

# Simulationsgestützte Prozessoptimierung eines laserbasierten Mikroschweißverfahrens

**Andreas Patschger<sup>1</sup>, Tobias Loose<sup>2</sup> und Jens Bliedtner<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> *Ernst-Abbe-Fachhochschule Jena, Carl-Zeiss-Promenade 2, 07745 Jena, Deutschland  
E-Mail: Andreas.Patschger@fh-jena.de*

<sup>2</sup> *Ingenieurbüro Tobias Loose, Herdweg 13, 75045 Wössingen (Lkr. Karlsruhe), Deutschland  
E-Mail: loose@tl-ing.de*

## ZUSAMMENFASSUNG

In einem Forschungsvorhaben mit dem Ziel einer industriellen Anwendung soll die Umhüllung eines Vakuumisulationspanels aus ultra-dünnen CrNi-Stahl-Folien erfolgen. Zur vakuumdichten Versiegelung des Panels wird ein Laserstrahlfügeverfahren eingesetzt. Dabei stellt das laserbasierte Mikroschweißen aufgrund der geringen Materialstärken von  $\leq 50 \mu\text{m}$  hohe Anforderungen an die Prozessführung. Um die Fügepartner prozesssicher im Überlappstoß zu verschweißen, ist eine Optimierung der Prozessgrößen notwendig.

Die vom Laserstrahl transportierte Energie wird partiell absorbiert und in Wärme umgewandelt. Dabei treten durch Wärmeleitung in das Bauteil Verluste auf, die dem eigentlichen Prozess entzogen werden. Die minimale Materialstärke der Stahlfolie, die prozessbedingte Einspannlänge und die immanente Nachgiebigkeit der Spannmittel resultieren in einer verminderten Struktursteifigkeit des Gesamtsystems, das nur geringe Druckspannungen aufnehmen kann. Während des Abkühlens des Bauteils treten Druckeigenstressungen auf und führen zum Ausbeulen der Folien. Der thermisch induzierte Verzug hat eine Spaltbildung zwischen den Fügepartnern zur Folge.

Mit steigenden Wärmeleitungsverlusten wachsen der Verzug und damit der Füge-spalt, die zum Prozessabbruch führen. Daraus ergibt sich ein unmittelbarer Einfluss auf den Fügeprozess, der sehr empfindlich auf eine vertikale Relativverschiebung der Folien reagiert. Daher müssen die Wärmeleitungsverluste und der daraus resultierende Verzug minimiert werden.

Die Péclet-Zahl ist ein Maß für den relativen Anteil der Wärmeleitungsverluste am Laserbearbeitungsprozess und dadurch mit dem thermischen Wirkungsgrad verknüpft. Die gewählten Prozessgrößen bestimmen die Péclet-Zahl und sind deswegen entscheidend für die Prozesssicherheit und Verbindungsfähigkeit.

Um deren Einfluss zu qualifizieren, werden die Prozessgrößen variiert und die Prozesseffizienz in Abhängigkeit der Péclet-Zahl untersucht. Dabei wird die experimentelle Analyse durch eine Schweißstruktursimulation unterstützt, welche die Berechnung des globalen Temperaturfeldes, der Eigenstressungen und des Verzuges ermöglicht. Die Verbindung von experimenteller Analyse und Schweißstruktursimulation soll helfen, den Mikrofügeprozess robust auszulegen.

Die verwendeten Bauteilgeometrien stellen eine besondere Herausforderung für die Simulation dar. Aus der Temperaturfeldberechnung kann der Wärmeeintrag in das Bauteil abgeleitet und der erwärmte Bereich abgeschätzt werden. Beides ist für die Verzugsentstehung ausschlaggebend.

## 1 Einleitung

Das ZIM-Verbundprojekt „CroNiVIP“ (VP3018201AG2) hat die Entwicklung einer neuen Generation innovativer Dämmtechnik zum Inhalt. Das übergeordnete Ziel besteht in der Entwicklung neuartiger Vakuumisulationspaneelle (VIP) mit einer dünnen, rein metallischen Hülle aus CrNi-Stahlfolie, die einerseits höchste Dämmungseigenschaften aufweisen und andererseits hohe Anforderungen an die Temperaturstabilität erfüllen.

Durch die Substitution des konventionellen Hüllenmaterials, bestehend aus einer Kunststoffverbundfolie, mit einer CrNi-Stahlfolie wird die mögliche Einsatztemperatur weit über die bisherige Obergrenze von 80 °C ausgedehnt.

Dieses neue Eigenschaftsprofil erweitert die bestehende Produktpalette und bietet so die Möglichkeit neue Marktsegmente zu erschließen. Anwendungsgebiete für die neuartigen Hochleistungspaneelle finden sich beispielsweise bei solarthermischen Applikationen, in der Kryotechnik, bei Ofenisolationen und in Brandschutz sensiblen Bereichen. [Projektbeschreibung CroNiVIP, 2012]

Die vakuumdichte Versiegelung des VIPs soll mittels Laserstrahlfügeverfahren erfolgen. Hierfür eignet sich ein scannerbasiertes Remote-Verfahren, das sowohl die Prozessgeschwindigkeit garantieren als auch den Arbeitsraum abdecken kann. Da das Laserstrahlschweißen trotz seiner hohen Effizienz ein thermisches Verfahren bleibt, werden während der Bearbeitung Anteile der eingestrahnten Energie in das Bauteil abgeleitet. Dadurch wird ein Verzug thermisch induziert, der eine Spaltbildung zwischen den Fügepartnern zur Folge hat. In [Thomy et al., 2010] wird deutlich, dass der thermisch induzierte Verzug  $\Delta z$  bei abnehmender Werkstückdicke  $d$  und skaliertener Streckenenergie mit einer Potenzfunktion anwächst.

$$\Delta z = \frac{1}{d^3} \quad (1)$$

Das bedeutet, dass bei den avisierten Foliendicken von  $\leq 50 \mu\text{m}$  die Gefahr eines Prozessabbruchs durch einen nicht überbrückbaren Fügespalt besteht und minimiert werden muss. Dies kann durch eine angepasste Prozessführung erreicht werden. In [Beyer, 1996] wird deutlich, dass die Wärmeverluste sehr gut in Abhängigkeit von der Péclet-Zahl beschrieben werden können. Damit ergibt sich der thermische Wirkungsgrad aus [Patschger et al., 2013] mit:

$$\eta_{th} = \frac{1}{1 + \left(\frac{Pe}{2}\right)^{-0,7}} \quad (2)$$

Zusammen mit dem Einkoppelgrad  $\eta_{abs}$  bildet der thermische Wirkungsgrad den Prozesswirkungsgrad  $\eta_{Proc}$ :

$$\eta_{Proc} = \eta_{th} \cdot \eta_{abs} \quad (3)$$

Der Einkoppelgrad wird im Tiefschweißen durch den Absorptionsgrad  $A$  und das Aspektverhältnis  $A_R$  bestimmt. [Dausinger, 1995]

$$\eta_{abs} = A \cdot \frac{1 + (1 - A) \cdot \left[ \frac{1}{2A_R} - \left( \frac{1}{2A_R} \right)^2 \right]}{A \cdot \left( 1 - \frac{1}{2A_R} \right) + \frac{1}{2A_R}} \quad (4)$$

Aus Formel 2 ergibt sich die Notwendigkeit, den Prozess mit einer entsprechend großen Péclet-Zahl zu gestalten. Diese setzt sich aus der Vorschubgeschwindigkeit  $v$ , der Schweißnahtbreite  $b$  und der Temperaturleitfähigkeit  $\kappa$  zusammen [Poprawe et al., 2004]:

$$Pe = \frac{v \cdot b}{\kappa} \quad (5)$$

Mit einem zumeist vorgegebenem Werkstoff und der damit definierten Temperaturleitfähigkeit  $\kappa$  können entweder der Fokusbereich sowie die Schweißnahtbreite  $b$  oder die Vorschubgeschwindigkeit  $v$  erhöht werden, um die Péclet-Zahl und den Prozesswirkungsgrad zu steigern. Für Mikroschweißnähte findet die Erhöhung des Fokusbereichs ihre Grenze in den minimal erzielbaren Aspektverhältnissen, während die Geschwindigkeit bis zur Humpinggrenze beliebig gesteigert werden kann. Eine hohe Geschwindigkeit setzt eine hohe Leistung voraus. Werden die Wärmeleitungsverluste abgezogen, skaliert die Leistung linear mit der Geschwindigkeit.

Um den Unterschied der Wärmeleitungsverluste bei verschiedenen Vorschubgeschwindigkeiten zu verdeutlichen, werden zwei Lasermaterialbearbeitungssysteme eingesetzt, die sich deutlich in ihrem Leistungsbereich und damit in den erreichbaren Geschwindigkeiten unterscheiden.

## 2 Experimenteller Versuchsteil

### 2.1 Versuchsaufbau und verwendete Materialien

Es kamen ein Scheibenlasersystem der Fa. PRENOVATEK sowie ein Faserlasersystem der Fa. JENOPTIK zum Einsatz. Beide waren mit einer Strahlableitkeineinheit von RAYLASE ausgestattet. Im Folgenden sind die technischen Daten dargestellt:

**Tabelle 1: Technische Daten der Lasermaterialbearbeitungssysteme**

		PRENOVATEK NovaDisc-P5	JENOPTIK
System	-	Scheibenlaser	Faserlaser
Max. Leistung	W	40	1000
Wellenlänge	nm	1030	1070
Beugungsmaßzahl $M^2$	-	1,2 [Strocka et al., 2012]	1,15 [Patschger et al., 2012]
Strahlableitkeineinheit	-	RAYLASE Superscan-20	RAYLASE Superscan-LD30
Brennweite	mm	160	100
Fokusbereich	$\mu\text{m}$	25 [Strocka et al., 2012]	22 [Patschger et al., 2012]

Beide Systeme sind in der Wellenlänge, Strahlqualität und Fokusbereich vergleichbar. Daher kann davon ausgegangen werden, dass die Ergebnisse nicht durch unterschiedliche Absorptionsgrade oder Intensitätsverteilungen beeinflusst sind.

Die Untersuchungen wurden an kaltgewalzten CrNi-Stahlfolien (1.4301) in Dicken von 25 und 50  $\mu\text{m}$  durchgeführt. Für die Bestimmung der Péclet-Zahl nach Gleichung 5 wurde die Temperaturleitfähigkeit an ebenfalls kaltgewalzten Feinblechen in einer Stärke von 500  $\mu\text{m}$  mit einem LINSEIS XFA 500 im Temperaturbereich bis 500 °C gemessen (siehe Abbildung 1).

Eine geringere Materialstärke konnte aufgrund des Messverfahrens nicht verwendet werden. Die Probenkörper wurden von demselben Zulieferer bezogen. Allen in Abbildung 1 dargestellten Datenpunkten liegen 3 Messwerte zugrunde. Das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  der Regressionsgerade beträgt 97%. In [Swift-Hook und Gick, 1973] wird vorgeschlagen, dass für den betrachteten

Temperaturbereich  $T_{Umgebung} < T < T_{Schmelz}$  ein Mittelwert verwendet wird. Durch Extrapolation mittels der Regressionsgleichung ergibt sich ein Wert von  $0,0463 \text{ cm}^2/\text{s}$  für die Temperaturleitfähigkeit bei einer mittleren Prozesstemperatur von  $715 \text{ }^\circ\text{C}$ .

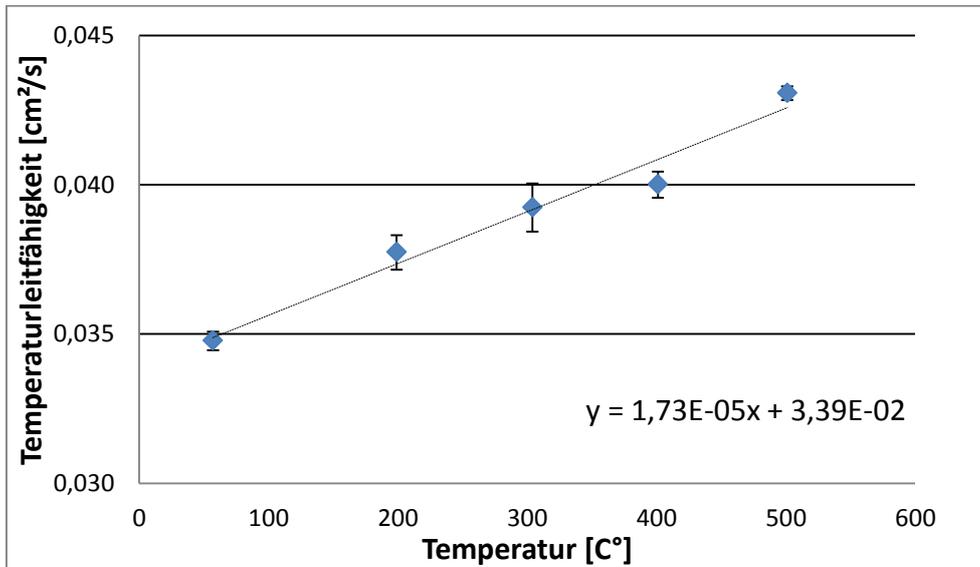


Abbildung 1: Temperaturleitfähigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur

Die Nahtlänge betrug ca. 30 mm und zum Spannen der Fügepartner diente eine Vorrichtung aus Aluminium mit einer Einspannlänge von ca. 6-8 mm.

## 2.2 Design und Auswertung der experimentellen Versuche

Mit dem Ziel, die theoretisch erreichbare Einschweißtiefe bei einer Durchschweißung konstant zu halten, werden zur Auswertung der Untersuchungen nur Daten in Betracht gezogen, die an der unteren Prozessgrenze gewonnen wurden (siehe Abbildung 2).

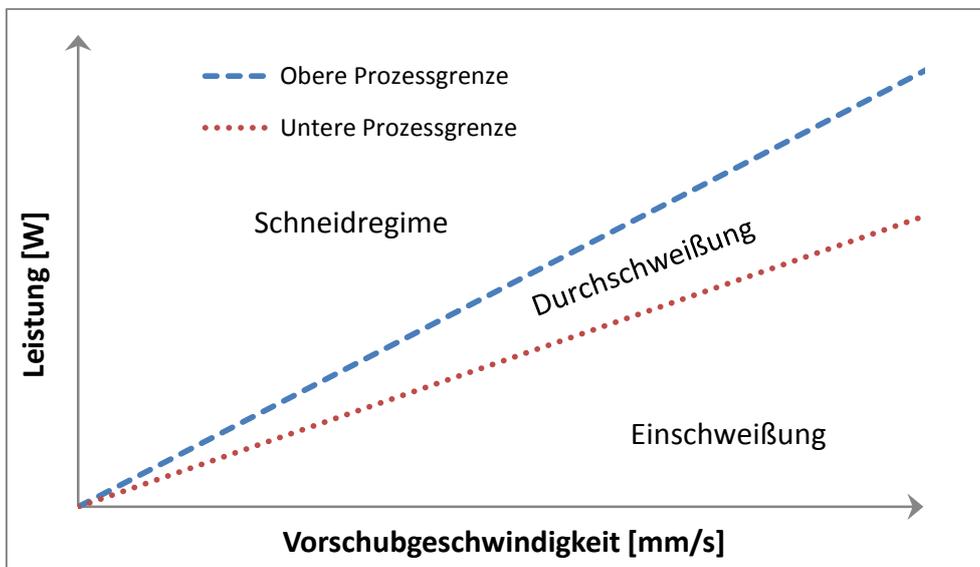


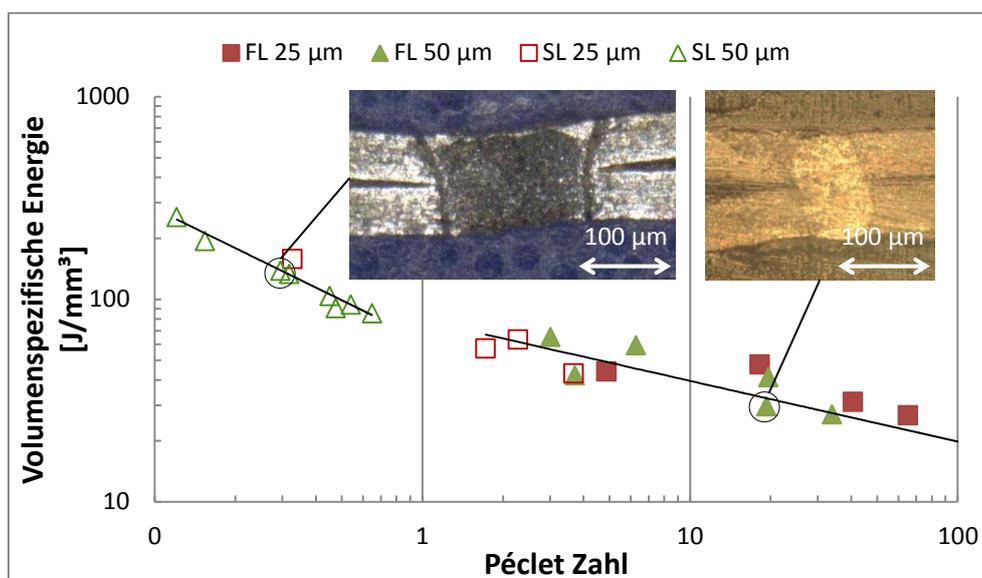
Abbildung 2: Vereinfachtes Schema zum Prozessfenster

Das bedeutet, dass bei konstanter Leistung die Geschwindigkeit soweit erhöht wurde, bis gerade noch eine durchgängige Nahtwurzel zu erkennen war. Dieser Vorgang wurde bei verschiedenen Leistungsstufen wiederholt und somit das Leistungsspektrum komplett abgedeckt.

Mit der Vereinbarung, dass die untere Prozessgrenze gleichbedeutend mit einer konstanten Einschweißtiefe ist, ergibt sich bei nahezu gleichem Fokussdurchmesser dasselbe Aspektverhältnis und somit derselbe Einkoppelgrad für die Versuche mit gleicher Foliendicke. Ein konstanter Einkoppelgrad lässt direkt von Prozesswirkungsgrad auf thermischen Wirkungsgrad schließen (siehe Gleichung 3).

### 2.3 Ergebnisse und Diskussion

Die volumenspezifische Energie ist ein probates Mittel, um den Prozesswirkungsgrad zu bestimmen. Da bei vorliegenden Versuchsreihen der Einkoppelgrad für die jeweilige Foliendicke näherungsweise als konstant angesehen werden kann, lässt sich direkt vom Prozesswirkungsgrad auf den thermischen Wirkungsgrad schließen.



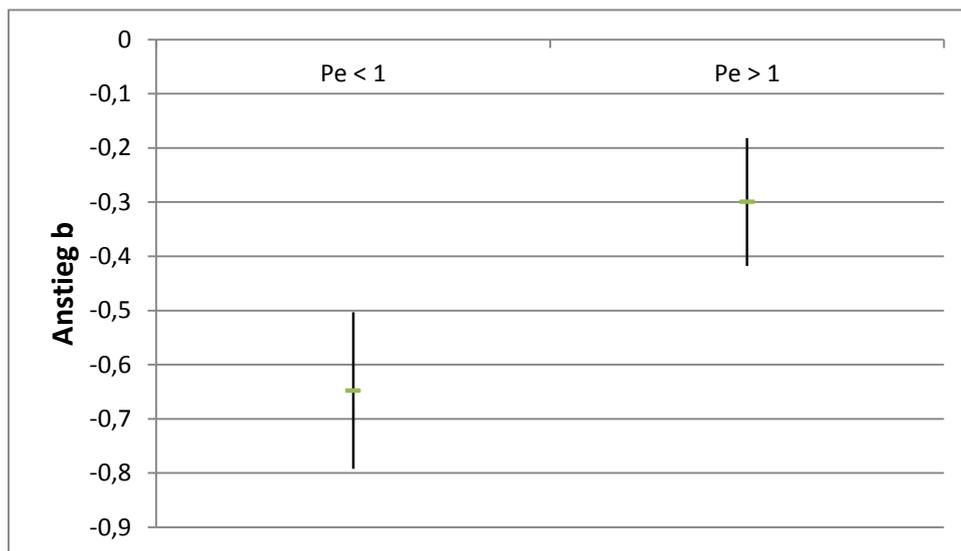
**Abbildung 3: Volumenspezifische Energie in Abhängigkeit von der Péclet-Zahl**

Abbildung 3 zeigt die volumenspezifische Energie in Abhängigkeit von der Péclet-Zahl für Foliendicken von 25 µm und 50 µm geschweißt mit dem Faserlaser- (FL) und dem Scheibenlaser-System (SL). Die volumenspezifische Energie wird stetig kleiner mit steigender Péclet-Zahl. Das bedeutet, dass immer weniger Energie durch den Laser eingebracht werden muss, um dasselbe Volumen aufzuschmelzen. Der thermische Wirkungsgrad wächst also mit größer werdender Péclet-Zahl.

Durch die doppelt-logarithmische Darstellung in Abbildung 3 werden die aufgetragenen Funktionen graphisch transformiert. Eine Potenzfunktion bildet eine Gerade. Damit kann eine solche Darstellung gleichzeitig als Test auf eine Potenzfunktion genutzt werden. [Stöcker, 2009] In Abbildung 2 zeigt sich genau dieses Verhalten mit dem bemerkenswerten Zusatz, dass sich in Abhängigkeit von der Péclet-Zahl zwei Regimes ausbilden, die unterschiedlichen thermischen Wirkungsgraden unterliegen. Aus der Abbildung 3 lässt sich ableiten, dass die Grenze zwischen den Regimes bei einer Péclet-Zahl von ca. 1 liegt. Um diese Aussage zu überprüfen, werden die Ergebnisse einer statistischen Regressionsanalyse unterzogen:

**Tabelle 2: Ergebnisse der Regressionsanalyse**

	$Pe < 1$	$Pe > 1$
Bestimmtheitsmaß $R^2$	0,9434	0,7272
Anstieg $b$	-0,64772	-0,2997
$P$ -value für $b$	<0,001	<0,001
obere Grenze 95% Vertrauensbereich für $b$	-0,50587	-0,1843
untere Grenze 95% Vertrauensbereich für $b$	-0,78958	-0,4152
Schnittpunkt $a$	63,1361	78,884



**Abbildung 4: Anstieg der Regressionsgeraden mit 95%-Vertrauensbereich für unterschiedliche Bereiche der Péclet-Zahl**

Aus Abbildung 4 wird deutlich, dass sich die Vertrauensbereiche der Anstiege der Regressionsgeraden für Péclet-Zahlen größer 1 und kleiner 1 nicht überlappen. Ein statistischer Vergleich der Anstiege über die Nullhypothese liefert einen Signifikanzwert ( $P$ -value) von <0,001. Daher muss die Nullhypothese zur Gleichheit der Anstiege abgelehnt werden. Die Anstiege sind damit statistisch signifikant verschieden. Das bedeutet, dass für Bereiche der Péclet-Zahl größer bzw. kleiner 1 die Wärmeverluste unterschiedlichen Abhängigkeiten bzw. Anstiegen unterliegen. [Dausinger, 1995] gibt unterschiedliche, theoretisch ermittelte Bereiche des thermischen Wirkungsgrades für die Péclet-Zahl nach Gleichung 5 mit  $Pe < 0,6$ ,  $0,6 < Pe < 12$  und  $Pe > 12$  an. Bei einer Péclet-Zahl größer 12 erreicht der thermische Wirkungsgrad einen maximalen theoretischen Wert von 48%.

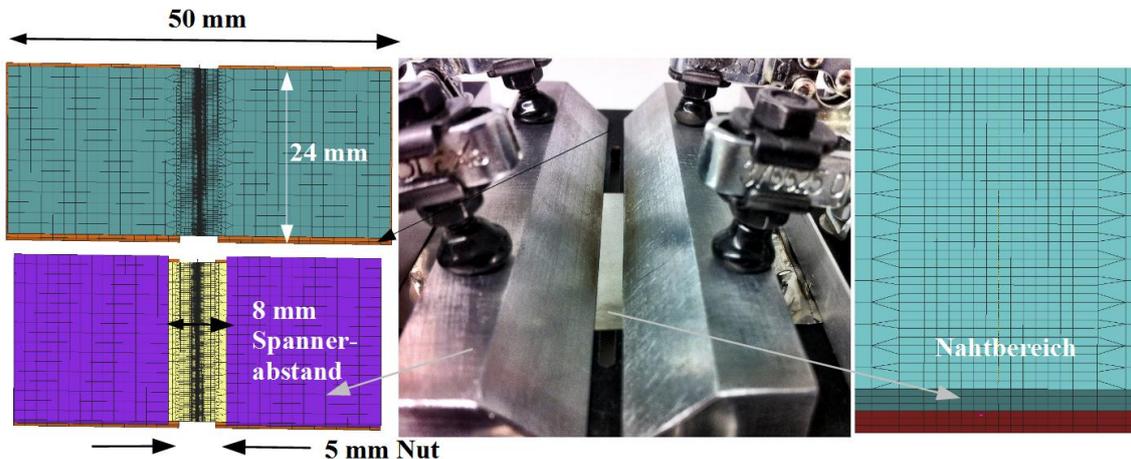
### 3 Simulativer Versuchsteil

#### 3.1 Modellierung

Für die Simulation wurde aus beiden Regimes jeweils eine Probe der 50  $\mu\text{m}$  Folienverbindungen an der unteren Prozessgrenze ausgewählt (siehe Abb. 3). Beide unterscheiden sich deutlich in den erreichten Péclet-Zahlen (siehe Tabelle 3).

**Tabelle 3: Prozessgrößen der verwendeten Proben**

		PRENOVATEC NovaDisc-P5	JENOPTIK
System	-	Scheibenlaser	Faserlaser
Folienstärke	µm	2 x 50	2 x 50
Leistung (Bearbeitungsebene)	W	16,9	300
Vorschubgeschwindigkeit	mm/s	7,5	1300
Nominelle Streckenenergie	J/mm	2,25	0,23
Péclet-Zahl $Pe$	-	0,32	19,3



**Abbildung 5: Versuchsaufbau mit Spannvorrichtung und Finite-Element-Modell für die transiente Berechnung**

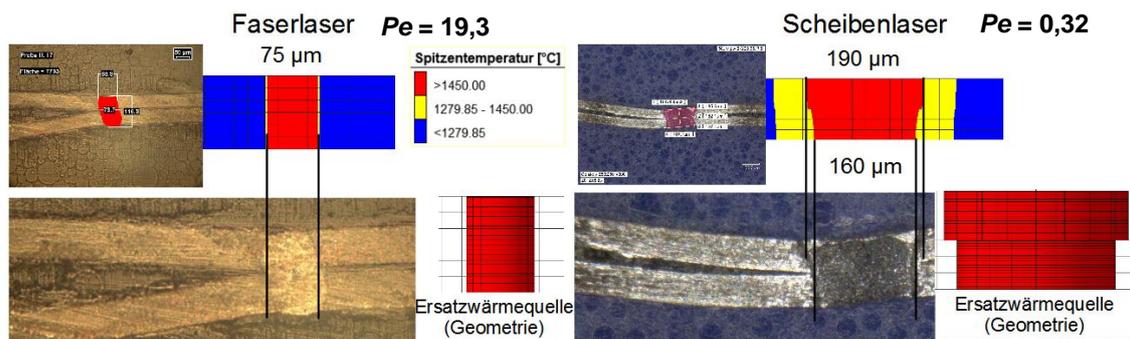
Abbildung 5 zeigt die Spannsituation beim Versuchsaufbau und die gewählte Nachbildung im Finite-Element-Modell mit 3D Volumenelementen. Der Nahtbereich wird mit drei Elementen über die Blechdicke und einer Elementkantenlänge von  $20\ \mu\text{m}$  vernetzt. Der Nahtfernabereich hingegen weist eine Vernetzung mit einem Element über die Blechdicke und einer Elementkantenlänge von  $1500\ \mu\text{m}$  auf. Daraus ergibt sich eine Modellgröße von 152.410 Elementen. Der Wärmeübergang zwischen Auflager der Spannvorrichtung und Folie sowie Spannelement und Folie wird mit  $100\ \text{W}/(\text{m}^2\text{K})$  angenommen. Währenddessen erhält der Wärmeübergang zur Umgebungsatmosphäre einen Wert von  $20\ \text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ . Die Schweißstruktursimulation wurde mit simufact.welding Version 3.1.0 und 3.1.1 unter Verwendung des simuact MARC Solvers durchgeführt.

Für die Temperaturfeldberechnung wird der Materialdatensatz von simufact.material 2012, X5CrNi18-10-sw, basierend auf der Dissertation von [Voß, 2001] verwendet, bei dem die Werte für die Wärmeleitfähigkeit modifiziert werden. Grundlage hierfür bilden Messungen zur Temperatur- und Wärmeleitfähigkeit im Temperaturbereich von  $57\ ^\circ\text{C}$  bis  $501\ ^\circ\text{C}$  (siehe Abbildung 1). Die Stützstellen  $20\ ^\circ\text{C}$  und  $1500\ ^\circ\text{C}$  werden durch Extrapolation bestimmt.

Der Wärmeeintrag wird nicht simuliert, sondern als Eingangsgröße vorgegeben und erfolgt über eine Ersatzwärmequelle. Diese wird dahingehend ausgelegt, dass sich der gleiche Wärmeeintrag ergibt wie in den experimentellen Versuchen. Die Leistungsdaten der Laserquelle allein sind dabei nicht hinreichend, weil die realen Verluste durch Wärmeleitung, Reflexion usw. unbekannt sind. Mit der Methode des Schliffbildabgleiches wird der Gesamtwärmeeintrag in das Blech durch Iteration bestimmt, indem dieser so lange variiert wird, bis die Temperaturfeldberechnung den gleichen Schmelzbadquerschnitt zum Ergebnis hat wie das Schliffbild.

Beim Schweißen mit dem Faserlasersystem entsteht eine Naht mit parallelen Flanken. Als Ersatzwärmequelle dient hier ein Zylinder mit dem Radius  $r = 35 \mu\text{m}$  und der Höhe  $h = 100 \mu\text{m}$ . Der Wärmeeintrag folgt einer gaußförmigen Verteilung über der Stirnseite des Zylinders, während ein konstanter Wärmeeintragsverlauf über die Zylindertiefe gewählt wurde.

Als Ergebnis des Schweißversuches mit dem Scheibenlasersystem bildet sich ein Schmelzbadverlauf, der im oberen Blech im Querschnitt trapezförmig und im unteren Blech im Querschnitt parallel ist. Als Ersatzwärmequelle werden in diesem Fall zwei Zylinder gewählt. Der obere, dem Laserstrahl zugewandte Zylinder hat einen Radius  $r = 93 \mu\text{m}$  und eine Höhe  $h = 50 \mu\text{m}$ , während der untere Zylinder mit einem Radius  $r = 80 \mu\text{m}$  und eine Höhe  $h = 50 \mu\text{m}$  definiert ist. Der Wärmeeintrag des oberen und des unteren Zylinders beträgt 68 % bzw. 32 % des Gesamtwärmeeintrages.



**Abbildung 6: Schliffbildabgleich für die beiden Proben**

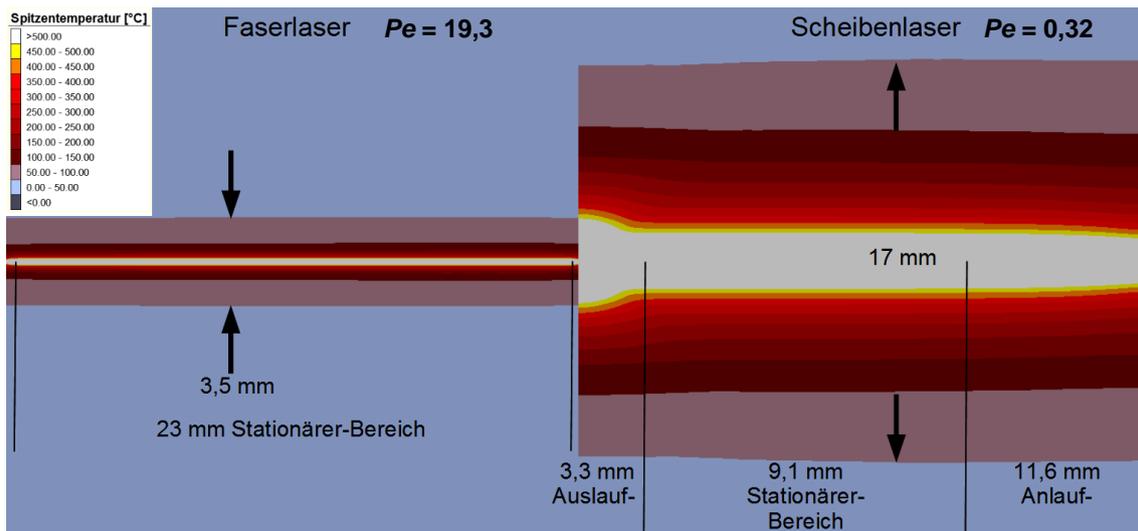
Abbildung 6 zeigt den Schliffbildabgleich links für die mit dem Faserlasersystem ( $Pe = 19,3$ ) und rechts für die mit dem Scheibenlasersystem ( $Pe = 0,32$ ) geschweißte Probe. Aus dem Schliffbildabgleich ergeben sich die beiden Ersatzwärmequellen.

### 3.2 Ergebnisse der Temperaturfeldberechnung

In Abbildung 7 ist die für den Schweißprozess simulierte Maximaltemperatur in einer Temperaturauflösung bis  $500 \text{ }^\circ\text{C}$  an der Oberfläche der Schweißprobe dargestellt. Im Ergebnis der Simulation für den Scheibenlaserschweißprozess mit niedriger Péclet-Zahl und daher hoher Streckenenergie sind deutlich drei Bereiche zu erkennen: Anlauf-, stationärer und Auslaufbereich. Der Anlaufbereich ist dadurch gekennzeichnet, dass mehr Wärme in das raumtemperierte Bauteil abgeleitet wird, als über die Oberflächen abgegeben werden kann. Das Bauteil erwärmt sich dadurch immer weiter und die Isothermen höherer Temperatur breiten sich aus.

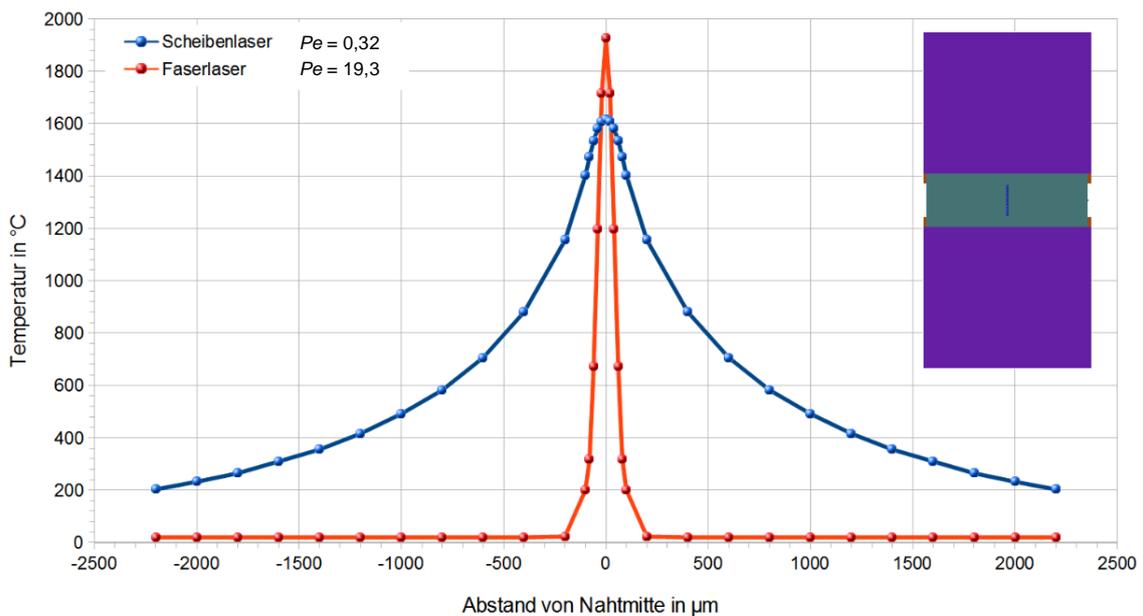
Im stationären Bereich herrscht ein Gleichgewicht zwischen eingetragener und abgegebener Energie. Die Isothermen höherer Temperaturen verlaufen parallel zur Naht. Dies ist der Bereich, in dem der Schweißprozess stabil und gleichmäßig abläuft. Der Wärmefluss, der nicht nur lateral zur Naht verläuft, sondern auch in Vorschubrichtung, verursacht im Auslaufbereich am Probenende dadurch einen Wärmestau. Die Isothermen höherer Temperaturen dehnen sich weiter aus. In diesem Bereich ist die Prozessstabilität gefährdet, da ein zu geringes Aspektverhältnis der Schweißnaht zum Durchsacken der Schmelze führt und einen Einbrand generiert.

In der Simulation für den Faserlaserschweißprozess mit niedrigen Streckenenergien ist der An- und Auslauf-Bereich mit  $0,5$  und  $0,5$  mm sehr gering, während dieser beim Scheibenlaser mit  $11,6$  mm und  $3,6$  mm deutlich größer ist.



**Abbildung 7: Maximaltemperatur im Schweißprozess**

Die Wärmeausbreitung, gemessen an der Breite der 50 °C-Isotherme, ist mit 3,5 mm beim Schweißprozess mit einer Péclet-Zahl von 19,3 wesentlich geringer als mit der deutlich kleineren Péclet-Zahl. Hier beträgt die Breite der 50 °C-Isotherme 17 mm. Dieser Bereich wird als Wärmezone bezeichnet und beeinflusst maßgeblich die Ausbeulung [Vollertsen et al., 2007]. Je geringer die Wärmezone ist, umso geringer sind auch die Eigenkräfte, also die über die Querschnittfläche integrierten Zug- und Druckeigenstressungen. Die Druckeigenkräfte wiederum können bei Erreichen der kritischen Größe Beulen und damit Verformungen senkrecht zur Foliendicke hervorrufen, die aufgrund der daraus resultierenden Spaltbildung zwischen den Fügepartnern zum Prozessabbruch führen.



**Abbildung 8: Temperaturprofil beim Fokusedurchgang in Folienmitte**

In Abbildung 8 ist das Temperaturprofil der Wärmezone quer zur Naht während der Passage des Laserstrahls für beide Proben dargestellt. Für eine hohe Péclet-Zahl (Faserlaser) ergibt sich eine

schmale Begrenzung des erwärmten Bereiches mit einem großen Temperaturgradienten quer zur Naht während der erwärmte Bereich bei einer geringen Péclet-Zahl (Scheibenlaser) wesentlich breiter mit einem kleinen Temperaturgradienten ausfällt.

Das Temperatur-Integral ist die über eine Referenzlänge integrierte Temperatur. Im vorliegenden Fall ist die Referenzlänge ein Abschnitt an der Probenoberfläche quer zur Schweißnaht auf der Höhe der Fokuslinie. Das Temperatur-Integral der in Abbildung 8 gezeigten Kurven kann ebenfalls als Maß für die eingebrachte Energie betrachtet werden.

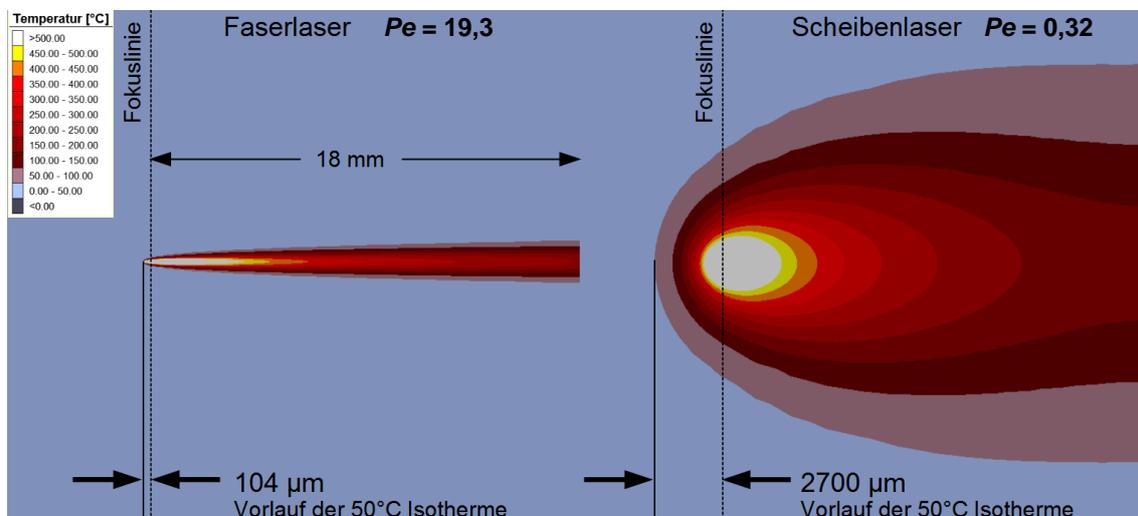
Das Gesamt-Temperatur-Integral ergibt sich über den gesamten erwärmten Abschnitt innerhalb der 50 °C Isotherme. Das Schmelzbad-Temperatur-Integral hingegen wird nur über dem Abschnitt innerhalb der 1500 °C Isotherme gebildet.

Der eigentliche Schweißprozess beschränkt sich auf das Aufschmelzen des Werkstoffes innerhalb des Nahtquerschnitts. Die Erwärmung der Bereiche daneben entzieht dem Fügeprozess Energie und kann daher als Verlustwärme betrachtet werden. Wird die Erwärmung in der Fügezone ins Verhältnis zur Gesamterwärmung gesetzt, resultiert daraus der lokale oder thermische Wirkungsgrad.

Der thermische Wirkungsgrad kann über das Temperatur-Integral beschrieben werden, in dem das Schmelzbad-Temperatur-Integral zum Gesamt-Temperatur-Integral ins Verhältnis gesetzt wird. Tabelle 4 stellt diese Werte für die untersuchten Prozesse gegenüber. Es zeigt sich deutlich der wesentlich höhere thermische Wirkungsgrad für eine große Péclet-Zahl. Hierbei bleibt die Erwärmung auf die Fügezone konzentriert.

**Tabelle 4: Temperatur-Integral und thermischer Wirkungsgrad**

		PRENOVATEC NovaDisc-P5	JENOPTIK
System	-	Scheibenlaser	Faserlaser
Péclet-Zahl	-	0,32	19,3
Gesamt-Temperatur-Integral	Kmm	3025	214
Schmelzbad-Temperatur-Integral	Kmm	276	129
thermischer Wirkungsgrad	-	0,0912	0,606



**Abbildung 9: Temperaturfeld beim Fokusedurchgang 18 mm (75%) vom Folienanfang**

Das Temperaturfeld zu dem Zeitpunkt, an dem der Brennfleck 75% der simulierten Nahtlänge erreicht, ist in Abbildung 9 dargestellt. Auch ist hier erkennbar, dass der Schweißprozess mit einer Péclet-Zahl von 19,3 ein sehr schmales Temperaturband mit einem langgestrecktem Schmelzbad erzeugt, während beim Schweißprozess mit der kleinen Péclet-Zahl ein breites Temperaturband mit eher gedrunenen, elliptischen Isothermen entsteht.

Eine weitere bemerkenswerte Beobachtung beschreibt das Vorauslaufen des Temperaturfeldes. Während die 50 °C-Isotherme beim Schweißprozess mit  $Pe = 19,3$  lediglich 104  $\mu\text{m}$ , also das 1,5-fache des Ersatzwärmequellendurchmessers, vor dem Fokuspunkt verläuft, beträgt dieser Abstand beim Schweißprozess mit  $Pe = 0,32$  2700  $\mu\text{m}$ . Dies verdeutlicht das grundsätzlich unterschiedliche Verhalten der Wärmeableitung vom eigentlichen Schweißprozess. Mit Einsatz von hohen Leistungen ist die Prozessgeschwindigkeit größer als die Wärmeleitungsgeschwindigkeit. Ein vorauslaufendes Temperaturfeld existiert dabei quasi nicht. Das führt zu einer Wärmeableitung ausschließlich quer zur Naht und damit zu einer lateral verlaufenden Wärmefront. Mit niedriger Leistung stellt sich ein Gleichgewicht zwischen vorauslaufendem Temperaturfeld und Schweißgeschwindigkeit ein. Letztere ist hinreichend klein, sodass eine transversale und laterale Wärmefront entstehen kann.

Derselbe Effekt ist auch aus den Temperatur-Zeitverläufen erkennbar, die für diskrete Punkte quer zur Naht in Abbildung 10 dargestellt ist. Der Brennfleck passiert bei  $t = 0$  s. Bei einer Péclet-Zahl von 0,32 (SL - durchgängige Linie) erfolgt der Temperaturanstieg vor dem Fokuspunkt und hat einen gemäßigten Gradienten. Für eine Péclet-Zahl von 19,3 (FL - gestrichelte Linie) hingegen ist vor dem Fokuspunkt fast kein Temperaturanstieg zu beobachten. Die Temperatur steigt erst beim Fokuspunkt mit einer steilen Flanke an. Dieser Temperaturverlauf in Nahtmitte ist vergleichbar einer Schockwelle (thermischer Schock).

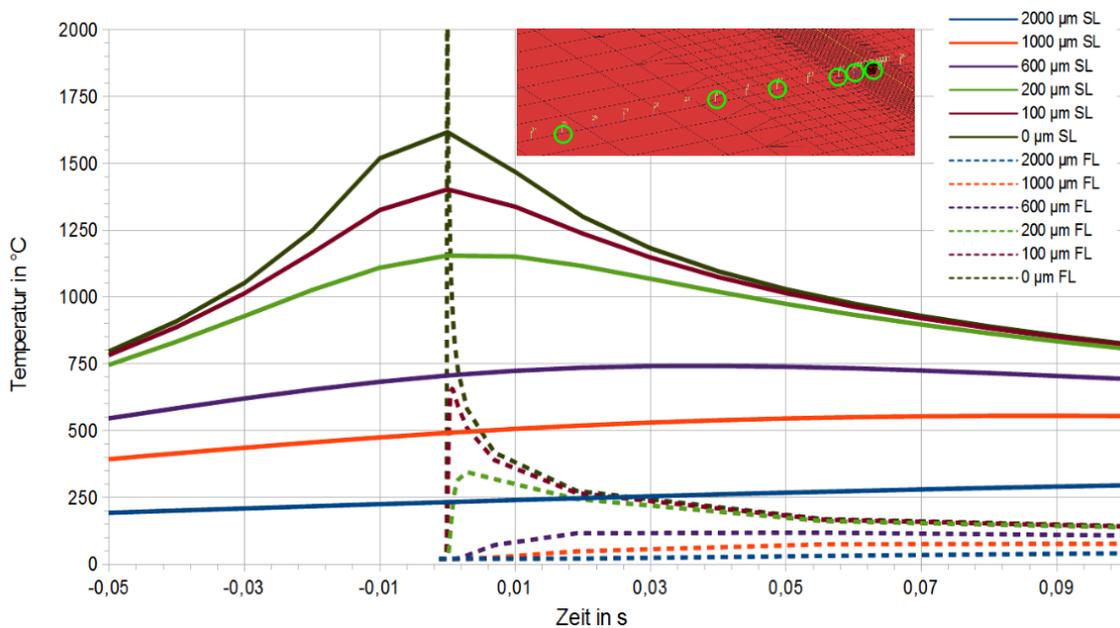


Abbildung 10: Temperaturverlauf querab zur Naht in Folienmitte

#### 4 Schlussfolgerungen

Für eine prozesssichere Fertigung ist darauf zu achten, dass Störgrößen wie die Spaltbildung aufgrund des thermischen Verzugs minimiert werden. Der Verzug wird durch Eigenspannungen hervorgerufen, die mit der Breite der Wärmezone skalieren. Daher sind kleine Wärmezonen, die mit großen Péclet-Zahlen bzw. hohen Prozessgeschwindigkeiten erreicht werden, vorzuziehen.

Anhand von Durchschweißungen an der unteren Prozessgrenze für Überlappverbindungen von  $2 \times 25 \mu\text{m}$  und  $2 \times 50 \mu\text{m}$  CrNi-Stahlfolien konnte gezeigt werden, dass die zum Aufschmelzen einer Volumeneinheit eingesetzte Energie mit steigender Péclet-Zahl abnimmt und währenddessen unterschiedlichen Wirkungsgradregimes folgt.

Bei vergleichbaren Fokussdurchmessern der dabei eingesetzten Lasersysteme ergab die mit zwei ausgewählten Schliffbildern der  $50 \mu\text{m}$  Folienverbindungen abgeglichenen Simulation eine um bis zu ca. 5 mal breitere Wärmezone für eine Péclet-Zahl von 19,3 im Vergleich zu einer Péclet-Zahl von 0,32.

Der simulierte thermische Wirkungsgrad unterscheidet sich bei beiden Schweißprozessen um Faktor 6.

Ebenfalls beobachtet werden konnten eine nur laterale Wärmeausbreitungsfront bei einer hohen Prozessgeschwindigkeit und dadurch eine Minimierung der prozessstörenden Anlauf- und Auslaufbereiche der Temperaturentstehung.

## 5 Ausblick

Durch den Walzprozess sind die Folien stark kaltverfestigt. Diese Anfangsverfestigung muss in der Simulation berücksichtigt werden, da sie sowohl die Eigenspannungsentstehung als auch den Verzug beeinflusst.

Mithilfe der Temperaturfeldberechnung und der strukturmechanischen Berechnung, soll näherungsweise numerisch bestimmt werden, in wie weit die Wahl der Prozessgrößen den Verzug quantitativ beeinflusst. Dabei soll auch das aus den Druckeigenspannungen hervorgerufene Beulen berücksichtigt werden.

Eine weitere Aufgabe der Schweißstruktursimulation findet sich in der Bewertung der Schweißpfadgestaltung. Verschiedene Varianten sind für die Ausführung der Eckkonturen bei einer geschlossenen Pfadgeometrie möglich. Neben prozesstechnischen Aspekten kann mithilfe der Schweißsimulation auch der Eigenspannungszustand als Beurteilungskriterium für eine optimierte Schweißpfadgestaltung hinzugezogen werden.

Diese Aufgabenstellungen sollen im Rahmen des Projektes in Zukunft bearbeitet werden.

## 6 Danksagung

Die Autoren danken dem BMWi für die Finanzierung dieser Untersuchungen sowie der AIF e.V. für die Unterstützung. (VP3018201AG2)

## 7 Literatur

N.N. (2012): Projektbeschreibung *Entwicklung eines neuartigen, mechanisch belastbaren Vakuum-Isolations-Panels mit breitem Einsatzspektrum für Hochleistungsanwendungen durch Verwendung einer CrNi-Stahlhülle (CroNiVIP)* (VP2156309AG2)

Beyer, E. (1995): *Schweißen mit dem Laser - Grundlagen*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg New York, S. 138.

Dausinger, F. (1995): *Strahlwerkzeug Laser: Energieeinkopplung und Prozesseffektivität*, Habilitation, Universität Stuttgart, B.G. Teubner Verlag, Stuttgart, S.34, S.87.

Patschger, A., Bergmann, J.P., Bliedtner, J. (2012): „Flexible and Efficient Laser Remote Welding of Ultra-thin Metal Foils“, *J. Laser Appl.* 24, 052005.

Patschger, A., Bliedtner, J., Bergmann, J.P. (2013): „Approaches to Increase Process Efficiency in Laser Micro Welding“, *Physics Procedia*, volume 41, S. 585-595, ISSN 1875-3892.

Poprawe, R., Weber, H., Herziger, G. (Hrsg.) (2004): *Landolt-Börnstein Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology, New Series / Group VIII: Advanced Materials and Technologies*, volume 1, Laser Physics and Applications, subvolume C: Laser Applications: Fundamentals of Laser-induced Processes, Springer, Berlin, Heidelberg, New York, p. 61.

Strocka, S., Hopf, A., Patschger, A., Bliedtner, J., Hild, M., Störzner, F. (2012): „Beitrag zur Prozessentwicklung für das Remote-Laser-Schweißen von dünnen metallischen Folien“, 22. *Internationale Wissenschaftliche Konferenz Mittweida*, Mittweida.

Stöcker, H. (2009): *Taschenbuch mathematischer Formeln und moderner Verfahren*, 4. Auflage, Harri Deutsch Verlag, Frankfurt am Main, S. 149.

Swift-Hook, D.T., Gick, A.E.F. (1973): „Penetration welding with lasers“, *Weld. Res.* 52, p.492-499.

Thomy, C., Möller, F., Vollertsen, F. (2010): „Distortion effects in micro welding with fibre laser“, *Proc. of ICALEO, 29th int. Cong. On Applications of Lasers and Electro-Optics*, Anaheim, USA, LIA Publication 613 (CD), 301, S. 85-90.

Vollertsen, F., Wagner, F., Thomy, C. (2007): „Micro welding for environmental-friendly products“, *Proc. Of ICALEO, 26th int. Cong. On Applications of Lasers and Electro-Optics*, Orlando, USA, LIA Publication 610 (CD), 308, S. 143-148.

Voß, O. (2001): *Untersuchung relevanter Einflußgrößen auf die numerische Schweißsimulation*, Dissertation, Technische Universität Braunschweig.