

Energieforschungsprogramm - XX. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische
Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Energieforschungsprogramm

Publizierbarer Endbericht

Programmsteuerung:

Klima- und Energiefonds

Programmabwicklung:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG)

Endbericht

erstellt am
08/04/2024

Projekttitlel:

Induheat

Projektnummer:

881147

Energieforschungsprogramm - XX. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische
Forschungsförderungsgesellschaft FFG

usschreibung	6. Ausschreibung Energieforschungsprogramm
Projektstart	01/03/2021
Projektende	28/02/2024
Gesamtprojektdauer (in Monaten)	36 Monate
ProjektnehmerIn (Institution)	ESS Engineering Software Steyr GmbH
AnsprechpartnerIn	Martin Schifko
Postadresse	Berggasse 35, 4400 Steyr
Telefon	+4372522044661
Fax	-
E-mail	Martin.schifko@essteyr.com
Website	www.essteyr.com

InduHeat

Prozess und Energieoptimierung mittels Induktion zum Aushärten der Korrosionsschutzschicht in der
Automobilindustrie

AutorInnen:

Hui CAO, Xinghua SONG, Ralf ZIMMERMANN, Raphael GERGELY,
Hochenauer CHRISTOPH, Martin SCHIFKO

1 Inhaltsverzeichnis

1	Inhaltsverzeichnis	3
2	Einleitung.....	5
2.1	Aufgabenstellung	5
2.2	Schwerpunkte des Projektes.....	5
2.3	Einordnung in das Programm.....	5
2.4	Verwendete Methoden	6
2.5	Aufbau der Arbeit.....	6
3	Inhaltliche Darstellung.....	7
3.1	Literaturrecherche.....	7
3.2	Beschreibung der Vorgehensweise.....	7
3.2.1	Experimente.....	7
3.2.2	Simulationen	22
3.2.3	Optimierung für die Induktionserwärmung.....	24
3.2.4	Ersatzmodelle und Modelle reduziert Ordnung.....	28
4	Ergebnisse und Schlussfolgerungen	29
4.1	Experimente.....	29
4.1.1	Erste Experimentalreihen	29
4.1.2	Steady State Experimente.....	30
4.1.3	Auswirkung Lack.....	31
4.1.4	Planare Experimente mit bewegten Induktor; erste Versuche	32
4.1.5	Kombinierte Aufwärmung Konvektion und Induktion	34
4.1.6	Wirkungsgrad Betrachtung Induktive Blech Aufwärmung	36
4.1.7	Experimente Anströmung Extern.....	38

Energieforschungsprogramm - XX. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische
Forschungsförderungsgesellschaft FFG

4.1.8	Vergleich beidseitiger Konvektion mit Kombination aus Konvektion und Induktion	39
4.1.9	Materialmix.....	40
4.1.10	Neue Einlassgeometrie	40
	41
4.2	Simulationen	41
4.2.1	Simulation mit dem ESS LBM Solver	41
4.2.2	Kombination Konvektion Induktion	42
4.2.3	Simulationen Blechaufwärmung.....	43
4.2.4	Ersatzmodelle und Modelle reduzierter Ordnung	44
5	Ausblick und Empfehlungen.....	47
5.1	Durchführung von Laborexperimenten mit größerer Nähe zu industriellen Anwendungen	47
5.2	Einsatz von Mehrfachinduktoren bei der Induktionserwärmung.....	47
5.3	Umfassende Nutzung von Simulation und Optimierung für Laborversuche und industrielles Design	48
6	Literaturverzeichnis.....	49
[1]	J. Barglik, A. Smagór, A. Smalcerz, D.G. Desisa, Induction Heating of Gear Wheels in Consecutive Contour Hardening Process, Energies 14 (2021) 3885.	49
7	Anhang	50
8	Kontaktdaten.....	50

2 Einleitung

2.1 Aufgabenstellung

Das übergeordnete Ziel dieses Projekts ist die Entwicklung eines selektiven Induktionsofens zum Backen von Karosserien in der Automobilindustrie. Die Erforschung und Untersuchung industrieller Anwendungen der Induktionserwärmung beginnt mit der Erwärmung von Werkstücken in Laborexperimenten und den entsprechenden numerischen Simulationen. Reine Konvektionserwärmung, reine Induktionserwärmung und kombinierte Konvektions- und Induktionserwärmung werden durch verschiedene Laborexperimente und numerische Simulationen untersucht und verglichen. Ziel der Arbeit ist es, die effizienteste und energiesparendste Erwärmungsmethode und die entsprechenden optimalen Einstellungen herauszufinden.

2.2 Schwerpunkte des Projektes

Der Schwerpunkt dieses Projekts liegt auf der Untersuchung der Heizleistung der kombinierten konvektiven und induktiven Heizung. Der Grund dafür ist, dass die kombinierte Erwärmung eine der praktikabelsten und effizientesten der vorgeschlagenen Erwärmungsmethoden ist. Die Induktionserwärmung hat das Potenzial, eine hocheffiziente lokale Erwärmung zu erreichen, da elektromagnetische Felder direkt in Wärmeenergie umgewandelt werden können. Einer der Nachteile der Induktionserwärmung ist jedoch, dass die hohe Temperatur nur in der Nähe der Oberfläche des Werkstücks auftritt und daher nicht gleichmäßig verteilt ist, insbesondere bei dünnen Werkstücken oder Werkstücken aus Blech, die eine geringere Masse haben und daher weniger von der Heizzone weggleiten. Durch die Kombination von Induktionserwärmung und Konvektion kann eine gleichmäßigere Temperaturverteilung erreicht werden. Die kombinierte Erwärmung ist im Vergleich zur reinen Konvektionserwärmung auch energieeffizienter. Die Studie konzentriert sich auch auf die Untersuchung der Faktoren, die die kombinierte Erwärmung beeinflussen, einschließlich der Geometrie des Werkstücks, der Leistung und der Vorschubgeschwindigkeit des Induktors sowie des Massenstroms und der Temperatur der Heißluft. Die optimalen Einstellungen der oben genannten Parameter bei der kombinierten Erwärmung sind so gewählt, dass das erwärmte Werkstück gleichmäßig die gewünschte Temperatur erreicht und gleichzeitig die Energieeinsparungen maximiert werden können.

2.3 Einordnung in das Programm

Das Projekt InduHeat adressiert alle drei Programmziele laut "Leitfaden - Energieforschung 2019". Die Ziele unterscheiden sich jedoch hinsichtlich ihrer Prioritäten (absteigend aufgelistet):

Ziel 2 – „Österreichs Technologieführerschaft schafft Zugang zu internationalen Märkten“: Mit InduHeat verfolgen wir klar die Strategie weltweit die Nummer 1 für die optimale Trocknung für Lackieranlagen zu sein.

Ziel 3 – „Energieforschung und Innovation als Beschäftigungsmotor für den Standort Österreich“: Mit der Erreichung einer internationalen Spitzenposition soll die Anzahl der geschaffenen Arbeitsplätze in der Region erhöht werden.

Ziel 1 – „Grand Challenges: Energieforschung im Zentrum großer gesellschaftlicher Herausforderungen“: Wie weiter oben gezeigt werden konnte kann ein signifikanter Beitrag des Projekts zu Klimaschutz und Ressourceneffizienz geleistet werden.

Ausschreibungsschwerpunkt: Das Projekt entspricht dem Ausschreibungspunkt 3 „Digitalisierung industrieller Energiesysteme“, wobei industrielle Produktionstechnik mit dem Ziel optimiert werden soll, Kosten zu reduzieren und eine hohe, gleichbleibende Qualität zu gewährleisten. Um dies zu erreichen entwickeln wir Simulationen, welche dem technischen Konzept eines „Digital Twin for Production“ zugeordnet werden kann. Die industrielle Wärmeerzeugung soll optimiert und die technische Lösung in industrielle Automatisierungslösungen integriert werden.

2.4 Verwendete Methoden

In diesem Projekt wird eine Kombination aus Laborversuchen und numerischen Simulationen verwendet. In einer Reihe von Experimenten wird die Machbarkeit der vorgeschlagenen Induktionserwärmungsstrategie untersucht und überprüft. Der Vergleich der experimentellen Daten bestätigt, dass die kombinierte Erwärmung der reinen Konvektionserwärmung in Bezug auf die Energieeinsparung überlegen ist. Die Experimente liefern auch die erforderlichen Einstellungen und Parameter für die Simulation.

Als numerischer Löser für die Konvektionserwärmung wird die LBM-Methode (Lattice Boltzmann) verwendet. Die ANSYS-Softwarepakete Maxwell und Fluent werden für die elektromagnetischen und konvektiven Wärmeübertragungssimulationen eingesetzt. Mit Hilfe der numerischen Simulationen kann ein "digitaler Zwilling" des Erwärmungsprozesses realisiert werden. Die optimalen Einstellungen und Eingangsparameter für die Maximierung der Energieeinsparung können aus den Berechnungen gewonnen und in den Experimenten wieder verwendet werden.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass sich die schwierigen Laborexperimente und die Simulationen mit fortgeschrittenen mathematischen Werkzeugen gegenseitig befruchten und die Effizienz der gesamten Arbeit verbessern können, was auch die Neuheit des Projekts ist.

2.5 Aufbau der Arbeit

Wie bereits erwähnt, besteht die Forschungsarbeit in diesem Projekt hauptsächlich aus zwei Teilen: Experimente und Simulationen. Zu den Experimenten gehören: Experimente im stationären Zustand, translatorische Induktor Experimente, Experimente zum Einfluss verschiedener Werkstück Geometrien, Experimente zum Einfluss von Lackbeschichtungen, Wirkungsgrad Betrachtung Induktive Blech Aufwärmung, Vergleich der Erwärmungseffizienz verschiedener Erwärmungsmethoden und verschiedener Aufbauten, und so weiter. Die Simulationen bestehen aus dem ESS LBM Solver für die konvektive Erwärmung und dem ANSYS Paket für die kombinierte Erwärmung. Darüber hinaus wird ein Optimierungsmodell zur Minimierung des Energieverbrauchs im kombinierten Heizprozess vorgeschlagen, und es werden Modellierungstechniken reduzierter Ordnung berücksichtigt. Weitere Einzelheiten sind den Abschnitten 3 und 4 zu entnehmen.

3 Inhaltliche Darstellung

3.1 Literaturrecherche

Zu Beginn des Projektes wurde eine Literaturrecherche über bestehende Arbeiten durchgeführt. Dabei wurde festgestellt, dass sich die meisten Arbeiten zur induktiven Erwärmung mit der Erwärmung von Volumenkörpern beschäftigen [1,2]. Die Arbeiten, die sich mit der Erwärmung von Blechen beschäftigen, beziehen sich meist nur auf ebene Bleche[3,4] und nicht auf gekrümmte Strukturen, wie sie für dieses Projekt benötigt werden.

Bei der Recherche der dem Projekt zugrundeliegenden Theorie wurden die folgenden in der Literatur beschriebenen Phänomene als wesentlich für den Erfolg der Arbeit erachtet:

- Skin effect [5–7]
- Proximity effect [8]
- Ring effect [8]
- Slot effect [9]
- Edge effect [8]

Alle diese Effekte sind in der Literatur gut beschrieben und stellen insbesondere für profilierte Bleche mit Hohlräumen, wie sie in dieser Arbeit verwendet werden, eine Herausforderung dar.

3.2 Beschreibung der Vorgehensweise

Die vorliegende Arbeit lässt sich grob in 2 große, ineinander greifende Blöcke unterteilen. Einerseits die experimentelle Betrachtung und andererseits die numerische Betrachtung mittels Simulationen. Die Experimente dienen einerseits dazu, wichtige Parameter für eine effiziente induktive Erwärmung zu identifizieren und andererseits dazu, die Simulationen zu validieren. Die Simulationen wurden durchgeführt, um weitere Erkenntnisse über die effiziente induktive Erwärmung zu gewinnen und weitere Optimierungsparameter zu identifizieren.

3.2.1 Experimente

3.2.1.1 Erste Experimentalreihen

Für die ersten Versuchsreihen wurde am IWT ein einfacher Prüfstand aufgebaut, bei dem eine handelsübliche Induktionserwärmungsanlage mit einer Oberflächeninduktionsspule ausgerüstet wurde. Es wurde darauf geachtet, den Prüfstand möglichst modular aufzubauen, um ihn später leicht erweitern zu können. Die ersten Versuchsreihen dienten dazu, die Grenzen der induktiven Erwärmung besser zu verstehen. Dazu wurden verschiedene Profile (Abbildung 1) induktiv erwärmt und die Erwärmung im Querschnitt direkt unter der Induktionsspule mit Thermoelementen gemessen. Der Versuchsaufbau hierfür ist in Abbildung 2 dargestellt. Nach der Untersuchung einfacher Profile wurden verschachtelte Profile untersucht. Um zu sehen, wie sich die Abschattung eines Bleches induktiv auswirkt. Außerdem wurden in dieser Versuchsreihe ferromagnetische und nichtferromagnetische Materialien untersucht.

Energieforschungsprogramm - XX. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

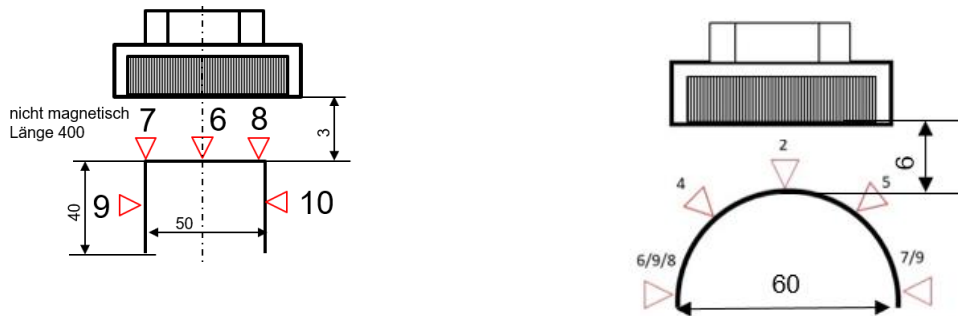


Abbildung 1: Profile für erste Versuche



a)



b)

Abbildung 2: a) Werkstück und Induktionsspule; b) Verwendetes Induktionsgerät

3.2.1.2 Steady-State Experimente

Dem folgenden Abschnitt liegt eine Publikation [10] zugrunde welche zurzeit online als Preprint verfügbar ist.

Die nächste Versuchsreihe befasste sich mit der Ermittlung eines Parameterfeldes zwischen Luftspalt, Induktorleistung und Wirkungsgrad. Ein weiteres Ziel dieses Prüfstandes war es, die Energiebilanzen analytisch schließen zu können und damit das Experiment in sich zu validieren. Daher wurde ein Prüfstand realisiert, der Messungen im stationären Zustand ermöglicht.

Die folgenden Parameter wurden während der Experimente variiert:

- Leistung des Induktors
- Luftspalt zwischen Induktor und Werkstück
- Material des erhitzten Rohrs
 - Unlegierter Stahl
 - Edelstahl

Energieforschungsprogramm - XX. Ausschreibung

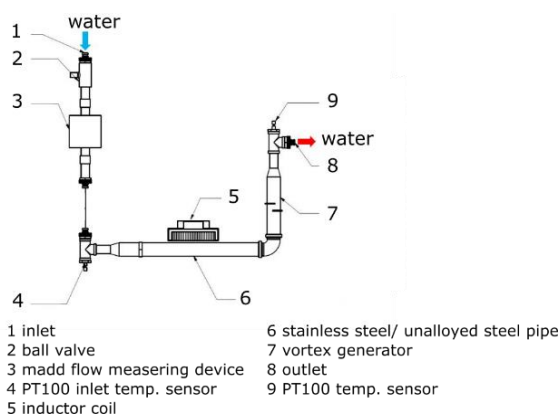
Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Die folgenden Parameter wurden gemessen:

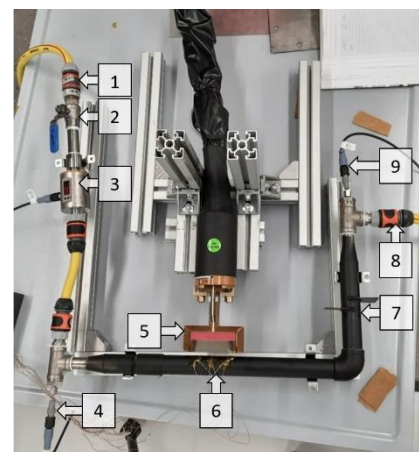
- Ein- und Auslass-Temperatur des Prüfstandes und des Induktors
- Massenstrom von Wasser durch den Prüfstand
- Massenstrom von Kühlwasser durch den Induktor
- Oberflächentemperatur des erhitzten Rohrs
- Elektrische Leistung des Induktionsheizgerätes

Der Prüfstand (Abbildung 3) ist wie folgt aufgebaut:

Wasser strömt durch den Einlass (1) in den Prüfstand, der Massenstrom wird danach mit einem magnetisch-induktiven Durchflussmesser (3) gemessen, der weiter Stromabwärts angeordnet ist. Thermoelemente (4, 9) werden zur Messung der Einlass- und Auslasstemperatur verwendet. Eine Induktionsspule (5) wird verwendet, um das 1-Zoll-Rohr zu erwärmen, welches zwischen unlegiertem und rostfreiem Stahl ausgetauscht werden kann, um Parameterfelder für beide Materialien zu erhalten. Ein "vortex generator" (7) wurde eingebaut, um die Durchmischung der verschiedenen Schichten der laminaren Strömung im Rohr zu erhöhen und so die Mischtemperatur messen zu können. Um alle Parameter zu erhalten, um die Energiebilanzen schließen zu können, wurden außerdem der Massenstroms, sowie der Eintritts- und Austrittstemperatur des durch den Induktor strömenden Kühlwassers gemessen. Der im Experiment verwendete Induktor war ein Oberflächeninduktor mit einer einzigen Wicklung und zusätzlichen magnetischen Flusskonzentratoren mit einer Breite von 74 mm.



a)



b)

Abbildung 3: a) Schema Steady-State Prüfstand; b) Foto Steady-State Prüfstand [10]

Berechnung der Energiebilanzen

Für die Berechnung der Nutzleistung $\dot{Q}_{\text{heat effective}}$ des Induktors wurde der Massenstrom \dot{m}_{water} durch den Prüfstand sowie die Temperaturdifferenz zwischen Einlass ($T_{\text{in rig}}$) und Auslass ($T_{\text{out rig}}$) und die spezifische Wärmekapazität von Wasser herangezogen.

$$\dot{Q}_{\text{heat effective}} = \dot{m}_{\text{water}} c_{p_w} (T_{\text{out rig}} - T_{\text{in rig}}) \quad (1)$$

Die Verlustleistung $\dot{Q}_{\text{heat loss}}$ wurde auf ähnliche Weise berechnet. Dazu wurden der Kühlwassermassenstrom $\dot{m}_{\text{cooling water}}$ durch die Induktorspule und deren Eintritts- ($T_{\text{out ind}}$) und Austrittstemperatur ($T_{\text{in ind}}$) verwendet.

$$\dot{Q}_{\text{heat loss}} = \dot{m}_{\text{cooling water}} c_{p_w} (T_{\text{out ind}} - T_{\text{in ind}}) \quad (2)$$

Um die Energiebilanzen zu schließen, wurde der relative Fehler wie folgt berechnet:

$$\text{Error} = \frac{P_{\text{DC}} - (\dot{Q}_{\text{heat effective}} + \dot{Q}_{\text{heat loss}})}{P_{\text{DC}}} \times 100\% \quad (3)$$

Dabei wurden die zuvor berechneten Nutz- ($\dot{Q}_{\text{heat effective}}$) und Verlustleistungen ($\dot{Q}_{\text{heat loss}}$) sowie die elektrische Leistung (P_{DC}) des Induktionsgeräts verwendet.

Der Wirkungsgrad wurde aus der elektrischen Leistung des Induktors am Netz $P_{\text{el AC}}$ und der Nutzleistung $\dot{Q}_{\text{heat effective}}$ berechnet.

$$\eta = \frac{\dot{Q}_{\text{heat effective}}}{P_{\text{el AC}}} \quad (4)$$

3.2.1.3 Auswirkung Lack

Um den Einfluss der Lackierung auf das Aufheizverhalten zu untersuchen, wurden Versuche mit 2 verschiedenen Materialien durchgeführt. Dazu wurde Klarlack jeweils mit Magnetit und gewöhnlichem Eisenoxid im Verhältnis 1:2 gemischt und auf eine Glasplatte aufgetragen, um den reinen Einfluss der Lackierung zu erkennen. Die Induktorspule wurde auf einer CNC-Maschine montiert (Abbildung 4) und kontinuierlich über die Glasplatte bewegt. Zum Vergleich wurde der gleiche Versuch mit einer Blechplatte durchgeführt. Die Temperatur wurde jeweils mit 5 Thermoelementen gemessen, die in der Mitte des Werkstücks angebracht waren.

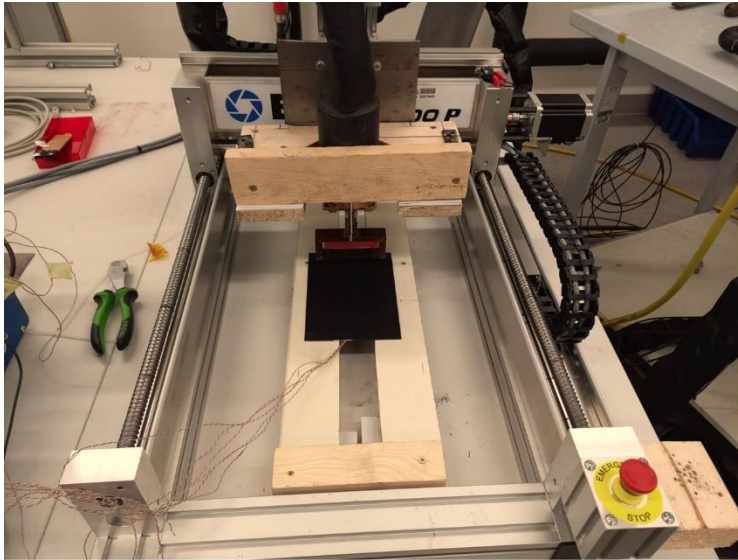


Abbildung 4: Induktionsspule auf CNC-Maschine montiert

3.2.1.4 Planare Experimente mit bewegten Induktor; erste Versuche

Ziel der ersten Versuchsreihe war es, ein Blechteil mit einem bewegten Induktor möglichst schnell auf die angestrebte Zieltemperatur zu erwärmen und diese Zieltemperatur anschließend zu halten, wobei die Temperaturverteilung über das gesamte Bauteil möglichst homogen sein sollte.

Zu diesem Zweck wurde ein neuer Prüfstand entwickelt, bei dem die Induktorspule in eine CNC-Maschine eingespannt ist. Bei der Entwicklung der Heizstrategie wurden folgende Parameter berücksichtigt:

- Vorschub des Induktors
- Leistung des Induktors
- Luftspalt

Zusätzlich zu den Thermoelementen wurde die Temperatur auch mittels Thermografie gemessen, um die Homogenität genauer zu untersuchen. Der Verfahrensweg der Induktorspule ist in Abbildung 5 dargestellt.

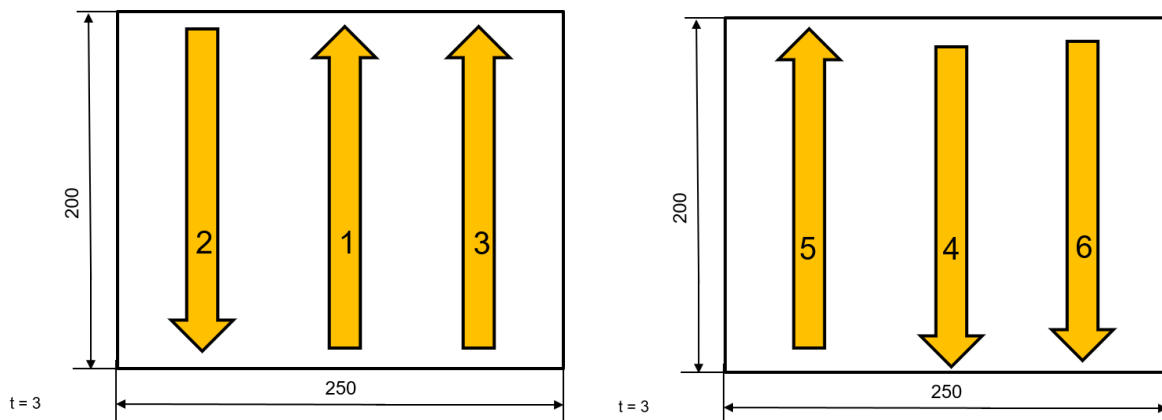


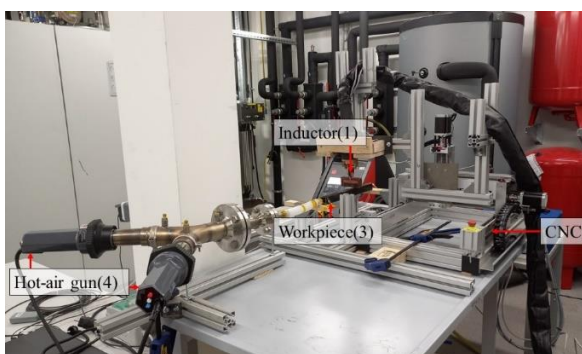
Abbildung 5: Verfahrenweg Induktor

3.2.1.5 Kombinierte Erwärmung durch Konvektion und Induktion

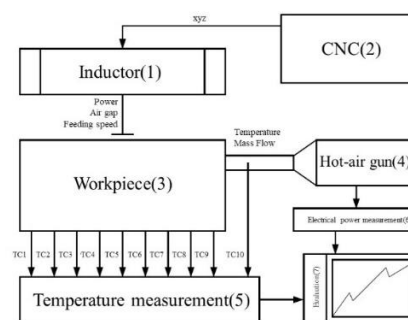
Der Nachfolgende Abschnitt basiert auf einer Publikation[11] die im Rahmen des Projektes veröffentlicht wurde.

Die ersten Versuche mit einem statischen Induktor zeigten, dass es schwierig ist, Profile rein induktiv zu erwärmen, was sich auch bei Versuchen mit einem beweglichen Induktor bestätigte. Der Prüfstand wurde erweitert, um eine kombinierte Erwärmung durch Induktion und Konvektion zu ermöglichen. Der konvektive Wärmeeintrag erfolgt durch zwei Heißluftgebläse, wie in der schematischen Darstellung und dem Foto des Prüfstandes in Abbildung 6 gezeigt. Der Prüfstand kann in zwei verschiedenen Konfigurationen aufgebaut werden, wobei das Werkstück in einer Konfiguration in einem Winkel von unten angeblasen wird, und in der anderen Konfiguration die Luft durch das Profil strömt (Abbildung 7).

Der Induktor ist wiederum auf einer CNC-Maschine montiert, um eine Bewegung in 3 Achsen zu gewährleisten. Die Temperatur wurde mit 9 Thermoelementen gemessen.



a)



b)

Abbildung 6: Kombiniertes Prüfstand a) Foto; b) Schema [11]

Energieforschungsprogramm - XX. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

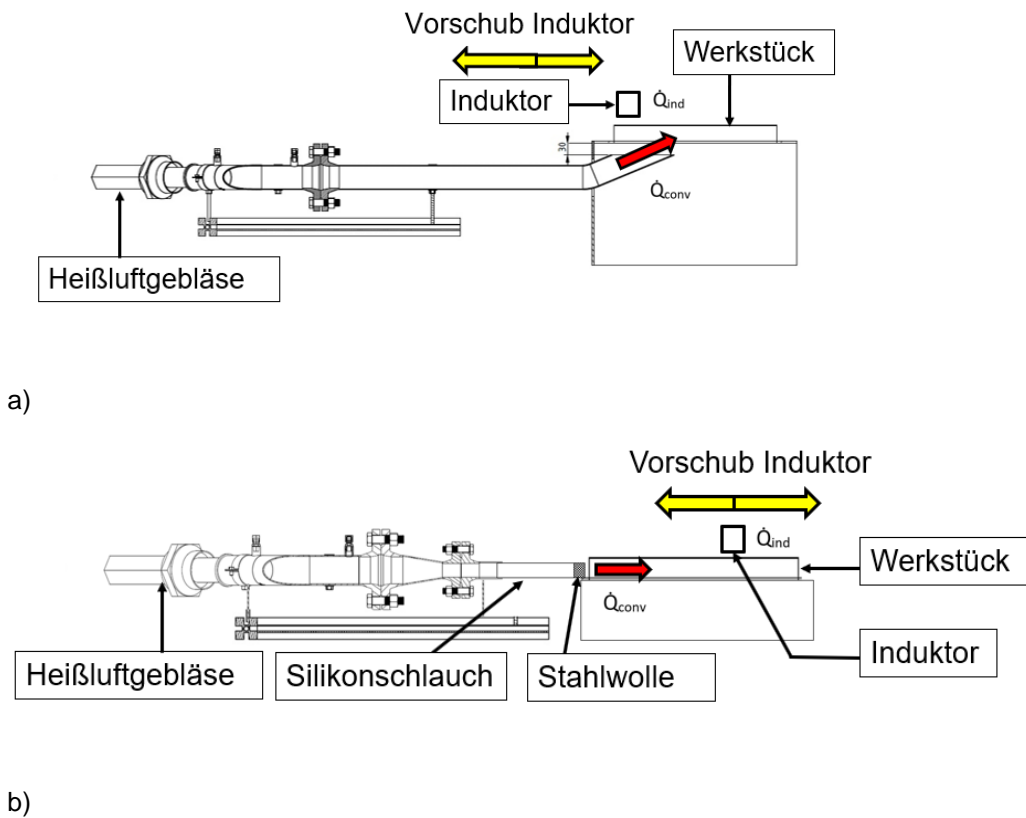


Abbildung 7: Schema des kombinierten Prüfstands: a) extern erwärmt; b) intern erwärmt [11]

Nach den ersten erfolgreichen Versuchen konnte mit diesem Prüfstand eine homogene Temperaturverteilung erreicht werden, so dass sich die nächsten Versuche mit dem Energieeinsparpotential beschäftigen.

Für die Versuche zum Energieeinsparpotential wurden Vergleiche zwischen der rein konvektiven Erwärmung des Werkstücks mittels Heißluftgebläse und der Kombination von Induktion und Konvektion durchgeführt. Hierbei wurde ein rechteckiges und ein gewinkeltes Profil untersucht, welche in Abbildung 8 dargestellt sind.

Der Prüfstand ist in Abbildung 6 schematisch dargestellt. Der Induktor (1) ist auf einer CNC-Maschine (2) montiert, die sich in drei Richtungen (x, y, z) bewegen kann. Dies gewährleistet eine gleichmäßige Geschwindigkeit der Spule während diese sich über das Werkstück bewegt und einen konstanten Luftspalt zwischen Spule und Induktor. Die Spule wird von einem handelsüblichen Induktor mit programmierbaren Leistungsstufen betrieben. Die konvektive Wärmeübertragung erfolgt durch zwei Heißluftpistolen (4). Die beiden Heißluftpistolen sind mit einem Y-Rohr verbunden, das in einen Silikonschlauch mündet, der den Luftmassenstrom zum Werkstück leitet. Um eine lokale Erwärmung am Einlass des Luftstroms zu vermeiden, wurde Stahlwolle im Ende des Silikonschlauchs angebracht, um eine diffuse Energieeinbringung zu erreichen, was in Abbildung 7 näher dargestellt ist.

Die erste Versuchsreihe bestand darin, das Werkstück nur durch konvektive Wärmeübertragung auf eine Zieltemperatur zu erwärmen. Der Heißluftstrom wurde durch die beiden Heißluftgebläsen erzeugt, wobei 2 verschiedene Massenströme 6g/s und 12g/s zum Einsatz kamen. Diese Versuche wurden durchgeführt, um einen Vergleich für die kombinierten Heizstrategien zu haben. Eine weitere Versuchsreihe wurde mit einer Kombination aus Konvektion und Induktion durchgeführt. Bei diesen Versuchen wurde das Heißluftgebläse ebenfalls mit den beiden unterschiedlichen Massenströmen betrieben und die Oberseite des Werkstücks zusätzlich durch den Induktor erwärmt, wie in Abbildung 7 dargestellt. Um eine möglichst effiziente Induktionserwärmung zu gewährleisten, wurde die Strategie verfolgt, das Werkstück ohne Überhitzung auf die Zieltemperatur zu bringen und dann die Induktorleistung für die folgenden Erwärmungsschritte zu reduzieren, um die Temperatur an der Oberfläche aufrechtzuerhalten. Die Induktorparameter wurden so gewählt, dass der Induktor mit einem kleinen Luftspalt betrieben werden konnte, um die Effizienz zu gewährleisten und den Induktor am unteren Ende seiner Betriebsleistung (500 W) betreiben zu können.

Die Temperatur wurde mit 9 Thermoelementen am Werkstück gemessen (Abbildung 8) und mit einem Thermoelement am Auslass der Heißluftpistolen, um die Temperatur des Luftmassenstromes für die konvektive Wärmeübertragung zu messen. Um die Gesamtmenge an elektrischer Energie zu bestimmen, die erforderlich ist, um das Werkstück auf die Zieltemperatur zu erwärmen, wurde die von den beiden Heißluftpistolen aufgenommene elektrische Leistung gemessen. Für die elektrische Leistung des Induktors wurde die aufgenommene Leistung bei jedem Einschalten des Induktors gemessen. Für die Temperaturmessungen wurden Thermoelemente vom Typ T verwendet, da sie schnell auf die während der Induktionserwärmung auftretenden Temperaturänderungen reagieren. Die Thermoelemente wurden vor den Messungen im Wasserbad kalibriert. Die Temperaturunsicherheit der Thermoelemente beträgt ± 1 K im Temperaturbereich von -40 °C bis 133 °C und $\pm 0,75$ % im Temperaturbereich von 133 °C bis 350 °C.

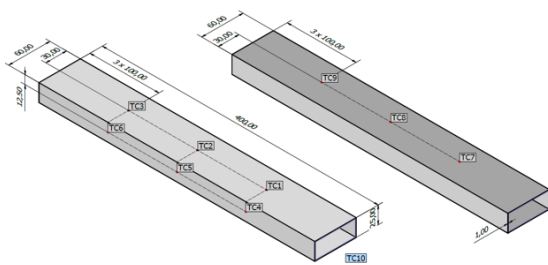
Ziel der Versuche war es, den Punkt mit dem höchsten Wirkungsgrad zwischen induktiver und konvektiver Wärmeübertragung zu finden. Beide Geometrien bestanden aus ferromagnetischem Stahl mit einer Dicke von 1,5 mm. Die oben erwähnte induktive Erwärmungsstrategie wurde durch eine Reihe von Experimenten entwickelt und die effizienteste dieser Strategien in Bezug auf Vorschubgeschwindigkeit und Induktorleistung ausgewählt. Im ersten Durchlauf wird der Induktor mit 1500 W betrieben, um die Zieltemperatur von 100 °C an der Oberseite des Profils zu erreichen. Für den Rest des Versuchs wird der Induktor mit 500 W betrieben und kontinuierlich über das Werkstück hin- und herbewegt. Folgende Versuche wurden durchgeführt:

Energieforschungsprogramm - XX. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

- Reine Konvektion mit minimalem Massenstrom (~6g/s)
- Reine Konvektion mit maximalem Massenstrom (~12g/s)
- Kombination aus Induktion und Konvektion mit minimalem Massenstrom (~6g/s)
- Kombination aus Induktion und Konvektion mit maximalem Massenstrom (~12g/s)

Rechteck Profil



Gewinkeltes Profil

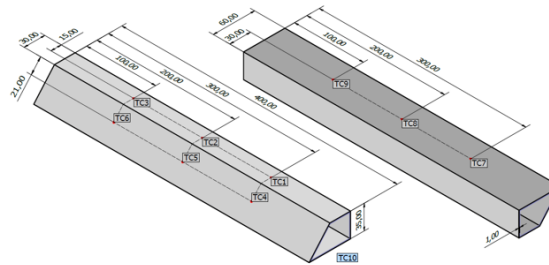


Abbildung 8: Untersuchte Profile für kombinierte Erwärmung [11]

Die Gesamtmenge an elektrischer Energie wurde aus der von den Heißluftgebläsen und der Induktion verbrauchten Energiemenge berechnet. Daher wurde wie folgt vorgegangen: Die für die Konvektion benötigte elektrische Energie E_{cond} ist in Gleichung (5) angegeben. Der elektrische Energieaufwand der Induktion E_{ind} wird in Gleichung (6) dargestellt. Die folgenden Parameter wurden für diese Berechnung verwendet: Die Leistung der ersten Initialen induktiven Erwärmung $P_{1\ ind}$ und die Leistung der folgenden Erwärmungsstufen $P_{2\ ind}$, die mit der Anzahl der Erwärmungsstufen n_{ind} multipliziert wird. Die Summe wird dann mit der Zeit t_{pass} multipliziert, die der Induktor benötigt, um das Werkstück zu durchlaufen, da der Induktor nur dann mit Strom versorgt wird, wenn sich die Induktorspule direkt über dem Werkstück befindet. Der elektrische Wirkungsgrad des Induktors η_{el} wurde experimentell auf 0,9 bestimmt, indem die von der Stromversorgung gezogene Leistung gemessen und mit der in früheren Experimenten eingestellten Leistung des Induktors verglichen wurde. Die gesamte entnommene Energie wird dann in Gleichung (7) durch Addition der konvektiven und induktiven Energie berechnet.

$$E_{cond} = P_{Fan} t_{cond} \quad (5)$$

$$E_{ind} = \frac{(P_{1\ ind} + P_{2\ ind} n_{ind}) t_{pass}}{\eta_{el}} \quad (6)$$

$$E_{tot} = E_{cond} + E_{ind} \quad (7)$$

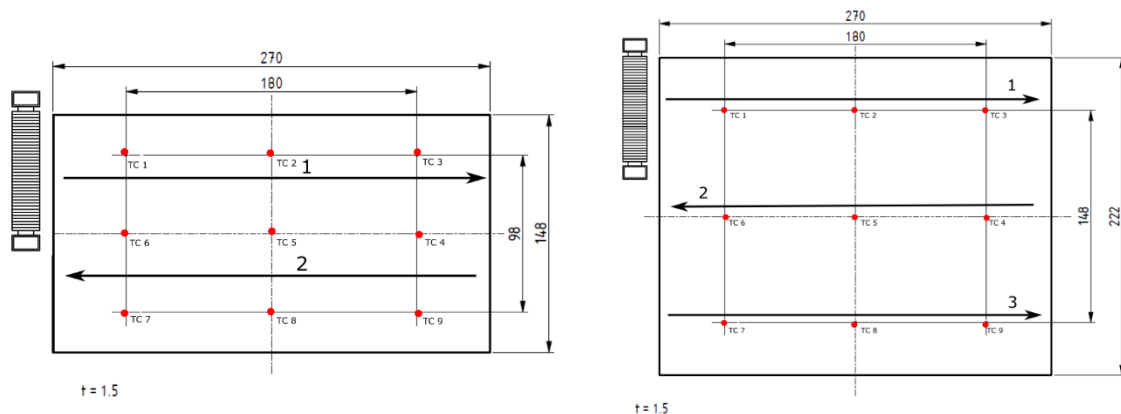
3.2.1.6 Wirkungsgrad Betrachtung Induktive Blech Aufwärmung

Dem folgenden Abschnitt liegt eine Publikation [10] zugrunde welche zurzeit online als Preprint verfügbar ist.

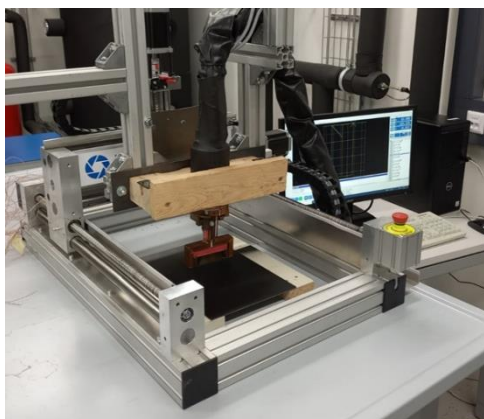
Aufbauend auf den Blecherwärmungsversuchen und den Steady-State Versuchen wurde eine Versuchsreihe durchgeführt, in der die Effizienz der induktiven Erwärmung von Blechen mit dem aus den stationären Versuchen erstellten Parameterfeld verglichen wurde. Der Grund hierfür ist, dass das stationäre Experiment aufgrund der analytisch berechneten geschlossenen Energiebilanzen in sich validiert ist und somit zur Bewertung der transienten Experimente herangezogen werden kann. Die in der Literatur zu findenden Versuchen zur Erwärmung von Blechen beschäftigen sich hauptsächlich mit feststehenden Induktoren und bewegten Blechen, wobei der Induktor die gleiche Breite wie das Werkstück aufweist. Der hier gezeigte Aufbau mit einer beweglichen Induktorspule, die schmalere als das Werkstück ist, stellt eine flexiblere Variante dar.

Energieforschungsprogramm - XX. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG



a)



c)

Abbildung 9: a) schmales Werkstück; b) breiteres Werkstück; c) Foto Prüfstand zur Erwärmung von Blechen

Die gewählte planare Erwärmungsstrategie zielte darauf ab, das Blech effizient zu erwärmen und gleichzeitig eine gleichmäßige Oberflächentemperaturverteilung aufrechtzuerhalten. Um dies zu erreichen, wurde der Induktorspule auf einer kleinen CNC-Fräsmaschine montiert, wie in Abbildung 9 dargestellt. Es wurden vier Versuche zur planaren Erwärmung durchgeführt, wobei zwei Werkstückgrößen (zweifache und dreifache Breite der Induktionsspule) und zwei Materialien (unlegierter Stahl und Edelstahl) getestet wurden, um festzustellen, ob die Effizienz mit zunehmender Werkstückbreite abnimmt. Die Werkstücke und die Anordnung der Induktionsspule sind in Abbildung 9 zu sehen.

Das Verfahren zur Erwärmung der Bleche bestand darin, die Induktionsspule für den ersten Durchgang am Rand des Werkstücks zu positionieren und sie dann entlang der Länge des Werkstücks zu bewegen, wie durch den mit "1" gekennzeichneten Pfeil angezeigt wird. Sobald die Spule das gesamte Werkstück passiert hat, wird der Strom zur Induktionsspule abgeschaltet und die Spule über die Breite des Werkstücks bewegt, bevor das Werkstück erneut passiert wird (siehe Pfeil '2'). Dieser Vorgang wird ein drittes Mal wiederholt (Pfeil '3'). Für das kleinere Werkstück war es nur notwendig, zweimal über das Werkstück zu fahren, um die gesamte Oberfläche abzudecken.

Der Versuch wurde mit drei Luftspalten von 3 mm bis 9 mm durchgeführt. Bei größeren Luftspalten wurde die Leistung erhöht, um eine ungefähre Temperatur von 140°C aufrechtzuerhalten. Die Vorschubgeschwindigkeit der CNC-Maschine blieb für alle Versuchsreihen konstant bei 1500 mm/min

für jeden Längsdurchgang. Die Temperaturen wurden mit Hilfe von 9 Thermoelementen gemessen, die unter dem Werkstück angebracht waren.

Zur Berechnung des Wirkungsgrades wurden folgende Formeln verwendet.

Die effektive Leistung des Induktors wird bestimmt durch:

$$\dot{Q}_{\text{heat effective trans}} = \frac{m \text{ cp } (T_{\text{ave.end}} - T_{\text{ave.start}})}{t_{\text{ind}}} \quad (8)$$

Die Masse des Werkstücks wird durch m repräsentiert und seine spezifische Wärmekapazität durch cp (502 J/(kgK) für Edelstahl und 490 J/(kgK) für unlegierten Stahl). Die Temperatur zu Beginn des Experiments wird als $T_{\text{ave.start}}$ bezeichnet, was der Durchschnitt der neun verwendeten Thermoelemente ist. Die durchschnittliche Endtemperatur ($T_{\text{ave.end}}$) wurde ermittelt, indem die Temperaturmessungen aller neun Thermoelemente nach dem initialen Aufheizen des Werkstücks gemittelt wurden (wenn die Induktionsspule das gesamte Werkstück zum ersten Mal passiert hat). t_{ind} repräsentiert die Zeit, die der Induktor benötigt um das Werkstück einmal abzurastern.

Die Gesamteffizienz der transienten Experimente wird wie folgt berechnet:

$$\eta = \frac{\dot{Q}_{\text{heat effective trans}}}{P_{\text{el AC}}} \quad (9)$$

Durch die Division der zuvor berechneten effektiven Leistung $\dot{Q}_{\text{heat effective trans}}$ durch die elektrische Leistung, die vom Gerät verbraucht wird $P_{\text{el AC}}$. Auf diese Weise wurde das gleiche Berechnungsverfahren wie für die transienten Experimente implementiert, um die Vergleichbarkeit zwischen den beiden Experimenten sicherzustellen.

3.2.1.7 Experimente Anströmung von Unten

Wie bereits erwähnt, wurde der kombinierte Prüfstand in zwei Konfigurationen betrieben, einmal mit Durchströmung des Profils und einmal mit externer Anströmung des Profils, siehe Abbildung 10. Diese Konfiguration simuliert eher eine industrielle Anwendung. Stellvertretend für die Versuche mit dieser Konfiguration sind hier die Versuche mit einem B-Säulen-Dummy dargestellt.

Das Modell der B-Säule ist in Abbildung 11 dargestellt. Um die unterschiedlichen elektromagnetischen Eigenschaften der in einer B-Säule verwendeten Werkstoffe zu simulieren, wurde eine Mischung aus ferromagnetischen und nicht-ferromagnetischen Blechen verwendet. Das Werkstück wurde induktiv mit 1,5 kW an der dem Induktor zugewandten Fläche auf Temperatur gebracht und anschließend wurde die Temperatur mit reduzierter Leistung gehalten, während sich die Induktorspule konstant über das

Energieforschungsprogramm - XX. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Werkstück bewegte. Die Unterseite des Werkstücks wurde währenddessen konvektiv erwärmt.

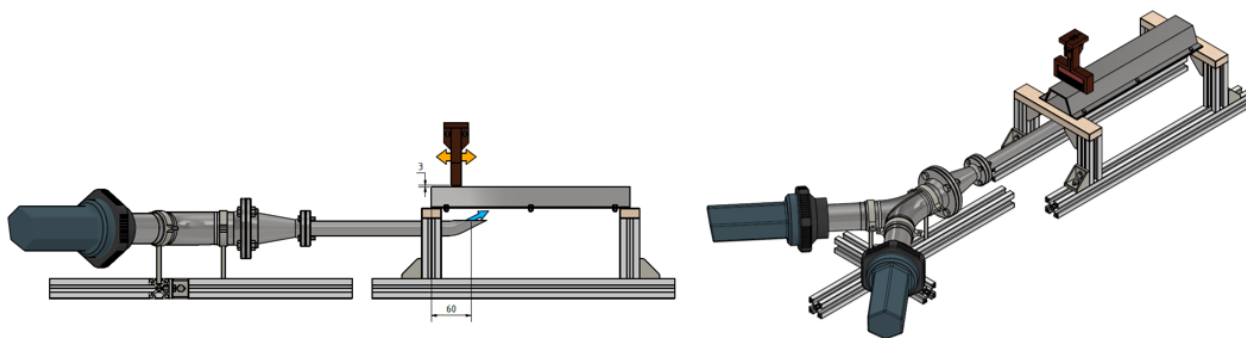


Abbildung 10: Schema Prüfstand für externe konvektive Erwärmung

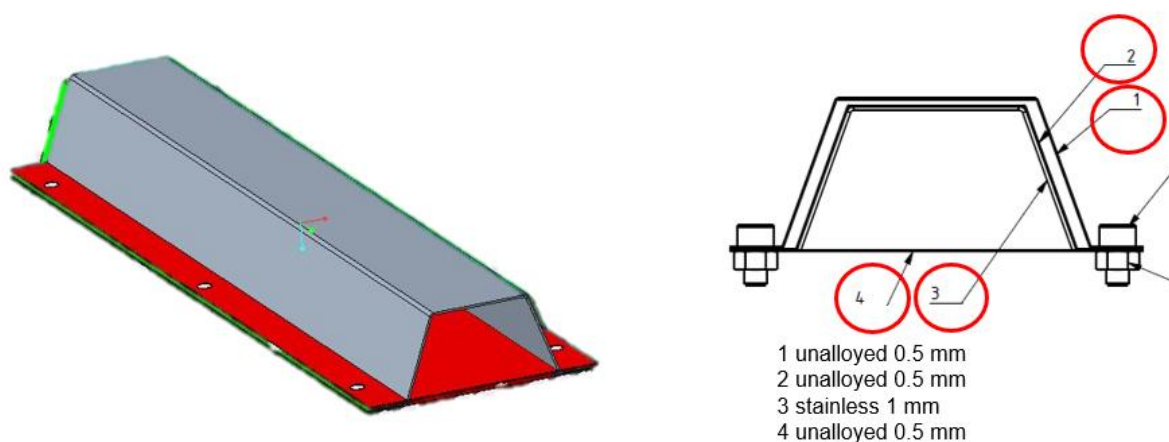


Abbildung 11: B-Säulen Dummy

3.2.1.8 Vergleich beidseitiger Konvektion mit Kombination aus Konvektion und Induktion

Um das Energieeinsparpotential der kombinierten Erwärmungsmethode in einem industrienahen Versuch zu demonstrieren, wurde aufbauend auf den Versuchen zur äußeren Anströmung eine weitere Versuchsreihe entwickelt. Diese vergleicht die konvektive Erwärmung von beiden Seiten mit der Beheizung von einer Seite konvektiv und einer Seite induktiv, siehe hierzu Abbildung 12. Dazu wurde ein rechteckiges Profil zweimal erwärmt. Beide Male wurde darauf geachtet, dass die Temperatur nach 150 Sekunden 150°C beträgt. Bei der zweiten Versuchsreihe wurde das obere Heißluftgebläse durch eine Induktionsspule ersetzt, die sich mittels einer CNC-Maschine ständig über das Werkstück bewegt.

Energieforschungsprogramm - XX. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

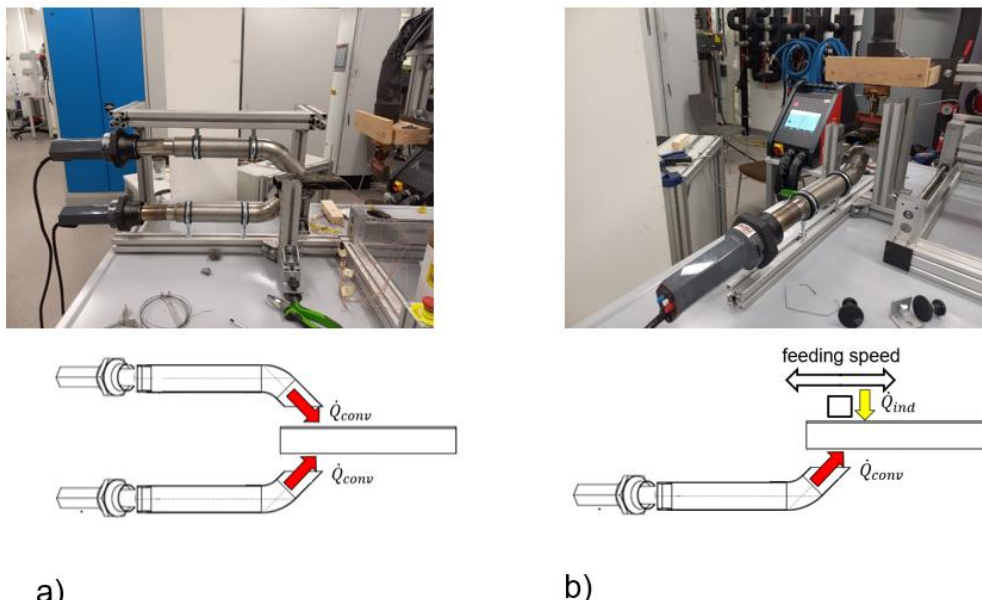


Abbildung 12: a) Doppelt konvektiv erwärmt; b) Kombination induktiv konvektiv

3.2.1.9 Materialmix

Aufbauend auf den Experimenten zum B-Säulen-Dummy wurde ein weiterer Materialmix aus einem ferromagnetischen und einem nicht-ferromagnetischen Blech untersucht. Ziel dieser Versuchsreihe war es, Strategien zu entwickeln, die zu einer homogenen Temperaturverteilung bei gleichzeitig effizienter Erwärmung führen. Die Geometrie ist in der Abbildung 13 dargestellt.

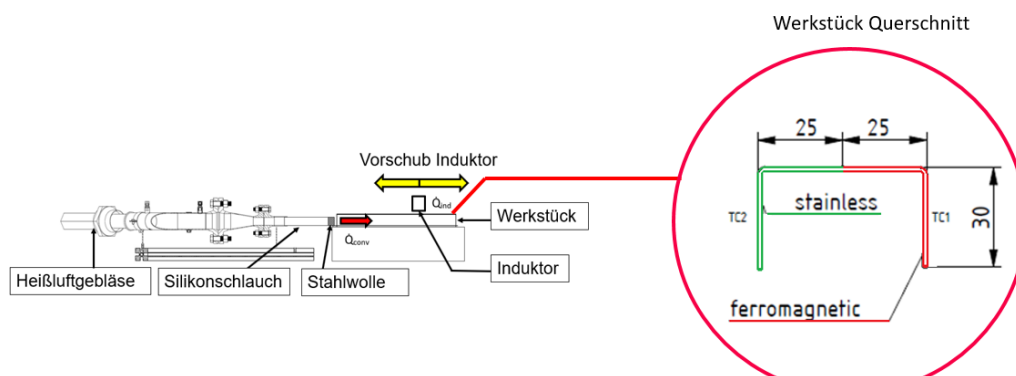


Abbildung 13: Schema Materialmix

Für die homogene Erwärmung wurde eine neue Strategie entwickelt: Die Induktorspule wird nun schneller über den ferromagnetischen Teil des Werkstücks und langsamer über den Edelstahlteil bewegt, um die unterschiedlichen Materialeigenschaften auszugleichen. Wie bei den vorhergehenden Versuchen bestand die Strategie darin, das Werkstück mit höherer Induktorleistung auf Temperatur zu bringen und dann die Temperatur mit reduzierter Leistung zu halten.

3.2.1.10 Neue Einlassgeometrie

In einer weiteren Variation der Versuche mit kombinierter induktiver und konvektiver Erwärmung wurde die Einlassgeometrie zu einen geometrisch definierten Trichter geändert. Zwei Experimente wurden

Energieforschungsprogramm - XX. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

wiederholt, um die Simulation mit dem von ESS entwickelten Solver zu erleichtern. In der vorherigen Versuchsreihe wurde der konvektive Wärmestrom durch einen Silikonschlauch eingeleitet, was bei der Simulation zu Herausforderungen führen kann, da die Geometrie des Schlauches nicht eindeutig definiert ist. Um dieses Problem zu lösen, wurde eine neue Einlassgeometrie konstruiert. Die neue Einlassgeometrie ist in Abbildung 14 grün markiert und schließt luftdicht mit dem Werkstück ab, da der Spalt zwischen Einlassgeometrie und Werkstück mit temperaturbeständigem Klebeband verschlossen wurde. Des Prüfstands ist in Abbildung 15 zu sehen. Die neue Einlassgeometrie führte zu einer homogeneren Verteilung des Temperaturfeldes im konvektiven Anteil der Erwärmung, was den Simulationen zugute kam.

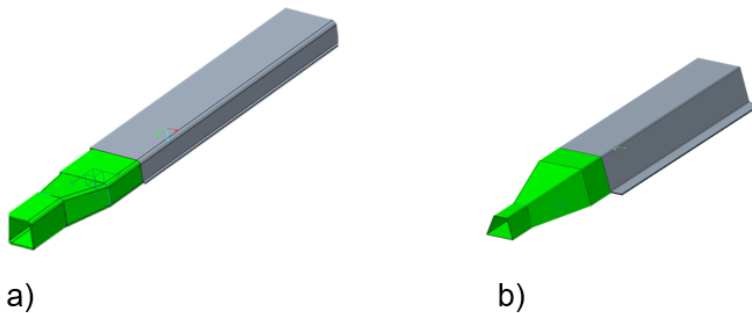


Abbildung 14: Neue Einlassgeometrie: a) Rechteckiger Querschnitt; b) B-Säulen Model

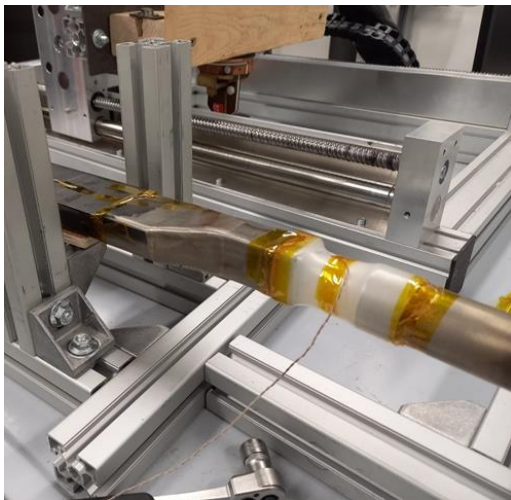


Abbildung 15: Neue Einlassgeometrie auf dem Prüfstand

3.2.2 Simulationen

3.2.2.1 Kombination Konvektion Induktion

Der folgende Abschnitt basiert auf folgender Publikation: „Heating Strategies for Efficient Combined Inductive and Convective Heating of Profiles“ [11]

Zum besseren Verständnis der Experimente und zur Generierung weiterer Daten zur Validierung des in diesem Projekt entwickelten Lösers wurden 2 Experimente zur Kombination von Induktion und Konvektion mit kommerziell erhältlicher Software simuliert.

Für ein genaues numerisches Modell müssen sowohl die Multiphysik als auch die Nichtlinearität des Problems berücksichtigt werden [1], weshalb eine Kombination aus elektromagnetischer Analyse und Wärmeübertragung unter Berücksichtigung der temperaturabhängigen Materialeigenschaften erforderlich ist. Dies wurde in dieser Arbeit unter Verwendung des kommerziell erhältlichen Softwarepakets Ansys durchgeführt. ANSYS Maxwell wird für den elektromagnetischen Teil der Simulation verwendet. Der Wärmeübergang im Werkstück und der konvektive Wärmeübergang von den Heißluftgebläsen zum Werkstück wurden mit ANSYS Fluent modelliert. Um den numerischen Aufwand zu reduzieren, wurde das Induktormodell vereinfacht und nur der relevante Teil der Spule modelliert, wie in Abbildung 16 dargestellt.

In ANSYS Maxwell wird die elektromagnetische Kopplung zwischen der Spule mit ihren Magnetflusskonzentratoren und dem Werkstück simuliert. Daraus wurden die Wirbelströme im Werkstück berechnet und die ohmschen Verluste abgeleitet. Diese Verluste wurden dann in die thermische Simulation übertragen, die in Ansys Fluent durchgeführt wurde, wo die Temperaturen berechnet wurden, die sich aus den Verlusten und der erzwungenen Konvektion ergaben. Die Spule ist aus Kupfer und der magnetische Flusskonzentrator ist aus ferromagnetischem Stahl modelliert. Die Temperatur wird nur für das Werkstück aktualisiert und nicht für die Spule und den magnetischen Konzentrador, da die Spule in den Experimenten mit Wasser gekühlt wurde und daher die Temperatur nicht stark ansteigt. Nach jedem Zeitschritt wird die Induktionsspule in der elektromagnetischen Simulation entsprechend der Position im Experiment verschoben. Die elektromagnetische Kopplung wird erneut simuliert, bis Konvergenz mit der neuen Position erreicht ist.

Die Zeitschrittweite wurde für beide Profile auf 0,5 s und die Endzeit auf 158 s festgelegt, was 5 Durchläufen des Induktors entspricht. Die maximale Anzahl der Iterationen für jeden Zeitschritt in der Kopplung wurde auf 5 festgelegt, was ausreichend ist, um eine Konvergenz für jeden Zeitschritt zu gewährleisten. Der Erregerstrom für die Induktionsspule wurde ebenfalls zeitabhängig entsprechend der Leistung in den Experimenten vorgegeben. Die Geometrie der Induktionsspule wurde für die Simulation stark vereinfacht, und der Erregerstrom wurde direkt den beiden Enden der Spule zugeordnet, ohne die Halterung der Spule zu modellieren. Die Frequenz des Erregerstroms änderte sich nicht mit der Änderung der Leistung und wurde entsprechend den Experimenten auf 15 kHz festgelegt. Nach jedem Durchlauf wird die Position der Induktionsspule auf Start zurückgesetzt und der Erregerstrom bis zum nächsten Durchlauf auf Null gesetzt. In dieser Phase der Simulation erfolgt die Erwärmung nur durch erzwungene Konvektion.

Das Netz im elektromagnetischen Teil der Simulation wurde automatisch von der Software mit adaptiven Methoden generiert. Abbildung 16 zeigt das adaptive Netz für einen Zeitschritt von 5 s. Unterhalb der Induktionsspule, wo alle elektromagnetischen Phänomene auftreten, ist das Netz feiner. Weiter von der

Spule entfernt ist das Netz größer, um die numerische Komplexität der Simulation zu reduzieren. Für schräge Profil wurde die maximale Anzahl der adaptiven Durchläufe von 30 auf 200 erhöht, da aufgrund der komplexeren Geometrie mit weniger Durchläufen keine Konvergenz erreicht werden konnte.

Für die thermische Simulation dieser Arbeit wurde die Turbulenz mit dem SST k- Ω -Modell modelliert [12,13]. Da nur das Werkstück von Interesse war, wurde der Lufteintritt vereinfacht und erst ab dem Temperaturmesspunkt modelliert. Die blauen Pfeile in Abbildung 16 kennzeichnen den Einlass. Die Einlasstemperatur und der Luftmassenstrom wurden entsprechend dem Experiment zugewiesen. Beide Seiten des Profils wurden als Druckauslass definiert (wie durch die roten Pfeile in Abbildung 16). Für alle Außenflächen des Profils wurde zur Simulation der natürlichen Konvektion ein Wärmedurchgangskoeffizient von $5 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ angesetzt und die Umgebungstemperatur entsprechend den Experimenten auf 20 °C festgelegt.

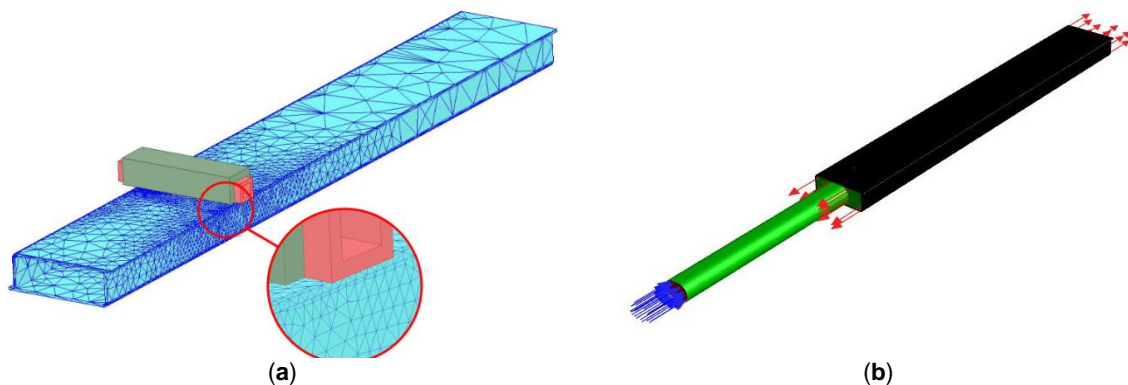


Abbildung 16: Simulationsmodelle a) Maxwell; b) Fluent

3.2.2.2 Simulationen Blechaufwärmung

Zusätzlich zu den Simulationen der Profile wurden Simulationen für die Blecherwärmungsexperimente erstellt. Diese Simulation ist wie die vorhergehende eine gekoppelte Simulation, die in gleicher Weise mit dem kommerziellen Softwarepaket ANSYS durchgeführt wurde. Der elektromagnetische Teil wurde wieder mit ANSYS Maxwell und die Wärmeleitung im Material mit ANSYS Fluent simuliert. Das für die Simulation verwendete Modell ist in Abbildung 17 dargestellt. Die Induktorgeometrie ist dieselbe wie in der vorherigen Simulation.

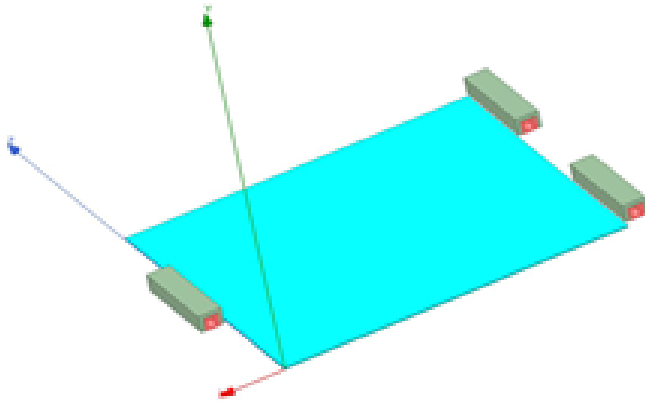


Abbildung 17: Simulationsmodell Fluent

3.2.2.3 Simulation mit dem ESS LBM Solver

Die Simulationen für die oben erwähnten und die in den vorangegangenen Berichten gezeigten Experimente werden mit dem ESS-Ofensimulationslöser durchgeführt, der auf der Lattice-Boltzmann-Methode (LBM) basiert. LBM kann das Fluid mit fiktiven Teilchen modellieren, die aufeinanderfolgende Ausbreitungs- und Kollisionsprozesse über ein diskretes Gitter durchführen. In einem LBM-Algorithmus gibt es Kollisions- und Ausbreitungsschritte. Im Solver für die ESS-Ofensimulation werden sowohl die Turbulenz der Heißluft für die Simulation des Wärmestroms als auch der Wärmeleitungsprozess mit der LBM-Methode berechnet. Die Einstellungen der Simulation und die Ergebnisse werden in Abschnitt 4 dargestellt.

3.2.3 Optimierung für die Induktionserwärmung

Frühere Laborexperimente und Simulationsergebnisse haben gezeigt, dass die kombinierte Konvektions- und Induktionserwärmung unter den drei vorgeschlagenen Erwärmungsstrategien am effektivsten ist. Daher liegt der Schwerpunkt dieser Arbeit darauf, die optimalen Einstellungen für die kombinierte Erwärmung herauszufinden, um den Energieverbrauch im gesamten Erwärmungsprozess zu minimieren. Daher wird der Gesamtenergieverbrauch im Heizprozess als Zielfunktion für die Optimierung betrachtet. Die Eingangsargumente für die Optimierung bestehen aus dem Massenstrom der Heißluftpistole, der Leistung des Induktors, der Vorschubgeschwindigkeit für den Induktor und der Erwärmungszeit für die Konvektion und für die Induktion. Am Ende dieser Erwärmungstestfälle soll eine Zieltemperatur gleichmäßig erreicht werden, die als Einschränkung für die Optimierung angesehen werden kann.

3.2.3.1 Eine kurze Beschreibung der Simulation

In dieser Arbeit basieren die Optimierungsergebnisse auf den numerischen Ergebnissen der Simulation, während die Parameter des mathematischen Simulationsmodells auf der Grundlage zahlreicher früherer Labormessungen bestimmt und kalibriert wurden. Das mathematische Modell der Simulation besteht aus drei Teilen:

- dem elektromagnetischen Modell, das auf den Maxwell'schen Gleichungen zur Berechnung der Wirbelströme beruht und die induktive Wärmequelle liefert,

- dem Turbulenzmodell für die von der Heißluftpistole erzeugte Heißluft, das den Wärmestrom bei der konvektiven Erwärmung liefert,
- und die Wärmeleitung auf dem Werkstück.

Für die Lösung der oben genannten Modelle wurden verschiedene numerische Solver verwendet. Bisher wurden die Simulationen der elektromagnetischen Felder mit ANSYS durchgeführt, und die numerischen Ergebnisse für die Wirbelströme und die induzierten volumetrischen Wärmequellen sind mit dem Simulationslöser gekoppelt. Das Turbulenzmodell der Heißluft wird mit der Lattice-Boltzmann-Methode (LBM) berechnet. Die Wärmeleitungsgleichung wird mit Finite-Differenzen-Methoden (FDM) und LBM gelöst, wobei das Berechnungsgebiet für die Wärmeleitung das zu erwärmendes Werkstück ist. Die endgültige Ausgabe der Simulation ist die Temperaturverteilung auf dem Werkstück während des kombinierten Erwärmungsprozesses.

3.2.3.2 Optimierungsmodell

Für den kombinierten Heizprozess ist der Gesamtenergieverbrauch die Summe der elektrischen Energie der konvektiven Erwärmung und der induktiven Erwärmung.

Energieverbrauch für die konvektive Erwärmung

Die Ausgangsleistung des Heißluftgebläses kann als Funktion des Massendurchsatzes und der Temperatur der ausgegebenen Heißluft formuliert werden:

$$P_{conv} = c_p \dot{m} (T_{out.air} - T_0),$$

wobei die spezifische Wärmekapazität in Abhängigkeit von der Ausgangstemperatur und dem Druck in einem engen als $1019 \text{ [J/(K \cdot kg)]}$ und die Umgebungstemperatur als 30 °C angenommen werden kann. Berücksichtigt man nun die Laufzeit der Heißluftpistole, so beträgt der Energieverbrauch für die Verbindungsheizung

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{conv} &= P_{conv} t_{conv} \\ &= c_p \dot{m} (T_{out.air} - T_0) t_{conv}. \end{aligned}$$

Energieverbrauch für die induktive Erwärmung Wie in [Gergely, Hochenauer, *Energies*, 2023] beschrieben, wird die für die induktive Erwärmung verbrauchte elektrische Energie berechnet, indem die anfängliche Spitzenleistung und die darauffolgende niedrigere Leistung des Induktors berücksichtigt werden:

$$\mathcal{E}_{ind} = (P_1 + P_2 n_{ind}) t_{pass} / \eta,$$

dabei ist t_{pass} die Zeit, in der Induktor das Werkstück durchläuft, n_{ind} die Anzahl der Durchläufe für die geringere Leistung und η der Wirkungsgrad, der experimentell auf 0,9 festgelegt wurde. Da t_{pass} außerdem durch die Vorschubgeschwindigkeit des Induktors und die Länge L des Werkstücks berechnet werden kann. Der Energieverbrauch für die induktive Erwärmung lässt sich dann wie folgt berechnen

$$\mathcal{E}_{ind} = \frac{(P_1 + P_2 n_{ind}) L}{\eta \cdot vel_f}.$$

Bemerkung: bei diesen Versuchen wurde der Induktor beim ersten Durchlauf mit einer höheren Leistung P_1 (z. B. 1500 W) und bei den folgenden Durchläufen mit einer niedrigeren Leistung P_2 (z. B. 500 W) betrieben. Mit "Passes inductor after peak" n_{ind} wird beschrieben, wie viele Durchläufe der Induktor das Werkstück mit der reduzierten Leistung P_2 durchlaufen hat. Die Details können in [Gergely, Hochenauer, *Energies*, 2023] nachgelesen werden.

Gesamtenergieverbrauch für die kombinierte Heizung (die Zielfunktion)

Summiert man die konvektive und die induktive Energie, erhält man die Gesamtenergie für den kombinierten Prozess

$$\begin{aligned}\mathcal{E}_{total} &= (T_{out.air} - T_0) t_{conv} + \frac{(P_1 + P_2 n_{ind}) L}{\eta \cdot vel_f} \\ &= \mathcal{E}(\dot{m}, T_{out.air}, t_{conv}, P_1, P_2, vel_f, n_{ind})\end{aligned}$$

wobei die Eingangsargumente hier aufgeführt sind:

- der Massenstrom aus der Heißluftpistole;
- die Temperatur der von der Heißluftpistole abgegebenen Heißluft;
- die Zeit für die konvektive Erwärmung (Laufzeit der Heißluftpistole);
- höhere und niedrigere Leistungen für den Induktor;
- die Vorschubgeschwindigkeit des Induktors;
- die Anzahl der Durchläufe des Induktors bei niedriger Leistung.

3.2.3.3 Optimierung mit Einschränkung

Der Einfachheit halber sei \mathbf{h} ein Vektor, der aus allen oben aufgeführten Eingangsargumenten besteht, d. h.,

$$\mathbf{h} := [\dot{m}, T_{out.air}, t_{conv}, P_1, P_2, vel_f, n_{ind}]'.$$

Legt man die anderen Einstellungen für den kombinierten Erwärmungsprozess fest und betrachtet ein Werkstück mit seiner Oberfläche Σ , für eine gegebene Eingabe \mathbf{h} , kann man den oben beschriebenen Simulationslöser aufrufen, um die Temperaturverteilung für den gesamten Erwärmungsprozess zu erhalten. Auf dieser Grundlage kann eine Abbildung erstellt werden,

$$\tilde{\mathcal{A}} : \mathbf{h} \mapsto T(\Sigma),$$

wobei $T(\Sigma)$ nur die (endgültige) Temperaturverteilung auf der Oberfläche des Werkstücks am Ende eines bestimmten Erwärmungsprozesses ist. Betrachten wir nun die Endtemperatur eines gegebenen Erwärmungsprozesses an 9 Messpunkten auf dem Werkstück, wie in [Gergely, Hochenauer, *Energies*, 2023] gezeigt, d. h.,

Energieforschungsprogramm - XX. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

$$\mathbf{T}_{end} := [T_1(t_{end}), T_2(t_{end}), \dots, T_9(t_{end})]'$$

Ähnlich wie bei der oben definierten Abbildung \tilde{A} wird durch den Aufruf des Simulationslösers eine neue Abbildung

$$\mathcal{A} : \mathbf{h} \mapsto \mathbf{T}_{end}$$

Mit den oben erwähnten Einstellungen und Bezeichnungen kann für einen gegebenen Eingangsargumentationsvektor \mathbf{h} , den gesamten Energieverbrauch wie oben definiert, das folgende Minimierungsproblem aufgestellt werden:

$$\begin{aligned} & \min_{\mathbf{h}} \mathcal{E}(\mathbf{h}), \\ \text{subject to} & \quad \min(\mathcal{A}(\mathbf{h})) \geq T^*, \end{aligned}$$

wobei $\min(\mathcal{A}(\mathbf{h}))$ das Minimum des Vektors $\mathcal{A}(\mathbf{h})$ und T^* eine gegebene Zieltemperatur, z.B. 100°C , ist.

Wertebereiche für die Eingangsargumente und Variation des Optimierungsmodells

Hier wird davon ausgegangen, dass die anderen Einstellungen in den kombinierten Heizungsversuchen fest sind. Die Werte bzw. Wertebereiche für die betrachteten Eingangsargumente sind nachfolgend aufgeführt.

input arguments	values in the current experiments	possible values or value ranges	unit
\dot{m}	6e-3, 12e-3	[6e-3, 12e-3]	kg/s
$T_{out.air}$	573.15	[423.15, 623.15]	K
t_{conv}	239, 252	[200, 400]	s
P_1	1500	[1200, 1800]	W
P_2	500	[400, 600]	W
vel_f	0.025	[0.02, 0.03]	m/s
n_{ind}	4,5	[3, 8]	integer

Table 1: Possible values or value ranges for the input arguments

Die Versuchsergebnisse zeigen, dass die aktuellen Werte der in den Versuchen verwendeten Eingangsparameter eine gute Leistung aufweisen. Durch die Lösung des oben vorgestellten Optimierungsmodells können die optimalen Einstellungen oder Kombinationen der Eingangsparameter für den betrachteten Heizfall und das Rechteckprofil ermittelt werden.

Es ist zu beachten, dass die Lösung des vorgeschlagenen Optimierungsmodells nur den Gesamtenergieverbrauch für das betrachtete Werkstück und den festen Versuchsaufbau minimieren kann. Es können verschiedene Optimierungsmodelle entwickelt werden, indem die Eingangsparameter erhöht oder verringert, die Zielfunktion modifiziert und die Nebenbedingungen geändert werden. Werden mehrere bewegliche Indikatoren berücksichtigt, kann auch die Position der Indikatoren im Verhältnis zueinander in das Optimierungsmodell einbezogen werden.

3.2.4 Ersatzmodelle und Modelle reduziert Ordnung

Zur effizienten Durchführung von simulationsbasierter Optimierung wurden statistische Ersatzmodelle entwickelt und für den Einsatz für hochdimensionale Probleme modifiziert. Ähnlich wie beim maschinellen Lernen müssen solche Modelle in einer Offline-Phase mit Hilfe eines Pools von Trainingsdaten erstellt und mittels der Maximum-Likelihood-Methode kalibriert werden. Im Projekt wurden solche Methoden betrachtet, die neben den Primärdaten auch Ableitungsinformationen ausnutzen können, da diese von anderen Projektpartnern bereitgestellt wurden, insbesondere das Gradienten-erweiterte Kriging (Gradient-enhanced Kriging (GE-Kriging)).

4 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

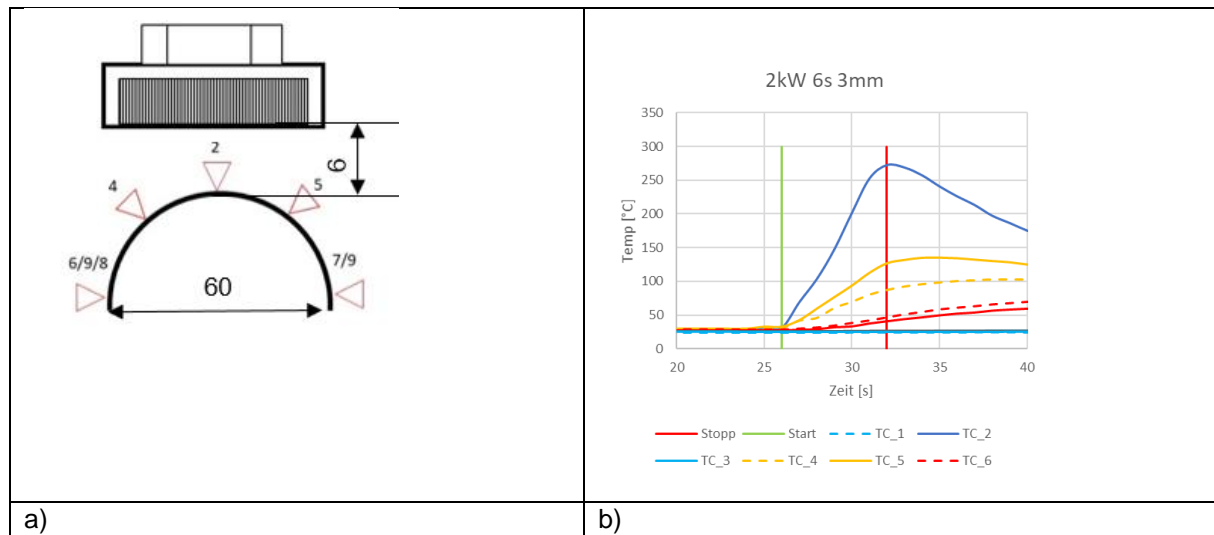
4.1 Experimente

4.1.1 Erste Experimentalreihen

Stellvertretend für die Vielzahl der durchgeführten Versuche werden hier die Ergebnisse für 2 Profile diskutiert.

Im ersten Versuch wurde ein halbkreisförmiges Profil aus unlegiertem Stahl mit 2 kW für 6 Sekunden induktiv erwärmt (siehe hierzu Abbildung 18). Die Temperatursensoren wurden wie in der Abbildung gezeigt angebracht, wobei sich alle Sensoren im Querschnitt direkt unter der Induktorspule befanden. Es zeigte sich das erwartete und in der Literatur beschriebene Ergebnis. Der Messpunkt, der dem Induktor am nächsten lag, erwärmte sich am schnellsten. Je weiter die Messpunkte vom Induktor entfernt sind, desto mehr erfolgt die Erwärmung durch Wärmeleitung im Werkstück und desto weniger durch Induktion.

Eine weitere Versuchsreihe befasste sich mit der Erwärmung eines Werkstückes, das aus einem ferromagnetischen und einem nicht ferromagnetischen Werkstoff zusammengeschweißt wurde. Dazu wurde unlegierter Stahl mit rostfreiem Stahl gemäß Abbildung 18 verschweißt. Auch hier wurde die Temperatur mit Thermoelementen gemessen, die entsprechend der Abbildung im Querschnitt unter dem Induktor angebracht wurden. Dazu wurde der Induktor für 6 Sekunden mit 2 kW betrieben. Auch hier zeigte sich das erwartete Ergebnis. Die Messpunkte in der Nähe des Induktors erreichten höhere Temperaturen und die Seite des ferromagnetischen Materials erreichte höhere Temperaturen als die Seite des unlegierten Materials.



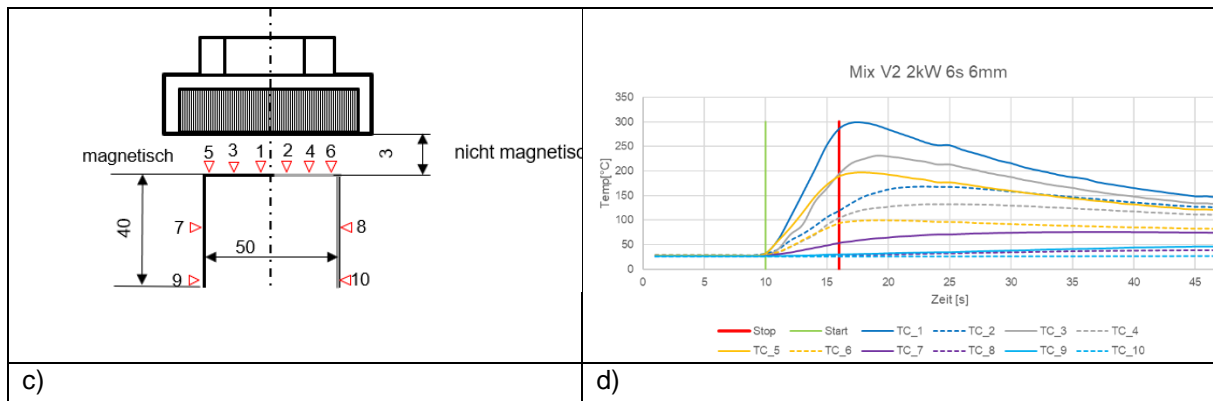


Abbildung 18: Ausgewählte Ergebnisse der ersten Versuchsreihe a) Halbkreisprofil; b) Ergebnisse Halbkreisprofil; c) Rechteckprofil Materialmix; d) Ergebnisse Rechteckprofil Materialmix

4.1.2 Steady State Experimente

Die vorgestellten Ergebnisse für die stationären Versuche basieren auf der folgenden Publikation, die derzeit als Preprint online verfügbar ist: „Investigation of Induction Heating for Sheet Metal with Moving Induction Coil“ [10]

Die Ergebnisse der Steady-State Versuche sind für Edelstahl und für unlegierten Stahl in Abbildung 19 sowie detaillierter in Tabelle 1 und Tabelle 2 dargestellt. Die Abbildungen zeigen den Zusammenhang zwischen Leistung, Luftspalt und Wirkungsgrad. Die unterschiedlichen Luftspalte sind farblich gekennzeichnet. Um für jede Versuchsreihe die gleichen Bedingungen zu erhalten, wurde die obere Leistungsgrenze gewählt, um ein Sieden des Wassers in der Nähe der Rohrwand zu verhindern. Für größere Luftspalte wurden keine Experimente mit geringerer Leistung durchgeführt, da dies zu einer geringen Temperaturdifferenz führen könnte, die einen signifikanten Anstieg des Messfehlers zur Folge hätte. Der wichtigste Parameter in dieser Studie ist der Luftspalt, wie der signifikante Rückgang des Wirkungsgrades für unlegierten Stahl von 69,3 % bei einem Luftspalt von 1 mm auf 28,3 % bei einem Luftspalt von 9 mm bei gleicher Ausgangsleistung zeigt. Darüber hinaus ist eine deutliche Tendenz zur Abnahme des Wirkungsgrades zu erkennen, wenn die Leistungsabgabe des Induktors reduziert wird.

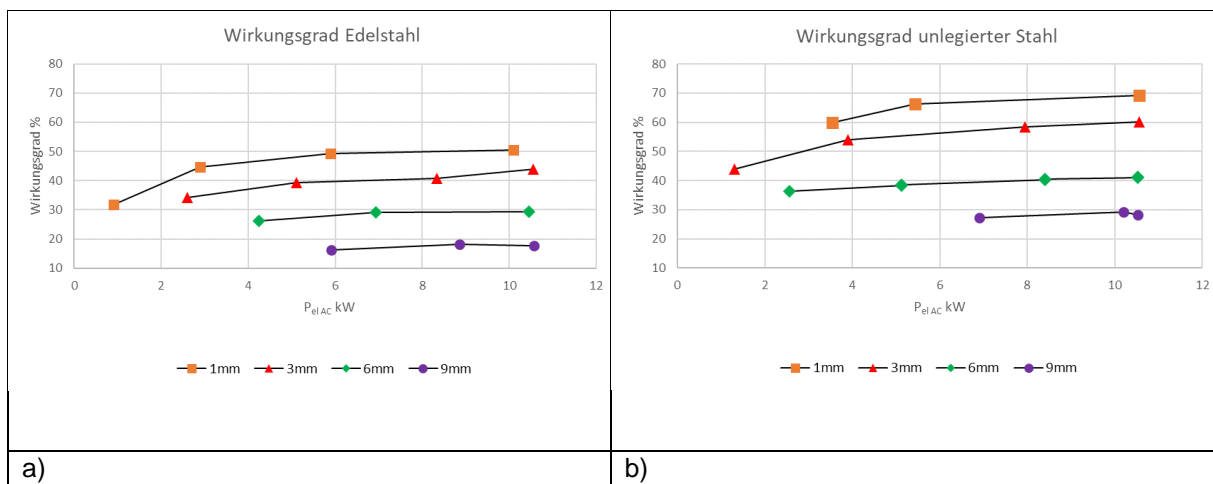


Abbildung 19: Parameterfelder für Steady-State Prüfstand a) Edelstahl; b) unlegierter Stahl

Energieforschungsprogramm - XX. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Tabelle 1: Steady-State Experimente Edelstahl

Experiment	Luft Spalt mm	P DC kW	P el AC kW	Q heat effective kW	Heat loss ind. kW	Wirkungsgrad %
S 1-1	1	10.1	10.42	5.27	4.63	50.6
S 1-2	1	5.9	6.20	3.05	2.93	49.2
S 1-3	1	2.9	3.06	1.37	1.57	44.7
S 1-4	1	0.9	1.05	0.34	0.60	31.9
S 3-1	3	10.3	10.56	4.64	5.38	43.9
S 3-2	3	8.2	8.33	3.40	4.66	40.8
S 3-3	3	4.8	5.11	2.01	2.76	39.4
S 3-4	3	2.3	2.60	0.89	1.48	34.3
S 6-1	6	10.1	10.45	3.08	6.86	29.5
S 6-2	6	6.5	6.94	2.01	4.56	29.0
S 6-3	6	4	4.24	1.11	2.84	26.2
S 9-1	9	10.2	10.57	1.87	7.90	17.6
S 9-2	9	8.5	8.85	1.62	6.84	18.3
S 9-3	9	5.6	5.90	0.96	4.43	16.3

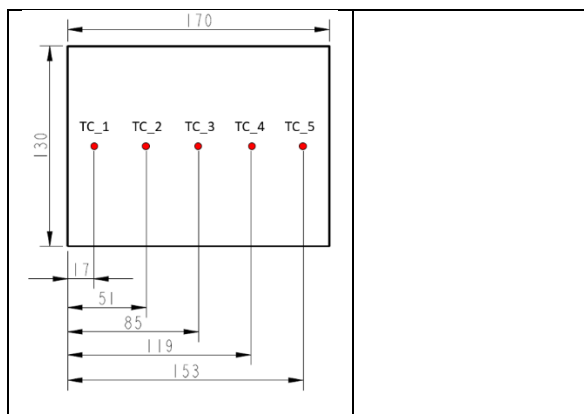
Tabelle 2: Steady-State Experimente unlegierter Stahl

Experiment	Luftspalt mm	P DC kW	P el AC kW	Q heat effective kW	Heat loss ind. kW	Wirkungsgrad %
U 1-1	1	10.2	10.56	7.32	2.81	69.3
U 1-2	1	5.3	5.441	3.60	1.66	66.2
U 1-3	1	3.4	3.546	2.12	1.20	59.9
U 2-1	3	10.2	10.56	6.36	3.86	60.3
U 2-2	3	7.5	7.953	4.65	2.98	58.4
U 2-3	3	3.6	3.9	2.11	1.54	54.0
U 2-4	3	1.1	1.301	0.57	0.54	44.0
U 6-1	6	10.2	10.53	4.35	5.61	41.3
U 6-2	6	8.1	8.4	3.41	4.65	40.6
U 6-3	6	4.8	5.122	1.97	2.80	38.4
U 6-4	6	2.4	2.565	0.93	1.50	36.2
U 9-1	9	10.2	10.53	2.98	6.99	28.3
U 9-2	9	9.9	10.2	2.99	6.81	29.3
U 9-3	9	6.6	6.9	1.89	4.56	27.3

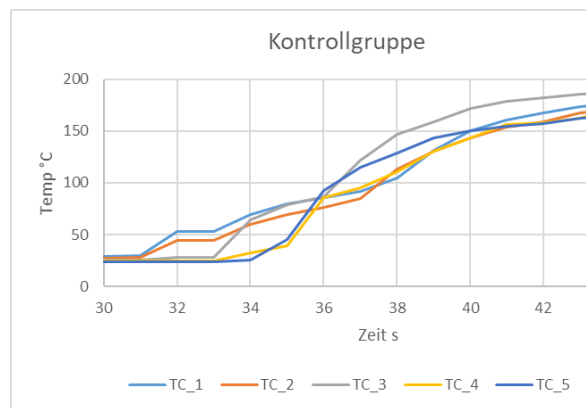
4.1.3 Auswirkung Lack

Die Versuche mit Magnetit und gewöhnlichem Eisenoxid führten in beiden Fällen zu den gleichen Ergebnissen (Abbildung 20). In beiden Fällen konnte an den jeweils 5 Messpunkten kein

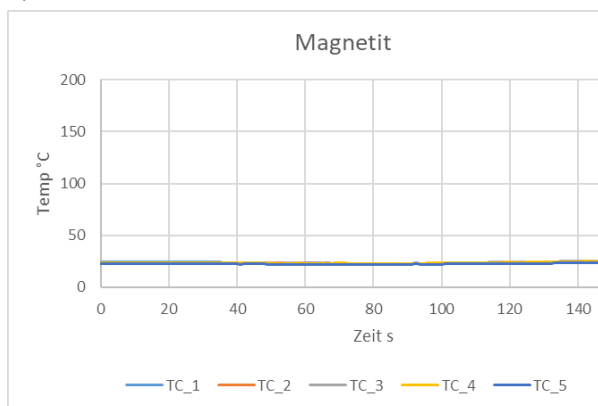
Temperaturanstieg gemessen werden, obwohl der Induktor die ganze Zeit über das Werkstück bewegt wurde und mit einer Leistung von 3 kW betrieben wurde. Daher wurde diese Versuchsreihe nach 100 bzw. 160 Sekunden abgebrochen. Zum Vergleich hat die Kontrollgruppe, in der ein unlegiertes Blech erwärmt wurde, nach 40s über 150°C erreicht. Diese Versuche führten also zu dem Ergebnis, dass der Einfluss des Lackes, auch wenn er magnetische Partikel enthält, vernachlässigbar ist.



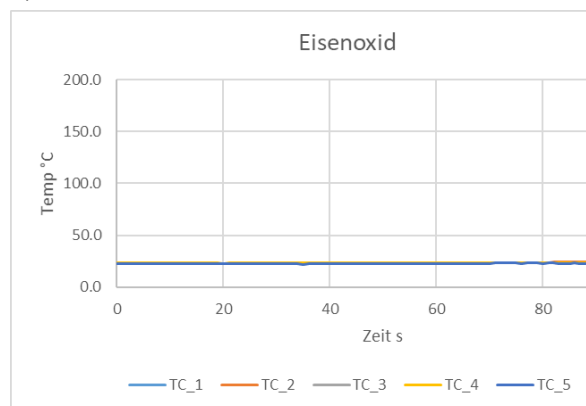
a)



b)



c)



d)

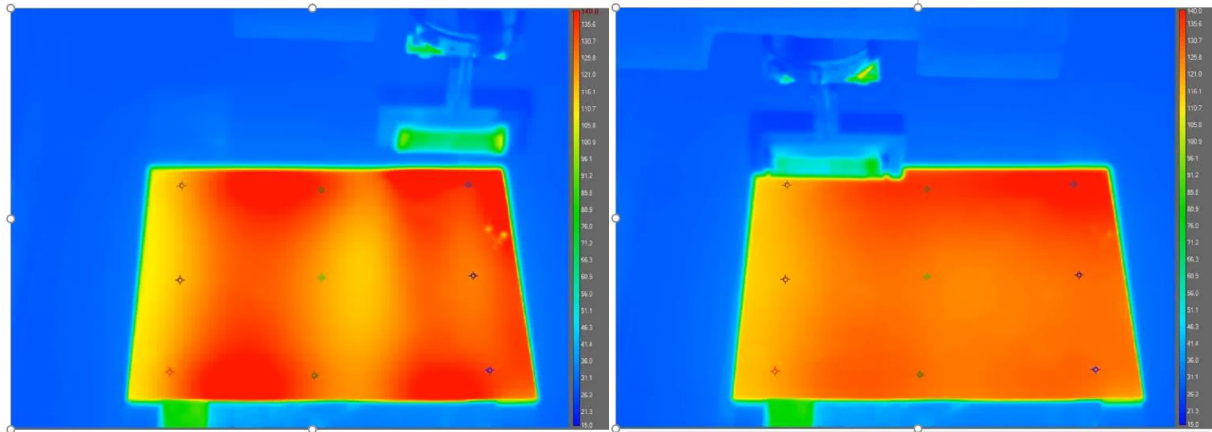
Abbildung 20: Ergebnisse der Lack Versuche a) Positionierung Thermoelemente; b) Kontrollgruppe; c) Ergebnisse Magnetit; d) Ergebnisse Eisenoxid

4.1.4 Planare Experimente mit bewegten Induktor; erste Versuche

Abbildung 21 zeigt thermografische Aufnahmen des Werkstücks nach a) dem ersten Abtasten, b) dem zweiten Abtasten und c) am Ende des Versuchs. Deutlich ist die zunehmende Homogenität des Temperaturfeldes zu erkennen. Dies wird auch in Abbildung 22 bestätigt, in der die Temperatur der 9 Thermoelemente als Funktion der Zeit dargestellt ist. Diese Versuchsreihe war sehr erfolgreich und hat bewiesen, dass eine homogene Temperaturverteilung mit einem beweglichen Induktor möglich ist.

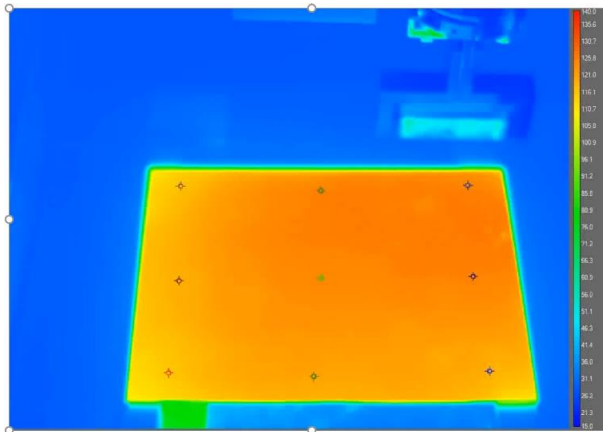
Energieforschungsprogramm - XX. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische
Forschungsförderungsgesellschaft FFG



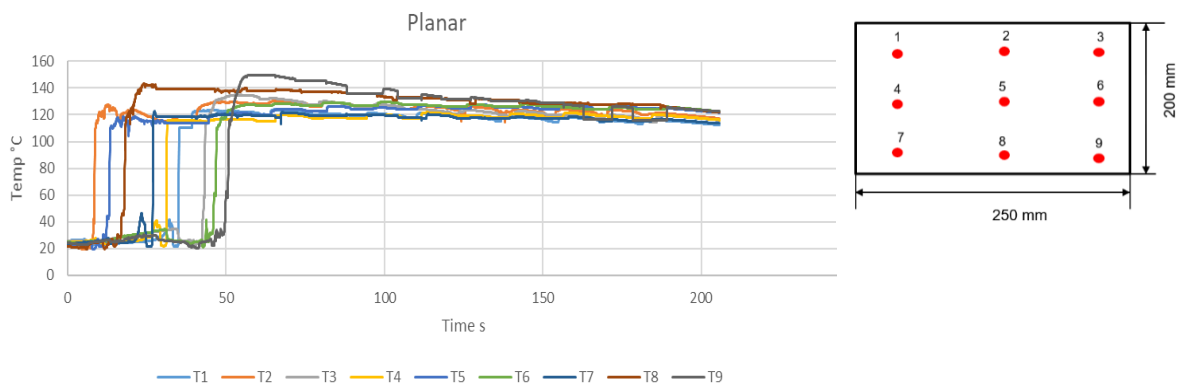
a)

b)



c)

Abbildung 21: Thermographie des Werkstücks a) nach 3 Verfahrenwegen; b) nach 6 Verfahrenwegen; c) am Ende des Experiments



Energieforschungsprogramm - XX. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

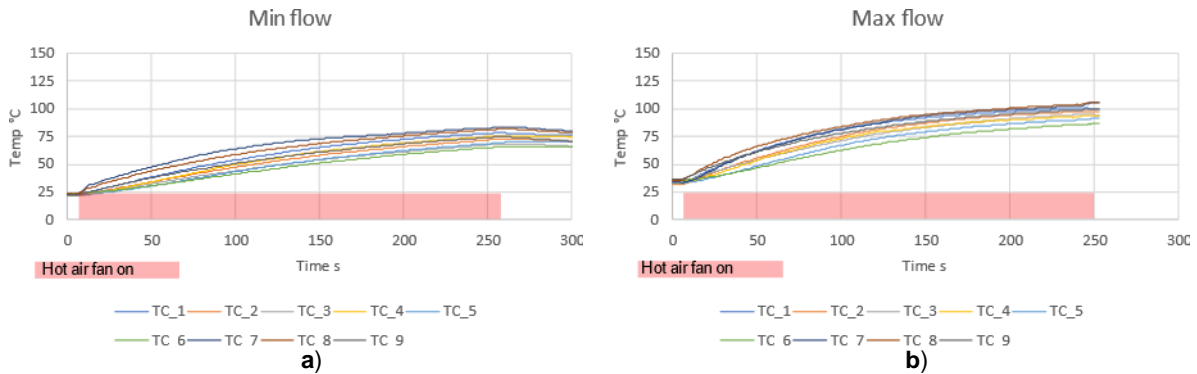
a)

b)

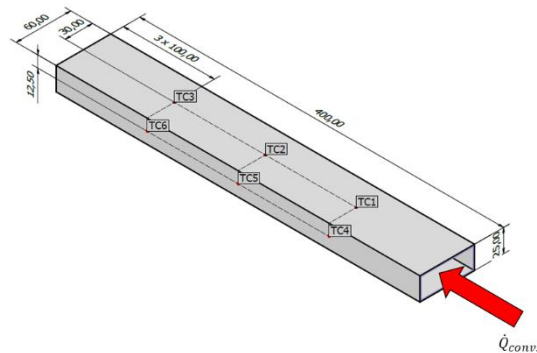
Abbildung 22: a) Zeitlicher Verlauf der Temperatur b) Position der Messpunkte

4.1.5 Kombinierte Aufwärmung Konvektion und Induktion

Die Ergebnisse für die kombinierte Erwärmung sind der folgenden Veröffentlichung entnommen: „Heating Strategies for Efficient Combined Inductive and Convective Heating of Profiles“ [11]



	Min	Max	
Leistung Konvektion	1672.8	3073.4	W
Zeit Konvektion	252.0	239.0	S
Massenstrom Luft	6.0	11.1	g/s
Temp. Luft Austritt	171.0	203.4	°C
Überfahrten des Induktors	0	0	-
Energie Induktor	0	0	J
Energie Konvektion	421.6	734.5	J
Benötigte elektrische Energie Gesamt	421.6	734.5	J
Durchschnittliche Temp. am Ende	74.5	96.0	°C



c)

d)

Abbildung 23: Ergebnisse konvektives Erwärmen a) Ergebnisse min. Massenstrom b) Ergebnisse max. Massenstrom c) Betriebsparameter Experiment d) Werkstück mit Messstellen Position [11]

Energieforschungsprogramm - XX. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

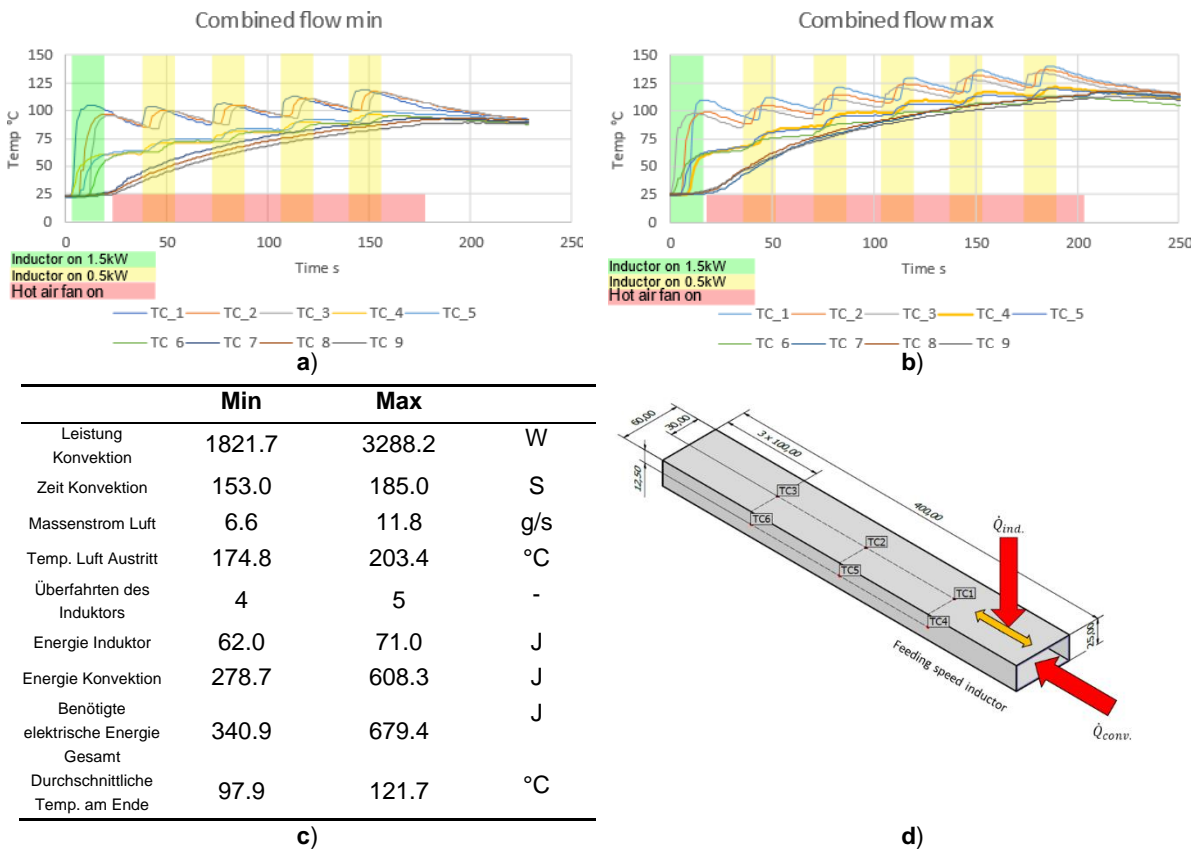


Abbildung 24: Ergebnisse kombiniertes Erwärmen a) Ergebnisse min. Massenstrom b) Ergebnisse max. Massenstrom c) Betriebsparameter Experiment d) Werkstück mit Messstellen Position [11]

Tabelle 3: Ergebnisse Kombinierte Experimente [11]

Experiment	Profile	Konvektive Leistung	Zeit konvektive Erwärmung	Massenstrom Luft	Überfahrten Induktor	Energie Induktion	Energie Konvektion	Benötigte elektrische Energie Gesamt	Durchschnittstemperatur am Ende
		W	s	10 ⁻³ kg s ⁻¹	-	J	J	J	°C
Flow min.	Rechteckig	1672.8	252	6.0	0	0	421.5	421.5	74.5
Flow max.	Rechteckig	3073.4	239	11.1	0	0	734.5	734.5	96.0
Komb. min.	Rechteckig	1821.7	153	6.6	4	62.2	278.7	340.9	97.0
Komb. max.	Rechteckig	3288.2	185	11.8	5	71.1	608.3	679.4	121.7
Flow min.	Gewinkelt	1651.7	308	5.9	0	0	508.7	508.7	82.8
Flow max.	Gewinkelt	3535.3	191	11.1	0	0	675.5	675.5	101.0
Komb. min.	Gewinkelt	1753.5	210	6.3	6	62.2	368.2	430.4	103.1
Komb. max.	Gewinkelt	1430.6	219	12.4	6	80	751.3	831.3	117.0

Die Ergebnisse der Versuche waren vielversprechend. Abbildung 23 zeigt die Erwärmung der Profile durch reine Konvektion; diese Versuche dienen als Grundlage für den späteren Vergleich mit den kombinierten Konvektions- und Induktionsversuchen. Die gleichen Versuche wurden auch für das abgewinkelte Profil durchgeführt, wie in Abbildung 8 dargestellt. Die hier gezeigten Experimente wurden mit zwei verschiedenen Heißluftmassenströmen durchgeführt (die Massenströme sind in den Tabellen in Abbildung 23 und Abbildung 24 angegeben). Mit reiner Konvektion und den Heißluftgebläsen auf minimalen Massenstrom der Heißluftgebläse wurde eine durchschnittliche Temperatur von 74,46°C erreicht, mit beiden Heißluftgebläsen auf Massenstrom der Heißluftgebläse wurde eine durchschnittliche Temperatur von 95,98°C erreicht. Diese Temperatur ist für den späteren Vergleich

wichtig, da dies die Zieltemperatur für den Versuch mit der minimalen Leistung der Heißluftgebläse in Kombination mit der Induktionsheizung war.

Die Ergebnisse für die rechteckigen und abgewinkelten Profile sind in Tabelle 3 dargestellt, wobei die durchschnittliche elektrische Leistungsaufnahme der Heißluftgebläse in der ersten Spalte angegeben ist. Die Zeit, in der die Konvektionsheizung eingeschaltet war, ist in der zweiten Spalte angegeben. Bei den gezeigten Versuchen wurde der Induktor für den ersten Durchgang immer mit 1500 W betrieben, danach wurde die Leistung auf 500 W reduziert. Die Spalte "Überfahrten Induktor" gibt an, wie oft der Induktor das Werkstück mit reduzierter Leistung passiert hat. Die folgenden Spalten zeigen die gesamte elektrische Energie welche konvektiv induktiv und gesamt, aufgewendet wurde.

Das Einsparungspotential wird am besten durch den Vergleich der rein konvektiven Versuche mit maximaler Luftmenge und der kombinierten Versuche mit minimaler Luftmenge deutlich. Für das rechteckige Profil wurde nach 239 s konvektiver Erwärmung mit maximalem Luftstrom der Heißluftpistole eine mittlere Temperatur von 96,0 °C erreicht. Dies führte zu einer Gesamtenergie von 734,5 J. Eine sehr ähnliche Temperatur von 97,9 °C wurde im kombinierten Experiment mit minimalem Luftstrom der Heißluftpistole erreicht, jedoch wurde diese Temperatur wesentlich schneller nach nur 153 s konvektiver Erwärmung erreicht. Da auch die mittlere Leistung der Heißluftpistolen niedriger war (1821,7 W im Vergleich zu 3073,4 W im Experiment mit maximaler Luftströmung) und der Induktor viel weniger Energie benötigte (62,2 J), betrug die gesamte elektrische Energie für das Experiment mit maximaler konvektiver Luftströmung 734,5 J im Vergleich zu 340,9 J für das kombinierte Experiment. Dies entspricht einer Energieeinsparung von 53 %. Ähnliche Ergebnisse wurden für das abgewinkelte Profil erzielt. Hier wurde beim rein konvektiven Versuch nach 191 s eine Temperatur von 101,0 °C und beim kombinierten Versuch nach 210 s eine Temperatur von 103,1 °C erreicht. Der Gesamtenergieverbrauch für das rein konvektive Experiment betrug 675,5 J und für das kombinierte Experiment mit minimaler Luftströmung 368,5 J, was einer Energieeinsparung von 36 % entspricht. Da die konvektiven Heißluftpistolen mit geringerer Leistung betrieben werden konnten, war die Energieeinsparung trotz fehlender Zeitersparnis immer noch recht hoch. Die höhere Energieeinsparung beim rechteckigen Profil lässt sich durch den konstant kleinen Luftspalt zwischen Induktor und Werkstück erklären, wodurch mehr induktive Energie das Werkstück erreichen konnte, während sich beim anderen Profil der Luftspalt entlang der Induktionsspule auf der schrägen Fläche vergrößert.

4.1.6 Wirkungsgrad Betrachtung Induktive Blech Aufwärmung

Den Ergebnissen basieren auf einer Publikation [10] die zurzeit als Preprint verfügbar ist.

Die Ergebnisse der Versuche zur transienten Erwärmung sind in Tabelle 4 für die breiteren und Tabelle 5 für die schmäleren Werkstücke, jeweils für Edelstahl und unlegierten Stahl dargestellt. Der Wirkungsgrad zwischen den beiden Werkstücken bleibt bei gleichen Luftspalten und Induktionsleistungen nahezu gleich. Wie bei den stationären Versuchen ist deutlich zu erkennen, dass auch bei den transienten Versuchen der Wirkungsgrad mit zunehmendem Luftspalt deutlich abnimmt, z.B. für unlegierten Stahl von 47,41 % bei einem Luftspalt von 3 mm auf 30,5 % bei 9 mm. Zwischen den verschiedenen Materialbreiten gibt es keine großen Unterschiede im Wirkungsgrad, z.B. 33,89 % für das breitere Werkstück im Vergleich zu 34,75 % für das schmalere, jeweils bei einem Luftspalt von 3 mm und einer Leistung von 2,33 kW und mit Edelstahl.

Die wichtigsten Ergebnisse dieser Arbeit sind in Abbildung 25 dargestellt. Sie zeigen das Parameterfeld zwischen dem Wirkungsgrad, der Leistung des induktiven Heizelements und dem Luftspalt der Steady-State-Experimente. Diese Ergebnisse werden mit den transienten Experimenten im gleichen Diagramm verglichen.

Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass die transienten Ergebnisse genau in den Trend des validierten Parameterfeldes passen, was als Obergrenze für die Effizienz angesehen werden kann. Somit wird bestätigt, dass die gezeigte Heizstrategie, bei der die Induktionsspule über das Werkstück bewegt wird, eine effiziente Heizstrategie ist.

Die Erkenntnisse aus den transienten Versuchen können auf andere industrielle Anwendungen übertragen werden. Der verwendete Temperaturbereich von bis zu 140°C ähnelt dem beim Aushärten und Trocknen von Lacken, wo eine gleichmäßige Temperaturverteilung von großer Bedeutung ist.

Tabelle 4: Ergebnisse Blech Experimente breitere Geometrie [10]

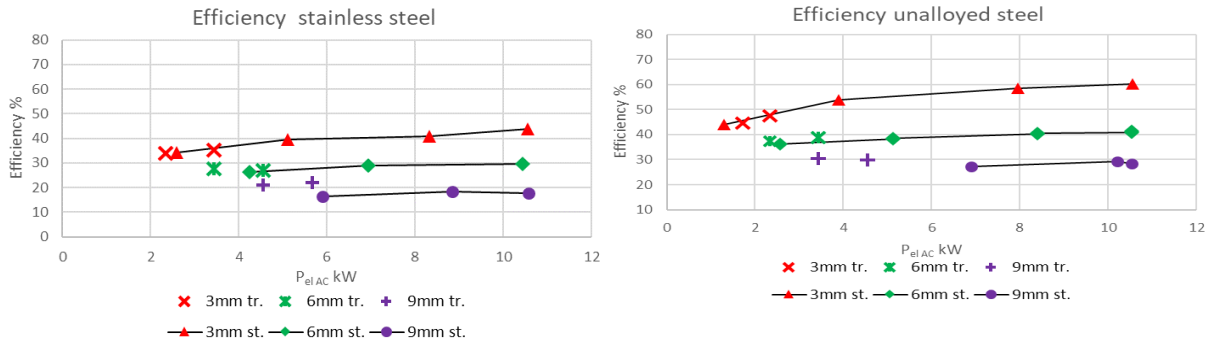
	Material; Width	Air gap mm	Pel AC kW	η %
TS 3-1	Stainless 222	3	2.33	33.89
TS 3-2	Stainless 222	3	3.44	35.14
TS 6-1	Stainless 222	6	3.44	27.22
TS 6-2	Stainless 222	6	4.56	28.33
TS 9-1	Stainless 222	9	4.56	21.32
TS 9-1	Stainless 222	9	5.67	22.09
TU 3-1	Unalloyed 222	3	1.72	44.69
TU 3-2	Unalloyed 222	3	2.33	47.41
TU 6-3	Unalloyed 222	6	2.33	37.32
TU 6-1	Unalloyed 222	6	3.44	38.94
TU 9-1	Unalloyed 222	9	3.44	30.50
TU 9-2	Unalloyed 222	9	4.56	29.95

Tabelle 5: Ergebnisse Blech Experimente schmalere Geometrie [10]

	Material; Width	Air gap mm	Pel AC kW	η %
TS 3-3	Stainless 148	3	2.33	34.75
TS 3-4	Stainless 148	3	3.44	35.20
TS 6-3	Stainless 148	6	3.44	27.72
TS 6-4	Stainless 148	6	4.56	27.09
TS 9-3	Stainless 148	9	4.56	20.90
TS 9-4	Stainless 148	9	5.67	21.04
TU 3-3	Unalloyed 148	3	1.72	47.44
TU 3-4	Unalloyed 148	3	2.33	46.73
TU 6-3	Unalloyed 148	6	2.33	40.34
TU 6-4	Unalloyed 148	6	3.44	39.77
TU 9-3	Unalloyed 148	9	3.44	32.93
TU 9-4	Unalloyed 148	9	4.56	29.21

Energieforschungsprogramm - XX. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG



a)

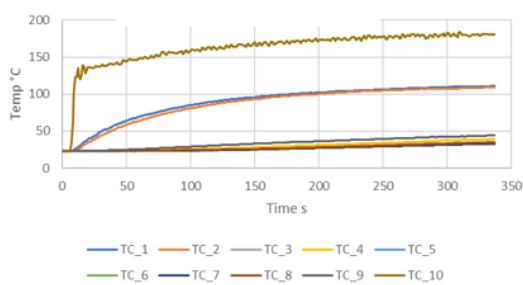
b)

Abbildung 25: Vergleich Translatorisches Experiment mit Steady State Experimenten a) Edelstahl b) unlegierter Stahl [10]

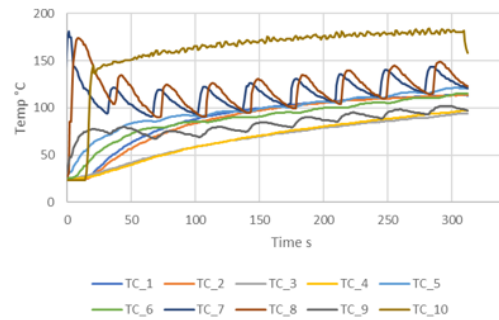
4.1.7 Experimente Anströmung Extern

Durch die Kombination von Induktion und Konvektion konnte die Homogenität des Temperaturfeldes im Vergleich zur reinen Konvektionserwärmung stark verbessert werden (Abbildung 26 a) und b)). Dennoch ist es aufgrund der komplexen Geometrie des B-Sälen Dummies schwierig, eine bessere Homogenität zu erreichen.

Es ist eine Herausforderung, eine gleichmäßige Erwärmung durch Induktion zu erreichen. Aufgrund des Skin-Effekts erhält nur die erste Schicht unterhalb der Spule nahezu die gesamte induktive Leistung. Die nachfolgenden Lagen werden durch Wärmeleitung erwärmt. Die Wärmeübertragung zwischen den Schichten 1 und 2 erfolgt durch Konvektion und Strahlung.



a)



b)

P ind initial [kW]	1.5
P konv [kW]	3.6
Air gap [mm]	3
Feeding speed [mm/min]	1500
Velocity air stream [m/s]	~20
Temperature outlet [°C]	~150

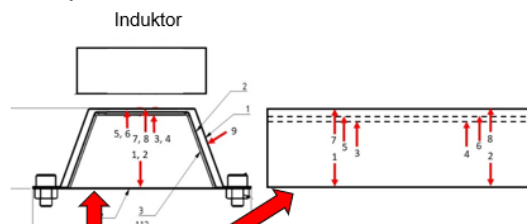


Abbildung 26: Ergebnisse B-Säulen a) Rein konvektiv; b) Kombination konvektiv induktiv; c) Betriebsparameter Experiment; d) Werkstück und Position der Messstellen

4.1.8 Vergleich beidseitiger Konvektion mit Kombination aus Konvektion und Induktion

Die Ergebnisse beider Experimente sind in Abbildung 27 für das reine Konvektionsexperiment und in Abbildung 28 für die Kombination von Induktion und Konvektion dargestellt. Die Abbildungen zeigen auch die wichtigsten Parameter, mit denen die Experimente durchgeführt wurden. Die benötigte elektrische Energie für die rein konvektive Erwärmung betrug 748,7 kJ und für die kombinierte Erwärmung 362,1 kJ, was einer Energieeinsparung von 51,63 % entspricht.

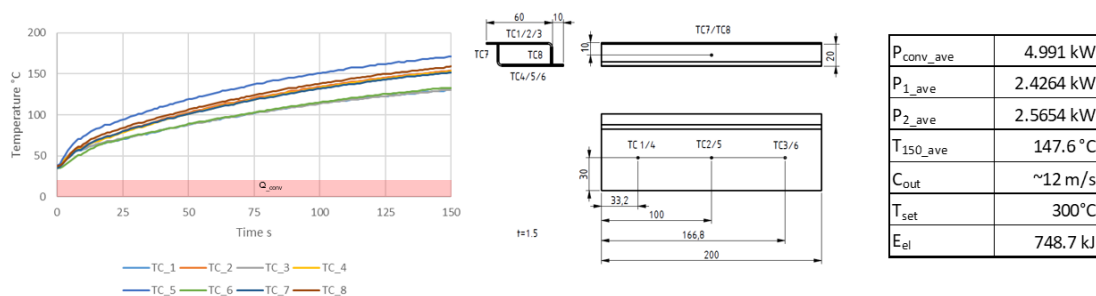


Abbildung 27: Doppelt konvektiv erwärmt

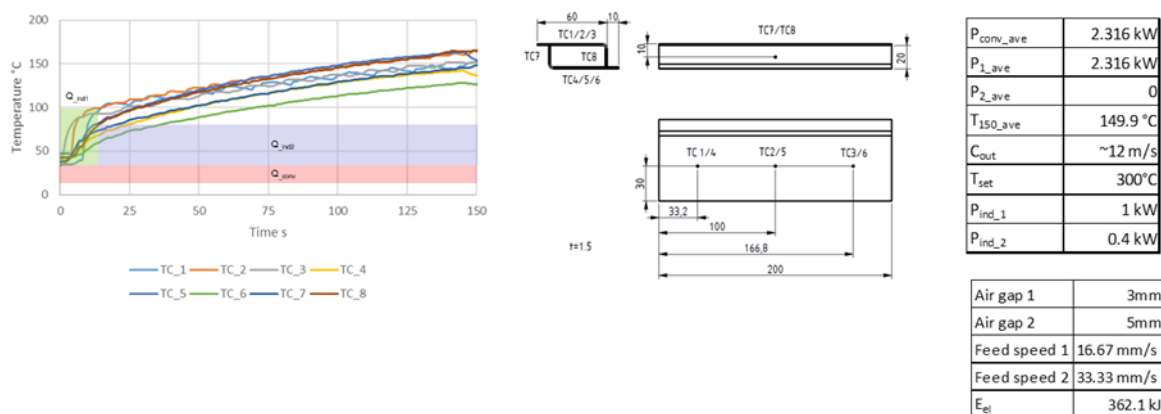


Abbildung 28: Kombination induktiv konvektiv

Energieforschungsprogramm - XX. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

4.1.9 Materialmix

Die Ergebnisse der neu entwickelten Strategie sind in Abbildung 29 dargestellt. Der einzige Messpunkt, der leichte Abweichungen aufweist, ist der Messpunkt TC2, der seitlich am nicht ferromagnetischen Teil des Werkstücks angebracht wurde. Die Anwendung der neu entwickelten Strategie führte zu einer Energieeinsparung von 39,96 % im Vergleich zur reinen konvektiven Erwärmung. Siehe Tabelle 6 für Konvektion und Tabelle 7 für die kombinierte Erwärmungsstrategie.

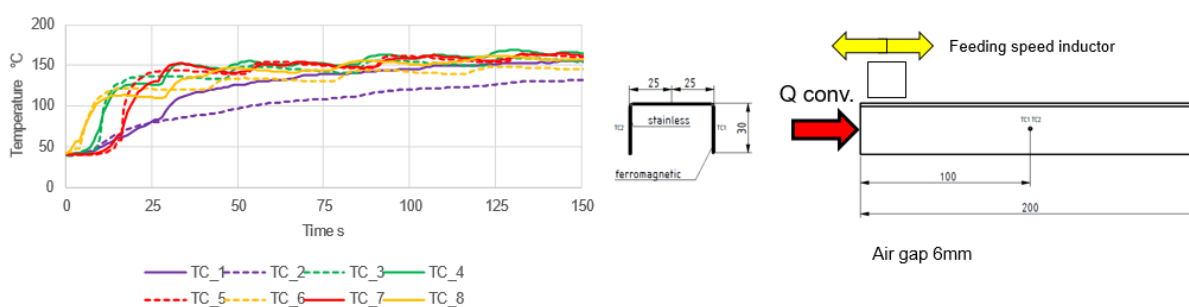


Abbildung 29: Ergebnisse Materialmix

Tabelle 6: Ergebnisse Materialmix rein konvektiv

Leistung Heißluftgebläse	4590W
Durchschnitts Temperatur Ende	150°C
Temperatur erreicht nach	140s
Benötigte elektrische Energie	643.68kJ

Tabelle 7: Ergebnisse Materialmix kombiniert

Leistung Heißluftgebläse	2382W
Durchschnitts Temperatur Ende	154°C
Temperatur erreicht nach	140s
Energie Induktion	97.42kJ
Energy Konvektiv	295.4kJ
Benötigte elektrische Energie	392.81kJ

4.1.10 Neue Einlassgeometrie

Die Ergebnisse der neuen Einlassgeometrie sind in Abbildung 30 dargestellt. Die Thermoelemente, die sich im gleichen Querschnitt befinden, sind hier in der gleichen Farbe dargestellt, wobei die Messstellen an der Oberseite (TC 1-3) durchgezogen und die Messstellen an der Unterseite (TC 4-6) gestrichelt

Energieforschungsprogramm - XX. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

dargestellt sind. Durch die neue Einlassgeometrie gibt es fast keine Temperaturunterschiede in den Querschnitten.

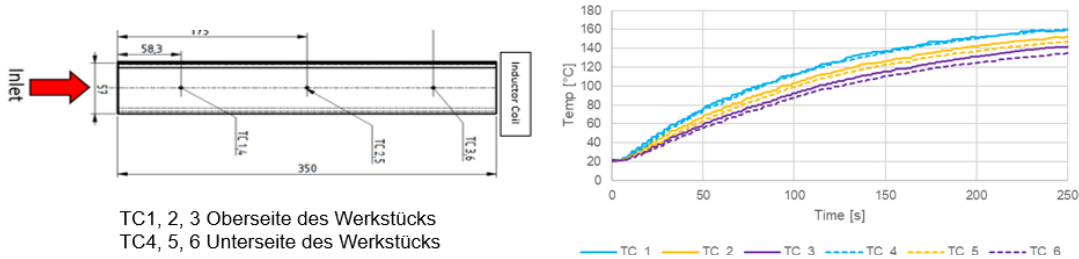


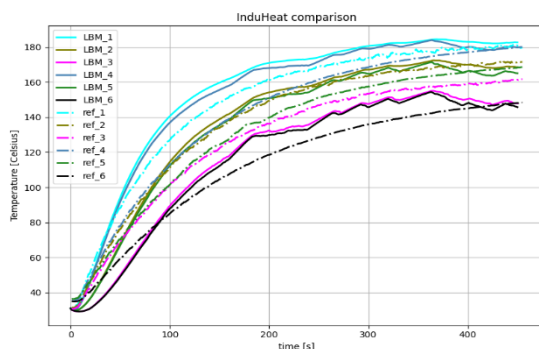
Abbildung 30: Ergebnisse neue Einlassgeometrie

4.2 Simulationen

4.2.1 Simulation mit dem ESS LBM Solver

Die Simulation beginnt mit dem rein konvektiven Inneren des betrachteten rechteckigen Profils. Der spezifische Aufbau kann den experimentellen Informationen in Abschnitt 3 entnommen werden. Die Parameter des thermischen Modells wurden durch frühere Laborexperimente bestimmt/gemessen. Einige dieser Parameter sind in der nachstehenden Tabelle aufgeführt. Die folgende Abbildung zeigt die Simulationsergebnisse für die ersten 6 Messpunkte für 400 Sekunden, wobei die gestrichelten Referenzdaten von früheren Labormessungen stammen.

Luft Eintrittsgeschwindigkeit	6m/s
Luft Eintrittstemperatur	150°C
Auslassdruck	1bar
Wärmeübergangskoeffizient	5W/(m ² K)
Wärmeleitfähigkeit	0.242W/(mK)
Dichte	1.225kg/m ³
Spezifische Wärmekapazität	1.006J/(kgK)



Diese Simulationen werden verwendet, um die Leistung der Experimente und der vorherigen ANSYS-Simulationen weiter zu überprüfen. Außerdem kann auf der Grundlage des ESS-Simulationslösers eine Vorwärtsabbildung erstellt werden, die die gegebenen Eingaben (z. B. Temperatur und Geschwindigkeit

der einströmenden Heißluft und die Leistung des Induktors) auf die endgültige Temperaturverteilung auf dem Werkstück abbildet. Die Vorwärtsabbildung wird dann verwendet, um ein Optimierungsmodell zu erstellen, das den Gesamtenergieverbrauch des Erwärmungsprozesses unter der Bedingung minimiert, dass die Endtemperatur des Werkstücks eine bestimmte Zieltemperatur erreicht.

4.2.2 Kombination Konvektion Induktion

Die Simulationsergebnisse der kombinierten Experimente sind in Abbildung 31 dargestellt. Die Diagramme zeigen den Vergleich zwischen dem Experiment und der transienten Simulation für das rechteckige und das abgewinkelte Profil. Die Positionen der Thermoelemente und Messpunkte in den Simulationen entsprechen den Positionen in Abbildung 8. Die Simulationsergebnisse sind als gestrichelte Linien und die experimentellen Ergebnisse als durchgezogene Linien dargestellt. Die Simulationsergebnisse stimmen gut mit den Messergebnissen überein. Lediglich zu Beginn beider Simulationen, wenn die Temperaturen den ersten Peak erreichen, gibt es einige Abweichungen. Der Peak ist in der Simulation für den Messpunkt TC_1 wesentlich stärker ausgeprägt als im Experiment, was durch die thermische Trägheit der im Experiment verwendeten Thermoelemente und den Wärmeübergang vom Werkstück zu den Thermoelementen erklärt werden kann [14]. Für das schräge Profil sind die Ergebnisse sehr ähnlich, die größte Abweichung zwischen Simulation und Experiment findet sich ebenfalls im ersten Peak sowohl für das Thermoelement TC_3 als auch für TC_5, die Gründe sind die gleichen wie für das rechteckige Profil. Nach dem ersten Peak besteht eine gute Übereinstimmung zwischen Experiment und Simulation.

Nach diesem ersten Peak, der auf eine höhere Leistung des Induktors zurückzuführen ist, stimmen die Ergebnisse der Simulation und des Experiments gut überein. Es ist deutlich zu erkennen, wann der Induktor den Messpunkt passiert, da dies als Peak in den blauen Linien dargestellt ist, die den Messpunkt TC_3 repräsentieren. Nach jedem Peak an TC_3 sinkt die Temperatur aufgrund der Wärmeleitung im Material. TC_9, der am weitesten vom Induktor entfernte Punkt, wird vom Induktor nicht beeinflusst, und die Temperatur steigt aufgrund von erzwungener Konvektion und Wärmeleitung von den vom Induktor erwärmten Bereichen weg.

Abbildung 32 zeigt das Temperaturprofil für 4 verschiedene Zeitschritte. Diese Zeitschritte entsprechen den in Abbildung 31 markierten Zeitschritten. Der Zeitschritt von 5 Sekunden zeigt den ersten Durchgang des Induktors über das kalte Werkstück. Der Temperaturanstieg an der Oberfläche des Induktors ist deutlich zu erkennen, während der Boden des Werkstücks aufgrund des im Vergleich zur Induktion wesentlich langsameren Prozesses der erzwungenen Konvektion relativ kalt bleibt. Die nächsten Bilder zeigen die Simulation für den zweiten, vierten und fünften Durchlauf. Die Temperaturverteilung wird mit jedem weiteren Durchlauf der Induktionsspule gleichmäßiger, da eine Leitung von den heißesten Zonen direkt unter dem Induktor zum unteren Bereich des Werkstücks stattfindet und das Werkstück parallel dazu konvektiv erwärmt wird.

Energieforschungsprogramm - XX. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

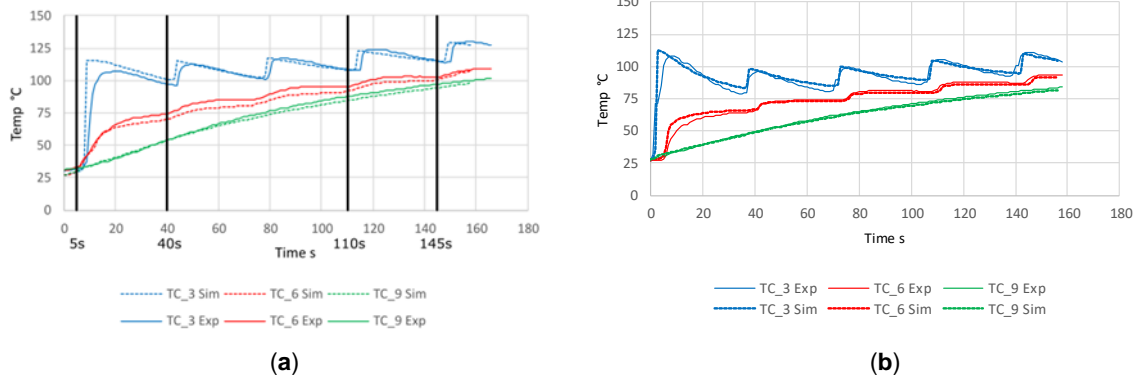


Abbildung 31: Vergleich zwischen Simulation und Experimenten a) Rechteckiges Profil b) Gewinkeltes Profil

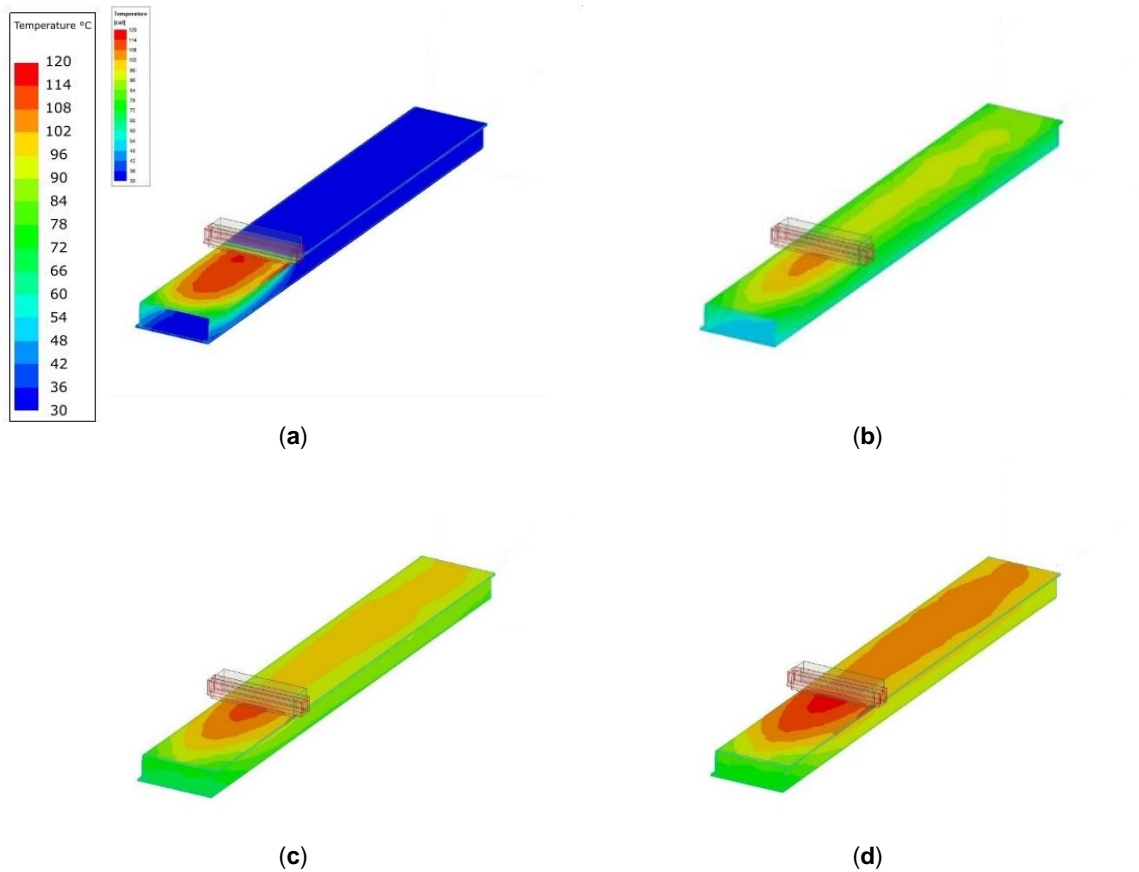


Abbildung 32: Simulation zu verschiedenen Zeitschritten a) 5s; b) 40s; c) 110s; d) 145s

4.2.3 Simulationen Blechaufwärmung

Auch hier wurde die Simulation zur Validierung mit einem vorhandenen Experiment verglichen (Abbildung 33). Die Simulation ist als durchgezogene Linie und das Experiment als gestrichelte Linie dargestellt, wobei die gleichen Messpunkte durch die gleiche Farbe gekennzeichnet sind. Die Endtemperaturen stimmen gut überein, wobei der Gradient in der Simulation deutlich höher ist. Dies ist auf die thermische Trägheit der Thermoelemente zurückzuführen. Da die Endtemperaturen jedoch genau getroffen wurden, war die Simulation erfolgreich.

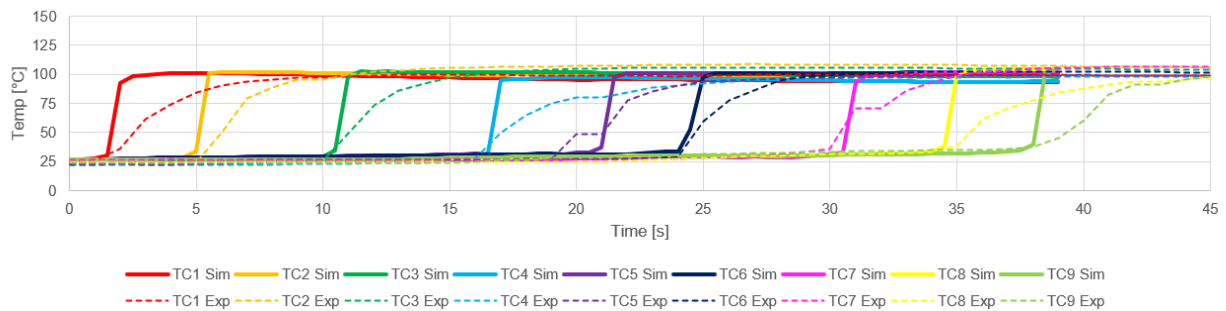


Abbildung 33: Vergleich Simulation Experiment Aufwärmung von Blech

4.2.4 Ersatzmodelle und Modelle reduzierter Ordnung

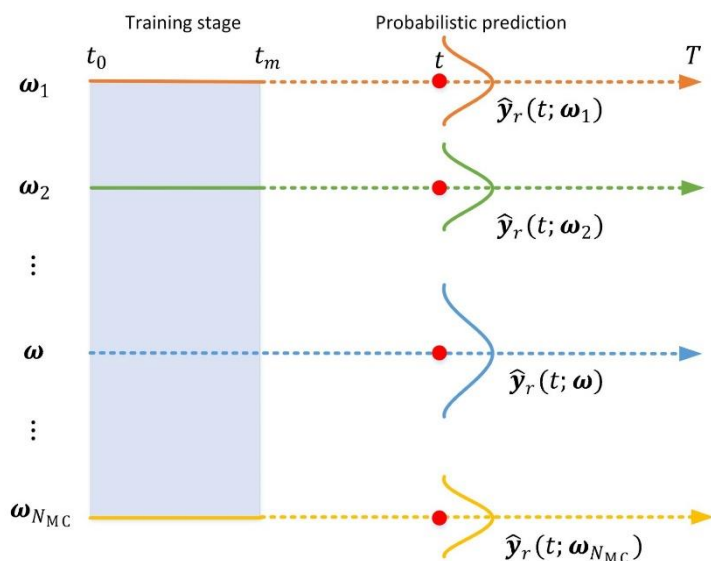
Die Konstruktion eines GE-Kriging-Modells wird bei hochdimensionalen Problemen aufgrund der Größe der inhärenten Korrelationsmatrix und des damit verbundenen hochdimensionalen Hyperparameter-Schätzungsproblems tendenziell selbst sehr rechenaufwändig und wird zudem von numerischer Instabilität beeinträchtigt. Um diese Probleme zu lösen, wurde die neue Variante des SGE-Kriging (Sliced GE-Kriging) entwickelt, um sowohl die Größe der Korrelationsmatrix als auch die Anzahl der Hyperparameter zu reduzieren. Zunächst wird die Trainingsdatenstichprobe im Parameterraum in mehrere Scheiben (Slices) aufgeteilt. Dann wenden wir das Bayes'sche Theorem an, um die vollständige Wahrscheinlichkeitsfunktion durch eine "zerlegte" Likelihood-Funktion zu approximieren, bei der anstatt einer einzigen großen mehrere kleine Korrelationsmatrizen zur Beschreibung der Korrelation des Stichprobensatzes verwendet werden. Anschließend ersetzen wir das ursprüngliche hochdimensionale Hyperparameter-Abstimmungsproblem durch ein niedrigdimensionales Gegenstück, indem wir die Beziehung zwischen den Hyperparametern und den ableitungsbasierten globalen Sensitivitätsindizes lernen. Die Ergebnisse, publiziert in Cheng/Zimmermann, SISC, 2023 zeigen, dass das SGE-Kriging-Modell eine Genauigkeit und Robustheit aufweist, die mit der des herkömmlichen Krigingmodells vergleichbar ist, aber mit wesentlich geringeren Trainingskosten einhergeht. Die Vorteile treten am deutlichsten bei hochdimensionalen Problemen mit Dutzenden von Variablen hervor.

Desweiteren wurde eine datengetriebene, probabilistische Methode zur Konstruktion von Modellen reduzierter Ordnung (ROMs) für parametrisierte nichtlineare dynamische Systeme. Die Basis stellt ein Regressionsmodell für Gaußsche Prozesse dar (Gaussian Process Regression (GPR), mit dessen Hilfe ein nichtlineares, dynamisches System im einem

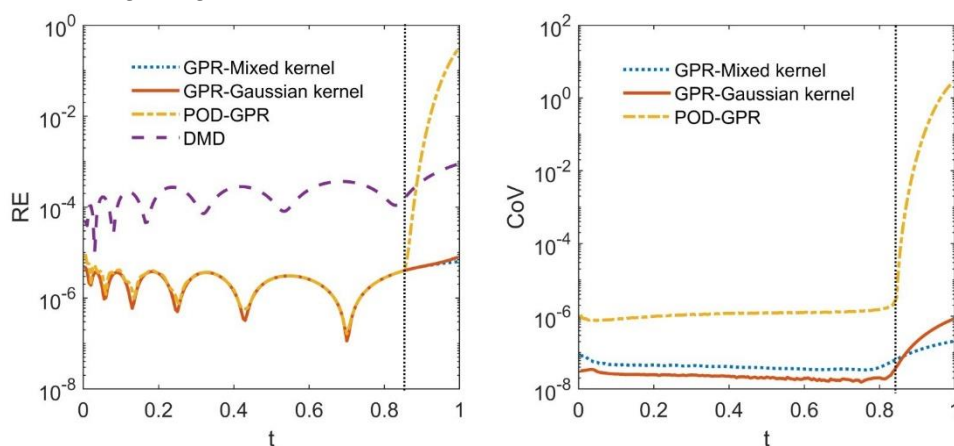
Energieforschungsprogramm - XX. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Unterraum reduzierter Ordnung erlernt werden kann. Der Unterraum wird mittels einer klassischen Hauptkomponentenanalyse (proper orthogonal decomposition, POD) bestimmt. Dies führt zu einem ROM-Verfahren, welches der klassischen “Dynamic Mode Decomposition” (DMD) ähnelt. Allerdings sorgt der probabilistische Zugang dafür, dass nicht nur eine Vorhersage der Trajektorie des dynamischen Modells über den Trainingsbereich hinaus möglich ist, sondern auch die damit verbundene (pseudo-statistische) Unsicherheit geschätzt wird. Dies ist schematisch in der folgenden Abbildung dargestellt.



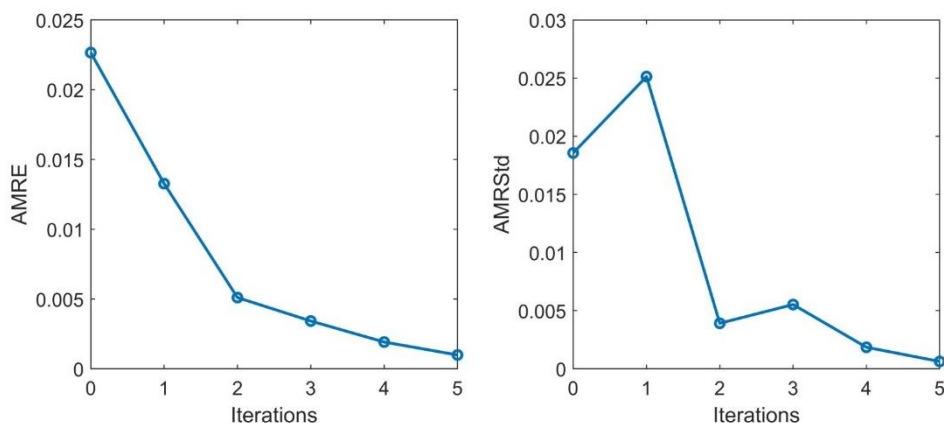
In der nächsten Abbildung werden die Vorhersagefehler der klassischen DMD, des herkömmlichen POD-GPR sowie der neuen Methode für ein zehndimensionales Benchmark-Problem gezeigt.



Insgesamt wird eine Parametrisierung des ROMs mit natürlichen Unsicherheitsschätzungen in der Zeit, im Raum und im Parameterbereich ermöglicht. Anhand der geschätzten Unsicherheiten kann wiederum eine adaptive Verfeinerung des Modells vorgenommen werden. Die nächste Abbildung zeigt Anhand, wie mittlere relative Vorhersagefehler des Modells im Zuge der adaptiven Verfeinerung abnimmt. In diesem Beispiel wurde ein ROM für die Navier-Stokes-Gleichungen der Strömungsmechanik erstellt.

Energieforschungsprogramm - XX. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG



Die Details sind in der Publikation Cheng/Zimmermann [CZ3, 2023] beschrieben.

Eine einschränkende Schlussfolgerung aus dem Projekt ist, dass die Anzahl an Trainingsdaten, welche benötigt werden, um ein zufriedenstellendes Ersatzmodell automatisiert und adaptiv zu erstellen, im industriellen Kontext kaum bereitgestellt werden können. Zukünftige Forschungsanstrengungen müssen sich darauf konzentrieren, den maximalen Informationsgehalt aus den unter einem begrenzten Budget zur Verfügung stehenden Berechnungsdaten herauszuholen.

5 Ausblick und Empfehlungen

Die neu vorgeschlagene Induktionserwärmungsmethode ist ein neuer Versuch und eine neue Erkundung für das Einbrennen von Autolacken, die das Design von Autoöfen in der Automobilindustrie möglicherweise grundlegend verändern könnte. Für dieses Projekt gibt es die folgenden Ausblicke und Empfehlungen.

5.1 Durchführung von Laborexperimenten mit größerer Nähe zu industriellen Anwendungen

Im aktuellen Projekt findet die Konvektionserwärmung des kombinierten Erwärmungsprozesses in einem offenen Raum statt, in dem die Temperatur der Umgebungsluft als Raumtemperatur und der Druck als 1 bar angenommen wird. Bei Anwendungen in der Automobilindustrie sind die Öfen in der Regel geschlossener aufgebaut und haben eine höhere Heizleistung bei der Konvektion. Ein ähnlicher Aufbau des Ofens könnte für künftige Laborversuche in Betracht gezogen werden, wobei die Heißluftauslässe anders als in der aktuellen Arbeit angeordnet werden würden. Die Herausforderung besteht darin, sicherzustellen, dass der bewegliche Induktor in einer Hochtemperaturumgebung gut funktioniert und gleichzeitig eine hohe Heizeffizienz bei der Konvektionsheizung beibehält. In zukünftigen Experimenten werden wir ein verfeinertes Design benötigen, um diese Herausforderungen zu meistern.

5.2 Einsatz von Mehrfachinduktoren bei der Induktionserwärmung

In den aktuellen Laborversuchen wird ein Translationsinduktor in der Induktion mit einer gleichmäßigen Vorschubgeschwindigkeit eingesetzt, die von einer CNC-Maschine gesteuert wird. Für die rechteckigen Profile, die in den aktuellen Versuchen verwendet werden, ist es auch möglich, zwei Translationsinduktoren zu verwenden, die sich gleichzeitig von gegenüberliegenden Flächen aus bewegen, kombiniert mit einer internen Konvektionserwärmung. Darüber hinaus könnte für künftige Arbeiten auch die Verwendung mehrerer Induktoren in Betracht gezogen werden, insbesondere bei komplexeren Geometrien. Die neuen Fragen, die sich stellen, sind, wie man die richtigen Positionen oder Bewegungsbereiche der Induktoren wählt und wie man sie effizient mit der Konvektionserwärmung kombiniert. Weitere Optimierungsmaßnahmen werden durchgeführt, um Lösungen für die oben genannten Fragen zu finden. Die Erwärmungseigenschaften für nicht-ferromagnetische Materialien würden in die Kombination mit der Konvektionserwärmung einbezogen werden.

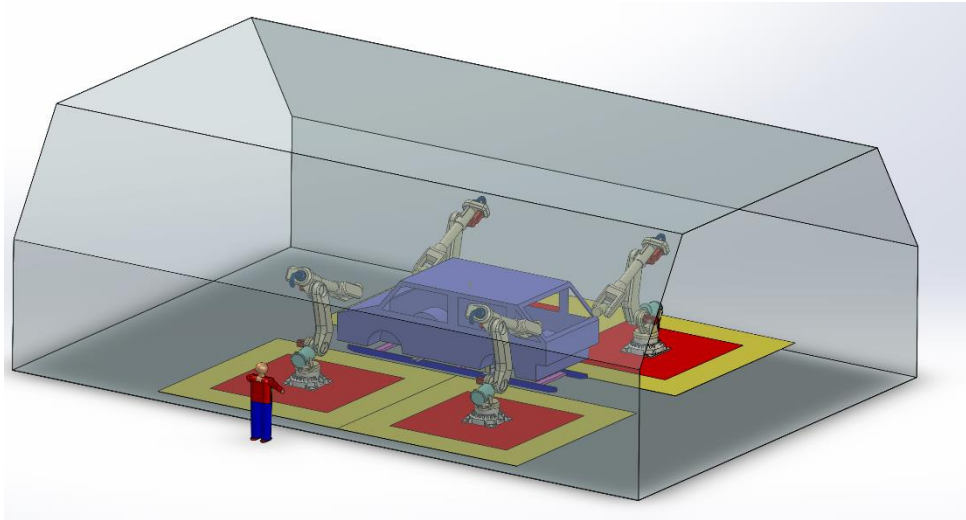


Abbildung: Eine Illustration für die von den Robotern eingesetzten Mehrfachinduktoren.

5.3 Umfassende Nutzung von Simulation und Optimierung für Laborversuche und industrielles Design

Durch die Erstellung präziser mathematischer Modelle können numerische Simulationen verschiedene Erwärmungsprozesse genau reproduzieren, was als digitaler Zwilling bezeichnet wird. In Zukunft können weitere Simulationen durchgeführt werden, um verschiedene virtuelle Erwärmungsprozesse zu realisieren, so dass mehr Beobachtungen als durch Experimente gewonnen werden können. Dies ist vor allem für die Erprobungsphase von industriellen Anwendungen neuer Induktionsöfen von Bedeutung. Dadurch wird auch Material eingespart, Abfall vermieden und die Effizienz verbessert. Darüber hinaus ist es auch möglich, den Erwärmungsprozess und das Ofendesign zu optimieren, indem verschiedene Zielfunktionen in den Optimierungsmodellen festgelegt werden. Beispielsweise können mathematische Werkzeuge zur Lösung des Optimierungsmodells verwendet werden, um die optimale Position oder den optimalen Bewegungsbereich der im vorherigen Unterabschnitt erwähnten Mehrfachinduktoren zu finden, um den gewünschten Erwärmungseffekt zu erzielen. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die umfassende Nutzung von Simulations- und Optimierungsergebnissen zur Unterstützung von Laborexperimenten und industriellem Design die Richtung künftiger Projekte sein wird.

6 Literaturverzeichnis

- [1] J. Barglik, A. Smagór, A. Smalcerz, D.G. Desisa, Induction Heating of Gear Wheels in Consecutive Contour Hardening Process, *Energies* 14 (2021) 3885.
- [2] H.-T. Bui, S.-J. Hwang, Modeling a working coil coupled with magnetic flux concentrators for barrel induction heating in an injection molding machine, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 86 (2015) 16–30.
- [3] L. Bao, B. Wang, X. You, H. Li, Y. Gu, W. Liu, Numerical and experimental research on localized induction heating process for hot stamping steel sheets, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 151 (2020) 119422.
- [4] Vibrans, Tobias (PMT/T1), Induktive Erwärmung von Formplatinen für die Warmumformung: Dissertation an der Fakultät für Maschinenbau der Technischen Universität Chemnitz, Institut für Werkzeugmaschinen und Produktionsprozesse, Chemnitz, 22.06.2016 (2016).
- [5] G. Benkowsky, Induktionserwärmung Härten, Glühen, Schmelzen, Löten, Schweißen ; Grundlagen und praktische Anleitungen für Induktionserwärmungsverfahren, insbesondere auf dem Gebiet der Hochfrequenzerwärmung, 5th ed., Verl. Technik, Berlin, 1990.
- [6] E.J. Davies, Conduction and Induction Heating, IET, Stevenage, 1990.
- [7] V. Rudnev, Metals HandBook VOL 4 - Heat Treating (1991).
- [8] Valery Rudnev, Don Loveless, Raymond L. Cook, Handbook of Induction Heating, Imprimerie nouvelle association ouvriere, Paris.-, 2017.
- [9] V. Rudnev, Systematic analysis of induction coil failures: Part 4: Coil copper electromagnetic edge effect (2006) pp. 27–28.
- [10] R. Gergely, C. Hochenauer, Investigation of Induction Heating for Sheet Metal with Moving Induction Coil (2024).
- [11] R. Gergely, C. Hochenauer, Heating Strategies for Efficient Combined Inductive and Convective Heating of Profiles, *Energies* 16 (2023) 5895.
- [12] F.R. Menter (Ed.), Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications, 1993.
- [13] F.R. Menter, M. Kuntz, R. Langstry, Ten Years of Industrial Experience with the SST Turbulence Model, *Turbulence, Heat and Mass Transfer* (2003).
- [14] M. Feurhuber, M. Magno, M. Miranda, C. Hochenauer, CFD investigations of steam penetration, air-removal and condensation inside hollow loads and cavities, *Applied Thermal Engineering* 147 (2019) 1070–1082.

7 Anhang

8 Kontaktdaten

Projektleitung

Martin Schifko

ESS Engineering Software Steyr GmbH

Berggasse 35, 4400 Steyr

martin.schifko@essteyr.com

www.essteyr.com

Auflistung der weiteren ProjektpartnerInnen

Technische Universität Graz

Institut für Wärmetechnik

University of Southern Denmark

Department of Mathematics and Computer Science