

FAU Studien aus dem Maschinenbau 424

### **Thomas Braun**

Potenzialanalyse der plasmabasierten, strukturierten Metallisierung thermoaktiver Oberflächen im industriellen Hausbau



Thomas Braun

Potenzialanalyse der plasmabasierten, strukturierten Metallisierung thermoaktiver Oberflächen im industriellen Hausbau

# FAU Studien aus dem Maschinenbau

### Band 424

Herausgeber/-innen:

Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke Prof. Dr.-Ing. Nico Hanenkamp Prof. Dr.-Ing. habil. Tino Hausotte Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein Prof. Dr.-Ing. Sebastian Müller Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack Thomas Braun

# Potenzialanalyse der plasmabasierten, strukturierten Metallisierung thermoaktiver Oberflächen im industriellen Hausbau

Dissertation aus dem Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS)

Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke

Erlangen FAU University Press 2023 Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek: Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.d-nb.de abrufbar.

Bitte zitieren als

Braun, Thomas. 2023. Potenzialanalyse der plasmabasierten, strukturierten Metallisierung thermoaktiver Oberflächen im industriellen Hausbau. FAU Studien aus dem Maschinenbau Band 424. Erlangen: FAU University Press. DOI: 10.25593/978-3-96147-654-1.

Das Werk, einschließlich seiner Teile, ist urheberrechtlich geschützt. Die Rechte an allen Inhalten liegen bei ihren jeweiligen Autoren. Sie sind nutzbar unter der Creative-Commons-Lizenz BY-NC.

Der vollständige Inhalt des Buchs ist als PDF über den OPUS-Server der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg abrufbar: https://opus4.kobv.de/opus4-fau/home

Verlag und Auslieferung: FAU University Press, Universitätsstraße 4, 91054 Erlangen

Druck: docupoint GmbH

ISBN: 978-3-96147-653-4 (Druckausgabe) eISBN: 978-3-96147-654-1 (Online-Ausgabe) ISSN: 2625-9974 DOI: 10.25593/978-3-96147-654-1

# Potenzialanalyse der plasmabasierten, strukturierten Metallisierung thermoaktiver Oberflächen im industriellen Hausbau

Der Technischen Fakultät der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

zur

Erlangung des Doktorgrades Dr.-Ing.

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Thomas Maria Braun

aus Wörth a. d. Donau

Als Dissertation genehmigt von der Technischen Fakultät der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Tag der mündlichen Prüfung:17.10.2022

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke Prof. Dr.-Ing. Anton Maas, Universität Kassel

### Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS) an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg.

Meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke danke ich in besonderem Maße für die Inspiration und den Freiraum zur Themenfindung sowie der fortwährenden fachlichen Unterstützung bei meinen Forschungstätigkeiten. Herrn Prof. Dr.-Ing. Anton Maas aus dem Fachgebiet Bauphysik der Universität Kassel danke ich für die fachspezifischen Impulse sowie die Übernahme des Zweitgutachtens. Des Weiteren gilt mein herzlicher Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. Georg Fischer (LTE) für die Beteiligung als weiteres Mitglied des Prüfungskollegiums sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Dietmar Drummer (LKT) für die Übernahme des Vorsitzes des Promotionsverfahrens.

Diese Dissertation beruht zu Teilen auf den Ergebnissen des durch das Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung geförderten Projektes Baustoff-integrierte Flächenheizung (BiFH). Ein Dank sei hier ebenso den Projektpartnern aus der Industrie (u. a. LUXHAUS, Knauf Gips KG, Plasma Innovations GmbH) ausgesprochen, ohne deren Unterstützung das Forschungsvorhaben nicht hätte umgesetzt werden können.

Ein herzlicher Dank geht auch an alle (ehemaligen) Mitarbeitenden des Lehrstuhls FAPS wie v. a. J. Bürner, A. Fehrle, J. Praß, L. Baier, R. Merkl, J. Weber, J. Bauer, M. Michl, G. Kleineidam, T. Kuhn, A. Hensel, M. Muckelbauer, C. Kästle, T. Stoll, R. Schramm, M. Ankenbrand, F. Häußler, P. Bräuer, R. Seidel, T. Reitberger, E. Russwurm, M. Beimler, D. Kozic, G. Gion, M. Petersen, M. Masuch, A. Kühl, A. Höft, C. Fischer, J. Bönig, E. & M. Brandmeier, M. Brossog, W. Weller, N. Merz und G. Stretz sowie meinen jahrelangen Wegbegleitern O. Schmitt, M. Spahr, J. Dreher & M. Staiger. Ebenso möchte ich mich bei allen Studierenden für die wertvollen Beiträge innerhalb der Forschungsaktivitäten bedanken.

Der größte Dank geht an meine Eltern sowie meinem Bruder Franz mit Bianca, welche mich auf meinem Lebensweg immerwährend unterstützt haben.

Regensburg, im Januar 2023

Thomas M. Braun

# Inhaltsverzeichnis

Forn	nelze	ichen-	und Abkürzungsverzeichnisvii
1	Ein	leitur	ng und Zielsetzung
	1.1	Probl	emstellung
	1.2	Zielse	etzung und Vorgehensweise
2	Rai	ımwä	rmeerzeugung im Kontext industriell produzierter
_	Wo	hnge	bäude
	2.1	Bause	ektor als Schlüsselbranche
		2.1.1 2.1.2 2.1.3	Entwicklung und Wandel im Wohnungsbau6 Einfluss klimapolitischer Rahmenbedingungen7 Potenziale modular gefertigter Gebäude
	2.2	Gebä	udetechnische Wärmebereitstellung14
		2.2.1 2.2.2 2.2.3	Anforderungen an Heizsysteme
	2.3	Forsc Fläch	hungsansatz zur Untersuchung plasmagenerierter enheizungen
		2.3.1 2.3.2 2.3.3	Thermisch aktivierbare Oberflächen im Gebäude
3	Коі	nzept	entwicklung plasmastrukturierter
,	Flä	chenł	neizsysteme
	3.1	Mater indus	rialauswahl für thermisch aktivierbare Oberflächen im triellen Hausbau
		3.1.1 3.1.2 3.1.3	Konstruktiver Aufbau industriell gefertigter Wände
	3.2	Ober	flächenfunktionalisierung mit CAPM43
		3.2.1 3.2.2 3.2.3	Anlagenaufbau und Versuchssetup
	3.3	Funk	tionsanalyse plasmabasierter Heizstrukturen auf Gipskarton 51
		3.3.1 3.3.2 3.3.3	Substratspezifische CAPM-Parameterstudie
	3.4	Zusar	nmenfassung und Bewertung technischer Funktionsfähigkeit76

4	Un	tersuchung thermischer Behaglichkeit	79	
	4.1	Konzipierung plasmagenerierte Wandflächenheizung	80	
		4.1.1 Grundlagen zum Stromwärmegesetz		
		4.1.2 Analytische Auslegung	83	
		4.1.3 Empirische Untersuchung		
	4.2	Installation des Wandflächenheizsystems		
	4.3	Behaglichkeitsmessung verschiedener Szenarien		
		4.3.1 Theoretische Grundlagen		
		4.3.2 Versuchsaufbau und -durchführung		
		4.3.3 Versuchsergebnisse und Auswertung		
	4.4	Zusammenfassung und Bewertung des praktischen Einsatzpotenzials		
5	Int	egrationspotenzial in der Fertighausherstellung	97	
	5.1	Heizlastberechnung zur Wandflächenauslegung		
	5.2	Fertigungsabfolge in der Modulherstellung99		
	5.3	Möglichkeit zur Prozessintegration102		
	5.4	Zusammenfassung und Bewertung der		
		Inline-Plasmastrukturierung	105	
6	Bev	Bewertung der Wirtschaftlichkeit107		
	6.1	Überschlägige Kalkulation der Anschaffungskosten	107	
		6.1.1 Herstellkosten plasmabasierte Heizstruktur	108	
		6.1.2 Gleichstromquelle	114	
		6.1.3 Heizsystemregelung		
		6.1.5 Gesamtkosten	110	
	6.2	Berechnung der monetären Einordnung		
	6.3	Zusammenfassung und Bewertung der Wirtschaftlichkeit		
7	<b>7</b> 110	sammenfassung und Ausblick		
/ 8	Sin	mmary	125	
о т.	Jul		127	
LITE	eratu	rverzeiciinis	129	

# Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis

Formelzeichen			
Symbol	Einheit	Beschreibung	
Ă	mm <sup>2</sup>	Fläche Leiterbahnquerschnitt	
ADS	mm	Abstand zwischen Düse und Substrat	
BG	mm/s	Beschichtungsgeschwindigkeit	
clo	$m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$	Bekleidungsfaktor	
$f_{cl}$	-	Bekleidungsflächenfaktor	
hc	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$	konvektiver Wärmeübergangskoeffizient	
Ι	А	Strom	
I <sub>cl</sub>	$m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$	Bekleidungsisolation in	
L	m	Leiterbahnlänge	
LP	kW	Leistung Plasmaerzeuger	
Μ	$W \cdot m^{-2}$	Energieumsatz	
Μ	$W \cdot m^{-2}$	Wirksame mechanische Leistung	
met	$W \cdot m^{-2}$	metabolische Einheit	
Р	W	Heizleistung	
pa	Ра	Wasserdampfpartialdruck	
PGS	l/min	Prozessgasstrom	
PMV	-	predicted mean vote	
PPD	-	predicted percentage of dissatisfied	
$\mathbf{Q}_{\mathbf{W}}$	J	Wärmeenergiegehalt	
R	Ω	Elektrischer Widerstand	
$R_k$	Ω	Widerstandswert vor der Temperaturer-	
		höhung	
R <sub>Segment</sub>	Ω	Elektrischer Widerstand eines Segmentes	
t	S	Zeit	
ta	°C	Lufttemperatur	
t <sub>cl</sub>	°C	Oberflächentemperatur der Kleidung	
TGD	bar	Trägergasdruck	
$T_{\text{HS}}$	°C	Temperatur Heizstruktur	
Tu	°C	Umgebungstemperatur	
U	V	Spannung	
U <sub>N</sub>	V	Ausgangsspannung Netzteil	
ε	-	Emissionskoeffizient	
ρ <sub>20</sub>	$(\Omega \cdot mm^2)/m$	spezifischer Widerstand	
$\alpha_{\rm T}$	K-1	Temperaturkoeffizient des Widerstandes	

ΔR	Ω	Änderung des elektrischen Widerstandes
ΔΤ	К	Änderung der Temperatur
<del>ī</del> r	°C	mittlere Strahlungstemperatur
$v_{ar}$	m/s	relative Luftgeschwindigkeit

#### Alternating current (Wechselstrom) AC ΑÜ Anzahl der übereinanderliegenden Überfahrten **BDEW** Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. Blockheizkraftwerke BHKW Baustoff-integrierte Flächenheizung BiFH BK **Bulk-Kupfer** Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz **BMUB** und nukleare Sicherheit CAD Computer-aided design CAM Computer-aided manufacturing CAPM Cold-Active-Plasma-Metallization DC Direct current (Gleichstrom) Deutsche Industrie- und Handelskammer DIHK Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung DIW **E-DLE** Elektrischen Durchlauferhitzer **EEWärmeG** Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz EnEV Energieeinsparverordnung **Enterprise Resource Planning** ERP Heizwand Nr. X Hx Heizstruktur HS ITG Institut für Technische Gebäudeausrüstung Dresden Forschung und Anwendung GmbH KfW Kreditanstalt für Wiederaufbau **MwSt** Mehrwertsteuer **OSB-Platte** Grobspanplatte (engl. Oriented strand board) Oberflächenvorbehandlung OV PG Prozessgas PV Photovoltaik Heizwand-Quadrant Nr. X Qx REM Rasterelektronenmikroskop RWE Raumwärmeerzeugung SA Standardabweichung SB Strukturbreite SELV Safty extra low voltage Heizwand-Segment Nr. X Sx

#### Abkürzungen

TG	Trägergas
TWE	Trinkwassererwärmung
UBA	Umweltbundesamt
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
WRG	Wärmerückgewinnung
WSV	Wärmeschutzverordnung
WW-Wärme-	Warmwasser-Wärmepumpen
pumpen	

## Bildverzeichnis

Bild 1:	Erzielter und prognostizierter Umsatz innerhalb der Baubranche (Daten aus [11])5
Bild 2:	Endenergieverbrauch zur Raumwärmeerzeugung nach Sektoren (links: Daten aus 2019, Stand 09/2020 [26], rechts: Daten aus 2018, Stand 05/2020 [4])8
Bild 3:	Stetiger Rückgang des Heizwärmebedarfs aufgrund politisch vorgegebenen Dämmstandards der Gebäudehülle [28, 31]9
Bild 4:	Anteil erneuerbarer Energien am Endenergieverbrauch für die Wärmebereitstellung in Gegenüberstellung zur Bruttostromerzeugung aus erneuerbaren Energien, Stand 2019 [32, 33]
Bild 5:	Steigender Trend der in Fertigbauweise errichtete Gebäude [43, 44]13
Bild 6:	Prozesse zur industriellen Baufertigstellung (nach [39])14
Bild 7:	Beispiele für Raumluft-Temperaturprofile verschiedener Heizungssysteme (Theoretisch ideale Temperatur Verteilung (1), Radiatoren an Innenwand (2) an Außenwand (3), Einzelöfen an Innenwand (4), Luftheizung (5), Deckenstrahlungsheizung (6), Fußbodenheizung (7), Wandheizung (8)) (nach [6, 7])
Bild 8:	Behaglichkeitsfeld für Raumlufttemperatur und Raumbegrenzungsflächen [51]16
Bild 9:	Bestand zentraler Wärmeerzeuger für Heizungen in Deutschland nach Kategorie im Jahr 2018 [53]17
Bild 10:	Strahlungs- und Konvektionsanteile verschiedener Heizkörper (nach [62])20
Bild 11:	Strahlungs- und Konvektionsanteil ausgewählter Heizsysteme (nach [6])24
Bild 12:	Vorgehensmodell zur Findung eines nachhaltigen Heizsystems für industriell gefertigte Gebäude
Bild 13:	In den Bauwerkstoff integrierte Wandflächenheizung im Gebäude (Bild [S1])27
Bild 14:	Schematische Darstellung des Plasmabeschichtungs- prozesses (Eigendarstellung nach [88])28

### Bildverzeichnis

Bild 15:	Flugbahnen von Pulverpartikeln im Plasmastrahl (nach [92])29
Bild 16:	Schematische Darstellung des Schichtaufbaus beim thermischen Spritzen [85]
Bild 17:	Einflussfaktoren auf den Plasmabeschichtungsprozess nach der 5-M-Methode (in Anlehnung an [95])31
Bild 18:	Mechanische Verklammerung als Haftungsphänomen bei der CAPM (nach [85])32
Bild 19:	Anzahl der Baugenehmigungen zur Errichtung neuer Wohngebäude im Fertigteilbau nach überwiegend verwendetem Werkstoff [115]38
Bild 20:	Typischer Aufbau von Innen- und Außenwänden aus Holz errichteter Fertighäuser [116, 117]39
Bild 21:	Gipskarton als Trockenbauwerkstoff für den Innenausbau ([119])40
Bild 22:	Oberflächenstruktur ausgewählter Gipskartonplatten (Bilder aus [S2])41
Bild 23:	Partikelgrößenverteilung des Kupferpulvers "plasma tronic®" der Firma relyon plasma GmbH42
Bild 24:	REM-Aufnahmen zeigen die spratzige Gestalt des "plasma tronic®"-Kupferpulvers (REM-Aufnahmen [132])43
Bild 25:	Schematische Darstellung der Komponenten des Plasmabeschichtungsprozesses44
Bild 26:	Versuchsaufbau zur Plasmabeschichtung von Gipskartonproben (Bilder aus [S3])46
Bild 27:	Schematische Darstellung zur Messung des Pulvermassenstromes47
Bild 28:	Messung der Kontinuität des Pulvermassenstroms48
Bild 29:	Messung der Kontinuität der Plasmaflamme49
Bild 30:	Schematischer Versuchsaufbau zur Plasmabeschichtung53
Bild 31:	Bewertungsskala zur optischen Auswertung der Haftung (Bilder aus [S4])53
Bild 32:	Keine ausreichende Haftung des Kupferpulvers bei einer BG von 15 mm/s und 25 mm/s, bei ADS = 10 mm sowie AÜ = 1 (Bilder aus [S4])54
Bild 33:	Einfluss der BG bei konstantem ADS und AÜ (Bilder aus [S4])55

Bild 34:	Einfluss bei Variation des ADS (Bilder aus [S4])56
Bild 35:	Vergleich des Einflusses bei Erhöhung der AÜ (Bilder aus [S4])57
Bild 36:	Haupteffektdiagramm zur optischen Beurteilung der Haftung zwischen Gipskarton und Plasmastruktur in Abhängigkeit der Beschichtungsparameter
Bild 37:	Haupteffektdiagramm für die SB in Abhängigkeit von AÜ, BG sowie ADS58
Bild 38:	Höhenprofilmessung der plasmabasierten Heizstruktur59
Bild 39:	Schliffbilder des Heizstruktur-Gipskarton-Verbundes (REM-Aufnahmen [132])60
Bild 40:	Schematisches Setup zur Durchführung von Schertests61
Bild 41:	Untersuchung der Scherkräfte zwischen Plasmastruktur und Gipskarton62
Bild 42:	Gegenüberstellung der Scherfestigkeitswerte zwischen Plasmastruktur und Gipskarton63
Bild 43:	Schematische Darstellung des Messaufbaus zur thermischen Eigenschaftsbestimmung der Heizstrukturen 63
Bild 44:	Versuchsaufbau zur Funktionsanalyse der Heizstrukturen64
Bild 45:	Aufheizverhalten der plasmabasierten Heizstrukturen auf Gipskarton ([S3])66
Bild 46:	Beschichtungslayout für die Durchführung der Dauerbeständigkeitsuntersuchungen der Wandflächenheizung68
Bild 47:	Proben zur Untersuchung des Einflusses von Dekorationswerkstoffen auf die Plasmastruktur (Bilder aus [S2])69
Bild 48:	Schliffbilder von mit Dekorationswerkstoffen überzogen Heizstrukturen (REM-Aufnahmen [132])70
Bild 49:	Streichen bzw. Tapezieren verursachen ein Aufquellen der Kartonummantelung
Bild 50:	Exemparischer Verlauf eines Zyklus unter periodisch wechselnden Umgebungsbedingungen bei 70 % relative Luftfeuchte
Bild 51:	Einfluss des zyklischen Temperaturwechsels auf die elektrische Leitfähigkeit der plasmabasierten Kupferstrukturen (Daten aus [S2])73

### Bildverzeichnis

Bild 52:	Versuchsaufbau zur Analyse der Auswirkungen der Einschaltvorgänge auf die Flächenheizsegmente
Bild 53:	Zyklus eines Einschaltvorganges der Heizstrukturen zur Simulation der Dauergebrauchseigenschaften nach einem mehrjährigen Einsatz75
Bild 54:	Auswirkungen der Einschaltvorgänge auf die elektrische Leitfähigkeit der Kupferstrukturen über eine Einsatzzeit von annähernd 10 Jahren (Daten aus [P5])
Bild 55:	Demonstrationshaus zur Untersuchung des praktischen Einsatzes und physiologischen Behaglichkeit der plasmagenerierten Wandflächenheizung
Bild 56:	Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes der Plasmastruktur (Daten aus [S3])82
Bild 57:	Schematischer Aufbau zur elektrischen Verschaltung der Heizwand84
Bild 58:	Aufheizverhalten des Flächenheizsegmentes (Bilder aus [S5, S6, P6])86
Bild 59:	Grundriss des Demonstrationshauses mit Anordnung der Heizwände
Bild 6o:	Aufbau Heizflächenwand im Demonstrationshaus
Bild 61:	Einhausung für Netzgeräte an der Außenwand zur thermischen Isolierung89
Bild 62:	Aufbau des Behaglichkeitsmessgerätes91
Bild 63:	PMV/PPD-Index der untersuchten Szenarien (Daten aus [S7, S8, P6])93
Bild 64:	Allgemeinen Heizlast-Auslegung für Gebäude [47, 153]
Bild 65:	Schematische Darstellung des Fertigungsprozesses eines Wandmoduls in Holzrahmenbauweise (eigene Darstellung basierend auf Daten aus [178–180, S9])100
Bild 66:	Aufbau der Holzrahmenkonstruktion [178, S9]101
Bild 67:	Schematischer Aufbau einer Multifunktionsbrücke zur In-Line-Plasmastrukturierung104
Bild 68:	Aufbau des Gesamtsystems zum Betreiben einer elektrischen Wandflächenheizung108
Bild 69:	Elektrische Leistung der Plasmazelle (Daten aus [S10, S11])110
Bild 70:	Elektrische Leistung der Absaugungsanlage (Daten aus [S10, S11])111

Bild 71:	Gesamtkostenvergleich der betrachteten Heizungssysteme
	für einen Zeitraum von 20 Jahren (Datenbasis aus [207])121
Bild 72:	Schematische Illustration weiterer Anwendungspotenziale
	für plasmagenerierte Heizstrukturen125

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Konstante und veränderliche Steuergrößen mit den jeweiligen Faktorstufen
Tabelle 2:	Heizstrukturlänge in Abhängigkeit der jeweiligen Heizlast im Raum (Daten aus [175])99
Tabelle 3:	Beschichtungsdauer zum Fertigen der geforderten Heizstrukturlänge103
Tabelle 4:	Berechnung des Maschinenstundensatzes zur industriellen Heizstrukturherstellung mittels CAPM (nach [182])109
Tabelle 5:	Überschlägig veranschlagte Gesamtkosten zur Fertigung der Heizstrukturen für das in Kapitel 5.1 vorgestellte Beispielgebäude
Tabelle 6:	Aufwendungen für Netzteile für das in Kapitel 5.1 vorgestellte Beispielgebäude ([195–198])15
Tabelle 7:	Überschlägig veranschlagte Gesamtkosten einer plasmagenerierten Wandflächenheizung für das in Kapitel 5.1 vorgestellte Beispielgebäude117
Tabelle 8:	Brutto-Energiepreise ausgewählter Energieträger (Daten aus [207], Stand 2018)118
Tabelle 9:	Betrachtete Kombinationen von Heizsystemen
Tabelle 10	:Gegenüberstellung der Anschaffungskosten der betrachteten Heizungssysteme (Daten aus [207])120
Tabelle 11:	Gegenüberstellung der verbrauchs- und betriebsgebunden Kosten der betrachteten Heizungssysteme (Daten aus [207])121

# 1 Einleitung und Zielsetzung

Die Sonne spendet als natürliche Energiequelle seit mehreren Milliarden Jahren Wärme und ist für das Bestehen des Lebens auf der Erde unabkömmlich. Diese thermische Energie steht jedoch u. a. aufgrund der Bewegung der Erde um die Sonne, der Neigung der Erdachse sowie der Drehung der Erde um ihre eigene Achse [1] nicht gleichmäßig zur Verfügung, weshalb seit Anbeginn der Menschheit Technologien zur künstlichen Wärmeerzeugung entwickelt wurden. War es zunächst über Jahrtausende hinweg das offene Feuer, das dem Menschen als Wärmequelle diente, gibt es derzeit hochmoderne und komfortable Möglichkeiten für eine gezielte Wärmeeinbringung in ein Gebäude. Neben dem kontinuierlichen Fortschritt in der Heiztechnik unterliegt auch der Wohnungsbau einem stetigen Wandel. Zur Erfüllung zukünftiger klimapolitischer sowie sozialer Anforderungen ist es notwendig, Wohnkonzepte und deren eingesetzte Wärmetechnik teilweise zu überdenken und optimal aufeinander abzustimmen.

### 1.1 Problemstellung

Das Ziel der deutschen Bundesregierung liegt in einer vollständigen Dekarbonisierung in allen Sektoren bis zum Jahr 2050 [2]. Verwirklicht werden soll dies im Bereich Gebäude, indem einerseits die gesetzlichen Anforderungen auf eine energetische Optimierung der Gebäudehülle abzielen, womit ein Absinken des Heizbedarfs erreicht wird und andererseits derzeit überwiegend mit fossilen Brennstoffen befeuerte Heizungen durch Systeme mit regenerativ betriebenen Energien substituiert werden [3]. Aufgrund des zukünftig geringeren Energiebedarfs für Gebäude [4] und der Tatsache, dass bis zum Jahr 2030 mindestens 65 % des Bruttostromverbrauchs regenerativ erzeugt werden soll [2], bietet das Heizen mit Strom eine aussichtsreiche Alternative [5].

Im Zuge der Neuausrichtung von Heizsystemen gilt es ebenso die thermische Behaglichkeit mit einzubeziehen. Wie Studien [6, 7] zeigen, kann der höchste thermische Komfort mit Wandflächenheizungen erreicht werden. Derzeit häufig eingesetzte Wärmeabgabesysteme, wie beispielsweise Radiatoren, weisen einen hohen Konvektionsanteil auf und bieten daher eine vergleichsweise geringere Behaglichkeit. Eine vielversprechende Lösung für die zukünftige Raumwärmeerzeugung kann daher in elektrischen Wandflächenheizungen gesehen werden. Damit werden die gegenwärtig überwiegend mit fossilen Brennstoffen betriebenen eingesetzten Zentralheizsysteme obsolet, wodurch Aufwendungen für beispielsweise Verrohrungen, Brennstofflager sowie intensive Wartungsarbeiten und die damit einhergehenden Ressourcen eingespart werden können.

Der Bedarf nach bezahlbarem individuellem Wohnraum steigt stetig. Jedoch zeigen Umfragen, dass die Bauwirtschaft bereits jetzt an ihre Produktionskapazitäten stößt, was letztendlich auch dem Fachkräftemangel in der Baubranche geschuldet ist. [8–10] Einen bedeutenden Ansatz, um den permanent wachsenden Bedarf nach Wohnungen bzw. Häusern stillen zu können, stellt der industrielle Hausbau dar. Die im Vergleich zum Massivbau aufgrund der Vorfertigung im Werk kürzeren Bauzeiten führen im Allgemeinen zu geringeren Kosten. Der stetig steigende Anteil von Fertighäusern zeigt, dass dieses Potenzial bereits weitreichend erkannt wurde [11]. Trotz eines hohen Automatisierungsgrades in der Fertigung unter der Verwendung innovativer digitaler Instrumente werden einige Arbeitsschritte innerhalb der unterschiedlichen Gewerke jedoch noch manuell durchgeführt. So erfolgt der Einbau des Heizsystems zum großen Teil noch manuell auf der Baustelle, wodurch der Vorteil der industriellen Fertigung nicht komplett ausgeschöpft wird.

### 1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise

Um die Vorteile elektrisch betriebener Wandflächenheizungen nutzen zu können und gleichzeitig eine automatisierte Integration des Heizsystems während der Fertighausherstellung gewährleisten zu können, bietet eine thermische Funktionalisierung von Oberflächen mit der additiven Plasmabeschichtungstechnologie (Cold Active Plasma Metallization, CAPM) ein großes Potenzial. Mittels Plasma und Kupferpulver kann so mit einer automatisiert geführten Düse eine Metallstruktur auf Innenwänden abgelegt werden, welche als elektrische Widerstandsheizung fungiert. So können bereits bei der Planung des individuell gestalteten Gebäudes die Heizstrukturdaten automatisch generiert und an die Fertigung übergeben werden. Durch den modularen Aufbau der Anlagentechnik kann der Plasmabeschichtungsprozess in bestehende Prozessketten bei der Gebäudesegmentherstellung integriert werden.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist die wissenschaftliche Untersuchung und Bewertung, ob die Realisierung thermisch aktivierbarer Wandelemente mit Hilfe der CAPM-Technologie technisch möglich und wirtschaftlich sinnvoll ist. Dafür werden die einflussreichsten Parameter hinsichtlich ihrer Auswirkung auf das Beschichtungsergebnis nach optischen, mechanischen, thermischen sowie elektrischen Gesichtspunkten untersucht. Zur Bewertung der Dauerbeständigkeit der plasmagenerierten Heizstrukturen unter realen Umgebungsbedingungen werden diese im Klimaschrank umfangreichen Tests unterzogen und hinsichtlich der auftretenden Eigenschaftsänderungen ausgewertet. Zur Validierung der technischen Umsetzbarkeit sowie der erreichbaren thermischen Behaglichkeit werden die plasmagenerierten Wandflächenheizungen in einem Demonstrationshaus installiert. Weiterhin wird das Potenzial zur Integration der CAPM-Technologie in die Produktionslinie bei der Fertighausherstellung bewertet. Dafür erfolgt die Bestimmung der Fertigungsdauer zur Herstellung der benötigten Flächenheizsegmente für ein Beispielgebäude auf Basis einer analytischen Auslegung des Heizsystems. Die Bewertung der Wirtschaftlichkeit der plasmagenerierten Wandflächenheizung durch eine monetäre Gegenüberstellung mit vergleichbaren Heizsystemen rundet die Arbeit ab.

# 2 Raumwärmeerzeugung im Kontext industriell produzierter Wohngebäude

Bei der Gebäudeerrichtung wird dem Heizsystem eine maßgebende Bedeutung zugeschrieben. Die sich stetig verschärfenden Vorgaben durch den Gesetzgeber mit dem primären Ziel der Reduzierung der Treibhaus-Emissionen, der steigende Fachkräftemangel sowie die fortschreitende Technologieentwicklung im Hausbau führen zu einer zunehmenden Abkehr von der herkömmlichen Massivbauweise hin zu einer industriellen Fertigung von Gebäuden. Für eine durchgängig automatisierte Produktion müssen jedoch die derzeit vorwiegend manuell installierten Heizsysteme durch disruptive und innovative Technologien substituiert werden. [2, 10, 12–14]

### 2.1 Bausektor als Schlüsselbranche

Wie in Bild 1 grafisch dargestellt, lag der durchschnittliche jährliche Anstieg des Umsatzes innerhalb der Baubranche zwischen 2012 und 2018 bei 3,98 %. In einer vom Statistischen Bundesamt erhobene Hochrechnung [11] wird im Zeitraum von 2019 und 2024 weiterhin ein Wachstum von 2,44 % pro Jahr prognostiziert.





Die Wichtigkeit des Bausektors kann weiterhin daran quantitativ beziffert werden, dass mehr als 50 % des gesamten deutschen Volksvermögens in Immobilien gebunden ist [15]. Die Bauwirtschaft stellt mit einem Anteil am Bruttoinlandsprodukt von 10,9 % und einem Anteil an der gesamten Beschäftigung von 5,6 % somit eine Schlüsselbranche für Deutschland dar (Daten aus 2019, veröffentlicht im März 2020 [16, 17]).

### 2.1.1 Entwicklung und Wandel im Wohnungsbau

Das Gut des Wohnens zählt zu den menschlichen Grundbedürfnissen und ist wesentliches Element der physischen Existenzsicherung [15]. Diese hohe Bedeutung spiegelt sich auch in den vom statistischen Bundesamtes erhobenen Zahlen wider, womit der Wohnungsbau mit 61 % aller Bauinvestitionen die bedeutsamste Bausparte darstellt [16, 17]. Wie umfangreich die Errichtung eines modernen Wohnhauses ist, zeigt folgend die Anzahl der notwendigen Gewerke. Somit werden Fachkräfte zur Durchführung der Rohbauarbeiten für Erdarbeiten, Maurer- und Betonarbeiten, Errichtung des Dachstuhls, Dachdecker- und Klempnerarbeiten benötigt, während weiterhin für den Innenausbau Handwerker für Putzarbeiten, Estrich-, Boden- und Fliesenverlegen, Schreiner-/Glaserarbeiten, Installation der sanitären Anlagen, der Elektrik sowie Heizung, Treppenbauten und Malerarbeiten herangezogen werden müssen. [18]

Eine Differenzierung des Aufbaus von Gebäuden erfolgt in der Art der Errichtung des Gebäudes sowie der dafür verwendeten Materialien. In der Praxis wird primär von Massivbau gesprochen, wenn die Errichtung des Gebäudes vor Ort mit Mauerwerk und Stahlbeton erfolgt. Daneben hat sich der Begriff "Leichtbauweise" etabliert, der mit einer industriellen Vorfertigung von Holzbausegmenten und der anschließenden Montage der Bauteile auf der Baustelle in Verbindung gebracht wird. Darüber hinaus wird auch von Fertigbauweise bei der Produktion von Fertigteilen aus Beton, Stahl oder anderen Baustoffen im Werk und anschließender Baustellmontage gesprochen. Der Begriff Massivbau wird ebenso bei der Errichtung von Holzblockhäuser am Zielort im Sprachgebrauch verwendet. Daneben existieren weitere Möglichkeiten zur Errichtung von Gebäuden, die eine Mischung aus Vorfertigung und Baustellmontage sowie der Verwendung unterschiedlichster Materialien beinhalten. [19, 20]

Mit ca. 80 % dominiert in Deutschland (Daten aus 2018 [21]) die Gebäudeerrichtung aus Stein bzw. Beton, bei welcher die primäre Errichtung des Hauses vor Ort auf der Baustelle erfolgt. Dies erfordert eine exakt terminierte Abstimmung zwischen allen Gewerken untereinander und kann bei einer Verzögerung eines Bauabschnittes zur Nichteinhaltung der gesamten Bauplanung führen. Dies schließt ebenso die Infrastruktur und Logistik auf der Baustelle mit ein, d. h. die Bereitstellung ausreichender Lagerflächen und die Vermeidung von Ablaufstörungen durch die Einhaltung der 8 R der Logistik (richtiger Bauwerkstoff in der benötigten Menge und Qualität zum richtigen Zeitpunkt mit den richtigen Kosten, Daten sowie Wissen am exakt definierten Ort). Je nach Abstimmung der einzelnen Gewerke bzw. Handwerker kann die Errichtung des Rohbaus einen Zeitraum von wenigen Wochen bis mehrere Monate in Anspruch nehmen. [22, 23]

Einen Vorteil bietet hierbei die Fertigbauweise. Innerhalb von wenigen Tagen steht der komplette Rohbau, bzw. ist je nach Grad der Vorfertigung der Innenausbau bereits in weiten Teilen abgeschlossen. Dies kann gewährleistet werden, da die Herstellung im industriellen Maßstab in der Fließfertigung mit einer hohen Automatisierungstiefe erfolgt. Somit reduziert sich die Anzahl der nötigen Fachkräfte und eine exakte Abstimmung zwischen den einzelnen Gewerken entfällt aufgrund des bereits in der Fertigungshalle bereitstehenden Fachpersonals. Entgegen der konventionellen Errichtung des Gebäudes auf der Baustelle kann sowohl die Fertigung der einzelnen Hauselemente als auch die Montage dieser weitestgehend witterungsunabhängig erfolgen. Ebenso verringert sich die Komplexität der logistischen Abläufe, da alle benötigen Materialien direkt an der Fertigungslinie kommissioniert werden können. Damit kann der Werkstoffüberschuss reduziert sowie eine Verknappung verhindert werden, welche wiederum zu teuren Transportkosten bzw. Bauverzögerungen führt. Neben der hohen Oualität und Präzision von gegenwärtig errichteten Fertighäusern, welche auf der Verwendung innovativer industrieller Produktionsprozesse und dem Einsatz modernster Materialien zurückzuführen sind, können hohe Gebäudedämmstandards erfüllt werden. [24, 25]

### 2.1.2 Einfluss klimapolitischer Rahmenbedingungen

Der "Klimaschutzplan 2050" der deutschen Bundesregierung beinhaltet Meilensteine zur Reduktion der Treibhausgase in den kommenden Jahren bis hin zu einer vollständigen Dekarbonisierung in allen Sektoren (Energiewirtschaft, Gebäude, Verkehr, Industrie, Landwirtschaft) in Deutschland bis spätestens 2050. Mit dem "Energiekonzept 2010" hat sich die Bundesregierung zudem das Ziel zur Senkung des Primärenergieverbrauchs um 50 % bis zum Jahr 2050 im Vergleich zum Basisjahr 2008 gesteckt. Die Förderungen zum Ausbau der erneuerbaren Energien soll weiterhin dazu führen, dass bis zum Jahr 2030 mindestens 65 % des Bruttostromverbrauchs regenerativ erzeugt werden. Für eine Umsetzung der genannten Ziele ist laut dem Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMUB) eine Energieeffizienzsteigerung in allen Sektoren wie Energiewirtschaft, Gebäude, Verkehr, Industrie sowie Landwirtschaft gleichermaßen nötig. [2]

Ein großes Potenzial zur Reduzierung des Endenergieverbrauchs und damit der Treibhausgasemissionen sieht das BMUB dabei vor allem bei Wohngebäuden und postuliert dies in ihrer Veröffentlichung "Klimaschutz in Zahlen" (Ausgabe 2019 [2]). Bei Betrachtung des in Bild 2 dargestellten Diagramms zum Gesamtenergieverbrauch in Deutschland wird der hohe Anteil des benötigten Ressourcenaufwandes für Haushalte grafisch verdeutlicht. Die vom Umweltbundesamt (UBA) erhobenen Zahlen zeigen, dass private Haushalte im Jahr 2019 einen Energiebedarf von 666 TWh (Stand 09/2020) aufweisen und somit mit 26 %, nach dem Sektor Verkehr (31 %) sowie der Industrie (28 %), den drittgrößten Endenergieverbraucher in Deutschland darstellen [26]. Davon werden wiederum ca. 68 % (487 TWh im Jahr 2018, Stand 03/2020 [4]) zur Erwärmung von Räumen privater Haushalte benötigt, wie die Grafik in Bild 2 illustriert.



Bild 2: Endenergieverbrauch zur Raumwärmeerzeugung nach Sektoren (links: Daten aus 2019, Stand 09/2020 [26], rechts: Daten aus 2018, Stand 05/2020 [4])

Zur Umsetzung der klimapolitischen Ziele hat die Bundesregierung im Jahr 1976 (letzte Änderung 2013) das Energieeinsparungsgesetz, 2002 (letzte Neufassung 2007) die Energieeinsparverordnung sowie 2008 (letzte Änderung 2015) das Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz (EEWärmeG) verabschiedet. Zur Vereinfachung respektive Entbürokratisierung wurde 2019 der vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie in Zusammenarbeit mit dem vom Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat erarbeitete Gesetzentwurf für das Gebäudeenergiegesetz vom Bundeskabinett beschlossen, der die Inhalte der zuvor genannten Gesetze bündelt. [13, 14] Neben den erwähnten Gesetzen ist im Erneuerbaren-Energien-Gesetz im Jahr 2000 (letzte Änderung 2019) die Regelung zur Einspeisung von Strom aus regenerativen Quellen ins Stromnetz verankert [27]. Die Hauptinhalte aller aufgezählten Gesetze lassen sich dabei in folgende zwei übergeordnete Ziele bündeln:

 Erhöhung der Energieeffizienz von Gebäuden zur Reduktion des Energiebedarfs sowie Substituieren fossiler durch regenerative Energien

Eine Erhöhung der Energieeffizienz von Gebäuden setzt dabei die Minimierung der Transmissionswärmeverluste voraus, welche nur über eine wärmegedämmte, möglichst luftdichte und wärmebrückenfreie Gebäudehülle zu realisieren ist. Somit gilt nach den genannten Gesetzen für alle Neubauten ein Mindeststandard hinsichtlich der Energieeffizienz, welcher derzeit auf einen maximalen Verbrauch von 55 kWh Endenergie pro Quadratmeter und Jahr festgelegt ist. Es wird von politischer Seite weiterhin darauf hingearbeitet, dass alle Gebäude im privaten Sektor zukünftig standardmäßig als Nullenergiehäuser bzw. Niedrigenergiehäuser realisiert werden müssen, welche Energie-Verbrauchswerte von weniger als 15 kWh/m<sup>2</sup> und Jahr aufweisen. [27, 28]

Der Einfluss der politischen Rahmenbedingungen hinsichtlich der kontinuierlichen Steigerung der geforderten Gebäudedämmung in den vorausgegangenen Dekaden spiegelt sich im jährlich erforderlichen Heizwärmebedarf wider, deren zeitlicher Ablauf in Bild 3 dargestellt ist. Die hohe Bandbreite des Heizwärmebedarfs der jeweiligen Baujahresgruppe der in Bild 3 dargestellten Grafik ergibt sich neben dem Zustand der Dämmung der Gebäudehülle aus der Bauform des Hauses/Daches (Gebäudetyp: Einfamilienhaus, Mehrfamilienhaus), den jeweiligen klimatischen regionalen Bedingungen sowie dem Nutzerverhalten bzw. der Anzahl der Bewohner. Wie das Diagramm zeigt, ist ein kontinuierlicher jährlicher Rückgang der erforderlichen Heizleistung für Wohngebäude zu verzeichnen. [28–31]



Bild 3: Stetiger Rückgang des Heizwärmebedarfs aufgrund politisch vorgegebenen Dämmstandards der Gebäudehülle [28, 31]

Weiterhin existieren politische Vorgaben im Neubausegment zum Ausbau erneuerbarer Energien im Wärmebereich. Das EEWärmeG schreibt vor, dass in Abhängigkeit der eingesetzten Technologie ein festgelegter Anteil (bspw. Solarenergie 15 %, Biogas: 30 %, Biomasse 50 %) des Energieverbrauches im Haushalt durch erneuerbare Energien gedeckt werden muss. Somit werden bei Installation im Neubau von Solarthermie, Biomasse bzw. Geothermie monetäre Förderungen vergeben, um das politisch getriebene Ziel, den Anteil der erneuerbaren Energien am Endenergiebedarf zur Wärme- und Kältebereitstellung bis zum Jahr 2020 auf 14 % zu erhöhen, erreichen zu können. [27]

Das in Bild 4 dargestellte Diagramm zeigt den Anteil der erneuerbaren Energien am Endenergieverbrauch für Wärme und Kälte in den Jahren 1999 bis 2019 in Deutschland. Wie die Statistik illustriert, wurde das Ziel des EE-WärmeG seit 2012 bereits mehrere Jahre in Folge erreicht, während weiterhin ein kontinuierlicher Anstieg des Anteils erneuerbarer Energien am Endenergieverbrauch für Wärme und Kälte zu beobachten ist. [32] Zusätzlich ist in Bild 4 die Bruttostromerzeugung aus erneuerbaren Energien in Terawattstunden dargestellt, deren Verlauf eine ebenso steigende Tendenz des zur Verfügung stehenden Stromes aus erneuerbaren Energien erkennen lässt. Somit werden ca. 40 % (244 TWh) der gesamten deutschen Stromerzeugung aus erneuerbaren Energieträgern gewonnen (Stand 2019). [33]





------ Bruttostromerzeugung aus erneuerbaren Energien

Bild 4: Anteil erneuerbarer Energien am Endenergieverbrauch für die Wärmebereitstellung in Gegenüberstellung zur Bruttostromerzeugung aus erneuerbaren Energien, Stand 2019 [32, 33] Der fortwährend sinkende Heizwärmebedarf aufgrund neuer Dämmkonzepte der Gebäudehülle, die Substitution fossiler Energieträger zur häuslichen Wärmebereitstellung und die steigende Verfügbarkeit von erneuerbaren Energien führt langfristig zu einem Wandel in der Heizungstechnik. Somit erhalten mit regenerativen Energien betriebene Heizsysteme zur Schaffung einer thermischen Behaglichkeit in Wohnhäusern zukünftig eine Schlüsselrolle, welche nur bei sehr niedrigen Außentemperaturen für eine entsprechende Wärmezufuhr sorgen müssen. [34, 35]

### 2.1.3 Potenziale modular gefertigter Gebäude

Das Deutsche Institut für Wirtschaftsforschung (DIW) prognostiziert einen deutlichen Aufwärtstrend in der Bauwirtschaft, der u. a auf niedrige Wohnungsbaukredite, starken Zuzug in den Ballungsräumen sowie gestiegenem Einkommen privater Haushalte zurückzuführen ist. So müssten nach überschlägigen Berechnungen des DIW jedes Jahr ca. 350.000 bis 400.000 neue Wohnungen errichtet werden, um der Knappheit des Wohnungsmarktes entgegenzuwirken. Jedoch zeichnet sich durch die steigenden Auftragsbestände sowie der in Umfragen erhobenen Auslastungsgrade der an der Realisierung der einzelnen Gewerke beteiligten Unternehmen ab, dass die Bauwirtschaft bereits jetzt an ihre Produktionskapazitäten stößt. [8, 9] Eine nicht zu vernachlässigende Rolle spielt dabei der Fachkräftemangel in der Baubranche, wie die Ergebnisse einer Umfrage der Deutschen Industrie- und Handelskammer (DIHK, Berlin) im Frühjahr 2019 zeigen, wonach 81 % der Unternehmen im Baugewerbe dieses Defizit als Risiko für die eigene wirtschaftliche Entwicklung sehen. Dieser anhaltende Trend (im Jahr 2010 lag dieser Mangel an Facharbeitern im Baugewerbe bei lediglich 21 %) in Kombination mit den guten Wachstumsaussichten innerhalb der Baubranche zeigt den eindeutigen Bedarf einer Neuausrichtung zur effizienten und innovativen Errichtung von Gebäuden auf. [10]

Bereits im 18. Jahrhundert wurden aufgrund zunehmender Migrationsströme in die Großstädte und der daraus resultierenden schlagartigen Wohnungsnot neue Bauformen erforderlich. Im Zuge der industriellen Revolution und der neu zur Verfügung stehenden Materialien wie Stahl, Beton und Stahlbeton entstand daher das Bauen nach industriellen Maßstäben. Es bot eine vielversprechende Alternative zu bisherigen Baumethoden, um schnell und kostengünstig Wohnraum zur Verfügung zu stellen. So führte eine erhöhte Produktivität nach den Leitlinien der Industrieproduktion mit einer Serienfertigung gleicher Teile in einer hohen Stückzahl zu einer preisgünstigen Werksvorfertigung von Baukomponenten mit einer gleichbleibend hohen Qualität. [36]

Auch heute noch werden beim industriellen Bauen bzw. beim Fertigteilsowie Modulbauverfahren tragende und nicht-tragende Bauteile zunächst in einem Herstellwerk vorgefertigt und auf der Baustelle zu einem Gebäude montiert [37]. Somit geht der Fertigungsprozess weg von einer reinen Baustellenfertigung hin zu einem industriellen Produktionsprozess, wie er beispielsweise in der Automobilbranche bereits standardmäßig umgesetzt ist. Die einzelnen Gebäudesegmente werden auf einer Plattform innerhalb einer Fertigungslinie hergestellt, womit je nach Ausstattungswunsch durch Variation von einzelnen Parametern (Geometrie, Materialien etc.) individualisierte Häuser realisiert werden können.

Weiterhin vereinfacht sich aufgrund der geringeren Anzahl an Einzelkomponenten die Baustellenlogistik im Bereich der Beschaffung, Produktion und Entsorgung. [38, 39] Die Fertigbauweise weist damit viele Vorteile auf, wie beispielsweise

- vergleichsweise kürzeren Bauzeiten,
- einen geringeren Arbeitskräftebedarf,
- eine bessere Qualitätskontrolle während des Baufortschrittes,
- ein höheres Potenzial für Automatisierung,
- definierte Workflows,
- Reduzierung von Materialsuchzeiten,
- intelligente Steuerungssysteme,
- eine höhere Sicherheit für Arbeitskräfte und
- die Verringerung von Schlechtwetterstunden bzw. wetterbedingte Leistungsschwankungen,

wodurch letztendlich geringere Gesamtherstellkosten für Gebäude anfallen [38–41]. Nach [40] existieren hierbei vier unterschiedliche Stufen des Vorfertigungsgrads:

- 1. Komponentenfertigung und Vormontage von Bauteilen in einer Fabrik
- 2. Zweidimensionale Vorfertigung, welche keinen umbauten Raum beinhaltet
- 3. Dreidimensionale Vorfertigung, welche einen umbauten Raum, jedoch keine spezifische Raumnutzung beinhaltet
- 4. Dreidimensionale Vorfertigung kompletter Gebäude oder Teile davon, welche bereits eine definierte Raumnutzung (z. B. Küche) beinhaltet.
Der Marktanteil von genehmigten Ein- und Zweifamilienhäusern in Fertigbauweise lag um die Jahrtausendwende bei ca. 13,5 % und ist im Jahr 2019 bereits auf über 20 % angestiegen [42]. Diesen steigenden Trend spiegeln auch die Zahlen in Bild 5 wider, womit die Anzahl von Baufertigstellungen in Fertigbauweise im Jahr 2018 mit ca. 19.000 beziffert werden, womit dieser Wirtschaftszweig einen Gesamtumsatz von ca. 3,2 Milliarden Euro erwirtschaftet hat. [43, 44]



ZZZZ Anzahl der Baufertigstellungen von Wohngebäuden im Fertigteilbau —— Gesamtumsatz zur Errichtung von Fertigbauteilen in Deutschland

#### Bild 5: Steigender Trend der in Fertigbauweise errichtete Gebäude [43, 44]

Den Vorteilen vorfabrizierter und standardisierter Gebäude steht der Wunsch nach individualisiertem, den eigenen Bedürfnissen genügendem Wohnraum gegenüber. Dabei hat die Mass Customization [45] im Fertighausbau zum Schaffen personalisierten Wohnraums, der online konfiguriert bzw. virtuell begangen werden kann und industriell gefertigt wird, längst Einzug genommen [19, 46]. Durch hochautomatisierte Fertigungsanlagen können individuelle komplexe Segmente für unterschiedliche Gebäudeformen effizient hergestellt werden. So entstand in den letzten Jahren eine große Bandbreite verschiedener Hausmodelle mit individuellen Stilvarianten, welche das jeweilig persönliche Anspruchsniveau der Bauherrin bzw. des Bauherrn erfüllt. [19, 36]

Bild 6 veranschaulicht schematisch die allgemeinen Abläufe zur Herstellung eines industriell gefertigten Gebäudes. Die übergeordnete und zentral durchgeführte Werk-, Ausführungs- sowie Produktionsplanung erlaubt eine optimale Bewältigung der technischen, terminlichen sowie wirtschaftlichen Herausforderungen. Unterstützend wirkt dabei der zuverlässige und kontinuierliche Informationsfluss über alle Planungs- und Ausführungsphasen hinweg. Die Verrichtung der einzelnen Gewerke und Fertigungsprozesse kann somit bestmöglich abgestimmt werden, womit weiterhin eine optimierte Ressourcenplanung gewährleistet werden kann. [39] Die Digitalisierung umfasst dabei einen durchgehenden Informationsfluss von den eigentlichen Gebäudedaten, über die sich daraus ergebenden Fertigungsinformationsströme, welche wiederum mit den unternehmensinternen Daten des Enterprise Resource Planning (ERP)-Systemen verknüpft sind, bis hin zu den Informationen über den gesamten Lebenszyklus des Gebäudes hinaus. [38]



Bild 6: Prozesse zur industriellen Baufertigstellung (nach [39])

Die kürzeren Bauzeiten bei der Fertighausherstellung führen allgemein zu geringeren Kosten. Wie in Bild 6 dargestellt, erfolgt jedoch der Einbau vieler Gewerke wie z. B. das Finishing der Haustechnik, welche die Installation des Heizsystems beinhaltet und je nach Ausführung einen Anteil von 4 – 12 % der gesamten Baukosten darstellt, trotz des hohen Automatisierungsgrades bei der Fertighausherstellung derzeit noch weitgehend manuell nach der Montage der Gebäudehülle auf der Baustelle [18, 47]. Wie auch in [39] beschrieben, existieren deshalb noch hohe Entwicklungspotenziale im industrialisierten Hausbau hinsichtlich der Interoperationalisierung der ineinander greifenden Bauverfahren und der dabei verwendeten Geräte. Das Ziel sind optimal aufeinander abgestimmte, parallel ablaufende und ineinandergreifende Prozesse, um eine noch höhere Kosteneffizienz erreichen zu können. [39]

# 2.2 Gebäudetechnische Wärmebereitstellung

Effektive Heiztechnik ist für eine komfortable Nutzbarmachung von Gebäuden bzw. Räumen notwendig und muss somit alle Anforderungen zur Erzeugung eines behaglichen Gefühls für den Menschen erfüllen [48]. An Heizsysteme werden zur Schaffung einer thermischen und physiologischen Behaglichkeit eine Reihe an Anforderungen gestellt, welche nachfolgend mit derzeit vorwiegend am Markt verfügbaren Systemen sowie mit den zuvor genannten klimapolitischen Rahmenbedingungen gegenübergestellt werden. [6]

#### 2.2.1 Anforderungen an Heizsysteme

Die physiologischen Einflussgrößen auf die thermische Behaglichkeit eines Menschen in einem bautechnisch geschaffenen Raum bestehen aus der Raumlufttemperatur, Luftfeuchte, Luftbewegung sowie der Oberflächentemperatur der raumumschließenden Flächen. Die Verteilung der Raumlufttemperatur richtet sich nach der Art und der Platzierung des Heizsystems im Raum. Dabei soll die Raumtemperatur einen geringen Gradienten im vertikalen Verlauf aufweisen, was durch ein Temperaturdelta zwischen Fuß- und Kopfhöhe (0,10 m – 1,70 m) von weniger als 4 K beschrieben werden kann, um ein für den Menschen behagliches Gefühl zu erzeugen. Diese als theoretisch ideale Kurve angesehene Temperaturverteilung ist in Bild 7 unter dem Punkt 1 mit den Raumluft-Temperaturprofilen anderer Heizsysteme (Radiatoren an Innenwand (2), an Außenwand (3), Einzelöfen an Innenwand (4), Luftheizung (5), Decken-Strahlungsheizung (6), Fußbodenheizung (7), Wandheizung (8)) gegenübergestellt aufgetragen. [6, 7]



Bild 7: Beispiele für Raumluft-Temperaturprofile verschiedener Heizungssysteme (Theoretisch ideale Temperatur Verteilung (1), Radiatoren an Innenwand (2) an Außenwand (3), Einzelöfen an Innenwand (4), Luftheizung (5), Deckenstrahlungsheizung (6), Fußbodenheizung (7), Wandheizung (8)) (nach [6, 7])

Weiterhin sind für die Behaglichkeit gleichmäßige, nicht zu niedrige Oberflächentemperaturen der Raumumschließungsflächen von großer Bedeutung. Liegen somit die Oberflächentemperaturen unter 18 °C, bzw. 2-3 K unter der Raumlufttemperatur, können für den Menschen als unangenehm empfundene Luftbewegungen entstehen. Diese werden als "Zugluft" bezeichnet und können bei längerer Einwirkung darüber hinaus zu Gesundheitsschädigungen führen. Der direkte Zusammenhang zwischen Raumlufttemperatur und Temperatur der raumumschließenden Flächen in Bezug auf das Wohlbefinden kann anhand des Behaglichkeitsdiagrammes in Bild 8 abgelesen werden. [6, 49–51]



Bild 8: Behaglichkeitsfeld für Raumlufttemperatur und Raumbegrenzungsflächen [51]

In der Darstellung wird hervorgehoben, dass bei einer entsprechend hohen Temperatur der Raumumschließungsflächen von beispielsweise 20 °C eine Raumlufttemperatur von ebenso 20 °C ausreicht, um Behaglichkeit zu erzeugen. Somit können Wärmeverluste beim Lüften reduziert werden.

Neben den genannten Anforderungen existieren weiterhin technische und wirtschaftliche Ansprüche an ein Heizungssystem. Zu nennen ist hierbei das bedarfsgerechte Erreichen der gewünschten operativen Raumtemperatur innerhalb kurzer Zeit nach Aktivierung der Heizung. Zudem soll eine schadstoffarme Bereitstellung der Heizwärme durch ein umweltgerechtes Beheizen erfolgen. Eine im Raum verbaute Heizung soll keine Einschränkung hinsichtlich der Raumgestaltung und des Nutzungszweckes verursachen und dementsprechend gut im Raum integrierbar sein. Weiterhin darf keine Belästigung durch etwaige Geräusche oder Gerüche entstehen. Das System soll derart konstruiert bzw. integriert sein, dass Staubablagerungen vermieden werden, welche bei Umwälzung der Luft zu Unwohlsein führen können. Ebenso ist die Oberflächentemperatur des wärmeabgebenden Mediums nach DIN EN ISO 13732-1 (Ergonomie der thermischen Umgebung -

Bewertungsverfahren für menschliche Reaktionen bei Kontakt mit Oberflächen - Teil 1: Heiße Oberflächen [52]) so niedrig zu wählen, dass Verletzungen durch Verbrennung der Haut verhindert werden. Konkret darf die festgelegte Verbrennungsschwelle von 51 °C bei einer Kontaktdauer von bis zu einer Minute, bzw. 48°C bei einer Berührung von weniger als zehn Minuten bei unbeschichteten Metalloberflächen nicht überschritten werden. Sowohl in der Anschaffung als auch im Betrieb soll das System wirtschaftlich ausgelegt sein, was eine lange Lebensdauer sowie einfache Montage und Wartung der Anlage miteinschließt. [6, 49]

## 2.2.2 Eigenschaften ausgewählter Wärmeerzeugungsanlagen

Die offene Feuerstelle gilt als die erste humangeschichtliche Wärmequelle, aus der sich mittlerweile eine Vielzahl an hochkomplexen Raumwärmeerzeugungsmethoden entwickelt haben. Heizungssysteme werden nach der Art des Energieträgereinsatzes (Kohle, Erdöl, Gas, Holz, Uran etc.), dem Ort der Wärmeerzeugung (zentral oder dezentral) und der verwendeten Technik zur Energieumwandlung (Plattenheizkörper, Radiator, Flächenheizung etc.) differenziert. Nach einer vom Bundesverband des Schornsteinhandwerks durchgeführten Erhebung, deren Ergebnisse in Bild 9 grafisch dargestellt sind, dominiert derzeit (Stand 2018 [53]) noch die Wärmeerzeugung durch Verbrennung von fossilen Brennstoffen.





#### Zentrale Wärmeerzeugungssysteme

Bei den derzeit im Bestandsbau (nach [53]) dominierenden zentralen Heizungssystemen wird Wärme entfernt des benötigten Ortes erzeugt und über ein Medium mittels Verteilsystem an die erforderliche Stelle transportiert. Allen voran werden, wie aus der Grafik in Bild 9 hervorgeht, Ein-, Zwei- sowie Mehrfamilienhäuser überwiegend mit Gas-Heizwert- und Gas-Brennwert-Kesseln betrieben, während Öl-Heizungen (Heizwert/Brennwert) ebenso noch im Bestandsbau genutzt werden. Das bei der Verbrennung entstehende Abgas besteht zum Großteil aus Wasserdampf und wird bei der Heizwerttechnik mit ca. 120 °C in den Schornstein geleitet, während es bei der Brennwerttechnik durch Abkühlung in einem Wärmetauscher kondensiert und die so entstandene Kondensationsenthalpie des Wasserdampfs dem System wieder zugeführt wird, womit eine höhere Energieausbeute (ca. +11 % bei Gas [54] gegenüber Heizwerttechnik) erreicht werden kann. [27, 53]

Wie in Bild 9 ersichtlich, ist der Anteil an Wärmepumpen zur Wohnraumerwärmung im Bestandsbau mit ungefähr einer Million verbauter Geräte in einem nur untergeordneten Maße vertreten. Wie die Werte aus [55] jedoch zeigen, ist seit dem Jahr 2000 eine steigende Tendenz beim Einbau von Wärmepumpen als Heizsystem im Neubau zu beobachten. Während im Jahr 2000 der Anteil von installierten Wärmepumpen bei lediglich ca. 0,6 % lag, stieg dieser kontinuierlich bis zum Jahr 2018 auf ca. 41 % an. In Wohnhäusern kommt vorwiegend die Kompressionswärmepumpe zum Einsatz, bei der ein Arbeitsmittel (Kältemittel) einen Kreisprozess aus vier Zustandsänderungen durchläuft. Bei niedrigem Druck verdampft das kondensierte Kältemittel durch Zuführen von Wärme. Mittels elektrisch betriebenen Kompressors wird das dampfförmige Kältemittel verdichtet, woraufhin der Druck sowie die Temperatur ansteigen. Im Kondensator gibt das verdichtete Kältemittel die erzeugte Wärme an eine Wärmesenke, wie z. B. das rücklaufende Heizwasser aus dem Heizkreislauf, ab. Aufgrund der Wärmeabgabe kondensiert das unter hohem Druck befindliche Kältemittel. Im letzten Schritt wird der Druck des kondensierten Kältemittels über das Drosselventil abgesenkt, was ein Herabsetzen der Temperatur zur Folge hat. Als Wärmequellen können Außenluft, Grundwasser, Erdreich, Oberflächenwasser oder Abwärme eingesetzt werden, wobei die Luft-/Wasser-Wärmepumpe aufgrund der vergleichsweisen geringeren Anschaffungskosten und Platzbedarfs vorwiegend für die Wärmebereitstellung für Einfamilienhäuser eingesetzt wird. Zudem müssen im Vergleich zu mit Erdkollektoren bzw. Erdsonden und Grundwasser betriebenen Wärmepumpen keine Genehmigung für den Betrieb eingeholt werden. [56]

Ebenso werden in Bild 9 Biomasse-Kessel für die Wohnraumwärmeerzeugung aufgeführt. Hierbei handelt es sich einerseits um dezentrale Heizsysteme wie Kamine und Kaminofeneinsätze, Scheitholzöfen, Pelletöfen und andererseits um wassergeführte Zentralheizungskessel, welche mit Scheitholz, Pellets und Hackschnitzel betrieben werden. Eine Unterscheidung erfolgt hinsichtlich der beschickten Befeuerung, welche einerseits per Hand und andererseits automatisch erfolgen kann, sofern ein homogener, zerkleinerter Brennstoff wie Pellets oder Hackschnitzel vorliegen. [27]

Neben den in Bild 9 genannten, am häufigsten verbauten zentrale Wärmeerzeuger werden noch weitere Systeme zur Schaffung einer behaglichen Raumtemperatur in Wohngebäuden eingesetzt. Zu nennen sind hierbei Blockheizkraftwerke (BHKW), welche durch eine Kraft-Wärme-Kopplung gleichzeitig die Erzeugung von Strom und Wärme ermöglichen. Als Antrieb werden Hubkolbenverbrennungsmotoren, Gasturbinen, Stirling-Motoren, Dampfmotoren, Organic Ranking Cycle-Anlagen und Brennstoffzellen verwendet. Eine Unterteilung von Blockheizkraftwerken erfolgt nach ihrer elektrischen Leistungserzeugung. Sogenannte Nano-BHKW werden mit einem Leistungsbereich von 1 kW bis 2,5 kW bevorzugt für Ein-/Zweifamilienhäuser installiert, während Mikro-BHKW mit einer elektrischen Leistung zwischen 2,5 kW und 20 kW für Mehrfamilienhäuser, Gewerbeimmobilien und Verwaltungsgebäude eingesetzt werden. Größere Wohnimmobilien und Nahwärmenetze werden mit einer elektrischen Leistung von 20 kW – 50 kW mit Mini-BHKW und größere Gebäude und Nah- sowie Fernwärmenetze mit Klein-BHKW (>50 kW) versorgt. Für die Quartieroder Fernwärmeversorgung werden weiterhin Groß-BHKW gebaut, welche eine elektrische Leistung >2.000 kW aufweisen. Bei der Verbrennung werden bei kleineren Anlagen überwiegend hochwertige teure Energieträger, wie z. B. Erd-, Flüssig-, Biogas, Biomasse sowie Heizöl verwendet, während bei großen, zentralen Kraftwerken, welche primär zur Stromerzeugung verwendet werden, preisgünstigere Energien, wie Braun- und Steinkohle genutzt werden. [57, 58]

Unter Nah-/Fernwärme wird eine zentrale Wärmeversorgung von verschiedenen Gebäuden über Wärmenetze verstanden. Die Wärme stammt dabei aus Blockheizkraftwerken oder Heizkraftwerken, welche mit fossilen Brennstoffen, Biomasse oder Müll befeuert werden. Dabei wird Heizwasser in einem wärmegedämmten Zweileiternetz (Vor- und Rücklaufleitung) mit ca. 70 °C – 130 °C zu den Verbrauchern gepumpt und mittels einer Hausübergabestation an die entsprechenden Wohneinheiten übergeben. [59, 60]

#### Wärmeabgabesysteme

Die zentral erzeugte Wärme wird über ein Medium wie Wasser, Dampf bzw. Luft durch ein Rohrleitungssystem zu den angeschlossenen Wärmeverteilern transportiert und an die Umgebung mittels Wärmestrahlung und Konvektion abgegeben. Als Apparaturen zur Wärmeabgabe innerhalb eines Raumes haben sich verschiedene Systeme, wie beispielsweise Plattenheizkörper etabliert, welche aus einer oder mehreren mit Heizungswasser durchströmten Platten bestehen zwischen denen Konvektionsbleche angebracht sind, wie in Bild 10 links schematisch dargestellt. Weiterhin existieren Glieder bzw. Röhrenheizkörper (Radiatoren, Bild 10 Mitte), welche aus einzelnen, parallel nebeneinander verschraubten genormten Gliedern bzw. Stahlrohren aufgebaut sind und die Wärme überwiegend über Konvektion abgeben. Daneben werden häufig in Fußleisten vor großen Terrassentüren etc. sogenannte Konvektoren in Räumen installiert, welche aus wasserführenden Rohren mit Lamellen bestehen (Bild 10 rechts). Dabei heizt sich kalte Luft am Boden auf und steigt nach oben, womit sich eine stetige Luftzirkulation einstellt. In Bild 10 sind die jeweiligen Heizkörperarten mit ihren spezifischen Strahlungs- und Konvektionsanteilen schematisch illustriert. [6, 51, 61]



Bild 10: Strahlungs- und Konvektionsanteile verschiedener Heizkörper (nach [62])

Eine weitere Variante zur Raumerwärmung stellen integrierte Heizflächen dar, welche in die raumumfassenden Bauteile wie Fußboden, Wand und Decken integriert sind. Bei Wasserfußbodenheizungen sind wärmeabgebende Rohre (aus Kunststoff, Kupfer, Aluminium oder Edelstahl), welche von einem zentral erwärmten Medium durchflossen werden, im Fußboden eingebettet. Bei der Nassverlegung bzw. Trockenverlegung werden wärmeabgebenden Rohre vom Estrich umschlossen bzw. befinden sich in der Dämmschicht unter dem Estrich. [63] Je nach Einbauart befinden sich die Heizrohre zwischen vier und sieben Zentimetern unter dem Fußbodenbelag und geben die Wärme erst nach einer entsprechenden Aufheizdauer, welche von der gewählten Heizmedium-Temperatur und den Materialien für den Fußboden abhängig ist, an den Raum ab. [64, 65] Bei wassergeführten Wandheizungen werden gleichartig wie bei der Fußbodenheizung großflächig Rohre in die Wände eingebracht. Dies erfolgt dabei beispielsweise mit einem Befestigungssystem direkt auf der Wand oder kann mit auf Trockenbauplatten montierten wasserführenden Leitungen erfolgen, welche wiederum an der Wand installiert werden. Die Rohre werden rauminnenseitig von einer 2 cm bis 3 cm wärmeleitenden Putzschicht umgeben, während die Rückseite zur Vermeidung von Verlusten vor allem bei Außenwänden häufig mit einer Wärmedämmung versehen wird. Analog der Fußboden- und Wandheizung besteht die Deckenheizung aus einer langen Verrohrung, welche im Beton oder im Deckenputz verlegt wird. [66]

#### Dezentrale Einzelheizungen

Bei dezentralen Einzelheizungen erfolgt die Wärmeerzeugung und -übergabe innerhalb eines Gerätes direkt in dem zu beheizenden Raum. Dafür stehen unterschiedliche Geräte am Markt bereit, welche sich durch ihren jeweilig eingesetzten Energieträger, wie feste Brennstoffe (z. B. Kohle, Torf, Holz, sonstige Biomasse etc.), Öl, Gas oder Strom sowie der Art der Wärmeübergabe wie Konvektion und Strahlung, kategorisieren lassen. Bei der Erzeugung von Wärme durch Verbrennung müssen die verwendeten Geräte an einem Schornstein bzw. einer Abgasleitung angeschlossen werden. Als Einzelraum-Direkt-Heizgeräte werden Kamine, Öfen für Festbrennstoffe und Öl-/Gasheizöfen verwendet. Kachelöfen werden als Einzelraum-Speicherheizgeräte bezeichnet, da sie aufgrund der hohen Wärmespeicherkapazität der Kacheln die Wärme zeitlich verteilt abgeben. [49, 63, 67]

Weiterhin findet die Erwärmung von Räumen mit elektrischem Strom Anwendung. Dies erfolgt einerseits über Direktheizungen, welche Wärme unmittelbar abgeben und andererseits über Speicherheizungen, welche eine zeitlich verteilte Wärmeabgabe ermöglichen. Direktheizungen lassen sich wiederum in verschiedene Unterkategorien untereilen. Bei Radiatoren erwärmt ein elektrischer Heizstab ein Medium (z. B. Öl) und gibt Strahlungsund Konvektionswärme langsam an die Umgebung ab, während bei einem Konvektor Luft erwärmt wird, nach oben steigt und bei Abkühlung wieder zu Boden sinkt und somit eine stetige Luftzirkulation erzeugt. Als Heizlüfter werden Geräte bezeichnet, bei denen die Verteilung der elektrisch erzeugten Wärme im Raum zusätzlich mittels Ventilatoren erfolgt. [63]

Bei elektrischen Speicherheizungen wird zwischen Speicherheizgeräten und –flächen unterschieden. Bei Ersteren, welche auch als Nachtspeicherheizungen bezeichnet werden, werden Keramik-Formsteine mit dazwischenliegend eingebrachten Rohrheizkörpern auf ca. 600 °C bis 700 °C aufgeheizt. Für eine kontrollierte Wärmeabgabe sind die Steine mit einer Dämmschicht aus Mineralwolldämmplatten umgeben, welche wiederum in einem Stahlblechgehäuse eingesetzt sind. Zur Erhöhung der Wärmespeicherkapazität bieten ausgewählte Hersteller eine zusätzliche Kachel- bzw. Natursteinabdeckung an. Die Steuerung der Wärmeabgabe erfolgt durch einen raumthermostatisch geregelten Entladeventilator. Dieser führt die heiße Luft durch den Speicherkern in eine Mischkammer, in welcher die Vermischung mit Raumluft erfolgt und schließlich über ein Luftgitter aus dem Speicherheizgerät austritt. Die in den Heizungen integrierte Steuerung bewirkt eine vom Energieversorgungsunternehmen geregelte Aufladung des Speichers während der vorgesehenen Stromlieferzeiten (vornehmlich nachts) und in Abstimmung mit den Außentemperaturen. [63, 68, 69]

Die Speicherung von elektrischem Strom in Wärme ist weiterhin mit sogenannten Natursteinheizungen möglich. Das Speichermedium besteht beispielsweise aus Marmor, Dolomit, Kalksandstein oder Granit, in welchem ein elektrischer Heizleiter eingearbeitet ist. Die Aufheizzeit beträgt je nach Ausführung und Dicke (ca. 3 - 8 cm) der Platte ca. 30 Minuten, bis die Oberfläche ca. 85 °C und somit die Betriebstemperatur erreicht hat. Die Heizflächen werden der Raumgröße und dem Heizwärmebedarf angepasst und sind typischerweise ab einem halben bis zu mehreren Quadratmetern erhältlich. [63, 70]

Elektrische Speicherheizflächen werden entsprechend den wassergeführten Systemen im Fußboden respektive in der Wand oder Decke installiert. Dabei sind die Heizleitungen, analog zu den mit wärmeführendem Medium durchströmten Rohren, im Estrich integriert. Daneben dient eine ca. 6 cm - 14 cm dicke Estrichschicht als Wärmespeicher. Somit kann zu Tageszeiten bei einem Überangebot an elektrischen Strom die Energie gespeichert und kontinuierlich abgegeben werden. Weiterhin können die Heizleiter auch unmittelbar unter dem Bodenbelag verlegt werden, womit die Speicherkapazität sinkt und das System somit überwiegend als Direktheizung fungiert. [63, 68–70]

Darüber hinaus haben sich elektrische Heizmatten in der Praxis etabliert, welche u. a. aus einem Glasfasergewebe mit einem integrierten Heizdraht bestehen. Eine Installation kann entweder als Direktheizung unmittelbar unter dem Boden-/Wandbelag oder als Speicherheizung im Estrich erfolgen. Mehr Flexibilität dagegen bieten selbstklebende Heizmatten, welche auf dem Estrich angebracht sind. Die Heizleiter werden frei in Waben ohne Werkzeug positioniert, bevor der finale Bodenbelag aufgebracht wird. Ebenso werden in glasfaserverstärkter Aluminiumfolie integrierte Heizkabel für Anwendungen als Flächenheizung im Handel veräußert. Anwendung finden ebenso Heizfolien, welche je nach Ausführung mit Materialstärken von ca. 0,1 mm sehr dünn realisiert werden können und sich daher auch vor allem für einen nachträglichen Einbau als Fußbodenheizung sowie für den Einsatz als Wand- und Deckenheizung direkt unter dem Putz bzw. der Deckenverkleidung eignen. Einige Hersteller bieten dafür Carbonfasermatten mit zwei applizierten Kupferbändern an den Rändern, zur elektrischen Energieversorgung, am Markt an. Als Heiztapete wird eine Heizfolie mit aufgebrachter Tapete bezeichnet, welche sich durch eine besonders schnelle Wärmeeinbringung im Raum aufgrund des fehlenden Putzes von mehreren Zentimetern auszeichnet. Die Bahnbreiten der Folien variieren je nach Hersteller und Ausführung meist zwischen 50 cm bis 100 cm und können, im Gegensatz zu ihrer Länge, zum Erhalt der elektrischen Leitfähigkeit nicht beliebig konfektioniert werden, womit eine detaillierte Planung des Heizsystems im Vorfeld unerlässlich ist. [71–74]

#### 2.2.3 Vorteile elektrischer Wandflächenheizungen

Auf Basis der in 2.2.1 genannten Anforderungen an Wärmeerzeuger und den in 2.2.2 vorgestellten spezifischen Eigenschaften derzeit vorwiegend verbauter Heizanlagen erfolgt nachstehend eine analytische Bewertung der Systeme hinsichtlich ihrer Eignung für den in Kapitel 2.1.3 beschriebenen industriellen bzw. automatisierten Hausbau. Wie die Temperaturverläufe der unterschiedlichen Heizsysteme in Bild 7 zeigen, nähern sich Flächenheizsysteme aus physiologischer Sicht am nächsten der idealen Kurve des vertikalen Temperaturverlaufs. Flächenheizungssysteme bestechen weiterhin durch den Wegfall von Heizkörpern und der damit einhergehenden flexiblen Gestaltungsmöglichkeit im Raum, während das gleichmäßige Temperaturprofil für ein angenehmes Raumklima sorgt. Aufgrund der im Vergleich zum Heizkörper größeren wärmeabgebenden Fläche erhöht sich die Empfindungstemperatur, woraufhin die Raumlufttemperatur um zwei bis drei Kelvin niedriger gehalten werden kann und Energieverluste durch z. B. Lüften minimiert werden. [6, 51]

In Bild 11 wird der jeweiligen Konvektions- und Strahlungsanteil der gängigsten Wärmeübergabemethoden in einer schematische Darstellung aufgezeigt. In der Abbildung links dargestellt, ist der Heizkörper mit einem Konvektionsanteil von ca. 70 – 90 %. Die am Heizkörper erwärmte Luft ist deutlich höher temperiert als die Raumluft und die dadurch entstehende Konvektion führt zu permanenten Verwirbelungen von Staub, Hausstaubmilben und Bakterien. Bei der Fußbodenheizung (Bild 11, mittig) überwiegt der Strahlungsanteil mit ca. 60 – 70 %, jedoch sorgt die Konvektion auch hier für Raumluft-Verwirbelungen sowie unterschiedlich temperierte Luftschichten. Im Vergleich zum Heizkörper tritt dieser Effekt aufgrund der niedrigeren Oberflächentemperatur des Bodens, welche laut Empfehlung der ISO 7730 [75] bzw. DIN EN ISO 11855-1 [76] eine Temperatur zwischen 19 °C und 29 °C aufweisen soll, jedoch geringer aus. [6, 51]

Als weitere Ausführung von Flächenheizungen existieren daneben Deckenheizungen, welche ihre Anwendung dagegen vornehmlich in höheren Räumen mit lichten Höhen ab drei Meter finden, da die Wärmestrahlung von oben bei längerem Aufenthalt in niedrigeren Zimmern physiologisch als unangenehm empfunden wird. Der Strahlungsanteil bei Wandflächenheizungen (Bild 11, rechts) beträgt ca. 90 % und die Wärmestrahlung wird von den umgebenden Wänden absorbiert sowie reflektiert. Physiologisch gesehen gilt daher die Wandflächenheizung aufgrund der milden Wärmestrahlung und günstigen Temperaturverteilung als ideales Wärmeeinbringsystem. Aufgrund des niedrigen Konvektionswärmeanteils von ca. 10 % wird nahezu kein Staub aufgewirbelt, während die Luftfeuchtigkeit auf annähernd konstantem Niveau gehalten wird. [6, 51]



Bild 11: Strahlungs- und Konvektionsanteil ausgewählter Heizsysteme (nach [6])

Die Anforderung zum raschen Anstieg auf operative Temperatur im Bedarfsfall kann mit den derzeitig verbauten, meist wassergeführten Wandheizsystemen jedoch nur bedingt realisiert werden. Das Trägermedium benötigt aufgrund des Einbaus in der Wand bzw. unter der Putzschicht eine gewisse Vorlaufzeit, bis die Wärme an die Oberfläche durchdringt. Aus monetärer sowie aus nachhaltiger Sicht ist die Anschaffung und Installation einer aus Metall oder Kunststoff bestehenden flächigen Verrohung in der Wand mit einem signifikanten Aufwand verbunden. Weiterhin können im Falle einer Reparatur, wie z. B. Leckage, hohe Kosten und ein immenser Folgeschaden entstehen. Die Erwärmung des Trägermediums erfolgt zudem meist über eine Zentralheizung. Dadurch besteht ein zusätzlicher Platzbedarf für das Aggregat und ggf. für die Brennstofflagerung, während weiterhin ein Rohrleitungssystem zur Medienverteilung zwischen Heizwärmebereitsteller und den Heizflächen benötigt wird, welches mit Energieverlusten behaftet ist. Ebenso ist eine regelmäßige und intensive Wartung des Heizsystems inklusive Schornsteinreinigung gesetzlich vorgeschrieben. [49]

Ein auffallendes Merkmal zentraler Heizungssysteme ist die eingesetzte Brennstoffart zur Raumwärmeerzeugung. Hierfür werden vorwiegend primäre Energieträger, wie z. B. Kohle, Öl oder Gas verwendet, was aus einer Studie des Bundesumweltamtes aus dem Jahr 2016 hervorgeht [77]. Die Veröffentlichung zur Marktentwicklung der Wärmeerzeuger zeigt ferner, dass 70,4 % der Wärme durch Öl-/Gasbrennwerttechnik und 17,4 % durch Öl/Gas-Niedertemperaturtechnik erzeugt werden. Demzufolge werden 87,8 % der verbauten Heizsysteme mit fossilen Brennstoffen betrieben und entsprechen somit nicht den gegenwärtigen sowie zukünftigen klimapolitischen Zielstellungen der Bundesregierung, welche in Kapitel 2.1.2 dargestellt sind. Weiterhin sind in 8 % der Haushalte Wärmepumpen installiert und 4,2 % nutzen die Energie aus Biomasse. [78]

Eine vielversprechende Lösung offerieren ohne Trägermedium basierende Elektro-Flächenheizungen. Nach den in 2.1.2 aufgezeigten klimapolitischen Rahmenbedingungen stellt Heizen mit Strom mittlerweile eine adäquate Alternative zu bestehenden, mit fossilen Brennstoffen betriebenen Systemen dar. Elektrisch betriebene Flächenheizungen, welche in Form von Heizfolien im Raum installiert werden zeigten bereits in mehreren wissenschaftlichen Untersuchungen [79, 80] gute Eigenschaften hinsichtlich Behaglichkeit und Reaktionszeit. Jedoch sind Folien meist nur in vorkonfektionierten Größen erhältlich und können damit nicht spezifisch an die geometrischen Gegebenheiten des individuellen Fertighauses angepasst werden. Da es sich weiterhin bei Heizmatten bzw. dünnen Heizfolien um biegeschlaffe Bauteile handelt, ist die automatisierte Handhabung nur mit wirtschaftlich hohem Aufwand reproduzierbar und sollte laut [81] vermieden werden, womit sich dieses System für den industriellen Hausbau nur bedingt eignet. [61, 69, 82, 83]

# 2.3 Forschungsansatz zur Untersuchung plasmagenerierter Flächenheizungen

Die Deutsche Gesellschaft für Oberflächenbehandlung e.V. hat zur Identifizierung der vielversprechendsten Oberflächenfunktionen den Bedarf einer schaltbaren bzw. elektrisch leitenden Oberfläche als "Leuchtturm-Thema" identifiziert. Nach der Meinung von Experten (Befragung von 300 technischen Experten aus ca. 100 Unternehmen und 30 Instituten) werden lediglich 10 – 15 % des Potenzials an beschichtbaren Produkten ausgeschöpft. [84, 85] So bietet auch die elektrische Funktionalisierung von Bauwerkstoffen zur Realisierung von thermisch aktivierbaren Oberflächen viele Vorteile, wie die nachfolgenden Ausführungen darlegen.

## 2.3.1 Thermisch aktivierbare Oberflächen im Gebäude

Wie die vorangegangenen Ausführungen zeigen, besteht für die automatisierte Integration von Heizsystemen von industriell gefertigten Gebäuden ein ernstzunehmender Handlungsbedarf. Eine Lösung stellen elektrisch betriebene Wandflächenheizungen dar, welche mit regenerativ erzeugten Energien versorgt werden und dabei die vergleichsweise höchste thermische Behaglichkeit aufweisen. Ein hohes Potenzial zeigen elektrische Heizmatten bzw. -folien. Jedoch weisen diese eine Limitierung hinsichtlich der automatisierten Handhabung sowie der Gestaltungsflexibilität auf, um den individuellen architektonischen Gegebenheiten gerecht zu werden.

Ein vielversprechender Ansatz kann daher in thermisch aktivierbaren Baustoffen gesehen werden, welche durch eine direkte metallische Strukturierung der Oberfläche (ohne weitere Komponenten wie Folien, Matten etc.), als elektrische Wandflächenheizung fungieren. Somit wird die Installation eines zentralen Wärmeerzeugers sowie weiterer peripherer Bauteile wie Rohre, Heizkörper oder Schornstein obsolet, womit einerseits Ressourcen und andererseits Aufwendungen für die Montage eingespart werden können. Da sich die Wärmeschicht direkt unter einem Dekorationsüberzug (z. B. Tapete, Farbe...) befindet, welcher konventionell eine Dicke von weniger als einem Millimeter aufweist, bietet das System weiterhin den Vorteil einer schnellen Reaktionszeit und damit einem raschen Aufheizen der Wandoberfläche, wie in Kapitel 2.1.1 gefordert.

Zur Generierung einer Heizstruktur auf einer Oberfläche verspricht die kaltaktive Plasmabeschichtung (Cold Active Plasma Metallization, CAPM) ein hohes Potenzial, da sie innerhalb eines Prozessschrittes das Applizieren einer elektrisch leitenden Schicht auf einer Vielzahl von Werkstoffen erlaubt. Aufgrund der Inline-Prozessfähigkeit der CAPM-Technologie kann eine Integration in bestehende Fertigungslinien realisiert werden. Eine detaillierte Vorstellung des CAPM-Verfahrens erfolgt in Kapitel 2.3.2. In Bild 12 ist die systematische Vorgehensweise zur lösungsorientierten Findung eines zukünftigen Heizungssystems von der aktuellen Situation sowie den Problemstellungen, bis hin zur Umsetzung der Anforderungen dargestellt.

#### 2.3 Forschungsansatz zur Untersuchung plasmagenerierter Flächenheizungen



Bild 12: Vorgehensmodell zur Findung eines nachhaltigen Heizsystems für industriell gefertigte Gebäude

In Bild 13 sind auf die Oberfläche des Baustoffes integrierte elektrische Heizleiter schematisch dargestellt, welche anschaulich die Funktionsweise der elektrischen Wandflächenheizung illustrieren. Wie in der Abbildung skizziert, führen einzeln ansteuerbare Heizsegmente zu einer bedarfsgerechten Wärmeerzeugung, womit eine Reduktion des Energiebedarfs erzielt werden kann.



Bild 13: In den Bauwerkstoff integrierte Wandflächenheizung im Gebäude (Bild [S1])

#### 2.3.2 Strukturierte Metallisierung von Baustoffoberflächen

Zum Aufbau eines thermisch aktivierbaren Bauwerkstoffes bieten oberflächlich applizierte, elektrisch leitende Strukturen die physikalischen Voraussetzungen, um als elektrische Widerstandsheizung eigesetzt zu werden. Großes Potenzial für eine definierte Oberflächenmetallisierung bietet die kaltaktive Plasmabeschichtungstechnologie. Diese erlaubt eine kontakt- und lösemittelfreie strukturierte Metallisierung von dreidimensionalen Oberflächen innerhalb eines Prozessschrittes, ohne Vor- und Nachbehandlung. Dafür wird nano- bzw. mikroskaliges Metallpulver innerhalb eines inertem Gasstromes in eine Plasmaflamme gleitet, welches durch die hohe thermische Energie an- bzw. aufgeschmolzen wird und mittels kinetischer Energie des Plasmastrahls eine Beschleunigung erfährt. Dadurch werden die Partikel auf die Oberfläche geschleudert und gehen mit dem Substrat durch eine mechanische Verklammerung eine dauerhafte Verbindung ein. Bild 14 zeigt den schematischen Aufbau der Plasmadüse sowie des Beschichtungsvorgangs. [86, 87]



Bild 14: Schematische Darstellung des Plasmabeschichtungsprozesses (Eigendarstellung nach [88])

Wird einem Gas entsprechend Energie zugeführt, werden die Elektronen auf einen weiter außenliegenden und damit einem energiereicheren Orbit um den Atomkern angehoben, bis die Ionisation eintritt. Hierbei werden die Elektronen von ihrem Atomkern wegkatapultiert und fliegen frei im Gas umher, womit ein Gemisch aus negativ geladenen Elektronen und positiv geladenen Ionen entsteht, was als Plasma bezeichnet wird. [89] Bei einem kaltaktiven bzw. nichtthermischen Plasma unter Atmosphärendruck liegt ein thermodynamisches Nicht-Gleichgewicht zwischen den Elektronen einerseits und Neutralteilchen andererseits vor [90]. Somit verbleiben die neutralen Gasmoleküle bei Umgebungstemperatur, während die gesamte elektrische Energie auf die Elektronen übertragen wird, welche fünf Zehnerpotenzen unterhalb der Dichte der Neutralteilchen liegen [91]. Vereinen sich die freien Elektronen wieder mit den Gasionen oder fallen von einem höheren Orbit wieder in den Grundzustand zurück, tritt dies durch das typische Leuchten des Plasmas in Erscheinung [89]. Die zur künstlichen Plasmaerzeugung benötigte Energie wird durch das Zünden eines Lichtbogens über eine gepulste Hochfrequenzentladung zwischen Wolfram-Kathode und Kupfer-Anode bereitgestellt, durch welche das Prozessgas (z. B. Stickstoff, Wasserstoff, Argon, Helium) vorbeiströmt. [92, 93]

Zur Vermeidung von Oxidation erfolgt der Transport des zur Plasmabeschichtung verwendeten Metallpulvers von der Pulverkartusche über eine Schlauchverbindung mit Hilfe eines inerten Trägergasstromes zur Düse. Wie in Bild 15 schematisch dargestellt, wird das Pulver seitlich der Düse in den Plasmastrahl über den Pulverinjektor eingeführt. Durch die Überlagerung der Geschwindigkeiten des Metallpulver-Trägergasstromes mit dem Plasmastrahl ergeben sich in Abhängigkeit der Korngröße, Dichte und Form des Pulvers unterschiedliche Flugbahnen der Partikel. Aufgrund der Temperaturgradienten im Plasmastrahl erfahren die Pulver einen ungleichen Aufschmelzgrad. Sind die Pulverpartikel sehr klein, können sie mangels ausreichender kinetischer Energie nicht in die Plasmakernzone gelangen. Dagegen reicht die Zeit zum vollständigen Aufschmelzen der großen Partikel im Plasmastrahl bis zum Austritt aus der Düse nicht aus. [92]



Bild 15: Flugbahnen von Pulverpartikeln im Plasmastrahl (nach [92])

Wie in Bild 16 schematisch gezeigt, platzen die flüssig bis breiigen Spritzteilchen aufgrund ihrer hohen kinetischen Energie, sobald sie auf das Substrat auftreffen, auf und verfließen flach auf der Oberfläche. Dadurch kommt der lamellenartige Schichtaufbau zustande, deren schematischer Aufbau ebenso in Bild 16 illustriert ist. Es erfolgt die Umwandlung der kinetischen Energie der Spritzpartikel in Deformations- und Wärmeenergie. Aufgrund der Wärmeleitung am Grundsubstrat und der umgebenden Atmosphäre kühlen die Partikel nach dem Aufprall umgehend ab und erstarren, bevor ein neues Partikel auf die Oberfläche auftrifft.



Bild 16: Schematische Darstellung des Schichtaufbaus beim thermischen Spritzen [85]

Aufgrund der hohen Abkühlrate, welche als "Rapid Solidification Process" bezeichnet wird, entstehen bei der Abkühlung infolge des unterschiedlichen thermomechanischen Verhaltens Spannungen in den aufeinanderliegenden lamellenartigen Schichten. Diese werden durch die Bildung von Mikrorissen entlang der Partikelgrenzen senkrecht zur Oberfläche abgebaut. Von der sogenannten Aufbauporosität wird gesprochen, wenn innerhalb des Spritzprozesses nicht alle Partikel aufgeschmolzen werden und durch die Einlagerung dieser Partikel Lunker bzw. Hohlräume entstehen, welche durch die nachfolgenden Spritzpartikel nicht aufgefüllt werden können. [85, 92]

Die additive Plasmabeschichtung erlaubt je nach Parameter-Setup einen strukturierten metallischen Auftrag mit Breiten von wenigen Millimetern (minimal ohne Maskierung ca. 2 mm - 5 mm), bis hin zur vollflächigen Metallisierung des Substrates. Die Höhe der Strukturen kann dabei in einer Überfahrt auf bis zu 100 µm aufgebaut werden, bevor Delamination zu einem Ablösen der Metallschicht auf dem Substrat führt. Schon während der Flugphase kühlen die Partikel rapide ab, wodurch sie nach dem Auftreffen auf die Oberfläche schnell erstarren. Prozessparameterabhängig können somit nach [86] aufgrund der Relativbewegung zwischen Düse und Substrat und der dadurch nur zeitlich begrenzten, lokal auftretenden Wärmeeinwirkung metallische Strukturen auf temperatursensiblen Substraten, wie beispielsweise Kunststoffen gefertigt werden, welche typenabhängig eine Glasübergangstemperatur von nur ca. 100 °C [94] aufweisen. [85, 86, 92]

Die optischen, elektrischen, thermischen und mechanischen Eigenschaften sowie die Zuverlässigkeit der im Plasmabeschichtungsprozess gefertigten metallischen Strukturen auf einem Substrat sind von einer Vielzahl an Einflussfaktoren geprägt, welche in Bild 17 in einem Ursachen-Wirkungs-Diagramm nach der 5-M-Methode in Mensch, Maschine, Material, Methode und Mitwelt unterteilt, dargestellt werden. Die Plasmastrukturierung weist aufgrund der Möglichkeit zur robotergesteuerten Handhabung des Substrates bzw. der Düse einen hohen Grad an Automatisierung auf. Dennoch ist vom Bediener ein prozesstechnisches Grundverständnis und Sorgfalt nötig, um anlagenbedingte Unregelmäßigkeiten frühzeitig zu erkennen und deren Ursachen konform zu beheben.



Bild 17: Einflussfaktoren auf den Plasmabeschichtungsprozess nach der 5-M-Methode (in Anlehnung an [95])

Für eine reproduzierbare Beschichtungsqualität ist eine zuverlässige Anlagenverfügbarkeit unabdingbar. Aufgrund von Agglomeration in der Pulverdosiereinheit bzw. im Zuführschlauch können Unregelmäßigkeiten beim Schichtauftrag hervorgerufen werden, welche durch eine sachgerechte Lagerung des Pulvers unter inerter Atmosphäre sowie regelmäßigen Reinigungszyklen der entsprechenden Komponenten, wie Dosiereinheit und Schläuche, entgegengewirkt werden kann. Schwankungen bei der Prozessbzw. Trägergaszuführung verursachen einen diskontinuierlichen Plasmaauftrag und können durch den Einsatz spezifischer Gasdruck-Überwachungssysteme detektiert werden. Aufgrund der kontinuierlichen Emittierung von Elektroden treten Verschleißerscheinungen an der Kathode auf, welche zu einer Vergrößerung der Funkenstrecke zwischen den Elektroden führen und damit ein Flackern der Plasmaflamme verursachen kann. Zur Vermeidung dieses Phänomens ist ein festgeschriebenes Wartungsintervall zur Instandhaltung unabdingbar. Dabei muss ebenso der Austausch der Anoden erfolgen, da die durch die Düsenöffnung strömenden Metallpartikel zu einer lokalen Abrasion und damit unvorhersehbaren Weitung führen. Die Reproduzierbarkeit der Beschichtungsergebnisse ist weiterhin von der Aufnahme bzw. der Handhabung der Probe sowie der prozessseitigen Softwarereglung abhängig und bedarf gleichbleibender Wartung und Pflege. [85, 92, 96]

Die Materialauswahl bei der Plasmastrukturierung bezieht sich auf die Fügepartner Substrat und Beschichtungswerkstoff. Da bei dem in dieser Arbeit verwendetem Substrat, welches in Kapitel 3.1.2 vorgestellt wird, von keinem Aufschmelzen der Oberfläche auszugehen ist, wie es beispielsweise bei Kunststoffen der Fall ist, wird die dauerhafte Verbindung über eine mechanische Adhäsion bzw. Verklammerung hervorgerufen [92]. Die Intensität der Haftung ist von der Korngröße bzw. –form, dem Auftreffwinkel und der jeweiligen Schmelztemperatur der Metallpartikel sowie dem topografischen Zustand der Oberfläche des Substrates abhängig. Weist die Oberfläche, wie in Bild 18 dargestellt, dominierende Unebenheiten und Hinterschneidungen auf, können die breiigen Schmelzpartikel aufgrund der Kapillarwirkung und der hohen kinetischen Energie in die Oberfläche eindringen, wo sie sofort erstarren und sich formschlüssig verankern. [85, 92]



Bild 18: Mechanische Verklammerung als Haftungsphänomen bei der CAPM (nach [85])

Eine zusätzliche Verbesserung der mechanischen Haftung wird beim Abkühlen der Partikel durch die auftretende Schrumpfspannungen erreicht. Ebenso sind die Substrateigenschaften wie Temperatur- bzw. Wärmeformbeständigkeit, Härte/Elastizität sowie die elektrische Leitfähigkeit für die Einsatzmöglichkeiten und dadurch für die Dauerbeständigkeit des Materialverbundes, abhängig. [85, 92]

Zum Aufstellen eines Prozessmodelles erfolgt die Untersuchung des Einflusses der jeweiligen Fertigungsprozessparameter auf das Beschichtungsergebnis. Dabei werden die Steuergrößen Beschichtungsgeschwindigkeit, Abstand Düse-Substrat, sowie die Anzahl der übereinanderliegenden Bahnen auf Basis von eigenen [P1–P3] und Vorarbeiten aus [87, 97–100] festgelegt, während die Prozessgaszusammensetzung sowie deren Druck als vorgegebene Parameter definiert werden, wie in Kapitel 3.2 ausführlich dargestellt wird. Eine Oberflächenvorbehandlung bzw. -reinigung des Substrates mittels Plasmas erfolgt innerhalb des Beschichtungsvorgangs. Analytisch aufgestellte Berechnungsmodelle werden durch empirisch ermittelte Werte validiert, um eine realitätsnahe Vorbestimmung der Heizstrukturen-Erwärmung unter definierten klimatischen Umgebungsbedingungen voraussagen zu können.

Die Mitwelt beeinflusst die Qualität der Heizstrukturen während des Beschichtungsprozesses in Form der vorherrschenden Bedingungen wie das Klima, die Atmosphäre sowie die Sauberkeit in der Fertigungszelle. Während des Betriebs der elektrischen Flächenheizsegmente wird der Substrat-Metall-Verbund zyklisch thermischen und elektrischen Belastungen unter klimatisch wechselnden Einsatzbedingungen ausgesetzt. Nachgelagerte Prozesse, wie das Aufbringen von Dekorationswerkstoffe, können sich auf die Leistungsfähigkeit der Heizstruktur auswirken, deren Untersuchung ebenfalls Bestandteil der vorliegenden Arbeit ist.

## 2.3.3 Forschungshypothese und Ableitung der wissenschaftlichen Fragenstellungen auf Basis des Entwicklungstands

Die Plasmatechnologie findet bereits in annähernd allen relevanten Branchen wie der Automobilindustrie, der Medizintechnik, der Raum- und Luftfahrt sowie in vielen anderen bedeutsamen Bereichen weitreichend Anwendung. Dabei umfasst der Stand der Plasmatechnik viele Anwendungen zur Oberflächenaktivierung/-reinigung für weiterführende Prozesse wie z. B. das Kleben oder Umspritzen mit Kunststoffen [101, 102]. Weiterhin umfassen die aktuellen Einsatzgebiete der Plasmabeschichtungstechnologie vorwiegend die Schaffung von Verschleiß- (z. B. Motorenbau) und Korrosionsschutzschutzschichten (z. B. Off-Shore-Technik) sowie Schutzschichten für Hochtemperaturanwendungen (Turbinenbau) [92, 103–105]. Für diesen Zweck finden vorwiegend Plasmaspritzgeräte mit einer relativ hohen Leistung von ca. 80 kW [92] (im Vergleich: CAPM benötigt ca. 2 kW [87]) Anwendung, um bei Temperaturen weit über 1.000 °C hochschmelzende metallische (z. B. Titan) und keramische (z. B. Aluminiumoxid) Werkstoffe auf temperaturstabilen Substraten verarbeiten zu können [106].

Anhand von in [99, 100] durchgeführten Analysen konnten mit Unterstützung der statistischen Versuchsplanung die relevantesten Schlüsselparameter der Plasmabeschichtung wie beispielsweise Abstand Düse-Substrat, die Pulver-/Gasdurchflussmenge und die Plasmaleistung identifiziert werden. Somit stehen diese Untersuchungsergebnisse in Analogie zu Forschungsresultaten aus [87, 97, 98, 107-109], in welchen mit Hilfe des Plasmabeschichtungsprozesses Kupferpartikel auf dielektrischen und teilweise temperatursensiblen Substraten wie Kunststoff (z. B. Polyamid 612), Faserverbundwerkstoff, glasfaserverstärkten Kunststoffen, Keramik sowie Siliziumhalbleiter erfolgreich aufgebracht werden konnten. Dabei lag im Gegensatz zu der Fertigung bei Funktionsschutzschichten, bei denen hauptsächlich die mechanischen Eigenschaften (z. B. Haftung, Härte...) im Vordergrund stehen, der Fokus auf der elektrischen Leitfähigkeit. Mit der metallischen Strukturierung von dielektrischen, dreidimensionalen Schaltungsträgern können hochintegrierte mechatronische Bauteile (Mechatronic Integrated Devices, 3D-MID) generiert werden. Das Ziel der dreidimensionalen Verschmelzung von Mechanik und Elektronik liegt dabei in der Miniaturisierung, Gewichtsreduzierung und Funktionsintegration bei gleichzeitiger Verkürzung der Prozesskette sowie der Fertigungskosten. [86, 110] In [111, 112] konnte die Plasmabeschichtung von Polypropylen, Polyamid und Polyphenylensulfid erfolgreich nachgewiesen werden, was eine Erweiterung des Substratportfolios zur Herstellung von mechatronischen Schaltungsträgern mittels CAPM zur Folge hat. Dabei stellte sich heraus, dass eine Verringerung des Abstands zwischen Düse und Substrat eine Erhöhung des Flächenenergieeintrages bewirkt, wodurch ein partielles Anschmelzen der Polymeroberfläche zu einer signifikanten Verbesserung der Haftung der Kupferpartikel führt.

In [113] wurden die Ergebnisse zum oberflächlichen Aufbau einer elektrisch leitenden Verbindung mittels thermisch-kinetischem Auftragsverfahren zur erfolgreiche Erwärmung von Fahrzeugbauteilen am Beispiel einer Mittelarmlehne vorgestellt. Damit konnten bereits erste positive Erfolge hinsichtlich thermisch aktivierbarer Oberflächen verzeichnet werden. Weiterhin fand die additive Beschichtungstechnologie im Bereich der Leistungselektronik bei der Metallisierung von Aluminiumoxid und anschließender Kontaktierung durch Bonden [107, 108, 95] erfolgreich Anwendung. In [114] konnte die Langzeitzuverlässigkeit von Kupferstrukturierungen hinsichtlich ihrer elektrischen und mechanischen Eigenschaften anhand von Umweltsimulationstests (Temperatur-Schock, Wärme-Feuchte) nachgewiesen werden.

Die dargestellten Forschungsergebnisse postulieren die Funktionalität sowie das weitreichende Potenzial der additiven Plasmabeschichtungstechnologie zum Auftrag einer Metallstruktur auf einer Vielzahl von Substraten und somit zur Herstellung von Wandflächenheizsegmenten. Ebenso bietet die Möglichkeit zur Integration der Fertigungstechnologie in bestehende Prozessketten ein großes Anwendungspotenzial zum Einsatz im industriellen Hausbau. Jedoch fehlen grundlegend Kenntnisse über die Machbarkeit und die Funktionalität von mittels CAPM erzeugter Heizstrukturen auf baustofftypischen Materialien sowie Aussagen über die thermische Behaglichkeit des Flächenheizsystems. Ebenso ist das Langzeitverhalten der plasmabasierten Metallisierung unter realen, im häuslichen Umfeld üblichen, Umgebungsbedingungen unbekannt. Weiterhin existieren bisher keine Analysen hinsichtlich der Möglichkeit zur Integration des Prozesses in Produktionslinien beim industriellen Hausbau sowie Berechnungen über die Wirtschaftlichkeit der Flächenheizung sowohl bei der Fertigung als auch im Betrieb, womit folgende Forschungsthese formuliert wird:

**Forschungsfrage:** Ist die Realisierung eines thermisch aktivierbaren Wandelementes mit Hilfe der Plasmabeschichtungstechnologie technisch möglich und wirtschaftlich sinnvoll?

Zur Verifizierung der aufgezeigten Forschungshypothese ist das Ziel der vorliegenden Arbeit die Beantwortung der folgende Leitfragen:

- 1. Ist die technische Funktionalität von im CAPM-Prozess hergestellter Heizstrukturen auf Bauwerkstoffen dauerhaft unter realen Umgebungsbedingungen gewährt?
- 2. Kann eine ausreichende thermische Behaglichkeit mittels CAPM hergestellter Flächenheizsegmente erreicht werden?
- 3. Ist eine Integration der CAPM-Technologie in den industriellen Fertigungsprozess von Gebäudesegmenten möglich?
- 4. Stellen die additiv applizierten Heizstrukturen eine wirtschaftliche Alternative zu bestehenden Heizsystemen dar?

# 3 Konzeptentwicklung plasmastrukturierter Flächenheizsysteme

Das Forschungsziel beinhaltet die erfolgreiche Generierung von Wandflächenheizungen auf in der Fertigbauweise typischerweise eingesetzten Werkstoffen unter Verwendung der additiven kaltaktiven Plasmabeschichtungstechnologie. Dafür ist es notwendig Sachkenntnisse über den konstruktiven Aufbau der Wandsegmente respektive der verwendeten Materialen aufzuzeigen, um ein geeignetes Substrat als Träger der Heizstrukturen identifizieren zu können. Für die elektrische Funktionalisierung der Oberfläche gilt es ein geeignetes Parametersetup für die Plasmabeschichtung anhand von experimentellen Versuchen zu ermitteln, um die technische Funktionalität des Heizsystems nachweisen zu können. Dies beinhaltet einerseits das Schaffen einer dauerhaften Verbindung zwischen Substrat und Heizstruktur und andererseits das Erreichen einer durchgängigen elektrischen Leitfähigkeit des metallischen Auftrags. In Untersuchen wird die Langzeitzuverlässigkeit der thermisch funktionalisierten Bauwerkstoffe unter realen Umgebungsbedingungen analysiert, welche eine abschließende Bewertung des praktischen Einsatzpotenziales des Wandflächenheizsystems erlaubt.

# 3.1 Materialauswahl für thermisch aktivierbare Oberflächen im industriellen Hausbau

Die Materialpaarung bei der Plasmabeschichtung besteht, wie in Bild 17 im Gliederungspunkt "Material" dargestellt, sowohl aus dem Substrat, welches den Schaltungsträger der Flächenheizung darstellt, als auch aus dem Beschichtungswerkstoff, aus welchem die Heizstrukturen gefertigt werden. Anhand der Bestimmung der materialtypischen Eigenschaften des Bauwerkstoffes können einerseits die Einsatzgrenzen wie beispielweise die maximal zulässige Oberflächentemperatur des Heizsegmentes festgelegt werden und andererseits können Rückschlüsse über die Verbindungsqualität zwischen Substrat und der metallischen Beschichtung gezogen werden. Ebenso wird das für die Versuchsdurchführung verwendete metallische Pulver für die CAPM eingehend betrachtet sowie hinsichtlich der spezifischen Eigenschaften untersucht, um Rückschlüsse auf die Prozessbeeinflussung bzw. das Beschichtungsergebnis ziehen zu können.

#### 3.1.1 Konstruktiver Aufbau industriell gefertigter Wände

Wie die Grafik in Bild 19 illustriert, werden industriell gefertigte Häuser aus unterschiedlichen Materialien wie Stahl, Stahlbeton, Ziegel, Kalksandstein und Porenbeton gefertigt, wobei der Werkstoff Holz eine zunehmend wichtige Stellung einnimmt. Der Grund hierfür liegt in einer hohen Verfügbar- bzw. Bearbeitbarkeit des nachwachsenden Rohstoffes, der Fähigkeit Druck- und Zugbeanspruchungen aufzunehmen sowie dem guten Verhältnis von Gewicht zu Festigkeit. [36, 115]



Bild 19: Anzahl der Baugenehmigungen zur Errichtung neuer Wohngebäude im Fertigteilbau nach überwiegend verwendetem Werkstoff [115]

Industriell gefertigte Holz-Fertighäuser werden überwiegend in der Tafelbauweise im Werk produziert und anschließend sukzessive auf der Baustelle zusammengesetzt. Bei der Tafelbauweise handelt es sich um großformatige Holztafeln, welche transportbedingt eine Länge von zehn Metern nicht überschreiten sollen. Aufgrund dieser großen Dimension der Segmente kann die Anzahl an Bauteile für die Gebäudeerrichtung reduziert werden und fugenbedingte Schwachstellen im Hinblick auf Windschutz und Luftdichtheit vermieden werden. Holztafelwände bestehen aus einem hölzernen Gerippe, welches auch als Riegelwerk bezeichnet wird, das sowohl die Axialkräfte (Druck, Zug) als auch die Biegemomente entlang der Achsen aufnehmen kann sowie einer flächigen Beplankung, welche vorwiegend den Scheibenschubkräften in der Elementebene entgegenwirkt. Die Wärmedämmung wird in die gleiche Ebene der Tragelemente, den Rippenzwischenräumen eingebracht, womit hohe Dämmwerte bei verhältnismäßig geringen Wanddicken realisiert werden können. [16] In Bild 20 ist der Aufbau einer nach "KfW-Effizienzhausstandard 55" (Niedrigenergiehaus) ausgelegten Innen- bzw. Außenwand, deren Breiten ca. 0,15 m bzw. ca. 0,4 m betragen, in der Holz-Fertigbauweise schematisch dargestellt. Dabei variiert der exakte Aufbau der Wände je nach Hersteller, wobei alle prinzipiell aus einem Riegelwerk bestehen, deren Zwischenräume zur Wärmedämmung mit Mineralwolle ausgekleidet sind. Bei den Innenwänden erfolgt die Beplankung mit Grobspanplatten (engl. oriented strand board, OSB-Platte) auf beiden Seiten, jeweilig gefolgt von einer Gipskartonplatte. Bei der nach außen zugewandten Seite wird zur besseren Wärmedämmung des Gebäudes eine Holzfaserdämmplatte als Beplankung eingesetzt, welche als Basis für das Außenputzsystem fungiert. Bei den Innenwänden wird der mit Mineralwolle versehene Zwischenraum für die Verlegung der Infrastruktur (z. B. Strom-, Wasserleitungen) genutzt, während bei den Außenwänden zum Erhalt des vollen Wärmedämmschutzes eine weitere aus Riegelwerk und Dämmschutz aufgebrachte Wand mit kleineren Abmaßen (ca. 0,15 m) als Installationsebene genutzt wird. Auf diese Wand wiederum wird die Beplankung aus OSB-Platten zur Rauminnenseite aufgebracht, welche mit Gipskartonplatten verkleidet sind. Zu dekorativen Zwecken werden die Gipskartonplatten konventionell mit Farbe oder Tapete abgedeckt. Wie der schematische Aufbau der Wände in Bild 20 postuliert, bestehen die in den Raum gerichteten Seiten aus Gipskarton, welcher sich somit als Substrat für die Wandflächenheizung anbietet. [116, 117]



Bild 20: Typischer Aufbau von Innen- und Außenwänden aus Holz errichteter Fertighäuser [116, 117]

## 3.1.2 Gipskarton als Substrat für Wandflächenheizung

Gipskartonplatten sind nach DIN EN 520 [118] genormt und bestehen im Wesentlichen aus einem mit Karton ummantelten Gips-Kern, wie in Bild 21 dargestellt. Hauptbestandteile sind gebrannter Gips, Wasser und verschiedene Zuschlagstoffe, die zur Beeinflussung der Festigkeit, Härte sowie des Porenanteils beigemischt werden. Der Plattenwerkstoff weist im Standardformat eine Länge von 2.000 mm sowie eine Breite von 1.125 mm auf und ist in Dicken ab 9,5 mm bis 18 mm erhältlich. Ebenso besitzt das Material allgemein sehr gute bauphysikalische Eigenschaften hinsichtlich des Schall-, Brand-, Feuchte- und Wärmeschutzes, die je nach Umgebungs-, bzw. Einbauanforderungen unterschiedlich stark ausgeprägt sein können. So haben sich verschiedene Arten von Gipskartonplatten am Markt etabliert, welche sich äußerlich durch die Farbe der Kartonummantelung, wie z. B. Gipskarton-Putzträgerplatten (grau), imprägnierte Bauplatten (grün), Feuerschutzplatten (rot), unterscheiden lassen. Für Feuchträume (häusliche Bäder) beispielsweise werden somit häufig imprägnierten Gipskartonplatten eingesetzt, um durch eine reduzierte Wasseraufnahme ein Quellen und Schwinden bei Änderung der klimatischen Bedingungen zu minimieren. Weiterhin lässt sich der Bauwerkstoff verhältnismäßig einfach z. B. durch Zuschneiden sowie Bohren mechanisch verarbeiten. Der Bauwerkstoff wird vornehmlich für den Innenausbau verwendet, da er nahezu in allen Bereichen ohne besondere Anforderungen eingesetzt und durch bspw. Beschichten weiterverarbeitet werden kann. Gipskartonplatten zeichnen sich durch eine Dauertemperaturbelastung von 50 °C aus, welche auch kurzzeitig auf 60 °C erhöht werden darf. [119–122]



Bild 21: Gipskarton als Trockenbauwerkstoff für den Innenausbau ([119])

In Folge der Porosität und der damit einhergehenden schnellen Aufnahme und Abgabe von Wasserdampf sorgt die Gipskartonplatte für eine natürliche Feuchtigkeitsregulierung im Raum. Aufgrund eines niedrigen Wärmeeindringkoeffizienten, welcher als ein Maß für die Fähigkeit eines Materials, Wärme in kurzer Zeit abzugeben, gilt, weisen Gipskartonplatten mit 850  $\frac{J}{m^2 \cdot K \cdot s^{0,5}}$  eine höhere thermische Behaglichkeit bei gleicher Oberflächentemperatur auf, als beispielsweise eine Betonwand mit 2240  $\frac{J}{m^2 \cdot K \cdot s^{0,5}}$  [123, 124].

Wie in Bild 18 dargestellt, ist die mechanische Verklammerung der Hauptmechanismus der Adhäsion zwischen Grundsubstrat und Plasmabeschichtung, weshalb der Oberflächenbeschaffenheit des Gipskartons eine hohe Bedeutung zukommt. Aus diesem Grund werden für zwei Gipskartonarten, welche nach DIN EN 520 [118] mit "Typ A"(graue Kartonummantelung) sowie mit "Typ H2" (grüne Kartonummantelung) bezeichnet werden, Rauheitsmessungen mit einer mikroskopischen Analyse mittels eines berührungslosen optischen Konfokal-Mikroskops (VK9700 Fa. Keyence) nach DIN EN ISO 4287 [125] durchgeführt [126].

Die mittels Mikroskops aufgenommenen Oberflächenprofile der jeweils 12,5 mm dicken Gipskartonproben sind in Bild 22 dargestellt. Die optische Abtastung der jeweils 15 gemessenen Probenoberflächen ergeben für den Gipskarton "Typ A" (grau) einen durchschnittlichen Rz-Wert von 46,8 µm (Standardabweichung 6,8 µm), während die Analyse der Gipskartonoberfläche des "Typs H2" (grün) einen durchschnittlichen Rz-Wert von 40,6 µm (Standardabweichung von 8,4 µm) ergibt. Die Differenzen zwischen den Mittelwerten sind nach statistischer Auswertung mit einem p-Wert von 0,47 (>  $\alpha$  = 0,05) nicht signifikant, womit auf eine differenzierte Betrachtung hinsichtlich der Gipskarton-Art im Nachfolgenden nicht näher eingegangen wird. In Bild 22 sind die Papierfasern der Karton-Ummantelung dargestellt. Die ausgeprägte Oberflächenstruktur bietet eine theoretisch gute Voraussetzung für eine mechanische Verklammerung zwischen Gipskarton und Metallstruktur, dessen Validierung Inhalt dieser Arbeit darstellt.



Bild 22: Oberflächenstruktur ausgewählter Gipskartonplatten (Bilder aus [S2])

## 3.1.3 Kupfer als Beschichtungswerkstoff

Für die Fertigung von elektrischen Heizstrukturen bietet sich der Werkstoff Kupfer an, da dieser mit einer Wärmeleitfähigkeit von ca. 402  $\frac{W}{mK}$  nur noch von Silber übertroffen wird, welches einen Wert von 422  $\frac{W}{mK}$  aufweist [127]. Bei Betrachtung der normierten Kosten nach [128] ist Silber um ca. 90 Mal teurer in der Anschaffung und scheidet deshalb für die weiteren Betrachtungen aus. Bulk-Kupfer weist eine Schmelztemperatur von 1.083 °C [129] und eine elektrische Leitfähigkeit von 58 · 10<sup>6</sup>  $\frac{s}{m}$  auf [130].

Für die Versuchsdurchführung in Kapitel 3.3 wird auf das für die CAPM-Anlage zugelassen Pulver "plasma tronic<sup>®</sup>" der Firma relyon plasma GmbH zurückgegriffen. Aufgrund fehlender Daten seitens des Herstellers wird eine Laser-Beugungs-Spektroskopie (mit einer Auflösung von 0,1  $\mu$ m) durchgeführt, um die Partikelgrößenverteilung bestimmen zu können, dessen Ergebnisse anhand der Kurvenverläufe in Bild 23 illustriert sind. Die dimensionslose Summenverteilung entspricht dabei dem Anteil der Partikel mit dem jeweilig identischen Durchmesser. Die Dichteverteilung spiegelt dagegen den Mengenanteil der Partikel mit gleichem Durchmesser an der Gesamtmenge aller Partikel wider und entspricht somit der Ableitung der Summenverteilung. Die Messergebnisse zeigen, dass 10 % aller Partikel einen kleineren Durchmesser als ca. 2,5  $\mu$ m (d10) aufweisen, während d50 bei ca. 4,3  $\mu$ m sowie d90 bei ca. 7,6  $\mu$ m liegt.



Bild 23: Partikelgrößenverteilung des Kupferpulvers "plasma tronic<sup>®</sup>" der Firma relyon plasma GmbH

Zur Evaluierung der Aussagekraft der Messungen zur Partikelgrößenverteilung des Kupferpulvers "plasma tronic<sup>®</sup>" werden Aufnahmen mit dem Rasterelektronenmikroskop (REM) angefertigt. Wie in Bild 24 veranschaulicht, handelt es sich um Pulver mit spratziger Gestalt, was auf eine Herstellung durch Druckluft-/Wasserverdüsung schließen lässt [131]. Wie die Grafik zeigt, ist das Längen-/Breitenverhältnis der Partikel ungleich, weshalb die Ergebnisse der Messung zur Partikelgrößenverteilung nur als Anhaltspunkt angesehen werden können. Durch die im Vergleich zur sphärischen Form größere Oberfläche der spratzigen Partikel kann eine höhere Energiemenge durch die von der Plasmaflamme erzeugte Wärme auf das Kupferpulver übertragen werden, womit das Aufschmelzverhalten begünstigt wird. Nachteile können in der Förderung des Pulvers zum Plasmabrenner entstehen, da die ungleichmäßige Form der Partikel zu einem Verhaken bzw. einer Agglomeration führen können und damit die Reproduzierbarkeit des Schichtauftrages beeinflusst werden kann.



Bild 24: REM-Aufnahmen zeigen die spratzige Gestalt des "plasma tronic<sup>®</sup>"-Kupferpulvers (REM-Aufnahmen [132])

# 3.2 Oberflächenfunktionalisierung mit CAPM

Die Plasmabeschichtungstechnologie besteht aus einer Vielzahl von Komponenten, wie im Ursachen-Wirkungs-Diagramm in Bild 17 unter dem Begriff "Maschine" dargelegt ist, die für eine erfolgreiche metallische Strukturierung verantwortlich sind. Zur Interpretation der Beschichtungsergebnisse ist es deshalb von hoher Bedeutung genaue Kenntnis über die Funktionsweise der einzelnen Systembausteine zu haben. Eine Qualifizierung der für die Beschichtung bedeutendsten Anlagenbestandteile geben darüber hinaus Auskunft über die Zuverlässigkeit respektive Reproduzierbarkeit der CAPM-Anlagentechnik. Ebenso sind in Bild 17 unter "Methode" die einflussreichsten Parameter auf den Plasmabeschichtungsprozess dargestellt, deren detaillierte Untersuchung gleichermaßen Bestandteil der nachfolgenden Ausführungen sind.

## 3.2.1 Anlagenaufbau und Versuchssetup

Die Konzeption und der Aufbau der im Rahmen dieser Arbeit verwendeten CAPM-Anlage erfolgte im Rahmen der Dissertation mit dem Titel "Strukturierte additive Metallisierung durch kaltaktives Atmosphärendruckplasma" [87]. In Bild 25 sind die vier Hauptbestandteile zur Durchführung einer Plasmabeschichtung und deren Zusammenwirken schematisch dargestellt.



Bild 25: Schematische Darstellung der Komponenten des Plasmabeschichtungsprozesses

Dabei besteht die in Bild 25 skizzierte Konstruktion aus den folgenden Einzelkomponenten, deren Nummerierung sich in der Illustration wiederfindet:

1. Gasversorgungssystem mit Kontrolleinheit: Leitungen führen das Gas kontrolliert zur Plasmadüse sowie zur Pulver-Gas-Mischstation

- 2. Prozessraum/Handhabungsstation:
  - Manipulationseinheit führt das Substrat unter der Plasmadüse
  - Fest installierte Plasmadüse
  - Absaugvorrichtung transportiert Pulver-Overspray ab
- 3. Plasma-Steuereinheit:
  - Bedienpanel zur Softwareregelung
  - Pulverkartusche und Pulverförderer
  - Gepulste Hochspannungsversorgung (mit elektrischen Verbindungsleitungen) ermöglicht die Hochfrequenzzündung zwischen Kathode und Anode zur kaltaktiven Plasmaerzeugung in der Plasmadüse
- 4. Misch-Station: Pulver wird mittels inerten Gasstroms der Plasmadüse zugeführt

In der Plasma-Steuereinheit ist die gepulste Hochspannungsversorgung "PS2000" für den Plasmaerzeuger "PB3" (Bestandteil der Plasmadüse) der Firma relyon plasma GmbH (ehemals Reinhausen Plasma) untergebracht, welche für die Zündung des Lichtbogens sorgt. In der Spannungsquelle erfolgt die Umwandlung der Netzspannung von 230 V, 50 Hz auf bis zu 20 kV in einem Frequenzbereich zwischen 40 und 65 kHz, bei einer maximalen Leistung von 2 kW. [87, 133] Weiterhin ist die Pulverkartusche Bestandteil der Zelle, von welcher mittels Vibrationsschwingungen die Zuführung des Pulvers in die Pulver-Gas-Mischstation erfolgt. Von dieser wiederrum wird das Pulver durch einen inerten Trägergasstrom zur Plasmadüse transportiert. Mit Hilfe der Steuerungseinheit lassen sich die Parametereinstellungen

- Plasmaleistung,
- Volumenstrom des Prozess- bzw. Trägergases und
- geförderte Pulvermenge

definieren. [87] In der Handhabungsstation des Typs "Robox 3.3" (Fa. Baumann Automation, Volumen ca. 3,5 m<sup>3</sup>), findet der eigentliche Beschichtungsprozess statt. Von der Prozesseinheit gelangen die Medien Gas, gepulster Strom sowie der mit Pulverpartikeln versetzte Trägergasstrom zur fixierten Plasmadüse, unter welcher das Werkstück während des Beschichtungsvorgangs mittels Handhabungsgerät geführt wird. Um eine dreidimensionale Beschichtung der Werkstücke zu ermöglichen, dient als Handhabungsgerät ein 6-Achs-Gelenkarmroboter der Firma KUKA ("KUKA KR 5 sixx R850"), welcher mit der Bahnplanungssoftware FAMOS robotics<sup>®</sup> geregelt werden kann. Es können laut Herstellerangaben Massen von bis zu 5 kg bei einer Wiederholgenauigkeit von ±0,03 mm manipuliert werden [134]. Für die Erzielung höherer Präzision bei der Beschichtung können auf die Ergebnisse der Dissertation zur Genauigkeitssteigerung von Robotersystemen zurückgegriffen werden [135]. Weiterhin ist im Bild die Kupferanode zu sehen, an welcher zwei Zuführschläuche befestigt sind, in denen das Trägergas-Pulver-Gemisch in die Aufschmelzzone der Plasmadüse gelangt.

Eine weitere Komponente des in Bild 25 dargestellten Systems ist die nach [92] vorgeschriebene Absaugvorrichtung, welche die Umwelt vor Verunreinigungen bzw. Gefährdungen durch Gas- und Metallstaubaustritt schützt. Dafür wird ein Nassabscheider (Fa. Camfil) eingesetzt, der die im Gasstrom vorhandenen Feststoffpartikel, welche sich in der Größenordnung im µm-Bereich befinden, in der Flüssigkeit (Wasser) bindet. Das System hat eine Absaugleistung von 1.800 m<sup>3</sup>/h und sorgt somit für einen ausreichenden Luftwechsel in der Prozesszelle während des Beschichtungsvorgangs. Durch die Verwendung eines Nassabscheiders können verschiedenartig reaktionsfreudige Pulver-Arten verarbeitet werden, während das Brandrisiko auf ein Minimum reduziert wird [136].

Zur Erzielung einer hohen Reproduzierbarkeit erfolgt die Handhabung der Proben mit einer entsprechenden Vorrichtung, welche wie in Bild 26 links dargestellt, auf dem Roboterarm fixiert ist. In Bild 26 rechts ist das Versuchssetup zur Durchführung der Beschichtung dargestellt. Der Roboter führt eine 150 x 150 mm<sup>2</sup> große Gipskartonprobe unter der fest installierten aktivierten Düse. Weiterhin ist die beidseitig in der Düse integrierte Pulverzuführung illustriert.



Bild 26: Versuchsaufbau zur Plasmabeschichtung von Gipskartonproben (Bilder aus [S3])

Um Prozessschwankungen aufgrund von Schwindung innerhalb der Anlagentechnik vorzubeugen, befindet sich die Prozesszelle in einer konstant klimatisierten Umgebung bei 22 °C ( $\pm$ 3 °C). Während des Einschaltvorgan-

ges kann es ebenso zu Schwindung und damit Veränderungen des Düsendurchmessers aufgrund der Prozesswärme kommen, weshalb das System vor jeder Versuchsdurchführung zunächst (innerhalb von ca. 1 min.) auf Betriebstemperatur gebracht wird, um eine konstante Beschichtungsqualität erzielen zu können. Zum Erreichen einer hohen Reproduzierbarkeit während der Beschichtung ist der regelmäßige Austausch der Elektroden bzw. der Düse unabdingbar. Die durch den Overspray verursachte Verunreinigung innerhalb der Prozesszelle kann die Bewegungsführung des Substrates durch den Roboter negativ beeinflussen, weshalb dieser einerseits durch eine speziell angefertigte Schutzummantelung gesichert ist und andererseits die Kontamination durch fest definierte Reinigungszyklen geringhalten werden.

#### 3.2.2 Qualifizierung der Anlagenzuverlässigkeit

Zur Fertigung einer reproduzierbaren elektrisch leitenden Schicht ist eine homogene und kontinuierliche Pulverzuführung in die Plasmadüse unabdingbar. Mit der Untersuchung des Pulvermassenstromes können Aussagen über die Gleichmäßigkeit der Zuführung des spratzig geformten Kupferpulvers zur Plasmadüse getroffen werden. Diese Ergebnisse dienen sogleich als Basis zur Interpretation der Beschichtungsergebnisse in Kapitel 3.3.2. Die Steuerung der Pulvermenge erfolgt über die Einstellung des Trägergasstrom-Drucks, der für eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse konstant auf 1,5 bar (Definition Wert vgl. Kapitel 3.3.1) eingestellt wird. Die Messung erfolgt mittels einer eigens entwickelten Vorrichtung, welche in Bild 27 schematisch dargestellt ist. Das Pulver wird unmittelbar unter der Düse in einem Behälter mit einer luftdurchlässigen Membran aufgefangen, durch welche das Trägergas entweichen kann. Der auf der Präzisionswaage fixierte Behälter zeichnet in einer Abtastfrequenz von 60 Hz automatisiert die jeweiligen Messwerte im Mikrogrammbereich in eine Datenbank auf.



Bild 27: Schematische Darstellung zur Messung des Pulvermassenstromes

Die Grafik in Bild 28zeigt die Ergebnisse der Messung des Metallpulver-Massenstromes innerhalb der Versuchsdauer von 17 Sekunden. Es sind starke Schwankungen mit Pulverdurchfluss-Mengen zwischen ca. 100 mg/s bis zu ca. 210 mg/s zu beobachten. Der durchschnittliche Massenstrom über die Versuchsdauer hinweg beträgt 160 mg/s mit einer Standardabweichung von 33 mg/s. Mit einem p-Wert von 0,51 ist nach dem Anderson-Darling-Test keine Normalverteilung zu beobachten. Somit bestätigt sich, dass die Pulverform zu Agglomeration sowie zu einem gegenseitigen Verhaken der Partikel führt und damit die Pulverzuführung mittels Vibrationsschwingungen Schwankungen unterliegt. Inwiefern sich dieser Effekt auf das Beschichtungsergebnis auswirkt, zeigen die Auswertungen zur Qualitätsanalyse der Plasmastrukturen in Kapitel 3.3.2. Wie die nachfolgende Untersuchung zeigt, ist die Ursache für diesen Effekt nicht in der Plasmaflamme bzw. der Gas-Versorgung zu finden.



Bild 28: Messung der Kontinuität des Pulvermassenstroms

Neben dem Pulvermassenstrom ist die Kontinuität der Plasmaflamme für das Beschichtungsergebnis von entscheidender Bedeutung. Mit einer Messung der Plasmaflammentemperatur können einerseits Rückschlüsse über eine konstante Leistungsabgabe des Plasmagenerators sowie andererseits über eine gleichmäßige Prozessgaszuführung gezogen werden. Für die Versuchsdurchführung wird ein Thermoelement (Typ K) mittels Kapton-Klebebandes auf der Substratoberfläche (Gipskarton) fest fixiert. Nach dem Einstellen der Betriebstemperatur der Anlagentechnik nach ca. einer Minute positioniert das Handhabungsgerät die Probe, bzw. die Messspitze des Thermoelementes, mit einem konstanten Abstand von 15 mm (Erklärung zur Parameterfestlegung erfolgt in 3.1.3) unter der Beschichtungsdüse und die Aufzeichnung der Oberflächentemperatur des Substrates mittels Datenlogger (Abtastfrequenz 60 Hz) wird gestartet. Um kein Verfälschen der Versuchsergebnisse durch den schwankenden Pulvermassenstrom hervorzurufen, wird die Plasmaflamme ohne Pulverzuführung betrieben. Die Messergebnisse in Bild 29 zeigen die geringe Spannbreite der sich einstellenden Oberflächentemperaturen des Substrates während der Einwirkung
durch die Plasmaflamme innerhalb des Messzeitraums von 18 Sekunden. Der annähernd konstante Temperaturverlauf mit einem Delta von lediglich ca. 6 K während der Versuchsdauer lässt keinerlei Schwankungen hinsichtlich des Prozessgasmassenstromes sowie der Leistungsabgabe des Plasmagenerators erkennen. Die stetig leicht ansteigende Temperatur von anfänglich 301 °C auf 307 °C ist auf ein Aufheizen des Substrates durch die kontinuierliche Wärmezufuhr zurückführen und tritt beim eigentlichen Beschichtungsprozess durch die Relativbewegung zwischen Düse und Substrat, was mit einer zeitlich lokal begrenzten Wärmeeinwirkung auf die Substratoberfläche einhergeht, nur bedingt auf.



Bild 29: Messung der Kontinuität der Plasmaflamme

#### 3.2.3 Einflussgrößen auf den Prozess

Zur Erstellung eines Prozessmodelles für die kaltaktive Plasmabeschichtungstechnologie werden die im Ursachen-Wirkungs-Diagramm in Bild 17 unter "Methode" genannten und im folgenden aufgeführten Parameter herangezogen, da diese nach eigenen Untersuchungen [P1, P3, P4] sowie Forschungsergebnissen aus [87, 92, 99, 100, 103–106] den größten Einfluss auf das Beschichtungsergebnisse ausüben:

**Leistung Plasmaerzeuger (LP):** Die Leistung der Hochspannungsversorgung kann in der verwendeten CAPM-Anlage stufenlos bis 2 kW eingestellt werden. Wie die Untersuchungen aus [87] zeigen, ist für eine stabile Plasmaflamme sowie ein Aufschmelzen der Metallpartikel die Leistung auf 100 % einzustellen, womit dieser Wert für die weiteren Analysen konstant gehalten wird.

**Prozessgas (PG):** Die Temperatur bzw. der Energieinhalt des Plasmas kann neben der Leistung des Plasmaerzeugers über die Auswahl des entsprechenden Gases, bzw. dessen Zusammensetzung aus verschiedenen Einzelgasen, gesteuert werden. Die verwendete CAPM-Anlage ist für den

Gebrauch von Stickstoff (N<sub>2</sub>), bzw. einem Gemisch aus Stickstoff und Formiergas, konzipiert. Das eingesetzte Formiergas besteht aus einer Mischung aus Stickstoff (95 %) und Wasserstoff (5 %). Wasserstoff (H<sub>2</sub>) weist als leichtes Plasmagas einen hohen Wärmeinhalt bei guter Wärmeleitfähigkeit auf und wird allgemein zur Erhöhung der Temperatur der Plasmaflamme eingesetzt, was gleichzeitig zu einem Anstieg des thermischen Energieeintrags auf die Substratoberfläche führt. [92, 93, 137] Um die auf den temperatursensiblen Gipskarton (Materialauswahl vgl. Kapitel 3.1) einwirkenden Temperaturen möglichst gering zu halten und einer Beschädigung des Baustoffes durch Verbrennungen entgegenzuwirken, wird auf reinen Stickstoff als Prozessgas zur Versuchsdurchführung zurückgegriffen.

**Prozessgasstrom (PGS):** Die in die Plasmadüse eingeleitete Prozessgas-Durchflussmenge hat ebenso einen Einfluss auf die sich einstellende Plasmatemperatur und damit den thermischen Energieeintrag auf die Substratoberfläche. Anlagenseitig kann ein Bereich zwischen 35 l/min und 80 l/min ausgewählt werden. Wie aus den grundlegenden Untersuchungen zur CAPM in [87] hervorgeht, bewirkt eine Zunahme des Gasstromes eine Abnahme der Prozesstemperatur, da die gleiche Energiemenge auf eine höhere Anzahl an Gaspartikeln verteilt wird. Ein unzureichendes Aufschmelzen der Pulverpartikel und eine unzureichende Haftung auf dem Substrat ist bei einer Durchflussrate von 50 l/min die Folge, während es bei 35 l/min aufgrund zu hoher Temperaturen des Plasma-Pulver-Gemisches zu einer partiellem Delamination der Metallisierung führt. Eine durchgängige Kupferstruktur kann mit einer Parametereinstellung von 45 l/min erzielt werden, womit diese für die folgenden Versuchsdurchführungen als konstant determiniert wird. [87]

**Trägergas (TG):** Das Trägergas sorgt für eine inerte Zuführung des Metallpulvers aus der Kartusche in die Plasmadüse. Dabei vermischen sich das stoffgleiche PG mit dem TG (jeweils Stickstoff) in der Plasmadüse, bevor durch den elektrischen Energieeintrag durch die Hochfrequenzzündung der Aggregatszustand des Plasmas entsteht.

**Trägergasdruck (TGD):** Die inerte Zuführung des Metallpulvers in die Düse erfolgt innerhalb eines Trägergasstromes, dessen Druck anlagenseitig zwischen 0,8 bar und 2 bar variiert werden kann. Wie aus den Erkenntnissen von [87] hervorgeht führt ein Druck von unter 1,2 bar einerseits zu hohen Prozesstemperaturen, da die Energie nicht ausreichend von den Pulverpartikeln absorbiert werden kann und andererseits reicht die Energie bei höheren Drücken größer als 1,5 bar nicht aus, um die passierende

Pulvermenge hinreichend aufzuschmelzen. Zur Generierung einer homogenen durchgehend elektrisch leitfähigen Struktur wird dieser Parameter konstant auf 1,2 bar für alle Versuche festgelegt. [87]

**Oberflächenvorbehandlung (OV):** Wie eigene Untersuchungen [P1, P2, P3] zeigen, führt eine mechanische Oberflächenvorbehandlung, wie beispielsweise das Sandstrahlen, allgemein zu einer Erhöhung der Rauigkeit des Substrates und damit zur besseren Einlagerung der Metallpartikel in der Oberfläche. Eine mechanische Bearbeitung der Kartonoberfläche ist ohne Schädigung des Substrates jedoch nicht möglich und wird deshalb in der weiteren Betrachtung nicht weiterverfolgt.

**Beschichtungsgeschwindigkeit (BG):** Dieser Parameter beschreibt die Relativgeschwindigkeit zwischen Düse und Substrat und beeinflusst daher das Beschichtungsergebnis hinsichtlich des oberflächlichen Temperaturflächeneintrages maßgeblich. Ebenso kann durch die BG die lokale Menge des Materialauftrages gesteuert werden, weshalb diese veränderliche Größe im Fokus der nachfolgenden Betrachtungen steht.

Abstand Düse – Substrat (ADS): Der Plasmastrahl weist aufgrund der konischen Öffnung am Düsenende eine kegelförmige Form auf und übt in Abhängigkeit des ADS einen unterschiedlich hohen Flächenenergieeintrag auf das Substrat aus, welcher sich in der Breite der abgelegten Metallstruktur widerspiegelt. Diesen Parameter gilt es hinsichtlich des temperatursensiblen Substrates entsprechend einzustellen, um ein Verbrennen der Oberfläche zu vermeiden.

**Anzahl Überfahrten (AÜ):** Mit der Anzahl der übereinanderliegenden Überfahrten wird die Schichtdicke und damit die elektrische Leitfähigkeit bzw. Heizleistung der metallischen Strukturen definiert. Da dieser Parameter maßgeblich die Beschichtungsqualität beeinflusst, ist er ebenfalls Bestandteil der folgenden Untersuchungen.

# 3.3 Funktionsanalyse plasmabasierter Heizstrukturen auf Gipskarton

Auf Basis des in Kapitel 3.13 ausgewählten Substrat-Werkstoffes erfolgt mit der in 3.2 vorgestellten Anlagentechnik zur kaltaktiven Plasmabeschichtung die elektrische Funktionalisierung der Gipskartonoberfläche. Dabei steht die Analyse des Einflusses der einzelnen Parameter auf das Beschichtungsergebnis im Vordergrund. Bewertet werden die optischen, mechanischen sowie elektrischen Eigenschaften des Kupfer-Gipskarton-Verbundes. Ebenso erfolgt die Untersuchung der Dauerbeständigkeit des Materialverbundes. Eine bewertende Betrachtung des Anwendungspotenzials plasmabasierter Heizstrukturen auf Gipskarton zur Realisierung von Wandflächenheizungen rundet dieses Unterkapitel ab.

#### 3.3.1 Substratspezifische CAPM-Parameterstudie

Auf Basis der in Kapitel 3.2.2 beschriebenen Einflussgrößen auf den Plasmabeschichtungsprozess werden die relevanten Parameter hinsichtlich ihrer jeweiligen Signifikanz und gegenseitigen Wechselwirkung anhand von systematischen Versuchsreihen untersucht. Betrachtet werden dabei die veränderlichen Steuergrößen Beschichtungsgeschwindigkeit (BG), Abstand Düse – Substrat (ADS) sowie die Anzahl der Überfahren (AÜ) mit den in Tabelle 1 jeweilig gelisteten Faktorstufen (Festlegung der Grenzen wird nachfolgend erläutert). Die konstanten Steuergrößen Leistung Plasmagenerator (LP), das Prozess- (PG) sowie Trägergas (TG) und der Prozessgasstrom (PGS) sowie Trägergasdruck (TGD) bleiben, wie zuvor in Kapitel 3.2.3 erläutert, über alle Versuche hinweg unverändert.

Parameterbezeichnung	Abkürzung	Werte		
Konstante Steuergrößen				
Leistung Plasmagenerator	LP	2.000 Watt (≙ 100 %)		
Prozessgas	PG	Stickstoff		
Trägergas	TG	Stickstoff		
Prozessgasstrom	PGS	45 l/min		
Trägergasdruck	TGD	1,2 bar		
Veränderliche Steuergrößen / Faktorstufen				
Beschichtungsgeschwindigkeit	BG	15 / 25 / 30 / 40 / 50 / 60 / 75 mm/s		
Abstand Düse – Substrat	ADS	8 / 10 / 12 / 15 mm		
Anzahl der Überfahrten	AÜ	1/3/6		

Tabelle 1: Konstante und veränderliche Steuergrößen mit den jeweiligen Faktorstufen

Für die Versuchsdurchführung wird ein teilfaktorieller Versuchsplan erstellt, der sich aus einer Kombination der in Tabelle 1 dargestellten veränderlichen Steuergrößen und deren jeweiligen Faktorstufen zusammensetzt. Die Anzahl der betrachteten Parametervariationen beläuft sich auf 27 und für jedes Parametersetup werden drei Replikationen angefertigt (soweit möglich). Ausgewertet wird die optische Homogenität sowie der Einfluss der Parameter auf die Strukturbreite. Als Substrate werden Gipskartonproben mit einer Länge von 65 mm und einer Breite von 35 mm bei einer Materialstärke von 12,5 mm verwendet. In Bild 30 ist der schematische Versuchsaufbau mit den Steuergrößen ADS, BG und AÜ illustriert.



Bild 30: Schematischer Versuchsaufbau zur Plasmabeschichtung

Die optische Auswertung der Beschichtungsergebnisse erfolgt innerhalb sechs Kategorien, wobei o keine bzw. unzureichende Haftung des Kupferpulvers auf der Substratoberfläche bedeutet und 5 eine durchgehende Plasmastruktur darstellt. In Bild 31 sind die sechs verschiedenen Kategorien anhand von Beispielbildern illustriert.



Bild 31: Bewertungsskala zur optischen Auswertung der Haftung (Bilder aus [S4])

Bevor in Bild 36 der Zusammenhang der Beschichtungsparameter anhand eines Haupteffektdiagramms vorgestellt wird, erfolgt zunächst die optische Auswertung des Einflusses der jeweiligen Parameter auf das Beschichtungsergebnis mit Hilfe von Probenfotos. Wie in Bild 32 links illustriert, führt eine BG von 15 mm/s zu einem hohen Energieflächeneintrag, welcher anhand von Einbrandkerben in den Randregionen der Plasmastrukturen ersichtlich wird. Es ist keine durchgehende Haftung des Kupferpulvers zu beobachten und somit keine elektrische Leitfähigkeit nachweisbar. Der geringe Vorschub bewirkt einen hohen thermokinetischen Energieeintrag, der zu einer thermischen Schädigung der temperatursensiblen Gipskartonummantelung führt, womit keine mechanische Verbindung zwischen den Kupferpartikeln und der Oberfläche erreicht werden kann. Bei einer BG von 25 mm/s bildet sich eine durchgängige Kupferleiterbahn, welche sich jedoch, wie in Bild 32 rechts erkennbar, annähernd vollständig von der Gipskartonoberfläche ablöst. Die Strukturbreite beträgt bei einer BG von 15 mm/s 4,4 mm und nimmt bei einer leichten Erhöhung der BG auf 25 mm/s trotz konstantem ADS von 10 mm minimal ab. Zurückzuführen ist diese marginale Abweichung auf den Overspray, da die Kupferpartikel in Folge der niedrigeren BG von 15 mm/s mehr Zeit haben, sich auf der Oberfläche abzulegen. Aufgrund der unzureichenden Beschichtungsergebnisse wird die Versuchsdurchführung mit den BG von 15 mm/s bzw. 25 mm/s nach der ersten Überfahrt abgebrochen. Weiterhin wird deutlich, dass mit einer AÜ = 1 keinerlei Haftung erzielt werden kann, weshalb diese Parameter-Faktorstufe nicht weiterverfolgt wird.



Bild 32: Keine ausreichende Haftung des Kupferpulvers bei einer BG von 15 mm/s und 25 mm/s, bei ADS = 10 mm sowie  $A\ddot{U} = 1$  (Bilder aus [S4])

Zur Darstellung des Einflusses der BG auf die Plasmastruktur wird sowohl der ADS mit 10 mm, als auch die AÜ mit 3 konstant gehalten, während die BG mit 30 mm/s, 40 mm/s, 50 mm/s, 60 mm/s sowie 75 mm/s variiert wird. Weiterhin wird in diesem Zusammenhang die obere Grenz-Beschichtungsgeschwindigkeit mit BG<sub>max</sub> = 75 mm/s grafisch illustriert, da mit 100 mm/s der Flächenenergieauftrag für ein Haften des Pulvers auf der Oberfläche nicht mehr ausreicht, wie in Bild 33 unten zu sehen ist. Die Ergebnisse der plasmabeschichteten Proben sind in Bild 33 grafisch gegenübergestellt. Es ist ein deutlicher Zusammenhang zwischen der BG und dem abgelegten Kupferauftrag auf dem Gipskarton zu erkennen. Eine niedrige Beschichtungsgeschwindigkeit von 30 mm/s bzw. 40 mm/s führt zu einem teilweise ungleichmäßigen Materialauftrag und lokalen Partikelanhäufungen, welche sich während der Abkühlphase partiell von der Oberfläche ablösen. Wird die BG auf 50 mm/s erhöht, treten vereinzelt Fehlstellen auf. Mit einer BG von 60 mm/s ist eine weitestgehend homogene Leiterbahn zu realisieren, jedoch ist an der linken Außenseite auch bei dieser Parameterkombination ein partielles Ablösen von Kupferpartikeln zu beobachten. Bei einer weiteren Erhöhung der BG auf 75 mm/s häufen sich die Anzahl der Fehlstellen wieder, bis schließlich bei einer BG von 100 mm/s die Flächenenergie für eine konstante Anhaftung der Kupferpartikel auf der Gipskartonoberfläche nicht mehr ausreicht.



Bild 33: Einfluss der BG bei konstantem ADS und AÜ (Bilder aus [S4])

Im nächsten Schritt wird der Einfluss des ADS auf das Beschichtungsergebnis analysiert. Wie aus den vorhergehenden Untersuchungen (vgl. Bild 33) hervorgeht, kann mit einer BG von 60 mm/s eine durchgängige Kupferstruktur bei gleichzeitig vergleichsweise hoher Strukturbreite erzeugt werden, weshalb dieser Wert sowie die AÜ = 3 für die nachfolgende Betrachtung konstant gehalten werden. Die Beschichtungsergebnisse bei der Variation des ADS von 8 mm, 10 mm, 12 mm sowie 15 mm sind in Bild 34 dargestellt. Die beschichteten Gipskartonzuschnitte in Bild 34 zeigen, dass bei einem ADS von 8 mm ein partielles Ablösen von Kupferfragmenten zu beobachten ist, während bei einem ADS von 10 mm eine annähernd homogene Beschichtung generiert werden kann. Wird der Abstand auf 12 mm erhöht, fallen leichte Verfärbungen im Randbereich auf, welche bei einem weiteren Anstieg des ADS auf 15 mm zu einer partiellen Oxidation führen. Der stetige Anstieg der Strukturbreite (SB) bei Vergrößerung des ADS ist durch die kegelförmige Gestalt des Plasmastrahls zurückzuführen, so dass Werte von 3,2 mm mit Standardabweichung (SA) = 0,9 mm (ADS = 8 mm) bis zu 5,4 mm mit SA = 0,9 mm (ADS = 15 mm) gemessen werden.



Bild 34: Einfluss bei Variation des ADS (Bilder aus [S4])

In einer weiteren optischen Untersuchung wird die Auswirkung der Anzahl der Überfahrten auf das Beschichtungsergebnis beurteilt (Bild 35). Dafür werden jeweils Proben mit drei sowie mit sechs übereinanderliegenden Schichten bei einer konstanten BG von 60 mm/s sowie einem ADS von 10 mm bzw. 15 mm vergleichend betrachtet.

Wie die Abbildungen der Beschichtungsergebnisse in Bild 35 veranschaulichen, führt eine Verdoppelung der Überfahrten zu einer Homogenisierung der Heizstrukturen sowohl bei den Proben mit einem ADS von 10 mm als auch bei 15 mm. Verdeutlicht wird dies einerseits durch eine dunklere als auch gleichmäßigere Verfärbung der Plasmastruktur und andererseits durch eine höhere Kantenschärfe, welche vor allem bei einem ADS von 15 mm ausgeprägt ist.



Bild 35: Vergleich des Einflusses bei Erhöhung der AÜ (Bilder aus [S4])

In Bild 36 ist der Zusammenhang zwischen den jeweiligen Prozessparametern und der optisch bewerteten Beschichtungsqualität mit einem Haupteffektdiagramm dargestellt. So kann im vorgegebenen Rahmen mit einer Erhöhung der Anzahl der Überfahrten genauso wie mit einem Anstieg des Abstands zwischen Düse und Substrat eine Verbesserung der Haftung des Kupferpulvers erzielt werden. Dagegen wird das Optimum der Beschichtungsgeschwindigkeit bei BG = 60 mm/s erreicht.



Bild 36: Haupteffektdiagramm zur optischen Beurteilung der Haftung zwischen Gipskarton und Plasmastruktur in Abhängigkeit der Beschichtungsparameter

Wie die optische Auswertung der Proben zeigt, existiert für die additive Plasmabeschichtung auf Gipskarton nur ein begrenztes Prozessfenster für die Realisierung einer durchgängigen Plasmastruktur. Zurückzuführen ist dies auf die vergleichsweise geringe Temperaturbeständigkeit des Substrates mit 50 °C, womit das Parametersetup auf einen möglichst geringen Energieeintrag pro Fläche ausgelegt werden muss. Somit kann eine durchgängige sowie gleichmäßige Kupferstruktur nur mit einem Parametersetup von ADS = 15 mm, BG = 60 mm/s sowie  $A\ddot{U} = 6$  erreicht werden. Deshalb werden alle Proben für die weiteren Untersuchungen der geometrischen, mechanischen, thermischen sowie elektrischen Eigenschaften der plasmabasierten Heizstruktur mit diesen Einstellungen gefertigt. Den Zusammenhang zwischen den Parametern AÜ, BG und ADS auf die Strukturbreite illustriert das erzeugte Haupteffektdiagram in Bild 37. Die Ergebnisse zeigen, dass eine Verdoppelung der AÜ sowie eine Erhöhung des ADS jeweils zu einer deutlichen Vergrößerung der SB führen, während eine Zunahme der BG eine Reduktion der SB zur Folge hat.



Bild 37: Haupteffektdiagramm für die SB in Abhängigkeit von AÜ, BG sowie ADS

## 3.3.2 Charakterisierung des Schichtverbundes

Wie die Ergebnisse aus dem vorhergehenden Unterkapitel zeigen, ist der additive Auftrag einer metallischen Struktur auf einer Gipskartonoberfläche mit einem ausgewählten Parametersetup möglich. In den nachfolgenden Ausführungen werden die optischen, mechanischen, thermischen sowie elektrischen Eigenschaften des Plasmastruktur-Gipskarton-Verbundes anhand anwendungsspezifischer Messmethoden vorgestellt.

#### Mikroskopische Analyse

Zur Untersuchung der geometrischen Eigenschaften erfolgt eine Profilmessung der auf dem Gipskarton aufgetragenen Heizstruktur mittels 3D-Laserscan-Mikroskop (VK9700 Fa. Keyence, 18.000-fache Vergrößerung). Dafür wird die Oberfläche entsprechend optisch abgetastet und die sich daraus ergebenden Höhenwerte aufgenommen. Bild 38 oben zeigt die Aufnahme des analysierten Probenausschnittes. Dabei ist ein deutlicher Overspray der Kupferpartikel an den beiden Randbereichen zu beobachten, der eine exakte Abgrenzung und damit eine definierte sowie reproduzierbare Messung der Schichtbreite erschwert. Wie die Grafik in Bild 38 unten zeigt, ist innerhalb einer Strukturbreite von ca. 5,6 mm ein zusammenhängendes Gefüge zu beobachten. Weiterhin sind deutliche Schwankungen im Höhenprofil erkennbar, welche einerseits auf eine ungleichmäßige Pulverzuführung und andererseits auf ein geringes Aufschmelzverhalten der Kupferpartikel zurückzuführen sind. An der höchsten Stelle weist die Kupferstruktur ein lokales Maximum von ca. 42 µm auf, während die durchschnittliche Profilhöhe bei ca. 23 µm liegt. Der somit errechnete Querschnitt wird mit 131.052 µm<sup>2</sup> beziffert.



Bild 38: Höhenprofilmessung der plasmabasierten Heizstruktur

Für eine detaillierte Untersuchung des Gipskarton-Plasmastruktur-Verbundes wird ein Probenquerschliff angefertigt, der in Bild 39 oben dargestellt ist. Wie die Vergrößerung in Bild 39 (Mitte) zeigt, bildet der Kupferauftrag die mikrostrukturell ungleichmäßige Kontur der Oberflächenbeschaffenheit des Gipskartons ab, womit die in Bild 38 aufgezeigten Profilschwankungen weiterhin begründet werden können.

Die in Bild 39 unten abgebildete REM-Aufnahme illustriert den mikrostrukturellen Aufbau der Kupferschicht mit einer Dicke von ca. 23  $\mu$ m, was den zuvor ermittelten durchschnittlich Wert widerspiegelt. Ebenso in Bild 39 unten ersichtlich ist eine Vielzahl an Einschlüssen aufgrund nicht vollständig aufgeschmolzener Kupferpartikel, die für eine hohe Porosität der Heizstruktur verantwortlich sind. Wie die nachfolgenden Untersuchungen des elektrischen Widerstandes bestätigen, mindert die hohe Porosität die elektrische Leitfähigkeit der Plasmastruktur.



Bild 39: Schliffbilder des Heizstruktur-Gipskarton-Verbundes (REM-Aufnahmen [132])

Die in Bild 39 unten erkennbaren formschlüssige Verklammerung der Metallpartikel in der Gipskartonoberfläche sorgen für eine mechanische Adhäsion zwischen Heizstruktur und Substrat, deren Verbindungsintensität in nachfolgenden Untersuchungen bestimmt wird. In der Randzone der Heizstruktur ist der Overspray zu erkennen. Die sich an den Randzonen der Oberfläche eingelagerten Kupferpartikel (vgl. Bild 39, Mittig rechts) haben keine ersichtliche elektrische Verbindung zur Plasmastruktur und tragen somit zur Funktionserfüllung der Erwärmung nicht bei.

#### Haftungsintensität zwischen Heizstruktur und Gipskarton

Die Datengrundlage zur Bewertung der mechanischen Adhäsion zwischen Kupferstruktur und Gipskarton wird mit der Durchführung von Schertests geschaffen. Zur Vergleichbarkeit der Ergebnisse werden dafür sechs Proben mit jeweils 25 Kupferstrukturen mit einer definierten Kantenlänge von 2,5 x 2,5 mm<sup>2</sup> hergestellt. Dafür werden, wie in Bild 40 links schematisch dargestellt, Strukturierungsmasken (Stahl, Materialstärke 0,7 mm) auf dem Gipskarton (Maße 50 mm x 50 mm) fixiert, bevor mit dem in Kapitel 3.3.1 ermittelten Parametersetup eine Beschichtung der Proben erfolgt. Ein direktes Abscheren der Kupferstruktur ist aufgrund der niedrigen Höhe von ca. 23 µm und damit fehlenden Angriffsfläche für den Schermeißel nicht möglich. Deshalb werden Bauteile (Widerstand mit Größe 0603, Länge 1,6 mm, Breite 0,8 mm) mittels Zwei-Komponenten-Epoxidharzkleber (Typ EPO-TEK® H20E, Fa. EPOXY Technology Inc.) als Verbindungsmedium auf die Kupferstruktur aufgebracht, wie in Bild 40 rechts schematisch dargestellt.



Bild 40: Schematisches Setup zur Durchführung von Schertests

Für den Schervorgang wird der Meisel ca. 200  $\mu$ m hinter dem Kupferquadrat mit einer Scherhöhe von ca. 1 mm positioniert, wie in Bild 40 rechts illustriert. Die in einem beweglichen Schlitten des Schertesters (XYZTEC Condor 150-3) verspannte Probe fährt mit einer Geschwindigkeit von 250  $\mu$ m/s gegen einen in einer fixierten Messdose integrierten Schermeißel, bis sich die Plasmastruktur von dem Substrat ablöst. Dabei wird die jeweilige Scherkraft digital von dem Prüfgerät aufgezeichnet.

In Bild 41 sind die 50 x50 mm<sup>2</sup> Kupferproben mit der oberflächlich fixierten Strukturierungsmaske aus Stahl, wie zuvor beschrieben, dargestellt. Nach der vollflächigen Plasmabeschichtung mit dem in 3.3.1 ermittelten Parametersetup entstehen 25 identische Testpads pro Gipskartonprobe, welche wie in Bild 41 links unten illustriert, mit einem Widerstand (0603) mittels Kleber als Verbindungsmedium versehen sind. Um etwaige lokal auftretende Schwankungen der Oberflächenbeschaffenheit detektieren zu können, welche sich in einer Abweichung der Scherfestigkeitswerte widerspiegeln, wird die Probenoberfläche in einzelne Segmente unterteilt (a - e: horizontal, 1 - 5: vertikal), wie in Bild 41 unten (Mitte) gezeigt.



Bild 41: Untersuchung der Scherkräfte zwischen Plasmastruktur und Gipskarton

Die Diagramme in Bild 42 zeigen die Aufteilung der Scherfestigkeitswerte in horizontaler bzw. vertikaler Richtung. Untersucht werden sechs Proben mit jeweils 25 Testpads. Bei allen insgesamt 150 Messstellen werden die Kupferquadrate aus der Kartonoberfläche herausgerissen, wie in Bild 41 unten (rechts) dargestellt.



Bild 42: Gegenüberstellung der Scherfestigkeitswerte zwischen Plasmastruktur und Gipskarton

Das Ablösen der Kartonummantelung von dem Gips-Kern zeigt, dass die maximal mögliche Haftung zwischen Heizstruktur und Substratoberfläche mit dem ausgewählten Parametersetup aus Kapitel 3.1.1 erreicht wird, da ein Materialversagen des Gipskartons die Ausfallursache darstellt. Der Mittelwert der Scherfestigkeiten beträgt 7,0 N/mm<sup>2</sup>. Mit einer Standardabweichung von 1,2 N/mm<sup>2</sup> wird auf ein homogenes Materialverhalten über die gesamte Probenoberfläche hinweg geschlossen.

#### Untersuchung der Funktionsfähigkeit der Flächenheizsegmente

Mit der thermischen Eigenschaftsuntersuchung wird das Erwärmungsverhalten der Kupferstrukturen auf Gipskarton bei Anlegen eines elektrischen Stromes analysiert, um Aussagen über die Funktions- bzw. Leistungsfähigkeit des Flächenheizsystems treffen zu können. Zur Datengewinnung wird der in Bild 43 schematisch dargestellte Messaufbau (Eigenkonstruktion) verwendet.



Bild 43: Schematische Darstellung des Messaufbaus zur thermischen Eigenschaftsbestimmung der Heizstrukturen

Dabei wird auf den Probekörper (150 x 150 mm<sup>2</sup>) eine Heizstruktur mit einer Länge von 1085 mm mit den zuvor in Kapitel 3.3.1 definierten Beschichtungsparametern appliziert. Anschließend wird das Wandflächenheizsegment in die Vorrichtung eingespannt und mittels Klemmen über ein programmierbares Netzteil (Manson HCS-3404, mit maximal 1 – 60 V bzw. o – 10 A) mit elektrischer Energie versorgt, wie in Bild 44 illustriert. In einem in LabView entwickelten Steuerungsprogramm wird die Oberflächen-Zieltemperatur der Heizstruktur eingetragen und die Software regelt automatisch die Leistungsabgabe des Netzgerätes, bis die Soll-Temperatur erreicht ist. Die Aufnahme der Oberflächentemperatur erfolgt dabei einerseits über eine Thermokamera (Flir ThermaCam S65) zur Erfassung der gesamten Probenoberfläche und andererseits über Thermoelemente zur punktuellen Temperaturmessung, welche einerseits für die anfängliche Emissionsgradbestimmung und andererseits für die permanente Überprüfung der von der Wärmebildkamera ermittelten Daten eingesetzt werden.



Bild 44: Versuchsaufbau zur Funktionsanalyse der Heizstrukturen

Somit können automatisiert definierte Zieltemperaturen angefahren werden, während simultan die entsprechenden elektrischen Leistungskennwerte aufgezeichnet werden. Weiterhin können mit den mittels Wärmebildkamera erzeugten Aufnahmen direkte Rückschlüsse über die Homogenität, der mittels CAPM generierten Kupferstruktur auf dem Substrat gezogen werden.

Wie in Bild 44 dargestellt, werden zur elektrischen Kontaktierung der Gipskartonprobe an den jeweiligen Enden der Heizstruktur Kupferlitzen mittels Lötzinnes (SnAgPb) fixiert, welche über Anschlussklemmen mit dem regelbaren Netzteil verbunden sind. Für eine korrekte Messung der Wärmestrahlung des Probekörpers mittels Wärmebildkamera ist ein einheitlicher Emissionsgrad ( $\varepsilon$ ) der Oberfläche erforderlich, welcher über einen schwarzen Anstrich der Gipskartonprobe realisiert wird (vgl. Bild 44). Zur Bestimmung des Emissionsgrades wird anfänglich der Wert eins (schwarzer Strahler) in der Wärmebildkamera eingestellt und so lange sukzessive herabgesetzt, bis die mit dem Thermoelement gemessenen und von der Wärmebildkamera angezeigten Temperaturwerte übereinstimmen, was bei einem Wert von  $\varepsilon = 0.96$  der Fall ist. Die Umgebungstemperatur T<sub>U</sub> während der Versuchsdurchführung beträgt 20 °C.

Für die Untersuchung des thermischen Verhaltens bzw. zum Nachweis der Funktionsfähigkeit der Heizstruktur wird für die Oberflächentemperatur der Gipskartonprobe in der Steuerungssoftware des Messaufbaus ein Temperaturzielwert von 30 °C eingestellt. Die mittels Wärmebildkamera erzeugte Aufnahme in Bild 45 oben veranschaulicht anhand der farblichen Abhebung auf der 150 x 150 mm<sup>2</sup> großen Gipskartonprobe die Erwärmung der Heizstruktur durch den schwarzen Farbauftrag hindurch.

Somit ist die Funktionsfähigkeit der plasmabasierten Flächenheizung auf Gipskarton erfolgreich nachgewiesen. Ebenso erkennbar ist die Wärmeausbreitung auf der Oberfläche in den Zwischenräumen der Heizstrukturen sowie lokale Hotspots, welche ein Indiz für eine ungleichmäßige Pulverzuführung sind, was die Messergebnisse aus Bild 29 links bestätigen.

Wie der Verlauf der Grafik in Bild 45 unten zeigt, steigt die durch das Netzgerät bereitgestellte elektrische Leistung während der Aufheizphase des Probekörpers auf maximal 7,3 W (1,66 V, 4,4 A) an, während gleichzeitig ein kontinuierlicher Anstieg der Temperatur zu verzeichnen ist. Nähert sich die Temperatur der eingestellten Zieltemperatur von 30 °C wird die elektrische Leistungsabgabe durch die Softwareregelung verringert, um eine Übertemperatur zu vermeiden.



Bild 45: Aufheizverhalten der plasmabasierten Heizstrukturen auf Gipskarton ([S3])

Wie die Messungen zeigen, hat sich nach ca. 5 min die Oberfläche auf 30 °C erwärmt und nach ca. 10 min hat sich das System bei einem konstanten Leistungskennwert von ca. 3,1 W eingependelt. Dies entspricht einem Wert von 2,9 W/m Heizstruktur bei einer Umgebungstemperatur von  $T_U = 20$  °C. Wird die benötigte Wärmeleistung der 150 x 150 mm<sup>2</sup> großen Probe mit dem dargestellten Layout auf einem Quadratmeter hochskaliert, ergibt sich eine Leistung von 138 W/m<sup>2</sup> zum Erhalt einer Oberflächentemperatur von 30 °C ( $T_U = 20$  °C).

#### Elektrische Eigenschaften

Für eine exakte Ermittlung des elektrischen Widerstandwertes der 1085 mm langen Heizstruktur wird die Vierpunktmessung herangezogen, damit die Leitungswiderstände keine Verfälschung des Messergebnisses verursachen. Dafür wird mittels der zwei äußeren Messspitzen an der Heizstruktur ein definierter Messstrom angelegt. Mit den inneren beiden Messspitzen, welche an einem Spannungsmesser mit einem annähernd unendlich hohen Innenwiderstand angeschlossen sind, wird die abfallende Spannung gemessen, womit sich nach dem ohmschen Gesetz der elektrische Widerstand der Heizstruktur bestimmen lässt. [138, 139] Der so ermittelte Wert der Probe beträgt 2,5  $\Omega$ , womit sich ein Wert von 2,3  $\Omega$ /m ergibt [S3]. Somit kann anhand des in Bild 38 ermittelten Höhenprofils der Plasmastruktur bzw. der Querschnittsfläche von ca. 0,131 mm<sup>2</sup> ein spezifischer Widerstand von ca. 0,301 (( $\Omega$  mm<sup>2</sup>)/m) ermittelt werden, welcher aufgrund der porösen Struktur (vgl. Bild 39) ca. 17-fach höher ist als der spezifische Widerstand von solidem Kupfer mit 0,0173 (( $\Omega$  mm<sup>2</sup>)/m) [130] bei 20 °C.

#### 3.3.3 Bewertung der Dauerbeständigkeit

Die rechnerische Nutzungsdauer für Heizungen nach VDI 2067 [140] beträgt je nach Heizsysteme ca. 18-20 Jahre. Um erste Aussagen über die Dauerbeständigkeit bzw. des Potenzials der Wandflächenheizung tätigen zu können, wird zunächst in dieser Arbeit ein ca. fünfjähriger Einsatz unter realen Umweltbedingungen simuliert. Untersucht wird eine Änderung der mechanischen und elektrischen Eigenschaften der plasmabasierten Heizstruktur auf Gipskarton, welche durch thermomechanische Spannungen während der zyklischen Temperaturänderung beim Aufheizen und Abkühlen auftreten können. Um einen realitätsnahe Umsetzung des Versuchsaufbaus abbilden zu können, werden die plasmabeschichteten Proben teilweise tapeziert und gestrichen.

#### Bestimmung eines Proben-Beschichtungslayouts

Eine energetische Auslegung eines Heizsystems in Abhängigkeit der wohnraumspezifischen Anforderungen und die damit verbundene Festlegung des Beschichtungslayouts der Heizstrukturen unter Einbezug aller sicherheitsrelevanten Normen und Richtlinien, erfolgt detailliert in Kapitel 4. Für die nachfolgende Versuchsdurchführung wird ein exemplarisches Teilstück (150 x 150 mm<sup>2</sup>) aus dem in Bild 46 dargestellten Beschichtungslayout für eine Wandflächenheizung betrachtet. Das dargestellte Layout kann je nach Wärmebedarf eines Raumes hinsichtlich des Abstandes zwischen den Heizstrukturen variiert werden und ist unter den zulässigen elektrischen Rahmenbedingungen (maximale Berührungsspannung, vgl. Kapitel 4) in der Größe frei skalierbar. Durch die vergleichsweise einfache Gestaltung mit waagrechten und senkrechten Bahnen kann fertigungstechnisch eine hohe Reproduzierbarkeit erwartet werden, welche für eine Vergleichbarkeit der Proben zwingend notwendig ist.

Weiterhin ist das Layout redundant gestaltet, so dass im Falle einer partiellen Unterbrechung der Heizstruktur, durch beispielsweise Bohren eines Loches in die Wand, nicht das gesamte Heizsystem ausfällt, sondern dennoch die Funktionsfähigkeit (bis auf das beschädigte Teilstück) weiterhin gewährleistet werden kann. In Bild 46 links ist die Wandflächenheizung mit dem zuvor beschriebenen Beschichtungslayout mit zwei partiellen Unterbrechungen schematisch dargestellt. Für die weiteren Untersuchungen wird ein Ausschnitt aus dem Gesamtgeflecht extrahiert und einer realer Probekörper gefertigt, der in Bild 46 rechts illustriert ist.



Bild 46: Beschichtungslayout für die Durchführung der Dauerbeständigkeitsuntersuchungen der Wandflächenheizung

## Analyse der elektrischen Eigenschaftsänderung nach dem Auftrag einer Dekorationsschicht

Wandbeschichtungen bzw. -bekleidungen, welche vorwiegend aus Farbe und Tapete bestehen, werden für die Sachwerterhaltung als Schutzfunktion, aus Hygienegründen und aus gestalterischen Motiven verwendet. Eingesetzt werden vorwiegend Dispersionsfarben, da diese leicht zu verarbeiten sind, eine hohe Deckkraft sowie Elastizität aufweisen und gegen schwache Säuren beständig sind, während sie auf einer Vielzahl von Untergründen wie beispielsweise Beton, Kalksandstein, Raufaser- sowie Gipskartonplatten anwendbar sind. Sie bestehen vorwiegend aus Wasser als Verdünnungsmittel, Kunstharz (Reinacrylat) als Bindemittel sowie Pigmenten (z. B. Titanoxid für weiße Farbe) und anderen Füllstoffen (Carbonate, Silikate). Das Trocknen der Dispersionsfarben erfolgt durch Verdunsten des beigemischten Wassers, während dabei die Pigmente bzw. Kunststoffteilchen zusammenfließen und miteinander verkleben. Bindemittel sorgen für eine Haftung der unlöslichen pulverförmigen Pigmente untereinander sowie auf dem jeweiligen Untergrund und sind für die Härte, den Glanz sowie die Strapazierfähigkeit des Auftrages verantwortlich. [141-144] Tapeten haben die Eigenschaft die Temperatur-, Feuchtigkeits- und Luftverhältnisse im Wohnraum mit zu beeinflussen und tragen somit zu einem gesunden Raumklima bei. Tapeten können aus Papier, Kunststoff, Textilien und Raufasern bestehen und werden mit Tapetenkleister als Verbindungsmedium auf der Wandoberfläche befestigt [142]. Der Kleister besteht aus hochwertiger Methylzellulose und wird teilweise zur Verstärkung der Klebekraft mit Kunstharz vermischt [143]. Methylzellulose wird synthetisch aus pflanzlicher Zellulose hergestellt und zählt damit zu den nicht elektrisch leitenden Werkstoffen [145]. Zur Verarbeitung wird der pulverförmige wasserlösliche Kleister mit Flüssigkeit vermengt, so dass sich je nach Mischungsverhältnis die für die Anwendung erforderliche Viskosität einstellen lässt [142].

Zur Untersuchung des Einflusses der ausgewählten Wanddekorationsstoffe auf die elektrischen Eigenschaften der auf Gipskarton applizierten Heizstrukturen werden die Flächenheizsegment-Proben (150 x 150 mm<sup>2</sup>) einerseits mit einem Anstrich aus weißer Kunstharz-Dispersionsfarbe [146] (Bild 47 links) und andererseits mit einer Deckschicht aus weißer Raufaser-Tapete [147] (Bild 47 rechts) mittels Tapetenkleister [148] überdeckt.



Bild 47: Proben zur Untersuchung des Einflusses von Dekorationswerkstoffen auf die Plasmastruktur (Bilder aus [S2])

Die Untersuchung des Einflusses einer Dekorationsschicht auf die elektrischen Eigenschaften der Plasmastruktur erfolgt durch Messungen des elektrischen Widerstandswertes vor und nach dem Aufbringen der Farbe bzw. des Kleisters/Tapete. Dafür werden an die Enden der Heizstrukturen mittels einer Lötverbindung (SnAgPb) Kupferlitzen entsprechend Bild 47 fixiert, um eine elektrische Kontaktierung und damit einer Verbindung zum Messgerät herstellen zu können.

Bild 48 zeigt jeweils eine Schliffbilddarstellung einer gestrichenen (oben) und tapezierten (unten) Probe. Die gestrichene Probe besteht aus einer Gipsschicht, der Kupferstruktur und einer Lage aus Dispersionsfarbe mit einer Höhe von ca. 154  $\mu$ m. Im unteren Bild ist die gekleisterte und tapezierte Probe dargestellt, in welcher das kupferbeschichtete Grundsubstrat mit einer Kleisterschicht von ca. 74  $\mu$ m und einer darauf aufgebrachten Tapetendecklage von 454  $\mu$ m zu sehen ist.



Bild 48: Schliffbilder von mit Dekorationswerkstoffen überzogen Heizstrukturen (REM-Aufnahmen [132])

Die Farbe bzw. der Kleister haftet auf der Oberfläche der Kupferstruktur an, was nach dem Aushärten zu einer dauerhaften Verbindung führt. Ein Eindringen der niedrigviskosen Materialien in die porösen Kupferstrukturen ist in keinem Schliffbild optisch zu erkennen.

Die Ergebnisse der elektrischen Widerstandsmessung zeigen einen Anstieg der gestrichenen Proben (Anzahl = 4) um durchschnittlich ca. 6,5 %, während das Kleistern und anschließende Tapezieren zu einer Erhöhung (Anzahl = 4) um ca. 14,4 % führt. Eine Begründung für den Anstieg des elektrischen Widerstandwertes liefern die Schliffbild-Aufnahmen in Bild 49. Die optische Auswertung zeigt ein Aufquellen der Kartonummantelung, welche zu Mikroverschiebungen in der Kupferstruktur führt. Der im Vergleich zum Streichen höhere Anstieg des elektrischen Widerstandswertes deckt sich mit den Messwerten des Abstandes zwischen Gips und Kartonummantelung, so dass beim Streichen ein Spalt von ca. 35 µm auftritt, während das Tapezieren einen Abstand von ca. 105 µm hervorruft. Eine vergleichende Betrachtung mit Bild 49 links offeriert, dass ohne den Auftrag eines Dekorationswerkstoffes dieses Phänomen nicht beobachtet werden kann.



Bild 49: Streichen bzw. Tapezieren verursachen ein Aufquellen der Kartonummantelung

#### Auswirkungen von Umweltsimulationstests

Während des Lebenszyklus der Wandflächenheizung ist diese permanent wechselnden thermischen Umweltbedingungen (Jahreszeitenwechsel, Sonneneinstrahlung, Lüften, Ein-Ausschaltvorgänge etc.) ausgesetzt. Die dabei auftretenden thermomechanischen Spannungen zwischen Gipskarton, Kupferstruktur sowie dem Dekorationswerkstoff und deren Auswirkungen auf die thermischen Eigenschaften des Heizsystems werden anhand der folgenden zwei Versuche analysiert. Einerseits werden die deaktivierten Flächenheizsegmente thermisch wechselnden Umgebungsbedingungen ausgesetzt, um beispielsweise die Erwärmung durch Sonneneinstrahlung, den Temperaturschwankungen beim Jahreszeitenwechsel sowie beim Lüften simulieren zu können. Dafür werden insgesamt sechs Proben (jeweils zwei unbehandelte, tapezierte und gestrichene, wie im Bild 47 dargestellt) gefertigt und im Anschluss in einen Klimaschrank ausgelagert. Als Randbedingung werden 45 °C als obere Grenztemperatur veranschlagt, um die Gipskartonproben mit einer Dauergebrauchsbelastungsgrenze von 50 °C nicht nachhaltig zu beschädigen [122, 119]. Die minimale Temperatur der Untersuchung wird auf 10 °C festgesetzt, welche laut Literatur [149] als standardmäßige Temperatur für unbeheizte Räume gesehen wird. Im Klimaprüfschrank werden 70 % relative Luftfeuchte eingestellt, da dieser Wert in Badezimmern (als feuchtester Raum in einem Gebäude) in etwa einem Drittel des Jahres gemessen werden kann [150].

In Bild 50 ist der Versuchsverlauf anhand eines Zyklus exemplarisch dargestellt. Hat der Klimaschrank die vorgegebene Zieltemperatur von 10 °C bzw. 45 °C erreicht, beginnt die jeweilige Haltephase von 20 Minuten, damit die Probe ausreichend Zeit für eine vollständige Akklimatisierung hat. Die sich jeweils einstellende tatsächliche Oberflächentemperatur der Gipskartonprobe wird mittels Thermoelement gemessen und ist ebenso in der Grafik in Bild 50 illustriert. Wie dieser Temperaturverlauf zeigt, werden aufgrund der Reaktionsträgheit des Klimaschrankes beim Temperaturwechsel die Zielwerte minimal unter- bzw. überschritten.



Bild 50: Exemparischer Verlauf eines Zyklus unter periodisch wechselnden Umgebungsbedingungen bei 70 % relative Luftfeuchte

Aufgrund der unterschiedlichen häuslichen Gegebenheiten (z. B. die Nähe zum Fenster) und des nur bedingt vorhersehbaren Wetterwechsels, sind die zu erwartenden Temperaturschwankungen während der Lebensdauer des Flächenheizsystems nur unscharf vorherzusagen, was die Festlegung der Zyklenanzahl für die Versuchsdurchführung erschwert. Um dennoch ein aussagekräftiges Versuchsergebnis zu erlangen, werden die vom Umweltbundesamt erhobenen Daten [151] für die Anzahl besonders heißer Tage in Deutschland mit über 30 °C herangezogen, welche im Jahr 2019 bei 17 Tagen lag, an denen von einer hohen äußeren thermischen Belastung des Flächenheizsystems auszugehen ist. Um eine Einsatzdauer von ca. fünf Jahren zu simulieren wird demnach die Zykluszahl auf 80 festgelegt, nach deren Durchlaufen erste Aussagen über das Verhalten des Heizsystems getroffen werden können. Jeder 82-minütige Zyklus besteht aus einer technisch bedingten Aufheizzeit von ca. 13 Minuten bzw. einer Abkühlphase von ca. 28 Minuten sowie den beiden Haltephasen von jeweils 20 min bei 10 °C respektive 45 °C. Somit befinden sich die Proben insgesamt ca. 109 Stunden (4,5 Tage) bei durchgehend wechselnden thermischen Belastungen und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 70 % im Klimaschrank.

Wie die Ergebnisse in Bild 51 grafisch aufzeigen, konnten alle Proben über die gesamte Versuchsdauer hinweg ihre Funktionalität beibehalten. Um Ausfälle und Veränderungen der elektrischen Eigenschaften frühzeitig detektieren zu können, werden nach der Hälfte der abgefahrenen Zyklen die Widerstandswerte der unbehandelten, gestrichenen sowie tapezierten Proben jeweils erfasst. Die Messungen lassen einen Anstieg des elektrischen Widerstandes über alle Proben hinweg erkennen, indes bei den Unbehandelten die niedrigste Erhöhung mit ca. 5 % und bei den Tapezierten mit ca. 17 % der höchste Anstieg zu verzeichnen ist.





Bei den unbehandelten und gestrichenen Proben kann nach Durchlaufen der weiteren 40 Zyklen keine weitere signifikante Steigerung des elektrischen Widerstandes beobachtet werden, während die Leitfähigkeit der tapezierten Flächenheizsegmente nochmals um knapp 8 % abnimmt. Die Ergebnisse der Messung zeigen, dass der bereits in Bild 49 aufgezeigte Effekt des Aufquellens der Gipskartonummantelung durch die Feuchte/Wärme-Belastung über mehrere Tage hinweg bei den tapezierten Proben weiterhin verstärkt wird. Jedoch ist davon auszugehen, dass die extreme Kombination aus hoher Luftfeuchte und Wärme, wie sie während der Versuchsdurchführung vorherrschte, in der Realität nicht regelmäßig auftritt, womit auch bei tapezierten Proben von einer dauerhaften Funktionserfüllung ausgegangen werden kann. Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse der gemessenen Widerstände, dass die plasmabasierten und mit Dekorationswerkstoffen überzogenen Flächenheizsegmente den im häuslichen Umfeld auftretenden Umweltbedingungen standhalten können.

In einer weiteren Analyse werden die Auswirkungen der Einschaltvorgänge auf die elektrischen Eigenschaften der Heizstrukturen hinsichtlich der Langzeitzuverlässigkeit untersucht. Dafür werden sechs Proben nach Bild 47 gefertigt (jeweils zwei unbehandelt, tapeziert und gestrichen) und in einem Klimaschrank bei konstanten äußeren Randbedingungen von 5 °C und 70 % relativer Luftfeuchtigkeit ausgelagert. Die niedrigen Temperaturen dienen einer raschen Abkühlung der Flächenheizsegmente, um die Dauergebrauchseigenschaften des Werkstoff-Verbundes unter extremen klimatischen Bedingungen bewerten zu können. Der Versuchsaufbau ist in Bild 52 dargestellt. Die Proben werden in einem Klimaschrank ausgelagert und jeweils an ein regelbares Labornetzteil angeschlossen. Die aktuelle Temperatur wird mittels Thermoelemente und einem entsprechenden Datenlogger abgegriffen, welcher die Daten an die Steuerungssoftware überträgt, welche wiederum die Labornetzteile schaltet.



Bild 52: Versuchsaufbau zur Analyse der Auswirkungen der Einschaltvorgänge auf die Flächenheizsegmente

Die Proben werden zyklisch mit Energie versorgt bis die maximale Dauergebrauchstemperatur der Gipskartonplatten mit 50 °C [119] erreicht ist, um Eigenschaftsänderungen der Flächenheizsegmente unter hohen thermischen Belastungen bewerten werden können. Im Anschluss erfolgt die Abkühlphase bis die Oberflächentemperatur auf 10 °C (vgl. vorhergehende Untersuchungen, unbeheizter Raum [149]) abgesenkt ist, bevor der Zyklus durch definiertes Bestromen der Proben erneut beginnt. Untersucht werden soll das Langzeitverhalten der Heizstrukturen für einen Betrieb von ca. fünf Jahren. Bei einer üblichen Heizperiode in Deutschland von 185 Tagen (sechs Monate) [152] und durchschnittlich ein bis zwei Einschaltvorgängen pro Tag, sollen die Messungen der elektrischen Widerstandswerte nach ca. 1.600 abgefahrene Zyklen Aussagen über die Langzeitzuverlässigkeit des Werkstoffverbundes geben.

In Bild 53 ist der gemessene Temperaturverlauf der Oberfläche während eines Zyklus dargestellt. Somit beläuft sich die Aufheizphase der Kupferstrukturen auf 35 Sekunden, während zur Abkühlung der Oberfläche auf 10 °C eine Zeit von 120 Sekunden beansprucht wird. Der Testumfang beläuft sich auf 1.680 Zyklen, womit sich die Gesamtdauer des Versuchs bei einer Zykluszeit von 155 Sekunden auf insgesamt ca. 72 Stunden erstreckt.



Bild 53: Zyklus eines Einschaltvorganges der Heizstrukturen zur Simulation der Dauergebrauchseigenschaften nach einem mehrjährigen Einsatz

Bild 54 zeigt die Auswertung der mittels Vierpunktmessung ermittelten elektrischen Widerstandswerte vor und nach der zyklischen Erwärmung der Proben in einer vergleichenden Betrachtung. Wie die Werte zeigen, kann bei allen Proben, trotz der periodischen thermomechanischen Belas-

tungen während der Versuchsdauer, eine elektrische Leitfähigkeit gemessen und somit die Funktionsfähigkeit über einen simulierten Zeitraum von ca. fünf Jahren nachgewiesen werden. Nach 500 Zyklen ist bei den unbehandelten sowie den gestrichenen Proben eine leichte Erhöhung des elektrischen Widerstandes von ca. 1 % zu verzeichnen, während die zyklischen Belastungen bei den tapezierten Proben einen Anstieg von ca. 2 % hervorgerufen haben. Nach dem Durchlaufen aller 1.680 Zyklen ist bei den unbehandelten Proben eine Erhöhung um weitere ca. 2,6 % zu beobachten, womit der Widerstand einen Gesamtanstieg um ca. 3,9 % erfährt. Bei den gestrichenen Proben erhöht sich der Wiederstand um weitere 3,2 % und bei den tapezierten Proben um 2,5 %, womit sich ein Gesamtanstieg von beiden Proben um ca. 4,5 % einstellt und somit von den unbehandelten Proben minimal abweicht. Zusammenfassend wird bei allen Probenarten nur ein geringer Anstieg des elektrischen Widerstandwertes gemessen, so dass bei einer simulierten Einsatzdauer von ca. fünf Jahren von keiner gravierenden Beeinträchtigung der Funktionsfähigkeit ausgegangen werden kann. Die hier dargestellten Untersuchungen zeigen weiterhin, dass die Heizstrukturen zum Erhalt der elektrischen bzw. thermischen Eigenschaften keine schützende Deckschicht benötigen. Allerdings führt das Tapezieren bzw. Streichen auch zu keiner nachhaltigen Schädigung des Materialverbundes.





## 3.4 Zusammenfassung und Bewertung technischer Funktionsfähigkeit

Mit den in Kapitel 3 durchgeführten Analysen kann die Forschungsfrage zur dauerhaften technischen Funktionalität unter realen Umgebungsbedingungen von im CAPM-Prozess hergestellten Heizstrukturen positiv beantwortet werden. Bei der Betrachtung des Aufbaus industriell gefertigter Gebäude wird der Werkstoff Gipskarton als Schaltungsträger für Wandflächenheizung identifiziert, da dieser Baustoff sowohl bei Außen- als auch bei Innenwänden als Verkleidung in den Raum ragender Flächen eingesetzt wird. Durch Variation der einflussreichsten Parameter auf den Plasmabeschichtungsprozess kann mit einem Parametersetup von ADS von 15 mm, einer BG von 60 mm/s sowie einer AÜ von 6 erreicht eine Kupferstruktur auf einer Gipskartonoberfläche abgelegt werden. Mit der thermischen Untersuchung der Heizstruktur kann die Funktionsfähigkeit der plasmagenerierten Wandflächenheizung nachgewiesen werden. Neben der allgemeinen Funktionalität beinhaltet die 1. Forschungsfrage auch den Nachweis der dauerhaften Zuverlässigkeit der plasmagenerierten Wandflächenheizung. Die Dauerbeständigkeit einer fünfjährigen Lebensdauer des Gipskarton-Heizstruktur-Dekorationsschicht-Verbundes wird anhand zweier Untersuchungen bewertet. Nach der Simulation der thermomechanischen Beanspruchung durch Umwelteinflüsse wird bei allen Proben nach dem Durchlaufen der Temperaturzyklus-Tests eine durchgängige Funktionsfähigkeit festgestellt. Eine weitere Belastung für den Werkstoffverbund stellen die Einschaltvorgänge dar. Nach dem Durchlaufen von 1.680 Zyklen sind trotz thermomechanischer Belastungen durch ein schnelles Aufheizen und Abkühlen bei konstanten Umweltbedingungen keine Ausfälle zu verzeichnen. Somit kann eine mehrjährige Funktionsfähigkeit der Wandflächenheizung unter Umwelteinflüsse sowie unter thermischen Belastungen durch Einschaltvorgänge, erfolgreich nachgewiesen werden.

## 4 Untersuchung thermischer Behaglichkeit

Zur Untersuchung der physiologischen Behaglichkeit des Wandflächenheizsystems wird ein freistehendes Energiesparhaus nach KfW 55 im Rahmen des Projektes baustoffintegrierte Flächenheizung [P6] auf dem Betriebsgeländer der Firma LUXHAUS Vertrieb GmbH & Co. KG aufgebaut (vgl. Bild 55). Es besteht aus einem Raum mit einem Außenmaß von 5,2 m auf 7,1 m, bei einem Innenmaß von 4,7 m auf 6,6 m, was einem Grundriss der Wohnfläche von 31 m<sup>2</sup> entspricht. Mit einer Deckenhöhe von 2,6 m besitzt das in Ständerbauweise errichtete Demonstrationsgebäude ein Raumvolumen von 81,12 m<sup>3</sup>. Die Berechnung der Heizlast (detaillierte Beschreibung in Kapitel 4.1.1) erfolgt nach Norm DIN EN 12 831 [153] und berücksichtigt dabei die Lagerung auf drei Stützen, womit die am niedrigsten anzunehmenden Norm-Temperatur von -16 °C [153] (regional abhängig) neben den Wänden und der Decke auch am Boden auftreten kann. Ebenso berücksichtigt die Heizlastrechnung die installierte Türe sowie die zwei verbauten Fenster. Somit ergibt sich bei dem in der Rechnung zugrundeliegenden Wärmedämmstandard nach KfW 55 mit einem Transmissionswärmeverlust von 1.014 Watt und dem Lüftungswärmeverlust von 510 Watt, eine Gesamt-Norm-Heizlast von 1.524 Watt. Dies bedeutet, dass eine Wärmequelle mindestens diese Leistung aufweisen muss, um selbst bei der niedrigsten lokal anzunehmenden Umgebungstemperatur (im Beispiel -16 °C) eine ausreichend hohe Wärmeenergie zum Halten der Norm-Raumtemperatur von 21 °C zur Verfügung stellen zu können [6].



Bild 55: Demonstrationshaus zur Untersuchung des praktischen Einsatzes und physiologischen Behaglichkeit der plasmagenerierten Wandflächenheizung

### 4.1 Konzipierung plasmagenerierte Wandflächenheizung

Zur Bewertung der praktischen Umsetz-/Einsetzbarkeit bzw. der thermischen Behaglichkeit des Systems wird die plasmabasierte Wandflächenheizung in ein reales Gebäude integriert (Kapitel 4.2/4.3). Hierfür gilt es zunächst die Dimensionierung der Wandflächenheizung für das Demonstrationshaus zu bestimmen. Für die Durchführung der Behaglichkeitsuntersuchungen (vgl. Kapitel 4.3) ist es Voraussetzung, dass an allen vier Seiten des Raumes jeweils eine Wandflächenheizung installiert ist. Zum Erreichen einer physikalischen Behaglichkeit ist zwischen Fuß- und Kopfbereich eines Menschen, wie Bild 7 illustriert, ein möglichst geringer Temperaturgradient sicherzustellen, welcher durch ein entsprechend großes Abmaß der Heizflächenhöhe von zwei Metern realisiert wird. Für eine weitgehend großflächige Wärmeeinbringung innerhalb der Raumumschließungsflächen, nach Vorgabe des in Bild 8 dargestellten Graphen, ist allgemein eine möglichst große Heizflächenbreite anzustreben. Aufgrund platztechnischer Einschränkungen durch die Türe bzw. Fenster (Beschreibung des Grundrisses in Kapitel 4.2) limitiert sich der zur Verfügung stehende Bereich auf zwei Meter. Fertigungstechnisch bedingt, können mit der zur Verfügung stehenden Plasmabeschichtungsanlage nur maximale Plattengrößen von 400 x 500 mm<sup>2</sup> verarbeitet werden, womit sich bei einem elektrischen Zusammenschluss mehreren Platten zu einem Verbund eine Seitenbreite der Heizfläche von 1,6 m ergibt. Für eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse der Behaglichkeitsuntersuchungen werden alle Heizflächen identisch dimensioniert, womit sich die zu realisierende Wandflächengröße mit einer Höhe von 2 m und einer Breite von 1,6 m auf 3,2 m<sup>2</sup> erstreckt. In einem betrachteten Szenario der Behaglichkeitsuntersuchungen wird u. a. das Ergebnis bei nur zwei aktivierten Wandflächenheizungen bewertet. Um die zuvor berechnete Norm-Heizlast des Demonstrationsraumes von 1.524 Watt dennoch erfüllen zu können, wird die benötigte Leistung für jede der vier Wandflächenheizung auf 800 Watt festgelegt. In einem weiteren Szenario erfolgt die Untersuchung der Auswirkung der Heizflächengröße auf die Behaglichkeit, weshalb die 3,2 m² große Heizflächenwand in vier einzeln ansteuerbare 0,8 m<sup>2</sup> große Quadranten aufgeteilt wird (Skizze der ausgelegten Heizwand wird in 4.1.2 (Bild 57) vorgestellt).

Als gesetzliche Vorgabe zur Auslegung des elektrischen Heizsystems gilt einerseits, dass die Berührungsspannung der Heizstruktur von 60 V DC nach VDE 0100-410 (Errichten von Niederspannungsanlagen Teil 4-41: Schutzmaßnahmen – Schutz gegen elektrischen Schlag) [154] zu keinem Zeitpunkt überschritten werden darf. Andererseits ist die nach DIN EN ISO 13732-1 (Ergonomie der thermischen Umgebung – Bewertungsverfahren für menschliche Reaktionen bei Kontakt mit Oberflächen – Teil 1: Heiße Oberflächen [52]) festgelegte Verbrennungsschwelle von 51 °C bei einer Kontaktdauer von bis zu einer Minute, bzw. 48°C bei einer Berührung von weniger als zehn Minuten bei unbeschichtetem Metall einzuhalten. Als weiterer Grenzwert in diesem Kontext ist die unter Dauerbelastung maximal zulässige Oberflächentemperatur des Gipskartons von 50 °C [155] zu nennen, um keine nachhaltige Schwächung des Baustoffes durch Austrocknung hervorzurufen.

#### 4.1.1 Grundlagen zum Stromwärmegesetz

Auf Basis der genannten Rahmenbedingungen erfolgt die analytische Auslegung der erforderlichen Heizstrukturlänge durch Anwendung des Stromwärmegesetzes nach James Prescott. Dieser physikalische Zusammenhang besagt, dass ein durch einen metallischen Leiter fließender elektrischer Strom I durch fortwährende Umformung von elektrischer Leistung P den Wärmeenergiegehalt Q<sub>w</sub> erzeugt. Somit wird die an einem metallischen Leiter angelegte Spannung U durch Spannungsabfall an einem Widerstand R in Wärme umgewandelt. R ist dabei von seinem materialspezifischen sowie temperaturabhängigen Widerstand  $\rho$ , der Leiterbahnlänge I und der Fläche des Querschnitts A abhängig. Demnach berechnet sich der erzeugte Wärmeenergiegehalt Q<sub>w</sub> in Abhängigkeit des Stromes I, der Zeit t und des Widerstandes R nach folgendem Gesetz [156–160]:

$$Q_W = P \cdot t = U \cdot I \cdot t = I^2 \cdot R \cdot t \text{ mit } R = \frac{\rho_{20} \cdot I}{A}$$
(1)

mit:

11110.	
$Q_{ m W}$	Wärmeenergiegehalt in J
Р	Heizleistung in W
t	Zeit in s
U	Spannung in V
Ι	Strom in A
R	Widerstand in $\Omega$
$ ho_{20}$	spezifischer Widerstand in $(\Omega \cdot mm^2)/m$ (bei 20 °C)
L	Leiterbahnlänge in m
Α	Fläche Leiterbahnquerschnitt in mm <sup>2</sup>

Unter Berücksichtigung der Temperaturabhängigkeit des Widerstandes, der zu erwartenden Temperatur der Heizstruktur T<sub>HS</sub> bei Anlegen eines

definierten elektrischen Stromes I sowie der vorherrschenden Umgebungstemperatur T<sub>U</sub>, wird (1) um den materialspezifischen Temperaturkoeffizient  $\alpha_T$  erweitert, womit sich zur Ermittlung der Stromwärmeverluste bei Gleichstromnetzen der folgende Zusammenhang ableiten lässt [161]:

$$P = I^2 \frac{\rho_{20} \cdot L}{A} (1 + \alpha_{\rm T} ({\rm T}_{\rm HS} - {\rm T}_{\rm U}))$$
<sup>(2)</sup>

mit:

$\alpha_{\rm T}$	Temperaturkoeffizient des Widerstandes in K-1
T <sub>HS</sub>	Temperatur Heizstruktur in °C
Tu	Temperatur Umgebung in °C

Der materialabhängige Temperaturkoeffizient ( $\alpha_T$ ) kann aufgrund differierender physikalischer Eigenschaften der Plasmastruktur zu Bulk-Kupfer, wie beispielsweise der abweichende spezifische Widerstand, nicht aus der Literatur übernommen werden, weshalb die Bestimmung des Kennwertes in Untersuchungen auf Basis von (3) erfolgt [162]:

$$\Delta \mathbf{R} = \alpha_{\mathrm{T}} \cdot \Delta \mathrm{T} \cdot \mathbf{R}_{\mathrm{k}} \tag{3}$$

mit:

ΔR	Änderung des elektrischen Widerstandes in $\Omega$
ΔΤ	Änderung der Temperatur in K
R <sub>k</sub>	Widerstandswert vor der Temperaturerhöhung in $\Omega$

Für die Ermittlung des Temperaturkoeffizienten werden Messungen des elektrischen Widerstandes der Kupferstruktur bei jeweils 20°, 30°C, 40°C, 50°C sowie 60°C nach dem in Bild 44 beschriebenem Messaufbau bei einer Umgebungstemperatur von 20°C absolviert. Bild 56 veranschaulicht die annähernd lineare Erhöhung des elektrischen Widerstandes bei einem Anstieg der Temperatur der Plasmastruktur. Somit ergibt sich ein Wert für den Temperaturkoeffizienten plasmabasierter Kupferstrukturen von  $\alpha_{T_{HS}} = 0,0023$  K-1.



Bild 56: Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes der Plasmastruktur (Daten aus [S<sub>3</sub>])

Neben der Abweichung des spezifischen Widerstandes ist auch der Temperaturkoeffizient von Bulk-Kupfer (BK) mit einem Literaturwert von  $\alpha_{T_{BK}} = 0,0039$  K-1 differierend, im Vergleich zum Wert plasmagenerierter Strukturen [163]. Zur Bestimmung des Temperaturdeltas (T<sub>HS</sub> - T<sub>U</sub>) wird für die weitere Berechnung die Dauerbelastungstemperatur des Gipskartons mit T<sub>HS</sub> = 50 °C (< als Verbrennungsschwelle mit 51 °C) sowie die Norm-Innentemperatur mit T<sub>U</sub> = 20 °C (Norm DIN EN 12 831 [153]) herangezogen, womit sich ein Wert von  $\Delta T$  = 30 K ergibt.

#### 4.1.2 Analytische Auslegung

Zur exakten analytischen Bestimmung der Heizstrukturlänge wird der in Kapitel 3.3.2 ermittelte Wert des elektrischen Widerstandswertes der Kupferstruktur von 2,3  $\Omega/m$  durch Erhöhung der Datenbasis spezifiziert. Dafür werden insgesamt 27 geradlinige Plasmastrukturen mit jeweils 300 mm auf Gipskartonplatten (400 x 500 mm<sup>2</sup>) appliziert. Um etwaige Schwankungen hinsichtlich der Reproduzierbarkeit aufdecken zu können, werden die Widerstandswerte für jeweils 100 mm lange Teilstücke gemessen. Das Ergebnis der insgesamt 81 Messungen ergibt einen Mittelwert von 2,1  $\Omega/m$  mit einer Standardabweichung von SA =  $0.2 \Omega/m$  (Daten aus [S5, S6, P6]). Das Ergebnis zeigt weiterhin, dass der in Kapitel 3.3.2 ermittelte Wert des elektrischen Widerstandswertes  $(2,3 \Omega/m)$  sich innerhalb der Standardabweichung (0,2  $\Omega/m$ ) bewegt. Eine Begründung für die geringe Abweichung kann in der Verwendung eines alternativen Kupferpulvers (Rogal Kupfer GK 0/50" der Firma Schlenk Metallic Pigments GmbH [164]) gefunden werden, das aufgrund mangelnder Verfügbarkeit des ursprünglich eingesetzten Materials und aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten (vgl. Kapitel 6.1) für die weiteren Untersuchungen herangezogen wird. Aufgrund der sphärischen Oberflächenform der Kupferpartikel ist eine geringe Modifizierung der in Kapitel 3.3.1 ermittelten Prozessparameter erforderlich, weshalb für die weitere Betrachtung folgende Werte als Berechnungsgrundlage dienen: BG = 100 mm/s,  $A\ddot{U} = 8$ , ADS = 13,5 mm. Zudem wird dem Prozessgas Stickstoff mit einer angepassten Durchflussmenge von 25 l/min weiterhin Formiergas mit 15 l/min zugegeben, womit sich die Gesamt-Durchflussmenge auf 40 l/min reduziert.

Für die Analyse der Behaglichkeit ist es notwendig, dass nur selektive Bereiche der Wandflächenheizung aktiviert werden können. Deshalb wird der zuvor festgelegte Wärmeenergiegehalt von insgesamt 800 Watt durch vier einzelne Quadranten mit jeweils 200 Watt bereitgestellt. Jeder dieser vier 0,8 m<sup>2</sup> großen Flächen besteht wiederum aus vier 400 x 500 mm<sup>2</sup> großen Gipskartonsegmenten, welche je 50 Watt in Form von Wärmeenergie an die Umgebung abgeben. Zur Reduzierung von Fehlerquellen wird die Anzahl der Verbindungsstellen zwischen den einzelnen Segmenten möglichst gering gehalten, weshalb ein Beschichtungslayout mit nur zwei Kontaktierungsstellen pro Platte gewählt wird, wie in Bild 57 rechts ersichtlich. Die elektrische Energieversorgung der Heizwände wird jeweils über vier programmierbare Netzteile (Mansons HCS - 3404) gewährleistet, welche eine regelbare Ausgangsspannung (U<sub>N</sub>) zwischen 1 V bis 60 V bei einem Ausgangsstrom von 0 A bis 10 A zur Verfügung stellen. Wie in Bild 57 dargestellt, versorgt jeweils ein Netzteil einen 0,8 m<sup>2</sup> großen Quadranten. Dieser besteht aus je zwei in Reihe geschalteten 400 x500 mm<sup>2</sup> großen Segmenten (mit je R<sub>Segment</sub>), welche wiederum mit einer Parallelschaltung elektrisch verbunden sind, wie das Ersatzschaltbild in Bild 57 unten links zeigt.



Bild 57: Schematischer Aufbau zur elektrischen Verschaltung der Heizwand

Als Betriebsspannung werden 40 Volt gewählt, um einerseits unterhalb der zulässigen Berührungsspannung zu bleiben und andererseits noch ausreichend elektrische Leistung zum Ausgleich von etwaig auftretenden Leitungsverlusten zwischen Netzteil und Heizwand zur Verfügung zu haben. Die durch das Netzteil bereitgestellte Spannung U<sub>N</sub> liegt zu gleichen Teilen (40 V) an beiden parallel verschalteten Zweigen an, während sich aufgrund der Reihenschaltung die Spannung wiederum in zwei gleiche Teile zu je 20 V auf jedes 400 x500 mm<sup>2</sup> großes Heizsegment aufteilt. Somit liegt bei einer geforderten Leistung von 50 W pro Segment und einer Betriebsspannung von 20 V nach (1), ein Strom von 2,5 A an jeder Heizstruktur an. Unter
Verwendung von (2) ergibt sich somit eine Mindestlänge der Heizstruktur von 3,6 m. Zur Realisierung einer gleichmäßigen Aufteilung der Heizstruktur auf dem Gipskarton und um beide Kontaktierungen für eine einheitliche elektrischen Verbindung auf der gleichen Seite zu platzieren, ergibt sich das in Bild 57 (rechts) dargestellte Layout mit einer Gesamtlänge von ca. 4,0 m und einem rechnerisch ermittelten Gesamtwiderstand von R<sub>ges</sub> = 8,4  $\Omega$ .

#### 4.1.3 Empirische Untersuchung

Zur Validierung des zuvor analytisch berechneten Wertes des Gesamtwiderstandes pro Segment mit  $R_{Segment} = 8.4 \Omega$  wird der elektrische Widerstand der Heizstrukturen von elf Proben (vgl. Bild 58 links) ermittelt, welche nach dem zuvor festgelegten Layout (vgl. Bild 57 rechts) gefertigt werden. Die Messergebnisse liefern mit durchschnittlich R<sub>segment</sub> = 7,6  $\Omega$  $(SA = 0.63 \Omega)$  im Vergleich zum errechneten Ergebnis von R<sub>segment</sub> = 8.4 \Omega einen etwas geringeren Wert. Die Begründung wird in der streckenweisen Analyse der Heizstrukturen gefunden. Die Verbindungsstücke (Ellipse mit Halbachsen 15 mm bzw. 25 mm ≙ Länge ca. 64 mm), welche die geradlinigen Hauptzonen der Heizstrukturen (vgl. Bild 58) miteinander verbinden, weisen einen Mittelwert von lediglich 0,050  $\Omega$  (27 Messungen, SA = 0,008  $\Omega$ ) auf, was einem normierten Wert von 0,724  $\Omega/m$  (SA  $_{0,1} \Omega/m$ ) entspricht. (Daten aus [S<sub>5</sub>, S<sub>6</sub>, P<sub>6</sub>]) Die Differenz ist auf das fertigungsbedingte Abbremsen des Roboters beim Abfahren von Kurven zu begründen, woraufhin aufgrund des konstanten Massenstromes des Plasma-Pulver-Gemisches eine Materialanhäufung die Folge ist. Wird der analytisch berechnete Wert von  $R_{Segment} = 8.4 \Omega$  durch das real erzielte Ergebnis von  $R_{\text{Segment}} = 7.6 \Omega$  in Gleichung (2) ersetzt, ergibt sich eine Stromstärke von 2,5 A bei einer Spannung von 20,3 V. Dadurch beläuft sich die Wärmeabgabe pro Segment auf insgesamt 50,8 Watt und bildet in guter Näherung den analytisch ermittelten Zielwert von 50 Watt ab.

In Bild 58 sind die real gefertigte Probe und eine zugehörige Aufnahme mit der Wärmebildkamera gegenübergestellt. Es ist eine deutliche Erwärmung der Heizstrukturen von durchschnittlich 50 °C zu erkennen, während die Randzonen aufgrund des geringeren elektrischen Widerstandes mit ca. 30°C weniger erwärmt werden. Weiterhin sind ebenso lokale Wärmehotspots mit maximal 68,5 °C in der thermografischen Aufnahme zu erkennen, welche auf eine ungleichmäßige Pulverzuführung während der Plasmabeschichtung zurückzuführen sind. Die Messungen zeigen, dass bei Anlegen eines Stromes von 2,5 A eine Spannung von 20,2 V abfällt. Die Wärmeleistung beträgt somit 50,5 Watt und stimmt annähernd identisch mit den berechneten Werten (50,8 Watt) überein. Die durchschnittliche Oberflächentemperatur der Heizstruktur von  $T_{HS} = 50$  °C stellt sich innerhalb von 15 Minuten ein und hält dieses Temperaturniveau konstant. Die Ergebnisse decken sich somit annähernd vollständig mit dem zuvor aufgestellten Modell und bestätigen dessen Korrektheit. Somit beträgt die normierte Wärmeleistung der plasmagenerierten Heizstruktur pro Meter 12,6 Watt/m. (Daten aus [S5, S6, P6])

Das Ziel zum Betreiben der Flächenheizung in der Praxis liegt jedoch in einer schnellen Reaktions- bzw. Aufheizzeit. Dafür wird zur Minimierung der Erwärmungsphase in einer weiteren Analyse die Spannung von 30 V am Flächenheizsegment angelegt. Die somit anliegenden 3,6 A erwärmen die Oberfläche der Heizstruktur innerhalb von 18 Sekunden von T<sub>U</sub> = 20 °C auf T<sub>HS</sub> = 50 °C auf. Somit konnte die Anforderung einer schnellen Reaktion des Heizsystems ebenfalls erfolgreich nachgewiesen werden. (Daten aus [S5, S6])



Bild 58: Aufheizverhalten des Flächenheizsegmentes (Bilder aus [S5, S6, P6])

# 4.2 Installation des Wandflächenheizsystems

Die Installation der plasmagenerierten Wandflächenheizungen aus Gipskarton zur Durchführung der Behaglichkeitsuntersuchungen im Demonstrationshaus erfolgt in der klassischen Trockenbauweise, während langfristig eine Inline-Plasmabeschichtung während der Wandsegmentfertigung beim Modulhausproduzenten (vgl. Kapitel 5) angestrebt wird. In Bild 59 ist der Grundriss des in Bild 55 dargestellten Demonstrationshauses skizziert. Neben einer Zugangstüre sind zwei Fenster in dem 31 m<sup>2</sup> großen Raum verbaut. Die Anordnung der Heizwände (HX) erfolgt an allen vier Seiten jeweils mittig an den freien Flächen. Weiterhin ist der Aufstellort des Behaglichkeitsmessgerätes illustriert, dessen detaillierte Vorstellung im nachfolgendem Kapitel erfolgt.



Bild 59: Grundriss des Demonstrationshauses mit Anordnung der Heizwände

Der Aufbau eines industriell gefertigten Wandsystems ist in Kapitel 3.1.2 detailliert beschrieben und in Bild 20 schematisch dargestellt. Grundsätzlich besteht eine Wand in Ständerbauweise aus einer Unterkonstruktion und einer oberflächenbildenden Verkleidung, der sogenannten Decklage [165]. Das langfristige Ziel besteht in der Integration der elektrischen Leitungen innerhalb der Wand und dem direkten Montieren der Flächenheizung auf den Grobspanplatten (vgl. Kapitel 5).

Im Demonstrationshaus werden die plasmabeschichteten Gipskartonplatten manuell integriert, so, dass die Raumumschließungsflächen im vorliegenden Fall aus Grobspanplatten bestehen, wie in Bild 60 zu sehen ist. Für den Versuchsaufbau wird eine zusätzliche Balkenkonstruktion zwischen Grobspanplatte und Gipskarton als Installationsebene aufgebaut, welche eine leichte Zugänglichkeit für Nachjustierungen gewährt. In Bild 60 ist der fertige Aufbau der installierten Wandflächenheizung im Demonstrationshaus dargestellt.

Die Verbindung zweier Segmente ( $S_X$ ) zur Realisierung der Reihenschaltung erfolgt mit einem aus elektrisch leitfähigem Acrylklebstoff bestehendem Klebeband [166]. Der 12 mm breite selbsthaftende Streifen hat eine glatte Kupferschicht als Trägermaterial und weist einen spezifischen Widerstand von 0,0171 (( $\Omega$  mm<sup>2</sup>)/m) auf. Mit einer Dicke von 70 µm ist demnach von keiner wesentlichen Profiländerung der Oberfläche auszugehen. Das Kupferklebeband wird weiterhin für die Kontaktierung der Heizstrukturen zur elektrischen Energieversorgung verwendet. Dazu wird, wie in Bild 60 rechts dargestellt, die elektrisch leitende Folie auf der Vorderseite der Plasmastruktur fixiert und zwischen den angrenzenden Heizsegmenten nach hinten geführt. Dort wird das Klebeband in eine Klemme geführt, welche mittels einer Kabelverbindung mit dem Netzgerät verbunden ist. Weiterhin wird auf jeder Heizwand ein Temperatursensor installiert, welcher die jeweilige Raumlufttemperatur an die zentrale Steuerungseinheit weitergibt.



Bild 60: Aufbau Heizflächenwand im Demonstrationshaus

Die regelbaren Netzgeräte werden aufgrund ihrer Wärmeentwicklung thermisch von dem Innenraum abgetrennt, um keine Verfälschung der Messergebnisse bei den nachfolgenden Behaglichkeitsuntersuchungen zu verursachen. Dafür wird die in Bild 61 dargestellte Einhausung auf der Rückseite des Demonstrationshauses installiert, in welcher die 16 Netzgeräte untergebracht sind.

Pro Heizwand ( $H_x$ ) werden dafür vier elektrische Energiequellen benötigt, welche jeweils einen Quadranten ( $Q_x$ ) mit Strom versorgen. Die Netzgeräte verfügen über eine USB-Schnittstelle und erlauben somit eine zentrale Regelung über eine entsprechende Software. Zur Vermeidung von Leitungsverlusten zwischen Netzgerät und Heizwand werden Kabel mit einem Querschnitt von 4 mm<sup>2</sup>eingesetzt, welche im Zwischenraum der Wandkonstruktion geführt werden.



Bild 61: Einhausung für Netzgeräte an der Außenwand zur thermischen Isolierung

## 4.3 Behaglichkeitsmessung verschiedener Szenarien

Wie in Kapitel 2.2.1 erläutert, bieten Flächenheizungen, allen voran Wandflächenheizungen, im Vergleich zu dominierend eingesetzten Systemen, wie beispielsweise Radiatoren und Konvektoren, die höchste thermische Behaglichkeit. Anhand der nachfolgend beschriebenen Versuchsergebnisse wird die mit plasmabasierten Wandflächenheizungen erreichbare thermische Behaglichkeit quantitativ analysiert. Dafür werden verschiedene Szenarien hinsichtlich der Auswirkungen auf die Behaglichkeit betrachtet, indem einzelne oder alle Wandflächenheizungen bzw. Segmente selektiv aktiviert werden.

#### 4.3.1 Theoretische Grundlagen

Die analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit ist in DIN EN ISO 7730 [75] beschrieben. Das menschliche Wärmeempfinden ist demnach vom thermischen Gleichgewicht des Körpers als Ganzes und dieses wiederum von der körperlichen Tätigkeit und der getragenen Bekleidung abhängig. Ebenso haben die Parameter des Umgebungsklimas wie Lufttemperatur, mittlere Strahlungstemperatur, Luftgeschwindigkeit und Luftfeuchte einen direkten Einfluss. Werden die genannten Werte ermittelt, kann damit das vorausgesagte mittlere Votum (predicted mean vote, PMV) bestimmt werden, welches das Wärmeempfinden eines Menschen rechnerisch voraussagt. Der physikalische Zusammenhang zur voraussagenden Quantifizierung des Wärmeempfindens eines Menschen ist in Formel (4) beschrieben:

$$\begin{split} PMV &= [0,303 \cdot \exp(-0,036 \cdot M) + 0,028] \cdot (M - W) - 3,05 \cdot \\ 10^{-3} \cdot [5733 - 6,99 \cdot (M - W) - p_{a}] - 0,42 \cdot [(M - W) - 58,15] - \\ 1,7 \cdot 10^{-5} \cdot M \cdot (5867 - p_{a}) - 0,0014 \cdot M \cdot (34 - t_{a}) - 3,96 \cdot 10^{-8} \cdot \\ f_{\rm cl} \cdot [(t_{\rm cl} + 273)^{4} - (\bar{t}_{\rm r} + 273)^{4} - f_{\rm cl} \cdot h_{c}(t_{\rm cl} - t_{a})] \\ t_{\rm cl} &= 35,7 - 0,028(M - W) - I_{\rm cl}\{3,96 \cdot 10^{-8}f_{\rm cl}[(t_{\rm cl} + 273)^{4} - (\bar{t}_{\rm r} + 273)^{4}] + f_{\rm cl} \cdot h_{c}(t_{\rm cl} - t_{a})\} \end{split}$$
(5)

$$f_{\rm cl} = \begin{cases} 1,00 + 1,290 \cdot I_{\rm cl} \text{ für } I_{\rm cl} \le 0,078 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W} \\ 1,05 + 0,645 \cdot I_{\rm cl} \text{ für } I_{\rm cl} > 0,078 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W} \end{cases}$$
(6)

$$h_{\rm c} = \begin{cases} 2,38 \cdot |t_{\rm cl} - t_{\rm a}|^{0,25} \text{ für } 2,38 \cdot |t_{\rm cl} - t_{\rm a}|^{0,25} > 12,1 \cdot \sqrt{\nu_{\rm ar}} \\ 12,1 \cdot \sqrt{\nu_{\rm ar}} & \text{ für } 2,38 \cdot |t_{\rm cl} - t_{\rm a}|^{0,25} < 12,1 \cdot \sqrt{\nu_{\rm ar}} \end{cases}$$
(7)

mit:

M	Energieumsatz in W·m <sup>-2</sup>
W	Wirksame mechanische Leistung in $W \cdot m^{-2}$
I <sub>cl</sub>	Bekleidungsisolation in $m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$
$f_{\rm cl}$	Bekleidungsflächenfaktor
ta	Lufttemperatur in °C
$\bar{t}_{r}$	mittlere Strahlungstemperatur in °C
$v_{\rm ar}$	relative Luftgeschwindigkeit in m/s
$p_{a}$	Wasserdampfpartialdruck in Pa
$h_{\rm c}$	konvektiver Wärmeübergangskoeffizient W $\cdot$ m <sup>-2</sup> $\cdot$ K <sup>-1</sup>
$t_{ m cl}$	Oberflächentemperatur der Kleidung in °C

Der Energieumsatz M beschreibt den Tätigkeits- bzw. Aktivitätsgrad eines Menschen in Leistung pro Quadratmeter Körperfläche. Dabei wird beispielsweise für eine sitzende, entspannte Tätigkeit nach DIN EN ISO 7730 ein Wert von 1 met (1 metabolische Einheit (met)  $\triangleq 58 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ) angesetzt. Die abgegebene wirksame mechanische Leistung W kann nach [167] in der Regel mit W = o angesetzt werden. Einen weiteren Faktor stellt die Bekleidungsisolation I<sub>cl</sub> dar, welche den Wärmedurchlasswiderstand zwischen Haut und Umgebung kennzeichnet. Eine unbekleidete Person weist einen relativen Wärmedurchlasswiderstand von o clo (clothing) auf, während eine typische Innenraumbekleidung im Sommer mit 0,5 clo und im Winter mit 1,0 clo beziffert wird, was einem Wert von 0,155 m<sup>2</sup> · K · W<sup>-1</sup> entspricht. [168] Der Bekleidungsflächenfaktor f<sub>cl</sub> kann mit (6) in Abhängigkeit der Bekleidungsisolation I<sub>cl</sub> berechnet werden. Der konvektive Wärmeübergangskoeffizient h<sub>c</sub> ist eine von der Oberflächentemperatur der Kleidung

sowie der relativen Luftgeschwindigkeit abhängige Variable, deren physikalischer Zusammenhang in (7) dargestellt ist. Weiterhin können die Berechnung der Oberflächentemperatur der Kleidung t<sub>cl</sub> und die dafür notwendigen Faktoren nach DIN EN ISO 7730 Gleichung (5) entnommen werden. Das Ergebnis der Datenerhebungen bzw. Berechnungen stellt der sogenannte PMV-Index dar, der die Klimabeurteilung auf Basis einer siebenstufigen Skala von "+3 heiß" bis "-3 kalt" voraussagt. [75, 168, 169]

Auf Basis des PMV-Index kann indessen der Prozentsatz an Unzufriedenen vorausgesagt werden (predicted percentage of dissatisfied, PPD), die ein bestimmtes Umgebungsklima wahrscheinlich als zu warm respektive als zu kalt empfinden. Somit liefert der PPD-Index Angaben zu thermischer Unbehaglichkeit bzw. Unzufriedenheit und wird nach Gleichung (8) berechnet. Der PPD-Wert kann laut [170] einen Wert von 5 % (Personen, die immer unzufrieden sind) nicht unterschreiten, womit dieser Wert eine ideale thermische Behaglichkeit darstellt. Die Gleichungen basieren auf Experimenten mit 1.300 Personen. [75]

$$PPD = 100 - 95 \cdot \exp(-0.03353 \cdot PMV^4 - 0.2179 \cdot PMV^2)$$
(8)

#### 4.3.2 Versuchsaufbau und -durchführung

Zur Aufnahme der für die Behaglichkeitsmessung nach (4) erforderlichen Parameter wird ein Klimamessgerät (testo 480, der Fa. Testo SE & Co. KGaA) herangezogen, welches die Software zur automatisierten Bestimmung des PMV/PPD-Index beinhaltet. Wie in Bild 62 illustriert, besteht der Messaufbau aus einem Globe-Thermometer zur Messung der Strahlungswärme (nach ISO 7243 [171], ISO 7726 [172], DIN 33403 [173]) mittels eines in einer Hohlkugel (Durchmesser 150 mm) integriertem Thermoelements vom Typ K.



Bild 62: Aufbau des Behaglichkeitsmessgerätes

Weiterhin besteht das System aus einer Sonde zur Turbulenzgradmessung zur Berechnung des Zugluftrisikos sowie einer Raumluftqualitätssonde zur Bestimmung der CO<sub>2</sub>-Konzentration, der relativen Feuchte, der Temperatur sowie des Absolutdrucks. Mithilfe eines justierbaren Stativs wird die Messhöhe von 60 cm eingestellt, was in etwa einer sitzenden Tätigkeit entspricht.

Für die Versuchsdurchführung werden fünf verschiedene Szenarien (S x) beleuchtet. Dabei werden jeweils zwei Versuchsreihen mit einer Dauer von je 20 Minuten pro Messung betrachtet, in denen unterschiedliche Flächenheizungen (vgl. Beschriftung Heizwand (HX) nach Bild 59) bzw. einzelne Segmente aktiviert werden. Die untersuchten Szenarien lauten wie folgt:

- S 1: H1 H4
- S 2: H1
- S 3: H1 H2
- S 4: H1 H4 (nur Aktivierung der oberen zwei Quadranten)
- S 5: H1 H4 (nur Aktivierung der unteren zwei Quadranten)

Als Rahmenbedingungen für die PMV/PPD-Berechnungen werden einerseits der Aktivitätswert von 1 met festgelegt, was einer sitzenden Tätigkeit entspricht sowie 1 clo für den Bekleidungswert im Messsystem hinterlegt. Wie in Bild 59 im Grundriss und in Bild 62 im realen Aufbau illustriert, erfolgt die Platzierung der Sonden gemäß der Herstellerangaben [170] mittig im Raum. Die Außentemperatur während der Versuchsdurchführung beträgt ca. 4 °C.

#### 4.3.3 Versuchsergebnisse und Auswertung

Die Ergebnisse der Behaglichkeitsmessungen sind in Bild 63 in einer Grafik zusammengefasst dargestellt. Bei Szenario S 1 ergeben beide Messungen einen PMV-Wert von 0,09. Damit befindet sich der PMV-Wert annähernd im Median und ist mit "neutral" als idealer Zustand bewertet, da es für die Mehrzahl an Menschen weder zu warm, noch zu kalt ist. Der PPD-Wert bleibt bei 5,17 % und entspricht nach Norm [75] ebenfalls einer nahezu idealen Behaglichkeit. Eine geringe Verringerung des PMV-Wertes auf durchschnittlich -0,28 ist innerhalb von zwei Messungen in Szenario S 2 zu beobachten, während der Anteil an Unzufriedenen mit 6,6 % eine leichte Erhöhung erfährt. Somit ruft die einseitige Wärmeeinbringung im Raum ein etwas kälteres Empfinden hervor, welches sich dennoch absolut im Sollbereich befindet, wie der Grafik in Bild 63 zu entnehmen ist. Mit einem PMV-Wert von -0,17 nähert sich das Ergebnis der Messungen aus S 3, bei dem zwei senkrecht zueinanderstehende Heizwände (H1 und H2) aktiviert sind, wieder näher dem Median an, womit sich ein PPD-Wert von 5,74 % ergibt. Bei einem Vergleich des PMV/PPD-Index von Szenario S 4 mit 0,15 (PMV) bzw. 5,55 % (PPD) und Szenario S 5 mit -0,01 (PMV) bzw. 5,02 % (PPD) wird deutlich, dass eine geringere Energiezufuhr auch ausreichend ist, um eine annähernd ideale thermische Behaglichkeit zu erzeugen, sofern die Wärmeeinbringung von allen raumumschließenden Seiten erfolgt. So zeigt sich, dass bei Szenario S 5 das Messgerät mit einer Höhe von 60 cm genau im Einflussbereich der Heizwände liegt und damit die vergleichsweise beste thermische Behaglichkeit erreicht werden kann, während sich bei Szenario S 4 die Sonden unterhalb der aktivierten Heizsegmente befinden. (Daten aus [S7, S8, P6])



Bild 63: PMV/PPD-Index der untersuchten Szenarien (Daten aus [S7, S8, P6])

Zur Einordnung der Ergebnisse wird eine Vergleichsmessung innerhalb von 20 Minuten mit einem elektrischen Heizlüfter durchgeführt, deren PMV- bzw. PPD-Daten ebenso in Bild 63 eingetragen ist. Wie die Grafik zeigt, befinden sich die Werte PMV = -0,89 und PPD = 21,84 % außerhalb des Sollbereichs und weisen somit eine geringe thermische Behaglichkeit auf. Bei einem Vergleich der Messwerte wird deutlich, dass die Raumtemperatur mit 22,9 °C durchschnittlich 2,4 °C über der Strahlungstemperatur von 20,5 °C liegt. Bei S1-S5 ist ein Temperaturdelta von deutlich unter einem Grad Celsius, bei mittleren Temperatur (in Abhängigkeit des Szenarios) zwischen 22-24 °C, zu beobachten. Einen weiteren Unterschied, der zu einer vergleichsweise hohen Anzahl an Unzufriedenen führt, zeigt der Vergleich der Messwerte der Luftbewegung. Während bei Betrachtung von SI-S5 die Luftbewegung immer 0,02 m/s beträgt, liegt diese bei Erwärmen des Raumes mit einem Heizlüfter bei 0,12 m/s und ist damit deutlich höher. Eine weitere Auffälligkeit zeigt die Analyse der Werte zur relativen Feuchte. Während die relative Feuchte bei SI-S5 durchschnittlichen 30 % beträgt, wird bei dem Betreiben des Heizlüfters ein Wert von lediglich 19,1 % gemessen. Nach [174] sollte im Wohnraum die relative Luftfeuchtigkeit nicht 30 % unterschreiten, da dies Reizungen der Augen und Schleimhäute verursachen kann. (Daten aus [S7, S8, P6])

## 4.4 Zusammenfassung und Bewertung des praktischen Einsatzpotenzials

Die Untersuchungen der thermischen Behaglichkeit der mittels CAPM gefertigten Wandflächenheizungen finden in einem eigens errichteten Demonstrationshaus statt, welches dem Energieeffizienz-Standard (KfW 55) für industriell gefertigte Gebäude entspricht. Zur Analyse des Einflusses der lokal variierenden Wärmeeinbringung auf die Behaglichkeit werden alle vier Wände des Raumes mit Heizflächen ausgestattet, welche individuell aktiviert bzw. angesteuert werden können. Dafür wird jede 1,6 x 2,0 m<sup>2</sup> (Breite x Höhe) große Heizwand in vier Quadranten mit jeweils 200 Watt aufgeteilt, welche mit je einem programmierbaren Netzteil angesteuert werden kann. Die Zieltemperatur der Heizstruktur entspricht der Dauergebrauchstemperatur des Gipskartons mit 50 °C, während die Norm-Innentemperatur TU = 20  $^{\circ}$ C in die Berechnung zur erforderlichen Heizstrukturlänge mit eingeht. Somit wird zum Erreichen einer Wärmeleistung von 50 Watt pro Segment eine Gesamtlänge des Kupferauftrages von mindestens 3,6 m benötigt. Für die praktische Umsetzung wird die Länge jedoch auf ca. 4,0 m verlängert, um eine Kontaktierung mit angrenzenden Segmenten realisieren zu können.

Mit der erfolgreichen Inbetriebnahme des Systems kann schließlich die Funktionsfähigkeit plasmagenerierter Wandflächenheizungen unter realen Bedingungen nachgewiesen werden. Zur Bewertung der thermischen Behaglichkeit des Heizsystems werden fünf unterschiedliche Szenarien untersucht. Dafür ermittelt ein Behaglichkeitsmessgerät die erforderlichen Werte (Strahlungswärme, Zugluftrisiko, relative Feuchte, Absolutdruck, Lufttemperatur etc.) und gibt den entsprechenden PMV- bzw. PPD-Wert aus, welche ein quantifizierbares Maß für das Wärmeempfinden bzw. der Zufriedenheit der Menschen darstellen. Es konnte herausgearbeitet werden, dass das System bei dem Betreiben von nur einer Heizwand bereits eine annähernd ideale thermische Behaglichkeit erzeugen kann, welche durch einen Wärmeeintrag von allen raumumschließenden Wänden noch bis zum minimal erreichbaren Wert von Unzufriedenen auf 5,02 % (Szenario 5) gesteigert werden kann. Mit den in Kapitel 4 erzielten Ergebnissen kann die zweite Forschungsfrage, zur Erreichung einer ausreichenden thermischen Behaglichkeit mittels CAPM-hergestellter Flächenheizsegmente, positiv beantwortet werden.

# 5 Integrationspotenzial in der Fertighausherstellung

Die nachfolgend beschriebenen Untersuchungen bewerten das Integrationspotenzial der Plasmabeschichtungstechnik in den bestehenden Prozess zur Modulhausherstellung. Dafür wird zunächst anhand einer beispielhaften Heizlastberechnung die zu fertigende Heizstrukturlänge zur Versorgung eines fiktiven Gebäudes mit der benötigten Wärmeleistung ermittelt, um die erforderliche Prozesszeit bestimmen zu können. Weiterhin erfolgt eine Analyse der Arbeitsschritte bei der industriellen Modulhausfertigung zur Ermittlung einer geeigneten Position für die In-Line-Fertigung von Heizstrukturen mittels CAPM-Technik. Abschließend wird ein Modell zur prozessintegrierten Fertigung des Heizsystems im automatisierten Hausbau aufgestellt und bewertet.

## 5.1 Heizlastberechnung zur Wandflächenauslegung

Die Dimensionierung eines Heizsystems für einen Neubau, respektive Sanierungsfall, erfolgt allgemein über eine Heizlastberechnung nach der europäischen Norm DIN EN 12 831 [153]. Dabei ist die Norm-Heizlast als die Wärmeleistung definiert, die erforderlich ist, um die Norm-Innenraumtemperatur unter Norm-Außenbedingungen sicherzustellen. Als Norm-Innentemperatur wird für das private Wohnen eine Temperatur von +20 °C in Wohn- und Schlaf- sowie WC-Räumen angesetzt, während die Norm-Außentemperaturen regional unterschieden werden. Die jeweiligen Temperaturen sind in DIN EN 12831 Beiblatt 1 für diverse Städte aufgelistet [153].

Die Norm-Heizlast berechnet sich aus den Transmissions- sowie Lüftungswärmeverlusten. Erstere sind Verluste durch Wärmeleitung über die raumumschließenden Flächen nach außen und zu angrenzenden Räumen, welche eine niedrigere Temperatur aufweisen, während Lüftungswärmeverluste durch das Öffnen von Fenstern bzw. Türen auftreten. Die Summe dieser beiden Werte ergibt die Auslegungs-Heizleistung eines zu erwärmenden Raumes/Gebäudes und ist Grundlage für die Berechnung des benötigten Heizsystems. Eine exakte Berechnung der individuellen Heizlast eines Gebäudes ist sehr umfangreich, wie in Bild 64 ausführlich dargestellt ist, weshalb die Verarbeitung der Daten vorwiegend mit EDV-Unterstützung durchgeführt wird. [47] In die Berechnung fließen u. a. die

- ortsabhängigen meteorologischen Daten (Normaußentemperatur, Jahresmittel der Außentemperatur),
- die Werte der Norm-Innentemperaturen der einzelnen Räume,
- die wärmetechnischen Eigenschaften aller Bauteile für jeden Raum sowie
- die Norm-Transmissions- bzw. Lüftungswärmeverluste

ein [	47,	6,	61]	:
-------	-----	----	-----	---



Bild 64: Allgemeinen Heizlast-Auslegung für Gebäude [47, 153]

Die Berechnung der Heizlast muss demnach für jedes Gebäude individuell durchgeführt werden und ist mit hoher Komplexität verbunden. Um dennoch eine realitätsnahe überschlägige Annahme über die zu applizierende Heizstrukturlänge bei der Modulhausfertigung tätigen zu können, wird auf eine musterhafte, nach Norm DIN EN 12831 [153] durchgeführte Heizlastberechnung für ein freistehendes Gebäude zurückgegriffen [175]. Das Haus weist den KfW 55-Standard auf und entspricht damit der überwiegenden Energieeffizienzklasse derzeitig neu errichteter Konstruktionen in Holzständerbauweise. Der Berechnung für das fiktives Gebäude liegt eine Norm-Außentemperatur von -14 °C sowie eine Jahresmittel-Außentemperatur von 6,8 °C zugrunde, alle weiteren Daten sind in [175] aufgelistet. In Tabelle 2 ist eine Aufstellung der in [175] berechneten Heizlasten einzelner Räume mit der zugehörigen Größe sowie der jeweiligen Norminnentemperatur (nach DIN EN 12831 [153]) dargestellt. Die Wohnfläche der insgesamt acht Räume ergeben zusammen ca. 150 m<sup>2</sup> und entsprechen damit nach [176, 177] der durchschnittlichen Wohnfläche eines Einfamilienhauses in Deutschland. Mit der in Kapitel 4.1. berechneten durchschnittliche Leistung der plasmagenerierten Heizstruktur von 12,6 W/m wird die jeweilige für den Raum benötigte Länge bestimmt. Daraus ergeben sich die in Tabelle 2 dargestellten erforderlichen Heizstrukturlängen je Raum. Zur Erfüllung der Heizlast von ca. 6,9 kW für die Wohnfläche von ca. 150 m<sup>2</sup> wird demnach eine gesamte Heizstrukturlänge von 547 m benötigt.

Raum- bezeichnung	Norm-Innentemperatur in °C	Raumgröße in m <sup>2</sup>	Heizlast in W	Heizstrukturlänge in m
Wohnen	20	21,57	1.890	150,0
Küche – Essen	20	42,43	1.673	132,8
Schlafen	20	26,10	899	71,3
Bad	24	14,96	659	52,3
Flur	20	6,26	428	34,0
Arbeitsraum	20	10,44	344	27,3
Kinderzimmer	20	21,87	875	69,4
Abstellraum	20	6,72	125	9,9
Summe		150,35	6.893	547,0

Tabelle 2: Heizstrukturlänge in Abhängigkeit der jeweiligen Heizlast im Raum (Daten aus [175])

# 5.2 Fertigungsabfolge in der Modulherstellung

Das Prinzip der industriellen Fertigung von Gebäuden wurde bereits in Kapitel 2.1.3 und der detaillierte Aufbau einer Außen- bzw. Innenwand in Holzständerbauweise in Kapitel 3.1.1 vorgestellt. Nachfolgend wird die chronologische Abfolge der Modulherstellung anhand der konkret durchzuführenden Prozessschritte am Beispiel eines Fertighausherstellers vorgestellt. Die Erhebung der Daten durfte dankenswerterweise beim Fertighaushersteller Luxhaus Vertrieb GmbH & Co. KG [178] im Rahmen des Projektes "baustoffintegrierte Flächenheizung" [P6], gefördert mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung, erfolgen. Dabei wird der bei Luxhaus spezifische Fertigungsablauf durch eine vergleichende branchenübergreifende Betrachtung (u. a. [179, 180]) auf eine allgemeingültige Vorgehensweise abstrahiert. Bild 65 zeigt den vereinfachten schematischen Ablauf einer industriellen Fertigungslinie bei der Produktion von Wandmodulen in Holzrahmenkonstruktionsbauweise. In der Realität bestehen die Fertigungslinien je nach Hersteller meist aus mehreren (parallelen) Arbeitsstationen für einzelne Prozessschritte, um einerseits den Durchlauf zu erhöhen und andererseits keine Verzögerungen bei komplexen Wandmodulen hervorzurufen.



Bild 65: Schematische Darstellung des Fertigungsprozesses eines Wandmoduls in Holzrahmenbauweise (eigene Darstellung basierend auf Daten aus [178–180, S9])

Vor der individuellen Fertigung eines Gebäudes werden 3D-Modelle in CAD erstellt, anhand derer die Stücklisten der einzelnen Module und die entsprechenden Datensätze abgeleitet werden. Die so generierten Informationen werden an die Fertigung übermittelt, in der automatisiert der Holzzuschnitt für Balken, Fugensparren, Pfette etc. sowie das Bohren der Aussparungen für die Versorgungsleitungen an der Abbundanlage verrichtet werden (vgl. Bild 65, Station 1). Die konfektionierten Fichtenholzplanken werden im Rahmenbau auf Basis der Konstruktionszeichnung zusammengesetzt und verschraubt (Station 2). Aufgrund der beschränkten LaderaumDimension beim Transport der Wandmodule mit dem LKW sind die maximalen Maße bei den meisten Herstellern auf 12 m Länge und 3,5 m Breite begrenzt. Anschließend erfolgt die Beplankung mit bereits zugeschnittenen OSB-Platten, welche mittels Klammern und Leim fixiert werden. Zur Befüllung der Holzkonstruktion mit Dämmmaterial sowie zur Vorinstallation der Elektrik und der Versorgungsrohe, wird die komplette Wand mittels eines sogenannten Butterflyförderers um 180 ° gedreht. Bild 66 zeigt die bereits einseitig mit OSB-Platten beplankte und gewendete Holzrahmenkonstruktion, welche mittels Rollenförderer entlang der Fertigungslinie transportiert wird. [178–180, S9]



Bild 66: Aufbau der Holzrahmenkonstruktion [178, S9]

Im Weiteren erfolgt eine Differenzierung zwischen Außen- und Innenwänden. Die Innenwände werden auf der Oberseite mit OSB-Platten beplankt, um das Holzkonstrukt von beiden Seiten abzuschließen. Dafür wird eine Leim-Schicht als Verbindungsmedium auf die Holzkonstruktion aufgetragen, bevor die vorgefertigten OSB-Platten bündig aufgelegt werden. Zum Aushärten des Leims wird die Wand mittels Rollenförderer in eine sogenannte Einetagenoberkolbenpresse transportiert, in welcher die Aushärtung des Leims innerhalb von 20 Minuten erfolgt (Station 3). Auf den Außenwänden hingegen werden Holzfaserdämmplatten mittels Klammern bzw. Nägeln befestigt, da die Platten den thermomechanischen Belastungen in der Presse nicht standhalten würden.

Anschließend erfolgt in Station 4 sowohl bei den Außen- als auch Innenwänden auf den jeweils in den Raum gerichteten Seiten die Beplankung mit Gipskarton. Bei einigen Herstellern erfolgt die Verkleidung mit Gipskartonplatten jedoch auch erst auf der Baustelle, um Beschädigungen zu vermeiden. Ebenfalls in Station 4 werden in einem weiteren Arbeitsschritt automatisiert Aussparrungen für beispielsweise Steckdosen, Schalter sowie weitere Zugänge zur Durchführung von Installationsarbeiten in die Wände gefräst. Dies erfolgt unter Zuhilfenahme einer CNC-gesteuerten Portalkinematik, einer sogenannten Multifunktionsbrücke, die mit Fräs-, Säge- sowie Drehmeißelwerkzeugen ausgestattet ist. Dabei fährt die auf Schienen geführte Werkzeugmaschine über die auf dem Rollenförderer befindliche Wand in X- bzw. Y-Richtung und senkt das Werkzeug in Z-Richtung ab, um die entsprechenden Arbeiten durchzuführen. Ebenso erfolgt an dieser Station die Befestigung der Transporthaken an der Oberseite der Wand, um diese mittels Deckenkransystem aufnehmen und zur nächsten Station transportieren zu können. In die nun aufrecht gestellten Wände werden Fenster und Türen ein- sowie das Putzschichtsystems an den Außenwänden aufgebracht. Somit sind die Wände, nachdem sie transportgerecht verpackt wurden, für die Verfrachtung und den Aufbau auf der Baustelle vorbereitet. [178–180, S9]

#### 5.3 Möglichkeit zur Prozessintegration

Zur Auslegung der neu zu integrierenden Arbeitsstation in die Fertigungslinie bedarf es einer überschlägigen Berechnung der jeweiligen Beschichtungsdauer der Wände auf Basis der in Tabelle 2 (Kapitel 5.1) ermittelten Heizstrukturlängen. Dabei stellt, wie in Kapitel 5.2 beschrieben, die Presse mit einer Zykluszeit von 20 Minuten den Taktgeber der Prozesskette für die Integration der CAPM-Technik dar. Wie die Messungen in Kapitel 4.3.3 zeigen, bietet eine Beheizung aller raumumschließenden Flächen die höchste thermische Behaglichkeit. Deshalb erfolgt in der weiteren Betrachtung die vereinfachte Annahme, dass ein Raum, unabhängig der architektonischen Freiheiten, aus vier Wänden besteht, auf welche die zur Erfüllung der erforderlichen Heizlast benötigten Heizflächen gleichmäßig verteilt sind. Nach den Ergebnissen aus Kapitel 4.1.2 (Anpassung der Prozessparameter auf Kupferpulver Rogal Kupfer GK 0/50 der Firma Schlenk Metallic Pigments GmbH) wird ein optimales Beschichtungsergebnis bei einer Plasmastrukturierung von Gipskarton bei acht Überfahrten und einer Geschwindigkeit von 100 mm/s (die Geschwindigkeitsreduktion des Roboters beim Strukturieren der Radien wird aufgrund des geringes Einflusses vernachlässigt) erreicht, womit sich die Dauer zum Fertigen eines Meters Heizstruktur auf 80 Sekunden beläuft. In Tabelle 3 sind die benötigte Heizstrukturlänge für den gesamten Raum bzw. die jeweilige Wand und die entsprechende Beschichtungsdauer dargestellt. Die Ergebnisse der Berechnungen in Tabelle 3 zeigen, dass eine Plasmastrukturierung mit nur einer Düse innerhalb der geforderten Taktzeit von 20 min nicht in allen Räumen möglich ist. Aufgrund des modularen sowie kompakten Aufbaus der Plasmabeschichtungslage ist es möglich mehrere Beschichtungsdüsen parallel zu betreiben, wie in Bild 67 schematisch dargestellt wird. Werden dagegen die Anzahl der Beschichtungsdüsen auf drei erhöht, können die geforderten Längen der Heizstrukturen innerhalb des vorgegebenen Prozessfensters gefertigt werden. Um eine Innenwand innerhalb der Taktzeit von beiden Seiten mit Heizstrukturen versehen zu können, ist die Anzahl der Düsen entsprechend zu verdoppeln. Wird die Fertigungsabfolge der Heizwände jedoch optimiert, können innerhalb eines Taktes mehrere Heizwände beschichtet und die Anzahl der Düsen damit entsprechend reduziert werden.

Raum-	Heizstrukturlänge/	Heizstrukturlänge/	Beschichtungsdauer pro Wandmodul in min		
bezeichnung	Raum in m	wandmodul in m	1 Düse	3 Düsen	
Wohnen	150,0	37,5	50,0	16,7	
Küche – Essen	132,8	33,2	44,3	14,8	
Schlafen	71,3	17,8	23,7	7,9	
Bad	52,3	13,1	17,5	5,8	
Flur	34,0	8,5	11,3	3,8	
Arbeitsraum	27,3	6,8	9,1	3,0	
Kinderzimmer	69,4	17,4	23,2	7,7	
Abstellraum	9,9	2,5	3,3	1,1	
Summe	547,0	136,8	182,4	60,8	

Tabelle 3: Beschichtungsdauer zum Fertigen der geforderten Heizstrukturlänge

Der prinzipielle Aufbau der Plasmabeschichtungsanlage sowie die für die Plasmastrukturierung notwendigen Komponenten wurden bereits in Kapitel 3.2.1 vorgestellt. Für die industrielle Anwendung bedarf es jedoch einer Adaption des Prozesses von der Forschungsumgebung auf die beim Fertighaushersteller vorherrschenden Bedingungen. Der größte Unterschied ist in der Handhabung zu identifizieren. Innerhalb der Grundlagenuntersuchungen wurde auf eine Forschungsanlage zurückgegriffen, mit der Gipskartonplatten mit einem Abmaß von maximal 400 x 500 mm<sup>2</sup> in einer Bearbeitungszelle beschichtet werden können. Dabei führt ein 6-Achs-Gelenkarmroboter, welcher eine zulässige Gesamttraglast von 5 kg aufweist, die Probe unter der fest installierten Düse. Industriell gefertigte Wände dagegen weisen ein Abmaß von ca. 12 x 3,5 m<sup>2</sup> und ein Gewicht von ca. 700-800 kg [179] auf. Anstatt des Führens der Probe bietet sich daher die Manipulation der Düse über dem stationären Wandmodul an.

Ein entsprechendes Umsetzungskonzept ist in Bild 67 schematisch dargestellt, das die mittels Portalkinematik bzw. Multifunktionsbrücke geführten Plasmabeschichtungsdüsen über dem stationären Wandmodul zeigt.

Dabei bietet es sich an den Pulverförderer in der Nähe der Düse unterzubringen, um Agglomeration durch lange Zuführschläuche zu vermeiden. Wird das Fassungsvermögen des Pulverspeichers zudem entsprechend dimensioniert (Verbrauch ca. 15 kg/h), können so ausgedehnte Flächen mit minimalem Rüstaufwand strukturiert werden. Ebenso können die Düse mit ca. 1 kg sowie der Plasmaerzeuger mit ca. 15 kg [181] aufgrund ihres geringen Gewichtes durch die Portalkinematik problemlos mitgeführt werden. Die Energieversorgung des Systems erfolgt über ein entsprechend konfektioniertes Kabel, das über die Portalkinematik mitgeführt wird. Um die bewegte Masse möglichst gering zu halten, sollte das Prozessgas (50 Liter Gasflasche  $\triangleq$  80 kg) mit einem Zuführschlauch in die Anlage befördert werden. Weiterhin bietet sich aufgrund des Durchflusses von 40 l Prozessgas pro Minute eine Versorgung mittels Bündel bzw. Tanks an, da diese einerseits meist zu einem günstigeren Preis angeschafft werden können (vgl. Kapitel 6) und zum anderen die Wartungsintervalle für den Austausch reduziert werden können. Wie in Bild 67 skizziert, ist in der Nähe der Beschichtungsdüsen eine Absaugvorrichtung zum sicheren Betreiben des Systems installiert, um den Pulver-Overspray zuverlässig abzuführen.



Bild 67: Schematischer Aufbau einer Multifunktionsbrücke zur In-Line-Plasmastrukturierung

Bei Betrachtung der schematischen Darstellung der Fertigungslinie im vorherigen Unterkapitel (vgl. Bild 65) kann eine In-Line-Plasmabeschichtung erst nach der Beplankung mit Gipskartonplatten in Arbeitsschrittfolge 4 erfolgen. Zudem sollte in Anbetracht einer hohen Reproduzierbarkeit die Beschichtung der Wände noch im liegenden Zustand durchgeführt werden, da die Wände nach der Aufnahme mit dem Deckenkransystem freischweben und somit keine ausreichende Stabilität aufweisen. Dies kann zu Abweichungen im Beschichtungsabstand und somit zu einem inhomogenen Pulverauftrag führen, was ein ungleichmäßiges Heizverhalten verursacht. Die potenziell beste Integration der Plasmabeschichtung ist demnach in Station 4 zu verorten, indem das Plasmabeschichtungssystem in die vorhandene Portalkinematik eingebaut wird. Jedoch beinhaltet, wie in Bild 65 gezeigt, diese Station je nach Komplexität des Wandmodules viele Arbeitsinhalte. Somit kann mit Hilfe der digitalen Planung die Fertigungsreihenfolge der unterschiedlich arbeitsintensiven Wände aufeinander abgestimmt werden, so dass eine ideale Auslastung der Plasmabeschichtungsanlage gewährleistet werden kann. Zudem sind Außenwände nicht von der Taktzeit der Presse abhängig, wodurch die Planung weiterhin erleichtert wird.

### 5.4 Zusammenfassung und Bewertung der Inline-Plasmastrukturierung

Für die erfolgreiche Integration der CAPM-Technik in eine Produktionslinie zur Modulhausherstellung müssen die benötigten Heizstrukturen in der vorgegebenen Taktzeit gefertigt werden können. Die Auslegung des Heizsystems und damit die Bestimmung der erforderlichen Strukturlängen erfolgt anhand einer Heizlastberechnung, welche für jede Immobilie nach Norm individuell angefertigt werden muss. Faktoren sind die Transmissions- und Lüftungswärmeverluste, welche u. a. aus der geografischen Lage sowie der Energieeffizienzklasse eines Hauses bestimmt werden. Für die überschlägige Dimensionierung der Heizstrukturen wird eine musterhafte Heizlastberechnung eines KfW 55-Gebäudes herangezogen. Anhand der Vorgaben der raumspezifischen Heizlasten kann die jeweils mindestens benötigte Heizstrukturlänge anhand der im vorherigen Kapitel ermittelten normierten Leistung von 12,6 W/m berechnet werden. Zur Erfüllung der erforderlichen Heizlast von ca. 6,9 kW für ein ca. 150 m<sup>2</sup> großes, freistehendes Gebäude werden insgesamt ca. 547 m Plasmastruktur benötigt.

Es kann innerhalb der Betrachtung eine geeignete Arbeitsstation identifiziert werden, in der eine Integration der CAPM-Technologie möglich wäre. Voraussetzung dabei ist, dass die Gipskartonwände bereits installiert sind und sich die Wandmodule noch auf dem Montageband befinden, um eine ausreichende Prozessstabilität gewährleisten zu können. Die Berechnungen der jeweiligen Beschichtungsdauer für jede Wand zeigen, dass nur mit drei (bzw. 6 für Innenwände mit beidseitig aufgebrachten Heizstrukturen) gleichzeitig betriebenen Beschichtungsdüsen innerhalb der im Beispiel gegebenen Taktzeit von 20 Minuten die erforderliche Heizstrukturlänge appliziert werden kann. Aufgrund der Dimension und des Gewichtes der Wandmodule wird eine Führung der Düsen über der stationären Wand empfohlen, was durch den modularen Aufbau der CAPM-Technologie ohne zu erwartende Herausforderungen realisiert werden kann. Ein möglicher Aufbau der Beschichtungsstation mit allen benötigten Komponenten konnte in einer schematischen Darstellung innerhalb der vorhergehenden Ausführungen illustriert werden. Mit den in diesem Kapitel durchgeführten Untersuchungen kann die dritte Forschungsfrage, zur möglichen Integration der CAPM-Technologie in den industriellen Fertigungsprozess von Gebäudesegmenten, positiv beantwortet werden.

# 6 Bewertung der Wirtschaftlichkeit

Die Vorteile einer plasmagenerierten Wandflächenheizung gegenüber derzeit überwiegend eingesetzter Heizsysteme im Kontext des industriellen Hausbaus wurden bereits umfassend erläutert. Neben der technischen Funktionalität entscheidet aber vor allem auch der wirtschaftliche Aspekt darüber, ob sich ein System bzw. eine Technologie am Markt etablieren kann. Daher werden die Aufwendungen zur Fertigung funktionsfähiger plasmagenerierter Wandflächenheizsysteme sowie aller benötigten Komponenten erfasst und mittels einer überschlägigen Kalkulation die Gesamtkosten ermittelt. Zur Erfüllung der klimapolitischen Rahmenbedingungen sind moderne Raumwärmeerzeugungsanlagen komplex aufgebaut und umfassen neben der Wärmequelle noch weitere Komponenten wie beispielsweise PV-/Solar-Anlagen sowie elektrische und thermische Speicher. Deshalb werden die für das plasmabasierte Wandflächenheizsystem anfallenden Herstellkosten in die Daten einer vorliegenden Studie zum Heizsystemvergleich eingebettet, um vergleichende Aussagen über eine monetäre Einordnung der Anschaffungs- sowie Betriebskosten tätigen zu können.

# 6.1 Überschlägige Kalkulation der Anschaffungskosten

Als Grundlange zur überschlägigen Kalkulation der Anschaffungskosten einer plasmagenerierten Wandflächenheizung wird auf die in Kapitel 5.1 musterhaft vorgestellte Heizlastberechnung [175] nach Norm DIN EN 12831 [153] für ein freistehendes Gebäude mit einem KfW 55-Standard zurückgegriffen. Die Basis zur Kostenermittlung stellt die in Tabelle 2 dargestellte erforderliche Heizstrukturlänge von insgesamt 547 m dar, welche zur Erfüllung der Heizlast von ca. 6,9 kW für die Wohnfläche von ca. 150 m<sup>2</sup> benötigt wird.

Neben den Heizstrukturen werden noch weiter Komponenten wie eine Gleichstromquelle, Regelungstechnik sowie elektrische Verbindungen zur Energieversorgung benötigt, wie in Bild 68 schematisch skizziert ist. Optional kann weiterhin der zum Heizen benötigte Strom über eine PV-Anlage eingespeist und in einem elektrischen Speicher zwischengelagert werden, dessen monetäres Auswirken auf die Gesamtkosten in Kapitel 6.2 betrachtet wird. Ebenso gilt es die Installationskosten des Heizsystems in der überschlägigen Kalkulation der Anschaffungskosten zu berücksichtigen. Nachfolgend sind die jeweiligen Positionen dargestellt, aus welchen die gesamten Anschaffungskosten ermittelt werden:

- Herstellkosten plasmabasierter Heizstruktur
- Anschaffungskosten Gleichstromquelle
- Aufwendungen f
  ür Heizsystemregelung
- Installationskosten



Bild 68: Aufbau des Gesamtsystems zum Betreiben einer elektrischen Wandflächenheizung

# 6.1.1 Herstellkosten plasmabasierte Heizstruktur

Die Ermittlung der Aufwendungen zur Fertigung einer Heizstruktur erfolgt unter Berücksichtigung aller an der Beschichtung beteiligten Prozesseinheiten wie der Handhabungsstation, der Plasmabeschichtungsanlage sowie dem Absaugungssystem. Als Basis zur Berechnung der Kosten zur Fertigung von einem Meter Heizstruktur werden die jeweiligen Maschinenstundenkosten berechnet. Diese bestehen nach [182] aus Anschaffungswert, betrieblicher Nutzungsdauer, Raumbedarf, elektrischem Anschlusswert, Hilfs- und Betriebsstoffe sowie Instandhaltung und Werkzeugkosten. Zu den Angaben der Berechnung zählen u. a. der kalkulatorische Zinssatz sowie die Platz- und Stromkosten. Alle zur Berechnung verwendeten Daten sind in Tabelle 4 zusammengefasst.

Zur Berechnung der Kosten für die Handhabungsstation zur Fertigung der Heizstruktur wird auf eine Amortisations-Rechnung der Firma WEIN-MANN Holzbausystemtechnik GmbH [183] zurückgegriffen, da aufgrund der nur fiktiven Integration selbst keine Daten erhoben werden können. Für die Aufnahme der Modulwände bzw. der CAPM-Anlage findet eine wie in Kapitel 5.3 beschriebene und in Bild 67 schematisch dargestellte Multifunktionsbrücke Verwendung. Laut Angaben des Herstellers fallen zur Bearbeitung eines Quadratmeters Wand Kosten in Höhe von  $6,27 \notin /m^2$ (inklusive aller Kosten wie Maschineninvestition, Personal...) an. Bei einer Produktionskapazität von 1.944 m<sup>2</sup> pro Monat ergeben sich bei Anwendung der betrieblichen Nutzungszeit von 1.600 h/Jahr (Berechnung im

# nachfolgenden Absatz) ein Maschinenstundensatz von ca. 91,5 €/h (bzw. 12.167 €/Monat). [183]

Tabelle 4: Berechnung des Maschinenstundensatzes zur industriellen Heizstrukturherstellung mittels CAPM (nach [182])

	Grunddaten der Maschine	Einheit	Formel	Handhabungs- station	Plasmabeschichtungsanl	age	Absauganlage	Summe	
1	Anschaffungswert	e			95.000		20.000		
2	Preisindex	%		Inbegriffen*	106,3		106,3		
3	Betriebliche Nutzungsdauer	Jahre			8,0		8,0		
4	Betriebliche Nutzungszeit	h/Jahr		1.600	1.600		1.600		
5	Raumbedarf	m <sup>2</sup>		22	2		2		
6	Elektrischer Anschlusswert	kW		Inbegriffen*	1,3 (gemessen)		3,6 (gemessen)		
7	Hilfs- und Betriebsstoffe	€/Monat		(*nach [183] fallen zur Bearbeitung eines m <sup>2</sup> Wand Kosten von 6,27 €/m <sup>2</sup> an, bei 1.944	Beschichtung mit "plasma tronic <sup>®</sup> " Kupferpulver Beschichtung mit "Rogal Kupfer GK 0/50" Kupferpulver	826,5 19.694,3 2.201,0 4.471,3	88,8		
8	Instandhaltung	%/Jahr		m²/Monat	3 %		3%		
9	Werkzeugkosten	€/Monat		Produktions- kapazität	200		-		
			]	Daten zur Berechn	ung				
10	Kalkulationszinssatz p	%		Inbegriffen*	5,4		5,4		
11	Platzkosten	€/(m² x Jahr)		39.5					
12	Stromkosten	€/kWh		Inbegriffen*	0,18	0,18			
			]	Fixe Maschinenkos	ten				
13	Kalkulatorische Abschreibung	€/h	(1)x(2)/(3)x(4)	Inbegriffen*	7,9		1,7		
14	Kalkulatorische Zinsen	€/h	0,5x(1)x(10)/(3)x(4)	moegrinen	0,2		0,04		
15	Raumkosten	€/h	(5)x(11)/(4)	0,55	0,05	0,05			
			Va	riable Maschinenk	osten				
16	Fertigungslöhne	€/h		Inbegr	iffen in Pauschale Handhabungsstation				
17	Betriebskosten	€/h	12x(7)/(4)		"plasma tronic <sup>e</sup> " "Rogal Kupfer GK 0/50"	153,9 49,6	0,7		
18	Werkzeugkosten	€/h	12x(9)/(4)	Inbegriffen*	1,5		-		
19	Instandhaltung	€/h	(1)x(2)x(8)/(4)	]	1,9		0,4		
20	Stromkosten	€/h	(6)x(12)		0,2		0,6		
Mas	chinenstundensatz gesamt ir	n € ("plasma	tronic <sup>®</sup> ")	91,5	165,7		3,5	260,6	
Mas	chinenstundensatz gesamt in	€ ("Rogal K	upfer GK o/5o")	91,5	61,4		3,5	156,4	
Kost	en in $\epsilon$ /m Heizstruktur ("pla	sma tronic®	')	2,5	4,6		0,1	7,2	
Kost	en in €/m Heizstruktur ("Rog	gal Kupfer G	K 0/50")	2,0	1,4		0,1	3,5	

Der Anschaffungswert der Plasmabeschichtungsanlage wird auf Basis von Erfahrungswerten zur Anschaffung vergleichbarer Produkte überschlägig auf 95.000 € geschätzt, während die Absaugungsanlage auf 20.000 € beziffert wird. Der Erzeugerpreisindex für Maschinen in Deutschland, welcher im Januar 2021 veröffentlicht wurde und auf der Homepage von Statista online einsehbar ist, lag im Jahr 2020 bei 106,3 % [184]. Die betriebliche Nutzungsdauer wird nach AfA-Tabelle für den Wirtschaftszweig "Maschinenbau" (Sonstige Be- und Verarbeitungsanlagen) jeweils auf acht Jahre festgelegt [185].

Nach [182] besitzt ein Jahr nach Abzug des Betriebsurlaubs und der Feiertage 218 Soll-Lauftage. Bei 7,5 Stunden Betrieb der Anlagen je Tag (0,5 h/Tag für Wartung: Befüllung mit Kupferpulver, Austausch Gasbündel, Reinigung etc.) ergeben sich somit 1.635 Soll-Laufstunden, womit nach Subtraktion von 35 h/Jahr für Wartungsarbeiten (Austausch Elektroden, Überprüfung der Komponenten) eine betriebliche Nutzungsdauer von 1.600 h/Jahr (bzw. 133,3 h/Monat) angesetzt wird. Der Wartungs- bzw. Rüstungsaufwand zum Betreiben der Absauganlage beschränkt sich auf den Austausch des Wassers. Dieser kann in dem für die Plasmabeschichtungsanlage angegebenen Wartungszeitraum erledigt werden, womit bei der Absauganlage ebenso eine betriebliche Nutzungsdauer von 1.600 h/Jahr eingeplant wird. Zusätzlich fließt der Raumbedarf für die Multifunktionsbrücke nach [186] mit 22 m<sup>2</sup> in die Berechnung mit ein. Die Plasmabeschichtungsanlage selbst ist in der Multifunktionsbrücke integriert, so dass nur ein Platzbedarf für zwei Stickstoffbündel (davon ein Austauschbündel) mit je 0,77 m<sup>2</sup> (plus Zugang) [187] mit insgesamt 2 m<sup>2</sup> in die Rechnung aufgenommen wird. Ebenso sind zwei Quadratmeter Grundfläche (inkl. Zugang) für die Absauganlage vorgesehen. Das Institut der deutschen Wirtschaft Köln e.V. hat in einer Kostenerhebung für Produktionshallen, welche primär der Herstellung von Waren dienen, beheizt sind und über ebenerdige Rolltore, Tageslicht und teilweise Krananlagen verfügen, eine monatliche Durchschnittsmiete von ca. 3,29 Euro/m<sup>2</sup> (Jahr: 39,48 €/m<sup>2</sup>) (Daten aus 2017) ermittelt [188].

Elektrische Energie wird in der Plasmabeschichtungsanlage zur Plasmaerzeugung, zur Pulverförderung sowie für die Regelungs- und Überwachungselektronik als auch für die Absauganlage und die Handhabungsstation benötigt. Während die elektrische Leistung für die Handhabungsstation im Preis pro Quadratmeter Oberflächenbearbeitung enthalten ist, wird der elektrische Anschlusswert der Plasmabeschichtungsanlage bzw. der Absauganlage während der Beschichtung gemessen. Die Ermittlung erfolgt unter Zuhilfenahme des Energiemesskoffers SENSTRON PAC4200 der Firma Siemens AG [189]. Die Aufnahme der Daten findet in einem Zeitintervall von 0,1 s statt. Im hochgefahrenen Zustand weist die Plasmazelle eine Grundlast von ca. 290 W auf (Bild 69).



Bild 69: Elektrische Leistung der Plasmazelle (Daten aus [S10, S11])

Wird das Plasma gezündet, stellt sich nach einer Stabilisierungsphase von ca. 10 s ein Wert von ca. 1,3 kW ein. Bei Aktivierung der Pulverzuführung

wird keine Energieänderung festgestellt. Die grafische Auswertung der Messergebnisse ist in Bild 69 illustriert. (Daten aus [S10, S11])

Um das zur Bindung des überschüssigen Pulvers benötigte Wasser in Bewegung zu setzen, benötigt die Absaugungsanlage beim Hochfahren des Systems eine kurzzeitige (ca. 150 Sekunden) höhere elektrische Leistung von annähernd 5 kW, während sich im Anschluss die Dauerlast auf ein relativ konstantes Niveau von ca. 3,6 kW einpendelt, wie der Grafik aus Bild 70 zu entnehmen ist. (Daten aus [S10, S11])



Bild 70: Elektrische Leistung der Absaugungsanlage (Daten aus [S10, S11])

Bei einer Leistung von  $P_{Plasmazelle}$  (1,3 kW) +  $P_{Absauganlage}$  (3,6 kW) = 4,9 kW ergeben sich bei einem Industrie-Netto-Strompreis von 0,18  $\in$  pro Kilowattstunde (Daten aus 2021, Statista [190]) Stromkosten für die Plasmabeschichtungsanlage sowie die Absaugung von insgesamt 0,88  $\in$ /h (bzw. 118  $\in$ /Monat).

Da sich die Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten nur auf die Plasmabeschichtungs- bzw. Absauganlage beziehen und diese ohne nennenswerten Materialeinsatz durch das Personal während der dafür eingeplanten Zeitfenster durchgeführt werden können, wird ein jährlicher Wert von 3 % vom Wiederbeschaffungswert angenommen. Die Werkzeugkosten beziehen sich bei der Plasmabeschichtungsanlage auf die Düse sowie auf die darin enthaltenen Elektroden, welche aufgrund von Verschleiß regelmäßig ausgetauscht werden müssen, wofür monatliche Aufwendungen von ca. 200  $\in$ (Erfahrungswert) kalkuliert werden. Der kalkulatorische Zinssatz für das Jahr 2021 wird nach [191] mit 5,4 % berücksichtigt [192].

Als Hilfs- und Betriebsstoffe fließen zur Plasmabeschichtung das Prozessgas und das Metallpulver sowie das Wasser für den Nassabscheider in die Berechnung mit ein. Das Prozessgas dient einerseits zur Erzeugung der

Plasmaflamme und andererseits als Trägergas zum Transport des Metallpulvers zur Düse. Zur Durchführung der Parameterstudie in Kapitel 3.3.1 wird Stickstoff mit einer Reinheit von ≥99,99 mol-% und einem Durchlauf von 45 l/min (2.700 l/h) eingesetzt. Für das alternativ verwendete Pulver "Rogal Kupfer GK 0/50", welches aufgrund der sphärischen Partikelform eine geringere Oberfläche im Gegensatz zu der spratzigen Gestalt des Materials "plasma tronic<sup>®</sup>" aufweist, wird für ein besseres Aufschmelzverhalten eine höhere Prozesstemperatur benötigt. Diese wird durch die Zugabe von Formiergas (Mischung aus 95 % Stickstoff und 5 % Wasserstoff) realisiert. Dabei wird für die Beschichtung ein Prozessgas-Durchfluss von 25 l/min (1.500l/h) Stickstoff und 15 l/min (900 l/h) Formiergas verwendet. Die anfallenden Kosten für den Bezug dieser Gase sind einerseits herstellerabhängig und variieren andererseits je nach Bestellmenge. Für die Versuchsdurchführungen in dieser Arbeit wird ein Bündel Stickstoff, bestehend aus 12 Einzelflaschen, mit einem Fülldruck von 300 bar verwendet, welches einem Volumen von 157 m<sup>3</sup> entspricht und einen Netto-Anschaffungspreis von ca. 360 € aufweist. Für die Verwendung einer Flasche Formiergas (50 l, 200 bar, 9,5 m<sup>3</sup>) entstehen Kosten in Höhe von ca. 138 €. Bei Verwendung des Materials "plasma tronic®" fallen somit Stickstoff-Kosten in Höhe von 6,20 €/h (826,5 €/Monat) an. Zur Verarbeitung des Pulvers "Rogal Kupfer GK 0/50" entstehen Kosten für Stickstoff von 3,44 €/h, zu welchen 13.07 €/h für Formiergas addiert werden, womit sich die Prozessgaskosten auf insgesamt 16,51  $\overline{\epsilon}/h$  (2.201  $\overline{\epsilon}/Monat$ ) belaufen.

In Kapitel 3.1.1 wird für die Parameterstudie auf das vom Hersteller der Plasmabeschichtungsanlage (Fa. Relyon Plasma GmbH) empfohlene Kupferpulver "plasma tronic®" zurückgegriffen, das mit einem Nettopreis von 256,50 € pro Kilogramm (Stand 01/2017) in die Berechnung Eingang findet. Mangels weiterer Verfügbarkeit und aufgrund wirtschaftlicher Aspekte wurde abweichend das Beschichtungspulver "Rogal Kupfer GK 0/50" der Firma Schlenk Metallic Pigments GmbH eingesetzt, das zur Fertigung der Wandheizungssegmente für das Demonstrationshaus (vgl. Kapitel 4) verwendet wurde. Das Material wird mit einem Netto-Preis von 35 €/kg in der Kostenrechnung berücksichtigt. Die Bestimmung des Pulvermassenstroms des Kupfers erfolgt analog nach der in Kapitel 3.2.2 vorgestellten Messung. Für das in Kapitel 3.3.1 ermittelte Parametersetup des Materials "plasma tronic<sup>®</sup>" wird ein Materialdurchfluss von 160 mg/s (576 g/h) (vgl. Bild 27) gemessen, während für die in Kapitel 4.1.2 dargestellten Beschichtungsparameter für "Rogal Kupfer GK 0/50" ein Durchsatz von ca. 263 mg/s (947 g/h) [S6] ermittelt wird. Die Kosten für das Beschichtungsmaterial

belaufen sich somit auf 148 €/h für "plasma tronic®" bzw. 33 €/h für "Rogal Kupfer GK 0/50".

Für den Betrieb des Nassabscheiders wird eine Füllmenge von ca. 200 Liter Wasser benötigt, das einerseits angeschafft und andererseits aufgrund der Verunreinigung mit Metallpartikeln als Sondermüll entsorgt werden muss. Aus hygienischen sowie funktionalen Gründen ist der Austausch der Wassermenge in einem regelmäßigen Turnus von drei Monaten erforderlich. Der Netto-Arbeitspreis (ohne Grundpreis etc.) der Stadtwerke Erlangen für 1 m<sup>3</sup> Wasser ist auf 2,065 € (Stand 02/2021 [193]) festgesetzt, womit für eine komplette Füllung der Anlage ca. 0,41 € an Kosten anfallen. Für die Sondermüll-Entsorgung des mit Partikeln versetzten Wassers ist ein Nettobetrag von ca. 265 € pro Entleerung zu entrichten. Die Ausgaben lassen sich somit mit 0,67 €/h bzw. 88,8 €/Monat beziffern.

Bei Betrachtung der fixen sowie variablen Maschinenkosten in Tabelle 4 fällt auf, dass die Betriebskosten der Plasmabeschichtungsanlage den größten Kostenfaktor darstellen. Allen voran sind diesbezüglich die Aufwendungen für das Kupferpulver sowie das Prozessgas zu nennen. Während bei der Plasmabeschichtung mit "plasma tronic<sup>®</sup>" mit reinem Stickstoff die geringeren Prozessgaskosten (ca. 827 €) pro Monat anfallen, sind ca. 19.694 €/Monat für das Metallpulver aufzuwenden. Mit ca. 4.471 € pro Monat sind die Anschaffungskosten für das Pulver "Rogal Kupfer GK o/50" deutlich geringer, allerdings entstehen durch die Verwendung des Formiergases vergleichbar höhere Prozessgaskosten. In Summe ist somit ein Maschinenstundensatz von ca. 261 €/h bei Verwendung des Materials "plasma tronic<sup>®</sup>"</sup> aufzuwenden, während der geringe Anschaffungspreis des "Rogal Kupfers GK o/50" zu niedrigeren Kosten von 156 €/h führt.

Zur Veranschaulichung werden die aufzuwendenden Kosten zur Fertigung einer Heizstrukturlänge von einem Meter sowohl für das Beschichtungspulver "plasma tronic<sup>®</sup>", als auch für "Rogal Kupfer GK o/50" dargestellt. Die Beschichtungsgeschwindigkeit bei dem in Kapitel 3.3.1 ermitteltem Parametersetup für "plasma tronic<sup>®</sup>" beträgt 60 mm/s bei sechs Überfahrten, womit sich eine Fertigungsdauer von 100 s/m Heizstruktur ergibt. Mit einer Beschichtungsgeschwindigkeit von 100 mm/s und acht Überfahrten werden zur Verarbeitung des Materials "Rogal Kupfer GK o/50" 80 s benötigt, um einen Meter Plasmastruktur herzustellen. Bei entsprechender Skalierung entstehen somit Kosten von ca. 7,2  $\in$ /m bei Verwendung von "plasma tronic<sup>®</sup>" bzw. 3,5  $\in$ /m bei Gebrauch des preisgünstigeren Materials "Rogal Kupfer GK o/50", wie in Tabelle 4 dargestellt. Die Kosten für das in Kapitel 5.1 vorgestellte musterhafte Gebäude zur Fertigung der benötigten Heizstrukturen sind in Tabelle 5 zusammengefasst und belaufen sich bei Verwendung des Materials "plasma tronic<sup>®</sup>" auf insgesamt ca. 3.939 €, während bei Verwendung des günstigeren Pulvers "Rogal Kupfer GK 0/50" Kosten in Höhe von ca. 1.915 € anfallen.

Daum	Heizlast	eizlast Usigstrukturlänge Kost		struktur in €
bezeichnung	in W	in m	"plasma tronic®"	"Rogal Kupfer GK o/50"
Wohnen	1.890	150,0	1.080,0	525,0
Küche – Essen	1.673	132,8	956,2	464,8
Schlafen	899	71,3	513,4	249,6
Bad	659	52,3	376,6	183,1
Flur	428	34,0	244,8	119,0
Arbeitsraum	344	27,3	196,6	95,6
Kinderzimmer	875	69,4	499,7	242,9
Abstellraum	125	9,9	71,3	34,7
Summe	6.893	547,0	3.938,6	1.914,7

Tabelle 5: Überschlägig veranschlagte Gesamtkosten zur Fertigung der Heizstrukturen für das in Kapitel 5.1 vorgestellte Beispielgebäude

# 6.1.2 Gleichstromquelle

Im Idealfall erfolgt die Energieversorgung der Wandflächenheizung direkt, wie in Bild 68 schematisch illustriert, mittels Gleichstrom (DC) aus einem hausinternen Stromspeicher, welcher aus am Haus installierten regenerativen Energieerzeugungsanlagen gespeist wird. Als Speicher bieten sich Lithium-Ionenbatterien mit einer Klemmenspannung von 48 V (DC) an [194], welche sich mit einer Schutzkleinspannung (SELV – safty extra low voltage) ohne Gefahren zum Betreiben der Flächenheizsegmente eignen. Steht kein entsprechender elektrischer Speicher oder eine alternative Gleichspannungsquelle zur Verfügung, bietet sich die Installation eines AC/DC Wandlers an, der 230 V (AC) Eingangsspannung in 48 V (DC) Gleichspannung umwandelt. Entsprechende Schaltnetzteile sind in verschiedenen Leistungsklassen wie beispielsweise 960 W (205 €) [195], 480 W (89 €) [196], 240 W (44 €) [197] sowie 120 W (25 €) [198] erhältlich, können direkt auf einer DIN-Hutschiene montiert werden, weisen berührgeschützte Schraubanschlüsse auf, haben einen Überlastschutz durch Strombegrenzung und sind geschützt gegen Kurzschluss, Überlast sowie Überspannung. Nach den Datenblättern [195-198] weisen die Netzteile einen Wirkungsgrad zwischen 89 % und 94 % auf, welcher bei der Festlegung der

jeweilig benötigten Anzahl der Netzteile zur Erfüllung der erforderlichen Heizleistung in Tabelle 6 jeweils berücksichtigt ist. Zur Deckung des Leistungsbedarfs der Heizstrukturen von insgesamt 6,9 kW und zum Ausgleich des Energieverlustes aufgrund der Verlustleistung werden, wie in Tabelle 6 dargestellt, elf Netzteile benötigt, welche einen Gesamt-Netto-Preis von insgesamt 1.682  $\in$  aufweisen.

Tabelle 6: Aufwendungen	für	Netzteile	für	das i	n Kapitel	5.1	vorgestellte	Beispielgebä	äude
([195–198])									

Raum-	Erforderliche	Anzahl Berücksio	Summe	Summe			
bezeichnung	Heizlast in W	902 W (960 W)	444W (480 W)	216 W (240 W)	107 W (120 W)	in W	in €
Wohnen	1.890	2			1	1.911	435
Küche – Essen	1.673	2				1.804	410
Schlafen	899	1				902	205
Bad	659	1				902	205
Flur	428		1			444	89
Arbeitsraum	344		1			444	89
Kinderzimmer	875	1				902	205
Abstellraum	125			1		216	44
Summe	6.893 W	6.314 W	888 W	216 W	107 W	7.525	1.682

#### 6.1.3 Heizsystemregelung

Neben der thermischen Behaglichkeit spielt ebenso der Bedienkomfort des Heizsystems für den praktischen Einsatz eine wesentliche Rolle. Zeitgemäß ist hierbei eine manuelle Steuerung per Smartphone-App, genauso wie eine automatische Regelung nach definierten Vorgaben. Zur Umsetzung bietet sich hierbei ein WiFi-Schaltaktor an, der das jeweilige Netzteil aktiviert bzw. deaktiviert und somit den Zustand des Wandflächenheizsystems steuert. Geeignet ist hierfür beispielsweise ein Aktor [199], der mit seinen geringen Abmaßen von 39 x 36 17 mm<sup>3</sup> ebenso im Schaltschrank in unmittelbarer Nähe der Netzteile installiert werden kann und mit seinem Eingangsspannungs-Bereich von 24 – 60 V (DC) für das mit 48 V (DC) betriebene Wandflächenheizsystem geeignet ist. Einen weiteren Vorteil bietet das System mit der Möglichkeit zur Integration in eine Smart-Home-Umgebung [200]. Beispielsweise können dem System Temperatursensoren [201] für jeden Raum hinzugefügt werden, womit die Software je nach Temperaturvorwahl automatisch Steuerbefehle an die entsprechenden einzelnen bzw. gruppierten Schaltnetzteile sendet und somit eine konstante Raumtemperatur gewährleistet. Neben vordefinierten Zeitvorgaben zur Aktivierung der Wandflächenheizung ist ebenfalls die Möglichkeit zur

Steuerung des Systems über Sprachbefehle gegeben [199, 200]. Zur kontinuierlichen Überwachung der Gesamt- bzw. Einzelraum-Heizkosten dient die im Schaltaktor integrierte Verbrauchsmessung, welche anhand der grafischen Oberfläche der Software ausgelesen bzw. -gewertet werden kann [200]. Zur Steuerung der Netzteile werden somit elf Schaltaktoren [199] mit einem Nettobetrag von 18 Euro pro Stück sowie acht Sensoren zur Erfassung der Temperaturwerte [201] für je 21 €benötigt, womit für die Regelung des Heizsystems Gesamtkosten von ca. 366 € aufzubringen sind.

#### 6.1.4 Installationskosten

Die Installationskosten des Wandflächenheizsystems setzen sich, wie nachfolgend erläutert, aus zwei Teilbereichen zusammen. Zum einen müssen die plasmagenerierten Heizstrukturen, wie in Kapitel 4.2 in Bild 60 dargestellt, elektrisch kontaktiert werden. Dies erfolgt während der Fertigung der Wandmodule und kann nach dem im Bild 65 (Kapitel 5.2) schematisch dargestellten Fertigungsprozess beispielsweise in Station 2 bzw. 4 durchgeführt werden. Dafür werden elektrisch leitfähiges Klebeband [166], das mit ca. 1,80 €/m [202] angeschafft werden kann, Verbindungsklemmen [203] (ca. 0,20 €/Stück) sowie zweiadrige elektrische Schlauchleitungen (0,55 €/m [204]) verwendet. Neben den Kosten für Material, welche überschlägig mit 20 € pro Wandmodul angesetzt werden, erfolgt die Addition der Personalkosten. Zur Durchführung der elektrischen Installationsarbeiten der einzelnen Komponenten wird eine Arbeitszeit eines Bauelektrikers von 20 Minuten (ein Takt) angesetzt. Laut Erhebung des Statistischen Bundesamtes [205] bezahlt der Arbeitgeber im produzierenden Gewerbe für jede geleistete Arbeitsstunde im Durchschnitt 36,70 €, weshalb für die Berechnungen Personalkosten von ca. 12,50 € pro Wandmodul angesetzt werden. Somit belaufen sich die Installationskosten pro Wandmodul auf insgesamt ca. 32,50 €. Für das in Kapitel 5.1 vorgestellte Beispielgebäudes mit 150 m<sup>2</sup> und acht Räumen summieren sich somit die Kosten auf ca. 1.040 €. Die Kosten zur Verlegung der Verbindungsleitungen in den weiteren Wandmodulen ohne Wandflächenheizung zum Schaltschrank werden vernachlässigt, da dies im Rahmen der regulären Elektroinstallation keinen bedeutenden Mehraufwand darstellen. Zum anderen werden für die Installation der Netzteile sowie Schaltaktoren im Schaltschrank und weiterer elektrischer Arbeiten (z. B. Kontaktieren der Verbindungsleitungen der Wandmodule mit dem Schaltschrank), vier Stunden eines Elektrikers (ca. 50 €/h [206]) angesetzt. Somit belaufen sich die Gesamtinstallationskosten des Beispielgebäudes auf ca. 1.240 €.

#### 6.1.5 Gesamtkosten

In Tabelle 7 sind die Gesamtkosten des plasmagenerierten Wandflächenheizsystems zusammengefasst. Mit  $3.993 \in$  bzw.  $1.915 \in$  stellt die Herstellung der Heizstrukturen den teuersten Posten dar. Wie die Ausführungen zeigen, beeinflussen allen voran die Ausgaben für das Kupferpulver die Fertigungskosten der Heizstrukturen. Die Aufwendungen der Gleichstrom-Netzteile werden mit  $1.682 \in$  beziffert, während die Heizsystemregelung mit 366  $\in$  sowie die Installation der Elektrik mit  $1.240 \in$  in die Rechnung mit eingehen. Bei Addition der einzelnen Positionen fallen zur Generierung eines Wandflächenheizsystems für das in Kapitel 5.1 vorgestellte Beispielgebäude Gesamtkosten von  $7.227 \in$  bzw.  $5.203 \in$  bei Verwendung des Pulvers "plasma tronic<sup>®</sup>"</sup> bzw. "Rogal Kupfer GK o/50" an.

Tabelle 7:	Überschlägig	veranschlagte	Gesamtkosten	einer	plasmagenerierten	Wandflä-
	chenheizung	für das in Kapit	tel 5.1 vorgestell	te Beis	pielgebäude	

		Kosten in €			
	Position	"plasma tronic®"	"Rogal Kupfer GK o/50"		
Heizstrukturen	547 m	3.939	1.915		
Gleichstrom- quellen Heizsystem-	7 x 960 W 2 x 480 W 1 x 240 W 1 x 120 W 11 x Schaltaktoren	1.682			
regelung	8 x Temperatursensoren	30	56		
Installations- kosten	Elektr. leitfähiges Klebeband Verbindungsklemmen Schlauchleitungen 2-adrig Personal		40		
	Gesamt	7.227	5.203		

### 6.2 Berechnung der monetären Einordnung

Wie in Kapitel 2.2.2 erläutert, existiert derzeit ein großer Markt an differierenden Beheizungssystemen für Wohnräume, die sich u. a in der Art ihrer verwendeten Energieträger sowie Wärmeabgabesysteme unterscheiden lassen. Moderne Wohngebäude werden zudem häufig zur Erfüllung der in Kapitel 2.1.2 erläuterten politischen Rahmenbedingungen um solarthermische Anlagen zur Warmwasseraufbereitung, Zu-/Abluftanlagen mit Wärmerückgewinnung, Photovoltaik-Systeme zur Eigenstromgewinnung sowie unterschiedliche Speichertechnologien (mechanisch, elektrisch, thermisch, chemisch) ergänzt. Dabei dienen diese Systeme neben der Raumwärmeerzeugung (RWE) auch für die Trinkwassererwärmung (TWE).

Somit ist eine separierte Betrachtung der Kosten für die Raumwärmeerzeugung, zur monetären Einordung der mittels Plasmabeschichtungsverfahren hergestellten Wandflächenheizung, nur bedingt sinnvoll. Aus diesem Grund wird eine Studie [207] des Instituts für Technische Gebäudeausrüstung Dresden Forschung und Anwendung GmbH (ITG) aus dem Jahr 2019 mit dem Titel "Energetische Effizienz und Wirtschaftlichkeit der elektrischen Direktheizung", welche vom Bundesverband Flächenheizungen und Flächenkühlungen e.V. in Auftrag gegeben wurde, herangezogen. Dabei werden Anschaffungs- und Betriebskosten ausgewählter Heizsysteme dem plasmagenerierten Flächenheizsystem gegenübergestellt. Die beispielhaften Vergleichskostenberechnungen beziehen sich dabei ebenso (vgl. Kapitel 5) auf ein Einfamilienhaus mit einem Effizienzstandard nach KfW 55 und einer Wohnfläche von 150 m<sup>2</sup>. Bei den hierbei verwendeten Energiepreisen, welche in Tabelle 8 zusammengefasst dargestellt sind, handelt es sich um bundesdurchschnittliche Jahresmittelwerte (brutto) für den Zeitraum Januar bis Dezember aus dem Jahr 2018 und basieren auf den Angaben des Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (BDEW). Weiterhin erfolgt die Berechnung der Stromvergütung für eingespeisten PV-Strom nach dem von der Bundesnetzagentur (01.06.2019) veröffentlichtem Fördersatz nach dem Erneuerbaren-Energien-Wärmegesetz. [207]

Energieträger	Grundpreis	Energiepreis in €/kWh (BDEW 2018, *EEG 2019)
Erdgas	140 €/a	0,052
Strom, Normaltarif	-	0,260
Strom, Heiztarif	73 €/a	0,190
Stromvergütung für eingespeisten PV-Strom	-	0,1079*

Tabelle 8: Brutto-Energiepreise ausgewählter Energieträger (Daten aus [207], Stand 2018)

In Tabelle 9 sind die in der Studie [207] betrachteten Kombinationen aus Heizsystemen (Gas, Wärmepumpe, elektrische Direktheizungen) und weiteren zusätzlichen Geräten, wie Photovoltaik-Anlage, elektrische Stromspeicher, elektrische Durchlauferhitzer (E-DLE) sowie Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung (WRG), dargestellt. Zur vergleichenden Betrachtung der monetären Eigenschaften werden die Investitionskosten der elektrischen Direktheizung von 9.000  $\in$ , welche in Tabelle 9 sowie Tabelle 10 jeweils mit den Nummern 4, 6 sowie 8 beziffert sind, durch die in Kapitel 6.1.5 genannten Gesamtkosten zur Herstellung eines plasmabasierten Wandheizungssystems von netto 5.203 € bzw. brutto 6.192 € (gerechneter MwSt.-Satz von 19 %) für "Rogal Kupfer GK 0/50" substituiert. Die sich daraus ergebenden Kombinationen sind in Tabelle 9 bzw. Tabelle 10 mit der Nummerierung 5, 7 sowie 9 versehen.

Für die vergleichende Betrachtung nach Tabelle 9 wird u. a. ein Gas-Brennwertgerät (Nr. 1) herangezogen, das nach Bild 9 (Kapitel 2.2.2) die derzeit meist verwendete Wärmeerzeugungsanlage in Deutschland darstellt [53]. Dafür werden ein Wärmeerzeuger, Heizflächen zur Wärmeabgabe in den jeweiligen Räumen sowie das zur Verbindung obligatorische Leitungssystem benötigt. Ebenso muss in einen Schornstein zur Rauchgasabführung sowie in einen Hausanschluss zur Gaszuführung investiert werden.

Nr.		Kombina	tion		
1	Gas-Brennwertgerät			PV-Anlage	Lüftungsanlage mit WRG
2	Luft-Wasser- Wärmepumpe			PV-Anlage	Lüftungsanlage mit WRG
3	Luft-Wasser- Wärmenumpe	Elektrischer Direktheizer TWE	Strom-	PV-Anlage	Lüftungsanlage mit WRG
		Direktileizei TWE	sperener		
4	Elektrische Direktheizung	WW-Wärmepumpe		PV-Anlage	Luftungsanlage mit WRG
5	Plasmagenerierte Wandflächenheizung	WW-Wärmepumpe		PV-Anlage	Lüftungsanlage mit WRG
6	Elektrische Direktheizung	Speicher mit Heizstab		PV-Anlage	Lüftungsanlage mit WRG
	Plasmagenerierte	Speicher mit			Lüftungsanlage
7	Wandflächenheizung	Heizstab		PV-Anlage	mit WRG
	Elektrische	Elektrischer	Strom-	DY 1 1	Lüftungsanlage
8	Direktheizung	Durchlauferhitzer	speicher	PV-Anlage	mit WRG
	Plasmagenerierte	Elektrischer	Strom-		Lüftungsanlage
9	Wandflächenheizung	Durchlauferhitzer	speicher	PV-Anlage	mit WRG

Tabelle 9: Betrachtete Kombinationen von Heizsystemen

Nach Bild 9 stellen Wärmepumpen (Nr. 2, 3) nach der Gas- und Ölheizung die derzeit am meisten verbauten Systeme für die Wärmeerzeugung in Gebäuden dar und bestehen aus einer im Freien stehenden Luft-Wasser-Wärmepumpe inklusive Wärmeerzeuger, einer Regelung, Heizflächen sowie einem Leitungssystem [53]. Weiterhin werden elektrische Direktheizungen (Nr. 4-9) betrachtet, welche sich durch den Wegfall der Kosten für einen zentralen Wärmeerzeuger sowie einen Schornstein auszeichnen. Wie in Tabelle 10 ersichtlich, erfolgt ebenso die Betrachtung des Einflusses eines elektrischen Stromspeichers (Kapazität in Studie nicht genannt) auf die Wirtschaftlichkeit des Heizsystems in den Kombinationen Nr. 3, 8 sowie 9. Alle betrachteten Heizsysteme, welche neben der Raumwärmeerzeugung auch für die Erwärmung des Trinkwassers (TWE) verwendet werden, beinhalten sowohl eine Zu-/Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung (WRG), als auch eine PV-Anlage mit einer installierten Nennleistung von 9,0 kWp.

In Tabelle 10 sind die Investitionskosten aller betrachteten Heizsystemkonfigurationen, mit den jeweiligen Einzelpreisen der Komponenten, gegenübergestellt. Bei einem direkten Vergleich der Anschaffungskosten für Heizungssysteme fällt auf, dass vor allem Kombination 3 mit einer Luft-Wasser-Wärmepumpe, einem elektrischen Durchlauferhitzer sowie einem elektrischen Stromspeicher mit über 56.350  $\in$  eine hohe Investition verursacht. Ebenso sticht die mit fossilem Brennstoff betriebene Gas-Brennwerttherme nach Tabelle 10 mit einem hohen Wert hervor, während die gesamten Ausgaben für die Setups mit elektrischen Flächenheizungen kostengünstiger ausfallen. Der Kostenvergleich der plasmagenerierten Heizstrukturen (5, 7, 9) mit den in der Studie aufgeführten elektrischen Flächenheizungen (4, 6, 8) zeigt weiterhin die wirtschaftliche Konkurrenzfähigkeit des Systems.

				I	Elektrische Flächenheizungen				
Angaben in € (brutto)	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Wärmeerzeuger	3.600	10.200	10.000	-	-	I	-	-	-
Heizung									
Trinkwassererwärmung	1.600	2.900	800	4.200	4.200	2.200	2.200	800	800
PV-Anlage	15.200	15.200	15.200	15.200	15.200	15.200	15.200	15.200	15.200
Stromspeicher	-	-	9.300	-	-	-	-	9.300	9.300
Zu-/Abluftanlage	9.000	9.000	9.000	9.000	9.000	9.000	9.000	9.000	9.000
Flächenheizung	11.300	11.300	11.300	9.000	6.192	9.000	6.192	9000	6.192
Warmwasserleitung	1300	1300	200	1300	1300	1300	1300	200	200
Schornstein	2.900	-	-	-	-	-	-	-	-
Hausanschluss Gas	2.100	-	-	-	-	-	-	-	-
Gas-/Elektro-	700	500	550	150	150	150	150	150	150
installation									
Summe	47.700	50.400	56.350	38.850	36.042	36.850	34.042	43.650	40.842
					1 T		1		Ť

Tabelle 10: Gegenüberstellung der Anschaffungskosten der betrachteten Heizungssysteme (Daten aus [207])

Plasmabasierte Flächenheizung

Neben den Investitionskosten hängt die Wirtschaftlichkeit eines Heizsystems von den jährlichen verbrauchsgebundenen Aufwendungen ab. Gleichzeitig geht der durch die PV-Anlage erzeugte, selbst benötigte sowie eingespeiste Strom (Detailangaben in [207]) in die Gesamtkostenrechnung mit ein. Die betriebsgebundenen Kosten setzen sich aus der Wartung und
den ggf. anfallenden Schornsteinfegergebühren sowie etwaig nötiger Versicherungen zusammen. Eine Übersicht der jährlich anfallenden Kosten der verschiedenen Heizsysteme ist in Tabelle 11 dargestellt. [207]

Tabelle 11: Gegenüberstellung der verbrauchs- und betriebsgebunden Kosten der betrachteten Heizungssysteme (Daten aus [207])

				Elektrische Flächenheizungen					
Angaben in € (brutto)	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Verbrauchsgebundene									
Kosten gesamt inkl.	768	683	658	1.321	1.321	1.629	1.629	1.478	1.478
Haushaltsstrom			-						
Betriebsgebundene								- 9 -	- 9 -
Kosten	450	415	405	315	315	290	290	280	280
Summe	1.224	1.098	1.063	1.636	1.636	1.919	1.919	1.758	1.758
					1		1		Ť
									·

Plasmabasierte Flächenheizung

Bild 71 illustriert die überschlägigen Kosten der neun unterschiedlich betrachteten Kombinationen von Heizsystemen. Der Betrachtungszeitraum des Kostenverlaufs beträgt 20 Jahre. Es zeigt sich, dass Konfiguration 5 auf die Dauer des Betrachtungszeitraumes die kostengünstigste Variante darstellt, trotz der höheren Anschaffungskosten im Vergleich zu Variante 7. Die vergleichende wirtschaftliche Betrachtung der ausgewählten Heizsysteme veranschaulicht, dass plasmagenerierte Wandflächenheizungen im Vergleich zu vorwiegend eingesetzten Heizsystemen durchaus konkurrenzfähig sind.



Bild 71: Gesamtkostenvergleich der betrachteten Heizungssysteme für einen Zeitraum von 20 Jahren (Datenbasis aus [207])

# 6.3 Zusammenfassung und Bewertung der Wirtschaftlichkeit

Moderne Wärmeerzeugungsanlagen bestehen aus einer Verknüpfung von vielen weiteren Komponenten wie beispielsweise eine PV-Anlage, Lüftungsanlage sowie Stromspeicher. Daher reicht eine monetäre Gegenüberstellung von abgegrenzt betrachteten Heizungsanlagen für eine aussagekräftige Bewertung nicht aus. Um dennoch eine vergleichende Betrachtung zu anderen Heizsystemen zu ermöglichen, wird eine Studie herangezogen, in welcher die Anschaffungs- und Betriebskosten für gängige Heizsysteme aufgezeigt werden. Mit der Substitution der Investitionskosten von am Markt erhältlichen elektrischen Direktheizungen durch die Herstellungskosten der plasmagenerierten Wandflächenheizung, können aufgrund der annähernd identischen Wirkungsweise die verbrauchsgebundenen Kosten übernommen werden. Die vergleichende Analyse zeigt, dass innerhalb des Betrachtungszeitraumes von 20 Jahren eine Konfiguration mit plasmagenerierten Wandflächenheizungen unterhalb der Kosten der gegenübergestellten Systeme liegt. Begründet werden kann dies mit den vergleichsweise geringeren Anschaffungskosten, welche durch die thermische Aktivierung der Gipskartonplatten erreicht werden kann. Somit entfallen der Erwerb von weiteren Komponenten wie beispielsweise Rohre, Matten, Folien etc. sowie deren überwiegend manuell durchgeführte Installationsarbeiten.

# 7 Zusammenfassung und Ausblick

Der kontinuierlich steigende Einsatz von digitalen Werkzeugen in der Branche der Fertighaushersteller leistet einen wesentlichen Beitrag zur individuellen Gestaltung und Herstellung von kostengünstigen Gebäuden in Hinblick auf bezahlbaren Wohnraum. Gleichzeitig wird durch einen optimierten Einsatz von Werkstoffen eine kontinuierliche Qualitätssteigerung der Bausubstanz erreicht, wodurch die Vorteile des industriellen Bauens weiter bestärkt werden. Eine weitere Reduktion der Anschaffungskosten durch Optimierung der Fertigungszeiten kann zukünftig durch einen weiteren Ausbau des Einsatzes von Automatisierungstechnologien realisiert werden. Ein großes Potenzial bietet dabei die Substitution der derzeit überwiegend manuellen und zeitintensiven Installation von Heizsystemen auf der Baustelle durch eine automatisierte Integration während der Gebäudesegmentfertigung im Werk.

Aufgrund der u. a. politisch getriebenen fortschreitenden Dekarbonisierung und der stetig steigenden Verfügbarkeit von regenerativ erzeugten Energien, stellt Heizen mit Strom zukünftig eine Alternative zu derzeitigen, meist mit fossilen Brennstoffen betriebenen, Heizsystemen dar. Wird das elektrisch betriebene Heizsystem direkt in die Wandoberfläche eines Raumes integriert, stellen eine hohe thermische Behaglichkeit sowie eine schnelle Reaktionszeit des Heizsystems weitere wesentliche Vorteil dar.

Zur Realisierung von elektrischen Heizstrukturen wird in der vorliegenden Arbeit die kaltaktive Plasmabeschichtungstechnik (Cold Active Plasma Metallization, CAPM) herangezogen. Diese bietet das Potenzial zur automatisierten Fertigung von elektrisch leitenden Schichten auf Wänden innerhalb der Gebäudesegmentproduktion im industriellen Hausbau. Dabei wird Kupferpulver in eine Plasmaflamme injiziert, welches in der Beschichtungsdüse an- bzw. aufschmilzt. Aufgrund der thermischen und kinetischen Energie des Plasma-Pulver-Gemisches bildet sich eine durchgängige Metallstruktur auf der Oberfläche, welche als elektrische Widerstandsheizung fungiert.

Als Substrat für die Flächenheizung dient Gipskarton, da dieses Material überwiegend bei in Holzständerbauweise errichteten Wänden als Decklage für in den Raum gerichtete Seiten eingesetzt wird. In einer Parameterstudie konnte ein geeignetes Setup gefunden werden, um elektrisch leitende Strukturen mittels CAPM-Prozess fertigen zu können. Die Charakterisierung des Schichtverbundes zeigte einerseits, dass die Kupferpartikel eine dauerhafte Verbindung mit der Gipskartonoberfläche eingehen, während andererseits anhand von thermischen Untersuchungen die Funktionsfähigkeit des Flächenheizsystems nachgewiesen werden konnte. Das Auftreten von thermomechanischen Spannungen zwischen Gipskarton, Heizstruktur und Dekorationsschicht wurde anhand von Untersuchungen in Klimaschränken analysiert. Dabei kann die Funktionalität auch nach einer simulierten Nutzungsdauer von mehr als fünf Jahren nachgewiesen werden.

Die Beurteilung der Qualität des Heizsystems erfolgte weiterhin über thermische Behaglichkeitsuntersuchungen. Dafür wurden an allen vier Raumumschließungsflächen in einem Demonstrationsgebäude plasmagenerierte Wandflächenheizungen installiert. In allen untersuchten Szenarien, in welchen verschiedene Heizwände bzw. einzelne Segmente aktiviert wurden, kann eine annähernd ideale Behaglichkeit gemessen werden. Weiterhin kann die Annahme bestätigt werden, dass die thermische Aktivierung aller Raumumschließungsflächen zu den besten Ergebnissen hinsichtlich eines physiologischen Komforts führt.

Zur Ausschöpfung des vollen Potenzials der plasmagenerierten Wandflächenheizung ist eine automatisierte Produktion der Heizstrukturen innerhalb der Produktionslinie des Fertighausherstellers nötig. Anhand der Heizlastberechnung eines fiktiven Gebäudes kann die Prozessdauer zur elektrischen Funktionalisierung der Gipskartonoberflächen bestimmt werden. Die Ergebnisse zeigen, dass die jeweilige herstellerabhängige Taktzeit durch die entsprechende Anpassung der Anzahl an Beschichtungsdüsen realisiert werden kann. Aufgrund der Maße und des Gewichtes des Wandmoduls bietet sich die Führung der Düsen mittels Portalkinematik über dem stationären Substrat an. Anhand eines schematischen Modells wird ein möglicher Aufbau einer Plasmabeschichtungs-Station illustriert, womit der theoretische Nachweis zur Integrationsmöglichkeit des CAPM-Prozesses erbracht wurde.

Über die Nachhaltigkeit eines Heizsystems entscheidet letztendlich auch die Wirtschaftlichkeit über die gesamte Nutzungsdauer hinweg. Zur Bewertung der Herstellkosten wurden daher die Aufwendungen während der Plasmabeschichtung ermittelt und preislich quantifiziert. Unter Einberechnung der Kosten aller weiteren benötigten Komponenten zum Betreiben des Heizsystems konnte eine überschlägige Berechnung zur Ermittlung der Fertigungskosten durchgeführt werden. Anhand einer monetären Gegenüberstellung mit derzeit häufig verbauten bzw. alternativen Heizsystemen konnte aufgezeigt werden, dass plasmagenerierte Wandflächenheizungen wirtschaftlich konkurrenzfähig sind. Die durchgeführten Forschungsarbeiten zeigen das weitreichende Potenzial der plasmabasierten, strukturierten Metallisierung thermoaktiver Oberflächen im industriellen Hausbau. Dennoch werden während der Qualifizierung der Heizstrukturen lokale Wärmehotspots beobachtet. Wie die Messungen zeigen, ist dies primär auf die Pulverzuführung zurückzuführen. Deshalb müssen alternative Pulverzuführsysteme betrachtet werden, womit die Reproduzierbarkeit des Schichtauftrages erhöht werden kann. Ebenso müssen die Einwirkungen der Geometrie bzw. Größe der Partikeloberflächen auf das Beschichtungsergebnis in weiteren Untersuchungen evaluiert werden. Weiterhin können die Prozesstemperatur bzw. der Flächenenergieeintrag durch Variation des Gasgemisches beeinflusst werden, indem beispielsweise alternative Gase wie Argon beigemischt werden, deren Analyse den Inhalt für weiterführende Forschungsarbeiten darstellt.

Neben dem Einsatz im industriellen Hausbau offeriert die CAPM-Technologie zur Generierung thermisch aktivierbarer Oberflächen ein hohes Potenzial für weitere Anwendungsgebiete. Zum Beispiel kann in weiteren Untersuchungen die thermische Funktionalisierung der Flügel von Windkraftrotoren betrachten werden, deren schematische Darstellung in Bild 72 links abgebildet ist.



Bild 72: Schematische Illustration weiterer Anwendungspotenziale für plasmagenerierte Heizstrukturen

Die Bildung von Eis- und Schneeschichten kann somit präventiv verhindert werden, während weiterhin die entstehende Wärme auf dem Rotor zum Abschmelzen des bereits gebildeten Belags genutzt werden kann. Zeitintensive und aufwendige Enteisungsvorgänge entfallen durch die direkte Beheizung der Oberflächen. Unter Verwendung regenerativer Energien zum Betreiben des Heizsystems kann die Umwelt durch den Wegfall von chemischen Substanzen für Enteisungsvorgänge geschont werden. Durch eine direkte elektrische Funktionalisierung der Oberfläche entfällt die Montage und Installation weiterer Systeme. Voraussetzung ist der erfolgreiche Auftrag einer elektrisch leitenden Schicht auf dreidimensionalen Oberflächen. Ebenso muss untersucht werden, ob die Plasmastrukturen während des Betriebes permanenten dynamischen Biegewechselbelastungen unter extremen klimatischen Bedingungen standhalten können.

Thermisch aktivierbare Oberflächen können beispielsweise auch im Dachhimmel oder in Türmodulen zur Wärmeeinbringung in Elektrofahrzeugen integriert werden, wie in Bild 72 rechts schematisch illustriert ist. Somit entfällt die aufwendige Installation zusätzlicher Bauteile wie beispielsweise Wärmepumpen. Die direkte und durch Sensoren gesteuerte gezielte Wärmeeinbringung in den Fahrzeuginnenraum trägt zur Effizienzsteigerung und damit zur Erhöhung der Reichweite bei, deren Evaluierung Gegenstand weiterer Forschungsarbeiten darstellt.

# 8 Summary

The proliferation of digital tools in the prefabricated housing industry facilitates the customisation of living space and the production of low-cost buildings, enabling affordable accommodation. Simultaneously, continuous improvements in the quality of such buildings are achieved through optimised use of materials, which reinforces the advantages of industrially manufactured houses. However, further reductions in acquisition costs, e.g., by shortening production times, can only be realised through increased use of automation technologies. In this regard, the substitution of the predominantly manual and time-consuming on-site installation of heating systems by automated integration during building segment production in the factory.

At the same time, the ongoing decarbonisation and the increasing availability of renewable energies makes heating with electricity a viable alternative for more and more households which still use fossil-fuel-based systems. If the electrical heating system is integrated directly into the wall surface of a room, a high level of thermal comfort and fast response times of the heating system present further advantages.

In this thesis, Cold Active Plasma Metallisation (CAPM) technology was used to create electrical heating structures. The technology enables the automated integration of electrically conductive layers on wall surfaces within the production of building segments in industrial prefabricated house manufacturing. During the process, copper powder is injected within an inert gas stream into a plasma flame. Due to the thermal and kinetic energy of the plasma-powder combination, a continuous metal structure is formed on the target surface, which acts as an electrical resistance heater.

The substrate for the panel heating is plasterboard, which is the most common material for the top layer of walls in prefabricated houses. In a parameter study, a successful CAPM setup to produce electrically conductive structures was derived. The characterisation of the layered compound shows that the copper particles are permanently bonded to the plasterboard surface, with thermal tests verifying the functionality of the surface heating system. The behaviour of thermomechanical stresses between plasterboard, heating structure and decorative layer is analysed using climatic chambers, demonstrating sustained operability after a simulated usage period of five years The quality of the heating system is determined by conducting thermal comfort tests. For this purpose, CAPM-generated wall panel heaters are installed on all room enclosures surfaces in a demonstration building. In all scenarios in which different heating walls or individual segments were activated, a high level of comfort could be attested. Furthermore, the assumption that thermal activation of all room enclosure surfaces leads to the best results regarding physiological comfort was confirmed.

To realise the full potential of plasma-generated wall panel heating, automated production of the heating structures within the production line of the prefabricated house manufacturer is necessary. Based on the heating load calculation of a fictitious building, the process duration for the electrical functionalisation of the plasterboard surfaces can be determined. The results show that the relevant manufacturer-specific cycle time can be realised by adjusting the number of coating nozzles. Due to the dimensions and weight of the wall module, routing the nozzles by using portal kinematics above the stationary substrate is the most suitable solution. A schematic model is used to illustrate a possible design of a plasma coating installation.

The sustainability of a heating system produced in this way is evaluated by determining its cost-effectiveness about its period of operation. To evaluate the manufacturing costs, the raw materials and supplies are calculated and quantified in terms of price during the plasma coating process. After taking all costs into account, an estimation function for the production costs could be derived. Based on a monetary comparison with conventional/currently predominant heating systems, it was thus shown that plasma-generated wall panel heating systems are economically competitive.

# Literaturverzeichnis

- ROEDEL, W. und T. WAGNER. Strahlung und Energie in dem System Atmosphäre/Erdoberfläche. In: W. ROEDEL und T. WAGNER, Hg. Physik unserer Umwelt: Die Atmosphäre. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011, S. 1-64. ISBN 978-3-642-15728-8
- [2] WELKE, M. und M. BECK. Klimaschutz in Zahlen. Fakten, Trends und Impulse deutscher Klimapolitik, Ausgabe 2019. 4.000. Auflage. Berlin, 05/2019
- [3] ITTERSHAGEN, M. Klimaneutraler Gebäudebestand in Deutschland bis 2050 ist möglich [online]. Umfassende Gebäudesanierung und mehr erneuerbare Energien führen zum Ziel, 2016. 23 Januar 2017 [Zugriff am: 21. Juni 2021]. Verfügbar unter: https://www.um weltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/klimaneutraler-ge baeudebestand-in-deutschland-bis
- [4] N. N. Energieverbrauch privater Haushalte [online], 2020. 1 Juli 2020 [Zugriff am: 23. Juni 2021]. Verfügbar unter: https://www.um weltbundesamt.de/daten/private-haushalte-konsum/wohnen/en ergieverbrauch-privater-haushalte
- [5] UNNERSTALL, T. Energiewende verstehen. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2018. ISBN 978-3-662-57786-8
- [6] PISTOHL, W., C. RECHENAUER und B. SCHEUERER. Handbuch der Gebäudetechnik. Planungsgrundlagen und Beispiele. 9., überarbeitete Auflage. Köln: Bundesanzeiger Verlag, 2016. ISBN 978-3-846-20589-1
- BOGUSCH, N. und T. DUZIA. Basiswissen Bauphysik. Grundlagen des Wärme- und Feuchteschutzes. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verl., 2012. ISBN 381-6-78613-8
- [8] MARTIN GORNIG und CLAUS MICHELSEN. Bauwirtschaft: Volle Auftragsbücher und gute Wachstumsaussichten [online]. *DIW-Wochenbericht*, 2017, 84(1/2), S. 32-42. Verfügbar unter: http://hdl.handle.net/10419/149846

- [9] ASCHENBRENNER, H. und B. METZGER. Die häufigsten Baufehler - inkl. Arbeitshilfen online. Vorbeugen, reklamieren und beheben. München: Haufe Lexware Verlag, 2018. Haufe Fachbuch. ISBN 978-3-648-09650-5
- [10] WEITZ, H. Fachkräftemangel: Risiko für die Unternehmen des Baugewerbes [online], 2019 [Zugriff am: 27. Mai 2020]. Verfügbar unter: https://www.bauindustrie.de/zahlen-fakten/bauwirtschaft -im-zahlenbild/fachkraeftemangel\_bwz/
- SCHLUMBOHM, M., V. STAFFA, E. BARTH und L. STEFAN. Baugewerbe 2020 [online]. Statista Branchenreport - WZ-Code 41, 42, 43. Zitiert nach de.statista.com, 10/2020. 10/2020 [Zugriff am: 7. Januar 2021]. Verfügbar unter: https://de.statista.com/statis tik/studie/id/1907/dokument/branchenreport-baugewerbe/
- [12] FITZNER, K. und H. RIETSCHEL. Raumklimatechnik. 16., völlig überarb. und erw. Aufl. Berlin: Springer, 2008. ISBN 978-3-540-57011-0
- [13] FRESENIUS, T. und A. MARTENS. Bundeskabinett hat den Gesetzentwurf für das Gebäudeenergiegesetz (GEG) beschlossen.
   Energiewende im Gebäudebereich. Berlin, 23. Oktober 2019
- [14] LEAL FILHO, W., Hg. Aktuelle Ansätze zur Umsetzung der UN-Nachhaltigkeitsziele. Berlin, Germany: Springer Spektrum, 2019. ISBN 978-3-662-58717-1
- [15] KOFNER, S. Wohnungsmarkt und Wohnungswirtschaft. München u. a.: Oldenbourg, 2004. ISBN 978-3-486-57605-4
- [16] STATISTISCHES BUNDESAMT und HAUPTVERBAND DER DEUTSCHEN BAUINDUSTRIE. Anteil der Bauinvestitionen an der Verwendung des Bruttoinlandprodukts\* in Deutschland im Jahr 2019 [online]. Zitiert nach de.statista.com, 2020 [Zugriff am: 7. Januar 2021]. Verfügbar unter: https://de.statista.com/statis tik/daten/studie/151966/umfrage/deutsche-bauwirtschaft-einge ordnet-im-bruttoinlandsprodukt/
- [17] HAUPTVERBAND DER DEUTSCHEN BAUINDUSTRIE E.V. Bauwirtschaft im Zahlenbild [online]. 135 Mr. Euro Umsatz im Bauhauptgewerbe 2019. Ausgabe 2020, 2020. Verfügbar unter: https://www.bauindustrie.de/media/documents/Bauwirtschaft-i m-Zahlenbild\_final\_Inhalt\_verlinkt.pdf

- [18] KELLER, H. Baugewerke [online]. Ausführliche Definition im Online-Lexikon, 2012 [Zugriff am: 17. April 2020]. Verfügbar unter: https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/baugewerke-5283 1/version-275928
- [19] GILL, J. Individualisierung als Standard. Bielefeld: transcript, 2014. Architektur und Design. ISBN 978-3-837-61460-2
- [20] PREISIG, H. Massiv-oder Leichtbauweise? Trends im Passivhausbau, 2002 [Zugriff am: 22. Dezember 2021]. Verfügbar unter: http://www.hansruedipreisig.ch/publikationen/images/01\_tec 42.pdf
- [21] N. N. Wirtschaftliche Lage der deutschen Fertigbauindustrie 2018
   [0nline], 2018. 16 April 2020 [Zugriff am: 16. April 2020]. Verfügbar unter: https://www.fertigbau.de/bdf/unsere-branche/index.html #&panel1-1&panel2-1
- [22] GÜNTHNER, W.A., J. DURCHHOLZ, E. KLENK, J. BOPPERT, T. KNÖSSL und M. KLEVERS. Schlanke Logistikprozesse. Handbuch für den Planer. Dordrecht: Springer, 2013. ISBN 978-3-642-38271-0
- [23] HOFSTADLER, C. Bauablaufplanung und Logistik im Baubetrieb. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007. ISBN 978-3-540-34320-2
- [24] HAMMERMEISTER, M. Fertighaus Bauzeit Wie lange dauert es?
   [online], 2019. 12 September 2019, [Zugriff am: 17. April 2020].
   Verfügbar unter: https://www.massivhaus.de/ratgeber/fertighaus
   -bauzeit.html
- [25] N. N. Fertighaus oder Massivhaus: Welche Bauweise ist die bessere? [online], 2020. 23 März 2020 [Zugriff am: 17. April 2020]. Verfügbar unter: https://www.hurra-wir-bauen.de/hausbau/fertig haus/fertighaus-oder-massivhaus.html
- [26] N. N. Energieverbrauch nach Energieträgern, Sektoren und Anwendungen [online], 2021. 10 Mai 2021 [Zugriff am: 21. Juni 2021]. Verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/daten/energ ie/energieverbrauch-nach-energietraegern-sektoren
- [27] SCHABBACH, T. und V. WESSELAK. Energie. Den Erneuerbaren gehört die Zukunft. 2., vollständig überarbeitete und neu strukturierte Auflage. Berlin: Springer, 2020. Technik im Fokus. ISBN 978-3-662-58048-6

- [28] KREIDEWEIS, S. und A. CHACHATRYAN. In der Zukunft zu Hause: Hocheffizient bauen und sanieren. UmweltWissen. Augsburg, 2019
- BOLLIN, E., Hg. Regenerative Energien im Gebäude nutzen.
   Wärme- und Kälteversorgung, Automation, Ausgeführte Beispiele. 2., überarbeitete Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016. Lehrbuch. ISBN 978-3-658-12404-5
- [30] MAAS, A. Energy Conservation Ordinance 2014 On the way to the nearly zero energy building / EnEV 2014 - auf dem Weg zum Niedrigstenergiegebäude [online]. *Mauerwerk*, 2016, 20(1), S. 70-83. ISSN 14323427. Verfügbar unter: https://onlinelibrary. wiley.com/doi/abs/10.1002/dama.201600689
- [31] CLAUS MICHELSEN und NOLAN RITTER. Energieeffizienz: Regulierung für Wohngebäude wirkt [online]. *DIW-Wochenbericht*, 2017, 84(38), S. 787-790. Verfügbar unter: http://hdl.handle. net/10419/170513
- [32] BREITKOPF, A. Anteil Erneuerbarer Energien am Endenergieverbrauch für Wärme und Kälte in Deutschland in den Jahren 1999 bis 2019 [online]. Zitiert nach de.statista.com, 30. März 2020. 30 März 2020 [Zugriff am: 29. April 2020]. Verfügbar unter: https://de.statista.com/statistik/daten/studie/158536/umfrage/an teil-erneuerbarer-energien-an-der-waermebereitstellung-seit-1998/
- [33] BREITKOPF, A. Erneuerbaren Energien Stromerzeugung in Deutschland bis 2019 [online]. Zitiert nach de.statista.com, 2019.
   20 Dezember 2019 [Zugriff am: 30. April 2020]. Verfügbar unter: https://de.statista.com/statistik/daten/studie/152296/umfrage/st romerzeugung-aus-erneuerbaren-energien-in-deutschland-seit-1998/
- [34] HAAS, A. und V. DORER. Optimised air-heating for Minergie-P and passive housing; Optimierte Luftheizung fuer Minergie-P und Passivhaeuser. Technical Report, 2004
- BRAUNER, G. Effizienz der Gebäude und Heizungsbedarf. In: BRAUNER, Hg. Systemeffizienz bei regenerativer Stromerzeugung. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019, S. 169-197. ISBN 978-3-658-24853-6

Literaturverzeichnis

- [36] MORO, J.L. Baukonstruktion vom Prinzip zum Detail. Band 1 Grundlagen. 2. Aufl. 2019. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2019. ISBN 978-3-662-57402-7
- [37] BREITKOPF, A. Statistiken zum Fertigteilbau. Zitiert nach de. statista.com. Hamburg, 2019
- [38] FRIEDL, G. und M. GRUNDKE. Herausforderungen des Controllings im modularen Hausbau [online]. *Controlling*, 2017, 29(3),
   S. 48-53. ISSN 0935-0381. Verfügbar unter: https://www.beck-elibr ary.de/10.15358/0935-0381-2017-3-48.pdf
- [39] GIRMSCHEID, G. Strategisches Bauunternehmensmanagement. Prozessorientiertes integriertes Management für Unternehmen in der Bauwirtschaft. 2. Aufl. s.l.: Springer-Verlag, 2010. VDI-Buch. v.o. ISBN 364-2-141-943
- [40] LI, Z., G.Q. SHEN und X. XUE. Critical review of the research on the management of prefabricated construction [online]. *Habitat International*, 2014, 43, S. 240-249. ISSN 01973975. Verfügbar unter: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0197 397514000459
- [41] MÜLLER, A., C. GEYER und R. HAUSAMMANN. Hochleistungs-Hybridbausystem mit Holz und Stahl [online]. *Bautechnik 97, Sonderheft Holzbau*, 2020, (S1), S. 26-34 [Zugriff am: 29. Mai 2020]. Verfügbar unter: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/ bate.201900114
- [42] WINDSCHEIF, C. Wirtschaftliche Lage der deutschen Fertigbauindustrie 2019. Bad Honnef
- [43] N. N. Anzahl der Baufertigstellungen neuer Wohn- und Nichtwohngebäude im Fertigteilbau in Deutschland in den Jahren 2012 bis 2018. Statistisches Bundesamt - Bautätigkeit und Wohnungen - Bautätigkeit 2018. Zitiert nach de.statista.com, 2019
- [44] N. N. Errichtung von Fertigteilbauten: Gesamtumsatz in Deutschland in den Jahren 2012 bis 2018. Produzierendes Gewerbe: Tätige Personen und Umsatz der Betriebe im Baugewerbe. Zitiert nach de.statista.com, 2020
- [45] Mass Customization. In: Marketing-Trends. Wiesbaden: Gabler, 2006, S. 133-143. ISBN 978-3-8349-0044-9

- BRANDT, F., P. HAMMANN und R. PALUPSKI. Multimediale Unterstützung des Vertriebs von Fertighäusern. In: H. HIPPNER, M. MEYER und K.D. WILDE, Hg. Computer Based Marketing. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 1998, S. 519-530. ISBN 978-3-322-91959-5
- [47] RECKNAGEL, H., E.-R. SCHRAMEK und E. SPRENGER. Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik 07/08 Buch und CD-ROM (als SET), 2006. ISBN 978-3-835-63122-9
- [48] KOBER, R. und H. MÜLLER, Hg. Luft- und Raumklimatechnik ganzheitlich geplant. Behaglichkeit und höchste Energieeffizienz. Karlsruhe: cci Dialog, 2013. Anlagenkonzepte. ISBN 978-3-922-42029-3
- [49] SCHMIDT, M. Auf dem Weg zum Nullemissionsgebäude. Grundlagen, Lösungsansätze, Beispiele. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2013. ISBN 978-3-8348-2193-5
- [50] SCHULZ, M. und H. WESTKÄMPER. Die neue Heizung. Umweltfreundlich und wirtschaftlich heizen mit Gas, Holz, Strom und Sonnenenergie. 2., verbess. Aufl. Staufen bei Freiburg: Ökobuch-Verl., 2013. ISBN 978-3-936-89663-3
- [51] TIATOR, I. Heizungsanlagen mit der neuen EnEV 2014. 4., aktualisierte und erweiterte Auflage, 2016. Die neue Meisterprüfung. ISBN 978-3-8343-3356-8
- [52] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. DIN EN ISO 13732-1:2008-12: 12/2008, Ergonomie der thermischen Umgebung - Bewertungsverfahren für menschliche Reaktionen bei Kontakt mit Oberflächen - Teil 1: Heiße Oberflächen (ISO 13732-1:2006); Deutsche Fassung EN ISO 13732-1:2008. Berlin: Beuth Verlag GmbH
- [53] BREITKOPF, A. Bestand zentraler Wärmeerzeuger für Heizungen in Deutschland nach Kategorie im Jahr 2018. Zitiert nach de. statista.com. Köln, 2019
- [54] RECKNAGEL, H. und E.-R. SCHRAMEK, Hg. Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik. Einschließlich Warmwasser- und Kältetechnik. 73. Aufl. München: Oldenbourg, 2007. ISBN 978-3-835-63104-5
- [55] BREITKOPF, A. Anteil der Wärmepumpen im Neubau in Deutschland in den Jahren 2000 bis 2018. Zitiert nach de.statista.com. Berlin, 2019

- [56] TENBOHLEN, I.S., D.-W.-I.M. BRUNNER und D.-I.T. HENZLER. Be-und Entlastung elektrischer Verteilnetze durch Wärmepumpen bei der Wärmeerzeugung in Wohngebäuden. University of Stuttgart, 2015
- [57] DEHLI, M. Energieeffizienz in Industrie, Dienstleistung und Gewerbe. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2020. Energie in Naturwissenschaft, Technik, Wirtschaft und Gesellschaft. ISBN 365-8-232-03X
- [58] BOHNE, D. Technischer Ausbau von Gebäuden. Und nachhaltige Gebäudetechnik. 10., aktual. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014. ISBN 978-3-834-81832-4
- [59] KONSTANTIN, P. Praxisbuch der Fernwärmeversorgung. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2018. ISBN 978-3-662-55910-9
- [60] HERTLE, H., M. PEHNT, B. GUGEL, M. DINGELDEY und K. MÜLLER. Wärmewende in Kommunen. Leitfaden für den klimafreundlichen Umbau der Wärmeversorgung. Im Auftrag und herausgegeben von der Heinrich-Böll-Stiftung, Schriften zur Ökologie, 2015, 41
- [61] ALBERS, K.-J., Hg. Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik 2017/2018. Einschließlich Trinkwasser- und Kältetechnik sowie Energiekonzepte. 78. Auflage. München: DIV Deutscher Industrieverlag GmbH, 2017. einschließlich Trinkwasser- und Kältetechnik sowie Energiekonzepte. ISBN 978-3-865-67332-8
- [62] SCHMID, C. Heizung, Lüftung, Elektrizität. Energietechnik im Gebäude: Bau & Energie. 4., vollst. überarb. und aktualisierte Aufl. Zürich: Hochschulverlag, 2014. ISBN 978-3-728-13491-2
- [63] RIETSCHEL, H. und K. FITZNER. Raumklimatechnik 3. Raumheiztechnik. 16., völlig überarb. und wesentlich erw. Aufl. Berlin: Springer, 2005. VDI-Buch. ISBN 978-3-540-26323-4
- [64] VENZMER, H., Hg. Bautenschutz. Innovative Sanierungslösungen. s.l.: Beuth Verlag GmbH, 2014. Beuth Forum. ISBN 978-3410239970
- [65] ST. WIRTH. Eignet sich die Fußbodenheizung als Raumheizeinrichtung für Gebäude mit niedrigem Heizwärmebedarf? [online]. *Bauphysik*, 2003, 25(6), S. 367-371. ISSN 01715445. Verfügbar unter: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/bapi.200301620

- [66] LAASCH, T. und E. LAASCH. Haustechnik. Grundlagen Planung
   Ausführung. 13., durchgesehen und akt. Aufl. 2013. Wiesbaden: Springer, 2013. ISBN 978-3-8348-9900-2
- [67] RUDOLPH, M. und U. WAGNER. Energieanwendungstechnik. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008. ISBN 978-3-540-79021-1
- [68] GROTE, K.-H., J. FELDHUSEN und H. DUBBEL. Dubbel. Taschenbuch für den Maschinenbau; mit Tabellen. 21., neubearbeitete und erweiterte Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2005. ISBN 978-3-540-22142-5
- [69] HESTERMANN, U. und L. RONGEN. Frick/Knöll Baukonstruktionslehre 1. 36., vollst. überarb. und akt. Aufl. 2015. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015. ISBN 383-4-82565-4
- [70] KREUZ, M. Infrarot Natursteinheizung [online]. Natursteinheizung: Was macht die IR-Natursteinheizung so einzigartig- Und worin unterscheidet sich diese von anderen Infrarotheizungen? [Zugriff am: 25. Juni 2020]. Verfügbar unter: https://www.hausund energie.de/infrarotheizung/natursteinheizungen-als-infrarotheizung/
- [71] N. N. Elektrische Heizsysteme [online]. Warmup, 2018 [Zugriff am: 24. Juni 2020]. Verfügbar unter: https://www.warmupdeutsch land.de/wp-content/uploads/warmup-produktbroschuere-2018 .pdf
- [72] ROBERT JOHN DOELLING. Heizfolie als elektrische Fußbodenheizung [online]. Wie funktioniert Heizfolie? Welche Böden eignen sich für die Direktheizung?, 2017. 27 Juni 2017 [Zugriff am: 24. Juni 2020]. Verfügbar unter: https://www.energie-experten.org/ heizung/elektroheizung/elektrische-fussbodenheizung/heizfolie .html
- [73] ROSENKRANZ, A. Heizfolie: Die elektrische Infrarotheizung [online], 8. Juli 2019. 8 Juli 2019 [Zugriff am: 24. Juni 2020]. Verfügbar unter: https://heizung.de/elektroheizung/wissen/heizfolie-dieelektrische-infrarotheizung/
- [74] ROBERT JOHN DOELLING. Matten, Folien, Anstriche und Tapeten als Infrarot-Wandheizungen im Überblick [online]. Welche Infrarot-Wandheizungen gibt es? Wie unterscheiden sie sich? Wo

ist der Einsatz von Vorteil? Mit welchen Kosten muss man rechnen? 15 Oktober 2017 [Zugriff am: 24. Juni 2020]. Verfügbar unter: https://www.energie-experten.org/heizung/elektroheizung/infra rotheizung/infrarot-wandheizung.html

- [75] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. 7730:2005: 2016-05, Ergonomie der thermischen Umgebung – Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit (ISO 7730:2005); Deutsche Fassung EN ISO 7730:2005. Berlin: Beuth Verlag GmbH
- [76] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. 11855-1:2015: 2015-08, Umweltgerechte Gebäudeplanung – Planung, Auslegung, Installation und Steuerung flächenintegrierter Strahlheizungs- und -kühlsysteme – Teil 1: Begriffe, Symbole und Komfortkriterien (ISO 11855-1:2012); Deutsche Fassung EN ISO 11855-1:2015. Berlin: Beuth Verlag GmbH
- [77] Marktdaten: Bereich Wohnen [online] [Zugriff am: 9. Mai 2018]. Verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/daten/priva te-haushalte-konsum/konsum-produkte/gruene-produkte-mark tzahlen/marktdaten-bereich-wohnen#textpart-2
- [78] HERING, E. und B. SCHRÖDER. Wärmeschutz und Heizungstechnik. Ein Überblick. Wiesbaden: Springer, 2015. essentials. ISBN 978-3-658-08600-8
- [79] HEIN, M., R. STÖBER, G. FISCHERAUER, J. BÜRNER, J. FRANKE, M. FELLER und J. MAUL. Smart Heating System for Old Buildings
   An Approach to the Decentralized Use of Renewable Energies [online]. Advanced Engineering Forum, 2016, 19, S. 20-26. Verfügbar unter: https://www.scientific.net/AEF.19.20
- [80] HEIN, M., R. STÖBER, G. FISCHERAUER, J. BAUER, J. BÜRNER, A. KETTSCHAU, J. FRANKE und M. FELLER. Heizsystem zur Schaffung eines angenehmen und belastungsarmen Raumklimas in Altbauten. In: VDE, Hg. 9. Deutscher AAL-Kongress. Berlin: VDE-Verlag GmbH, 2016
- [81] LOTTER, B., J. DEUSE und E. LOTTER. Die Primäre Produktion.
   Ein praktischer Leitfaden zur verlustfreien Wertschöpfung. Berlin: Springer Vieweg, 2016. VDI-Buch. ISBN 978-3-662-53211-9

- [82] VENZMER, H., B. SCHMIDT und D. SCHMIDT, Hg. Energielieferant Altbau. Potenziale - Nachhaltigkeit - Objektbeispiele. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2017. ISBN 978-3-410-27112-3
- [83] HESTERMANN, U., L. RONGEN und O. FRICK. Baukonstruktionslehre 1. Mit 138 Tabellen. 35., vollständig überarbeitete und aktualisierte Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, 2010. ISBN 978-3-834-80837-0
- [84] STENZEL, V. und N. REHFELD. Funktionelle Beschichtungen. Hannover: Vincentz Network, 2013. ISBN 978-3-866-30876-3
- [85] BOBZIN, K. Oberflächentechnik für den Maschinenbau. Weinheim: Wiley-VCH, 2013. ISBN 978-3-527-33018-8
- [86] FRANKE, J., Hg. Räumliche elektronische Baugruppen (3D-MID). Werkstoffe, Herstellung, Montage und Anwendungen für spritzgegossene Schaltungsträger. München: Carl Hanser Verlag, 2013
- [87] SCHRAMM, R. Strukturierte additive Metallisierung durch kaltaktives Atmosphärendruckplasma. Dissertation. Bamberg: Meisenbach, 2015. Fertigungstechnik - Erlangen. 273. ISBN 978-3-87525-396-2
- [88] THEOPHILE, E. The plasmadust process: An innovative process for metal coatings on a wide variety of substrates. In: A. BIRKICHT, J. FRANKE, C. GOTH und W. JOHN, Hg. Proceedings 9th International Congress Molded Interconnect Devices, 2010. ISBN 978-3-00-031504-6
- [89] PODBREGAR, N. Vom Gas zum Plasma [online]. Wie man den vierten Materiezustand herstellt, 2019. 1 Februar 2019 [Zugriff am: 4. Juli 2021]. Verfügbar unter: https://www.scinexx.de/dossierarti kel/vom-gas-zum-plasma/
- [90] RESCHETILOWSKI, W. Chemische Reaktionsapparate in Theorie und Praxis. Berlin: Springer Spektrum, 2020. Handbuch chemische Reaktoren. ISBN 978-3-662-56433-2
- [91] N. N. Forschung am Lehrstuhl für Plasma- und Atomphysik Was ist Plasmaphysik? [online] [Zugriff am: 6. Juli 2021]. Verfügbar unter: https://www.ep5.ruhr-uni-bochum.de/forschung.html

- [92] LUGSCHEIDER, E. und F.-W. BACH, Hg. Handbuch der thermischen Spritztechnik. Technologien - Werkstoffe - Fertigung. Düsseldorf: Verl. für Schweißen und Verwandte Verfahren DVS-Verl., 2002. Fachbuchreihe Schweißtechnik. 139. ISBN 387-1-551-864
- [93] WOLF, R.A. Atmospheric pressure plasma for surface modification. Hoboken, N.J: John Wiley & Sons, 2013. ISBN 978-1-118-54751-9
- [94] KAISER, W. Kunststoffchemie für Ingenieure. Von der Synthese bis zur Anwendung. 4., neu bearb. und erw. Aufl. München: Hanser, 2016. ISBN 978-3-446-44774-5
- [95] KÄSTLE, C. Qualifizierung der Kupfer-Drahtbondtechnologie für integrierte Leistungsmodule in harschen Umgebungsbedingungen: Dissertation. Erlangen: FAU University Press, 2018. Fertigungstechnik - Erlangen
- [96] DIN Deutsches Institut f
  ür Normung e.V. 13507: Juni 2010, Thermisches Spritzen – Vorbehandlung von Oberflächen metallischer Werkst
  ücke und Bauteile f
  ür das thermische Spritzen. Berlin: Beuth Verlag GmbH
- [97] SCHRAMM, R., T. REITBERGER und J. FRANKE. Electrical and Mechanical Investigations on Copper Circuit Paths Coated on Fibre-Reinforced Plastics by Atmospheric Plasma Technology. In: IMAPS, Hg. Journal of Microelectronics and Electronic Packaging, 2015
- [98] SCHRAMM, R., T. REITBERGER und J. FRANKE. Electrical Characterization of Fibre-Reinforced Plastics by Atmospheric Plasma Technology. In: I.M. ASSEMBLY und P. SOCIETY, Hg. 47th International Symposium on Microelectronics. San Diego, 2014
- [99] DATTA, S., D.K. PRATIHAR und P.P. BANDYOPADHYAY. Modeling of plasma spray coating process using statistical regression analysis [online]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, 65(5-8), S. 967-980. ISSN 0268-3768. Verfügbar unter: https://link.springer.com/article/10.1007/s00170 -012-4232-y
- [100] SARAVANAN, P., V. SELVARAJAN, S.V. JOSHI und G. SUNDARA-RAJAN. Experimental design and performance analysis of alumina coatings deposited by a detonation spray process [online]. *Journal* of Physics D: Applied Physics, 2001, 34(1), S. 131-140. ISSN 0967-

9782. Verfügbar unter: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/ 0022-3727/34/1/320

- [101] DOOBE, M. Kunststoffe erfolgreich kleben. Grundlagen, Klebstofftechnologien, Best-Practice-Beispiele, 2018. ISBN 365-8-184-442
- [102] HABENICHT, G. Kleben. Grundlagen, Technologien, Anwendungen. 6., aktualisierte Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009. VDI-Buch. ISBN 978-3-540-85264-3
- SCHMID, J. Moderne Leichtmetallwerkstoffe für den Motorenbau und deren Endbearbeitung durch Honen [online]. *MTZ - Motortechnische Zeitschrift*, 1998, 59(4), S. 248-257. ISSN 0024-8525. Verfügbar unter: doi:10.1007/BF03228466
- [104] GEBERT, A., D. WOCILKA, B. BOUAIFI, K. ALALUSS und K.-J. MATTHES. Neuentwicklungen für den Verschleiß- und Korrosionsschutz beim Plasma-Pulver-Auftragschweißen [online]. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 2008, 39(1), S. 99-104. ISSN 09335137. Verfügbar unter: https://www.bibliothek.tu-chem nitz.de/uni\_biblio/frontdoor.php?source\_opus=4051&la=de
- TRUNOVA, O., T. BECK, R. HERZOG, R.W. STEINBRECH und L. SINGHEISER. Damage mechanisms and lifetime behavior of plasma sprayed thermal barrier coating systems for gas turbines—Part I: Experiments [online]. Surface and Coatings Technology, 2008, 202(20), S. 5027-5032. ISSN 02578972. Verfügbar unter: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0257897 208003599
- [106] AUMÜLLER, B., A.N. KIRKBRIDE, R. ZELLER und H.W. BERGMANN. Prozeßidentifikation beim Plasmaspritzen temperatursensitiver Werkstoffe mit Hilfe einer Infrarot-Hochtemperatur-Thermokamera [online]. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 1996, 27(2), S. 72-79. ISSN 09335137. Verfügbar unter: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/mawe.199602702 07
- [107] HENSEL, A., K. KOHLMANN-VON PLATEN und J. FRANKE. Investigations of Copper Wire Bonding Capability on Plasma Based Additive Copper Metallizations. In: Proceedings of the Proceedings of the 19th Electronics Packaging Technology Conference, 2017. ISBN 978-1-5386-3041-9

- [108] HENSEL, A., M. MÜLLER, J. FRANKE und K. KOHLMANN-VON PLATEN. System Concept of a Robust and Reproducible Plasma-Based Coating Process for the Manufacturing of Power Electronic Applications. In: R. SCHMITT und G.SCHUH, Hg. 7. WGP-Jahreskongress Aachen, 5.-6. Oktober 2017. Aachen: Apprimus Verlag, Aachen, 2017 Wissenschaftsverlag des Instituts für Industriekommunikation und Fachmedien an der RWTH Aachen, 2017, S. 79-85. ISBN 978-3-86359-555-5
- [109] HENSEL, A., M. MÜLLER und J. FRANKE. Einfluss der Beschichtungssequenz auf die Bauteiltemperatur während eines plasmabasierten Kupferbeschichtungsprozesses auf unterschiedlichen Substratmaterialien. In: 2018 Elektronische Baugruppen und Leiterplatten, 2018
- [110] SCHRAMM, R. Strukturierung und Metallisierung. In: J. FRANKE, Hg. Räumliche elektronische Baugruppen (3D-MID). Werkstoffe, Herstellung, Montage und Anwendungen für spritzgegossene Schaltungsträger. München: Carl Hanser Verlag, 2013, S. 65-120
- [11] SOVER, A., P. POPP und T. AYDIN. Digital Direct Metallization (DDM) by a plasma coating process on polymeric components and its applications [online]. *MATEC Web of Conferences*, 2017, 112, S. 4003. Verfügbar unter: https://www.matec-conferences.org/arti cles/matecconf/abs/2017/26/matecconf\_imane2017\_04003/matec conf\_imane2017\_04003.html
- [112] SOVER, A. und J. AMEND. Direct metallization by a plasma coating process on thermal conductive polyamide [online]. *MATEC Web of Conferences*, 2018, 178, S. 3005. Verfügbar unter: https://www.matec-conferences.org/articles/matecconf/abs/2018 /37/matecconf\_imanee2018\_03005/matecconf\_imanee2018\_0300 5.html
- [113] FRANKE, J., C. FISCHER, F. LOOS, H.-D. LIEß und R. SÜß-WOLF. Integration von Makro-MID-Technologie im PKW. In: J. GAUSE-MEIER, F. RAMMIG, W. SCHÄFER und A. TRÄCHTLER, Hg. 8. Paderborner Workshop - Entwurf mechatronischer Systeme. Paderborn: HNI Verlagsschriftenreihe, 2011, S. 39-55
- [114] MÜLLER, M. und J. FRANKE. Highly Efficient and Flexible Plasma based Copper Coating Process for the Manufacture of Direct Metallized Mechatronic Devices. In: IEEE, Hg. Proceedings of the

18th Electronics Packaging and Technology Conference (EPTC), 2016, S. 1-6

- [115] BREITKOPF, A. Anzahl der Baugenehmigungen zur Errichtung neuer Wohngebäude im Fertigteilbau in Deutschland nach überwiegend verwendetem Baustoff in den Jahren 2012 bis 2018. Zitiert nach de.statista.com. Wiesbaden, 07/2019
- [116] MORO, J.L. Baukonstruktion vom Prinzip zum Detail. Band 2 Konzeption. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2019. ISBN 978-3-662-57398-3
- [117] N. N. Die neue LUXHAUS Konstruktion –mehr als eine Wand. Georgensgmünd
- [118] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. 520: 2009-12, Gipsplatten - Begriffe, Anforderungen und Prüfverfahren: Beuth Verlag GmbH
- [119] N. N. Datenblatt: Knauf Bauplatte imprägniert. die wirtschaftliche Gipsplatte GKBI für Basis-Systeme im Trockenbau. Iphofen
- [120] RUPP, G. Fachkunde für Stuckateure und Trockenbauer. Mit Fachrechnen und Fachzeichnen. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 1997. ISBN 978-3-322-91863-5
- [121] FOUAD, N.A., Hg. Lehrbuch der Hochbaukonstruktionen. 4., vollst. überarb. und aktual. Aufl. 2013. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013. ISBN 978-3-519-35015-6
- [122] N. N. Datenblatt: Knauf Bauplatte GKB. die wirtschaftliche Gipsplatte für Basis-Systeme im Trockenbau. Iphofen
- [123] CHRISTEN, D.S. Praxiswissen der chemischen Verfahrenstechnik. Handbuch für Chemiker und Verfahrensingenieure. 2. bearbeitete und ergänzte Auflage. Berlin: Springer, 2010. VDI-Buch. ISBN 978-3-540-88974-8
- [124] LOHMEYER, G. Praktische Bauphysik. Eine Einführung mit Berechnungsbeispielen; mit 300 Tafeln und 323 Beispielen. 3., neubearb. und erw. Aufl. Stuttgart: Teubner, 1995. ISBN 351-9-250-136
- [125] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. 4287, Geometrische Produktspezifikation (GPS). Berlin: Beuth Verlag GmbH
- [126] KEFERSTEIN, C.P., M. MARXER und C. BACH. Fertigungsmesstechnik. Alles zu Messunsicherheit, konventioneller Messtechnik

und Multisensorik. 9., überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2018. ISBN 978-3-658-17755-3

- [127] HARTWIG, G. Eigenschaftsvergleich verschiedener Materialien. Metalle, Keramiken, Polymere, Faserverbundwerkstoffe: mit 42 Tabellen. Bad Saulgau: Leuze, 2008. ISBN 978-3-874-80243-7
- [128] HAGEDORN, J., F. SELL-LE BLANC und J. FLEISCHER. Handbuch der Wickeltechnik für hocheffiziente Spulen und Motoren. Ein Beitrag zur Energieeffizienz. Berlin: Springer Vieweg, 2016. ISBN 978-3-662-49209-3
- [129] VINARICKY, E., Hg. Elektrische Kontakte, Werkstoffe und Anwendungen. Grundlagen, Technologien, Pr
  üfverfahren. 3. Auflage. Berlin: Springer Vieweg, 2016. ISBN 978-3-642-45426-4
- [130] PLAßMANN, W. und D. SCHULZ, Hg. Handbuch Elektrotechnik. Grundlagen und Anwendungen für Elektrotechniker. 7., neu bearbeitete Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016. ISBN 978-3-658-07048-9
- SCHATT, W., B. KIEBACK und K.-P. WIETERS. Pulvermetallurgie. Technologien und Werkstoffe. 2., bearbeitete und erweiterte Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; Springer e-books, 2007. VDI-Buch. ISBN 978-3-540-68112-0
- [132] REM-AUFNAHMEN. Durchgeführt von Dr. Ralf Webler, Fa. Schlenk Metallic Pigments GmbH & Co KG. Roth, 08/2019
- [133] N. N. Datenblatt: Plasmabrush Betriebsanleitung, Stromversorgung PS2000. Regensburg, 2017
- [134] N. N. Datenblatt: Der Kompakte für niedrige Lasten, KR 5 sixx. Gersthofen
- BUSCHHAUS, A. Hochpräzise adaptive Steuerung und Regelung robotergeführter Prozesse: Dissertation. Bamberg: Meisenbach Verlag, 2017. Fertigungstechnik - Erlangen. 300. ISBN 978-3-87525-427-3
- [136] SCHUBERT, H. Handbuch der Mechanischen Verfahrenstechnik. Hoboken: John Wiley & Sons, 2012. ISBN 978-3-527-30577-3
- [137] FAUCHAIS, P.L., J.V. HEBERLEIN und M.I. BOULOS. Thermal Spray Fundamentals. From Powder to Part. Boston, MA: Springer US, 2014. ISBN 978-0-387-28319-7

- [138] PARTHIER, R. Messtechnik. Grundlagen und Anwendungen der elektrischen Messtechnik. 8., überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016. ISBN 978-3-658-13597-3
- [139] NICKEL, F. Herstellung und Charakterisierung mechanisch flexibler organischer Solarzellen durch Flüssigprozessierung. Zugl.: Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Diss., 2014. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, 2015. ISBN 978-3-731-50399-6
- [140] VDI-Gesellschaft Bauen und Gebäudetechnik. 2067 Blatt 1: 09/2012, Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen - Grundlagen und Kostenberechnung. Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure e.V., VDI-Fachbereich Technische Gebäudeausrüstung
- [141] NEUMANN, D., U. WEINBRENNER, U. HESTERMANN und L. RONGEN. Frick/Knöll Baukonstruktionslehre 2. 32., vollständig überarbeitete und aktualisierte Auflage. Wiesbaden: Vieweg + Teubner Verlag, 2003. ISBN 978-3-322-93886-2
- [142] RÖTZEL, A. Praxiswissen Umweltfreundliches Bauen. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2005. ISBN 978-3-322-97854-7
- [143] HEID, H. und J. REITH. Malerfachkunde. 5., vollständig überarbeitete Auflage. Wiesbaden: Vieweg + Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, 2010. ISBN 978-3-519-45900-2
- [144] STAHR, M. Bausanierung: Vieweg+Teubner, 2011. ISBN 978-3-8348-1406-7
- [145] WÜSTENBERG, T. Cellulose und Cellulosederivate. Grundlagen, Wirkungen und Applikationen. Hamburg: Behr, 2013. ISBN 978-3-954-68019-1
- [146] N. N. Datenblatt: Dispersonsfarbe Arctisweiss, Fa. Obi. Wermelskirchen, 2018
- [147] N. N. Datenblatt: ERFURT-Rauhfaser. Wermelskirchen, 2018
- [148] N. N. Datenblatt: OBI Kraftkleister ultra. Wermelskirchen, 2018
- [149] SCHILD, K. Wärmebrücken. Berechnung und Mindestwärmeschutz. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2018. Detailwissen Bauphysik. ISBN 978-3-658-20708-3

- [150] FOUAD, N.A., Hg. Bauphysik Kalender 2015. Simulations- und Berechnungsverfahren. 15. Jahrgang. Berlin: Ernst & Sohn, 2015. ISBN 978-3-433-60511-0
- [151] N. N. Indikator: Heiße Tage [online], 2019. 2 Dezember 2019
   [Zugriff am: 12. Oktober 2020]. Verfügbar unter: https://www.um
   weltbundesamt.de/indikator-heisse-tage
- [152] LOHMEYER, G. und M. POST. Praktische Bauphysik. Eine Einführung mit Berechnungsbeispielen. 8., vollst. aktualisierte Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2013. ISBN 978-3-834-82223-9
- [153] DIN Deutsches Institut f
  ür Normung e.V. 12831-1:2017-09: 2017-09, Energetische Bewertung von Geb
  äuden - Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast - Teil 1: Raumheizlast, Modul M3-3. Berlin: Beuth Verlag GmbH
- [154] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. DIN VDE 0100-410 VDE 0100-410:2018-10: Oktober 2018, Errichten von Niederspannungsanlagen. Berlin: VDE Verlag GmbH
- [155] N. N. Diamant GKFI. Robuster Alleskönner für leistungsstarken Trockenbau. Iphofen, 09/2020
- [156] HERING, E., K. BRESSLER und J. GUTEKUNST, Hg. Elektronik für Ingenieure und Naturwissenschaftler. 7., aktualisierte und verbesserte Auflage. Berlin: Springer Vieweg, 2017. ISBN 978-3-662-54213-2
- [157] BÄKER, M. Funktionswerkstoffe. Physikalische Grundlagen und Prinzipien. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014. ISBN 978-3-658-02969-2
- [158] BÖGE, W. und W. PLAßMANN. Vieweg Handbuch Elektrotechnik. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2007. ISBN 978-3-8348-0136-4
- [159] ZASTROW, D. Elektrotechnik. Ein Grundlagenlehrbuch; mit 142 Beispielen und 225 Übungsaufgaben mit Lösungen sowie 27 Übersichten als Wissensspeicher. 17., überarb. und erg. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2010. Studium. ISBN 978-3-834-80562-1
- [160] ADAM, J. Strombelastbarkeit von Leiterbahnen: Fachverb. Elektronik-Design, 2002
- [161] ROGLER, R.-D. und K. SCHELLENBERGER. Erwärmung einer Freileitung bei Wechsellast. Praktikum Hochstromtechnik. Dresden, 10/2018

- [162] GIEL, D. und U. HARTEN. Brückenkurs Physik. MINTestanforderungen fürs Studium. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; Springer Spektrum, 2019. ISBN 978-3-662-59553-4
- BERNSTEIN, H. Elektrotechnik/Elektronik für Maschinenbauer.
   Einfach und praxisgerecht. 3., überarb. Auflage 2018. Wiesbaden:
   Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018. ISBN 978-3-658-20838-7
- [164] N. N. High-Performance-Metallics made by Schlenk [online]. Kupfer- und Kupferlegierungspulver für technische Anwendungen [Zugriff am: 26. November 2020]. Verfügbar unter: https://www.schlenk.com/fileadmin/editorsCMS/uploads/PDF/ BU\_MM\_4\_Kupfer\_de.pdf
- [165] TICHELMANN, K. Trockenbau. Grundlagen, Materialien, Anwendungen. München, Germany: Institut für internationale Architektur-Dokumentation, 2007. Edition Detail. ISBN 978-3-920-03421-8
- [166] N. N. Datenblatt: 3M Technische Informationen. 3M TM Abschirmband Nr. 1181. 41453 Neuss, 2009
- [167] SCHILD, K. und W.M. WILLEMS, Hg. Wärmeschutz. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2011. ISBN 978-3-8348-1456-2
- [168] DENTEL, A. und U. DIETRICH. Thermische Behaglichkeit-Komfort in Gebäuden. Dokumentation Primero-Komfort. Hamburg, HafenCity Universität, Institut für Energie und Gebäude, 2013
- SCHILD, K. und W.M. WILLEMS. Thermische Behaglichkeit. In: K. SCHILD und W.M. WILLEMS, Hg. Wärmeschutz. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2011, S. 267-286. ISBN 978-3-8348-1456-2
- [170] N. N. Dem Wohlfühlklima auf der Spur. Objektive Behaglichkeitsmessungen am Arbeitsplatz und anderen klimatisierten Räumen durchführen. Titisee-Neustadt, 28. Juni 2017
- [171] DIN Deutsches Institut f
  ür Normung e.V. 7243:2017: 12/2017, Ergonomie der thermischen Umgebung. Berlin: Beuth Verlag GmbH
- [172] Deutsches Institut für Normung. 7726:2001: 04/2002, Umgebungsklima. Berlin: Beuth Verlag GmbH

- [173] Deutsches Institut für Normung. 33403-3:2011-07: 11/2007, Klima am Arbeitsplatz und in der Arbeitsumgebung. Berlin: Beuth Verlag GmbH
- [174] VOLKENANT, K., P.K. WOLFF, D. TRAUTHWEIN und M. GOLDMANN. Gesund bauen und wohnen. München: Haufe Verlag, 2008. Meine Immobilie. ISBN 978-3-448-08791-8
- [175] N. N. Norm-Heizlast nach DIN EN 12831. Projekt: Musterplanung / kfw 55. Holzminden, 11. Dezember 2014
- [176] REICH, S., B. WELLER und M.-S. FAHRION. Primärenergieeinsparung durch edelgasgefüllte Isolierverglasungen [online]. *Stahlbau*, 2013, 82(S1), S. 327-336. ISSN 00389145. Verfügbar unter: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/stab.201390074
- [177] N. N. Bestand an Wohnungen und Wohngebäuden. Bauabgang von Wohnungen und Wohngebäuden, Lange Reihen ab 1969 -2011. Wiesbaden, 2012
- [178] N. N. LUXHAUS [online]. Die Nr. 1 in der Climatic-Wand-Technologie., 2020 [Zugriff am: 19. November 2020]. Verfügbar unter: https://www.luxhaus.de/
- [179] SCHMIDT, S. und L. MANNSCHOTT. Die Wandproduktion für ein Fertighaus [online], 2020 [Zugriff am: 19. November 2020]. Verfügbar unter: https://www.bau-welt.de/neubau/fertighaus/ fertighaus-produktion.html
- SCHÄFER, M. So läuft die Fertigung im Werk [online], 2020
   [Zugriff am: 19. November 2020]. Verfügbar unter: https://www. fingerhaus.de/bauweise/bauablauf/fertigung-im-werk#c2393
- [181] N. N. plasmabrush PB3. Betriebsanleitung. Regensburg, 2010
- [182] HERING, E. Kalkulation für Ingenieure. Wiesbaden: Springer, 2014. essentials. ISBN 978-3-658-05199-0
- [183] N. N. Vorfertigung im Hausbau [online]. Wann lohnt sich die Investition in eine Kompaktanlage für einen Zimmereibetrieb?, 2017. 10.10.20217 [Zugriff am: 21. August 2021]. Verfügbar unter: https://www.schuler-consulting.com/news-events/news/artikel/ vorfertigung-im-hausbau
- [184] BREITKOPF, A. Erzeugerpreisindex für Maschinen in Deutschland in den Jahren 1990 bis 2020 [online]. Zitiert nach de.statista. com. 20 Januar 2021 [Zugriff am: 28. August 2021]. Verfügbar unter:

https://de.statista.com/statistik/daten/studie/236232/umfrage/er zeugerpreisindex-fuer-maschinen-in-deutschland/

- [185] N. N. AfA-Tabelle für den Wirtschaftszweig "Maschinenbau". Aktenzeichen: IV D 2-S 1551-470/01, Nr. 101 der Tabellenliste, 6. Dezember 2001
- [186] N. N. Multitalent für den Holzbau [online]. Unsere Multifunktionsbrücken, 2019 [Zugriff am: 28. August 2021]. Verfügbar unter: https://www.homag.com/fileadmin/product/houseconstruction/ brochures/Weinmann-Multifunktionsbruecke-WALLTEQ-de.pdf
- [187] N. N. Datenblatt Stickstoff [online]. Flaschenbündel. Erfüllt die Anforderungen der Norm DIN EN ISO 14175: N1 [Zugriff am: 28. August 2021]. Verfügbar unter: https://produkte.linde-gase.de /db\_neu/stickstoff.pdf
- [188] HENGER, R., T. HERBST und P. SALOSTOWITZ. Industrieimmobilien-Index: Neuer Index für Industrieimmobilien zeigt Rekordjahr 2017 [online], 23. Februar 2018. Verfügbar unter: https://www.iwkoeln.de/studien/ralph-henger-neuer-index-fuerindustrieimmobilien-zeigt-rekordjahr-2017-381541.html
- [189] SIEMENS AG. Systemhandbuch Multifunktionsgerät SENSTRON PAC4200 [online]. 09/2010 [Zugriff am: 5. Februar 2019]. Verfügbar unter: https://cache.industry.siemens.com/dl/files/595/34261 595/att\_90266/v1/manual\_sentron\_pac4200\_03\_de-DE.pdf
- [190] BREITKOPF, A. Industriestrompreise\* (inklusive Stromsteuer) in Deutschland in den Jahren 1998 bis 2021 [online]. Zitiert nach de.statista.com, 2021. 2021 [Zugriff am: 21. August 2021]. Verfügbar unter: https://de.statista.com/statistik/daten/studie/252029/um frage/industriestrompreise-inkl-stromsteuer-in-deutschland/
- [191] N. N. Kalkulatorischer Zinssatz 2021 [online], 2020. Verfügbar unter: https://gpanrw.de/sites/default/files/media/1595238854\_ kalkulatorischer\_zinssatz\_2021.pdf
- [192] SIEBELS, M. 1. Personal- und Sachkosten in der Bundesverwaltung für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen und Kostenberechnungen
   2. Kalkulationszinssätze für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen. Berlin, 28. Mai 2021
- [193] N. N. Allgemeiner Trinkwassertarif [online], 2021. 1 Februar 2021
   [Zugriff am: 17. Februar 2021]. Verfügbar unter: https://www.estw .de/de/Energie-Wasser/Wasser/Wasserversorgung-Erlangen/

- [194] ROTHACHER, T., H. SCHWARZBURGER, T. TIMKE und D. E.V. Stromspeicher für Gewerbe und Industrie. Technik, Auswahl und Auslegung Mit Anmerkungen für Heimspeicher. Berlin: Beuth Verlag, 2018. Beuth Praxis. ISBN 978-3-410-25755-4
- [195] N. N. Mean Well SDR-960-48 Hutschienen-Netzteil (DIN-Rail) 48 V/DC 20A 960W [online], 2021 [Zugriff am: 17. September 2021]. Verfügbar unter: https://www.voelkner.de/products/767822/ Mean-Well-SDR-960-48-Hutschienen-Netzteil-DIN-Rail-48-V-D C-20A-960W-1-x.html?ref=43&utm\_source=google&utm\_medi um=organic&utm\_campaign=fpla&gclid=CjwKCAjw-ZCKBhBkEi wAM4qfF-P\_Y8wFniRDPpILiAmUvLIAG4TExmxUPBfmD4PZ4a UZJBF9\_Zb5ShoCNXQQAvD\_BwE
- [196] N. N. Mean Well NDR-480-48 Hutschienen-Netzteil (DIN-Rail) 480 W [online], 2021 [Zugriff am: 25. September 2021]. Verfügbar unter: https://www.voelkner.de/products/902688/Mean-Well-N DR-480-48-Hutschienen-Netzteil-DIN-Rail-480-W-1-x.html
- [197] N. N. Mean Well NDR-240-48 Hutschienen-Netzteil (DIN-Rail)
   240 W [online], 2021 [Zugriff am: 25. September 2021]. Verfügbar unter: https://www.voelkner.de/products/902686/Mean-Well-N
   DR-240-48-Hutschienen-Netzteil-DIN-Rail-240-W-1-x.html?offer
   =3de59e056b0ee407dee5dffbc6dd25d8
- [198] N. N. Mean Well NDR-120-48 Hutschienen-Netzteil (DIN-Rail) 48
   V/DC 2.5A 120W [online], 2021 [Zugriff am: 25. September 2021].
   Verfügbar unter: https://www.voelkner.de/products/834112/Mean
   -Well-NDR-120-48-Hutschienen-Netzteil-DIN-Rail-48-V-DC-2.5
   A-120W-1-x.html?offer=743511a4a51aee11b4f79bb44a184a37
- [199] N. N. SHELLY 2.5 Shelly 2.5 Wi-Fi WLAN Schaltaktor 2x 10 A [online], 2021 [Zugriff am: 26. September 2021]. Verfügbar unter: https://www.reichelt.de/de/de/shelly-2-5-wi-fi-wlan-schaltaktor-2x-10-a-shelly-2-5-p267692.html?PROVID=2788&gclid=CjoKCQj wkbuKBhDRARIsAALysV4DJv0x6SexP3MywmEsuDuy\_SPVuqBq z869RbodUCap3bWnvyQtKicaAnwoEALw\_wcB&&r=1
- [200] N. N. Shelly [online] [Zugriff am: 26. September 2021]. Verfügbar unter: https://shelly.cloud/
- [201] N. N. SHELLY HTW Shelly H&T Wi-Fi WLAN Luft-/Temp.-sensor [online], 2021 [Zugriff am: 26. September 2021]. Verfügbar unter: https://www.reichelt.de/shelly-h-t-wi-fi-wlan-luft-temp-sensorshelly-htw-p268813.html?&nbc=1&trstct=lsbght\_sldr::268815

- [202] N. N. 3M Scotch 1181 ET118112X16.5 Abschirmband Scotch® 1181 Kupfer [online], 2021 [Zugriff am: 26. September 2021]. Verfügbar unter: https://www.voelkner.de/products/4162/3M-Scotch-1181-ET118112X16.5-Abschirmband-Scotch-1181-Kupfer-L-x-B-16.5m-x-12mm-1St.html?ref=43&utm\_source=google&utm\_medium=orga nic&utm\_campaign=fpla&gclid=CjoKCQjwtMCKBhDAARIsAG-2Eu9q-xvBljz9rlnKpboGk4gRRIdC-eDAey3mvgnDkGVJnzNiNfxq SEkaAiAtEALw\_wcB
- [203] N. N. WAGO 222-413-50 222 Verbindungsklemme flexibel [online], 2021 [Zugriff am: 26. September 2021]. Verfügbar unter: https://www.voelkner.de/products/2298/WAGO-222-413-50-222-Verbindungsklemme-flexibel-0.08-4mm-starr-0.08-2.5mm-Polzahl-num-3-50-St.-Grau-Orange.html?ref=43&utm\_source=google &utm\_medium=organic&utm\_campaign=fpla&gclid=CjoKCQjwt MCKBhDAARIsAG-2Eu\_dp6jMZW4VqLendGwBX-Mooos\_6Qux VUDzawM-nmf2wIQQ5\_Zdb5waAm58EALw\_wcB
- [204] N. N. Kopp 151510843 Schlauchleitung Ho3VV-F 2 x 0.75mm<sup>2</sup> Weiß 10 m [online], 2021 [Zugriff am: 26. September 2021]. Verfügbar unter: https://www.voelkner.de/products/946856/Kopp-15151084 3-Schlauchleitung-Ho3VV-F-2-x-0.75mm-Weiss-10m.html?ref=43 &utm\_source=google&utm\_medium=organic&utm\_campaign=fp la&gclid=CjoKCQjwtMCKBhDAARIsAG-2Eu\_jZSnlwOKR7QmvG n1s2t96LYqC8G3d2rN4PoJoF4MCaUEsHGQTXVgaAi1vEALw\_wc B
- [205] N. N. Arbeitskosten in Deutschland 2020 im oberen EU-Drittel [online]. Bei den Lohnnebenkosten lag Deutschland unter dem EU-Durchschnitt, 2021. 3 Mai 2021 [Zugriff am: 26. September 2021]. Verfügbar unter: https://www.destatis.de/DE/Presse/Presse mitteilungen/2021/05/PD21\_203\_624.html;jsessionid=B120A505E7 03FE8D6C835D12668486E3.live722
- [206] FREHNER, M. Handwerkerstunde: Was kostet ein Handwerker? [online]. Handwerker Stundensatz, 2021 [Zugriff am: 26. September 2021]. Verfügbar unter: https://www.deutsche-handwerks-zeit ung.de/handwerkerstunde-was-kostet-ein-handwerker-146071/
- [207] WINIEWSKA, B., B. MAILACH und B. OSCHATZ. Energetische Effizienz und Wirtschaftlichkeit der elektrischen Direktheizung. Dortmund, Leipzig, 26. Juni 2019

# Verzeichnis promotionsbezogener studentischer Arbeiten

- [S1] KAISER, F. Innovationen fotorealistisch pr\u00e4sentieren die M\u00f6glichkeiten in 3DS Max Design. Masterarbeit. Erlangen, 15. Februar 2015
- [S2] HAHN, D. Beurteilung von additiv beschichteten Baumaterialien auf ihre Eignung als Flächenheizung unter realen Bedingungen. Erlangen, 31. März 2017
- [S<sub>3</sub>] SCHALLER, L. Aufbau eines realitätsnahen Szenarios zur Untersuchung additiv aufgetragener Heizstrukturen im häuslichen Anwendungsfeld. Erlangen, 1. März 2016
- [S4] SCHOLZ, S. Experimentelle Untersuchungen zum additiven Auftrag von Heizstrukturen auf Oberflächen im Wohnumfeld. Projektarbeit. Erlangen, 15. September 2014
- [S5] SCHEINER, L. Eigenschafts- und Dauergebrauchsanalyse plasmabeschichteter Flächenheizsegmente aus Gipskarton. Masterarbeit. Erlangen, 2019
- [S6] GRUPP, H. Untersuchung thermischer, mechanischer und elektrischer Eigenschaften plasmabeschichteter Gipskartonplatten. Masterarbeit. Erlangen, 2019
- [S7] DORSCHT, F. Qualifizierung additiv hergestellter Flächenheizsegmente unter realen Bedingungen in einem Demonstrationsraum. Bachelorarbeit. Erlangen, 2019
- [S8] KOTZ, K. Entwicklung, Aufbau und Evaluierung eines Smart-Home-Systems unter realen Bedingungen in einem Testgebäude. Projektarbeit. Erlangen, 2019
- [S9] ADAM, S. Erstellen eines kinematischen Simulationsmodells des Plasmabeschichtungsprozesses im Kontext der Fertighausherstellung. Projektarbeit. Erlangen: Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik, 1. März 2018
- [S10] SCHRÖPPEL, K. Studie zur Wirtschaftlichkeitsbetrachtung und -bewertung einer mit additiven Technologien hergestellten Flächenheizung. Erlangen
- [S11] BAUMÜLLER, M. Wirtschaftlichkeitsbetrachtung und -bewertung von additiven Fertigungstechnologien im direkten Vergleich zur Plasmabeschichtung. Erlangen, 31. Oktober 2017

# Verzeichnis promotionsbezogener eigener Publikationen

- [P1] BRAUN, T., S. GREINER, A. DIEPGEN, K. SCHRÖPPEL, D. DRUMMER und J. FRANKE. ADDITIVE METALLIZATION OF INJECTION MOLDED CERAMIC COMPONENTS BY A PLASMA-COATING PROCESS. In: IEEE, Hg. Proceedings of the SMTA Pan Pacific Microelectronics Symposium, 2017. ISBN 978-1-944543-02-0
- [P2] GREINER, S., K.H. KURTH, C. FIX, T. BRAUN, J. FRANKE und D. DRUMMER. Influence of Material and Processing Parameters on the Surface Roughness of Injection-Molded Ceramic Parts [online]. *Journal of Ceramic Science and Technology*, 2017, 08, S. 227-286. Verfügbar unter: doi:10.4416/JCST2017-00009
- [P3] BRAUN, T., S. GREINER, J. FRANKE und D. DRUMMER. Additive Plasma Metallization of Spatial Ceramic Injection Molded Components. In: 12th International Congress Molded Interconnect Devices, 2016, S. 62-67. ISBN 978-1-5090-5427-5
- [P4] BRAUN, T., S. GREINER, U. BAIERL, D. DRUMMER und J. FRANKE. Additive Metallisierung von im Spritzguss hergestellten Keramiken mittels Plasma-Coating-Technologie. *PLUS - Produktion von Leiterplatten und Systemen*, 2017, 19, S. 985-1144
- [P5] HAHN, D., T. BRAUN und J. FRANKE. Entwicklung und Evaluierung eines Systems zur automatisierten Prüfung von im Plasmabeschichtungsprozess additiv gefertigten Leiterbahnstrukturen für elektronische Baugruppen. In: GEMEINSCHAFTSVERANSTAL-TUNG VON DVS – DEUTSCHER VERBAND FÜR SCHWEIßEN UND VERWANDTE VERFAHREN E. V. UND GMM – VDE/VDI-GESELLSCHAFT MIKROELEKTRONIK, MIKROSYSTEM- UND FEINWERKTECHNIK, Hg. Elektronische Baugruppen und Leiterplatten. EBL 2018 : multifunktionale Aufbau- und Verbindungstechnik - Beherrschung der Vielfalt : Vorträge der 9. DVS/GMM-Tagung in Fellbach am 20. und 21. Februar 2018. Düsseldorf: DVS Media GmbH, 2018, S. 20-25
- [P6] BRAUN, T. und J. FRANKE. Baustoff-integrierte Flächenheizung (BiFH). Abschlussbericht. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2019.
   Forschungsinitiative Zukunft Bau. F 3177. ISBN 3738803963

# Reihenübersicht

Koordination der Reihe (Stand 2023): Geschäftsstelle Maschinenbau, Dr.-Ing. Oliver Kreis, www.mb.fau.de/diss/

Im Rahmen der Reihe sind bisher die nachfolgenden Bände erschienen.

Band 1 – 52 Fertigungstechnik – Erlangen ISSN 1431-6226 Carl Hanser Verlag, München

Band 53 – 307 Fertigungstechnik – Erlangen ISSN 1431-6226 Meisenbach Verlag, Bamberg

ab Band 308 FAU Studien aus dem Maschinenbau ISSN 2625-9974 FAU University Press, Erlangen

Die Zugehörigkeit zu den jeweiligen Lehrstühlen ist wie folgt gekennzeichnet:

Lehrstühle:

FAPS	Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik
FMT	Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik
KTmfk	Lehrstuhl für Konstruktionstechnik
LFT	Lehrstuhl für Fertigungstechnologie
LGT	Lehrstuhl für Gießereitechnik
LPT	Lehrstuhl für Photonische Technologien
REP	Lehrstuhl für Ressourcen- und Energieeffiziente Produktionsmaschinen

# Band 1: Andreas Hemberger

Innovationspotentiale in der rechnerintegrierten Produktion durch wissensbasierte Systeme FAPS, 208 Seiten, 107 Bilder. 1988. ISBN 3-446-15234-2.

### Band 2: Detlef Classe

Beitrag zur Steigerung der Flexibilität automatisierter Montagesysteme durch Sensorintegration und erweiterte Steuerungskonzepte FAPS, 194 Seiten, 70 Bilder. 1988. ISBN 3-446-15529-5.

# Band 3: Friedrich-Wilhelm Nolting

Projektierung von Montagesystemen FAPS, 201 Seiten, 107 Bilder, 1 Tab. 1989.ISBN 3-446-15541-4.

### Band 4: Karsten Schlüter

Nutzungsgradsteigerung von Montagesystemen durch den Einsatz der Simulationstechnik FAPS, 177 Seiten, 97 Bilder. 1989. ISBN 3-446-15542-2.

### Band 5: Shir-Kuan Lin

Aufbau von Modellen zur Lageregelung von Industrierobotern FAPS, 168 Seiten, 46 Bilder. 1989. ISBN 3-446-15546-5.

# Band 6: Rudolf Nuss

Untersuchungen zur Bearbeitungsqualität im Fertigungssystem Laserstrahlschneiden LFT, 206 Seiten, 115 Bilder, 6 Tab. 1989. ISBN 3-446-15783-2.

# Band 7: Wolfgang Scholz

Modell zur datenbankgestützten Planung automatisierter Montageanlagen FAPS, 194 Seiten, 89 Bilder. 1989. ISBN 3-446-15825-1.

Band 8: Hans-Jürgen Wißmeier Beitrag zur Beurteilung des Bruchverhaltens von Hartmetall-Fließpreßmatrizen

LFT, 179 Seiten, 99 Bilder, 9 Tab. 1989. ISBN 3-446-15921-5.

# Band 9: Rainer Eisele

Konzeption und Wirtschaftlichkeit von Planungssystemen in der Produktion

FAPS, 183 Seiten, 86 Bilder. 1990. ISBN 3-446-16107-4.

# Band 10: Rolf Pfeiffer

Technologisch orientierte Montageplanung am Beispiel der Schraubtechnik FAPS, 216 Seiten, 102 Bilder, 16 Tab. 1990. ISBN 3-446-16161-9.

#### Band 11: Herbert Fischer

Verteilte Planungssysteme zur Flexibilitätssteigerung der rechnerintegrierten Teilefertigung FAPS, 201 Seiten, 82 Bilder. 1990. ISBN 3-446-16105-8.

# Band 12: Gerhard Kleineidam

CAD/CAP: Rechnergestützte Montagefeinplanung FAPS, 203 Seiten, 107 Bilder. 1990. ISBN 3-446-16112-0.

# Band 13: Frank Vollertsen

Pulvermetallurgische Verarbeitung eines übereutektoiden verschleißfesten Stahls LFT, XIII u. 217 Seiten, 67 Bilder, 34 Tab. 1990. ISBN 3-446-16133-3.

# Band 14: Stephan Biermann

Untersuchungen zur Anlagen- und Prozeßdiagnostik für das Schneiden mit CO2-Hochleistungslasern LFT, VIII u. 170 Seiten, 93 Bilder, 4 Tab. 1991. ISBN 3-446-16269-0.

# Band 15: Uwe Geißler

Material- und Datenfluß in einer flexiblen Blechbearbeitungszelle LFT, 124 Seiten, 41 Bilder, 7 Tab. 1991. ISBN 3-446-16358-1.

# Band 16: Frank Oswald Hake

Entwicklung eines rechnergestützten Diagnosesystems für automatisierte Montagezellen FAPS, XIV u. 166 Seiten, 77 Bilder. 1991. ISBN 3-446-16428-6.

# Band 17: Herbert Reichel

Optimierung der Werkzeugbereitstellung durch rechnergestützte Arbeitsfolgenbestimmung FAPS, 198 Seiten, 73 Bilder, 2 Tab. 1991. ISBN 3-446-16453-7.

# Band 18: Josef Scheller

Modellierung und Einsatz von Softwaresystemen für rechnergeführte Montagezellen FAPS, 198 Seiten, 65 Bilder. 1991. ISBN 3-446-16454-5.

# Band 19: Arnold vom Ende

Untersuchungen zum Biegeumforme mit elastischer Matrize LFT, 166 Seiten, 55 Bilder, 13 Tab. 1991. ISBN 3-446-16493-6.

# Band 20: Joachim Schmid

Beitrag zum automatisierten Bearbeiten von Keramikguß mit Industrierobotern FAPS, XIV u. 176 Seiten, 111 Bilder, 6 Tab. 1991. ISBN 3-446-16560-6.

# Band 21: Egon Sommer

Multiprozessorsteuerung für kooperierende Industrieroboter in Montagezellen FAPS, 188 Seiten, 102 Bilder. 1991. ISBN 3-446-17062-6.

# Band 22: Georg Geyer

Entwicklung problemspezifischer Verfahrensketten in der Montage FAPS, 192 Seiten, 112 Bilder. 1991. ISBN 3-446-16552-5.

# Band 23: Rainer Flohr

Beitrag zur optimalen Verbindungstechnik in der Oberflächenmontage (SMT) FAPS, 186 Seiten, 79 Bilder. 1991. ISBN 3-446-16568-1.

# Band 24: Alfons Rief

Untersuchungen zur Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden und schweißen in der Rohkarosseriefertigung LFT, VI u. 145 Seiten, 58 Bilder, 5

Tab. 1991. ISBN 3-446-16593-2.

# Band 25: Christoph Thim

Rechnerunterstützte Optimierung von Materialflußstrukturen in der Elektronikmontage durch Simulation

FAPS, 188 Seiten, 74 Bilder. 1992. ISBN 3-446-17118-5.

# Band 26: Roland Müller

CO2 -Laserstrahlschneiden von kurzglasverstärkten Verbundwerkstoffen LFT, 141 Seiten, 107 Bilder, 4 Tab.

1992. ISBN 3-446-17104-5.

# Band 27: Günther Schäfer

Integrierte Informationsverarbeitung bei der Montageplanung FAPS, 195 Seiten, 76 Bilder. 1992. ISBN 3-446-17117-7.

#### Band 28: Martin Hoffmann

Entwicklung einerCAD/CAM-Prozeßkette für die Herstellung von Blechbiegeteilen LFT, 149 Seiten, 89 Bilder. 1992. ISBN 3-446-17154-1.

#### Band 29: Peter Hoffmann

Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden und –schweißen: Prozeßführung und Systemtechnik in der 3D-Laserstrahlbearbeitung von Blechformteilen

LFT, 186 Seiten, 92 Bilder, 10 Tab. 1992. ISBN 3-446-17153-3.

# Band 30: Olaf Schrödel

Flexible Werkstattsteuerung mit objektorientierten Softwarestrukturen

FAPS, 180 Seiten, 84 Bilder. 1992. ISBN 3-446-17242-4.

# Band 31: Hubert Reinisch

Planungs- und Steuerungswerkzeuge zur impliziten Geräteprogrammierung in Roboterzellen FAPS, XI u. 212 Seiten, 112 Bilder. 1992. ISBN 3-446-17380-3.

# Band 32: Brigitte Bärnreuther

Ein Beitrag zur Bewertung des Kommunikationsverhaltens von Automatisierungsgeräten in flexiblen Produktionszellen FAPS, XI u. 179 Seiten, 71 Bilder. 1992. ISBN 3-446-17451-6.

#### Band 33: Joachim Hutfless

Laserstrahlregelung und Optikdiagnostik in der Strahlführung einer CO2-Hochleistungslaseranlage LFT, 175 Seiten, 70 Bilder, 17 Tab. 1993. ISBN 3-446-17532-6.

# Band 34: Uwe Günzel

Entwicklung und Einsatz eines Simula-tionsverfahrens für operative undstrategische Probleme der Produktionsplanung und -steuerung FAPS, XIV u. 170 Seiten, 66 Bilder, 5 Tab. 1993. ISBN 3-446-17604-7.

#### Band 35: Bertram Ehmann

Operatives Fertigungscontrolling durch Optimierung auftragsbezogener Bearbeitungsabläufe in der Elektronikfertigung FAPS, XV u. 167 Seiten, 114 Bilder. 1993. ISBN 3-446-17658-6.

# Band 36: Harald Kolléra

Entwicklung eines benutzerorientierten Werkstattprogrammiersystems für das Laserstrahlschneiden LFT, 129 Seiten, 66 Bilder, 1 Tab. 1993. ISBN 3-446-17719-1.

#### Band 37: Stephanie Abels

Modellierung und Optimierung von Montageanlagen in einem integrierten Simulationssystem FAPS, 188 Seiten, 88 Bilder. 1993. ISBN 3-446-17731-0.

# Band 38: Robert Schmidt-Hebbel

Laserstrahlbohren durchflußbestimmender Durchgangslöcher LFT, 145 Seiten, 63 Bilder, 11 Tab. 1993. ISBN 3-446-17778-7.

# Band 39: Norbert Lutz

Oberflächenfeinbearbeitung keramischer Werkstoffe mit XeCl-Excimerlaserstrahlung LFT, 187 Seiten, 98 Bilder, 29 Tab. 1994. ISBN 3-446-17970-4.

# Band 40: Konrad Grampp

Rechnerunterstützung bei Test und Schulung an Steuerungssoftware von SMD-Bestücklinien FAPS, 178 Seiten, 88 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18173-3.

# Band 41: Martin Koch

Wissensbasierte Unterstützung derAngebotsbearbeitung in der Investitionsgüterindustrie FAPS, 169 Seiten, 68 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18174-1.

Band 42: Armin Gropp Anlagen- und Prozeßdiagnostik beim Schneiden mit einem gepulsten Nd:YAG-Laser LFT, 160 Seiten, 88 Bilder, 7 Tab. 1995. ISBN 3-446-18241-1.

# Band 43: Werner Heckel

Optische 3D-Konturerfassung und on-line Biegewinkelmessung mit dem Lichtschnittverfahren LFT, 149 Seiten, 43 Bilder, 11 Tab. 1995. ISBN 3-446-18243-8.

# Band 44: Armin Rothhaupt

Modulares Planungssystem zur Optimierung der Elektronikfertigung FAPS, 180 Seiten, 101 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18307-8.

# Band 45: Bernd Zöllner

Adaptive Diagnose in der Elektronikproduktion FAPS, 195 Seiten, 74 Bilder, 3 Tab. 1995. ISBN 3-446-18308-6.

#### Band 46: Bodo Vormann

Beitrag zur automatisierten Handhabungsplanung komplexer Blechbiegeteile LFT, 126 Seiten, 89 Bilder, 3 Tab. 1995. ISBN 3-446-18345-0.

## Band 47: Peter Schnepf

Zielkostenorientierte Montageplanung FAPS, 144 Seiten, 75 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18397-3.

# Band 48: Rainer Klotzbücher

Konzept zur rechnerintegrierten Materialversorgung in flexiblen Fertigungssystemen FAPS, 156 Seiten, 62 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18412-0.

### Band 49: Wolfgang Greska

Wissensbasierte Analyse undKlassifizierung von Blechteilen LFT, 144 Seiten, 96 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18462-7.

## Band 50: Jörg Franke

Integrierte Entwicklung neuer Produkt- und Produktionstechnologien für räumliche spritzgegossene Schaltungsträger (3-D MID) FAPS, 196 Seiten, 86 Bilder, 4 Tab. 1995. ISBN 3-446-18448-1.

# Band 51: Franz-Josef Zeller

Sensorplanung und schnelle Sensorregelung für Industrieroboter FAPS, 190 Seiten, 102 Bilder, 9 Tab. 1995. ISBN 3-446-18601-8.

#### Band 52: Michael Solvie

Zeitbehandlung und Multimedia-Unterstützung in Feldkommunikationssystemen FAPS, 200 Seiten, 87 Bilder, 35 Tab. 1996. ISBN 3-446-18607-7.

#### Band 53: Robert Hopperdietzel

Reengineering in der Elektro- und Elektronikindustrie FAPS, 180 Seiten, 109 Bilder, 1 Tab. 1996. ISBN 3-87525-070-2.

#### Band 54: Thomas Rebhahn

Beitrag zur Mikromaterialbearbeitung mit Excimerlasern - Systemkomponenten und Verfahrensoptimierungen

LFT, 148 Seiten, 61 Bilder, 10 Tab. 1996. ISBN 3-87525-075-3.

# Band 55: Henning Hanebuth

Laserstrahlhartlöten mit Zweistrahltechnik LFT, 157 Seiten, 58 Bilder, 11 Tab. 1996. ISBN 3-87525-074-5.

# Band 56: Uwe Schönherr

Steuerung und Sensordatenintegration für flexible Fertigungszellen mitkooperierenden Robotern

FAPS, 188 Seiten, 116 Bilder, 3 Tab. 1996. ISBN 3-87525-076-1.

# Band 57: Stefan Holzer

Berührungslose Formgebung mit-Laserstrahlung LFT, 162 Seiten, 69 Bilder, 11 Tab. 1996. ISBN 3-87525-079-6.

#### Band 58: Markus Schultz

Fertigungsqualität beim 3D-Laserstrahlschweißen vonBlechformteilen LFT, 165 Seiten, 88 Bilder, 9 Tab.

1997. ISBN 3-87525-080-X.

#### Band 59: Thomas Krebs

Integration elektromechanischer CA-Anwendungen über einem STEP-Produktmodell FAPS, 198 Seiten, 58 Bilder, 8 Tab. 1997. ISBN 3-87525-081-8.

#### Band 60: Jürgen Sturm

Prozeßintegrierte Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion FAPS, 167 Seiten, 112 Bilder, 5 Tab. 1997. ISBN 3-87525-082-6.

#### **Band 61: Andreas Brand**

Prozesse und Systeme zur Bestückung räumlicher elektronischer Baugruppen (3D-MID) FAPS, 182 Seiten, 100 Bilder. 1997. ISBN 3-87525-087-7.

#### Band 62: Michael Kauf

Regelung der Laserstrahlleistung und der Fokusparameter einer CO2-Hochleistungslaseranlage LFT, 140 Seiten, 70 Bilder, 5 Tab. 1997. ISBN 3-87525-083-4.

#### Band 63: Peter Steinwasser

Modulares Informationsmanagement in der integrierten Produktund Prozeßplanung FAPS, 190 Seiten, 87 Bilder. 1997. ISBN 3-87525-084-2.

#### Band 64: Georg Liedl

Integriertes Automatisierungskonzept für den flexiblen Materialfluß in der Elektronikproduktion FAPS, 196 Seiten, 96 Bilder, 3 Tab. 1997. ISBN 3-87525-086-9.

# Band 65: Andreas Otto

Transiente Prozesse beim Laserstrahlschweißen LFT, 132 Seiten, 62 Bilder, 1 Tab. 1997. ISBN 3-87525-089-3.

#### Band 66: Wolfgang Blöchl

Erweiterte Informationsbereitstellung an offenen CNC-Steuerungen zur Prozeß- und Programmoptimierung FAPS, 168 Seiten, 96 Bilder. 1997. ISBN 3-87525-091-5.

#### Band 67: Klaus-Uwe Wolf

Verbesserte Prozeßführung und Prozeßplanung zur Leistungs- und Qualitätssteigerung beim Spulenwickeln FAPS, 186 Seiten, 125 Bilder. 1997. ISBN 3-87525-092-3.

#### Band 68: Frank Backes

Technologieorientierte Bahnplanung für die 3D-Laserstrahlbearbeitung LFT, 138 Seiten, 71 Bilder, 2 Tab. 1997. ISBN 3-87525-093-1.

#### Band 69: Jürgen Kraus

Laserstrahlumformen von Profilen LFT, 137 Seiten, 72 Bilder, 8 Tab. 1997. ISBN 3-87525-094-X.

# Band 70: Norbert Neubauer

Adaptive Strahlführungen für CO2-Laseranlagen LFT, 120 Seiten, 50 Bilder, 3 Tab. 1997. ISBN 3-87525-095-8.

#### Band 71: Michael Steber

Prozeßoptimierter Betrieb flexibler Schraubstationen in der automatisierten Montage FAPS, 168 Seiten, 78 Bilder, 3 Tab. 1997. ISBN 3-87525-096-6.

## Band 72: Markus Pfestorf

Funktionale 3D-Oberflächenkenngrößen in der Umformtechnik LFT, 162 Seiten, 84 Bilder, 15 Tab. 1997. ISBN 3-87525-097-4.

## Band 73: Volker Franke

Integrierte Planung und Konstruktion von Werkzeugen für die Biegebearbeitung LFT, 143 Seiten, 81 Bilder. 1998. ISBN 3-87525-098-2.

#### Band 74: Herbert Scheller

Automatisierte Demontagesysteme und recyclinggerechte Produktgestaltung elektronischer Baugruppen FAPS, 184 Seiten, 104 Bilder, 17 Tab. 1998. ISBN 3-87525-099-0.

#### Band 75: Arthur Meßner

Kaltmassivumformung metallischer Kleinstteile – Werkstoffverhalten, Wirkflächenreibung, Prozeßauslegung LFT, 164 Seiten, 92 Bilder, 14 Tab.

1998. ISBN 3-87525-100-8.

# Band 76: Mathias Glasmacher

Prozeß- und Systemtechnik zum Laserstrahl-Mikroschweißen LFT, 184 Seiten, 104 Bilder, 12 Tab. 1998. ISBN 3-87525-101-6.

# Band 77: Michael Schwind

Zerstörungsfreie Ermittlung mechanischer Eigenschaften von Feinblechen mit dem Wirbelstromverfahren LFT, 124 Seiten, 68 Bilder, 8 Tab. 1998. ISBN 3-87525-102-4.

#### Band 78: Manfred Gerhard

Qualitätssteigerung in der Elektronikproduktion durch Optimierung der Prozeßführung beim Löten komplexer Baugruppen FAPS, 179 Seiten, 113 Bilder, 7 Tab. 1998. ISBN 3-87525-103-2.

#### Band 79: Elke Rauh

Methodische Einbindung der Simulation in die betrieblichen Planungs- und Entscheidungsabläufe FAPS, 192 Seiten, 114 Bilder, 4 Tab. 1998. ISBN 3-87525-104-0.
#### Band 80: Sorin Niederkorn

Meßeinrichtung zur Untersuchung der Wirkflächenreibung bei umformtechnischen Prozessen LFT, 99 Seiten, 46 Bilder, 6 Tab. 1998. ISBN 3-87525-105-9.

#### Band 81: Stefan Schuberth

Regelung der Fokuslage beim Schweißen mit CO2-Hochleistungslasern unter Einsatz von adaptiven Optiken LFT, 140 Seiten, 64 Bilder, 3 Tab. 1998. ISBN 3-87525-106-7.

#### Band 82: Armando Walter Colombo

Development and Implementation of Hierarchical Control Structures of Flexible Production Systems Using High Level Petri Nets FAPS, 216 Seiten, 86 Bilder. 1998. ISBN 3-87525-109-1.

#### Band 83: Otto Meedt

Effizienzsteigerung bei Demontage und Recycling durch flexible Demontagetechnologien und optimierte Produktgestaltung FAPS, 186 Seiten, 103 Bilder. 1998. ISBN 3-87525-108-3.

#### Band 84: Knuth Götz

Modelle und effiziente Modellbildung zur Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion FAPS, 212 Seiten, 129 Bilder, 24 Tab. 1998. ISBN 3-87525-112-1.

#### Band 85: Ralf Luchs

Einsatzmöglichkeiten leitender Klebstoffe zur zuverlässigen Kontaktierung elektronischer Bauelemente in der SMT FAPS, 176 Seiten, 126 Bilder, 30 Tab. 1998. ISBN 3-87525-113-7.

#### Band 86: Frank Pöhlau

Entscheidungsgrundlagen zur Einführung räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID) FAPS, 144 Seiten, 99 Bilder. 1999. ISBN 3-87525-114-8.

### Band 87: Roland T. A. Kals

Fundamentals on the miniaturization of sheet metal working processes

LFT, 128 Seiten, 58 Bilder, 11 Tab. 1999. ISBN 3-87525-115-6.

#### Band 88: Gerhard Luhn

Implizites Wissen und technisches Handeln am Beispiel der Elektronikproduktion FAPS, 252 Seiten, 61 Bilder, 1 Tab. 1999. ISBN 3-87525-116-4.

#### Band 89: Axel Sprenger

Adaptives Streckbiegen von Aluminium-Strangpreßprofilen LFT, 114 Seiten, 63 Bilder, 4 Tab. 1999. ISBN 3-87525-117-2.

### Band 90: Hans-Jörg Pucher

Untersuchungen zur Prozeßfolge Umformen, Bestücken und Laserstrahllöten von Mikrokontakten LFT, 158 Seiten, 69 Bilder, 9 Tab. 1999. ISBN 3-87525-119-9.

#### Band 91: Horst Arnet

Profilbiegen mit kinematischer Gestalterzeugung LFT, 128 Seiten, 67 Bilder, 7 Tab. 1999. ISBN 3-87525-120-2.

### Band 92: Doris Schubart

Prozeßmodellierung und Technologieentwicklung beim Abtragen mit CO2-Laserstrahlung LFT, 133 Seiten, 57 Bilder, 13 Tab. 1999. ISBN 3-87525-122-9.

#### Band 93: Adrianus L. P. Coremans

Laserstrahlsintern von Metallpulver - Prozeßmodellierung, Systemtechnik, Eigenschaften laserstrahlgesinterter Metallkörper LFT, 184 Seiten, 108 Bilder, 12 Tab. 1999. ISBN 3-87525-124-5.

Band 94: Hans-Martin Biehler Optimierungskonzepte für Qualitätsdatenverarbeitung und Informationsbereitstellung in der Elektronikfertigung

FAPS, 194 Seiten, 105 Bilder. 1999. ISBN 3-87525-126-1.

### Band 95: Wolfgang Becker

Oberflächenausbildung und tribologische Eigenschaften excimerlaserstrahlbearbeiteter Hochleistungskeramiken LFT, 175 Seiten, 71 Bilder, 3 Tab. 1999. ISBN 3-87525-127-X.

#### Band 96: Philipp Hein

Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren: Modellierung, Prozeßauslegung und Prozeßführung LFT, 129 Seiten, 57 Bilder, 7 Tab. 1999. ISBN 3-87525-128-8.

#### Band 97: Gunter Beitinger

Herstellungs- und Prüfverfahren für thermoplastische Schaltungsträger FAPS, 169 Seiten, 92 Bilder, 20 Tab. 1999. ISBN 3-87525-129-6.

#### Band 98: Jürgen Knoblach

Beitrag zur rechnerunterstützten verursachungsgerechten Angebotskalkulation von Blechteilen mit Hilfe wissensbasierter Methoden

LFT, 155 Seiten, 53 Bilder, 26 Tab. 1999. ISBN 3-87525-130-X.

### Band 99: Frank Breitenbach

Bildverarbeitungssystem zur Erfassung der Anschlußgeometrie elektronischer SMT-Bauelemente LFT, 147 Seiten, 92 Bilder, 12 Tab. 2000. ISBN 3-87525-131-8.

### Band 100: Bernd Falk

Simulationsbasierte Lebensdauervorhersage für Werkzeuge der Kaltmassivumformung LFT, 134 Seiten, 44 Bilder, 15 Tab. 2000. ISBN 3-87525-136-9.

#### Band 101: Wolfgang Schlögl

Integriertes Simulationsdaten-Management für Maschinenentwicklung und Anlagenplanung FAPS, 169 Seiten, 101 Bilder, 20 Tab. 2000. ISBN 3-87525-137-7.

#### Band 102: Christian Hinsel

Ermüdungsbruchversagen hartstoffbeschichteter Werkzeugstähle in der Kaltmassivumformung LFT, 130 Seiten, 80 Bilder, 14 Tab. 2000. ISBN 3-87525-138-5.

#### Band 103: Stefan Bobbert

Simulationsgestützte Prozessauslegung für das Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren LFT, 123 Seiten, 77 Bilder. 2000. ISBN 3-87525-145-8.

#### Band 104: Harald Rottbauer

Modulares Planungswerkzeug zum Produktionsmanagement in der Elektronikproduktion FAPS, 166 Seiten, 106 Bilder. 2001. ISBN 3-87525-139-3.

#### Band 105: Thomas Hennige

Flexible Formgebung von Blechen durch Laserstrahlumformen LFT, 119 Seiten, 50 Bilder. 2001. ISBN 3-87525-140-7.

#### Band 106: Thomas Menzel

Wissensbasierte Methoden für die rechnergestützte Charakterisierung und Bewertung innovativer Fertigungsprozesse LFT, 152 Seiten, 71 Bilder. 2001. ISBN 3-87525-142-3.

### Band 107: Thomas Stöckel

Kommunikationstechnische Integration der Prozeßebene in Produktionssysteme durch Middleware-Frameworks FAPS, 147 Seiten, 65 Bilder, 5 Tab. 2001. ISBN 3-87525-143-1.

#### Band 108: Frank Pitter

Verfügbarkeitssteigerung von Werkzeugmaschinen durch Einsatz mechatronischer Sensorlösungen

FAPS, 158 Seiten, 131 Bilder, 8 Tab. 2001. ISBN 3-87525-144-X.

#### Band 109: Markus Korneli

Integration lokaler CAP-Systeme in einen globalen Fertigungsdatenverbund

FAPS, 121 Seiten, 53 Bilder, 11 Tab. 2001. ISBN 3-87525-146-6.

#### Band 110: Burkhard Müller

Laserstrahljustieren mit Excimer-Lasern - Prozeßparameter und Modelle zur Aktorkonstruktion LFT, 128 Seiten, 36 Bilder, 9 Tab. 2001. ISBN 3-87525-159-8.

#### Band 111: Jürgen Göhringer

Integrierte Telediagnose via Internet zum effizienten Service von Produktionssystemen FAPS, 178 Seiten, 98 Bilder, 5 Tab. 2001. ISBN 3-87525-147-4.

#### Band 112: Robert Feuerstein

Qualitäts- und kosteneffiziente Integration neuer Bauelementetechnologien in die Flachbaugruppenfertigung FAPS, 161 Seiten, 99 Bilder, 10 Tab.

2001. ISBN 3-87525-151-2.

### Band 113: Marcus Reichenberger

Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten alternativer Elektroniklote in der Oberflächenmontage (SMT) FAPS, 165 Seiten, 97 Bilder, 18 Tab. 2001. ISBN 3-87525-152-0.

### Band 114: Alexander Huber

Justieren vormontierter Systeme mit dem Nd:YAG-Laser unter Einsatz von Aktoren LFT, 122 Seiten, 58 Bilder, 5 Tab. 2001. ISBN 3-87525-153-9.

#### Band 115: Sami Krimi

Analyse und Optimierung von Montagesystemen in der Elektronikproduktion FAPS, 155 Seiten, 88 Bilder, 3 Tab. 2001. ISBN 3-87525-157-1.

#### Band 116: Marion Merklein

Laserstrahlumformen von Aluminiumwerkstoffen - Beeinflussung der Mikrostruktur und der mechanischen Eigenschaften LFT, 122 Seiten, 65 Bilder, 15 Tab. 2001. ISBN 3-87525-156-3.

#### Band 117: Thomas Collisi

Ein informationslogistisches Architekturkonzept zur Akquisition simulationsrelevanter Daten FAPS, 181 Seiten, 105 Bilder, 7 Tab. 2002. ISBN 3-87525-164-4.

### Band 118: Markus Koch

Rationalisierung und ergonomische Optimierung im Innenausbau durch den Einsatz moderner Automatisierungstechnik FAPS, 176 Seiten, 98 Bilder, 9 Tab. 2002. ISBN 3-87525-165-2.

### Band 119: Michael Schmidt

Prozeßregelung für das Laserstrahl-Punktschweißen in der Elektronikproduktion LFT, 152 Seiten, 71 Bilder, 3 Tab. 2002. ISBN 3-87525-166-0.

### Band 120: Nicolas Tiesler

Grundlegende Untersuchungen zum Fließpressen metallischer Kleinstteile LFT, 126 Seiten, 78 Bilder, 12 Tab. 2002. ISBN 3-87525-175-X.

#### Band 121: Lars Pursche

Methoden zur technologieorientierten Programmierung für die 3D-Lasermikrobearbeitung LFT, 111 Seiten, 39 Bilder, o Tab. 2002. ISBN 3-87525-183-0.

#### Band 122: Jan-Oliver Brassel

Prozeßkontrolle beim Laserstrahl-Mikroschweißen LFT, 148 Seiten, 72 Bilder, 12 Tab. 2002. ISBN 3-87525-181-4.

#### Band 123: Mark Geisel

Prozeßkontrolle und -steuerung beim Laserstrahlschweißen mit den Methoden der nichtlinearen Dynamik LFT, 135 Seiten, 46 Bilder, 2 Tab. 2002. ISBN 3-87525-180-6.

#### Band 124: Gerd Eßer

Laserstrahlunterstützte Erzeugung metallischer Leiterstrukturen auf Thermoplastsubstraten für die MID-Technik LFT, 148 Seiten, 60 Bilder, 6 Tab. 2002. ISBN 3-87525-171-7.

#### Band 125: Marc Fleckenstein

Qualität laserstrahl-gefügter Mikroverbindungen elektronischer Kontakte LFT, 159 Seiten, 77 Bilder, 7 Tab. 2002. ISBN 3-87525-170-9.

### Band 126: Stefan Kaufmann

Grundlegende Untersuchungen zum Nd:YAG- Laserstrahlfügen von Silizium für Komponenten der Optoelektronik LFT, 159 Seiten, 100 Bilder, 6 Tab. 2002. ISBN 3-87525-172-5.

### Band 127: Thomas Fröhlich

Simultanes Löten von Anschlußkontakten elektronischer Bauelemente mit Diodenlaserstrahlung LFT, 143 Seiten, 75 Bilder, 6 Tab. 2002. ISBN 3-87525-186-5.

#### Band 128: Achim Hofmann

Erweiterung der Formgebungsgrenzen beim Umformen von Aluminiumwerkstoffen durch den Einsatz prozessangepasster Platinen

LFT, 113 Seiten, 58 Bilder, 4 Tab. 2002. ISBN 3-87525-182-2.

#### Band 129: Ingo Kriebitzsch

3 - D MID Technologie in der Automobilelektronik FAPS, 129 Seiten, 102 Bilder, 10 Tab. 2002. ISBN 3-87525-169-5.

#### Band 130: Thomas Pohl

Fertigungsqualität und Umformbarkeit laserstrahlgeschweißter Formplatinen aus Aluminiumlegierungen

LFT, 133 Seiten, 93 Bilder, 12 Tab. 2002. ISBN 3-87525-173-3.

### Band 131: Matthias Wenk

Entwicklung eines konfigurierbaren Steuerungssystems für die flexible Sensorführung von Industrierobotern

FAPS, 167 Seiten, 85 Bilder, 1 Tab. 2002. ISBN 3-87525-174-1.

#### Band 132: Matthias Negendanck

Neue Sensorik und Aktorik für Bearbeitungsköpfe zum Laserstrahlschweißen LFT, 116 Seiten, 60 Bilder, 14 Tab. 2002. ISBN 3-87525-184-9.

#### Band 133: Oliver Kreis

Integrierte Fertigung - Verfahrensintegration durch Innenhochdruck-Umformen, Trennen und Laserstrahlschweißen in einem Werkzeug sowie ihre tele- und multimediale Präsentation LFT, 167 Seiten, 90 Bilder, 43 Tab. 2002. ISBN 3-87525-176-8.

#### Band 134: Stefan Trautner

Technische Umsetzung produktbezogener Instrumente der Umweltpolitik bei Elektro- und Elektronikgeräten FAPS, 179 Seiten, 92 Bilder, 11 Tab. 2002. ISBN 3-87525-177-6.

#### Band 135: Roland Meier

Strategien für einen produktorientierten Einsatz räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID)

FAPS, 155 Seiten, 88 Bilder, 14 Tab. 2002. ISBN 3-87525-178-4.

### Band 136: Jürgen Wunderlich

Kostensimulation - Simulationsbasierte Wirtschaftlichkeitsregelung komplexer Produktionssysteme FAPS, 202 Seiten, 119 Bilder, 17 Tab. 2002. ISBN 3-87525-179-2.

### Band 137: Stefan Novotny

Innenhochdruck-Umformen von Blechen aus Aluminium- und Magnesiumlegierungen bei erhöhter Temperatur LFT, 132 Seiten, 82 Bilder, 6 Tab. 2002. ISBN 3-87525-185-7.

#### Band 138: Andreas Licha

Flexible Montageautomatisierung zur Komplettmontage flächenhafter Produktstrukturen durch kooperierende Industrieroboter FAPS, 158 Seiten, 87 Bilder, 8 Tab. 2003. ISBN 3-87525-189-X.

#### Band 139: Michael Eisenbarth

Beitrag zur Optimierung der Aufbau- und Verbindungstechnik für mechatronische Baugruppen FAPS, 207 Seiten, 141 Bilder, 9 Tab. 2003. ISBN 3-87525-190-3.

### Band 140: Frank Christoph

Durchgängige simulationsgestützte Planung von Fertigungseinrichtungen der Elektronikproduktion FAPS, 187 Seiten, 107 Bilder, 9 Tab. 2003. ISBN 3-87525-191-1.

### Band 141: Hinnerk Hagenah

Simulationsbasierte Bestimmung der zu erwartenden Maßhaltigkeit für das Blechbiegen LFT, 131 Seiten, 36 Bilder, 26 Tab. 2003. ISBN 3-87525-192-X.

### Band 142: Ralf Eckstein

Scherschneiden und Biegen metallischer Kleinstteile - Materialeinfluss und Materialverhalten LFT, 148 Seiten, 71 Bilder, 19 Tab. 2003. ISBN 3-87525-193-8.

#### Band 143: Frank H. Meyer-Pittroff

Excimerlaserstrahlbiegen dünner metallischer Folien mit homogener Lichtlinie LFT, 138 Seiten, 60 Bilder, 16 Tab. 2003. ISBN 3-87525-196-2.

#### Band 144: Andreas Kach

Rechnergestützte Anpassung von Laserstrahlschneidbahnen an Bauteilabweichungen LFT, 139 Seiten, 69 Bilder, 11 Tab. 2004. ISBN 3-87525-197-0.

#### Band 145: Stefan Hierl

System- und Prozeßtechnik für das simultane Löten mit Diodenlaserstrahlung von elektronischen Bauelementen LFT, 124 Seiten, 66 Bilder, 4 Tab. 2004. ISBN 3-87525-198-9.

#### Band 146: Thomas Neudecker

Tribologische Eigenschaften keramischer Blechumformwerkzeuge-Einfluss einer Oberflächenendbearbeitung mittels Excimerlaserstrahlung

LFT, 166 Seiten, 75 Bilder, 26 Tab. 2004. ISBN 3-87525-200-4.

#### Band 147: Ulrich Wenger

Prozessoptimierung in der Wickeltechnik durch innovative maschinenbauliche und regelungstechnische Ansätze FAPS, 132 Seiten, 88 Bilder, o Tab. 2004. ISBN 3-87525-203-9.

#### Band 148: Stefan Slama

Effizienzsteigerung in der Montage durch marktorientierte Montagestrukturen und erweiterte Mitarbeiterkompetenz FAPS, 188 Seiten, 125 Bilder, o Tab. 2004. ISBN 3-87525-204-7.

#### Band 149: Thomas Wurm

Laserstrahljustieren mittels Aktoren-Entwicklung von Konzepten und Methoden für die rechnerunterstützte Modellierung und Optimierung von komplexen Aktorsystemen in der Mikrotechnik LFT, 122 Seiten, 51 Bilder, 9 Tab. 2004. ISBN 3-87525-206-3.

#### Band 150: Martino Celeghini

Wirkmedienbasierte Blechumformung: Grundlagenuntersuchungen zum Einfluss von Werkstoff und Bauteilgeometrie LFT, 146 Seiten, 77 Bilder, 6 Tab. 2004. ISBN 3-87525-207-1.

### Band 151: Ralph Hohenstein

Entwurf hochdynamischer Sensorund Regelsysteme für die adaptiveLaserbearbeitung LFT, 282 Seiten, 63 Bilder, 16 Tab. 2004. ISBN 3-87525-210-1.

### Band 152: Angelika Hutterer

Entwicklung prozessüberwachender Regelkreise für flexible Formgebungsprozesse LFT, 149 Seiten, 57 Bilder, 2 Tab. 2005. ISBN 3-87525-212-8.

### Band 153: Emil Egerer

Massivumformen metallischer Kleinstteile bei erhöhter Prozesstemperatur LFT, 158 Seiten, 87 Bilder, 10 Tab. 2005. ISBN 3-87525-213-6.

#### Band 154: Rüdiger Holzmann

Strategien zur nachhaltigen Optimierung von Qualität und Zuverlässigkeit in der Fertigung hochintegrierter Flachbaugruppen FAPS, 186 Seiten, 99 Bilder, 19 Tab. 2005. ISBN 3-87525-217-9.

#### Band 155: Marco Nock

Biegeumformen mit Elastomerwerkzeugen Modellierung, Prozessauslegung und Abgrenzung des Verfahrens am Beispiel des Rohrbiegens LFT, 164 Seiten, 85 Bilder, 13 Tab. 2005. ISBN 3-87525-218-7.

#### Band 156: Frank Niebling

Qualifizierung einer Prozesskette zum Laserstrahlsintern metallischer Bauteile LFT, 148 Seiten, 89 Bilder, 3 Tab. 2005. ISBN 3-87525-219-5.

#### Band 157: Markus Meiler

Großserientauglichkeit trockenschmierstoffbeschichteter Aluminiumbleche im Presswerk Grundlegende Untersuchungen zur Tribologie, zum Umformverhalten und Bauteilversuche LFT, 104 Seiten, 57 Bilder, 21 Tab. 2005. ISBN 3-87525-221-7.

#### Band 158: Agus Sutanto

Solution Approaches for Planning of Assembly Systems in Three-Dimensional Virtual Environments FAPS, 169 Seiten, 98 Bilder, 3 Tab. 2005. ISBN 3-87525-220-9.

#### Band 159: Matthias Boiger

Hochleistungssysteme für die Fertigung elektronischer Baugruppen auf der Basis flexibler Schaltungsträger FAPS, 175 Seiten, 111 Bilder, 8 Tab. 2005. ISBN 3-87525-222-5.

#### Band 160: Matthias Pitz

Laserunterstütztes Biegen höchstfester Mehrphasenstähle LFT, 120 Seiten, 73 Bilder, 11 Tab. 2005. ISBN 3-87525-223-3.

#### Band 161: Meik Vahl

Beitrag zur gezielten Beeinflussung des Werkstoffflusses beim Innenhochdruck-Umformen von Blechen

LFT, 165 Seiten, 94 Bilder, 15 Tab. 2005. ISBN 3-87525-224-1.

### Band 162: Peter K. Kraus

Plattformstrategien - Realisierung einer varianz- und kostenoptimierten Wertschöpfung FAPS, 181 Seiten, 95 Bilder, o Tab. 2005. ISBN 3-87525-226-8.

#### Band 163: Adrienn Cser

Laserstrahlschmelzabtrag - Prozessanalyse und -modellierung LFT, 146 Seiten, 79 Bilder, 3 Tab. 2005. ISBN 3-87525-227-6.

#### Band 164: Markus C. Hahn

Grundlegende Untersuchungen zur Herstellung von Leichtbauverbundstrukturen mit Aluminiumschaumkern

LFT, 143 Seiten, 60 Bilder, 16 Tab. 2005. ISBN 3-87525-228-4.

#### Band 165: Gordana Michos

Mechatronische Ansätze zur Optimierung von Vorschubachsen FAPS, 146 Seiten, 87 Bilder, 17 Tab. 2005. ISBN 3-87525-230-6.

### Band 166: Markus Stark

Auslegung und Fertigung hochpräziser Faser-Kollimator-Arrays LFT, 158 Seiten, 115 Bilder, 11 Tab. 2005. ISBN 3-87525-231-4.

#### Band 167: Yurong Zhou

Kollaboratives Engineering Management in der integrierten virtuellen Entwicklung der Anlagen für die Elektronikproduktion FAPS, 156 Seiten, 84 Bilder, 6 Tab. 2005. ISBN 3-87525-232-2.

### Band 168: Werner Enser

Neue Formen permanenter und lösbarer elektrischer Kontaktierungen für mechatronische Baugruppen FAPS, 190 Seiten, 112 Bilder, 5 Tab.

2005. ISBN 3-87525-233-0.

### Band 169: Katrin Melzer

Integrierte Produktpolitik bei elektrischen und elektronischen Geräten zur Optimierung des Product-Life-Cycle FAPS, 155 Seiten, 91 Bilder, 17 Tab. 2005. ISBN 3-87525-234-9.

#### Band 170: Alexander Putz

Grundlegende Untersuchungen zur Erfassung der realen Vorspannung von armierten Kaltfließpresswerkzeugen mittels Ultraschall LFT, 137 Seiten, 71 Bilder, 15 Tab. 2006. ISBN 3-87525-237-3.

#### Band 171: Martin Prechtl

Automatisiertes Schichtverfahren für metallische Folien - Systemund Prozesstechnik LFT, 154 Seiten, 45 Bilder, 7 Tab. 2006. ISBN 3-87525-238-1.

#### Band 172: Markus Meidert

Beitrag zur deterministischen Lebensdauerabschätzung von Werkzeugen der Kaltmassivumformung LFT, 131 Seiten, 78 Bilder, 9 Tab. 2006. ISBN 3-87525-239-X.

#### Band 173: Bernd Müller

Robuste, automatisierte Montagesysteme durch adaptive Prozessführung und montageübergreifende Fehlerprävention am Beispiel flächiger Leichtbauteile FAPS, 147 Seiten, 77 Bilder, o Tab. 2006. ISBN 3-87525-240-3.

### Band 174: Alexander Hofmann

Hybrides Laserdurchstrahlschweißen von Kunststoffen LFT, 136 Seiten, 72 Bilder, 4 Tab. 2006. ISBN 978-3-87525-243-9.

#### Band 175: Peter Wölflick

Innovative Substrate und Prozesse mit feinsten Strukturen für bleifreie Mechatronik-Anwendungen FAPS, 177 Seiten, 148 Bilder, 24 Tab. 2006.

ISBN 978-3-87525-246-0.

### Band 176: Attila Komlodi

Detection and Prevention of Hot Cracks during Laser Welding of Aluminium Alloys Using Advanced Simulation Methods LFT, 155 Seiten, 89 Bilder, 14 Tab. 2006. ISBN 978-3-87525-248-4.

### Band 177: Uwe Popp

Grundlegende Untersuchungen zum Laserstrahlstrukturieren von Kaltmassivumformwerkzeugen LFT, 140 Seiten, 67 Bilder, 16 Tab. 2006. ISBN 978-3-87525-249-1.

#### Band 178: Veit Rückel

Rechnergestützte Ablaufplanung und Bahngenerierung Für kooperierende Industrieroboter FAPS, 148 Seiten, 75 Bilder, 7 Tab. 2006. ISBN 978-3-87525-250-7.

### Band 179: Manfred Dirscherl

Nicht-thermische Mikrojustiertechnik mittels ultrakurzer Laserpulse

LFT, 154 Seiten, 69 Bilder, 10 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-251-4.

#### Band 180: Yong Zhuo

Entwurf eines rechnergestützten integrierten Systems für Konstruktion und Fertigungsplanung räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3D-MID) FAPS, 181 Seiten, 95 Bilder, 5 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-253-8.

#### Band 181: Stefan Lang

Durchgängige Mitarbeiterinformation zur Steigerung von Effizienz und Prozesssicherheit in der Produktion FAPS, 172 Seiten, 93 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-257-6.

#### Band 182: Hans-Joachim Krauß

Laserstrahlinduzierte Pyrolyse präkeramischer Polymere LFT, 171 Seiten, 100 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-258-3.

#### Band 183: Stefan Junker

Technologien und Systemlösungen für die flexibel automatisierte Bestückung permanent erregter Läufer mit oberflächenmontierten Dauermagneten FAPS, 173 Seiten, 75 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-259-0.

#### Band 184: Rainer Kohlbauer

Wissensbasierte Methoden für die simulationsgestützte Auslegung wirkmedienbasierter Blechumformprozesse LFT, 135 Seiten, 50 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-260-6.

### Band 185: Klaus Lamprecht

Wirkmedienbasierte Ümformung tiefgezogener Vorformen unter besonderer Berücksichtigung maßgeschneiderter Halbzeuge LFT, 137 Seiten, 81 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-265-1.

### Band 186: Bernd Zolleiß

Optimierte Prozesse und Systeme für die Bestückung mechatronischerBaugruppen FAPS, 180 Seiten, 117 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-266-8.

### Band 187: Michael Kerausch

Simulationsgestützte Prozessauslegung für das Umformen lokal wärmebehandelter Aluminiumplatinen

LFT, 146 Seiten, 76 Bilder, 7 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-267-5.

### Band 188: Matthias Weber

Unterstützung der Wandlungsfähigkeit von Produktionsanlagen durch innovative Softwaresysteme FAPS, 183 Seiten, 122 Bilder, 3 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-269-9.

#### Band 189: Thomas Frick

Untersuchung der prozessbestimmenden Strahl-Stoff-Wechselwirkungen beim Laserstrahlschweißen von Kunststoffen LFT, 104 Seiten, 62 Bilder, 8 Tab.

2007. ISBN 978-3-87525-268-2.

#### Band 190: Joachim Hecht

Werkstoffcharakterisierung und Prozessauslegung für die wirkmedienbasierte Doppelblech-Umformung von Magnesiumlegierungen

LFT, 107 Seiten, 91 Bilder, 2 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-270-5.

### Band 191: Ralf Völkl

Stochastische Simulation zur Werkzeuglebensdaueroptimierung und Präzisionsfertigung in der Kaltmassivumformung LFT, 178 Seiten, 75 Bilder, 12 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-272-9.

#### Band 192: Massimo Tolazzi

Innenhochdruck-Umformen verstärkter Blech-Rahmenstrukturen LFT, 164 Seiten, 85 Bilder, 7 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-273-6.

### Band 193: Cornelia Hoff

Untersuchung der Prozesseinflussgrößen beim Presshärten des höchstfesten Vergütungsstahls 22MnB5

LFT, 133 Seiten, 92 Bilder, 5 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-275-0.

### Band 194: Christian Alvarez

Simulationsgestützte Methoden zur effizienten Gestaltung von Lötprozessen in der Elektronikproduktion

FAPS, 149 Seiten, 86 Bilder, 8 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-277-4.

#### Band 195: Andreas Kunze

Automatisierte Montage von makromechatronischen Modulen zur flexiblen Integration in hybride Pkw-Bordnetzsysteme FAPS, 160 Seiten, 90 Bilder, 14 Tab. 2008.

ISBN 978-3-87525-278-1.

### Band 196: Wolfgang Hußnätter Grundlegende Untersuchungen zur experimentellen Ermittlung und zur Modellierung von Fließortkurven bei erhöhten Temperaturen

LFT, 152 Seiten, 73 Bilder, 21 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-279-8.

#### Band 197: Thomas Bigl

Entwicklung, angepasste Herstellungsverfahren und erweiterte Qualitätssicherung von einsatzgerechten elektronischen Baugruppen

FAPS, 175 Seiten, 107 Bilder, 14 Tab. 2009. ISBN 978-3-87525-292-7. 2008

ISBN 978-3-87525-280-4.

#### Band 198: Stephan Roth

Grundlegende Untersuchungen zum Excimerlaserstrahl-Abtragen unter Flüssigkeitsfilmen LFT, 113 Seiten, 47 Bilder, 14 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-281-1.

#### Band 199: Artur Giera

Prozesstechnische Untersuchungen zum Rührreibschweißen metallischer Werkstoffe LFT, 179 Seiten, 104 Bilder, 36 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-282-8.

### Band 200: Jürgen Lechler

Beschreibung und Modellierung des Werkstoffverhaltens von presshärtbaren Bor-Manganstählen LFT, 154 Seiten, 75 Bilder, 12 Tab. 2009. ISBN 978-3-87525-286-6.

#### Band 201: Andreas Blankl

Untersuchungen zur Erhöhung der Band 208: Uwe Vogt Prozessrobustheit bei der Innenhochdruck-Umformung von flächigen Halbzeugen mit vor- bzw. nachgeschalteten Laserstrahlfügeoperationen LFT, 120 Seiten, 68 Bilder, 9 Tab.

2009. ISBN 978-3-87525-287-3.

#### Band 202: Andreas Schaller

Modellierung eines nachfrageorientierten Produktionskonzeptes für mobile Telekommunikationsgeräte

FAPS, 120 Seiten, 79 Bilder, o Tab. 2009. ISBN 978-3-87525-289-7.

#### Band 203: Claudius Schimpf

Optimierung von Zuverlässigkeitsuntersuchungen, Prüfabläufen und Nacharbeitsprozessen in der Elektronikproduktion FAPS, 162 Seiten, 90 Bilder, 14 Tab. 2009. ISBN 978-3-87525-290-3.

#### Band 204: Simon Dietrich

Sensoriken zur Schwerpunktslagebestimmung der optischen Prozessemissionen beim Laserstrahltiefschweißen

LFT, 138 Seiten, 70 Bilder, 5 Tab.

#### Band 205: Wolfgang Wolf

Entwicklung eines agentenbasierten Steuerungssystems zur Materialflussorganisation im wandelbaren Produktionsumfeld FAPS, 167 Seiten, 98 Bilder. 2009. ISBN 978-3-87525-293-4.

### Band 206: Steffen Polster

Laserdurchstrahlschweißen transparenter Polymerbauteile LFT, 160 Seiten, 92 Bilder, 13 Tab. 2009. ISBN 978-3-87525-294-1.

#### Band 207: Stephan Manuel Dörfler

Rührreibschweißen von walzplattiertem Halbzeug und Aluminiumblech zur Herstellung flächiger Aluminiumschaum-Sandwich-Verbundstrukturen

LFT, 190 Seiten, 98 Bilder, 5 Tab. 2009. ISBN 978-3-87525-295-8.

Seriennahe Auslegung von Aluminium Tailored Heat Treated Blanks LFT, 151 Seiten, 68 Bilder, 26 Tab.

2009. ISBN 978-3-87525-296-5.

### Band 209: Till Laumann

Oualitative und guantitative Bewertung der Crashtauglichkeit von höchstfesten Stählen LFT, 117 Seiten, 69 Bilder, 7 Tab. 2009. ISBN 978-3-87525-299-6.

#### Band 210: Alexander Diehl

Größeneffekte bei Biegeprozessen-Entwicklung einer Methodik zur Identifikation und Quantifizierung LFT, 180 Seiten, 92 Bilder, 12 Tab. 2010. ISBN 978-3-87525-302-3.

#### Band 211: Detlev Staud

Effiziente Prozesskettenauslegung für das Umformen lokal wärmebehandelter und geschweißter Aluminiumbleche LFT, 164 Seiten, 72 Bilder, 12 Tab. 2010. ISBN 978-3-87525-303-0.

#### Band 212: Jens Ackermann

Prozesssicherung beim Laserdurchstrahlschweißen thermoplastischer Kunststoffe LPT, 129 Seiten, 74 Bilder, 13 Tab. 2010. ISBN 978-3-87525-305-4.

#### Band 213: Stephan Weidel

Grundlegende Untersuchungen zum Kontaktzustand zwischen Werkstück und Werkzeug bei umformtechnischen Prozessen unter tribologischen Gesichtspunkten LFT, 144 Seiten, 67 Bilder, 11 Tab. 2010. ISBN 978-3-87525-307-8.

### Band 214: Stefan Geißdörfer

Entwicklung eines mesoskopischen Modells zur Abbildung von Größeneffekten in der Kaltmassivumformung mit Methoden der FE-Simulation

LFT, 133 Seiten, 83 Bilder, 11 Tab. 2010. ISBN 978-3-87525-308-5.

### Band 215: Christian Matzner

Konzeption produktspezifischer Lösungen zur Robustheitssteigerung elektronischer Systeme gegen die Einwirkung von Betauung im Automobil

FAPS, 165 Seiten, 93 Bilder, 14 Tab. 2010. ISBN 978-3-87525-309-2.

### Band 216: Florian Schüßler

Verbindungs- und Systemtechnik für thermisch hochbeanspruchte und miniaturisierte elektronische Baugruppen

FAPS, 184 Seiten, 93 Bilder, 18 Tab. 2010

ISBN 978-3-87525-310-8.

### Band 217: Massimo Cojutti

Strategien zur Erweiterung der Prozessgrenzen bei der Innhochdruck-Umformung von Rohren und Blechpaaren LFT, 125 Seiten, 56 Bilder, 9 Tab. 2010. ISBN 978-3-87525-312-2.

#### Band 218: Raoul Plettke

Mehrkriterielle Optimierung komplexer Aktorsysteme für das Laserstrahljustieren LFT, 152 Seiten, 25 Bilder, 3 Tab. 2010. ISBN 978-3-87525-315-3.

#### Band 219: Andreas Dobroschke

Flexible Automatisierungslösungen für die Fertigung wickeltechnischer Produkte FAPS, 184 Seiten, 109 Bilder, 18 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-317-7.

### Band 220: Azhar Zam

Optical Tissue Differentiation for Sensor-Controlled Tissue-Specific Laser Surgery LPT, 99 Seiten, 45 Bilder, 8 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-318-4.

#### Band 221: Michael Rösch

Potenziale und Strategien zur Optimierung des Schablonendruckprozesses in der Elektronikproduktion

FAPS, 192 Seiten, 127 Bilder, 19 Tab. 2011.

ISBN 978-3-87525-319-1.

### Band 222: Thomas Rechtenwald

Quasi-isothermes Laserstrahlsintern von Hochtemperatur-Thermoplasten - Eine Betrachtung werkstoff-prozessspezifischer Aspekte am Beispiel PEEK LPT, 150 Seiten, 62 Bilder, 8 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-320-7.

#### Band 223: Daniel Craiovan

Prozesse und Systemlösungen für die SMT-Montage optischer Bauelemente auf Substrate mit integrierten Lichtwellenleitern FAPS, 165 Seiten, 85 Bilder, 8 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-324-5.

#### Band 224: Kay Wagner

Beanspruchungsangepasste Kaltmassivumformwerkzeuge durch lokal optimierte Werkzeugoberflächen LFT, 147 Seiten, 103 Bilder, 17 Tab.

2011. ISBN 978-3-87525-325-2.

#### Band 225: Martin Brandhuber

Verbesserung der Prognosegüte des Versagens von Punktschweißverbindungen bei höchstfesten Stahlgüten LFT, 155 Seiten, 91 Bilder, 19 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-327-6.

#### Band 226: Peter Sebastian Feuser

Ein Ansatz zur Herstellung von pressgehärteten Karosseriekomponenten mit maßgeschneiderten mechanischen Eigenschaften: Temperierte Umformwerkzeuge. Prozessfenster, Prozessimuation und funktionale Untersuchung LFT, 195 Seiten, 97 Bilder, 60 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-328-3.

#### Band 227: Murat Arbak

Material Adapted Design of Cold Forging Tools Exemplified by Powder Metallurgical Tool Steels and Ceramics LFT, 109 Seiten, 56 Bilder, 8 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-330-6.

#### Band 228: Indra Pitz

Beschleunigte Simulation des Laserstrahlumformens von Aluminiumblechen LPT, 137 Seiten, 45 Bilder, 27 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-333-7.

### Band 229: Alexander Grimm

Prozessanalyse und -überwachung des Laserstrahlhartlötens mittels optischer Sensorik LPT, 125 Seiten, 61 Bilder, 5 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-334-4.

#### Band 230: Markus Kaupper

Biegen von höhenfesten Stahlblechwerkstoffen - Umformverhalten und Grenzen der Biegbarkeit LFT, 160 Seiten, 57 Bilder, 10 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-339-9.

#### Band 231: Thomas Kroiß

Modellbasierte Prozessauslegung für die Kaltmassivumformung unter Brücksichtigung der Werkzeug- und Pressenauffederung LFT, 169 Seiten, 50 Bilder, 19 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-341-2.

Band 232: Christian Goth Analyse und Optimierung der Entwicklung und Zuverlässigkeit räumlicher Schaltungsträger (3D-MID) FAPS, 176 Seiten, 102 Bilder, 22 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-340-5.

#### Band 233: Christian Ziegler

Ganzheitliche Automatisierung mechatronischer Systeme in der Medizin am Beispiel Strahlentherapie

FAPS, 170 Seiten, 71 Bilder, 19 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-342-9.

### Band 234: Florian Albert

Automatisiertes Laserstrahllöten und -reparaturlöten elektronischer Baugruppen LPT, 127 Seiten, 78 Bilder, 11 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-344-3.

#### Band 235: Thomas Stöhr

Analyse und Beschreibung des mechanischen Werkstoffverhaltens von presshärtbaren Bor-Manganstählen LFT, 118 Seiten, 74 Bilder, 18 Tab.

2013. ISBN 978-3-87525-346-7.

### Band 236: Christian Kägeler

Prozessdynamik beim Laserstrahlschweißen verzinkter Stahlbleche im Überlappstoß LPT, 145 Seiten, 80 Bilder, 3 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-347-4.

#### Band 237: Andreas Sulzberger

Seriennahe Auslegung der Prozesskette zur wärmeunterstützten Umformung von Aluminiumblechwerkstoffen LFT, 153 Seiten, 87 Bilder, 17 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-349-8.

#### Band 238: Simon Opel

Herstellung prozessangepasster Halbzeuge mit variabler Blechdicke durch die Anwendung von Verfahren der Blechmassivumformung

LFT, 165 Seiten, 108 Bilder, 27 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-350-4.

#### Band 239: Rajesh Kanawade

In-vivo Monitoring of Epithelium Vessel and Capillary Density for the Application of Detection of Clinical Shock and Early Signs of Cancer Development LPT, 124 Seiten, 58 Bilder, 15 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-351-1.

#### Band 240: Stephan Busse

Entwicklung und Qualifizierung eines Schneidclinchverfahrens LFT, 119 Seiten, 86 Bilder, 20 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-352-8.

#### Band 241: Karl-Heinz Leitz

Mikro- und Nanostrukturierung mit kurz und ultrakurz gepulster Laserstrahlung LPT, 154 Seiten, 71 Bilder, 9 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-355-9.

#### Band 242: Markus Michl

Webbasierte Ansätze zur ganzheitlichen technischen Diagnose FAPS, 182 Seiten, 62 Bilder, 20 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-356-6.

#### Band 243: Vera Sturm

Einfluss von Chargenschwankungen auf die Verarbeitungsgrenzen von Stahlwerkstoffen LFT, 113 Seiten, 58 Bilder, 9 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-357-3.

### Band 244: Christian Neudel

Mikrostrukturelle und mechanisch-technologische Eigenschaften widerstandspunktgeschweißter Aluminium-Stahl-Verbindungen für den Fahrzeugbau LFT, 178 Seiten, 171 Bilder, 31 Tab. 2014. ISBN 978-3-87525-358-0.

#### Band 245: Anja Neumann

Konzept zur Beherrschung der Prozessschwankungen im Presswerk

LFT, 162 Seiten, 68 Bilder, 15 Tab. 2014. ISBN 978-3-87525-360-3.

#### Band 246: Ulf-Hermann Quentin

Laserbasierte Nanostrukturierung mit optisch positionierten Mikrolinsen

LPT, 137 Seiten, 89 Bilder, 6 Tab. 2014. ISBN 978-3-87525-361-0.

#### Band 247: Erik Lamprecht

Der Einfluss der Fertigungsverfahren auf die Wirbelstromverluste von Stator-Einzelzahnblechpaketen für den Einsatz in Hybrid- und Elektrofahrzeugen FAPS, 148 Seiten, 138 Bilder, 4 Tab. 2014. ISBN 978-3-87525-362-7.

#### Band 248: Sebastian Rösel

Wirkmedienbasierte Umformung von Blechhalbzeugen unter Anwendung magnetorheologischer Flüssigkeiten als kombiniertes Wirk- und Dichtmedium LFT, 148 Seiten, 61 Bilder, 12 Tab. 2014. ISBN 978-3-87525-363-4.

#### Band 249: Paul Hippchen

Simulative Prognose der Geometrie indirekt pressgehärteter Karosseriebauteile für die industrielle Anwendung LFT, 163 Seiten, 89 Bilder, 12 Tab.

2014. ISBN 978-3-87525-364-1.

### Band 250: Martin Zubeil

Versagensprognose bei der Prozesssimulation von Biegeumformund Falzverfahren LFT, 171 Seiten, 90 Bilder, 5 Tab. 2014. ISBN 978-3-87525-365-8.

### Band 251: Alexander Kühl

Flexible Automatisierung der Statorenmontage mit Hilfe einer universellen ambidexteren Kinematik FAPS, 142 Seiten, 60 Bilder, 26 Tab. 2014.

ISBN 978-3-87525-367-2.

### Band 252: Thomas Albrecht

Optimierte Fertigungstechnologien für Rotoren getriebeintegrierter PM-Synchronmotoren von Hvbridfahrzeugen FAPS, 198 Seiten, 130 Bilder, 38 Tab. 2014. ISBN 978-3-87525-368-9.

### Band 253: Florian Risch

Planning and Production Concepts for Contactless Power Transfer Systems for Electric Vehicles FAPS, 185 Seiten, 125 Bilder, 13 Tab. 2014.

ISBN 978-3-87525-369-6.

#### Band 254: Markus Weigl

Laserstrahlschweißen von Mischverbindungen aus austenitischen und ferritischen korrosionsbeständigen Stahlwerkstoffen LPT, 184 Seiten, 110 Bilder, 6 Tab. 2014. ISBN 978-3-87525-370-2.

#### Band 255: Johannes Noneder

Beanspruchungserfassung für die Validierung von FE-Modellen zur Auslegung von Massivumformwerkzeugen LFT, 161 Seiten, 65 Bilder, 14 Tab. 2014. ISBN 978-3-87525-371-9.

#### Band 256: Andreas Reinhardt

Ressourceneffiziente Prozess- und Produktionstechnologie für flexible Schaltungsträger FAPS, 123 Seiten, 69 Bilder, 19 Tab. 2014. ISBN 978-3-87525-373-3.

#### Band 257: Tobias Schmuck

Ein Beitrag zur effizienten Gestaltung globaler Produktions- und Logistiknetzwerke mittels Simulation FAPS, 151 Seiten, 74 Bilder. 2014. ISBN 978-3-87525-374-0.

### Band 258: Bernd Eichenhüller

Untersuchungen der Effekte und Wechselwirkungen charakteristischer Einflussgrößen auf das Umformverhalten bei Mikroumformprozessen

LFT, 127 Seiten, 29 Bilder, 9 Tab. 2014. ISBN 978-3-87525-375-7.

### Band 259: Felix Lütteke

Vielseitiges autonomes Transportsystem basierend auf Weltmodellerstellung mittels Datenfusion von Deckenkameras und Fahrzeugsensoren FAPS, 152 Seiten, 54 Bilder, 20 Tab. 2014.

ISBN 978-3-87525-376-4.

### Band 260: Martin Grüner

Hochdruck-Blechumformung mit formlos festen Stoffen als Wirkmedium LFT, 144 Seiten, 66 Bilder, 29 Tab.

2014. ISBN 978-3-87525-379-5.

### Band 261: Christian Brock

Analyse und Regelung des Laserstrahltiefschweißprozesses durch Detektion der Metalldampffackelposition LPT, 126 Seiten, 65 Bilder, 3 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-380-1.

#### Band 262: Peter Vatter

Sensitivitätsanalyse des 3-Rollen-Schubbiegens auf Basis der Finite Elemente Methode LFT, 145 Seiten, 57 Bilder, 26 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-381-8.

#### Band 263: Florian Klämpfl

Planung von Laserbestrahlungen durch simulationsbasierte Optimierung LPT, 169 Seiten, 78 Bilder, 32 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-384-9.

#### Band 264: Matthias Domke

Transiente physikalische Mechanismen bei der Laserablation von dünnen Metallschichten LPT, 133 Seiten, 43 Bilder, 3 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-385-6.

#### Band 265: Johannes Götz

Community-basierte Optimierung des Anlagenengineerings FAPS, 177 Seiten, 80 Bilder, 30 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-386-3.

ISBN 978-3-87525-380-3.

### Band 266: Hung Nguyen

Qualifizierung des Potentials von Verfestigungseffekten zur Erweiterung des Umformvermögens aushärtbarer Aluminiumlegierungen LFT, 137 Seiten, 57 Bilder, 16 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-387-0.

#### Band 267: Andreas Kuppert

Erweiterung und Verbesserung von Versuchs- und Auswertetechniken für die Bestimmung von Grenzformänderungskurven LFT, 138 Seiten, 82 Bilder, 2 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-388-7.

#### Band 268: Kathleen Klaus

Erstellung eines Werkstofforientierten Fertigungsprozessfensters zur Steigerung des Formgebungsvermögens von Alumi-niumlegierungen unter Anwendung einer zwischengeschalteten Wärmebehandlung

LFT, 154 Seiten, 70 Bilder, 8 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-391-7.

#### Band 269: Thomas Svec

Untersuchungen zur Herstellung von funktionsoptimierten Bauteilen im partiellen Presshärtprozess mittels lokal unterschiedlich temperierter Werkzeuge LFT, 166 Seiten, 87 Bilder, 15 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-392-4.

#### Band 270: Tobias Schrader

Grundlegende Untersuchungen zur Verschleißcharakterisierung beschichteter Kaltmassivumformwerkzeuge

LFT, 164 Seiten, 55 Bilder, 11 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-393-1.

#### Band 271: Matthäus Brela

Untersuchung von Magnetfeld-Messmethoden zur ganzheitlichen Wertschöpfungsoptimierung und Fehlerdetektion an magnetischen Aktoren

FAPS, 170 Seiten, 97 Bilder, 4 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-394-8.

#### Band 272: Michael Wieland

Entwicklung einer Methode zur Prognose adhäsiven Verschleißes an Werkzeugen für das direkte Presshärten LFT, 156 Seiten, 84 Bilder, 9 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-395-5.

### Band 273: René Schramm

Strukturierte additive Metallisierung durch kaltaktives Atmosphärendruckplasma FAPS, 136 Seiten, 62 Bilder, 15 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-396-2.

#### Band 274: Michael Lechner

Herstellung beanspruchungsangepasster Aluminiumblechhalbzeuge durch eine maßgeschneiderte Variation der Abkühlgeschwindigkeit nach Lösungsglühen LFT, 136 Seiten, 62 Bilder, 15 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-397-9.

### Band 275: Kolja Andreas

Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit auf das Werkzeugeinsatzverhalten beim Kaltfließpressen LFT, 169 Seiten, 76 Bilder, 4 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-398-6.

### Band 276: Marcus Baum

Laser Consolidation of ITO Nanoparticles for the Generation of Thin Conductive Layers on Transparent Substrates LPT, 158 Seiten, 75 Bilder, 3 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-399-3.

### Band 277: Thomas Schneider

Umformtechnische Herstellung dünnwandiger Funktionsbauteile aus Feinblech durch Verfahren der Blechmassivumformung LFT, 188 Seiten, 95 Bilder, 7 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-401-3.

#### Band 278: Jochen Merhof

Sematische Modellierung automatisierter Produktionssysteme zur Verbesserung der IT-Integration zwischen Anlagen-Engineering und Steuerungsebene FAPS, 157 Seiten, 88 Bilder, 8 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-402-0.

### Band 279: Fabian Zöller

Erarbeitung von Grundlagen zur Abbildung des tribologischen Systems in der Umformsimulation LFT, 126 Seiten, 51 Bilder, 3 Tab. 2016. ISBN 978-3-87525-403-7.

### Band 280: Christian Hezler

Einsatz technologischer Versuche zur Erweiterung der Versagensvorhersage bei Karosseriebauteilen aus höchstfesten Stählen LFT, 147 Seiten, 63 Bilder, 44 Tab. 2016. ISBN 978-3-87525-404-4.

### Band 281: Jochen Bönig

Integration des Systemverhaltens von Automobil-Hochvoltleitungen in die virtuelle Absicherung durch strukturmechanische Simulation FAPS, 177 Seiten, 107 Bilder, 17 Tab. 2016.

ISBN 978-3-87525-405-1.

#### Band 282: Johannes Kohl

Automatisierte Datenerfassung für diskret ereignisorientierte Simulationen in der energieflexibelen Fabrik FAPS, 160 Seiten, 80 Bilder, 27 Tab. 2016.

ISBN 978-3-87525-406-8.

### Band 283: Peter Bechtold

Mikroschockwellenumformung mittels ultrakurzer Laserpulse LPT, 155 Seiten, 59 Bilder, 10 Tab. 2016. ISBN 978-3-87525-407-5.

#### Band 284: Stefan Berger

Laserstrahlschweißen thermoplastischer Kohlenstofffaserverbundwerkstoffe mit spezifischem Zusatzdraht LPT, 118 Seiten, 68 Bilder, 9 Tab. 2016. ISBN 978-3-87525-408-2. Band 285: Martin Bornschlegl Methods-Energy Measurement -Eine Methode zur Energieplanung für Fügeverfahren im Karosseriebau

FAPS, 136 Seiten, 72 Bilder, 46 Tab. 2016. ISBN 978-3-87525-417-4.

ISBN 978-3-87525-409-9.

### Band 286: Tobias Rackow

Erweiterung des Unternehmenscontrollings um die Dimension Energie FAPS, 164 Seiten, 82 Bilder, 29 Tab. 2016. ISBN 978-3-87525-410-5.

### Band 287: Johannes Koch

Grundlegende Untersuchungen zur Herstellung zyklisch-symmetrischer Bauteile mit Nebenformelementen durch Blechmassivumformung

LFT, 125 Seiten, 49 Bilder, 17 Tab. 2016. ISBN 978-3-87525-411-2.

#### Band 288: Hans Ulrich Vierzigmann

Beitrag zur Untersuchung der tribologischen Bedingungen in der Blechmassivumformung - Bereitstellung von tribologischen Modellversuchen und Realisierung von Tailored Surfaces LFT, 174 Seiten, 102 Bilder, 34 Tab. 2016. ISBN 978-3-87525-412-9.

#### Band 289: Thomas Senner

Methodik zur virtuellen Absicherung der formgebenden Operation des Nasspressprozesses von Gelege-Mehrschichtverbunden LFT, 156 Seiten, 96 Bilder, 21 Tab. 2016. ISBN 978-3-87525-414-3.

#### Band 290: Sven Kreitlein

Der grundoperationsspezifische Mindestenergiebedarf als Referenzwert zur Bewertung der Energieeffizienz in der Produktion FAPS, 185 Seiten, 64 Bilder, 30 Tab. 2016.

ISBN 978-3-87525-415-0.

#### Band 291: Christian Roos

Remote-Laserstrahlschweißen verzinkter Stahlbleche in Kehlnahtgeometrie

LPT, 123 Seiten, 52 Bilder, o Tab. 2016. ISBN 978-3-87525-416-7.

### Band 292: Alexander Kahrimanidis

Thermisch unterstützte Umformung von Aluminiumblechen LFT, 165 Seiten, 103 Bilder, 18 Tab. 2016. ISBN 978-3-87525-417-4.

#### Band 293: Jan Tremel

Flexible Systems for Permanent Magnet Assembly and Magnetic Rotor Measurement / Flexible Systeme zur Montage von Permanentmagneten und zur Messung magnetischer Rotoren FAPS, 152 Seiten, 91 Bilder, 12 Tab. 2016. ISBN 978-3-87525-419-8.

### Band 294: Ioannis Tsoupis

Schädigungs- und Versagensverhalten hochfester Leichtbauwerkstoffe unter Biegebeanspruchung LFT, 176 Seiten, 51 Bilder, 6 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-420-4.

#### Band 295: Sven Hildering

Grundlegende Untersuchungen zum Prozessverhalten von Silizium als Werkzeugwerkstoff für das Mikroscherschneiden metallischer Folien

LFT, 177 Seiten, 74 Bilder, 17 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-422-8.

#### Band 296: Sasia Mareike Hertweck

Zeitliche Pulsformung in der Lasermikromaterialbearbeitung – Grundlegende Untersuchungen und Anwendungen LPT, 146 Seiten, 67 Bilder, 5 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-423-5.

### Band 297: Paryanto

Mechatronic Simulation Approach for the Process Planning of Energy-Efficient Handling Systems FAPS, 162 Seiten, 86 Bilder, 13 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-424-2.

#### Band 298: Peer Stenzel

Großserientaugliche Nadelwickeltechnik für verteilte Wicklungen im Anwendungsfall der E-Traktionsantriebe FAPS, 239 Seiten, 147 Bilder, 20 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-425-9.

#### Band 299: Mario Lušić

Ein Vorgehensmodell zur Erstellung montageführender Werkerinformationssysteme simultan zum Produktentstehungsprozess FAPS, 174 Seiten, 79 Bilder, 22 Tab. 2017.

ISBN 978-3-87525-426-6.

### Band 300: Arnd Buschhaus

Hochpräzise adaptive Steuerung und Regelung robotergeführter Prozesse

FAPS, 202 Seiten, 96 Bilder, 4 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-427-3.

### Band 301: Tobias Laumer

Erzeugung von thermoplastischen Werkstoffverbunden mittels simultanem, intensitätsselektivem Laserstrahlschmelzen LPT, 140 Seiten, 82 Bilder, o Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-428-0.

#### Band 302: Nora Unger

Untersuchung einer thermisch unterstützten Fertigungskette zur Herstellung umgeformter Bauteile aus der höherfesten Aluminiumlegierung EN AW-7020 LFT, 142 Seiten, 53 Bilder, 8 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-429-7.

### Band 303: Tommaso Stellin

Design of Manufacturing Processes for the Cold Bulk Forming of Small Metal Components from Metal Strip LFT, 146 Seiten, 67 Bilder, 7 Tab.

2017. ISBN 978-3-87525-430-3.

### Band 304: Bassim Bachy

Experimental Investigation, Modeling, Simulation and Optimization of Molded Interconnect Devices (MID) Based on Laser Direct Structuring (LDS) / Experimentelle Untersuchung, Modellierung, Simulation und Optimierung von Molded Interconnect Devices (MID) basierend auf Laser Direktstrukturierung (LDS) FAPS, 168 Seiten, 120 Bilder, 26 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-431-0.

### Band 305: Michael Spahr

Automatisierte Kontaktierungsverfahren für flachleiterbasierte Pkw-Bordnetzsysteme FAPS, 197 Seiten, 98 Bilder, 17 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-432-7.

#### Band 306: Sebastian Suttner

Charakterisierung und Modellierung des spannungszustandsabhängigen Werkstoffverhaltens der Magnesiumlegierung AZ31B für die numerische Prozessauslegung LFT, 150 Seiten, 84 Bilder, 19 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-433-4.

### Band 307: Bhargav Potdar

A reliable methodology to deduce thermo-mechanical flow behaviour of hot stamping steels LFT, 203 Seiten, 98 Bilder, 27 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-436-5.

### Band 308: Maria Löffler

Steuerung von Blechmassivumformprozessen durch maßgeschneiderte tribologische Systeme LFT, viii u. 166 Seiten, 90 Bilder, 5 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-133-1.

#### Band 309: Martin Müller

Untersuchung des kombinierten Trenn- und Umformprozesses beim Fügen artungleicher Werkstoffe mittels Schneidclinchverfahren

LFT, xi u. 149 Seiten, 89 Bilder, 6 Tab. 2018.

ISBN: 978-3-96147-135-5.

### Band 310: Christopher Kästle

Qualifizierung der Kupfer-Drahtbondtechnologie für integrierte Leistungsmodule in harschen Umgebungsbedingungen FAPS, xii u. 167 Seiten, 70 Bilder, 18 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-145-4.

#### Band 311: Daniel Vipavc

Eine Simulationsmethode für das 3-Rollen-Schubbiegen LFT, xiii u. 121 Seiten, 56 Bilder, 17 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-147-8.

#### Band 312: Christina Ramer

Arbeitsraumüberwachung und autonome Bahnplanung für ein sicheres und flexibles Roboter-Assistenzsystem in der Fertigung FAPS, xiv u. 188 Seiten, 57 Bilder, 9 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-153-9.

#### Band 313: Miriam Rauer

Der Einfluss von Poren auf die Zuverlässigkeit der Lötverbindungen von Hochleistungs-Leuchtdioden FAPS, xii u. 209 Seiten, 108 Bilder, 21 Tab. 2018.

ISBN 978-3-96147-157-7.

### Band 314: Felix Tenner

Kamerabasierte Untersuchungen der Schmelze und Gasströmungen beim Laserstrahlschweißen verzinkter Stahlbleche LPT, xxiii u. 184 Seiten, 94 Bilder, 7 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-160-7.

### Band 315: Aarief Syed-Khaja

Diffusion Soldering for High-temperature Packaging of Power Electronics

FAPS, x u. 202 Seiten, 144 Bilder, 32 Tab. 2018.

ISBN 978-3-87525-162-1.

### Band 316: Adam Schaub

Grundlagenwissenschaftliche Untersuchung der kombinierten Prozesskette aus Umformen und Additive Fertigung LFT, xi u. 192 Seiten, 72 Bilder, 27 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-166-9.

#### Band 317: Daniel Gröbel

Herstellung von Nebenformelementen unterschiedlicher Geometrie an Blechen mittels Fließpressverfahren der Blechmassivumformung LFT, x u. 165 Seiten, 96 Bilder, 13 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-168-3.

### Band 318: Philipp Hildenbrand

Entwicklung einer Methodik zur Herstellung von Tailored Blanks mit definierten Halbzeugeigenschaften durch einen Taumelprozess LFT, ix u. 153 Seiten, 77 Bilder, 4

Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-174-4.

### Band 319: Tobias Konrad

Simulative Auslegung der Spannund Fixierkonzepte im Karosserierohbau: Bewertung der Baugruppenmaßhaltigkeit unter Berücksichtigung schwankender Einflussgrößen LFT, x u. 203 Seiten, 134 Bilder, 32 Tab. 2010.

ISBN 978-3-96147-176-8.

### Band 320: David Meinel

Architektur applikationsspezifischer Multi-Physics-Simulationskonfiguratoren am Beispiel modularer Triebzüge FAPS, xii u. 166 Seiten, 82 Bilder, 25 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-184-3.

### Band 321: Andrea Zimmermann

Grundlegende Untersuchungen zum Einfluss fertigungsbedingter Eigenschaften auf die Ermüdungsfestigkeit kaltmassivumgeformter Bauteile

LFT, ix u. 160 Seiten, 66 Bilder, 5 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-190-4.

### Band 322: Christoph Amann

Simulative Prognose der Geometrie nassgepresster Karosseriebauteile aus Gelege-Mehrschichtverbunden LFT, xvi u. 169 Seiten, 80 Bilder, 13 Tab. 2019.

ISBN 978-3-96147-194-2.

#### Band 323: Jennifer Tenner

Realisierung schmierstofffreier Tiefziehprozesse durch maßgeschneiderte Werkzeugoberflächen LFT, x u. 187 Seiten, 68 Bilder, 13 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-196-6.

#### Band 324: Susan Zöller

Mapping Individual Subjective Values to Product Design KTmfk, xi u. 223 Seiten, 81 Bilder, 25 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-202-4.

#### Band 325: Stefan Lutz

Erarbeitung einer Methodik zur semiempirischen Ermittlung der Umwandlungskinetik durchhärtender Wälzlagerstähle für die Wärmebehandlungssimulation LFT, xiv u. 189 Seiten, 75 Bilder, 32 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-209-3.

### Band 326: Tobias Gnibl

Modellbasierte Prozesskettenabbildung rührreibgeschweißter Aluminiumhalbzeuge zur umformtechnischen Herstellung höchstfester Leichtbau-strukturteile LFT, xii u. 167 Seiten, 68 Bilder, 17 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-217-8.

#### Band 327: Johannes Bürner

Technisch-wirtschaftliche Optionen zur Lastflexibilisierung durch intelligente elektrische Wärmespeicher

FAPS, xiv u. 233 Seiten, 89 Bilder, 27 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-219-2.

10011 970 3 90147 219 2.

### Band 328: Wolfgang Böhm

Verbesserung des Umformverhaltens von mehrlagigen Aluminiumblechwerkstoffen mit ultrafeinkörnigem Gefüge LFT, ix u. 160 Seiten, 88 Bilder, 14 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-227-7.

### Band 329: Stefan Landkammer

Grundsatzuntersuchungen, mathematische Modellierung und Ableitung einer Auslegungsmethodik für Gelenkantriebe nach dem Spinnenbeinprinzip LFT, xii u. 200 Seiten, 83 Bilder, 13 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-229-1.

#### Band 330: Stephan Rapp

Pump-Probe-Ellipsometrie zur Messung transienter optischer Materialeigen-schaften bei der Ultrakurzpuls-Lasermaterialbearbeitung LPT, xi u. 143 Seiten, 49 Bilder, 2

Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-235-2.

#### Band 331: Michael Scholz

Intralogistics Execution System mit integrierten autonomen, servicebasierten Transportentitäten FAPS, xi u. 195 Seiten, 55 Bilder, 11 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-237-6.

#### Band 332: Eva Bogner

Strategien der Produktindividualisierung in der produzierenden Industrie im Kontext der Digitalisierung FAPS, ix u. 201 Seiten, 55 Bilder, 28 Tab. 2019.

ISBN 978-3-96147-246-8.

#### Band 333: Daniel Benjamin Krüger

Ein Ansatz zur CAD-integrierten muskuloskelettalen Analyse der Mensch-Maschine-Interaktion KTmfk, x u. 217 Seiten, 102 Bilder, 7 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-250-5.

### Band 334: Thomas Kuhn

Qualität und Zuverlässigkeit laserdirektstrukturierter mechatronisch integrierter Baugruppen (LDS-MID) FAPS, ix u. 152 Seiten, 69 Bilder, 12 Tab. 2019. ISBN: 978-3-96147-252-9.

### Band 335: Hans Fleischmann

Modellbasierte Zustands- und Prozessüberwachung auf Basis soziocyber-physischer Systeme FAPS, xi u. 214 Seiten, 111 Bilder, 18 Tab. 2019. ISBN: 978-3-96147-256-7.

#### Band 336: Markus Michalski

Grundlegende Untersuchungen zum Prozess- und Werkstoffverhalten bei schwingungsüberlagerter Umformung LFT, xii u. 197 Seiten, 93 Bilder, 11 Tab. 2019. ISBN: 978-3-96147-270-3.

### Band 337: Markus Brandmeier

Ganzheitliches ontologiebasiertes Wissensmanagement im Umfeld der industriellen Produktion FAPS, xi u. 255 Seiten, 77 Bilder, 33 Tab. 2020. ISBN: 978-3-96147-275-8.

#### Band 338: Stephan Purr

Datenerfassung für die Anwendung lernender Algorithmen bei der Herstellung von Blechformteilen LFT, ix u. 165 Seiten, 48 Bilder, 4 Tab. 2020. ISBN: 978-3-96147-281-9.

#### Band 339: Christoph Kiener

Kaltfließpressen von gerad- und schrägverzahnten Zahnrädern LFT, viii u. 151 Seiten, 81 Bilder, 3 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-287-1.

#### Band 340: Simon Spreng

Numerische, analytische und empirische Modellierung des Heißcrimpprozesses FAPS, xix u. 204 Seiten, 91 Bilder, 27 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-293-2.

#### Band 341: Patrik Schwingenschlögl

Erarbeitung eines Prozessverständnisses zur Verbesserung der tribologischen Bedingungen beim Presshärten LFT, x u. 177 Seiten, 81 Bilder, 8 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-297-0.

#### Band 342: Emanuela Affronti

Evaluation of failure behaviour of sheet metals LFT, ix u. 136 Seiten, 57 Bilder, 20 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-303-8.

#### Band 343: Julia Degner

Grundlegende Untersuchungen zur Herstellung hochfester Aluminiumblechbauteile in einem kombinierten Umform- und Abschreckprozess LFT, x u. 172 Seiten, 61 Bilder, 9 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-307-6.

### Band 344: Maximilian Wagner

Automatische Bahnplanung für die Aufteilung von Prozessbewegungen in synchrone Werkstück- und Werkzeugbewegungen mittels Multi-Roboter-Systemen FAPS, xxi u. 181 Seiten, 111 Bilder, 15 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-309-0.

5011 970 3 90147 309 0.

### Band 345: Stefan Härter

Qualifizierung des Montageprozesses hochminiaturisierter elektronischer Bauelemente FAPS, ix u. 194 Seiten, 97 Bilder, 28 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-314-4.

### Band 346: Toni Donhauser

Ressourcenorientierte Auftragsregelung in einer hybriden Produktion mittels betriebsbegleitender Simulation FAPS, xix u. 242 Seiten, 97 Bilder, 17 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-316-8.

#### Band 347: Philipp Amend

Laserbasiertes Schmelzkleben von Thermoplasten mit Metallen LPT, xv u. 154 Seiten, 67 Bilder. 2020. ISBN 978-3-96147-326-7.

#### Band 348: Matthias Ehlert

Simulationsunterstützte funktionale Grenzlagenabsicherung KTmfk, xvi u. 300 Seiten, 101 Bilder, 73 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-328-1.

### Band 349: Thomas Sander

Ein Beitrag zur Charakterisierung und Auslegung des Verbundes von Kunststoffsubstraten mit harten Dünnschichten KTmfk, xiv u. 178 Seiten, 88 Bilder, 21 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-330-4.

### Band 350: Florian Pilz

Fließpressen von Verzahnungselementen an Blechen LFT, x u. 170 Seiten, 103Bilder, 4 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-332-8.

#### Band 351: Sebastian Josef Katona

Evaluation und Aufbereitung von Produktsimulationen mittels abweichungsbehafteter Geometriemodelle KTmfk, ix u. 147 Seiten, 73 Bilder, 11 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-336-6.

#### Band 352: Jürgen Herrmann

Kumulatives Walzplattieren. Bewertung der Umformeigenschaften mehrlagiger Blechwerkstoffe der ausscheidungshärtbaren Legierung AA6014 LFT, x u. 157 Seiten, 64 Bilder, 5 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-344-1.

### Band 353: Christof Küstner

Assistenzsystem zur Unterstützung der datengetriebenen Produktentwicklung KTmfk, xii u. 219 Seiten, 63 Bilder, 14 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-348-9.

#### Band 354: Tobias Gläßel

Prozessketten zum Laserstrahlschweißen von flachleiterbasierten Formspulenwicklungen für automobile Traktionsantriebe FAPS, xiv u. 206 Seiten, 89 Bilder, 11 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-356-4.

## Band 355: Andreas Meinel

Experimentelle Untersuchung der Auswirkungen von Axialschwingungen auf Reibung und Verschleiß in Zylinderrol-lenlagern KTmfk, xii u. 162 Seiten, 56 Bilder, 7 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-358-8.

## Band 356: Hannah Riedle

Haptische, generische Modelle weicher anatomischer Strukturen für die chirurgische Simulation FAPS, xxx u. 179 Seiten, 82 Bilder, 35 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-367-0.

### Band 357: Maximilian Landgraf

Leistungselektronik für den Einsatz dielektrischer Elastomere in aktorischen, sensorischen und integrierten sensomotorischen Systemen FAPS, xxiii u. 166 Seiten, 71 Bilder, 10 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-380-9.

#### Band 358: Alireza Esfandyari

Multi-Objective Process Optimization for Overpressure Reflow Soldering in Electronics Production FAPS, xviii u. 175 Seiten, 57 Bilder, 23 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-382-3.

#### Band 359: Christian Sand

Prozessübergreifende Analyse komplexer Montageprozessketten mittels Data Mining FAPS, XV u. 168 Seiten, 61 Bilder, 12 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-398-4.

#### Band 360: Ralf Merkl

Closed-Loop Control of a Storage-Supported Hybrid Compensation System for Improving the Power Quality in Medium Voltage Networks FAPS, xxvii u. 200 Seiten, 102 Bilder, 2 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-402-8.

#### Band 361: Thomas Reitberger

Additive Fertigung polymerer optischer Wellenleiter im Aerosol-Jet-Verfahren FAPS, xix u. 141 Seiten, 65 Bilder, 11 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-400-4.

### Band 362: Marius Christian Fechter

Modellierung von Vorentwürfen in der virtuellen Realität mit natürlicher Fingerinteraktion KTmfk, x u. 188 Seiten, 67 Bilder, 19 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-404-2.

Band 363: Franziska Neubauer Oberflächenmodifizierung und Entwicklung einer Auswertemethodik zur Verschleißcharakterisierung im Presshärteprozess LFT, ix u. 177 Seiten, 42 Bilder, 6 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-406-6.

# Band 364: Eike Wolfram Schäffer

Web- und wissensbasierter Engineering-Konfigurator für roboterzentrierte Automatisierungslösungen FAPS, xxiv u. 195 Seiten, 108 Bilder, 25 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-410-3.

#### Band 365: Daniel Gross

Untersuchungen zur kohlenstoffdioxidbasierten kryogenen Minimalmengenschmierung REP, xii u. 184 Seiten, 56 Bilder, 18 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-412-7.

#### Band 366: Daniel Junker

Qualifizierung laser-additiv gefertigter Komponenten für den Einsatz im Werkzeugbau der Massivumformung LFT, vii u. 142 Seiten, 62 Bilder, 5 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-416-5.

#### Band 367: Tallal Javied

Totally Integrated Ecology Management for Resource Efficient and Eco-Friendly Production FAPS, xv u. 160 Seiten, 60 Bilder, 13 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-418-9.

### Band 368: David Marco Hochrein

Wälzlager im Beschleunigungsfeld – Eine Analysestrategie zur Bestimmung des Reibungs-, Axialschub- und Temperaturverhaltens von Nadelkränzen – KTmfk, xiii u. 279 Seiten, 108 Bilder, 39 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-420-2.

#### Band 369: Daniel Gräf

Funktionalisierung technischer Oberflächen mittels prozessüberwachter aerosolbasierter Drucktechnologie FAPS, xxii u. 175 Seiten, 97 Bilder, 6 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-433-2.

### Band 370: Andreas Gröschl

Hochfrequent fokusabstandsmodulierte Konfokalsensoren für die Nanokoordinatenmesstechnik FMT, x u. 144 Seiten, 98 Bilder, 6 Tab. 2021.

ISBN 978-3-96147-435-6.

#### Band 371: Johann Tüchsen

Konzeption, Entwicklung und Einführung des Assistenzsystems D-DAS für die Produktentwicklung elektrischer Motoren KTmfk, xii u. 178 Seiten, 92 Bilder, 12 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-437-0.

#### Band 372: Max Marian

Numerische Auslegung von Oberflächenmikrotexturen für geschmierte tribologische Kontakte KTmfk, xviii u. 276 Seiten, 85 Bilder, 45 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-439-4.

#### Band 373: Johannes Strauß

Die akustooptische Strahlformung in der Lasermaterialbearbeitung LPT, xvi u. 113 Seiten, 48 Bilder. 2021. ISBN 978-3-96147-441-7.

#### Band 374: Martin Hohmann

Machine learning and hyper spectral imaging: Multi Spectral Endoscopy in the Gastro Intestinal Tract towards Hyper Spectral Endoscopy LPT, x u. 137 Seiten, 62 Bilder, 29 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-445-5.

#### Band 375: Timo Kordaß

Lasergestütztes Verfahren zur selektiven Metallisierung von epoxidharzbasierten Duromeren zur Steigerung der Integrationsdichte für dreidimensionale mechatronische Package-Baugruppen FAPS, xviii u. 198 Seiten, 92 Bilder, 24 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-443-1.

Band 376: Philipp Kestel

Assistenzsystem für den wissensbasierten Aufbau konstruktionsbegleitender Finite-Elemente-Analysen

KTmfk, xviii u. 209 Seiten, 57 Bilder, 17 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-457-8.

### Band 377: Martin Lerchen

Messverfahren für die pulverbettbasierte additive Fertigung zur Sicherstellung der Konformität mit geometrischen Produktspezifikationen FMT, x u. 150 Seiten, 60 Bilder, 9 Tab. 2021.

ISBN 978-3- 96147-463-9.

### Band 378: Michael Schneider

Inline-Prüfung der Permeabilität in weichmagnetischen Komponenten

FAPS, xxii u. 189 Seiten, 79 Bilder, 14 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-465-3.

#### Band 379: Tobias Sprügel

Sphärische Detektorflächen als Unterstützung der Produktentwicklung zur Datenanalyse im Rahmen des Digital Engineering KTmfk, xiii u. 213 Seiten, 84 Bilder, 33 Tab. 2021.

ISBN 978-3-96147-475-2.

### Band 380: Tom Häfner

Multipulseffekte beim Mikro-Materialabtrag von Stahllegierungen mit Pikosekunden-Laserpulsen LPT, xxviii u. 159 Seiten, 57 Bilder, 13 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-479-0.

#### Band 381: Björn Heling

Einsatz und Validierung virtueller Absicherungsmethoden für abweichungs-behaftete Mechanismen im Kontext des Robust Design KTmfk, xi u. 169 Seiten, 63 Bilder, 27 Tab. 2021.

ISBN 978-3-96147-487-5.

#### Band 382: Tobias Kolb

Laserstrahl-Schmelzen von Metallen mit einer Serienanlage – Prozesscharakterisierung und Erweiterung eines Überwachungssystems LPT, xv u. 170 Seiten, 128 Bilder, 16

Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-491-2.

### Band 383: Mario Meinhardt

Widerstandselementschweißen mit gestauchten Hilfsfügeelementen - Umformtechnische Wirkzusammenhänge zur Beeinflussung der Verbindungsfestigkeit LFT, xii u. 189 Seiten, 87 Bilder, 4 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-473-8.

#### Band 384: Felix Bauer

Ein Beitrag zur digitalen Auslegung von Fügeprozessen im Karosseriebau mit Fokus auf das Remote-Laserstrahlschweißen unter Einsatz flexibler Spanntechnik LFT, xi u. 185 Seiten, 74 Bilder, 12 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-498-1.

#### Band 385: Jochen Zeitler

Konzeption eines rechnergestützten Konstruktionssystems für optomechatronische Baugruppen FAPS, xix u. 172 Seiten, 88 Bilder, 11 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-499-8.

### Band 386: Vincent Mann

Einfluss von Strahloszillation auf das Laserstrahlschweißen hochfester Stähle LPT, xiii u. 172 Seiten, 103 Bilder, 18 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-503-2.

#### Band 387: Chen Chen

Skin-equivalent opto-/elastofluidic in-vitro microphysiological vascular models for translational studies of optical biopsies LPT, xx u. 126 Seiten, 60 Bilder, 10 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-505-6.

#### Band 388: Stefan Stein

Laser drop on demand joining as bonding method for electronics assembly and packaging with high thermal requirements LPT, x u. 112 Seiten, 54 Bilder, 10 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-507-0

#### Band 389: Nikolaus Urban

Untersuchung des Laserstrahlschmelzens von Neodym-Eisen-Bor zur additiven Herstellung von Permanentmagneten FAPS, x u. 174 Seiten, 88 Bilder, 18 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-501-8.

### Band 390: Yiting Wu

Großflächige Topographiemessungen mit einem Weißlichtinterferenzmikroskop und einem metrologischen Rasterkraftmikroskop FMT, xii u. 142 Seiten, 68 Bilder, 11 Tab. 2022.

ISBN: 978-3-96147-513-1.

#### Band 391: Thomas Papke

Untersuchungen zur Umformbarkeit hybrider Bauteile aus Blechgrundkörper und additiv gefertigter Struktur LFT, xii u. 194 Seiten, 71 Bilder, 16 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-515-5.

### Band 392: Bastian Zimmermann

Einfluss des Vormaterials auf die mehrstufige Kaltumformung vom Draht LFT, xi u. 182 Seiten, 36 Bilder, 6 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-519-3.

#### Band 393: Harald Völkl

Ein simulationsbasierter Ansatz zur Auslegung additiv gefertigter FLM-Faserverbundstrukturen KTmfk, xx u. 204 Seiten, 95 Bilder, 22 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-523-0.

#### Band 394: Robert Schulte

Auslegung und Anwendung prozessangepasster Halbzeuge für Verfahren der Blechmassivumformung

LFT, x u. 163 Seiten, 93 Bilder, 5 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-525-4.

### Band 395: Philipp Frey

Umformtechnische Strukturierung metallischer Einleger im Folgeverbund für mediendichte Kunststoff-Metall-Hybridbauteile LFT, ix u. 180 Seiten, 83 Bilder, 7 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-534-6.

### Band 396: Thomas Johann Luft

Komplexitätsmanagement in der Produktentwicklung - Holistische Modellierung, Analyse, Visualisierung und Bewertung komplexer Systeme KTmfk, xiii u. 510 Seiten, 166 Bilder, 16 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-540-7.

#### Band 397: Li Wang

Evaluierung der Einsetzbarkeit des lasergestützten Verfahrens zur selektiven Metallisierung für die Verbesserung passiver Intermodulation in Hochfrequenzanwendungen

FAPS, xxii u.151 Seiten, 72 Bilder, 22 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-542-1.

#### Band 398: Sebastian Reitelshöfer

Der Aerosol-Jet-Druck Dielektrischer Elastomere als additives Fertigungsverfahren für elastische mechatronische Komponenten FAPS, xxv u. 206 Seiten, 87 Bilder, 13 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-547-6.

#### Band 399: Alexander Meyer

Selektive Magnetmontage zur Verringerung des Rastmomentes permanenterregter Synchronmotoren FAPS, xv u. 164 Seiten, 90 Bilder, 18 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-555-1.

#### Band 400: Rong Zhao

Design verschleißreduzierender amorpher Kohlenstoffschichtsysteme für trockene tribologische Gleitkontakte KTmfk, x u. 148 Seiten, 69 Bilder, 14 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-557-5.

#### Band 401: Christian P. J. Schwarzer

Kupfersintern als Fügetechnologie für Leistungselektronik FAPS, xxvii u. 234 Seiten, 125 Bilder, 24 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-566-7.

#### Band 402: Alexander Horn

Grundlegende Untersuchungen zur Gradierung der mechanischen Eigenschaften pressgehärteter Bauteile durch eine örtlich begrenzte Aufkohlung LFT, xii u. 204 Seiten, 58 Bilder, 6 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-568-1.

### Band 403: Artur Klos

Werkstoff- und umformtechnische Bewertung von hochfesten Aluminiumblechwerkstoffen für den Karosseriebau

LFT, x u. 192 Seiten, 73 Bilder, 12 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-572-8.

Band 404: Harald Schmid

Ganzheitliche Erarbeitung eines Prozessverständnisses von Tiefziehprozessen mit Ziehsicken auf Basis mechanischer und tribologischer Analysen

LFT, xiii u. 211 Seiten, 78 Bilder, 5 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-577-3.

Band 405: Johannes Henneberg Blechmassivumformung von Funktionsbauteilen aus Bandmaterial LFT, viii u. 176 Seiten, 101 Bilder, 2 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-579-7.

### Band 406: Anton Schmailzl

Festigkeits- und zeitoptimierte Prozessführung beim quasi-simultanen Laser-Durchstrahlschweißen LPT, xiii u. 157 Seiten, 84 Bilder, 7 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-583-4.

#### Band 407: Alexander Wolf

Modellierung und Vorhersage menschlichen Interaktionsverhaltens zur Analyse der Mensch-Produkt Interaktion KTmfk, x u. 207 Seiten, 69 Bilder, 10 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-585-8.

#### Band 408: Tim Weikert

Modifikationen amorpher Kohlenstoffschichten zur Anpassung der Reibungsbedingungen und zur Erhöhung des Verschleißschutzes KTmfk, xvii u. 258 Seiten, 91 Bilder, 9 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-589-6.

#### Band 409: Stefan Götz

Frühzeitiges konstruktionsbegleitendes Toleranzmanagement KTmfk, ix u. 276 Seiten, 127 Bilder, 13 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-593-3.

### Band 410: Markus Hubert

Einsatzpotenziale der Rotationsschneidtechnologie in der Verarbeitung von metallischen Funktionsfolien für mechatronische Produkte FAPS, xviii u. 139 Seiten, 86 Bilder, 7 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-603-9.

#### Band 411: Manfred Vogel

Grundlagenuntersuchungen und Erarbeitung einer Methodik zur Herstellung maßgeschneiderter Halbzeuge auf Basis eines neuartigen flexiblen Walzprozesses LFT, ix u. 176 Seiten, 61 Bilder, 11 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-605-3.

#### Band 412: Michael Weigelt

Multidimensionale Optionenanalyse alternativer Antriebskonzepte für die individuelle Langstreckenmobilität FAPS, xv u. 222 Seiten, 89 Bilder, 38 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-607-7.

#### Band 413: Frank Bodendorf

Machine Learning im Cost Engineering des Supply Managements FAPS, xiii u. 165 Seiten, 75 Bilder, 13 Tab. 2023. ISBN 978-3-96147-609-1.

#### Band 414: Maximilian Metzler

Planung und Simulation taktiler, intelligenter und kollaborativer Roboterfähigkeiten in der Montage FAPS, xix u. 174 Seiten, 72 Bilder, 3 Tab. 2023. ISBN 978-3-96147-611-4.

#### Band 415: Tina Buker

Ein Ansatz zur Reduktion produktinduzierter Nutzerstigmatisierung durch Förderung einer gleichermaßen gebrauchstauglichen wie emotionalen Produktgestalt KTmfk, x u. 236 Seiten, 54 Bilder, 44 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-613-8.

### Band 416: Marlene Kuhn

Model-based Traceability System Development for Complex Manufacturing Applying Blockchain and Graphs FAPS, xv u. 167 Seiten, 63 Bilder, 10 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-615-2.

#### Band 417: Benjamin Lengenfelder

Remote photoacoustic sensing using speckle-analysis for biomedical imaging LPT, xv u. 124 Seiten, 86 Bilder, 10 Tab. 2023. ISBN 978-3-96147-617-6.

### Band 418: Benjamin Pohrer

Analyse des Zusammenhangs zwischen dem tribochemischen Aufbau von Grenzschichten und der Ausbildung von White Etching Crack-Schäden KTmfk, xv u. 258 Seiten, 103 Bilder, 10 Tab. 2023. ISBN 978-3-96147- 621-3.

#### Band 419: Matthias Friedlein

Zuverlässigkeitsmethoden zur Beschleunigung von Qualifizierungsuntersuchungen für Steckkontakte FAPS, xxv u. 162 Seiten, 98 Bilder, 7 Tab. 2023. ISBN 978-3-96147-625-1.

#### Band 420: Thomas Stoll

Laser Powder Bed Fusion von Kupfer auf Aluminiumoxid-Keramiken FAPS, xxvii u. 236 Seiten, 103 Bilder, 11 Tab. 2023. ISBN 978-3-96147-631-2.

### Band 421: Eric Eschner

Relation of Particle Motion and Process Zone Formation as a Basis for Sensing Approaches within PBF-LB/M LPT, xiv u. 143 Seiten, 87 Bilder, o Tab. 2023. ISBN 978-3-96147-633-6.

### Band 422: Mehari, Fanuel

Laser-induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) as a diagnostics tool for biological tissue analysis. LPT, xv u. 145 Seiten, 68 Bilder, 12 Tab. 2023. ISBN 978-3-96147-641-1

#### Band 423: Leicht, Uwe

Ultraschallüberlagertes Umformen und Verstemmen von Stahlwerkstoffen LFT, xi u. 165 Seiten, 65 Bilder, 6 Tab. 2023. ISBN 978-3-96147-643-5

#### Band 424: Braun, Thomas

Potenzialanalyse der plasmabasierten, strukturierten Metallisierung thermoaktiver Oberflächen im industriellen Hausbau FAPS, xvii u. 152 Seiten, 72 Bilder, 11 Tab. 2023 ISBN 978-3-96147-653-4

## Abstract

The industrial production of buildings offers a high potential for the creation of comparatively low-cost housing due to the high degree of automation and the resulting advantages, such as shorter construction times, lower demand for personnel and an increase in quality. However, currently the installation of the heating system is mainly carried out by manual methods, like in the construction of solid houses. In addition, the demand for material resources is partly very high.

The main subject of the research work was to develop a wall panel heating system that can be automatically integrated into the wall modules during the prefabrication process. The technical implementation of the requirements is an electrically operated wall panel heating system mounted directly on the surface of the building material. This was carried out using Cold Active Plasma Coating technology (CAPM), which allows the automated deposition of an electrically conductive structure on a variety of materials.

In a parameter study, a successful configuration was found for the production of electrically conductive structures using the CAPM process. The characterisation of the layered composite showed on the one hand that the copper particles form a permanent bond with the plasterboard surface, while on the other hand the functionality of the surface heating system could be proven on the basis of thermal tests. By investigating the electrical, thermal and mechanical properties of the panel heating system under defined environmental conditions, the long-term reliability of the wall panel heating system was successfully demonstrated. Using a comfort measurement method, an ideal thermal comfort of the heating system was objectively proven in a specially built demonstration house. Furthermore, the integration of the coating process into existing production lines for the manufacture of prefabricated houses could be confirmed within a theoretical investigation. The cost-effectiveness analysis shows the competitiveness of plasma-generated wall panel heating in relation to systems currently used on the market.

Die industrielle Gebäudefertigung bietet aufgrund des hohen Automatisierungsgrades und der damit einhergehenden Vorteile, wie beispielsweise kürzere Bauzeiten, geringeren Arbeitskräftebedarf sowie Steigerung der Qualität, ein hohes Potenzial zur Schaffung von vergleichsweise kostengünstigem Wohnraum. Allerdings erfolgt auch hier, wie derzeit im Massivhausbau, der Einbau des Gewerkes Heizung überwiegend manuell, begleitet durch einen teilweise sehr hohen Einsatz materieller Ressourcen.

Das Gesamtziel der Arbeit war die Entwicklung eines Wandflächenheizsystems, welches während der Fertighausherstellung automatisiert in die Wandmodule integriert werden kann. Die Lösung zur Umsetzung der Anforderungen ist eine direkt auf die Oberfläche des Baustoffes integrierte, elektrisch betriebenen Wandflächenheizung. Die Durchführung erfolgte mit der kaltaktiven Plasmabeschichtungstechnik (CAPM), welche den automatisierten Auftrag einer elektrisch leitenden Struktur auf Oberflächen einer Vielzahl an Materialien erlaubt.

In einer Parameterstudie konnte ein geeignetes Setup gefunden werden, um elektrisch leitende Strukturen mittels CAPM-Prozess fertigen zu können. Die Charakterisierung des Schichtverbundes zeigte einerseits, dass die Kupferpartikel eine dauerhafte Verbindung mit der Gipskartonoberfläche eingehen, während andererseits die Funktionsfähigkeit des Flächenheizsystems anhand von thermischen Untersuchungen nachgewiesen werden konnte. Durch die Untersuchung der elektrischen, thermischen sowie mechanischen Eigenschaften des Flächenheizsystems unter definierten Umwelteinflüssen konnte die Langzeitzuverlässigkeit, der mittels CAPM hergestellter Wandflächenheizungen, erfolgreich dargelegt werden. Mit Hilfe von Behaglichkeitsmessungen wurde in einem eigens errichteten Demonstrationshaus eine ideale thermische Behaglichkeit des Heizsystems objektiv belegt. Ebenso konnte die Integration des Beschichtungsprozesses in bestehende Fertigungslinien zur Herstellung von Fertighäusern innerhalb einer theoretischen Analyse bestätigt werden. Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zeigt die Konkurrenzfähigkeit der plasmagenerierten Wandflächenheizung zu derzeit am Markt verbauten Systemen auf.

