

SOTEX Sondermaschinen GmbH

Planung · Konstruktion · Steuerungsentwicklung · Fertigung · Service

Am Jahnsbacher Berg 5
09392 Auerbach/Erzgebirge

Abschlussbericht

"Ressourcenschonung durch einstufige Temperierung in einer Prozesskette für endlosfaserverstärkte thermoplastische Strukturbauteile"

gefördert von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Förderkennzeichen: 29579 - 21/0

Projektlaufzeit: 01.01.12 – 30.09.13

Projektleiter: Dipl.-Ing. Christoph Spieler

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	29579-21	Referat	Fördersumme	86.585,00 €
----	-----------------	---------	-------------	--------------------

Antragstitel	Ressourcenschonung durch einstufige Temperierung in einer Prozesskette für endlosfaserverstärkte thermoplastische Strukturbauteile
---------------------	---

Stichworte	Erwärmung thermoplastischer Halbzeuge
-------------------	---------------------------------------

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
21 Monate	01.01.2012	30.12.2013	1

Zwischenberichte	1
------------------	---

Bewilligungsempfänger	Sotex Sondermaschinen GmbH Am Jahnsbacher Berg 5	Tel	03721/2682-11
		Fax	03721/2682-22
	09392 Auerbach	Projektleitung Dipl.-Ing. Christoph Spieler	
		Bearbeiter Thomas Eulitz	

Kooperationspartner

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

Faser-Kunststoff-Verbunde (FKV) sind favorisierte Werkstoffe im Bereich Strukturleichtbau, da diese neben sehr guten spezifischen Werkstoffeigenschaften auch große Designmöglichkeiten bieten. Bisher werden endlosfaserverstärkte thermoplastische Bauteile in Form von vollflächigen Verstärkungen im Bauteil eingesetzt, wobei eine Überdimensionierung im mechanischen wie im wirtschaftlichen Sinn stattfindet. In der Automobilindustrie wird ein großer Anteil dieser FKV-Strukturbauteile angestrebt, da nur durch konsequenten Leichtbau alternative Antriebskonzepte wie beispielsweise die Elektromobilität zum Erfolg geführt werden können. Bei der derzeitigen Herstellung derartiger Bauteile liegen die Einzelprozesse der Vorformung von konsolidierten Halbzeugen sowie des Laminataufbaus in entkoppelten Fertigungszellen. Ein Schwerpunkt liegt in einem geschlossenem Warenträgerumlauf an der Temperierstation, um eine große Flexibilität zu gewährleisten. Durch die modulare Gestaltung der Temperierstation können Heiztechnologien kombiniert werden, um geringere Aufheizzeiten zu realisieren und deren Energiebedarf im Bereich von 25% - 40% zu reduzieren. Dadurch können Erwärmungsvorgänge eingespart werden, welche für eine negative Energiebilanz verantwortlich sind.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Durch die geplante Neuentwicklung lässt sich die eingesetzte Energie des Gesamtprozesses um ca. 20% - 40% reduzieren. Das Einsparpotenzial resultiert hauptsächlich aus dem Wegfall des Prozessschrittes 1. Somit kann die dort benötigte Aufheizenergie komplett entfallen. Je Teil werden ca. 0,063 m² Organoblech benötigt. Für eine homogene Erwärmung im Infrarotfeld ist jedoch die dreifache Heizfläche 0,189 m² notwendig. Bei einer üblichen erforderlichen Bestrahlungsstärke von 12,5 kW/m² (Wirkungsgrad 70%) und einer hierfür bekannten Aufwärmzeit von 120 s pro Teil ergibt sich ein Beheizungsbedarf von 0,07875 kWh pro Teil. Ferner wird eine Stückzahl von ca. 200.000 pro Jahr für eine Anlage angenommen. Daraus ergibt sich ein jährliches Einsparpotenzial von 15.750 kWh durch den Wegfall des Prozessschrittes 1, da die Herstellung eines Organobleches entfällt, wobei mittels Handhabesysteme das UD-Halbzeug belastungsgerecht auf eine 3D-Kontur drapiert und vor dem Einlegen ins Spritzgießwerkzeug erwärmt wird.

Ergebnisse und Diskussion

Im Rahmen des FuE-Vorhabens wurde eine Temperierstation entwickelt, gebaut und erprobt, die auf dem Prinzip der Wärmestrahlung eine energieeffiziente Vorwärmung unkonsolidierter und konsolidierter, thermoplastbasierter Faserverbundhalbzeuge in ebener und dreidimensionaler Form erlaubt. Die Temperierstation wurde für die effiziente Erwärmung thermoplastischer Prepregs mit höchstem Wirkungsgrad ausgelegt und ermöglicht das Temperieren mehrlagiger, unkonsolidierter Prepregstapel.

Die angestrebte Energieersparnis von 20% - 40% wird mit dem Projekt erreicht und resultiert aus einer effektivitätsgesteigerten Prozesskette, die mit der neu entwickelten Temperierstation realisierbar ist. Ausgangspunkt war eine dezentrale Prozesskette, die zwar den Vorteil flexibler, zeitlich/räumlich getrennter Halbzeugfertigung bildet, dadurch aber insgesamt drei komplette Aufheizzyklen der Halbzeuge notwendig macht. Mit der entwickelten Temperierstation wird zum einen ein voller Aufheizzyklus eingespart und zum anderen der Energiebedarf des zweiten Aufheizzyklus um ca. 90% reduziert, indem Restwärme genutzt wird.

Weiterhin wird durch Synergieeffekte zusätzliches Energieeinsparpotential genutzt, beispielsweise durch den Wegfall von Transportwegen und Lagerhaltung sowie durch die Verwendung nur einer Temperierstation für alle Aufheischritte. Letzteres wird ermöglicht, indem die Temperierstation nicht nur ebene Halbzeuge, sondern auch 3D-Strukturen effektiv erwärmen kann.

Die entwickelte Technologie bietet darüber hinaus Potential für weiterführende Forschungen, hierzu wurde mit der Temperierstation ein Prozessaufbau zur Erforschung von Fertigungsprozessen thermoplastbasierter Hochleistungsverbundbauteile an der TU Chemnitz, Professur Strukturleichtbau und Kunststoffverarbeitung, installiert. Die Temperierstation selbst bietet zusätzliches Optimierungspotential, beispielsweise hinsichtlich weiterer Steigerung des Wirkungsgrades durch noch bessere Ausnutzung der IR-Strahlung und Vorbereitung der unkonsolidierten Prepregstapel für eine bessere Wärmeleitung während des Temperiervorgangs.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Mit der Installation der entwickelten Temperierstation im Demonstrations-/Forschungsprozess im Technikum der Professur Strukturleichtbau und Kunststoffverarbeitung der TU Chemnitz werden die öffentlichkeitswirksamen Mittel und Medien der Forschungseinrichtung genutzt. Dort erfolgen weiterführende Untersuchungen und damit verbunden wissenschaftliche und öffentlichkeitswirksame Veröffentlichungen. Weiterhin wird die Anlage in der Prozessumgebung Studenten für forschungsnahe Ausbildungszwecke vorgeführt und interessierten Firmen für anwendungsspezifische Bauteil, Prozess- und Technologieentwicklungen demonstriert.

Fazit

Die innovative Technologieentwicklung reduziert den Energiebedarf zur Fertigung thermoplastbasierter Hochleistungsfaserverbundbauteile deutlich, durch Einsparung von ca. 60% Energie für die Aufheizzyklen einer Prozesskette vom Prepreg zum Bauteil folgt unter Berücksichtigung von Synergieeffekten insgesamt eine Reduzierung des Gesamtenergiebedarfs um bis zu 40%. Damit stellt das durchgeführte FuE-Projekt einen wichtigen Beitrag zur energie- und kosteneffizienten Großserienfertigung von Hochleistungsfaserverbundbauteilen dar, welche insbesondere für die notwendige Entwicklung umwelt- und ressourcenschonende Kraftfahrzeuge eine Grundvoraussetzung darstellen.

Inhalt

1	Verzeichnisse	2
2	Einleitung und Stand der Technik	5
3	Voruntersuchungen	7
4	Anforderungskatalog	9
5	Konstruktive Entwicklung einer modularen Temperierstation	10
5.1	Vorbetrachtungen	10
5.2	Varianten zur Temperierung	10
5.3	Vorzugsvariante Temperierung.....	17
5.4	Warenträger.....	18
5.5	Konstruktive Umsetzung.....	20
6	Bauliche Umsetzung des Demonstrators	22
7	Versuchsdurchführung und Funktionsnachweis.....	23
8	Zusammenfassung der Ergebnisse und Ausblick	27
9	Literaturangaben.....	30

1 Verzeichnisse

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Vergleich von verschiedenen Aufheizstrategien ^[1]	6
Abb. 2: Versuchsaufbau nach DIN 51908	7
Abb. 3: Ermittelte Wärmeleitfähigkeit verschiedener thermoplastisch vorimprägnierter Halbzeuge	8
Abb. 4: Unterschiedliche Bedingungen für die Erwärmung in Abhängigkeit vom Halbzeugaufbau	8
Abb. 5: Variante 1 als kontinuierlicher Prozess auf Basis von Infrarotstrahlung	11
Abb. 6: Absorptionsbereiche verschiedener Thermoplasten ^[4]	11
Abb. 7: Schematisch; Verluste am Infrarotstrahler (sowohl elektrisch- als auch gasbetriebene)	12
Abb. 8: Variante 2 mit diskontinuierlicher Infrarotstrahlung	12
Abb. 9: Verlustleistungen an einem elektrischen Infrarotstrahler (Variante 1 und 2)	13
Abb. 10: Variante 3 mit Gasflamme als Wärmequelle	13
Abb. 11: Verlustleistungen an einem Gasstrahler	14
Abb. 12: Variante mit Energieeintrag basierend auf Mikrowellen	14
Abb. 13: Wirkungsgrad bei der Erzeugung von Mikrowellenstrahlung mithilfe eines Magnetrons ^{[6], [7]}	15
Abb. 14: Wirkungsgrad bei der Erzeugung von Mikrowellenstrahlung mithilfe eines Klystrons ^{[6], [7]}	15
Abb. 15: Vergleich von konventioneller Erwärmung von außen (links) und Erwärmung mit Mikrowellen (rechts) ^[8]	16
Abb. 16: Variante 5 mit Infrarotstrahlung in Form von Laserstrahlung	17
Abb. 17: Infrarotbestrahlung mittels Flexibler Strahleranordnung (links: eben und rechts: simulierter Hohlraumstrahler)	18
Abb. 18: Haupt- und Teilfunktionen des Grundträgers	18
Abb. 19: Funktionsstruktur des Trägersystems	19
Abb. 20: Gesamtansicht der Temperierstation - Konstruktionsmodell	21
Abb. 21: Seitenansichten und Hauptabmessungen der Temperierstation	21
Abb. 22: Gesamtansicht des Demonstrators (rechts: Vorderansicht, links: Rückansicht)	22
Abb. 23: Detailansicht IR-Strahlerfeld (links) und Winkelverstellung über geschlitztes Blech mit Flügelmutterhalterung (rechts)	22
Abb. 24: Temperierstation im Versuchsssetup (links), mit eingeschalteten IR-Feldern (rechts)	23
Abb. 25: Halbzeugzuschnitt mit vier Thermoelementen	23
Abb. 26: Temperaturen bis Erreichen der Zieltemperatur für verschiedene Halbzeuge, Lagenzahlen und Heizleistungen (zwischen der 1. und 2. Lage sowie komplett durchgewärmt)	24
Abb. 27: Beeinflussung der Messergebnisse durch Thermoelemente infolge vergrößerter Lagenabstände	25
Abb. 28: Erreichen der Zieltemperaturen für die unterschiedlichen Sensoren ist am Beispiel Plytron, 8lagig, 50% Strahlerleistung besonders deutlich sichtbar	25
Abb. 29: Durchzeichnung der Warenträgerstruktur auf dem Halbzeug	25
Abb. 30: Klassische, dezentrale Prozesskette zur Fertigung thermoplastbasierter Hochleistungsfaserverbundbauteile auf Basis von Organoblechen	27
Abb. 31: Optimierte, zentralisierte Prozesskette mit Temperierstation für unkonsolidierte Halbzeuge und 3D-Preformen	28

Tabellenverzeichnis

<i>Tab. 1: Besonderheiten verschiedener Aufheizstrategien^[2]</i>	6
<i>Tab. 2: Messergebnisse Wärmeleitfähigkeit</i>	7
<i>Tab. 3: Abkühlung vorgewärmter Halbzeuge beim Handhabevorgang (Plytron)</i>	9
<i>Tab. 4: Überblick zu den Hauptanforderungen</i>	9
<i>Tab. 5: Morphologischer Kasten für die Temperierstation</i>	10
<i>Tab. 6: Übersicht zu den Varianten für ein Warenträgersystem</i>	19
<i>Tab. 7: Konstruktion der Temperierstation</i>	21
<i>Tab. 8: Maximaltemperatur (innerhalb Halbzeug)</i>	24
<i>Tab. 9: Potential zur Optimierung des Temperiervorgangs</i>	26

Abkürzungsverzeichnis

ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol
Basalt + PA6	Basaltfaserverstärktes Polyamid 6
C + PA6	Kohlefaserverstärktes Polyamid 6 (Ce-Preg®)
CO ₂ – Laser	Kohlenstoffdioxidlaser
FuE	Forschung und Entwicklung
Glas + PA6	Glasfaserverstärktes Polyamid 6
Glas + PP	Glasfaserverstärktes Polypropylene
IR-Strahler	Infrarotstrahler
Nd:YAG-Laser	Neodym-dotierter Yttrium-Aluminium-Granat-Laser
PA	Polyamid
PA6	Polyamid 6
PMMA	Polymethylmethacrylat ("Plexiglas")
PP	Polypropylen
Prepreg	preimpregnated (fibres)
PVC	Polyvinylchlorid
Viskose + PLA	Viskosefaserverstärktes Polyactid
VWS	Vorwärmstation

Kurzzeichenverzeichnis

$E_{\text{elektrisch}}$	[J]	Elektrische Energie
$E_{\text{kinetisch}}$	[J]	Bewegungsenergie
$E_{\text{mechanisch}}$	[J]	Mechanische Energie
E_{th}	[J]	Thermische Energie
$E_{\text{th-voll}}$	[J]	notwendige thermische Energie zur Erwärmung von Raumtemperatur bis Zieltemperatur
$E_{\text{th-teil}}$	[J]	notwendige thermische Energie zum Ausgleich von Temperaturverlusten/Wiedererwärmung bis Zieltemperatur
$E_{\text{th-ges}}$	[J]	Summe benötigter thermische Energiemengen
T_{max}	[°C]	Maximale Temperatur, wenn letzter Messpunkt Zieltemperatur erreicht hat
T_{schmelz}	[°C]	Schmelztemperatur
d	[mm]	Gesamtdicke
d_{SL}	[mm]	Dicke Symmetriehälfte mit Sensoren
d_{L}	[mm]	Dicke Symmetriehälfte ohne Sensoren
h	[mm]	Höhe
t	[s]	Zeit
$t_{1,L}$	[s]	Zeit bis Erreichen der Zieltemperatur unterhalb der ersten Lage
t_{komplett}	[s]	Zeit bis Erreichen der Zieltemperatur an allen Messpunkten
λ_{b}	[W/m*K]	berechnete Wärmeleitfähigkeit
λ_{g}	[W/m*K]	gemessene Wärmeleitfähigkeit
λ_{M}	[W/m*K]	Wärmeleitfähigkeit der Matrixkomponente

2 Einleitung und Stand der Technik

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde eine modulare Temperierstation für die Temperierung thermoplastbasierter, faserverstärkter Halbzeuge (Prepregs, Organobleche) in geschlossenen Fertigungsprozessen entwickelt. Ziel war die Steigerung der Effektivität von Fertigungsprozessen zur Herstellung von Hochleistungsfaserverbundbauteilen auf Organoblechbasis. Zur Verringerung des Energiebedarfs im Gesamtprozess wurden zunächst verschiedene physikalische Mechanismen betrachtet und Wirkprinzipien untersucht, daraus wurden Varianten abgeleitet, bewertet und auf Basis der Vorzugsvariante ein Technologiedemonstrator entwickelt. Dieser wurde in Versuchen hinsichtlich seiner technischen Leistungsfähigkeit und seines Energiesparpotentials untersucht.

Mittels Recherchen wurden wichtige Daten für das Entwicklungsvorhaben erarbeitet, diese Ergebnisse sind besonders für die spätere Bewertung und Auswahl der Varianten von Bedeutung gewesen. Ziel war die grundlegende Ermittlung des effizientesten Weges zur Erwärmung thermoplastischer Prepregs nach aktuellem Stand der Technik. **Abb. 1** zeigt eine Übersicht mit Klassifizierung der wichtigsten Wirkprinzipien und deren maßgeblich wirksamen physikalischen Effekt. Prinzipiell kann zwischen vier Hauptprinzipien unterschieden werden:

1. Mittels Wärmekonvektion erfolgt ein Energieaustausch in Form von Wärme durch ein strömendes fluides Medium (z. B. Luft oder Inertgas). Dieses Medium wird zuerst erwärmt, dafür muss bei auf diesem Prinzip basierenden technischen Lösungen weder Kontakt zwischen Wärmerezeuger und Halbzeug vorhanden sein, noch Barrierefreiheit zwischen Wärmestrahler und aufzuheizender Oberfläche gewährleistet werden, weshalb hierbei eine größere technisch-bauliche Flexibilität besteht.
2. Bei der Wärmeleitung stehen Wärmerezeuger und Halbzeug in direktem Kontakt, was sehr kompakte Bauformen ermöglicht, aber zu Verklebungen und Oberflächenschäden führen kann.
3. Durch Wärmestrahlung können Halbzeuge ohne Kontakt zur Wärmequelle aufgeheizt werden. Bei der technischen Umsetzung ist auf einen barrierefreien Strahlungsverlauf von der Wärmequelle zum Halbzeug zu achten, zudem müssen werkstoffabhängige Absorptionsgrade verschiedener Wellenlängenbereiche Beachtung finden.
4. Gleiches gilt auch bei der Verwendung von elektromagnetischen Wellen außerhalb des Infrarotbereichs, die erst im Halbzeuginneren durch Absorption im Werkstoff zur Wärmerezeugung führen.

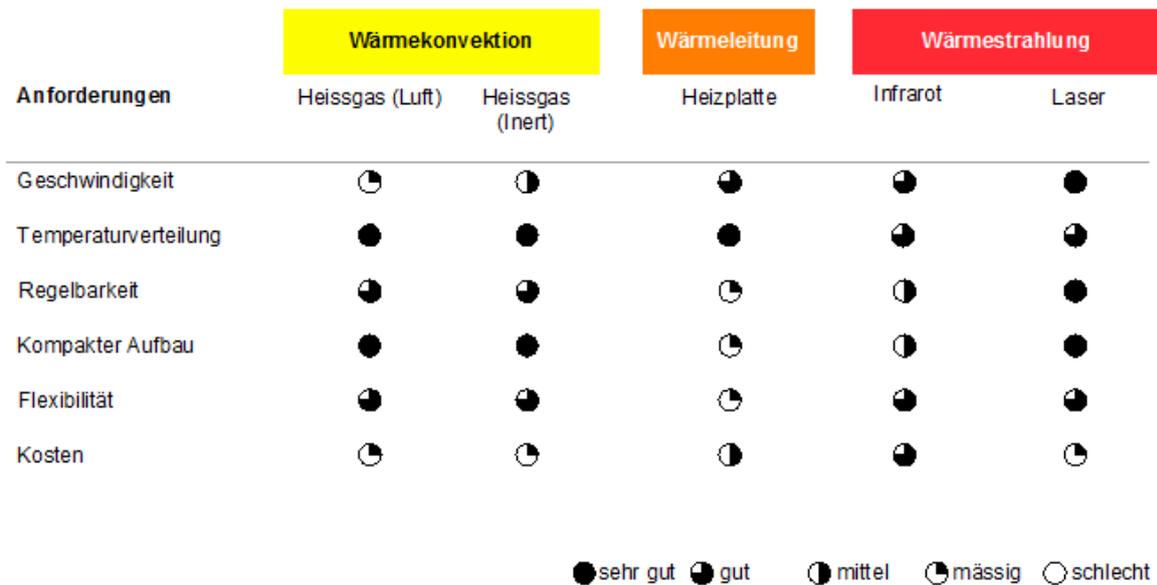


Abb. 1: Vergleich von verschiedenen Aufheizstrategien^[1]

Weiterhin wurden wesentliche Merkmale verschiedener Aufheiztechnologien identifiziert (Tab. 1).

Tab. 1: Besonderheiten verschiedener Aufheizstrategien^[2]

Aufheizmethode	Effekte	Bemerkung
Kontaktheizung	<ul style="list-style-type: none"> Maßnahmen zur Vermeidung von Verunreinigungsfilmen sind erforderlich 	<ul style="list-style-type: none"> Große Erwärmungsstrecken mit zusätzlicher Druckaufbringung
Heißgas	<ul style="list-style-type: none"> Oxidationsgefahr bei hohen Temperaturen durch inerte Heizgasse reduziert 	<ul style="list-style-type: none"> Große zeitliche Trägheit der Systeme Konstante Geschwindigkeiten sind anzustreben
Offene Flamme	<ul style="list-style-type: none"> Oxidationswirkung der offenen Flamme 	<ul style="list-style-type: none"> Konstante Verarbeitungsgeschwindigkeit ist unbedingt einzuhalten
IR-Strahler	<ul style="list-style-type: none"> Brauchbare Steuerungen nur mit kurzwelligen IR-Hellstrahlern 	<ul style="list-style-type: none"> Problematisch bei dicken Laminaten
CO₂ – Laser	<ul style="list-style-type: none"> Ideale Energiequelle Für alle Materialien geeignet 	<ul style="list-style-type: none"> Aufwändige Strahlführung erforderlich
Nd:YAG-Laser	<ul style="list-style-type: none"> Hohe Energiedichte bei minimaler Trägheit Eingeschränkter Wirkungsgrad bei transparentem Halbzeug 	<ul style="list-style-type: none"> Idealer Transport der Strahlung im Lichtleitfaserkabel möglich

3 Voruntersuchungen

Zur Charakterisierung des Erwärmungsverhaltens unterschiedlicher Halbzeuge im Vorfeld wurden Messungen der Wärmeleitfähigkeit durchgeführt. Hierfür wurde ein Vergleichsverfahren nach DIN 51908 verwendet, der entsprechende Versuchsaufbau ist in **Abb. 2** dargestellt. Geprüft wurden ein- und mehrlagige Halbzeuge unterschiedlicher Materialkombinationen.



Abb. 2: Versuchsaufbau nach DIN 51908

Die ermittelten Werte sind in **Tab. 2** und **Abb. 3** für verschiedene Halbzeugmaterialien aufgeführt und geben Aufschluss über die unterschiedlichen thermischen Eigenschaften verschiedener Halbzeuge. Die Halbzeuge unterscheiden sich hinsichtlich Materialzusammensetzung und Fasergehalt. Auffällig sind die großen Abweichungen zu den theoretischen Werten (vgl. Antrag), insbesondere bei der Kombination Kohlefaser mit Polyamid. Grund hierfür ist die heterogene Struktur der Halbzeuge, besonders das Ce-Preg® ist durch einen vergleichsweise losen Verbund nicht imprägnierter Fasern auf einer PA-Folie gekennzeichnet. Die enthaltene Luft verschlechtert die Wärmeleitfähigkeit deutlich.

Tab. 2: Messergebnisse Wärmeleitfähigkeit

Halbzeug	berechnete Wärmeleitfähigkeit λ_b (vgl. Antrag)	Matrix		gemessene Werte		
		λ_M	T_{schmelz}	λ_g [W/m*K]	λ/h	h [m]
Basalt + PA6		0,25	220 °C	0,0656	327,9	0,0002
C + PA6 (Ce-Preg®)	9,986	0,25	220 °C	0,0795	265,1	0,0003
Glas + PA6		0,25	220 °C	0,0805	201,3	0,0004
Glas + PP	0,67	0,23	163 °C	0,0555	184,9	0,0003
Viskose + PLA			160 °C	0,0309	154,6	0,0002
Glas + PP (Plytron)	0,67	0,23	163 °C	0,1620	554,2	0,0003

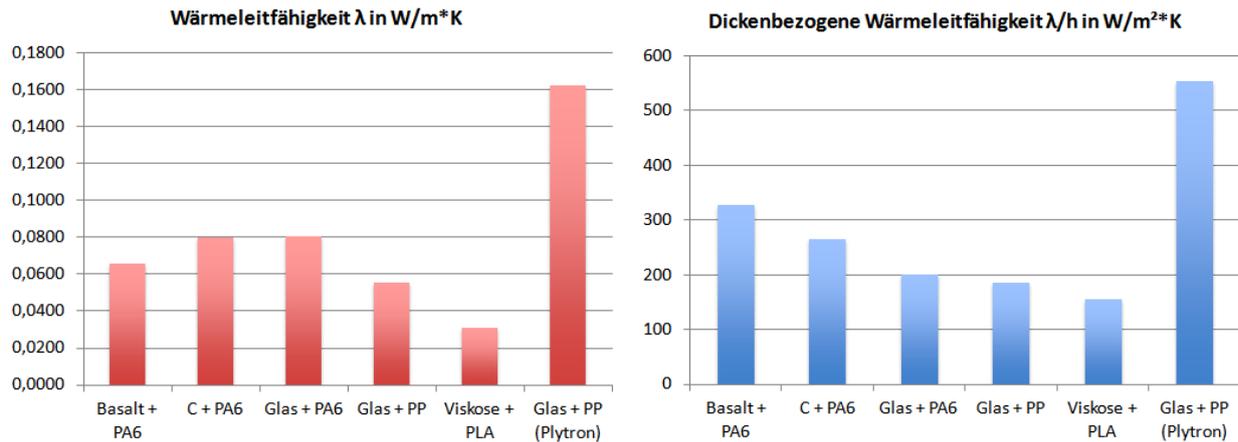


Abb. 3: Ermittelte Wärmeleitfähigkeit verschiedener thermoplastisch vorimprägnierter Halbzeuge

Die ermittelten Werte sind nur bedingt auf den realen Erwärmungsvorgang anwendbar, da praktisch keine Einzellagen erwärmt werden, sondern Mehrlagenpakete. Sind diese bereits vorverpresst (konsolidiert), erfolgt eine Durchwärmung analog zum Versuch. Bei unverpressten oder nur punktuell fixierten Lagenpaketen führen die Luftspalte zwischen den Einzellagen zu einer Verzögerung bei der Erwärmung. In diesen Fällen ändert sich der Wärmetransport durch das Halbzeug ab dem lokalen Erreichen der Schmelztemperatur, da beim Erweichen der Lagen Luft aus den Zwischenlagenbereichen austritt und Wärme besser zur nächsten Schicht übertragen werden kann (**Abb. 4**).

- Ausgangszustand: Luft-Halbzeug-Schichtaufbau (heterogen)
- Endzustand: luftarmer, aufgeschmolzener Laminataufbau (homogener)



Abb. 4: Unterschiedliche Bedingungen für die Erwärmung in Abhängigkeit vom Halbzeugaufbau

Dieser Umstand ist von großer praktischer Relevanz. Versuche zur Kennwertermittlung mehrlagiger, unverpresster Halbzeuge in einem Prüfstand nach DIN 12667 führten zu keinem Ergebnis, da sich durch den heterogenen Schichtaufbau keine Messwerte ermitteln ließen. Weiterhin wurde die Abkühlung vorgewärmter Halbzeuge für einen exemplarischen Handhabevorgang von fünf Sekunden bestimmt. Hierzu wurde die Temperatur von einem Messfühler in der Mitte des Lagenpakets ermittelt, während es nach der Erwärmungsphase über den Zeitraum in der Umgebungsluft bewegt wurde (**Tab. 3**).

Tab. 3: Abkühlung vorgewärmter Halbzeuge beim Handhabevorgang (Plytron)

Lagenanzahl	4	4	2	2
Ausgangstemperatur	155 °C	105 °C	155 °C	105 °C
Mittelwert Endtemperatur	127 °C	155 °C	155 °C	155 °C
Mittlerer Temperaturverlust	12 K	7 K	28 K	15,5 K

Erwartungsgemäß ist der Temperaturverlust höher mit zunehmender Vorwärmtemperatur und abnehmender Halbzeugdicke. Besonders bei dünnen Halbzeugstapeln spielt die Art der nachfolgenden Handhabung der vorgewärmten Halbzeuge eine besondere Rolle bei der weiteren Verarbeitung. Das Abkühlen der Halbzeuge muss effektiv verringert werden, andernfalls sind die Halbzeuge mit entsprechend mehr thermischer Energie zum Ausgleich des Temperaturverlusts zu beaufschlagen. Hierbei besteht jedoch die Gefahr der Überhitzung und damit verbundenen Degradation der Matrixkomponente.

4 Anforderungskatalog

Tab. 4: Überblick zu den Hauptanforderungen

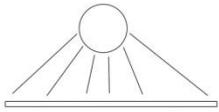
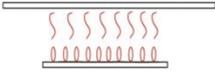
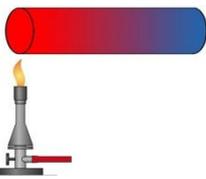
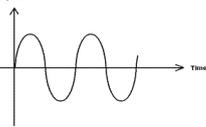
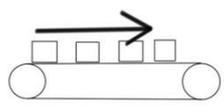
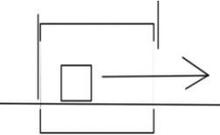
Parameter	Wert	Bemerkung
Halbzeugmasse in kg	max. 1,5	
max. Halbzeugabmessungen in mm	max: 650 x 300	
Kunststoffmaterial/Halbzeugart	PA und PP	- Halbzeugmatrix
Lagenausrichtung	variabel	
Durchwärmung	<ul style="list-style-type: none"> im Kern der Halbzeuge muss Schmelztemperatur erreicht werden, bevor an der Oberfläche eine Schädigung infolge Überhitzung eintritt 	
Halbzeuggeometrie	ebene Halbzeuge und komplexe 3D-Strukturen	
Anschlussleistung	max. 30 kW	
<ul style="list-style-type: none"> Integrierbarkeit in eine Prozesskette mittels entsprechender Schnittstellen sicherer Systembetrieb, besonders hinsichtlich Personenschutz/Brandschutz flexibler Systemaufbau des Demonstrators <p><u>Sensoren:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> abhängig vom technisch umgesetzten Wirkprinzip Temperaturüberwachung relevanter Systemkomponenten zum Schutz vor Überhitzung und für Reproduzierbarkeit (konstanter Systemzustand im Dauerbetrieb) Pyrometer zur berührungslosen Bestimmung der Oberflächentemperatur der Halbzeuge (Kalibrierung mittels Thermoelementen für jede Halbzeugart notwendig) 		

5 Konstruktive Entwicklung einer modularen Temperierstation

5.1 Vorbetrachtungen

Als Grundlage für die Entwicklung von Varianten wurde ein morphologischer Kasten erarbeitet (**Tab. 5**). Aus diesem wurden vier Varianten für eine Temperierstation abgeleitet und ausgearbeitet, welche hinsichtlich verschiedener Kriterien miteinander verglichen und bewertet wurden.

Tab. 5: Morphologischer Kasten für die Temperierstation

Energieeinbringung	Wärmestrahlung 	Wärmekonvektion 	Wärmeleitung 	
Energieform	Infrarot 	Gas 	Mikrowellen 	Laser 
Arbeitsweise	Kontinuierlich 	Diskontinuierlich 		

5.2 Varianten zur Temperierung

Variante 1

Die Wärmeinbringung erfolgt hier über elektrische Wärmestrahler, die Arbeitsweise ist kontinuierlich (**Abb. 5**). Die Auswahl der optimalen Wärmestrahler (Infrarotstrahler) hängt von der Form und des Materials des zu erwärmenden Gutes (hier: PA/PP mit Glas/Kohlefaserverstärkung) ab. Zu unterscheiden sind hier lang-, mittel- und kurzwellige Strahler. Mittelwellige Strahler sind für die Anwendung bei Kunststoffen am geeignetsten, da die Kohlenwasserstoffe die Wellenlängen sehr gut absorbieren. Der Wirkungsgrad solcher Infrarotstrahler ist relativ hoch und liegt zwischen 80% und 86%.^[3]

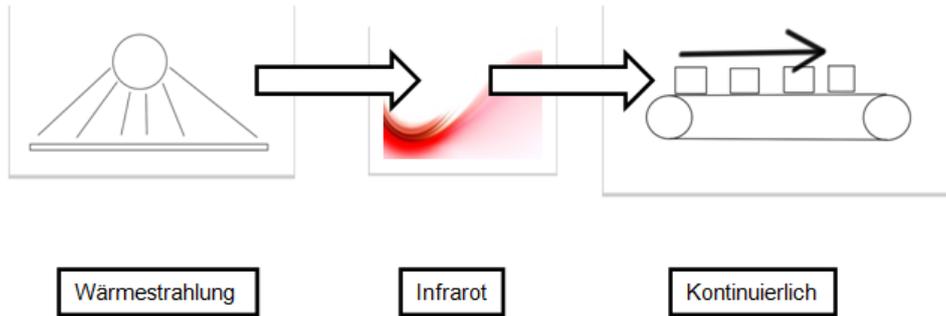


Abb. 5: Variante 1 als kontinuierlicher Prozess auf Basis von Infrarotstrahlung

Aus **Abb. 6** lässt sich schließen, welcher Strahler bzw. welche Wellenlänge das zu erwärmende Gut am effizientesten erwärmen kann. In diesen Punkten kann jedoch die Absorption durch das zu erwärmende Gut nicht als 100% angesehen werden, sondern maximal als 90%. Dies ist der Reflektion durch die Oberfläche des Gutes geschuldet, welche nie vollständig vermieden werden kann (**Abb. 7**). Dieser Effekt tritt nicht nur bei elektrisch betriebenen Strahlern auf, sondern auch bei gasbetriebenen. Die Eignung von Materialien für die Erwärmung mit infraroter Strahlung wird daran gemessen, wie breit deren Absorptionsspektrum ist, d.h. in welchem Wellenlängenbereich sie die Strahlung absorbieren. Je weiter dieses Spektrum gefächert ist, umso einfacher gestaltet sich die Handhabung.

Absorptionsbereiche verschiedener Thermoplaste

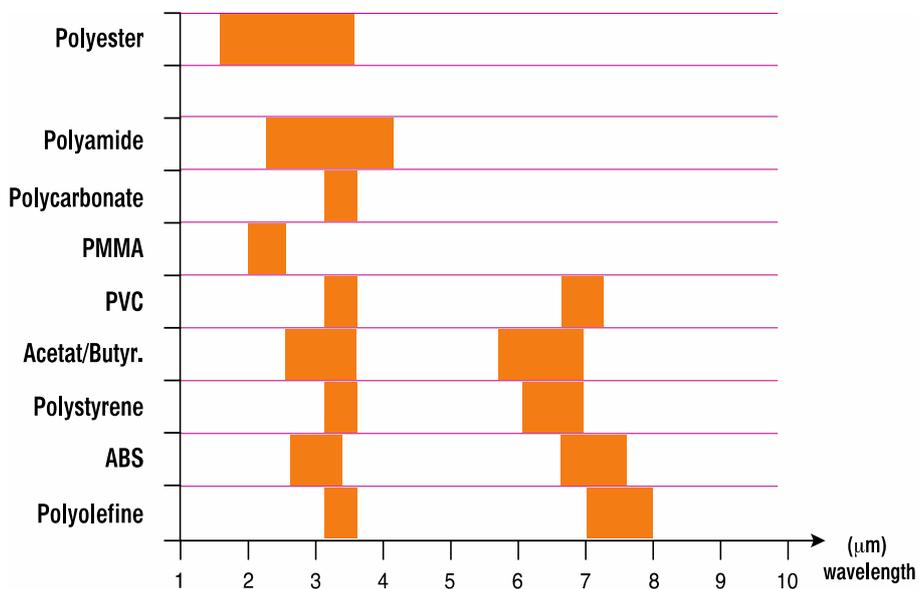


Abb. 6: Absorptionsbereiche verschiedener Thermoplasten^[4]

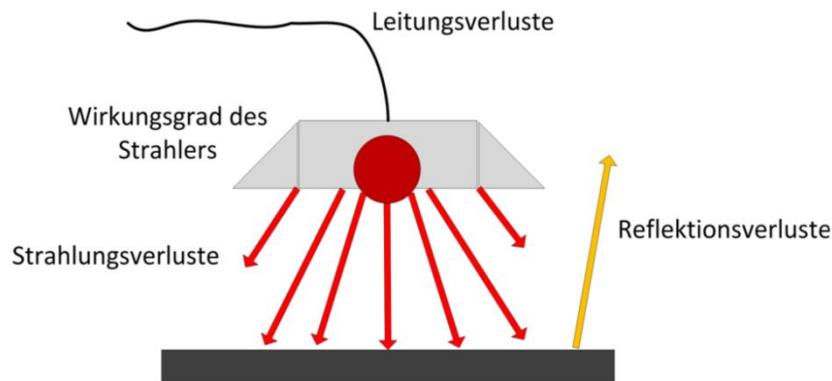


Abb. 7: Schematisch; Verluste am Infrarotstrahler (sowohl elektrisch- als auch gasbetriebene)

Variante 2

Die zweite Variante verfolgt einen diskontinuierlichen Ansatz und besteht im Rest aus den gleichen Elementen wie die erste Variante (**Abb. 8**). Durch einen abgeschlossenen Ofen ist es möglich den Wirkungsgrad weiter zu steigern. Eine Wärmekonvektion von dem erwärmten Bauteil an die Umgebungsluft wird somit auf ein bestimmtes Volumen begrenzt und die Effizienz der Erhitzung steigt. Dies wird allerdings durch einen geringeren Durchsatz erkauft. Dieser kommt zustande, da für jedes zu erwärmende Teil (oder Charge) die Ofentüren geschlossen bleiben müssen. Die Ausführung der Strahler aus Variante 1 bleibt hierbei unangetastet. Jedoch muss in Einzelfällen über eine Kühlung der Infrarotstrahler nachgedacht werden, da die Konvektion durch den geschlossenen Arbeitsraum unterbunden wird.

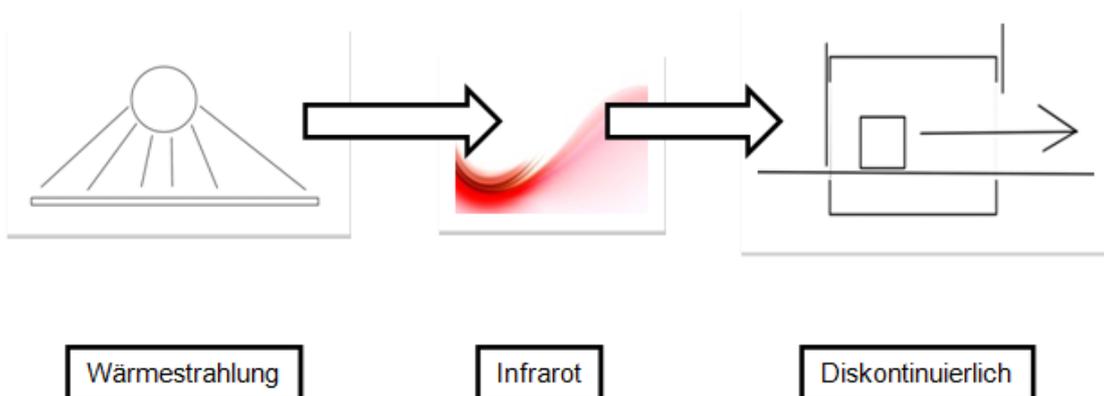


Abb. 8: Variante 2 mit diskontinuierlicher Infrarotstrahlung

Konkret wirkt das Wegfallen der Konvektion positiv auf die Wärmeübertragungsverluste. Die durch die Infrarotstrahlung erwärmte Luft kann nicht aus dem Ofen entweichen und ist somit noch in der Lage seine Wärme auf das zu erwärmende Gut zu übertragen.

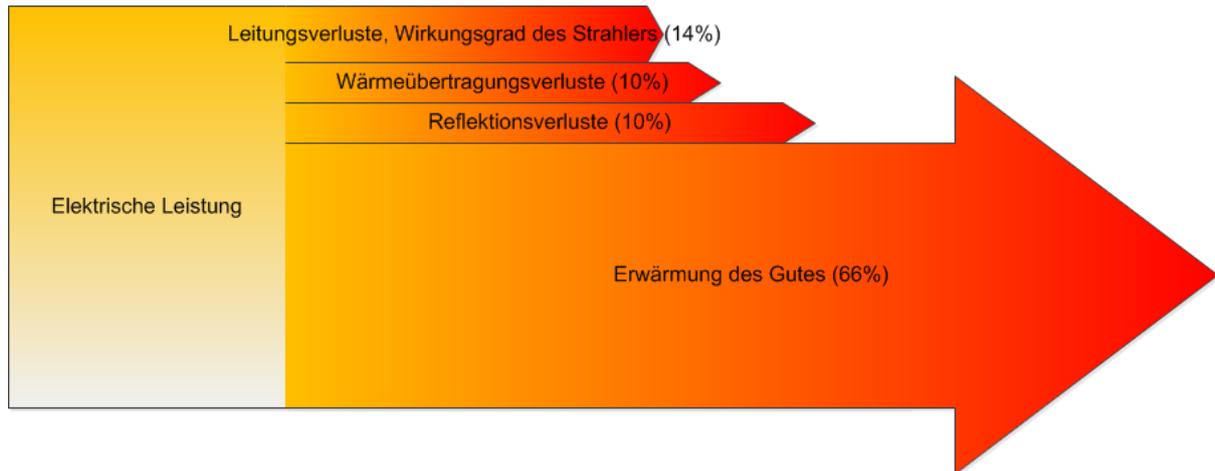


Abb. 9: Verlustleistungen an einem elektrischen Infrarotstrahler (Variante 1 und 2)

Sehr gut geeignete Kunststoffe^{[4], [5]}:

- Polyester
- Polyamide
- ABS
- Polyolefine
- Polypropylen

Weniger geeignet^[4]:

- PVC
- Polycarbonate

Variante 3

Variante 3 basiert ebenfalls auf Wärmestrahlung. Als Heizmedium wird hier Gas verwendet, welches in speziellen Brennern verbrannt wird (**Abb. 10**).

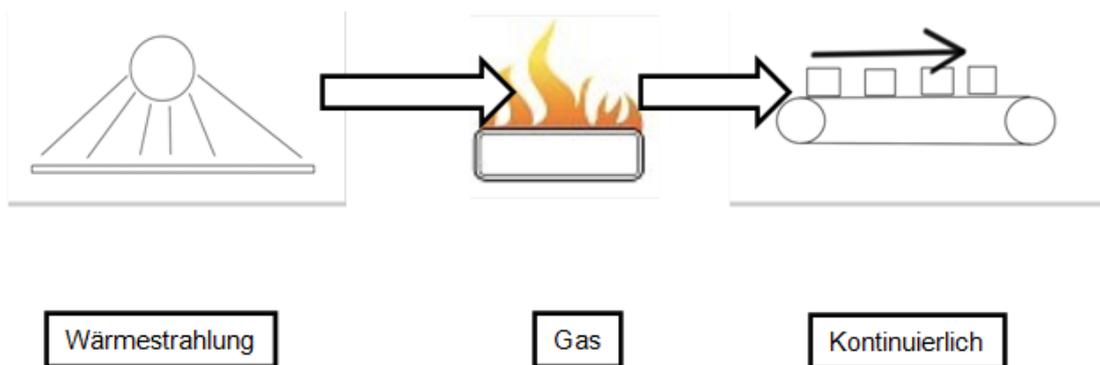


Abb. 10: Variante 3 mit Gasflamme als Wärmequelle

Im Vergleich zu elektrischen Strahlern ist der Wirkungsgrad von Gasbrennern allgemein als niedriger zu betrachten. Der Wirkungsgrad der Verbrennung von Gas liegt zwischen 65% und 85%. Da die Übertragung der Wärme wiederum über Strahlung erfolgt, welche optimaler Weise im mittellwelligen Bereich vorliegt, liegt der Wirkungsgrad der Wärmeübertragung theoretisch analog zu elektrischen Systemen bei ca. 90%. Praktisch sind die auftretenden Reflexionsverluste allerdings geringfügig höher als bei elektrischen

Systemen, da die Wellenlänge der Strahlung nicht auf das Material des zu erwärmenden Gutes eingestellt werden kann. Dies hat eine schlechtere Absorption zur Folge. Im Ganzen folgt hieraus ein Wirkungsgrad von ca. 60% (siehe **Abb. 11**).

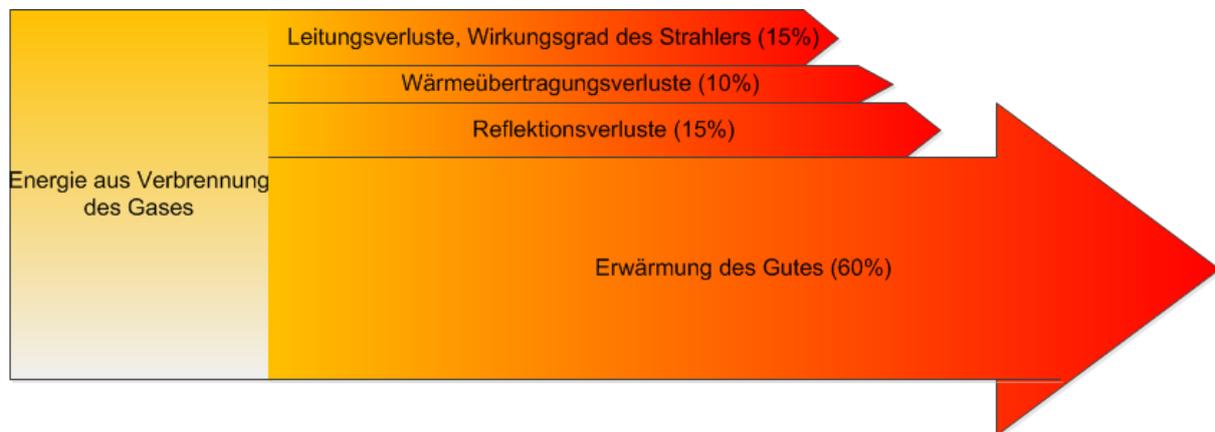


Abb. 11: Verlustleistungen an einem Gasstrahler

Bei einer Auslegung als diskontinuierliches System ist der daraus gewonnene Nutzen vergleichbar mit Variante 2. Der Wirkungsgrad der Wärmeübertragung würde auch hier um einige Prozent steigen, je nachdem, wie groß der Brennraum ausgelegt ist (je kleiner, umso weniger Konvektionsverluste).

Variante 4

In Variante 4 wird Mikrowellenstrahlung genutzt um Wärme in das Gut einzubringen (**Abb. 12**). Während sich Infrarotstrahlung in einem Wellenlängenbereich von $1,4 \mu\text{m}$ bis $15 \mu\text{m}$ befindet, liegt Mikrowellenstrahlung im Wellenlängenbereich zwischen einem Millimeter bis dreißig Zentimeter. Hierdurch werden hauptsächlich Wassermoleküle zu Schwingungen angeregt, wodurch Wärme erzeugt wird.

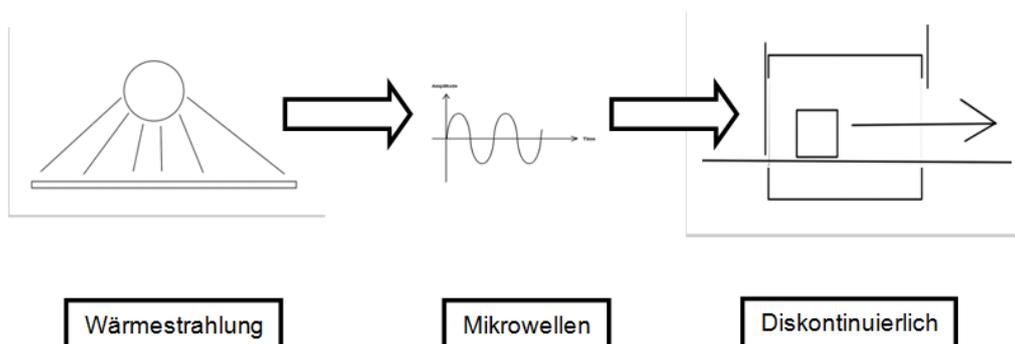


Abb. 12: Variante mit Energieeintrag basierend auf Mikrowellen

Mikrowellenanlagen sind in der Regel diskontinuierlich ausgelegt, da Mikrowellen auf den menschlichen Körper eine schädliche Wirkung haben und eine Anlage entsprechen abgeschirmt sein muss. Es gibt jedoch vereinzelt auch kontinuierlich arbeitende Mikrowellenanlagen, welche mit speziellen Schleusen ausgestattet sind um ein Austreten von Mikrowellenstrahlung zu vermeiden.

Des Weiteren sind nicht alle Materialien dafür geeignet mittels Mikrowellen erwärmt zu werden. Beispielsweise ist es nicht möglich Polypropylen und die meisten Metalle mit Mikrowellenstrahlung zu erwärmen. Polypropylen ist nicht in der Lage die Strahlung zu absorbieren und ist vollständig durchdringbar. Metalle hingegen reflektieren die Wellen so gut wie komplett und erwärmen sich somit ebenfalls nicht.

Für entsprechend kompatible Materialien ist Mikrowellenerwärmung dennoch interessant, da nur das Gut erwärmt wird und der Rest der Anlage, inklusive der Luft im Heizraum, kalt bleibt. Dies wirkt sich positiv auf den effektiven Wirkungsgrad aus, welcher bei der Verwendung eines Magnetrons bei bis zu 80% liegt. Klystrone sind in der Lage weitaus höhere Leistungen zu liefern, haben allerdings nur einen Wirkungsgrad von maximal 60%.^{[6], [7]} Hieraus ergeben sich nach Verrechnung mit dem tatsächlichen effektiven Wirkungsgrad eines Mikrowellenofens weitere Übertragungsverluste in Höhe von ca. 10%.

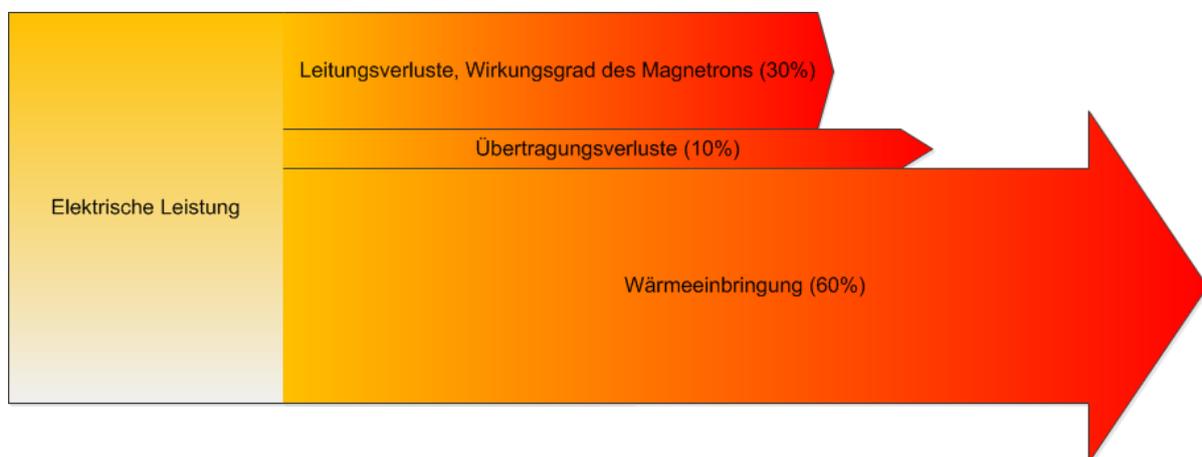


Abb. 13: Wirkungsgrad bei der Erzeugung von Mikrowellenstrahlung mithilfe eines Magnetrons^{[6], [7]}

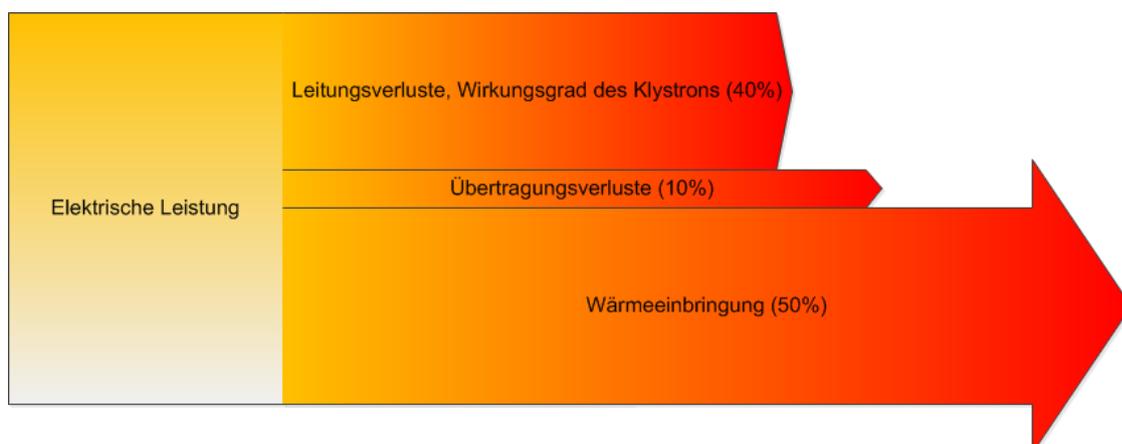


Abb. 14: Wirkungsgrad bei der Erzeugung von Mikrowellenstrahlung mithilfe eines Klystrons^{[6], [7]}

Geeignete Kunststoffe:

- Polyethylenterephthalat
- Polyamid
- ABS

Ungeeignete Kunststoffe:

- Polyethylene
- Polypropylen
- Polycarbonate
- Polybutylenterephthalat
- LCP
- Polyethersulfon
- Polyetherimid

Von Vorteil ist hier die Erwärmung aus dem Bauteilinneren heraus. Dies ermöglicht eine sehr gleichmäßige Erwärmung bei der Verwendung einer sog. Drehantenne am Magnetron. Zudem ist die Erwärmung eines Gutes nur geringfügig von seiner Wärmeleitfähigkeit abhängig bei Verwendung von Mikrowellen. Dies verhindert eine Zersetzung oder Verkohlung des Kunststoffes an der Oberfläche.

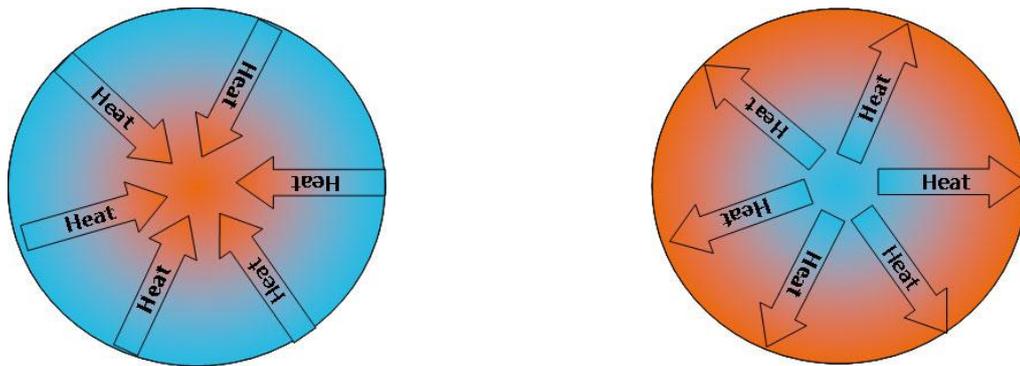


Abb. 15: Vergleich von konventioneller Erwärmung von außen (links) und Erwärmung mit Mikrowellen (rechts)^[8]

Variante 5

Eine weitere Möglichkeit Wärme in Material einzubringen liefert die Verwendung eines Lasers in Variante 5 (**Abb. 16**). Hierbei stehen vor allem CO₂ – Laser und Nd:YAG-Laser hervor. Sie erlauben eine gleichmäßige und schnelle Wärmeerbringung. Da eine Strahlführung zur großflächigen Erwärmung technisch aufwendig zu realisieren ist, ist diese Technologie eher für lokale Erwärmung geeignet. Zudem liegt der Wirkungsgrad solcher Laser nur bei maximal 50% und damit weit hinter anderen Techniken zurück. Sie Grundinvestitionen für eine derartige Anlage ist sehr hoch.

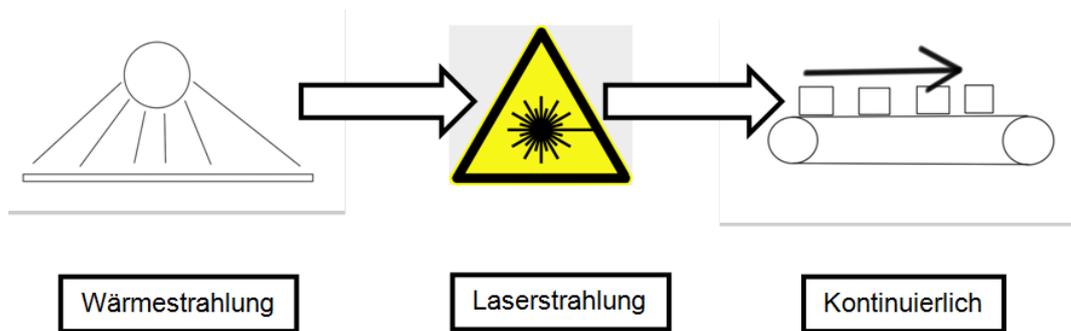


Abb. 16: Variante 5 mit Infrarotstrahlung in Form von Laserstrahlung

Da das Prinzip auch hier auf einer Infrarotstrahlenemittierung basiert, gelten dieselben Regeln für die Absorption der Strahlung durch das Gut wie bei den konventionellen Infrarotstrahlern.^[1]

5.3 Vorzugsvariante Temperierung

Aufgrund der höchsten Effizienz wurde als Vorzugsvariante Wärmestrahlung mittels Infrarot gewählt, im speziellen Variante 2 mit diskontinuierlichem Betrieb. Im Gegensatz zu einem kontinuierlichen Betrieb kann die Temperierung hier variabel auf die Taktung einer Fertigungsstraße abgestimmt werden. Die Infrarotstrahler sollen dabei im Pulsbetrieb arbeiten, wodurch eine gute Einstellung auf die Wärmeleiteigenschaften der Halbzeuge erfolgen kann um ein Verbrennen der Oberfläche an dicken oder schlechter wärmeleitenden Werkstoffen zu vermeiden.

Hauptmerkmale der präzisierten Vorzugsvariante sind:

- diskontinuierlicher Temperierprozess
- Infrarotstrahler im Pulsbetrieb
- variable Anordnung der Infrarotstrahler zur optimalen Temperierung ebener Halbzeuge sowie von 3D-Konturen
- Bestrahlung von beiden Seiten
- Abstandsverstellung der Infrarotstrahler zur Mittelebene
- flexibles Systemdesign des Demonstrators zur Erprobung unterschiedlichster Szenarien und variablen Einsatz im Prozess

Die IR-Strahler sind als Hohlraumstrahler angeordnet (**Abb. 17**), bei dem das obere und das untere Strahlerfeld stufenlos aus der Ebene bis zum Halbreisquerschnitt verstellt werden können. Hierdurch ist besondere Flexibilität für den Demonstrator gewährleistet. Die gewölbte Anordnung ist in vereinfachter Betrachtung der technischen Umsetzung des Strahlungsfeldes gemäß dem Lambertischen Richtungsgesetz^[9] besonders zur gut zur effizienten Erwärmung der Halbzeuge geeignet. Insbesondere für die Erwärmung von 3D-Strukturen ist eine solche Anordnung zwingend notwendig, um das Auftreten lokaler Hot Spots zu minimieren. Weiterhin werden Reflexionsverluste durch Reflektoren minimiert, was den Wirkungsgrad gegenüber Abb. 9 nochmals verbessert.

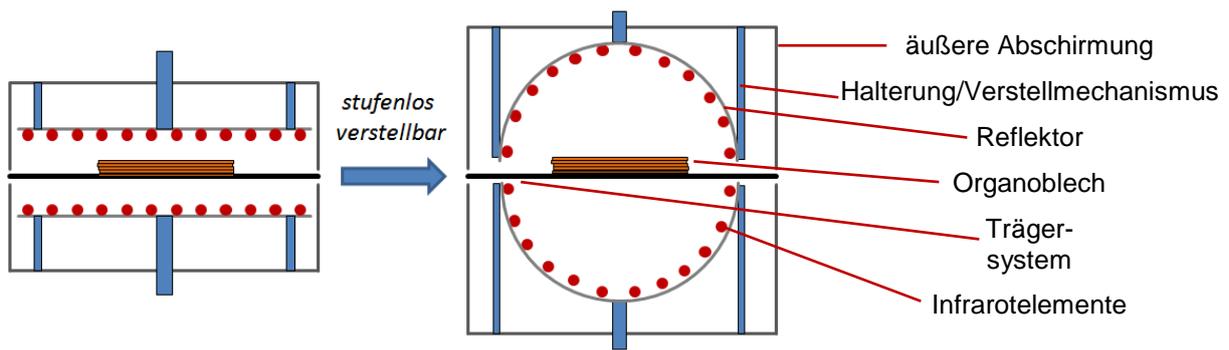


Abb. 17: Infrarotbestrahlung mittels flexibler Strahleranordnung (links: eben und rechts: simulierter Hohlraumstrahler)

5.4 Warenträger

Neben der Hauptfunktion der Temperierung hat das Trägersystem und dessen Bewegungskinetik zur Sicherstellung des Warenträgerumlaufs Einfluss auf den Erwärmungs- und insbesondere auf den Gesamtfertigungsprozess. Die Kernaufgaben eines Trägersystems in der Temperierstation sind

- Transport des Halbzeuges in und aus der Temperierstation
- Übernahme/Übergabe an angrenzende Handhabesysteme
- Positionierung der Halbzeuge während des Temperiervorgangs
- geringe thermische Beeinflussung der Halbzeuge

Nachfolgend wird in Grundträger als Bestandteil des Trägersystems und Warenträger als Schnittstelle zum Halbzeug unterschieden. Aufgegliedert in Teilfunktionen (**Abb. 18**) ergibt sich daraus eine Funktionsstruktur für das Transportsystem (**Abb. 19**).

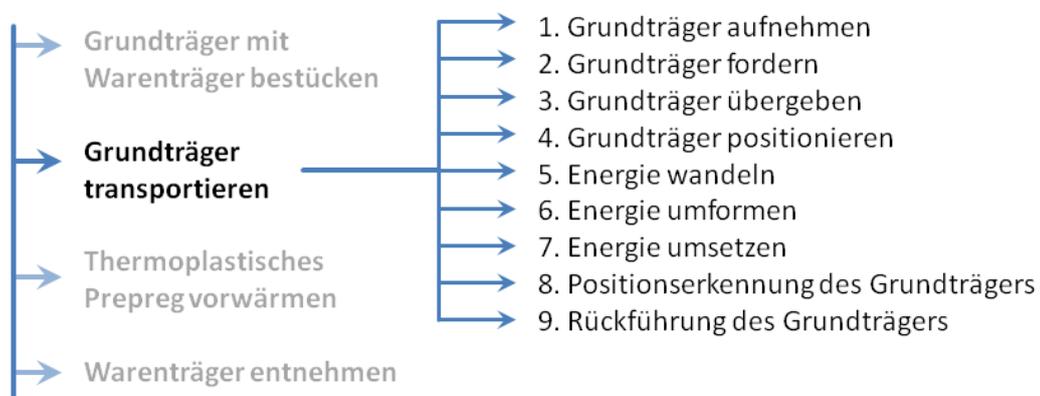


Abb. 18: Haupt- und Teilfunktionen des Grundträgers

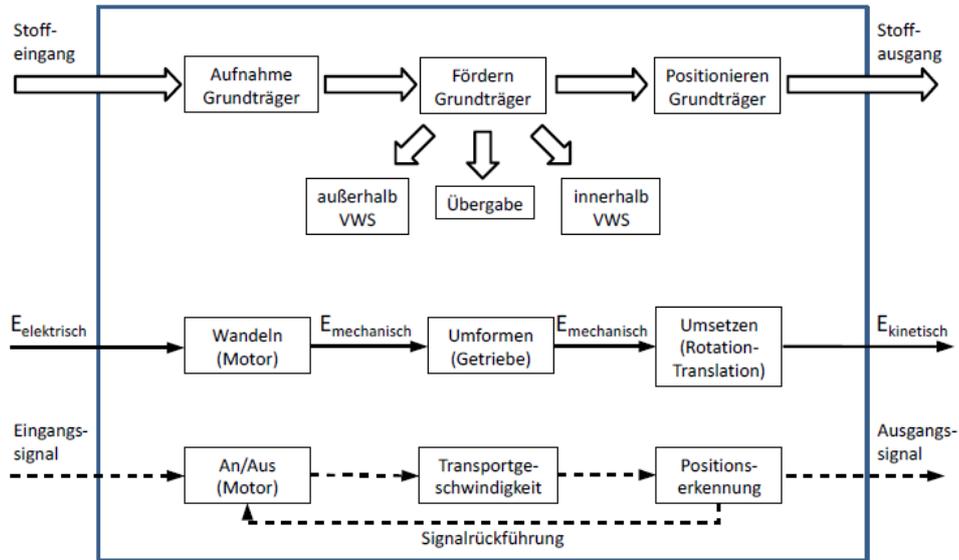


Abb. 19: Funktionsstruktur des Trägersystems

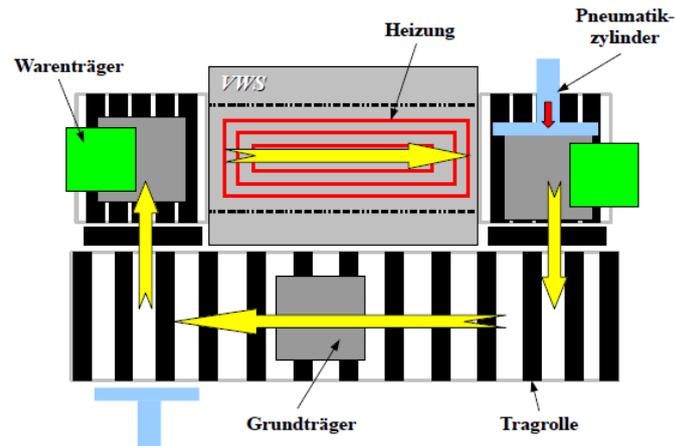
Ein geeignetes Warenträgersystem muss den vorherrschenden Temperaturen gegenüber beständig sein, darf das thermische System nicht zu stark beeinflussen und die Erwärmung des Halbzeuges nicht beeinträchtigen. Für das Warenträgersystem wurden unterschiedliche technische Varianten entwickelt (Tab. 6).

Tab. 6: Übersicht zu den Varianten für ein Warenträgersystem

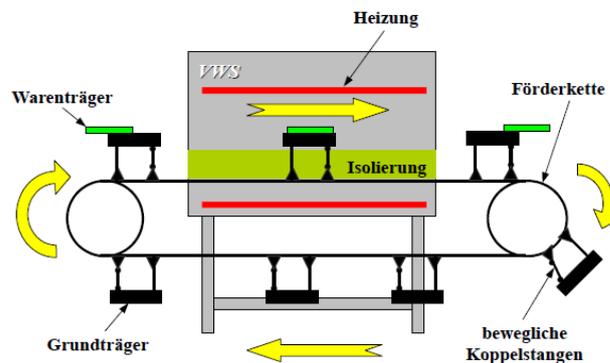
<p>Variante 1</p> <ul style="list-style-type: none"> gekennzeichnet durch hängendes Fördersystem mit Grundträgerrückführung über der Temperierstation Elektromagnete zur Stabilisierung/Schwingungsdämpfung 	
<p>Variante 2</p> <ul style="list-style-type: none"> Grundträger liegt auf Rollen auf, die Kettenglieder bewegt werden Rückführung mittels Rollenförderer und unterhalb des Heiztunnels 	

Variante 3

- seitliche Rückführung der Grundträger über ein Rollensystem

**Variante 4**

- Koppelstangen verbinden Zugmittel und Grundträger, dadurch ist die Einbringung thermischer Isolierungen zwischen Grundträger und Zugmittel möglich → Energieeinsparung



Die Gegenüberstellung der Varianten mit Hinblick auf die Entwicklung eines möglichst flexiblen Forschungsdemonstrators einer Temperierstation führten zu dem Schluss, im Rahmen des Forschungsvorhabens kein integriertes Trägersystem baulich umzusetzen. Stattdessen soll eine flexible, extern zugeführte Gitterablage als Warenträger Verwendung finden.

5.5 Konstruktive Umsetzung

Die konstruktive Umsetzung erfolgte auf Basis eines geschweißten Grundgestells mit einem Aufbau aus Profilstücken. Gestalt und Abmessungen der Konstruktion sind in **Abb. 20** und **Abb. 21** dargestellt. Die Temperierstation verfügt über keine integrierte Bauteil-/Halbzeugablage, die zu erwärmenden Halbzeuge/Preforms werden über ein separates, externes Gitter zugeführt. Diese Konstruktionsweise hat den Vorteil, dass verschiedene Ablagesysteme zum Einsatz kommen können, beispielsweise auch spezielle Greifer an einem Roboter. Mit letzteren kann die Homogenität der Erwärmung von 3D-Teilen weiter gesteigert werden, da mit den IR-Strahlern nur eine verstellbare Wölbung in eine Richtung technisch umsetzbar ist. Das IR-Strahlerfeld selbst besteht aus je zwölf Einzelstrahlern oben und unten, die an einem flexiblen Edelstahlblech montiert sind. Durch das Blech wird die verstellbare Wölbung des IR-Strahlerfeldes realisiert. Die Materialwahl garantiert einen hohen IR-Reflexionsgrad.

Tab. 7: Konstruktion der Temperierstation

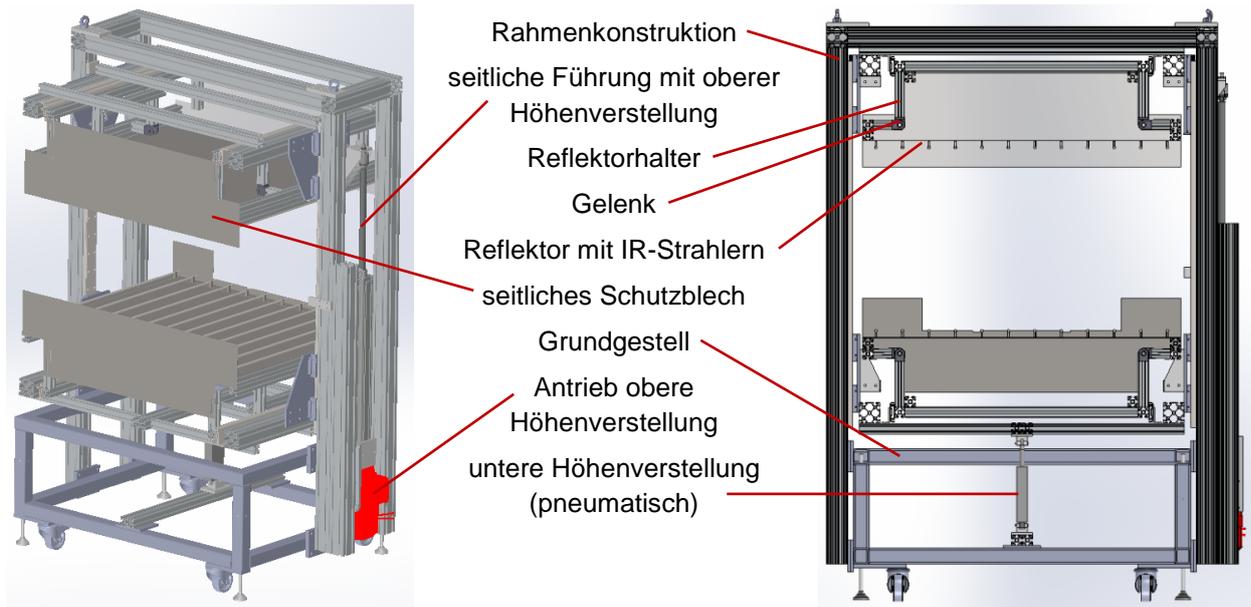


Abb. 20: Gesamtansicht der Temperierstation - Konstruktionsmodell

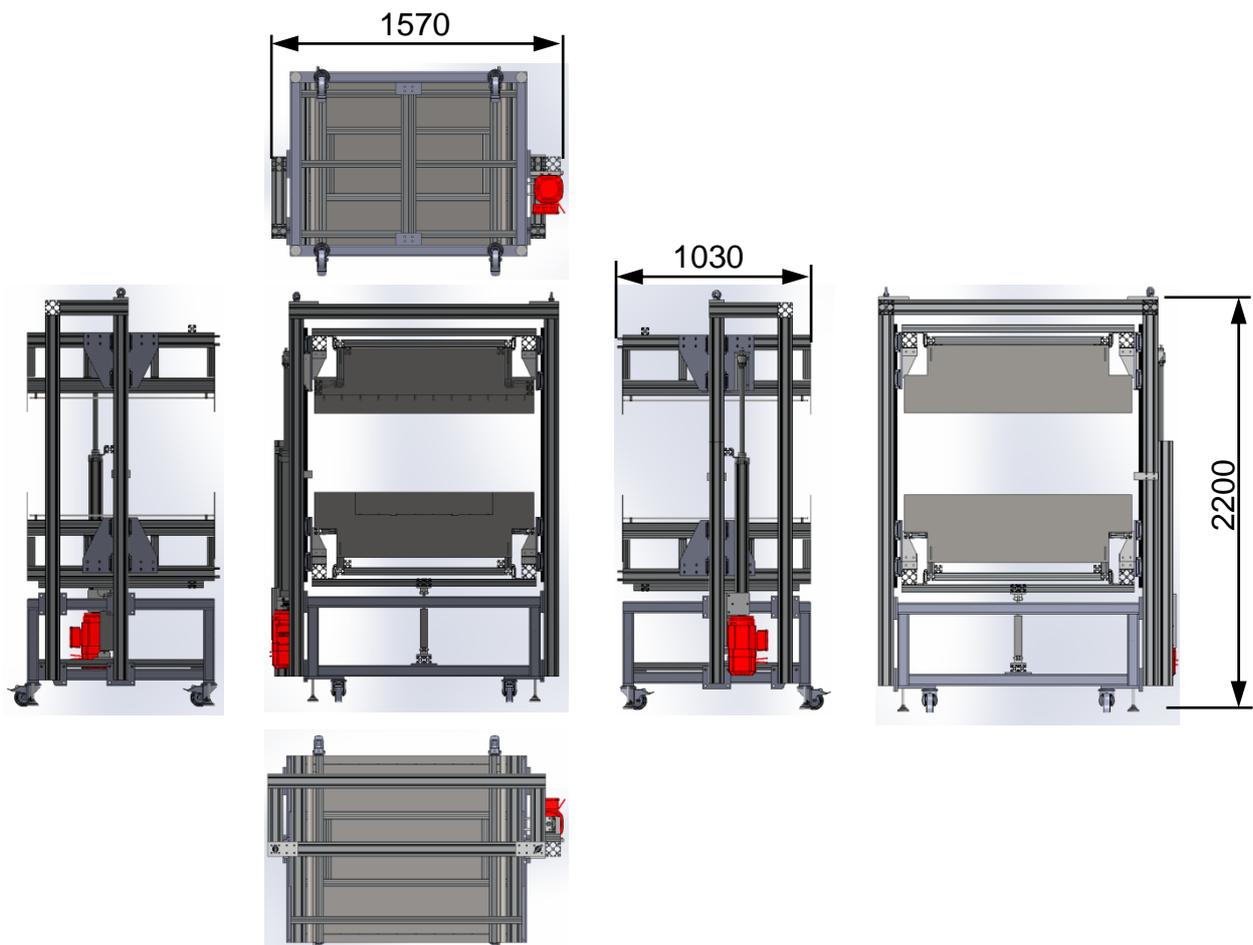


Abb. 21: Seitenansichten und Hauptabmessungen der Temperierstation

6 Bauliche Umsetzung des Demonstrators

Die Temperierstation wurde baulich umgesetzt und nach Implementierung einer Steuerung für das System in Betrieb genommen. **Abb. 22** zeigt das Gesamtsystem, die Umsetzung des IR-Strahlerfeldes ist in **Abb. 23** in ebener Montage dargestellt. Die seitlichen Hitzeschutz-/Reflexionsbleche sind auf den Darstellungen noch nicht montiert. Eine Winkelverstellung des IR-Strahlerfeldes erfolgt manuell per Hand, hierzu sind zunächst Flügelmuttern zu lösen, die das Stahlblech an dessen geschlitzten Versteifungen mit einem Stahlband verschrauben und dadurch die aktuelle Position fixieren. Danach sind diese Komponenten zueinander verschiebbar und das Blech mit den IR-Strahlern kann verformt werden. In gewünschter Position erfolgt die Fixierung mit Flügelmuttern.



Abb. 22: Gesamtansicht des Demonstrators (rechts: Vorderansicht, links: Rückansicht)

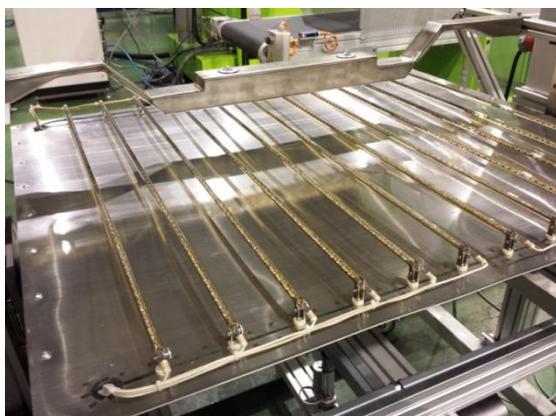


Abb. 23: Detailansicht IR-Strahlerfeld (links) und Winkelverstellung über geschlitztes Blech mit Flügelmutterhalterung (rechts)

7 Versuchsdurchführung und Funktionsnachweis

Der Demonstrator wurde nach Fertigstellung ins Versuchsfeld der Professur Strukturleichtbau und Kunststoffverarbeitung der TU Chemnitz überführt, um zukünftig in einem Gesamtprozess zur Erforschung von Fertigungstechnologien für thermoplastische Faserverbundbauteile weiter untersucht und optimiert zu werden. Die im Rahmen des vorliegenden Projektes durchzuführenden Untersuchungen erfolgten vor Ort. Für die Versuche wurde das IR-Strahlerfeld in einem gewölbten Zustand zum simulierten Hohlraumstrahler voreingestellt (**Abb. 24**). Die Wölbung wurde zu Gunsten eines zuverlässigen Systembetriebs und zur Schonung der Strahler für die Testphase nicht dauerhaft exakt bis auf Halbkreisform eingestellt, hier sind zur Vorbeugung von Beschädigungen bauliche Anpassungen notwendig.



Abb. 24: Temperierstation im Versuchsssetup (links), mit eingeschalteten IR-Feldern (rechts)

Es wurden für Halbzeugzuschnitte aus Plytron (Glas+Polypropylen) und Ce-Preg® (Kohlefaser-Polyamid) Temperatur-Zeit-Verläufe aufgezeichnet. Dazu wurden mittig der Zuschnitte je bis zu vier Thermoelemente positioniert (**Abb. 25**).

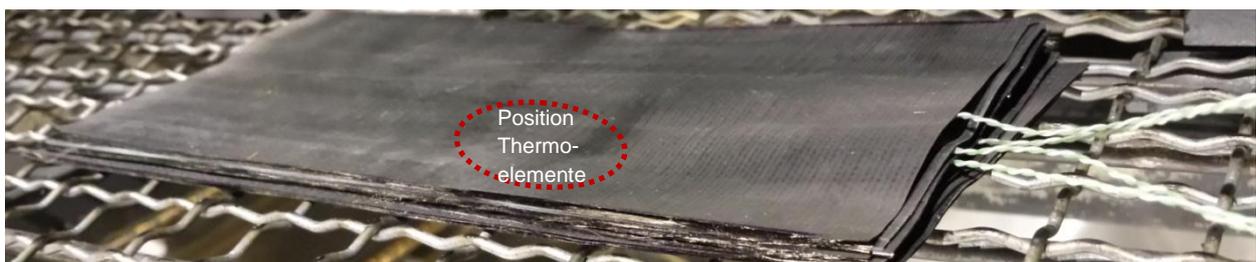


Abb. 25: Halbzeugzuschnitt mit vier Thermoelementen

In **Abb. 26** sind die mittleren Zeiten zusammengefasst, die bis zum Erreichen der jeweiligen Zieltemperaturen für unterschiedliche Lagenanzahlen ermittelt wurden. Gemessen wurde mit bis zu vier Thermoelementen in unterschiedlichen Lagen, die Übersicht zeigt die Zeit bis Erreichen der Zieltemperatur unterhalb der ersten Lage und bis zum Erreichen der Zieltemperatur an jedem Sensor. Die Sensoren waren einseitig der Symmetrieebene des Lagenaufbaus vom Rand bis Mitte des Lagenaufbaus positioniert. Es wurden für Plytron Versuche mit Pulsbetrieb (75% und 50% Leistung) durchgeführt, um einem möglichen Überhitzen der Randbereiche bis zur Durchwärmung entgegenzuwirken.

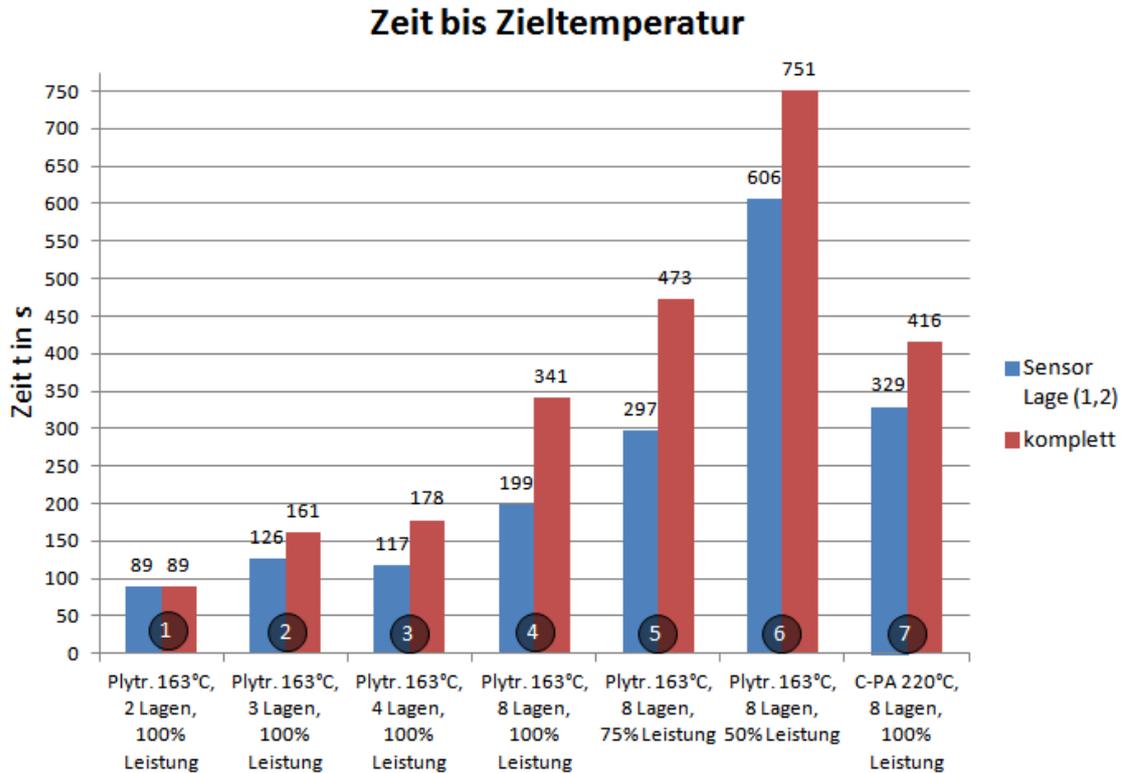


Abb. 26: Temperaturen bis Erreichen der Zieltemperatur für verschiedene Halbzeuge, Lagenzahlen und Heizleistungen (zwischen der 1. und 2. Lage sowie komplett durchgewärmt)

Tab. 8 zeigt die Maximaltemperaturen unterhalb der ersten Lage zum Zeitpunkt des Durchwärmens (alle Lagen haben Zieltemperatur erreicht), für acht Lagen ist die maximale Temperatur selbst bei einhundert Prozent Strahlerleistung noch unbedenklich.

Tab. 8: Maximaltemperatur (innerhalb Halbzeug)

	1	2	3	4	5	6	7
Temperatur zwischen 1. und 2. Lage bei Durchwärmung in °C	163	184	199	186	195	169	250

Erwartungsgemäß erreicht der Randsensor zuerst die Zieltemperatur, bis zur Durchwärmung aller Lagen ist weitere Zeit notwendig. Diese zusätzliche Durchwärmzeit fällt bei dem Ce-Preg® - Halbzeug mit PA6 als Matrix vergleichsweise geringer aus, trotz schlechterem Wärmeleitkoeffizienten (vgl. Tab. 2). Die Gründe hierfür liegen in der Struktur der Halbzeuge. Während beim Plytron die Fasern mit hohem Imprägniergrad pro Lage bereits einen steifen Verbundaufbau bilden, sind die Kohlefasern beim Ce-Preg® nur schwach mit der PA6-Folie verbunden und bilden eine lockere, biegeschlaffere Struktur. Daraus resultiert im Mehrlagenaufbau ein deutlich geringerer mittlerer Lagenabstand und dementsprechend weniger Luft zwischen den Lagen, was die Wärmeleitung senkrecht zur Halbzeugebene/Verbundsymmetrieebene deutlich begünstigt.

Der große Einfluss enthaltener Luft zwischen den Einzellagen wurde bei den Versuchen auch dadurch deutlich, dass die Zieltemperatur meist nicht in der Symmetrieebene zuletzt erreicht wurde, sondern eine Lage darüber. Die Ursache hierfür ist der Einfluss

der Thermoelemente auf den Lagenabstand (**Abb. 27**), selbst eine Variierung der Messdrahtzuführrichtung von Lage zu Lage brachte keine Besserung. **Abb. 28** zeigt die entsprechenden Messkurven am Beispiel.



Abb. 27: Beeinflussung der Messergebnisse durch Thermoelemente infolge vergrößerter Lagenabstände

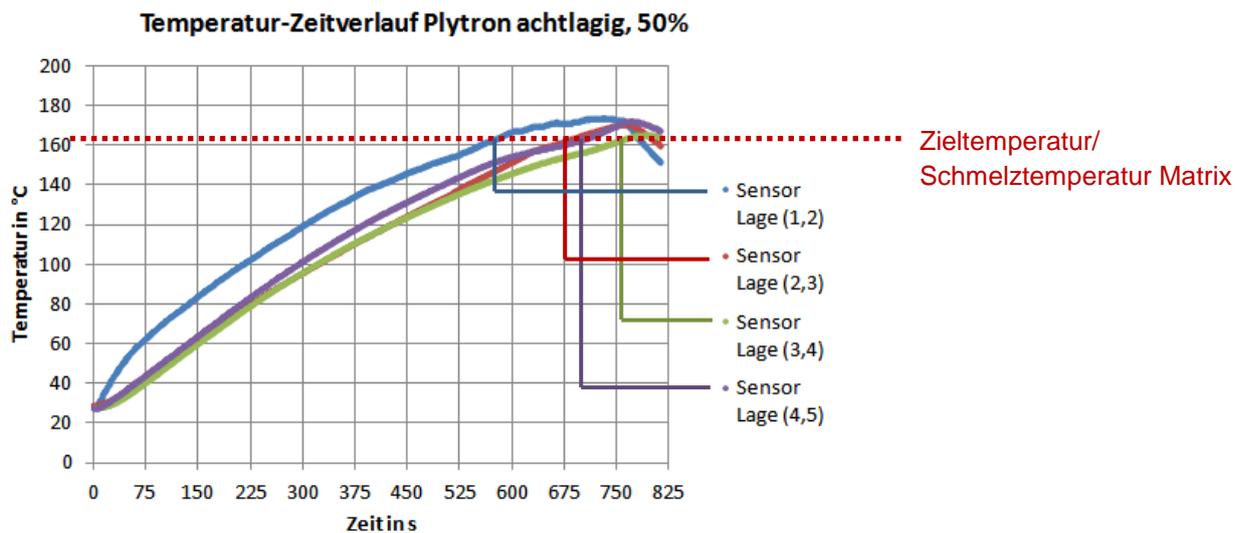


Abb. 28: Erreichen der Zieltemperaturen für die unterschiedlichen Sensoren ist am Beispiel Plytron, 8lagig, 50% Strahlerleistung besonders deutlich sichtbar

Die Verschiebung des Maximums für die Zeit bis Erreichen der Zieltemperatur erfolgte auch in Richtung der Hälfte mit den Sensoren, wenn diese in den unteren Lagen positioniert waren, daher kann der Einfluss des Warenträgers hierfür nicht die Ursache sein. Die Proben wiesen dennoch rein optisch Merkmale einer Beeinflussung durch den Warenträger auf, indem sich dessen Struktur auf der Oberseite der Halbzeuge durchzeichnete (**Abb. 29**). Ursache ist das Eigengewicht des Halbzeugs, das beim Erreichen der Schmelztemperatur lokal die Kunststoffschmelze oberhalb leicht aus den Fasern drückt. Der Sachverhalt wird als unbedenklich für die weitere Verarbeitung eingeschätzt.

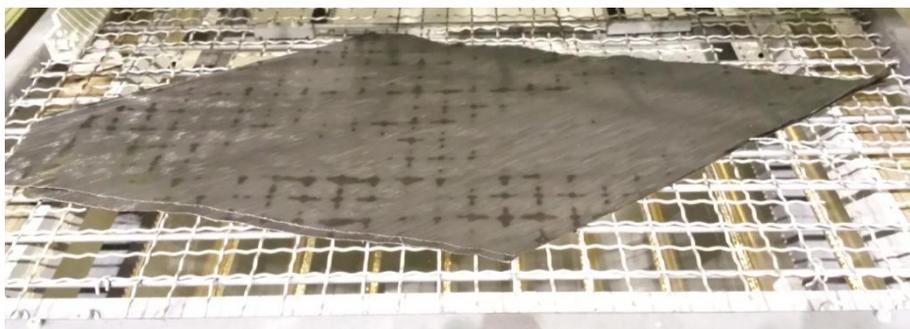


Abb. 29: Durchzeichnung der Warenträgerstruktur auf dem Halbzeug

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass ein realer Erwärmungsvorgang nicht vorkonsolidierter Halbzeuge deutlich komplexer ist und von weiteren Faktoren abhängt, als bei den im Projektantrag durchgeführten theoretischen Betrachtungen berücksichtigt werden konnten. Daher sind die tatsächlichen Erwärmungszeiten größer als postulierte Werte vermuten lassen. Jedoch gibt es hinsichtlich der Temperierzeiten vielversprechende Ansatzpunkte zur weiteren Optimierung der effektiven Heizleistung und somit der Energieausnutzung (**Tab. 9**).

Tab. 9: Potential zur Optimierung des Temperiervorgangs

Maßnahme	Effekt
1. Wegfall der Thermoelemente zwischen den Halbzeuglagen im Produktionsbetrieb	<ul style="list-style-type: none"> • Verkürzung der Temperierzeit • gleichmäßiger, symmetrischer Erwärmungsvorgang • Verringerung des Energiebedarfs pro Zyklus
2. Verbesserung der Wölbung des Strahlerfeldes	<ul style="list-style-type: none"> • Verkürzung der Temperierzeit • Verringerung des Energiebedarfs pro Zyklus
3. Verbesserung der Abschirmung des IR-Bereichs nach allen Seiten	<ul style="list-style-type: none"> • Verkürzung der Temperierzeit • Schonung umliegender Anlagen vor IR-Strahlung • Verringerung des Energiebedarfs pro Zyklus
4. Temperierung des Strahlerfeldes (Heizen/Kühlen)	<ul style="list-style-type: none"> • stabiler Dauerbetrieb des Systems durch konstante Betriebsparameter (im Testbetrieb Abkühlphasen für gleiche Ausgangsbedingungen notwendig)
5. Flächig-punktueller Fixierung der Einzellagen mittels Ultraschallschweißverfahren	<ul style="list-style-type: none"> • Verringerung des mittleren Lagenabstandes und somit der Luftschichten zwischen den Lagen • Schaffen punktueller Kontaktstellen • insgesamt verbesserte Wärmeleitung in Dickenrichtung • Verkürzung der Temperierzeit • Verringerung des Energiebedarfs pro Zyklus

Die genannten Maßnahmen werden über das Forschungsvorhaben hinaus weiterführend am Demonstrator durchgeführt und untersucht.

Trotz der noch gültigen Einschränkungen hinsichtlich erreichbarer Heizzeiten wird die entwickelte Anlage dem vorgesehenen Einsatzzweck voll gerecht. Die angestrebten Energieeinsparpotentiale von bis zu 40% durch die geänderte Fertigungsprozessfolge sind mit der Technologieentwicklung realisierbar, die Verdeutlichung erfolgt im abschließenden Kapitel 2.7.

8 Zusammenfassung der Ergebnisse und Ausblick

Im Rahmen des FuE-Vorhabens wurde eine Temperierstation entwickelt, gebaut und erprobt, die auf dem Prinzip der Wärmestrahlung eine energieeffiziente Vorwärmung unkonsolidierter und konsolidierter, thermoplastbasierter Faserverbundhalbzeuge in ebener und dreidimensionaler Form erlaubt.

Die angestrebte Energieersparnis von 20% - 40% wird mit dem Projekt erreicht und resultiert aus effektiveren Prozessketten, die mit der neu entwickelten Temperierstation realisierbar sind. Ausgangspunkt war eine dezentrale Prozesskette, die zwar den Vorteil flexibler, räumlich getrennter Halbzeugfertigung bildet, dadurch aber insgesamt mehr komplette Aufheizzyklen der Halbzeuge notwendig macht (**Abb. 30**). Als Schritt "0" gekennzeichnet ist der Schritt der Faser-Kunststoff-Imprägnierung (Prepregfertigung). Dieser Vorgang ist bei den verwendeten Kunststoffen technisch anspruchsvoll, vollständig oder teil-vorimprägnierte Thermoplasthalbzeuge werden daher fast ausschließlich bei allen Teilefertigern von spezialisierten Firmen zugekauft (z. B. das Halbzeug "Plytron" der Firma Elekon AG und das "Ce-Preg®" des Cetex Institut für Textil- und Verarbeitungsmaschinen gemeinnützige GmbH).

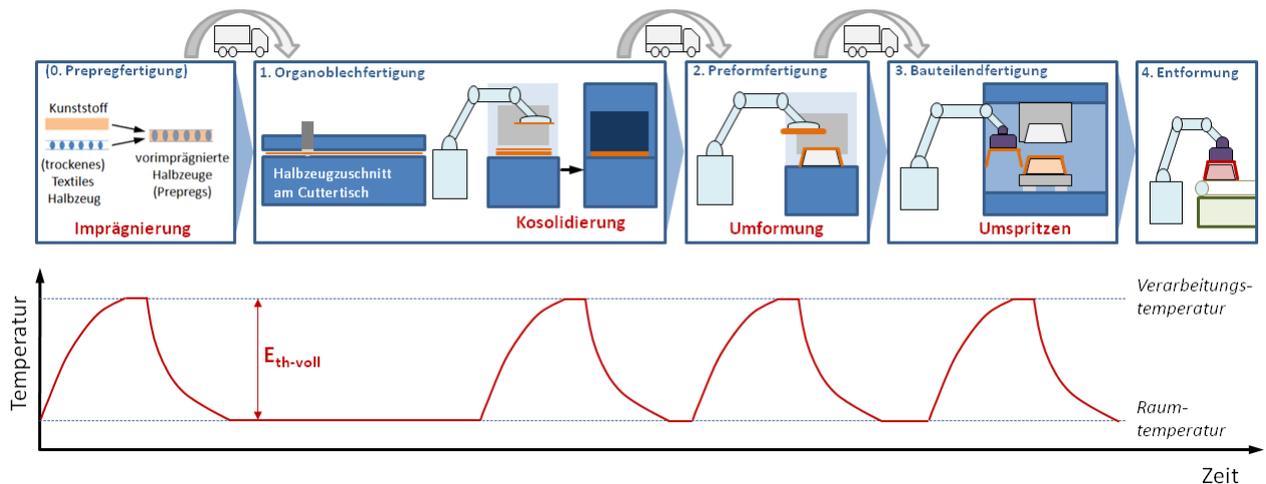


Abb. 30: Klassische, dezentrale Prozesskette zur Fertigung thermoplastbasierter Hochleistungsfaserverbundbauteile auf Basis von Organoblechen

Zunächst soll für das vollständige technische Verständnis die vorgeschaltete Imprägnierung der Halbzeuge mit dargestellt werden. Eine qualitative Betrachtung der benötigten thermischen Energie zur Aufheizung der Halbzeuge in der Fertigungsprozesskette ergibt

$$E_{\text{th-ges_alt}} = E_{\text{th-voll}(0)} + E_{\text{th-voll}(1)} + E_{\text{th-voll}(2)} + E_{\text{th-voll}(3)} \quad (1)$$

Unter der vereinfachenden Annahme, die benötigte Energiemenge $E_{\text{th-voll}}$ zum Erreichen der Zieltemperatur der konstanten Halbzeuggesamtmasse ist in jedem Schritt gleich, folgt

$$E_{\text{th-ges_alt}} = E_{\text{th-voll}} + E_{\text{th-voll}} + E_{\text{th-voll}} + E_{\text{th-voll}} = 4 \times E_{\text{th-voll}} \quad (2)$$

Mit der neuartigen Temperierstation wird eine effektive Erwärmung unkonsolidierter Halbzeuge ermöglicht, wodurch ein Prozessschritt eingespart wird (**Abb. 31**). Weiterhin ist die entwickelte Temperierstation in der Lage, die effektive Vorwärmung der Preforms sicherzustellen. Durch die unmittelbare Abfolge aller Prozessschritte ab Halbzeugzuschnitt kann die Restwärme der Preformfertigung genutzt werden, für die Wiedererwärmung auf Zieltemperatur ist somit nur noch ein deutlich geringerer Energiebetrag $E_{th\text{-teil}}$ notwendig.

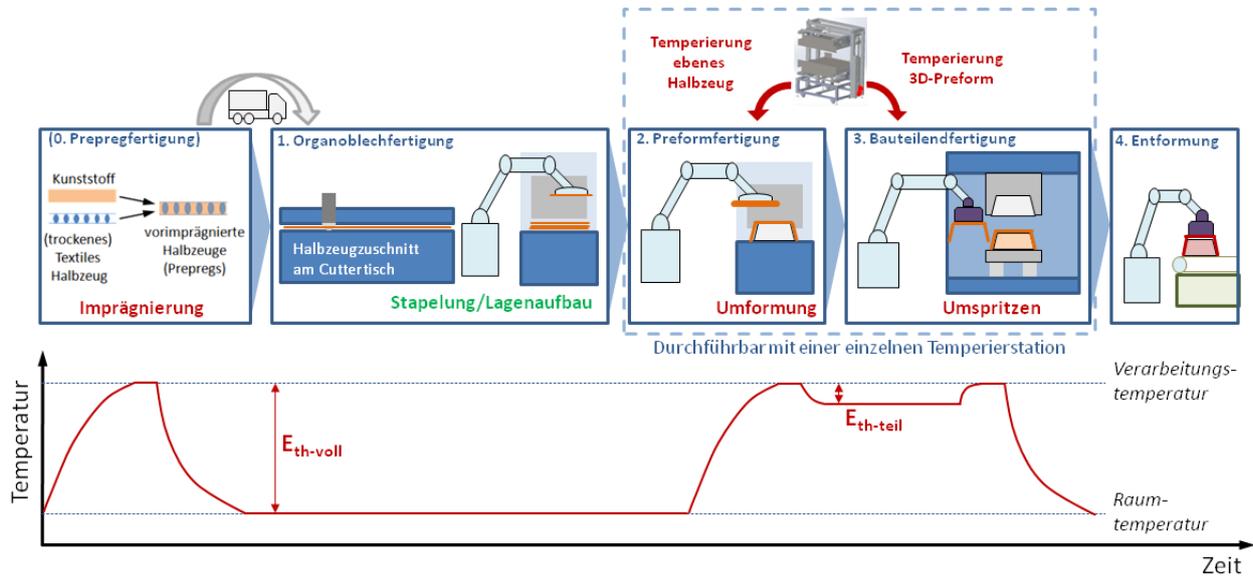


Abb. 31: Optimierte, zentralisierte Prozesskette mit Temperierstation für unkonsolidierte Halbzeuge und 3D-Preformen

Analog zur bisherigen Prozessfolge ergibt sich die notwendige Gesamtenergie $E_{th\text{-ges_neu}}$ zur Erwärmung der Halbzeugmasse aus

$$E_{th\text{-ges_neu}} = E_{th\text{-voll}} + E_{th\text{-voll}} + E_{th\text{-teil}} \quad (3)$$

Unter der Annahme, dass die notwendige Energie zum Ausgleich kurzzeitiger Temperaturverluste zwischen Preformfertigung und Umspritzen ca. 10% der Energiemenge für eine vollständige Erwärmung

$$E_{th\text{-teil}} = 0,1 \times E_{th\text{-voll}} \quad (4)$$

entspricht, folgt aus (3) und (4)

$$E_{th\text{-ges_neu}} = E_{th\text{-voll}} + E_{th\text{-voll}} + 0,1 \times E_{th\text{-voll}} = 2,1 \times E_{th\text{-voll}} \quad (5)$$

Werden die Gleichungen (2) und (5) nach $E_{th\text{-voll}}$ umgestellt, ergibt sich daraus

$$4 \times E_{th\text{-ges_neu}} = 2,1 \times E_{th\text{-ges_alt}} \quad (6)$$

bzw.

$$E_{th\text{-ges_neu}} = 0,525 \times E_{th\text{-ges_alt}} \quad (7)$$

und damit eine Ersparnis an Aufheizenergie von 47,5%. Berücksichtigt man die notwendige Energie für die Bauteilendfertigung und weitere identische Prozessschritte sowie den Wegfall von Transportwegen, wird eine Energieeinsparung von ca. 20% im gesamten Fertigungszyklus inklusive vorgeschalteter Imprägnierung erreicht.

Prepregs werden bauteilunabhängig von spezialisierten Firmen frei als Halbzeuge angeboten und von Bauteilfertigern als Rohmaterial zugekauft. Wird die vorgelagerte Imprägnierung (Prepregherstellung) unter diesem Gesichtspunkt nicht mit in die Bauteilfertigung einbezogen, ergibt sich für Gleichung (6)

$$3 \times E_{\text{th-ges_neu}} = 1,1 \times E_{\text{th-ges_alt}} \quad , \quad (8)$$

bzw.

$$E_{\text{th-ges_neu}} = 0,37 \times E_{\text{th-ges_alt}} \quad . \quad (9)$$

Die Energieersparnis bei den Temperiervorgängen liegt dann bei 63% und unter Berücksichtigung verbleibender Prozessschritte und Wegfall von Transportwegen beträgt die Gesamtenergieersparnis bei dieser Betrachtungsweise ca. 40% gegenüber der dezentralisierten Prozesskette zu Projektbeginn.

Mit dem durchgeführten FuE-Projekt wurde eine deutliche Reduzierung des Energiebedarfs für die Herstellung thermoplastbasierter Hochleistungsfaserverbundbauteile und somit die angestrebten Ziele erreicht. Der entstandene Demonstrator wird über das Projekt hinaus für Forschungszwecke eingesetzt und es wird an einer weiteren Steigerung des Wirkungsgrades gearbeitet.

9 Literaturangaben

- [1] (Schmidt, R.: *Einsatz von Hochleistungslasern für die Fertigung von Faser-verbundbauteilen mit thermoplastischer Matrix im Wickelverfahren*; VDI-Verlag, Düsseldorf 1994
- [2] Paolo Ermanni, Niccolò Pini (2005): *Die Verarbeitung von FV-Thermoplasten*. Vortrag: Composites Technologien
- [3] *ASHRAE Handbook - Heating, Ventilating, and Air-Conditioning Systems and Equipment*. (I-P Edition) American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., 2008, Tabelle 2, S. 15.3.
- [4] Krelus Infrared: *Die schnellen mittelwelligen Krelus Infrarot-Strahler*. Hirschtal (CH). Firmenschrift
- [5] Dipl.-Ing. René Fuhrich, IKT, TU Chemnitz: *Strahlungserwärmung beim Kunststoffschweißen mit Infrarotstrahlung*. Sitzung des FA11 des DVS. Düsseldorf 20.09.2011. S.7
- [6] Christian Wolff: *Funktionsweise eines Magnetrons*. <http://www.radartutorial.eu/08.transmitters/tx08.de.html> (06.08.2012)
- [7] Moritz Mottschall, Dietlinde Quack: *Entwicklung der Vergabekriterien für ein klimaschutzbezogenes Umweltzeichen*. Öko-Institut e.V.. Berlin 04.01.2011. Abbildung 2.3, S. 11
- [8] Fraunhofer . ICT: *Kunststoff erwärmung mit Mikrowellen*. <http://www.ict.fraunhofer.de/de/komp/PE/mp/erw.html> (06.08.2012)
- [9] Günter Cerbe, Hans-Joachim Hoffmann: *Einführung in die Thermodynamik*. (12. Auflage), S. 349, Hanser Verlag 1999