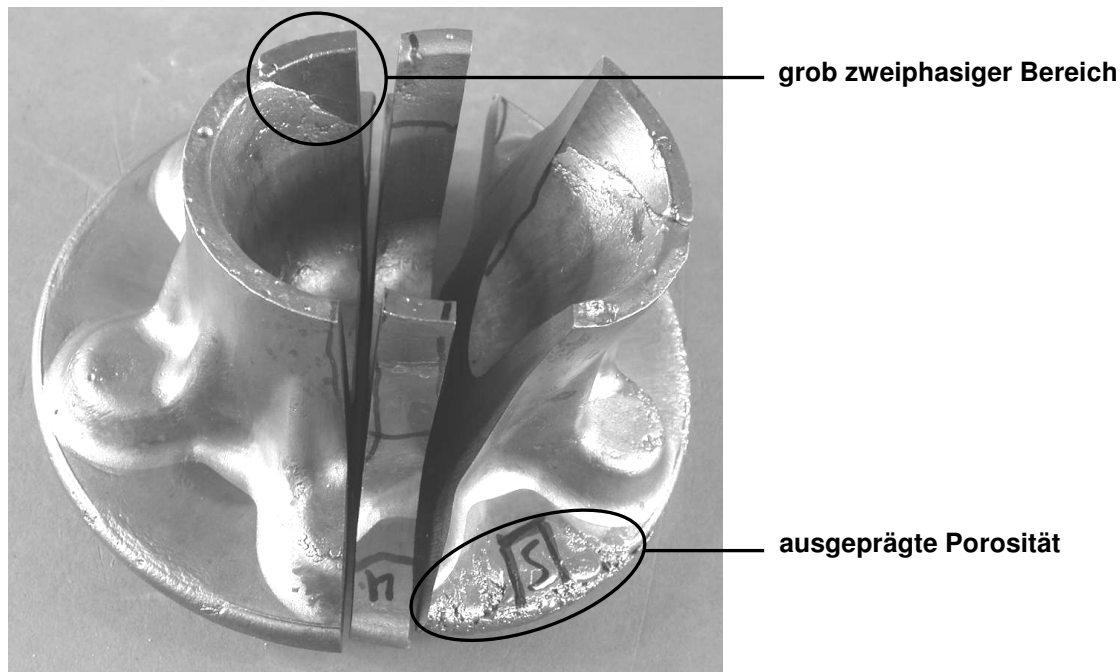
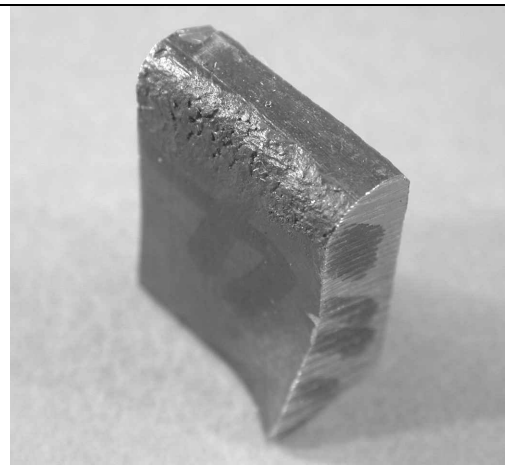
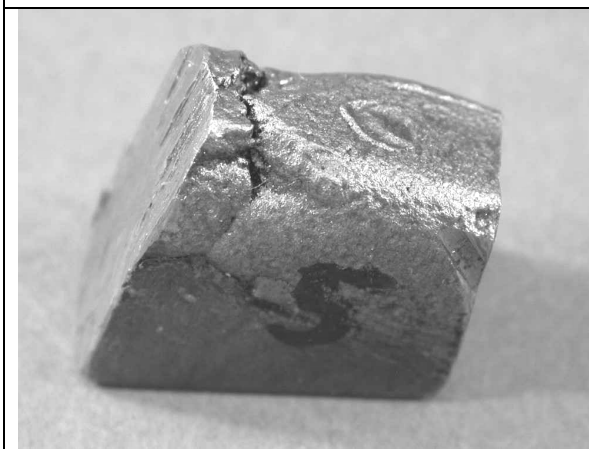


Abb. 8.1: Ausgeprägte Porosität im Tellerbereich und grob zweiphasiger Bereich im oberen Randbereich des Schaftes (Ohne Prozessoptimierung)

Thixogeschmiedete Bauteile dürfen auf keinen Fall solche grobe Fehler haben. Deshalb muss z.B. mit der Methode der gezielten Abkühlung das Herauspressen der Schmelze verhindert werden.

**Abb. 8.2: Lunker****Abb. 8.3: Poren****Abb. 8.4: Ungenügende Formfüllung****Abb. 8.5: Grob zweiphasiger Bereich**

Bei der visuellen Sichtprüfung der mit gezielter Abkühlung hergestellten rotations-symmetrischen Radnabe Nr.34 (Abb. 8.6) zeigen sich nur vergleichsweise kleine Fehler an der Oberfläche. Eine ungenügende Formfüllung sowie ein „grob zweiphasiger Bereich“ treten in dieser Radnabe nicht auf.

Die an der Oberfläche erkennbaren Oberflächenunebenheiten sind vergleichbar mit denen von konventionell geschmiedeten Bauteilen. Die äußere Schale des Bauteiles ist zu jeder Zeit der Umformung im festen Zustand, so dass die Bauteiloberfläche die Qualität von geschmiedeten Bauteilen aufweist. Luft- und Oxideinschlüsse können in das Bauteil makroskopisch nicht eindringend, da die feste Bauteilschale jeder Zeit geschlossen bleibt.



Abb. 8.6: Mit der Methode der gezielten Abkühlung thixogeschmiedete Radnabe (Nr. 34)

8.2 Mechanische Untersuchungen

Tab. 8.1 gibt eine Übersicht der angewandten Untersuchungsmethoden an.

Tab. 8.2: Übersicht der durchgeführten mechanischen Prüfungen

Bauteil- Nr.	Härteprüfung	Zugprüfung	Kerbschlagversuch
11	X	X	X
24	X	X	X
34	X		

Härteverläufe im Teller-(Abb. 8.7) und Schaftbereich (Abb. 8.8) wurden für alle drei Proben durchgeführt.

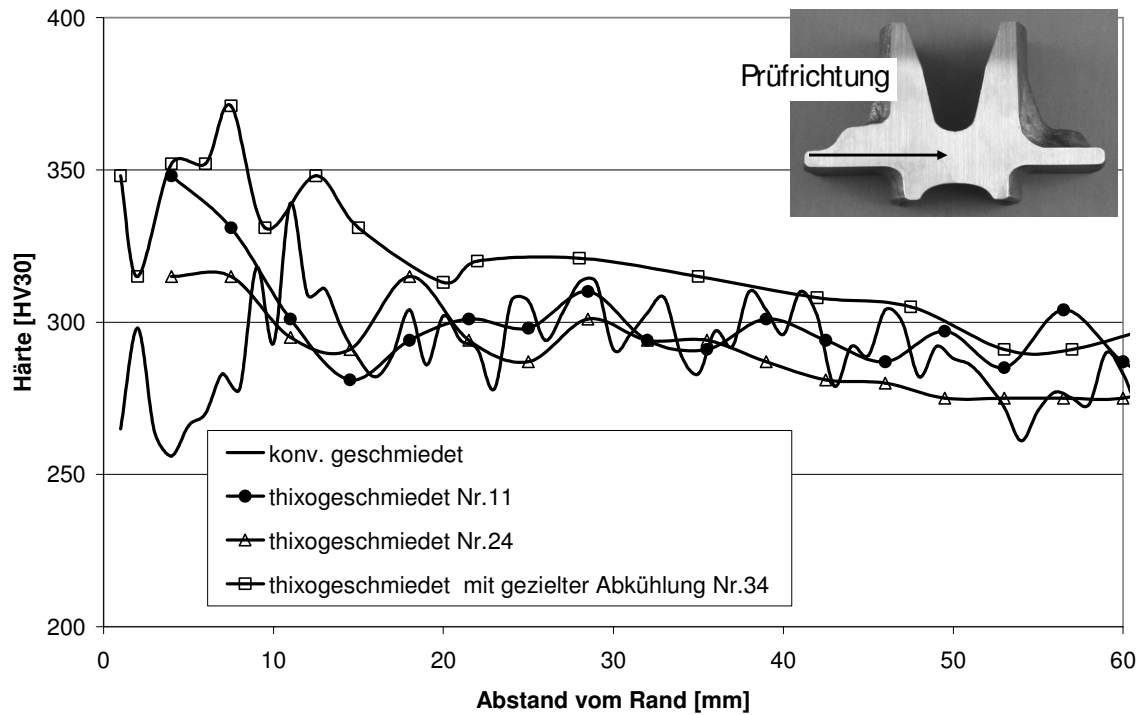


Abb. 8.7: Härteverläufe an thixogeschmiedeten und konventionell geschmiedeten Radnaben im Tellerbereich

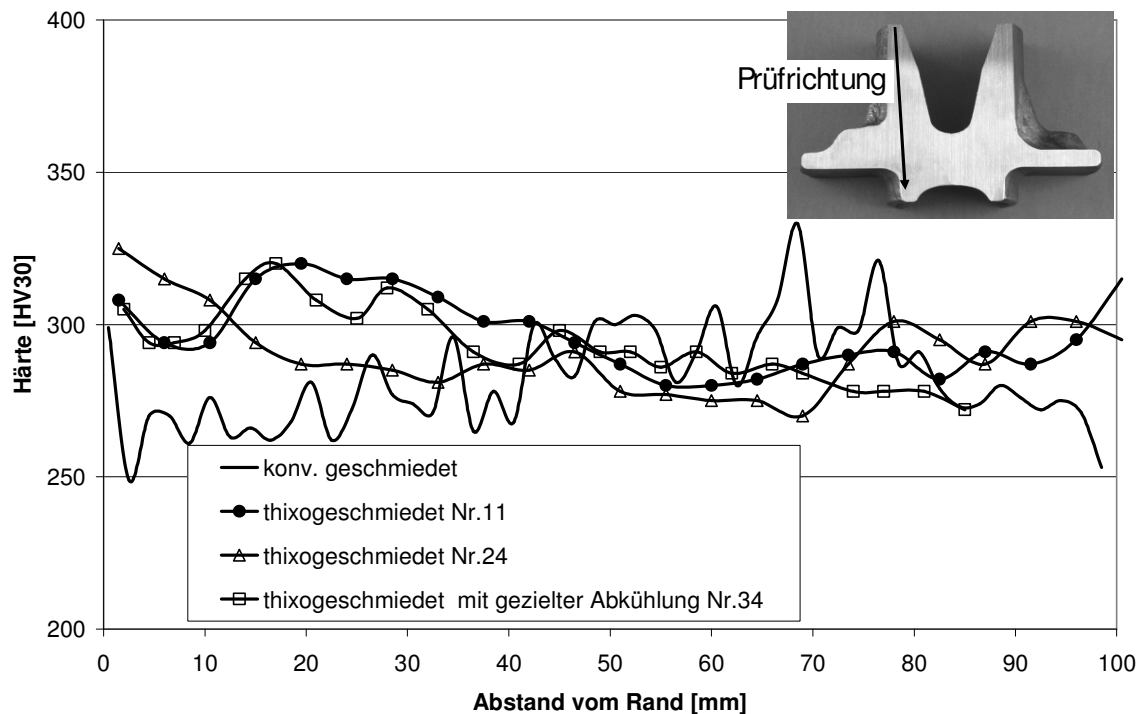


Abb. 8.8: Härteverläufe an thixogeschmiedeten und konventionell geschmiedeten Radnaben im Schaftbereich

Im Mittel beträgt die Härte etwa 300 HV 30 sowohl für die konventionell geschmiedete als auch die thixogeschmiedeten Radnaben. Tendenziell liegen die Härtewerte des Randbereiches etwas höher, in den massiveren Bereichen zur Nabenmitte hin tendenziell unter 300 HV. Diese Ergebnisse können durch von unterschiedlichen Abkühlgeschwindigkeiten erklärt werden. Im Abschnitt „Gefügeuntersuchungen“ werden die dazugehörigen Gefüge untersucht.

Zugproben wurden durch Drahterodieren im Teller (Abb. 8.9) - und Schaftbereich (Abb. 8.10) entnommen.

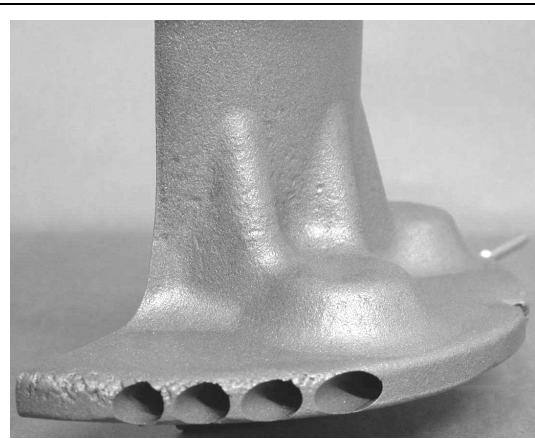


Abb. 8.9: Probenentnahme von Zugproben aus dem Tellerbereich

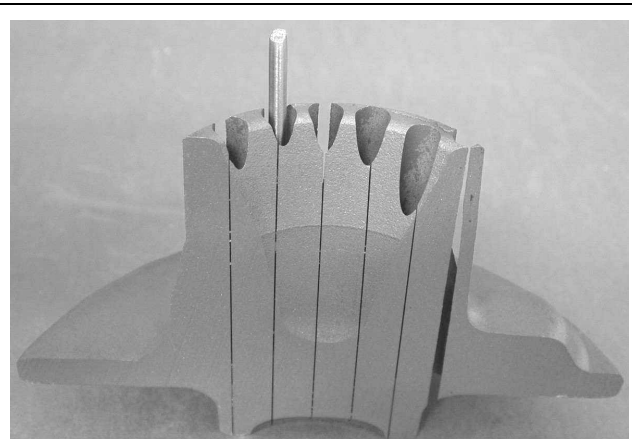
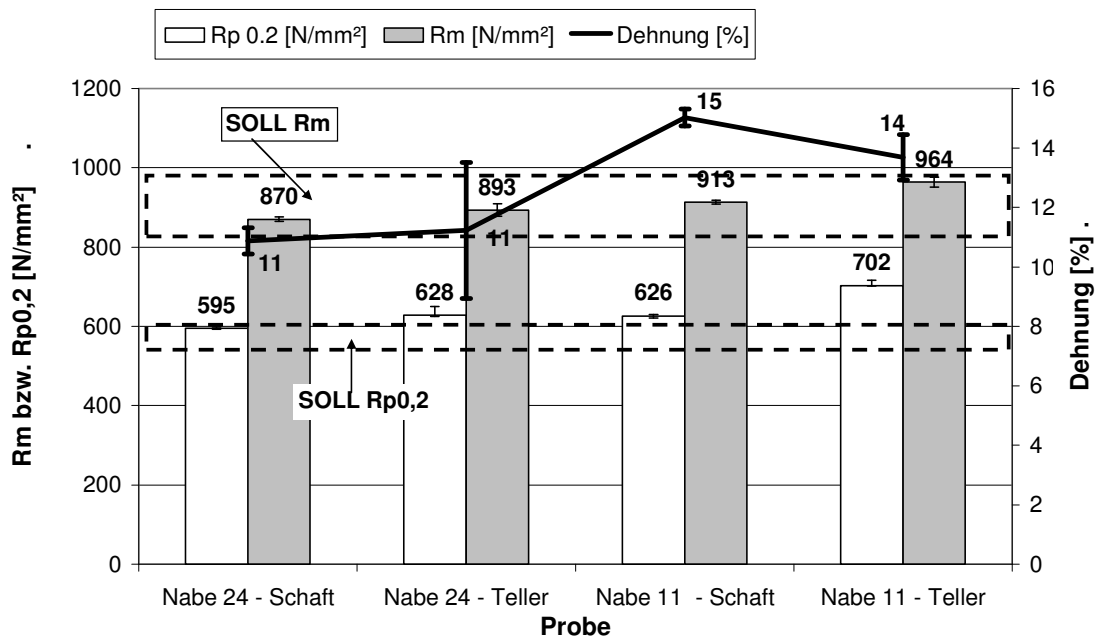


Abb. 8.10: Probenentnahme von Zugproben aus dem Schaftbereich

Der Vergleich der mechanischen Eigenschaften aus dem Zugversuch (Abb. 8.11) zeigt, dass die Eigenschaften im thixogeschmiedeten und im geschmiedeten Zustand nahezu deckungsgleich sind; im Vergleich zum gegossenen Zustand liegen die Streckgrenze, die Bruchdehnung und das E-Modul der thixogeschmiedeten Nabe noch günstiger.



Die Dehngrenze Rp0,2, die Festigkeit und die Dehnung sind gemittelte Werte aus 4 bis 6 Proben.

Abb. 8.11: Ergebnisse der Zugversuche der Radnabe Nr. 24 und 11

Tab. 8.3 gibt einen tabellarischen Vergleich der mechanischen Eigenschaften aus dem Zugversuch von konventionell geschmiedeten, thixogeschmiedeten und gegossenen Bauteilen an.

Tab. 8.3: Vergleich der mechanischen Eigenschaften aus dem Zugversuch: Schmieden, Thixoschmieden und Gießen.

	Schmieden	Thixoschmieden	Gießen
Werkstoff	38MnVS5	46MnVS3	ASTM 897M Grade 850/550/10
R_m [N/mm²]	850 - 1000	850 - 1000	> 900
R_{p0,2} [N/mm²]	650	650	550
A₅ [%]	10-20	10- 15	7- 12
E [GPa]	205	205	180

Im Vergleich zur gegossenen ADI- Sorte ASTM 897M Grade 850/550/10 weisen konventionell und thixogeschmiedete Bauteile eine wesentlich höhere Streckgrenze und ein höheres E-Modul auf. Zur Erreichung der gleichen mechanischen

Eigenschaften (Steifigkeit) können geschmiedete und thixogeschmiedete Bauteile kleiner als gegossene Bauteile dimensioniert werden.

Aus den Radnaben Nr.11 und 24 wurden 8 verschieden orientierte Probengeometrien mittels Drahterodieren herausgetrennt. Aus der drahterodierten großen Probe wurden dann wiederum 8 Kleinstbiegeproben KLST nach DIN 50 115 herausgetrennt und dann auf Maß geschliffen. Der Kerb wurde gefräst (Abb. 8.12).

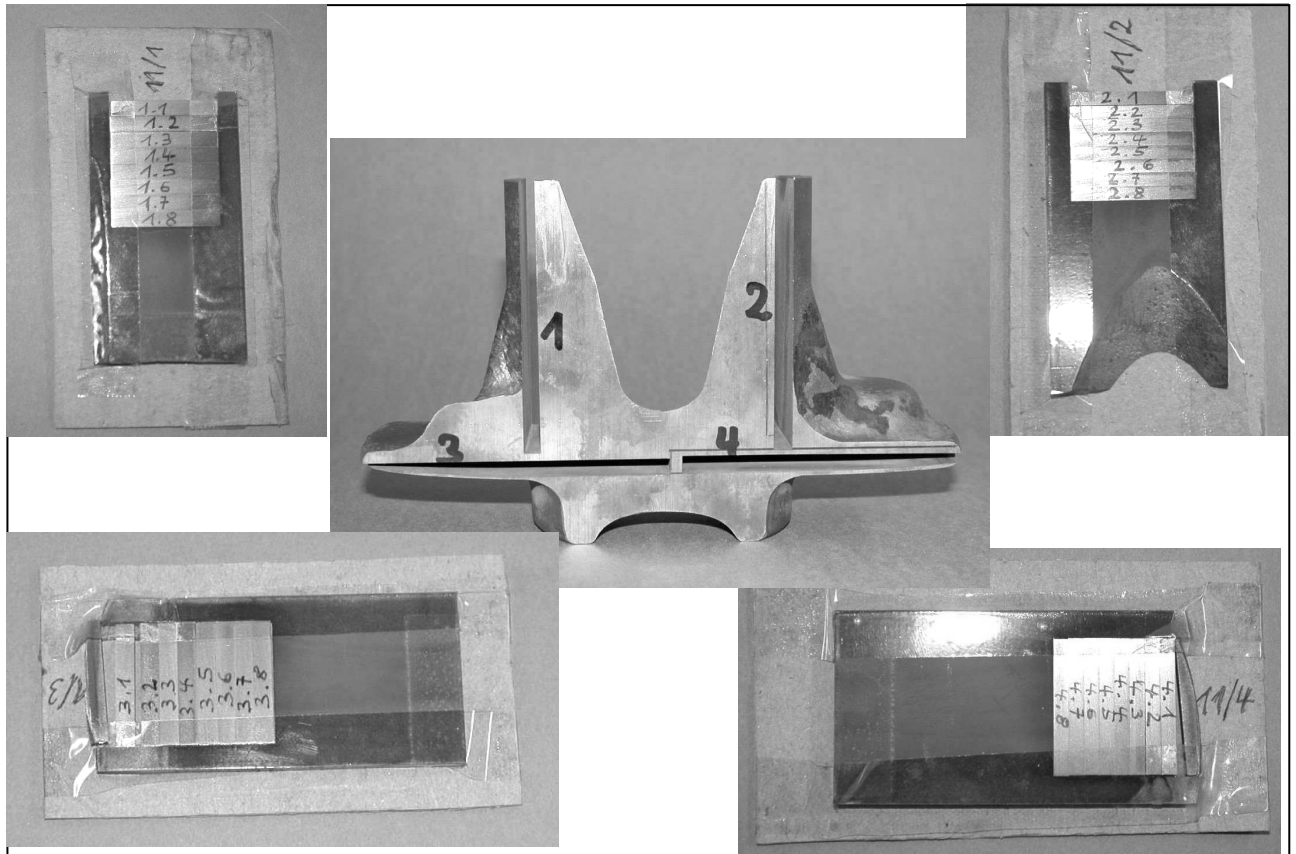


Abb. 8.12: Lage und Kerborientierung der Kerbschlagproben (Nabe Nr. 11 und 24)

Die Probenlage im Bauteil und die Orientierung des Kerbs wurden dokumentiert, da dadurch die Beanspruchungsrichtung in der Prüfung vorgegeben ist. Die Kerbschlagzähigkeit ist stark von der Geometrie und dem Querschnitt der Probe abhängig. Vergleichbar sind nur Kerbschlagzähigkeitswerte bei absolut gleichen Probengeometrien und gleichen Kerbgeometrien. Die Kerbschlagzähigkeit ist bezüglich der Rissempfindlichkeit eines Werkstoffs eine sehr scharfe Prüfung und zeigt vor allem an kleinen Probenquerschnitten sehr schnell inhomogene Bereiche im Werkstoff auf.

Die Prüfungen wurden an einem Tischpendelschlagwerk von der Fa. Zwick Typ: 5102 mit einer Schlagarbeit von 2 J durchgeführt.

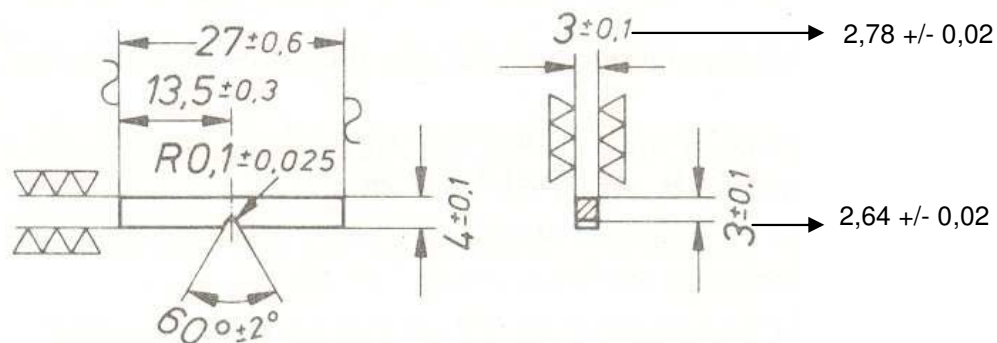


Abb. 8.13: Verwendete Probengeometrie KLST DIN 50115

Die Ergebnisse der Kerbschlagprüfung sind der Abb. 8.14 zu entnehmen.

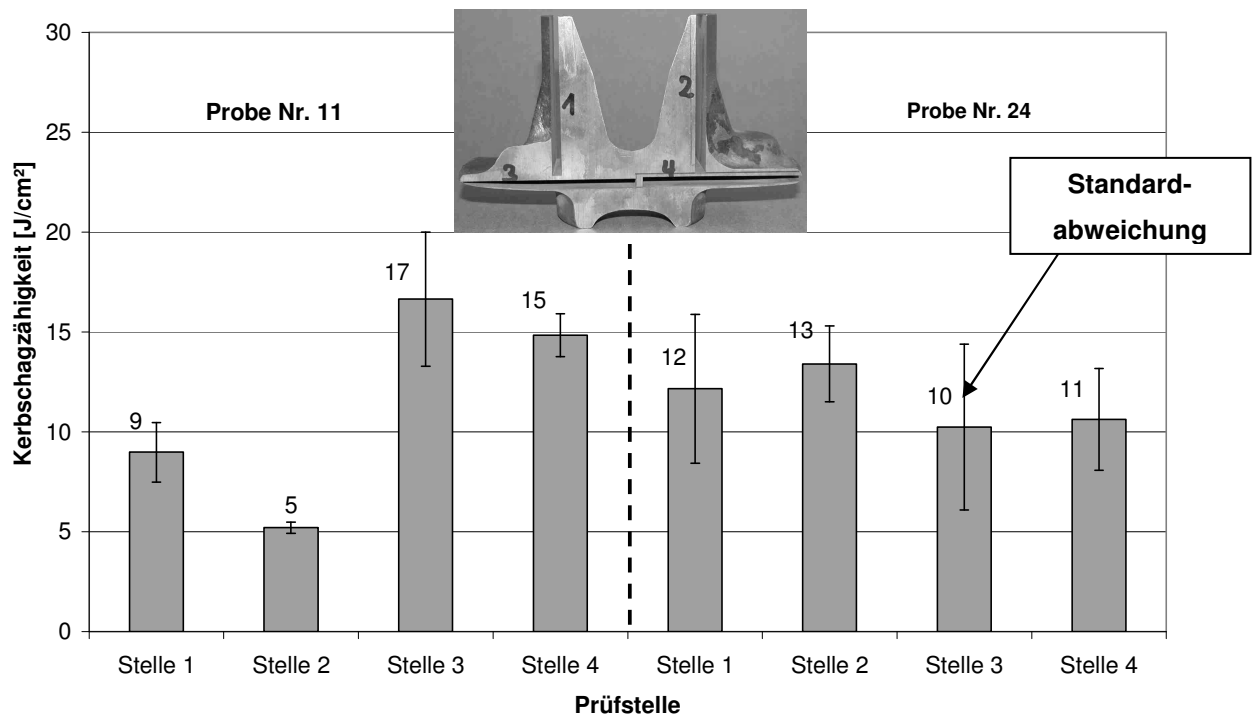


Abb. 8.14: Ergebnisse der Kerbschlagversuche bei Raumtemperatur

Die Ergebnisse der Kerbschlagprüfung an der Radnabe Nr.11 fallen im Schaftbereich (Stelle 1 und 2) wesentlich geringer aus als die im Tellerbereich (Stelle 3 und

4). Während die Zähigkeit im Mittel bei ca. 7 J/cm² liegt, beträgt der Mittelwert im Tellerbereich etwa bei 16 J/cm².

Bei der Probe Nr. 24 liegen die Werte der Kerbschlagzähigkeit im Teller- und Schaftbereich auf ähnlichem Niveau (10 bis 13 J/cm²).

Eine klare Abhängigkeit der Schlagzähigkeit von Probenlage und Kerborientierung konnte nicht abgeleitet werden. Ganz offensichtlich wird die Zähigkeit durch den zufällig im Kerbgrund vorliegenden Gefügestand bestimmt.

8.3 Metallographische Untersuchungen

Die ohne Prozessoptimierung hergestellten Radnaben weisen im äußeren Bereich des Tellers Lunker auf. Auch in Bereichen, die makroskopisch in Ordnung sind, zeigt sich im Mikrogefüge Porosität (Abb. 8.15). Ein anderes Merkmal, das in allen untersuchten Naben auftritt und im nicht geätzten Schlibbild leicht zu erkennen ist, sind die zeilig angeordneten nichtmetallischen Einschlüsse (Schlakeneinschlüsse, Zunder), wie in Abb. 8.16 exemplarisch zu sehen. Diese Einschlüsse sind vermutlich Folge des Umformprozesses selbst, wo zunderbehaftetes Material von der ehemaligen Bolzenoberfläche in das Bauteil transportiert und dort die Fließrichtung des Materials markiert.

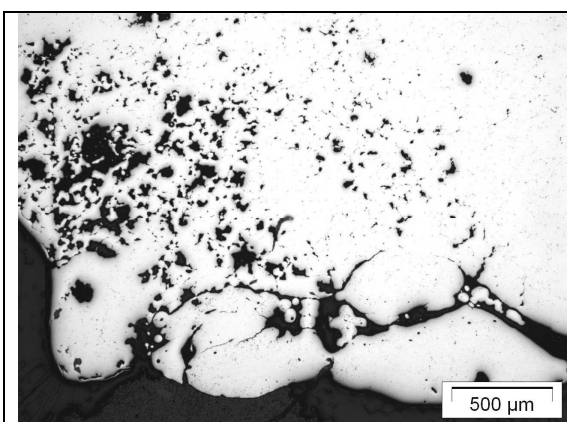


Abb. 8.15: Poren und Lunker im Randbereich des Tellers (50x)

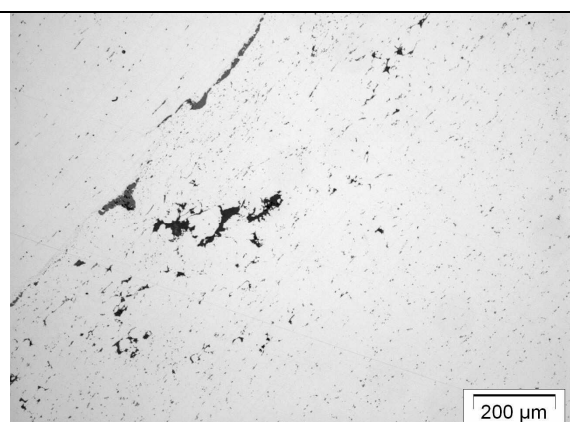
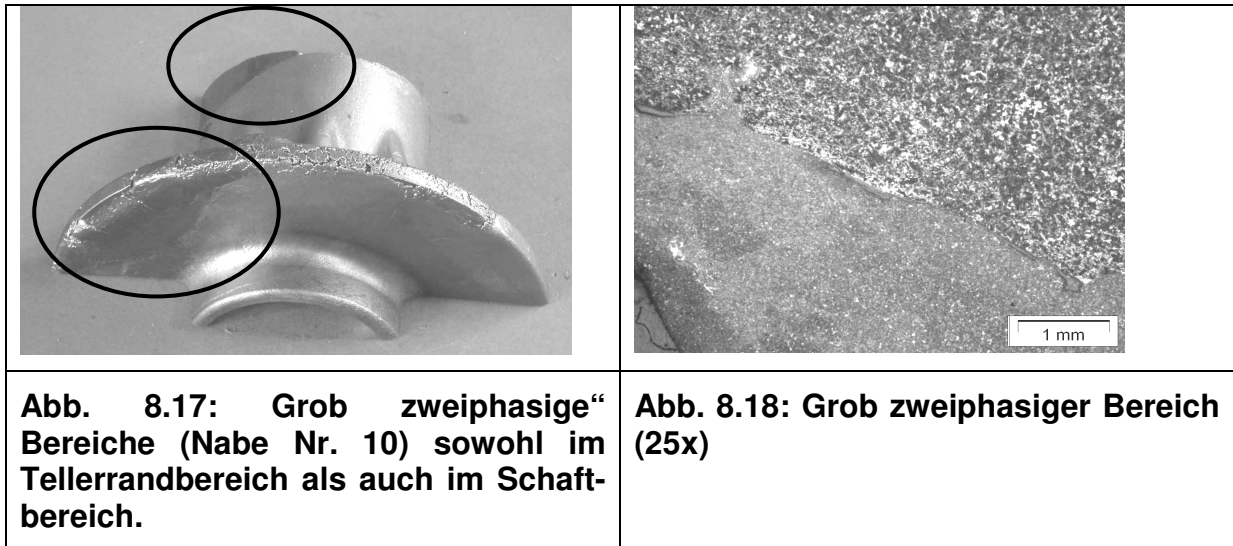


Abb. 8.16: Nichtmetallische Einschlüsse (z.B. Zunder) in zeiliger Anordnung (x100)

Die Zweiphasigkeit, die an manchen Stellen mit bloßem Auge erkennbar ist (Abb. 8.17), bestätigt sich auch unter dem Mikroskop (Abb. 8.18). Hier sind zwei ganz unabhängige Bestandteile durch eine scharfe Phasengrenze voneinander abgegrenzt, die über weite Strecken sogar durch einen Spalt getrennt sind.



In diesem grob zweiphasigen Bereich treten darüber hinaus nichtmetallische Gefügebestandteile auf. Hier handelt es sich neben Zunder vor allem um Schlacke, die sich aus den ehemals schmelzflüssigen Bereichen abgesondert hat, zu erkennen in Abb. 8.19 als graue Gefügebestandteile.

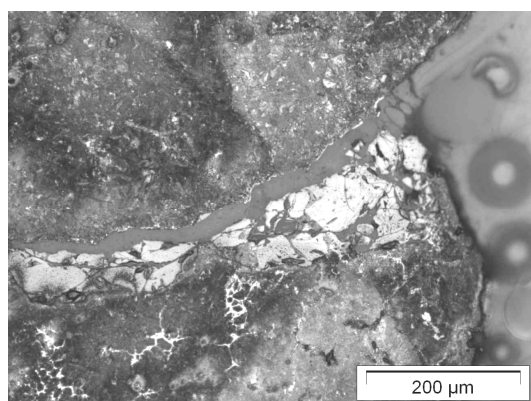


Abb. 8.19: Anhäufung von nichtmetallischen Einschlüssen (200x)

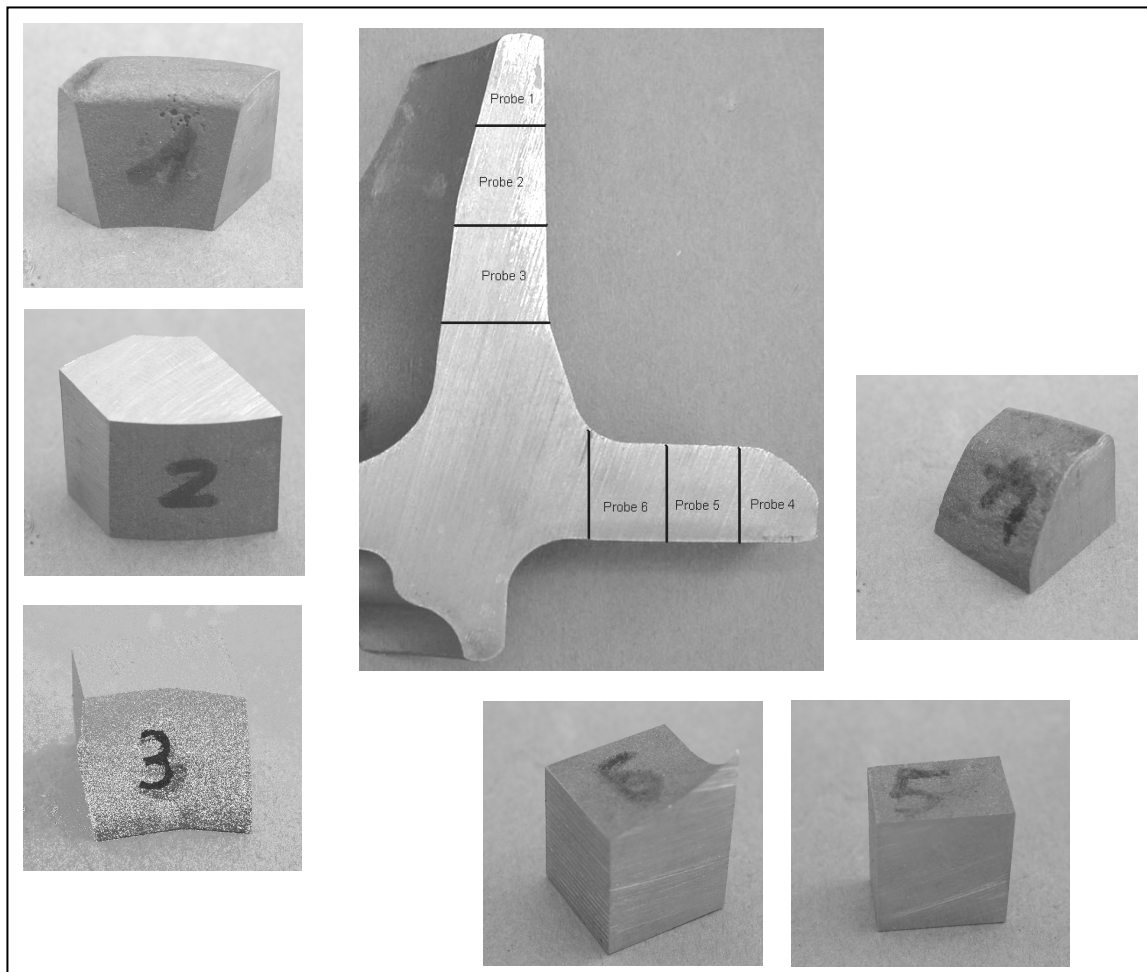


Abb. 8.20: Probenentnahme aus Schaft- und Tellerbereich einer mit prozessoptimierten Parametern thixogeschmiedete Radnabe für die Schliifherstellung

Die mit prozessoptimierten Parametern hergestellte Radnabe Nr.34 zeigt nur an einigen, wenigen Stellen kleine Lunker im äußeren Bereich von Teller und Schaft (Abb. 8.21, Abb. 8.22 und Abb. 8.23). Im Innern der Nabe sind diese nicht zu finden, allerdings sind hier feine, zeilige nichtmetallische Einschlüsse (z.B. MnS) erkennbar (Abb. 8.24).

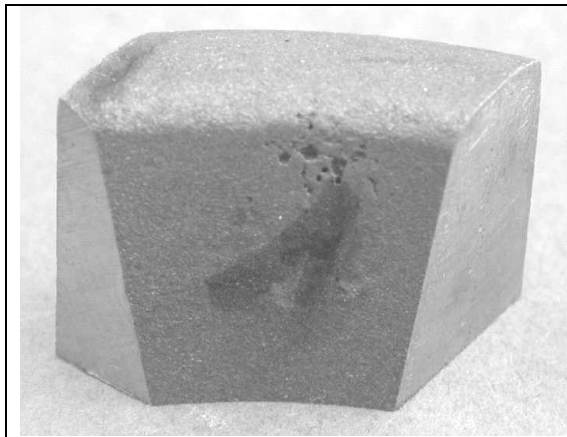


Abb. 8.21: Porenansammlung an der Oberfläche

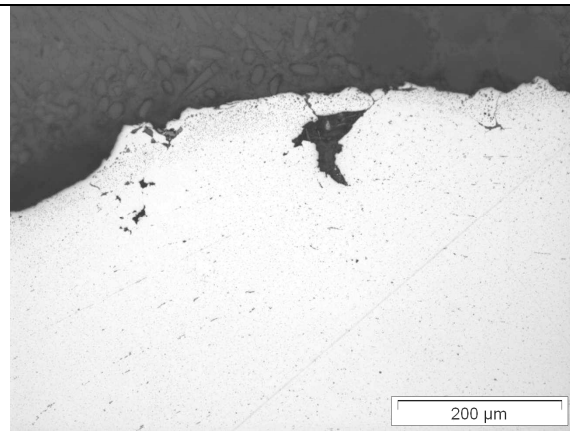


Abb. 8.22: Lunker im Randbereich

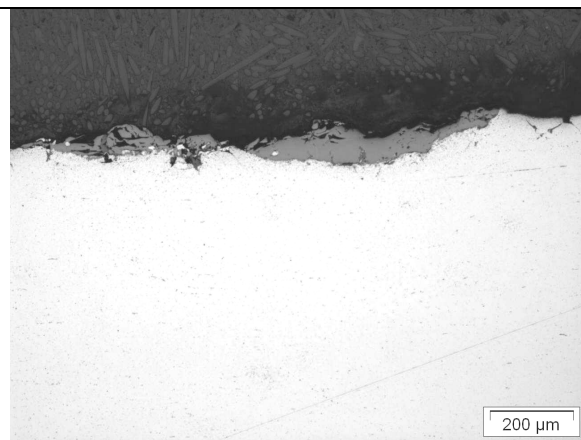


Abb. 8.23: Schlackenbildung am Rand

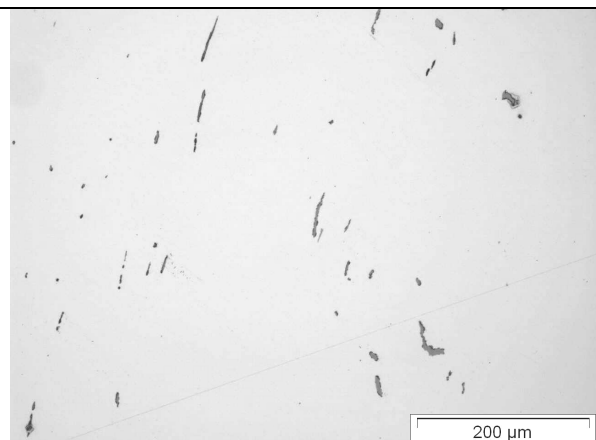


Abb. 8.24: Mn-S Sulfidausscheidungen

Es treten folgende Grundgefüge auf, die mit der Abkühlgeschwindigkeit korreliert werden können:

- Bainit (Abb. 8.25),
- Martensit (Abb. 8.26),
- Perlit und Ferrit (Abb. 8.27),
- Ledeburit (nur für die Radnabe Nr. 34) (Abb. 8.28).

In der Regel treten Mischformen des Gefüges auf, d.h. es liegen mehrere Phasenbestandteile nebeneinander vor. In Nabe Nr. 34 tritt ein neues Phänomen auf: auf der Oberfläche bildet sich eine dünne, über weite Bereiche der Bauteiloberfläche dicht durchziehende Schicht von Ledeburit, also von einem eutektischen Gussgefüge.

Diese Ledeburitausbildung besitzt folgende Merkmale:

- Dünne Ledeburitschicht, die maximal eine Schichtdicke von 0,3 mm einnimmt und große Anteile der Bauteiloberfläche überzieht,
- Das Ledeburitgefüge innerhalb dieser Schicht ist homogen (kein Mischgefüge),
- Unterhalb der Ledeburitschicht erscheint durchgehend ein Saum aus martensitisch- bainitischem Gefüge, das im Zusammenhang mit der Erstarrung des Ledeburit zu sehen ist.

Diese Phänomene sind dann zu verstehen, wenn während des Thixoform-Prozesses eine Reaktion stattfinden kann, bei der in Gegenwart von Kohlenstoff oder Stickstoff die Randschicht des Werkstückes lokal aufkohlen und nitriert werden kann.

In Gegenwart von Kohlenstoff (Stickstoff) wird bei längerer Haltezeit auf entsprechender Temperatur (ca. 1400 °C) die Oberfläche zunehmend Kohlenstoff aufnehmen, wodurch sich die Zusammensetzung sukzessive entlang der Liquiduslinie verändert, d.h. die Zusammensetzung verschiebt sich entlang der roten Linie in Abb. 8.29. Diese Aufkohlung bewirkt, dass Restschmelze so an Kohlenstoff angereichert wird, bis diese mit eutektischer Zusammensetzung erstarrt (Gusseisen!) und Ledeburit bildet, siehe Linie 1 in Abb. 8.29

Diese Aufkohlung wird möglicherweise durch die Verwendung von Graphit als Trennmittel bei diesem Versuch verursacht.

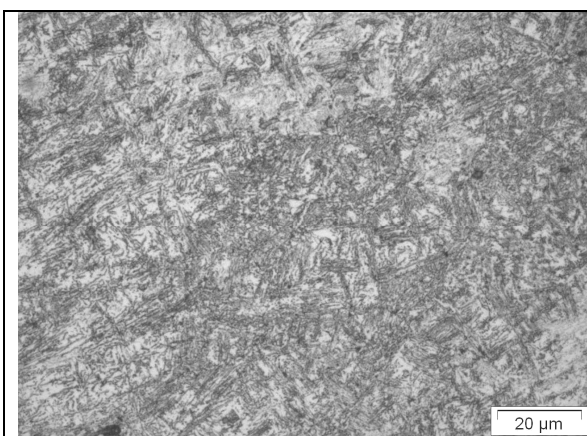


Abb. 8.25: Bainitisches Gefüge

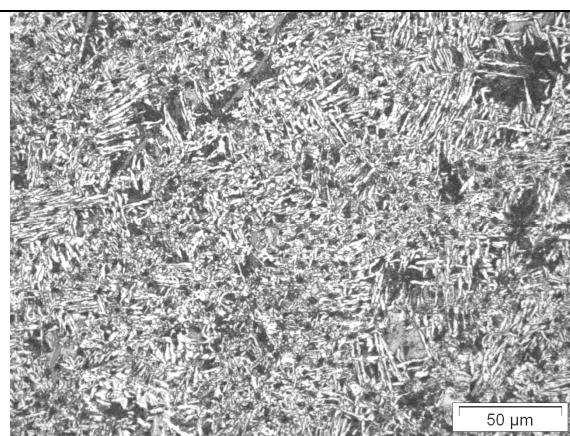


Abb. 8.26: Martensit mit Perlit (500x)

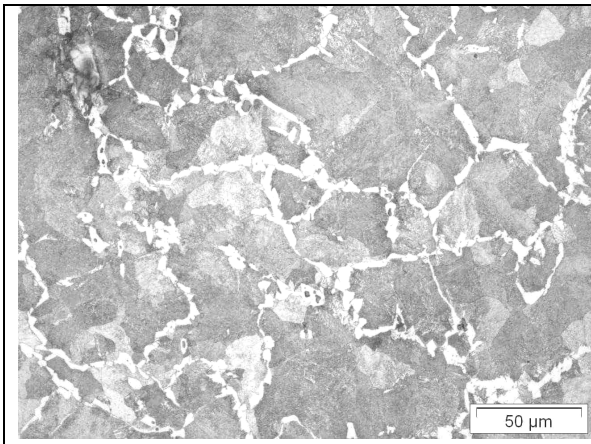


Abb. 8.27 Ferrit / Perlit Gefüge (500x)

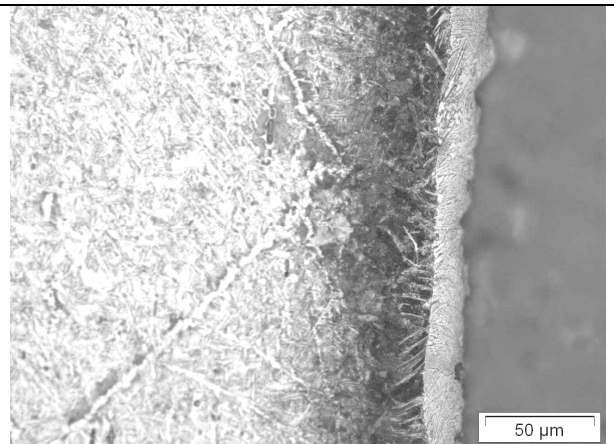


Abb. 8.28: Dünne Ledeburite Schicht, Martensitgefüge (500x)

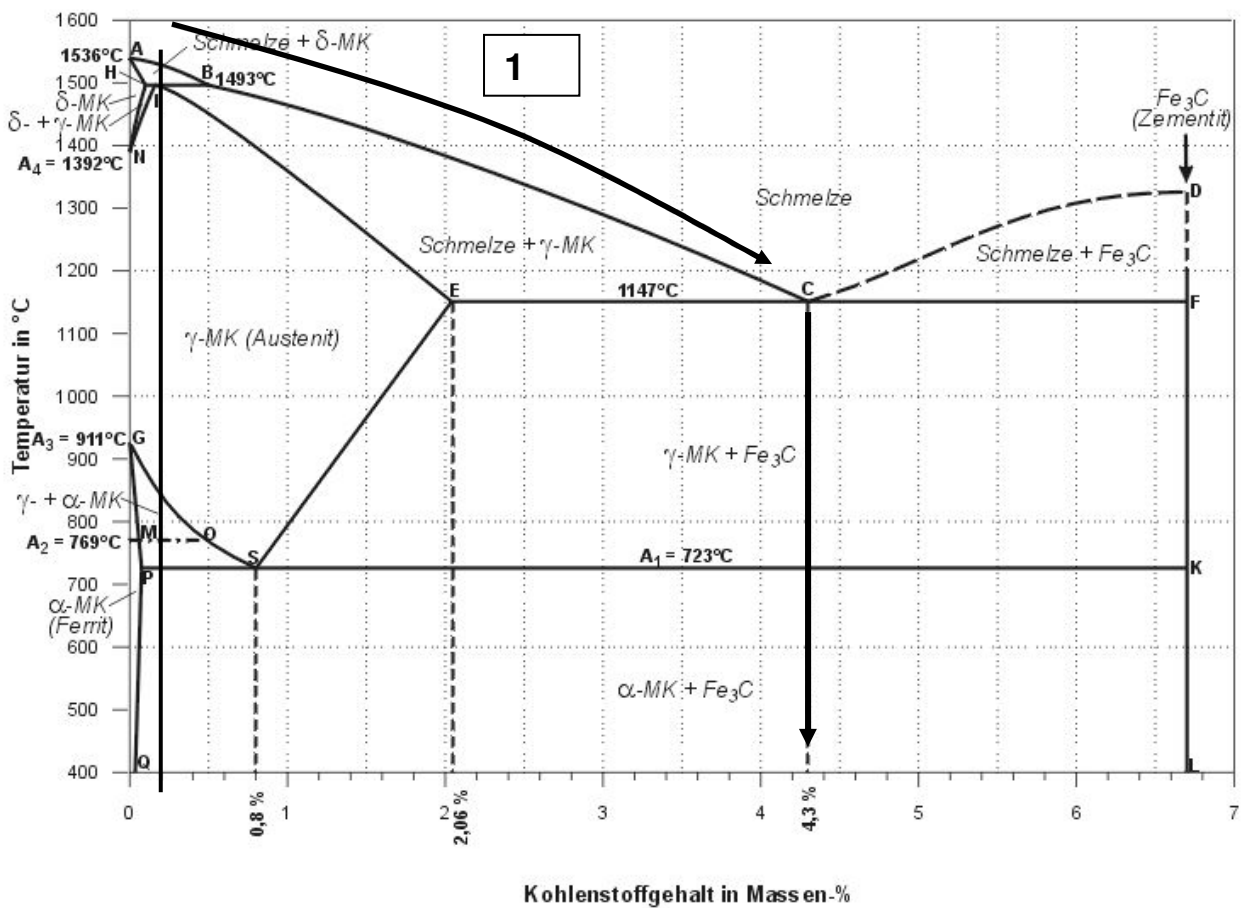


Abb. 8.29: Fe-C- Zustandsdiagramm. Eingezeichnet ist der untersuchte Werkstoff (grün) und der Pfad der Aufkohlung (rot) bis zur eutektischen Zusammensetzung (Erstarrung von Ledeburite, gelb)

8.4 Bewertung von optimierten thixogeschmiedeten Radnaben

Die mit optimierten Prozessparametern thixogeschmiedeten Radnaben (z.B. Nabe Nr.34) sind sehr homogen, erkennbare Fehlstellen sind erheblich kleiner und seltener als ohne Prozessoptimierung.

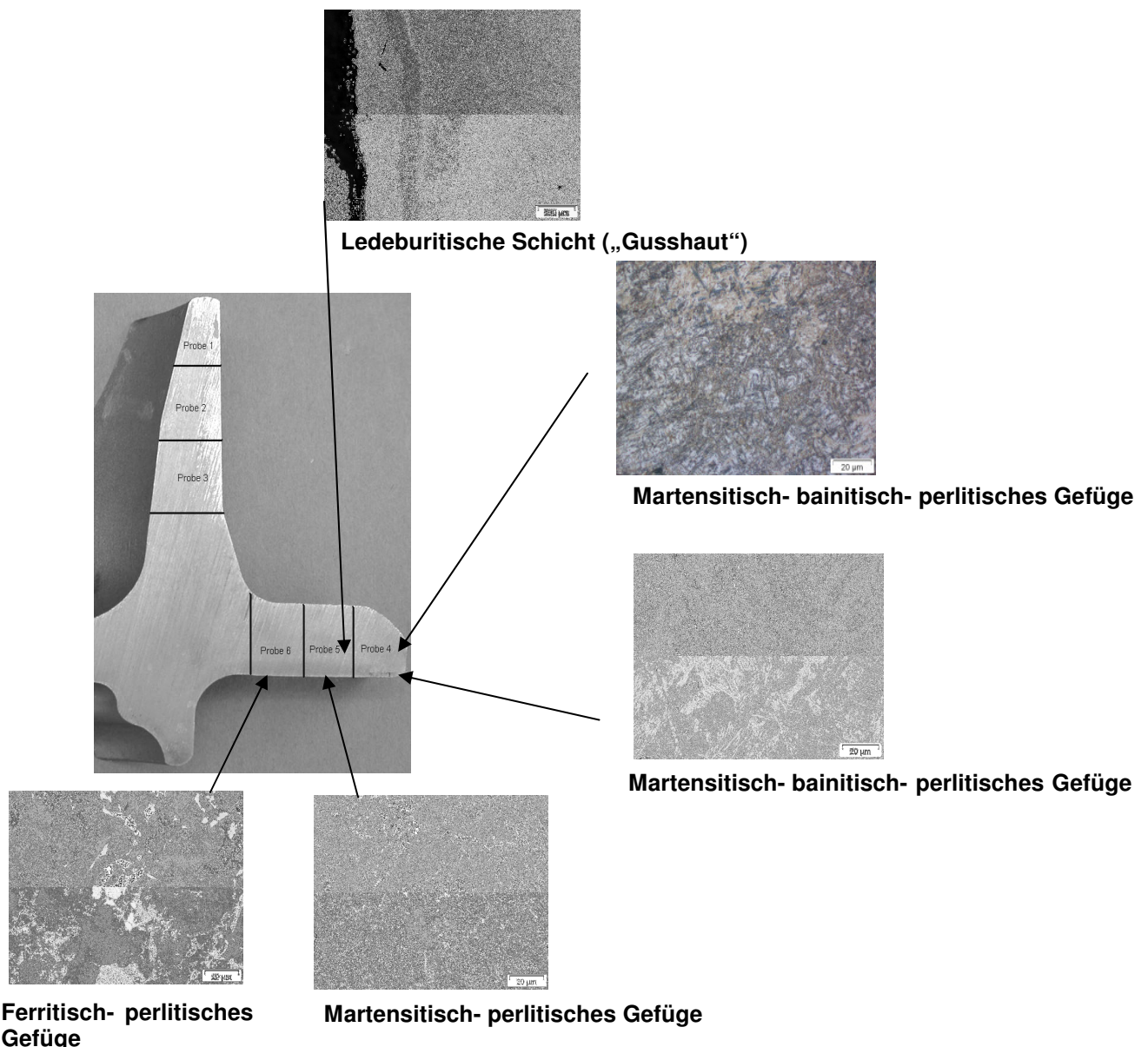


Abb. 8.30: Übersicht der typischen Gefügebereiche in einer mit prozess-optimierten Parametern hergestellte Radnabe

Die Gefügeausbildung entspricht weitgehend der dem früher untersuchten Gefüge und ist mit den unterschiedlichen Abkühlbedingungen zu korrelieren (Abb. 8.30). Die Härtemessungen ergeben die erwarteten Ergebnisse, die mit der Gefügeausbildung korrespondieren.

Die mechanischen Kennwerte von thixogeschmiedeten Bauteilen werden auch ohne nachträgliche Wärmebehandlung erreicht.

Durch Verwendung eines Kohlenstoffhaltigen Trennmittels (Graphit) bei der Umformung bildet sich im Bauteil eine mit Kohlenstoff angereicherte Zone aus hartem Ledeburit. Dadurch kann

Dieser Effekt könnte in Zukunft als integrierte Oberflächenhärtung durch Kohlenstoff oder Stickstoffanreicherung der Oberfläche während des Umformprozesses genutzt werden. Somit könnte die Prozesskette signifikant verkürzt werden.

9 Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen

9.1 Einsparpotentiale

Die in Abb. 9.1 dargestellte typische Kostenverteilung von komplexen Bauteilen wie Radnaben zeigt, dass der größte Teil mit 55 % der Herstellkosten in der Zerspanung liegt. Dies wird durch die hohen Bearbeitungszugaben und die großgehaltenen Radien an den Schmiederohlingen verursacht. Die Werkzeug-, Umform- und Werkstoffkosten entsprechen zusammen nur 45 % der Gesamtkosten. Ein großes Einsparpotential besteht daher für endkonturnahe, thixogeschmiedete Bauteile.

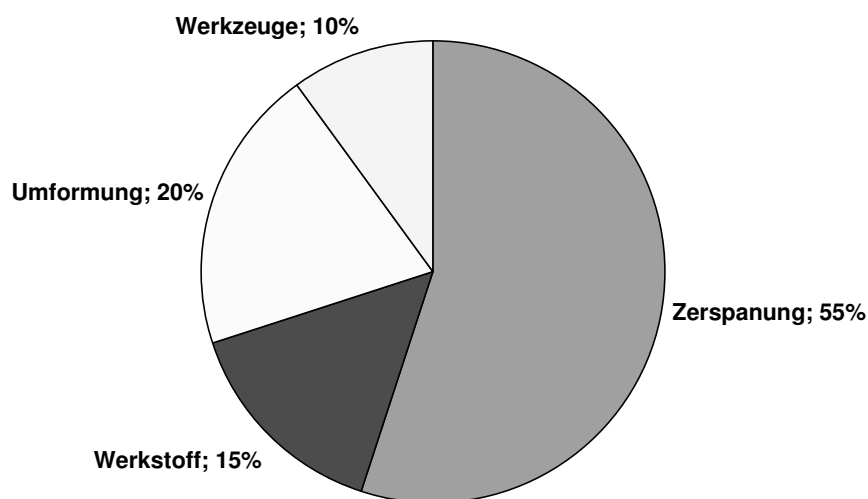


Abb. 9.1: Typische Kostenverteilung komplexer Schmiedebauteile (z. B. Radnabe)

In Tab. 9.1 sind die Einsparpotentiale des Verfahrens „Thixoschmieden“ im Vergleich zum konventionellen Schmieden dargestellt.

Die Werkzeugkosten beim Schmieden (drei bis vier Umformstufen) und beim Thixoschmieden (eine Umformstufe) sollten bei gleicher Standzeit (bisher noch nicht erreicht) ähnlich ausfallen, da das beim Thixoschmieden verwendete keramische Werkzeug ca. 3-5 mal so teuer wie eines der drei bis vier Schmiedewerkzeuge aus Warmarbeitsstahl ist.

Die Investkosten für die Umformaggregate sollten beim Thixoschmieden von Stahl viel geringer ausfallen, da die benötigte Umformkraft 50 bis 70 % geringer ist.

Die Erwärmungskosten beim Thixoschmieden von Stahl steigen jedoch aufgrund der ca. 200 °C höheren Umformtemperatur und der Verwendung von Schutzgas um ca. 15 bis 25 %. Aufgrund der reduzierten Bearbeitungszugaben und der schärferen Kanten können ca. 5-10 % Einsparungen an Zerspankosten und an den Materialkosten erreicht werden.

Die gesamte Einsparung könnte beim Erreichen einer ähnlichen Standzeit wie mit Schmiedewerkzeugen ca. 10- 20 % betragen.

Tab. 9.1: Einsparpotentiale vom Verfahren Thixoschmieden von Stahl im Vergleich zum Schmieden für komplexe Bauteile (z.B. Radnabe)

	Schmieden	Thixoschmieden
Werkzeuge	↓ 3-4 Werkzeuge ↑ Stahlwerkzeuge	↑ 1 Werkzeug ↓ Keramikwerkzeug (3 - 5 teurer als Stahl)
Pressen	↓ Sehr hohe Investkosten	↑ einfache Pressen mit 50 - 70% weniger Kraft
Erwärmung	↑ 1200 -1270 °C	↓ Höhere Temperaturen (1380- 1470 °C)
Zerspanung	↓ Hoher Zerspanungsaufwand	↑ weniger Zerspanung (5-10%)
Materialeinsatz	↓ Hoher Stahleinsatz	↑ geringerer Stahleinsatz (5 - 10%)

Legende:

„↓“ „Nachteil, „↑“ Vorteil

9.2 Kostenberechnungen

Eine umfassende Wirtschaftlichkeitsbetrachtung des Thixoforming-Verfahrens für Stahllegierungen fällt zur Zeit noch schwer, da bestimmte Prozessdaten besonders die Werkzeugstandzeiten, zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht hinreichend bekannt sind.

Tab. 9.2 zeigt die zur Kostenkalkulation verwendeten Parametern.

Zur Herstellung der Bauteile werden beim konventionellen Schmieden drei Gravuren für drei Umformstufen aus kostengünstigem Warmarbeitsstahl benötigt. Dagegen wird beim Thixoschmieden nur ein Werkzeug aus dem ca. 3-5-mal teureren Werkstoff Si_3N_4 benutzt. Bei Werkzeugen aus Stahl entstehen die meisten Kosten nicht durch die Materialkosten, sondern durch die Bearbeitungskosten (Drehen, Härten, CNC- Fräsen im Harten Zustand, Nitrokarburieren...) (Abb. 9.2).

Tab. 9.2: Annahmen für die Kostenkalkulation der thixogeschmiedeten seriennahen Radnabe W220

Kostenart		Schmieden	Thixoschmieden
Material	Werkstoff	46MnVS3	46 MnVS3
	Werkstoffkosten pro kg	0,673 €/kg	0,673 €/kg
	Einsatzgewicht	3,45 kg	3,20 kg
Fertigung	Umformaggregat	Hubbalken	Hubbalken
	Personalbedarf pro Schicht	1	1
	Ausbringung	900 Stück/h	190 bzw. 350 Stück/h
	Losgröße	7500 Stück	7500 Stück
	Ausschuss	1%	2%
Werkzeuge	Anzahl Werkzeuge	3	1
	Werkzeugwerkstoff	Warmarbeitsstahl	Si_3N_4 - Keramik
	Standzeit	7500 Stück	7500 Stück*

* Bisher noch nicht erreicht.

Die für Schmiedewerkzeuge geltenden Maßtoleranzen können durch ein konturnahes Sintern der Keramik erreicht werden. Die Bearbeitung der Form erfolgt im kreidenartigen sogenannten grünen Zustand.

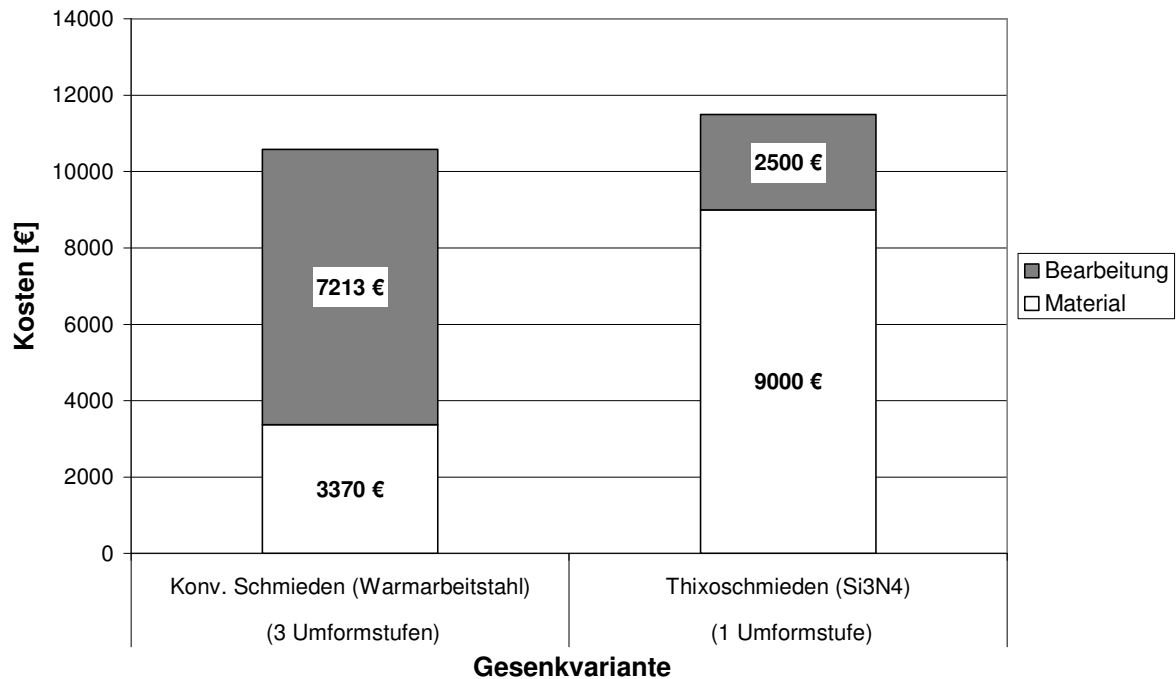


Abb. 9.2: Werkzeugkosten (Einsätze + Armierungen) für das Schmieden und das Thixoschmieden

Unter Berücksichtigung der hohen Bearbeitungskosten der drei Werkzeuge aus dem kostengünstigen Ausgangsmaterial Stahl, sieht die Kostenrechnung für ein Werkzeug aus sehr teuren Ausgangsmaterial Si_3N_4 Keramik mit geringen Bearbeitungskosten gar nicht so schlecht aus. Die Werkzeuge aus Warmarbeitsstahl sind nur ca. 10 % billiger.

Abb. 9.3 zeigt den Einfluss der Werkzeugstandzeit auf die Herstellkosten thixogeschmiedeter Bauteile. Die Herstellung von konventionell geschmiedeten Bauteilen wird auf einer vollautomatischen Anlage mit einer hohen Ausbringung von 900 Stück/h durchgeführt.

Da das Thixoschmieden ein neues Verfahren ist und da die Produktionserfahrung noch fehlt, wurde eine Ausbringung von 190 bis 350 Stück/h angenommen. Mit der Methode der gezielten Abkühlung kann die Abkühlphase des Umformgutes im

Werkzeug entfallen und somit könnten in Zukunft ähnlich hohe Taktzeiten wie beim konv. Schmieden gefahren werden.

Bei einer geringen Standzeit der keramischen Werkzeuge steigen die Werkzeug- und Umrüstkosten sehr stark an. Erst bei einer Werkzeugstandzeit von ca. 7000 Stück und mit einer Ausbringung von 350 Stück/h ist das Thixoschmieden von Stahl wirtschaftlicher als das konventionelle Schmieden.

Zusätzliche Kosteneinsparungen (ca. 10 %) können durch den geringeren Anteil an Zerspanung gewonnen werden.

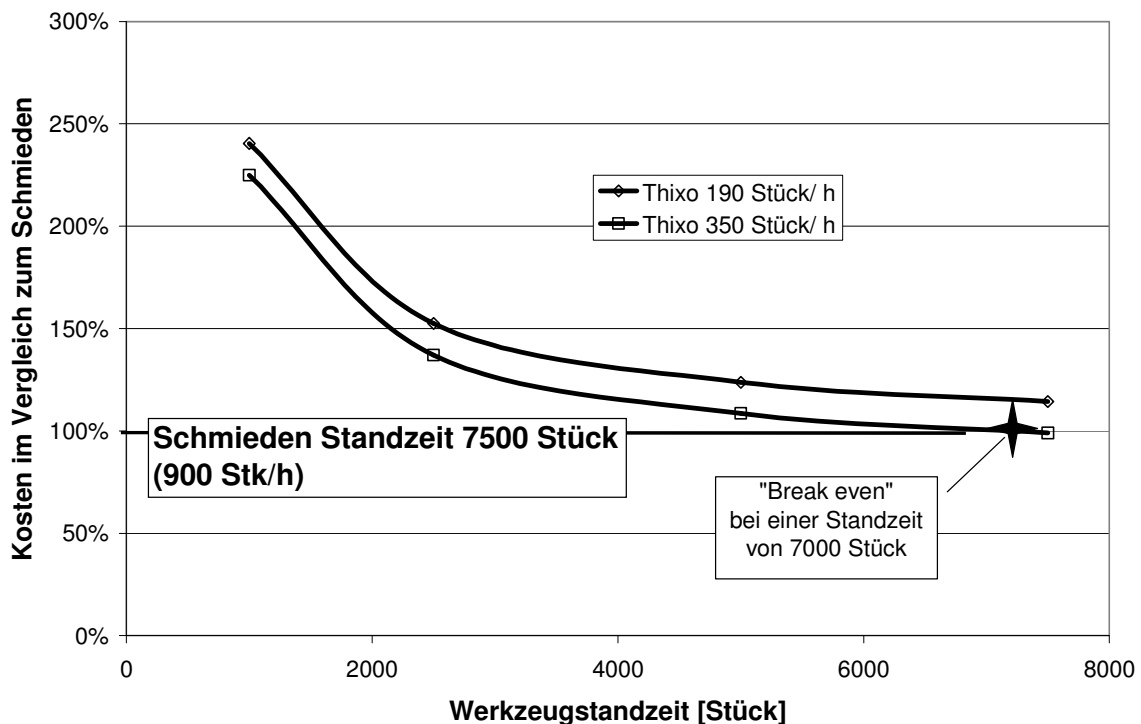


Abb. 9.3: Einfluss der Werkzeugstandzeit auf die Herstellungskosten beim Thixoschmieden im Vergleich zum konv. Schmieden

Für eine gleiche Werkzeugstandzeit beim Schmieden und Thixoschmieden wurde die Zusammensetzung der Kosten untersucht und mit dem Konkurrenzverfahren „ADI-Gießen“ bei einer Jahresproduktion von 150 000 Radnaben pro Jahr, einer Losgröße von 7500 Stück und einer Werkzeugstandzeit von Schmiede- und Thixoschmiedewerkzeugen von 7500 Stück verglichen (Abb. 9.4).

Auffallend sind die großen Kostenunterschiede um ca. 40 % zwischen konventionell geschmiedeten und gegossenen Bauteilen. Mögliche Ursachen für die hohen Kosten von ADI- gegossenen Bauteilen sind die Verwendung von verlorenen Formen als Formwerkzeug und die aufwendige zusätzliche Wärmebehandlung. Nach einer aufwendigen Prozessoptimierung zur Reduktion der Poren bei sehr stark schwankenden Wandstärken, können die Bauteile sehr endkonturnah gegossen werden. Die Zerspanung von ADI- Werkstoffen bereitet noch Probleme. Die zu erwartenden Einsparungen beim Zerspanen liegen zwischen 5- 15 % der Gesamtkosten.

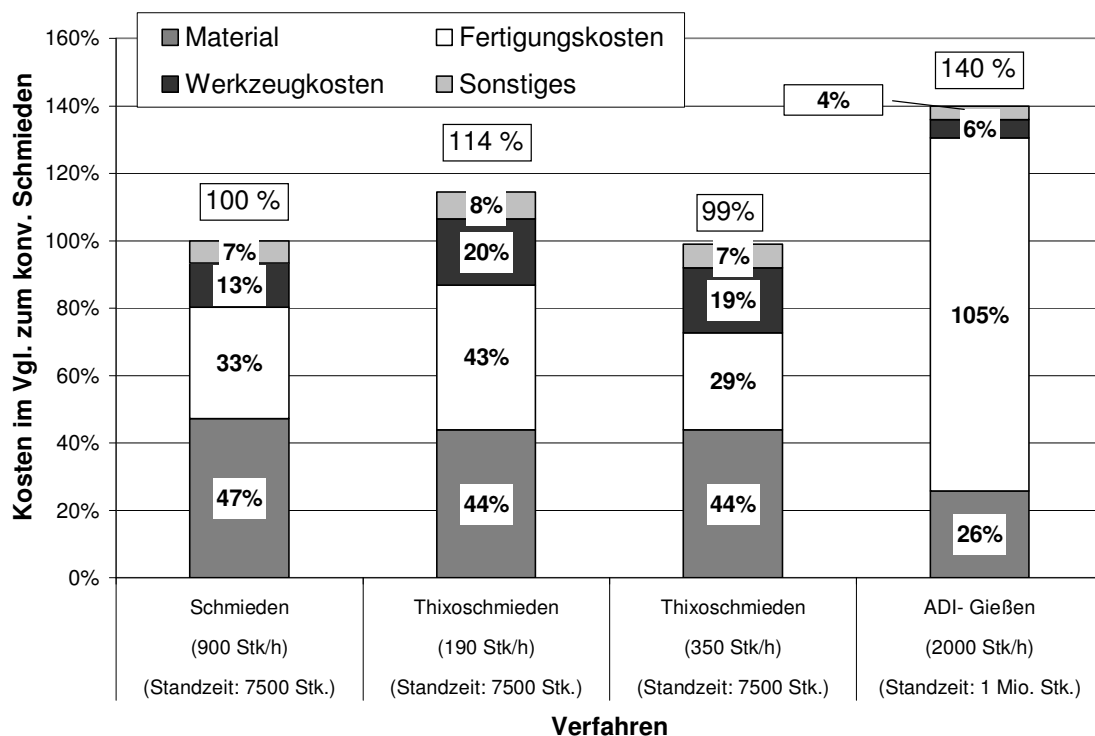


Abb. 9.4: Kostenvergleich von geschmiedeten, thixogeschmiedeten, bzw. gegossenen Rohlingen vor der Zerspanung.

Die Kostenunterschiede zwischen konventionellen und thixogeschmiedeten Bauteilen werden zum größten Teil von den Fertigungskosten und geringfügig durch Werkzeugkosten verursacht. Für die Herstellung von konventionell geschmiedeten Bauteilen existieren automatische Pressen mit einer hohen Ausbringung (900 Stk/h). Die Kostenberechnung von thixogeschmiedeten Bauteilen wurde mit viel langsameren Maschinen durchgeführt, da es zur Zeit noch keine automatische Produktionszelle zum Thixoschmieden gibt. Die Fertigungskosten von

thixogeschmiedeten Bauteilen wurden mit bereits existierenden Maschinen bei der Fa. Hammerwerk Fridingen berechnet (außer Erwärmungsanlage).

Damit die Herstellung von (Thixo-) Schmiederohlingen durch das Verfahren „Thixoschmieden von Stahl“ wirtschaftlich wird, müssen folgende Bedingungen in Zukunft erfüllt werden:

- Erhöhung der Werkzeugstandzeit
- Entwicklung von automatisierten Produktionszellen mit einer hohen Ausbringung (z. B. mit Schmiedung von mehreren Bauteilen pro Hub)

9.3 Ausblick

Die Kosten von einbaufertigen geschmiedeten Bauteilen werden im größten Teil von der Zerspanung der Schmiederohlinge beeinflusst (Abb. 9.3). Durch das Thixoschmiedeverfahren können die Bearbeitungszugaben der (Thixo-)Schmiederohlinge („Near Net Shape“) sowie der Materialeinsatz stark reduziert werden.

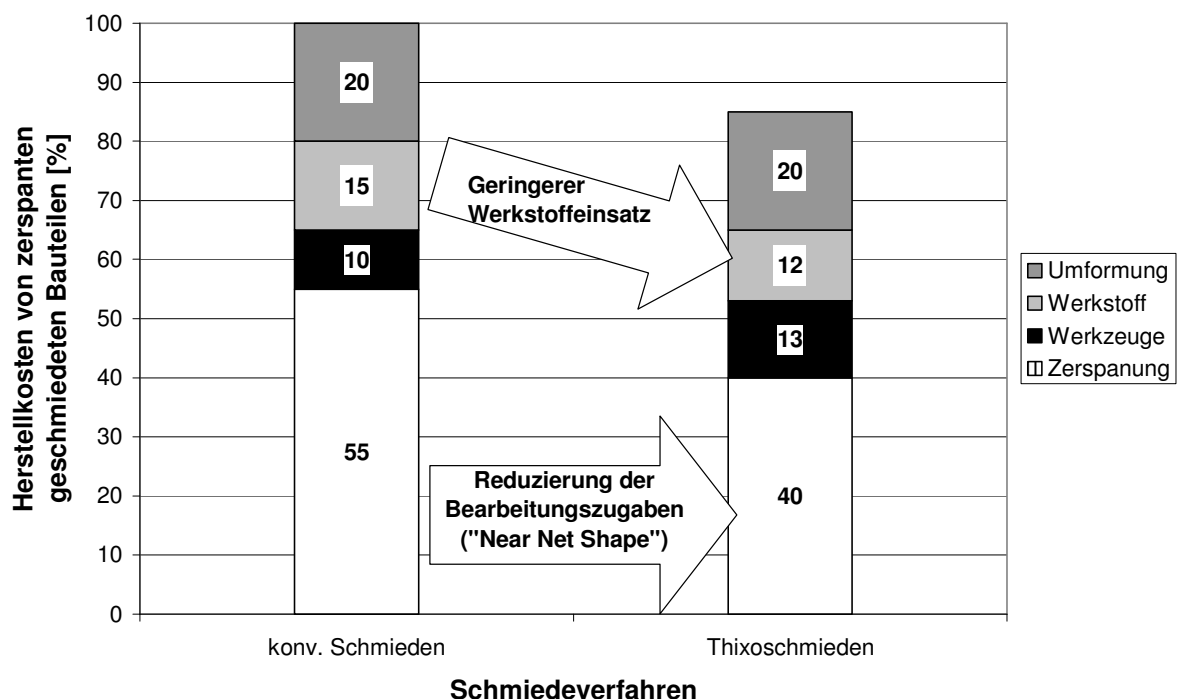


Abb. 9.5: Kostenvergleich von einbaufertigen geschmiedeten Bauteilen

Für die Herstellung von konventionellen einbaufertigen Schmiedebauteilen liegen die zu erwartende Kosteneinsparungen zwischen 15 und 20%.

Werden die neuen Möglichkeiten des Thixoschmiedeverfahrens wie das gleichzeitige Fügen und Oberflächenvergüten während der Umformung genutzt, können die Kosteneinsparungen bis zu 30% betragen.

10 Zusammenfassung und Ausblick

Im Gegensatz zur Formgebung von Aluminiumlegierungen im teilerstarrten Zustand bestanden am Anfang dieser Arbeit beim Thixoschmieden von Stählen bei den derzeit verfügbaren Formwerkzeugen noch beträchtliche Probleme bezüglich der mechanischen, tribologischen, chemischen und thermischen Leistungsfähigkeit aufgrund der erheblich höheren Verarbeitungstemperaturen. Die herkömmlichen Stahlwerkzeuge weisen durch Benetzung, Klebeneigung und Schmelzreaktionen einen hohen Verschleiß auf, woraus sehr geringe Werkzeugstandzeiten resultieren.

Zielsetzung dieser Arbeit war die Entwicklung von prozessgerechten Werkzeugen zum Thixoschmieden von Stahl. Um geeignete Werkzeugtechnologien zu entwickeln, musste die gesamte Prozesskette des Verfahrens „Thixoschmieden von Stahl“ analysiert und optimiert werden.

Für die Realisierung der Formgebung im teilerstarrten Zustand im Solidus/Liquidusbereich wurden zunächst zwei globulitische Stahllegierungen 46MnVS3 und 70MnVS5 als Vormaterial in Zusammenarbeit mit der Fa. Saarstahl entwickelt und thermophysikalisch charakterisiert. Hierbei galt es, den Zielkonflikt hinsichtlich erreichbarer mechanischer Eigenschaften und möglichst großem Schmelzintervall zu lösen. Der hochlegierte Stahl 70 MnVS5 weist mit ca. 99 °C den größten Schmelzintervall ($T_S = 1374$ °C und $T_L = 1473$ °C) auf. Mit 84 °C ($T_S = 1416$ °C und $T_L = 1500$ °C) hat der Stahl 46MnVS3 zwar einen geringeren Schmelzintervall, aber für eine Radnabe bessere mechanische Eigenschaften.

Zur Auswahl von geeigneten Werkzeugwerkstoffen wurden mittels Grundsatzuntersuchungen an Hochschulen (IBF und GHI der RWTH Aachen, IFUM Hannover) zahlreiche Werkstoffklassen untersucht und bewertet. So wurden beispielsweise mehr als 30 metallische und keramische Werkzeugwerkstoffe in zyklischen Fingertests in Stahlschmelze getaucht. Der Werkstoff Si_3N_4 zeigte hinsichtlich hoher Temperaturschwankungen und Klebeneigung die besten Eigenschaften.

Um relevante Kenngrößen für die Simulation und für die spätere Werkzeugauslegung zu ermitteln, wurde am Laborstand des IFUM- Hannover eine verkleinerte Modellradnabe (Gewicht 610 g) hergestellt. Durch eine Werkzeugvorwärmung und hohe Stempelgeschwindigkeiten bis zu 500 mm/s konnten riss- und lunkerfreie Bauteile hergestellt werden. Die keramischen Gesenke erwiesen sich bisher im Vergleich zu Gesenken aus Warmarbeitsstahl als sehr verschleißfest und erleichterten die Bauteilentnahme nach der Thixoschmiedung auch ohne Verwendung von Trennmittel.

Bei der Entwicklung des Werkzeug- und Anlagekonzeptes wurde darauf Wert gelegt, dass eine seriennahe Prototypenfertigung dargestellt werden kann. Für die Bolzenerwärmung wurden Heizzyklen mit und ohne Schutzgas entwickelt. Durch Verwendung von Schutzgas konnte die nötige Energie zur Erwärmung bis zur Verarbeitungstemperatur im Vergleich zu einer Erwärmung ohne Schutzgas stark reduziert werden. Die Erwärmung bis zum teilflüssigen Bereich erwies sich als unproblematisch und gut reproduzierbar. Aufgrund der großen thermischen Trägheit der massiven verwendeten Stahlbolzen existierte lange Zeit (bis zu 100s) eine teilflüssige Phase im Umformgut.

Das erste entwickelte Werkzeugkonzept zur Herstellung der seriennahen Radnabe W220 bestand aus einem Grundgestell, in welches ein über Stickstoffeder eingebrachtes Schließkonzept integriert ist, und einem Armierungsverband mit thermisch verschleißbeständigen Werkzeugeinsätzen. Dieses Werkzeug zeigte aber Schwächen aufgrund der thermisch gering belastbaren Gasfeder.

In den bereits bekannten Veröffentlichungen [SFB-01, ABS-99, KOP-01, DOE03] unterscheidet sich Thixoschmieden vom Thixogießen, abgesehen vom verlorenen Anguss im Wesentlichen nur durch einen geringeren Flüssigkeitsanteil im Bolzen. Nach einer Bolzenerwärmung auf eine Temperatur zwischen Solidus- und Liquidustemperatur wird der Bolzen sofort umgeformt. Die Folgen davon sind gravierende Bauteilfehler, wie grob zweiphasige Bereiche im makroskopischen Bereich, verschweißte Bahnen, sehr inhomogene Gefügestrukturen und nichtmetallische Einschlüsse im mikroskopischen Bereich.

Durch die Entwicklung der neuen Methode der gezielten Abkühlung nach der Erwärmung und vor der Formgebung (Abb. 10.1) konnte das Platzen der festen Außenschale verhindert werden und somit Bauteile mit mechanischen Eigenschaften auf dem Niveau von geschmiedeten Bauteilen hergestellt werden.

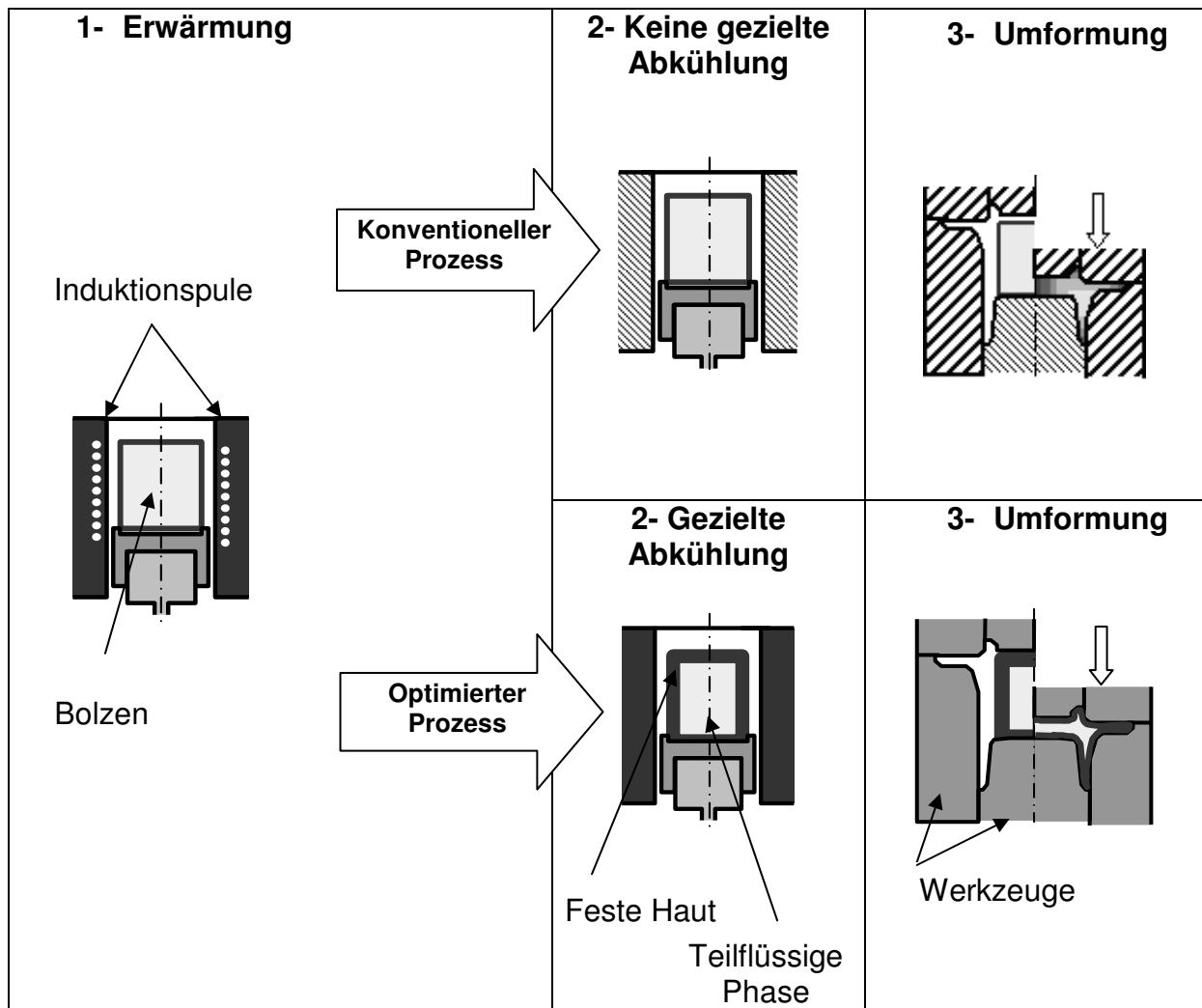


Abb. 10.1: Schematische Darstellung des optimierten Thixoschmiedeprozesses

Der Einsatz von armierten keramischen Gesenken war nur bei rotations-symmetrischen Bauteilen sehr erfolgreich. Nicht rotationssymmetrische keramische Gesenke wiesen sehr schlechte Standzeiten auf. Eine Weiterentwicklung der Armierungskonzepte ist zur Vermeidung der Brüche notwendig.

Das zweite untersuchte Werkzeug zur Herstellung von Antriebswellenköpfen war ein konventionelles Schmiedewerkzeug. Zur Vermeidung von Schmelzaustritten

während der Umformung wurde das Untergesenk mit einem umlaufenden Steg versehen, der mit der Außenwand des Obergesenkes überlappt. Dieses Werkzeug wies große Vorteile auf, da keine teuren und temperaturempfindlichen Gasfeder vorhanden waren.

Die experimentellen Untersuchungen wurden durch theoretische Untersuchungen unterstützt. Ein neues Materialmodell, basierend auf den Fließgesetzen der Umformtechnik und der Gießtechnik, wurde entwickelt und implementiert. Anhand von FEM- Berechnungen konnten die Werkzeugverbände ausgelegt und die thermomechanischen Belastungen sowohl im Einzelhub als auch im Dauerbetrieb untersucht werden. Auch hier erscheint die Keramik Si_3N_4 aufgrund der hohen Temperaturentwicklungen bis $1300\text{ }^\circ\text{C}$ besser geeignet sein als konventioneller Warmarbeitsstahl.

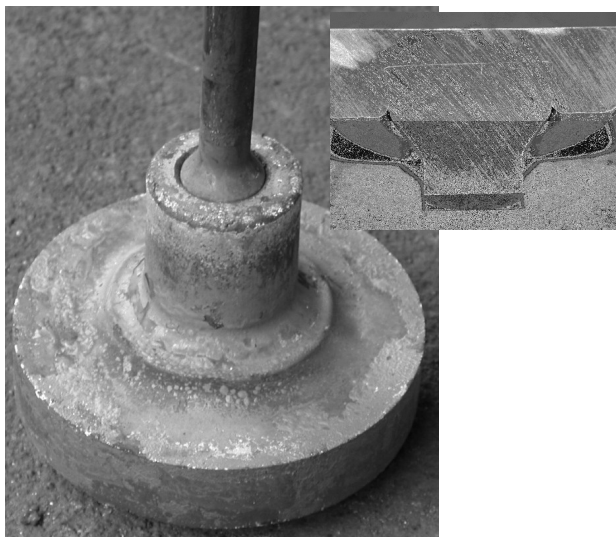


Abb. 10.2: Antriebswellenkopf mit thixogefügtem Schaft

Aufgrund der zur Zeit noch zu geringen Werkzeugstandzeit lässt sich bei einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung bisher noch keine Kosteneinsparung im Vergleich zum konventionellen Schmieden erkennen. Dennoch bietet das Verfahren Thixoschmieden von Stahl sehr große Einsparpotentiale, da die Prozesskette durch zum Beispiel eine Umformung mit integrierter Fügung [KAL-02] (Abb. 10.2) oder Oberflächenvergütung [BEY-05] reduziert werden kann.

11 Literaturverzeichnis

- [ABD-02] Abdelfattah, S. Thixoschmieden im geschlossenen Gesenk zur Herstellung komplexer Bauteile, Dissertation IFUM Hannover 2002
- [ABS-99] Koesling, D. Abschlussbericht: Untersuchungen zum Thixoforming als Alternative zur Herstellung komplex geformter Stahlbauteile, P322, Studiengesellschaft Stahlanwendung e.V., 1999
- [BEY-05] Beyer, C. Oberflächenvergüten beim Thixoschmieden, Erfindung zum Patent angemeldet mit dem Aktenzeichen DE102005013651.6, 2005
- [BLE-98] Bleck, W, Gefügecharakterisierung von Aluminium und Stahl für das Thixoforming, Werkstoffwoche München (Band VI), Werkstoffinformationsgesellschaft Wiley-VCH- Verlag, ISBN 3-527-29943-2, 1998, S.29-36
- [BMB-01] BMBF- Forschungsvorhaben 03N5024 Einsatzoptimierte Werkzeugwerkstoffe und Stähle für das Thixoschmieden, 1. Zwischenbericht 1.4 bis 31.12.2001
- [BMB-04] BMBF- Forschungsvorhaben 03N5024 Einsatzoptimierte Werkzeugwerkstoffe und Stähle für das Thixoschmieden, 6. Zwischenbericht 01.01.2004 bis 30.06.2004
- [DES-03] Desery, C. Thixoschmieden, Entwicklung der Thixoforming-technologie für hochschmelzende Stahlwerkstoffe, Werkstattstechnik online Jahrgang 93 (2003) H.10, S.689-694

- [DOE -03] Doege, E. Thixo-Schmieden von Stahl, Massivumformung 2003, S.119-138, ISBN 3-88355-318, 2003
- [DOE-01] Doege, E. Thixoforming von hochschmelzenden Stahlwerkstoffen , UTF science 1/2001, S18-24
- [DOE-02] Doege, E. Praxisnahe Entwicklungen am IFUM- mittelfristig umsetzbar, 17. Umformtechnisches Kolloquium Hannover 2002, S.87-90
- [FLE-78] Flemings, M.C. Thixocasting Steel Parts; Final Technical Report, Massachussetts Institut of Technology, September 1978
- [HAR-01] Hartmann, D. BMBF-Verbundforschungsvorhaben Einsatz-optimierte Werkzeugwerkstoffe und Stähle für das Thixoschmieden von Stahl, Zwischenbericht Nr.1, 2001
- [HEI-76] Heinemeyer, D. Untersuchungen zur Frage der Haltbarkeit von Schmiedegesenken, Dissertation TU- Hannover 1976
- [HIR-99-1] Hirt, G. Thixoforming von Stahl – Erfahrungen und Perspektiven, DVM-Tag 1999 – Bauteil 99 “Werkstoff und Verfahren im Wettbewerb” Berlin, 5.- 7. Mai 1999
- [HIR-99-2] Hirt, G. Entwicklungstendenzen beim Thixoforming, Thermprocess Symposium 1999, Fachgemeinschaft Thermo-Prozess und Abfalltechnik im VDMA, Vulcan-Verlag-Essen, Düsseldorf, 14. Juni 1999
- [KAL-02] Kallweit, J. Entwicklung von Formgebungstrategien zum Thixoforming von Stahl und zum Fügen im thixotropen Zustand, Dissertation, IBF der RWTH Aachen, Umformtechnische Schriften, Band 107, ISBN 3-8322-1207-8

- [KAN-69] Kanappan, A. Wear in Forging Dies, Metal Forming 36 (1969), S.335-343
- [KAP-93] Kapranos, P. Semi-solid Processing of Aluminium and high melting point alloys, Proc. Inst. Mech. Engrs., Vol.207, 1993, S.1-8
- [KAP-94] Kapranos, P. Properties of Thixoformed Tool Steels, Proc. of the Third Int. Conf. on Processing of Semi Solid Alloys and Composites, Tokyo 1994
- [KAP-94] Kapranos, P. Semi- Solid Forging of High Temperature Alloys, Proc. of the Third Int. Conf. on Processing of Semi Solid Alloys and Composites, Tokyo 1994
- [KAP-96] Kapranos, P. Thixoforming high melting point alloys into non-metallic dies; Proceedings of the 4th International Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, Sheffield, June 1996, S.306-311
- [KIRK-96] Kirkwood D. H. Semi Solid Processing of High Melting Alloys, Proc. of the 4th Int. Conf. on Processing of Semi Solid Alloys and Composites, Sheffield 1996
- [KLA-02] Klassen, O. Rheologische Untersuchungen des Thixogießprozesses, Shaker Verlag, 2002
- [KOK-99] J. Koke; M. Modigell; J. Petra Rheological investigations and two-phase modeling on semi-solid metal suspensions, Applied Mechanics and engineering, 1999, vol. 4, Special issue: ICER '99, S. 345-350
- [KOP-99] Kopp, R. Thixoforming of Aluminium Alloys, Metec, Düsseldorf 1999
- [KOP-00] Kopp, R. Thixoschmieden von Aluminium und Stahl, Konferenz- Einzelbericht: UKD2000-7, Umformtechnisches Kolloquium Darmstadt, 14.-15.03.2000, S.195-200

- [KOP-01] Kopp, R. Möglichkeiten der Stahlformgebung durch Thixoforming, 16. ASK, 22.-23.03.2001 Aachen, S. 273-280
- [KOP-01] Kopp, R. Different Forming Technologies for Aluminium and Steel in the Semi-Solid State, Production Engineering Vol VIII/1 (2001), German Academic Society for Production Engineering
- [KOP-02] Kopp, R. Forming and Joining of Commercial Steel Grades in the semi-Solid State, Journal of Materials Processing Technology 130-131 (2002), S. 562-568
- [KOP-04-1] Kopp, R. Thixoformingzelle: Innovative Stahlformgebung im teilerrstarten Zustand, 19. ASK, 25./26 März 2004 Aachen, S.245- 250, ISBN 3-86130-208- X
- [KOP-04-2] Kopp, R. Characterisation of Steel Thixoforming Tool by High Temperature Compression Tests, Steel Research international 75 (2004), No.8/9, S. 569 - 576
- [KÜT-04] Küthe, F. An Automated Thixoforming Plant for Steel Parts, Steel Research international 75 (2004), No 8/9, S.593 - 600
- [KUR-04] Kurapov, D. Adhäsion and Thermal Shock Resistance of Al₂O₃ Thin Films Deposited by PACVD for Die Protection in Semi-Solid Processing of Steel, Steel Research international 75 (2004), No 8/9, S. 577 - 580
- [KYR-03] Kyrlov, O. Surface and Coatings Technology 163 – 164 (2003), S. 203-207
- [MÄH-03] Mähliß, S. Urformen aus dem flüssigen Zustand – Gießen, Studienarbeit Fachhochschule Karlsruhe, 2003

- [MEY-05] Meyer-Rau, S. Testing Strategies for Corrosive Interactions of Ceramics with Semi-Solid and Molten metal alloys, Journal of the European Ceramic society 25(2005), S. 1049-1055
- [MID-92] Midson, S.P. Semi solid Forming High Temperature Alloys, Proc. of the 2nd Int. Conf. on Processing of Semi Solid Alloys and Composites, Boston 1992
- [MOO-59] Moore, F. The Rheology of Ceramic Slips and Bodies. Trans Brit. Ceramic Soc. 58, 1959
- [MÜN-04] Münstermann, S. Modell Tests and Analysis of Corrosion Resistance of Ceramic Tool Dies for Steel Thixoforming, Steel Research international 75(2004), No.8/9, S. 581 - 587
- [NEU-03] Neumaier, T. Zur Optimierung der Verfahrensauswahl von Kalt-, Halbwarm- und Warmmassivumformverfahren, Fortschritt-Berichte VDI Reihe 2, Dissertation IFUM Hannover, ISBN 3-18-363702-2
- [NIE-00] Niedick, I. Simultane Entwicklung und Integration von Thixoformingtechnologie für Leichtbauteile "Thixotec", EFU Gesellschaft für Ur-/Umformtechnik mbH, Simmerath, Verlagsgruppe Mainz, 2000
- [NOH-02] Nohn, B. Beitrag zur numerischen Simulation des Thixoformings, Fortschritt-Bericht VDI, Nr. 598, 2002
- [RAU-98] Rau, S. Ceramic Tool Materials for the Thixoforming of Aluminium, Copper and Steel, Proceedings of the 5th International Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, Golden, Colorado, June 1996, S.306-311
- [SEI-92] Seidel, E. Tribologie bei der Massivumformung, Industrial and Automotive Lubrication, 11 th International

- Colloquium, Ostfildern, 13.-15.01.1998, Band 11,3 (1998), S. 2339-2346.
- [SFB-01] SFB-289 Thixoforming, Arbeits-und Ergebnisbericht 1999/2000/2001, RWTH Aachen
- [SFB-04] SFB-289 Thixoforming, Arbeits-und Ergebnisbericht 2002/2003/2004, RWTH Aachen
- [SHI-04] Shimahara, H Investigations of basic data for the Semi-Solid Forging of Steels, International Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, 21-23.09.2004, Zypern
- [SIE-93] Siegert, K. Umformtechnik II, Unterlagen zur Vorlesung, Institut für Umformtechnik, Universität Stuttgart, 1993
- [TAB-99] Tabellenbuch Metall, 41. neubearbeitete und erweiterte Auflage, Verlag Europa-Lehrmittel, ISBN3-8085-1721-2
- [TIE-93] Tietmann, A. Gießschmieden und Thixoschmieden von Aluminiumknetlegierungen, Dissertation, Institut für Bildsame Formgebung der RWTH Aachen, Umformtechnischen Schriften, Band 43, Verlag Stahleisen mbH, 1993
- [WEG- 98] Wegner, K-W. Werkstoffentwicklung für Schmiedeteile im Automobilbau, ATZ Automobiltechnische Zeitschrift 100 (1998)12
- [WIT-99] Witulski, T. Ein Beitrag zur Beschreibung der Prozessparameter beim Thixoforming von Aluminium-Legierungen, Dissertation, Institut für Bildsame Formgebung der RWTH Aachen, 1999
- [YOU-79] Young, K.P. Structure and Properties of Thixocast Steels, Metals Technology, April 1979

12 Anhang

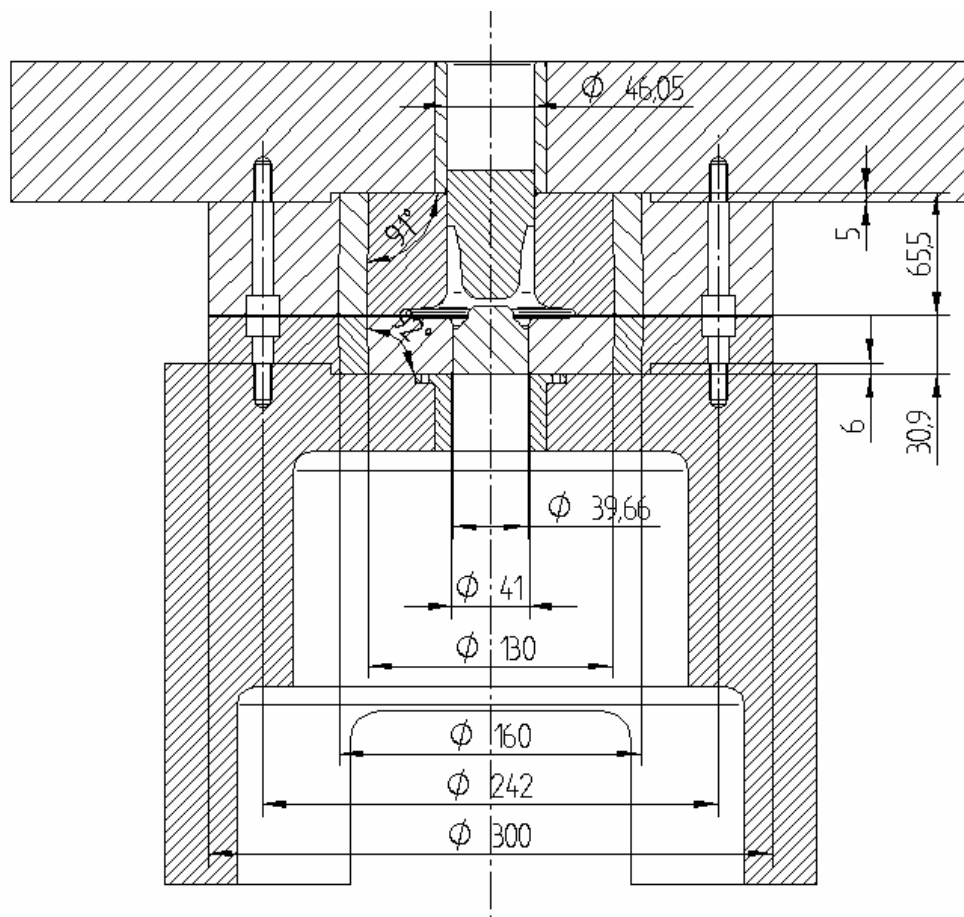


Abb. A- 1: Zusammenbau des Zeitstandversuches zur Herstellung der verkleinerten Radnabe am IFUM- Hannover [BMB-01]

stkecf7 FRAME 1 JUNE 3, 2003 15.23.25

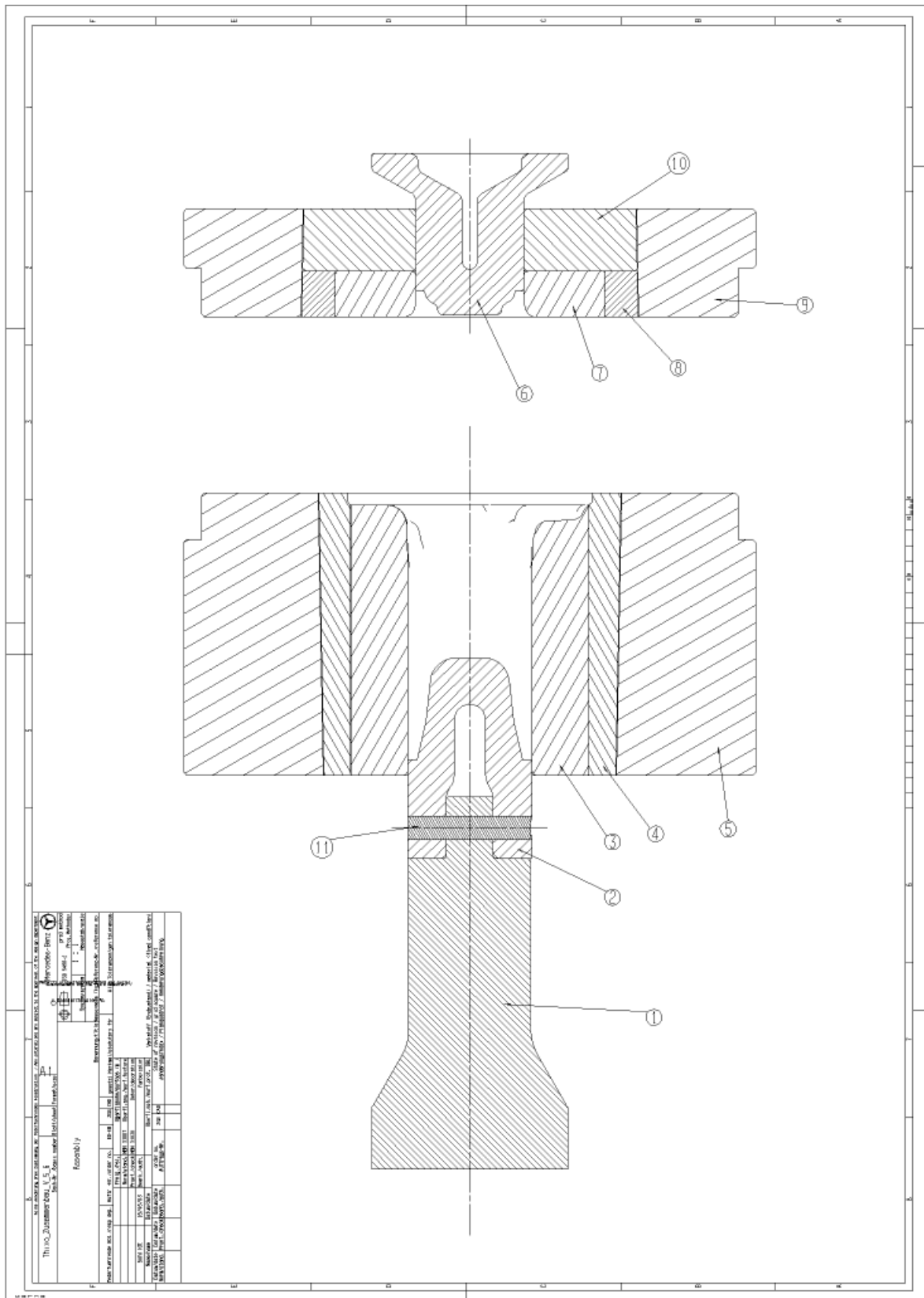


Abb. A- 3: Zusammenbau des keramischen Thixoschmiedewerkzeuges

Tab. A- 1: Stückliste des Thixoschmiedewerkzeuges zur Herstellung von seriennahen Radnaben

Pos.	Menge	Einheit	Benennung	Werkstoff / Festigkeit
1	1	Stück	Unterstempel Part2	Stahl 1.2999 54 +/- 1 HRC
2	1	Stück	Unterstempel Part1	Si ₃ N ₄
3	1	Stück	Gravureinsatz unten	Si ₃ N ₄
4	1	Stück	Mittleres Armierungsring des Untergesenkes	Hartmetall G55
5	1	Stück	Äußeres Armierungsring des Untergesenkes	Stahl 1.2367 1800 N/ mm2
6	1	Stück	Oberstempel	Si ₃ N ₄
7	1	Stück	Gravureinsatz oben	Si ₃ N ₄
8	1	Stück	Mittleres Armierungsring des Obergesenkes	Hartmetall G55
9	1	Stück	Äußeres Armierungsring des Obergesenkes	Stahl 1.2367 1800 N/ mm2
10	1	Stück	Platte	Stahl 1.2367 1600 N/ mm2
11	1	Stück	Schlüssel	Stahl 1.2367 1600 N/ mm2

Christophe BEYER

Persönliche Daten

Geburtsdatum: 26. Januar 1974
Geburtsort Annweiler am Triefels
Familienstand: Ledig
Staatsangehörigkeiten: deutsch und französisch

Schulbildung

1980 – 1984 Grundschule von Alsting (F)
1984 – 1992 Deutsch- Französisches Abitur, Saarbrücken
Abschluss: Abitur

Studium

1992 - 1998 Deutsch- französisches Doppelstudium an der EEIGM der
INPL von Nancy (F) und der Universität des Saarlandes
Fachrichtungen: Werkstoffwissenschaften und
Werkzeugtechnik
Abschlüsse: Ingénieur (Frankreich)
Dipl. Ing. (Deutschland)

Militärdienst

10/1998 – 07/1999 2 ème Régiment du Génie, Metz (F)

Beruf

08/1999 - 06-2002 Entwicklungsingenieur bei der Fa. Wieland Werke, Ulm
07/2002- 05/2005 Doktorand bei der Fa. DaimlerChrysler, Ulm
Seit 06/2005 Mitarbeiter der Fa. Hirschvogel, Denklingen