

Energie- und materialeffiziente Herstellung von Kupfer- Verbundhalbzeugen mittels Verbundgießen

gefördert durch



Deutsche
Bundesstiftung Umwelt

www.dbu.de

(DBU-Aktenzeichen: 32334/01-21)

Abschlussbericht

von

Tim Mittler, M.Sc.; Thomas Greß, M.Sc. (Technische Universität München),
Dipl.-Ing. Jan Westerwick; Michael Prawinski (Bögra Technologie GmbH),
Dr.-Ing. Christoph Honsel (RWP GmbH),
Dipl.-Ing. (FH) Elmar Hartmann (esa4u GmbH)

Solingen, 13. August 2018

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	32334/01	Referat	21	Fördersumme	599.350 €
----	-----------------	---------	-----------	-------------	------------------

Antragstitel **Energie- und materialeffiziente Herstellung von Kupfer-Verbundhalbzeugen mittels Verbundgießen**

Stichworte Umwelt und gesundheitsfreundliche Verfahren und Produkte

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
3 Jahre 7 Monate	1.10.2014	30.04.2018	1/1

Zwischenberichte 5 Stück

Bewilligungsempfänger	Bögra Technologie GmbH	Tel	0212 381 190
	Georgestrasse 5	Fax	0212 381 117
	42719 Solingen	Projektleitung	
		Dipl. Ing. Jan Westerwick	
		Bearbeiter	
		Michael Prawinski	

Kooperationspartner Technische Universität München – Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen, Walther-Meißner Straße 4, 85748 Garching
Esa4u GmbH, Seeweg 60, 97204 Höchberg
RWP-Simtec GmbH, Bundesstrasse 77, 52159 Roetgen

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

Die Zielsetzung des beantragten Vorhabens besteht darin, die prozess- und anlagentechnischen Grundlagen zu erarbeiten, um die Herstellung von zweikomponentigen Kupferverbundhalbzeugen mittels kontinuierlichem Verbundgießen zu ermöglichen. Durch die Kombination des Gießens und des stoffschlüssigen Fügens in einem einzigen Fertigungsschritt ergeben sich aufgrund der damit einhergehenden Prozesskettenverkürzung – verglichen mit konventionellen Verfahren zur Herstellung von Verbundhalbzeugen – weitreichende umweltrelevante Vorteile.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Um die thermischen und prozesstechnischen Bedingungen für die Entstehung einer stoffschlüssigen Bindung zwischen den Gießwerkstoffen Zinnbronze und Reinkupfer zu erarbeiten, wurden zunächst statische Verbundgießversuche mit horizontaler und vertikaler Bindezone durchgeführt. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse bildeten die Grundlage für die spätere Durchführung der kontinuierlichen Verbundgießversuche. Hierfür wurden zunächst Zinnbronze-Substratbänder (Bandformat 150 mm x 12 mm) auf einer Pilot-Stranggießanlage gegossen. Anschließend erfolgte die Verfahrensentwicklung zum einstufigen Stranggießen von Verbundbändern. Die Gießprozesssimulation (RWP WinCast®) unterstützte hierbei die Werkzeugauslegung und Verfahrenserprobung. Zusätzlich wurden in diesem Schritt erste Konzepte für ein vertikales Verbundstranggießverfahren im industriellen Maßstab ausgearbeitet. Ziel war es, den Machbarkeitsnachweis des kontinuierlichen Verfahrens zu erbringen und ein Prozessfenster für das Verbundgießen von zweischichtigen Cu-Bändern zu definieren. Die Verbundhalbzeuge wurden hierzu werkstoffkundlich untersucht, um die Zusammenhänge zwischen den thermischen und prozesstechnischen Bedingungen und der daraus resultierenden Verbundbeschaffenheit zu ermitteln. Die Verbundqualität wurde mittels Ultraschall und mechanischen Prüfmethode quantifiziert. Abschließend wurde die umformtechnische Weiterverarbeitbarkeit der Verbunde bewertet.

Ergebnisse und Diskussion

Anhand der simulationsunterstützten, statischen Gießversuche mit verlorenen Formen und horizontaler Bindezone konnte die gießtechnische Herstellbarkeit eines Zinnbronze-Reinkupferverbundes nachgewiesen werden. Weitere Gießversuche mit vertikaler Bindezone bestätigten, dass eine zu starke Oberflächenoxidation des zuerst gegossenen Werkstoffes die Ausbildung eines stoffschlüssigen Verbundes mit dem zweiten Werkstoff verhindert. Sofern die niederschmelzende Zinnbronze durch den Verbundgießvorgang partiell aufgeschmolzen wird, stellt sich eine hinreichend gute Verbindung mit dem Reinkupfer ein. Zu hohe Temperaturen im Bereich der Liquidustemperatur führen allerdings zu einer unerwünschten Durchmischung der beiden Werkstoffe. Die Temperatur, welche bindezonennah innerhalb der Zinnbronze für die Ausbildung eines stoffschlüssigen Schichtverbundes mit guter Verbundqualität erreicht werden sollte, kann mit ca. 1000-1040 °C angegeben werden. Anhand dieser Erkenntnisse wurde simulationsunterstützt ein Grobkonzept für das halbkontinuierliche, vertikale Verbundstranggießen von Kupferwerkstoffen im industriellen Maßstab entworfen.

Die Verbundqualität der horizontal stranggegossenen Cu-Verbundbänder zeigt eine deutliche Abhängigkeit von der Hubweite, der Gießgeschwindigkeit und der Aufgießdicke. Der Einfluss des Kühlwasser-Volumenstroms ist hingegen vergleichsweise gering. Sehr kurze oder große Hübe führen zu Anbindungsfehlern zwischen den Gießwerkstoffen. Hauptsächlich hierfür sind prozessbedingte Benetzungsprobleme. Die Anzahl und Größe der Fehlstellen reduziert sich innerhalb der Bindezone mit steigender Gießgeschwindigkeit. Allerdings führt eine zu hohe Gießgeschwindigkeit zu unerwünschten Durchmischungen der Gießwerkstoffe, da die mechanische und thermische Stabilität der substratoberflächennahen Schichten dem Wärmeeintrag und der fluidmechanischen Kräfte seitens der Reinkupferschmelze nicht standhalten. Eine zu geringe Gießgeschwindigkeit bedingt hingegen einen Gießabbruch durch Rückerstarrung der Schmelzen in ihr Zuführsystem.

Die gegossenen Verbundbänder wurden in einem sechsstufigen Kaltwalzprozess mit einmaligen Zwischenglühen erfolgreich weiterverarbeitet. Die Verbundbleche wurden anschließend schergeschnitten. Hierbei zeigte sich eine deutliche Abhängigkeit der maximalen Schneidkraft und der Schnittflächenausprägung von der Schicht im Stempelkontakt und des Wärmebehandlungszustandes der Verbundbleche. Eine Delamination der Schichten erfolgte auch während der Fertigbearbeitung nicht. Somit ist die Weiterverarbeitbarkeit der stranggegossenen Cu-Verbundbänder nachgewiesen.

Veröffentlichungen und Vorträge

- Mittler, T., Greß, T., Feistle, M., Krinninger, M., Hofmann, U., Riedle, J., Golle, R., Volk, W., 2018. Fabrication and processing of metallurgically bonded copper bimetal sheets. *Journal of Materials Processing Technology*.
- Greß, T., Mittler, T., Volk, W., 2018. Casting methods for the production of rotationally symmetric copper bimetals. *Materials Science and Technology*, 1-11.
- Mittler, T., Greß, T., Pintore, M., Volk, W., 2017. Continuous casting of copper compounds. *Metall* 71, 448-451.
- Mittler, T., Greß, T., Pintore, M., Volk, W., 2016. Kupfer-Hybridhalbzeuge: Gießtechnische Herstellung eines rotationssymmetrischen Schichtverbundes. *Metall* 70, 248-251.
- Greß, T., Mittler, T., Volk, W.: Casting methods for the production of rotationally symmetric copper compounds. *Copper Alloys*, Mailand 2018.
- Mittler, T., Greß, T., Volk, W.: Horizontales Verbundstranggießen von Kupferwerkstoffen. 14. Kupfer-Symposium, Esslingen 2017.
- Mittler, T., Greß, T., Pintore, M.: Simulation der thermischen Verhältnisse beim Verbundstranggießen von Kupferwerkstoffen. DGM-Fachausschuss Stranggießen, Neu-Ulm 2017.
- Mittler, T., Greß, T., Pintore, M., Volk, W.: Verbundstranggießen von Kupferwerkstoffen. DGM-Fachausschuss Stranggießen, Mönchengladbach 2016.
- Mittler, T.: Berichte aus den Hochschulen – Bereich Kupferguss. BDG-Fachausschuss Kupfergusswerkstoffe, Papenburg 2015.

Fazit

Das Forschungsprojekt konnte die Machbarkeit einer umweltschonenden, gießtechnischen Herstellung von zweischichtigen, stoffschlüssigen Verbundhalbzeugen auf Kupferbasis und deren umformtechnische Weiterverarbeitbarkeit belegen. Die wesentlichen Zusammenhänge zwischen den Gießparametern und der Verbundbeschaffenheit wurden aufgezeigt. Die Ergebnisse stellen einerseits die Grundlage für eine mögliche Industrialisierung des Verfahrens dar und können andererseits einen wichtigen Beitrag für den erfolgreichen Übertrag der Prozesskette auf weitere Werkstoffkombinationen (z. B. Al-Cu) liefern.

Inhaltsverzeichnis

Projektkennblatt.....	2
1 Abbildungsverzeichnis.....	5
2 Tabellenverzeichnis.....	7
3 Nomenklatur.....	8
4 Zusammenfassung.....	9
5 Einleitung.....	10
6 Hauptteil.....	14
6.1 Basisuntersuchungen.....	14
6.2 Entwicklungen in der Gießprozesssimulation.....	25
6.3 Verfahrensentwicklung zum vertikalen Verbundstranggießen im Rundformat.....	26
6.4 Horizontales Verbundstranggießen im Bandformat.....	36
6.4.1 Anlagen- und Werkzeugtechnik.....	36
6.4.2 Stranggießen Cu-Substrat.....	39
6.4.3 Horizontales Kupferverbundstranggießen.....	40
6.4.4 Umformtechnische Weiterverarbeitung der Verbundstränge.....	47
6.5 Veröffentlichung der Projektergebnisse.....	50
6.5.1 Beiträge Fachzeitschriften.....	50
6.5.2 Vorträge auf Tagungen und Ausschüssen.....	50
7 Fazit.....	51
8 Literaturverzeichnis.....	53

1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Vereinfachte Prozesskette bei der Herstellung von Verbundhalbzeugen mittels Walzplattieren (oben) und kontinuierlichem Verbundgießen (unten) nach [Ner14b]	10
Abbildung 2: Projektstruktur	11
Abbildung 3: Versuchsaufbau zum statischen Schichtverbundgießen mit horizontaler Bindezone nach [Ner10]	15
Abbildung 4: Versuchsdurchführung zum statischen Schichtverbundgießen mit horizontaler Bindezone und Verbundgussteil.....	15
Abbildung 5: Thermische Verhältnisse beim statischen Verbundgießen mit horizontaler Bindezone	16
Abbildung 6: Anwendung des Simulationsmodells nach [Ner10] zur Abbildung der thermischen Verhältnisse beim statischen Verbundgießen von Kupferwerkstoffen	16
Abbildung 7: Maximale Substrattemperatur beim statischen Verbundgießen in Abhängigkeit der Substrattemperatur unmittelbar vor dem Aufgießen und der Wahl des Substratwerkstoffs	17
Abbildung 8: Maximale Substrattemperatur beim statischen Verbundgießen in Abhängigkeit der Aufgießtemperatur und der Wahl des Substratwerkstoffs.....	18
Abbildung 9: Makroschliffe von Verbundgusskörpern: a) CuSn6-Substrat mit $T_{2max} = 1075 \text{ °C}$ und b) Cu99,5-Substrat mit $T_{2max} = 1048 \text{ °C}$	18
Abbildung 10: Mikrostruktur der Bindezone in Abhängigkeit des Atmosphärenkontakts der Substratoberfläche vor dem Aufgießen sowie der Wahl des Substratwerkstoffs	19
Abbildung 11: Versuchsdurchführung zum statischen Schichtverbundgießen von platten- und bolzenförmigen Verbundgussteilen mit vertikaler Bindezone	20
Abbildung 12: Schematische Darstellung des Versuchsstandes zum statischen Schichtverbundgießen mit steigender Formfüllung und vertikaler Bindezone nach [Gre18]	21
Abbildung 13: Thermische Verhältnisse beim statischen Verbundgießen mit steigender Formfüllung und vertikaler Bindezone nach [Gre18]	22
Abbildung 14: Mikrostruktur der Grenzfläche in Abhängigkeit der Angießtemperatur und Werkstoffzuordnung nach [Gre18]	23
Abbildung 15: Härte des grenzflächennahen Bereichs in Abhängigkeit der Werkstoffzuordnung und Angießtemperatur nach [Gre18].....	24
Abbildung 16: Prozessablauf zur Herstellung rotationssymmetrischer Verbundhalbzeuge	26
Abbildung 17: CAD-Modell des vertikalen Stranggießversuchsstands	27
Abbildung 18: Thermische Verhältnisse beim mehrstufigen vertikalen Verbundstranggießen nach [Gre18].....	28
Abbildung 19: Gefügeanalyse an rotationssymmetrischen Verbundproben	29
Abbildung 20: Makroskopische Gefügeanalyse an geätzten Substrat- und Verbundproben nach [Mit16] 30	
Abbildung 21: Härteprofil gegossener Substrat- und Verbundproben nach [Mit16].....	31
Abbildung 22: Push-Out-Test an gegossenen Substrat- und Verbundproben nach [Gre18].....	31
Abbildung 23: Modell und Randbedingungen zur Simulation des mehrstufigen, vertikalen Verbundstranggießens	32
Abbildung 24: Temperaturfeldsimulation des vertikalen Substratgießens	33
Abbildung 25: Temperaturfeldsimulation des vertikalen Umgießens nach [Mit16]	33
Abbildung 26: Schematische Darstellung eines einstufigen, vertikalen Verbundstranggießprozesses zur Herstellung rotationssymmetrischer Halbzeuge auf Kupferbasis	34

Abbildung 27: Parameterstudie zum einstufigen, vertikalen Verbundstranggießen	35
Abbildung 28: Anlage zum horizontalen Verbundstranggießen von Kupferbasiswerkstoffen	36
Abbildung 29: Stell- und Messeinrichtungen im Kühlsystem der Stranggießanlage.....	37
Abbildung 30: Gießwerkzeug zum Verbundstranggießen von Kupferbändern nach [Mit17] und [Mit18]	39
Abbildung 31: Kavitätsnahe Kokillentemperaturen beim Substratbandgießen in Abhängigkeit der Wartezeit (Hubweite 7,2 mm, Gießtemperatur ca. 1130 °C).....	40
Abbildung 32: Gussprodukt des horizontalen Verbundstranggießprozesses	41
Abbildung 33: Kokillentemperatur in 3,5 mm Abstand zur Kavität (kavitätsnah) beim horizontalen Substrat- und Verbundstranggießen (Hubweite 7,2 mm, Wartezeit 1,1 s) nach [Mit17].....	42
Abbildung 34: Strang- und Werkzeugtemperaturen beim horizontalen Verbundstranggießen (Hubweite 9,6 mm, Wartezeit 1,5 s)	42
Abbildung 35: Mechanische und zerstörungsfreie Bindezonenprüfung von Kupferwerkstoffen	43
Abbildung 36: Einfluss der Gießgeschwindigkeit auf die thermischen Verhältnisse beim horizontalen Kupfer-Verbundstranggießen	44
Abbildung 37: Struktur der Bindezone in Abhängigkeit der Gießgeschwindigkeit	44
Abbildung 38: Verbundqualität in Abhängigkeit der Gießgeschwindigkeit nach [Mit18]	45
Abbildung 39: Verbundqualität in Abhängigkeit der Hubweite nach [Mit18]	45
Abbildung 40: Simulierte Substratoberflächentemperatur in Abhängigkeit der Hubweite bei konstanter Gießgeschwindigkeit	46
Abbildung 41: Verbundqualität in Abhängigkeit der Aufgießdicke	46
Abbildung 42: Verbundqualität in Abhängigkeit des Kühlwasservolumenstroms	47
Abbildung 43: Stichplan zur umformtechnischen Weiterverarbeitung der Verbundbänder nach [Mit18]	47
Abbildung 44: Verbundblech und Mikrostruktur im Anschluss an das Kaltwalzen.....	48
Abbildung 45: Maximale Schneidkraft und Schnittflächenausprägung in Abhängigkeit des Stempelkontakts nach [Mit18]	49
Abbildung 46: Mikrostruktur der Verbundbleche in Abhängigkeit der Schicht mit Stempelkontakt und des Wärmebehandlungszustandes (a) ungeätzt, b) geätzt) nach [Mit18].....	49

2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Richtwerte physikalischer und mechanischer Werkstoffeigenschaften der Verbundpartner 14	
Tabelle 2: Versuchsparameter zum Schichtverbundgießen mit verlorener Form und horizontaler Bindezone.....	17
Tabelle 3: Mechanische Festigkeiten der statisch gegossenen Verbundgussteile.....	20
Tabelle 4: Prozessparameter und -randbedingungen zum diskontinuierlichen Verbundgießen [Gre18].....	21
Tabelle 5: Prozessparameter zum mehrstufigen vertikalen Verbundstranggießen nach [Gre18]	27
Tabelle 6: Prozessfenster des CuSn6-Substratbandgießens im Format 150 mm x 12 mm.....	40

3 Nomenklatur

Abkürzung	Beschreibung	Einheit
AP	Arbeitspaket	-
BDG	Bundesverband der deutschen Gießerei-Industrie	-
C	Kohärenz	-
DBU	Deutsche Bundesstiftung Umwelt	-
DGM	Deutsche Gesellschaft für Materialkunde	-
DIN	Deutsches Institut für Normung	-
DKI	Deutsches Kupferinstitut	-
DMS	Dehnungsmessstreifen	-
F	Kraft	N
g	Erdbeschleunigung	m/s ²
KE	Kokilleneinlauf	-
HV	Vickers-Härte	-
konv	Konvektion	-
liq/L	Liquidus	-
max	Maximum	-
min	Minimum	-
Q	Wärme	J
s	Schmelzpunkt	-
sol/S	Solidus	-
str	Strahlung	-
T	Thermoelementmessposition	-
UP	Umgießpunkt	-
v	Geschwindigkeit	m/s
VDI	Verein Deutscher Ingenieure	-
x, y, z	kartesische Koordinaten	m

4 Zusammenfassung

Die globale Zielsetzung des von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) geförderten Forschungsprojekts „Energie- und materialeffiziente Herstellung von Kupfer-Verbundhalbzeugen mittels Verbundgießen“ (DBU-Aktenzeichen: 32334/01-21) war die prototypische Entwicklung eines umweltfreundlichen Produktionsverfahrens für Werkstoffverbunde auf Kupferbasis. Das Projektkonsortium setzte sich aus den industriellen Partnern Bögra Technologie GmbH, RWP GmbH und esa4u GmbH sowie mit dem Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen (utg) der Technischen Universität München als wissenschaftlichen Partner zusammen.

Werkstoffverbunde stellen dem Bauteilkonstrukteur ein komplexes, teils konträres Eigenschaftsprofil auf engstem Bauraum zur Verfügung. Für Kupferbasiswerkstoffe ist beispielsweise die Kombination der hohen Leitfähigkeit des Reinkupfers mit den guten mechanischen Eigenschaften einer Zinnbronze für die Anwendung in elektrischen Kontakten interessant. Die wesentliche Zielsetzung des Forschungsprojekts bestand hierin, einen stoffschlüssigen Schichtverbund dieser exemplarischen Werkstoffpaarung bereits im ersten Wertschöpfungsschritt der Halbzeuherstellung – beim Gießen der Werkstoffe – zu erzeugen. Hierdurch kann eine separate Fügeoperation in der weiteren Prozesskette entfallen. Dies ist aus Umweltaspekten besonders vorteilhaft, da zum einen die ohnehin abzuführende Gießwärme unmittelbar für die Ausbildung einer stoffschlüssigen Verbindung der Fügepartner genutzt werden kann und zum anderen chemische Oberflächenbehandlungen wie Beizen oder Entfetten als Fügevorbereitung gänzlich entfallen können.

Im Vorfeld der Verbundhalbzeug-Herstellung wurden statische Schwerkraft- und Kippgießversuche in unterschiedlichen Gussformaten durchgeführt. Es konnte gezeigt werden, dass die Verbundbildung zwischen den Kupferbasiswerkstoffen entscheidend von den thermischen Bedingungen zum Gießzeitpunkt, dem Atmosphärenkontakt der Substratoberfläche vor dem Verbundgießen, der Orientierung der Substratoberfläche und dem gewählten Gießverfahren abhängt. Hierauf aufbauend wurde ein Konzept zum vertikalen Verbundstranggießen von rotationssymmetrischen Kupfer-Verbundhalbzeugen im industriellen Maßstab entwickelt und die Anlagen- und Werkzeugtechnik zum horizontalen Verbundstranggießen von zweischichtigen Kupferbändern im Pilotmaßstab ausgelegt. Die Gießprozesssimulation begleitete die Verfahrensentwicklungen. Die anhand von Messdaten kalibrierten und validierten Modelle bilden die thermischen Verhältnisse während der Verbundbildung mit hinreichender Genauigkeit ab. Hierfür wurde u. a. der intermittierende Strangabzug für die Simulation des horizontalen Verbundstranggießens in die Software implementiert. Die sich in den Gießversuchen einstellende Verbundqualität wurde mittels Lichtmikroskopie, Ultraschallprüfung und mechanischen Prüfverfahren evaluiert. So konnte insbesondere eine Abhängigkeit der Verbundqualität von der Hubweite, der Gießgeschwindigkeit und der Aufgießdicke aufgezeigt werden. Abschließend wurde die umformtechnische Weiterverarbeitbarkeit der Verbundbänder in Form von Kaltwalzen und Scherschneiden überprüft. Es konnte gezeigt werden, dass der Schichtverbund über die gesamte Prozesskette hinweg nicht delaminiert und eine metallurgische Bindung im Fertigteil vorliegt. Dies stellt Grundvoraussetzungen für die Industrialisierung dieses umweltschonenden Verbundstranggießverfahrens zur Herstellung von mehrschichtigen Bauteilen auf Kupferbasis dar.

5 Einleitung

Werkstoffverbunde werden eingesetzt, um ein technologisch komplexes Eigenschaftsprofil innerhalb eines einzigen Bauteils zu erreichen. Dies ist insbesondere von Interesse, wenn konträre Materialanforderungen auf möglichst geringem Bauraum zur Verfügung gestellt werden sollen. Im Bereich der Kupferwerkstoffe gilt dies beispielsweise für die Kombination der exzellenten elektrischen Leitfähigkeit des Reinkupfers mit den guten mechanischen Eigenschaften eines legierten Kupfers wie Bronze oder Messing. Für die Herstellung von Werkstoffverbunden bedarf es jedoch einer Fügeoperation, welche in Prozessketten der Metallverarbeitung oftmals einen zusätzlichen Energie- und Materialeinsatz erfordern.

Metallische Bandhalbzeuge mit Kupferbeteiligung werden nach dem Stand der Technik u.a. durch Walzplattieren gefügt. In den vorgelagerten Prozessschritten des Walzplattierens werden die Verbundpartner zunächst einzeln gegossen und zu Blechen gewalzt. Unmittelbar vor der eigentlichen Fügeoperation werden die Oberflächen in der Regel vorbehandelt, um Oxide und sonstige Verunreinigungen zu entfernen. Die notwendigen Beiz- und Entfettungsvorgänge werden mittels organischen Lösungsmitteln oder Säuren durchgeführt [Kna78], welche aus Umweltaspekten problematisch sein können. Das Fügen der Werkstoffe erfolgt parallel zu deren plastischen Formänderung unter hohen Walzdrücken. Im Bereich von Kupferwerkstoffen müssen Umformgrade beim Kaltwalzprozess von ca. 50% erreicht werden, um eine hinreichende Bindung der Fügepartner sicherzustellen [Abb10]. Die weitere umformtechnische Verarbeitung erfordert ein Zwischenglühen des Werkstoffverbundes [Beh10] und die Verbundqualität kann über Wärmebehandlungen weiter gesteigert werden [Pan89]. Diese sind allerdings sehr energieintensiv und verlängern die Durchlaufzeit der Bauteilherstellung.

Abbildung 1 zeigt mit dem kontinuierlichen Verbundgießen bzw. Verbundstranggießen eine verkürzte Prozesskette mit deutlicher Reduzierung des Energie- und Ressourceneinsatzes in der Herstellung von Verbundhalbzeugen.

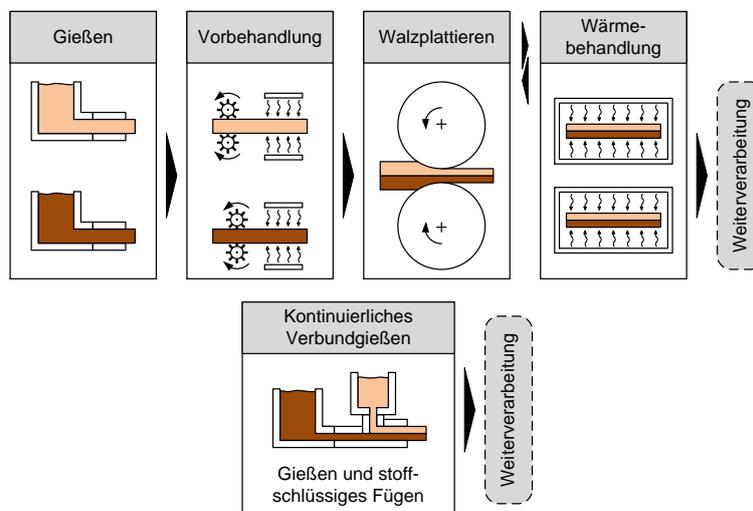


Abbildung 1: Vereinfachte Prozesskette bei der Herstellung von Verbundhalbzeugen mittels Walzplattieren (oben) und kontinuierlichem Verbundgießen (unten) nach [Ner14b]

So wird die stets abzuführende Gießwärme der Werkstoffe direkt für die Ausbildung einer stoffschlüssigen Verbindung der Fügepartner genutzt. In Abgrenzung zum Schweißen oder Löten wird somit die unlösbare Verbindung ohne den Einsatz weiterer Energiezufuhr und bereits im ersten Schritt der Wertschöpfungskette erreicht. Weiterhin entfällt durch diese Art des Fügens die mechanische und chemische Vorbehandlung der Bleche vor der Fügeoperation.

Die Zielsetzung des Projekts ist die Erarbeitung der prozess- und anlagentechnischen Grundlagen, um die Herstellung von zweischichtigen Kupfer-Verbundhalbzeugen mittels kontinuierlichen Verbundgießen zu ermöglichen. Die globale Zielsetzung lässt sich in folgende Teilziele untergliedern:

- Erarbeitung des Prozessfensters für die Entstehung einer stoffschlüssigen Verbindung zwischen ausgewählten Kupferbasiswerkstoffen
- Auslegung, Konstruktion und Inbetriebnahme der Werkzeug- und Anlagentechnik zum Verbundstranggießen
- Verfahrenserprobung und Nachweis der Machbarkeit
- Herstellung des Zusammenhangs zwischen den beim Verbundgießen vorliegenden thermischen bzw. prozesstechnischen Bedingungen, der daraus resultierenden Verbundbeschaffenheit und den technologischen Eigenschaften der Verbundhalbzeuge
- Bewertung der umformtechnischen Weiterverarbeitbarkeit der Verbundhalbzeuge

Abbildung 2 zeigt das wissenschaftlich-technische Lösungskonzept zur Erreichung der Zielsetzung. Die Projektstruktur ist in 7 Arbeitspakete (AP) unterteilt, deren Ergebnisse zusammengefasst im Hauptteil des Abschlussberichts dokumentiert sind.

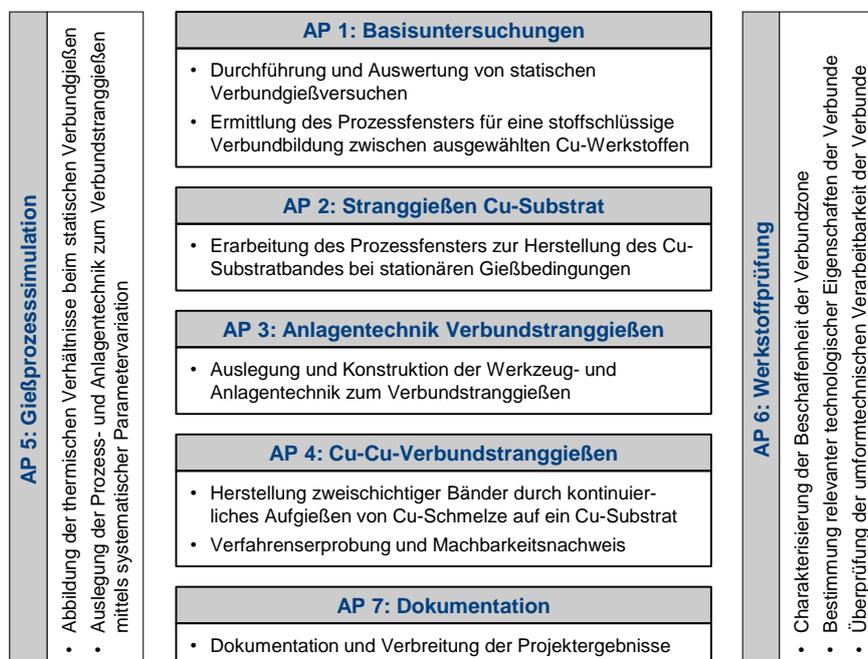


Abbildung 2: Projektstruktur

Im AP 1 werden mittels statischer Verbundgießversuche geometrisch einfache Verbundgusskörper hergestellt, die aus verschiedenen Kupferbasiswerkstoffen bestehen. Vorrangige Ziele sind die Erarbeitung des Prozessfensters für die Entstehung einer stoffschlüssigen metallischen Verbindung

zwischen den Verbundpartnern sowie die Auswahl einer für das Verbundstranggießen geeigneten Kombination aus Substrat- und Aufgusswerkstoff. Die erzeugten Verbundgusskörper werden zu diesem Zweck im Rahmen des AP 6 werkstoffkundlich untersucht.

Das AP 2 beinhaltet die Durchführung und Auswertung von Horizontalstranggießversuchen zur Herstellung eines einschichtigen, monolithischen Cu-Substratstranges. Durch systematische Variation der grundlegenden Gießparameter gilt es, das Prozessfenster zu erschließen, in dem eine kontinuierliche Fertigung des Substratbandes bei stationären Gießbedingungen möglich ist. Dies ist Grundvoraussetzung für die anschließende Entwicklung des Verbundstranggießverfahrens, bei dem der schmelzflüssige Aufgusswerkstoff kontinuierlich auf das Substratband aufgegossen wird.

Im Rahmen des AP 3 erfolgt zum einen die Bereitstellung des Verbundgießwerkzeuges und der anlagentechnischen Möglichkeiten zum horizontalen Verbundstranggießen zweischichtiger Cu-Bänder. Von zentraler Bedeutung ist hierbei die Konzipierung eines geeigneten Aufgießmoduls, das ein prozesssicheres Zuführen des flüssigen Aufgusswerkstoffes erlaubt und zudem die Ausbildung einer stoffschlüssigen Verbindung zwischen Substrat- und Aufgussstrang ermöglicht. Dabei werden die Ergebnisse der Basisuntersuchungen (AP 1), der Stranggießversuche (AP 2) sowie der im AP 5 durchgeführten Simulationsstudien berücksichtigt. Zum anderen ist beabsichtigt, ein Grobkonzept für die Werkzeug- und Anlagentechnik zum vertikalen Verbundstranggießen von Rundformaten im industriellen Maßstab zu erarbeiten.

Das AP 4 zielt darauf ab, das horizontale Verbundstranggießen von zweischichtigen Cu-Bändern unter Verwendung der im AP 3 entwickelten Anlagentechnik im Sinne einer Verfahrenserprobung experimentell zu untersuchen. Auf diese Weise wird zum einen der Nachweis der prinzipiellen Machbarkeit erbracht, zum anderen lässt sich das Prozessfenster für das kontinuierliche Verbundgießen durch systematische Variation der Gießparameter erarbeiten. Um Zusammenhänge zwischen grundlegenden Eigenschaften der Verbunde und den Gießbedingungen erfassen zu können, werden die produzierten Verbundbänder anschließend im AP 6 werkstoffkundlich untersucht.

Im AP 5 wird die Gießprozesssimulation eingesetzt, um alle Phasen der Verfahrensentwicklung effizient zu unterstützen und somit den erforderlichen experimentellen Aufwand in den übrigen AP auf ein Minimum begrenzen zu können. In einem ersten Schritt gilt es, die thermischen Verhältnisse beim statischen Verbundgießen (siehe AP 1) hinreichend genau nachzubilden. Darauf aufbauend werden mittels Parameterstudien erfolgversprechende Prozessparameter für das horizontale Verbundstranggießen identifiziert und Handlungsempfehlungen für die konstruktive Auslegung des Verbundgießwerkzeuges (siehe AP 3) abgeleitet. Um eine realitätsnahe simulative Beschreibung des entwickelten Verfahrens sicherzustellen, erfolgt die Validierung der Simulationsmodelle auf Basis der Ergebnisse der im AP 4 durchgeführten Gießversuche. Aufbauend auf diesen validierten Simulationsmodellen wird abschließend die Konzipierung der Werkzeug- und Anlagentechnik zum vertikalen Verbundstranggießen von Rundformaten im industriellen Maßstab (siehe AP 3) begleitet.

Im Rahmen des AP 6 werden sowohl die im AP 1 hergestellten Cu-Cu-Verbundgusskörper als auch die im AP 4 erzeugten Verbundstränge werkstoffkundlichen Prüfungen unterzogen, wobei metallographische und mechanische Methoden zum Einsatz kommen. Ziel ist es, Korrelationen

zwischen den während der Verbundbildung vorliegenden Bedingungen, der daraus resultierenden Verbundbeschaffenheit (z. B. Gefügestruktur) sowie relevanten technologischen Eigenschaften (z. B. Bindefestigkeit, Härte) herstellen zu können. Einen weiteren Schwerpunkt dieses AP 6 bildet die Untersuchung der umformtechnischen Weiterverarbeitbarkeit der Verbundstränge, wofür Walzversuche nach industriellen Standards sowie begleitende metallographische Analysen durchgeführt werden.

Das AP 7 erstreckt sich über die gesamte Projektlaufzeit und beinhaltet die umfassende Dokumentation sowie Veröffentlichung der gewonnenen Forschungsergebnisse, so dass eine Verbreitung des entwickelten Verbundstranggießverfahrens in der industriellen Praxis gefördert wird.

6 Hauptteil

Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse aus den AP vorgestellt und diskutiert. Der Hauptteil gliedert sich entsprechend den Schwerpunkten des Forschungsprojektes in Basisuntersuchungen und (Verbund-)stranggießen. Die Ergebnisse aus den unterstützenden AP Gießprozesssimulation und Werkstoffprüfung werden beim entsprechenden Gießverfahren mit dargestellt.

6.1 Basisuntersuchungen

Zunächst wurden geeignete Kupferbasiswerkstoffe für das Forschungsvorhaben ausgewählt. Die Kriterien für die Auswahl der zu verbindenden Werkstoffe waren insbesondere technische Relevanz, konträres Eigenschaftsprofil der monolithischen Werkstoffe, Verfügbarkeit von thermophysikalischen und physikalischen Daten sowie prinzipielle Verarbeitbarkeit der Werkstoffe in den vorgesehenen Gießverfahren. Aus metallurgischer Sicht wurde bei der Auswahl der Fügepartner zudem darauf geachtet, dass die Elemente im Legierungssystem über eine nennenswerte Randlöslichkeit bis Raumtemperatur verfügen. Dies ist im Kupfer-Zinn-System gegeben. Das Erstarrungsintervall der ca. 6 Gewichts-% Zinn enthaltenen Bronze liegt ca. zwischen 1040 und 910 °C [DKI04]. Reines Kupfer weist einen Schmelzpunkt von ca. 1083 °C auf.

Die Anforderungen werden durch die Werkstoffpaarung Reinkupfer und Zinnbronze CuSn6 erfüllt. Tabelle 1 stellt hierfür Richtwerte der wesentlichen Werkstoffeigenschaften gegenüber. Ein Schichtverbund im Halbzeug kann somit die hervorragende elektrische Leitfähigkeit des Reinkupfers mit den guten mechanischen Eigenschaften der Zinnbronze verbinden, welche wiederum stark vom Verarbeitungszustand (gegossen, gewalzt, geglüht) abhängen. Eine derartige Eigenschaftskombination weist insbesondere ein hohes Potential für die Herstellung von elektrischen Kontakten und Steckverbindern auf.

Tabelle 1: Richtwerte physikalischer und mechanischer Werkstoffeigenschaften der Verbundpartner

	Reinkupfer (Cu99,7) [Boe14]	Zinnbronze (CuSn6) [DKI04]
Dichte [kg/m ³]	8900	8820
Elektr. Leitfähigkeit [MS/m]	min. 55	9
Wärmeausdehnungskoeffizient (20-200 °C) [10 ⁻⁶ K ⁻¹]	17	18,5
Zugfestigkeit [MPa]	min. 150	min. 380 (Drähte)
Bruchdehnung [%]	min. 25	min. 5 (Drähte)

Zunächst wurden zylindrische Verbundgusskörper mit horizontaler Bindezone entsprechend der in [Ner10] dargelegten Vorgehensweise mittels diskontinuierlichen Schwerkraftgießversuchen hergestellt. Abbildung 3 zeigt den Versuchsaufbau und Abbildung 4 ein Standbild aus der Versuchsdurchführung sowie das urgeformte Verbundgussteil. Im Versuchsablauf wird zunächst der Substratwerkstoff in die Sandform gegossen. Der unterhalb der Kavität positionierte Kupfer-Kühlkörper entzieht dem Gießwerkstoff Wärme, so dass eine gerichtete Erstarrung entgegen der Schwerkraftrichtung erfolgt. Die Temperaturen innerhalb der Kavität des Substratwerkstoffes werden an zwei Messstellen in unterschiedlicher Höhe erfasst, **Abbildung 3-b**). Ebenfalls befindet sich je eine Temperatur-Messposition in der Kavität des Aufgießwerkstoffes und in dem Kupferkühler. Während der Abkühlung des Substratwerkstoffes wird der Aufgießwerkstoff über ein zweites Gießsystem der Kavität zugeführt.

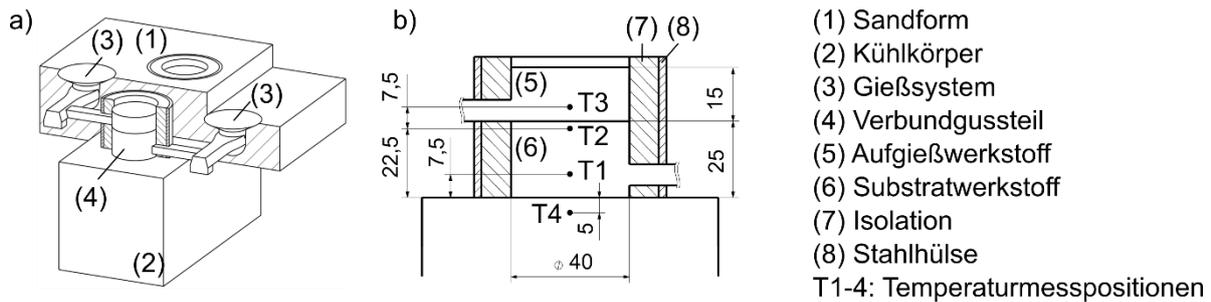
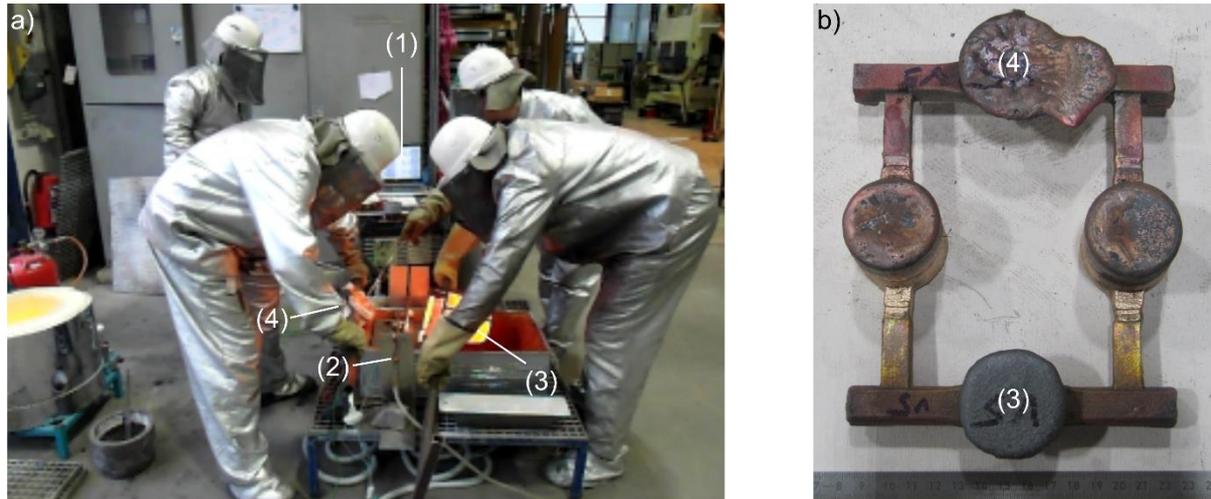


Abbildung 3: Versuchsaufbau zum statischen Schichtverbundgießen mit horizontaler Bindezone nach [Ner10]



(1) Temperaturmesstechnik (2) Schutzgaszuführung (3) Substratwerkstoff (4) Aufgießwerkstoff

Abbildung 4: Versuchsdurchführung zum statischen Schichtverbundgießen mit horizontaler Bindezone und Verbundgussteil

Abbildung 5 zeigt exemplarisch die thermischen Verhältnisse während eines Verbundgießversuchs. Die qualitativen Temperaturverläufe an den Messpositionen T1, T2 und T4 sind aus der gießtechnischen Herstellung von Aluminium-Werkstoffverbunden nach [Ner10], [Ner14a] und [Ner14b] bereits bekannt. So steigen die Temperaturen an allen Messpositionen infolge des Wärmeeintrags durch den Substratwerkstoff zunächst an bevor sie aufgrund der Wärmeabfuhr in das Gießwerkzeug abnehmen. Die Temperaturen an den Messpositionen T1 und T2 steigen infolge des direkten Kontakts der Messspitze mit der Schmelze rasch an, während die Messposition T3 vorwiegend durch Strahlungseffekte und die Messposition T4 durch Wärmeleitung im Kühler einen deutlich geringeren und zeitlich verzögerten Temperaturanstieg erfahren. Infolge des Wärmeeintrags durch den Aufgießwerkstoff erfolgt ein erneuter Temperaturanstieg an allen Messpositionen. Von besonderem Interesse ist hierbei die erreichte Maximaltemperatur im Substratwerkstoff T_{2max} , da diese Hinweise über ein oberflächennahes, partielles Wiederaufschmelzens des Substratwerkstoffs liefert. In der darauffolgenden Abkühlung gleichen sich die Temperaturen im Verbundgussbauteil an.

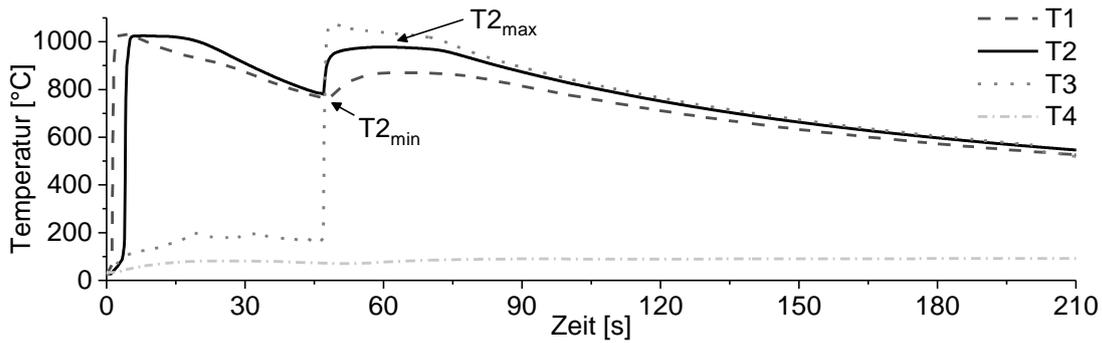
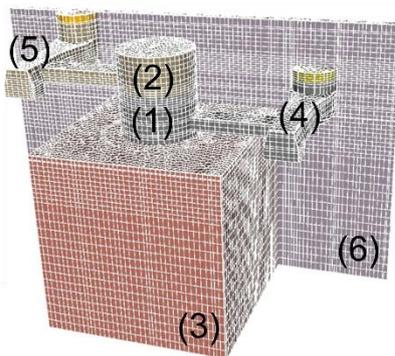


Abbildung 5: Thermische Verhältnisse beim statischen Verbundgießen mit horizontaler Bindezone

Abbildung 6 zeigt das Simulationsmodell zur Abbildung der thermischen Verhältnisse beim statischen Verbundgießen der Kupferwerkstoffe. Der Wärmeübergang zwischen dem Substratwerkstoff und dem Kupferkühler bestimmt maßgeblich die Wärmeabfuhr aus dem Verbundgussteil. Der Wärmeübergangskoeffizient wurde iterativ anhand von Temperaturmessdaten an der Messposition T2 kalibriert. Das Simulationsmodell bildet die thermischen Verhältnisse mit hinreichender Genauigkeit ab, vgl. Abbildung 6. Somit kann das kalibrierte und validierte Simulationsmodell für Variationsrechnungen verwendet werden.

Geometrie



- (1) Substratzylinder
- (2) Aufgießzylinder
- (3) Kupferkühlkörper
- (4) Gießsystem Substrat
- (5) Gießsystem Aufgießen
- weitere Komponenten (nicht dargestellt):
Isolation, Sandform, Umgebung

Starttemperaturen

Gießwerkstoffe: 1100 °C
Werkzeugkomponenten und Umgebung: 25 °C

Wärmeübergang

Gießwerkstoff-Kupferkühler: 6000 - 500 W/m²K
Substratzylinder-Aufgießzylinder 990000 W/m²K

Kalibrierung und Validierung

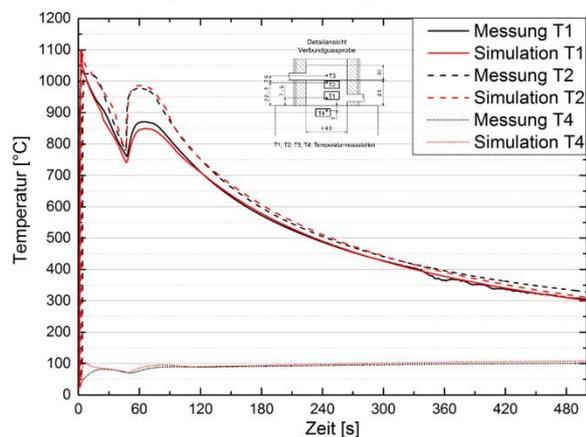


Abbildung 6: Anwendung des Simulationsmodells nach [Ner10] zur Abbildung der thermischen Verhältnisse beim statischen Verbundgießen von Kupferwerkstoffen

In der experimentellen Versuchsreihe wurden der Aufgießzeitpunkt (T_{2min}), die Wahl des Substratwerkstoffes und die Atmosphäre während der Abkühlung der Substratoberfläche variiert. Tabelle 2 fasst die Versuchsparameter zusammen.

Tabelle 2: Versuchsparameter zum Schichtverbundgießen mit verlorener Form und horizontaler Bindezone

Substratwerkstoff [-]	CuSn6; Cu99,5
Atmosphäre [-]	Luft; Argon
Substrattemperatur zu Aufgießbeginn T_{2min} [°C]	780 ... 1037

Abbildung 7 zeigt den Zusammenhang zwischen den Temperaturen T_{2min} und T_{2max} sowohl aus den Experimenten als auch der Simulationsstudie. Je höher die Substrattemperatur unmittelbar vor dem Aufgießen ist, desto höher ist auch die erreichte Maximaltemperatur nahe der Bindezone im Anschluss an das Aufgießen. Dies ist bereits aus [Ner10] und [Ner14a] für das statische Aluminium-Verbundgießen bekannt. Alle ermittelten Maximaltemperaturen befinden sich oberhalb der Solidustemperatur der Zinnbronze. Somit ist im Falle des Einsatzes der Zinnbronze als Substratwerkstoff von einem (partiellen) Wiederaufschmelzen der oberflächennahen Schichten auszugehen. Hierbei hemmt die Aufwendung der Schmelzenthalpie während des Wiederaufschmelzens den Temperaturanstieg in der Zinnbronze. Sofern Reinkupfer als Substratwerkstoff verwendet wird, ist in den Temperaturdaten kein Wiederaufschmelzen an der Messposition T_2 erkennbar.

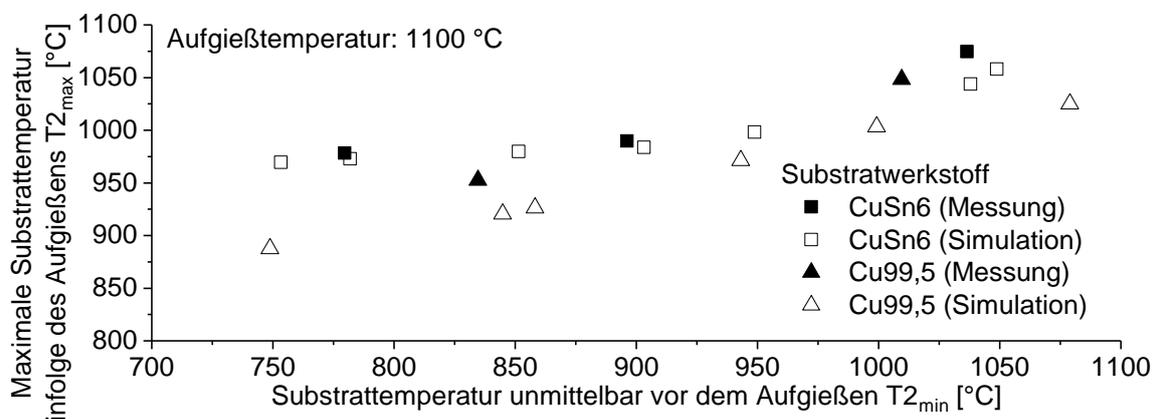


Abbildung 7: Maximale Substrattemperatur beim statischen Verbundgießen in Abhängigkeit der Substrattemperatur unmittelbar vor dem Aufgießen und der Wahl des Substratwerkstoffs

Im Vergleich zur Substrattemperatur zum Aufgießbeginn T_{2min} zeigt die Gießtemperatur des Aufgießwerkstoffes bzw. Aufgießtemperatur einen eher geringen Einfluss auf die simulierte, maximale Substrattemperatur infolge des Aufgießens T_{2max} , vgl. Abbildung 8. Aufgrund der Wärmeabfuhrbedingungen liegt der Ort der letzten Erstarrung im Substratwerkstoff oberflächennah, d.h. unmittelbar an der späteren Bindezone. Gas- und Erstarrungsporosität treten bevorzugt innerhalb dieses oberflächennahen Bereiches auf. Dies muss als Nachteil bei der Verwendung einer horizontalen Bindezone im statischen Verbundgießprozess bewertet werden. Bei Reinkupferschmelzen wirkt sich dies in besonderen Maße aus, da diese eine hohe Neigung zur Gasaufnahme in Abhängigkeit der Schmelztemperatur [Die67] zeigen. Daher wurden die Gießtemperaturen der Kupferbasiswerkstoffe in den experimentellen Untersuchungen möglichst konstant zu halten.

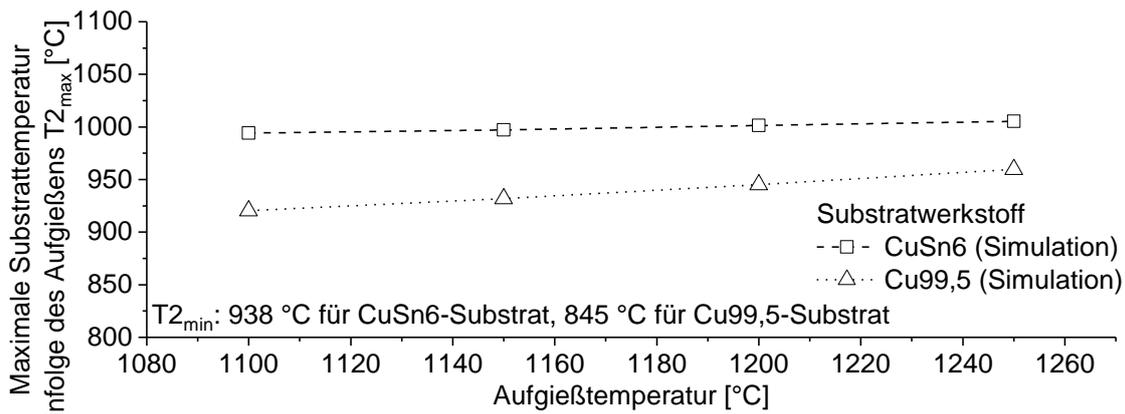


Abbildung 8: Maximale Substrattemperatur beim statischen Verbundgießen in Abhängigkeit der Aufgießtemperatur und der Wahl des Substratwerkstoffs

Abbildung 9 zeigt für beide Substratkonfigurationen die Makroschliffe der Verbundgussteile, welche die höchsten Substrattemperaturen infolge des Aufgießens zeigten. So sind in Abbildung 9-a) deutliche Auswaschungen im CuSn6-Substratwerkstoff und eine unerwünschte Vermischung mit dem Cu99,5-Aufgießwerkstoff erkennbar. Dies deutete sich bereits in der Temperaturmessung anhand des Übersteigens von $T_{2_{\max}}$ über die CuSn6-Liquidustemperatur an. Bei der Verwendung von Reinkupfer als Substratwerkstoff (Abbildung 9-b)) findet hingegen keine Vermischung der Werkstoffe statt. Dies kann anhand der unterschiedlichen thermophysikalischen Eigenschaften der monolithischen Werkstoffe erklärt werden. Reinkupfer ist der höher schmelzende Werkstoff, dessen Schmelzpunkt von ca. 1083 °C gemäß den Temperaturdaten bei der Wiedererwärmung nicht erreicht wird. Zudem führt das Reinkupfer aufgrund seiner hohen Wärmeleitfähigkeit die eingebrachte Wärmemenge durch den Aufgießwerkstoff schneller in Richtung Kühler ab.

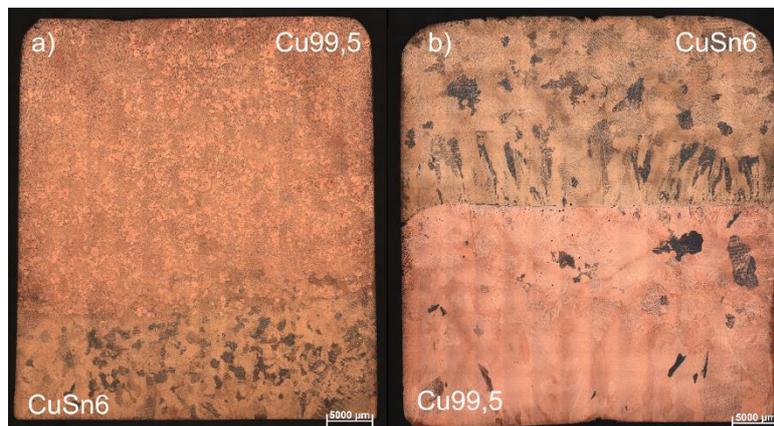


Abbildung 9: Makroschliffe von Verbundgusskörpern: a) CuSn6-Substrat mit $T_{2_{\max}} = 1075$ °C und b) Cu99,5-Substrat mit $T_{2_{\max}} = 1048$ °C

Die Mikrostruktur der Bindezone in Abbildung 10 zeigt eine deutliche Abhängigkeit der Verbundqualität vom Atmosphärenkontakt der Substratoberfläche vor dem Aufgießen. Bei Luftkontakt kann eine ausgeprägte Oxidschicht in der Bindezone festgestellt werden, welche eine durchgehende stoffschlüssige Anbindung der Werkstoffe verhindert. Zudem sind Risse durch die Oxidschicht und innerhalb der bindezonennahen Grundwerkstoffe zu erkennen. Die Ausbildung der Oxidschicht wird durch ein Überströmen der Substratoberfläche mit Argon deutlich reduziert. Gänzlich lässt sich die Bildung von Oxiden auf der Substratoberfläche jedoch nicht vermeiden. Dies liegt einerseits an dem

Ausgasen und der Gasdurchlässigkeit der Form selbst und zudem zeigt die innere Oxidation des Reinkupfers, dass die Schmelze selbst gelösten Sauerstoff in die Kavität transportiert. An oxidfreien Stellen konnte sich ein Stoffschluss zwischen den Werkstoffen einstellen. Ein stoffschlüssiger Schichtverbund mit optisch hoher Verbundqualität konnte insbesondere bei Verwendung der CuSn6-Legierung als Substratwerkstoff mit einer Ausgangstemperatur $T_{2\min}$ knapp unterhalb der Solidustemperatur erreicht werden.

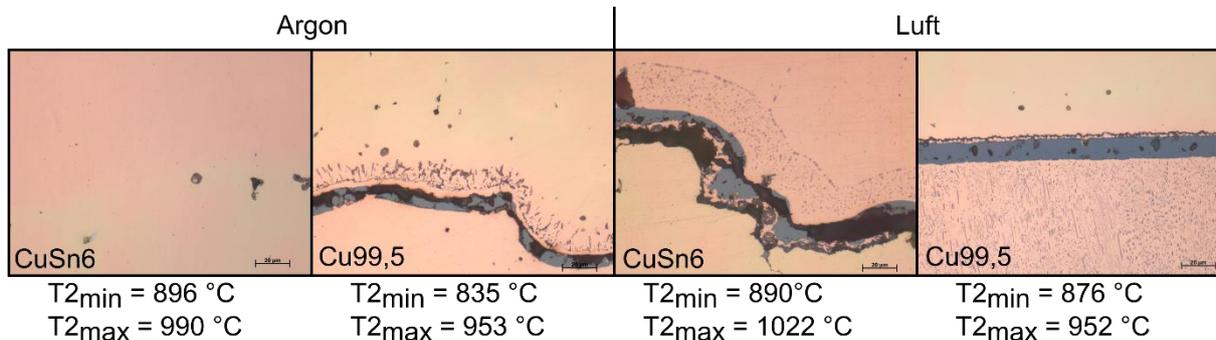


Abbildung 10: Mikrostruktur der Bindezone in Abhängigkeit des Atmosphärenkontakts der Substratoberfläche vor dem Aufgießen sowie der Wahl des Substratwerkstoffs

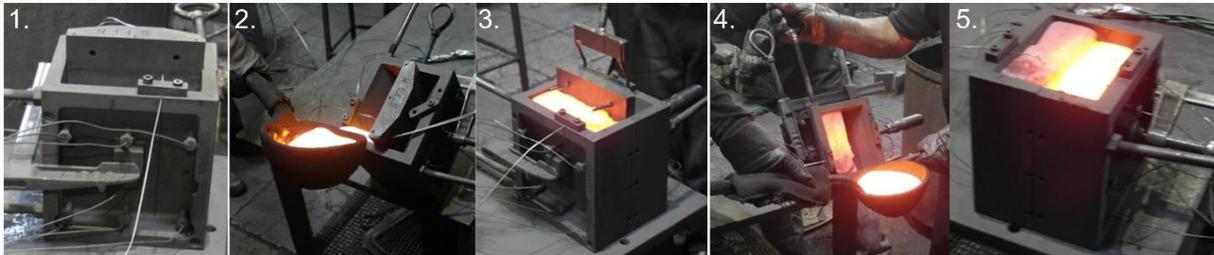
Anhand der Sandgießversuche mit horizontaler Bindezone konnte gezeigt werden, dass die ausgewählten Kupferbasiswerkstoffe gießtechnisch verbunden werden können. Zudem wurden folgende Optimierungen für die weitere Verfahrensentwicklung des statischen Verbundgießens von Kupferbasiswerkstoffen abgeleitet:

- Verwendung einer vertikalen Bindezone zur Minimierung bindezonennaher Einfallstellen, Gas- und Erstarrungsporosität
- Abdeckung der Substratoberfläche mit einem festen, gasundurchlässigen Körper zum Schutz vor Oxidation während der Erstarrung und Abkühlung des Substratwerkstoffs
- Erhöhung der Abkühlgeschwindigkeit im Substratwerkstoff zur Reduzierung der für die Oxidation zur Verfügung stehenden Zeit sowie zur Einstellung stranggussähnlicher Abkühlgeschwindigkeiten

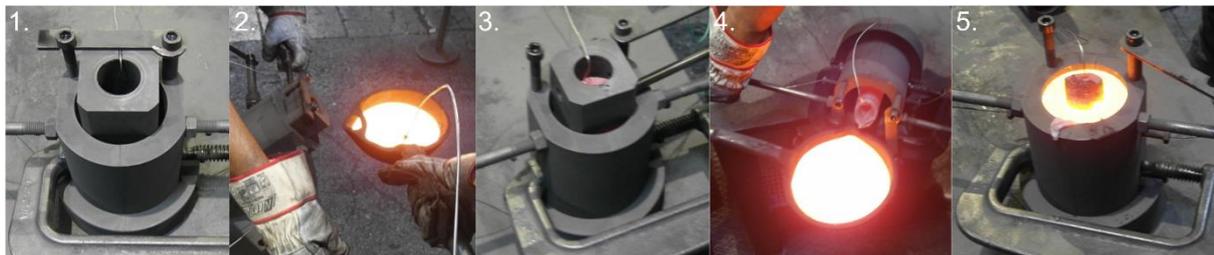
Im nächsten Schritt wurden daher statische Verbundgießversuche mit vertikaler Bindezone unter Verwendung von Dauerformen durchgeführt. Die Optimierungen wurden produktionsnah in ein Kippgießverfahren bei der Bögra Technologie GmbH integriert. Hierbei wird eine Dauerform mittels Gießzange gehalten und gekippt, während die Schmelze aus einem Gießlöffel direkt in die Kavität eingegossen wird. Zunächst wurden die Dauerformen simulationsunterstützt ausgelegt und im hauseigenen Werkzeugbau der Bögra Technologie GmbH gefertigt. Die Formen ermöglichen die Herstellung von plattenförmigen und rotationssymmetrischen Werkstoffverbunden. Abbildung 11 zeigt die jeweils zweigeteilten Dauerformen und die Versuchsdurchführung. Die Gießtemperaturen beider Werkstoffe betrug $1130 \pm 20 \text{ °C}$. Ein Grafiteinsatz begrenzt nun zu Versuchsbeginn die Kavität des Substratwerkstoffs und deckt nach dem Eingießen des Substratwerkstoffs dessen Oberfläche gegenüber der Atmosphäre ab. Der Grafiteinsatz wird vor dem Eingießen des Angießwerkstoffes manuell gezogen. Das Ziehen des Grafiteinsatzes verursachte bei der Versuchsdurchführung jedoch erhebliche Probleme. Insbesondere das Klemmen des Grafiteinsatzes, primär hervorgerufen durch ein

Anhaften des Substratwerkstoffes an der Grafitoberfläche, erschwerte ein reproduzierbares Ziehen des Einsatzes. Da auf eine Schutzgaszuführung während der Versuche verzichtet wurde, variiert die Kontaktzeit der Substratoberfläche mit der Luft somit relativ stark.

a) Herstellung eines plattenförmigen Verbundgussteils mit vertikaler Bindezone



b) Herstellung eines rotationssymmetrischen Verbundgussteils mit vertikaler Bindezone



1. Dauerform mit Grafiteinsatz 2. Eingießen des Substratwerkstoffes 3. Abkühlen des Substratwerkstoffes 4. Eingießen des Angießwerkstoffes 5. Abkühlen des Verbundgussteils

Abbildung 11: Versuchsdurchführung zum statischen Schichtverbundgießen von platten- und bolzenförmigen Verbundgussteilen mit vertikaler Bindezone

Im Fokus der Untersuchungen stand die erzielbare Bindefestigkeit der Kupferbasiswerkstoffe beim statischen Verbundgießen. Die für die Bindefestigkeit bedeutsamen Abkühlraten innerhalb der Dauerform sind nun mit jenen eines Stranggießprozesses vergleichbar. Aus den plattenförmigen Verbundgussteilen wurden je 3 Scherzugproben in Anlehnung an DIN EN 14869-2 und aus den bolzenförmigen Verbundgussteilen je 3 Zugproben entsprechend DIN 50125-B8x40 herausgearbeitet. Die Probenrohlinge hierfür wurden mittels Drahterodieren im Werkzeugbau der Bögra Technologie GmbH entnommen. Tabelle 3 zeigt die Festigkeiten aus der mechanischen Prüfung. Die ermittelten Werte weisen eine geringe Reproduzierbarkeit auf. So löst sich mancher Verbund auch bereits während der Probenfertigung. Hauptursächlich ist die Oxidation der Oberfläche im Anschluss an das manuelle Ziehen des Grafiteinsatzes sowie die Temperaturunterschiede auf der Substratoberfläche während des Angießens des zweiten Werkstoffes. Aufgrund des Kippverfahrens werden bestimmte Abschnitte der Substratoberfläche sehr lange mit Schmelze überströmt, während andere Oberflächenbereiche kaum eine Vorerwärmung erfahren. Dies führt zu einer erheblichen Inhomogenität der Verbundqualität sowohl über die Höhe als auch Breite des Verbundgussteils.

Tabelle 3: Mechanische Festigkeiten der statisch gegossenen Verbundgussteile

	Plattenformat (Scherzugprüfung)	Rundformat (Zugprüfung)
Mittlere Festigkeit [N/mm ²]	26	128
Maximale Festigkeit [N/mm ²]	67	209

Um den Einfluss der Kokillenbewegung und des manuellen Ziehens des Grafiteinsatzes auf die Formfüllung, die Erstarrung und die Verbundbildung möglichst zu vermeiden, wurde im nächsten Schritt ein Gießkonzept zum statischen Verbundgießen mit steigender Formfüllung entwickelt. Abbildung 12 zeigt eine schematische Darstellung des Versuchsaufbaus.

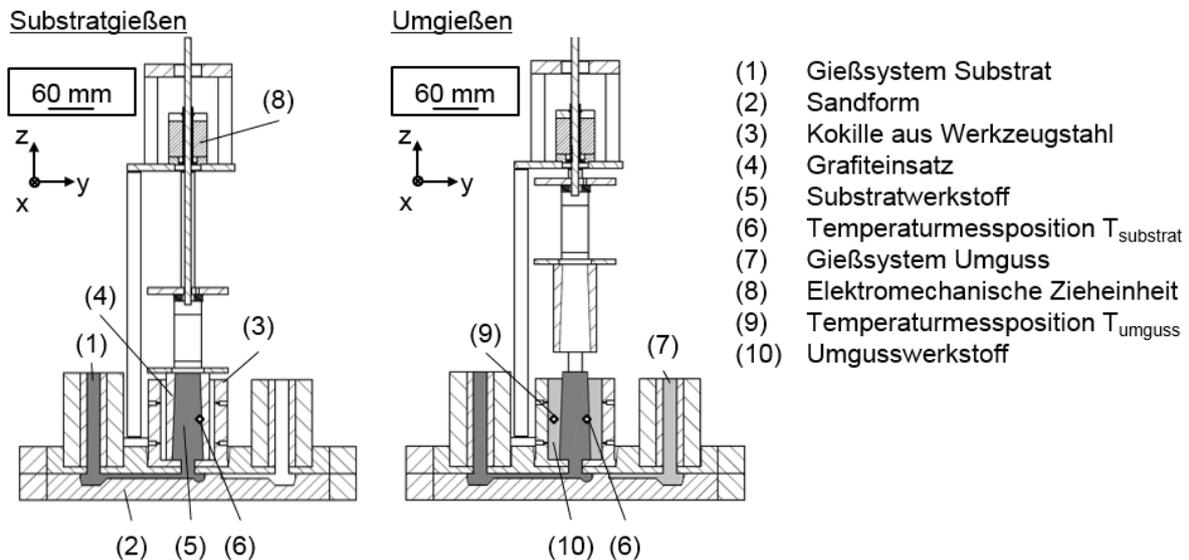


Abbildung 12: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus zum statischen Schichtverbundgießen mit steigender Formfüllung und vertikaler Bindezone nach [Gre18]

Die Gießwerkstoffe wurden in separaten widerstandsbeheizten und induktiv beheizten Öfen geschmolzen und mittels eines händischen Gießgestells zum Versuchsaufbau transportiert. Eine wesentliche Komponente des Versuchsaufbaus ist die ursprünglich für das Kippverbundgießen entwickelte und nun für die steigende Formfüllung angepasste Kokille aus Werkzeugstahl. Die Kokille ist nun bodenseitig angeschnitten und mit separaten Gießsystemen für den Substrat- und Umgießwerkstoff verbunden. Als Eingießtrichter dienten Isolierspeiser und die Gießläufe wurden in Ölsand abgeformt. Der in der Höhe konisch zulaufende, rotationsymmetrische Grafiteinsatz wurde konzentrisch in der Stahlkokille platziert und über eine Gewindestange starr mit einem Schrittmotor verbunden. Beim Erreichen der gewünschten Angießtemperatur an der Position T_{substrat} wurde der Grafiteinsatz elektromechanisch in z-Richtung gezogen und die Kavität für die Umgießschmelze somit geöffnet. Die thermischen Verhältnisse während des Verbundgießens wurden mittels Thermoelementen (Typ K, Klasse 1, Durchmesser 1,5 mm) in der Substratkavität, in dem Grafiteinsatz bzw. der Umgießkavität und in der Kokille detektiert.

Tabelle 4 führt die Randbedingungen des diskontinuierlichen Verbundgießens auf. Im Rahmen der experimentellen Studie wurde ein Versuchsplan mit variierender Werkstoffzuordnung Substrat/Umguss (CuSn6/Cu99,5 und Cu99,5/CuSn6) und Angießtemperatur (500 °C, 700 °C, 850/880 °C) durchgeführt.

Tabelle 4: Prozessparameter und -randbedingungen zum diskontinuierlichen Verbundgießen [Gre18]

Ziehgeschwindigkeit des Grafiteinsatzes [mm/s]	24
Position der Thermoelemente T_{substrat} und T_{umguss} oberhalb der Anschnitte (z-Richtung) [mm]	44
Durchmesser des Verbundzylinders [mm]	80
Höhe des Verbundzylinders [mm]	120
Durchmesser des Substrats auf Höhe des Anschnitts [mm]	46
Konischer Winkel des Substrats [°]	2

Die thermischen Verhältnisse während des diskontinuierlichen Verbundgießens mit steigender Formfüllung sind in Abbildung 13 für die Messpositionen T_{substrat} und T_{umguss} dargestellt. Das Gießen des Substratwerkstoffes bewirkt einen sprunghaften Anstieg von T_{substrat} . Während der anschließenden Erstarrungs- und Abkühlphase sinken die Substrattemperaturen. Das Benetzen des erstarrten Substrats mit dem Umgießwerkstoff ist am Wiederanstieg von T_{substrat} ersichtlich. Beim Verbundgießen wird die Umgusswärme in den Substratkörper und die Kokille abgeführt. Durch die Wärmezufuhr in den Substratkörper nimmt der Temperaturgradient zwischen Substrat und Umguss rasch ab. Infolgedessen ist der dominierende Wärmestrom die Wärmeleitung in die Gießform. In der Werkstoffzuordnung CuSn6/Cu99,5 (Substrat/Umguss) wird die Solidustemperatur der Zinnbronze während des Verbundgießens überschritten. Die Folge ist ein partielles Aufschmelzen des Substrats im Randbereich. Hingegen wird der Schmelzpunkt des Reinkupfers durch die Wiedererwärmung des Substrats bei einer Werkstoffzuordnung Cu99,5/CuSn6 (Substrat/Umguss) nicht erreicht.

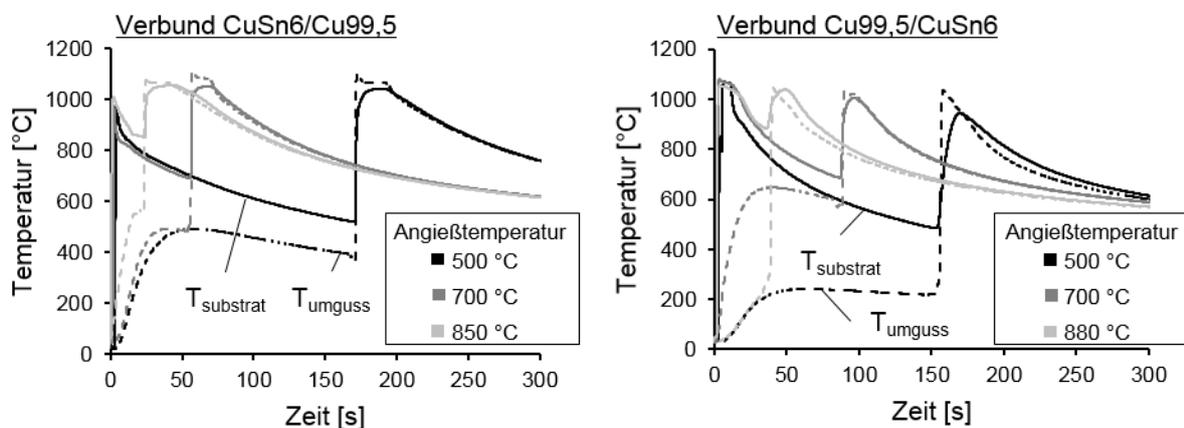


Abbildung 13: Thermische Verhältnisse beim statischen Verbundgießen mit steigender Formfüllung und vertikaler Bindezone nach [Gre18]

Aus den statisch gegossenen Verbundzylindern wurden Proben entnommen und eine optische und mechanische Werkstoffprüfung durchgeführt. Abbildung 14 zeigt eine Mikrostrukturanalyse des grenzflächennahen Bereichs in Abhängigkeit der Werkstoffzuordnung und der Angießtemperatur. Die Proben wurden in horizontaler Lage auf einer Höhe von $z=44$ mm herausgearbeitet, um eine Korrelation zwischen Temperaturprofil und Grenzflächenbeschaffenheit herzustellen.

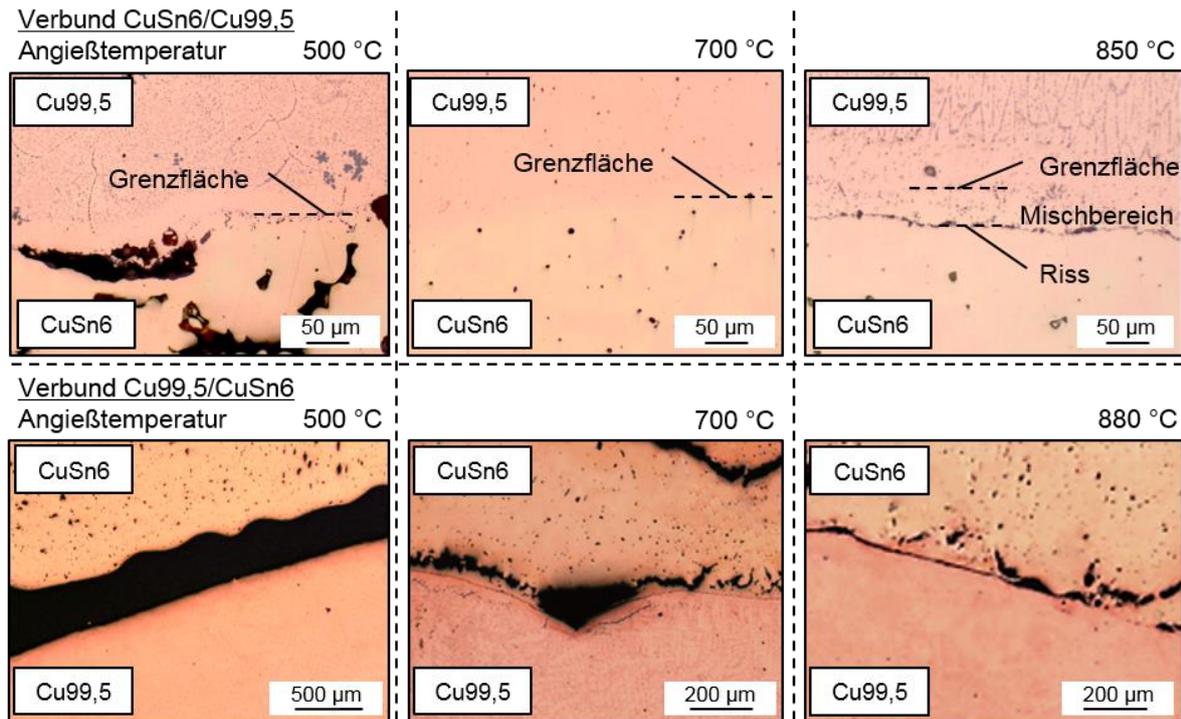


Abbildung 14: Mikrostruktur der Grenzfläche in Abhängigkeit der Angießtemperatur und Werkstoffzuordnung nach [Gre18]

Die Gefügeanalyse zeigt bei einer Werkstoffzuordnung CuSn6/Cu99,5, dass bei einer Angießtemperatur von 500 °C eine stoffschlüssige Verbindung zwischen Substrat und Umguss nur partiell erreicht werden konnte. Die Grenzfläche weist signifikante Fehlstellen im Randbereich des Substrats auf. Ursächlich hierfür ist ein Wiederaufschmelzen und anschließendes Herauslösen der zinnreichen, niederschmelzenden Bereiche. Verbundgießen mit einer Angießtemperatur von 700 °C führt dazu, dass ein etwa 1500 µm dicker Randbereich des CuSn6-Substrats wiederaufschmilzt und anschließend rekristallisiert. Dadurch werden günstige Temperatur- und Benetzungsvoraussetzungen für eine metallurgische Verbundbildung geschaffen. Durch eine rasche Erstarrung des Umgießwerkstoffes kann ein unerwünschtes Vermischen der Gießwerkstoffe vermieden werden. Die Grenzfläche zeigt eine großflächige Kohäsion zwischen den Fügepartnern ohne Fehlstellen in der Bindezone. Der dominierende Bindemechanismus ist die Mischkristallbildung an der Grenzfläche. Die Voraussetzung hierfür ist die Löslichkeit von Zinn in Kupfer. Aufgrund des niedrigen Zinngehalts und der diffusiven Trägheit von Zinn kann eine intermetallische Phasenbildung sowie die Ausbildung einer signifikanten Diffusionszone in der Bindezone vermieden werden. Strukturanalysen an Proben mit einer Angießtemperatur von 850 °C zeigen, dass Substrat und Umguss zeitgleich im (teil-)flüssigen Zustand vorlagen. Infolgedessen kommt es zu einer unerwünschten Vermischung der Gießwerkstoffe. Während der anschließenden Abkühlung des Verbundkörpers kommt es zur Rissbildung im Substrat. Diese ist ein Resultat des unterschiedlichen Kontraktionsverhaltens der beiden Gießwerkstoffe. Die Volumenschwindung des CuSn6-Substratkörpers, welcher zum Zeitpunkt des Umgießens eine nahezu maximale radiale Ausdehnung aufweist, ist höher als die des Cu99,5-Umgusses. Verbundgießversuche mit einer Werkstoffkombination Cu99,5/CuSn6 (Substrat/Umguss) zeigen eine unzureichende Verbundbildung zwischen den Fügepartnern. Durch den geringen Energieeintrag vom

Umguss in den Substratkörper kommt es nicht zum Wiederaufschmelzen und Rekristallisieren. Folglich liegen für eine Verbundbildung ungünstige thermische und kontaktspezifische Voraussetzungen vor.

In Abbildung 15 ist das Härteprofil von diskontinuierlich gegossenen Verbundproben dargestellt. Im makroskaligen Bereich weisen die gegossenen Verbundkörper in der jeweiligen Schicht den charakteristischen Verlauf monolithischer Werkstoffe auf. Das Härteniveau von CuSn6- bzw. Cu99,5-Schichten liegt durchschnittlich bei 85 HV_{0,2} bzw. 70 HV_{0,2}. Aufgrund der prozessbedingten Anreicherung des Cu99,5 mit Oxiden liegt das Härteniveau dort geringfügig über den in der Literatur publizierten Werten. Im grenzflächennahe Bereich des CuSn6-Substrats liegt eine etwa 1-1,5 mm breite Härteüberhöhung vor, welche auf das feinkörnige Rekristallisieren zurückzuführen ist. Darüber hinaus zeigt die Analyse einen sprunghaften Härteübergang über die Grenzfläche hinweg.

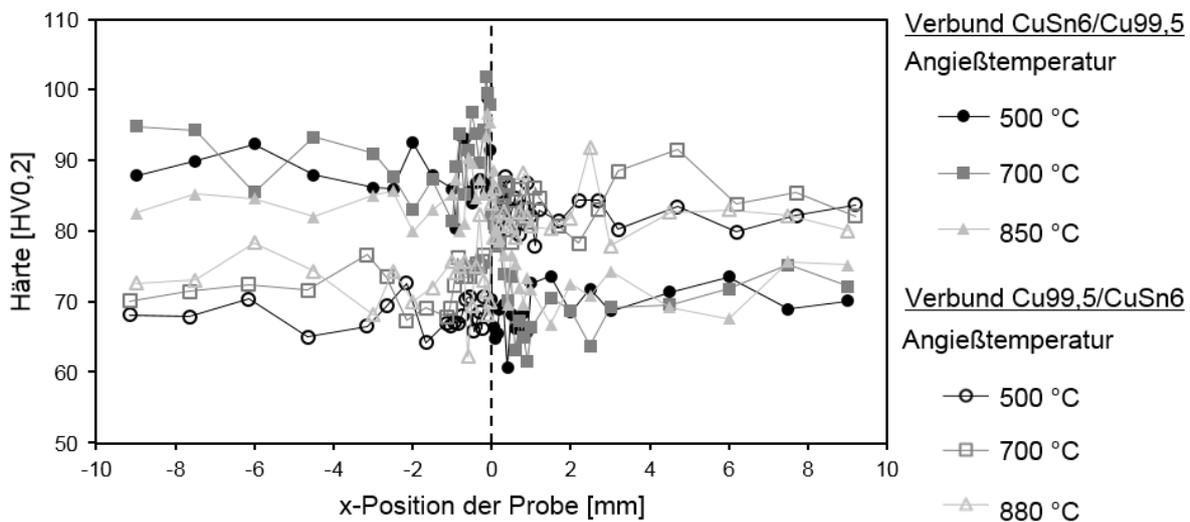


Abbildung 15: Härte des grenzflächennahen Bereichs in Abhängigkeit der Werkstoffzuordnung und Angießtemperatur nach [Gre18]

Aus den Ergebnissen der Basisuntersuchungen kann folgendes Zwischenfazit gezogen werden:

- Der Nachweis der Herstellbarkeit einer stoffschlüssigen Verbindung zwischen CuSn6 und Cu99,5 konnte mittels statischem Verbundgießen erbracht werden.
- Einen wesentlichen Verbundbildungsmechanismus zwischen den betrachteten Kupferwerkstoffen stellt das partielle Aufschmelzen mit anschließender Mischkristallbildung an der Grenzfläche dar. Die niedrigschmelzende Zinnbronze schmilzt aufgrund seines großen Erstarrungsintervalls partiell leicht auf und sollte daher als Substratwerkstoff eingesetzt werden.
- Die oberflächennahe Substrattemperatur in der Zinnbronze, welche zur Herstellung eines großflächigen Stoffschlusses mit scharfer Übergangzone erreicht werden sollte, kann mit ca. 1000-1040 °C angegeben werden. Das Erreichen dieser Zieltemperatur hängt maßgeblich von der Substrattemperatur vor dem Verbundgießen und den Abkühlbedingungen während des Verbundgießens ab.
- Die Oxidation der Substratoberfläche unmittelbar vor dem Verbundgießen kann durch die Verwendung einer Graphit-Abdeckplatte weitestgehend verhindert werden. Sie erlaubt somit auf eine Schutzgasabdeckung in der weiteren Verfahrensentwicklung zu verzichten.

6.2 Entwicklungen in der Gießprozesssimulation

Die Werkzeugauslegung und experimentellen Untersuchungen des Projekts wurden durch die Gießprozesssimulation mit der Software *WinCast® expert* unterstützt. Ziel war es hierbei insbesondere die hinreichend genaue Abbildung der thermischen Verhältnisse beim Verbundstranggießen sicherzustellen. Hierfür wurden während der Projektlaufzeit folgende Softwarelösungen umgesetzt:

- Intermittierender Strangabzug: Die Definition der Go-Stop Abzugskinetik wurde durch eine externe Steuerdatei realisiert, in welcher der Abzug in die vier Phasen stop, go, stop, back unterteilt werden kann. Das Bewegungsmuster wird dann entsprechend dieser Definition als Randbedingung auf den erstarrten Teil des Verbundstrangs aufgegeben. Zu beachten ist dabei eine korrelierende Definition der Zeitschrittweiten.
- Lagrange'sche Betrachtungsweise (mitbewegtes Koordinatensystem mit einem Fluidelement): Einerseits lassen sich so lokale Abkühlkurven und damit einhergehende weitere Gefügemerkmale bestimmen. Andererseits ist diese Betrachtungsweise notwendig, um lokale Wärmeübergangskoeffizienten berücksichtigen zu können, die nicht nur von der Temperatur sondern auch von der Temperaturhistorie abhängen.
- Berücksichtigung der natürlichen Konvektion (vertikales Stranggießen): In den *WinCast®*-Berechnungsprogrammen wird die Bewegungsgleichung über die Betrachtung des Kräftegleichgewichts an einem Fluid-Element gelöst. Üblicherweise werden hierbei Trägheitskräfte, Reibungskräfte und Druckkräfte betrachtet. Neu eingeführt in dieses Kräftegleichgewicht wurden die Volumenkräfte entsprechend des Archimedes'schen Prinzips.
- Optimierung der automatischen Zeitschrittweitensteuerung: Normalerweise gibt es bezüglich der Stabilität einer Berechnung mit der Finiten Elemente Methode im Wesentlichen keine Abhängigkeit zwischen der räumlichen und der zeitlichen Diskretisierung. Dies ist bei einer gekoppelten Berechnung von Bewegungs- und Wärmeleitungsgleichung leider nicht mehr der Fall. Aus diesem Grund wurde eine automatische Zeitschrittweitensteuerung eingeführt, bei der gewährleistet ist, dass der Verschiebungsvektor in einem Zeitinkrement größer als die durchschnittliche Maschenweite ist.
- Berücksichtigung der „Temperaturhistorie“ bei der Bestimmung des Wärmeübergangs: Es ist offensichtlich, dass der Wärmeübergang beim Verbundgießen in erheblichem Maße davon abhängt, ob und in welchem Umfang das Substratband aufgeschmolzen wird. Diese Information kann aus den lokalen Temperaturen entnommen werden, muss dann jedoch analog der Bewegung des Stranges mitgeführt und bei der Bestimmung des lokalen Wärmeüberganges berücksichtigt werden.
- Eigenspannungs- und Verzugsberechnung im Verbundstrang: Um die lokalen Eigenspannungen bestimmen zu können, wurde die Bewegung des erstarrten Stranges in den Spannungsalgorithmus integriert. Dadurch werden die jeweils vorherrschenden Bedingungen lokal berücksichtigt. Da Tensoren nicht interpoliert werden können, wird nur der komplette Spannungstensor aus dem vorherigen Element übernommen. Die Definition der Kontaktbedingungen zwischen der Kokille und dem Strang verändert sich von Zeitschritt zu Zeitschritt und muss berücksichtigt werden. Im Rahmen dieses Projektes wurde das tangential

Gleiten des Stranges auf der Kokille durch manuell vorzugebende Auflager definiert. Aufbauend auf der Verzugsberechnung können zudem nun spaltabhängige Wärmeübergangskoeffizienten definiert werden.

6.3 Verfahrensentwicklung zum vertikalen Verbundstranggießen im Rundformat

Die Ergebnisse aus den Basisuntersuchungen wurden anhand eines vertikalen, halbkontinuierlichen Umgießverfahrens simulativ und experimentell überprüft. Hieraus können wesentliche Erkenntnisse für die Ausarbeitung eines Grobkonzepts zum vertikalen Verbundstranggießen von rotationssymmetrischen Kupferhalbzeugen im industriellen Maßstab abgeleitet werden.

Abbildung 16 zeigt die Produkte des mehrstufigen Prozesses. Zuerst wird im vertikalen Stranggießverfahren ein monolithischer Bolzen gegossen, dessen Durchmesser anschließend auf 17,5 mm spanend reduziert wird. Die mechanisch bearbeitete Halbzeugstange wird anschließend mit einem Umgießwerkstoff gießtechnisch ummantelt.

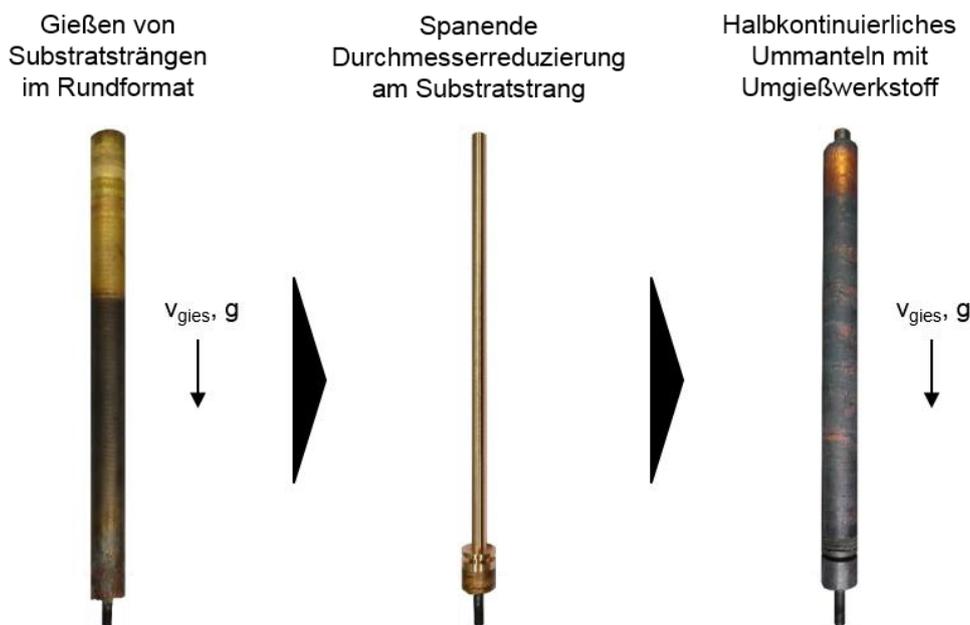


Abbildung 16: Prozessablauf zur Herstellung rotationssymmetrischer Verbundhalbzeuge

In Abbildung 17 ist das CAD-Modell des Versuchsstands zum vertikalen Stranggießen dargestellt. Hauptkomponenten der Anlage sind die elektromechanische Zieheinheit, das verfahrbare Gießgestell mit Anfahrstück sowie das Gießwerkzeug. Der Strangabzug erfolgt mit Hilfe eines Schrittmotors in vertikaler Richtung in einer intermittierenden (Go-Stop) Abziehkinematik. Das Gießwerkzeug stellt den Kern des Versuchsstands dar und besteht aus einer rotationssymmetrischen Gleitkokille und einem wasserdurchströmten Kupferkühler. Die Kavität der Grafitkokille besitzt einen Durchmesser von 40 mm. Das Gießwerkzeug ist mit ortsfesten Mantelthermoelementen (Typ K, Klasse 1, Durchmesser 1,5 mm) instrumentiert. Ein weiteres Thermoelement (T_{substrat}), dessen Messspitze im Prozess durch die Kokille gezogen wird, wird vor Prozessbeginn am Anfahrstück montiert. Das Eingießen und Mitbewegen des

Thermoelements ermöglicht die thermischen Verhältnisse im Halbzeugkern sowohl während des Substratgießens als auch während des späteren Umgießens zu messen. [Mit16]

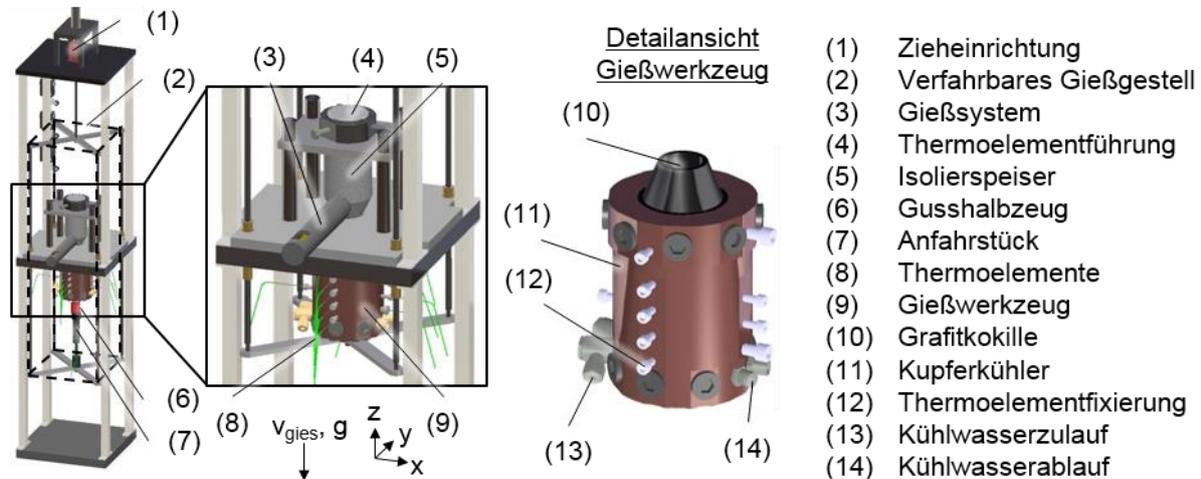


Abbildung 17: CAD-Modell des vertikalen Stranggießversuchsstands

In Tabelle 5 sind geometrische und technologische Parameter zum vertikalen Substrat- und Umgießprozess aufgeführt. Es wurde eine Versuchsreihe mit variierender Werkstoffzuordnung Substrat/Umguss durchgeführt, um die Ergebnisse aus den Basisuntersuchungen auch auf ihre Gültigkeit im (halb-)kontinuierlichen Prozess zu überprüfen. Die Schmelzetemperatur bei Tiegelentnahme betragen ca. 1240-1270 °C. Die Schmelzen wurden mit Phosphorkupfer desoxidiert und die Schmelzbadoberfläche anschließend mit Elektrodengrafit abgedeckt.

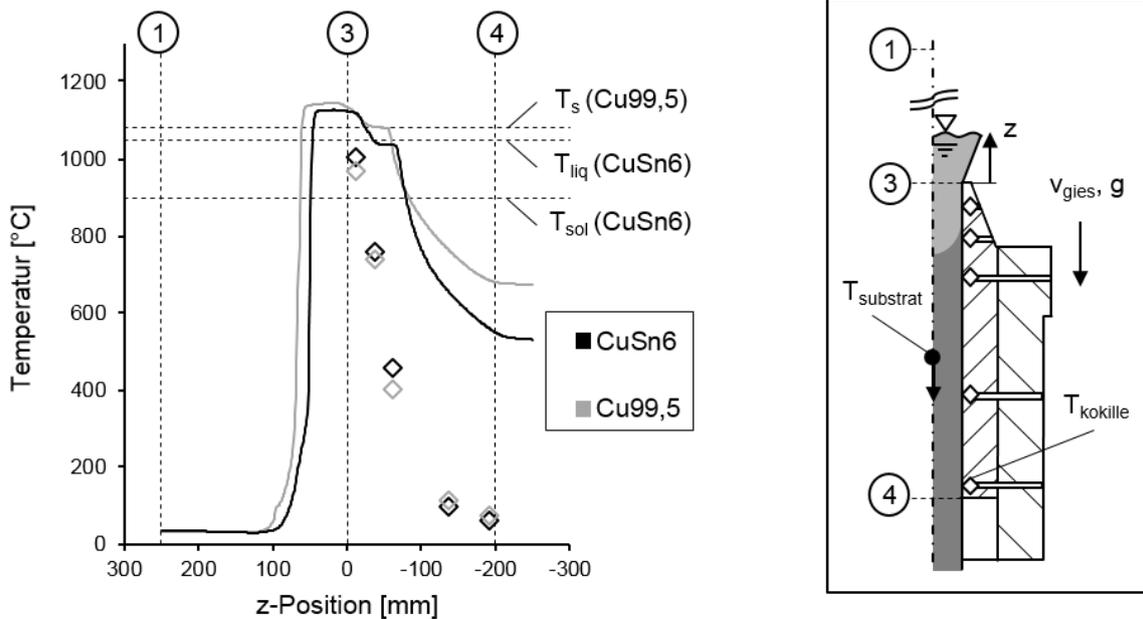
Tabelle 5: Prozessparameter zum mehrstufigen vertikalen Verbundstranggießen nach [Gre18]

Abziehkinematik	Go-Stop
Mittlere Abziehgeschwindigkeit beim Substratgießen [mm/min]	300
Mittlere Abziehgeschwindigkeit beim Verbundgießen [mm/min]	600
Hubweite beim Verbundgießen [mm]	7,5
Wartezeit beim Verbundgießen [s]	0,3
Anzahl der Go-Stop-Zyklen beim Verbundgießen	64
Substratlänge [mm]	490
Verbundlänge [mm]	440
Durchflussrate des Kühlwassers pro Kanal [l/min]	3,5
Startposition des Thermoelements T_{substrat} oberhalb des Kokilleneinlaufs (z-Richtung) während des Verbundgießens [mm]	210
Positionen der Thermoelemente T_{kokille} unterhalb des Kokilleneinlauf (z-Richtung) [mm]	-12, -37, -61, -136, -192

Abbildung 18 zeigt die thermischen Verhältnisse der Werkstoffkombination CuSn6/Cu99,5 und Cu99,5/CuSn6 beim Substrat- und Verbundgießen. T_{kokille} gibt hierbei die maximalen, gemessenen Kokillentemperaturen an. Die über das Gießsystem aus Isolierspeiser zugeführte Schmelze strömt über den Kokilleneinlauf in das Gießwerkzeug. Entgegen des Hauptwärmestroms setzt im Inneren der Kokille die Abkühlung und Erstarrung des Gießwerkstoffes ein. Die Erstarrungsfront verschiebt sich dabei von den Kokillenwänden hin zur thermischen Mitte. Durch die Volumenkontraktion infolge der Abkühlung des Gießmaterials kommt es zur Luftspaltbildung zwischen Kokille und Strang, dem sogenannten Strangabheben. Erkennbar ist dies an einem großen Temperaturgradienten zwischen den Temperaturmesspositionen im oberen Bereich der Kokille. Der Temperaturverlauf des mitbewegten

Thermoelements T_{substrat} steigt sprunghaft mit dem Eintauchen der Thermoelementspitze in das Schmelzebad an, vgl. Abbildung 18-a). Durch das Abkühlen der Schmelze im Inneren der Kokille sinkt das Temperaturniveau ab. Die Freisetzung eines Großteils der latenten Wärme ist beim Substratgießen am Temperaturplateau im Bereich des Kokilleneinlaufs zu erkennen. Das Plateau liegt beim Gießen des CuSn6-Materials etwa zwischen 1030 °C und 1050 °C, beim Gießen des Cu99,5-Materials bei ca. 1083 °C.

a) Substratgießen



b) Umgießen

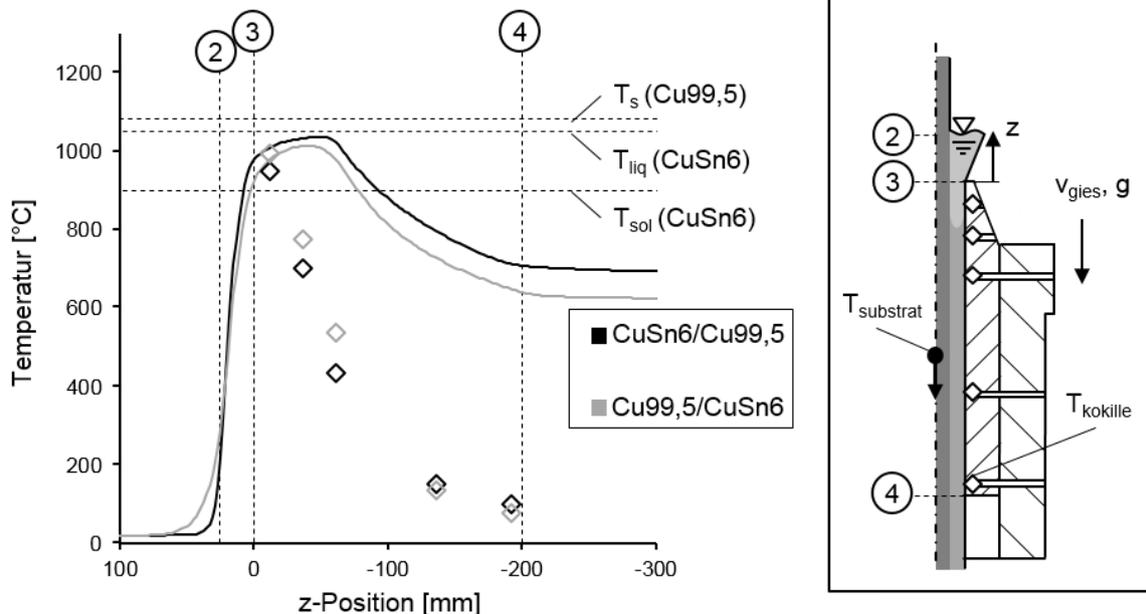


Abbildung 18: Thermische Verhältnisse beim mehrstufigen vertikalen Verbundstranggießen nach [Gre18]

Die thermischen Verhältnisse beim Verbundgießen, vgl. Abbildung 18-b), ähneln im Gießwerkzeug denen des Substratgießens. Unmittelbar nach dem Einströmen des Umgießwerkstoffes in das Gießwerkzeug setzt die Erstarrung ein. Die mittels mitbewegtem Thermoelement detektierten

thermischen Verhältnisse liegen oberhalb des Schmelzbadspiegels auf Raumtemperaturniveau. Eine Wärmeleitung entgegen der Abziehrichtung im Substratstrang ist daher marginal. Sobald der Mantelwerkstoff die Substratstange auf Höhe der Thermoelementspitze benetzt, steigen die Temperaturen im Substratkern deutlich. Das Temperaturmaximum, welches bei ca. 1035 °C (CuSn6/Cu99,5) bzw. 1015 °C (Cu99,5/CuSn6) liegt, wird im Einlaufbereich der Kokille erreicht. Aufgrund des geringen Substratquerschnitts ist anzunehmen, dass im Randbereich des CuSn6-Substrats Maximaltemperaturen zwischen ca. 1030 °C und der Liquidustemperatur vorliegen. Im Randbereich des Cu99,5-Substrats wird der Schmelzpunkt (1083 °C) hingegen nicht oder nur partiell erreicht.

Abbildung 19 illustriert die Gefügeanalyse über den Querschnitt der Verbundproben in Abhängigkeit der Werkstoffkombination. Die Schliffbilder belegen für alle Versuchsvarianten eine geometrische Stabilität des Substrat- und Umgusskörpers. Dennoch gibt es große Unterschiede der Grenzflächenbeschaffenheit. Beim Verbundgießen CuSn6/Cu99,5 liegen durch das Aufschmelzen und Rekristallisieren des Substratrandbereichs für eine Verbundbildung günstige Voraussetzungen vor. Eine großflächige Kohäsion ohne Vermischung der Fügepartner ist erkennbar. Die Verbundkombinationen Cu99,5/CuSn6, CuSn6/CuSn6 und Cu99,5/Cu99,5 hingegen sind lediglich durch einen partiellen Stoffschluss zwischen den Gießwerkstoffen charakterisiert. Der Energieeintrag durch den Umgießwerkstoff reicht nicht aus, um im Substrat die für eine Mischkristallbildung an der Grenzfläche günstige Restrukturierung zu bewirken.

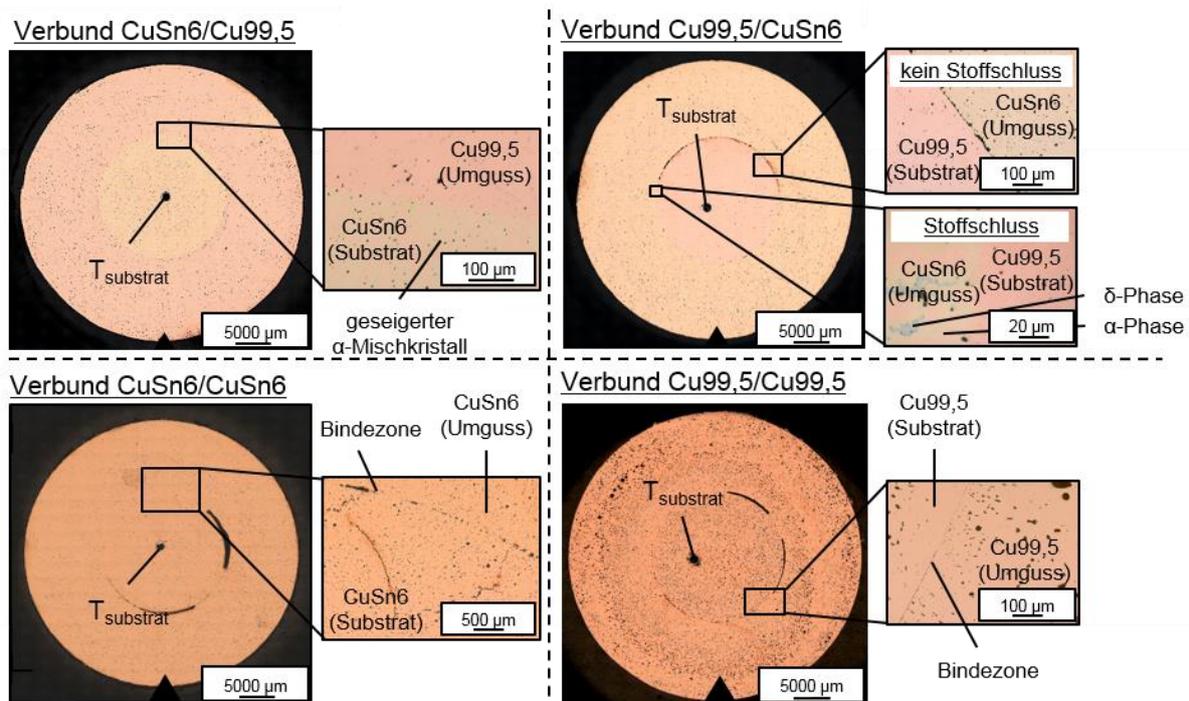


Abbildung 19: Gefügeanalyse an rotationssymmetrischen Verbundproben

Eine Gefügeanalyse an monolithischen und hybriden Proben, welche mittels einer Fe(III)-chlorid-Ätzung präpariert wurden, ist in Abbildung 20 dargestellt. Im CuSn6-Substrat ist ein Wiederaufschmelzen und Rekristallisieren des Randbereichs deutlich erkennbar. Aufgrund der veränderten Abkühlbedingungen weist der Randbereich ein feinkörnigeres Gefüge auf als der Substratkern. Der Substratkern behält

seine charakteristische, durch das monolithische Substratgießen geformte Gefügestruktur. Eine ähnliche Umstrukturierung ist im Cu99,5-Substrat nicht erkennbar. Die Erstarrung des Umgusswerkstoffes erfolgt aus zwei Richtungen. Ausgehend von der Kokillenwand und der Substratstange bewegen sich zwei Erstarrungsfronten aufeinander zu und treffen in der thermischen Mitte zusammen.

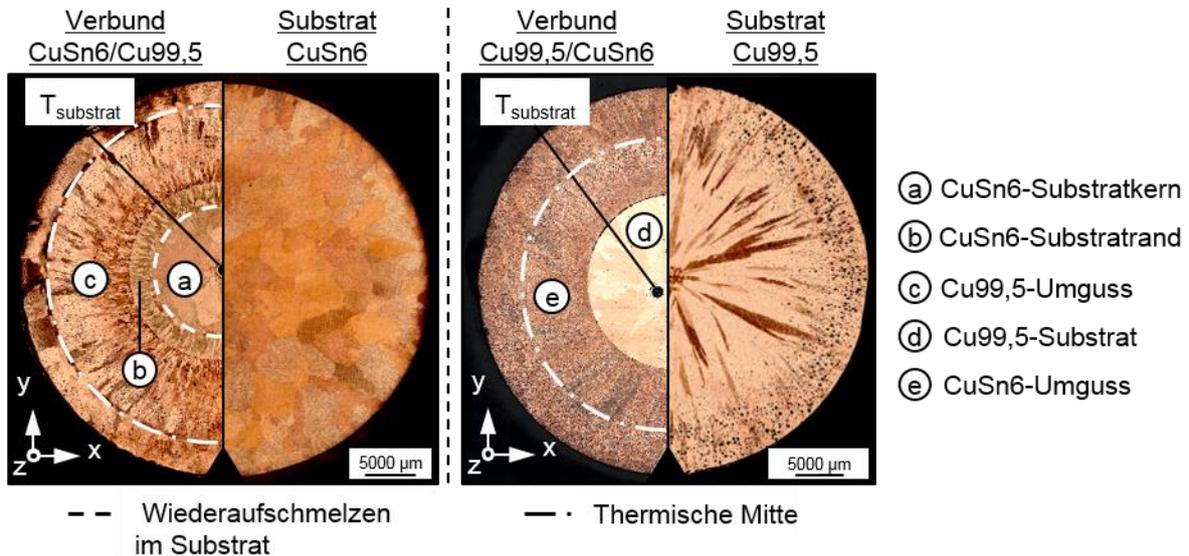


Abbildung 20: Makroskopische Gefügeanalyse an geätzten Substrat- und Verbundproben nach [Mit16]

Abbildung 21 zeigt den gemittelten Verlauf der Bauteilhärte gegossener Substrat- und Verbundproben. Die Ergebnisdiskussion wird anhand von Schlibbildaufnahmen monolithischer und hybrider Proben veranschaulicht, vgl. Abbildung 20. Die Materialhärte des Cu99,5 ist sowohl bei den Verbundproben als auch bei den monolithischen Gusskörpern ähnlich hoch. Ergebnisschwankungen der monolithischen Cu99,5-Messungen im Randbereich der Proben sind auf die lokale Gefügedefekte (Oxide und Poren) zurückzuführen. Die Werkstoffhärte des CuSn6 liegt bei den monolithischen Proben knapp unterhalb des Härteniveaus der Verbundhalbzeuge und beträgt durchschnittlich 82 HV_{0,2}. Die Ergebnisstreuung des monolithischen CuSn6 ist gering. Der aufgeschmolzene Randbereich des CuSn6-Substrats erstarrt nach dem Umgießen mit Cu99,5 verhältnismäßig schnell, was eine feinkörnige Gefügebildung zur Folge hat (Bereich (b)). Die feine Kornstruktur führt zu einer erhöhten CuSn6-Härte im Verbundbereich. Der abrasive Verschleißwiderstand des Umgießwerkstoffes ist bei Cu99,5/CuSn6-Proben höher als bei den untersuchten monolithischen CuSn6-Proben (Bereich (e)). Begründen lässt sich dies durch eine im Verhältnis zum Substratgießen hohe Abkühlgeschwindigkeit des Mantelmaterials beim Verbundgießen. Das Schlibbild der Cu99,5/CuSn6-Probe zeigt hierfür den feinkristallinen Gefügebau im CuSn6-Umguss.

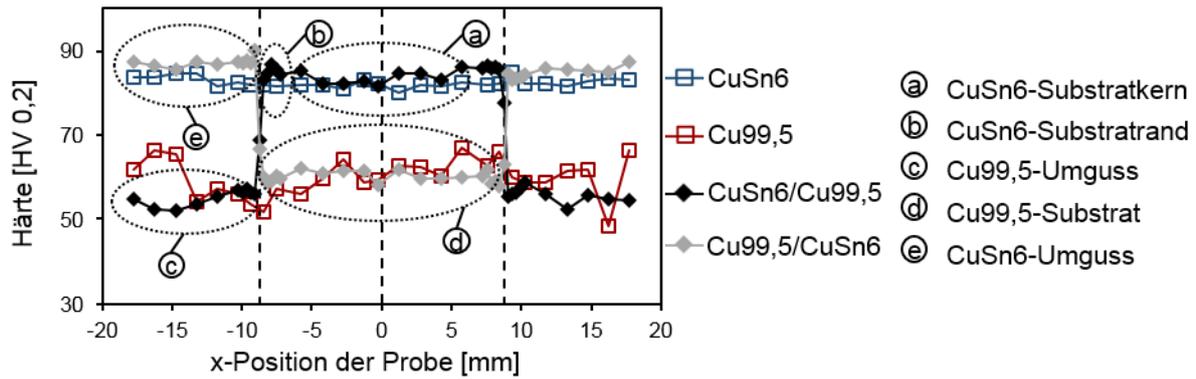


Abbildung 21: Härteprofil gegossener Substrat- und Verbundproben nach [Mit16]

Zur Quantifizierung der Bindefestigkeit zwischen Substrat und Umguss wurde ein Push-Out-Test entsprechend Abbildung 22 angewandt. Hierfür wurde ein geeignetes Werkzeug entworfen und gefertigt. Die Hauptkomponenten des Werkzeugs sind der Stempel und die Matrize. Der Ausdrückstempel wird von einer Stempelführung aufgenommen und positioniert. Der Stempel ist über eine Stempelaufnahme mit der statischen Zug-Druck-Prüfmaschine Typ 1484 der Firma Zwick Roell AG, Ulm, verbunden. Die Probe wird durch einen am Stempel angebrachten Sucherdorn konzentrisch zu den Aktivelementen ausgerichtet und mittels eines Niederhalters auf der Matrize fixiert. Die geometrische Auslegung der Kernbauteile Stempel und Matrize erfolgte auf Basis der durch Sapanathan [Sap15] durchgeführten numerischen Studien zur Gestaltung von Push-Out-Werkzeugen. Demzufolge ist der Schneidspalt zwischen Stempel und Matrize mit einer Größe von 0,4-0,5 mm für Scherversuche an Werkstoffverbunden optimal dimensioniert. Für den vorliegenden Fall wurden der Stempeldurchmesser auf 17,0 mm und der Matrizeninnendurchmesser auf 18,0 mm festgelegt. Aus monolithischen und hybriden Halbzeugen wurden Proben (nomineller Grenzflächendurchmesser 17,5 mm; Höhe 2 mm +/- 0,05 mm) in unterschiedlichen Halbzeughöhen mittels Drahterodieren im Werkzeugbau der Bögra Technologie GmbH entnommen. Der Traversenvorschub betrug 1 mm/min. Die Scherspannung wurde als Quotient aus maximaler Prüfkraft und Grenzfläche berechnet.

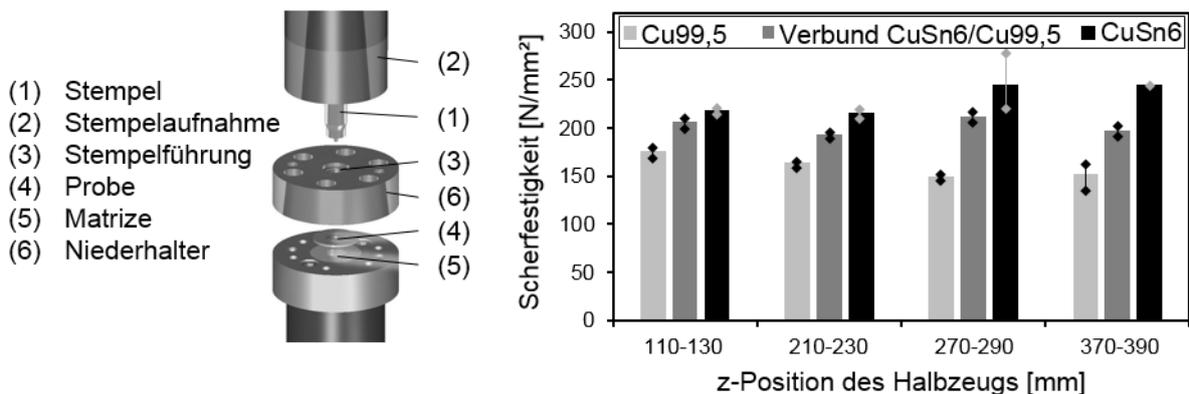


Abbildung 22: Push-Out-Test an gegossenen Substrat- und Verbundproben nach [Gre18]

Die mechanische Prüfung ergab eine durchschnittliche Schersfestigkeit von 160 N/mm² für monolithische Cu99,5-Referenzproben, 230 N/mm² für monolithische CuSn6-Proben und 200 N/mm² für CuSn6/Cu99,5-Proben. Proben der Werkstoffkombination Cu99,5/CuSn6, CuSn6/CuSn6 und Cu99,5/Cu99,5 wurde aufgrund des unzureichenden Kohäsion zwischen den Fügepartnern nicht

getestet. Auf der Bruchfläche von CuSn6/Cu99,5-Proben konnten mittels Lichtmikroskopie Cu99,5-Anhaftungen am CuSn6-Substrat nachgewiesen werden. Dies bedeutet, dass der Werkstoffverbund nicht direkt an der Verbundfläche sondern innerhalb des Mantelwerkstoffes enthaftet.

Zur Temperaturfeldanalyse des halbkontinuierlichen Substrat- und Verbundgießens wurden Simulationsstudien durchgeführt. Abbildung 23 zeigt das Simulationsmodell mit den wesentlichen Randbedingungen und Wärmeübergangskoeffizienten. Der Gießprozess wird anhand eines Viertelmodells simuliert. Die Temperierung des Kupferkühlers wird indirekt über eine Segmentierung des Kühlerblocks abgebildet. Die latente Wärme wird bei WinCast® expert durch eine kombinierte a priori und a posteriori Kalkulation berücksichtigt. Hierbei wird die freigesetzte Energie bei Erstarrungsvorgängen über den Temperaturgradienten interpoliert. [Mit16]

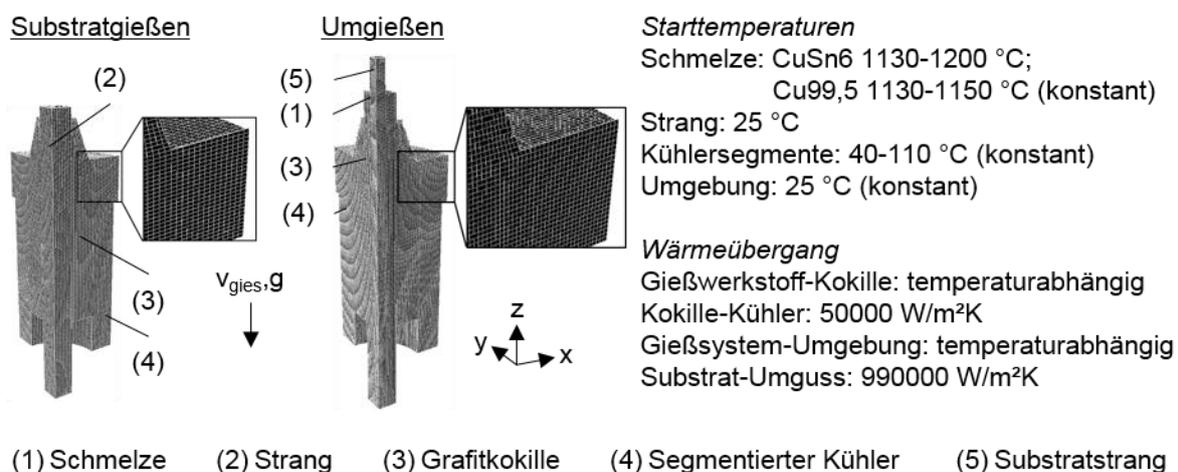


Abbildung 23: Modell und Randbedingungen zur Simulation des mehrstufigen, vertikalen Verbundstranggießens

Die Kalibrierung der Wärmeübergänge und Randbedingungen erfolgte anhand der experimentell erfassten Temperaturdaten zum monolithischen CuSn6- bzw. Cu99,5-Stranggießen mit einer Gießgeschwindigkeit von 300 mm/min. Das numerische Modell wurde in einem iterativen Prozess kalibriert und validiert. Abbildung 24 zeigt Ergebnisse der simulativen Prozessbetrachtung. Von entscheidender Wichtigkeit ist im Zuge der numerischen Modellbildung die Beschreibung der Kontaktverhältnisse zwischen Gießwerkstoff und Kokille durch den Wärmeübergangskoeffizienten. Im Rahmen der Kalibrierung des CuSn6-Stranggießsystems wurde der Wärmeübergangskoeffizient zwischen dem CuSn6-Gießwerkstoff und der Grafit-Kokille in unterschiedliche charakteristische Bereiche eingeteilt. Zwischen der Solidustemperatur und 1030 °C nimmt dieser moderat von 6000 W/(m²K) bis 35400 W/(m²K) zu, wohingegen die Zunahme von 1030 °C bis zur Liquidustemperatur sehr hoch ist. Der Wärmeübergangskoeffizient beträgt mit Erreichen der Liquidustemperatur 300000 W/(m²K) und nimmt mit weiterer Temperaturerhöhung im schmelzflüssigen Zustand nur geringfügig zu. Eine ähnliche Beschreibung der Kontaktverhältnisse zwischen Gießwerkstoff und Kokille konnte für das monolithische Cu99,5-Stranggießsystem vorgenommen werden. Detaillierte Angaben zum Wärmeübergangskoeffizienten finden sich in [Mit16]. Die Verhältnisse im thermisch stationären Stranggießprozess konnten im Zuge der numerischen Modellbildung mit hinreichender Genauigkeit sowohl im Gießwerkzeug als auch im Halbzeug dargestellt werden.

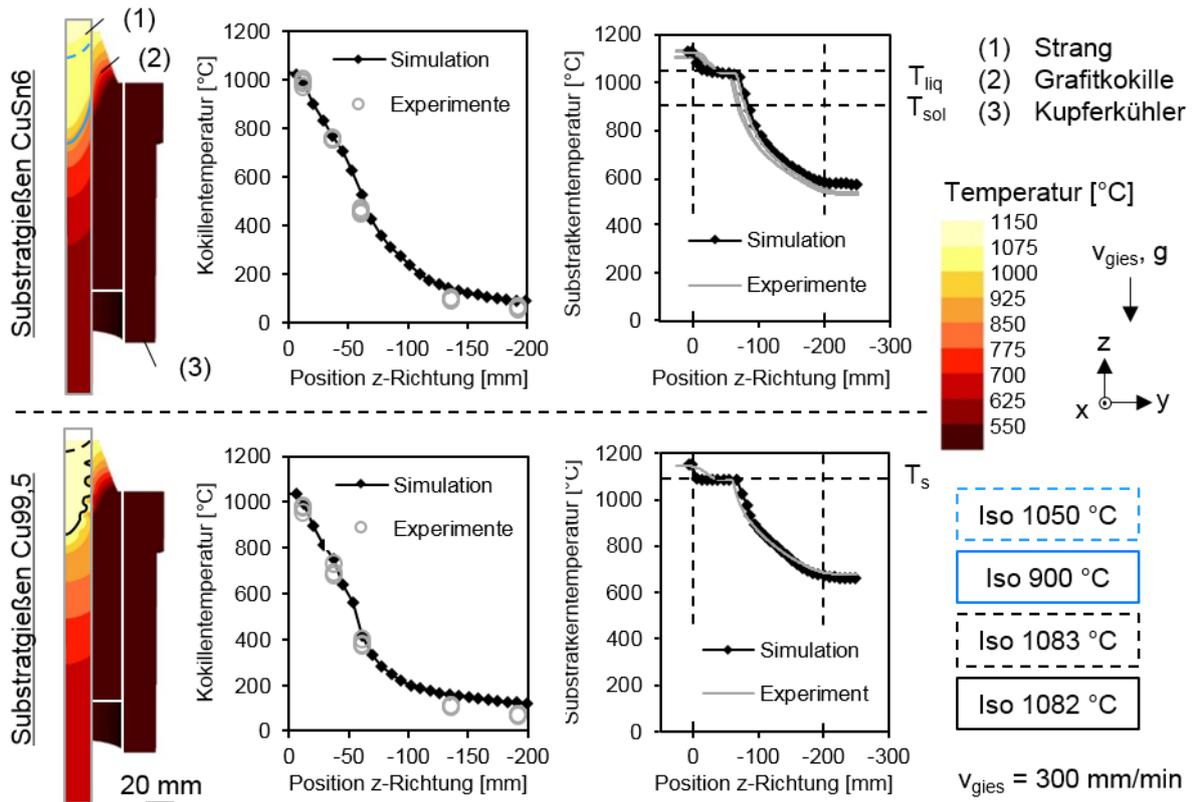


Abbildung 24: Temperaturfeldsimulation des vertikalen Substratgießens

Um das Konzept des Umgießens einer festen Substratstange mit einem Mantelwerkstoff und die für eine Verbundbildung wichtigen thermischen Voraussetzungen bewerten zu können, wurde eine Simulationsstudie durchgeführt. In Abbildung 25 ist der thermische stationäre Zustand im Gießsystem bei konstanter Gießgeschwindigkeit von 600 mm/min für unterschiedliche Werkstoffkombinationen dargestellt.

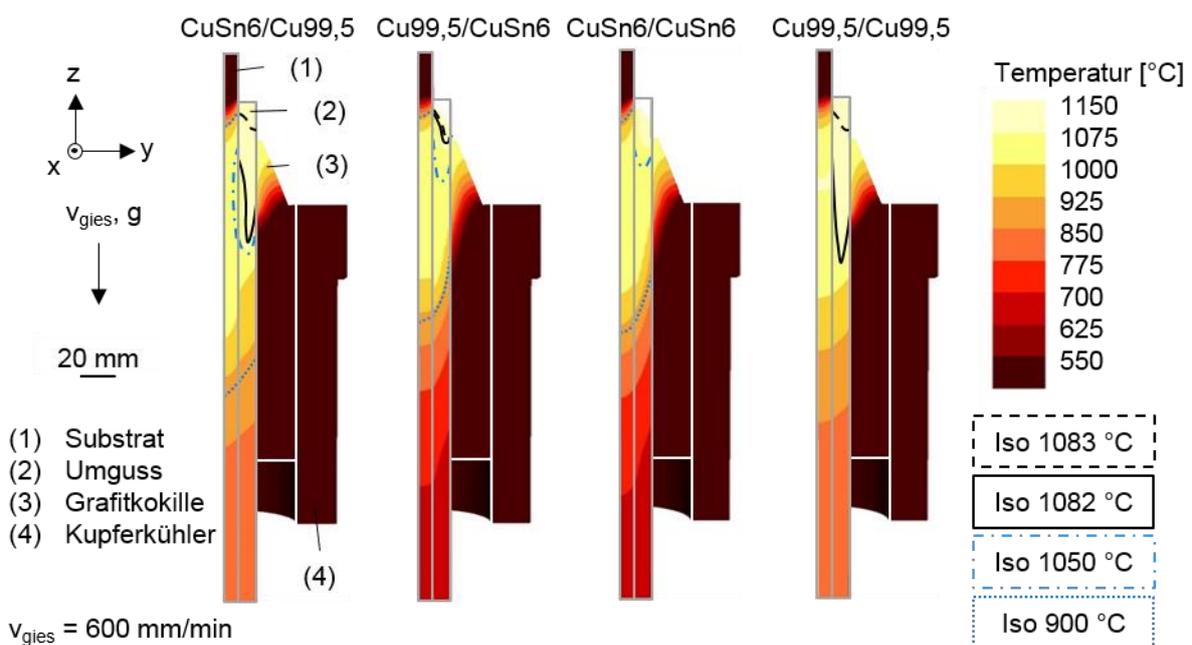


Abbildung 25: Temperaturfeldsimulation des vertikalen Umgießens nach [Mit16]

Anhand von Bewertungskriterien wurden die numerischen Modelle hinsichtlich ihrer Übertragbarkeit auf einen realen Prozess überprüft. Ein potentielles Prozessfenster konnte beispielsweise für einen Substratdurchmesser von 17,5-22,5 mm bzw. eine Gießgeschwindigkeit von 400-600 mm/min für Vollformate definiert werden.

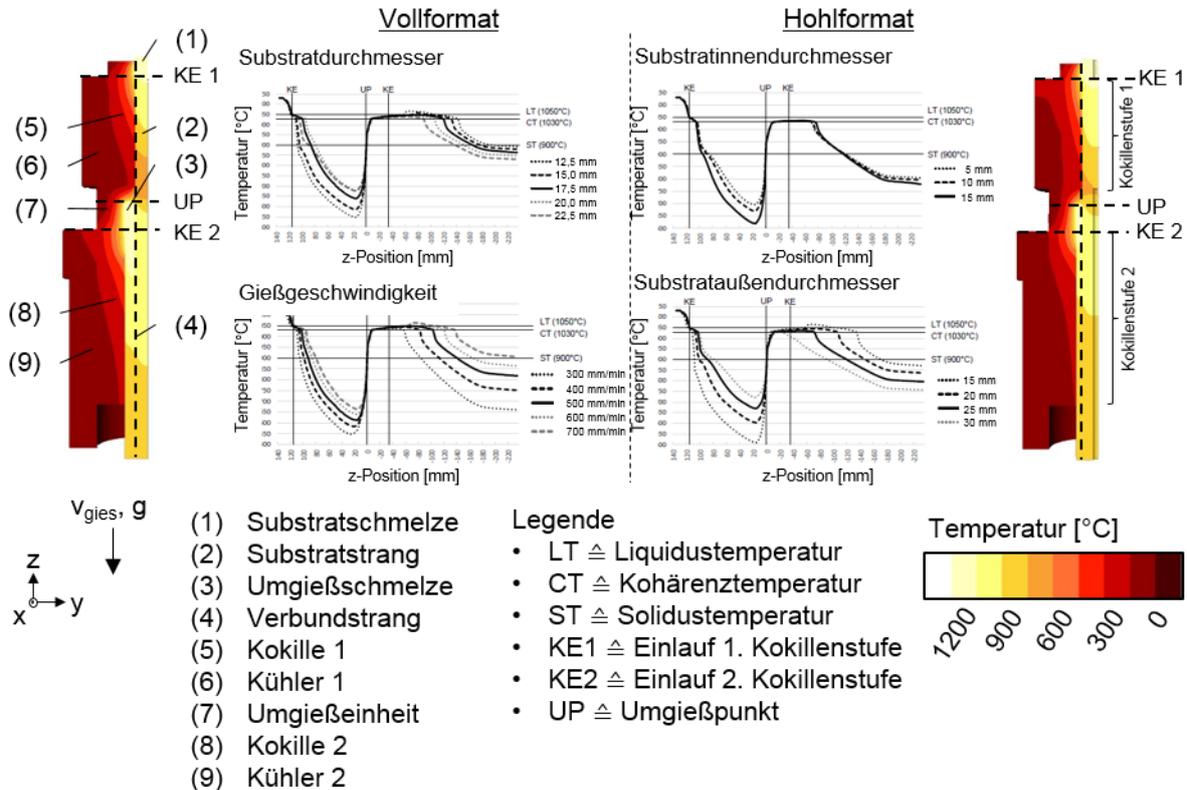


Abbildung 27: Parameterstudie zum einstufigen, vertikalen Verbundstranggießen

Folgendes Fazit kann aus den Untersuchungen zum halbkontinuierlichen, vertikalen Verbundgießen gezogen werden:

- Der Nachweis der Herstellbarkeit eines stoffschlüssigen Werkstoffverbundes zwischen CuSn6 und Cu99,5 in Form eines rotationssymmetrischen Halbzeuges mittels halbkontinuierlichem Umgießen konnte erbracht werden.
- Der halbkontinuierliche Prozess und die Verwendung einer Grafitkokille wirken sich positiv auf eine reproduzierbare Verbundbildung aus. Im Vergleich zu den statischen Gießversuchen begründet sich dies insbesondere durch homogener Temperaturen und der geringeren Oxidbildung an der Substratoberfläche.
- Das thermische Prozessfenster der Verbundbildung aus den statischen Gießversuchen kann auf die Herstellung hybrider, rotationssymmetrischer Halbzeuge übertragen werden. So stellt sich beim Erreichen von Substratoberflächentemperaturen knapp unterhalb der Liquidustemperatur der Zinnbronze ein hinreichend guter Stoffschluss ohne unerwünschte Durchmischungen zwischen den Verbundpartnern ein.

6.4 Horizontales Verbundstranggießen im Bandformat

6.4.1 Anlagen- und Werkzeugtechnik

Aufbauend auf den Erkenntnissen der Voruntersuchungen wurden die Werkzeug- und Anlagentechnik für das horizontale Verbundstranggießen von Kupferbasiswerkstoffen ausgelegt. Abbildung 28 zeigt die Pilot-Stranggießanlage des Typs 30/10 D I MCP N (Demag Technica, Veichtshöchheim), welche für die experimentelle Verfahrenserprobung eingesetzt wurde. Die esa4u GmbH optimierte die Anlagen- und Steuerungstechnik im Vorfeld und zwischen den Versuchsreihen.

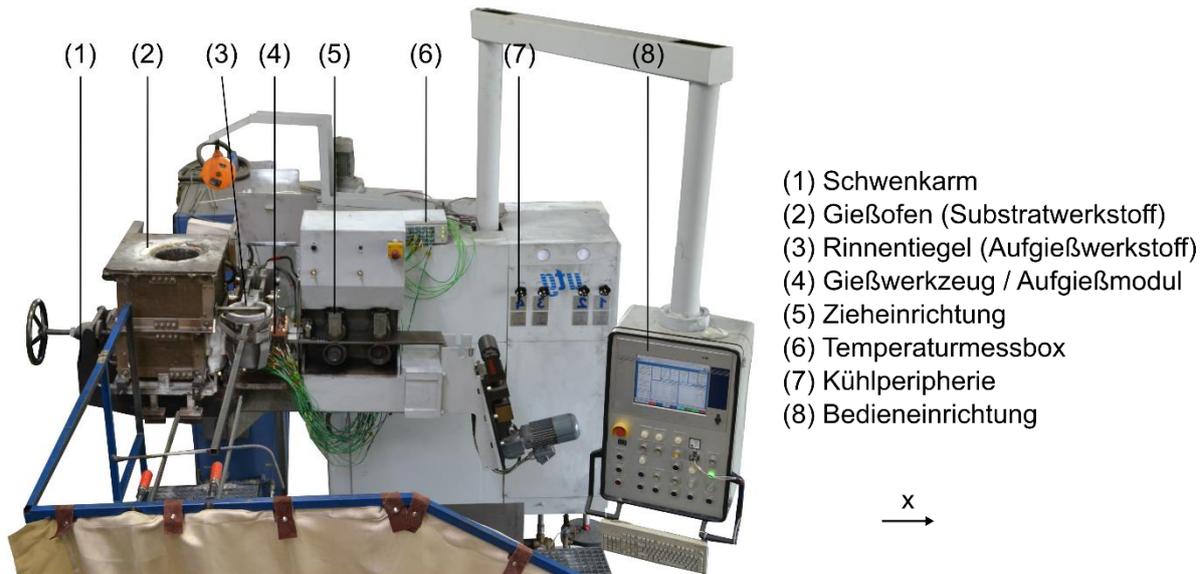


Abbildung 28: Anlage zum horizontalen Verbundstranggießen von Kupferbasiswerkstoffen

Die wesentlichen Komponenten der Stranggießanlage sind der Gießofen, das Gießwerkzeug, die Kühlperipherie und die Zieheinrichtung. Der auf dem Schwenkarm der Anlage montierte Mittelfrequenz-Induktionsofen verfügt über eine Nennleistung von 60 kW und wird zum Schmelzen und Warmhalten des CuSn6-Substratwerkstoffs eingesetzt. Im Ofengehäuse ist ein Schuttiegel eingelassen, dessen Tiegelschnauze kraftschlüssig über eine Spindel mit dem Gießwerkzeug verbunden ist. Eine Feuerfestplatte und Fasermatten isolieren die Schnittstelle Ofen-Gießwerkzeug thermisch und dichten sie ab. Im Rahmen des Projekts wurde eine Federbaugruppe am Spindelende eingebaut, um einen stetigen Anpressdruck zwischen Ofen, Isolation und Gießwerkzeug während des Schmelzens und im Prozess sicherzustellen. Zudem wurde die Ofensteuerung in die Anlagenbedieneinrichtung integriert. Die Wärme wird aus dem Gießwerkzeug über die Kühlperipherie abgeführt. Die Durchflussmengen sowie die Ein- und Austrittstemperaturen des Kühlwassers werden für vier separate Kühlkanäle messtechnisch erfasst. Abbildung 29 zeigt ein vereinfachtes Schaubild des instrumentierten Kühlsystems. Im zentralen Wassereinlauf wird über einen Drucksensor des Typs PN7004 (ifm electronic GmbH, Essen) der Wasserdruck überwacht. Die Wassertemperaturen im Einlauf und allen Ausläufen werden mittels eingebauten Pt100-Sensoren gemessen. Die Temperatursensoren sind nur durch eine dünne Edelstahlwandung vom Kühlmedium getrennt, was eine vergleichsweise geringe Trägheit in der Messwerterfassung bewirkt. Die Durchflüsse in den einzelnen Kanälen werden durch magnetisch-induktive Durchflusssensoren des Typs SM6004 (ifm electronic GmbH, Essen) erfasst. Im

Schaltschrank der Wasserverteilung werden die Werte mit ET200S Analogeingabebaugruppen eingelesen und via ProfiBus an die CPU übergeben. Die Baugruppen nehmen die durch die Sensoren ausgegebene Standardsignale (10V/20mA) auf und nach der Digitalisierung in der dezentralen Peripherie werden die digitalen Messwerte in der CPU auf Ober- und Untergrenzen hin überwacht. Zur Steuerung und Analyse des Gießversuchs werden die Werte im Visualisierungssystem PROCON-WIN® dargestellt sowie mit einer Frequenz von 1 Hz in Datenbank-Dateien geschrieben. Diese können anschließend mit gängigen Datenverarbeitungsprogrammen ausgewertet werden. Anhand der Messdaten wird der Durchfluss eines jeden Kühlkanals manuell über Stellventile im Prozess geregelt. Die aufgezeichneten Daten erlauben zudem die mittleren Kühlleistungen der einzelnen Kühlkanäle zu ermitteln.

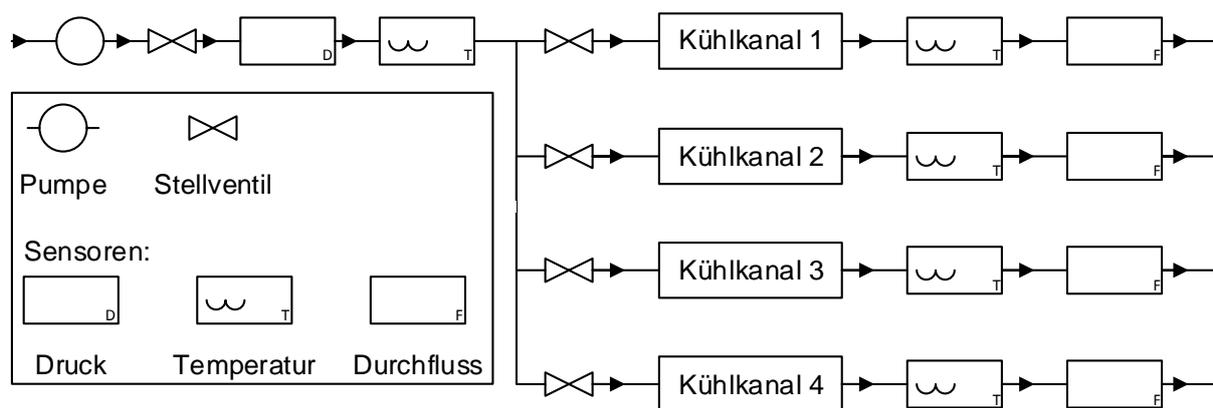


Abbildung 29: Stell- und Messeinrichtungen im Kühlsystem der Stranggießanlage

Das Aufgießmodul befindet sich oberhalb des Gießwerkzeuges und besteht im Wesentlichen aus einem Reservoir zur Bereitstellung der Aufgießschmelze während des Prozesses sowie einer Aufnahmevorrichtung für den Rinnentiegel. In diesem wird der Aufgießwerkstoff vor Prozessbeginn in einem separaten Ofen geschmolzen. Der Schmelzefüllstand im Reservoir wird durch das Kippen des Rinnentiegels eingestellt. Die Abzieheinrichtung besteht aus einem Walzenpaar, welches über einen Servomotor mit angeschlossenen Getriebe und Kettentrieb angetrieben wird. Die Mantelflächen der Antriebswalzen (Walzendurchmesser 100 mm) sind für eine bessere Kraftübertragung gerändelt. Um einer Schädigung der Wälzlager durch thermische Belastung vorzubeugen, wurde zudem eine Druckluftkühlung für die Walzen installiert. Die Abzieheinrichtung prägt dem Strang eine Go-Stop-Kinematik auf, welche über die Bedieneinrichtung der Anlage vorgegeben wird. Die Hub- und die Wartezeit ergeben addiert die Dauer eines Gießzyklus. Die Gießgeschwindigkeit ergibt sich somit aus dem Verhältnis von Hubweite zur Dauer eines Gießzyklus.

Abbildung 30-a) zeigt das Gießwerkzeug, welches für die Herstellung der Kupfer-Verbundbänder eingesetzt wurde. Das Gießwerkzeug ist im Wesentlichen eine Weiterentwicklung des in [Ner14a] vorgestellten Gießwerkzeuges zur Herstellung von zweischichtigen Aluminium-Verbundbändern. Es ermöglicht das Gießen von Substratbändern im Format 150 mm x 12 mm bei unterschiedlichen Aufgießdicken. Die Kavität wird durch die Oberfläche von Grafitplatten aus SIGRAFINE® R4550 (SGL Carbon GmbH, Bonn) begrenzt, welche zwischen wasserdurchströmte Kühlplatten aus AMPCOLOY® 972 (AMPCO METAL Deutschland GmbH, Geretsried) geklemmt sind. Das Gießwerkzeug ist ebenfalls für die Temperaturerfassung mit Mantelthermoelementen (Typ K, Klasse 1,

Durchmesser 1,5 mm) instrumentiert. Die Werkzeugtemperaturen werden für die anschließende Auswertung über die Temperaturmessbox aufgezeichnet. Aufgrund der begrenzten Schmelzmenge an der Pilotanlage ist die Wärmekapazität des Werkzeuges ein wesentliches Kriterium der Werkzeugauslegung. Die Masse des Werkzeuges beeinträchtigt seine Wärmekapazität. Je geringer die Kapazität ist, desto schneller stellen sich thermisch stationäre Bedingungen im Stranggießwerkzeug ein. Allerdings muss die innere Werkzeugoberfläche ausreichend dimensioniert sein, um die Wärmeabfuhr und somit die Erstarrung des Gießwerkstoffes innerhalb des Werkzeuges sicherzustellen. Die simulationsgestützte Auslegung ergab für das angestrebte Bandformat eine geeignete Werkzeuglänge von 280 mm und -breite von 200 mm. Zudem zeigte die Simulation, dass auf eine Beheizung des Aufgießmoduls bei ausreichender thermischer Isolierung verzichtet werden kann. Dies ist für das zu generierende Prozessverständnis besonders wertvoll, da die Gießwerkstoffe somit die alleinige Wärmequelle im System darstellen. Die thermisch isolierte Zuführung der Aufgießschmelze ist hierbei über die Werkstoffauswahl der Komponenten mit Schmelzekontakt zu erreichen. So wird eine mit Bornitrid geschichtete Aufgießplatte aus Monalite M1-A (Promat GmbH, Ratingen) für die Zuführung der Aufgießschmelze auf die Substratoberfläche eingesetzt. Zudem begrenzt ein mit Sand umgebender Isolierspeiser das Aufgießreservoir.

Abbildung 30-b) zeigt das Verfahrensprinzip des horizontalen Verbundstranggießens. Ab $x = 0$ befindet sich die Schmelze der Zinnbronze im Werkzeugkontakt. Das gekühlte Werkzeug entzieht der Schmelze Wärme, wobei der metallostatistische Druck innerhalb der Schmelze einen guten Kontakt mit der Grafitoberfläche bewirkt. Der Substratwerkstoff erstarrt ausgehend von den Randbereichen ins Bandinnere. Sobald sich eine hinreichend dicke Randschale gebildet hat, können die Kräfte aus der Zieheinrichtung übertragen und der Strang in x -Richtung abgezogen werden. Das Werkzeug besitzt bei $x = 85$ mm eine Teilungsebene in x -Richtung. In der oberen Werkzeughälfte schließt dort die Aufgießplatte an die Grafitplatte an, während in der unteren Hälfte primär aus Standzeitgründen eine weitere Grafitplatte eingesetzt ist. Der Erstkontakt der beiden Gießwerkstoffe findet bei $x = 123$ mm statt. Die Aufgießschmelze wird hierfür der Kavität über einen 4 mm breiten Aufgießspalt aus dem Reservoir zugeführt. Während der anschließenden Verbundbildung formt sich die Bindezone aus. In der oberen Werkzeughälfte schließt eine Grafitplatte bei $x = 165$ mm an die Aufgießplatte an. Hierbei wird die Aufgießdicke (6, 9 oder 12 mm) über die Kavitätshöhe unterhalb der Aufgießplatte sowie der Höhe der verwendeten Grafitseitenleisten bestimmt. Der Verbundstrang verlässt das Gießwerkzeug bei $x = 280$ mm.

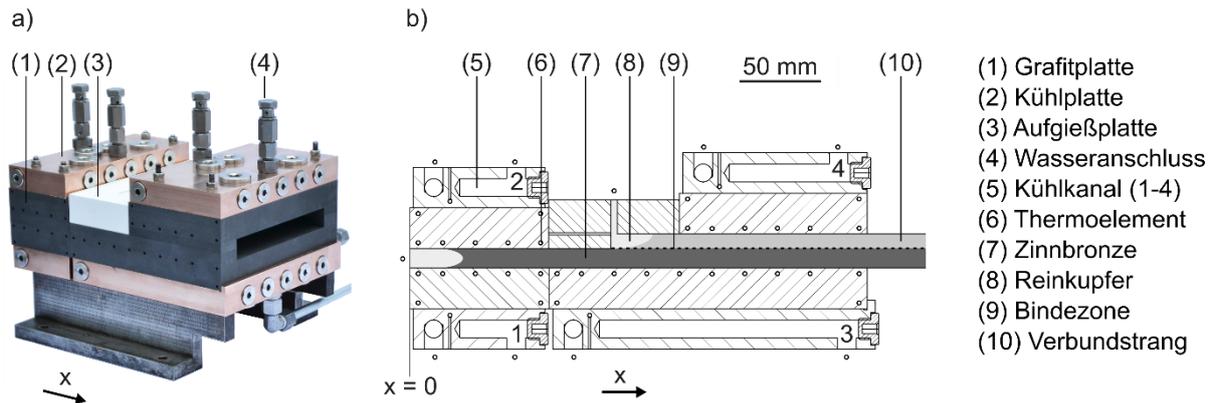


Abbildung 30: Gießwerkzeug zum Verbundstranggießen von Kupferbändern nach [Mit17] und [Mit18]

6.4.2 Stranggießen Cu-Substrat

Zunächst wurden in AP 2 mit dem in Abbildung 30 vorgestellten Werkzeug erfolgreich monolithische CuSn6-Substratbänder gegossen. Das prozesssichere Gießen des Substratbandes ist die Grundvoraussetzung für die spätere Zuführung der Aufgießschmelze auf eine intakte Substratoberfläche. In mehreren Versuchen wurde das Geschwindigkeits-Prozessfenster für das Gießen eines CuSn6-Substratbandes durch eine stufenweise Anpassung der Wartezeit bei einer Hubweite von 7,2 mm herausgearbeitet. Abbildung 31 zeigt die Kokillentemperaturen in 3,5 mm Abstand zur Kavität während eines Substratgießversuchs. Der Gießversuch setzt sich aus dem Anfahren des Strangs, der thermisch stationären Gießphasen im Anschluss an die Geschwindigkeitserhöhungen sowie dem Gießende zusammen. Die Kokillentemperaturen steigen während des Anfahrens infolge des Wärmeeintrags durch den Gießwerkstoff deutlich an. Um eine Rückerstarrung des Gießwerkstoffes in die Tiegelschnauze zu verhindern, beginnt der Anfahrvorgang mit einer gedrosselten Kühlwasserzufuhr. In den stationären Gießphasen bildet sich ein für die jeweilige Parameterkonfiguration spezifisches Temperaturprofil innerhalb des Werkzeuges aus. Für alle Konfigurationen stellt sich ein Temperaturgradient von ca. 900 °C über die Werkzeuglänge ein. Die Kokillentemperaturen steigen mit einer Verkürzung der Wartezeit. Der erhöhte Wärmeeintrag, welcher aus der Massenstromzunahme des Gießwerkstoffes mit zunehmender Geschwindigkeit resultiert, führt zu höheren Werkzeugtemperaturen. Die Werkzeugteilungsebene bei $x = 85$ mm bildet sich deutlich im Temperaturprofil der oberen und unteren Werkzeughälfte ab. Der in der Teilungsebene vorliegende thermische Kontaktwiderstand zwischen den beiden unteren Grafitplatten behindert den Wärmefluss in x-Richtung. In der oberen Werkzeughälfte stellt sich aufgrund der thermisch isolierenden Wirkung der Kalziumsilikatplatte ein Wärmestau ein. Dies ist anhand der geringfügig höheren Temperaturen unmittelbar vor der Teilungsebene der oberen Werkzeughälfte im Vergleich zur unteren Kokillenhälfte ersichtlich. Ab der Teilungsebene sinkt der Wärmeeintrag in das Werkzeug deutlich. Insbesondere die obere Kokillenplatte zeigt aufgrund ihres großen Abstandes zur Substratoberfläche keine Temperaturerhöhung. Die im Aufgießspalt in Luftatmosphäre gemessene Temperatur steigt während des Gießversuchs kontinuierlich an.

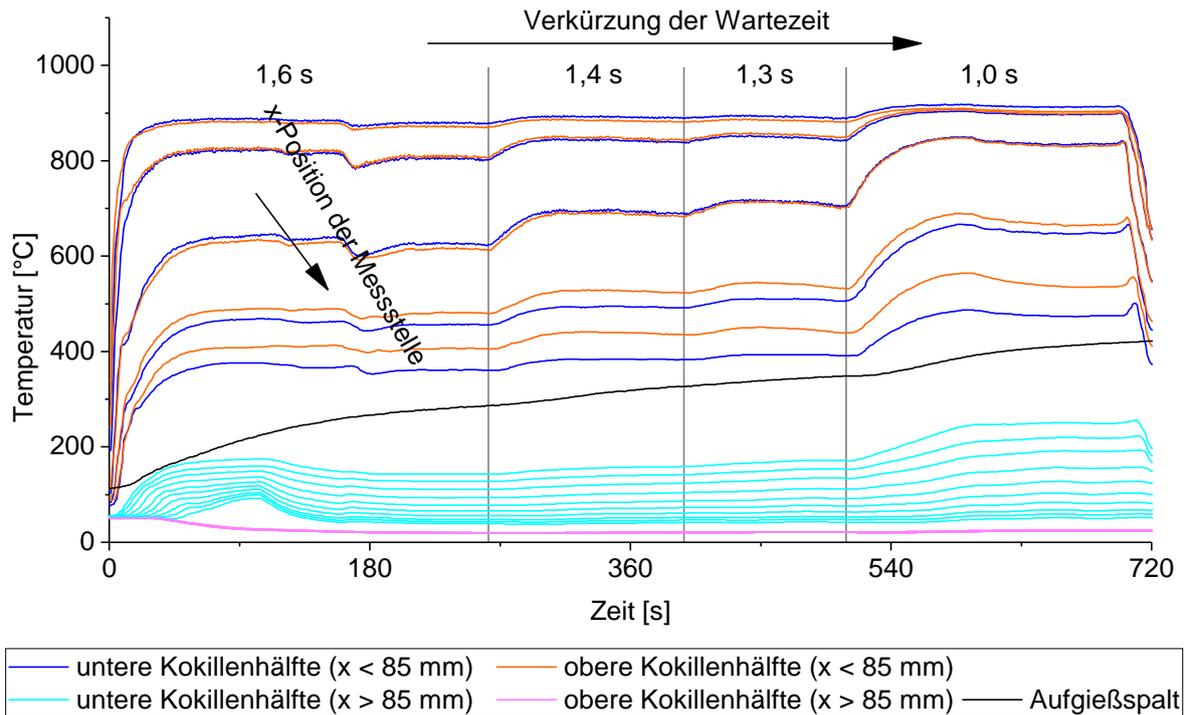


Abbildung 31: Kavitätsnahe Kokillentemperaturen beim Substratbandgießen in Abhängigkeit der Wartezeit (Hubweite 7,2 mm, Gießtemperatur ca. 1130 °C)

Anhand der Gießversuche wurde das in Tabelle 6 gezeigte Prozessfenster zum Gießen eines CuSn6-Substratbandes im Format 150 mm x 12 mm ermittelt. Es stellt die Randbedingungen für die Verbundstranggießversuche dar. Hierbei führen insbesondere zu geringe Geschwindigkeiten und Gießtemperaturen zu einer Erstarrung der Bandränder bereits im Übergang zur Schnittstelle Ofen-Gießwerkzeug. Die Folge sind Bandeinrisse ausgehend von den Rändern. Zu hohe Geschwindigkeiten führen ebenfalls zu Rissen im Bandquerschnitt. Diese treten auf, wenn sich aufgrund der zu kurzen Wartezeit keine ausreichend stabile Randschale ausbilden kann, welche den Reibkräften des nächsten Ziehzyklus standhält.

Tabelle 6: Prozessfenster des CuSn6-Substratbandgießens im Format 150 mm x 12 mm

Gießtemperatur [°C]	1120 ... 1220
Hubweite [mm]	2,5 ... 14,8
Wartezeit [s] (Hubweite 7,2 mm)	0,8 ... 1,6
Durchflussmenge Kühlwasser im Kanal 1 und 2 [l/min]	ca. 7-8

6.4.3 Horizontales Kupferverbundstranggießen

Aufbauend auf den ermittelten Randbedingungen des Substratbandgießens erfolgte die experimentelle und simulationsgestützte Untersuchung des einstufigen, horizontalen Verbundstranggießens von Kupferwerkstoffen im Bandformat. Abbildung 32 zeigt das Gussprodukt eines Verbundgießversuchs an der Pilotanlage. Zunächst wird nach dem erfolgreichen Anfahren des Substratbandes der Prozess auf die gewünschte Parameterkonfiguration eingestellt. Sobald thermisch stationäre Bedingungen im Gießwerkzeug erreicht sind, wird die Aufgießschmelze entsprechend des Verfahrensprinzips aus Abbildung 30-b) auf die Substratoberfläche aufgegossen. Bis zum Prozessende findet nun ein einstufiges, horizontales Verbundstranggießen statt.

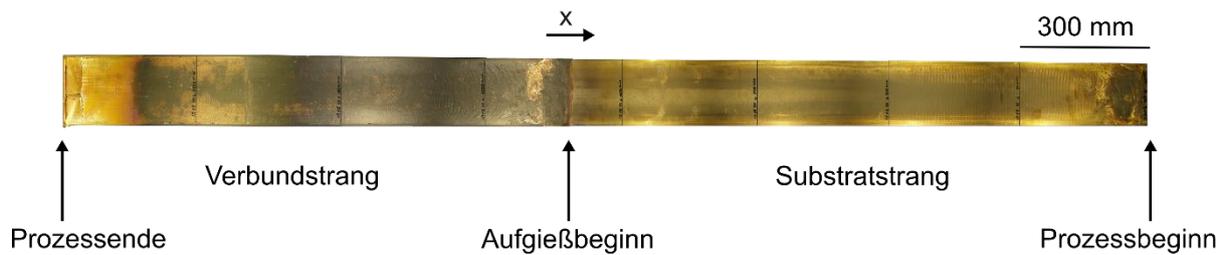


Abbildung 32: Gussprodukt des horizontalen Verbundstranggießprozesses

Abbildung 33 zeigt die Änderung des charakteristischen Temperaturprofils durch den Verbundgießvorgang gegenüber dem Substratgießen. So bleibt das Temperaturprofil des Verbundgießprozesses für $x < 85$ mm nahezu unverändert. Die Temperaturen in der oberen Kokille erfahren für $x > 165$ mm nur eine geringe Temperaturerhöhung. Da der Aufgießwerkstoff bereits unterhalb der Aufgießplatte erstarrt, gibt es keinen unmittelbaren Kontakt zwischen Gießwerkstoff und Kokillenplatte. Die Wärmeabgabe vom Verbundstrang an die obere Kokillenhälfte findet hierbei primär über Wärmestrahlung statt. Anders verhält es sich im Wärmeübergang zur unteren Kokillenhälfte, wie der deutliche Temperaturanstieg infolge des Wärmeeintrages durch den Aufgießwerkstoff zeigt. Die Schmelze des Reinkupfers erstarrt beim Kontakt mit der Substratoberfläche. Die Überhitzungs- und Schmelzwärme des Reinkupfers wird primär durch das Substratband aufgenommen, welches hierdurch eine Wiedererwärmung erfährt. Durch Wärmeleitung innerhalb des Substratbandes wird die Wärme vorzugsweise in Banddickenrichtung abgeführt und durch die untere Kokillenhälfte aufgenommen. Hierbei wird die Maximaltemperatur innerhalb der unteren Kokille jedoch nicht direkt bei der x -Position des Erstkontaktes der beiden Werkstoffe erreicht. Die Freisetzung der Schmelzenthalpie des Reinkupfers und die Wärmeleitung innerhalb der Zinnbronze sind zeitbehaftete Vorgänge, währenddessen der Verbundstrang weiter in x -Richtung abgezogen wird. Zudem nimmt der Wärmeübergang zwischen der Substratunterseite und der Kokillenoberfläche aufgrund besserer Kontaktverhältnisse zu. Die wesentlichen Gründe hierfür sind bereits vom Verbundstranggießen von Aluminiumbändern bekannt, vgl. [Wim15]. So erweicht das Substratband infolge dessen Wiedererwärmung. Weiterhin steigt der Anpressdruck des Bandes an die Kokillenoberfläche aufgrund der Gewichtskraft des Aufgießwerkstoffes. Aufgrund der hohen Dichte von Kupferbasiswerkstoffen wirkt sich letzteres beim horizontalen Verbundstranggießen in besonderen Maße aus. [Mit17]

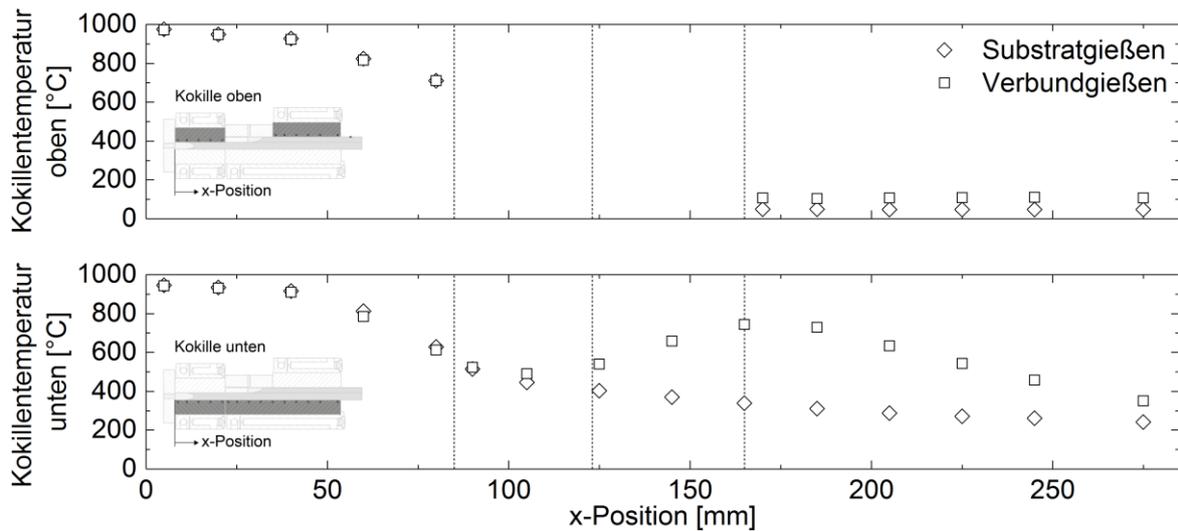


Abbildung 33: Kokillentemperatur in 3,5 mm Abstand zur Kavität (kavitätsnah) beim horizontalen Substrat- und Verbundstranggießen (Hubweite 7,2 mm, Wartezeit 1,1 s) nach [Mit17]

Abbildung 34 stellt die gemessenen und simulierten Werkzeugtemperaturen im Verbundstranggießprozess gegenüber. Neben den kavitätsnahen Messpositionen sind auch die übrigen Messpositionen dargestellt. Die Prozesstemperaturen werden durch die Simulation hinreichend genau abgebildet. Die simulierten Temperaturen der Substratoberseite und -unterseite weisen einen signifikanten Temperaturgradienten über die Banddickenrichtung infolge des Verbundgießvorgangs auf. Dieser variiert über die Werkzeuglänge und bedingt ein Abheben des Stranges von der unteren Kokillenoberfläche aufgrund unterschiedlicher Wärmeausdehnung der Substratbandseiten.

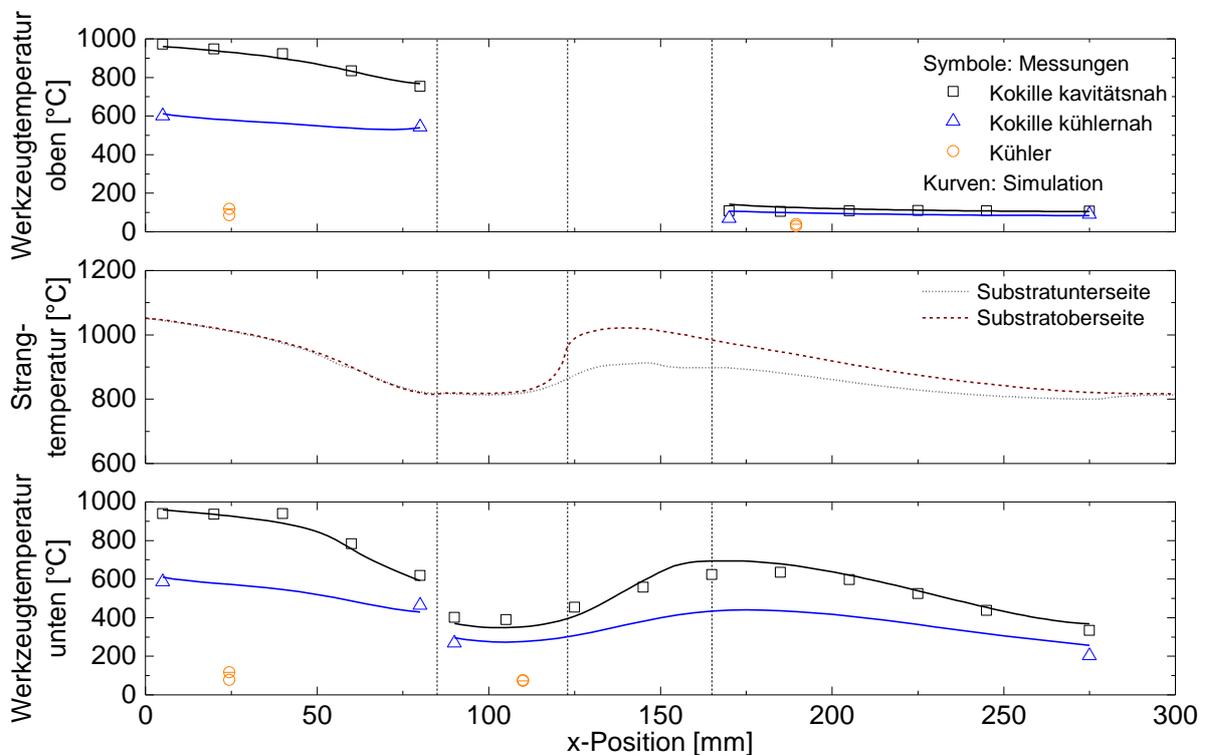


Abbildung 34: Strang- und Werkzeugtemperaturen beim horizontalen Verbundstranggießen (Hubweite 9,6 mm, Wartezeit 1,5 s)

Aus den Verbundgussbändern wurden Proben entnommen und mittels werkstoffkundlichen Methoden untersucht. Neben der Lichtmikroskopie und Mikrohärtemessung wurden Scherzug- und Ultraschallprüfungen eingesetzt, um die Verbundqualität zu charakterisieren. Abbildung 35 zeigt eingesetzte Prüfmethoden für die Evaluierung der Verbundqualität zwischen den Kupferbasiswerkstoffen. Die Scherzugprüfung wurde bereits bei [Wim15] erfolgreich für die Bindefestigkeitsermittlung von Aluminiumverbundbändern angewandt. Die Bindefestigkeit wird hierbei aus dem Verhältnis von erreichter Maximalkraft vor Probenversagen zur Verbundflächengröße berechnet. Für die Ultraschallprüfung der Bindezone wurde ein Vergleichskörperverfahren eingesetzt. Hierfür wurden monolithische Referenzprobe aus Reinkupfer ebenfalls mittels Ultraschall geprüft und die erhaltenen Referenzwerte mit der Bindezonenprüfung verglichen, vgl. [Mit18]. Die Proben wurden an drei Positionen über die Bandbreite gemessen: Der Prüfkopf wurde in der Strangmitte und beidseitig jeweils in 27,5 mm Abstand zur Strangmitte positioniert. Die Echohöhendifferenz zwischen der Verbundfläche und der Reflektorreferenz dient hierbei der zerstörungsfreien Quantifizierung der Verbundqualität.

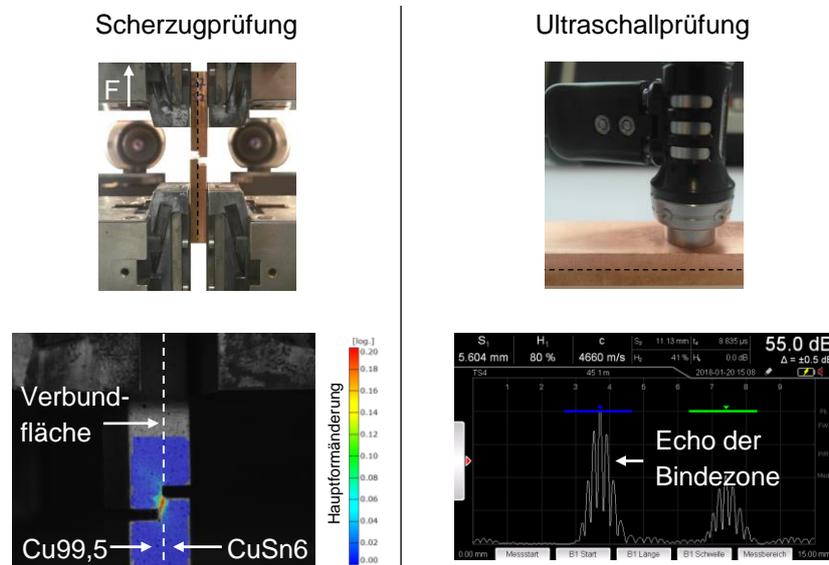


Abbildung 35: Mechanische und zerstörungsfreie Bindefestigkeitsprüfung von Kupferwerkstoffen

Die Parameter Gießgeschwindigkeit, Gießtemperatur, Abziehkinematik und Kühlwasserdurchfluss steuern den horizontalen (Verbund-)Stranggießprozess. Aufgrund der Erfahrungen aus den Vorversuchen bezüglich der bindezonnennahen Gasausscheidung der Kupferschmelzen wurden die Gießtemperaturen auch in den Versuchsreihen zum horizontalen Verbundstranggießen möglichst konstant gehalten. Abbildung 36 zeigt die thermischen Verhältnisse im Gießwerkzeug in Abhängigkeit der Gießgeschwindigkeit. Die Kokillentemperaturen steigen in beiden Werkzeughälften mit zunehmender Gießgeschwindigkeit. Die Kokillentemperaturen der höchsten Gießgeschwindigkeit von 387 mm/min befinden sich über eine weite Strecke innerhalb des Erstarrungsintervalls der Zinnbronze. Die Kühlleistung der Kanäle 1 und 2 ist bei der höchsten Gießgeschwindigkeit jedoch vergleichsweise gering. Der vermeintliche Widerspruch erklärt sich primär durch eine Spaltbildung zwischen den Kupferkühlern und der Kokille, welcher den Wärmeübergangswiderstand erhöht. Die thermische Ausdehnung der kraftschlüssig fixierten Werkzeugkomponenten nimmt mit steigender Temperatur zu.

Darüber hinaus beeinflusst der Temperaturgradient innerhalb einer Kokillenplatte und der Temperaturunterschied zwischen Kokille und Kühler die Spaltbildung. Allgemein sind diese Änderungen der Kühlbedingungen aufgrund von Spaltbildung zwischen Kokille und Kühler beim Kupferstranggießen bekannt [Ric09]. In den Temperaturentwürfen ist weiterhin eine Verlagerung der Erstarrungsfront des Reinkupfers in x-Richtung zu erkennen. So erstarrt bei der höchsten Gießgeschwindigkeit die Aufgießschmelze oberflächennah erst unterhalb der Grafitplatte. Für geringere Gießgeschwindigkeiten erstarrt die Schmelze unterhalb der Aufgießplatte.

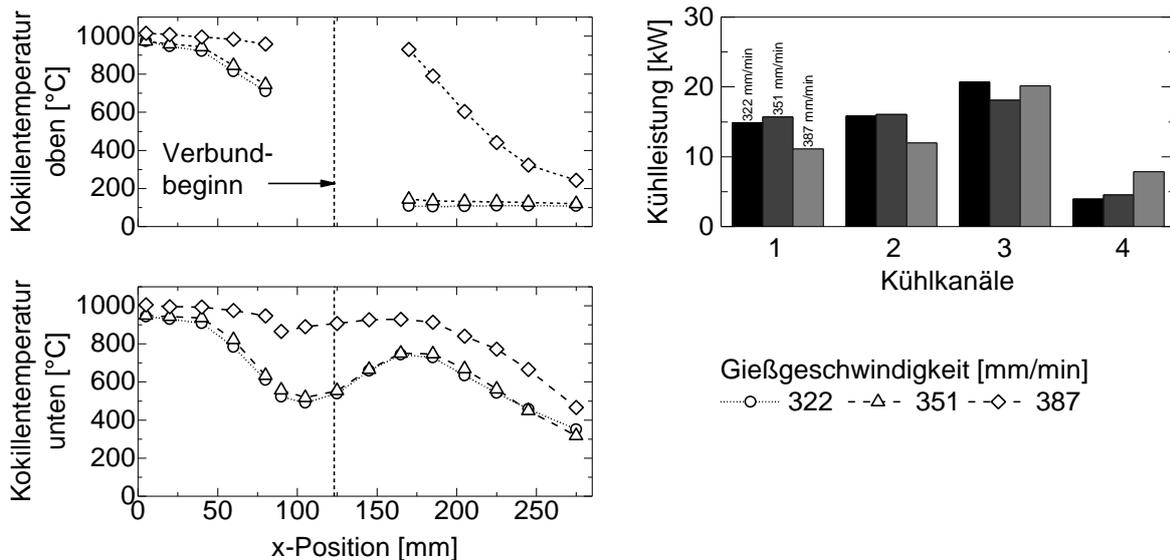


Abbildung 36: Einfluss der Gießgeschwindigkeit auf die thermischen Verhältnisse beim horizontalen Kupfer-Verbundstranggießen

Abbildung 37 zeigt Längsschliffe aus den Verbundbändern für die Konfigurationen mit der geringsten und höchsten Gießgeschwindigkeit. Im Schliffbild der geringen Gießgeschwindigkeit verläuft die Verbundfläche geradlinig und horizontal. Ein großflächiger Stoffschluss verbindet die beiden Werkstoffe, welcher durch kleinere Fehlstellen bevorzugt im Hubweitenabstand von 7,2 mm unterbrochen wird. Im Schliffbild der hohen Gießgeschwindigkeit sind nahezu keine Fehlstellen zu erkennen. Allerdings sind bindezonennahe Auswaschungen im Substratwerkstoff ersichtlich, deren iteratives Auftreten ebenfalls mit der Hubweite korreliert. Aus Abbildung 36 geht hervor, dass die Zinnbronze teillüssig den Aufgießbereich des Werkzeuges erreicht. Die eingebrachte Wärmeenergie des Reinkupfers reicht aus, um die oberen Substratschichten komplett aufzuschmelzen. Infolge dessen kommt es zu einer unerwünschten Durchmischung der Werkstoffe. [Mit18]

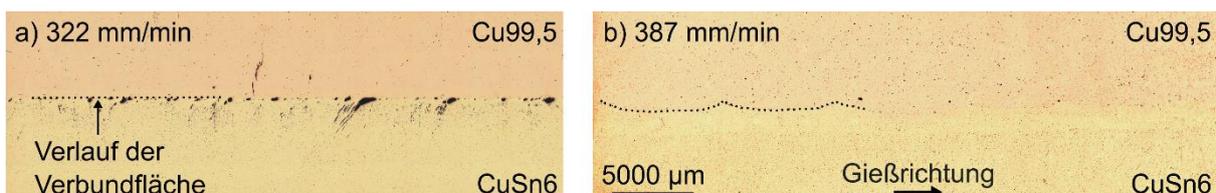


Abbildung 37: Struktur der Bindezone in Abhängigkeit der Gießgeschwindigkeit

Abbildung 38 zeigt die Ergebnisse der Ultraschall- und Scherzugprüfung für die Variation der Gießgeschwindigkeit. Die Ergebnisse stimmen sehr gut mit den Ergebnissen der Schliffbildanalyse

überein. So sinkt die Echohöhe der Verbundzone aufgrund der zurückgehenden Porosität mit steigender Gießgeschwindigkeit und die Bindefestigkeit nimmt zu. Es werden maximale Bindefestigkeiten von ca. 200 N/mm² erreicht.

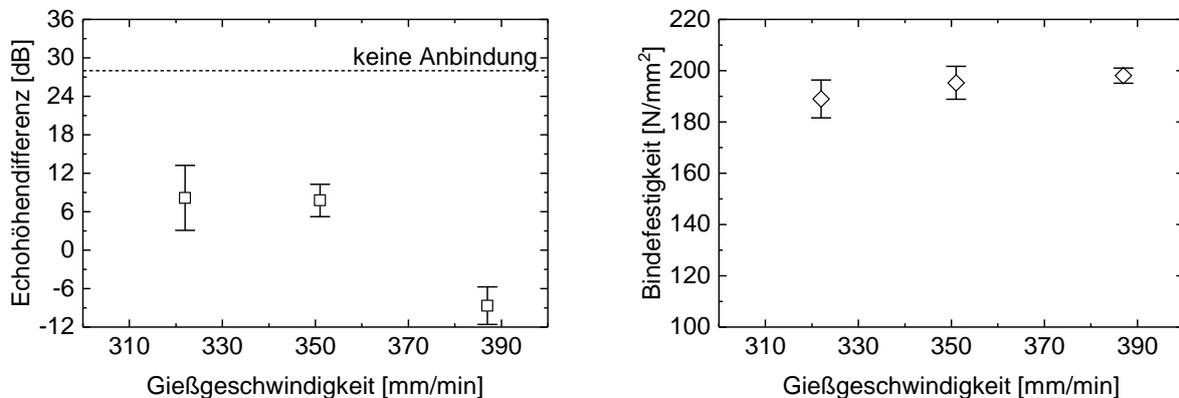


Abbildung 38: Verbundqualität in Abhängigkeit der Gießgeschwindigkeit nach [Mit18]

Abbildung 39 zeigt die Verbundqualität in Abhängigkeit der Hubweite. Die Echohöhe der Verbundfläche sinkt zunächst mit steigender Hubweite bevor sie bei einer weiteren Hubweitzunahme wieder zunimmt. Die ermittelte Bindefestigkeit bestätigt das Maximum in der Verbundqualität, welches bei einer Hubweite von ca. 7,2 mm erreicht wird. Hauptursächlich hierfür sind zwei Effekte. Zum einen wird bei Strangstillstand, d.h. innerhalb der Wartezeit eines Gießzyklus, die Benetzung der Substratoberfläche durch die Aufgießschmelze unterbrochen. Anbindungsfehler an der Schnittstelle Verbundpartner-Aufgießplatte bei $x = 123$ mm sind die Folge. Da bei gleicher Gießgeschwindigkeit die Anzahl der Wartephasen pro Gießlänge mit sinkender Hubweite zunimmt, erhöht sich die Anzahl der Anbindungsfehler über die Gießlänge. [Mit18]

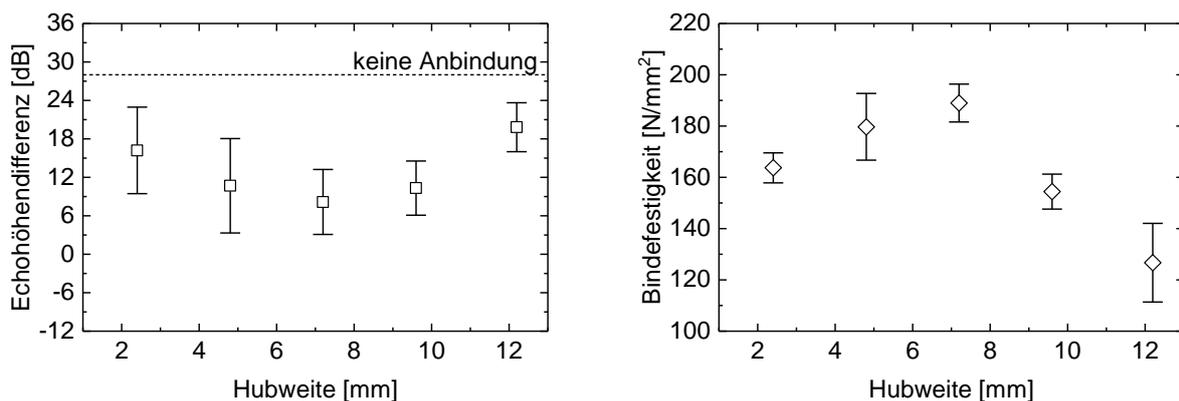


Abbildung 39: Verbundqualität in Abhängigkeit der Hubweite nach [Mit18]

Andererseits nimmt die Vorerwärmungstemperatur des Substratwerkstoffes am Ende einer Hubweite mit zunehmender Hubweite ab [Wim15]. Abbildung 40 zeigt hierfür die simulierten, thermischen Verhältnisse auf der Substratoberfläche unmittelbar vor und nach dem Erstkontakt der Werkstoffe während eines einzelnen Hubes zu Hubbeginn/Wartezeitende in Abhängigkeit der Hubweite. Es zeigt sich eine deutliche Abnahme der Oberflächentemperatur über die Hubweitenlänge unmittelbar vor deren Benetzung. Somit liegt während der Benetzung eine inhomogene Substratoberflächentemperatur

über die Hubweite vor. Aufgrund der thermisch ungünstigen Benetzungsvoraussetzungen am Hubweitenende ergeben sich wiederum Anbindungsfehler insbesondere bei großen Hubweiten. [Mit18]

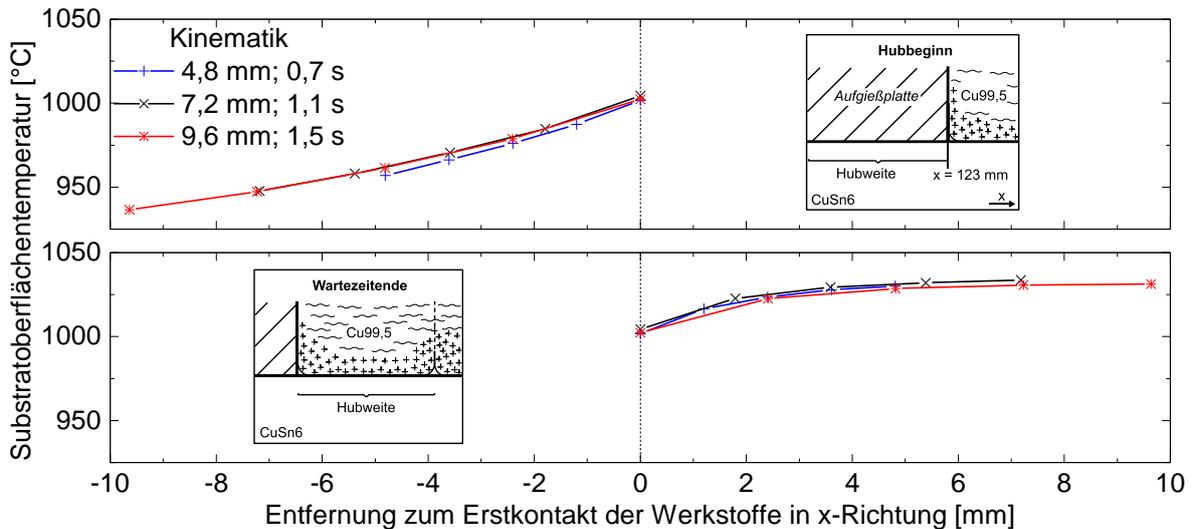


Abbildung 40: Simulierte Substratoberflächentemperatur in Abhängigkeit der Hubweite bei konstanter Gießgeschwindigkeit

Es wurden Verbundgießversuche zur Variation der Aufgießdicke durchgeführt. Das Einfrieren der Reinkupferschmelze in den Aufgießspalt verhinderte während oder kurz nach dem Anfahren ein prozesssicheres Verbundgießen mit 6 mm Aufgießdicke. Abbildung 41 zeigt den Vergleich der Verbundqualität für die zwei Aufgießdicken von 9 und 12 mm. Da sich insbesondere in den Messergebnissen der 12 mm Aufgießdicke eine signifikante Abhängigkeit der Echohöhe von der Ultraschallmessposition zeigt, sind die Prüfergebnisse nun nicht mehr über alle Positionen gemittelt, sondern für die einzelnen Messpositionen separat angegeben. So zeigt sich anhand der Ultraschallprüfergebnisse für die 12 mm Aufgießkonfiguration eine Inhomogenität in der Verbundqualität über die Bandbreite. Insgesamt nimmt die Verbundqualität mit höherer Aufgießdicke jedoch zu. Die Scherzugprüfung ergibt eine deutlich höhere Bindefestigkeit bei größerer Aufgießdicke und stimmt somit gut mit dem Ultraschallprüfergebnis aus der Strangmitte überein. Ähnlich Abbildung 37 zeigt sich in Längsschliffen aus der Strangmitte für die 12 mm Aufgießkonfiguration allerdings bindezonenah eine Welligkeit der Verbundfläche.

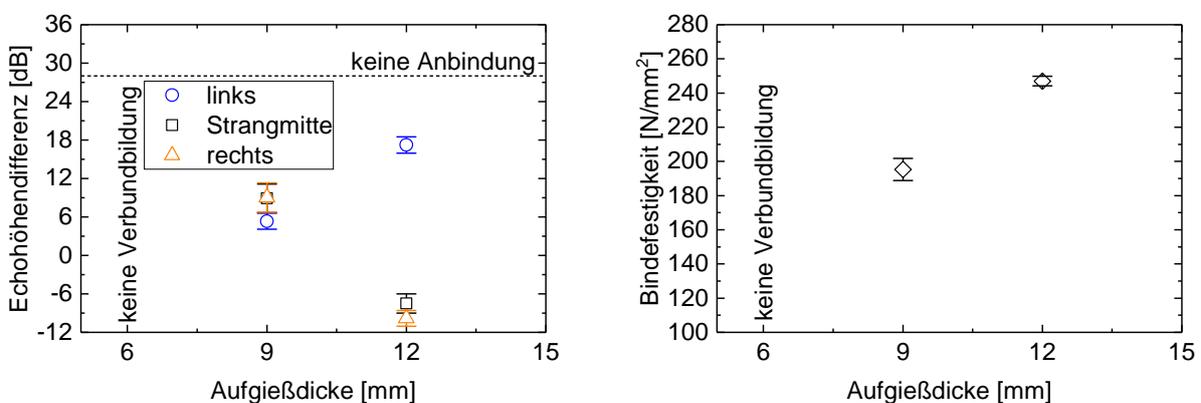


Abbildung 41: Verbundqualität in Abhängigkeit der Aufgießdicke

Abbildung 42 zeigt die Verbundqualität in Abhängigkeit des Wasservolumenstroms im Kühlkanal 3 für zwei Hubweiten. Es ist keine signifikante Änderung der Verbundqualität festzustellen. Die etwas höhere Bindefestigkeit bei hohem Volumenstrom kann durch eine höhere bindezonennahe Abkühlgeschwindigkeit begründet werden. Allerdings vermindert die Vielzahl der thermischen Übergangs- und Leitungswiderstände zwischen Kühlwasser und Verbundzone den Einfluss des Kühlwasser-Volumenstroms auf die Verbundbildung.

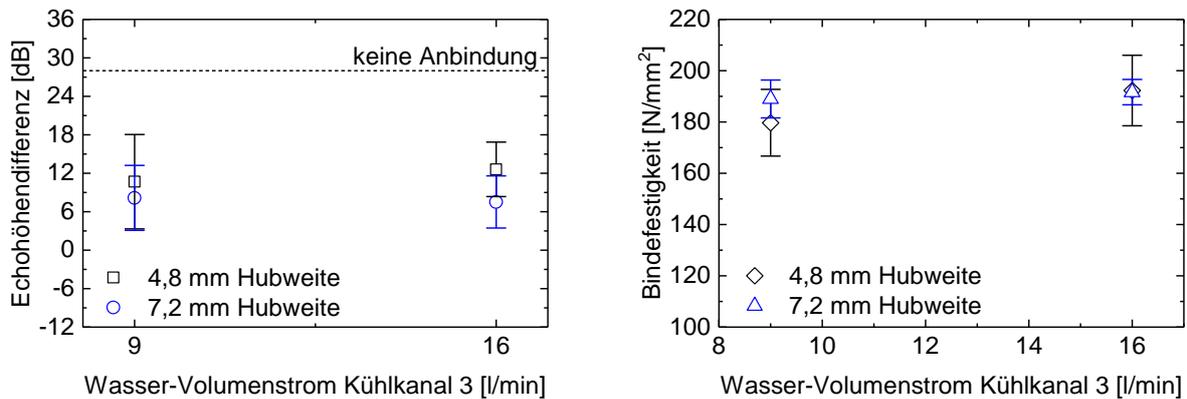


Abbildung 42: Verbundqualität in Abhängigkeit des Kühlwasservolumenstroms

6.4.4 Umformtechnische Weiterverarbeitung der Verbundstränge

Die umformtechnische Weiterverarbeitbarkeit der gegossenen Verbundbänder wurde anhand von Walzversuchen auf einer Walzanlage des Typs BW_320 (Heinrich Müller Maschinenfabrik GmbH, Pforzheim) überprüft. Abbildung 43 zeigt die Stichabnahmen ausgehend von 8,0 mm Probendicke auf die Zieldicke von 1,5 bzw. 1,0 mm. Die Stichabnahmen sind vergleichbar mit denen des industriellen Walzens eines Zinnbronzebandes.

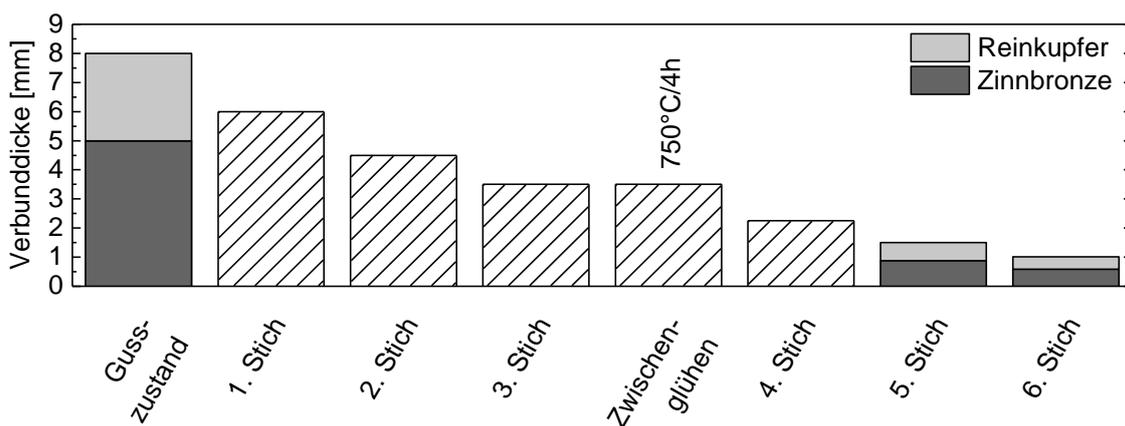


Abbildung 43: Stichplan zur umformtechnischen Weiterverarbeitung der Verbundbänder nach [Mit18]

Abbildung 44 zeigt ein Walzprodukt und Schlifffildaufnahmen über die Verbundblechdicke in Walzrichtung und orthogonal hierzu. Der stoffschlüssige Schichtverbund bleibt bis zum letzten Walzstich erhalten. Auch weisen die Walzproben im Vergleich zu den Gussproben keine bindezonennahe Mikroporosität auf. Der Walzdruck presst die Poren zusammen, was zu einer gering ausgeprägten Welligkeit der Verbundzone im Verbundblech führt. Vereinzelt sind aus dem Gießprozess resultierende Gas- und Oxideinschlüsse an der Bindezone feststellbar. Die einzelnen Schichten verfestigen durch

Kaltumformung. So kann bei den gewalzten Verbundblechen mit 1,0 mm Dicke eine durchschnittliche Aufhärtung der Zinnbronze um ca. 295% ausgehend von ca. 78 HV_{0,1} im Gusszustand und beim Reinkupfer um ca. 267% ausgehend von ca. 49 HV_{0,1} festgestellt werden. [Mit18]



Abbildung 44: Verbundblech und Mikrostruktur im Anschluss an das Kaltwalzen

Die Verbundbleche mit 1,5 mm Dicke wurden im Anschluss an das Kaltwalzen erfolgreich schergeschnitten. Abbildung 45 zeigt die maximale Schneidkraft und die Ausprägung der Schnittfläche gemäß VDI-Richtlinie 2906 in Abhängigkeit der Schicht mit Stempelkontakt, der Form des Schneidkantenradius und des Wärmebehandlungszustandes für den offenen Schnitt mit 15 mm Schnittlänge.

Wenn sich die Zinnbronze im Stempelkontakt befindet, muss aufgrund der höheren Festigkeit der Zinnbronze eine vergleichsweise hohe Schneidkraft bis zum Bruch eintritt aufgewendet werden. Die maximale Schneidkraft beim Scherschneiden der wärmebehandelten Proben liegt unabhängig von der Schicht im Stempelkontakt deutlich unterhalb der walzharten Verbundbleche. Abbildung 46 zeigt die Mikrostruktur der schergeschnittenen Verbundbleche in Abhängigkeit der Schicht mit Stempelkontakt und des Wärmebehandlungszustandes. Deutlich zeigen sich der Einfluss des Wärmebehandlungszustandes auf den Kanteneinzug sowie der höhere Glattschnittanteil bei Verwendung des Reinkupfers im Stempelkontakt. Eine Delamination der Schichten im Werkstoffverbund tritt nicht auf. Somit ist die Weiterverarbeitbarkeit der gießtechnisch hergestellten Verbundstränge nachgewiesen. Dies ist eine Grundvoraussetzung für die erfolgreiche Industrialisierung dieser neuartigen Prozesskette zur Herstellung von Kupfer-Verbundbauteilen. [Mit18]

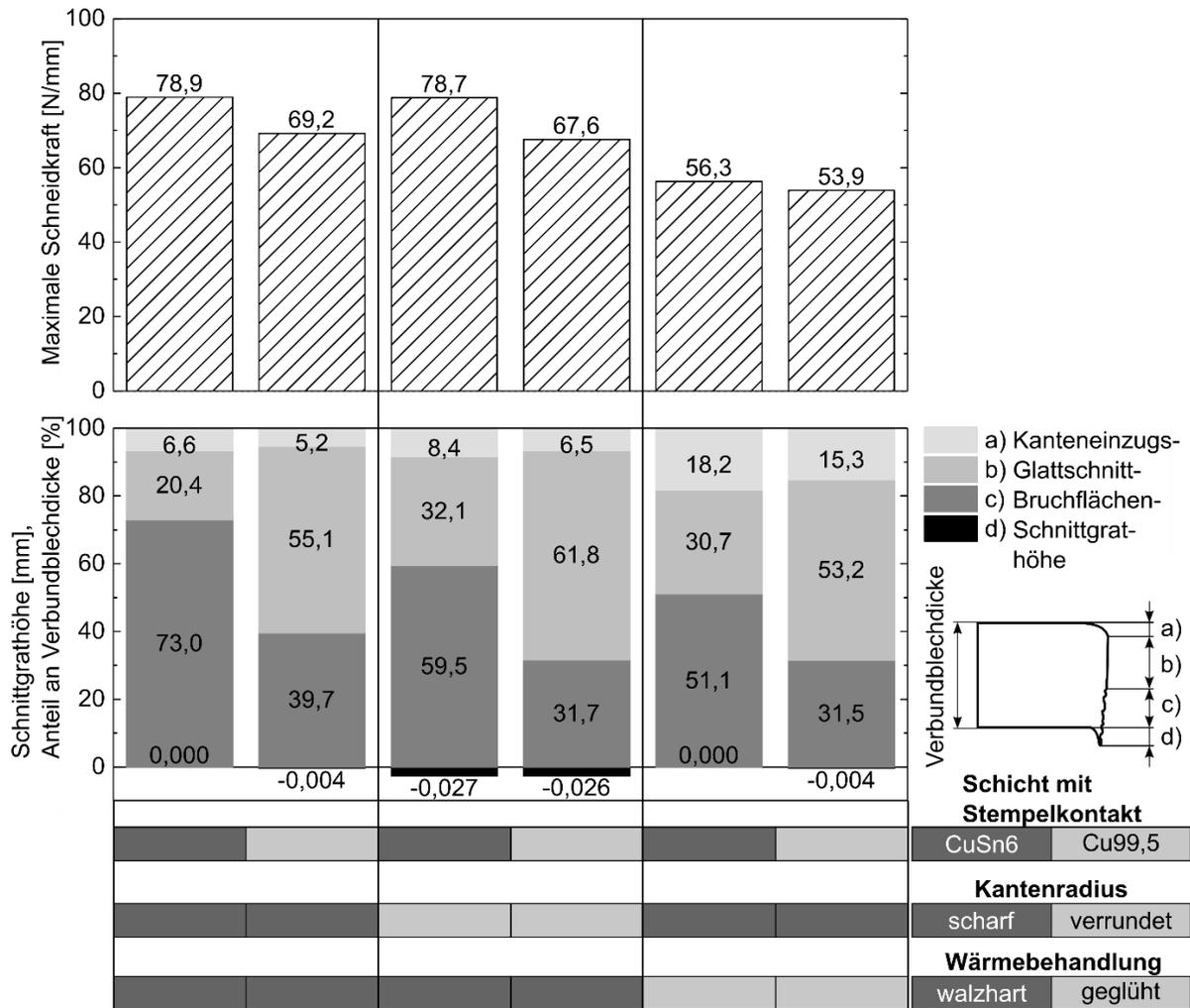


Abbildung 45: Maximale Schneidkraft und Schnittflächenausprägung in Abhängigkeit des Stempelkontakts nach [Mit18]

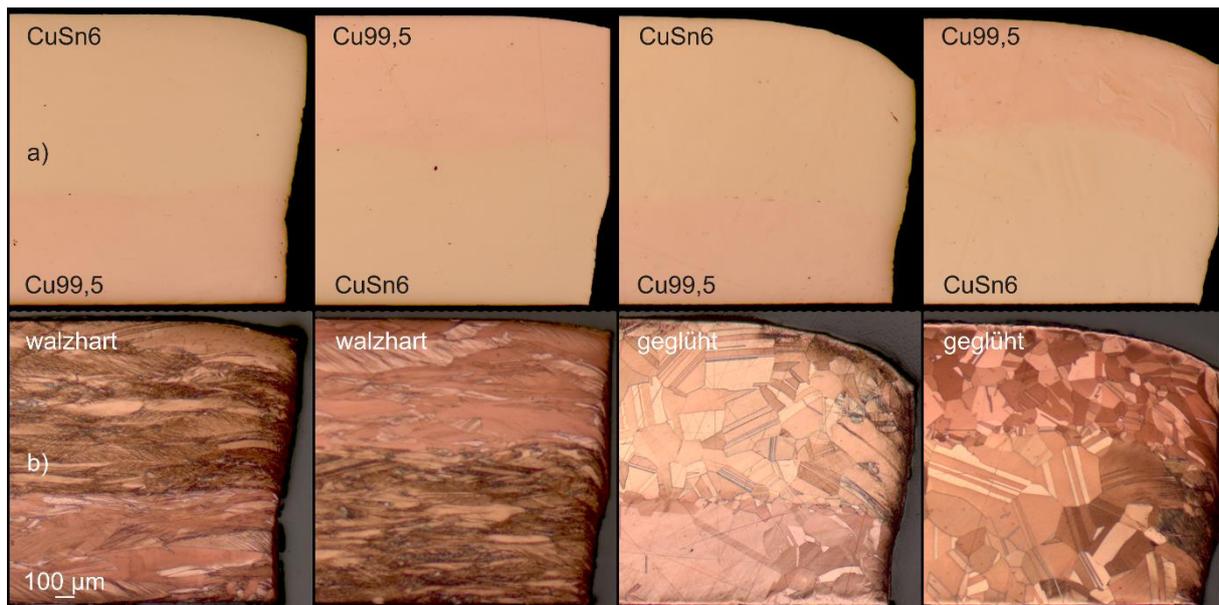


Abbildung 46: Mikrostruktur der Verbundbleche in Abhängigkeit der Schicht mit Stempelkontakt und des Wärmebehandlungszustandes (a) ungeätzt, b) geätzt nach [Mit18]

6.5 Veröffentlichung der Projektergebnisse

Die Projekthinhalte wurden in den unten aufgelisteten Fachzeitschriften, Tagungen und Ausschüssen der Fachwelt mit entsprechendem Förderhinweis auf die DBU vorgestellt. Darüber hinaus wurde das Projekt häufig bei Firmen- und Lehrstuhlbesichtigungen präsentiert. Die Ausbildung von Studierenden wurde durch die Ausfertigung von 12 Semester- bzw. Abschlussarbeiten im Rahmen des Projekts unterstützt. Die Ergebnisse aus zwei dieser Arbeiten wurden in Kurzvorträgen auf der Gießereitechnischen Tagung des BDG 2016 und 2017 präsentiert.

6.5.1 Beiträge Fachzeitschriften

- Mittler, T., Greß, T., Feistle, M., Krinninger, M., Hofmann, U., Riedle, J., Golle, R., Volk, W., 2018. Fabrication and processing of metallurgically bonded copper bimetal sheets. Journal of Materials Processing Technology, 2018.
- Greß, T., Mittler, T., Volk, W., 2018. Casting methods for the production of rotationally symmetric copper bimetals. Materials Science and Technology, 1-11.
- Mittler, T., Greß, T., Pintore, M., Volk, W., 2017. Continuous casting of copper compounds. Metall 71, 448-451.
- Mittler, T., Greß, T., Pintore, M., Volk, W., 2016. Kupfer-Hybridhalbzeuge: Gießtechnische Herstellung eines rotationssymmetrischen Schichtverbundes. Metall 70, 248-251.

6.5.2 Vorträge auf Tagungen und Ausschüssen

- Greß, T., Mittler, T., Volk, W.: Casting methods for the production of rotationally symmetric copper compounds. Copper Alloys, Mailand 2018.
- Mittler, T., Greß, T., Volk, W.: Horizontales Verbundstranggießen von Kupferwerkstoffen. 14. Kupfer-Symposium, Esslingen 2017.
- Mittler, T., Greß, T., Pintore, M.: Simulation der thermischen Verhältnisse beim Verbundstranggießen von Kupferwerkstoffen. DGM-Fachausschuss Stranggießen, Neu-Ulm 2017.
- Mittler, T., Greß, T., Pintore, M., Volk, W.: Verbundstranggießen von Kupferwerkstoffen. DGM-Fachausschuss Stranggießen, Mönchengladbach 2016.
- Mittler, T.: Berichte aus den Hochschulen – Bereich Kupferguss. BDG-Fachausschuss Kupfergusswerkstoffe, Papenburg 2015.

Darüber hinaus sind eine weitere Veröffentlichung in einer Fachzeitschrift, eine Dissertation und Vorträge auf Grundlage der erzielten Projektergebnisse geplant.

7 Fazit

Monolithische Werkstoffkonzepte kommen bei komplexen Eigenschaftsanforderungen auf engstem Bauraum schnell an ihre Grenzen. So nimmt seit Jahren die Bedeutung von metallischen Werkstoffverbunden zu, welche über eine Vielzahl von Fügeverfahren hergestellt werden. Diese Fügeverfahren sind oftmals energie- und kostenintensiv, da z. B. neben dem Fügen selbst ein zusätzlicher Prozessschritt für die Vorbereitung der Fügepartner erforderlich ist oder Fügehilfsmittel eingesetzt werden müssen. Bauteile, die in großer Stückzahl aus Halbzeugen wie Blechen, Bändern oder Bolzen gefertigt und anschließend gefügt werden, sind hiervon besonders betroffen.

Somit lässt sich speziell in der Herstellung von Werkstoffverbunden durch innovative Verfahren produktionsintegrierter Umweltschutz erfolgreich umsetzen. Ein derartiges innovatives Verfahren stellt das Verbundgießen von metallischen Werkstoffen dar. Das von der DBU geförderte Forschungsprojekt untersuchte die gießtechnische Herstellung von Verbundhalbzeugen in der Werkstoffpaarung Reinkupfer (hohe elektrische Leitfähigkeit) und Zinnbronze (gute mechanische Eigenschaften). Die Ergebnisse des Forschungsprojekts stellen eine wesentliche Grundlage für die mögliche Industrialisierung des Verfahrens dar und können wie folgt zusammengefasst werden:

- Stoffschlüssige Schichtverbunde auf Kupferbasis können sowohl mittels statischen, halbkontinuierlichen als auch kontinuierlichen Verbundgießverfahren hergestellt werden.
- Der Zustand der Substratoberfläche zum Aufgießzeitpunkt beeinflusst die Verbundqualität zwischen den Kupferwerkstoffen maßgeblich. So wird ein prozesssicheres und reproduzierbares Fügen beim statischen Verbundgießen besonders durch lokal unterschiedliche Substrattemperaturen und der starken Oxidationsneigung der Substratoberfläche erschwert. Die halbkontinuierlichen und kontinuierlichen Gießverfahren mit stationären Gleitkokillen erzielen hierbei deutlich bessere und reproduzierbare Ergebnisse hinsichtlich der sich einstellenden Verbundqualität.
- Die Verbundqualität zwischen den Kupferbasiswerkstoffen hängt bei der kontinuierlichen Herstellung im besonderen Maße von der Gießgeschwindigkeit, der Hubweite und der Aufgießdicke ab. In der Scherzugprüfung des stoffschlüssigen, bandförmigen Schichtverbundes werden bei horizontal geradlinig verlaufenden Verbundflächen maximale Bindefestigkeiten von 180 – 200 MPa erreicht. Sofern die Zinnbronze während des Verbundgießvorgangs großflächig aufschmilzt können noch höhere Bindefestigkeiten erzielt werden. Allerdings liegen hierbei eine wellige Verbundfläche und zum Teil unerwünschten Durchmischung der Werkstoffe vor.
- Die gießtechnisch hergestellten Kupferverbundbänder können erfolgreich umformtechnisch weiterverarbeitet werden. Aus dem Gießprozess resultierende, erstarrungsbedingte Mikroporosität innerhalb der Bindezone wird durch den Walzprozess beseitigt. Die gewalzten Verbund-Dünobleche lassen sich erfolgreich scherschneiden. Hierbei tritt keine Delamination der Schichten während des Schneidvorgangs auf. Die Ausprägung der Schnittflächenkenngrößen und die Höhe der Schneidkraft hängen wesentlich vom Wärmebehandlungszustand und der Schichtlage im Verbundblech ab.

Der Beitrag zum Umweltschutz, welcher sich aus einer Anwendung der alternativen Prozessroute an Stelle des Fügeverfahrens Walzplattieren ergibt, lässt sich wie folgt zusammenfassen:

- Der Energie- und Ressourceneinsatz wird durch das Entfallen von Prozessschritten zur Vor-, Zwischen- und Nachbehandlung der Fügepartner bzw. Verbunde (z. B. Entfetten, Beizen, Bürsten, Schleifen, Walzen, Wärmebehandlung) verringert.
- Der Einsatz problematischer Stoffe kann durch das Entfallen von chemischen Vorbehandlungen der Fügepartner vermieden werden.
- Verfügbare Werkstoffpotenziale können durch die Erweiterung des Spektrums der verarbeitbaren Legierungskombinationen und die Erhöhung der Verbundqualität aufgrund der Entstehung einer metallischen Bindung effizienter genutzt werden.
- Die Materialausbringung kann durch eine Verringerung des Anteils an Verschnitt bei der Verarbeitung harter, spröder und höherfester Werkstoffe, die beim Walzplattieren zur Bildung von Randrissen neigen, erhöht werden.

Eine Empfehlung für weiterführende Entwicklungs- und Forschungsarbeiten kann zudem wie folgt gegeben werden:

- Weiterentwicklung und Erprobung des vertikalen, einstufigen Verbundstranggießverfahrens im industriellen Maßstab
- Gießtechnische Werkzeug- und Prozessentwicklungen zur weiteren Minimierung von Anbindungsfehlern im Mikrobereich (Oxide, Gaseinschlüsse) und Stärkung der Verbundqualität an den Bandrändern
- Untersuchungen der Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge entlang der Wertschöpfungskette Verbundstranggießen-Walzen-Scherschneiden
- Ermittlung der minimal möglichen Verbundblechdicke (interessant insbesondere für die Verwendung als Vormaterial für Mikro-Steckverbinder und Kontaktfedern)
- Qualifizierung des Fertigteils anhand betriebsrelevanter Kenngrößen (Schwingfestigkeit der Verbundproben, Relaxationsbeständigkeit, uvm.)

8 Literaturverzeichnis

- [Abb10] Abbasi, M.; Toroghinejad, M. R.: *Effects of processing parameters on the bond strength of Cu/Cu roll-bonded strips*. Journal of Materials Processing Technology, 210, S. 560-563, 2010.
- [Beh10] Behrens, V.: *Elektrische Kontakte – Werkstoffe, Gestaltungen und Anwendungen in der Nachrichten-, Automobil- und Energietechnik*. Expert, Renningen, 3. Auflage, 2010.
- [Boe14] Bögra Technologie GmbH: *BÖGRA E-Cu*. Werkstoffdatenblatt, 2014.
- [Die67] Dies, K.: *Kupfer und Kupferlegierungen in der Technik*. Springer Verlag, 1967.
- [DIN14869] DIN EN 14869-2: *Strukturklebstoffe – Bestimmung des Scherverhaltens struktureller Klebungen – Teil 2: Scherprüfung für dicke Fügeiteile*. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth, Berlin, 2011.
- [DIN50125] DIN EN 50125: *Prüfung metallischer Werkstoffe – Zugproben*. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth, Berlin, 2009.
- [DKI04] Deutsches Kupferinstitut: *Kupfer-Zinn-Knetlegierungen (Zinnbronzen)*. Informationsdruck i.15, 2004.
- [Gre18] Greß, T., Mittler, T., Volk, W.: *Casting methods for the production of rotationally symmetric copper bimetals*. Materials Science and Technology, S. 1-11, 2018.
- [Kna78] Knauschner, A.: *Oberflächenveredeln und Plattieren von Metallen*. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1987.
- [Mit16] Mittler, T.; Greß, T.; Pintore, M.; Volk, W.: *Kupfer-Hybridhalbzeuge: Gießtechnische Herstellung eines rotationssymmetrischen Schichtverbundes*. METALL, S. 248-251, 2016.
- [Mit17] Mittler, T.; Greß, T.; Pintore, M.; Volk, W.: *Continuous casting of copper compounds*. METALL, S. 448-451, 2017.
- [Mit18] Mittler, T.; Greß, T.; Feistle, M.; Krinninger, M.; Hofmann, U.; Riedle, J.; Golle, R.; Volk, W.: *Fabrication and Processing of Metallurgically Bonded Copper Bimetal Sheets*. Journal of Materials Processing Technology, 2018.
- [Ner10] Nerl, C.; Wimmer, M.; Ridel, S.; Hoffmann, H.; Hofer, P.: *Simulationsgestützte Verfahrensentwicklung zum Verbundgießen von Aluminiumwerkstoffen*. In: Müller, H. R. (Hrsg.): *Stranggießen*. Werkstoff-Informationsgesellschaft, Frankfurt, S. 93-98, 2010.
- [Ner14a] Nerl, C.; Wimmer, M.; Hoffmann, H.; Kaschnitz, E.; Langbein, F.; Volk, W.: *Development of a continuous composite casting process for the production of bilayer aluminum strips*. Journal of Materials Science and Technology, 214, S. 1445-1455, 2014.

- [Ner14b] Nerl, C. J.: *Simulationsgestützte Verfahrensentwicklung zum kontinuierlichen Verbundgießen von Aluminiumhalbzeugen*. Dissertation, Technische Universität München, 2014.
- [Pan89] Pan, D.; Gao, K.; Yu, J.: *Cold roll bonding of bimetallic sheets and strips*. Journal of Materials Science and Technology, 5, S. 934-939, 1989.
- [Ric08] Ricken, H.: *Stranggießen mit Flüssigmetall als Wärmekopplung zwischen Kokille und Kühler*. Dissertation, Technische Universität München, 2008.
- [Sap15] Sapanathan, T.; Ibrahim, R.; Khoddam, S.; Zahiri, S. H.: *Shear blanking test of a mechanically bonded aluminium/copper composite using experimental and numerical methods*. Materials Science and Engineering A, 623, S. 153-164, 2015.
- [Wim15] Wimmer, M.: *Horizontales Stranggießen von Aluminium-Verbundbändern*. Dissertation, Technische Universität München, 2015.