

Programm Lebensgrundlage Umwelt
und ihre Sicherung (BWPLUS)

Hocheffiziente Verfahren zur Pulverbeschichtung von Holzwerkstoffen

Markus Cudazzo, Dieter Ondratschek, Ulrich Strohbeck
Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb
Universität Stuttgart

Förderkennzeichen: BWT 22003

Die Arbeiten des Programms Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung werden mit Mitteln des
Landes Baden-Württemberg gefördert

Februar 2005

INHALT

Zusammenfassung	3
1 Ausgangssituation und Zielsetzung des Vorhabens	4
2 Vorbereitende Arbeiten	4
2.1 Bewertung des Standes der Technik	4
2.2 Auswahl repräsentativer Pulverlacke sowie Holzwerkstoffsubstrate	6
3 Konzeption, Konstruktion und Aufbau der ersten Version der variablen TransApp®-Versuchsanlage	7
3.1 Anforderungsprofil	7
3.2 Konstruktion und Aufbau	8
4 Ausgangsversuche mit der ersten Version der variablen TransApp®-Versuchsanlage	8
4.1 Festlegung der Ausgangs-Versuchsparameter	8
4.2 Auswertung der Ausgangsversuche	9
4.3 Weitere Modifizierung der verfahrenstechnischen Parameter	11
5 Konstruktive Weiterentwicklung der TransApp®-Versuchsanlage	13
5.1 Allgemeines	13
5.2 Optimierungen im Bereich des elektrostatischen Fluidisierbehälters	14
5.3 Optimierungen im Bereich der Transferzone	16
5.4 Anpassung der Konstruktion an schwierige Teile	16
5.5 Prozessfenster bezüglich Werkstück- bzw. Transferbandgeschwindigkeit und transferierter Pulvermenge	17
5.6 Auswahl geeigneter Einbrenntechniken für die applizierte Pulverlacksschicht	18
5.6.1 Bisher übliche Einbrennprozesse für Pulverlacke und ihre Grenzen	18
5.6.2 Infrarotstrahler mit hohen Leistungsdichten für schnelle Einbrennprozesse	19
5.6.3 Allgemeines zu den Einbrennversuchen	25
5.6.4 Prozessfenster des Schmelz-/Vernetzungsprozesses	27
6 Untersuchung von Prozessüberwachungsmaßnahmen	36
7 Auslegung von Gesamtkonzepten/Kostenbetrachtung	38
8 Ausblick	44
Literatur	45
Abbildungs-, Tabellen- und Abkürzungs-Verzeichnis	2

Abbildungen

Abb.1:	Magnetbürsten-Laborversuchsanlage	5
Abb.2:	Erste Version der variablen TransApp [®] -Versuchsanlage	8
Abb.3:	Verschiebung des Korngrößenspektrums	9
Abb.4:	Ergebnisse von Ladungsmessungen	10
Abb.5:	Versuchsaufbau zur Ermittlung geeigneter Transferbandmaterialien	11
Abb.6:	Abhängigkeit der Feldstärke von Elektrodenradius und Abstand zur Elektrode	13
Abb.7:	Neue Ausbaustufe der TransApp [®] -Versuchsanlage	14
Abb.8:	Prozessfenster des Transferprozesses	18
Abb.9:	Energiefluss im Umlufttrockner	19
Abb.10:	Energieflusses bei der Infrarottrocknung	20
Abb.11:	Spektrum des reflektierten Wellenlängenbereichs der Farbtöne	21
Abb.12:	Aufbau von Gasinfrarotstrahlern und elektrischen Infrarotstrahlern	24
Abb.13:	Strahlungsspektrum verschiedener Infrarotstrahler	25
Abb.14:	NIR-Versuchsanlage sowie Gasinfrarot-Hellstrahler	26
Abb.15:	Temperaturverläufe bei der Infrarot-Bestrahlung	28
Abb.16:	Schematische Darstellung des Aufschmelzverhaltens	30
Abb. 17:	Vernetzungsverhalten eines thermisch härtenden Polyadditionsproduktes	31
Abb. 18:	Vernetzungsverhalten des Pulvers in Abhängigkeit von der Energie	31
Abb. 19:	Vernetzungsverhalten des Pulvers in Abhängigkeit von der Leistungsdichte	32
Abb. 20:	Vernetzungsverhalten des Pulvers in Abhängigkeit vom Farbton	33
Abb. 21:	Gefahr thermischer Schädigung beim Einsatz der Infrarottrocknung	34
Abb. 22:	Verlaufsqualität eingebrannter Pulverlackschichten	35
Abb. 23:	Aufbau der Pulverzudosierung und Füllstandsüberwachung Fluidisierbehälter	37
Abb. 24:	Dauerlaufversuche im kontinuierlichen Betrieb	37
Abb. 25:	Vergleich der Massenströme im Dauerlaufbetrieb	38
Abb. 26:	Durchschnittliche prozentuale Beschichtungskosten	42
Abb. 27:	Kosten/m ² MDF, nur Pulverlackkosten sowie Gesamtkosten	43
Abb. 28:	Beschichtungskosten/h der 4 Fallbeispiele	43
Abb. 29:	Neues Hochgeschwindigkeits-Pulverbeschichtungstechnikum	44

Tabellen

Tab.1:	Abschätzung von Marktpotenzialen zur Auswahl geeigneter Holzwerkstoffe	6
Tab.2:	Strahlungsarten und typische Strahlungstemperaturen/Wellenlängen-Maxima	22
Tab.3:	wesentliche stoffspezifische Kenndaten repräsentativer Materialien	27

Abkürzungen

MDF: Mitteldichte Faserplatte (Holzwerkstoff); engl.: medium density fibreboard

HDF: Hochdichte Faserplatte (Holzwerkstoff) ; engl.: high density fibreboard

NIR: Nahes Infrarot; engl.: near infrared

TransApp[®]: Transferapplikationsverfahren

Hocheffiziente Verfahren zur Pulverbeschichtung von Holzwerkstoffen

Markus Cudazzo, Dieter Ondratschek, Ulrich Strohbeck
Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb IFF
Universität Stuttgart

Zusammenfassung

Die elektrostatische Pulverbeschichtung wird trotz ihrer Umweltfreundlichkeit bei der Beschichtung von Holzwerkstoffen bisher nur zögerlich eingesetzt. Dies liegt zum einen an der geringen elektrischen Leitfähigkeit und Temperaturempfindlichkeit des Substrates, das beim herkömmlichen Einbrennen des Pulverlackes zu Ausgasungen und Rissbildungen neigt. Zum anderen können flüssiglacktypische hohe Förder- bzw. Prozessgeschwindigkeiten von > 1 m/s bei Flachteilen mit der bisherigen Pulverapplikationstechnik in Verbindung mit einem schnellen Aufschmelzen und Vernetzen der Lackschicht durch Hochleistungs-Infrarotstrahler nicht erreicht werden. Durch die Entwicklung einer Hochgeschwindigkeits-Transferapplikationstechnik (TransApp[®]) soll im Rahmen dieses Projektes ein wesentlicher Beitrag zur Überwindung der Hemmnisse geleistet werden. Bei dem neuen Applikationsverfahren wird der Pulverlack nicht durch herkömmliche Sprühpistolen, sondern über ein pulverbeladenes Transfermedium (z.B. ein Kunststoffband) mittels eines elektrischen Feldes auf das Substrat übertragen. Vorteile gegenüber der herkömmlichen Applikationstechnik sind, insbesondere auch bei hohen Vorschubgeschwindigkeiten, geringere Schichtdickenschwankungen und Partikelgrößenseparierungen sowie eine praktisch verlustfreie Applikation.

Zum schnellen Aufschmelzen bzw. Vernetzen der applizierten Pulverlackschicht im Sekundenbereich kommen insbesondere Infrarotstrahler mit hohen Leistungsdichten in Frage.

Highly efficient technology for powder coating on wood-based materials

Markus Cudazzo, Dieter Ondratschek, Ulrich Strohbeck

Summary

In spite of its environmental friendliness, the electrostatic powder coating so far is applied rather hesitantly on wood-based materials. This is mainly due to the low electrical conductivity and the temperature sensitivity of this kind of substrate, which tends to be susceptible to outgassing and crack initiation. Moreover, the typical conveyer velocities for liquid coatings on flat parts, i.e. > 50 m/min, cannot be achieved presently by electrostatic powder coating. The design of a low-air electrostatic powder transfer application in the scope of the present project will be an important contribution to overcome these obstacles. Instead of applying the powder by conventional powder spray guns, a transfer belt (e. g., plastic foil) transfers the powder to the substrate by the use of an electric field. Compared to conventional spray guns, the new technology yields weaker filmthickness fluctuations and particle separations as well as nearly a loss-free application, especially at high process speeds.

For high-speed melting and respectively crosslinking of applied powder coat in a few seconds, infrared radiators with high power densities are used.

1 Ausgangssituation und Ziel des Vorhabens

Ein sehr großes, bisher aber noch weitgehend unerschlossenes Anwendungspotenzial der lösemittelfreien Pulverlacke liegt im Holz- und Holzwerkstoffbereich, wo nach wie vor große Mengen lösemittelhaltiger Flüssiglacke verarbeitet werden. Die dabei aus holzverarbeitenden Betrieben in Deutschland stammenden jährlichen VOC-Emissionen dürften in der Größenordnung von 50.000 t liegen. Ein wichtiges Beispiel sind mitteldichte Faserplatten (MDF), bei denen sich in Verbindung mit der Pulverbeschichtung neue umweltschonende und kostengünstige Möglichkeiten zur Gestaltung von Oberflächen ergeben, u.a. für die Möbelindustrie. Allein in Deutschland wird dieses Marktpotenzial auf jährlich ca. 50 Mio m² zu beschichtende Oberfläche geschätzt, dies entspricht einer Pulverlackmenge von ca. 10 % des heutigen Pulverlackmarktes [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9].

Ursachen für den bisher äußerst zögerlichen Einsatz von Pulverlacken in der Holzbranche sind

- die geringe und oft nicht homogene elektrische Leitfähigkeit des Substrats, die bei der elektrostatischen Pulverlackapplikation zu ungleichmäßigem Pulverauftrag führt;
- die hohen Vorschubgeschwindigkeiten (z.B. bei MDF-Platten bis zu ca. 100 m/min), die aufgrund der erforderlichen hohen Anzahl von Sprühorganen beim EPS-Verfahren zu inakzeptablen Schichtdickenschwankungen führen;
- die übliche Wärmebehandlung der pulverbeschichteten Teile bei den pulverlacktypischen Aufschmelz- und Vernetzungstemperaturen > 100°C, die bei Holz und Holzwerkstoffen zu Lackierfehlern durch Ausgasungen bzw. zu Rissbildungen in der Lackschicht führen.

Durch Einsatz einer neuartigen elektrostatischen Pulverlack-Transferapplikationstechnik (TransApp[®]) in Verbindung mit einer schnellen Einbrenntechnik, soll ein Beitrag zur Überwindung dieser Hemmnisse geleistet werden [10]. Dabei wird der Pulverlack nicht wie bei herkömmlichen Sprühpistolen mittels Luft, sondern über ein pulverbeladenes Transfermedium (z.B. einem Kunststoffband) mittels eines elektrischen Feldes auf das Substrat übertragen.

2 Vorbereitende Arbeiten

2.1 Bewertung des Standes der Technik

Elektrostatisches Pulversprühen (EPS) [11], [12], [13], [14].

Das heute am weitesten verbreitete Pulversprühverfahren (EPS) wird üblicherweise zur Stückgutbeschichtung bei Fördergeschwindigkeiten < 5 m/min eingesetzt. Die Beschichtung horizontal geförderter Flachteile (z.B. Metallbänder) ist nur in wenigen Fällen realisiert, da es folgende Einschränkungen aufweist:

- Prozessgeschwindigkeit max. ca. 20 m/min,
- hoher Pulververbrauch durch örtliche Überbeschichtungen aufgrund nicht optimal anpassbarer Sprühstrahlüberlappung,
- geringer Auftragswirkungsgrad führt zu großen Pulvermengen, die im Kreislauf zu führen sind (Gefahr der Pulververschmutzung),
- Partikelgrößenparierung beim Pulverkreislauf und damit verbundenes Abdriften der Schichtdicke.

MSC Powder Cloud™-Verfahren

Das Powder-Cloud-Verfahren ist das bisher einzige, allerdings weltweit nur in einer einzigen Produktionsanlage in den USA eingesetzte, kommerziell genutzte Pulverbeschichtungsverfahren für hohe Prozessgeschwindigkeiten. Beschichtet werden bis zu 1650 mm breite Metallbänder bei Geschwindigkeiten bis zu 2 m/s. Der Pulverlack wird bei dieser Technik mittels rotierender Bürsten dosiert, mittels eines Luftstromes über Koronadrähte geleitet und dort aufgeladen. Ein- und beidseitige Beschichtungen bis zu ca. 130 µm Dicke sind möglich. Aufgrund des im Vergleich zu herkömmlichen Pulversprüh pistolen wesentlich höheren Koronastromes weist dieses Verfahren ungünstige Voraussetzungen bei bereits vorbeschichteten bzw. elektrisch gering leitfähigen Substraten auf. Eine Anwendung für flache Holzwerkstoff-Teile ist bisher nicht bekannt.

Magnetbürstenverfahren

Dieses am IFF bereits im Rahmen einer Machbarkeitsstudie ausführlich untersuchte, patentierte Verfahren stammt aus der Kopierer- und Laserdruckertechnik. Mit dem luftlosen Verfahren können gleichmäßige Pulverbeschichtungen ab ca. 5 µm Dicke mit Prozessgeschwindigkeiten von ca. 1 m/s erzeugt werden. Statt des zum Kopieren und Drucken verwendeten Tonerpulvers wird sehr feines Pulverlackmaterial (mittlerer Partikeldurchmesser ca. 15 µm) verwendet und durch Mischen mit ferromagnetischen, meist fluorpolymerbeschichteten Trägerteilchen (Carrier) triboelektrisch aufgeladen (Abb.1).

Verschiedene Einschränkungen haben bisher die Umsetzung des Magnetbürstenverfahrens gehemmt, insbesondere das erforderliche Einbringen eines zusätzlichen Mediums in den Prozess (Carrierpulver). Die Magnetbürstentechnik ist nur für dünne Substrate exakt gleichbleibender Dicke geeignet, da die erforderlichen definiert hohen Feldstärken mit der Magnetbürste bei sehr geringen Transferabständen < 100 µm realisiert werden. Bei Holzwerkstoffen mit ihren natürlichen, klimabedingten Dickenschwankungen ist dies nicht realisierbar. [15], [16], [17], [18], [19].

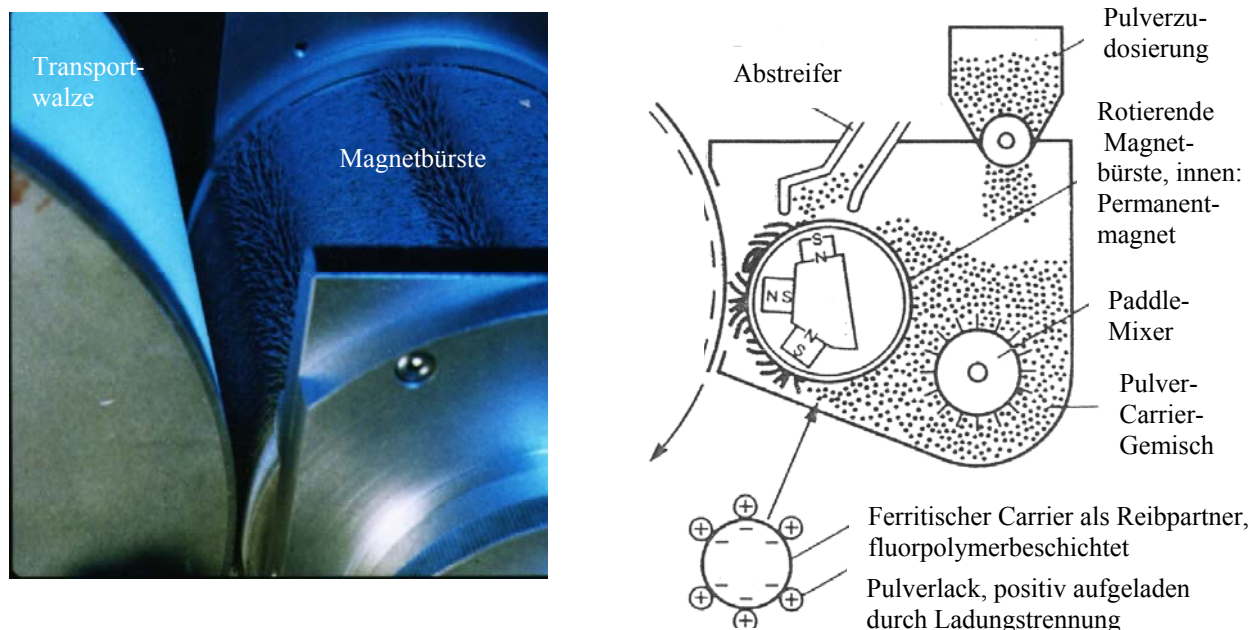


Abb.1: Magnetbürsten-Laborversuchsanlage, Werkstückförderung (z.B. Papiersubstrat) mittels der Transportwalze (Quelle: Fa. Epping PES-Laboratorium)

Elektrostatisches Wirbelbadverfahren

Beim elektrostatischen Wirbelbadverfahren wird das Substrat im bzw. über einem Fluidisierbecken mit aufgeladenem Pulver beschichtet. Mit dieser Technik werden im Produktionsmaßstab z.B. schmale Bänder und Drähte beschichtet. Die Beschichtung von Holz und Holzwerkstoffplatten ist bisher nicht realisiert, da die Bauteile von unten nach oben beschichtet werden müssten. Das elektrostatische Wirbelbadprinzip wird jedoch beim am IFF neuentwickelten TransApp[®]-Verfahren (siehe Abb.2) eingesetzt, bei dem eine Beschichtung von oben nach unten möglich ist.

Nicht elektrostatische Aufriesel-, Streu- bzw. Siebtechniken

Die üblichen Verfahren zum Aufrieseln von Schüttgütern genügen nicht den Anforderungen an die optische Beschichtungsqualität einer Pulverlackierung. Zudem treten bei hohen Prozessgeschwindigkeiten „Verwehungen“ des Pulvers auf, die bei elektrostatischen Verfahren durch die auf das Pulver wirkenden elektrischen Haftkräfte vermieden werden.

Weitere Technologien zur Pulverbeschichtung von flachen Substraten existieren bisher lediglich im Labormaßstab bzw. werden in der Patentliteratur beschrieben, z.B. [20].

2.2 Auswahl repräsentativer Holzwerkstoffsubstrate sowie geeigneter Pulverlacke

Mit Fachleuten aus dem Bereich der Holzwerkstoffherstellung und -verarbeitung werden Marktpotenziale für die Pulverbeschichtung abgeschätzt (siehe Tab. 1) und eine Vorauswahl an geeigneten Holzwerkstoff-Materialien getroffen. Es handelt sich dabei um profilierte und nicht profilierte MDF- und HDF-Platten mit einer Dicke von 8-25 mm.

Auswahl Marktpotenziale	Möbelrückwände, einseitig, 3-5 mm dick	Möbelplatten (Regalböden, Fronten, Korpus, 13-19 mm dick)	Laminatfußboden (6-8 mm Dicke)	Profilierte Platten
IST-Verfahren	Rollenheißkasch., lackierte/unlackierte Papiere, Mehrschichtwalzenauftrag	Folienbeschichtung	UV- oder elektronenstrahlhärtende Beschichtung	Nasslackierung oder Folienbeschichtung (Vakuumformenpressen)
IST-Kosten nur Material pro m² [€]	0, 15-0, 30	0, 30- 0,45 (pro Seite)	1,1 (beide Seiten)	3-4 (Folie)
Anforderungen	Glatt, matt (Glanz 5 bei 60°)	Glanz 12-60 bei 60°, wasserfest	Glanz 20-25 bei 60°, abrieb-, kratz- u. wasserfest	5 bis 90 bei 60°, Orangenhaut
Durchsatzgeschw. [m/min]	40	Bis ca. 30		1 (Lackierung)
Marktpotenzial (Oberfläche)	mittel	groß		150 Mio m ² /a in Europa (Folie)
Substrat	MDF, Hartfaser, Spanplatte,	MDF, Spanplatte	HDF	MDF

Tab. 1: Abschätzung von Marktpotenzialen zur Auswahl geeigneter Holzwerkstoffsubstrate

Zur Auswahl geeigneter Pulverlackmaterialien werden verschiedene Pulverlacke in Vorversuchen mit dem elektrostatischen Wirbelbad verarbeitet. Es zeigt sich, dass auch fein gemahlene Dünnschichtpulver mit einem $D(v,0.5)$ -Wert $< 20 \mu\text{m}$ (50 % des Partikelgesamtvolumens bestehen aus Partikeln mit einem Durchmesser $< 20 \mu\text{m}$) sich gut fluidisieren und applizieren lassen, wenn die Rieselfähigkeit des Pulvers sehr gut, d.h. der R-Wert gemäß der französischen Vorschrift T 30 A doc 396 (Sames Fluidimeter) > 180 ist. Als Standard-Versuchspulver wird ein Epoxipolyester-Mischpulver festgelegt. In Hinsicht auf das Einbrennen bei hohen Geschwindigkeiten werden zusätzlich UV-Pulver und hochreaktive Niedertemperaturpulver (z.B. auf Epoxibasis) sowie Niedertemperaturthermoplaste ausgewählt.

3 Konzeption, Konstruktion und Aufbau der ersten Version der variablen TransApp[®]-Versuchsanlage

3.1 Anforderungsprofil (siehe Abb. 2)

Substrat: Werkstückbreite max. 400 mm; Dicke 3-30 mm.

Prozessgeschwindigkeit: $\geq 1 \text{ m/s}$.

Transferband:

- elektrisch nicht leitfähig bzw. halbleitfähig ($R_o > 10^7 \Omega$), nicht hygroskopisch,
- Dicke 0,1- 2 mm; Breite maximal 400 mm, leichte Aufnahme/Abgabe von Pulver,
- Bandgeschwindigkeit $> 50 \text{ m/min}$, chemische Beständigkeit gegen Pulverlacke,
- möglichst geringe Veränderung der Kunststoffoberfläche (z.B. der elektrischen Leitfähigkeit) bei auftretenden Korona-Entladungen.

Leitfähige Hinterlegung des Transferbandes:

- ebene, feststehende Fläche, leitfähig und geerdet, glatt,
- Abstand Hinterlegung - Transferband variabel (Bereich 0,1 – 1,0 mm).

Führungswalzen für das Transferband:

- Walze 1 (Antriebs- und Beladewalze): ca. 200 mm, ballig,
- Walze 2: ca. 100 mm, nicht ballig, horizontal verstellbar,
- Walze 3: ca. 100 mm, nicht ballig,
- Walzenmaterial: Mantel- und Stirnfläche aus Metall,
- Walzenführung: Walze 4 dient als Spannwalze,
- Transferspalt: variabel 1-100 mm.

Beladestation:

- Elektrostatischer Fluidisierbehälter, erste Ausbaustufe, handelsübliches Gerät,
- Breite (quer zur Förderrichtung) ca. 200 mm, Länge ca. 600 mm, Höhe ca. 350 mm,
- Koronaaufladung.

Bandreinigungs- und Ionisierstation (bipolar ionisierte Luft):

- Zwischen Walze 3 und 4.

Feldverstärkung im Pulver-Transferbereich:

- Feststehende Transferelektrode, evtl. belüftet, 10-80 kV variabel.

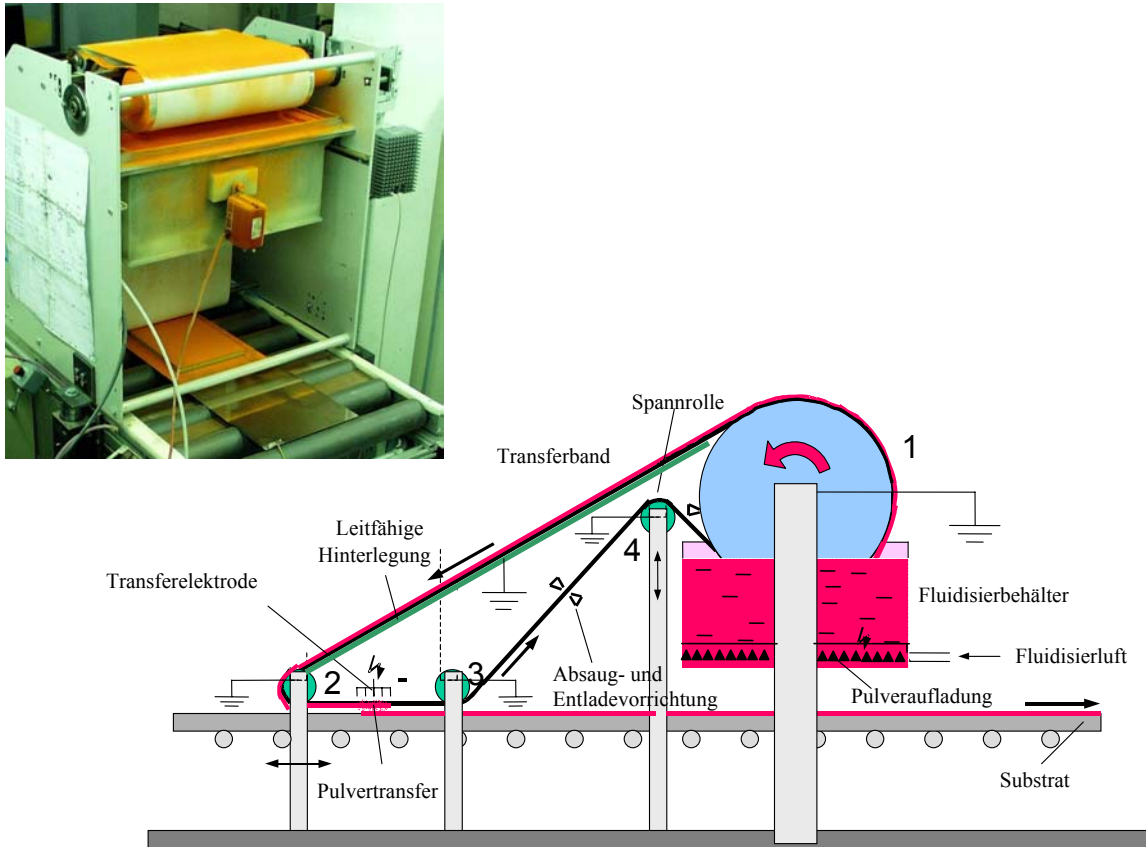


Abb.2: Erste Version der variablen TransApp[®]-Versuchsanlage

3.2 Konstruktion und Aufbau

Die Konstruktion und der Aufbau der variablen Versuchsanlage (s. Abb. 2) erfolgt im Team mit der Fa. Bürkle nach den Vorgaben des IFF. Für Einbrenntests kommt eine NIR-Versuchsanlage mit hohen Leistungsdichten zum Einsatz.

4 Ausgangsversuche mit der ersten Version der variablen TransApp[®]-Versuchsanlage

4.1 Festlegung der Ausgangs-Versuchsparameter

Die Ausgangsversuche werden mit einem Standard-Epoxy polyester-Mischpulver mit guter Rieselfähigkeit durchgeführt (Farbton: Schwarz matt). Als Holzwerkstoff kommt ein 9 mm dickes HDF-Material (Oberflächenwiderstand ca. 1 TΩ) zum Einsatz. Das Material wird mit einem Stahlblech hinterlegt, dadurch ist eine Klimatisierung zur Erhöhung der elektrischen Leitfähigkeit sowie spezielle feldsteuernde Maßnahmen zur elektrostatischen Applikation nicht erforderlich. Als Transferband wird ein polyesterbasierendes Verbundmaterial (endlos gefertigt) verwendet. Als Transferelektrode wird eine in POM eingebettete Drahtelektrode zunächst mit einem Radius von 1 mm eingesetzt.

Variiert wird an der Beladestation die Hochspannung, der Fluidisierluftvolumenstrom sowie die Vibration des Fluidisierbehälters und die Füllhöhe des Fluids. Die Beladewalze wird in das Fluid eingetaucht sowie alternativ über die Fluidisierwolke gefahren. Die an der Transferelektrode anliegende Hochspannung wird im Bereich zwischen 10 und 50 KV

variiert. Zusätzlich variiert werden die Durchlaufgeschwindigkeit des Werkstücks sowie die Transferbandgeschwindigkeit. Angestrebt werden Schichtdicken im Bereich von 60-70 μm , das entspricht bei einer Pulverdichte von ca. 1,5 g/cm^3 einem Pulverauftrag von ca. 100 g pro m^2 Werkstückfläche. Eingebrennt werden die HDF-Platten in der NIR-Einbrennzone bei Durchlaufzeiten im Bereich von ca. 5 s.

4.2 Durchführung und Auswertung der Ausgangs-Versuche

Ausreichende Schichtdicken werden bei Werkstück-Durchlaufgeschwindigkeiten im Bereich von 0,5 m/s erreicht, wenn die Beladewalze ins Fluidisierbett eingetaucht ist. Bei der Applikation überhalb der Fluidisierwolke liegen die Maximalgeschwindigkeiten im Bereich von ca. 0,3 m/s. Für höhere Durchlaufgeschwindigkeiten muss mehrfach beschichtet werden.

Die Schichtdickengleichmäßigkeit ist dabei bereits besser als bei herkömmlichen Pulverbeschichtungsprozessen im EPS-Verfahren, die Standardabweichung der Schichtdicke liegt bei einer durchschnittlichen Schichtdicke von 70 μm nur bei etwa 4 μm .

Die optische Verlaufsqualität nach dem Einbrennen der Holzwerkstoffplatten in der NIR-Zone ist als Qualität für einen Primerauftrag trotz geringfügiger Ausgasungserscheinungen ausreichend. Die Pulver-Separierungsneigung im Dauerlaufbetrieb, die am IFF mittels einer teilempirischen Simulationsmethode (KAP-SIM-Rechnung) bestimmt werden kann, ist beim eingesetzten Pulver gering (Abb.3). Pulververluste entstehen dadurch, dass vom Transferband maximal ca. 60 % der Pulverbeladung mittels der Transferelektrode auf das Substrat appliziert wird. Das Restpulver wird mittels bipolar ionisierter Luft wieder vom Band abgeblasen, um die Umlenkwalze vor der weiteren Beladung nicht zu verschmutzen.

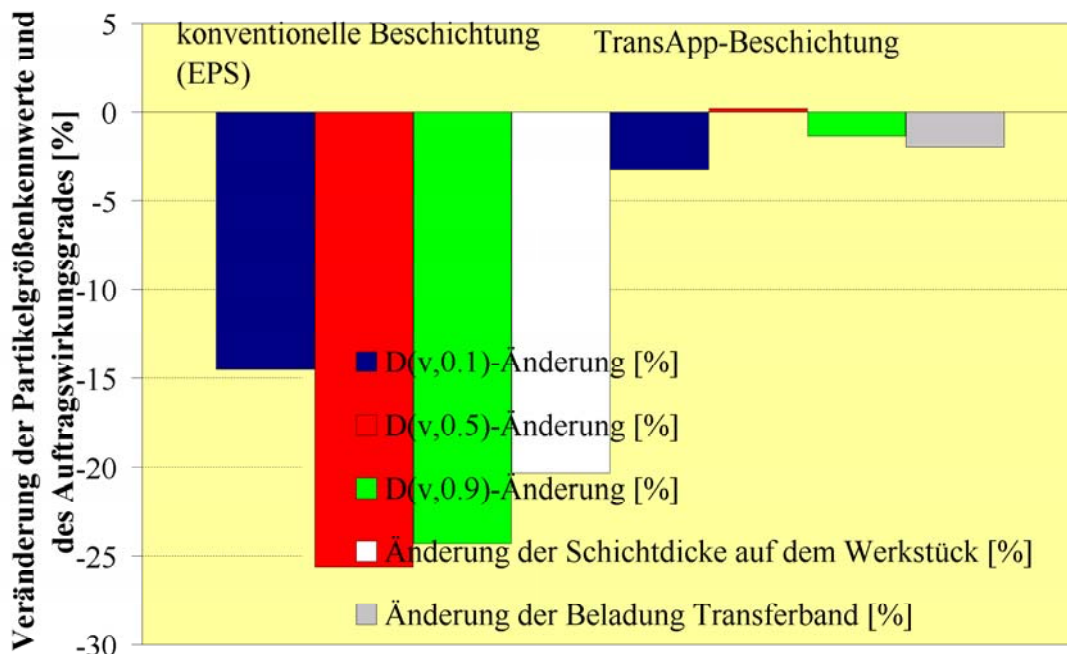


Abb.3: Verschiebung des Korngrößenspektrums (Partikelgrößenkennwerte $D(v,0.1/0.5/0.9)$), der Schichtdicke auf dem Werkstück (beim EPS-Verfahren) sowie der Beladung des Transferbandes (beim TransApp[®])

Mittels einer aus der Tonerbranche stammenden, vom IFF für die elektrostatische Pulverbeschichtung angepassten Messmethode [21] werden die partikelgrößenspezifischen

Ladungsverteilungen gemessen (q/d-Messmethode). Die Messung zeigt, dass am Applikator höher aufgeladene Partikel abgeschieden werden, während die geringer aufgeladenen Partikel eher am Transferband zurückbleiben. Die Sättigungsladung von Partikeln bei der Ionisationsaufladung liegt theoretisch nach Pauthenier [22] bei

$$Q_{\max} = 12\pi\epsilon_0 (\epsilon_r/\epsilon_r+2)r^2E_0 \quad (1)$$

Q_{\max} : Sättigungsaufladung (Partikel) [As (C)]

ϵ_0 : elektrische Feldkonstante/Permittivität des Vakuums ($8,86 \cdot 10^{-12}$)[As/Vm]

ϵ_r : Dielektrizitätszahl, relative Permittivität

E_0 : Anfangsfeldstärke [V/m]

r : Radius (Partikel) [m]

In der Praxis liegen die Werte bei typischen Partikelgrößen im fC-Bereich, etwas unterhalb der Sättigungsaufladung, da der Aufladeprozess zusätzlich von Zeitfaktoren abhängt. Ladungswerte steigen theoretisch mit r^2 , also proportional zur Oberfläche an. Bei der messmethodentypischen Darstellung der Ergebnisse (Abb. 4) werden die durchschnittlichen Ladungswerte/10 μm Durchmesser incl. Standardabweichung gegen die Partikelgrößen dargestellt. Deshalb wachsen die Kurven hier linear an. Da Raumladungen sich ähnlich auswirken wie eine Spannungsquelle zwischen Elektrode und geerdeter Gegenelektrode, wird die Feldstärke in der Nähe der Drahtelektrode etwas erniedrigt und zur geerdeten Gegenelektrode (geerdete Hinterlegung) hin leicht erhöht. Dies führt zu einer mäßig verringerten Aufladung der Partikel im elektrostatischen Fluidisierbett im Vergleich zum EPS-Verfahren (siehe auch massenbezogene Ladungswerte q/m in der Legende Abb.4), da dort aufgrund der hohen Pulver-Übertragungsraten die Raumladungsdichten höher sind und die verringerte Anfangsfeldstärke die Aufladung verringert (s. Gleichung 1).

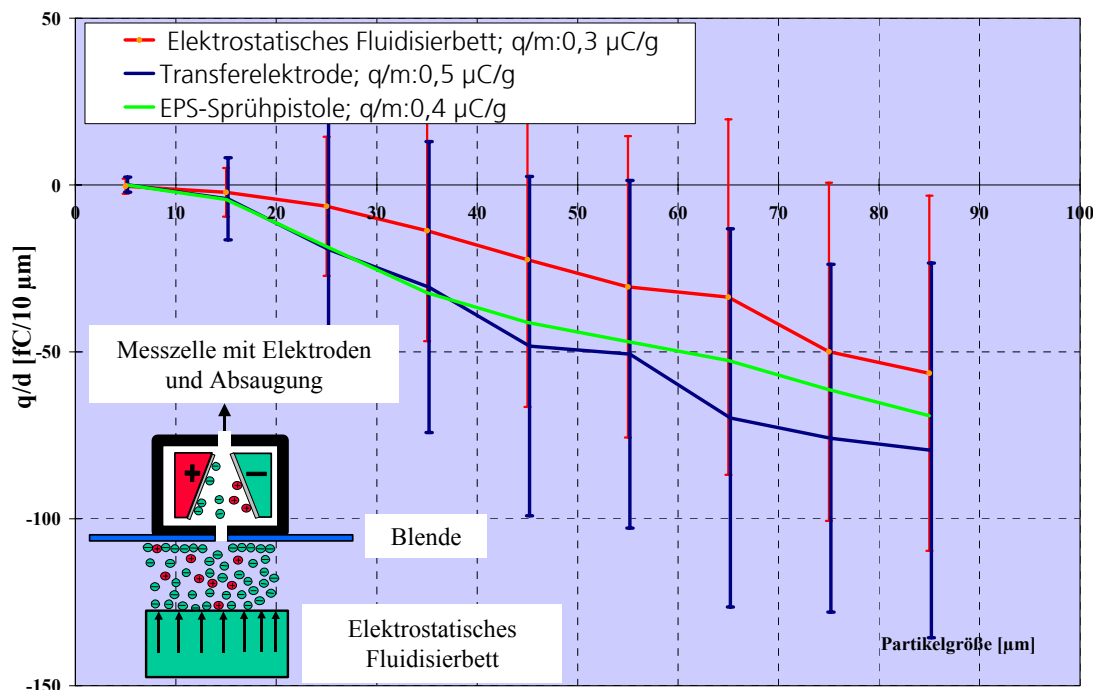


Abb.4: Ergebnisse von Ladungsmessungen von am elektrostatischen Fluidisierbett aufgeladenem sowie von an der Transferelektrode abgeschiedenem Pulver im Vergleich zu typischen Ladungswerten einer Korona-Sprühpistole (Beispiel).

Die Hauptschwierigkeiten bei den Applikationstests mit der ersten TransApp[®]-Versuchsanlage liegen in der nicht prozesssicheren Be- und Entladung des Transferbandes. Durch die Einwirkungen der an der Transferelektrode auftretenden Koronaentladungen auf das Transferband treten Veränderungen der elektrischen Leitfähigkeit des Bandes im Bereich von 10^{13} auf $10^{11} \Omega$ ein (reversible und z.T. irreversible Vorgänge). Weitere Schwierigkeiten bestehen mit dem handelsüblichen elektrostatischen Fluidisierbehälter, der keine prozesssichere Beladung des Transferbandes ermöglicht (siehe hierzu Abschn. 5.2).

4.3 Weitere Modifizierung der verfahrenstechnischen Parameter

Als Basis für die Verbesserung der Prozesssicherheit werden mit einem speziellen Versuchsaufbau unterschiedliche Transferbandmaterialien untersucht (Abb. 5). Zum Einsatz kommen verschiedene weitere Verbundmaterialien sowie einlagige Folien aus Polyester, Polyamiden, Fluorpolymeren, Polyurethan, PEEK und Polyimid. Beim polyimidbasierenden Material wird keine Veränderung des elektrischen Oberflächenwiderstandes ($10^{16} \Omega$) sowie des damit verbundenen Be- und Entladungsverhaltens des Bandes im Dauerlaufbetrieb festgestellt. Bei dem einfachen Aufbau der Vorversuchsanlage, bei dem das Transferband nur über zwei Walzen geführt ist, wird das Pulver mittels einer Sprühpistole auf das Transferband aufgetragen und anschließend mittels einer Drahtelektrode (Transferelektrode) abgeschieden. Im Dauerlaufbetrieb kommt es auf dem Transferband nicht zu einem Schichtaufbau von nicht abgeschiedenem Pulver, sondern es stellt sich ein Gleichgewichtszustand zwischen abgeschiedenem und nicht abgeschiedenem Pulver ein. Für die nur 125 μm dicke Polyimidfolie wird eine optimal angepasste Drahtelektrodenkonfiguration ausgewählt (z.B. $r=0,04 \text{ mm}$ siehe Abb.6), um eine hohe Feldstärke auf der Transferbandoberfläche zu erzielen, so dass dort anhaftende Partikel eine möglichst hohe Ablösekraft erfahren.

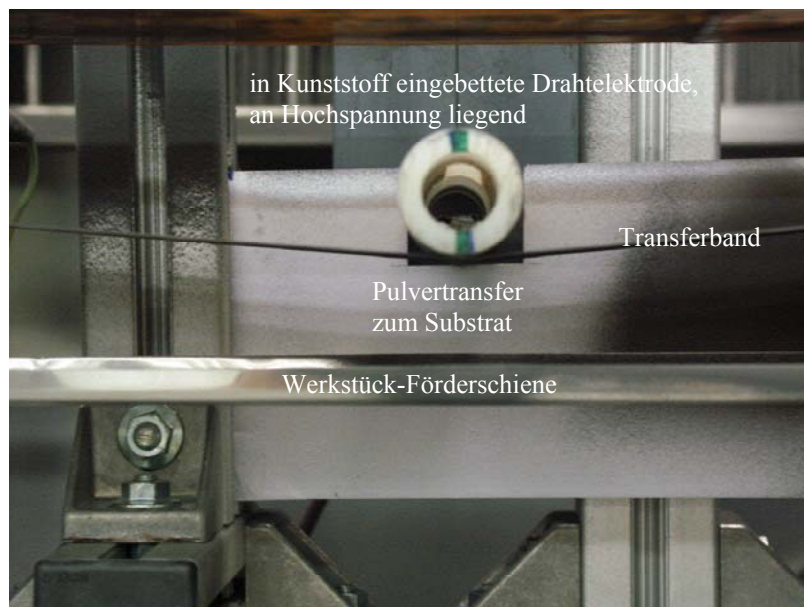


Abb.5: Versuchsaufbau zur Ermittlung geeigneter Transferbandmaterialien

Die exakte theoretische Ableitung der Feldstärken bei nicht idealen Geometrien ist nur durch aufwändige approximative oder iterative Methoden der numerischen Simulation möglich [12]. Für eine Abschätzung der Potenziale und Feldstärken im Applikationsbereich kann die Laplace-Gleichung für Zylinderkoordinaten (ohne Berücksichtigung von Raumladungen) herangezogen werden:

$$\varphi(s_0) = \frac{U_0 \cdot \ln(s_0/S)}{s_0 \cdot \ln(r/S)} \quad (2)$$

$$E(s_0) = \frac{U_0}{s_0 \cdot \ln(S/r)} \quad (3)$$

Raumladungseinflüsse werden durch die Poisson'sche Gleichung

$$\Delta^2\varphi = -\rho/\varepsilon \quad (4)$$

beschrieben. Für Zylinderkoordinaten gelten bei idealisiert homogener Raumladungsverteilung die Gleichungen

$$\varphi(s_0) = (U_0 - \rho(S^2 - r^2)/4\varepsilon) \cdot \frac{\ln(s_0/S)}{\ln(r/S)} + \frac{\varphi_p \cdot \ln(r/s_0)}{\ln(r/L)} + \frac{\rho(S^2 - s_0^2)}{4\varepsilon} \quad (5)$$

$$E(s_0) = \frac{U_0 - \varphi_p - \rho(S^2 - r^2)/4\varepsilon}{s_0 \cdot \ln(S/r)} + \frac{\rho \cdot s_0}{2\varepsilon} \quad (6)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \varepsilon_r \quad (7)$$

- φ : Potenzial [V]
- φ_p : Potenzial durch abgeschiedene Pulverschicht (**vernachlässigbar gering**) [V]
- *: **vernachlässigbare Größen**
- $E(s_0)$: Feldstärke entlang s_0 [V/m]
- U_0 : angelegte Hochspannung [V]
- s_0 : Abstand vom Drahtmittelpunkt an dem die Feldstärke ermittelt wird [m]
- S : Sprühabstand (Abstand Drahtmitte Substratoberfläche) [m]
- r : Radius Drahtelektrode [m]
- ρ : Raumladungsdichte [C/m³]
- ε : Permittivität, für diesen Fall $\approx \varepsilon_0$, da $\varepsilon_r \approx 1$ ($8,86 \cdot 10^{-12}$) [As/Vm]
- d : Banddicke [m]

Die Raumladungen beim Abscheiden des Pulvers bestehen ausschließlich aus geladenen Pulverpartikeln, da Luftionen durch die Abschirmung mit der Polyimidfolie nicht entstehen. Über eine auf 1 m normierte Abscheidelänge (Länge Drahtelektrode) und einer Sprühstrahlbreite von ca. $0,2 \text{ m}$ werden typischerweise ca. 80 g Pulver/s mit einer Aufladung von ca. $0,5 \mu\text{C/g}$ ($C=As$) auf das Werkstück übertragen. Dabei beträgt die Ionenstromdichte durch die Pulverpartikel (J_i) $200 \cdot 10^{-6} \text{ A/m}^2$. Die Raumladungsdichte errechnet sich nach der Gleichung

$$\rho_p = J_p / \mu_p E \quad (8)$$

- ρ_p : Raumladungsdichte der Pulverpartikel [C/m³]
- J_p : Ionenstromdichte durch Pulverpartikel [A/m²]
- μ_p : Ionenbeweglichkeit der Pulverpartikel, Feldgradient der Geschwindigkeit [m²/Vs]

Die Ionenbeweglichkeit der geladenen Pulverpartikel, Feldgradient der Geschwindigkeit, kann aus dem Stoke'schen Gesetz

$$v = Q \cdot E / 6\pi \cdot \eta_L \cdot r \quad (9)$$

v : Partikelgeschwindigkeit [m/s]
 $Q \cdot E$: Feldkraft [N]
 η_L : dynamische Viskosität der Luft ($1,79 \cdot 10^{-5}$) [Pas]
 r : Teilchenradius [m]

mit folgender Gleichung

$$\mu_p = Q / 6\pi \cdot \eta_L \cdot r \quad (10)$$

beschrieben werden.

Vereinfacht ergibt sich bei Partikeln repräsentativer Oberfläche mit repräsentativen Partikelradien (z.B. $7 \mu\text{m}$) und einer Absolutladung von 6 fC eine Partikelgeschwindigkeit von ca. $1,25 \text{ m/s}$ und ein ρ_p von ca. $160 \cdot 10^{-6} \text{ C/m}^3$.

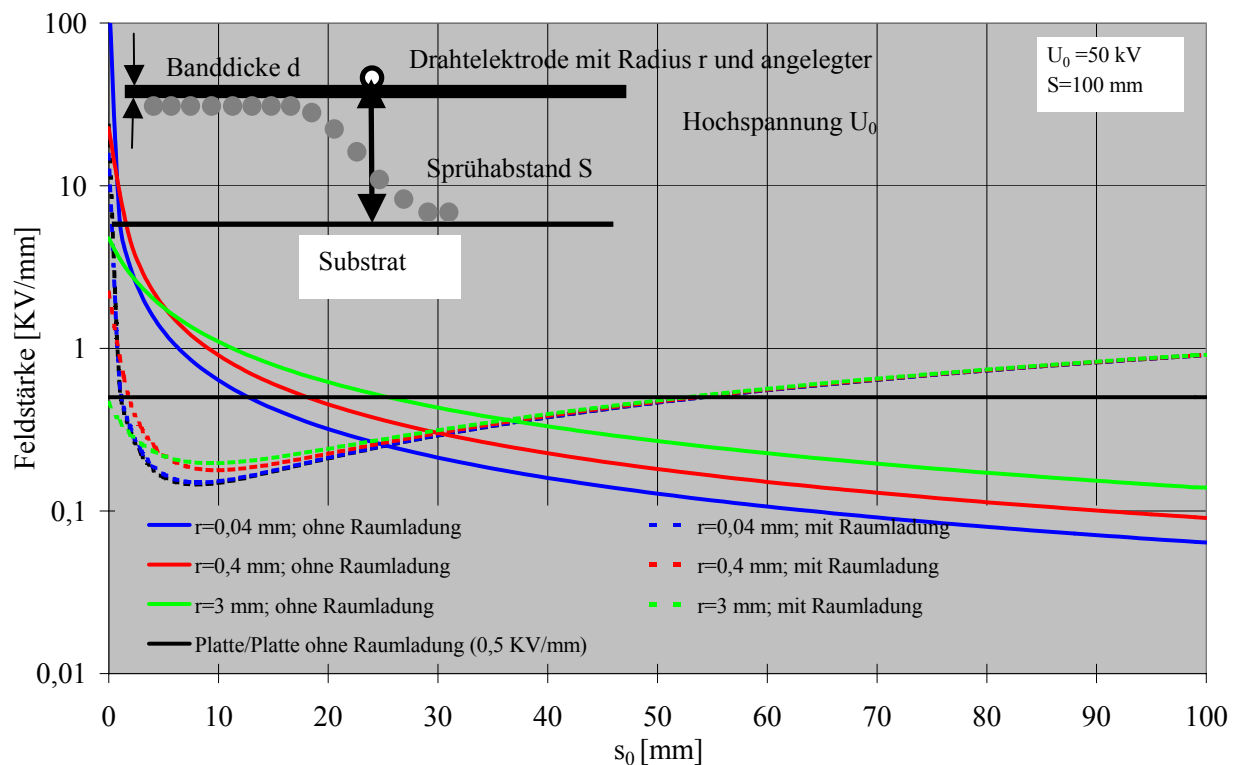


Abb.6: Abhängigkeit der Feldstärke von Elektrodenradius und Abstand zur Elektrode mit und ohne Berücksichtigung der Raumladungen; Ziel: möglichst hohe Feldstärke bei $s_0=r+d$

5 Konstruktive Weiterentwicklung der TransApp[®]-Versuchsanlage

5.1 Allgemeines

Aufgrund der positiven Erfahrungen mit der Vorversuchsanlage sowie zur Vereinfachung der bisher komplizierten Transferbandführung der TransApp[®]-Versuchsanlage und der damit verbundenen Prozessunsicherheiten (Be- und Entladung, Reinigung Transferband) wird für die nächste Ausbaustufe eine völlig überarbeitete Version der Anlage mit einer Walzenführung über nur zwei Walzen aufgebaut. Der Beladebereich befindet sich dabei nicht

mehr unterhalb der Walze, sondern unterhalb einer flächigen Hinterlegung des Transferbandes. Ein Eintauchen des zu beladenden Transferbandes in das fluidisierte Pulver ist dadurch nicht mehr möglich, durch eine Vergrößerung der Beladefläche wird trotzdem eine erhöhte Pulveraufnahme pro Zeiteinheit erwartet. Für diese Ausbaustufe ist allerdings eine Überarbeitung des Fluidisierbehälters insbesondere hinsichtlich reduzierter Bauhöhe des Fluidisierbehälters erforderlich, um den Abstand zwischen Transferelektrode und Substrat ausreichend gering zu halten. Zusätzlich muss die Zündsicherheit gewährleistet sein und die Gleichmäßigkeit der Beladung des Transferbandes verbessert werden (Abb.7).

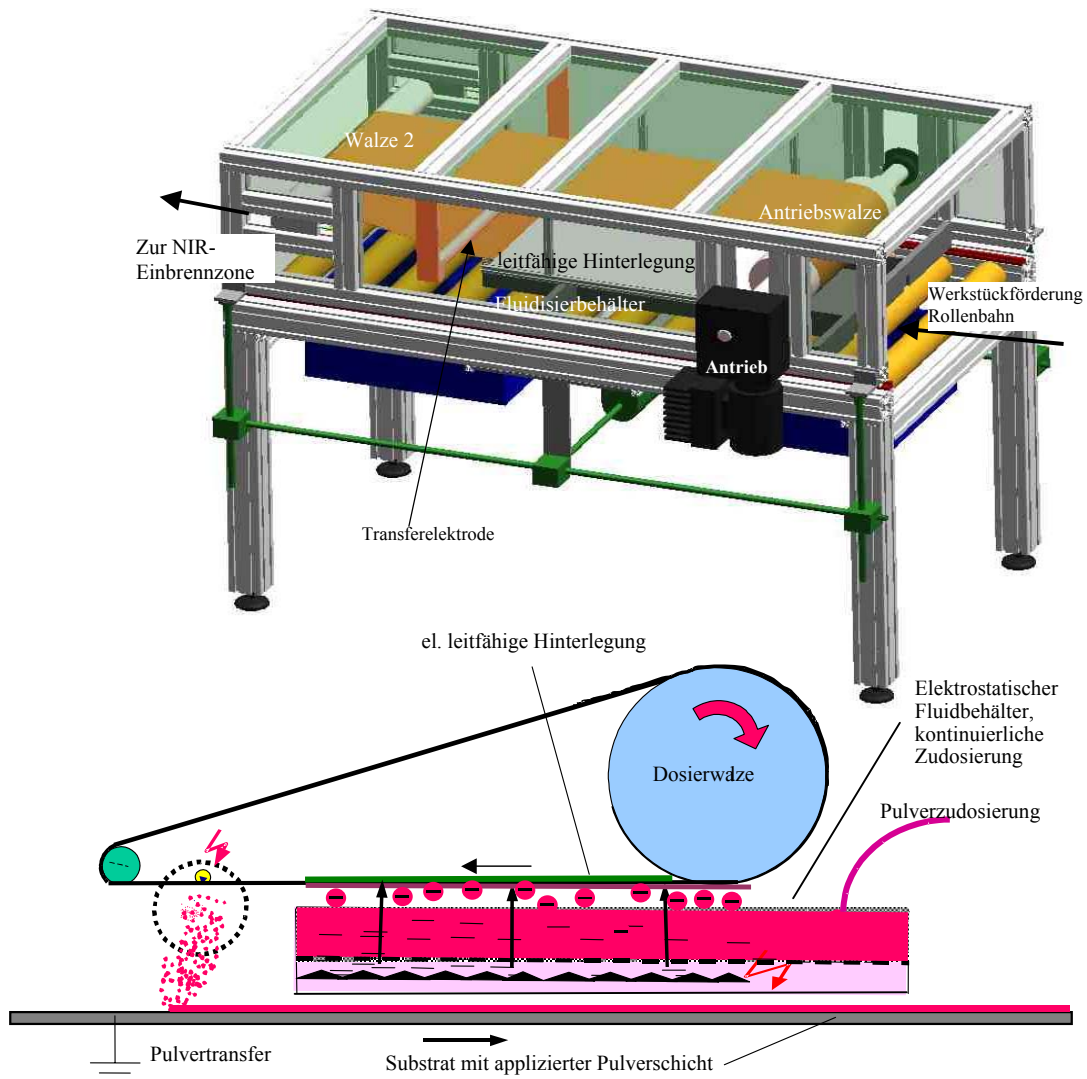


Abb.7: Neue Ausbaustufe der TransApp®-Versuchsanlage

5.2 Optimierungen im Bereich des elektrostatischen Fluidisierbehälters

Mit dem bisher üblichen elektrostatischen Fluidisierbehälter kann eine erhebliche Verringerung der Bauhöhe, die hinsichtlich eines ausreichend geringen Abstandes zwischen Transferband und Werkstück notwendig ist, nicht erzielt werden. Dies wäre mit Zündgefahren durch Erhöhung des hohen Energieeintrags (Q), der bereits in der IST-Version bei 300 mJ liegt, verbunden.

$$Q = 0,5 \cdot C \cdot U^2 \quad (11)$$

$$C = \epsilon_0 \cdot l \cdot 2\pi / \ln(S/r) \quad (12)$$

- Q: Energieeintrag [J]
 C: Kapazität [F]
 l: Länge Elektrodendraht [m]
 r: Elektrodenradius [m]

Die Minimierung der gespeicherten elektrischen Energie kann zum einen durch die Reduzierung der Korona-Einsatzspannung (bisher ca. 60 kV), zum anderen durch die Verringerung der Kapazität erfolgen. Peek beschreibt die Zusammenhänge bei der Korona-Einsatzspannung (U_{C0}) [23] mit der teilempirischen Gleichung:

$$U_{C0} = 3 \cdot 10^6 \cdot r \cdot f \cdot s \cdot (1 + 0,3 \cdot (s \cdot 10^{-2}/r_0)^{0,5}) \cdot \ln(S/r) \quad (13)$$

- U_{C0} : Korona-Einsatzspannung [V]
 f: Rauheitsfaktor der Elektrode ($0,5 < f < 1$)
 s: relative Dichte der Luft ($s \cong 1$)

Beim neuen Fluidisierbehälterkonzept wird die Korona-Einsatzspannung durch die Wahl sehr kleiner Drahtelektroden Durchmesser (80 μm) erheblich reduziert. Durch die dünnere Elektrode verringert sich auch die Kapazität, wodurch der Abstand Elektrode/geerdete Gegenelektrode (metallische Hinterlegung) und damit die Bauhöhe auf ca. 100 mm reduziert werden kann (Zündenergie $< 0,1 \text{ J}$). Durch die dichte Anordnung der Drahtelektroden im Bereich des Pulvertransfers wird ein nahezu homogenes Feld ähnlich wie beim Plattenkondensator ($E=U/S$, unabhängig von ϵ_0) erzeugt [24]. Bei 25 KV angelegter Hochspannung wird zwischen 30 und 50 mm Abstand (ohne Raumladungen durch aufgeladene Pulverpartikel) eine homogene Feldstärke von ca. 0,45 KV/mm mittels einer Feldmühle gemessen, das entspricht also ca. 90% des Wertes, der beim Platte/Platte-Modell erreicht werden müsste. Der Raumladungseffekt kann durch die Minimierung des Abstands Elektrode/metallische Hinterlegung (S) und der Füllhöhe im Fluidisierbehälter (Reduzierung parasitärer Raumladungseffekte) minimiert werden.

Bei einer auf 1 m² normierten Fluidisierbodenfläche wird am Hochspannungserzeuger bei der Pulverapplikation eine Stromstärke von ca. 250 μA gemessen. Bei einer typischen Übertragungsrate von ca. 100 g Pulver/s und bei einer pulverlacktypischen Aufladung von 0,3 $\mu\text{C/g}$ werden ca. 12 % der gesamten Ladungen durch Pulverpartikel getragen, die restlichen 88 % der Ladungen durch die Luftionen. Der Wirkungsgrad der Partikelaufladung ist damit etwas höher als beim EPS-Verfahren, bei dem nur ca. 5-7 % der Ladungen von den Pulverpartikeln getragen werden. Im Fallbeispiel beträgt die Ionenstromdichte durch Luftionen $220 \cdot 10^{-6} \text{ A/m}^2$ und die Ionenstromdichte durch Pulverpartikel $30 \cdot 10^{-6} \text{ A/m}^2$. Die Raumladungsdichte durch das applizierte Pulver (ρ_p) rechnet sich wie in Gleichung 8/9/10 beschrieben und beträgt beim repräsentativen Partikelradius 7 μm und einer Absolutladung von ca. 4 fC bei einer Partikelgeschwindigkeit von ca. 0,8 m/s ca. $38 \cdot 10^{-6} \text{ C/m}^3$. Zusätzlich zu den Raumladungen durch geladene Pulverpartikel kommen beim elektrostatischen Fluidisierbehälter noch Raumladungen durch Luftionen hinzu, die einen geringen Einfluss auf die Feldstärke ausüben. Sie berechnen sich analog zu den Pulverpartikeln (Gleichung 8) aus der Gleichung

$$\rho_i = J_i / \mu_i E \quad (14)$$

- ρ_i : Raumladungsdichte Luftionen [C/m^3]
 J_i : Ionenstromdichte durch Luftionen [A/m^2]
 μ_i : Ionenbeweglichkeit Luftionen, Feldgradient der Geschwindigkeit [m^2/Vs]

Die Ionenbeweglichkeit negativ geladener Luftionen wird aus der Literatur mit $ca. 220 \cdot 10^{-6} m^2/Vs$ angegeben. Bei einer durchschnittlichen Feldstärke von $ca. 0,5 \cdot 10^{-6} V/m$ ergibt sich für ρ_i ein Wert von $2 \cdot 10^{-6} C/m^3$. Die gesamte Raumladungsdichte beträgt also $38 \cdot 10^{-6} C/m^3 + 2 \cdot 10^{-6} C/m^3 = 40 \cdot 10^{-6} C/m^3$. Zur Abschätzung des Einflusses der Raumladungen auf das Anfangspotenzial und der damit verbundenen Feldstärke kann anlehnend an die Poisson'sche Gleichung für diesen Fall vereinfacht folgende Gleichung verwendet werden:

$$\varphi_0 = U_0 - (\rho S^2 / 2\epsilon_0) \quad (15)$$

Trotz hoher Übertragungsraten/Zeiteinheit ist der Einfluss der Raumladungsdichte auf die Anfangsfeldstärke mäßig, da beim neuen Konzept mit geringen Sprühabständen (S) gearbeitet wird.

Fallbeispiel: Sprühabstand $0,05 m$; Raumladungsdichte $40 \cdot 10^{-6} C/m^3$; angelegte Hochspannung $25.000 V$; dabei reduziert sich das Anfangspotenzial und damit verbunden die Feldstärke um den Raumladungstherm $\rho S^2 / 2\epsilon_0$ (Gleichung 15), also um $ca. 25 \%$ (Gleichung 15).

Parasitäre Aufladungen des Sinterbodens, die ebenfalls den Feldstärkenverlauf beeinflussen, werden mit dem neuen elektrostatischen Fluidisierbehälter dadurch minimiert, dass die Elektroden sich oberhalb des Sinterbodens befinden und sich der Sinterboden kaum noch elektrostatisch auflädt. Zusätzlich werden zur Vermeidung von Zündgefahren die Drahtelektroden durch die Vorschaltung von Hochspannungswiderständen (G Ω -Bereich) strom- und damit leistungsbeschränkt.

Weitere Varianten zur Aufladung und Abscheidung der Pulverpartikel mittels Wechselspannung und pulsierender Gleichspannung im Bereich $50-10.000 Hz$ sowie Überlagerungen von Gleichspannung und Wechselspannung/pulsierende Gleichspannung zeigen bei Versuchen die prinzipielle Eignung, aber keine signifikanten Verbesserungen des Applikationsprozesses.

5.3 Optimierungen im Bereich der Transferzone

Die visuelle Verlaufsqualität der Pulverlackschicht wird durch Einbringen eines geringen zusätzlichen Luftvolumenstromes ($ca. 5 m^3/h$) zwischen Transfer Elektrode und Werkstück waagrecht zur Werkstück-Förderrichtung verbessert und gleichzeitig werden kritische Streifenbildungen beim Transferprozess vermieden. Dadurch wird die Schichtdickenverteilung optimiert. Bei durchschnittlichen Schichtdicken von $ca. 60-70 \mu m$ liegt die Standardabweichung nur noch im Bereich von $ca. 4 \mu m$.

Versuche zur Abscheidung der Pulverpartikel vom Transferband mittels Wechselspannung und pulsierender Gleichspannung im Bereich $50-10.000 Hz$ sowie Überlagerungen von Gleichspannung und Wechselspannung/pulsierende Gleichspannung zeigen die prinzipielle Eignung, aber keine signifikante Verbesserung des Transferprozesses.

5.4 Anpassung der Konstruktion an schwierige Bauteile

Mit dem bestehenden Konzept können Kanten und Profile nur dann beschichtet werden, wenn in Anlehnung an vergleichbare Flüssiglackapplikationen (Flächenspritzautomaten) der

Sprühstrahl angewinkelt und gleichzeitig aufgeweitet wird. Hierzu wird vom IFF ein elektrostatisches Bürstenapplikationsverfahren entwickelt, das für diesen Anwendungsfall adaptiert werden kann. Dabei können Prozessgeschwindigkeiten von max. ca. 0,05 m/s gefahren werden [25].

5.5 Prozessfenster bezüglich Werkstück- bzw. Transferbandgeschwindigkeit und transferierter Pulvermenge

Zur Verwendung kommt das Standard-EP/PE-Mischpulver, da mit reinem Epoxipulver zum einen keine ausreichende Beschichtungsqualität und zum andern kein ausreichend reproduzierbarer Pulvertransfer erzielt wird. Kritisch ist die sehr hohe Beladung des Transferbandes, die auf eine hohe Aufladung der Partikel infolge der hohen Dielektrizitätszahl $\epsilon_r \cong 4,5$ (Mischpulver liegen bei ca. 3,5) zurückzuführen ist (siehe Gleichung 1). Gleichzeitig bewirkt die hohe Dielektrizitätszahl eine zu schnelle Entladung des Pulvers auf dem Transferband, so dass an der Transferelektrode keine ausreichend hohen Feldkräfte zur Ablösung des Pulvers wirken. Die Entladezeit τ kann nach Wu [26] wie folgt ermittelt werden:

$$\tau = \epsilon \sigma \text{ [s]} \quad (16)$$

σ : elektrischer Widerstand [$\Omega \cdot \text{m}$]

Bereits bei einem Durchgangswiderstand von ca. $10^{11} \Omega \cdot \text{m}$ liegen dabei die Entladezeiten im kritischen Bereich, insbesondere bei dem Pulver, das nicht beim ersten Banddurchlauf abgeschieden wird. Der Gleichgewichtszustand zwischen abgeschiedenen und auf dem Transferband zurückbleibendem Pulver stellt sich dann erst bei sehr hohen Bandbeladungen $> 500 \text{ g/m}^2$ ein.

Ähnliche Effekte sind auch beim Einsatz von Polyamidpulvern sowie weiteren Pulvern mit hoher Dielektrizitätszahl zu vermerken. Prinzipiell gut verarbeitbar sind neben den Epoxipolyester-Mischpulvern auch reine Polyesterpulver sowie Acrylatpulver.

Variiert wird bei den Versuchen die Transferbandgeschwindigkeit und die Werkstückgeschwindigkeit. Dabei zeigt sich, dass die Beladung des Transferbandes pro Flächeneinheit bei höheren Transferbandgeschwindigkeiten kontinuierlich abnimmt. Die pro Zeiteinheit transferierte Pulvermenge (in Abb. 8 normiert auf eine Transferbandbreite von 1 m) nimmt dagegen bis zu einer Geschwindigkeit von ca. $0,5\text{-}0,75 \text{ m/s}$ zu. Danach nimmt der Wert wieder ab, so dass Transferbandgeschwindigkeiten $> 0,5 \text{ m/s}$ keine Erhöhung der Schichtdicke auf dem Werkstück mehr bewirken.

Auch das mittlere Schichtgewicht auf dem Werkstück nimmt bei zunehmender Werkstück-Fördergeschwindigkeit ab. Um den SOLL-Wert von $100 \text{ g/m}^2 (\cong 70 \mu\text{m})$ zu erreichen, können Werkstück-Fördergeschwindigkeiten bis zu ca. $0,8 \text{ m/s}$ erzielt werden, wobei keine Unterschiede zwischen der Transferbandgeschwindigkeit von $0,5$ und $0,75 \text{ m/s}$ erkennbar sind (siehe in Abb. 8 quadratisch und dreieckig markierte Linie).

Für höhere Substratgeschwindigkeiten $> 0,8 \text{ m/s}$ müssen Substrate den Applikationsprozess zwei mal durchlaufen. Für zukünftige Konzepte können bei mäßig erhöhtem Platzbedarf in die TransApp[®]-Anlage zwei Beladestationen und zwei Abscheidebereiche (Drahtelektroden) integriert werden. Das Grundkonzept bleibt dabei erhalten, nur ein gemeinsames Transferband ist erforderlich.

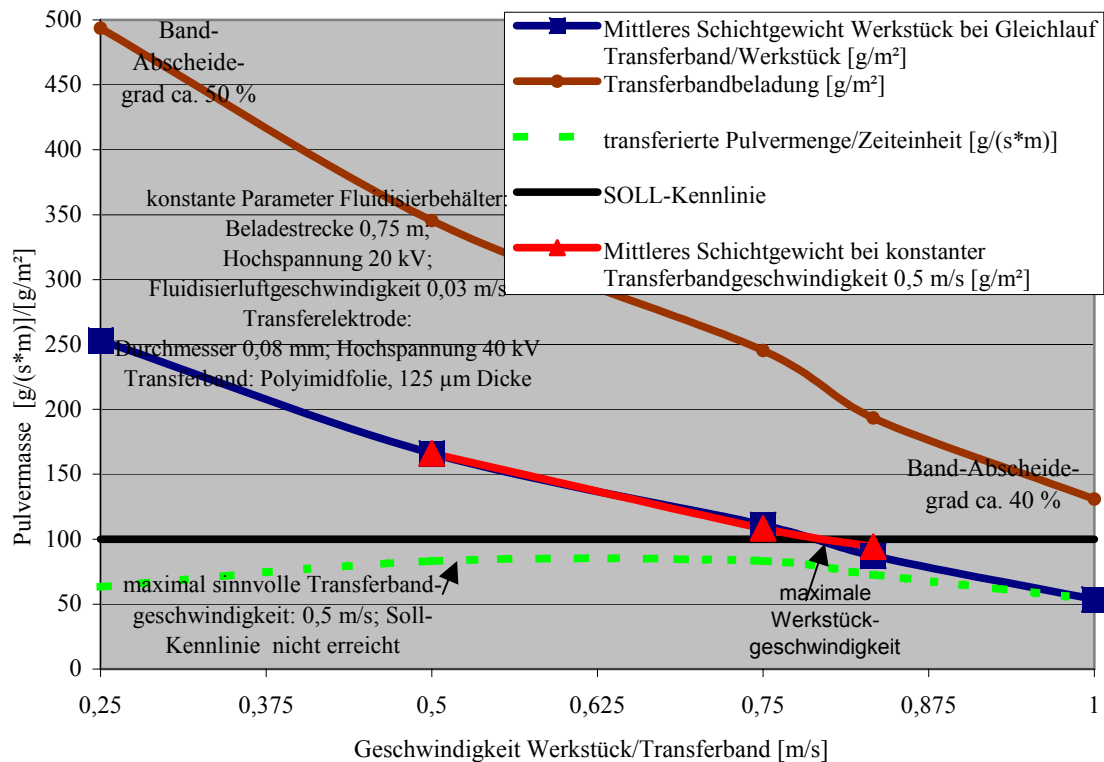


Abb.8: Prozessfenster des Transferprozesses

5.6 Auswahl geeigneter Einbrenntechniken für die applizierte Pulverlackschicht

5.6.1 Bisher übliche Einbrennprozesse für Pulverlacke und ihre Grenzen

Nach der Applikation der Pulverlackschicht erfolgt der Einbrennprozess, bei dem die Pulverlackschicht aufgeschmolzen und i.d.R. gleichzeitig chemisch vernetzt wird. Die Temperaturen liegen dabei i.d.R. bei $> 150^{\circ}\text{C}$. Als Einbrenntechnik kommt fast ausschließlich die Umlufttrocknung zum Einsatz, bei der das (meist metallische) Substrat komplett durchwärmt wird. Dabei wird heiße Luft umgewälzt und auf das kältere Werkstück übertragen. Die Luft kühlt sich dabei ab und muss wieder aufgeheizt werden. Die Beheizung kann direkt oder indirekt über Erdgas, Erdöl oder elektrischen Strom, ferner über Heißwasser, Dampf, Thermoöl oder Reingas aus thermischen Nachverbrennungsanlagen erfolgen (Abb.9). Teilweise wird vor der Umlufttrocknung ein Infrarot-Angelieprozess vorgeschaltet, um die Einbrennzeiten (*i.d.R.* $> 10 \text{ min}$) zu verkürzen und die Verlaufsqualität durch das schnellere Hochheizen des Substrates zu verbessern. Bei dickwandigen metallischen Substraten werden Infrarottechniken z.T. für Heißbeschichtungsprozesse eingesetzt, um Einbrennzeiten zu verringern. Selten wird der Umlufttrocknungsprozess durch den Einsatz langwelliger Infrarotstrahler (z.B. katalytische Gasstrahler) komplett ersetzt.

Bei den wenigen weltweit realisierten MDF-Pulverbeschichtungslinien werden Niedertemperaturpulver (hochreaktive Polyadditionsprodukte oder UV-härtende Polymerisationssysteme) appliziert, da MDF-Platten i.d.R. bei Temperaturen über 120°C thermisch geschädigt werden. Das Aufschmelzen/Vernetzen der Lackschicht erfolgt durch eine Kombination aus Infrarot-Vorheizen und Umlufterwärmung oder ausschließlich aus Umlufterwärmung. Beim Einsatz von UV-Pulvern erfolgt nach dem Aufschmelzen des Pulvers die UV-Vernetzung mittels einer UV-Strahlerzone. Die Fördergeschwindigkeiten bei diesen Anlagen liegen im Bereich von $1\text{-}5 \text{ m/min}$, die Einbrenn- bzw. Aufschmelzzeiten liegen im *Minutenbereich*.

In Abb. 9 ist schematisch der Energiefluss und die Wärmebilanz bei der Umlufttrocknung dargestellt [27].

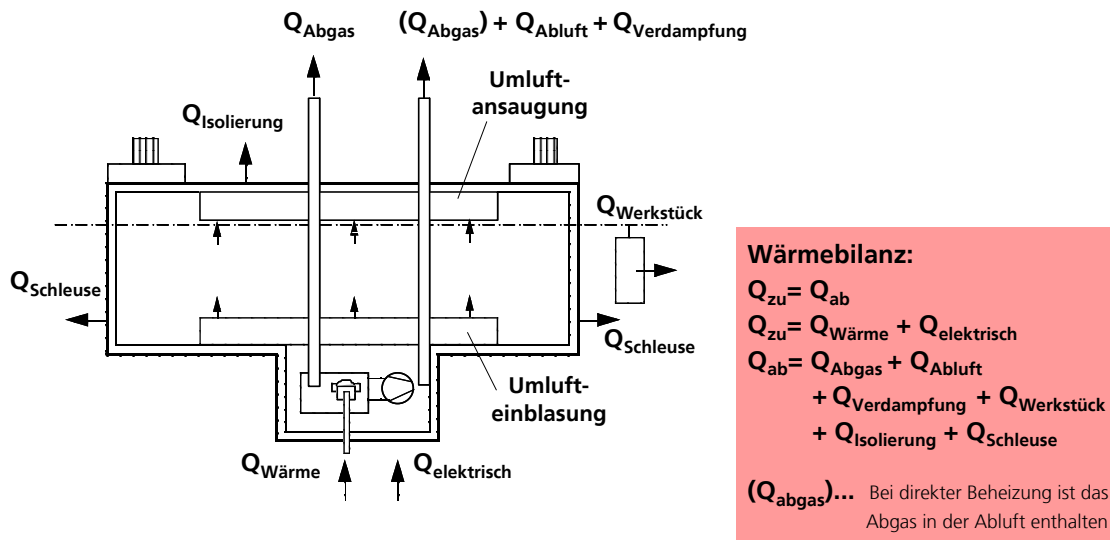


Abb.9: Energiefluss im Umlufttrockner

Bei den hohen, bei der TransApp[®]-Technik geforderten Prozessgeschwindigkeiten im Bereich von 1 m/s würde die Umlufttrocknung der MDF-Platten bei einer Einbrenndauer von 10 min eine Förderstrecke im Trockner von 600 m (!) benötigen. In Hinsicht auf eine kompakte Einbrenntechnik kommen daher insbesondere Infrarottechniken mit hohen Leistungsdichten und damit geringen Einbrennzeiten in Frage. Die Strahlertemperaturen liegen dabei deutlich überhalb der Temperatur, mit der das Substrat und die Pulverlackschicht belastet werden dürfen, so dass das Einbrennfenster entsprechend abgestimmt sein muss. Vorversuche am IFF zeigen, dass die Leistungsdichten der Strahler auf Einbrennzeiten von $< 30 \text{ s}$ angepasst werden müssen, da sonst das Substrat bereits thermisch geschädigt wird. Bei Einbrennzeiten von $< 30 \text{ s}$ werden auch dünne Platten (8 mm Dicke) im Innern nicht erheblich aufgeheizt. Dies zeigen Temperaturentnahmen an MDF-Platten, bei denen ein Temperaturfühler seitlich durch eine Bohrung in die MDF-Platte eingearbeitet und die Öffnung mit MDF-Spänen wieder verschlossen wird.

5.6.2 Infrarotstrahler mit hohen Leistungsdichten für schnelle Einbrennprozesse

Bei der Infraroterwärmung wird die Wärme über elektromagnetische Strahlungsenergie übertragen. Trifft IR-Strahlung auf Materie, so findet eine Wechselwirkung über die Mechanismen der Reflexion, Absorption und Streuung statt (Abb.10). Von der Energie Q_{ges} wird ein Teil $Q_{\text{Absorption,Strahlerkomponenten}}$ an den Strahlerkomponenten absorbiert (z.B. Quarzglas, Gehäuse), ein anderer Teil $Q_{\text{Absorption,Lufterwärmung}}$ an der Luft. Beim Verlust $Q_{\text{Streustrahlung}}$ ändert die Strahlung nur ihre Ausbreitungsrichtung, bleibt aber Strahlung. Ein Teil der Strahlung $Q_{\text{Reflexion Lack}}$ wird an der Oberfläche des Lackes reflektiert. Die restliche Strahlung dringt in Lack und Werkstück ein. Beim Durchgang wird ein Teil $Q_{\text{Absorption Lack,Substrat}}$ absorbiert und direkt im Körper in Wärme umgewandelt. Auch Anteile aus $Q_{\text{Reflexion Substrat}}$ werden am Werkstück zur Lackschicht hin reflektiert und dort absorbiert. Der Restanteil der Energie $Q_{\text{Transmission Substrat}}$ wird als geschwächter Strahl durch den Körper durchgelassen.

Aus der am Lack/Substrat in Wärme umgewandelten Strahlung resultiert eine Wärmeleitung ähnlich wie bei der konvektiven Erwärmung. Der Energiefluss ist in Abb. 10 am Beispiel mittelwelliger/kurzwelliger Strahler schematisch dargestellt.

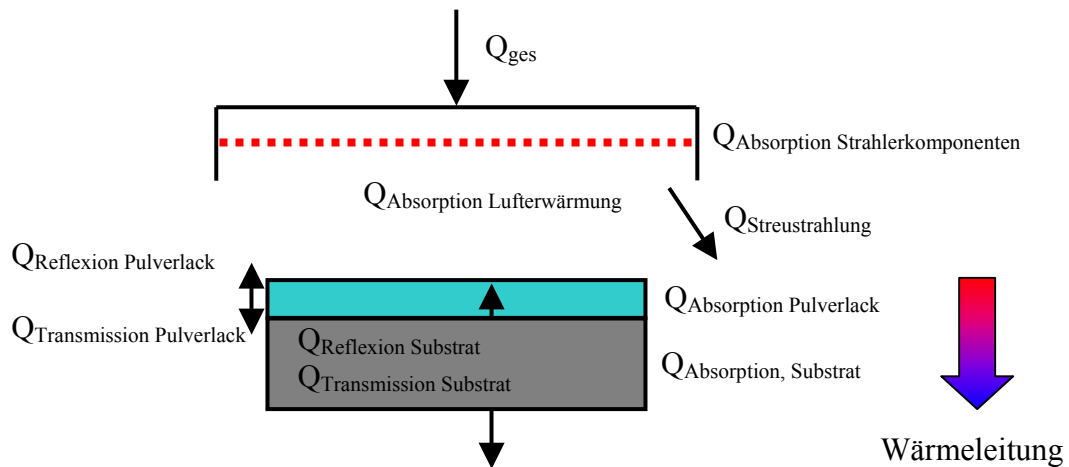


Abb.10: schematische Darstellung des Energieflusses mit der reflektierten, absorbierten und transmittierten Energie bei der Infrarottrocknung, Seitenansicht (*Temperaturabnahme in Pfeilrichtung*).

Reflexions-, Absorptions- und Transmissionsvermögen des Körpers sind wellenlängenabhängig. Die Höhe der Absorption sowie der Transmission hängt zusätzlich von der Dicke des Lackfilms und des Substrates ab. Je dicker das Substrat, desto höher die Absorption und desto geringer die Transmission.

Eine hohe Wärmeübertragung wird dann erreicht, wenn das Absorptionsspektrum des zu erwärmenden Stoffes möglichst gut mit dem Emissionsspektrum des Strahlers übereinstimmt, d.h. die Überlappung zwischen spektraler Energieverteilung (s.u. Abb.11 und Abb.13) und spektralem Absorptionsvermögen sollte möglichst groß sein, wenn die Strahlung größtenteils im Lackfilm absorbiert werden soll.

Beispiel (Abb. 13): Je kurzwelliger das Emissionsmaximum eines Infrarotstrahlers (siehe Gleichung 17) gegenüber dem sichtbaren Bereich, und damit je näher die Infrarotstrahlung dem sichtbaren Licht, desto größer wird der Einfluss des zu bestrahlenden Farbtönen auf die Wärmeübertragung.

Nach den Gesetzen der Farbaddition reflektieren beispielsweise Farbtöne wie Rot, Orange oder Gelb Wellenlängenbereiche in der Nähe zum Infrarotbereich und absorbieren die Wellenlänge der Komplementärfarben in der Nähe zum UV-Bereich (Blautöne). Weiß reflektiert den gesamten Wellenlängenbereich des sichtbaren Lichts sowie zumindest die angrenzenden Bereiche des Infrarots und der UV-Strahlung. Bei diesen Farbtönen ist daher bei der Verwendung von kurzwelligen Infrarotstrahlern eine längere Bestrahlungsdauer zu erwarten als bei dunklen Farbtönen, z.B. bei Blau oder Schwarz.

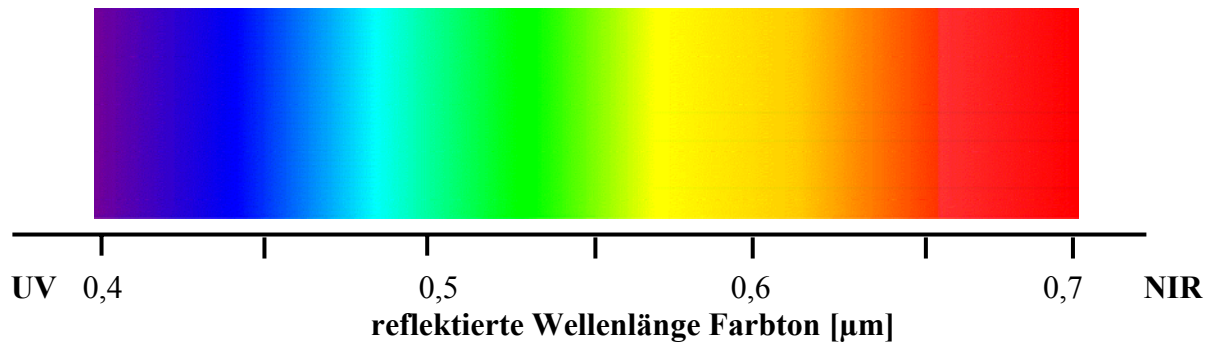


Abb.11: Spektrum des reflektierten Wellenlängenbereichs der Farbtöne

Die Strahlungsleistung (\dot{Q}) ist nach dem Stefan Boltzmann'schen Gesetz proportional zur strahlenden Oberfläche und der 4. Potenz der absoluten Temperatur (Gleichung 17), steigt also mit zunehmender strahlender Oberfläche und insbesondere mit zunehmender Temperatur an.

$$\dot{Q} = \varepsilon \cdot \delta \cdot A \cdot (T_S^4 - T_U^4) \quad (17)$$

\dot{Q} : Strahlungsleistung [J/s (W)]

ε : Emissionsgrad des strahlenden Körpers (bei idealem schwarzen Körper 1, bei Wolframdraht ca. 0,38 und bei Metallfaser oder Keramik ca. 0,8)

δ : Stefan-Boltzmann'sche Strahlungskonstante [$W/(m^2 \cdot K^4)$] ($5,67 \cdot 10^{-8}$)

A_S : strahlende Oberfläche [m^2]

T_S : Temperatur Strahler [K]

T_U : Temperatur Umgebung [K]

Die Strahlungsleistung verteilt sich über einen breiten Spektralbereich, die maximal abgestrahlte Wellenlänge verkürzt sich bei hohen Temperaturen nach dem Wien'schen Verschiebungsgesetz (Gleichung 18, Tabelle 2).

$$\lambda_{\max} = 2,8972 \cdot 10^{-3}/T \quad (18)$$

λ : Wellenlänge [m]

T_S : Temperatur [K]

Dabei verschiebt sich der Spektralbereich immer weiter in den Bereich des sichtbaren Lichts und enthält auch zunehmend UV-Anteile. Der komplette Spektralbereich kann durch das Planck'sche Strahlungsgesetz (Gleichung 19) ermittelt werden.

$$P_S(\lambda, T) = 2\pi hc/\lambda^5 \cdot (\exp(hc/\lambda kT) - 1)^{-1} \quad (19)$$

P_S : Leistung bezogen auf die strahlende Oberfläche [W/m^3]

h : Planck'sches Wirkungsquantum [Js] ($6,63 \cdot 10^{-34}$)

c : Lichtgeschwindigkeit [m/s] (299.792.458)

k : Boltzmannkonstante [J/K] ($1,38 \cdot 10^{-23}$)

Infrarotstrahler werden in der Praxis in drei Strahlungsarten eingeteilt, die langwellige Infrarotstrahlung (für unsere Anwendung, hohe Prozessgeschwindigkeiten, wegen der geringen Strahlungsleistungen nicht relevant), die mittelwellige Infrarotstrahlung und die

kurzwellige Infrarotstrahlung. Sehr kurzwellige Infrarotstrahlung wird auch NIR-Strahlung genannt (Tabelle 2).

Strahlungsart	Temperatur [°C]	Temperatur [K]	Wellenlänge λ_{\max} [μm]
Radiowellen	<300	<573	< 5,1
langwelliges IR	300	573	5,1
mittelwelliges IR	700	973	3,0
kurzwelliges IR	1000	1273	2,3
sehr kurzwelliges (N)IR	2200	2473	1,2
sichtbarer Bereich	3440	3713	0,78
	7350	7623	0,38
UV-Strahlung	>7350	>7623	>0,38

Tabelle 2: Strahlungsarten und typische Strahlungstemperaturen sowie Wellenlängen-Maxima

Auf dem Markt werden unterschiedlichste Typen von elektrischen Infrarotstrahlern sowie Gasinfrarotstrahlern mit unterschiedlichen Strahleranordnungen und Reflektoren sowie unterschiedlichen Aufheiz- und Abkühlzeiten angeboten [28]. Auf langwellige Infrarotstrahlertechniken (z.B. katalytische Gasstrahler) wird an dieser Stelle nicht eingegangen, da diese die für unsere Applikation erforderlichen hohen Leistungsdichten $> 50 \text{ kW/m}^2$ (aufgrund der niedrigen Strahlertemperatur $< 700^\circ\text{C}$) nicht erreichen.

Elektrische Infrarotstrahler:

Kurzwelligste NIR-Strahler (0,8-1,2 μm , nahe an der Grenze zum sichtbaren Licht) werden für eine sehr schnelle Trocknung von Lackschichten durch Verwendung von geregelten Hochleistungshalogenlampen eingesetzt. Diese sogenannten NIR-Strahler werden bei sehr hohen Temperaturen betrieben (bis 3500°C), d.h. die Wellenlänge des Emissionsmaximums liegt direkt oberhalb des sichtbaren Lichts mit einer relativ schmalbandigen Energieverteilung. NIR-Strahler führen mit ihrer hohen Leistungs-dichte (Versuchsanlage IFF bis 220 kW/m^2) zu einer raschen Erwärmung der zu trocknenden Schicht. Laut Herstellerangaben und Literatur über diese Technik [29] lassen sich z.B. bei speziell entwickelten Pulverlackformulierungen durch sehr schnelle Vernetzungsreaktionen Aufschmelz- und Einbrennzeiten von wenigen Sekunden (3-6 s) erzielen.

Kurzwellige IR-Strahler (1,2 – 2,3 μm) werden im allgemeinen als Quarzglasrohrstrahler, häufig mit Halogengasfüllung, gebaut. Die Oberflächentemperatur der Heizleiter (gewendelter Wolframdraht) kann bis 3000°C und höher betragen. Kurzwellige IR-Strahler haben sehr kurze Aufheiz- und Abkühlzeiten (ca. 1 s), daraus resultiert ein gutes Regelverhalten und eine verringerte Gefahr von thermischer Schädigung des Lackes/Substrates beim Abschalten bei Bandstillständen.

Mittelwellige IR-Strahler (2,3-3 μm) sind ähnlich wie die kurzwelligen IR-Strahler aufgebaut. Auch hier befindet sich das eigentliche Strahlerelement in einem Quarzglasrohr, das zur Stabilisierung und als Schutz dient. Quarzglas ist für mittel- und kurzwellige Strahler als Hüllrohr deshalb besonders geeignet, da es für diese Wellenlängen fast völlig durchlässig ist. Eine merkliche Absorption findet erst bei größeren Wellenlängen statt. Die Oberflächentemperaturen der aus einer Eisen-Chrom-Aluminium- oder Chrom-Nickel-Legierung bestehenden Heizwendeln liegen zwischen 800 und 900°C . Die Aufheiz- und Abkühlzeiten sind länger als bei kurzwelligen Halogen-Strahlern (30-90 s).

Schnelle mittelwellige Strahler sind als Zwillingsrohrstrahler mit einem Spektrum zwischen kurz- und mittelwelligen Strahlern erhältlich. Sie erreichen eine deutlich höhere

Flächenheizleistung als herkömmliche mittelwellige Strahler. Die *Carbon-IR-Strahler* besitzen ein Carbonband als Heizleiter. Diese Strahler erreichen sehr kurze Aufheizzeiten (1,5 s).

Gasinfrarotstrahler:

Mittelwellige IR-Strahler (Hellstrahler) arbeiten bei einer Strahlertemperatur von ca. 950 °C. Als strahlende Oberfläche werden z.B. Keramik- und Metallfasern eingesetzt. Die Standzeiten sind im Vergleich zu Elektrostrahlern extrem hoch.

Kurzwellige Porenstrahler arbeiten bei Temperaturen von ca. 1400 °C. Die Verbrennung des Gases erfolgt dabei nicht mehr in einer reinen Gasströmung an der Strahleroberfläche, sondern im Kern eines inerten Porenkörpers. Durch die Flammenstabilisierung innerhalb der porösen Matrix ist es möglich, die Leistung zu erhöhen, ohne dass die Flammen abheben.

Leistungsdichten der Strahlertypen:

Bei den Gasinfrarotstrahlern gestaltet sich die Bestimmung der Leistungsdichten relativ einfach und kann über den Gasverbrauch und den Brennwert H_S bezogen auf 1 m^2 Fläche ermittelt werden. Trotz der, verglichen mit den elektrischen Infrarotstrahlertechniken i.d.R. niedrigeren erzielbaren Temperaturen, die einen wesentlichen Einfluss auf die Leistung ausüben, können Gasstrahler mit sehr hohen Leistungsdichten bis 1000 kW/m^2 betrieben werden, da die Strahleroberfläche (Beispiel Porengasbrenner) sehr groß ist. Bei den Hellstrahlern können mit Keramikstrahlern Leistungsdichten bis über 150 kW/m^2 und mit Metallfasern bis über 300 kW/m^2 erzielt werden.

Das Fallbeispiel unten zeigt schematisch einen Gasinfrarot-Hellstrahler (Abb. 12, links) bei dem die profilierte Oberfläche der Keramik ca. $1,5 \text{ m}^2/\text{m}^2$ Strahlerzonenfläche beträgt. Bei einer Temperatur von 950°C resultiert daraus eine Leistungsdichte von ca. 150 kW/m^2 Strahlerzonenfläche, die sehr homogen über die gesamte Fläche verteilt ist.

Bei den elektrischen Infrarotstrahlern ist die strahlende Oberfläche (z.B. gewendelter Wolframdraht) bezogen auf 1 m^2 Fläche i.d.R. eher gering, da die Strahlerröhren nicht beliebig dicht gepackt werden können. Dagegen kann durch sehr hohe Temperaturen die Leistungsdichte erhöht werden.

Die gleiche Leistungsdichte wie beim Gasinfrarot-Hellstrahler (ca. 150 kW/m^2) kann im Fallbeispiel mittels kurzwelliger elektrischer Infrarotstrahler bei einer höheren Strahlertemperatur von 2200°C (Abb. 12, Mitte, 20 Zwillingstrahler/ m^2 Strahlerzonenfläche A_Z) oder mittels NIR-Strahler bei einer Strahlertemperatur von 2880°C (Abb. 12, links) erzielt werden. Als strahlende Fläche/ m^2 legt man in der Praxis vereinfacht die Zylinderoberfläche mit dem Durchmesser der gesamten Wendel zugrunde (nicht des Drahtes, s.u.). Sie ist bei den Fallbeispielen beim Durchmesser der Wolframwendel von $1,5 \text{ mm}$ erheblich geringer als beim Gasinfrarot-Hellstrahler. Die Strahlerzonenfläche von 1 m^2 ist im Fallbeispiel kurzwelliges Infrarot mit 20 Zwillingstrahlern ausgelegt, im Falle der NIR-Technik mit $3 \cdot 5 = 15$ Strahlern (Gleichung 17). Die strahlende Fläche beträgt beim kurzwelligen Infrarotstrahler nur ca. 0,19 und beim NIR-Strahler nur ca. $0,07 \text{ m}^2/\text{m}^2$ Strahlerzonenfläche A_Z .

Bei den Gasinfrarotstrahlern verteilt sich die Leistungsdichte verfahrensbedingt sehr homogen über die Strahlerfläche, auch bei sehr geringen Abständen zum Strahler. Bei den elektrischen Infrarotstrahlern werden zur Homogenisierung der Leistungsdichten über die gesamte Strahlerzonenfläche parabolische oder elliptische Reflektoren (aus Gold oder Aluminium) eingesetzt (nicht in Abbildung 12 dargestellt). Bei sehr geringen Abständen verteilt sich die

Leistungsdichte, bedingt durch den Aufbau, nicht so homogen wie bei den Gasinfrarot-Strahlern.

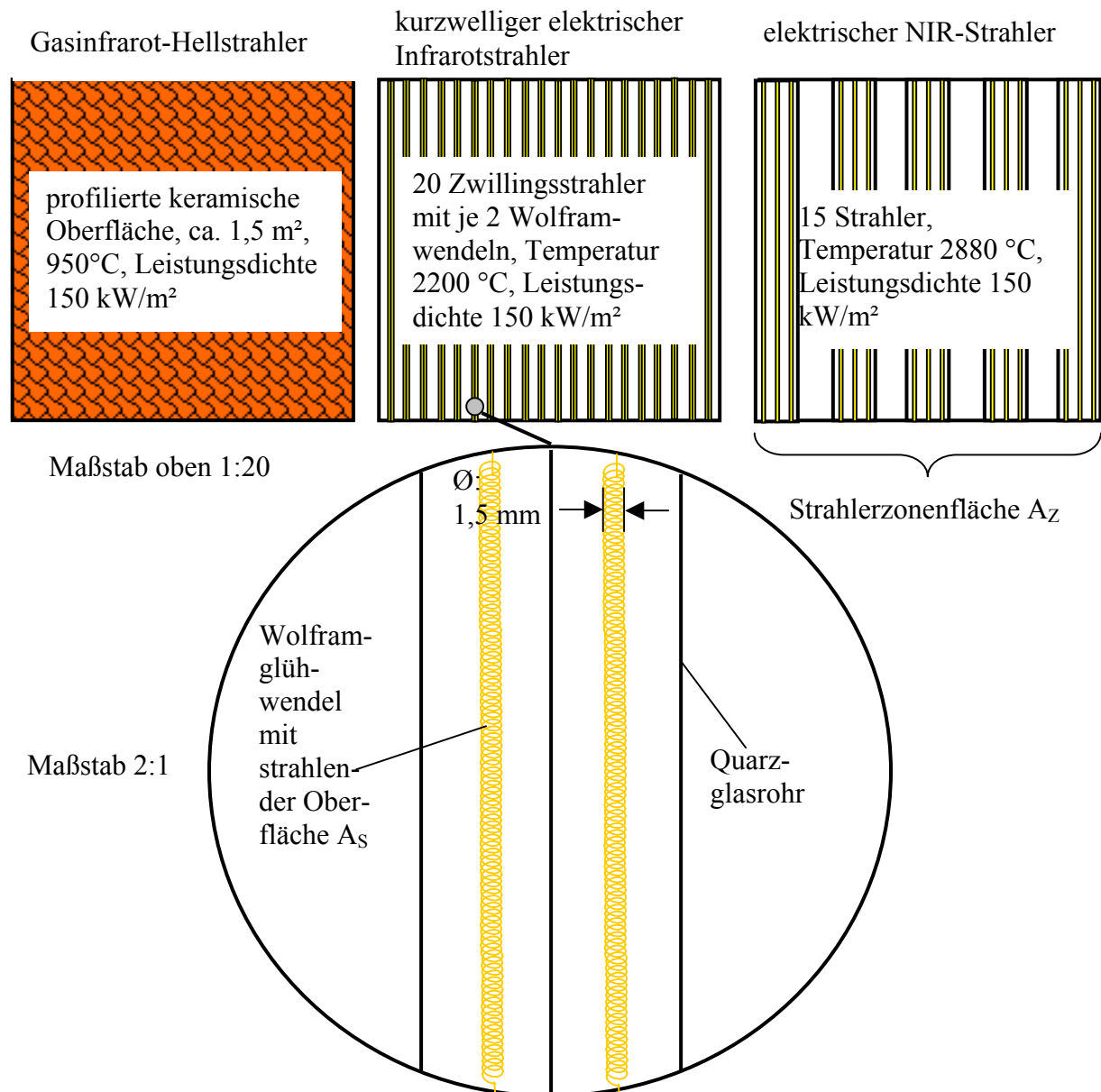


Abb.12: schematische Darstellung des Aufbaus von Gasinfrarotstrahlern (Beispiel Keramik-Hellstrahler links) und elektrischen Infrarotstrahlern (Beispiel kurzweiliger Infrarotstrahler Mitte, NIR-Strahler rechts)

Anlehnend an das Planck'sche Strahlungsgesetz (Gleichung 19) kann die Strahlungsleistung zur Veranschaulichung des Fallbeispiels (Abb.12) gegen die Strahlerzonenfläche A_Z (statt wie üblich gegen die strahlende Oberfläche A_S) dargestellt werden. Zusätzlich wird der Emissionsgrad mitberücksichtigt. Die Gleichung lautet damit

$$P_Z(\lambda, T) = 2\pi hc/\lambda^5 \cdot (\exp(hc/\lambda kT) - 1)^{-1} \cdot A_S/A_Z \cdot \varepsilon \quad (20)$$

P_Z : Leistung bezogen auf die Strahlerzonenfläche A_Z [W/m³]

A_Z : Strahlerzonenfläche [m²]

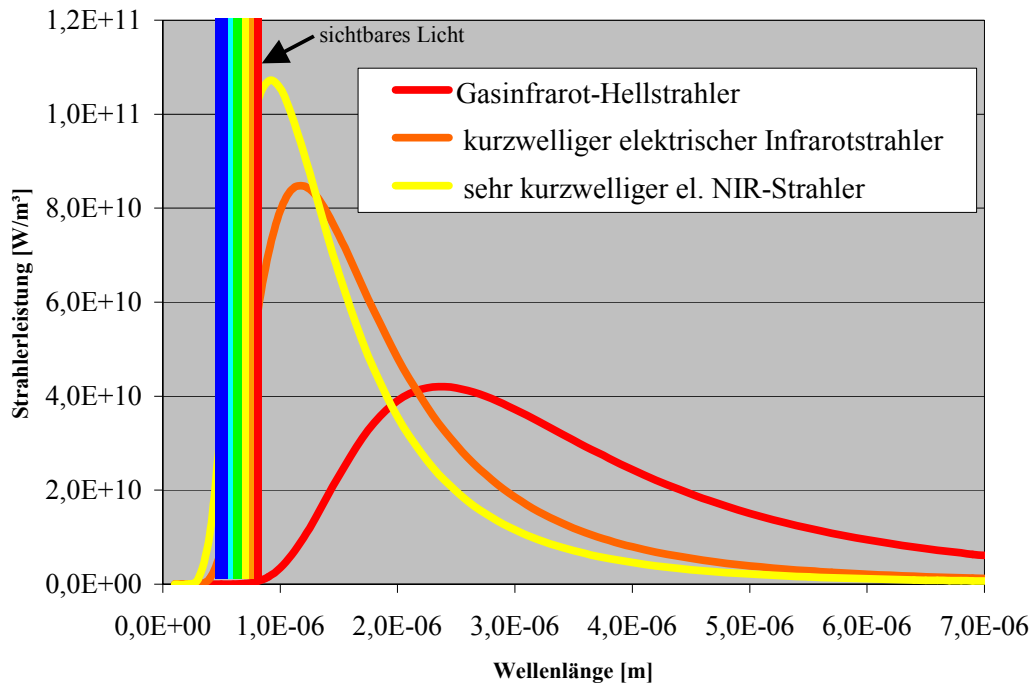


Abb.13: Vergleich des Strahlungsspektrums eines Gasinfrarot-Hellstrahlers mit einem kurzwelligen elektrischen Infrarotstrahler und einem NIR-Strahler (siehe Abb.12)

Die Flächen unter den Kurven in Abb. 13 sind aufgrund der gleichen Leistungsdichten P_Z der Strahlerzonen flächengleich. Die Anteile an sichtbarem Licht sind beim Gasinfrarot-Hellstrahler vernachlässigbar gering ($\ll 1\%$), beim kurzwelligen elektrischen Infrarotstrahler liegen sie bei ca. 5%. Bei NIR-Strahlern beträgt der sichtbare Anteil bereits ca. 13% und es werden geringfügig UV-Anteile emittiert. Diese werden von der Quarzglashülle nicht absorbiert.

5.6.3 Allgemeines zu den Einbrennversuchen

Zu Beginn des Projektes ist nur eine Einbrenntechnik bekannt, mit der aus der Literatur eine Einbrenndauer von wenigen Sekunden erzielt werden kann, die NIR-Strahlertechnik. Erste Versuche werden daher mit einer NIR-Versuchsanlage der Fa. Lambda-Technology mit zwei Strahlern à 12 kW Leistung und einer gesamten Strahlerzonlänge von 0,25 m durchgeführt. Ebenfalls zur Verfügung stehen verschiedene elektrische Strahlertypen der Fa. Heraeus (kurzwellige Strahler, mittelwellige Carbonstrahler, nicht abgebildet). Zusätzlich zu den elektrischen Infrarotstrahlern kommt ein mittelwelliger Gasinfrarotstrahler (keramischer Hellstrahler) der Fa. GoGas zum Einsatz. Die begrenzten Strahlerzonlängen der Versuchsanlagen erfordern eine Absenkung der Werkstückgeschwindigkeit auf den Bereich von 1-3 m/min. Zukünftige Anlagenkonzepte können auf die erforderlichen Einbrennzeiten angepasst werden (Abb. 14).

Als Pulverlackmaterialien für die Einbrenntests kommen thermisch vernetzende Polyadditionsprodukte wie Polyesterpulver, Epoxipolyester-Mischpulver und hochreaktive Niedertemperaturpulver zum Einsatz. Ebenfalls zum Einsatz kommen spezielle Niedertemperaturthermoplaste, u.a. tonerähnlich fein gemahlene Pulver, die nur auf dem Substrat aufgeschmolzen werden und nicht chemisch vernetzen.

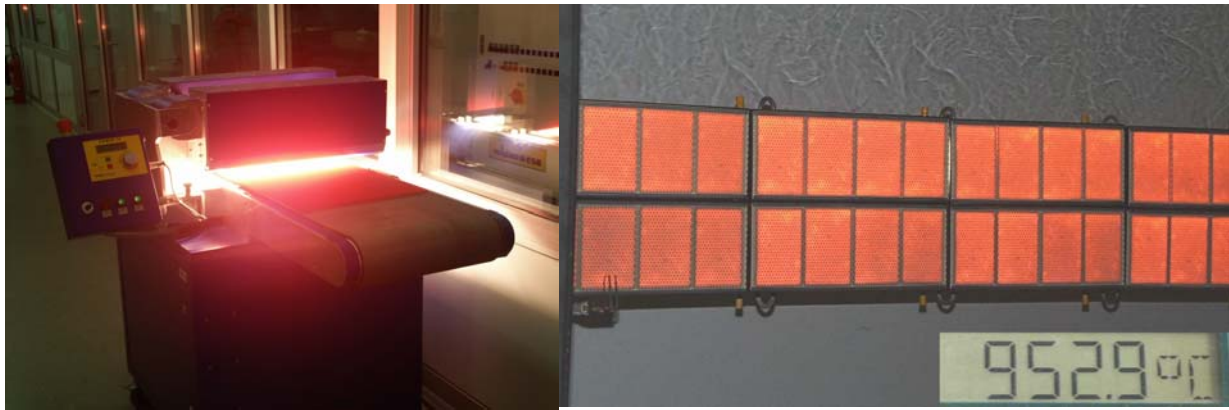


Abb. 14: NIR-Versuchsanlage der Fa. Lambda (links) sowie Gasinfrarot-Hellstrahler (Quelle: Fa. GoGas)

Auch eingesetzt werden Polymerisationspulver, die wie ein Thermoplast aufgeschmolzen werden und anschließend in wenigen Sekunden z.B. mittels UV-Strahlen oder Elektronenstrahlen vernetzt werden. Hinsichtlich der Einbrennzeiten und des Ausgasungsverhaltens kritisch ist dabei insbesondere der Aufschmelz-, nicht der Vernetzungsprozess. Daher beschränken sich unsere Versuche weitgehend auf das Aufschmelzen der Pulverlackschicht, UV- und Elektronenstrahlhärtung wird an wenigen Versuchsteilen exemplarisch extern (Fa. Tiger-Lacke, FEP Dresden) durchgeführt.

Aufgrund der zu erwartenden hohen Farbtonabhängigkeit des Aufschmelz- und Vernetzungsprozesses bei kurzwelligigen Infrarot-Einbrenntechniken werden jeweils der Farbton Weiß und Schwarz sowie zusätzlich weitere Farbtöne aus dem Farbenspektrum (Abb. 11) appliziert.

Variiert wird bei den Versuchen die Bestrahlungsdauer über die Durchlaufzeit, die Strahlerleistung sowie der Abstand Strahler/Werkstück. Zusätzlich wird die Dicke der eingesetzten Substrate variiert.

Die optische Verlaufsqualität wird visuell hinsichtlich Ausgasungsneigung des porösen MDF/HDF-Untergrundes sowie hinsichtlich Vergilbungs-/Überbrennungsneigung beurteilt. Mittels des Acetontests wird auf den MDF-Platten der Vernetzungsgrad des Pulvers überprüft, der Rückschlüsse auf die Oberflächenhärte zulässt. Die weiteren funktionellen Eigenschaften der Lackschicht wie

- Oberflächenhärte (Pendelhärte nach König DIN 53157),
- Untergrundhaftung (Gitterschnittprüfung DIN EN ISO 2409),
- Schlagbelastbarkeit EN ISO 6272,

werden an metallischen Substraten (Stahlbleche 0,75 mm bis 6 mm Dicke; Aluminiumsubstrat, 6 mm Dicke) sowie an Glasplatten (5-10 mm Dicke, geringe Wärmeleitfähigkeit von Glas in ähnlicher Größenordnung wie MDF) durchgeführt, da diese Tests auf Holzwerkstoffuntergründen nicht durchführbar sind.

5.6.4 Prozessfenster des Schmelz-/Vernetzungsprozesses

Allgemeine Zusammenhänge zum Substrateinfluss

Während in den gängigen Theorien zur Infrarottrocknung der Einfluss der Wärmeleitfähigkeit λ und der Wärmekapazität c des Substrates auf die Bestrahlungsdauer kaum Beachtung findet, zeigen Vorversuche am IFF einen erheblichen Einflussgrad dieser Kenngrößen.

Die spezifische Wärmekapazität c gibt die Wärmeenergie in kJ an, die benötigt wird um 1 kg eines Stoffes um 1K zu erwärmen [kJ/(kg · K)]. Je geringer der Wert, desto kürzer wird die erforderliche Aufheizzeit bei angenommen gleicher eingesetzter Wärmeleistung und gleicher aufzuwärmender Masse.

Die spezifische Wärmeleitfähigkeit λ gibt an, welche Wärmeenergie in einer Stunde durch einen Meter Stoffschicht hindurchgeht wenn zwischen den Stirnflächen ein Temperaturunterschied von 1K besteht [kJ/(m · h · K)]. Je geringer der Wert der spezifischen Wärmeleitfähigkeit, desto größer der Temperaturunterschied zwischen den Stirnflächen bei gleicher eingebrachter Wärmeenergie. Stoffe mit niedrigem λ -Wert wie MDF oder HDF sowie die meisten Kunststoffe und ferner Glas haben eine gute wärmeisolierende Wirkung, Stoffe mit hohem λ -Wert wie z.B. Metalle haben nur geringe wärmeisolierende Wirkung.

Material	spez. Wärmeleitfähigkeit λ [kJ/(m · h · K)]	spez. Wärmekapazität c [kJ/(kg · K)]	Dichte ρ [kg/m ³]
MDF	0,5	1,6	700-850
HDF	0,6	1,9	850-1000
Kunststoff	0,7-2	0,1-1	900-2200
Glas	ca. 3	0,8	2000-8000
Stahl	150-200	0,465	7800
Aluminium	850	0,9	2700

Tabelle 3: Wesentliche stoffspezifische Kenndaten repräsentativer Materialien

Bei allen eingesetzten kurzwelligigen und mittelwelligigen Strahlertypen können folgende allgemeine Gesetzmäßigkeiten festgestellt werden (Abb.15):

- Bei gering wärmeleitfähigen (also gut wärmeisolierenden) Substraten wie MDF- oder HDF-Platten ist das Temperaturgefälle bei der Bestrahlung zum Innern der Platte sehr groß; der (gering wärmeleitfähige) Pulverlack schmilzt schnell auf und erreicht die geforderten Temperaturen (z.B. 180-200 °C), auch die Grenzschicht zwischen Pulverlack und Substrat erreicht noch rasch hohe Temperaturen und die Bestrahlungsdauer ist daher kurz; das Substrat wird dabei im Kern bei den kurzen erforderlichen Bestrahlungszeiten kaum aufgeheizt.
- Bei Substraten hoher Wärmeleitfähigkeit wie z.B. metallischen Substraten wird die Pulverlackschicht ebenfalls rasch aufgeschmolzen, die Wärme wird allerdings schnell ins Substrat geleitet, so dass beim Beginn des Bestrahlungsprozesses das Substrat sowie die Grenzschicht zwischen Substrat und Werkstück zunächst eine hohe Temperaturdifferenz zur Oberfläche der Pulverlackschicht aufweist; je höher die spezifische und die absolute Wärmekapazität des Werkstücks (abhängig von der Substratdicke), desto länger dauert es, bis die Temperatur des Substrates sich der Temperatur der Lackschicht angleicht und desto länger ist die erforderliche Bestrahlungsdauer (s.u.).

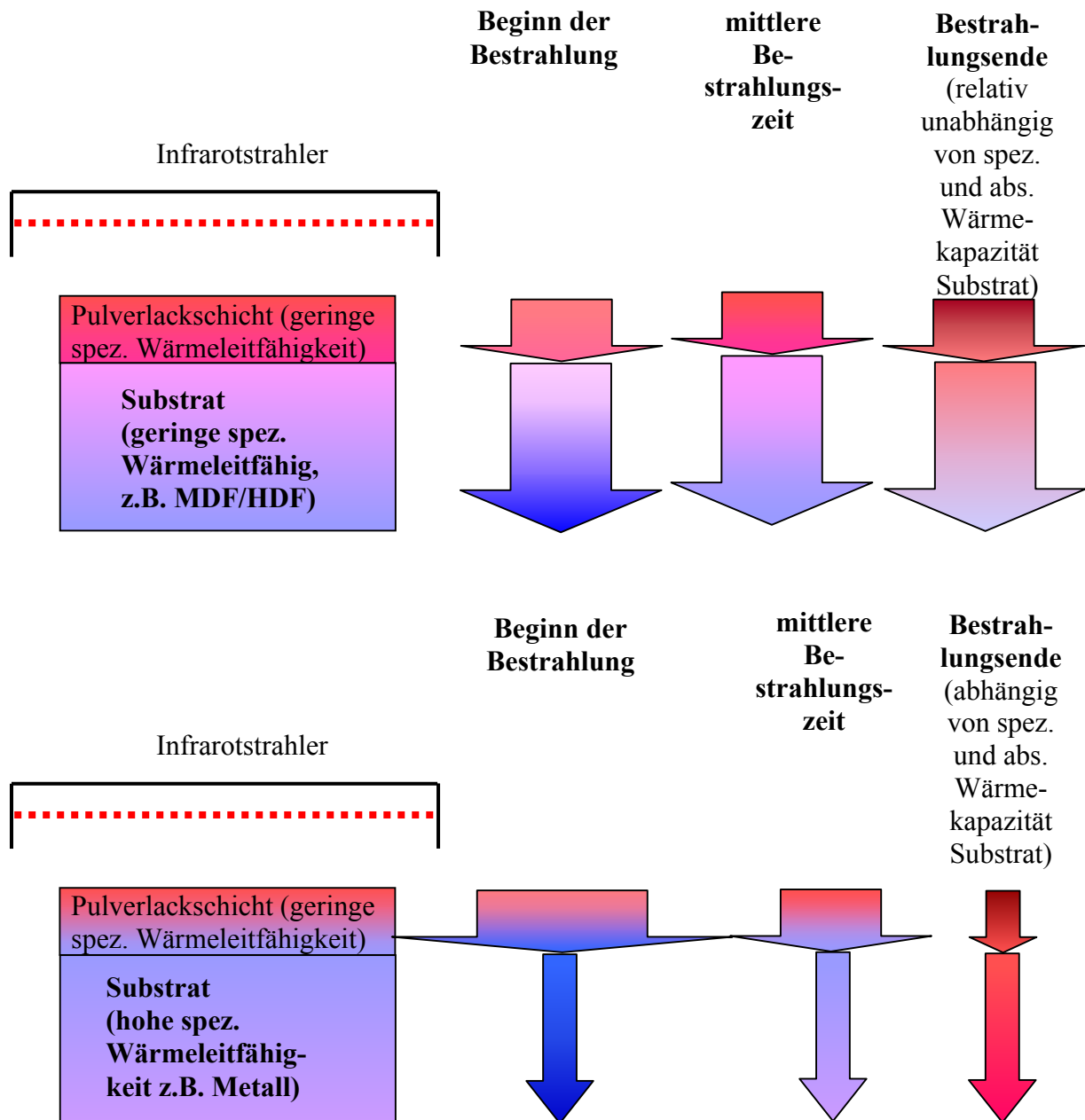


Abb.15: Temperaturverläufe bei der IR-Bestrahlung von gering wärmeleitfähigen Substraten wie MDF oder HDF (oben) und Substraten hoher Wärmeleitfähigkeit wie Metallen (unten); in Pfeilrichtung abnehmende Temperatur (dicke Pfeile/rasche Temperaturabnahme, dünne Pfeile/geringe Temperaturabnahme; Dunkelrot/hohe absolute Temperatur; Dunkelblau/geringe absolute Temperatur)

Allgemeine Zusammenhänge beim Aufschmelzen und Härten der Pulverlacke mittels Infrarotstrahlung

Aufgrund der Aufwärmung des Substrates von außen nach innen wird beim Beginn des Einbrennprozesses zunächst der Pulverlack an der Oberfläche der Pulverschicht rasch aufgeschmolzen und die Viskosität nimmt dort stark ab. Im Grenzbereich zwischen Pulverlackschicht und Substrat liegen die Pulverlackpartikel noch im ungeschmolzenen Zustand vor (Abb. 16 oben). Mit der Zeit schmilzt der Pulverlack auch an der Grenzschicht auf. Zusätzlich beginnt bei den thermisch härtenden Pulvern der Vernetzungsprozess zunächst an der Oberfläche des Pulverlackes und setzt sich dann in den tiefer liegenden Bereichen der

Pulverlackschicht fort, wodurch die Viskosität des aufgeschmolzenen Pulverlackes in diesen Bereichen wieder zunimmt. An der Lackfilmoberfläche ist der Pulverlack schnell annähernd vollständig vernetzt (Abb. 16 Mitte). Dies lässt sich mittels der Pendelhärteprüfung nach König gut nachweisen, die ein Maß für die Oberflächenhärte darstellt.

Am längsten dauert die Vernetzung des Pulverlackes an der Grenzfläche zwischen aufgeschmolzenem Pulverlack und Substrat, insbesondere dann, wenn das Substrat eine hohe spez. Wärmeleitfähigkeit sowie eine hohe spezifische und absolute Wärmekapazität besitzt (Abb. 16 unten) wie das z.B. bei einer dicken Metallplatte der Fall ist. Dann wird die Wärme an der Grenzschicht rasch ins Substrat abgeleitet, so dass die zur Vernetzung der Pulverschicht erforderliche Aktivierungsenergie im Grenzbereich zwischen Pulverlackschicht und Substrat erst nach annähernd vollständiger Durchwärmung des Substrates vorhanden ist. Die annähernd vollständige Vernetzung der Pulverlackschicht in diesem Grenzbereich ist aber für eine gute Untergrundhaftung i.d.R. erforderlich und wird über die Durchführung von Gitterschnitten überprüft (Abb. 17). In den durchgeführten Versuchen korrelieren Schlagbelastungstests gut mit der Gitterschnittprüfung und sind deswegen im Diagramm nicht separat dargestellt.

Beim Einsatz von Thermoplasten, die nur auf dem Substrat aufgeschmolzen werden (wie Abb. 16 oben), muss der Pulverlackfilm die Oberfläche des Substrates gut benetzen, der Temperaturunterschied innerhalb der Pulverlackschicht und des Substrates wirkt sich dabei nicht so kritisch auf die Untergrundhaftung aus.

Bei den Substraten mit geringer spez. Wärmeleitfähigkeit wie MDF/HDF/Glas spielt die spezifische Wärmekapazität des Substrates sowie die Substratdicke (und damit die absolute Wärmekapazität des Substrates) eine untergeordnete Rolle bei der Bestrahlungsdauer (Abb. 17).

Bei dunklen Farbtönen, bei denen Strahlungsreflexionen auf ein Minimum reduziert sind, zeigen die Versuche, dass die zum Schmelzen und Vernetzen der Pulverlackschicht erforderliche Bestrahlungsdauer bei gleichen Substraten annäherungsweise umgekehrt proportional zur Leistungsdichte P_z der Strahler (Variation zwischen 75 und 200 kW/m²) ist. Aus einer verdoppelten Leistungsdichte resultiert eine Halbierung der erforderlichen Bestrahlungsdauer, die eingesetzte Wärmeenergie Q_{gesamt} bleibt also trotz unterschiedlicher Strahlungsspektren innerhalb der Versuche am IFF weitgehend konstant (Abb. 18).

Bei gut wärmeleitfähigen Substraten wie Metallen wirkt sich die spezifische Wärmekapazität sowie die Substratdicke im Gegensatz zu den Substraten mit geringer Wärmeleitfähigkeit signifikant auf die zum Schmelzen und Vernetzen der Lackschicht erforderliche Wärmeenergie Q_{gesamt} aus. Ähnlich wie bei der Umlufttrocknung muss das Substrat annähernd vollständig durchwärmt werden, um eine möglichst vollständige Vernetzung der Lackschicht zu gewährleisten. Der im Diagramm 19 dargestellte (in der Praxis ungebräuchliche) Wert der flächenbezogenen Wärmekapazität c_F [kJ/(m² · K)] errechnet sich wie folgt (Gleichung 21):

$$c_F = c \cdot \rho_S \cdot s_d \quad (21)$$

c_F : flächenbezogene Wärmekapazität [kJ/(m² · K)]

c : spezifische Wärmekapazität [kJ/(kg · K)]

ρ_S : Dichte des Substrates [kg/m³]

s_d : Dicke des Substrates [m]

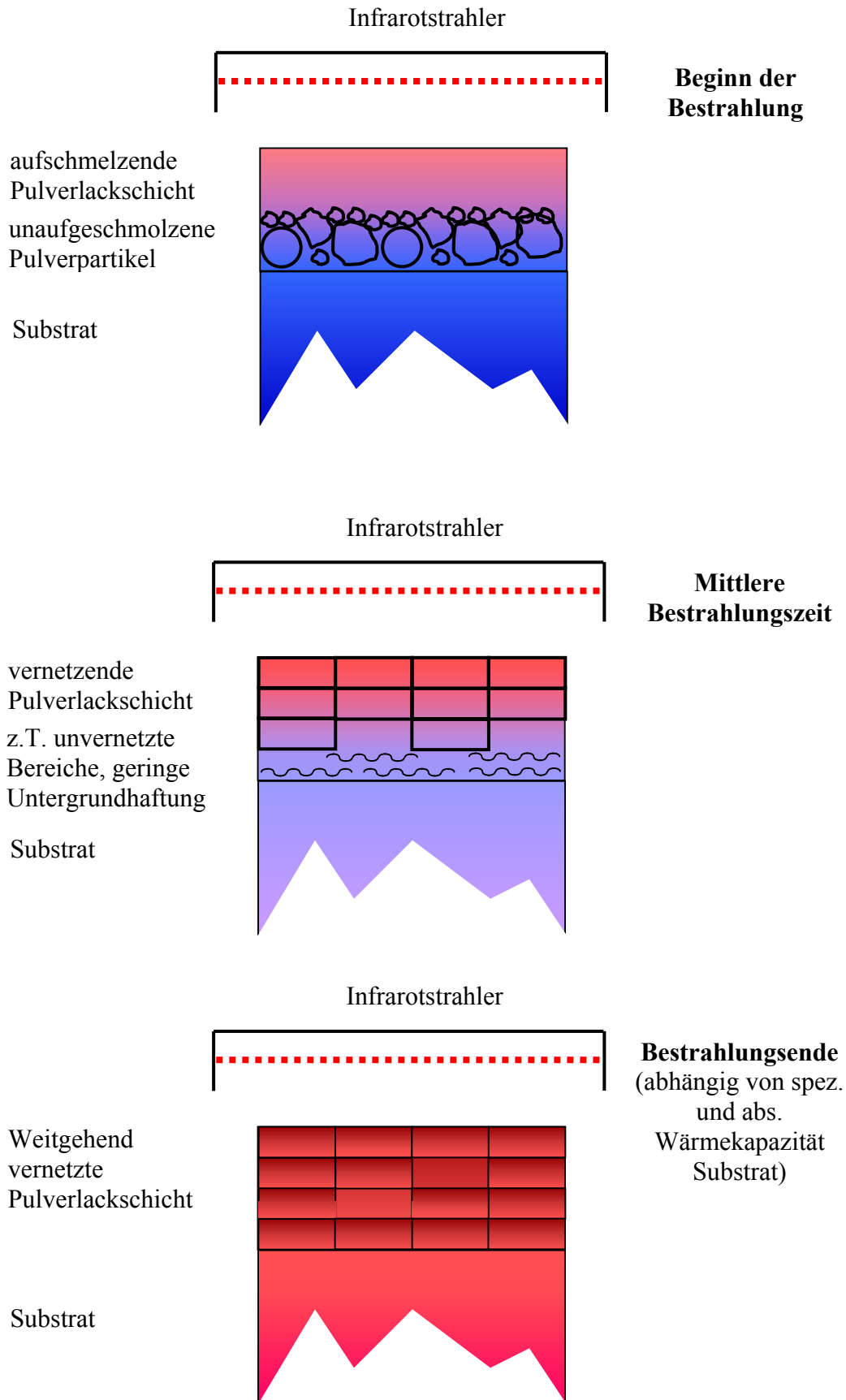


Abb. 16: Schematische Darstellung des Aufschmelzverhaltens bei den Versuchen am IFF (Beginn der Bestrahlung oben, mittlere Bestrahlungszeit Mitte, Bestrahlungsende unten)

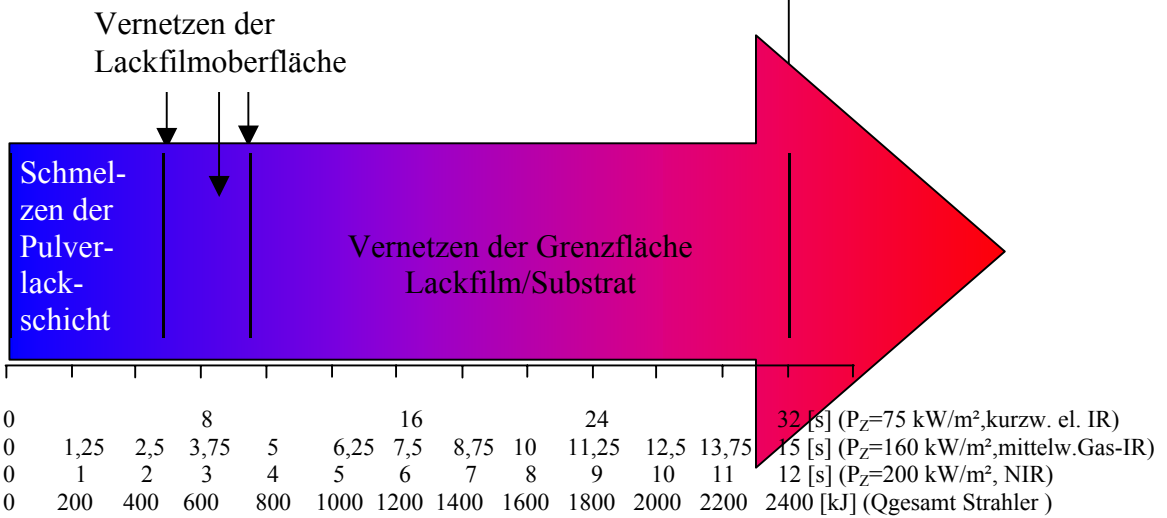
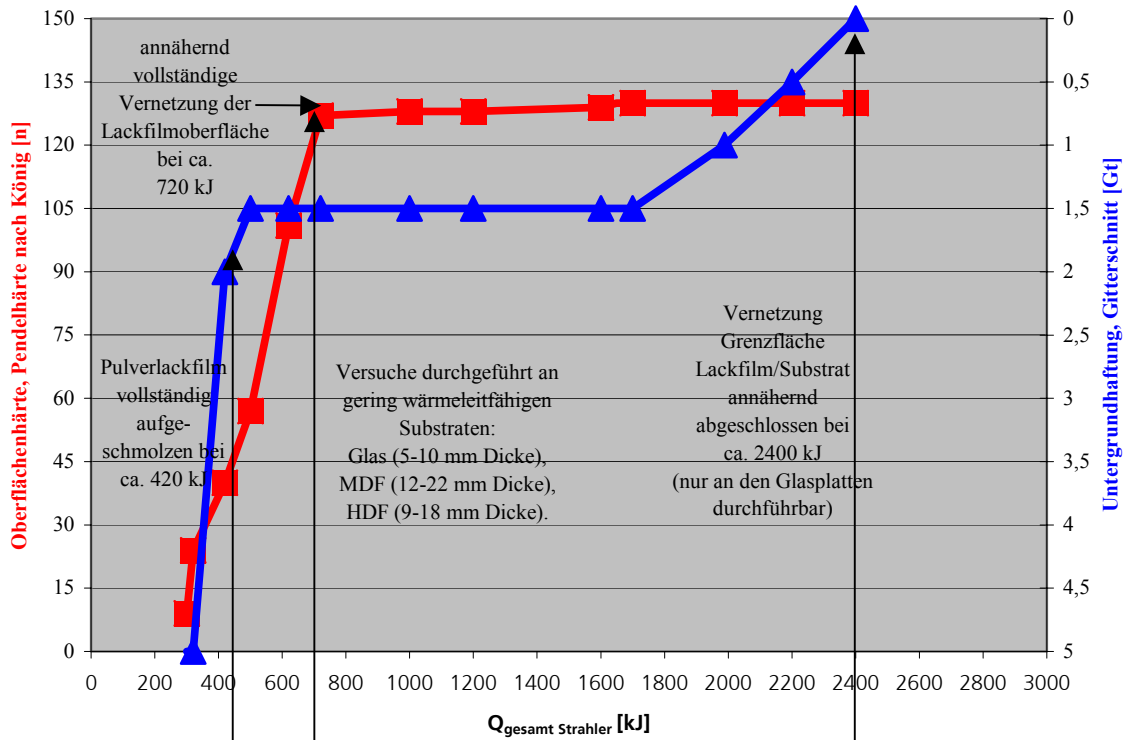


Abb. 17: Vernetzungsverhalten eines thermisch härtenden Polyadditionsproduktes (Epoxipolyester) in Abhängigkeit von der über den Infrarotstrahler eingebrachten Energie am Beispiel wärmeisolierender Substrate, Farbton Schwarz (oben);

Abb. 18: Abhängigkeit des Vernetzungsverhaltens von der Leistungsdichte der Strahler und der resultierenden Bestrahlungsdauer am Beispiel des sehr kurzwelligen elektrischen NIR-Strahlers, des kurzwelligen elektrischen Infrarotstrahlers sowie des mittelwelligen keramischen Gasinfrarot-Hellstrahlers (Pfeil unten)

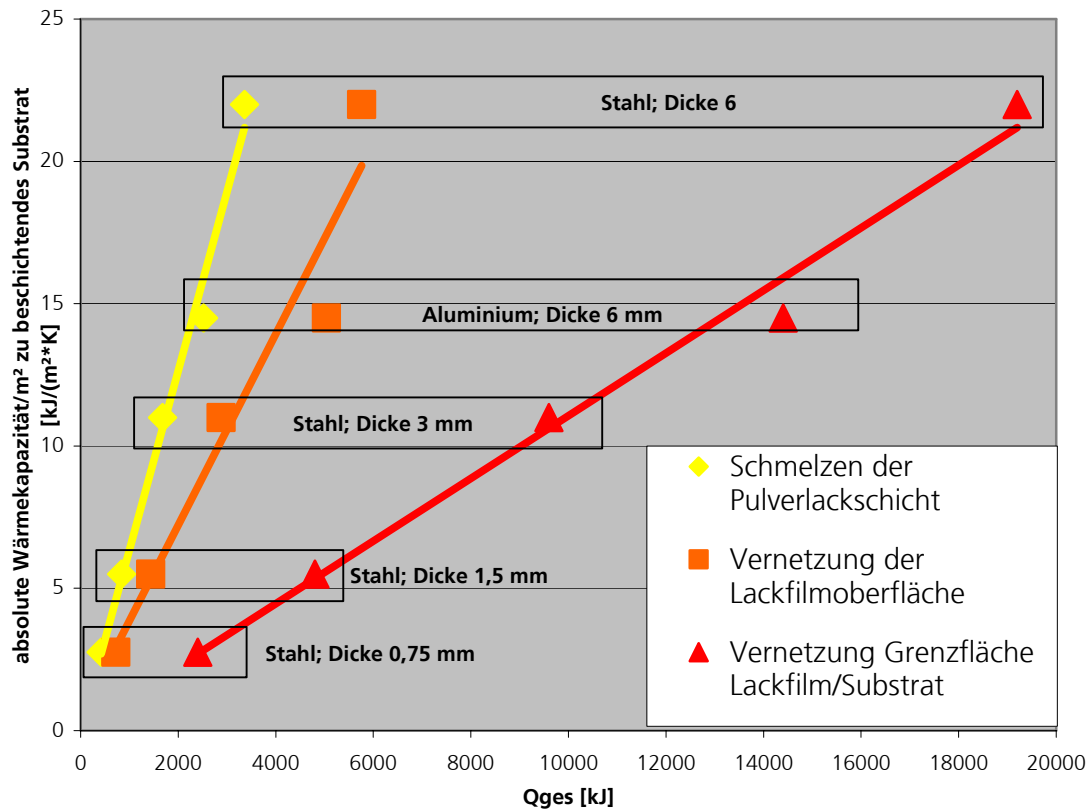


Abb. 19: Vernetzungsverhalten des Pulvers in Abhängigkeit von der eingebrachten Bestrahlungsenergie Q_{ges} bei gut wärmeleitfähigen Substraten (gilt für alle in den Versuchen eingesetzten Strahlertypen)

Farbtonabhängigkeiten bei der Infrarotbestrahlung (Abb. 20)

Die Bestrahlungsdauer hängt je nach emittiertem Spektralbereich stärker oder weniger stark von dem applizierten Pulverlackfarbton ab. Beim eingesetzten Gasinfrarot-Hellstrahler sind keine Abweichungen bei der Bestrahlungsdauer unterschiedlicher Farböne festzustellen.

Bei den kurzwelligeren elektrischen Gasinfrarotstrahlern sind die Abweichungen bei unterschiedlichen Farbönen gering. Farböne, die im reflektierten Wellenlängenspektrum eher in der Nähe des UV-Lichtes liegen wie Blau benötigen geringere Bestrahlungszeiten als Farböne in der Nähe des Infrarotbereiches wie Rot.

Sehr starke Farbtonabhängigkeiten sind beim Einsatz der NIR-Strahler zu beachten. Bestimmte Weißfarbtöne können nicht mehr eingebrannt werden, da selbst bei Einbrennzeiten > 20 s ($P_Z=200$ kW/m²) kein vollständiges Aufschmelzen der Lackschicht erfolgt. Dabei tritt bereits eine sichtbare thermische Schädigung des Pulvers auf (nicht in der Abbildung dargestellt). Einige, insbesondere matte Weißfarbtöne lassen sich bei hoher Bestrahlungsdauer noch vernetzen.

hoher Anteil des Strahlungsspektrums im sichtbaren Bereich

Strahlertyp	P _z [kW/m ²]	Q _{gesamt} [kJ] und Bestrahlungsdauer [s]					
		2400	3000	3600	4000	5000	kJ s
sehr kurzwelliger NIR-Strahler	200	12	15	18	20	25	kJ s
kurzwelliger el. IR-Strahler	75	32	32	34	36	38	kJ s
Mittelwelliger Gas-IR	160	/ 15	15	15	15	15	kJ s

geringer Anteil des Strahlungsspektrums im sichtbaren Bereich

Abb. 20: Erforderliche Energie und Bestrahlungsdauer bis zur vollständigen Vernetzung des Pulvers bei verschiedenen Strahlertypen in Abhängigkeit vom Farbton (Substrat: MDF/HDF/Glas)

Gefahr thermischer Schädigungen der Pulverlackschicht bei der Infrarotbestrahlung

Aufgrund der hohen Strahlertemperaturen, die deutlich über der Temperatur liegen, auf die der Lack erwärmt werden darf, besteht die Gefahr der thermischen Schädigung. Sie hängt von verschiedenen Parametern ab,

- vom Farbton, insbesondere wenn damit eine höhere Bestrahlungsdauer und damit ein höherer Energieeintrag verbunden ist,
- von der maximal abgestrahlten Wellenlänge λ_{\max} (also von der Strahlertemperatur T_S siehe Gleichung 18 und Tabelle 2), die zu längeren Bestrahlungszeiten bei hellen Farbtönen durch Strahlungsreflexion führen kann,
- bei Substraten hoher Wärmeleitfähigkeit von der Substratdicke (höhere Bestrahlungsdauer und Energieeintrag),
- von den Materialeigenschaften des Pulverlackes.

Insbesondere kritisch zeigt sich bei den Versuchen der Einsatz von *NIR-Strahlern* in Verbindung mit der Bestrahlung *heller Farbtöne*. Bei einer Strahlertemperatur im Bereich von 3000 °C und einer maximal abgestrahlten Wellenlänge λ_{\max} in der Nähe des sichtbaren Lichts sind die Bestrahlungszeiten aufgrund von Strahlungsreflexionen an der Oberfläche des Pulvers so hoch, dass sichtbare thermische Schädigungen des Pulvers z.T. schon vor dem vollständigen Schmelzen der Pulverschicht auftreten (Abb. 21).

Bei Substraten hoher spezifischer Wärmeleitfähigkeit wie Metallen sind hohe Substratdicken > 3 mm aufgrund der höheren erforderlichen Bestrahlungsdauer und des höheren Energieeintrags bei allen verwendeten Strahlern hoher Leistungsdichte sehr kritisch. Hierbei kommt es auch bei dunklen Farbtönen zu thermischen Schädigungen. Eine sinnvolle Variante für solche Substrate wäre das Bestrahlen der Rückseite der Bauteile. Da das Substrat fast vollständig durchwärmt werden muss, ist die Einbrenndauer dabei nur unwesentlich höher. Sonst wären für diese Substrate Strahler mit geringeren Leistungsdichten erforderlich, bei

denen die Bestrahlungsdauer allerdings deutlich zunimmt. Bei Substraten wie MDF/HDF oder Glas (geringe spez. Wärmeleitfähigkeit) ist die Substratdicke unkritisch hinsichtlich thermischer Schädigungen des Lackes, da bei hohen Substratdicken die erforderliche Bestrahlungsdauer nicht zunimmt.

Die Versuche zeigen eine erhebliche Abhängigkeit der Pulverlackmaterialeigenschaften hinsichtlich thermischer Schädigung. Gerade hochreaktive Niedertemperaturpulver, Niedertemperaturthermoplaste sowie UV- oder elektronenstrahlhärtende Polymerisationsprodukte, die für die geforderten schnellen Einbrennprozesse in die engere Auswahl fallen, werden z.T. thermisch geschädigt, wenn sie schnell erwärmt bzw. überhitzt werden. Hier besteht noch FuE-Bedarf, insbesondere bei der Materialentwicklung. Prinzipiell sind z.B. die Aufschmelz- und Vernetzungszeiten bei diesen Systemen etwas geringer als bei den oben betrachteten herkömmlichen Pulverlackmaterialien.

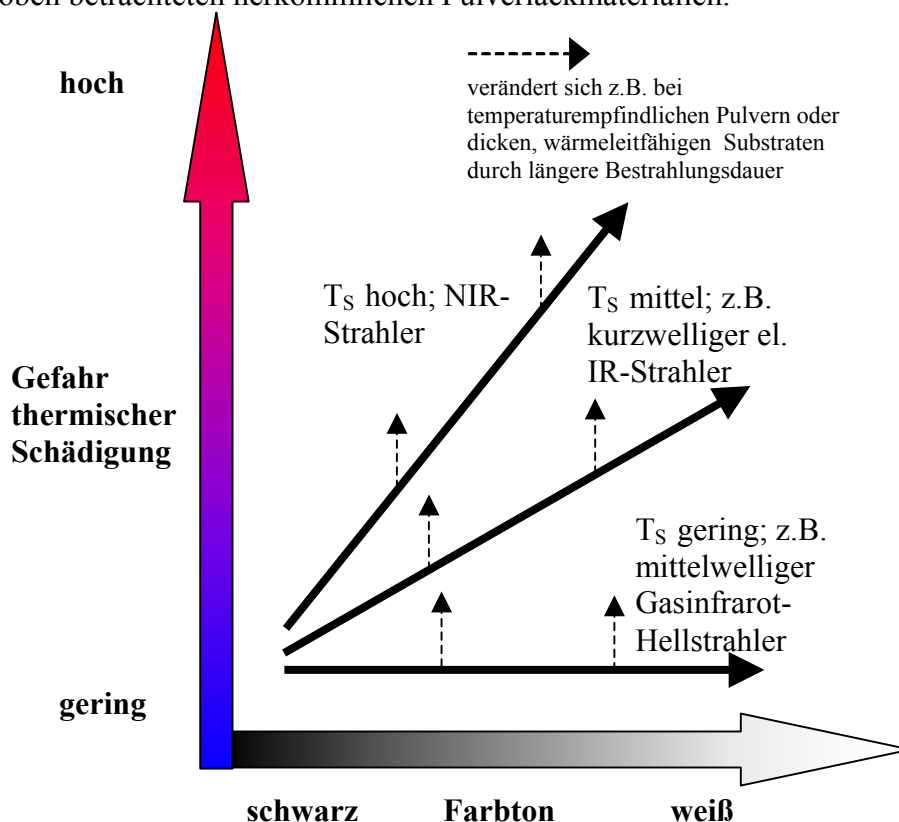


Abb. 21: Gefahr thermischer Schädigung beim Einsatz der Infrarottrocknung

Optische Verlaufsqualität der eingebrannten Pulverlackschicht

Die Gefahr von Filmbildungsstörungen durch Ausgasungen ist bei porösen Materialien wie MDF oder HDF prinzipiell gegeben und kann visuell bewertet werden. Versuche zeigen, dass sich die Gefahr beim Einsatz von Infrarotstrahlern mit hohen Leistungsdichten im Vergleich zur Umlufttrocknung eher vergrößert. Die hinsichtlich der Ausgasungsneigung besten Ergebnisse werden beim Einsatz herkömmlicher Polyadditionsprodukte wie Polyesterpulver oder Epoxipolyester-Mischpulver erzielt. Bei den Thermoplastpulvern weist ein sehr fein gemahlenes Tonerpulver sehr gute Ergebnisse auf. Auch UV-Pulver zeigen sich hinsichtlich Ausgasungen unkritisch, da der Schmelz- und Vernetzungsprozess anders als bei den thermisch härtenden Polyadditionsprodukten getrennt abläuft. Die hochreaktiven Niedertemperaturpulver weisen sehr hohe Ausgasungsprobleme auf, da die sich ausdehnende

Luft im Inneren der Holzwerkstoffplatte nicht mehr durch die geschmolzene Lackschicht ausgasen kann, wenn die Oberfläche der Lackschicht zu schnell vernetzt (Blasenbildung).

Zusätzlich zur visuellen Beurteilung der Oberflächen werden auf pulverbeschichteten Stahlblechuntergründen Tastschnittmessungen durchgeführt (nicht auf Holzwerkstoffuntergründen durchführbar). Die durch die Rechnerauswertung (Fourier-Analyse) erhaltene Grobstruktur (Wellenlänge 1-8 mm), die der „Orangenhaut“ der applizierten Lackschicht entspricht, wird durch den Rq-Wert (mittlere quadratische Rauhtiefe), dem Δq-Wert (mittlere quadratische Amplitude) und dem λq-Wert (mittlere Wellenlänge) charakterisiert. Der Δq-Wert korreliert mit dem „Longwave“-Wert des handelsüblichen Wavescan-Messprinzips (Fa. Byk Gardner, laseroptisches Verfahren), das für vergleichende Messungen auf Holzwerkstoffuntergründen zum Einsatz kommt.

In Abb. 22 sind exemplarisch Tastschnittergebnisse dargestellt die zeigen, dass mit dem TransApp[®]-Verfahren prinzipiell vergleichbare Verlaufsqualitäten erzeugt werden können, wie beim elektrostatischen Pulversprühen (EPS-Verfahren). Allerdings wird diese Qualität bisher nur dann erzielt, wenn mit einer besonderen Versuchsanordnung Werkstücke vertikal oder überhalb des Transferbandes gefördert werden und die Transferelektrode seitlich oder nach oben gerichtet ist. Dabei wird ein Herabrieseln ungeladener Pulverpartikel und Pulveragglomerate vermieden, das beim Standardaufbau der TransApp[®]-Anlage (Beschichtung des Werkstücks von oben nach unten) zu relativ hohen Rautiefewerten führt.

Schnelles Einbrennen der Lackschicht, insbesondere beim Einsatz von NIR-Strahlern, führt bei den verwendeten Pulverlacken und Substraten im Vergleich zur langsamen Umlufttrocknung zu etwas höheren Rautiefewerten und etwas kurzwelligeren Verlaufsstrukturen, die ggf. durch geeignete Additive (z.B. Verlaufshilfsmittel) modifiziert werden können.

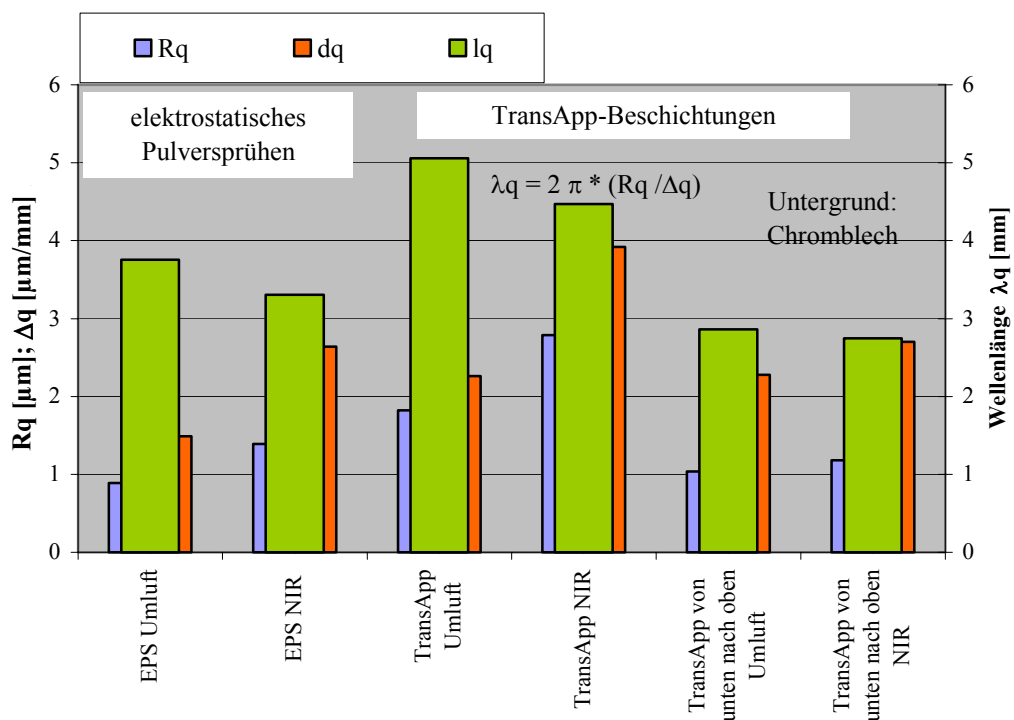


Abb. 22: Verlaufsqualität eingebrannter Pulverlackschichten (exemplarisch)

Schleifbarkeit der eingebrannten Pulverlackschicht

Beim Einsatz einer neuartigen Technik ist es vorteilhaft, zunächst Anwendungen zu betrachten, die nicht die hohen Anforderungen an die Qualität der Lackschicht stellt, wie der Decklackbereich. Dabei bietet sich im ersten Schritt an, die bisher als Flüssiglack applizierten Füllerschichten durch eine einschichtig aufgetragene Pulverfüllerschicht zu substituieren.

Voraussetzung dafür ist die gute Schleifbarkeit der Pulverlackschicht. Die Versuche am IFF zeigen, dass die schnelle Infrarottrocknung dabei Vorteile im Vergleich zur Umlufttrocknung der Bauteile bringt. Durch die Aushärtung der Pulverlackschicht von der Oberfläche zum Untergrund hin (siehe Abb.16) erreicht die Lackschicht schnell die für den Schleifprozess erforderliche Oberflächenhärte.

6 Untersuchung von Prozessüberwachungsmaßnahmen

Überwacht werden muss insbesondere die Füllhöhe des Fluidisierbehälters, die aufgrund der geringen Bauhöhe des Fluidisierbehälters bei nur ca. 30 mm liegt. Bereits geringe Schwankungen beeinflussen die Abscheidecharakteristik des Pulver-Transferprozesses erheblich. Eine gute Genauigkeit zur Messung der Füllhöhe des Fluidisierbehälters liefern ultraschallbasierende Messsonden, die laut Herstellerangabe mit einer Genauigkeit von ca. +/- 2 mm den Füllstand überwachen können.

Zur Online-Überwachung der Schichtdicke im uneingebrannten Zustand stehen für inhomogene Holzuntergründe nach bisheriger Recherche keine ausreichend genauen Methoden zur Verfügung. Da die Pulvernachdosierung in die Beladeeinheit in kurzen Taktintervallen erfolgen muss, um die Füllhöhe konstant zu halten, bietet sich die Online-Wägung der Zudosiereinheit an, um indirekt die Schichtdicke im Dauerlaufbetrieb zu überwachen.

Die Zudosierung erfolgt derzeit über einen zweiten Fluidisierbehälter mit einem max. Behälterinhalt von ca. 30 kg fluidisiertem Pulver. Die Zudosierung zum elektrostatischen Fluidisierbehälter erfolgt über Ausrieselöffnungen und wird über Magnetventile gesteuert. Um die Oberfläche des Fluids im Messbereich zu beruhigen, die durch die baulich bedingt geringen Abstände Pulverzudosierung/Ultraschallsondenmessung zu Messungenauigkeiten führt, wird die Sonde mit einem Rohr umhüllt, das mehrere Millimeter in das Fluid eintaucht. Die Messgenauigkeit erhöht sich dabei auf +/- 1 mm (Abb.23).

Durch einen einfachen Regelkreis (nur Ein- und Ausschalten der Zudosierung) wird die Füllhöhe und damit indirekt die Schichtdicke auf dem Substrat geregelt. Dadurch sind Dauerlaufversuche über mehrere Minuten (ca. 15 min) möglich, mit denen die Dauerlauffähigkeit der Versuchsanlage getestet werden kann (Abb.24).

Der Abstand Fluidoberfläche/Transferband wird zukünftig als Stellgröße für die Schichtdicke am Substrat verwendet werden, da ein signifikanter Zusammenhang zwischen diesen Größen besteht (Abb.25). Die einfache Zudosiertechnik über Ausrieselöffnungen reicht hinsichtlich der Zudosiergenauigkeit allerdings nicht aus und wird zukünftig durch alternative Zudosiertechniken wie z.B. Dichtstromförderprinzipien, Zellenradschleuse oder Schlauchquetschventiltechniken ersetzt (Abb.25).

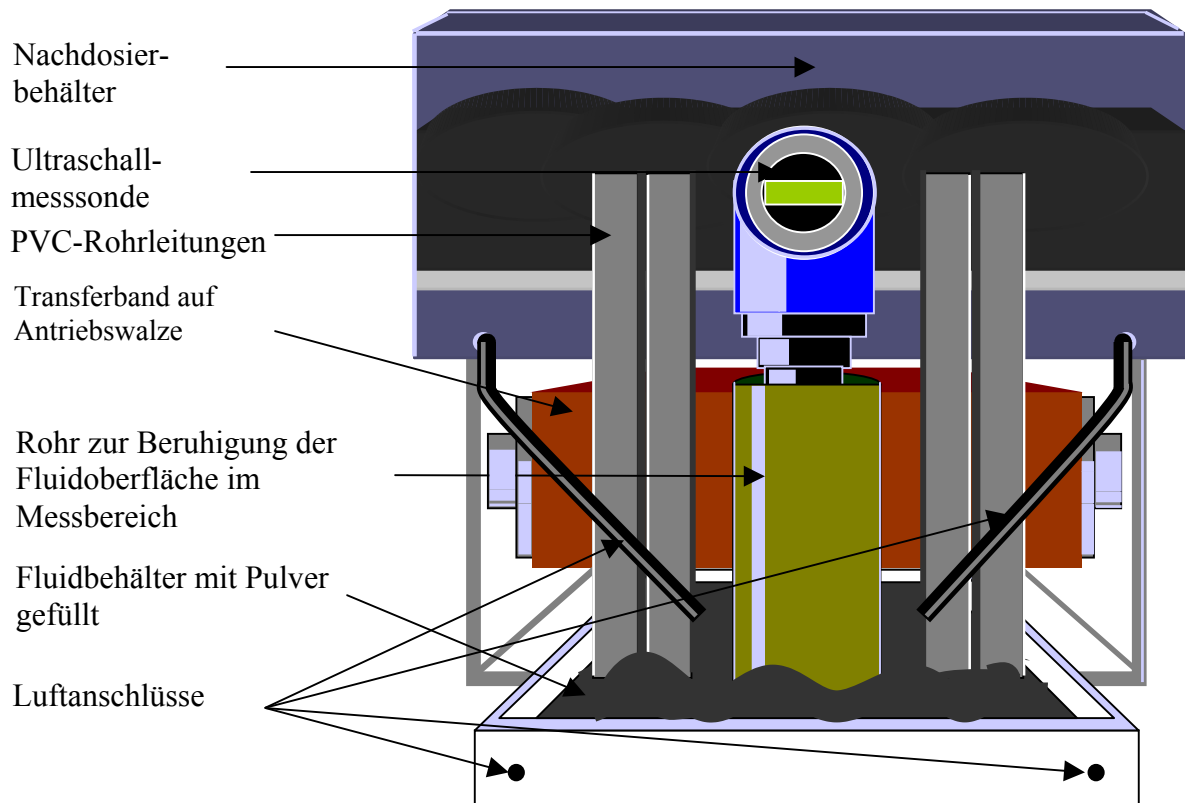


Abb. 23: Aufbau der Pulverzudosierung und Füllstandsüberwachung Fluidisierbehälter

Kontinuierliche Messung
Gewichtszunahme
Minizyklon (von
Abscheideelektrode
abgeschiedenes Pulver)

Kontinuierliche
Messung
Gewichtsabnahme

Kontinuierliche
Füllstandshöhen-
messung

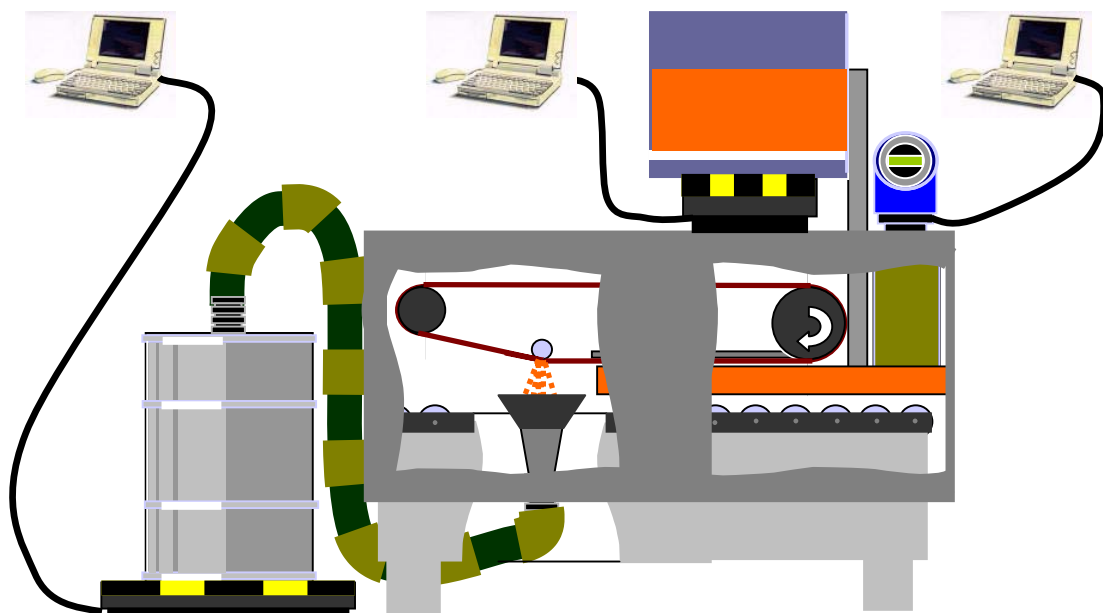


Abb. 24: Dauerlaufversuche im kontinuierlichen Betrieb über ca. 15 min

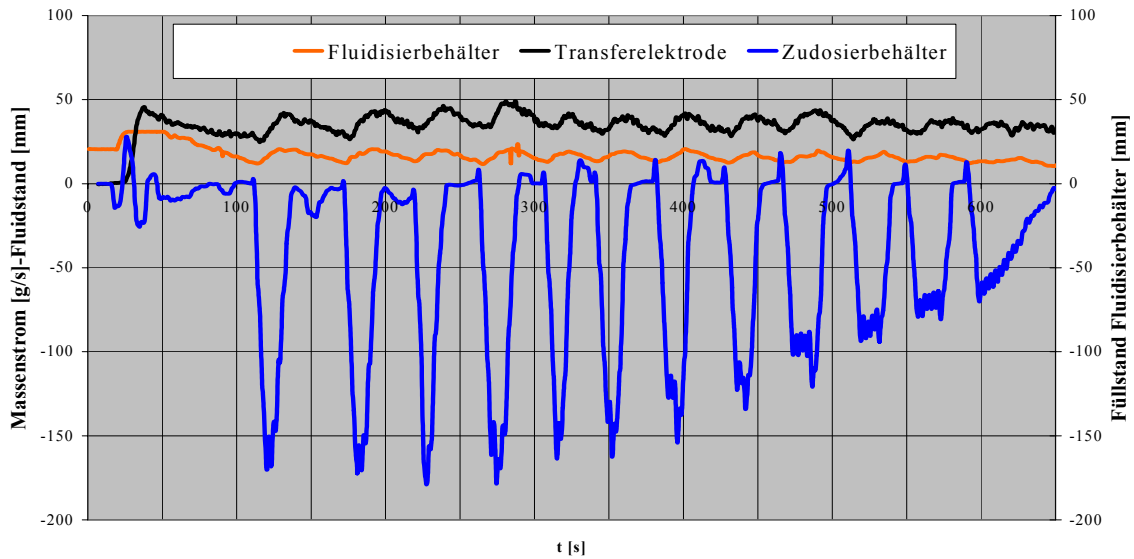


Abb. 25: Vergleich der Massenströme von der Transferelektrode und vom Nachdosierbehälter sowie Füllstand vom Fluidisierbehälter

7 Auslegung von Gesamtkonzepten/Kostenbetrachtung

Aufgrund der bisher guten Ergebnisse und des Kostenvorteils beim Einsatz herkömmlicher Polyadditionsprodukte (z.B. EP/PE-Standard-Versuchspulver) für den Bereich der Füllerapplikation werden zwei Konzepte für diese Applikation (Einbrenntechnik NIR/Gasinfrarot) sowie zwei weitere Konzepte für den Decklackbereich (Einsatz von Polymerisationspulver in Verbindung mit NIR/UV-Technik bzw. Niedertemperatur-Pulver/Umlufttrocknung), also insgesamt 4 Fallbeispiele skizziert (siehe auch Tab. 1, Vergleich IST-Kosten).

Für die kundenspezifische Auslegung von Gesamtkonzepten kann eine am IFF erstellte Excel-Matrix verwendet werden. Dabei können Werkstückdimensionen, Abstände und Werkstückdaten, die geforderte Prozessgeschwindigkeit sowie verschiedene Varianten an Einbrenntechniken variiert werden. Aus den kundenspezifischen Angaben werden für jeden Anwendungsfall Materialkosten, Energiekosten, Kapitalkosten, Personalkosten und Instandhaltungskosten berechnet.

Die Materialkosten, die im wesentlichen durch den Pulverlack verursacht sind, werden aus bisher üblichen Preisen hochgerechnet. Beim Pulverfüller wird von einem Epoxipolyester-Mischpulver (Polyadditionsprodukt) mit einem Materialpreis von nur 2 €/kg ausgegangen. Beim UV-vernetzenden Decklack (Polymerisationsprodukt) muss derzeit von hohen Kosten (ca. 10 €/kg bei sehr großen Abnahmemengen) ausgegangen werden. Ebenfalls hohe Kosten verursacht der Einsatz eines hochreaktiven Niedertemperaturpulvers. Beim potenziellen Einsatz der Umlufttrocknung kämen nur teure Niedertemperaturpulver in Frage, da die MDF-Substrate im Inneren nur bis ca. 120°C temperaturbelastet werden dürfen, während beim Einsatz der Infrarottrocknung die Oberfläche des Substrates höher belastet werden kann. Bei den sehr hohen absolut erforderlichen Pulvermengen können Preise zukünftig (insbesondere bei UV- oder elektronenstrahlhärtenden Pulvern) noch sinken. Die Pulverlackmengen errechnen sich aus der in den Versuchen erforderlichen Schichtdicke von ca. 65 µm und einer Pulverlackdichte von 1500 kg/m³.

Bei den Energiekosten (s.u.) werden die Kosten, q angelehnt an die vier Fallbeispiele, für das Vernetzen der Pulverschicht eines thermisch härtenden Pulverlackes durch die sehr kurzweilige NIR-Technik mit mittelwelliger Gasinfrarot-Hellstrahlertechnik verglichen und der für langsame Prozesse üblichen Umlufttrocknung gegenübergestellt. Zusätzlich wird der Aufschmelz- und Vernetzungsprozess eines UV-härtenden Polymerisationsproduktes durch eine Kombination aus NIR- und UV-Strahlertechnik dargestellt.

Die Kapitalkosten umfassen die Kosten für die TransApp[®] Einrichtungen (elektrostatischer Fluidisierbehälter, Transfervorrichtung mit Bandgleichlaufsteuerung, Drahtelektrode, Hochspannungserzeuger, Mess- und Regeltechnik für die Schichtdickenüberwachung, Lüftungstechnische Anlagen), die Fördertechnik sowie die Einbrenntechnik. Zusätzlich fallen Kosten für die Planung und Projektierung an. In den nachfolgenden Berechnungen wird eine Abschreibungsdauer von *10 Jahren* und ein Zinssatz von *6%* zugrundegelegt. Die Kosten für die TransApp[®]-Einrichtungen können nur grob aus den bisherigen Erfahrungen hochgerechnet werden, die Kosten für die Fördertechnik sowie für die Einbrenntechnik werden innerhalb der Excel-Matrix an die Aufschmelz- und Vernetzungszeiten (und der davon abhängigen Anlagendimension) angepasst. Bei der Variante der Umlufttrocknung wird davon ausgegangen, dass bei den damit verbundenen langen Einbrennzeiten eine aufwändige (und kostspielige) Palettenfördertechnik eingesetzt wird, um die Länge des Ofens zu minimieren.

Personal- und Instandhaltungskosten können zukünftig gemeinsam mit den Kunden hochgerechnet werden. In den nachfolgenden Kalkulationen wird davon ausgegangen, dass bei dem hochautomatisierten Prozess nur eine Person für den Betrieb der Anlage erforderlich ist (*Stundensatz 60 €*). Die Instandhaltungskosten werden auf die für Lackierprozesse üblichen *3%/Jahr* der Investitionssumme festgelegt.

Bei den Berechnungen wird von einer Prozessgeschwindigkeit von *1 m/s* und einem Abstand der Werkstücke längs zur Förderrichtung von *0,2 m* ausgegangen. Die Plattendicke wird auf *18 mm* festgelegt.

Energiekosten

NIR-Einbrenntechnik (siehe auch Abb. 19):

Aus der Leistungsdichte P_Z von *200 kW/m²* und einer Bestrahlungsdauer von *12s* bei einem dunklen Füllerfarbton resultiert eine mindestens *12 m* lange Einbrennzone bei einer Prozessgeschwindigkeit von *1 m/s*. Da die Strahlerzonenbreite die Substratbreite überschreitet, um im Randbereich gleiche Bestrahlungsbedingungen zu haben, wie in der Mitte des Substrates, wird von einer Strahlerzonenbreite von *1,2 m* und damit von einer Gesamtstrahlerzonenfläche A_Z von *14,4 m²* ausgegangen. Die gesamte Heizleistung der Strahler beträgt damit *2.880 kW*. Bei einem Energiebedarf von *2.880 kWh* fallen bei *0,06 €/kWh* Energiekosten von *172,8 €/h* an.

Bei einem hellen Farbton würden durch die erheblich verlängerten Bestrahlungszeiten von ca. *25 s* Energiekosten von *360 €/h!* anfallen.

Wird die NIR-Einbrennzone nur zum Aufschmelzen beispielsweise des UV-härtenden Pulvers verwendet, so fallen je nach Farbton zwischen *1,5* und *12 s* Bestrahlungsdauer an. Im Mittel kann von ca. *6 s* ausgegangen werden, das entspricht Energiekosten von *86,4 €/h*.

UV-Bestrahlungstechnik:

Hinzu kommt beim Einsatz von UV-Pulver eine UV-Bestrahlungsdauer von ca. 5 s bei einer Leistungsdichte P_Z des UV-Strahlers von 40 kW/m^2 . Dies bedeutet bei einer Gesamtstrahlerzonenfläche A_Z von 6 m^2 incl. Überlappung der Randbereiche (wie bei den NIR-Strahlern) eine Leistung von 240 kW . Beim Energiebedarf von 240 kWh fallen zusätzlich $14,4 \text{ €/h}$ Energiekosten an. Die Gesamtenergiekosten belaufen sich damit auf $100,8 \text{ €}$.

Gasinfrarot-Einbrenntechnik (keramischer Hellstrahler):

Bei einer Leistungsdichte P_Z der Strahler von 160 kW/m^2 und bei 15 s Bestrahlungsdauer fällt eine Gesamtstrahlerzonenfläche A_Z von 18 m^2 incl. Überlappung (wie bei den NIR- und UV-Strahlern) an. Die gesamte Heizleistung beträgt damit 2.880 kW wie beim Einsatz des NIR-Strahlers oben. Beim Energiebedarf von 2.880 kWh fallen beim Brennwert von (angenommen) Erdgas bei ca. 13 kWh/kg und Kosten von $0,33 \text{ €/kg Erdgas}$ $73,1 \text{ €/h}$ Energiekosten an, unabhängig davon, welcher Farbton bestrahlt wird. Die Kosten/kWh Erdgas betragen dabei $0,025 \text{ €}$.

Umlufttrocknung (Abb.9):

Zum Vergleich der Umlufttrocknung mit Infrarot- oder UV-Trocknung wird von einem direkt (gas-)beheizten Ofen ausgegangen der auf 120°C aufgeheizt wird (Niedertemperaturpulver). Vorversuche, bei denen die MDF-Platten mittels Temperaturfühler im Platteninneren im Umluftofen aufgewärmt werden zeigen, dass auch bei 30-minütiger Umlufttrocknung die MDF-Platten im Inneren noch nicht vollständig aufgeheizt sind. Deshalb wird in den Berechnungen unten ein Faktor (f) der Durchwärmung des Werkstückes von 0,8 (also 80%-ige Durchwärmung der MDF-Platte) zugrundegelegt. Die Ofendimensionen werden in der Excel-Matrix aus den Eingabedaten errechnet und belaufen sich aufgrund der Palettenfördertechnik für unseren Anwendungsfall auf $43,2 \text{ m} \cdot 1,4 \text{ m} \cdot 5 \text{ m}$ (L · B · H). Für den Energiebedarf des Trockners und die Energiekosten muss eine Wärmeverlustrechnung durchgeführt werden. Für die Betrachtung sind folgende Wärmeverluste relevant:

Die Wärmeleistung \dot{Q}_F zum Aufheizen der erforderlichen Frischluftvolumenströme (Gleichung 22) beträgt $129,6 \text{ kJ/s (kW)}$.

$$\dot{Q}_F = \dot{V}_F \cdot \rho_L \cdot c_{PL} \cdot \Delta T \quad (22)$$

\dot{V}_F : Frischluftvolumenstrom [m^3/s]($1 \text{ m}^3/\text{s}$)

ρ_L : Dichte der Luft [kg/m^3]($1,29$)

c_{PL} : mittlere spezifische Wärme der Luft [$\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$]($1,005$)

ΔT : Temperaturdifferenz [K]($120-20=100$)

Die Wärmeleistung \dot{Q}_W zum Aufheizen des Werkstückes auf 120°C (Gleichung 23/24) beträgt 1.536 kJ/s (kW) .

$$\dot{Q}_W = \dot{m}_W \cdot c_W \cdot \Delta T \cdot f \quad (23)$$

\dot{m}_W : Massenstrom [kg/s]($12,0$ siehe Gleichung 24)

c_W : spezifische Wärme MDF [$\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$]($1,6$)

ΔT : Temperaturdifferenz [K](100)

f: Faktor der Durchwärmung des Werkstückes ($0,8$)

der Massenstrom ermittelt sich für unseren Fall nach Gleichung 23,

$$\dot{m}_W = L_W / (L_W + A_{WL}) \cdot B_W \cdot H_W \cdot \rho_W \cdot v_P \quad (24)$$

L_W B_W H_W : Länge/Breite/Höhe Werkstück MDF [m](1 · 1 · 0,018)

A_{WL} : Abstand Werkstück/Werkstück in Längsrichtung [m](0,2)

ρ_W : Dichte Werkstück MDF [kg/m³](800)

v_P : Prozessgeschwindigkeit [m/s]

Die Wärmeleistung \dot{Q}_T zum Aufheizen der Transporteinrichtung (Palettenförderer, Stahl, ca. 6 kg/m Förderstrecke) auf 120°C (Gleichung 24 analog zu Gleichung 23) beträgt 279,0 kJ/s(kW).

$$\dot{Q}_T = \dot{m}_T \cdot c_T \cdot \Delta T \quad (25)$$

\dot{m}_T : Massenstrom Transporteinrichtung Palettenförderer [kg/s](6)

c_W : spezifische Wärme Stahl [kJ/(kg · K)](0,465)

Die Wärmeleistung \dot{Q}_A zum Ausgleich der Wärmeverluste über die Trockneroberfläche an die Umgebung (Gleichung 26) beträgt 7,035 kJ/s (kW).

$$\dot{Q}_A = k \cdot A \cdot \Delta T \quad (26)$$

k : Wärmedurchgangskoeffizient Trocknerwand [kJ/(m² · s · K)](ca. 0,139 · 10⁻³)

A : Trockneroberfläche [m²](506,5)

Die Wärmeleistung \dot{Q}_Q zum Ausgleich der Wärmeverluste des Durchlauftrockners über den Querschnitt der Öffnungen des Ofeneingangs und Ofenausgangs (Gleichung 27) beträgt 1,120 kJ/s(kW). Ein Teil des Luftvolumenstroms aus den Öffnungen führt beim Austritt zur Erwärmung des Werkstückes (ca. 1/3), die restlichen 2/3 zählen zu den Verlusten.

$$\dot{Q}_Q = 2/3 \cdot v_L \cdot A_Q \cdot \rho_L \cdot c_{PL} \cdot \Delta T \quad (27)$$

v_L : Luftgeschwindigkeit im Querschnitt der Öffnung [m/s](0,15)

A_Q : Querschnitt der Öffnungen gesamt [m²](0,0864)

Die gesamte Heizleistung beträgt damit 1953 kW (Gleichung 28).

$$\dot{Q}_{\text{Ges.Tr.}} = \dot{Q}_F + \dot{Q}_W + \dot{Q}_T + \dot{Q}_A + \dot{Q}_Q \quad (28)$$

Die erforderliche Wärmeenergie Q [kWh] errechnet sich wie folgt (Gleichung 29).

$$Q = \dot{Q} \cdot t \quad (29)$$

\dot{Q} : Wärmeleistung [kJ/s(kW)]

t : Zeit [h]

In einer Stunde fällt damit ein Energiebedarf von 1953 kWh an. Die Energiekosten E_K [€] ermitteln sich über

$$E_K = Q/H_S \cdot G_K$$

H_S : Brennwert (Erdgas ca. 13 kW/kg)

G_K : Kosten Erdgas/kg (ca. 0,33 €)

und betragen 49,6 €/h.

Kostenbetrachtung gesamt

Für den hochautomatisierten Beschichtungsprozess sind die Materialkosten entscheidend für die gesamten Beschichtungskosten und betragen im Mittel (siehe Abb. 26) mehr als 80% der gesamten Beschichtungskosten. Der Energiekostenanteil (im Mittel ca. 6 % der Gesamtkosten) stellt bereits eine untergeordnete Größe hinsichtlich der Gesamtkosten dar. Der Kapitalkostenanteil ist trotz der hohen absoluten Investitionssummen von > 2 Mio. € je nach Fallbeispiel sehr gering, da die Flächenleistungen groß sind.

Beim Einsatz des kostengünstigen Füllerpulvers (2€/kg) liegen die Beschichtungskosten bei ca. 0,3 €/m², wobei das Pulver selbst einen Anteil von ca. 0,2 €/m² darstellt. Beim Einsatz der Gasinfrarotstrahler liegen die Kosten/m² geringfügig unterhalb der Kosten bei NIR-Strahlern wegen der etwas geringeren Energiekosten der Gasinfrarotstrahler (Abb. 27).

Verursacht durch die hohen Materialkosten beim NT-Pulver bzw. beim UV-härtenden Polymerisationspulver (10 €/kg) liegen bei dieser Applikation die Beschichtungskosten bei ca. 1 €/m². Die trotz der aufwändigen Palettenfördertechnik bei der Umlufttrocknung geringeren Kapitalkosten und Energiekosten im Vergleich zur NIR/UV-Technik fallen bei den signifikanten Materialkostenanteilen kaum mehr ins Gewicht (Abb. 28).

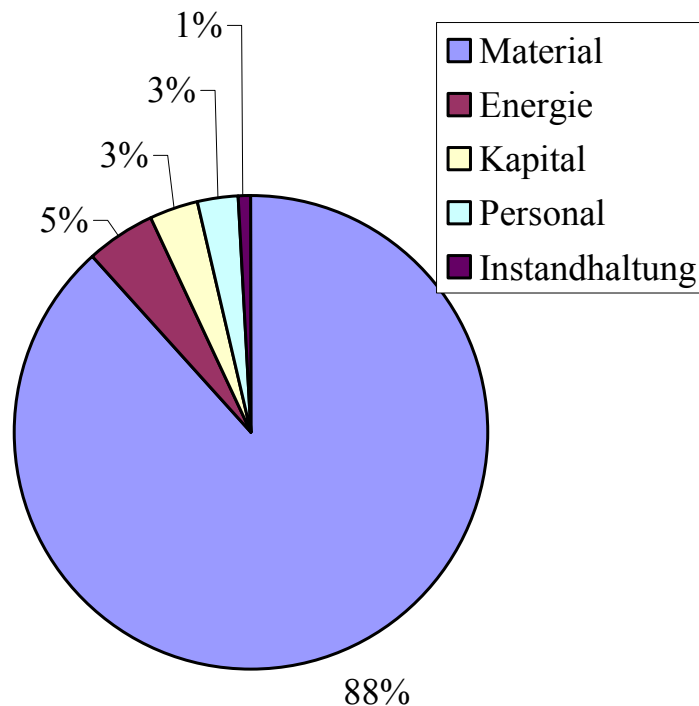


Abb. 26: Durchschnittliche prozentuale Beschichtungskosten, gemittelt aus 4 Fallbeispielen

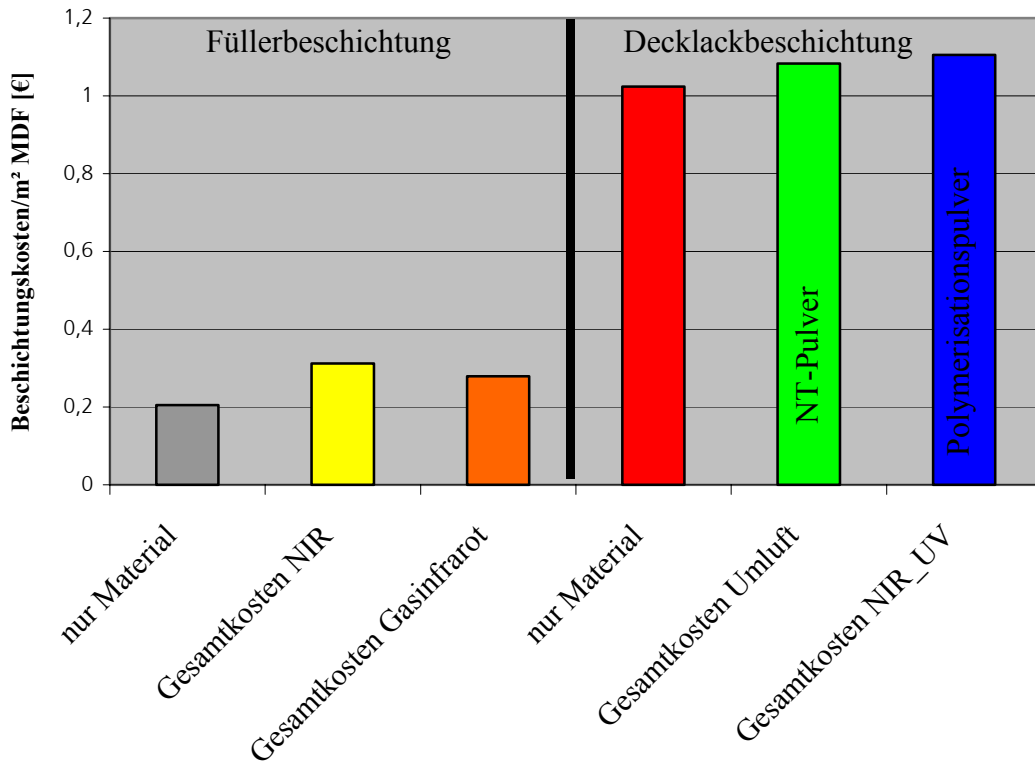


Abb. 27: Kosten/m² MDF, nur Pulverlackkosten sowie Gesamtkosten der 4 Fallbeispiele

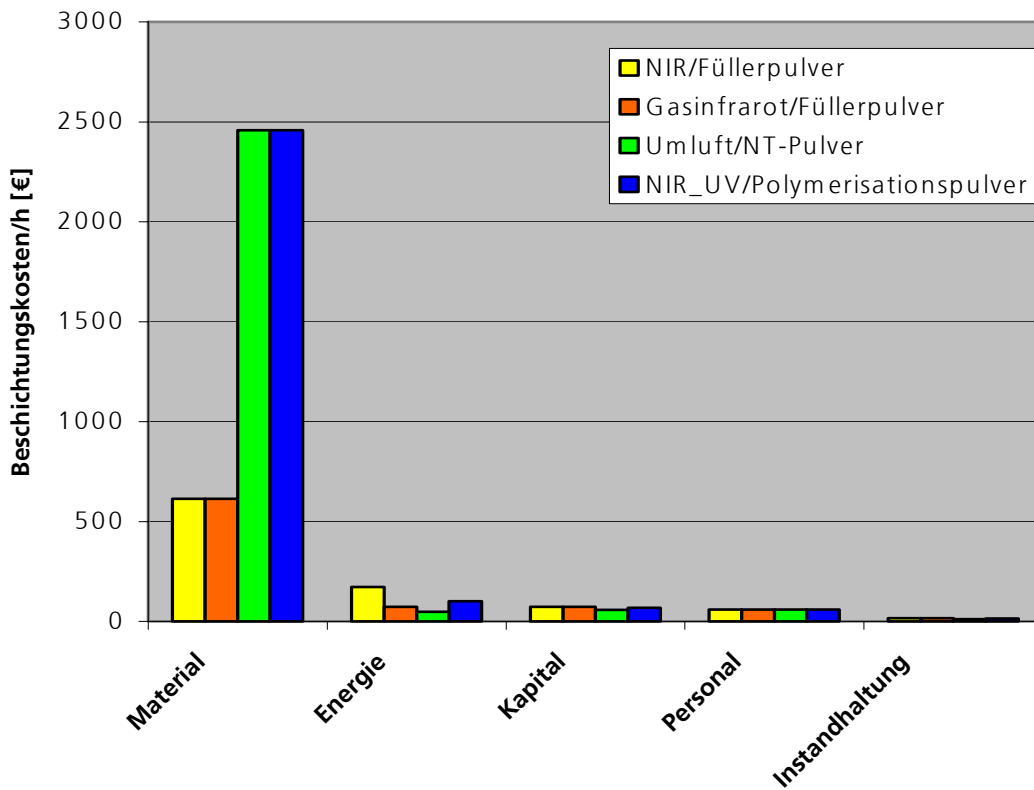


Abb. 28: Beschichtungskosten/h der 4 Fallbeispiele

8 Ausblick

Da die Technik der Hochgeschwindigkeits-Pulverbeschichtung vom IFF als strategisches Thema angesehen wird, steht seit September 2004 ein neues Technikum für Weiterentwicklungen zur Verfügung (Abb. 29).

Im Rahmen eines Programms zur „Förderung von innovativen Netzwerken“ (InnoNet) des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit (BMWA) soll die Technik durch das IFF, dem Fraunhofer-Institut für Elektronenstrahl- und Plasmatechnik (FEP) in Dresden, dem Zentrum für angewandte Forschung und Technologie (ZAFT) e.V. an der Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden (FH) sowie seitens der Industrie von vier mittelständischen Firmen aus dem Bereich Beschichtungsanlagenbau (u.a. Fa. Bürkle) und drei z. T. mittelständischen potenziellen Anwendern des Verfahrens sowie einem Hersteller von Pulverlacken weiterentwickelt werden.

Zudem sind bilaterale Projekte direkt mit Anlagenherstellern oder Anwendern geplant.



Abb. 29: Neues Hochgeschwindigkeits-Pulverbeschichtungstechnikum

Literatur

- [1] Zimmermann, F.: Entwicklungs- und Anwendungspotenziale für die MDF-Beschichtung; JOT 6/2001, S. 40-45
- [2] Cudazzo, M.: Forschung und Entwicklung für den EPS-Zukunftsmarkt Kunststoffe und Holzwerkstoffe; Tagungsband „Die EPS-Praxis 1997“, Bad Nauheim (Veranstalter: Technik + Kommunikation Verlags GmbH, Berlin)
- [3] Bauch, H.: Neue Perspektiven für die Beschichtung von Holzfaserverwerkstoff; Berichtsband DFO-Tagung Pulverlack-Praxis, 1998, Boppard (Veranstalter: Deutsche Forschungsgesellschaft für Oberflächenbehandlung e.V.)
- [4] Michaelis, H., Stillert, G.: Pulverbeschichtung von Holzwerkstoffen – Ergebnisse eines Forschungsprojektes; JOT 1999/11, S. 56-59
- [5] Buysens, K., Jacques, K.: UV powder coatings for wood applications ; European Coatings Journal 09/2001, S. 258-260
- [6] Noonan, J.R.: Investigation standard powder coatings on nonspeciality MDF and specially selected hardwood material; Powder Coating, August 2001, S. 31-40
- [7] Mitchel, S.: UV Powder on Wood: the first North American Installations; Congress Papers “Powder Coating Europe” 2002, Nürnberg (Veranstalter: Vincentz-Verlag, Hannover)
- [8] Römer, J.: MDF-Möbel mit Pulver beschichten: erste industrielle Serienproduktion; Congress Papers “Powder Coating Europe” 2002, Nürnberg (Veranstalter: Vincentz-Verlag, Hannover)
- [9] Foitzik, B.: Pulver auf Holzwerkstoffen – Wer wagt den nächsten Schritt?; JOT 2/2001, S. 14-17
- [10] Offenlegungsschrift DE 101 63025 A1: Verfahren und Vorrichtung zur Beschichtung bewegter Substrate
- [11] Strohbeck, U.: Pulverbeschichten; Kap. 4.9 im „besser lackieren!“-Jahrbuch 2004
- [12] Ye, Qiaoyan; Domnick, Joachim: On the simulation of space charge in electrostatic powder coating with a corona spray gun; Powder Technology 135-136 (2003) 250-260
- [13] Meuthen, B.: Pulverbeschichten von Band und Blech; JOT 2/2000, S. 16-21
- [14] Kretschmer, M.: Bandpulverbeschichtetes Coil: Technologie und Anwendung; Tagungsband ”Die EPS-Praxis 1999”, Bad Nauheim (Veranstalter: Technik + Kommunikation Verlags GmbH, Berlin)
- [15] Schulze-Hagenest, D.: Pulvern von flachen Werkstücken; JOT 1998/4, S. 34-40
- [16] PCT/NL95/00390: Process for Coating a Substrate with a Powder Paint Composition
- [17] PCT/NL97/00149: Process for Coating a Board- or Paper-like Substrate with a Powder Paint Composition
- [18] Cudazzo, M.: Projektbericht Neue Anwendungsmöglichkeiten der Pulverbeschichtung; Teilprojekt Pulverbeschichtung von Wandbelägen; Herausgeber: ABAG-Abfallberatungsagentur, Geschäftsbereich der SAA Sonderabfallagentur Baden-Württemberg GmbH; Oktober 1998
- [19] Binda, P., van den Berg Jeths, R.: Electro-Magnetic Brush Technology: A Novel Powder Coating Application Process for Coil Coating; ECCA 37th General Meeting, Malta 2003
- [20] Offenlegungsschrift DE 195 18 817 A1: Verfahren zum Beschichten von bewegten Bändern, insbesondere von Metallbändern, und Einrichtung zur Durchführung des Verfahrens
- [21] Cudazzo, M., Domnick, J., Pulli, K., Steigleder, T., Strohbeck, U., Ye, Q.: New Approaches in Improving the Reliability of Powder Application and Recovery; Congress Papers Powder Coating Europe 2000; Vincentz-Verlag, Hannover
- [22] M.M. Pauthenier, J. Phys. Radium 3, 590
- [23] F.W. Peek, Jr.: Dielectric Phenomena in High Voltage Engineering, 3rd ed., McGraw-Hill, New York 1929
- [24] White, Harry J.: Entstaubung industrieller Gase mit Elektrofiltern; VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1969
- [25] Offenlegungsschrift DE 103 17919 A1: Verfahren und Vorrichtung zur Beschichtung von Flachteilen
- [26] Souheng, Wu.: Electrostatic Charging and Deposition of Powder Coatings; Journal of Electrostatics, 1976
- [27] Klein, Wolfgang: Energieeinsparung bei der industriellen Lackierung; Journal of Electrostatics, 2004
- [28] Schneider, Matthias: Infrarot-Strahlungstrocknung; Kittel H., Lehrbuch für Lacke und Beschichtungen, Band 9 Kap. 9.3.2.2
- [29] Reiter, Jörg: Grundlagenuntersuchung für die Aushärtung von Pulverlacken mit Hilfe von NIR-Strahlung, Dissertation an der Fakultät für Naturwissenschaften der Universität Paderborn