

Temperaturabhängige Werkstoffuntersuchungen an Aluminiumlegierungen in der Umgebung von Schweißnähten

A. Scharff, Rostock; St. Allmeier, München

Temperaturabhängig gemessene mechanische und wärmephysikalische Kennwerte von Aluminiumlegierungen sind für alle Aluminiumverarbeiter und FEM-Benutzer sehr wichtig. Es herrscht ein Mangel an ausreichend sicheren Messwerten für den durch Schweißwärme beeinflussten Nebennahtbereich. Derartige Daten sind in keiner kommerziell erhältlichen Datenbank vorhanden. Dort findet man lediglich ausgewählte Untersuchungen am reinen Grundwerkstoff (verschiedene Legierungen, Prüftemperaturen und Eigenschaften, aus unterschiedlichsten Quelle zusammengetragen). Diese Lücke soll durch Untersuchungen an einer thermomechanischen Simulationsanlage geschlossen werden.

1. Aufbau und Wirkungsweise einer „Gleeble-Anlage“

Die Gleeble-Anlagen des US-amerikanischen Entwicklers und Herstellers Dynamic Systems Incorporation (DSI) sind - einfach ausgedrückt - eine Kombination aus Hochgeschwindigkeitsdilatometer und Zug-/ Druck-Prüfmaschine (Bild 1). Dabei ist DSI in der Lage, die Standardausfertigung dieser Anlage weitestgehend an spezielle Kundenwünsche bezüglich des thermischen und/oder des mechanischen Teilsystems anzupassen. Damit ist nicht nur die Simulation beliebiger konventioneller Temperaturzyklen (Wärmebehandlung, E/MSG/WSG- Schmelzschweißen) möglich, sondern beispielsweise auch die Simulation von Strahlschweißprozessen mit vergleichsweise sehr hohen Aufheizgeschwindigkeiten (Bild 2: eingespannte zylindrische Probe während des Versuchs), Schweißen mit begleitender Kurzzeitnachwärmung, Abschreckvorgänge, Thermoschockversuche, Ermittlung wärmephysikalischer Materialkennwerte usw.

Entscheidend ist, dass der Nutzer die Probengeometrie auf das Materialverhalten unter Wärmeeinfluss abstimmen kann, um die gewünschte Wärmeleitung auch auf die Probe übertragen zu können.

Die mechanischen Prüfmöglichkeiten reichen von Druckproben über die Aufnahme von Spannungs-Dehnungs-Diagrammen im Zugversuch bei höheren Temperaturen (Raumtemperatur wird nicht empfohlen) bis hin zu Reibschweiß- oder Walzversuchen, je nach Auslegung der Anlage. Letzteres verdeutlicht, dass sich das mechanische System mannigfaltig mit dem thermischen koppeln lässt. Bild 3 zeigt in diesem Zusammenhang das Beispiel einer Aluminium-Warmzugprobe vor und nach dem Versuch sowie mit Längsdehnungsmessgerät im eingebauten Zustand.

Die Gleeble-Anlagen gestatten eine softwaregesteuerte Simulation der programmierten thermomechanischen Vorgänge und deren PC-gestützte Auswertung. Die Programmierung erfolgt tabellarisch oder in einer maschineneigenen Sprache. Neben PC und Steuerkonsole verfügt jede Gleeble über eine hydraulische Pumpe, die mindestens 10 t übertragen kann (Standardausführung), einen Kühler, Kompressor für Druckluft, Vakuumpumpe, High-Flow-Quench-System, Druckwasserspeicher, verschiedene Probeneinspannvorrichtungen und Sprühbacken, ein Punktschweißgerät

für die Thermodrähte, ein taktiles Dilatometer zur Aufnahme der Querdehnungen, sofern diese für die Simulation von Umwandlungsvorgängen ausgelegt ist, und weiteres Zubehör [1].

2. Applikationsmöglichkeiten an der SLV Mecklenburg-Vorpommern

Die SLV Mecklenburg-Vorpommern verfügt über eine Anlage, die spezielle Anforderungen des Laserstrahlschweißens erfüllt, jedoch nur ein konventionelles mechanisches System beinhaltet. Je nach Werkstoff und Probenform sind Aufheizgeschwindigkeiten bis zu 6000 K/s möglich.

Neben der Simulation von Strahlschweißzyklen und Erarbeitung zugehöriger Gefüge- und Eigenschaftsdiagramme wurden zahlreiche Schweiß-ZTU-Schaubilder für das konventionelle Schmelzschweißen erarbeitet, mit deren Hilfe Aussagen zur Schweißreignung von Stahlwerkstoffen möglich wurden. Gefüge- und Eigenschaftssimulation ist jedoch auch an anderen Metallen, z.B. verschiedenen Aluminiumlegierungen, durchgeführt worden.

Zusätzlich zum standardmäßig ausgelieferten taktilem Dilatometer zur Ermittlung von Querdehnungen verfügt die Anstalt über ein taktiles Längsdehnungsmessgerät sowie ein Laserdilatometer zur berührungslosen Erfassung von Volumenveränderungen an wärmesimulierten Proben.

Eine weitere vorhandene Besonderheit ist die FEM-Software GLENIS [2], deren Berechnungsmöglichkeiten speziell auf Versuche mittels einer Gleeble-Anlage abgestimmt sind. Beispielsweise können die Temperaturverteilung und die voraussichtlichen Abkühlungszeiten in einer Probe beliebiger Form berechnet werden. Das eröffnet dem Benutzer die Möglichkeit, geeignete Probenformen und Einspannvorrichtungen ohne aufwendigere Simulationsversuche an der Gleeble selbst zu planen. Gleichzeitig kann so berechnet werden, ob sich bestimmte Wärmezyklen überhaupt auf vorgesehene Werkstoffe und/oder Probenformen anwenden lassen.

Die SLV M-V hat sich in den vergangenen Jahren jedoch nicht ausschließlich mit der Schweißsimulation beschäftigt. So wurden u.a. im Rahmen des hier näher ausgeführten, vom BMBF-geförderten Forschungsthemas thermomechanische Kennwerte an Aluminiumlegierungen gemessen [3], Thermoschockversuche absolviert [4], Schweißzyklen für das Elektronenstrahlschweißen in Abhängigkeit der jeweiligen Spitzentemperatur in der WEZ simuliert [5], so dass Ausgangsdaten für nachfolgenden FEM- Berechnungen zur Struktur- und Werkstoffsimulation (Gefüge- und Härtefelder) beim EB-Schweißen geschaffen wurden, sowie Warmzugversuche für verschiedene Werkstoffprüflabore, Institute und Firmen durchgeführt.

Bislang untersuchte Werkstoffe waren unlegierte Stähle, verschiedene höher- und hochfeste Feinkornbaustähle, hochlegierte austenitische Cr-Ni-Stähle und Duplexstahl sowie verschiedene aushärtbare und nicht aushärtbare Aluminiumlegierungen.

3. Messung temperaturabhängiger Werkstoffkennwerte an Aluminium-Schweißnähten

Zur Verbesserung der Werkstoff- und Struktursimulation im Rahmen von FEM- Berechnungen wurden Untersuchungen an verschiedenen aushärtbaren und nicht aus-

härtbaren Aluminiumlegierungen bezüglich ihrer mechanischen und wärmephysikalischen Eigenschaften sowie Gefüge unter Temperatureinfluss geführt [3].

Dazu wurden an der SLV München MIG- und WIG- Raupen bei unterschiedlicher Wärmeeinbringung, Nahtart und Blechdicke geschweißt. An der Blechunterseite wurden Temperatur-Ort-Zeit-Kurven mit Hilfe von Thermoelementen in einer speziell entwickelten Vorrichtung aufgenommen. Aus diesen Messkurven wurden Aufheizzeit, Maximaltemperatur und Abkühlzeit (zwischen 500 und 200 °C) für einen Ort nahe der Schmelzlinie ermittelt und als Eingangsdaten für die nachfolgende Simulation von Temperaturzyklen zur Bestimmung wärmephysikalischer Kennwerte genutzt (Bilder 5 und 6). Das oben benannte Temperaturintervall wurde aufgrund der Schmelzbereiche der verwendeten Legierungen, der in Schmelzliniennähe gemessenen Temperaturzyklen und Angaben im Schrifttum [6-8] festgelegt.

4. Gefüge und Härte nach Schweißsimulation

An zylindrischen Proben (L=100 mm, Ø=6 mm) wurden mit Hilfe der thermomechanischen Simulationsanlage „Gleeble 3500“ MIG-typische Schweißzyklen (AHR = 210 K/s, Abkühlzeit von 500 bis 200 °C = 12 s und wegen der Schmelzbereiche der untersuchten Legierungen gewählte Maximaltemperatur = 530 °C) simuliert, u.a. an EN AW- $\text{AlMgSi}_{0,5}$ T66 und EN AW- AlMg_3 O/H111.

In einem ersten Schritt wurden die Proben von Maximaltemperatur stets auf eine definierte „Prüftemperatur“ zwischen 500 und 200 °C abgekühlt, die in 50 K – Schritten variiert wurde, und danach innerhalb von 1 s auf Raumtemperatur abgeschreckt (Anblasen mit Stickstoff oder Sprühwasser). Die so gegenüber dem Lieferzustand erzeugten Gefügeveränderungen sind beispielhaft in Bild 7 für AlMg_3 dargestellt. Eine Temperaturabhängigkeit infolge des beschriebenen Temperatur-Zeit-Verlaufes, die sich in unterschiedlicher Korngröße oder verändertem Ausscheidungszustand er-messen ließe, ist kaum auszumachen. Bild 8 zeigt für beide Legierungen die je Prüf-temperatur gemessenen Härtewerte. Die Härtewerte bewegen sich jeweils auf dem Niveau des Wertes für Schmelzliniennähe nach einfacher MIG-Simulation (AlMg_3 bei ca. 52 HV5, $\text{AlMgSi}_{0,5}$ bei durchschnittlich 41 HV5). Eine echte Temperaturabhängigkeit ist ebenfalls nicht zu erkennen.

In einem zweiten Schritt war die Erwärmungsgeschwindigkeit wie beim realen MIG-Schweißen, jedoch wurde immer nur bis auf die jeweilige Prüftemperatur zwischen 500 und 200 °C erwärmt und danach zwecks „Einfrieren“ erzielter Werkstoffzustände wie oben beschrieben zügig abgekühlt. Wie schon zuvor sind auch hier kaum temperaturlabhängige Unterschiede innerhalb einer Legierung auszumachen. Die gemessenen Härtewerte zeigt Bild 9. Die nicht aushärtbare Legierung AlMg_3 reagierte hier temperaturunabhängig, die Härtewerte sind um wenige Einheiten höher als diejenigen nach der ersten Variante. Die aushärtbare Legierung $\text{AlMgSi}_{0,5}$ weist einen Sprung zu größeren Härtewerten bei den niedrigeren Maximal- bzw. Prüf-temperaturen auf, der sich jedoch aus den Gefügebildern nicht erklären lässt.

Alle Härtewerte wurden in [HV5] ermittelt. Eine Erweichung zum wärmeunbeeinflussten Zustand war bei allen Versuchen und Legierungen nachweisbar.

5. E-Modul und Fließspannung

Die Wärmeführung für diese Versuche sah eine Kombination von Warmzugversuch mit vorgelagertem Schweißzyklus vor, um so neben dem Einfluss von Temperatur und Dehngeschwindigkeit auch einen eventuellen Einfluss infolge Schweißens feststellen zu können. Mit Hilfe der thermomechanischen Simulationsanlage wurden Proben mit der für das MIG-Schweißen typischen Geschwindigkeit auf 530 °C erwärmt und gemäß „ $t_{5/2}=12\text{ s}$ “ – Zyklus auf Prüftemperatur abgekühlt. Untersucht wurden 500, 400, 300 und 200 °C.

Bei Erreichen der Prüftemperatur wurden die Proben in Anlehnung an genormte Warmzugversuche jeweils 10 min durchgewärmt. Direkt im Anschluss erfolgte in der „Gleeble“ der Zugversuch. Dabei wurden die Proben mit 3 verschiedenen Geschwindigkeiten gedehnt.

Aus den so gemessenen Spannungs-Dehnungs-Kurven wurde der E-Modul bestimmt (Bildern 10 und 11). Zu erwarten war, dass der Wert des E-Moduls mit steigender Prüftemperatur abnimmt. Das konnte zumindest für die Temperaturen von 200 bis 400 °C so festgestellt werden. Lediglich die 500 °C-Werte wichen beim AlMg3 teilweise und beim AlMgSi0,5 komplett von dieser Tendenz ab. Im Schrifttum erwähnte Zahlenwerte konnten nicht reproduziert werden. Da dort keine Aussagen zur Dehngeschwindigkeit während des Warmzugversuches gemacht wurden, kann nicht mit Sicherheit belegt werden, ob die festgestellten Differenzen ursächlich in der Geschwindigkeit der Formänderung zu suchen oder im vorgelagerten Schweißzyklus der eigenen Untersuchungen begründet sind.

Als Fließspannung wird diejenige Spannung bezeichnet, die zur Einleitung bzw. zur Aufrechterhaltung einer bleibenden Formänderung im einachsigen Spannungszustand erforderlich ist. Im vorliegenden Fall wurden die gemessenen Spannungen und Dehnungen ohne Zuhilfenahme des Fließkriteriums in Umformgrad und Fließspannung umgerechnet, ohne Bezug auf die momentanen Abmessungen der Probe. Der auf die Ausgangsmaße bezogene Umformgrad konnte somit als logarithmische Formänderung $\varphi = \ln(1 + \varepsilon)$ ausgedrückt werden. Die Fließspannung wurde in diesem Zusammenhang über $k_f = \sigma(\varepsilon + 1)$ berechnet. σ und ε wurden in den gemessenen Spannungs-Dehnungs-Kurven ermittelt, bezogen auf einen Punkt am Ende der Hookschen Gerade. Bild 12 und 13 zeigen beispielhaft die zugehörigen Warmfließkurven. Da die Fließspannung von der Formänderungsgeschwindigkeit und der Temperatur abhängig ist, wurden diese Größen auch für die grafische Auswertung herangezogen (Bilder 14 bis 17). Bei Temperaturen über 100 °C sinkt der Fließwiderstand von Aluminium und die Fließspannung wird zunehmend abhängig von der Formänderungsgeschwindigkeit. Die Fließspannung nimmt mit zunehmender Formänderungsgeschwindigkeit zu.

6. Thermischer Ausdehnungskoeffizient, Temperatur- und Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität

Die Gleeble-Anlage wurde ebenfalls zur Bestimmung des thermischen Ausdehnungskoeffizienten genutzt. Dabei wurde die Dilatation bei Erwärmung taktil über den Probenquerschnitt aufgenommen. Bild 18 und 19 zeigen die Ergebnisse für eine Aufheizrate von 210 K/s wie beim MIG-Schweißen sowie für 100 K/s.

Im Falle der Legierung AlMg3 gab es keine nennenswerte Veränderung der α -Werte bezüglich der Temperatur, unabhängig von der Aufheizgeschwindigkeit. Der thermische Ausdehnungskoeffizient war bei der geringeren Aufheizrate geringfügig größer im Vergleich zur höheren Aufheizrate. Im Fall von AlMgSi0,5 stieg der α -Wert oberhalb von 350 °C (bei 210 K/s) bzw. 400 °C (bei 100 K/s) an. Der thermische Ausdehnungskoeffizient ist bei der geringeren Aufheizrate niedriger als bei der größeren. Darüber hinaus sind an der TU Magdeburg die Wärme- und Temperaturleitfähigkeit sowie die spezifische Wärmekapazität mittels Laser-Flash-Apparatur LFA 427 der Firma Netzsch bzw. DSC 404 C – Analysegerät bestimmt worden (Bilder 20 und 21).

7. Simulation von Temperaturfeld und Eigenspannung an einem MIG-geschweißten Werkstück unter Verwendung der untersuchten temperaturabhängigen Eigenschaften von Aluminium

Mit [9] liegt nun eine Arbeit vor, die sich mit der Simulation des Temperaturfeldes und der Eigenspannungen an einem MIG-geschweißten Werkstück beschäftigte, aufgrund fehlender Werkstoffdaten ein bislang ebenfalls wenig betrachtetes Problem. Dabei wurden die in Rostock ermittelten thermo-mechanischen Werte als notwendige Eingangsdaten für die numerische Simulation mit SYSWELD verwendet, die Geometriemodelle wurden aus den in München hergestellten Querschliffen der MIG-Nähte erzeugt.

Es wurden 2- und 3-d Modelle mit unterschiedlicher Vernetzung des Nahtbereiches aufgestellt (Bilder 22 und 23), mit deren Hilfe nachfolgend zunächst die Wärmeausbreitung im Werkstück berechnet wurde (Bilder 24 und 25). Im 3-d Bild bewegt sich die Wärmequelle an der linken Kante von rechts unten nach links oben. Die 2-d Grafik stellt die Temperaturverteilung zum Zeitpunkt der größten Schmelzbadausdehnung dar, wobei die Spitzentemperatur nicht zum Zeitpunkt des größten Schmelzbades erreicht wurde.

Die mechanische Berechnung wurde ausschließlich an den ebenen Modellen durchgeführt, um die Berechnungszeiten zu minimieren. Bild 26 zeigt die Ausbildung der Quereigenspannungen σ_x 1000 s nach Schweißbeginn. Die Spannungen sind am verformten Querschnitt mit einer 1,5-fachen Überhöhung der Verschiebungen dargestellt. Die roten und dunkelblauen Bereiche stellen Spannungsspitzen am Übergang Naht – Grundwerkstoff dar, materialbedingt durch zwei verschiedene Legierungen. Diese dehnen sich bei Erwärmung aus und stützen sich gegenseitig ab, wodurch sie sich plastisch verformen. Während der Abkühlung bleiben diese Verformungen erhalten, das Werkstück zieht sich zusammen und es entstehen an den Orten der Verformungen Eigenspannungen. Bild 27 zeigt den Verlauf der Quereigenspannungen in verschiedenen Fasern des Grundwerkstoffes. Maxima bildeten sich jeweils am Rand der Schweißnaht aus. Bis zum Rand des Bleches bauen sich die Eigenspannungen ab.

Des Weiteren wurde der Einfluss der temperaturabhängigen Werkstoffkennwerte auf das Temperaturfeld an drei Knotenpunkten quer zur Naht untersucht. Bild 28 zeigt z.B. deutlich den relativ starken Einfluss der Wärmekapazität.

Durch ein Herabsetzen der Wärmekapazität und indirekt auch der Enthalpie wurde ein erhöhtes Temperaturniveau im Werkstück beobachtet. Die Enthalpie erfasst die Umwandlungsenergie für das Material, die bei einer Verringerung folglich niedriger ist. Dadurch wird weniger Energie für die Umwandlung der Aluminiumlegierung benötigt, wobei die Gesamtenergie jedoch erhalten bleibt. Der Überfluss an Energie kann

das Bauteil deshalb stärker erwärmen und die Temperatur steigt an. In den niedrigeren Temperaturregionen findet keine Umwandlung statt. Daraus resultieren die geringeren Unterschiede zum Ende der Schweißung hin. Die niedrige Wärmekapazität lässt zudem das Material schneller abkühlen, da die Wärme nicht so lange gehalten werden kann. Im Diagramm kann dies durch die niedrigeren Temperaturen zum Ende der Schweißung hin verfolgt werden.

Bei der Erhöhung wird hingegen mehr Energie für die Umwandlung benötigt. Die Schweißnaht wird deshalb nicht so stark erhitzt und kühlt etwas langsamer ab. Am Ende der Simulation haben die verschweißten Bleche wieder Raumtemperatur erreicht.

Die Wärmeleitfähigkeit hat nur geringen Einfluss auf die Temperaturverteilung, oberhalb von 400 °C (Bild 29). Materialien mit einer niedrigen Wärmeleitfähigkeit können die Wärmeenergie nicht so schnell ableiten. Dadurch „staut“ sich die Hitze, während weiterhin Energie eingetragen wird und die Temperatur im Bereich der Schweißnaht angehoben wird. In der Phase des Abkühlens sind keine Unterschiede der Simulationen mit den unterschiedlichen Variationen der Wärmeleitfähigkeit zu erkennen.

Zusammenfassung

Die dargestellten Ergebnisse zu den temperaturabhängig gemessenen mechanischen und wärmephysikalischen Kennwerten von Aluminiumlegierungen sind für alle Aluminiumverarbeiter und FEM- Benutzer sehr wichtig. Ausgangspunkt war der Mangel an ausreichend sicheren Messwerten bzw. das grundsätzliche Fehlen von Messwerten für den durch Schweißwärme beeinflussten Nebennahtbereich. Die gewonnenen Ergebnisse sollten durch weitere Versuche bestätigt und ergänzt werden.

Schrifttum

- [1] N.N.: Gleeble 3500, Manual. Dynamic System Inc., Poestenkill/NY, USA, 1996
- [2] N.N.: Beschreibung GLENIS. Alphacast Software Ltd., Northampton, England
- [3] Erarbeitung werkstoffkundlicher Kennwerte geschweißter Aluminiumbauteile in Abhängigkeit von der Wärmeeinbringung. Abschlussbericht AiF 12.934 BG, SLV München, SLV Mecklenburg-Vorpommern Rostock, 2003
- [4] RES- Hochgeschwindigkeitsplattieren von warmfesten Feinkornbaustählen. Abschlussbericht AiF 11.879 B, ISF Aachen, SLV Mecklenburg-Vorpommern Rostock, LWT Dortmund, 2000
- [5] Mathematische Simulation der Gefügeentwicklung und der sich einstellenden mechanischen Eigenschaften elektronenstrahlgeschweißter Verbindungen von Stahlwerkstoffen. Abschlussbericht DFG SE 162/4-1, ISF Aachen, SLV Mecklenburg-Vorpommern Rostock, 2000
- [6] Kou, S.; Le, Y.: Three-dimensional heat flow and Solidification during the autogenous GTA welding of aluminium plates. Metallurgical Transactions, Vol. 14A, Nov. 1983, S. 2245 ff
- [7] Kostrivas, A.; Lippold, J.C.: A method for studying weld fusion boundary microstructure evolution in aluminium alloys. Weld. Res. Suppl., Jan. 2000, page 1-s ff

- [8] Chen, C.C.; Baeslack, W.A. III: Weld fusion Zone simulation in aluminium alloy 2090. International symposium on physical simulation of welding, hot forming and continous casting, Ottawa, Can., 1988
- [9] Jacob, M.: Simulation des Temperaturfeldes und der Eigenspannungen von einer MIG-Schweißung an einem Werkstück unter Berücksichtigung der temperaturabhängigen Materialeigenschaften von Aluminium. Diplomarbeit B/2004/133, Bauhaus-Universität Weimar, unveröff., 2005



Bild 1: Thermomechanische Simulationsanlage „Gleeble 3500“

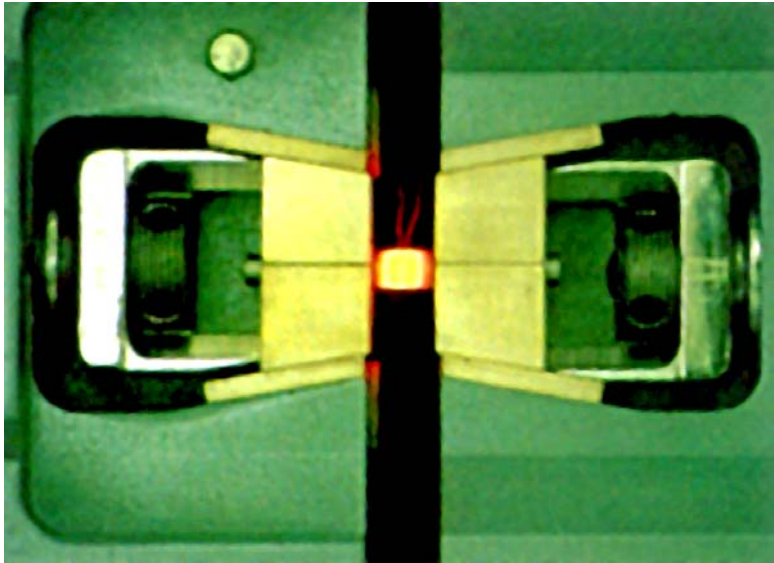


Bild 2: Zylindrische Probe während der Schweißsimulation



Bild 3: Proben für die Simulation von Warmzugversuch und thermischem Ausdehnungskoeffizienten aus einer Aluminiumlegierung

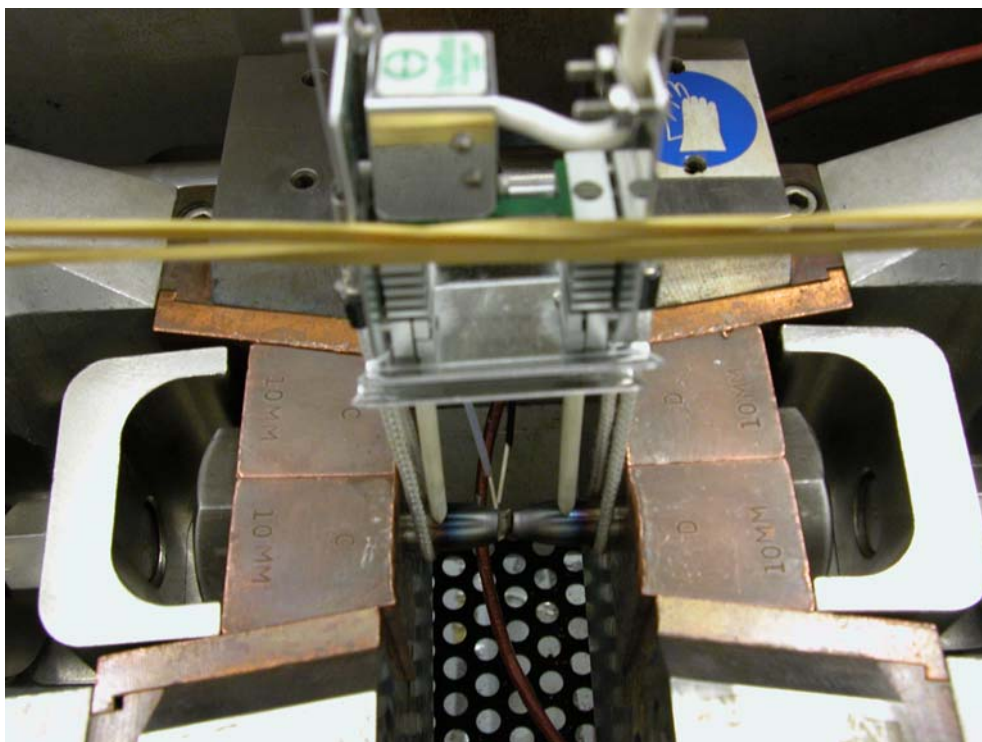


Bild 4: Warmzugprobe mit Längsdehnungsmessgerät im eingebauten Zustand

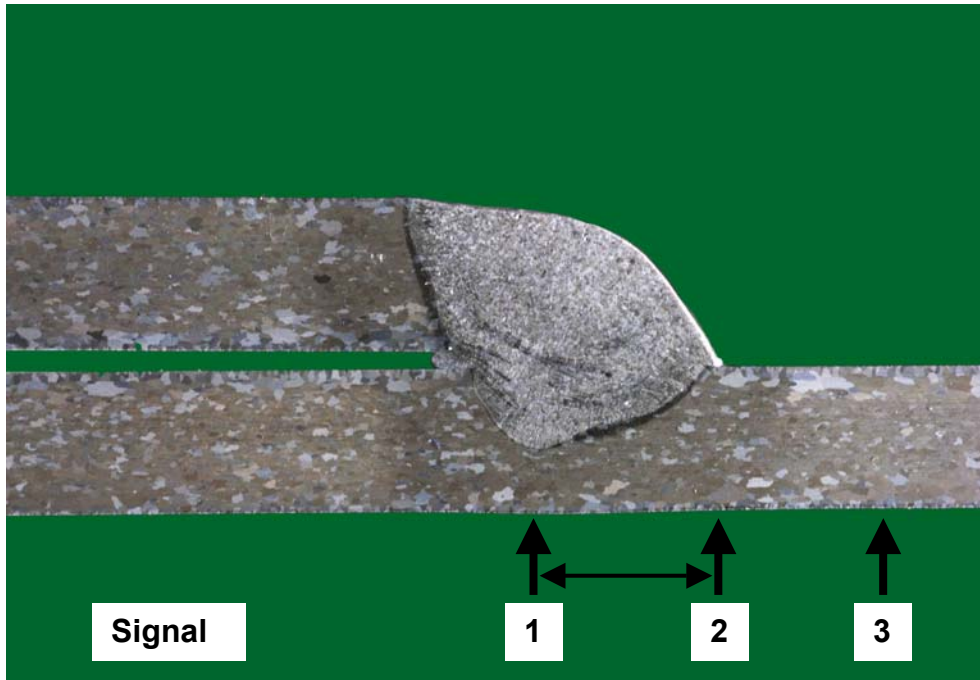


Bild 5:
Lage der Messpunkte (Temperaturfühler mit Bezeichnung Signal 1 liegt unter max. Einbrand, alle weiteren Temperaturfühler sind im Abstand von 5 mm angeordnet)

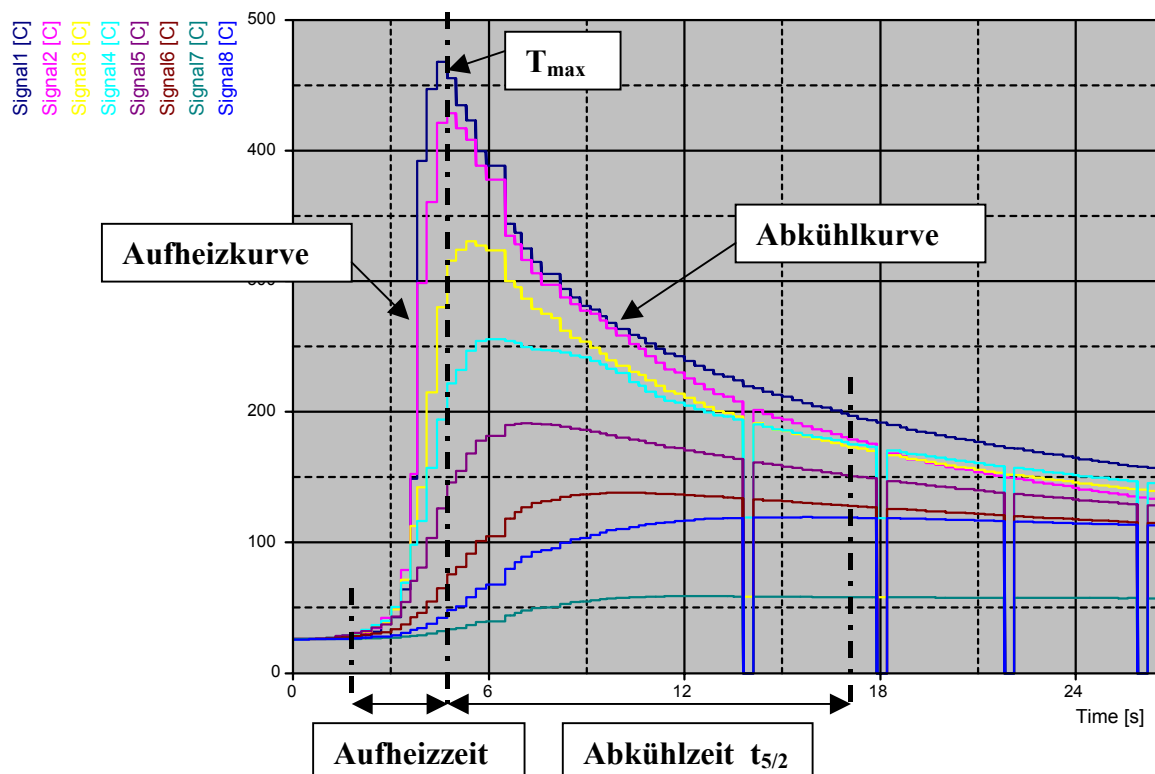


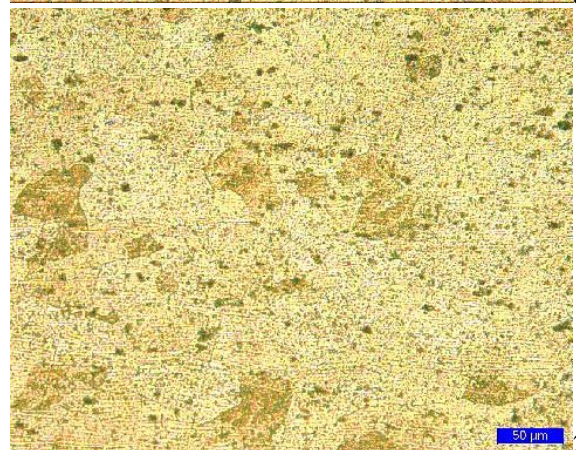
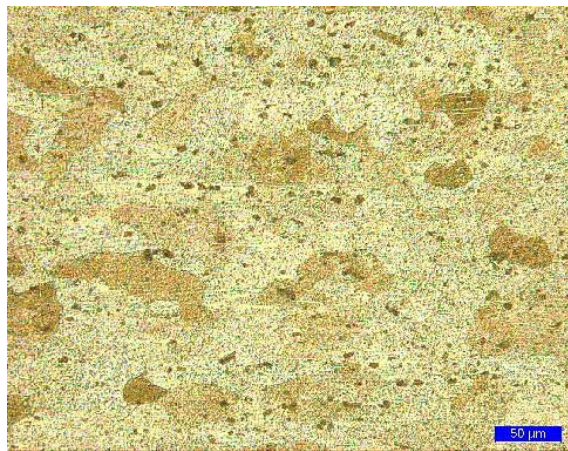
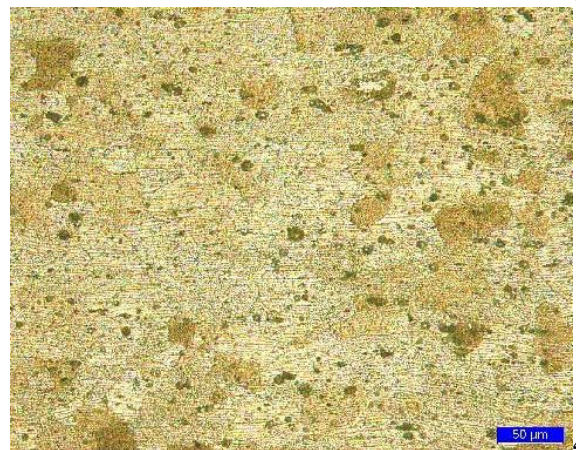
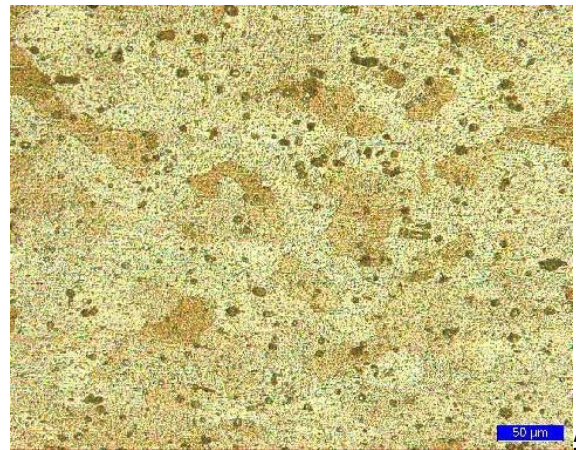
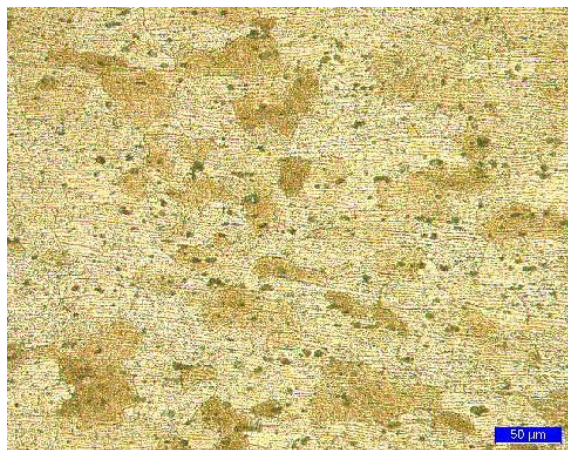
Bild 6:
Temperaturverlauf einer Kehlnaht am Überlapp-Stoß, MIG-geschweißt
Legierung: AlMgSi0,5; $t = 5$ mm; Zusatzwerkstoff: AlMg5; Schutzgas: Argon

Bild 7:

AlMg3

Schweißsimulation Var. 1

AHR=210 K/s, $T_{\max}=530\text{ °C}$,
abkühlen auf $T_{\text{prüf}}$ zwischen 500 bis 200 °C
gemäß Schweißzyklus mit $t_{5/2}=12\text{ s}$,
weiter abkühlen mit $t_{5/2}=1\text{ s}$



500

400

300

200

450

350

250

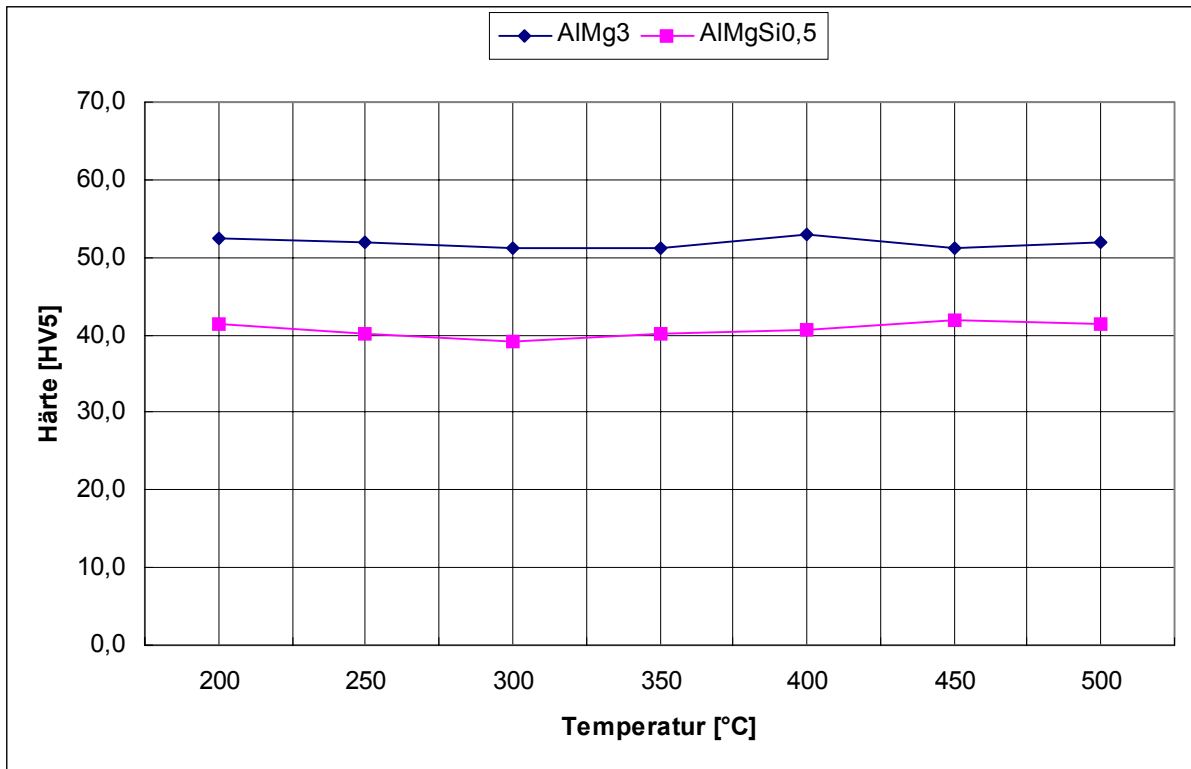


Bild 8:
 Härte für AlMg3 und AlMgSi0,5 in Abhängigkeit von der Temperatur nach Schweißsimulation Variante 1

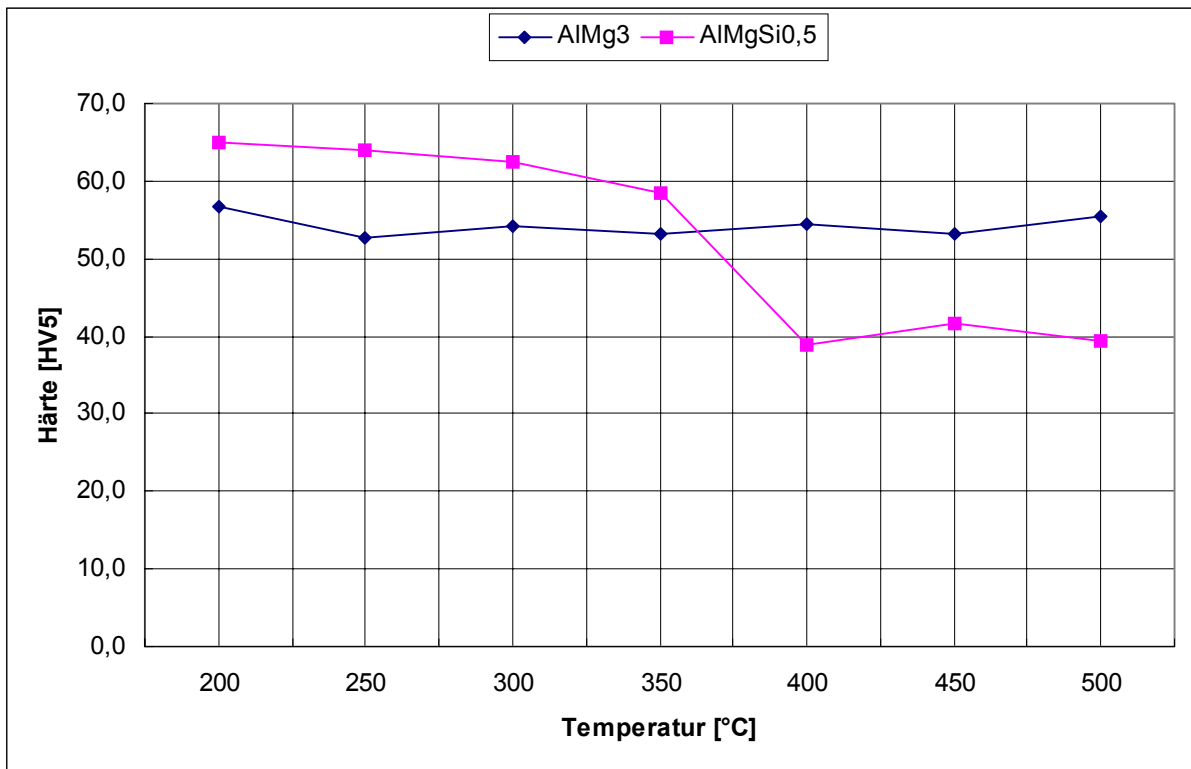


Bild 9:
 Härte für AlMg3 und AlMgSi0,5 in Abhängigkeit von der Temperatur nach Schweißsimulation Variante 2

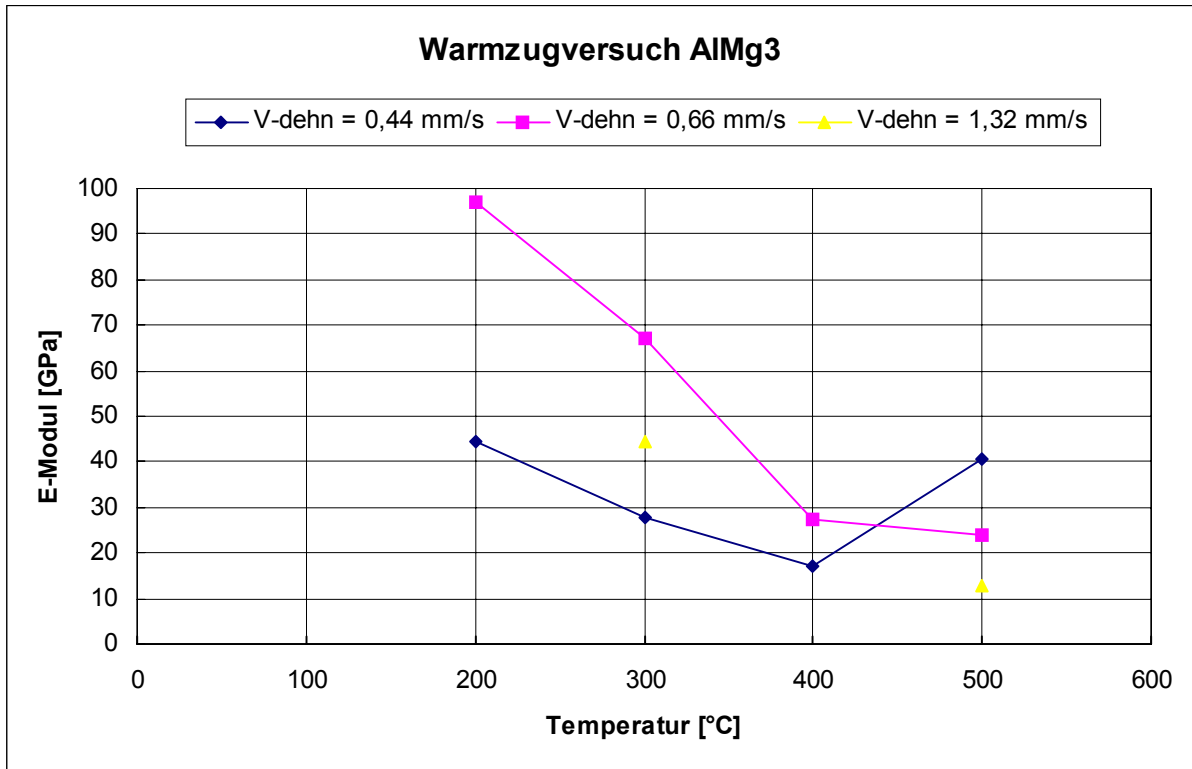


Bild 10: E-Modul in Abhängigkeit von der Temperatur, AlMg3

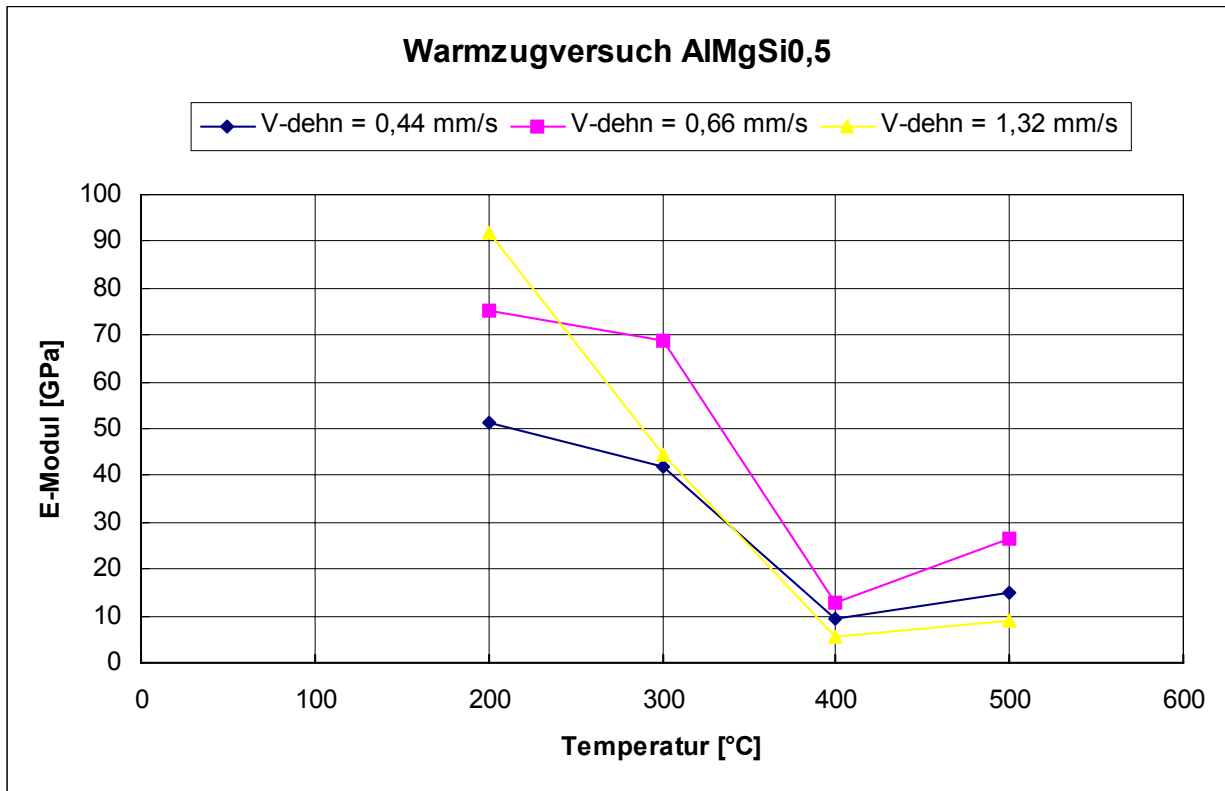


Bild 11: E-Modul in Abhängigkeit von der Temperatur, AlMgSi0,5

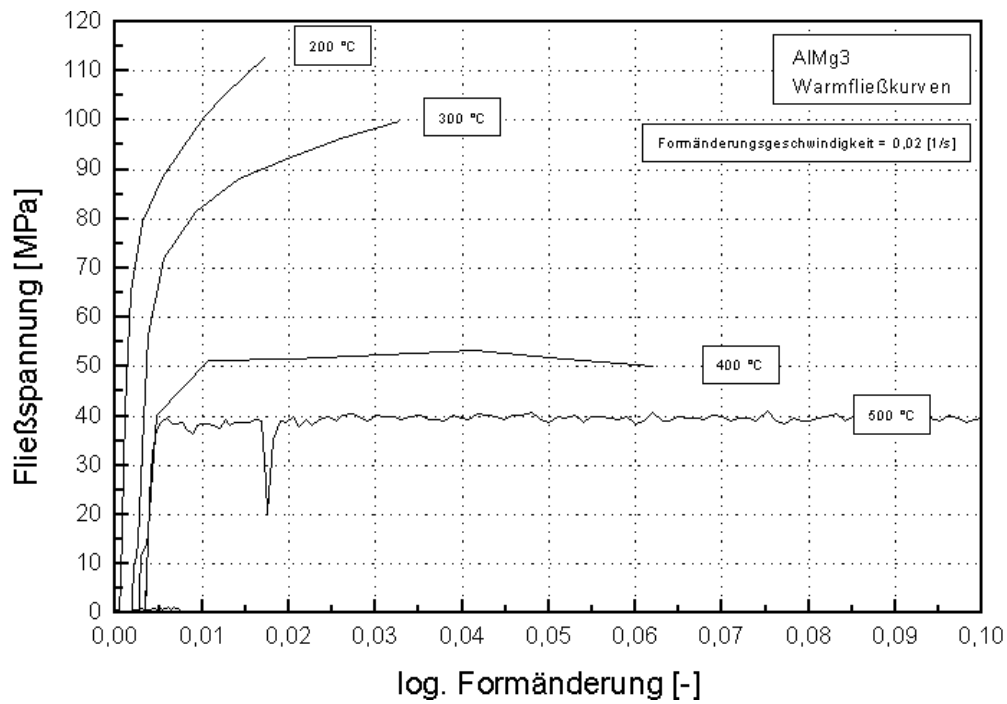


Bild 12: Warmfließkurven AlMg3 → 200 bis 500 [°C], 0.02 [s⁻¹]

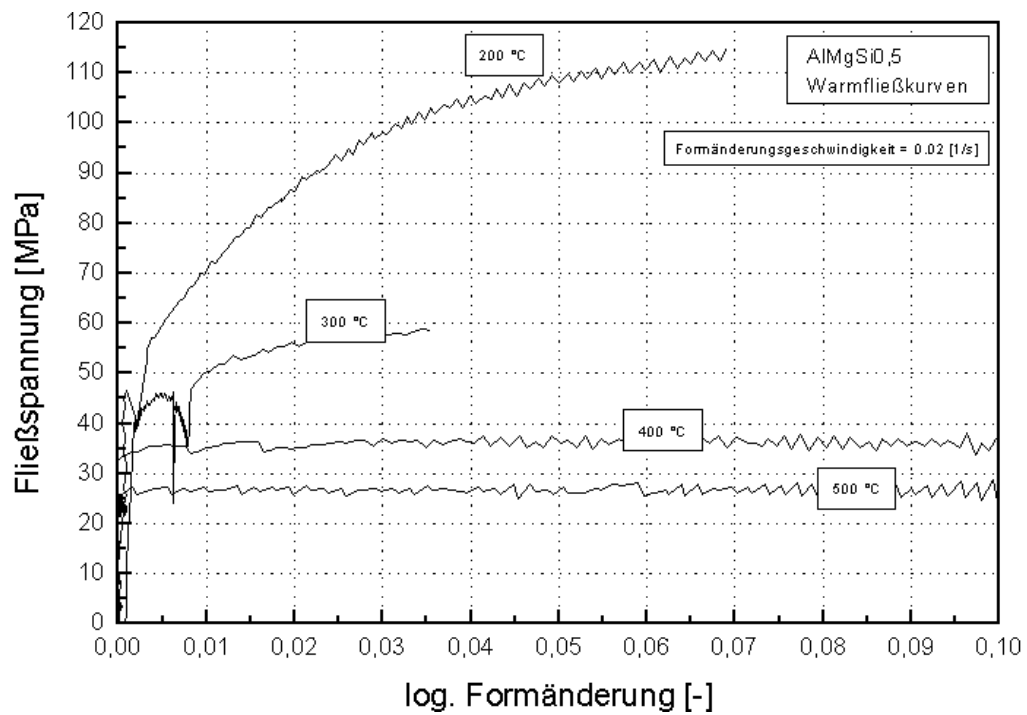


Bild 13: Warmfließkurven AlMgSi0,5 → 200 bis 500 [°C], 0.02 [s⁻¹]

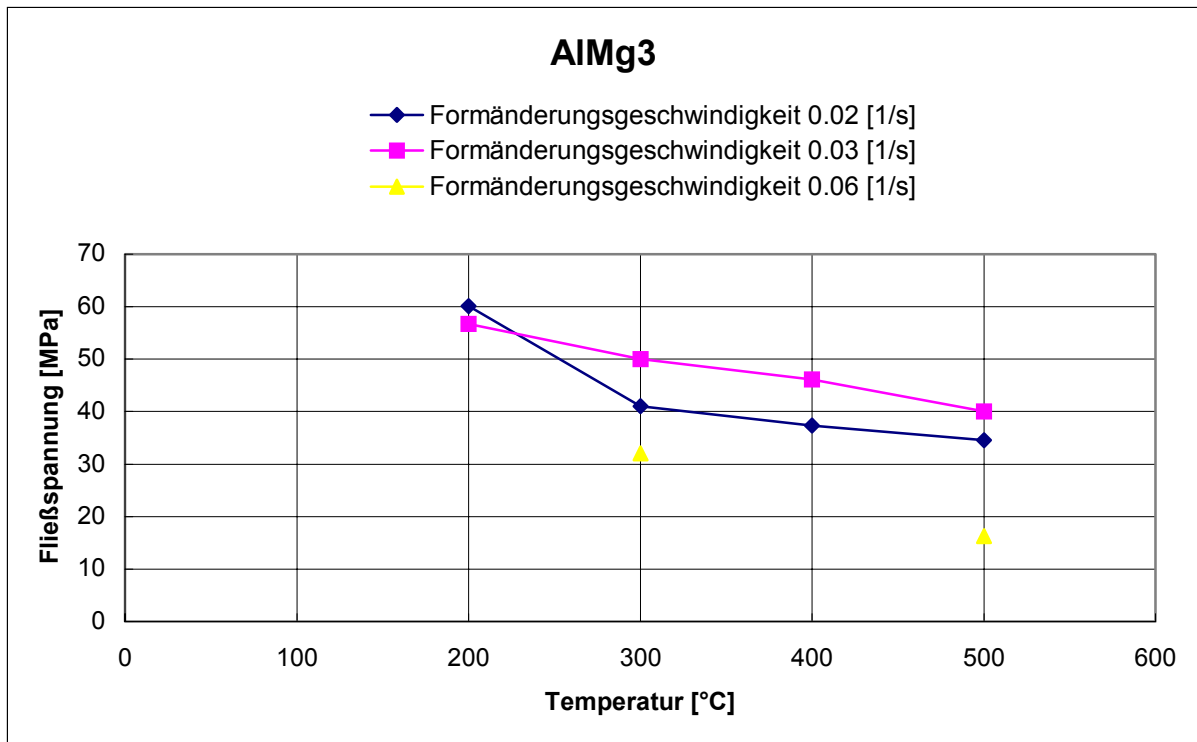


Bild 14: Fließspannung in Abhängigkeit von der Temperatur, AlMg3

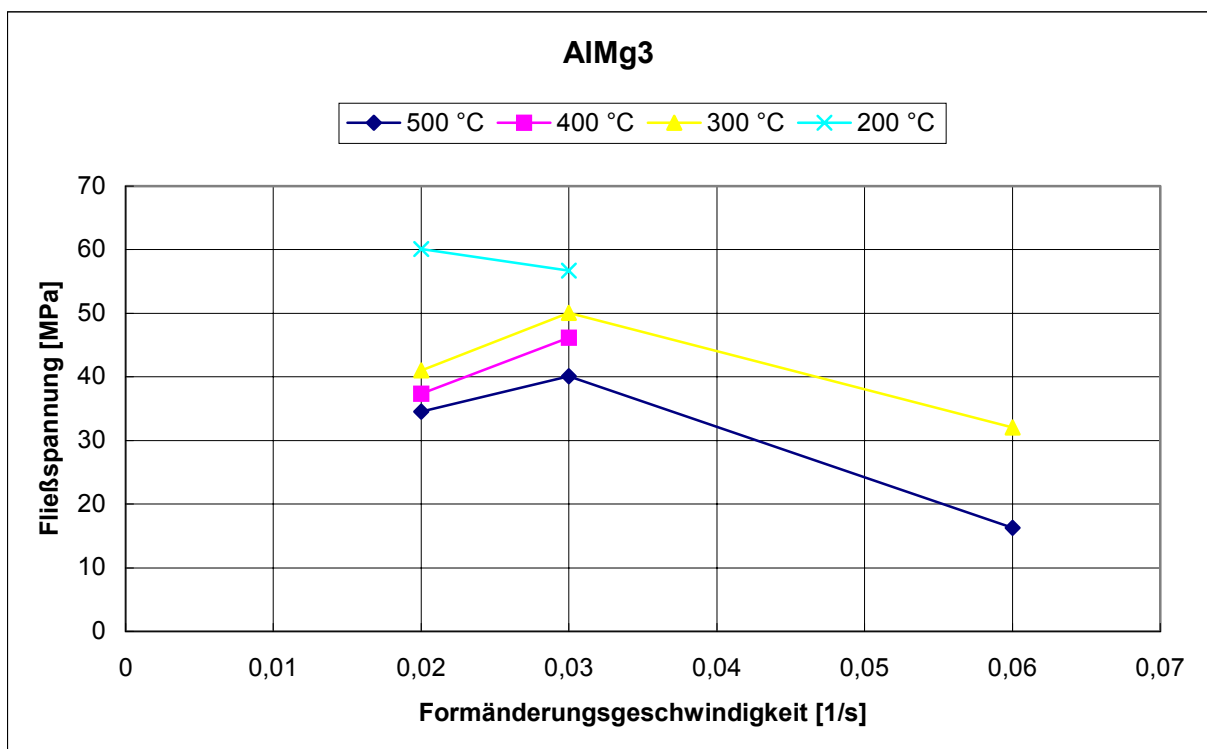


Bild 15: Fließspannung in Abhängigkeit von der Formänderungsgeschwindigkeit, AlMg3

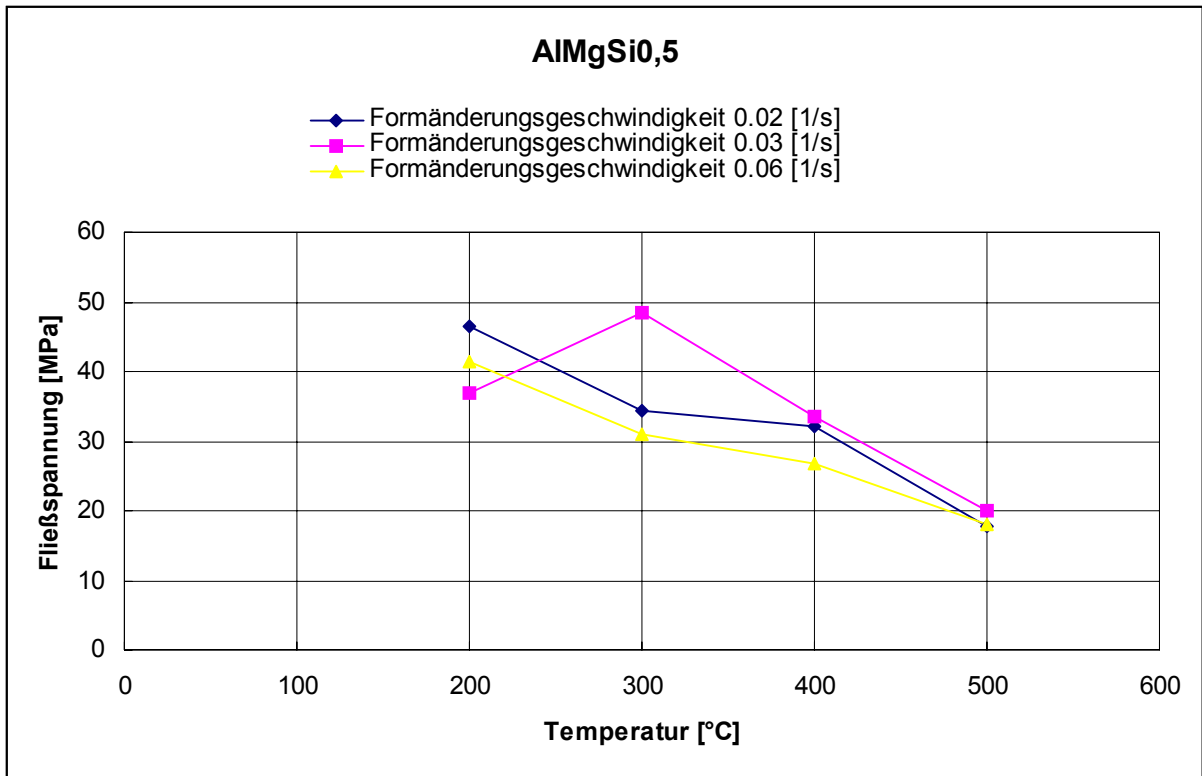


Bild 16: Fließspannung in Abhängigkeit von der Temperatur, AlMgSi0,5

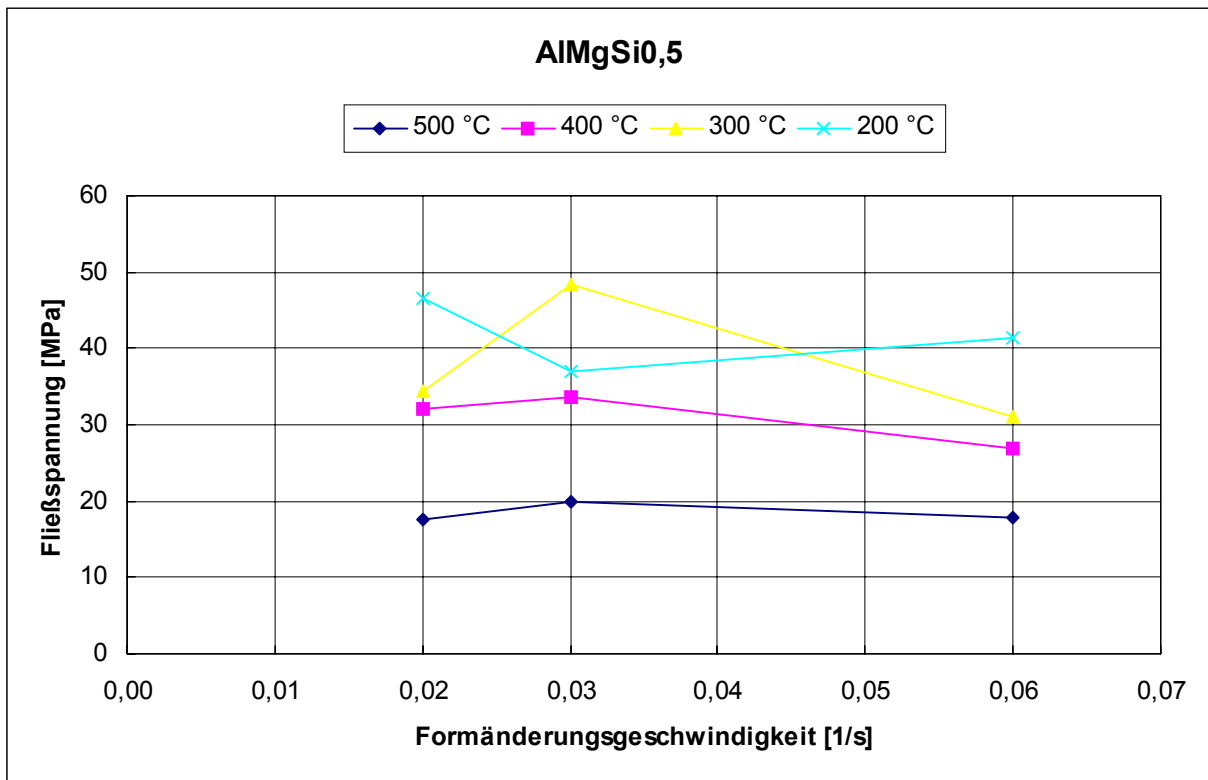


Bild 17: Fließspannung in Abhängigkeit von der Formänderungsgeschwindigkeit, AlMgSi0,5

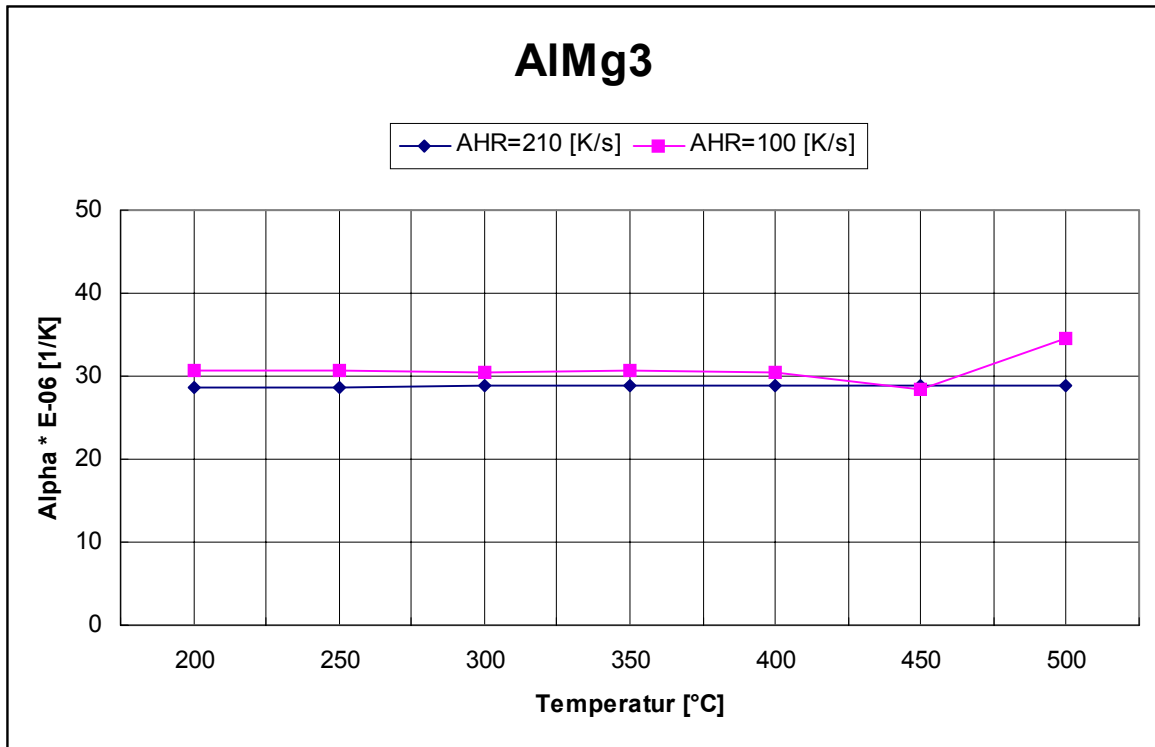


Bild 18:
Thermischer Ausdehnungskoeffizient in Abhängigkeit von der Temperatur und der Aufheizrate, AlMg3

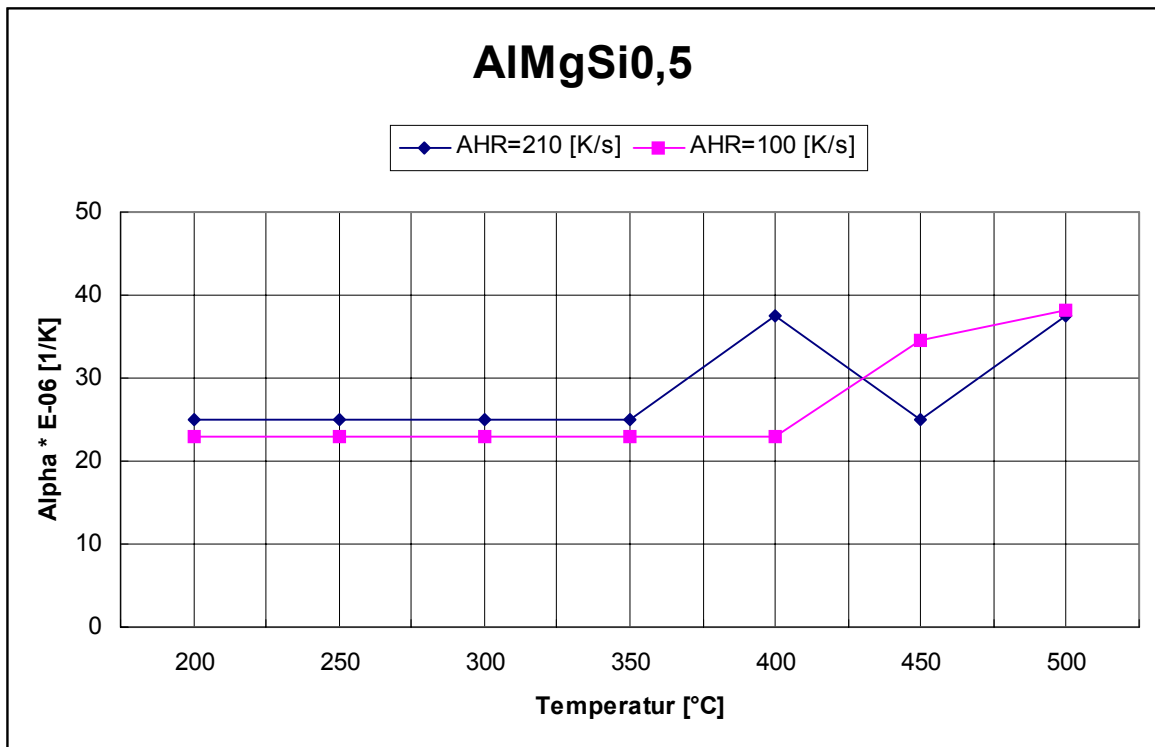


Bild 19:
Thermischer Ausdehnungskoeffizient in Abhängigkeit von der Temperatur und der Aufheizrate, AlMgSi0,5

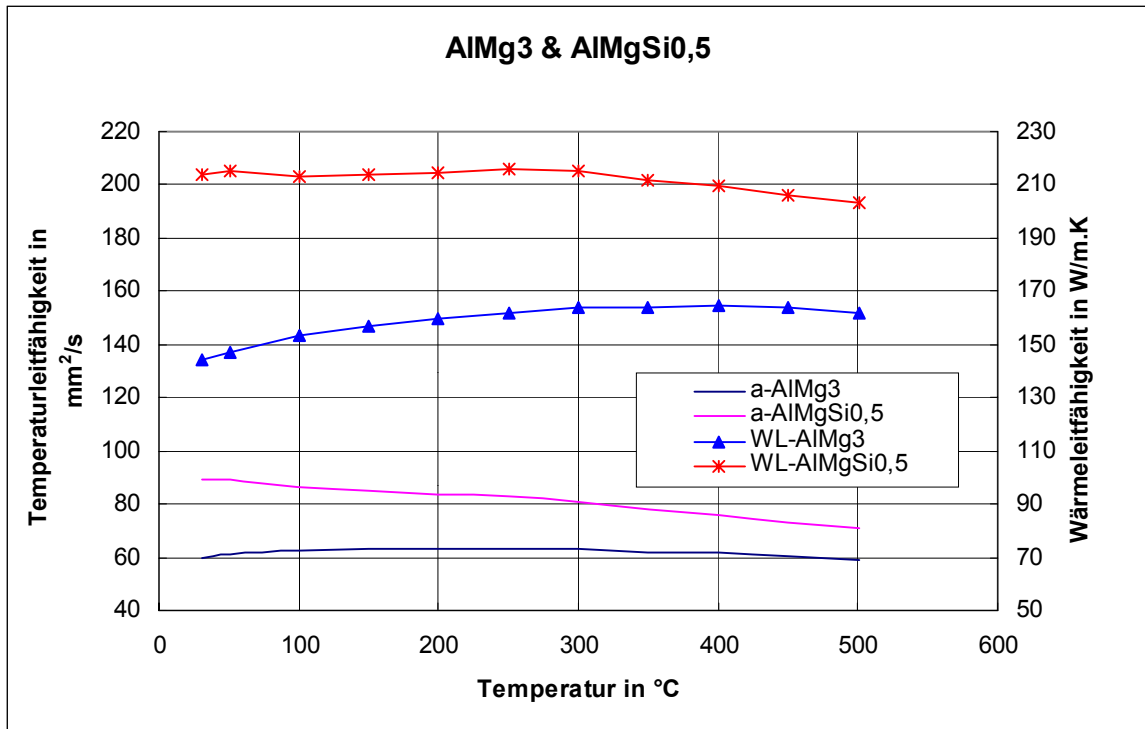


Bild 20:
Temperaturleitfähigkeit (α) und Wärmeleitfähigkeit (λ) in Abhängigkeit von der Temperatur (NETZSCH LFA 427). Ohne vorgelagerten Schweißzyklus. AlMg3 und AlMgSi0,5.

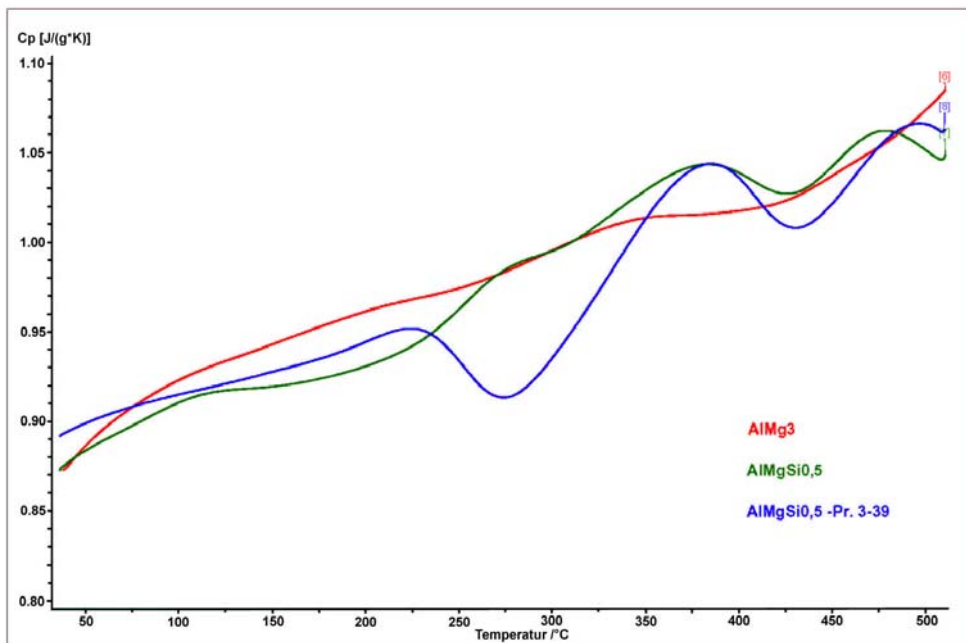


Bild 21:
Spezifische Wärmekapazität (c_p) als Funktion der Temperatur (NETZSCH DSC 404C), ohne vorgelagerten Schweißzyklus. Im Vergleich mit schweißsimulierter Probe 3-39 (AlMgSi0,5 bei 400 °C)

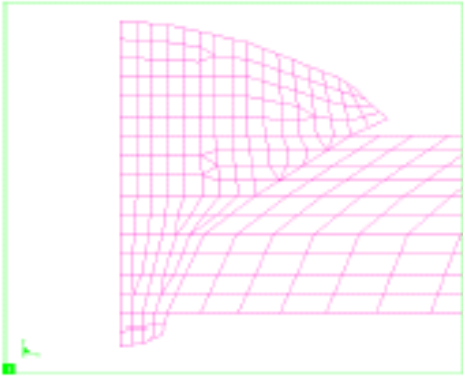


Bild 22: Vernetzung einer MIG-Naht für SYSWELD, 2-d Modell [9]

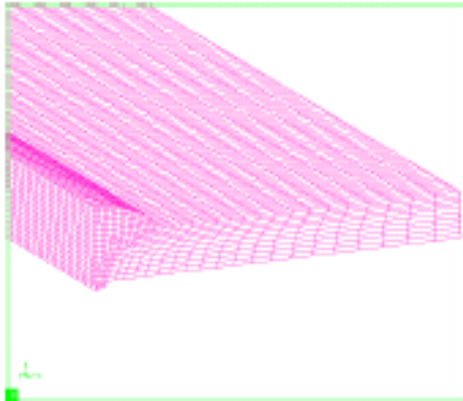


Bild 23: Vernetzung einer MIG-Naht für SYSWELD, 3-d Modell [9]

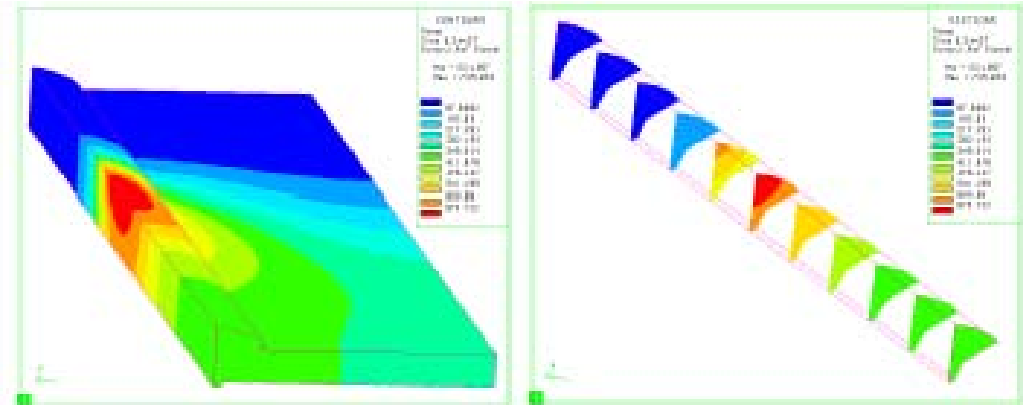


Bild 24: 3-d Wärmeausbreitung, Modell 4 [9]

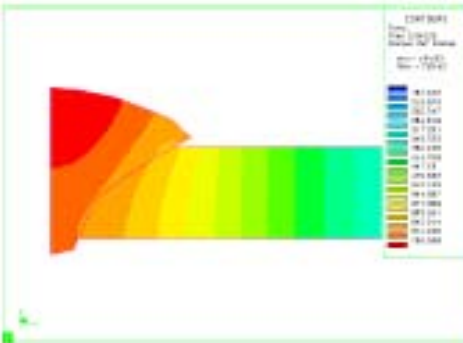


Bild 25: 2-d Wärmeausbreitung, Modell 4 [9]

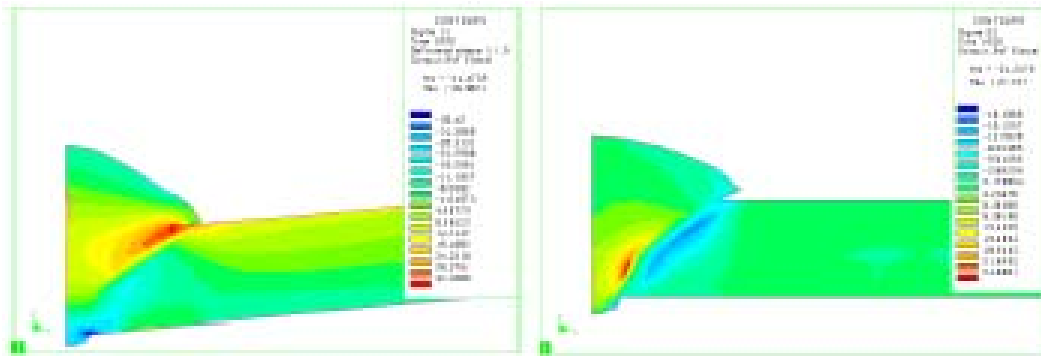


Bild 26: Quereigenspannungen σ_x , Verformungen 1,5-fach überhöht (links), Eigenspannungen σ_y (rechts), [9]

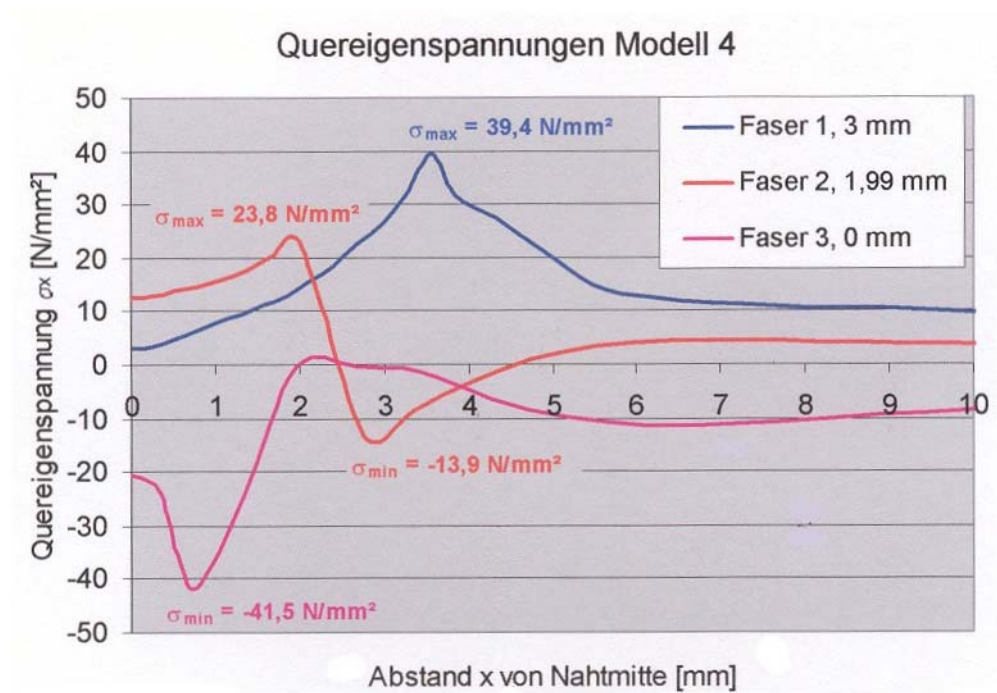


Bild 27: Verlauf der Eigenspannungen σ_x [9]

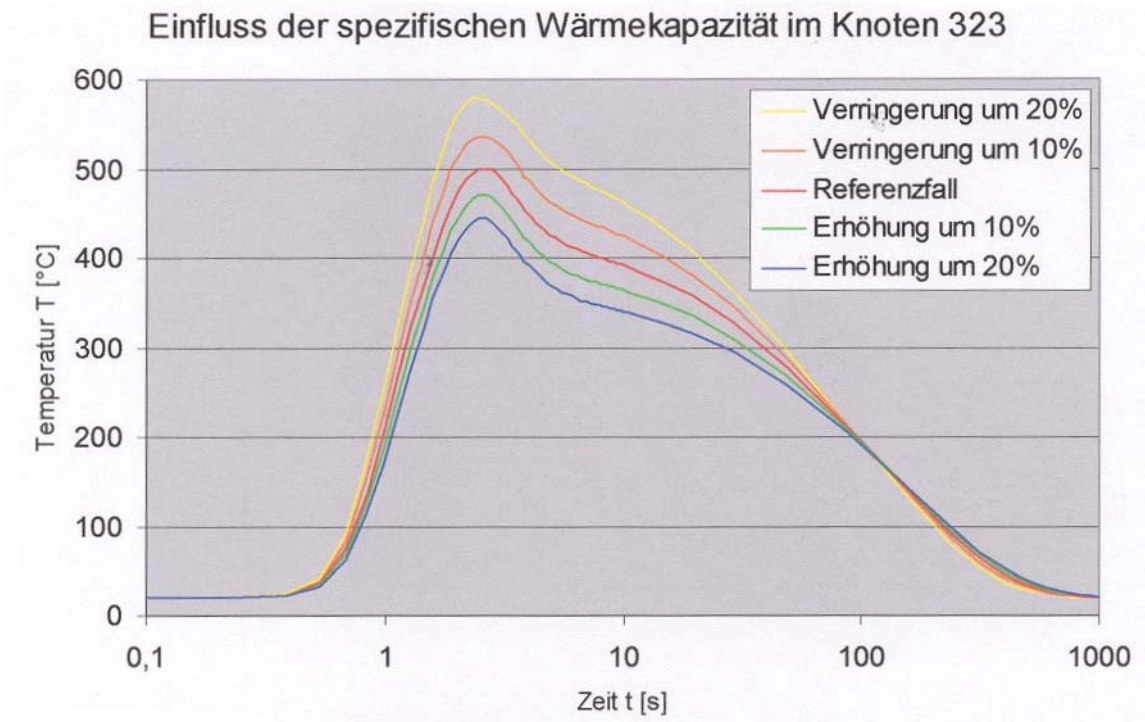


Bild 28: Einfluss der Wärmekapazität auf die Temperatur in Nahtnähe

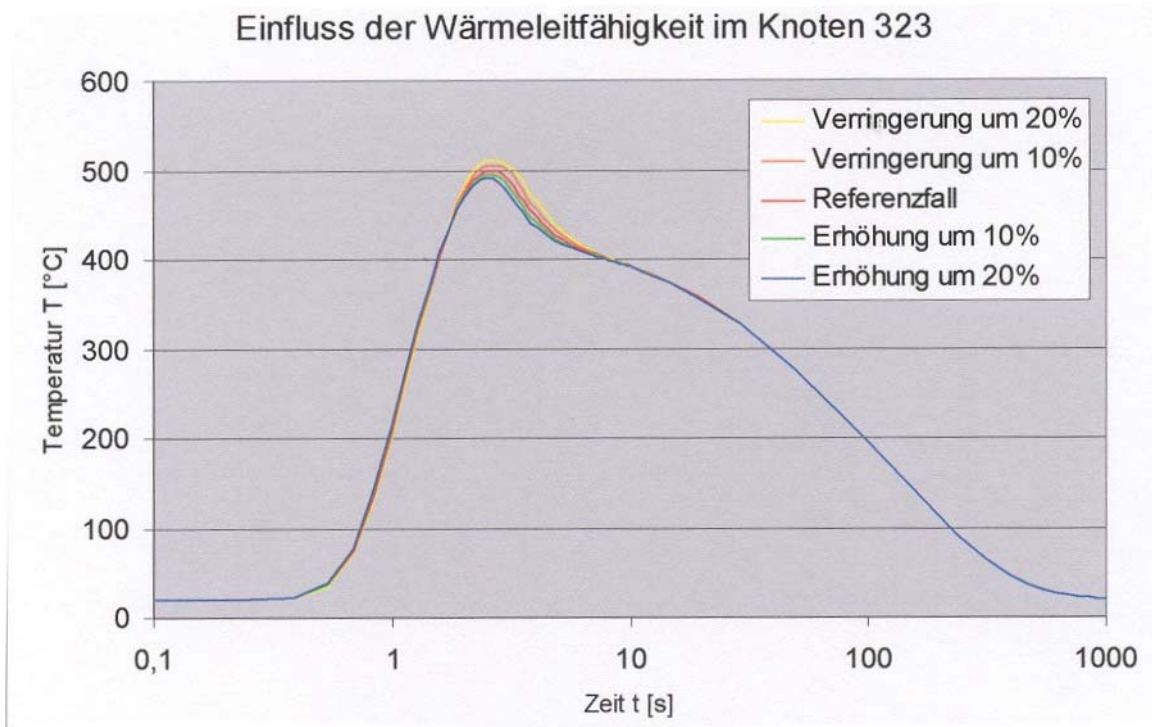


Bild 28: Einfluss der Wärmeleitfähigkeit auf die Temperaturverteilung in Nahtnähe