

## Experimentell-Numerische Ermittlung des Wärmeübergangskoeffizienten für EN AW-6082

# Wärmeübergangskoeffizienten für die Warmmassivumformung

N. Mohnfeld, H. Wester, R. Grawe, S. Peddinghaus, J. Uhe, B.-A. Behrens

**ZUSAMMENFASSUNG** Ein neu entwickelter Versuchstand ermöglicht die experimentell-numerische Ermittlung des wirkgrößenabhängigen Wärmeübergangskoeffizienten (WÜK) für die Massivumformung von EN AW-6082. Mittels 1D-FE-Modell und inverser Optimierung wurde der WÜK in Abhängigkeit von Temperatur, Kontaktdruck und Schmierung basierend auf experimentellen Versuchen bestimmt. Die Ergebnisse zeigen eine deutliche Druckabhängigkeit sowie signifikante Effekte der Schmierstoffe.

### STICHWÖRTER

Umformtechnik, Produktionstechnik, Werkstoffe

## Experimental-numerical determination of the heat transfer coefficient for EN AW-6082 - Heat transfer coefficients for hot forging

**ABSTRACT** A newly developed test setup enables the experimental-numerical determination of the effective heat transfer coefficient (HTC) depending on various influences for the forging of EN AW-6082. The HTC was determined as a function of temperature, contact pressure and lubrication using a 1D-FE model and inverse optimization, based on experimental tests.

## 1 Einleitung und Stand der Technik

Eine zentrale Strategie zur Reduktion von CO<sub>2</sub>-Emissionen, auch in der Automobilindustrie, ist die Verringerung des Fahrzeuggewichts. Während im Bereich der Blechumformung bereits weitentwickelte Leichtbaulösungen umgesetzt wurden, ist deren Anwendung in der Massivumformung bislang vergleichsweise unterrepräsentiert [1]. Da der Gewichtsanteil massiv umgeformter Komponenten im Automobil annähernd dem der Blechteile entspricht, besteht hier ein großes Leichtbaupotenzial [2]. Im Rahmen der Initiative „Massiver Leichtbau“ wurde festgestellt, dass durch den gezielten Einsatz alternativer Werkstoffe sowie konstruktiver Optimierungen signifikante Gewichtseinsparungen bei massiv umgeformten Bauteilen im Bereich des automobilen Antriebsstrangs realisiert werden können. Für einen Mittelklasse-Pkw wurde eine Reduktion von 42 kg, für leichte Nutzfahrzeuge von 99 kg, für Lkw von 124 kg und für Hybridfahrzeuge von 93 kg ermittelt [1–3].

Vor diesem Hintergrund bieten neuartige Technologien, wie das Verbundschmieden, weiteres Potenzial zur Realisierung innovativer Leichtbaulösungen. Das Verbundschmieden erlaubt eine beanspruchungsgerechte Bauteilgestaltung durch die Kombination unterschiedlicher Werkstoffe. Die Herstellung massivumgeformter hybrider Komponenten stellt zudem eine ressourcenschonende Fertigung einbaufertiger und anforderungsoptimierter Bauteile in wenigen Prozessschritten dar. Die Verbindung der unterschiedlichen Werkstoffe erfolgt im Rahmen des Umformprozesses durch eine Kombination aus Form- und Stoffschluss. Die Prozesskette zur Herstellung hybrider Bauteile durch Verbundschmieden besteht aus dem form- oder kraftschlüssigen Fügen der Halbzeuge,

gefolgt von einer gezielten, inhomogenen induktiven Erwärmung zur Einstellung der werkstoffspezifischen Temperaturen und abschließend dem Verbundschmieden zu einem hybriden Bauteil [4].

Wohletz und Groche untersuchten das Fügen von Stahl- und Aluminiumrohlingen mittels Vollvorwärts- und Napffließpressen und analysierten dabei insbesondere den Temperatureinfluss auf die Güte der Fügeverbindung. Dabei wurde festgestellt, dass bei erhöhten Umformtemperaturen entstehende Oxidschichten die Qualität der resultierenden Grenzsicht negativ beeinflussen. [5]

Essa *et al.* analysierten das Umformverhalten beim Stauchen hybrider Stahlrohlinge, bestehend aus einem weichen Kernmaterial C15E und einem härterem Mantelwerkstoff aus C45E. Dabei wurden verschiedenen Durchmesser, Höhen und Wandstärkenverhältnisse systematisch untersucht und Grenzverhältnisse ermittelt, welche zur Auslegung des Verbundschmiedens genutzt werden können. [6]

Auf diesen Ergebnissen aufbauend wurden von Politis *et al.* hybride Zahnräder mittels Gesenkschmieden gefertigt, bei denen der innere Zahnradbereich aus Aluminium und der äußere Mantel aus Stahl bestand [7]. Kosch untersuchte das Verbundschmieden von Stahl- und Aluminiumhalbzeugen mit Blick auf die auftretenden Temperaturgradienten zwischen den Fügepartnern sowie den Einfluss der jeweiligen Legierungszusammensetzungen auf die Ausbildung der intermetallischen Phase. Die gewonnenen Erkenntnisse ermöglichten die erfolgreiche Herstellung hybrider Zahnräder aus S235JR und EN AW-6082 [8]. Auf industrieller Ebene konnte die Fertigung hybrider Bauteile erfolgreich umgesetzt werden, etwa bei Zahnrädern (Neumayer Tekfor Holding GmbH) [9], Bremscheiben, Pleuelstangen, Antriebsflanschen

sowie Quer- und Längslenkern (Leiber Group GmbH & Co. KG) [10]. Serienanwendungen existieren bereits, etwa bei BMW, wo ein durch Verbundschmieden hergestellter Bremsstopf aus Aluminium und Grauguss zur Anwendung kommt und eine Gewichtsersparnis von 4 kg ermöglicht [11].

Die Verbindung artfremder Werkstoffe, wie Stahl und Aluminium im Verbundschmiedeprozess stellt insbesondere aufgrund der divergierenden Umformtemperaturen eine prozesstechnische Herausforderung dar. Die an den Kontaktflächen der Halbzeuge vorliegenden Temperaturen beeinflussen maßgeblich das Umformverhalten sowie die Ausbildung intermetallischer Phasen. Beim Verbundschmieden von Stahl- und Aluminiumhalbzeugen kann die Wärmeübertragung vom höher temperierten Stahl zum Aluminium zu einer lokalen Überschreitung der Solidustemperatur führen. Dies resultiert in einer partiellen Aufschmelzung des Aluminiums, was wiederum die Verbundbildung negativ beeinflusst. Gleichzeitig verringert die Wärmeabgabe im Stahl-Halbzeug dessen Formänderungsvermögen, wodurch die Rissanfälligkeit steigt. Darüber hinaus findet ein kontinuierlicher Wärmefluss von den Halbzeugen in Richtung des kühleren Werkzeugs statt [12, 13].

Zur Auslegung von Verbundschmiedeprozessen ist eine genaue Kenntnis über die vorliegende Temperaturverteilung sowie der thermischen Interaktion der Halbzeuge miteinander essenziell. Als Hilfsmittel zur Auslegung von Verbundschmiedeprozessen ist die Finite-Elemente-Methode (FEM) ein etabliertes Werkzeug. Um das Umformergebnis im Verbundschmiedeprozess numerisch belastbar vorhersagen zu können, ist daher eine präzise Abbildung der Temperaturverteilung in Halbzeugen und Werkzeugen unerlässlich. Eine wesentliche Voraussetzung für die Genauigkeit der Simulationsergebnisse ist die präzise Kenntnis der prozessspezifischen Randbedingungen, vor allem der Temperaturverteilungen, welche wiederum essenziell für eine prozesssichere Auslegung sind [14].

Ein zentraler Aspekt in der Betrachtung der Temperaturverteilung ist der Wärmeübergang in der Kontaktzone zwischen Werkstück und Werkzeug. Der Wärmeübergangskoeffizient (WÜK)  $\alpha$  beschreibt diesen Austausch quantitativ [14]. Der WÜK wird maßgeblich durch zeitlich veränderliche Prozessgrößen beeinflusst, wie etwa dem Kontaktdruck ( $a_n$ ), den Oberflächentemperaturen der Kontaktpartner ( $T_{O1}, T_{O2}$ ) sowie dem Schmiermittel ( $n_{lub}$ ). Der WÜK lässt sich gemäß folgender funktionaler Abhängigkeit ausdrücken [15, 16]:

$$\alpha = f(\sigma_N, T_{O1}, T_{O2}, n_{lub})$$

In der Mehrzahl numerischer Prozesssimulationen wird der WÜK aus Mangel an verlässlichen Daten als Konstante angenommen. Dadurch bleiben die tatsächlichen Prozessabhängigkeiten unbeachtet, was die Aussagekraft der Simulation reduziert.

Für die experimentelle Bestimmung des WÜK ist die Temperaturerfassung an den Kontaktflächen unerlässlich. Dabei kommen direkte und indirekte Messmethoden zum Einsatz. Direkte Verfahren, etwa der Einsatz von Thermoelementen (TE) auf der Werkzeugoberfläche, beeinflussen aber den Kontakt durch weitere Materialinteraktionen und verändern lokale Bedingungen wie die Kontaktfläche, wodurch die Aussagekraft eingeschränkt wird [14]. Thermographie ist als direkte Methode in geschlossenen Gesenken nicht praktikabel. Aus diesem Grund wird häufig auf indirekte Verfahren zurückgegriffen, bei denen TE nahe der

Werkzeugoberfläche positioniert werden, um die Temperaturentwicklung in der Randschicht zu erfassen. Zur Ermittlung des WÜK werden experimentelle Randbedingungen in einer numerischen Simulation nachgebildet. Durch Abgleich der gemessenen und simulierten Temperaturverläufe wird der WÜK iterativ ermittelt.

Grundlegende Untersuchungen zur Bestimmung des WÜK mittels indirekter Messmethoden wurden unter anderem von *Bariani* [17], *Malinowski* [18], *Chang* [19] sowie *Rosochowska* [20] durchgeführt. In [17] wurde der WÜK sowohl für den Schmiedeprozess als auch für den anschließenden Kühlvorgang analysiert. Für den Schmiedevorgang einer Turbinenschaufel konnte der WÜK anhand einer Temperaturmessung im Werkzeug bestimmt werden. *Caron* untersuchte den WÜK in einem Warmblechumformprozess durch den Einsatz von TE am Werkstück und Werkzeug. Aufgrund von Messungenauigkeiten wurde der WÜK hier mittels eines inversen Wärmeleitungsalgorithmus ermittelt [21]. *Mendiguren et al.* führten eine experimentelle Charakterisierung des WÜK im Formhärteprozess durch und zeigten, dass dieser primär vom Kontaktdruck abhängt, während die Werkzeugtemperatur einen untergeordneten Einfluss auf den Wärmeübergang hat [22].

Die bisherige experimentelle Ermittlung des WÜK basiert überwiegend auf einem von *Altan* entwickeltem Versuchsprinzip, das zwei beheizte, gegenüberliegende Stempel mit integrierten Temperatursensoren umfasst [23]. Dieses Verfahren erweist sich als aufwendig, insbesondere in der Erzeugung eines homogenen Ausgangstemperaturfeldes. Zudem wurden die bisherigen Untersuchungen unter Randbedingungen für Blechumformprozesse durchgeführt. Wesentliche Unterschiede in den Randbedingungen beim Massivumformprozessen sind zum einen höhere Kontaktdrücke und zum anderen ein größeres Wärmepotenzial des Werkstückes. In der Massivumformung entstehen partiell Kontaktdrücke, welche die Fließspannung des Werkstückes überschreiten. Diese Überschreitung wird durch eine Überlagerung mit einem hydrostatischen Spannungszustand erreicht, wie zum Beispiel beim Verbundschmieden im geschlossenen Gesenk. Aufgrund der kleineren wirksamen Oberflächen, bezogen auf das Volumen, zur Wärmeübertragung der Halbzeuge der Massivumformung im Vergleich zu Blechhalbzeugen, kühlen diese langsamer aus. Dadurch bleibt ein höheres Wärmepotenzial im Halbzeug erhalten, wodurch die Auskühlung des Werkstückes verlangsamt wird.

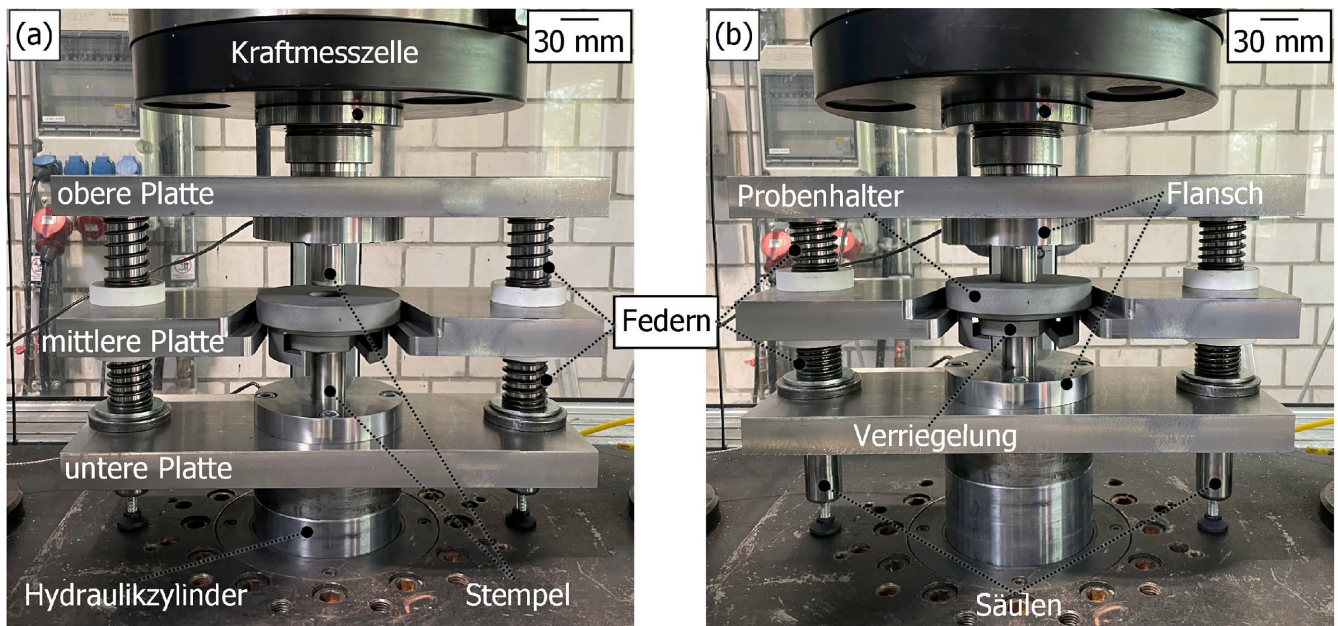
Eine gezielte Untersuchung des WÜK im Kontext des Verbundschmiedens wurde in der wissenschaftlichen Literatur bisher nicht durchgeführt. Dieser Beitrag stellt einen neuen Versuchsaufbau vor, welcher die Randbedingungen des Verbundschmiedens berücksichtigt, um einen wirkgrößenabhängigen WÜK über eine indirekte Methode experimentell-numerisch zu bestimmen.

## 2 Material und Methoden

### 2.1 Experimenteller Versuchsaufbau

Der entwickelte Versuchsaufbau wurde im Arbeitsraum eines servohydraulischen Umformsimulators (Firma Instron) montiert, wie in **Bild 1** dargestellt.

Der Versuchsaufbau setzt sich aus drei Platten aus C45 zusammen, die über zwei Säulen seitlich geführt werden. Dabei ist die obere Platte an der Kraftmesszelle (Firma Kistler) fixiert und mit den Säulen fest verschraubt. Die Säulen werden durch verstellbare Füße gegen den unteren Rahmen des Umformsimulators ver-

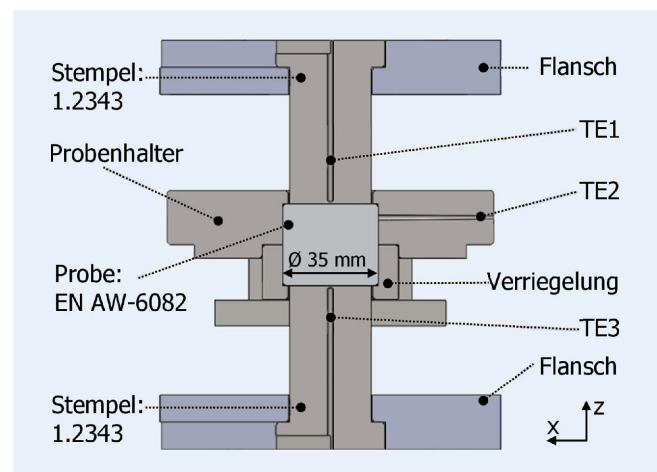


**Bild 1** Entwickelter Versuchsaufbau zur Ermittlung des Wärmeübergangskoeffizienten (WÜK): (a) unbelasteter und (b) belasteter Zustand.  
Foto: IFUM Hannover

spannt. Über die Federn ist die mittlere Platte schwimmend gelagert. Eine U-förmige Aussparung in der mittleren Platte dient dazu, den Probenhalter aufzunehmen und zwischen den Stempeln zu zentrieren. Die untere Platte ist auf dem Hydraulikzylinder montiert. Wird der Zylinder in Richtung Kraftmesszelle verfahren, werden die Federn komprimiert und zentrieren die mittlere Platte kontinuierlich mittig zwischen der oberen und unteren Platte, wie im belasteten Zustand in Bild 1 (b) dargestellt ist. Somit wird ein zeitgleicher Kontakt zwischen oberen Stempel und Probe sowie unterem Stempel und Probe sichergestellt. Der Aufbau des Probenhalters, der Probe sowie die beiden Stempel sind in der Schnittansicht in Bild 2 gezeigt.

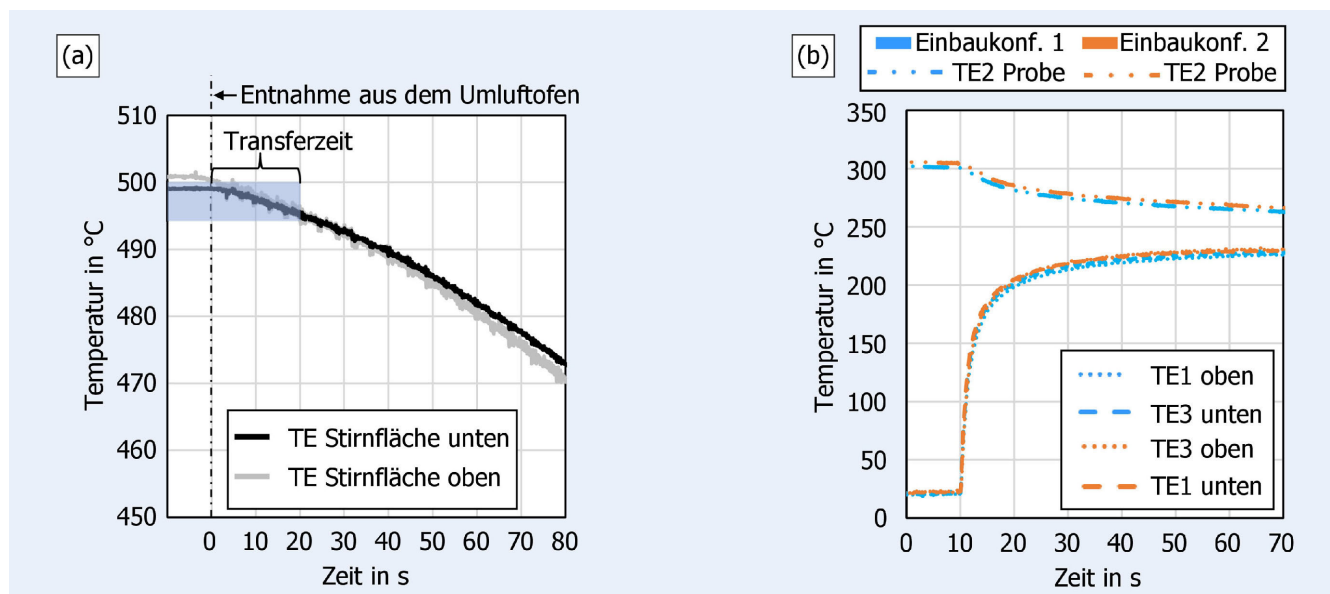
Die Aluminiumprobe wird durch den Probenhalter fixiert. Dieser kann durch Rotation um die z-Achse formschlüssig geschlossen werden. Durch die Öffnungen im Probenhalter und in der Verriegelung können die Stempel mit der Stirnfläche der Probe in Kontakt treten. In den Stempeln befindet sich eine Bohrung, über die ein Mantelthermoelement des Typ K bis 0,5 mm unterhalb der Stempelstirnfläche eingebracht wurde. So kann die Stempelerwärmung durch den Kontakt mit der Probe oberflächennah ermittelt werden. Über eine seitliche Bohrung im Probenhalter wird direkt an der Probenmantelfläche die Temperatur gemessen. Sobald die Stempel in Kontakt mit der Probe treten, ist die Probe vollständig umschlossen, sodass ein hydrostatischer Spannungszustand erzeugt wird. Somit können Kontaktspannungen oberhalb der Fließspannung des Probenmaterials appliziert werden.

Ein simultaner Kontakt der zwei Stempel mit der Probe ist für den Versuch essenziell. Dazu wurden die unteren Federn durch Unterlegscheiben vorgespannt, sodass das Eigengewicht der mittleren Platte und des Probenhalters kompensiert wurde. Zur Ermittlung der Systemkräfte wurden der Hydraulikstempel auf die theoretische Position gefahren, bei der die Stempel Kontakt zur Probe haben. Die benötigte Kraft wurde genullt, sodass für die Belastungsfunktion die berechneten Kräfte der jeweiligen Kontaktdrücke genutzt werden konnten. Für den Versuch wurde ein



**Bild 2** Schematische Schnittansicht durch die Aktivkomponenten des Versuchsaufbaus. Grafik: IFUM Hannover

kombiniertes Belastungsprofil entwickelt, damit die Stempel nach dem Einlegen des Probenhalters möglichst schnell mit der Probe in Kontakt treten können, ohne dass die Probenoberfläche vorzeitig auskühlt. Zunächst wird weggesteuert vorpositioniert und abschließend kraftgesteuert verfahren, bis durch den Kontakt zur Probe die Sollkraft erreicht wird. Die Sollkraft wird für 60 s gehalten und anschließend entlastet. Der Probenhalter wird vor dem Versuch mit der Probe bestückt und in einem Umluftofen (Firma Nabertherm) auf die Prüftemperatur erwärmt. Dabei wird durch das TE im Probenhalter die Aluminiumtemperatur überwacht. Das Abkühlverhalten der Stirnflächen der Aluminiumproben nach der Entnahme aus dem Ofen wurde in Vorversuchen bei 500 °C untersucht. Dabei wurde an beiden Stirnflächen über ein TE vom Typ K der Zeit-Temperaturverlauf ermittelt. Die resultierenden Abkühlkurven zeigt Bild 3 (a). Eine maximale Abweichung von der Versuchstemperatur von 5 °C wird toleriert, sodass die Transferzeit auf maximal 20 s festgelegt wurde.



**Bild 3** (a) Untersuchung der Probenauskühlung während des Transfers, (b) Überprüfung der Stempelthermoelemente TE1 und TE3. Grafik: IFUM Hannover

**Tabelle.** Versuchsplan zur Ermittlung eines wirkgrößenabhängigen WÜKs.

Parameterkombinationen	Temperatur in °C	Schmierstoff	Kontaktdruck in MPa	Wiederholungen
	300	-	50, 100, 150, 200, 250	3
	300	LUBRODAL F 3670	50, 100, 150, 200, 250	3
	300	Con Traer G300	50, 100, 150, 200, 250	3
	500	-	50, 100, 150, 200, 250	3

Vor der Durchführung des Versuchsplans (siehe Tabelle) wurden die TE in den Stempeln überprüft. Dazu wurden nach einem Versuchsdurchlauf die Stempel getauscht und erneut ein Versuch durchgeführt. In beiden Einbaupositionen konnten reproduzierbare Temperaturverläufe aufgenommen werden, wie in Bild 3 (b) gezeigt. Zudem zeigt der simultane Temperaturanstieg, dass die Stempel zeitgleich mit der Probe in Kontakt traten. Zur Ermittlung der WÜK in Abhängigkeit der Prozessparameter wurde jede Parameterkombination in der **Tabelle** dreimal wiederholt.

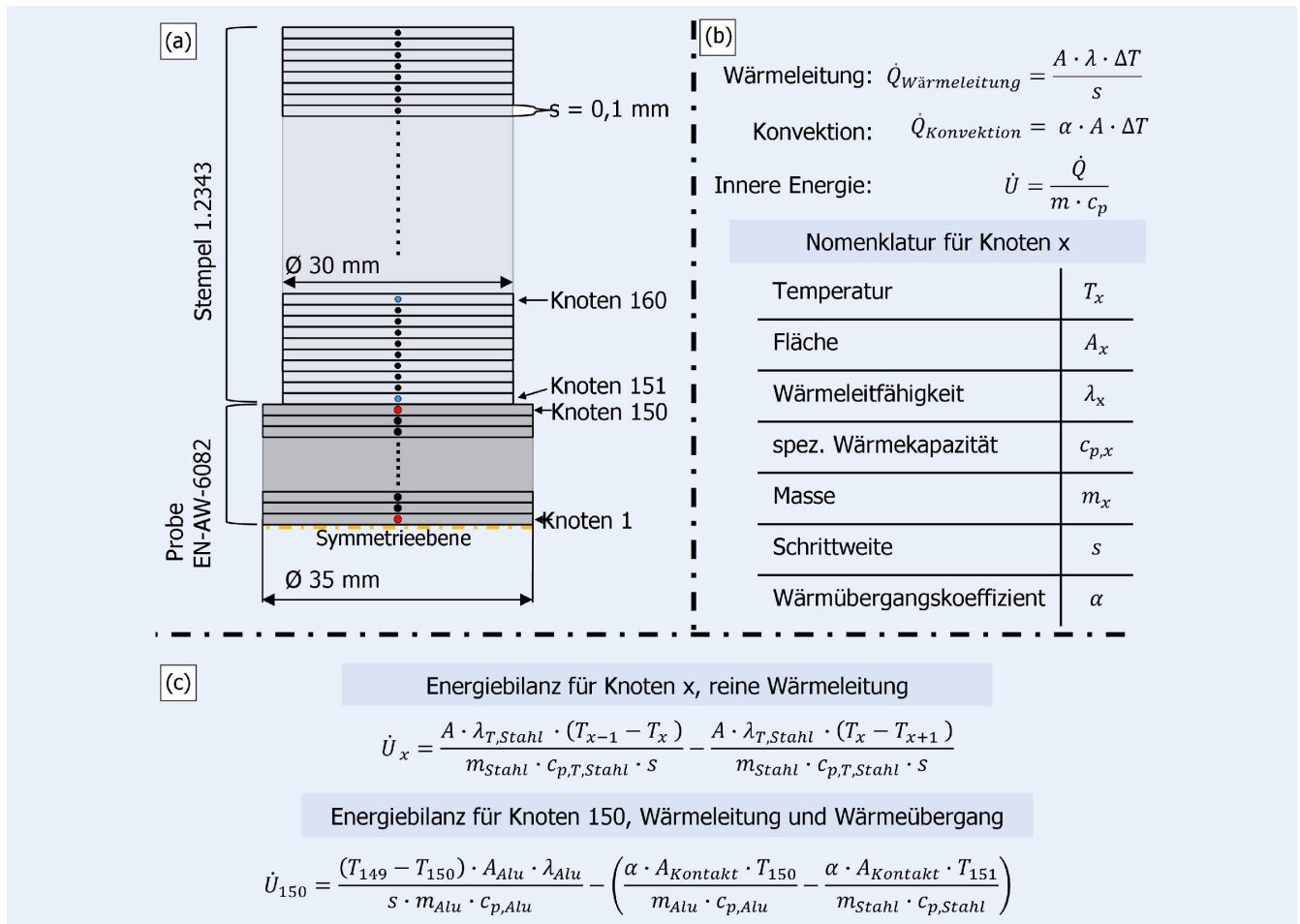
Als Schmierstoffe wurden "Con Traer G300" und "Lubrodal F 3670" der Firma Fuchs untersucht und vor den Versuchen auf den Stempelstirnflächen appliziert. Con Traer G300 ist ein graphithaltiges mineralölfreies Spray, welches durch leichtflüchtige Lösungsmittel schnell trocknet und appliziert werden kann. Dem steht mit Lubrodal F 3670 ein graphithaltiger Schmierstoff gegenüber, der in einer nicht-wassermischbaren Dispersion aufgetragen werden kann. Anwendung findet Lubrodal F 3670 vor allem für das isotherme Schmieden von Aluminium. Con Traer G300 wurde mit vier Hieben aufgesprüht, wohingegen Lubrodal F 3670 in Anlehnung an das Pad-printing-Verfahren über einen infiltrierte Schwamm aufgetragen wurde [24]. Die Stempel wurden vor jedem Versuch gereinigt, bevor neuer Schmierstoff aufgebracht wurde. Die Oberflächenrauheiten der Stempel sowie der Aluminiumproben wurden vor den Versuchen mit dem Keyence "VR-3200" Profilometer aufgenommen. Die Rauheitswerte sind vergleichbar, da beide Oberflächen spanend bearbeitet wurden mit  $S_z$  von 0,107 mm für EN AW-6082 und  $S_z$  von 0,065 mm für 1.2343.

## 2.2 Iterativ-inverse Bestimmung des WÜK

Die Bestimmung des WÜK erfolgte über eine iterativ inverse Optimierung, basierend auf den experimentell ermittelten Temperaturverläufen. Das entwickelte "Matlab"-Skript besteht aus einem 1D-Finite-Elemente (FE)-Modell und einem Optimierungsmodul. Basis für das 1D-FE-Modell ist die Diskretisierung des Versuchsaufbaus, wodurch die Probe und der Stempel als diskretisierte Knotenkette dargestellt werden. Die Wärmeleitung innerhalb der Materialien wurde durch das Fourier-Gesetz modelliert, während der Wärmeübergang zwischen den beiden Materialien gemäß dem Newtonschen Abkühlungsgesetz beschrieben wurde. In **Bild 4** ist schematisch das 1D-FE-Modell überlagert mit dem Stempel und der Probe sowie die Nomenklatur der Energiebilanzen für die Wärmeleitung und den Wärmeübergang dargestellt.

Ein Wärmeverlust durch Wärmestrahlung wurde nicht berücksichtigt, da die Proben und die Stempel durch den Probenhalter weitgehend abgeschirmt sind und deshalb Strahlung zunächst vernachlässigt wurde. Zur Reduktion des Berechnungsaufwandes wird die Symmetrie des Versuchsaufbaus ausgenutzt und lediglich eine Hälfte betrachtet, wobei sich die Symmetrieebene mittig in der Probe befindet.

Die Beschreibung der thermophysikalischen Eigenschaften wie der Wärmeleitfähigkeit, der spezifischen Wärmekapazität oder der Dichte erfolgte in Abhängigkeit der Temperatur. Die thermischen Materialdaten wurden aus der JMat-Pro-Datenbank entnommen. Das Modell besteht aus 500 Knoten, wobei die Knoten 1–150 die Probe beschreiben und die Knoten 151–500 den Stempel. Den



**Bild 4** (a) Schematische Darstellung des 1D-FE-Modells, (b) Nomenklatur und Grundgleichungen, (c) Beispiel der betrachteten Energiebilanzen. Grafik: IFUM Hannover

Knoten der Proben wurde initial die Versuchstemperatur zugewiesen und den Knoten des Stempels eine Ausgangstemperatur von  $25^\circ\text{C}$ . Dem Knoten 1 wurde als Randbedingung der experimentelle Temperaturverlauf aus dem Probenhalter zugewiesen. Knoten 150 und 151 repräsentieren die Kontaktknoten, an denen der WÜK in die Energiebilanz eingeht. Die Position des TE im Stempel wird durch Knoten 160 dargestellt. Der Temperaturverlauf von Knoten 160 wird zum Abgleich der experimentell aufzeichneten Temperaturkurve verwendet.

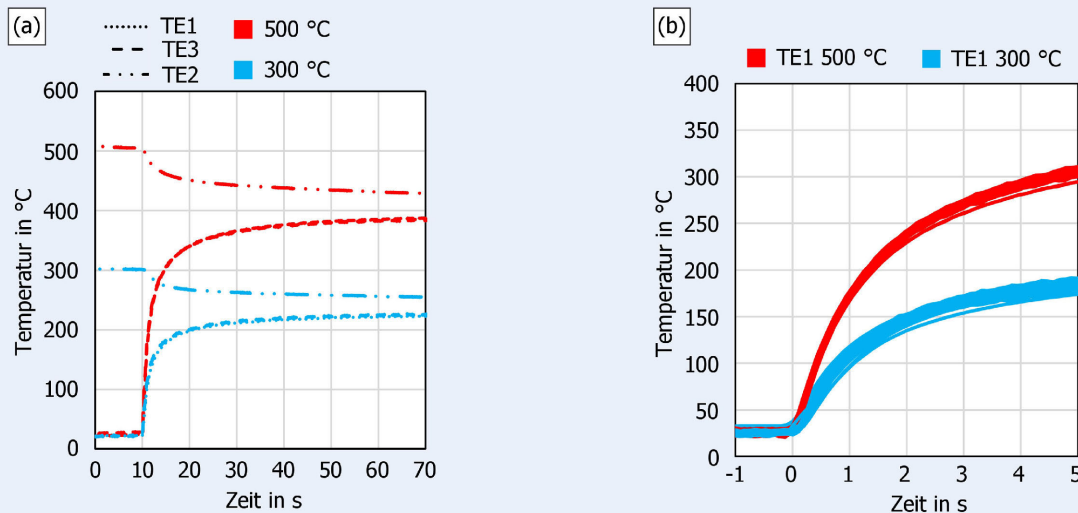
Die Berechnung der Zeit-Temperaturverläufe erfolgte für jede Iteration in jedem Knoten durch den Differentialgleichungslöser "ODE45". Die zu verwendende Zeitschrittweite wurde dabei adaptiv automatisch angepasst. Als Ergebnis steht ein numerisch bestimmter Temperatur-Zeit-Verlauf für jeden Knoten für einen spezifischen WÜK zur Verfügung. Durch Abgleich des berechneten und experimentell gemessenen Temperaturverlaufs an Knoten 160 wird die Fehlerquadratsumme  $R^2$  bestimmt und an das Optimierungsmodul übergeben. Basierend auf dem  $R^2$ -Wert bestimmt die Funktion "fminsearch" im Optimierungsmodul einen neuen WÜK für die folgende Iteration. Für die Optimierungsschleife wurden zwei Abbruchskriterien definiert: eine maximale Iterationsanzahl von 50 Durchläufen oder ein  $R^2$ -Wert  $> 0,98$ . Mit dem optimierten WÜK wurden abschließend das 1D-FE-Modell final gelöst und die berechneten Temperaturverläufe visualisiert.

### 3 Ergebnisse und Diskussion

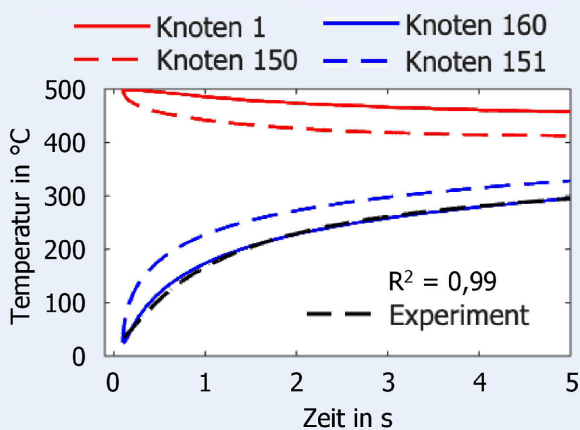
#### 3.1 Experimentelle und numerische Ergebnisse

**Bild 5 (a)** stellt beispielhaft die Temperaturverläufe der TE 1–3 für einen Versuch mit einer initialen Probertemperatur von  $500^\circ\text{C}$  und  $300^\circ\text{C}$  sowie einem Kontaktdruck von  $50 \text{ MPa}$  ohne Schmierung dar.

Es ist zu erkennen, dass bei beiden Versuchen die Temperatur in den Stempeln innerhalb der ersten  $5 \text{ s}$  steil ansteigt. Nach  $5 \text{ s}$  verlangsamt sich der Anstieg deutlich und die Temperatur nähert sich einem versuchsspezifischen Grenzwert an. Reziprok dazu entwickelt sich die Probertemperatur, jedoch ist das vorliegende Temperaturdelta geringer als das der Stempel. Der Temperaturabfall in der Probe während des Versuchs ist bei  $500^\circ\text{C}$  stärker als bei  $300^\circ\text{C}$  ausgeprägt. Aufgrund des steilen Temperaturanstieges innerhalb der ersten  $5 \text{ s}$  wurde dieser Zeitraum für die WÜK-Optimierung genutzt. Die kontinuierliche Temperaturentwicklung im Anschluss wird von der Wärmeleitung dominiert und nicht vom Wärmeübergang und ist somit weniger relevant [25]. Die Temperaturverläufe beider Stempel verlaufen nahezu deckungsgleich, sodass die getroffene Symmetrieannahme korrekt ist. Für TE1 im oberen Stempel wurden in Bild 5 (b) die Temperaturverläufe aller Parameterkombinationen aufgetragen und farbig nach der Probertemperatur gruppiert. Dabei fällt auf, dass der Anstieg der Temperatur unabhängig vom gewählten Kontaktdruck oder



**Bild 5** (a) Experimentelle Temperaturverläufe für 300 °C und 500 °C mit 50 MPa ohne Schmierung, (b) Temperaturverläufe aufgenommen an TE1 für alle durchgeführten Versuchsparameter. Grafik: IFUM Hannover



**Bild 6** Exemplarische Temperaturverläufe aus dem 1D-FE-Modell für einen Versuch mit 500 °C und 50 MPa ohne Schmierung. Grafik: IFUM Hannover

Schmiermittel sehr ähnlich ist. Im weiteren Verlauf nimmt die Streubreite der Daten weiter zu, wobei bei 500 °C die Streubreite schmäler ist aufgrund der geringeren Versuchsanzahl.

Die simulierten Temperaturverläufe aus dem 1D-FE-Modell sind exemplarisch für eine initiale Proben temperatur von 500 °C und einem Kontaktdruck von 50 MPa in **Bild 6** dargestellt.

Knoten 1 weist einen identischen Verlauf wie TE2 in Bild 5 (a) auf, da dieser aus den experimentellen Versuchen als Randbedingung implementiert wurde. Der Kontaktknoten 150 im Aluminium verliert 55 °C innerhalb der ersten 0,5 s. Ein noch größeres  $\Delta T$  von 155 °C stellt sich im Knoten 151 an der Stempelkontaktfläche ein. Der Vergleich zwischen Knoten 160 und dem TE im Stempel zeigt, dass im Modell in der ersten Sekunde der experimentelle Verlauf leicht überschätzt wird. Die geringfügige Differenz nimmt über den weiteren Verlauf ab. Insgesamt weist der berechnete Verlauf mit dem optimierten WÜK eine sehr gute Übereinstimmung auf, belegt durch einen  $R^2$ -Wert von 0,99.

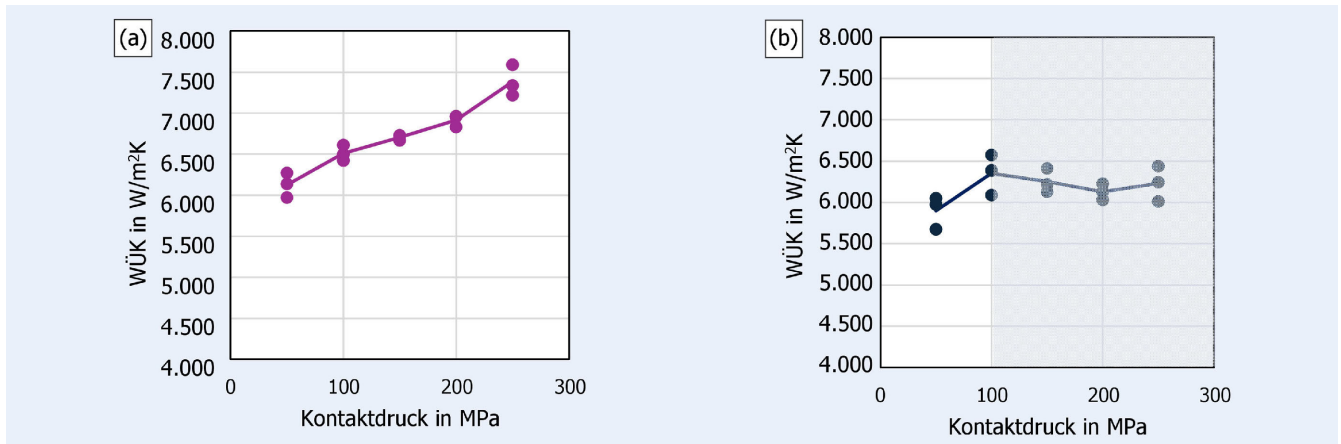
### 3.2 Wirkgrößenabhängiger Wärmeübergangskoeffizient

Die invers iterativ bestimmten WÜK für den untersuchten Parameterraum sind jeweils über den Kontaktdruck aufgetragen. Neben den drei Wiederholungen je Parameterkombination wurde der Mittelwert aus den drei Punkten gebildet und der mittlere WÜK als Linie geplottet. Für 300 °C ohne Schmierung in **Bild 7** (a) zeigt sich ein fast linearer Trend, der einen kontinuierlichen Anstieg des WÜK mit Erhöhung des Kontaktdruckes beschreibt.

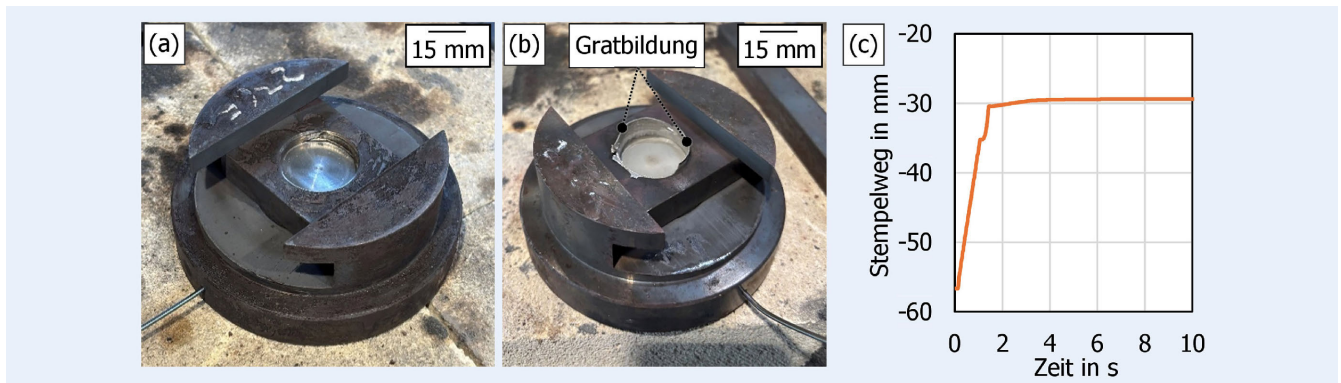
Ein steigender WÜK mit Erhöhung des Kontaktdruckes konnte ebenfalls in den Arbeiten von *Merklein et al.* für Bleche aus 22MnB5 bis zu einem maximalen Kontaktdruck von 50 MPa beobachtet werden [26]. Ein Erklärungsansatz ist, dass mit steigendem Kontaktdruck die Oberflächenrauheiten des weichen Kontaktpartners eingeebnet werden und so die wahre Kontaktfläche zur Wärmeübertragung erhöht wird. Um die Mittelwertkurve liegen die einzelnen Punkte sehr nah beieinander, was auf eine hohe Reproduzierbarkeit der Experimente hindeutet. Im direkten Vergleich zeigt der WÜK für eine Proben temperatur von 500 °C bei Kontaktdrücken von 50 MPa und 100 MPa ebenfalls einen ansteigenden Verlauf und vergleichbare Werte. Die Streuung ist aber im Vergleich zu 300 °C erhöht und die Mittelwerte fallen geringfügig niedriger aus, siehe Bild 7 b). Daraus kann abgeleitet werden, dass der Kontaktdruck einen größeren Einfluss auf den WÜK besitzt als die Temperatur. Mit steigendem Kontaktdruck stagniert der WÜK und bleibt auf einem konstanten Niveau von durchschnittlich 6250 W/m<sup>2</sup>k. Eine Erklärung liefert die Analyse der Probe sowie der Wegmessung des Hydraulikzylinders.

In **Bild 8** (a) ist die untere Stirnfläche einer Probe dargestellt, die bei 300 °C und 250 MPa geprüft wurde.

Eine Probe, die bei 500 °C und ebenfalls bei 250 MPa geprüft wurde, zeigt Bild 8 (b). Bei 300 °C ist keine Gratbildung zu beobachten, wogegen bei 500 °C eine starke Flittergratbildung festgestellt wurde. Die verringerte Fließspannung des Aluminiums führt dazu, dass der Fließwiderstand, der sich aus dem Spalt zwischen Stempel und Verriegelung ergibt, bei der aufgetragenen Last überwunden wird und somit kein hydrostatischer Spannungszustand



**Bild 7** (a) Druckabhängiger WÜK für 300 °C ohne Schmierung, (b) druckabhängiger WÜK für 500 °C ohne Schmierung. Grafik: IFUM Hannover



**Bild 8** (a) Probenstirnfläche nach einem Versuch mit 300 °C, 250 MPa, (b) Probenstirnfläche nach einem Versuch mit 500 °C, 250 MPa, (c) Stempelweg-Zeitverlauf für einen Versuch mit 500 °C, 250 MPa. Grafik: IFUM Hannover

mehr gegeben ist. Eine Analyse des Zylinderwegs in der konstanten Lastphase zeigt in Bild 8 (c) eine langsame, aber konstante Wegzunahme. Damit wurden die applizierten Kontaktdrücke nicht erreicht, wodurch für 500 °C der WÜK nur bis 100 MPa valide bestimmt werden konnte. Die WÜK in Bild 7 (b) sind daher oberhalb 100 MPa ausgegraut.

Der Einfluss der untersuchten Schmiermittel auf den WÜK ist in Bild 9 gezeigt.

Zunächst fällt auf, dass im Vergleich zu den ohne Schmierung durchgeführten Versuchen (siehe Bild 7 (a)) eine größere Streuung bei den Wiederholungen vorliegt. Die größten Schwankungen gibt es bei dem mittels Sprühdose aufgetragenen Schmierstoff Con Traer G300. Durch das Aufspritzen unterliegt die Schmiermittelaufbringung einer größeren Variation als durch das Aufbringen mit Schwamm. Die ermittelten WÜK sind für Lubrodal F 3670 größer als für Con Traer G300. Beide Schmiermittel zeigen bis 200 MPa Kontaktdruck einen linearen Anstieg des WÜK, wobei die Steigung des Anstiegs von Con Traer G300 steiler verläuft. Bei 250 MPa liegen die beiden WÜK auf einem vergleichbaren Niveau, jedoch ist der WÜK niedriger als bei 200 MPa. Auch im Vergleich zum ungeschmierten Zustand bei 250 MPa fällt der WÜK deutlich geringer aus. Der größere WÜK, welcher mit Lubrodal F 3670 auch schon bei geringeren Kontaktdrücken von 50 MPa erzielt wurde, könnte auf das bessere Vernetzungsverhalten der ölbasierten Dispersion zurückgeführt werden. Bei der Versuchstemperatur von 300 °C liegt der Schmierstoff noch viskos vor, da das Trägermedium noch nicht verdampft ist.

Bedingt durch das viskose Verhalten werden die Kavitäten in der Oberfläche gefüllt, wodurch die wahre Kontaktfläche vergrößert wird und der WÜK ansteigt. Der Abfall bei 250 MPa könnte darauf zurückgeführt werden, dass unter diesem Kontaktdruck das Trägermedium aus der Kontaktfläche verdrängt wird und die dispergierten Schmierstoffteilchen ohne Trägermedium als Grenzschicht fungieren und den Wärmeübergang beeinträchtigen. Da das Schmiermittel Con Traer G300 ein leichtverflüchtigendes Lösungsmittel als Trägermedium nutzt, das nach dem Aufspritzen verdampft, fungiert es bereits bei niedrigen Kontaktdrücken als Trennmittel. Nach dem Verdampfen liegen die Graphiteilchen ohne Trägermedium in der Kontaktzone vor, wodurch die wahre Kontaktfläche verkleinert wird. Eine direkte Folge ist ein reduzierter WÜK, der mit Erhöhung des Kontaktdruckes ansteigt. Der Abfall des WÜK bei 250 MPa bedarf einer weiteren Analyse der Schmierstoffrückstände an den Stempeln und der Probenstirnflächen. In Bild 10 sind alle Trendlinien des mittleren WÜK über die Kontaktdrücke aufgetragen.

Im direkten Vergleich zeigt sich, dass bei 300 °C bis 200 MPa ein linearer Anstieg des WÜK vorliegt, wohingegen bei 500 °C der Trend nur bis 100 MPa abzeichnet. Oberhalb 100 MPa stagniert der WÜK, da die angestrebte Kontaktspannung nicht erreicht werden konnte und ist daher invalide. Der Vergleich von geschmierten zu ungeschmierten Stempeln zeigt, dass ölbasierte Schmiermittel einen verbesserten Wärmeübergang ermöglichen als ungeschmierte oder trockengeschmierte Kontaktflächen.

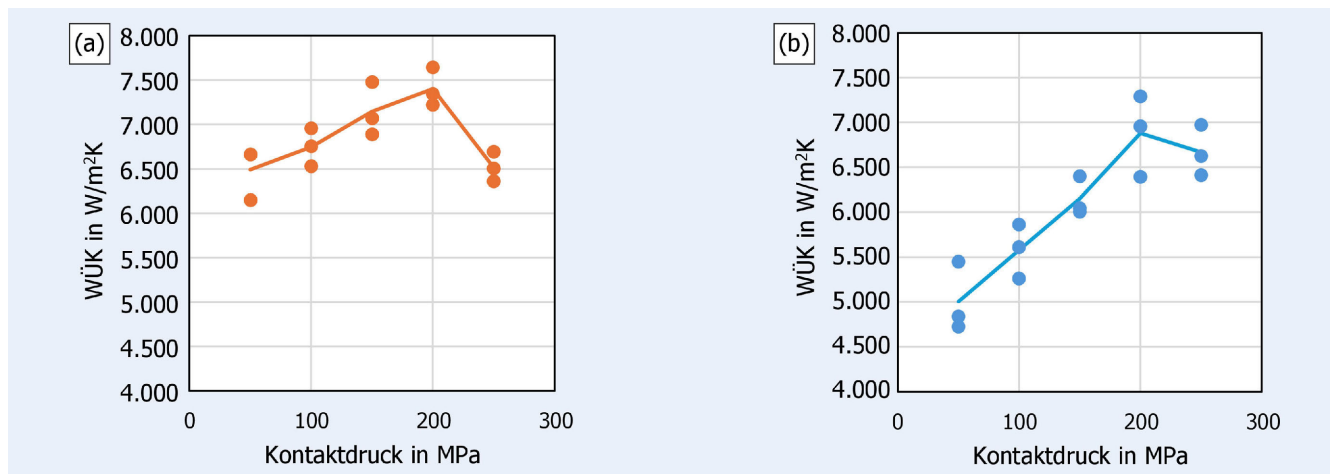


Bild 9 (a) Druckabhängiger WÜK für 300 °C mit Lubrodal F 3670, (b) druckabhängiger WÜK für 300 °C mit Con Traer G300. Grafik: IFUM Hannover

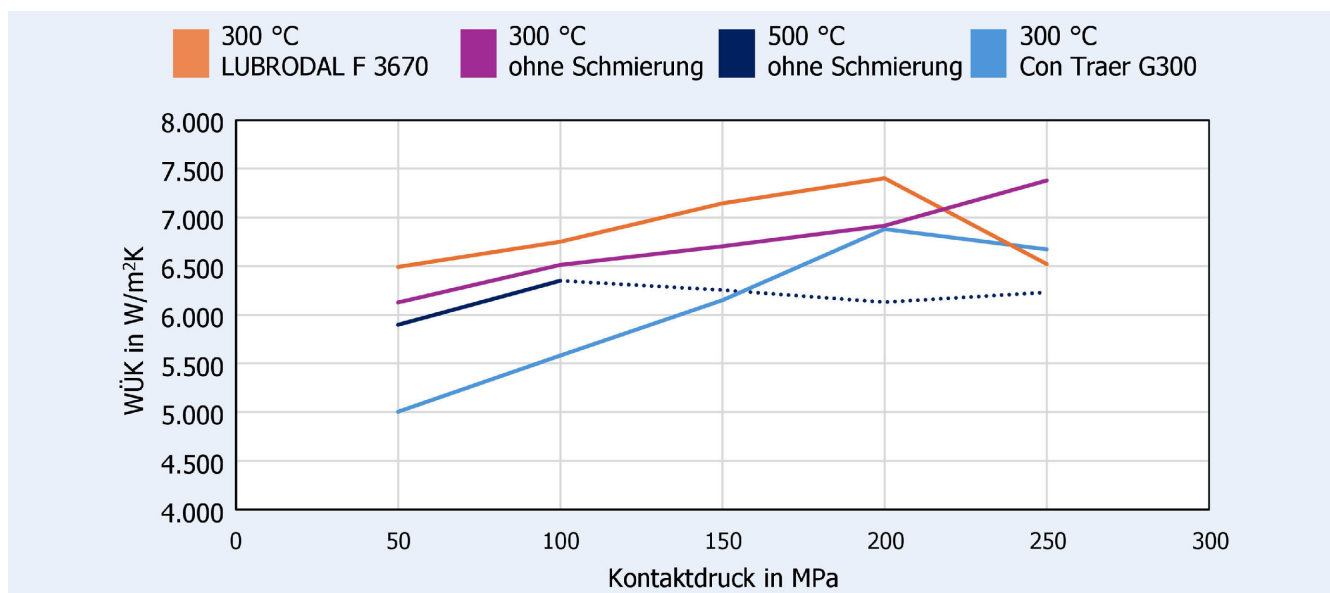


Bild 10 Gegenüberstellung der ermittelten druckabhängigen WÜK. Grafik: IFUM Hannover

#### 4 Zusammenfassung und Ausblick

Zur Ermittlung des WÜK unter realitätsnahen Bedingungen der Warmmassumformung, wurde ein neuer Versuchsstand entwickelt. Durch einen experimentell-numerischen Ansatz konnte ein wirkgrößenabhängigen WÜK ermittelt werden. Der Aufbau erlaubt die simultane Erfassung des transienten Temperaturverlaufs durch Thermoelemente bei definierten Kontaktdrücken an zwei Stempeln. Ein spezieller Probenhalter ermöglicht die Applikation eines hydrostatischen Spannungszustands im Kontaktbereich zwischen Stempel und Aluminiumprobe, wodurch Kontaktspannungen untersucht werden können, die oberhalb der werkstoffspezifischen Fließspannungen liegen. Die Versuche wurden mit und ohne Schmierung sowie bei Temperaturen von 300 °C bis 500 °C und Kontaktdrücken bis 250 MPa durchgeführt. Zur quantitativen Auswertung wurde ein iterativ-inverses Verfahren auf Basis eines 1D-FE-Modells in Matlab implementiert. Die iterative Bestimmung des WÜK erfolgte über die Minimierung des Fehlers zwischen simulierten und experimentell erfassten Temperaturverläufen.

Die Ergebnisse zeigen, dass der WÜK maßgeblich vom Kontaktdruck beeinflusst wird, wobei bei 300 °C ein nahezu linearer Anstieg bis 200 MPa beobachtet wurde. Bei 500 °C wurde hingegen ein Plateau ab 100 MPa festgestellt. Dabei wurde eine lokale Umformung (zum Beispiel Gratbildung) beobachtet, sodass kein hydrostatischer Spannungszustand mehr vorliegt und die Kontaktdrücke nicht erreicht werden konnten. Somit konnte für 500 °C der WÜK nur bis 100 MPa valide bestimmt werden. Die untersuchten Schmierstoffe zeigten unterschiedliche Effekte auf den WÜK. Der Schmierstoff Lubrodal F 3670 ermöglichte im Vergleich zu Con Traer G300 einen besseren Wärmeübergang bei geringeren Drücken, was auf ein verbessertes Benetzungsverhalten der Oberflächenrauheiten zurückgeführt wird. Bei höheren Drücken fiel der WÜK ab, vermutlich infolge der Verdrängung des Trägermediums aus der Kontaktzone. Der entwickelte Versuchsstand und das gekoppelte Auswerteverfahren ermöglichen eine systematische und reproduzierbare Erfassung des WÜK.

In zukünftigen Arbeiten ist eine Modifikation der Stempel- und Probenhaltergeometrie erforderlich, um den Spalt, welcher zur Gratbildung führt, zu reduzieren. Dadurch können WÜK bei

500 °C und Kontaktdrücken größer 100 MPa ermittelt werden. Eine zusätzliche Erweiterung des Versuchsstandes um eine aktive Kühlung ist vorgesehen, um den WÜK für Stahlproben bei Temperaturen von 900 °C aufnehmen zu können. Zudem wird eine Erwärmung der Stempel über Heizmanschetten integriert, um den Versuchstand weiter auf die Randbedingungen der Massivumformung anzupassen. Zur Nutzung der ermittelten WÜK in FE-Simulationen werden die erzielten Erkenntnisse in ein Modell zur mathematischen Beschreibung des wirkgrößenabhängigen WÜK übertragen. So kann der Wärmeübergang als orts- und zeitabhängige Größe in Prozesssimulationen berücksichtigt werden, um nicht nur die Prognose der thermischen Werkstückhistorie zu verbessern, sondern auch gezielte Maßnahmen zur Prozessführung zu ermöglichen.

## FÖRDERHINWEIS

Gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) – 496068488.


## LITERATUR

- [1] Wilke, F.: Stabstahl und Schmiedestücke aus hochfesten Stählen. SchmiedeJOURNAL. Stand: 2014. Internet: [www.massiverleichtbau.de/fileadmin/info/informationen\\_aus\\_der\\_branche/2014-03\\_Schmiedeteile\\_aus\\_hochfesten\\_Staehle\\_DEW\\_SchmiedeJOURNAL.pdf](http://www.massiverleichtbau.de/fileadmin/info/informationen_aus_der_branche/2014-03_Schmiedeteile_aus_hochfesten_Staehle_DEW_SchmiedeJOURNAL.pdf). Zugriff am 13.10.2025
- [2] Raedt, H.-W.; Wilke, F.; Ernst, C.-S.: Initiative Massiver Leichtbau Phase II: Leichtbaupotenziale für ein leichtes Nutzfahrzeug. ATZ Automobiltech (2016) 118, S. 50–53
- [3] Wurm, T.; Busse, A.; Raedt, H.: Initiative Massiver Leichtbau – Phase III: Werkstofflicher Leichtbau für Hybrid-Pkw und schweren Lkw. ATZ Automobiltech (2019) 121, S. 16–23
- [4] Behrens, B.-A.; Kosch, K.-G.: Herstellung lokal anforderungsoptimierter Hybridbauteile durch Verbundschmieden. Schmiede-Journal. Stand: 2013. Internet: [www.massivumformung.de/fileadmin/user\\_upload/6\\_Presse\\_und\\_Medien/Veroeffentlichungen/Schmiede-Journal/Maerz\\_2013/Spektrum\\_4.pdf](http://www.massivumformung.de/fileadmin/user_upload/6_Presse_und_Medien/Veroeffentlichungen/Schmiede-Journal/Maerz_2013/Spektrum_4.pdf), S. 60–63. Zugriff am 13.10.2025
- [5] Wohletz, S.; Groche, P.: Temperature Influence on Bond Formation in Multi-material Joining by Forging. Procedia Engineering (2014) 81, pp. 2000–2005
- [6] Essa, K.; Kacmarcik, I.; Hartley, P. et al.: Upsetting of bi-metallic ring billets. Journal of Materials Proceeding Technology (2012) 212, pp. 817–824
- [7] Politis, D. J.; Lin, J.; Dean, T. A.: Investigation of Material Flow in Forging Bi-metal Components. Proceedings of the 14th International Conference on Metal Forming, steel research international, 2012, pp. 231–234
- [8] Kosch, K.-G.: Grundlagenuntersuchungen zum Verbundschmieden hybrider Bauteile aus Stahl und Aluminium. Dissertation, Leibniz Universität Hannover, 2016
- [9] Kucharzewski, A.: Massivumformung – eine Prozesskette für den Leichtbau. Deutsche Massivumformung, Info-Reihe Massivumformung 42 (2010) 2, S. 34–40
- [10] Leiber, R.: Hybridschmieden bringt den Leichtbau voran. Aluminium Praxis (2012) 7–8
- [11] Kroner, A.: Ritterschlag für die Hybridschmiede. Industrie Anzeiger (2015) 15.15, S. 38–40
- [12] Behrens, B.-A.; Kosch, K.-G.; Frischkorn, C. et al.: Compound forging of hybrid powder-solid-parts made of steel and aluminum. Material Forming ESAFORM 2012. Key Engineering Materials 504–506 (2012), pp. 175–180
- [13] Behrens, B.-A.; Uhe, J.; Petersen, T. et al.: Challenges in the Forging of Steel-Aluminum Bearing Bushings. Materials 14 (2021) 4, #803, doi.org/10.3390/ma14040803
- [14] Alasti, M.: Modellierung von Reibung und Wärmeübergang in der FEM-Simulation von Warmmassivumformprozessen. Dissertation, Leibniz Universität Hannover, 2008
- [15] Burte, P. R.; Yong-Taek-Im; Altan, T. et al.: Measurement and analysis of heat transfer and friction during hot forging. Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Industry 112 (1990) 4, pp. 332–339
- [16] Jain, V. K.: Determination of heat transfer coefficient for forging applications. Journal of Materials Shaping Technology 8 (1990) 3, pp. 193–202
- [17] Bariani, P. F.; Berti, G.; Dal-Negro, T.: Experimental evaluation and FE simulation of thermal conditions at tool surface during cooling and deformation phases in hot forging operations. CIRP 51 (2002) 1, pp. 219–222
- [18] Malinowski, Z.; Lenard, J. G.; Davies, M. E.: A study of the heat-transfer coefficient as a function of temperature and pressure. Journal of Materials Processing Technology 41 (1994) 2, pp. 125–142
- [19] Chang, C. C.; Bramley, A. N.: Determination of the heat transfer coefficient at the workpiece-die interface for the forging process. Journal of Engineering Manufacture 216 (2002) 8, pp. 1179–1186
- [20] Rosochowska, M.; Chodnikiewicz, K.; Balendra, R.: A new method of measuring thermal contact conductance. Journal of Materials Processing Technology 145 (2004) 2, pp. 207–214
- [21] Caron, E.; Daun K.; Wells, M.: Experimental heat transfer coefficient measurements during hot forming die quenching of boron steel at high temperatures. International Journal of Heat and Mass Transfer 71 (2014), pp. 396–404
- [22] Mendiguren, J.; Ortubay, R.; de Argandoña, E. S. et al.: Experimental characterization of the heat transfer coefficient under different close loop controlled pressures and die temperatures. Applied Thermal Engineering 99 (2016), pp. 813–824
- [23] Altan, T.; Semiatin, S. L.; Collings, E. W. et al.: Determination of the Interface Heat Transfer Coefficient for Non-Isothermal Bulk-Forming Processes. Journal of Engineering for Industry 109 (1987) 1, pp. 49–57
- [24] Pietsch, M.; Mennig, M.: Pad Printing. In: Aegerter, M. A., Mennig, M. (Hrsg.): Sol-Gel Technologies for Glass Producers. New York: Springer Science+Business Media 2004, pp. 123–125
- [25] Müller, F.: Erweiterung von Verschleißmodellen für moderne Warmumformprozesse. Dissertation, Leibniz Universität Hannover, 2024
- [26] Merklein, M.; Lechler, J.; Stoehr, T.: Investigations on the thermal behavior of ultra high strength boron manganese steels within hot stamping. International Journal of Material Forming S1 (2009) 2, pp. 259–262

**Norman Mohnfeld, M.Sc.**   
mohnfeld@ifum.uni-hannover.de


**Hendrik Wester, M.Sc.** 

**Rico Grawe, B.Sc.** 

**Simon Peddinghaus, M.Sc.** 

**Dr.-Ing. Johanna Uhe**

**Prof. Dr.-Ing. Bernd-Arno Behrens** 

Leibniz Universität Hannover   
Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen IFUM  
An der Universität 2, 30823 Hannover  
[www.ifum.uni-hannover.de](http://www.ifum.uni-hannover.de)

## LIZENZ



Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons  
Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)