

Fachgebiet Druck- und Medientechnologie  
der  
Bergische Universität Wuppertal

**Bau und Erprobung eines Mikrowellentrockners für die  
Trocknung von wasserbasierenden Tiefdruckfarben mit Mo-  
dellcharakter für andere wasserbasierte Farben, Tinten, Lacke  
und Bindemittel**

Abschlußbericht über das Projekt  
gefördert unter dem Aktenzeichen 24893  
von der  
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Prof. Dr. Peter Urban, Dr. Ashraf A. Saad, Dipl.-Ing. Horst Mügge,  
B.Sc. Mark Eisberg

Februar 2009



**BERGISCHE  
UNIVERSITÄT  
WUPPERTAL**



Deutsche Bundesstiftung Umwelt



**Projektkennblatt**  
der  
**Deutschen Bundesstiftung Umwelt**



Az	<b>24893</b>	Referat	<b>21/2</b>	Fördersumme	<b>110.000,00 €</b>
<b>Antragstitel</b>	<b>Bau und Erprobung eines Mikrowellentrockners für die Trocknung von wasserbasierten Tiefdruckfarben mit Modellcharakter für andere wasserbasierte Farben, Tinten, Lacke und Bindemittel.</b>				
<b>Stichworte</b>	Mikrowellentrockner, Wasserbasierte Farbe/Lack				
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)		
<b>18 Monate(+5)</b>	<b>02.01.2007</b>	<b>30.09.2008</b>			
Zwischenberichte					
<b>Bewilligungsempfänger</b>	Muegge Electronic GmbH	Tel	06164 930727		
		Fax	06164 930777		
		Projektleitung	Horst Muegge		
		Bearbeiter			
	64385 Reichelsheim				
<b>Kooperationspartner</b>	Bergische Universität Wuppertal Fachbereich E Druck- und Medientechnologie				
	42119 Wuppertal				

### Zielsetzung und Anlaß des Vorhabens

Ziel des Vorhabens ist die Überwindung von Hemmnissen des breiten Einsatz von Wasserfarben in Tief- und Flexodruck mittels der Mikrowellentrocknung. Probleme bei der Konvektionstrocknung liegen im (gegenüber Lösemittelfarben) höheren Energieeinsatz zur Lösemittelverdampfung und in der unselektiven Aufheizung des Bedruckstoffes auch an unbedruckten Stellen und den daraus entstehenden Folgeproblemen in der Druckmaschine. In diesem Vorhaben sollen die spezifischen Vorzüge von Mikrowellentrocknung und Konvektionstrocknung optimiert werden.

### Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Zur Erreichung der Ziele des Vorhabens sind folgende Schritte in einem Arbeitsprogramm erforderlich:

- Konstruktion, Bau und Einbau eines Mikrowellentrockners an einer Musterdruckmaschine mit 0,6 m Bahnbreite und bis 40 m/min Bahngeschwindigkeit.
- Erprobung und Optimierung des Mikrowellentrockners

Auf der Grundlage der erworbenen Erkenntnisse soll Konstruktion, Bau und Einbau eines Mikrowellentrockners an einer Produktionsdruckmaschine mit 2,3 m Bahnbreite (Druckbreite 2,2 m) und über

300 m/min Bahngeschwindigkeit realisiert werden.

Die beiden Schritte in o.a. Aufzählung lassen sich grob auf die Projektpartner nach Konstruktion und Bau (Muegge Electronic GmbH) und Erprobung/Optimierung (Bergische Universität Wuppertal (BUW)) aufteilen, jedoch gibt es wechselweise Teilpakete/Vernetzungen.

Ebenfalls lässt sich eine grobe zeitliche Einteilung (ca.  $\frac{1}{2}$  der Zeit für Konstruktion und Aufbau und ca.  $\frac{1}{2}$  für Test und Optimierung) vornehmen.

Die Konstruktion und der Aufbau eines Mustertrockners umfasst die Bereiche Einkoppelsystem, Feldsimulation, Blendensystem, Kurzschlusschieber, Resonator, Luftführung und Sicherheitstechnik sowie die Netzteile. Dieses Arbeitspaket wird dominant von der Firma Muegge Electronic GmbH bearbeitet. Es sind in diesem Arbeitspaket Zuarbeiten der BUW betreffend Geometrie im Resonator (Verhältnis Höhe/Breite), Geometrie der Anordnung der Resonatoren hinsichtlich Bahnlauf/-führung, Belüftung im Applikator sowie der Handhabung in der Druckmaschine (hier vor allem: Handling Bedruckstoffbahn) erforderlich.

Die Erprobung und Optimierung des Mikrowellentrockners beinhaltet an einer alten Anlage, mit der die Vorversuche zu diesem Vorhaben stattfanden, Optimierungen in der Luftmenge und des Wärmeüberganges vorzunehmen um für die Inbetriebnahme der neu konstruierten Anlage einen Erfahrungsvorsprung zu erarbeiten. Weiterhin umfassen die Tests des neu konstruierten Trockners zunächst die Nutzung an der Labordruckmaschine der BUW, um einen Vergleich zur alten Anlage unter gleichen Druckrandbedingungen zu haben. Im Folgeschritt soll dann der Test und die Optimierung an der Labordruckmaschine der Firma Interprint unter den Rahmenbedingungen der dortigen Verfahrensspezifika erfolgen.

Im Bereich der Erprobung und Optimierung ist jeweils seitens der Firma Muegge Electronic GmbH anfallender Aufwand bei Einbau/Anbindung an bestehende Maschinen sowie im Bereich der Sicherheitstechnik, insbesondere des Schutzes vor aus den Applikatoren austretender Mikrowellenstrahlung durch geeignete Einhausung zu leisten. Diese Aufwände fallen jeweils zweimal an (neue Anlage in BUW und Firma Interprint).

Die im Rahmen dieses Projektes zu bauende Anlage zeichnet sich gegenüber dem Stand der Technik durch eine anwendungsbezogene Optimierung der elektrischen Felder, eine Anpassung der Luftführung im Applikator nach Menge und Temperatur an die Mikrowellentrocknung sowie die Kombination mit der Konvektionstrocknung aus.

Die erzielbaren Vorteile liegen in deutlich höheren erreichbaren Druckgeschwindigkeiten und in der Selektivität der Trocknung – die Bedruckstoffbahn an den unbedruckten Stellen wird nicht nennenswert erwärmt und ist damit auch nicht den trocknungsbedingten Nachteilen ausgesetzt (wie etwa Schrumpfen durch Verlust der Papierfeuchte). Den Energieeinsatz betreffend ist die Ersparnis gegenüber einer Heißlufttrocknung vorhanden. Der eigentlich die Umwelt positiv betreffende Effekt ergibt sich aus der Geschwindigkeitssteigerung – es sind Druck- und Trocknungsgeschwindigkeiten erreichbar, die die Konkurrenz zu Tief- und Flexodruckbereichen erlauben, in denen heute üblicherweise mit Lösemittel verdünnte Farben (70 – 80 % LM-Anteil) verarbeitet werden. Die energieaufwendige und/oder CO<sub>2</sub> erzeugend Nachbehandlung der Trocknerabluft zum Zwecke des Entfernen oder Verbrennen des Lösemittels fiel fort – gleichfalls die Belastung der Arbeitnehmer in solchen Druckereien mit Lösemitteln.

## ***Ergebnisse und Diskussion***

Ein industrietauglicher, robuster Mikrowellentrockner wurde seitens der Firma Muegge erstellt und seitens der Bergischen Universität Wuppertal (BUW) erprobt. Der Aufbau und die Inbetriebnahme an einer Labordruckmaschine der BUW gestaltete sich unproblematisch. Einzelergebnisse sind:

- Eine Verkleinerung der Schlitze für die Zu-/Abfuhr der Bedruckstoffbahn in Verbindung mit einer Abschirmung zwischen den einzelnen Resonatoren durch Lochbleche und einer Abschirmung an Bahneinlauf und –auslauf aus dem Gesamtsystem durch sogenanntes Foamglas führte in allen vorkommenden Betriebszuständen zu einer Minimierung der Streustrahlung. In nächstmöglichem Messabstand zur Bahnein- und –austritt ist die Streustrahlung immer deutlich unter  $10 \text{ mW/cm}^2$ , meist unter  $5 \text{ mW/cm}^2$  bzw. an der Nachweisgrenze.
- Im Bereich der Luftführung konnte durch entsprechende Verbesserungen bei der Zufuhr und Verteilung der Luft (Weniger Schläuche mit Verzeigung erst am Spülluftkanal und insgesamt deutlich vergrößertem Schlauchdurchmesser) eine Verringerung der Widerstände und damit verbunden ausreichende Luftzufuhr auch unter Verwendung eines Gebläses mit geringerem Förderdruck erreicht werden.
- Die Wärmeübergangszahlen im Resonatorraum wurden durch ein selbst entwickeltes Verfahren ermittelt und zeigen gute Werte für eine Kühlung des Bedruckstoffes.
- Die Dimensionierung des Luftkanals rückseitig auf dem Resonatorrücken wurde hinsichtlich der Gleichmäßigkeit der ausströmenden Luft (Geschwindigkeit) mit einem experimentellen Aufbau eines Dummys geprüft. Dabei wurde über der gesamten Bahnbreite eine gleichmäßige Ausströmgeschwindigkeit auch unter ungünstigen Bedingungen (große Ausströmbohrungen) gezeigt.
- Im Resonatorbereich sind die neuen Elemente Lochblende, Tuner und Kurzschlusschieber geprüft und hinsichtlich ihrer Tauglichkeit für das Resonatorsystem bestätigt worden. Die erzielbaren Trocknungsleistungen entsprechen den Leistungen des experimentellen Systems, dass in der Dissertation von Herrn Dr. Ashraf Saad beschrieben ist. Vorteilhaft an dem neuen System ist die Möglichkeit, über den Kurzschlusschieber die Leistung des Trockners zu optimieren. Diese Optimierung ist jeweils abhängig von den druckseitigen Betriebsbedingungen (Bahngeschwindigkeit, Wassermenge auf der Bahn).
- Als Ergebnis aus den Untersuchungen des neu gestalteten Resonatorbereiches ergibt sich zum einfachen (Handhabung durch Drucker) und vor allem automatischen Betrieb, dass die Einstellung des Kurzschlusschieber in einer praxisnahen Anlage automatisch so erfolgen sollte, dass die vom System reflektierte Leistung jeweils minimiert wird.

Untersuchungen bei der Firma Interprint waren zur Projektlaufzeit leider nicht möglich, da die dortige Labordruckmaschine u.a. auch für Produktionen eingesetzt wird und zur Projektlaufzeit keine Zeitfenster für Untersuchungen eröffnet werden konnte. Aus den Untersuchungen an der BUW wurden aber die Ziele, nämlich den Beleg der erfolgreichen Funktion und Leistung im Mikrowellenteil der Trocknung, erreicht.

## ***Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation***

Derzeit ist ein Fachartikel zur Publikation in den Zeitschriften „Deutscher Drucker“, „Flexo- und Tiefdruck“ sowie „Flexoprint“ in Vorbereitung. Diese drei Medien haben im Bereich des Druckens die größte Verbreitung in Deutschland und man erreicht damit die gesamte Branche, die auch ein Interesse an der Trocknung wasserbasierender Farben und Lacke hat.

Weiterhin wird dieses Projekt durch einen entsprechenden Plakataushang bei der European Conference des European Energy Efficiency Improvement (eeeei) Project for the graphic Industry am 27. März 2009 in Wuppertal bekannt gemacht.

### **Fazit**

Der Trockner der Firma Muegge zur Trocknung wasserbasierender Druckfarben und Lacke ist robust und industrietauglich. Seine Leistungsdaten bei der Einbringung von Energie in den Bedruckstoff entsprechen den Erwartungen und Absichten in diesem Projekt.

Bei Tuner und Kurzschlusschieber sollte für den Einsatz in der Praxis eine Einstellung leistungsbezogen vollautomatisch erfolgen, um das System arbeitsaufwandneutral für die Bediener an verschiedene Druckbedingungen kontinuierlich anzupassen.

Bis Mitte 2009 sind keine Feldversuche bei der Firma Interprint möglich, so dass die Überlegungen zu Effizienz des Systems sich auf Angaben des Trocknerherstellers (Trockner an der bei Interprint eingesetzt und für die Feldversuche geplanten Anlage) beziehen. Das darauf basierende Ergebnis ist positiv.

Seitens der Firma Fischer&Krecke (Bobst Group) wurde Interesse an dem System bekundet.

## Inhaltsverzeichnis

Projektkennblatt.....	2
1 Zusammenfassung .....	10
2 Einleitung .....	13
3 Aufbau der Mikrowellenanwendung.....	17
3.1 Hardware .....	17
1.1.1 Probleme bei der Inbetriebnahme .....	19
1.2 Software Komponente .....	20
2 Überlegungen zur Luftzufuhr des Mikrowellentrocknungssystems.....	24
2.1 Messungen zur Luftführung im Vorfeld.....	32
2.2 Kennlinie der Pumpe Piller Type MGHN 6-A.....	32
2.3 Gleichförmigkeit der aus den Bohrungen ausströmenden Luftmenge.....	34
2.4 Wärmeübergangszahl durch Luftspülung des Resonatorraums .....	35
3 Sicherheit .....	41
3.1 Allgemeine Sicherheitsbestimmungen .....	41
3.1.1 Skala der Belastung.....	42
3.1.2 Überblick über die Bereiche .....	42
3.1.2.1 Expositionsbereich 2 .....	42
3.1.2.2 Expositionsbereich 1 .....	42
3.1.2.3 Bereiche erhöhter Exposition .....	43
3.1.2.4 Gefahrbereich.....	43
3.1.3 Rechenbeispiele.....	43
3.1.3.1 Effektivwert.....	44
3.1.4 Auszug von relevanten Daten der Tabellen des BGV 11 für den 2,45 GHz Bereich	45
3.2 Biologische Einflüsse auf den Menschen .....	45
3.3 Schädigungen des Organismus.....	46
3.4 Messgerät für die Streustrahlung.....	46
3.5 Vergleich der Streustrahlungsmessungen Alter Trockner–Neuer Trockner .....	46
3.5.1 Alter Versuchsaufbau .....	47
3.5.2 Neuer Versuchsaufbau .....	48
3.5.3 Streustrahlungswerte.....	50
3.5.3.1 Strahlungswerte alter Trockner .....	50
3.5.3.2 Strahlungswerte neuer Trockner.....	51
3.5.4 Auswertung.....	51
4 Dämpfung durch Foamglas .....	53
4.1 Foamglas.....	53
4.2 Umgesetzte Versuche .....	54
4.2.2 Sprühlack .....	54
5 Messungen des relativen Wasserverlustes durch Veränderung des Luftdruckes.....	55
5.1 Messbedingungen.....	56
5.2 Ziele dieser Messungen .....	56
5.3 Verwendete Geräte und Materialien.....	56
5.4 Messergebnisse .....	57
5.5 Der relative Wasserverlust „ln(u)“ .....	58
6 Messungen des relativen Wasserverlustes durch Veränderung der Verweilzeit im Applikator.....	63
6.1 Versuchsaufbau .....	63
6.2 Durchführung der Wasserreduktionsmessung.....	64

6.2.1	Berechnung des $\ln(u)$ .....	64
6.3	Auswertung.....	67
7	Zusätzliche Bauelemente des MW-Trockners .....	69
7.1	Benutzte Geräte.....	70
7.2	Messbedingungen.....	70
7.3	Messgeometrie 1.....	70
7.3.1	Ergebnisse dieser Messungen.....	71
7.4	Messung 2.....	72
7.4.1	Ergebnisse dieser Messungen.....	72
8	Fazit .....	80
9	Energieeffizienz .....	82
9.1	Leistungsbestimmung Mikrowelle .....	82
9.1.1	Wirkleistung (P) .....	84
9.1.2	Blindleistung (Q) .....	84
9.1.3	Scheinleistung (S) .....	85
9.2	Auswertung.....	85
9.3	Leistungsberechnung Konvektionstrockner .....	86
9.4	Liste der Verbräuche .....	87
	Anhang.....	88

## Verzeichnis der Abbildungen, Diagramme und Tabellen

Abbildung 1: Aufbau d. Mikrowellenanwendung: Hardware 1 .....	17
Abbildung 2: Aufbau d. Mikrowellenanwendung: Hardware 2 .....	17
Abbildung 3: Interlockkreis + Stromrichtung .....	19
Abbildung 4: Wasserdurchlaufsmesser .....	20
Abbildung 5: Software: Screenshot 1 von 4 .....	21
Abbildung 6: Software: Screenshot 2 von 4 .....	22
Abbildung 7: Software: Screenshot 3 von 4 .....	22
Abbildung 8: Software: Screenshot 4 von 4 .....	23
Abbildung 9: Schema der Luftführung von der Pumpe zum Resonator .....	24
Abbildung 10: Aufbau zur Ermittlung der Kennlinie der Pumpe Piller Type MGHN 6-A .....	33
Abbildung 11: Aufbau zur Ermittlung des gleichförmigen Ausströmens der Spülluft aus den Düsen. Unten: Pumpe Piller Type MGHN 6-A; Oben an Wand: Resonatordummy mit Messvorrichtung .....	35
Abbildung 12: Maße/Messstellen zur Ermittlung der Wärmeübergangszahl (1: Länge Strecke im Resonatorraum; B: Breite IR-Strahlers) .....	39
Abbildung 13: Streustrahlungsmessungsaufbau [10] .....	47
Abbildung 14: Öffnung des Hohlleiters .....	48
Abbildung 15: Versuchsaufbau Neuer Trockner [11] .....	49
Abbildung 16: Luftzufuhr neuer Trockner und Kurzschlusschieber .....	49
Abbildung 17: 1kW Streustrahlung in $mW/cm^2$ (Spaltbreite 5mm) .....	50
Abbildung 18: 2kW Streustrahlung (alt) in $mW/cm^2$ (Spaltbreite 5mm) .....	50
Abbildung 19: Foamglas - Platten T 4-040 [3] .....	53
Abbildung 20: Lage des Mikrowellenapplikators und der Bedruckstoffbahn im Trocknungsabschnitt .....	55
Abbildung 21: Formzylinder mit Gravur [1] .....	63
Abbildung 22: Relativer Wasserverlust .....	67
Abbildung 23: Die bedruckte Papierbahn durchläuft den Wellenleiter mit Kurzschlusschieber, Lochblende und Tuner. ....	69
Abbildung 24: Einstellung des Tuner .....	71
Abbildung 25: Einstellung des Kurzschlusschiebers durch das Herein und Herausschieben in den Wellenleiter .....	71
Abbildung 26: Neuer Trockneraufbau .....	76
Abbildung 27: Leistungsmessung .....	82
Abbildung 28: Leistung [2] .....	84
Abbildung 29: Leistungsdreieck .....	85
Diagramm 1: Kennlinie der Pumpe Piller Type MGHN 6-A, Motorleistung 1,8 kW .....	33
Diagramm 2: Wärmeübergangszahl im Resonatorraum bei Bohrungsdurchmesser 2mm (2007) und 3mm (2008) für verschiedene Drücke der Luftversorgung. ....	40
Diagramm 1: Relativer Feuchtigkeitsverlust als Funktion der Wassermenge für zwei unterschiedliche Näpftiefen .....	60
<b>Diagramm 2:</b> Temperatur Änderung im Mikrowellentrockner .....	62
<b>Diagramm 3:</b> Die Streustrahlung in $mW/cm^2$ des geschlitzten Wellenleiters mit und ohne Foamglas für Luft, sowie trockenes und nasses Papier .....	74

Kennlinie 1: Zusammenhang zwischen Düsendurchmesser, Austrittsgeschwindigkeit (gemittelt auf kompletten Düsendurchmesser) und Volumenstrom für einen Luftkanal bei  $D_S = 30$  mm.29  
 Kennlinie 2: Zusammenhang zwischen Düsendurchmesser, Austrittsgeschwindigkeit (gemittelt auf kompletten Düsendurchmesser) und Volumenstrom für einen Luftkanal bei  $D_S = 40$  mm.30  
 Kennlinie 3: Zusammenhang zwischen Düsendurchmesser, Austrittsgeschwindigkeit (gemittelt auf kompletten Düsendurchmesser) und Volumenstrom für einen Luftkanal bei  $D_S = 50$  mm.30  
 Kennlinie 4: Zusammenhang zwischen Düsendurchmesser, Austrittsgeschwindigkeit (gemittelt auf kompletten Düsendurchmesser) und Volumenstrom für einen Luftkanal bei  $D_S = 60$  mm.31

Tabelle 1: Schema zur Ermittlung der Rohrreibungszahl (aus: Willi Bohl, Technische Strömungslehre) .....	27
Tabelle 2: Grenzwerte für die Frequenz von 2,45 GHz [7] .....	45
<b>Tabelle 3:</b> Wasserverluste im Mikrowellentrockner bei verschiedenen Luftdrücken und unter verschiedenen Bedingungen .....	58
Tabelle 4: Auswirkungen verschiedenster Drücke bei der Spülluft auf den relativen Feuchteverlust bei zwei praxistypischen Gravurtiefen .....	59
<b>Tabelle 5:</b> Temperaturänderungen der Bahn innerhalb des MW-Applikators .....	61
Tabelle 6: Mittelwert und Spannweite Wasserverlust .....	66
Tabelle 7: Ermittlung $\ln(u)$ .....	67
Tabelle 8: Leistung vorher und reflektiert als Funktion des Tuners (durch Auf- und Abbewegung der Schrauben im Wellenleiter) .....	72
Tabelle 9: Leistung vorher und reflektiert als Funktion des Tuners (durch Auf und Ab Bewegung der Schrauben im Wellenleiter) .....	73
Tabelle 10: Leistung vorher und reflektiert als Funktion des Tuners (durch Auf und Ab Bewegung der Schrauben im Wellenleiter) .....	73
Tabelle 11: eingebrachte und reflektierte Leistung als Funktion des Tuners und Kurzschlusschiebers .....	75
Tabelle 12: MW-Trockner Leistungsabnahme .....	83
Tabelle 13: Rechnung Leistungsmessung .....	87

### 1 Zusammenfassung

Das Ziel dieses Vorhabens ist die Beseitigung von Hemmnissen, die einem breiteren Einsatz von Wasserfarben im Flexo- und Tiefdruck entgegenstehen. In diesem Bereich finden häufig lösemittelverdünnte Farben Anwendung, die wegen des höheren Energiebedarfs bei der Farbtrocknung in Konvektionstrocknern sowie den Folgeerscheinungen einer dabei entstehenden zu hohen Papiertemperatur in der weiteren Verarbeitung in häufig nicht bevorzugt werden.

In diesem Projekt konnte, aufbauend auf einem im Rahmen eines Dissertationsvorhabens entstandenen Konzeptes, zu dem Ergebnisse aus einem experimentellen Mikrowellentrockner vorlagen, ein robuster, industrietauglicher Trockner konzeptioniert, gebaut und erprobt werden. Neben der Anlagenkonzeption und dem Bau erfolgten im Projekt eine Anzahl begleitender Untersuchungen und Berechnungen im Bereich Luftführung, Streustrahlung, Pumpenleistungsmessung, Wärmeübergangszahl und im Vorfeld an neuen Elementen (Tuner, Lochblende, Kurzschlusschieber) im Resonatorbereich.

Einzelergebnisse sind:

- Eine Verkleinerung der Schlitzes für die Zu-/Abfuhr der Bedruckstoffbahn in Verbindung mit einer Abschirmung zwischen den einzelnen Resonatoren durch Lochbleche und einer Abschirmung an Bahneinlauf und –auslauf aus dem Gesamtsystem durch sogenanntes Foamglas führte in allen vorkommenden Betriebszuständen zu einer Minimierung der Streustrahlung. In nächstmöglichem Messabstand zur Bahnein- und –austritt ist die Streustrahlung immer deutlich unter  $10 \text{ mW/cm}^2$ , meist unter  $5 \text{ mW/cm}^2$  bzw. an der Nachweisgrenze.

- Im Bereich der Luftführung konnte durch entsprechende Verbesserungen bei der Zufuhr und Verteilung der Luft (Weniger Schläuche mit Verzeigung erst am Spülluftkanal und insgesamt deutlich vergrößertem Schlauchdurchmesser) eine Verringerung der Widerstände und damit verbunden ausreichende Luftzufuhr auch unter Verwendung eines Gebläses mit geringerem Förderdruck erreicht werden.
- Die Wärmeübergangszahlen im Resonatorraum wurden durch ein selbst entwickeltes Verfahren ermittelt und zeigen gute Werte für eine Kühlung des Bedruckstoffes.
- Die Dimensionierung des Luftkanals rückseitig auf dem Resonatorrücken wurde hinsichtlich der Gleichmäßigkeit der ausströmenden Luft (Geschwindigkeit) mit einem experimentellen Aufbau eines Dummys geprüft. Dabei wurde über der gesamten Bahnbreite eine gleichmäßige Ausströmgeschwindigkeit auch unter ungünstigen Bedingungen (große Ausströmbohrungen) gezeigt.
- Im Resonatorbereich sind die neuen Elemente Lochblende, Tuner und Kurzschlusschieber geprüft und hinsichtlich ihrer Tauglichkeit für das Resonatorsystem bestätigt worden. Die erzielbaren Trocknungsleistungen entsprechen den Leistungen des experimentellen Systems, dass in der Dissertation von Herrn Dr. Ashraf Saad beschrieben ist. Vorteilhaft an dem neuen System ist die Möglichkeit, über den Kurzschlusschieber die Leistung des Trockners zu optimieren. Diese Optimierung ist jeweils abhängig von den druckseitigen Betriebsbedingungen (Bahngeschwindigkeit, Wassermenge auf der Bahn).
- Als Ergebnis aus den Untersuchungen des neu gestalteten Resonatorbereiches ergibt sich zum einfachen (Handhabung durch Drucker) und vor allem automatischen Betrieb, dass die Einstellung des Kurzschlusschieber in einer pra-

## Zusammenfassung

---

Projekt Mikrowellentrocknung – Saad/Urban/Eisberg – Druck- und Medientechnologie

---

xisnahen Anlage automatisch so erfolgen sollte, dass die vom System reflektierte Leistung jeweils minimiert wird.

Untersuchungen bei der Firma Interprint waren zur Projektlaufzeit leider nicht möglich, da die dortige Labordruckmaschine u.a. auch für Produktionen eingesetzt wird und zur Projektlaufzeit keine Zeitfenster für Untersuchungen eröffnet werden konnte. Aus den Untersuchungen an der BUW wurden aber die Ziele, nämlich den Beleg der erfolgreichen Funktion und Leistung im Mikrowellenteil der Trocknung, erreicht.

## 2 Einleitung

Die Ausgangssituation zu diesem Projekt ergab sich aus einer Dissertation an der Bergischen Universität Wuppertal zur Mikrowellentrocknung von wasserbasierten Druckfarben. Diese zeigte anhand eines experimentellen Mikrowellentrockners, dass es prinzipiell funktioniert, mit Mikrowellen unter gleichzeitiger Spülung/Kühlung mit Luft solche Druckfarben weitgehend zu trocknen, ohne das Papier nennenswert zu erwärmen.

Die Umweltsituation im Bereich der Drucktechnik ist insbesondere im Tief- und Flexodruck dadurch gekennzeichnet, dass aus Gründen der Trocknung häufig lösemittelhaltige Farben eingesetzt werden und Wasserfarben aufgrund der in normalen Konvektionstrocknern deutlich höheren Energieverbräuche nicht eingesetzt werden. Die ausgetriebenen Lösemittel wiederum müssen in entsprechenden Anlagen zur Abluftbehandlung entweder nachverbrannt oder über Aktivkohlefilter ausgewaschen werden. Letztere verursachen bspw. im Illustrationstiefdruck über die mittels Dampf erfolgende Filterwäsche zusätzlichen Energieaufwand.

Der Stand der Technik im Bereich der Mikrowellentrocknung von Druckfarben ist, dass auf dem Markt Geräte, die in der Technologie der Anlage aus der Dissertation Saad entsprechen bzw. dort beschrieben sind, nicht vorhanden sind. Dieser Stand der Technik beinhaltet:

- ein Resonatorsystem mit entsprechend hohen Feldstärken/hoher Leistung
- Eine Luftspülung des Resonatorraumes zur Kühlung der Bahn und zur Aufnahme/zum Abtransport des verdampften Wassers
- einen Phasenversatz um eine halbe Wellenlänge von je zwei aufeinander folgenden Resonatorsystemen zur Erzeugung einer über die Bahnbreite gleichmäßigen Leistungseinbringung mittels stehenden Wellen.

## Einleitung

Die Zielsetzung des Vorhabens besteht aus der Konstruktion und dem Bau eines Mikrowellentrockners in Industriequalität mit vier Resonatoren (je 2 um  $\lambda/2$  phasenversetzt) für Bahnbreiten von 0,6m und bis zu einer Bahngeschwindigkeit von 40 m/min, sowie dessen Erprobung. Dieser beinhaltet eine Trocknung in Kombination mit einer verbesserten Luftführung, die den Einsatz eines relativ leistungsarmen Gebläses anstelle der in der Dissertation Saad genutzten Druckluft erlaubt.

Diese Aufgabenstellung beinhaltet folgende Schritte:

Konstruktion, Bau und Einbau eines Mikrowellentrockners geeignet für eine Musterdruckmaschine mit 0,6 m Bahnbreite und bis 40 m/min Bahngeschwindigkeit.

Erprobung und Optimierung des Mikrowellentrockners

Die beiden Schritte in o.a. Aufzählung lassen sich grob auf die Projektpartner nach

Konstruktion und Bau (Muegge Electronic GmbH) und

Erprobung/Optimierung (Bergische Universität Wuppertal (BUW))

aufteilen, jedoch gibt es wechselweise Teilpakete/Vernetzungen.

Ebenfalls lässt sich eine grobe zeitliche Einteilung (ca.  $\frac{1}{2}$  der Zeit für Konstruktion und Aufbau und ca.  $\frac{1}{2}$  für Test und Optimierung) vornehmen.

Die Konstruktion und der Aufbau eines Mustertrockners umfasst die Bereiche Einkoppelsystem, Feldsimulation, Blendensystem, Kurzschlusschieber, Resonator, Luftführung und Sicherheitstechnik sowie die Netzteile. Dieses Arbeitspaket wird dominant von der Firma Muegge Electronic GmbH bearbeitet.

Es sind in diesem Arbeitspaket Zuarbeiten der BUW betreffend

Geometrie im Resonator (Verhältnis Höhe/Breite), Geometrie der Anordnung der Resonatoren hinsichtlich Bahnlauf/-führung, Belüftung im Applikator sowie der Handhabung in der Druckmaschine (hier vor allem: Handling Bedruckstoffbahn) erforderlich.

Die Erprobung und Optimierung des Mikrowellentrockners beinhaltet an einer alten Anlage, mit der die Vorversuche zu diesem Vorhaben stattfanden, Optimierungen in der Luftmenge und des Wärmeüberganges vorzunehmen um für die Inbetriebnahme der neu konstruierten Anlage einen Erfahrungsvorsprung zu erarbeiten. Weiterhin umfassen die Tests des neu konstruierten Trockners zunächst die Nutzung an der Labordruckmaschine der BUW, um einen Vergleich zur alten Anlage unter gleichen Druckrandbedingungen zu haben. Im Folgeschritt soll dann der Test und die Optimierung an der Labordruckmaschine der Firma Interprint unter den Rahmenbedingungen der dortigen Verfahrensspezifika erfolgen.

Im Bereich der Erprobung und Optimierung ist jeweils seitens der Firma Muegge Electronic GmbH anfallender Aufwand bei Einbau/Anbindung an bestehende Maschinen sowie, falls nach entsprechenden Messungen an der Bergischen Universität erforderlich, im Bereich der Sicherheitstechnik, insbesondere des Schutzes vor aus den Applikatoren austretender Mikrowellenstrahlung durch geeignete Einhausung zu leisten. Diese Aufwände fallen ggf. zweimal an (neue Anlage in BUW und Firma Interprint).

Die im Rahmen dieses Projektes zu bauende Anlage zeichnet sich gegenüber dem Stand der Technik durch eine anwendungsbezogene Optimierung der elektrischen Felder, eine Anpassung der Luftführung im Applikator nach Menge und Temperatur an die Mikrowellentrocknung sowie die Kombination mit der Konvektionstrocknung aus.

Die erzielbaren Vorteile liegen in deutlich höheren erreichbaren Druckgeschwindigkeiten und in der Selektivität der Trocknung – die Bedruckstoffbahn an den unbedruckten Stellen wird nicht nennenswert erwärmt und ist damit auch nicht den trocknungsbedingten Nachteilen ausgesetzt (wie etwa Schrumpfen durch Verlust der Papierfeuchte). Den Energieeinsatz betreffend ist die Ersparnis gegenüber einer Heißlufttrocknung vorhanden.

Der eigentlich die Umwelt positiv betreffende Effekt ergibt sich aus der Geschwindigkeitssteigerung – es sind Druck- und Trocknungsgeschwindigkeiten erreichbar, die die Konkurrenz zu Tief- und Flexodruckbereichen erlauben, in denen heute üblicherweise mit Lösemittel verdünnte Farben (70 – 80 % LM-Anteil) verarbeitet werden. Die energieaufwendige und/oder CO<sub>2</sub> erzeugende Nachbehandlung der Trocknerabluft zum Zwecke des Entfernen oder Verbrennen des Lösemittels würde sehr stark reduziert – gleichfalls die Belastung der Arbeitnehmer in solchen Druckereien mit Lösemitteln. Damit ist insgesamt mit einer verbreiterten Akzeptanz für wasserverdünnbare Farben zu rechnen.

### 3 Aufbau der Mikrowellenanwendung

Im Folgenden wird der Aufbau der Mikrowellenanwendung in der Universität Wuppertal erläutert. Die Hardware- und Softwarekomponenten werden vorgestellt, der Aufbau bzw. die Installation und die Inbetriebnahme wird dokumentiert.

#### 3.1 Hardware

In dem folgenden Abschnitt wird die Inbetriebnahme des Mikrowellentrockners MG 8000 G-110KL der Firma Muegge an der Bergischen Universität Wuppertal dokumentiert. Alle genannten Photographien befinden sich als CD-ROM im Anhang, ebenfalls eine Kurzanleitung des Aufbaus in Stichpunkten mit Lösungshilfen für erkannte, bei Inbetriebnahme aufgetretene Fragen



**Abbildung 1:** Aufbau d. Mikrowellenanwendung: Hardware 1



**Abbildung 2:** Aufbau d. Mikrowellenanwendung: Hardware 2

Die Labortiefdruckmaschine, der Schaltschrank und das zugehörige Laptop (nicht abgebildet) bilden die primären Elemente der Anlage.

Im ersten Schritt wurden die Tiefdruckmaschine und der Schaltschrank ausgerichtet. Danach sind die Hohlleiter mit den Luftkanälen verbunden und mit handelsüblichen Silikon fixiert und verdichtet worden (Baumarkt Silikon).

Anschließend fand die Montage und provisorische Ausrichtung der Hohlleiter für Laborzwecke unter zur Hilfenahme von Paletten und Holzstützen statt. Am Ausgang des Schaltschranks und den gleichzeitigen Verankerungspunkt für die Hohlleiter, wurden je Wellenleiter Teflonplatten installiert um eine Kontamination der Magnetronen durch Papierstaub oder jegliche andere Verschmutzung zu verhindern. Die Luftversorgung ist durch eine Pumpe Piller Typ MGHN 6-A realisiert worden. Die vier Wellenleiter sind durch Kunststoffrohre die in 3 cm Abstand Metallstreben beinhalten verbunden (Abbildung 31 „Luftzufuhr neuer Trockner und Kurzschlusschieber“). Eine ausreichende Luftversorgung ist wichtig, weil sich sonst Wasserdampf im Hohlleiter sammelt. Dieses hat eine höhere Streustrahlung und somit eine schlechtere Trocknung zur Folge (s. Kapitel Sicherheit).

Der Schaltschrank ist durch ein fünfadriges Starkstromkabel mit einem Querschnitt von 6 mm<sup>2</sup> durch einen Mitarbeiter des Facility-Management der Universität Wuppertal angeschlossen worden. Das Laptop und die Luftversorgung (4 mm<sup>2</sup>) sind in Eigenverantwortung an das Stromnetz gebracht worden.

Die Wasserversorgung bedurfte des Anschlusses eines Wasserhahnes von ½ Zoll und eines Schlauches von ½ Zoll (Besser ¾ Zoll), um die nötige Durchflussmenge von minimal 25 Liter pro Minute zu gewährleisten, damit die Magnetronen gekühlt und die gegebenenfalls reflektierte Strahlung und daraus entstandene Wärme abzuführen. Anschlüsse für die Wasserversorgung befinden sich an der rechten Seite des Schaltschranks und sind mit In und Out gekennzeichnet.

### 1.1.1 Probleme bei der Inbetriebnahme

Bei dem im vorherigen Abschnitt beschriebenen Aufbau sind folgende Probleme aufgetreten. Durch eine falsche Stromrichtung wurde der Interlockkreis 1 ausgelöst. Um diesen Fehler zu vermeiden, wurde der Schaltschrank wie folgt verbunden:

- L1 Schwarz
- L2 Grau
- L3 Braun
- N Blau
- PE Gelb/Grün



**Abbildung 3:** Interlockkreis + Stromrichtung

Der Fehler der falschen Stromrichtung kann ausgeschlossen werden, indem kontrolliert wird, ob die Diode in der Abbildung 3 bei A 4 orange leuchtet. Ist dies der Fall so ist das Kabel richtig angeschlossen worden. Die Stromkreise des Interlocks 1 und 2 müssen überbrückt werden, indem man mit zwei kurzen Kabeln eines beliebigen Querschnitts die Kreise 1 und 6 sowie 3 und 8 miteinander verbindet.

Bei industriellen Anwendungen werden die beschriebenen Interlock-Kreise für den Anschluss an den Notstop-Kreis bzw. eines beliebig anderen Interlock-Kreises der Tiefdruckmaschine gebraucht. Bei Maschinenstillstand oder Öffnen einer zugesperrten Tür wird dieser ausgelöst und die Mikrowelle abgeschaltet.

Dies geschieht zum Schutz der Mitarbeiter, und zur Vermeidung von Papierbahnbränden.



Abbildung 4: Wasserdurchlaufsmesser

Das zweite Problem stellte die Wasserversorgung dar. Der Schwimmer zur Kontrolle des Wasserflusses hierfür klemmte zeitweise. Dieses ließe sich jedoch durch eine ausreichend dimensionierte Wasserleitung von  $\frac{3}{4}$  Zoll beheben. Bei wiederholtem Klemmen sollte das Wasser des Kreislaufes komplett abgelassen und wieder aufgefüllt werden. Ebenfalls ist die Verwendung eines Filters im Zulauf ratsam. Zu beachten ist, dass die Wassermenge auch abhängig von der Länge der Zuleitung ist.

### 1.2 Software Komponente

Bis hierher wurde die Hardware-Komponente des Mikrowellentrockners beschrieben. Im Folgenden wird die Inbetriebnahme der Software, und deren Bedienung geschildert. Dies wird durch eine Auswahl an Screenshots unterstützt.

Als ersten Schritt wurde die Software von einer CD auf einen Windows Vista basierenden Rechner installiert. Laut der Anleitung der Firma Muegge sind auch alle anderen Microsoft-Windows-Vorgänger geeignet. Das Programm bedarf keiner großen Ressourcen und kann mit jedem heute gängigen Rechner betrieben werden. Nach der Installation kann das Programm über

Windows → Start → Programme → Muegge

geöffnet werden. Vorher muss der Dongle über eine USB Schnittstelle mit dem Schaltschrank und dem Laptop verbunden werden, da die Funktion des Pro-

gramms sonst nicht gewährleistet ist. Nachdem das Programm geöffnet ist muss der CAN-Bus initialisiert werden. Es erscheinen rechts im Fenster eine Reihe von Zahlen. Nun werden der Reset- und der Standby-Schalter in der genannten Reihenfolge betätigt. Durch den Reset Knopf wird die Fehlermeldung 196 entfernt, es erscheint 000. Das System ist jetzt fehlerfrei.

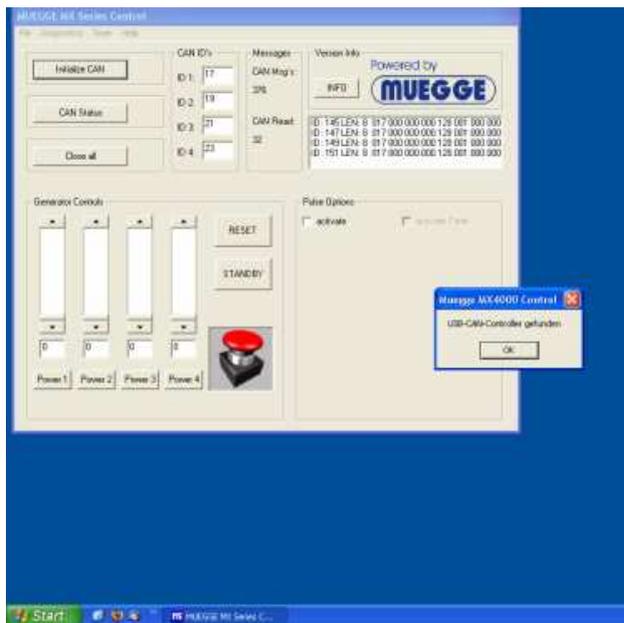


Abbildung 5: Software: Screenshot 1 von 4

Die Magnetronköpfe heizen sich durch das Drücken des Standby-Schalters auf. Nun wählt man in der oberen Leiste das Feld Diagnostik an und klickt auf eine der Auswahlmöglichkeiten: Status Generator 1 - 4.

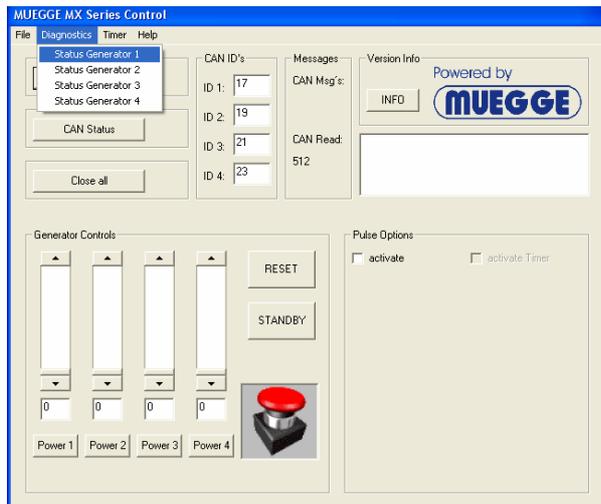


Abbildung 6: Software: Screenshot 2 von 4

Dieser Vorgang wird wiederholt, bis alle vier Statusleisten geöffnet sind. Nun kann die Leistung unten links eingestellt werden, entweder durch bewegen des Schiebers oder durch Eingeben von Werten im Bereich von 0 bis 2000 W.

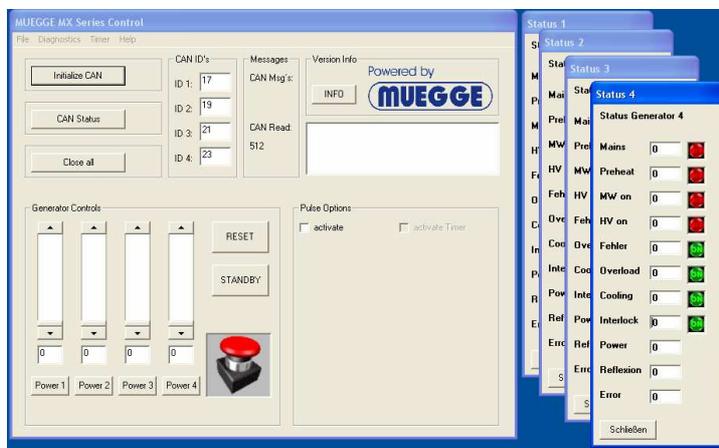


Abbildung 7: Software: Screenshot 3 von 4

Bei Werten über 2000 W erscheint automatisch das Maximum von 2000 W. Der letzte Schritt ist das Drücken des Power Buttons, der für jedes Magnetron einzeln betätigt werden muss. Die Papierbahn muss während dessen schon laufen, da sie ansonsten durchbrennt. Beim Arbeiten der Magnetrone werden die beiden Werte, Leistung und Reflexion, in den Diagnostik Feldern angezeigt.

Diese Reflexionswerte müssen nun auf den Wert Null gebracht werden. Hierzu muss man die Kurzschlusschieber verschieben. Sie befinden sich am Ende des jeweiligen Hohlleiters und besitzen einen schwarzen Knauf.

Als letzten Punkt ist die wohl wichtigste Schafffläche zu benennen, der rote Notschalter. Durch das Betätigen dieses Schalters werden alle Magnetrone direkt ausgeschaltet. Um das komplette Programm zu schließen müssen Sie nur den Button „close all“ drücken. Bei jeglicher Art von Fehlermeldung wird der Fehlercode in demselben Fenster angezeigt, in dem anfangs 196 und nach Betätigen des Reset Buttons wieder die 000 steht. Durch die dreistelligen Zahlen wird der jeweilige Fehlercode ausgedrückt. Den jeweiligen Fehler kann man unter [Help](#) → [Fehler](#) nachschauen. Nach Beseitigen des Fehlers werden der Reset- und dann der Standby-Button gedrückt. Nun wird die Leistung eingestellt und Power gedrückt. Der Power-Knopf wird erst betätigt, wenn die Papierbahn in Bewegung ist. Die bereits erwähnten Verkohlungen der Papierbahn wird so vermieden.

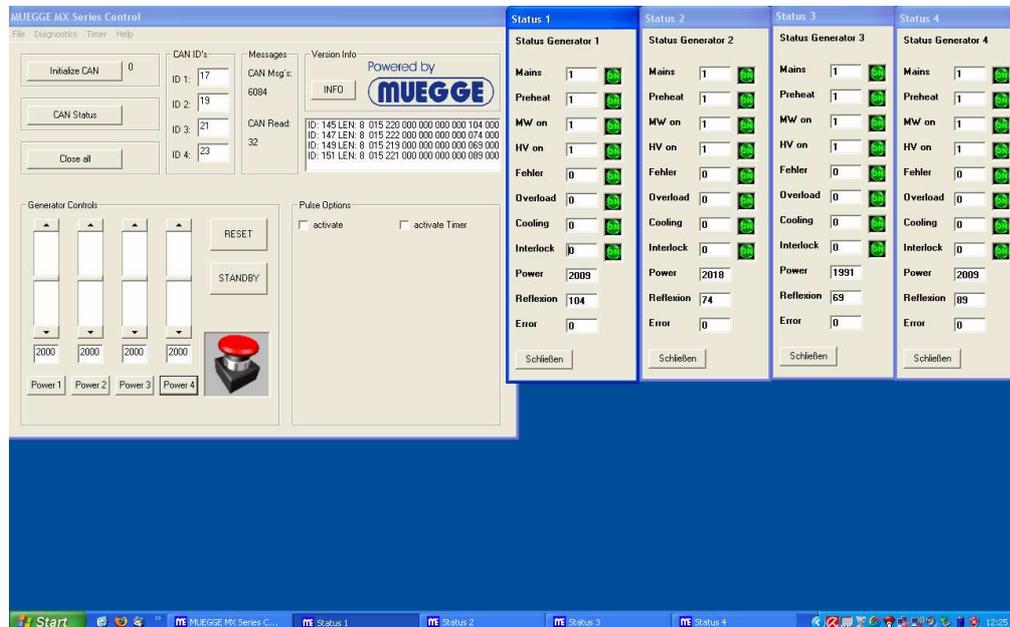


Abbildung 8: Software: Screenshot 4 von 4

## 2 Überlegungen zur Luftzufuhr des Mikrowellentrocknungssystems

Der zu entwickelnde Labormikrowellentrockner benötigt zusätzlich zum Mikrowellenteil (Energieeinbringung über insgesamt 4, jeweils paarweise phasenversetzt laufende/platzierte Resonatoren) eine Luftzu- und -abfuhr, mit der die Temperierung der Bahn und vor allem die Aufnahme und der Abtransport des aus der Farbe ausgetriebenen Wassers bewerkstelligt wird.

Im Folgenden wird zunächst überschlägig versucht, mit Mitteln aus der Berechnung von Rohrströmungen das Verhalten des Luft führenden Teils abzuschätzen. Als Randbedingung findet dabei eine aufgenommene Kennlinie der für die Luftversorgung geplanten Pumpe (Radialgebläse) in die Betrachtungen Eingang.

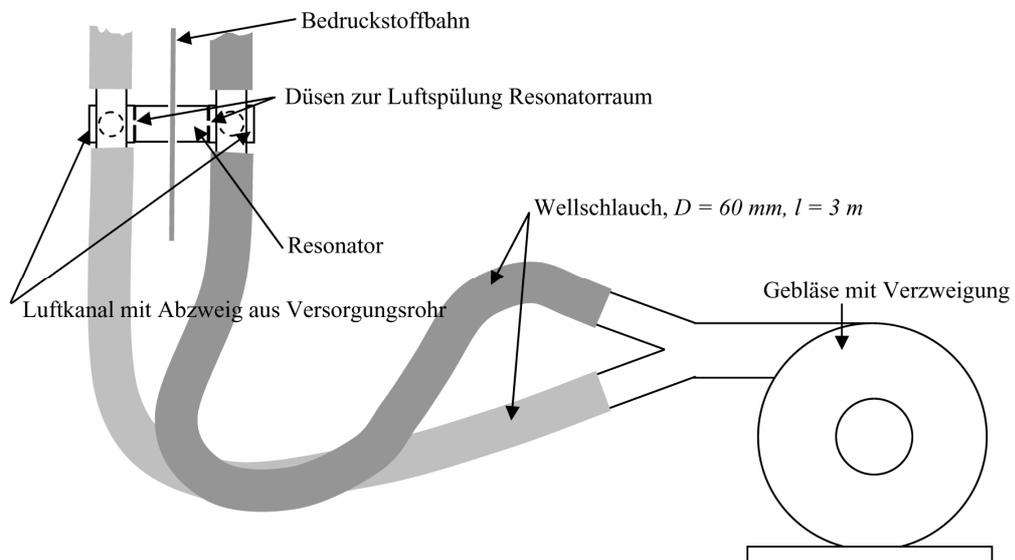


Abbildung 9: Schema der Luftführung von der Pumpe zum Resonator

Die Pumpe ist in der Lage, über einen Bereich von 0 bis ca. 0,21 m<sup>3</sup>/s eine Druckdifferenz zum Umgebungsdruck von 3500 Pa aufrechtzuerhalten. Dem steht der Druckabfall des Luftführungssystems für verschiedene Volumenströme als Kennlinie gegenüber.

Zur Einschätzung dieses Druckabfalls werden folgende vereinfachende Annahmen gemacht:

Hosenrohr zur Verzweigung des Pumpenausgangs auf zwei Rohre mit je  $D = 60$  mm, von denen mit Wellschläuchen die Weiterleitung zu den Luftkanälen auf den Resonatorrücken erfolgt.

Es wird generell von einer turbulenten Strömung ausgegangen.

Der Übergang in einen einzelnen Schlauch wird als Rohreinlauf wie folgt aufgefasst:

$$\Delta p = \zeta \cdot \frac{\rho_L}{2} \cdot w_q^2 \quad \text{mit}$$

$\zeta$ : Widerstandsbeiwert (Verzweigung in Hosenrohr: 0,25)

$\rho_L$ : Dichte Luft (1,29 kg/m<sup>3</sup>)

$w_q$ : mittlere Strömungsgeschwindigkeit im Querschnitt

Die mittlere Geschwindigkeit im Querschnitt eines Schlauches ergibt sich aus dem Volumenstrom  $dV/dt$  und dem Rohr-/Schlauchdurchmesser  $D_S$  zu:

$$w_q = \frac{\dot{V}_{PUMPE}}{2 \cdot \left(\frac{D_S}{2}\right)^2 \cdot \pi}$$

Der Transport zum Luftkanal auf dem Resonatorrücken erfolgt entweder über einen Schlauch (Alu-Wellschlauch oder „Spiralschlauch“) oder ein glattes Rohr mit

- $k$ : Rauigkeit Rohrwand
- $l_S$ : Schlauch-/Rohrlänge
- $D_S$ : Schlauch-/Rohrdurchmesser

und unter Einberechnung von zwei 90°-Krümmern im Leitungsverlauf zur Abbildung der zunächst nicht klaren Verlegung/Führung des Schlauches zwischen Pumpe und Verbraucher.

Der Druckabfall im geraden Schlauch/Rohr berechnet sich zu

$$\Delta p = \lambda \cdot \frac{l_S}{D_S} \cdot \frac{\rho_L}{2} \cdot w_q^2$$

Mit der Rohrreibungszahl  $\lambda$ . Die Krümmen werden später gesondert betrachtet.

Die Rohrreibungszahl ist abhängig von der Glätte bzw. Rauigkeit  $k$  der Rohr-/Schlauchinnenseite. Die Berechnung unterscheidet zwischen hydraulisch rauen und glatten Rohren sowie Rohren im Übergangsbereich. Die Unterscheidung wird danach getroffen, ob die Grenzschichtdicke an der Rohrwand größer ist als die Rauigkeit oder deutlich kleiner oder im Übergang.

## Überlegungen zur Luftzufuhr des Mikrowellentrocknungssystems

Die Abgrenzung der drei Bereiche und die jeweiligen Formeln zur Berechnung der Rohrreibungszahl zeigt u. a. Tabelle 1.

In einigen Formeln muss  $\lambda$  iterativ bestimmt werden.

Hydraulisch glatte Rohre	Hydraulisch raue Rohre	Rohre im Übergangsbereich
$Re \cdot \frac{k}{D_s} < 65$	$Re \cdot \frac{k}{D_s} > 1300$	$65 < Re \cdot \frac{k}{D_s} < 1300$
<p>Formel von Blasius für <math>2320 &lt; Re &lt; 10^5</math></p> $\lambda = 0.3164 \cdot Re^{-0.25}$ <p>Formel von Nikuradse für <math>10^5 &lt; Re &lt; 10^6</math></p> $\lambda = 0.0032 + 0.221 \cdot Re^{-0.237}$ <p>Formel von Prandtl und v. Kármán für <math>Re &gt; 10^6</math></p> $\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \cdot \log(Re \cdot \sqrt{\lambda}) - 0.8$	<p>Formel von Nikuradse</p> $\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \cdot \log \frac{D_s}{k} + 1.14$	<p>Formel von Prandtl und Colebrook</p> $\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \cdot \log \left[ \frac{2.51}{Re \cdot \sqrt{\lambda}} + \frac{k}{D_s} \cdot 0.269 \right]$

**Tabelle 1:** Schema zur Ermittlung der Rohrreibungszahl (aus: Willi Bohl, Technische Strömungslehre)

Die Widerstandszahl für den Krümmer setzt sich jeweils aus einem Anteil für Reibung und einem Anteil für die Krümmung zusammen. Der Anteil für Reibung  $\xi_{Re}$  ist abhängig von der Reynoldszahl  $Re$  und der Anteil für die Krüm-

zung  $\xi_K$  ist abhängig von Glätte/Rauhigkeit des Rohrs sowie dem Verhältnis von Krümmungsradius und Rohrdurchmesser. Beide werden jeweils den für eine Programmierung digitalisierten Graphen aus [Willi Bohl, Technische Strömungslehre] entnommen und multiplikativ zu einem Gesamtwiderstandswert zusammengefasst. Der Druckabfall für einen Krümmer errechnet sich analog zu o. a. Fällen zu

$$\Delta p = \zeta_{\text{Re}} \cdot \zeta_K \cdot \frac{\rho_L}{2} \cdot w_q^2$$

Fasst man den Einlauf in den Luftkanal als plötzliche Querschnittsänderung auf, so kann die Widerstandszahl mittels der Querschnitte  $A_1$  vor und  $A_2$  nach der Querschnittsänderung ausgedrückt werden und man kann mit der Geschwindigkeit in dem neuen Querschnitt  $w_2$  die Druckdifferenz  $\Delta p$  berechnen. Für das Rohr wird mit einem Durchmesser von  $30\text{mm}$  gerechnet und für den Querschnitt des Luftkanals wird mit  $40\text{mm} \cdot 43\text{mm}$  gerechnet.

$$\Delta p = \left( \frac{A_2}{A_1} - 1 \right)^2 \cdot \frac{\rho_L}{2} \cdot w_2^2$$

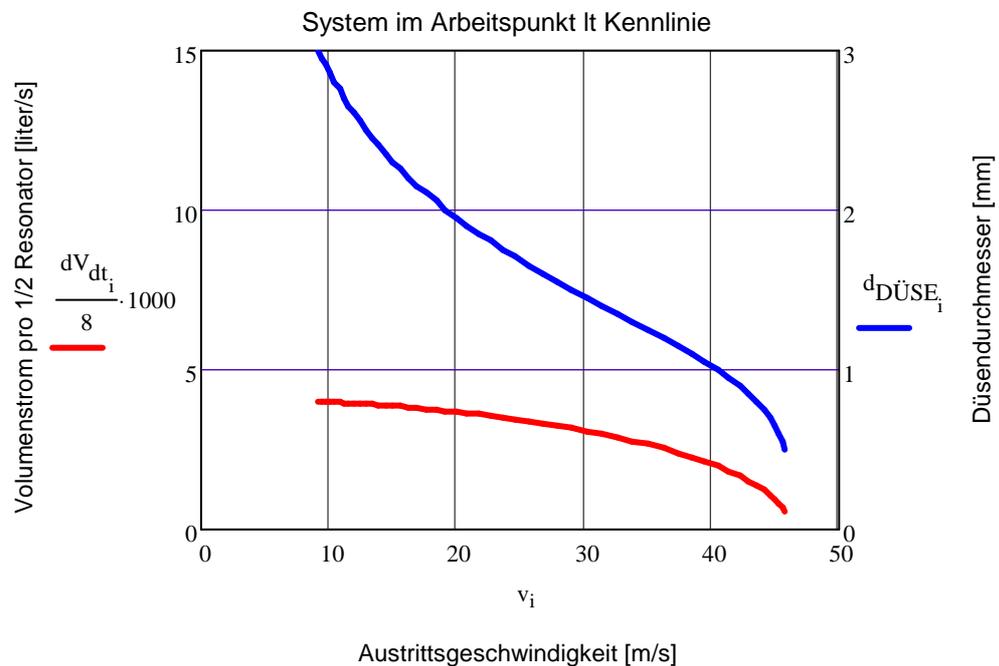
Für das Ausströmen aus dem Luftkanal in den Resonator wird von 61 Bohrungen mit einem Durchmesser  $d_s$  ausgegangen. Für das Ausströmen durch Bohrungen aus einem Behälter unter Überdruck wird mit den Ansatz

$$\Delta p = \left[ \frac{4 \cdot \frac{1}{61} \cdot \dot{V}}{\mu \cdot d_s^2 \cdot \pi} \right]^2 \cdot \frac{\rho_L}{2}$$

der Druckverlust unter Annahme identischer Ausströmgeschwindigkeiten in allen Bohrungen und einer Widerstandszahl von  $\mu = 0.63$  (Werte nach Bohl  $\mu = 0.58..0.63$ ) gerechnet.

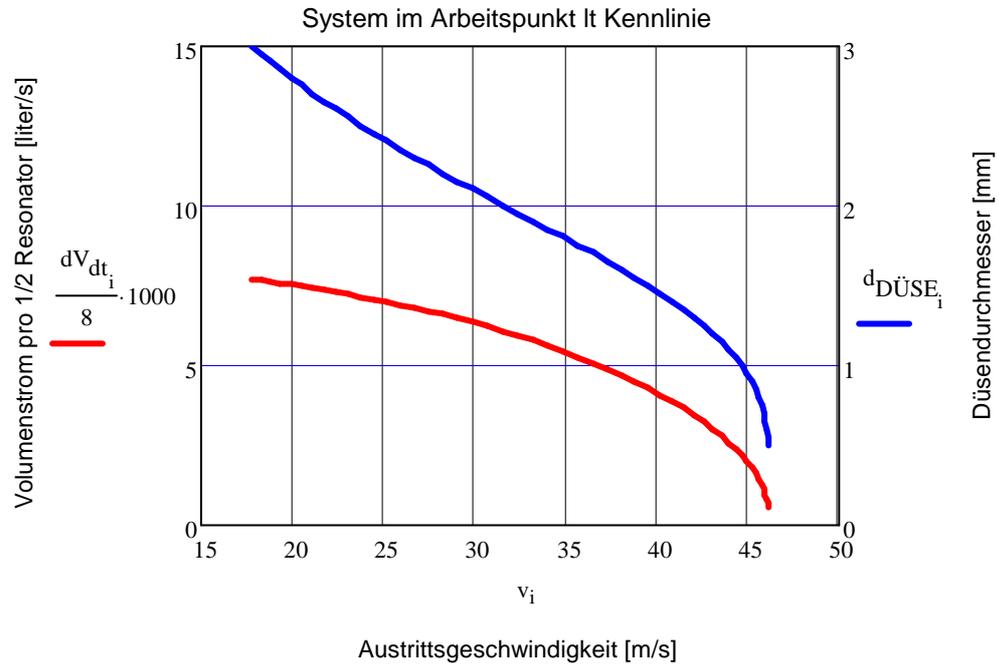
Der Gesamtdruckverlust an dem System ergibt sich aus der Addition aller Einzeldruckverluste, wobei bei den Krümmern deren Anzahl jeweils zu berücksichtigen ist.

Für zwei Krümmen mit  $90^\circ$  Krümmungswinkel und einem Krümmungsradius von  $3 \cdot d_s$  lassen sich für den linearen Teil der Pumpenkennlinie (3500 Pa) folgende Kennlinien 1 bis 4 für vier Schlauchdurchmesser (30mm bis 60mm) zur Charakterisierung der Luftmenge und der Einströmgeschwindigkeit durch die Bohrungen in den Resonator errechnen.

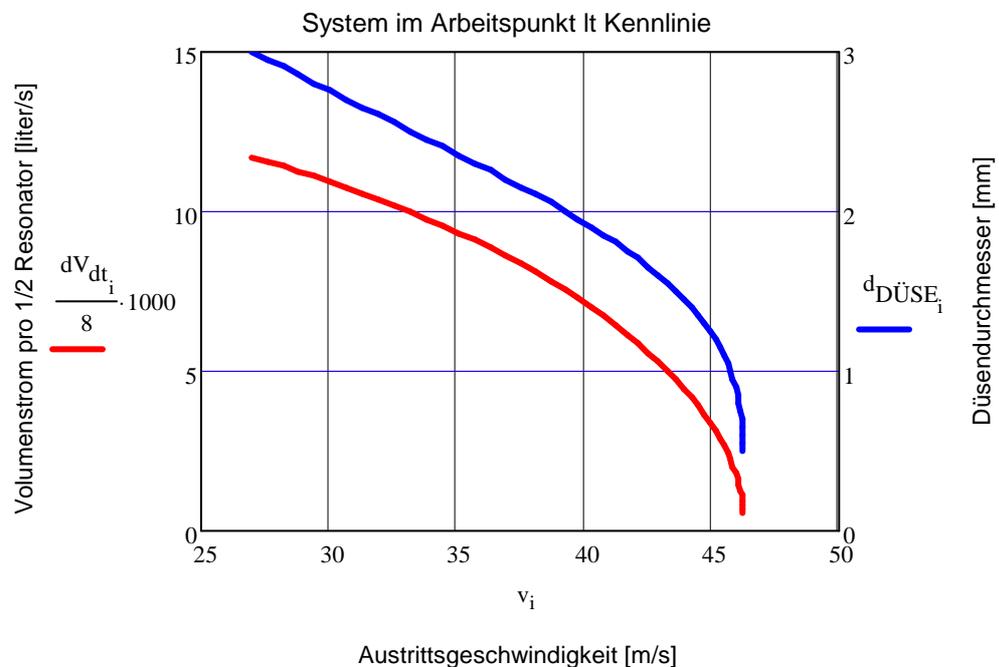


**Kennlinie 1:** Zusammenhang zwischen Düsendurchmesser, Austrittsgeschwindigkeit (gemittelt auf kompletten Düsendurchmesser) und Volumenstrom für einen Luftkanal bei  $D_s = 30$  mm.

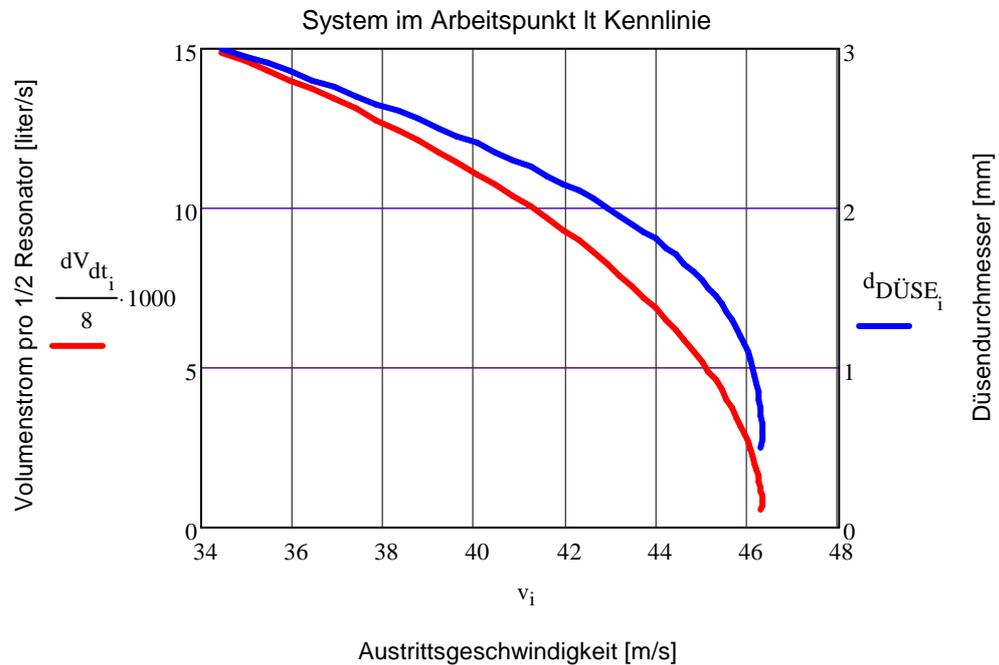
# Überlegungen zur Luftzufuhr des Mikrowellentrocknungssystems



**Kennlinie 2:** Zusammenhang zwischen Düsendurchmesser, Austrittsgeschwindigkeit (gemittelt auf kompletten Düsendurchmesser) und Volumenstrom für einen Luftkanal bei  $D_s = 40 \text{ mm}$ .



**Kennlinie 3:** Zusammenhang zwischen Düsendurchmesser, Austrittsgeschwindigkeit (gemittelt auf kompletten Düsendurchmesser) und Volumenstrom für einen Luftkanal bei  $D_s = 50 \text{ mm}$ .



**Kennlinie 4:** Zusammenhang zwischen Düsendurchmesser, Austrittsgeschwindigkeit (gemittelt auf kompletten Düsendurchmesser) und Volumenstrom für einen Luftkanal bei  $D_S = 60$  mm.

Die Kennlinien wurde mit folgenden Daten gerechnet:

$D_S$ :            30, 40, 50, 60 mm (Schlauchdurchmesser)  
 $k$ :                3 mm (Annahme für Welschlauch)  
 $l_S$ :              3 m (Schlauchlänge)

### 2.1 Messungen zur Luftführung im Vorfeld

Voruntersuchungen zur Luftführung umfassen:

- Kennlinie der für die Industrieanlage beabsichtigten Pumpe
- Gleichförmigkeit der aus den Bohrungen des rückseitigen Resonatorluftkanals in den Resonatorraum einströmenden Luftmenge (Druckabfall im Luftkanal?)
- Ermittlung der Wärmeübergangszahl im Resonatorraum

### 2.2 Kennlinie der Pumpe Piller Type MGHN 6-A

Die Pumpenkennlinie der an der für die Anlage geplanten Pumpe wurde durch stückweise ausgangsseitige Öffnung, beginnend mit einer Öffnung Null, ermittelt. Im Ansaugteil wurde ein ca. 1,5 m langes glattes Rohr mit zum Pumpeneingang identischen Durchmesser angeschlossen und die Luftgeschwindigkeit in der Rohrmitte zur Ermittlung einer mittleren Geschwindigkeit an verschiedenen Stellen im Querschnitt mit einem Flügelradanemometer gemessen. Die Querschnittsänderung durch das Anemometer bzw. der Eingriff in das System durch den Messvorgang wird vernachlässigt.

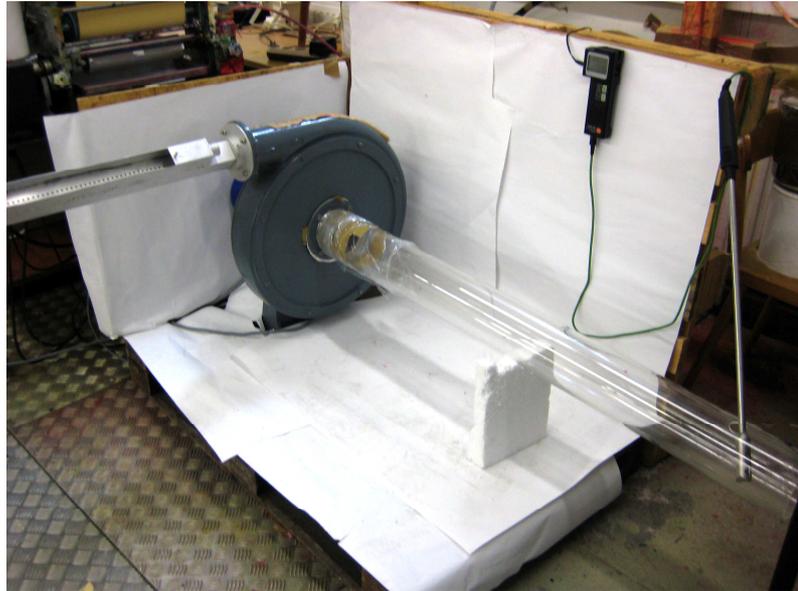


Abbildung 10: Aufbau zur Ermittlung der Kennlinie der Pumpe Piller Type MGHN 6-A

Es ergibt sich aus den gemessenen Geschwindigkeiten in Verbindung mit den Druckmessungen folgendes die Pumpe kennzeichnende Diagramm, welches Gegenstand der o. a. Überlegungen zum Systemverhalten im Arbeitspunkt ist.

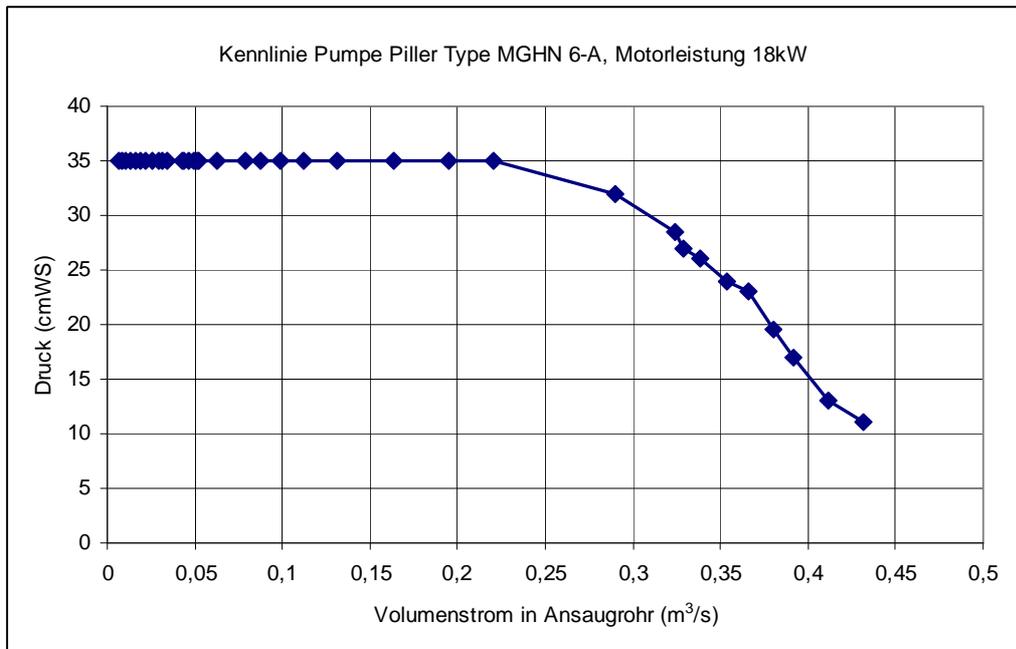
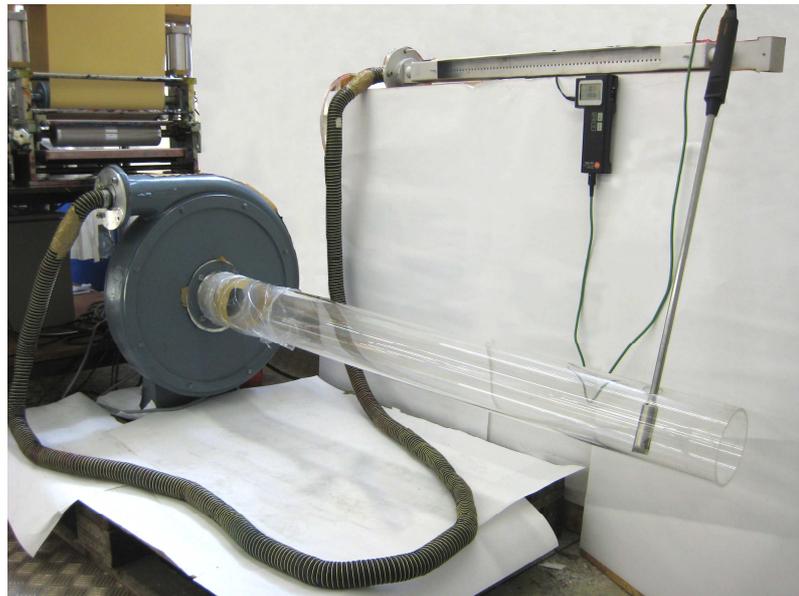


Diagramm 1: Kennlinie der Pumpe Piller Type MGHN 6-A, Motorleistung 1,8 kW

Es wird deutlich, dass die Pumpe bis zu einem Volumenstrom von  $0,21 \text{ m}^3/\text{s}$  bzw.  $210 \text{ ltr/s}$  keinen Druckabfall aufweist. Der Volumenstrom verbrauchsseitig pro Luftkanal auf dem Resonatorrücken liegt unterhalb von  $20 \text{ ltr/s}$ , sodass für insgesamt 4 Resonatoren á 2 Luftkanäle immer der maximal mögliche Druck von  $3500 \text{ Pa}$  (entspricht  $35 \text{ cm WS}$ ) anliegt, der zur Ermittlung von Kennlinie 1 bis 4 diene.

### 2.3 Gleichförmigkeit der aus den Bohrungen ausströmenden Luftmenge

Zur Absicherung der Gleichförmigkeit des aus den Bohrungen austretenden Luftstromes wurde ein rechteckiger Luftkanal hergestellt und mit Bohrungen versehen. Die Bohrungen haben einen Abstand von  $1 \text{ cm}$  (wie für die Anlage bei Interprint geplant), jedoch einen auf  $3 \text{ mm}$  (anstatt  $2 \text{ mm}$  wie für die Anlage bei Interprint geplant) vergrößerten Durchmesser. Weiterhin weist der Kanal einen Querschnitt von  $40 \text{ mm} \cdot 43 \text{ mm}$  auf, ist also nicht größer, als der geplante Kanal. Es wurden mit dem Anemometer in definiertem Abstand/definierter Lage (durch eine gebaute Hilfsvorrichtung gewährleistet) zu den Bohrungen über den gesamten Querschnitt Messungen der durch den Austritt aus den Düsen verursachten Luftgeschwindigkeit gemacht. Die Ergebnisse zeigten keine Anzeichen für einen Druckabfall im Kanal. Da der Kanal nicht größer ist, als der für die Anlage bei Interprint beabsichtigte, die Bohrungen jedoch größer sind, ist mit Sicherheit von einer über die Breite gleichmäßigen Belüftung des Resonatorraumes bei der gefertigten Anlage auszugehen.



**Abbildung 11:** Aufbau zur Ermittlung des gleichförmigen Ausströmens der Spülluft aus den Düsen. Unten: Pumpe Piller Type MGHN 6-A; Oben an Wand: Resonatordummy mit Messvorrichtung

### 2.4 Wärmeübergangszahl durch Luftspülung des Resonatorraums

Zur Ermittlung der Wärmeübergangszahl im Resonatorraum wurde zunächst für die alte Einrichtung der Versuchsaufbau um einen IR-Strahler bestimmter Leistung zur Bahnaufheizung ergänzt. Beim Bahnlauf erfolgt zunächst außerhalb des Resonators, durch den vorgeschalteten IR-Strahler, eine Aufheizung der Bahn, die anschließend im Resonator durch Luftzufuhr über die Düsen abgekühlt wird.

Der Zusammenhang zwischen in ein Material eingebrachter Wärmemenge und der sich daraus ergebenden Temperaturänderung lautet:

$$Q = c_p \cdot m \cdot \Delta T \quad \text{mit}$$

## Überlegungen zur Luftzufuhr des Mikrowellentrocknungssystems

- $Q$ : Wärmemenge [kJ]  
 $c_p$ : spezifische Wärmekapazität [kJ/kg/K]  
 $m$ : Masse [kg]  
 $\Delta T$ : Temperaturänderung des Körpers [K]

Der Wärmeverlust aus einer Bahn bei gegebener Temperaturdifferenz ergibt sich zu:

$$Q = \alpha \cdot A \cdot \Delta T \cdot \Delta t \quad \text{mit}$$

- $Q$ : Wärmemenge [kJ]  
 $\alpha$ : Wärmeübergangszahl [kW/m<sup>2</sup>/K]  
 $A$ : Fläche [m<sup>2</sup>]  
 $\Delta T$ : Temperaturdifferenz zwischen Körper und Umgebung [K]  
 $\Delta t$ : Zeitintervall [s]  
 $T_L$ : Temperatur der Luft im Resonator [K]

Für den Abkühlvorgang können die beiden Wärmemengen gleichgesetzt werden. Bei Betrachtung eines Zeitintervalls  $dt$  gilt:

$$c_p \cdot m \cdot (T(t) - T(t + dt)) = \alpha \cdot A \cdot (T(t) - T_L) \cdot dt$$

Umstellen ergibt:

$$c_p \cdot m \cdot T(t) - \alpha \cdot A \cdot (T(t) - T_L) \cdot dt = c_p \cdot m \cdot T(t + dt)$$

Mit  $T(t + dt) = T(t) + dT$  folgt

$$c_p \cdot m \cdot T(t) - \alpha \cdot A \cdot (T(t) - T_L) \cdot dt = c_p \cdot m \cdot T(t) + c_p \cdot m \cdot dT$$

Auflösen nach  $dT$  liefert:

$$-\frac{\alpha \cdot A}{c_p \cdot m} (T - T_L) \cdot dt = dT$$

Division durch  $(T - T_L)$  und Integration ergibt die Integrale

$$-\frac{\alpha \cdot A}{c_p \cdot m} \int_{t_1}^{t_2} dt = \int_{T_1}^{T_2} \frac{dT}{(T - T_L)}$$

Integration und Einsetzen der Grenzen führt auf

$$-\frac{\alpha \cdot A}{c_p \cdot m} (t_2 - t_1) = \ln(T_2 - T_L) - \ln(T_1 - T_L) = \ln \frac{T_2 - T_L}{T_1 - T_L}$$

Das Zeitintervall  $(t_2 - t_1)$  ergibt sich aus der Bahngeschwindigkeit  $v_B$  und der Abkühlstrecke  $l$ , so dass man schließlich erhält:

$$-\frac{\alpha \cdot A}{c_p \cdot m} \cdot \frac{l}{v_B} = \ln \frac{T_2 - T_L}{T_1 - T_L}$$

Auflösen nach  $\alpha$  und Ersetzen von  $m = \rho \cdot A$  ergibt für  $\alpha$ :

$$\alpha = -\frac{c_p \cdot \rho \cdot v_B}{l} \cdot \ln \frac{T_2 - T_L}{T_1 - T_L}$$

Die Aufheizung kann mittels der in den Bedruckstoff eingebrachten Leistung  $P$  beschrieben werden:

$$P = \frac{Q}{\Delta t} = \frac{c_p \cdot m \cdot \Delta T}{\Delta t}$$

Mit Dichte/flächenbezogener Masse  $\rho$ , Bahnbreite  $B$  und dem Zeitintervall  $\Delta t$ , in dem die Bahn erwärmt wird, ergibt sich  $m$  zu

$$m = \rho \cdot B \cdot v_B \cdot \Delta t$$

Mit der Eingangstemperatur  $T_E$  und der Ausgangstemperatur  $T_A$  erhält man

$$P = \frac{c_p \cdot \rho \cdot B \cdot v_B \cdot \Delta t}{\Delta t} \cdot (T_A - T_E)$$

Kürzen von  $\Delta t$  und Auflösen nach  $c_p$  ergibt

$$c_p = \frac{P}{\rho \cdot B \cdot v_B \cdot (T_A - T_E)}$$

Setzt man diesen Ausdruck in die Beziehung zur Bestimmung von  $\alpha$  ein, erhält man

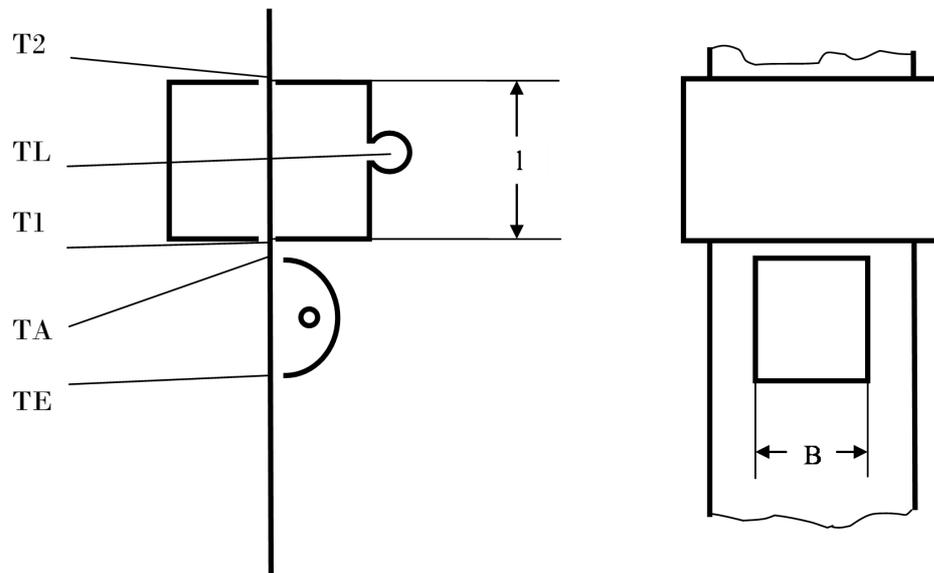
$$\alpha = -\frac{\rho \cdot v_B}{l} \cdot \frac{P}{\rho \cdot B \cdot v_B \cdot (T_A - T_E)} \cdot \ln \frac{T_2 - T_L}{T_1 - T_L}$$

Nach Kürzen von  $\rho$  und  $v_B$  bleibt

$$\alpha = \frac{-P}{l \cdot B \cdot (T_A - T_E)} \cdot \ln \frac{T_2 - T_L}{T_1 - T_L}$$

Dieser Ausdruck ist vorteilhaft, weil das unbekannte  $c_p$  des Bedruckstoffes unbekannt bleiben darf.

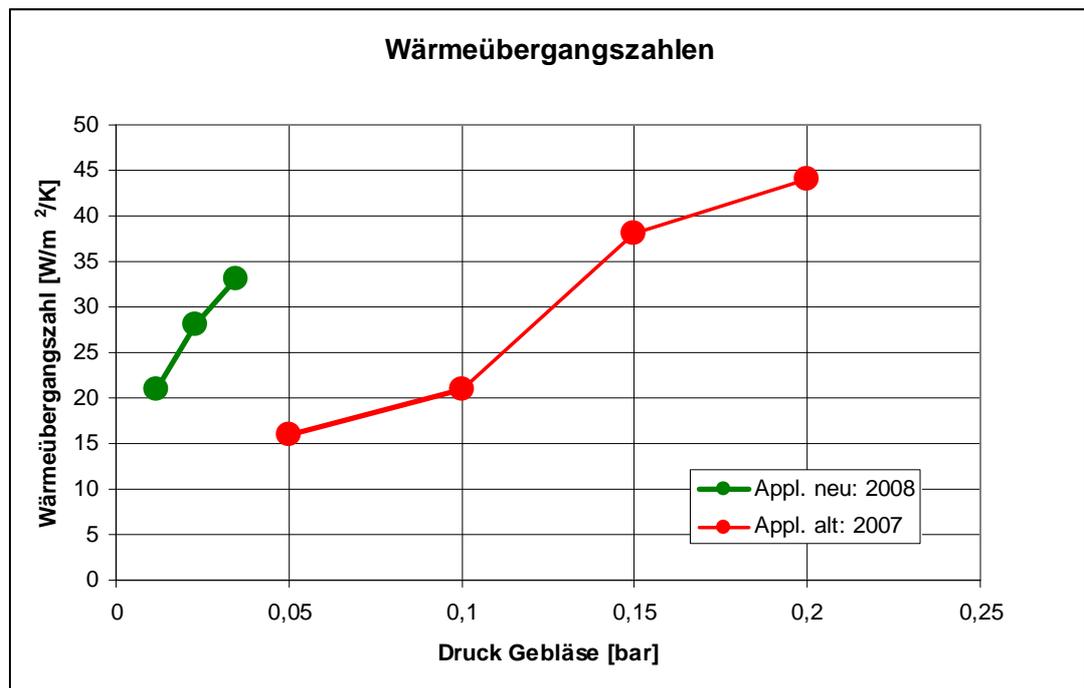
Die folgende Skizze verdeutlicht noch einmal den Versuchsaufbau und die Messstellen bzw. die o. a. Variablen.



**Abbildung 12:** Maße/Messstellen zur Ermittlung der Wärmeübergangszahl (1: Länge Strecke im Resonatorraum; B: Breite IR-Strahlers)

In der Praxis wird wegen der Messfleckgröße des IR-Temperaturmesssystems nicht genau am Resonatorein-/ausgang sondern in einem geringen Abstand davon gemessen werden können. Ebenfalls wird die Aufnahme der Leistung des IR-Strahlers von den Absorptionseigenschaften der Bahn bestimmt. Deshalb wurde zunächst mit schwarzem, rußpigmentiertem Papier gearbeitet. Es zeigten sich atypisch hohe Wärmeübergangszahlen, die mutmaßlich durch den bei den Versuchen stattfindenden Feuchteverlust des Papiers und die dadurch hervorgerufene zusätzliche Abkühlung begründet sind.

Es wurde daher letztendlich mit schwarzer Folie gearbeitet, um den Einfluss des Feuchteverlustes im Papier zu eliminieren. Für die Rechnung wird die volle Strahlerleistung  $P$  in die o. a. Formeln eingesetzt, die Länge  $l$  des Resonatorabschnitts und die Breite  $B$  des IR-Strahlers. Es ergeben sich folgende Wärmeübergangszahlen für verschiedene Luftdrücke im Resonatorraum als Ergebnis verschiedener Messreihen. Die erreichbaren Wärmeübergangszahlen sind ausreichend.



**Diagramm 2:** Wärmeübergangszahl im Resonatorraum bei Bohrungsdurchmesser 2mm (2007) und 3mm (2008) für verschiedene Drücke der Luftversorgung.

### 3 Sicherheit

Bevor der Mikrowellentrockner industriell genutzt werden kann, müssen die allgemeinen Sicherheitsbestimmungen im Zusammenhang mit hochfrequenter Strahlung beachtet werden. Hierzu werden Vergleiche mit einem Vorgängermodell eines Trockners, der ebenfalls in der Universität Wuppertal im Gebrauch war, angestellt. Die Berufs-Genossenschaft Elektro-Feinmechanik und Textil stellt in der **BGV B11** die zugehörigen Grenzwerte zur Verfügung, die in Deutschland gelten. Relevante Ausschnitte dieser Verordnung sind im Anhang aufgeführt. Auf die im Anhang enthaltenen Tabellen wird jeweils verwiesen.

#### 3.1 Allgemeine Sicherheitsbestimmungen

Auszug aus dem BGV B11:

##### § 2 Hochfrequenzanlagen

Zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen sind Hochfrequenzanlagen so zu errichten und zu betreiben, daß in ihrem Einwirkungsbereich in Gebäuden oder auf Grundstücken, die zum nicht nur vorübergehenden Aufenthalt von Menschen bestimmt sind, bei höchster betrieblicher Anlagenauslastung und unter Berücksichtigung von Immissionen durch andere ortsfeste Sende- und Empfangsanlagen

1. die im Anhang 1 bestimmten Grenzwerte der elektrischen und magnetischen Feldstärke für den jeweiligen Frequenzbereich nicht überschritten werden und
2. bei gepulsten elektromagnetischen Feldern zusätzlich der Spitzenwert für die elektrische und die magnetische Feldstärke das 32fache der Werte des Anhangs 1 nicht überschreitet.

Die gefährlichsten Faktoren für den menschlichen Organismus sind, die elektrische Feldstärke in [V/m] und die magnetische Feldstärke in [A/m], sowie die Leistungsflussdichte in [W/m<sup>2</sup>]. Alle betreffenden Grenzwerte kann man in der Berufs-Genossenschafts-Verordnung B11 (BGV B11) nachlesen. Dort werden vier Expositionsbereiche definiert, „für die jeweils unterschiedliche Grenzwerte, Aufenthaltsdauern und sonstige Vorschriften gelten. Diese sind Expositionsbereich 1 (kontrollierter Bereich), Expositionsbereich 2 (allgemein zugäng-

licher Bereich ohne sonstige Einschränkungen), Bereich erhöhter Exposition und Gefahrenbereich.“ [1]

### 3.1.1 Skala der Belastung

von fast keine → bis große Belastung

Exp.2 → Exp.1 → erhöht Exp. Bereich → Gefahrenbereich

### 3.1.2 Überblick über die Bereiche

#### 3.1.2.1 Expositionsbereich 2

Der Expositionsbereich 2 ist einer von zwei Dauerexpositionsbereichen. Alle Bereiche die **nicht** Expositionsbereich 1, erhöhter, oder Gefahrenbereich sind, gehören ihm an. Wie z. B. Büroräume, Lagerräume, Sanitäranlagen oder andere allgemeine Räumlichkeiten, die, wenn überhaupt, eine geringe Strahlung aufweisen. Die Grenzwerte stehen in der Tabelle 11 des BGV B11 und werden arithmetisch über jedes 6-Minuten-Intervall gemittelt. [2]

#### 3.1.2.2 Expositionsbereich 1

Der Expositionsbereich 1 ist ebenfalls ein Dauerexpositionsbereich. In ihm dürfen die Effektivwerte in einem Intervall von 6 Minuten nie höher sein als in Tabelle 8 des BGV B11 angegeben. Bei Überschreitungen treten dann die Tabelle 9 und 10 des BGV B11 für den erhöhten Expositionsbereich in Kraft. Typische Bereiche sind z. B. Anlagen die verfahrensbedingte Öffnungen besitzen, wie die in dieser Thesis behandelte Anwendung, in welcher die Streustrahlung immer unter der Expositionsobergrenze des Bereiches 1 bleibt, und somit die Strahlungsbelastung keine negativen Auswirkungen auf den Bediener hat. [3]

### 3.1.2.3 Bereiche erhöhter Exposition

Im Bereich der erhöhten Exposition sind die höchsten Einzelwerte innerhalb eines Intervalls erlaubt. Jedoch muss beachtet werden, dass die Summe der Werte durch die in Tabelle 10 des BGV B11 angegebenen Maxima über ein 6 Minuten Intervall begrenzt wird. Das heißt, dass wenn der Wert in Tabelle 10 des BGV B11 überschritten wird, der Bediener den Rest des Intervalls in einer strahlungsfreien Zone verbringen muss, und erst nach Ablauf des Intervalls diese wieder verlassen darf. Anwendungen hierfür sind Maschinen die stetig mit neuen Teilen bestückt werden, so dass der Bediener über kurze Dauer einer höheren Strahlung ausgesetzt ist, sich dann aber während der weiteren Anwendung in einem geschützten Bereich befindet. Dieses ist aber nur möglich, weil der Mensch über Mechanismen wie das Schwitzen verfügt, um solche durch die Strahlung bedingte Erwärmung selbst auszugleichen und zu regulieren. [4]

### 3.1.2.4 Gefahrbereich

Für den Gefahrbereich sind die Tabellen 9 und 10 des BGV B11 ausschlaggebend. Sobald die Maximalwerte überschritten werden handelt es sich um den Gefahrenbereich, welcher nicht ohne geeignete Schutzkleidung betreten werden darf, da es in kürzester Zeit zu erheblichen Schädigungen des menschlichen Organismus kommen kann. Beispiele hierfür sind große Radar- oder Satellitenanlagen. [5]

## 3.1.3 Rechenbeispiele

### Berechnung der Sicherheitsfaktoren

In einem Rechenbeispiel soll verdeutlicht werden, wie der Bereich der erhöhten Exposition zu verstehen ist. Nehmen wir an, eine Maschine wird mit einer Frequenz von 2,45 GHz betrieben. Diese Maschine muss mit Teilen bestückt werden, besitzt jedoch verfahrenstechnisch bedingte Schlitze, aus denen Strahlung

austritt. Der Bediener muss im Bereich der Strahlung für einen Zeitraum von 2 Minuten verweilen. Der Wert, der für diesen Frequenzbereich vorgesehen ist, der Tabelle 2 „Grenzwerte“ entnommen werden. Die Minuten hierfür werden eingesetzt und das Ergebnis entsprechend ermittelt:

$$\sqrt{\frac{113000}{2}} = 237,6 \quad V/m$$

Das bedeutet, der Bediener darf sich der Strahlung bei einem Effektivwert von 237,6 V/m über ein Zwei-Minuten-Intervall aussetzen, muss jedoch die restlichen vier Minuten in einer strahlungsfreien Zone verbringen. Hierbei ist zu beachten, dass bei einem Bediener, welcher sechs Minuten in dem Bereich verbringt, dieselben Werte als Grundlage gelten wie in Tabelle 8 des BGV B11. Die Begrenzung im erhöhten Bereich ist eine zusätzliche Einschränkung, für Strahlung, die z. B. in Millisekunden-Intervallen abstrahlt wird. Ein typischer Anwendungsfall hier für sind Satellitenanlagen.

Beispiel:

$$\frac{300}{0,001} = 300000 \quad W/m^2$$

Somit wäre der Spitzenwert von 50000 W/m<sup>2</sup> bereits innerhalb eines Intervalls von 60 ms um das 6-fache überschritten.

### 3.1.3.1 Effektivwert

Der Effektivwert ist der quadratische Mittelwert eines zeitlich veränderlichen Signals. Von jedem anzunehmenden Wert wird das Quadrat gebildet und durch die Intervalldauer dividiert, davon die Summe aller Werte und schließlich die Wurzel gezogen. Das besondere ist, dass Oberschwingungen und be-

sondere Kurvenverläufe dadurch berücksichtigt werden, dass sie eine höhere Gewichtung durch das Quadrieren bekommen. [6]

### 3.1.4 Auszug von relevanten Daten der Tabellen des BGV 11 für den 2,45 GHz Bereich

Die Tabelle zeigt die Grenzwerte bzw. die zu errechnenden Grenzwerte für den jeweiligen Expositionsbereich für die Frequenz von 2,45 GHz.

Bereich (2,45Ghz)	Feldstärke E [V/m]	Feldstärke H [A/m]	Leistungsdichte [W/m <sup>2</sup> ]
Exposition 2 arith. 6min	61,5	0,163	10
Exposition 1 >= 6min	137	0,364	50
Exposition erhöht <6min	$\sqrt{(113 \times 10^3) / \text{min}}$	$\sqrt{0,8 / \text{min}}$	$\sqrt{300 / \text{min}}$
Exposition Gefahr max. < 6min	>4472	>11,2	>50000

**Tabelle 2:** Grenzwerte für die Frequenz von 2,45 GHz [7]

### 3.2 Biologische Einflüsse auf den Menschen

„Maßgebend für die biologische Wirkung von HF-Feldern ist die vom Körper aufgenommene „absorbierte“ Strahlungsleistung. Basisgröße dafür ist die spezifische Absorptionsrate kurz SAR [W/kg]. „Sie gibt die Leistung an (Energie pro Zeit), die pro Kilogramm Gewebe absorbiert wird. HF-Felder, die auf den gesamten Körper einwirken und dabei zu SAR-Werten von im Mittel 4 W/kg führen, bewirken beim Menschen Temperaturerhöhungen von etwa 1°C. Im Vergleich dazu: Durch normale Muskelaktivitäten entsprechen einer Leistung

von 3 bis 5 W/kg“. [8] Entscheidend sind aber auch die Wellenlänge und die Größe des absorbierenden Körpers. Sollte dieser nämlich genau die Hälfte der Wellenlänge betragen, so tritt der Resonanzfall ein und der SAR-Wert ist maximal. [9]

### 3.3 Schädigungen des Organismus

Durch die übermäßige Einwirkung von Mikrowellen im höheren Bereich oder Gefahrenbereich kann es zu Schädigungen kommen. Die Gefahr liegt in der Erhöhung der Körpertemperatur. Dadurch können Eiweiße gerinnen und z. B. der Glaskörper des Auges eintrüben.

### 3.4 Messgerät für die Streustrahlung

In unserer Anwendung messen wir die Streustrahlung mit dem „Holaday EMF Measurement“ der Firma Lindgren. Es zeigt die Streustrahlung in  $[\text{mW}/\text{cm}^2]$  der Grenzwert für die Frequenz von 2,45 GHz beträgt so  $5 \text{ mW}/\text{cm}^2$  in einem Abstand von 5cm.

### 3.5 Vergleich der Streustrahlungsmessungen Alter Trockner–Neuer Trockner

Wie in der Einleitung des Kapitels Sicherheit erwähnt folgt nun der Vergleich der zwei Trockner, die im Labor des Gebäude FL am Campus Freudenberg auf ihre Streustrahlung untersucht wurden. Während des alten Versuchsaufbaus trat ein Materialproblem bei dem zum Absorbieren der Streustrahlung verwendeten Foamglas auf. Dieses stellte ein Problem für die verfahrenstechnisch saubere Abwicklung des Tiefdruckes dar. Diese Problematik wird in Kapitel 4, Dämpfung durch Foamglas, bearbeitet.

### 3.5.1 Alter Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau für im Vorfeld erfolgte Messungen an dem alten MW-Trockner ist im Folgenden abgebildet:

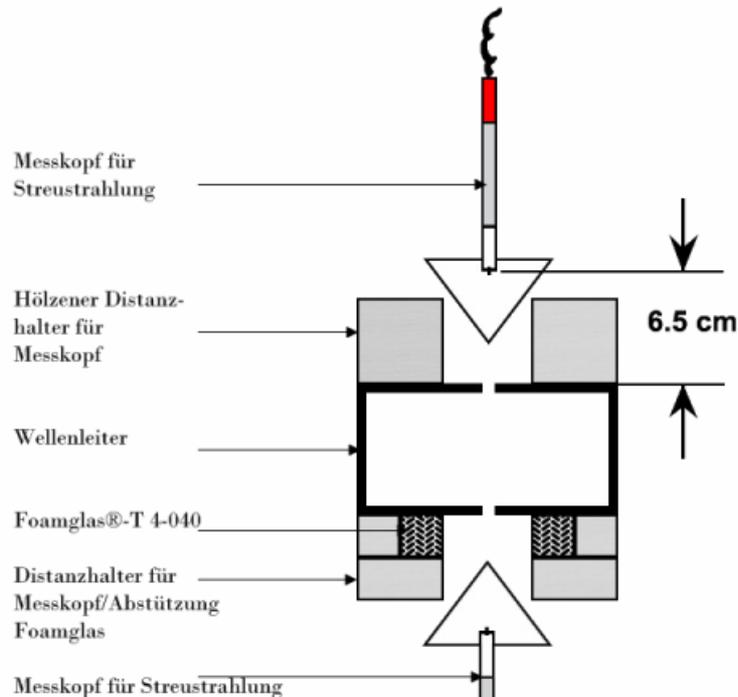


Abbildung 13: Streustrahlungsmessungsaufbau [10]

Auf den einzelnen Wellenleiter wurde je Messdurchgang kein Werkstoff, bzw. zur Dämpfung Foamglas oder Foamglas im Teflonkasten angebracht. Diese Aufbauten wurden dann verwendet, um bei einer Leistung von 1000 oder 2000 W am Applikator die Streustrahlung zu bestimmen. Zur Messung wurde das Messgerät der Firma Lindgren verwendet, und zwar zur Messung ohne Substrat wie oben abgebildet.

Bei den Messungen mit Papier musste darauf verzichtet werden, die Streustrahlung genau in der Senkrechten zu bestimmen. Die Messungen sind aber nächst möglich am **fünf** Millimeter breiten Schlitz durchgeführt worden. Das Papier hatte bei diesen Versuchen eine Geschwindigkeit von 10 m/min und es

wurden drei unterschiedliche Konfigurationen untersucht, und zwar Papier ohne Wasser und Luft, Papier mit Wasser und schließlich Papier mit Wasser und Luft. Ein definierter Abstand von 5 cm zum Messkopf war aber durch den Polystyrolkopf stets gegeben, so dass die Messwerte als valide betrachtet werden können. Alle Werte wurden entlang des 66 cm langen Schlitzes ermittelt, wobei stets der höchste festzustellende Wert ausschlaggebend war.

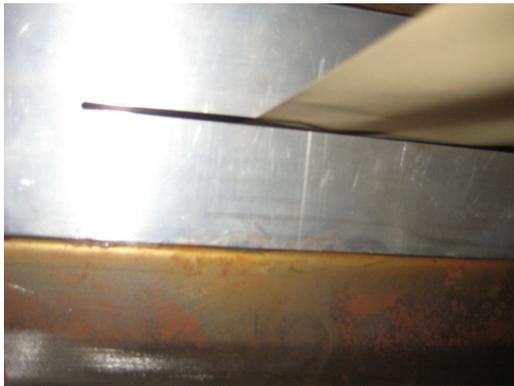


Abbildung 14: Öffnung des Hohlleiters

### 3.5.2 Neuer Versuchsaufbau

Mit dem **neuen** Trockner MG 8000 G-110KL der Firma Muegge hat sich der Aufbau dahingehend verändert, dass es nun vier übereinander angeordnete Wellenleiter gab, welche einen Schlitz von **drei** Millimeter Breite hatten (Abbildung 1, 2 und 14). Da die mittleren Wellenleiter durch eine Metallkonstruktion aus Gitterblechen seitlich abgedeckt waren, wurde nur der oberste Hohlleiter gemessen. Die Messungen wurden ebenfalls mit dem Streustrahlungsmessgerät durchgeführt. Auf das Foamglas und das Foamglas mit Teflon konnte aufgrund der gemessenen Werte verzichtet werden.

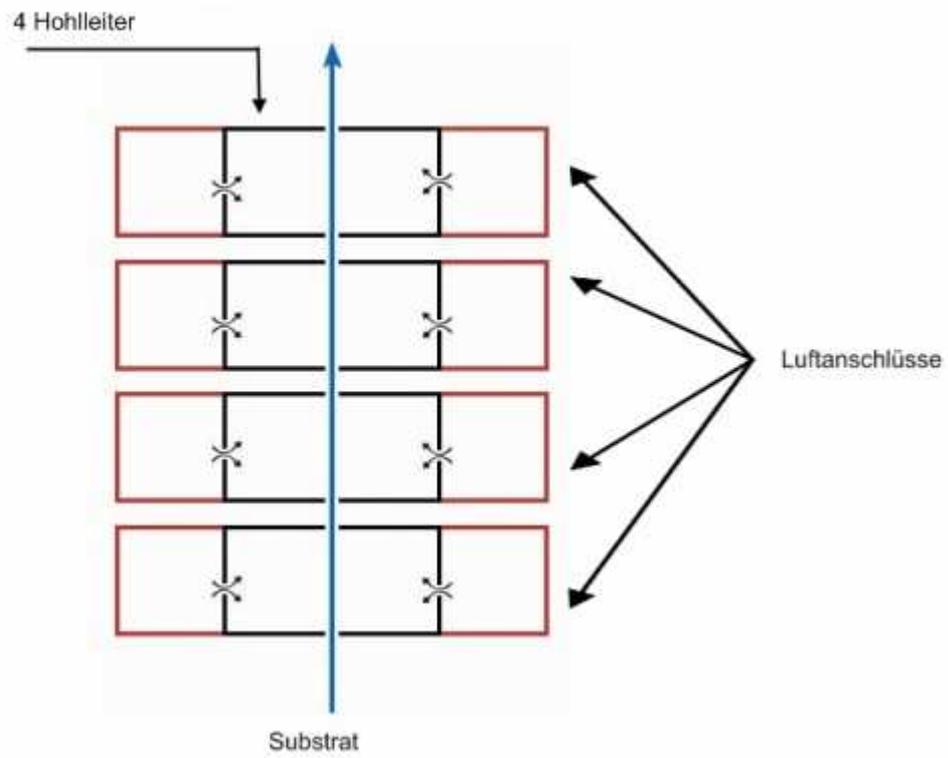


Abbildung 15: Versuchsaufbau Neuer Trockner [11]



Abbildung 16: Luftzufuhr neuer Trockner und Kurzschlusschieber

### 3.5.3 Streustrahlungswerte

Die Streustrahlung wurde sowohl beim alten als auch beim neuen Trockner in  $[mW/cm^2]$  gemessen und spiegelte sich in folgenden Diagrammen wieder:

#### 3.5.3.1 Strahlungswerte alter Trockner

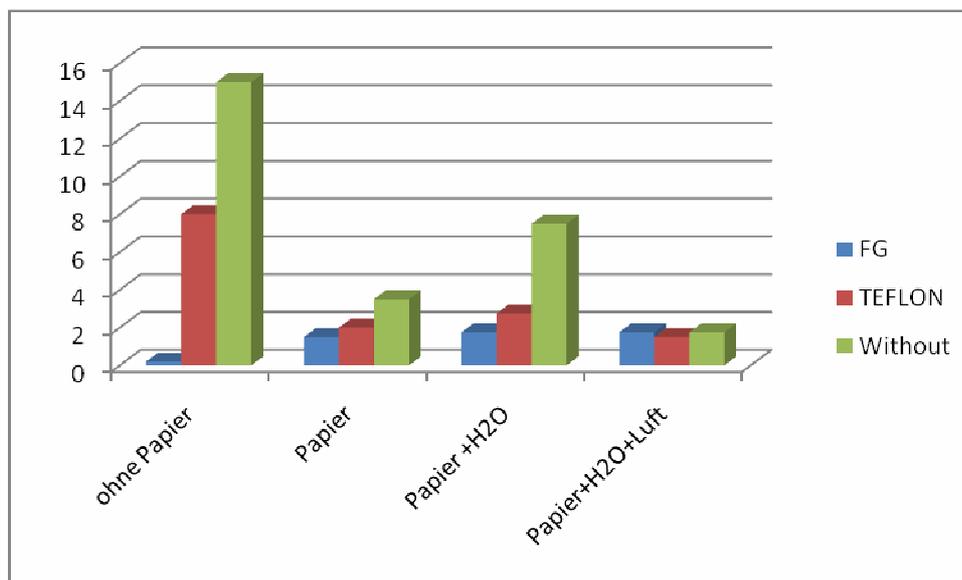


Abbildung 17: 1kW Streustrahlung in  $mW/cm^2$  (Spaltbreite 5mm)

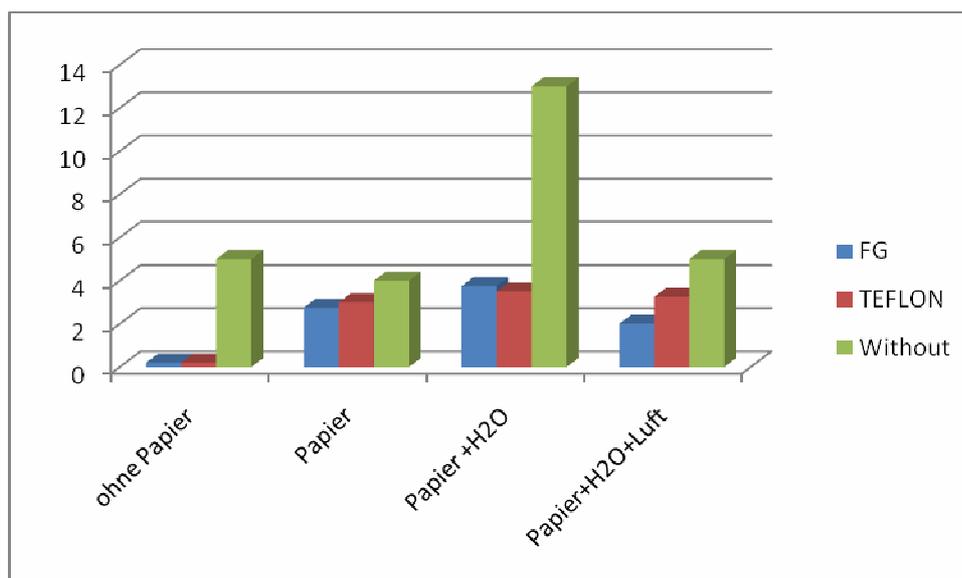


Abbildung 18: 2kW Streustrahlung (alt) in  $mW/cm^2$  (Spaltbreite 5mm)

### 3.5.3.2 Strahlungswerte neuer Trockner

Bei den Messungen entlang des 66 cm langen Schlitzes kam es immer zu demselben Ergebnis. Die Streustrahlung lag bei 0 bis 0,3 mW/cm<sup>2</sup>. Zur Kontrolle wurde dann auch unterhalb und trotz der Gitter auch an den Seiten gemessen. Es blieb jedoch bei den gemessenen Werten von 0 bis 0,3 mW/cm<sup>2</sup>. Die einzigen Stellen, an denen höhere Streustrahlung austrat, waren die Übergänge an denen die Hohlleiterstücke miteinander verschraubt waren. Diese Werte lagen im Bereich von 0,5 bis 4 mW/cm<sup>2</sup> und durch das Nachziehen der Schrauben konnte die Streustrahlung vollständig eliminiert werden. Im Ergebnis ist festzustellen, dass die Verringerung der Schlitzbreite von 5 auf 3 mm zu Werten im Bereich der Nachweisgrenze führt.

### 3.5.4 Auswertung

Die Säulendiagramme weisen eine zu erwartende Tendenz auf. Die Streustrahlung ist ohne Material am höchsten. Sie wird durch das Foamglas absorbiert und somit minimiert. Die Ummantelung mit Teflon führt zu schlechteren Werten, möglicherweise bedingt durch den damit größeren seitlichen Abstand des Foamglas zu Spalt. Das ist am auffälligsten der Fall bei 1 kW ohne Papier und 2 kW Papier mit H<sub>2</sub>O und Luft. Das reine Foamglas hingegen hat eine ungeordnete raue Oberfläche und ist vollständig schwarz gefärbt. Deshalb absorbiert es im Gegensatz dazu die elektromagnetische Strahlung erheblich besser. Dies ist augenscheinlich dadurch bedingt, dass Kohlenstoff, der im Foamglas enthalten ist, ein sehr guter Absorber für elektromagnetische Strahlung ist. Diese Eigenschaften sind auch im sichtbaren Bereich gegeben. [12]

Zusätzlich spielen auch die Veränderungen der Luftfeuchtigkeit im Hohlleiter eine Rolle, da sich die Bedingungen durch das Ab- und Anschalten des Gebläses veränderten. Durch den Wasserdampf kam es in beiden Diagrammen im Durchschnitt zu erhöhten Messwerten im Vergleich zu den Werten mit Luft.

Diese unterschiedlichen Messwerte sind bedingt durch die komplexen Wechselwirkungen zwischen Strahlung, Bahn, Wasser, Dampf und werden nicht weiter betrachtet.

Als Fazit der Messungen lässt sich festhalten, dass der neue Trockner eine wirkliche Verbesserung darstellt und aufgrund seines schmalen Schlitzes und der daraus resultierenden niedrigeren Streustrahlung, aus sicherheitstechnischer Sicht weiteren „Feldversuchen“ nichts mehr im Wege steht. Die Werte entsprechen der Norm nach BGV B11 und die Einordnung des Trockners in den Expositionsbereich 1 scheint gewährleistet.

- 
- [1] <http://www.bfs.de/de/elektro/hff/arbeitsschutz.html>
  - [2] vergleiche [http://www.bgetf.de/bilder/pdf/bgv\\_b11\\_a10-2008.pdf](http://www.bgetf.de/bilder/pdf/bgv_b11_a10-2008.pdf) S.14 ff.
  - [3] vergleiche [http://www.bgetf.de/bilder/pdf/bgv\\_b11\\_a10-2008.pdf](http://www.bgetf.de/bilder/pdf/bgv_b11_a10-2008.pdf) S.14 ff.
  - [4] vergleiche [http://www.bgetf.de/bilder/pdf/bgv\\_b11\\_a10-2008.pdf](http://www.bgetf.de/bilder/pdf/bgv_b11_a10-2008.pdf) S.16 ff.
  - [5] vergleiche [http://www.bgetf.de/bilder/pdf/bgv\\_b11\\_a10-2008.pdf](http://www.bgetf.de/bilder/pdf/bgv_b11_a10-2008.pdf) S.16 ff.
  - [6] vergleiche Fachkunde Elektrotechnik
  - [7] vergleiche Berufs-Genossenschaft-Vorschrift B11 EMF
  - [8] <http://www.bfs.de/de/elektro/hff/wirkungen.html> Absatz 5
  - [9] vergleiche <http://www.bfs.de/de/elektro/hff/wirkungen.html> Absatz 1-4
  - [10] erstellt von Dr. Ing. Ashraf A. Saad
  - [11] erstellt von Dr. Ing. Ashraf A. Saad
  - [12] <http://www.google.de/search?hl=de&q=mikrowellen+reflexion+22+Mai+08&btnG=Suche&meta> 15.11.2008

### 4 Dämpfung durch Foamglas

#### 4.1 Foamglas

Zur Absorption von Mikrowellen fiel die Entscheidung auf das Foamglas. Dieser Werkstoff war eine Empfehlung der Firma Muegge. Die Empfehlung beruhte auf deren eigenen positiven Erfahrungswerten mit diesem Material. Hinzu kommen die im Gegensatz zu anderen Stoffen günstigen Anschaffungspreise und die allgemeinen Eigenschaften des Werkstoffes. [1]

FOAMGLAS®-Platten T 4-040 sind: [2]

- wasserdicht
- dampfdicht
- nichtbrennbar
- schädlingssicher
- druckfest
- maßbeständig
- säurebeständig
- leicht zu bearbeiten



Abbildung 19: Foamglas - Platten T 4-040 [3]

**Ein Nachteil** ist jedoch die Eigenschaft, dass das Foamglas bei Berührung oder genügend starker Erschütterung anfängt, kleinste Teilchen aus der porösen

Oberfläche abzusondern. Das birgt dahingehend Probleme, dass im Druckbetrieb dadurch hervorgerufene Verunreinigungen des Substrates qualitative Mängel und vielleicht auch verfahrenstechnische Beeinträchtigungen nach sich ziehen. Das kann etwa eine fehlende Bedruckbarkeit sein. Dahingehend wurden aber keine weiteren Bemühungen angestellt, weil es dank des Teflon möglich war Abhilfe zu schaffen.

Von verschiedenen Möglichkeiten zur Vermeidung von Verunreinigungen durch Foamglas wurde eine Umhüllung mit Teflon oder eine Oberflächenfestigung mit hitzebeständigem Lack weiterverfolgt. Beide Möglichkeiten erschienen gleichermaßen gut geeignet.

### 4.2 Umgesetzte Versuche

#### 4.2.1 Teflon

Der Kasten hat die Länge von 66 cm und wurde von der Universitätswerkstatt angefertigt. Es wurden zwei rechteckige Werkstücke aus Teflon ausgefräst und mit zwei am Ende befindlichen Bohrungen durch Schrauben verbunden und fixiert. In den ausgefrästen Freiraum wurde der Hohlraum mit dem Foamglas gefüllt.

#### 4.2.2 Sprühlack

Zur Beschichtung wurde ein Sprühlack der Marke Senotherm verwendet.

Eigenschaften:

- Temperatur beständig bis 500°C
- Farbe Schwarz Metallic 310
- Aushärtung durch Verdunsten der Lösemittel

---

[1] [http://www.foamglas.de/hochbau/framesets/fs\\_prod\\_mateig.htm](http://www.foamglas.de/hochbau/framesets/fs_prod_mateig.htm)

[2] [http://www.foamglas.de/hochbau/framesets/fs\\_prod\\_mateig.htm](http://www.foamglas.de/hochbau/framesets/fs_prod_mateig.htm)

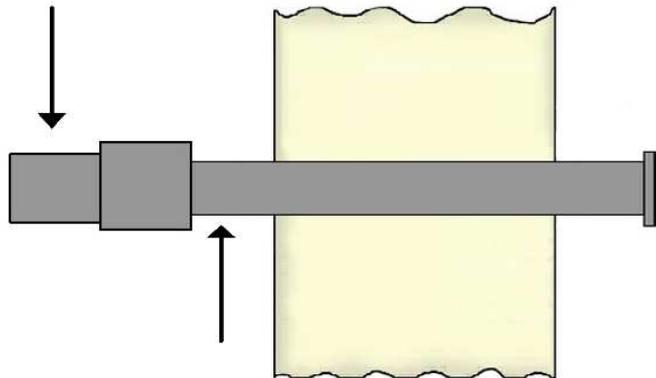
[3] [http://www.foamglas.de/hochbau/framesets/fs\\_prod\\_mateig.htm](http://www.foamglas.de/hochbau/framesets/fs_prod_mateig.htm)

## 5 Messungen des relativen Wasserverlustes durch Veränderung des Luftdruckes

### Messung der relativen Wasserverluste aus dem gedruckten Farbfilm als Funktion der verschiedenen Beträge von Druckluft für verschiedene Farbschichtdicken

Diese Messungen wurden durchgeführt, um die Wirkung der verschiedenen Luftdrücke zur Spülung des Applikators bewerten zu können mit denen der, bei der Trocknung entstehende Wasserdampf, abtransportiert wird.

Magnetronkopf



Mikrowellenapplikator

**Abbildung 20:** Lage des Mikrowellenapplikators und der Bedruckstoffbahn im Trocknungsabschnitt

### 5.1 Messbedingungen

Die Messungen wurden mit einer, im Applikator stehenden Welle, durchgeführt, wo eine zur Trocknung genutzte elektrische Feldstärke von rund 1240 V/cm vorlag. Die Druckgeschwindigkeit betrug 20 m/min. Die verwendeten Luftdrücke lagen zwischen 0,05 und 0,2 bar und die Luftfeuchtigkeit betrug 50 % relative Luftfeuchte bei einer Temperatur von 20°C. Bei allen Messungen waren die Faktoren elektrische Feldstärke, Druckgeschwindigkeit, Druckfarbe und der Bedruckstoff konstant, während die Luftmenge mittels Luftdruck variabel gesteuert wurde.

### 5.2 Ziele dieser Messungen

Die folgenden Fragen sollten mit Hilfe dieser Messungen beantwortet werden:

- Abhängigkeit des relativen Wasserverlusts von der Luftmenge/Luftdruck.
- Auswirkungen der unterschiedlichen Luftmengen/Luftdrücke auf die Bahntemperatur vor und nach dem Durchlaufen des Mikrowellentrockners.

### 5.3 Verwendete Geräte und Materialien

- In diesen Messungen wurde eine 30 cm breite Papierbahn mit einer RK Tiefdruckmaschine bedruckt. Die Übertragung der wasserbasierten Druckfarbe auf das Substrat erfolgte mit einem gravierten Tiefdruckzylinder, der verschiedene Nüpfchentiefen aufwies.

- Bei der wässrigen Druckfarbe handelt es sich um die „Blue 1117 / 761“ mit einem Kasein-Basierenden Bindemittel und nicht-leitfähiger Pigmentierung (insbesondere ohne Ruß).
- Für die verschiedenen Versuche wurde eine Papierrolle der “Technocell Dekor Deutschland” genutzt. Die folgenden Geräte wurden für die Bewertung der Feuchtigkeitsverluste in und außerhalb der Druckzone angewendet:
  1. Das Messgerät zum Wiegen der Proben hatte eine Kapazität von ca. 200 g und war in der Lage, Gewichtsunterschiede von 0,005 g zu erkennen. Verwendet wurde eine Digitalwaage mit direkter Ablesung.
  2. Zum Trocknen der Proben wurde ein gut belüfteter Trocknungs-ofen eingesetzt, der die Temperatur zwischen 101°C und 105°C halten konnte.

### 5.4 Messergebnisse

Abhängigkeit des relativen Wasserverlusts von der im Wellenleiter-Applikator durchgesetzten Luftmenge, ausgedrückt durch den Luftdruck.

Tabelle 4 und Diagramm 4 zeigen die Abhängigkeit des relativen Wasserverlusts von der Luftmenge / Luftdruck im Inneren des Wellenleiter-Applikators, um so den Wasserdampf aus dem Trockner beseitigen zu können.

Dies bedeutet, dass im Bereich von 0,05 bis 0,15 bar eine Erhöhung der Druckluft im Wellenleiter-Applikator, zu einem langsam ansteigendem Feuchtigkeitsverlust bei der bedruckten Papierbahn führt.

Eine weitere Erhöhung der Werte über 0,10 oder 0,15 bar bringt keine Verbesserung mehr.

Druck in der Luftzufuhr ( $\Delta p$ )		Wasserverlust in und außerhalb der Druckzone in $g/m^2$				
		Gravtiefe im Tiefdruckzylinder			Feuchtigkeitsgehalt der Druckfarbe auf der Papierbahn unmittelbar nach dem MW-Trockner	
		12 $\mu m$	18 $\mu m$	0 $\mu m$	12 $\mu m$	18 $\mu m$
0,05 bar	Luft	8.6	10.9	4	In den benannten Bereichen	
	Luft +MW	5.7	6.4	3.4	12 $\mu m$	18 $\mu m$
Mit Farbfilm übertragenes Wasser		4.6	6.9	4		
In der Bahn befindliches Wasser vom Farbfilm ( $g/m^2$ )		1.7	2.4	- 0.6	37 %	35 %
0,1 bar	Luft	7.8	10.3	4		
	Luft +MW	5.4	6.1	3.5		
Mit Farbfilm übertragenes Wasser		3.8	6.3	3.5		
In der Bahn befindliches Wasser vom Farbfilm ( $g/m^2$ )		1.4	2.1	- 0.5	37 %	33 %
0,15 bar	Luft	8.6	10.5	4.3		
	Luft +MW	5.8	6.3	3.7		
Mit Farbfilm übertragenes Wasser		4.3	6.2	3.7		
In der Bahn befindliches Wasser vom Farbfilm ( $g/m^2$ )		0.6	2.0	- 0.5	14 %	32 %
0,2 bar	Luft	8.2	10.3	3.9		
	Luft +MW	5.4	6.1	3.4		
Mit Farbfilm übertragenes Wasser		4.3	6.4	3.9		
In der Bahn befindliches Wasser vom Farbfilm ( $g/m^2$ )		1.5	2.1	- 0.5	35 %	34 %

**Tabelle 3:** Wasserverluste im Mikrowellentrockner bei verschiedenen Luftdrücken und unter verschiedenen Bedingungen.

### 5.5 Der relative Wasserverlust „ln(u)“

Die Differenz zwischen dem Gewichtsverlust von bedrucktem und unbedrucktem Papier ist auf die Menge von Wasser in der Druckfarbe zurückzuführen. Um die Wirkung der Druckluft auf die Trocknungsergebnisse prüfen zu können, haben wir das Diagramm zwischen dem relativen Wasserverlust

$$\ln\left(\frac{m_{w0}}{m_w}\right)$$

als Funktion des Drucks der Spülluft ( $\delta P$ ) nach Logarithmieren wie folgt dargestellt:

$$\ln(u) = \ln\left(\frac{m_{WF0} - m_{WP}}{m_{WF} - m_{WP}}\right) = \ln\left(\frac{m_{w0}}{m_w}\right)$$

$m_{WF0}$  : Mittelw. Gewichtsverlust im Ofen der Druckzone ohne MW-Trocknung

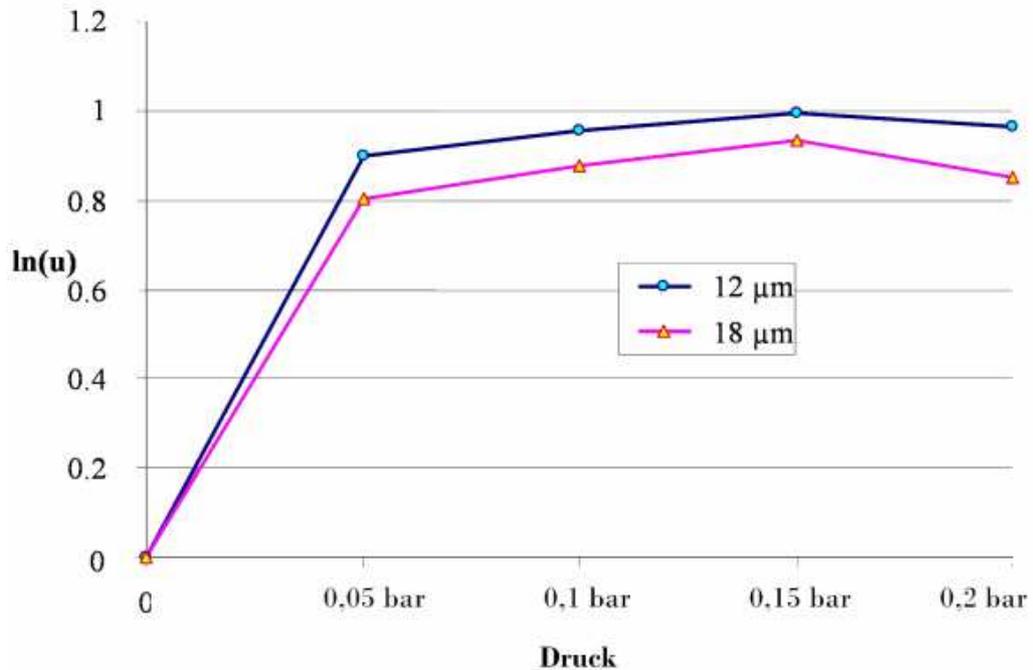
$m_{WP}$  : Mittelw. Gewichtsverlust im Ofen von unbedrucktem Papier

$m_{WF}$  : Mittelw. Gewichtsverlust im Ofen der Druckzone mit MW-Trocknung

$m_{WP}$  : Mittelw. Gewichtsverlust im Ofen von unbedrucktem Papier

Druck (bar)	Relativer Feuchtigkeitsverlust $\ln(u)$	
	12 $\mu\text{m}$	18 $\mu\text{m}$
0	0	0
0.5	0.90	0.80
1.0	0.95	0.88
1.5	1.00	0.93
2.0	0.97	0.85

**Tabelle 4:** Auswirkungen verschiedenster Drücke bei der Spülluft auf den relativen Feuchteverlust bei zwei praxistypischen Gravurtiefen



**Diagramm I:** Relativer Feuchtigkeitsverlust als Funktion der Wassermenge für zwei unterschiedliche Näpfchentiefen

### Messung der Auswirkung verschiedener Luftdrücke im Wellenleiter-Applikator auf die Temperatur der gedruckten Bahn vor und nach Durchlaufen des Mikrowellentrockners.

Tabelle 5 und Diagramm 2 zeigen die Abhängigkeit der Papierbahntemperatur von dem Wassergehalt der gedruckten Wasserfarbe nach Durchlaufen des Mikrowellentrockners. Die unbedruckte Zone zeigt deutlich geringere Bahntemperaturen als die beiden Druckzonen, die mit einer Näpfchentiefe von 12 und 18 µm bedruckt worden sind.

Außerdem wird deutlich, dass ein höher werdender Luftdruck im Wellenleiter-Applikator die Beseitigung des Wasserdampfes im Mikrowellentrockner begünstigt. Dies bedeutet wiederum, dass die Erhöhung der komprimierten Luft

im Wellenleiter-Applikator zu einer Verringerung der Bahntemperatur führt. Siehe Diagramm 5, von 0,05 bis 0,2 bar.

<b>Temperaturänderungen der Bahn innerhalb des MW-Applikators als Funktion des Luftdrucks, der Näpfchentiefe, bedruckt/unbedruckt</b>				
<b>t (°C)</b>	<b>Näpfchentiefe des Zylinders: 18 µm</b>			
	<b>0,05bar</b>	<b>0,10 bar</b>	<b>0,15 bar</b>	<b>0.2 bar</b>
Luft	18.5°C	19.2°C	20°C	19.5°C
Luft + MW	59.3°C	58°C	55.7°C	53.8°C
<b>d (t)</b>	<b>40.8°C</b>	<b>38.8°C</b>	<b>35.7°C</b>	<b>34.3°C</b>
<b>t (°C)</b>	<b>unbedruckte Bahn</b>			
	<b>0,05bar</b>	<b>0,10 bar</b>	<b>0,15 bar</b>	<b>0.2 bar</b>
Luft	19.5°C	21.9°C	23.3	22.4°C
Luft + MW	41.2°C	40.4°C	38	38.6°C
<b>d (t)</b>	<b>21.7°C</b>	<b>18.5°C</b>	<b>14.7</b>	<b>16.2°C</b>
<b>t (°C)</b>	<b>Näpfchentiefe des Zylinders: 12 µm</b>			
	<b>0,05 bar</b>	<b>0,10 bar</b>	<b>0,15 bar</b>	<b>0.2 bar</b>
Luft	17.1°C	18.2°C	19.2°C	18.6°C
Luft + MW	46.7°C	46.1°C	42.9°C	41.8°C
<b>d (t)</b>	<b>29.6°C</b>	<b>27.9°C</b>	<b>23.7°C</b>	<b>23.2°C</b>

**Tabelle 5:** Temperaturänderungen der Bahn innerhalb des MW-Applikators

### Temperaturänderungen im Trockner

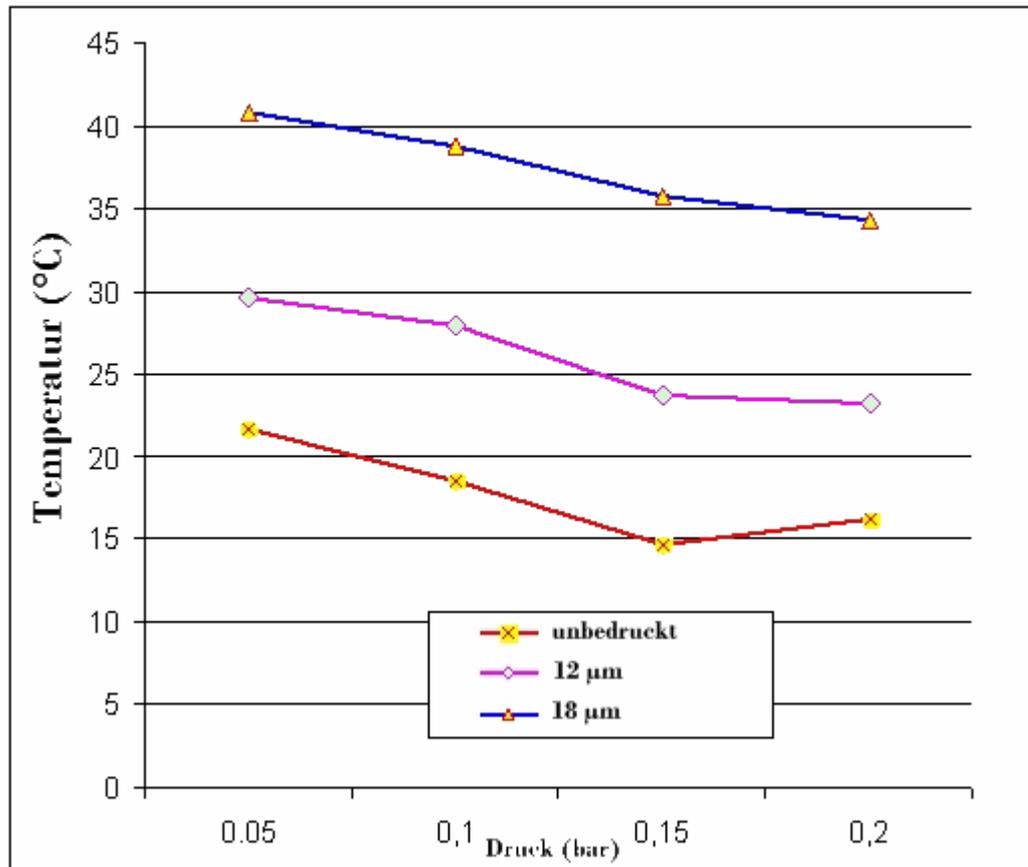


Diagramm 2: Temperatur Änderung im Mikrowellentrockner

## Messungen des relativen Wasserverlustes durch Veränderung der Verweilzeit im Applikator

---

Projekt Mikrowellentrocknung – Saad/Urban/Eisberg – Druck- und Medientechnologie

---

### 6 Messungen des relativen Wasserverlustes durch Veränderung der Verweilzeit im Applikator

Der Mikrowellentrockner wurde entsprechend der Richtlinien nach BGV B11 in den Dauerexpositionsbereich 1 eingeordnet. Nachfolgend werden die durchgeführten Tests zur Ermittlung des Wasserverlustes beim Einsatz des MW - Trockners beschrieben.

#### 6.1 Versuchsaufbau

Für den Versuchsaufbau wurden folgende Materialien benötigt:

- Papier 70 g/m<sup>2</sup>
- MW-Leistung 1000/2000 W
- Wasser als Farbe
- Formzylinder mit Gravur 12µm, 0µm (ungraviert), 18µm

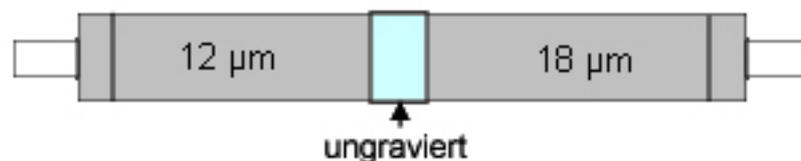


Abbildung 21: Formzylinder mit Gravur [1]

- $V = 10, 20, 30$  m/min
- Labormaschine
- Waage Mettler AE 200

Die Trocknerkonfiguration stellte sich, wie in dem Kapitel Sicherheit/Streuung (Abbildung 30 „Versuchsaufbau Neuer Trockner“) dar. Die vier

## Messungen des relativen Wasserverlustes durch Veränderung der Verweilzeit im Applikator

---

Projekt Mikrowellentrocknung – Saad/Urban/Eisberg – Druck- und Medientechnologie

---

Applikatoren wurden gleichzeitig mit einer Leistung von entweder ein oder zwei Kilowatt betrieben. Das zu trocknende Substrat war ein Dekorpapier mit einem Flächengewicht von  $70 \text{ g/m}^2$ . Als Farbersatz wurde mit 100 % Wasser gedruckt. Das Sujet des Formzylinders entsprach Abbildung 21. Während des Betriebes variiert die Geschwindigkeit des MW - Trockners zwischen 10 und 30 m/min. Jede Geschwindigkeit wurde sowohl mit Luft als auch mit Luft und MW betrieben, um Referenzwerte zu erhalten.

### 6.2 Durchführung der Wasserreduktionsmessung

Nach dem Druckvorgang wurden von jeder möglichen Konstellation mindestens sechs Proben des mit Wasser bedruckten Papiers ausgeschnitten und in Aluminiumfolie eingepackt, damit die Gewichtsmessungen nicht durch vorherige Verdunstungen des Wassers verfälscht werden konnten. Die Proben wurden zu Beginn mit Aluminiumfolie umhüllt gewogen, danach wurde die Aluminiumfolie wieder entfernt und die Proben für eine halbe Stunde bei  $105^\circ\text{C}$  in einem dafür vorgesehenen Ofen der Firma Memmert getrocknet. Während des Trocknungsvorgangs wurde das Gewicht der Aluminiumfolie bestimmt. Nach 30-minuetiger Trocknung wurden die Proben wieder in das jeweilige Stück Aluminiumfolie zurückgepackt und erneut gewogen. Die Differenz wurde ermittelt, der genaue Wasserverlust in Gramm auf einen Quadratmeter Fläche hochgerechnet und somit der Gewichtsverlust bestimmt.

#### 6.2.1 Berechnung des $\ln(u)$

In der Tabelle 3 „Daten Wasserverlust“ ist der Mittelwert in  $\text{g/m}^2$  für den unbedruckten und mit  $18 \mu\text{m}$  Nöpfchen gravierten Teil angegeben. Der Mittelwert bezieht sich auf eine hier nicht dargestellte Tabelle von einzelnen Messungen, welche für Luft und Luft und MW in den Geschwindigkeiten 10, 20, 30

## Messungen des relativen Wasserverlustes durch Veränderung der Verweilzeit im Applikator

---

Projekt Mikrowellentrocknung – Saad/Urban/Eisberg – Druck- und Medientechnologie

---

m/min durchgeführt wurden. Die Rechnung für einen diskreten Wert jener Tabelle ist:

$$\left( \frac{m_{Vorher} - m_{Nach}}{m_{Nach} - Alu} \right) * 100 = \text{Prozent}$$

$m_{Vorher}$  = Gewicht mit Aluminium vor der Trocknung im Ofen bei 105 °C

$m_{Nach}$  = Gewicht mit Aluminium nach der Trocknung im Ofen bei 105 °C

$Alu$  = Gewicht Aluminium

Den berechneten Prozentsatz multipliziert mit 0,7, weil ein 70g/m<sup>2</sup> schwerer Bedruckstoff verwendet wurde.

$$\frac{70}{100} * \text{Prozent} = \text{Gewichtsverlust auf g/m}^2 \text{ hochgerechnet inkl. Wasser + Bedruckstoff}$$

Von den auf g/m<sup>2</sup> hochgerechneten Wasserverlusten für 18 µm wurden die Standardabweichung, sowie die Spannweite ausgewiesen. Für den unbedruckten Bereich sind jene statistische Kennzahlen nicht angegeben, weil sie entweder „nicht relevant“ oder nur von geringer Gewichtung waren. Die mit „nicht relevant“ gekennzeichneten Zahlen fallen als Referenzwert heraus, da sie unter MW - Einsatz standen und so einen falschen Grundwert für die Rechnung liefern würden.

## Messungen des relativen Wasserverlustes durch Veränderung der Verweilzeit im Applikator

Projekt Mikrowellentrocknung – Saad/Urban/Eisberg – Druck- und Medientechnologie

	unbedruckt	bedruckt, 18 µm			
Geschwindigkeit [m/min]	Mittelw. unbedruckt [g/m <sup>2</sup> ]	Mittelwert g/m <sup>2</sup>	Minimum g/m <sup>2</sup>	Maximum g/m <sup>2</sup>	Standardabweichung g/m <sup>2</sup>
10 Luft	3,1	15,7	14,9	16,3	0,5
10 Luft+ MW	nicht relevant	4,7	3,9	5,2	0,4
20 Luft	3,7	18,7	18,1	19,0	0,3
20 Luft+ MW	nicht relevant	9,1	8,2	9,9	0,8
30 Luft	3,7	19,0	18,5	19,4	0,4
30 Luft+ MW	nicht relevant	12,5	12,1	12,8	0,3

**Tabelle 6:** Mittelwert und Spannweite Wasserverlust

Die oben berechneten Mittelwerte wurden nun in der Rechnung wie folgt eingesetzt um den  $\ln(u)$  zu bestimmen:

$$\ln(u) = \ln\left(\frac{m_{WF0} - m_{WP}}{m_{WF} - m_{WP}}\right) = \ln\left(\frac{m_{W0}}{m_W}\right)$$

$m_{WF0}$  : Mittelw. Gewichtsverlust im Ofen der Druckzone ohne MW-Trocknung

$m_{WP}$  : Mittelw. Gewichtsverlust im Ofen von unbedrucktem Papier

$m_{WF}$  : Mittelw. Gewichtsverlust im Ofen der Druckzone mit MW-Trocknung

$m_W$  : Mittelw. Gewichtsverlust im Ofen von unbedrucktem Papier

## Messungen des relativen Wasserverlustes durch Veränderung der Verweilzeit im Applikator

Projekt Mikrowellentrocknung – Saad/Urban/Eisberg – Druck- und Medientechnologie

Als Schlussrechnung wurde die Verweildauer im Trockner mit dem  $\ln(u)$  in ein Verhältnis gesetzt und Trendlinie sowie Bestimmtheitsmaß eingeführt. [2]

$\ln(u)$ für 18 $\mu\text{m}$	t[s]	V
0	0	0
0,55	0,086	30m/min
1,02	0,129	20m/min
2,09	0,258	10m/min

Tabelle 7: Ermittlung  $\ln(u)$

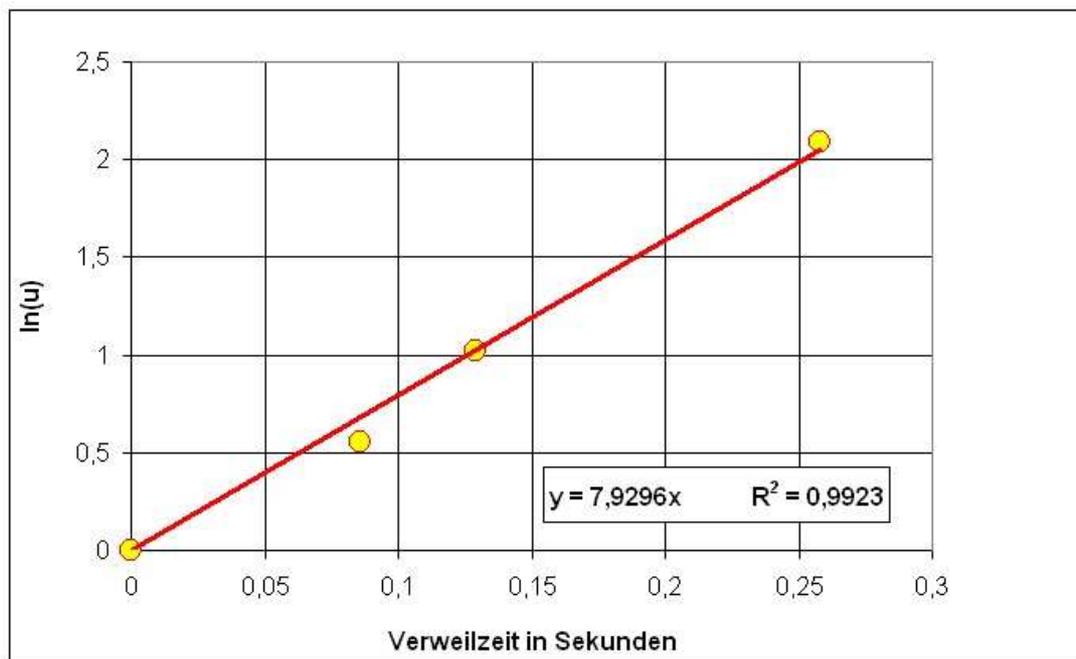


Abbildung 22: Relativer Wasserverlust

### 6.3 Auswertung

In der Abbildung 35 ist eine klare lineare Abhängigkeit der Achsen zu erkennen, welche mittels Bestimmtheitsmaß von 0,994 noch unterstützt wird. Je größer die Verweildauer in der MW, desto mehr Wasser kann ausgetrieben werden. Die drei Messpunkte sind dahingehend aussagekräftig, weil sie über

## Messungen des relativen Wasserverlustes durch Veränderung der Verweilzeit im Applikator

---

Projekt Mikrowellentrocknung – Saad/Urban/Eisberg – Druck- und Medientechnologie

---

eine genügend große Anzahl an Einzelwerten ermittelt wurden und die Standardabweichung mit dem höchsten Wert von  $0,8 \text{ g/m}^2$  bei  $20 \text{ m/min}$  mit Luft und MW im akzeptablen Bereich liegt.

---

[1] erstellt Dr. Ing. Ashraf A. Saad

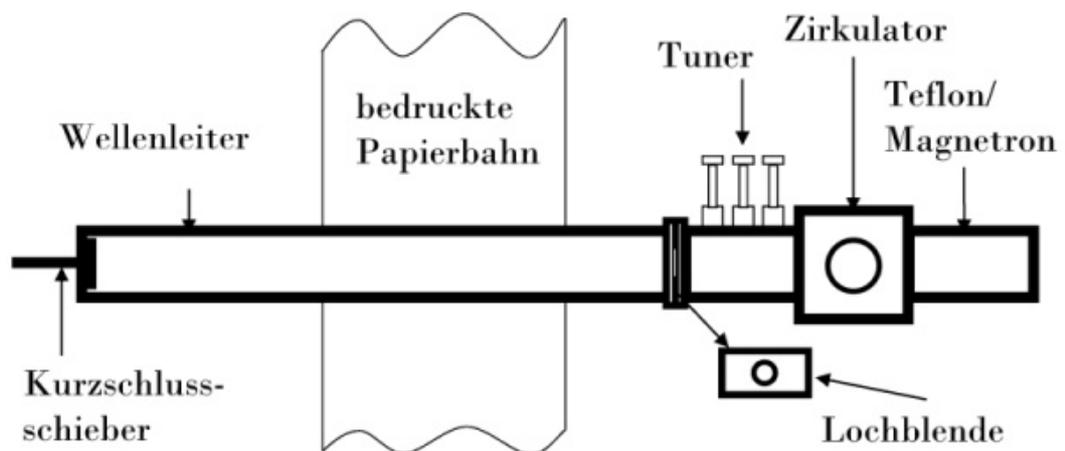
[2] vergleiche Dissertation des Dr. Ing. Ashraf A. Saad

### 7 Zusätzliche Bauelemente des MW-Trockners

#### Test der zusätzlichen Elemente von der Fa. Muegge an dem vorhandenen Mikrowellentrockner

Die Untersuchungen wurden am Mikrowellentrockner aus dem Drucklabor der Bergischen Universität Wuppertal nach Einbau der Teile durchgeführt. Ziel war die Überprüfung, ob dieselben Ergebnisse, wie die bei der Verwendung der Kupferstange im Prototyp-Mikrowellentrockner [1] erzielt werden können. Wie in Abbildung 25 sind dies folgende Bauteile:

1. Kurzschlusschieber R 26, kontaktlos
2. Tuner R 26 MS
3. Lochblende



**Abbildung 23:** Die bedruckte Papierbahn durchläuft den Wellenleiter mit Kurzschlusschieber, Lochblende und Tuner.

### 7.1 Benutzte Geräte

Im Mikrowellentrockner bzw. Wellenleiter-Applikator wurden Mikrowellen, also elektromagnetische Felder aufgebaut. Für die Leitfähigkeitstests [2] war der Trockner in einer Tiefdruck-Labormaschine fest eingebaut; um die relevante Prozessgröße der Trocknungszeit festzulegen ohne den Applikator zu ändern.

### 7.2 Messbedingungen

Die Messungen wurden mit einer stehenden Welle im Applikator durchgeführt. Diese wurde nur durch die Reflexion der vollen Leistung von 2kW erzeugt. Wie es vorher vom Prototyp-Mikrowellentrockner [3] bekannt war, hatte das zum Trocknen genutzte elektrische Feld im schwingenden Applikator eine Feldstärke von rund 1240V/cm. Für alle Messungen wurde sowohl trockenes, als auch mit Wasser bedrucktes Papier verwendet. Die Messungen wurden mit zwei verschiedenen Varianten wie folgt durchgeführt:

### 7.3 Messgeometrie I

Abbildung 25 zeigt die erste Variante bei der sich die Lochblende zwischen der Wellenleiter-Applikator und dem Tuner befand. Der Kurzschlusschieber befand sich auf der gegenüber liegenden Seite des Applikators.

Wie in den Abbildungen 26 und 27 dargestellt, können beide Tuner durch Auf- und Abbewegung der einzelnen Schrauben und der Kurzschlusschieber durch das Herein und Herausschieben in den Wellenleiter eingestellt werden.

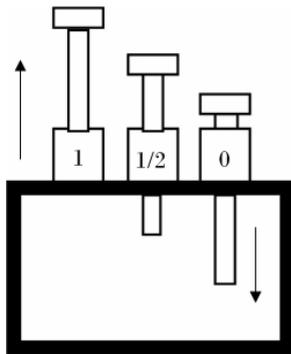


Abbildung 24: Einstellung des Tuner

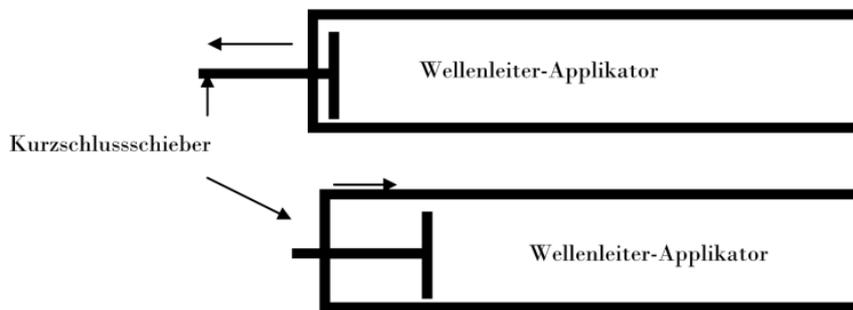


Abbildung 25: Einstellung des Kurzschlusschiebers durch das Herein und Herausschieben in den Wellenleiter

### 7.3.1 Ergebnisse dieser Messungen

Gemessen wurde die Auswirkung des Kurzschlusschiebers und der Lochblende auf die Steigung der stehenden Welle im Wellenleiter-Applikator. Die Ergebnisse dieser Messungen sind in Tabelle 8 zu sehen. Das Ergebnis zeigt keine bzw. eine sehr geringe Auswirkung durch den Kurzschlusschieber und/oder der Lochblende.

Tuner	Leistung in %	
	vorher	reflektiert
1 0 1	100	72
1 1 1	100	73
½ 1 1	100	73
0 1 1	100	73.5
0 ½ 1	100	73
0 0 1	100	72.3
0 0 ½	100	72.2
0 0 0	100	72.9
½ 0 0	100	72.6
½ ½ 0	100	73.2
½ ½ ½	100	73.2
1 0 1	100	72
1 0 ½	100	69.9
1 0 0	100	71

**Tabelle 8:** Leistung vorher und reflektiert als Funktion des Tuners (durch Auf- und Abbewegung der Schrauben im Wellenleiter)

## 7.4 Messung 2

Wie in Abbildung 25 ersichtlich, wurde die Lochblende bei der zweiten Variante zwischen Tuner und dem Verbreiter eingebaut. Auch hier befand sich der Kurzschlusschieber auf der anderen Seite des Wellenleiters. Die Einstellung des Tuners erfolgte durch Auf und Ab Bewegung der jeweiligen Schrauben im Wellenleiter. Analog dazu erfolgte die Einstellung des Kurzschlusschiebers durch dessen Hin- und Herbewegung im Wellenleiter.

### 7.4.1 Ergebnisse dieser Messungen

Gemessen wurde die Auswirkung des Kurzschlusschiebers und der Lochblende auf die Steigung der stehenden Welle im Wellenleiter-Applikator. Die Ergebnisse dieser Messungen sind in Tabelle 9 abgebildet. Das beste Ergebnis zeigte die Tuner-Schraubenstellung (101).

## Zusätzliche Bauelemente des MW-Trockners

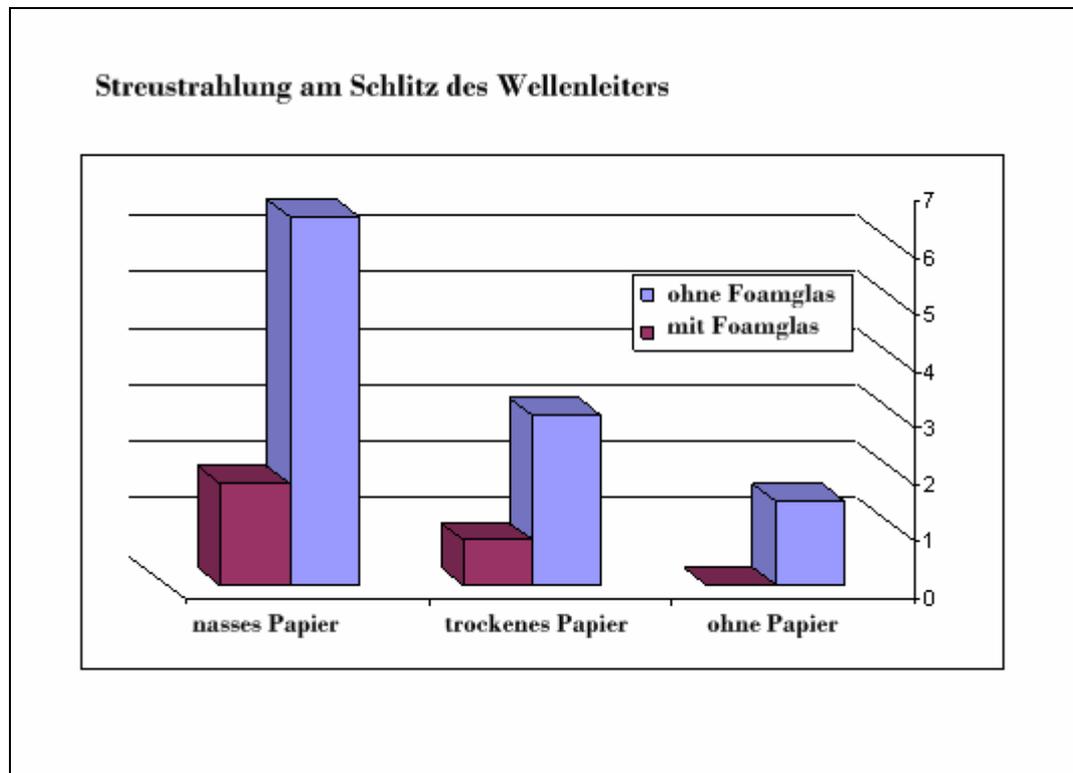
Zusätzlich wurden die verschiedenen Einstellungen des Kurzschlusschiebers durch Herein- und Herausschieben in den Wellenleiter untersucht. Die daraus resultierenden Ergebnisse sind in Tabelle 10 und 11 dargestellt.

Tuner	Leistung in %	
	vorher	reflektiert
1 0 ½	100	61
½ 0 ½	100	73
1 1 1	100	71
½ ½ ½	100	71
1 ½ 0	100	73
1 1 0	100	73
0 1 0	100	73
0 1 ½	100	73
0 1 1	100	72.7

**Tabelle 9:** Leistung vorher und reflektiert als Funktion des Tuners (durch Auf und Ab Bewegung der Schrauben im Wellenleiter)

	Tuner	Leistung %		Streustrahlung	
		vorher	reflektiert	ohne Foamglas	mit Foamglas
<b>ohne Papier</b>	1 0 1	100	62,5	1.2-1.7 mW	0.0 mW
<b>trockenes Papier</b>	1 0 1	100	50-57	2-4 mW	0.8-0.9 mW
<b>nasses Papier</b>	1 0 1	100	40-42	5-8 mW	1.5-2 mW

**Tabelle 10:** Leistung vorher und reflektiert als Funktion des Tuners (durch Auf und Ab Bewegung der Schrauben im Wellenleiter)



**Diagramm 3:** Die Streustrahlung in  $\text{mW}/\text{cm}^2$  des geschlitzten Wellenleiters mit und ohne Foamglas für Luft, sowie trockenes und nasses Papier

Anmerkung: die in diesem Kapitel dargestellten Werte zur Streustrahlung beruhen noch auf Untersuchungen mit dem durch Tuner und Kurzschlusschieber modifizierten alten Resonator mit 5 mm Schlitzbreite

Um die Ergebnisse verwirklichen zu können mussten diese Messungen mit veränderter Einstellung beider Schrauben des Tuners und des Kurzschlusschiebers erneut durchgeführt werden. In Tabelle 10 sind die Ergebnisse dargestellt und es kann folgendes festgehalten werden:

1. Die besten Lagen der Tunerschrauben waren (111) und (101), also wenn alle bzw. die beiden äußeren Schrauben ganz oben am Höhepunkt standen.

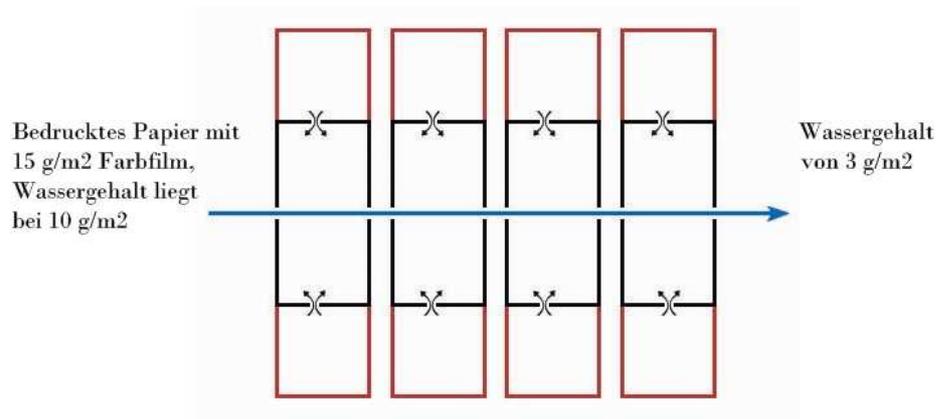
## Zusätzliche Bauelemente des MW-Trockners

2. Beim Einsatz des trockenen Papiers im Wellenleiter-Applikator wurden die minimalen Positionen in Abständen von 5,9 cm und 14,7 cm erreicht. (Diese Differenzen entsprechen etwa der halben Wellenlänge)
3. Als das nasse Papier den Wellenleiter-Applikator passierte wurden die minimalen Positionen in Abständen von 5,6 cm und 14,4 cm erreicht (Auch diese Differenzen entsprechen etwa der halben Wellenlänge). Dies bedeutet, dass die Position von der Auffüllung des Wellenleiters abhängig ist (luftgetrocknetes Papier, nassem Papier) und die Differenzen zwischen den Werten mit trockenem oder nassem Papier 3 mm betragen.
4. Das Foamglas absorbiert die Streustrahlung vom Schlitz des Mikrowellentrockners sehr gut, wie im Diagramm 3 zu sehen.

Tuner Schraubeneinstellung	Kurzschlusschieber	Papier	Reflektion Minimum/Maximum	Leistung in %
1 1 1	14,7 & 5,9 cm	trocken	7,8-8	50
		nass	42-45	50
1 1 1	14,4 & 5,6 cm	trocken	42-45	50
		nass	20-23	50
1 ½ 1	14,7 & 5,9 cm	trocken	7,8-8	50
		nass	42-45	50
1 ½ 1	14,4 & 5,6 cm	trocken	42-45	50
		nass	20-23	50
½ ½ ½	13 & 4,4 cm	trocken	16	50
		nass	42-45	50
½ ½ ½	12,7 & 4,1 cm	trocken	47	50
		nass	30-32	50
½ 0 ½	kein Effekt	trocken	46,7	50
		nass	47	50
½ 0 ½	kein Effekt	trocken	47	50
		nass	46,7	50
0 0 0	kein Effekt	trocken	47	50
		nass	47	50
0 0 0	kein Effekt	trocken	47	50
		nass	47	50

**Tabelle 11:** eingebrachte und reflektierte Leistung als Funktion des Tuners und Kurzschlusschiebers

Die folgenden Überlegungen dienen der Einschätzung des erfolgreichen Abtransportes des durch die MW-Strahlung ausgetriebenen Wassers durch die Spülluft.



**Abbildung 26:** Neuer Trockneraufbau

Wie in der Abbildung 28 zu erkennen ist, sind ca 67 % des nassen Farbfilms, vor dem Trocknen, Wasser. Das entspricht ca. 10 g/m<sup>2</sup> Wasser, welches durch den Druck aufgebracht wurde. Die Anwendungsbreite des MW-Trockners betrug dabei 60 cm und er wurde bei einer Bahngeschwindigkeit von 30 m/min betrieben.

$$\dot{A} = b \cdot v$$

b Bahnbreite in cm

v Bahngeschwindigkeit in m/min

$$\begin{aligned}\dot{A} &= 0,6 \text{ m} \cdot 30 \cdot \frac{\text{m}}{60\text{s}} \\ &= 0,3 \cdot \text{m}^2 / \text{s}\end{aligned}$$

Die Menge des Wassers bei Druckgeschwindigkeit entspricht:

$$\begin{aligned} md &= 10 \cdot \frac{\text{g}}{\text{m}^2} \cdot 0,3 \cdot \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \\ &= 3 \cdot \frac{\text{g}}{\text{s}} \end{aligned}$$

Das Wasser wurde um etwa 2/3 in der Menge reduziert:

$$\begin{aligned} &= \frac{2}{3} \cdot 3 \frac{\text{g}}{\text{s}} \\ &= 2 \frac{\text{g}}{\text{s}} \end{aligned}$$

Aus der Kennlinie 4 auf Seite 31 entnimmt man für einen Schlauchdurchmesser  $d_s = 60$  mm und einen Bohrungsdurchmesser von 2 mm folgende Daten:

Austrittsgeschwindigkeit Luft:	43 m/s
Volumenstrom pro 1/2 Resonator:	8 ltr/s = 0,008 m <sup>3</sup> /s
Volumenstrom System:	8 · 0,008 = 0,064 m <sup>3</sup> /s

Bei 2 g/s durch die Luft aufzunehmendem Wasser ergibt sich bei einer Luftdichte von 1,3 kg/m<sup>3</sup> ein  $\Delta x$  von:

$$\Delta x = \frac{\Delta \dot{m}_{DAMPF}}{\Delta \dot{m}_{LUFT}} = \frac{2 \frac{\text{g}}{\text{s}}}{0,064 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 1,3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 24 \frac{\text{g}}{\text{kg}}$$

Zum Bestimmen der relativen Luftfeuchtigkeit in Prozent nach dem Verdampfungsprozess wurde das Mollier-ix-Diagramm verwendet. Die relative Zielluftfeuchtigkeit beträgt 90% bei 25°C im Hohlleiter. Unter Annahme eines Hallenklimas (Klima der von der Pumpe angeforderten Luft) von 20°C/50%relF ergibt sich lt. ix-Diagramm eine Wasserbeladung von 7,3 g/kg. Die Wasserbe-

ladung beim angestrebten Zielklima von 25°C/90%relF ergibt sich lt. Diagramm zu 18 g/kg. Daraus folgt zunächst ein Aufnahmevermögen der Luft von

$$18 \text{ g/kg} - 7,3 \text{ g/kg} = 10,7 \text{ g/kg Luft.}$$

Variiert man die Berechnung für einen Bohrungsdurchmesser von 3 mm, so erhält man in analoger Vorgehensweise aus dem Diagramm 1d) und der Rechnung:

Austrittsgeschwindigkeit Luft:	34 m/s
Volumenstrom System:	0,12 m <sup>3</sup> /s
Aufnahmevermögen Luft:	12,8 g/kg

Man erkennt, dass der Bohrungsdurchmesser einen gewissen Einfluss auf die Wasseraufnahmefähigkeit hat. Weil die hier zugrunde gelegten Rechnungen zur Luftführung überschlägig sind und mit dem System, wie in der Dissertation Saad beschrieben, mit 2 mm Bohrungsdurchmesser gute Erfahrungen gemacht wurden, wird zunächst mit einem Bohrungsdurchmesser von 2 mm gearbeitet. In der Praxiserprobung an der Druckmaschine der Firma Interprint kann dann ggf. der Durchmesser erweitert werden, während umgekehrt eine Verringerung nicht möglich ist bzw. einen Neubau von Teilen erforderlich machen würde.

In jedem Fall ist diesem Punkt bei der Erprobung des Systems Aufmerksamkeit zu widmen. Mögliche Abhilfemaßnahmen bei Übersättigung der Luft innerhalb des Trockners können sein:

- Temperierung des Applikators zur Vermeidung von Kondensat an den Innenwänden des Applikators

- Abtransport der übersättigt an den Schlitzen austretenden austretenden Luft
- Erwärmung der zugeführten Luft auf eine über der Hallentemperatur liegende Temperatur.

Der letzte aufgeführte Punkt soll anhand einer Beispielrechnung dargestellt werden. Bei Erreichen eines Klimas im Applikator von 40°C/90%relF durch Vorwärmung der Hallenluft beträgt die Wasserbeladung der Luft lt. ix-Diagramm 43,6 g/kg. Daraus ergibt sich ein Aufnahmevermögen der Luft von

$$43,6 \text{ g/kg} - 7,3 \text{ g/kg} = 36,3 \text{ g/kg},$$

was im vorliegenden Ansatz ausreichend wäre.

---

[1] Dissertation Herrn Dr. Ashraf Saad

[2] RK printing, Coating and laminating machine, RK print-coating instruments limited, Lillington, Royston, Herts., SG8 0QZ

[3] Dissertation Herrn Dr. Ashraf Saad

### 8 Fazit

Der Trockner der Firma Muegge zur Trocknung wasserbasierender Druckfarben und Lacke ist robust und industrietauglich. Seine Leistungsdaten bei der Einbringung von Energie in den Bedruckstoff entsprechen den Erwartungen an und Absichten in diesem Projekt.

Die Luftführung konnte soweit gegenüber dem experimentellen Trockner aus der Dissertation von Dr. Ashraf Said verbessert werden, dass ein energetisch günstiges Gebläse anstatt Druckluft zur Resonatorspülung eingesetzt werden kann.

Bei Tuner und Kurzschlusschieber sollte für den Einsatz in der industriellen Praxis an Produktionsanlagen eine Einstellung leistungsbezogen vollautomatisch erfolgen, um das System arbeitsaufwandneutral für die Bediener an verschiedene Druckbedingungen kontinuierlich anzupassen. Die Erprobung an der Labordruckmaschine hat gezeigt, dass abhängig von der Wassermenge auf der Bedruckstoffbahn und der Druckgeschwindigkeit jedes Mal über den Kurzschlusschieber eine optimale Position der Leistungsmaximierung eingestellt werden muß / gefunden werden kann. Dies ist für den industriellen Einsatz möglichst zu automatisieren. Eine solche Automatisierung könnte etwa auf Grundlage der Erfassung der reflektierten Leistung erfolgen

Bis Mitte 2009 sind keine Feldversuche bei der Firma Interprint möglich und auch zur Projektzeit waren diese nicht möglich, so dass die Überlegungen zu Effizienz des Systems sich auf Angaben des Trocknerherstellers (Trockner an der bei Interprint eingesetzten und für die Feldversuche geplanten Anlage) beziehen. Das darauf basierende Ergebnis ist positiv.

## Fazit

---

Projekt Mikrowellentrocknung – Saad/Urban/Eisberg – Druck- und Medientechnologie

---

Seitens der Firma Fischer & Krecke (Bobst Group) wurde Interesse an dem System bekundet.

## 9 Energieeffizienz

### 9.1 Leistungsbestimmung Mikrowelle

Um die Energieeffizienz unseres Mikrowellentrockners zu prüfen bedarf es der Feststellung der eigenen Leistungsaufnahme, um den Verbrauch mit dem des konventionellen Trockners in Vergleich zu stellen.

Die Leistungsabnahme des Trockners wurden mit drei Leistungsmessgeräten der Marke Fluke vom Typ 43/43b bestimmt. Der Versuchsaufbau stellte sich wie in der Abbildung 30 Leistungsmessung dar.

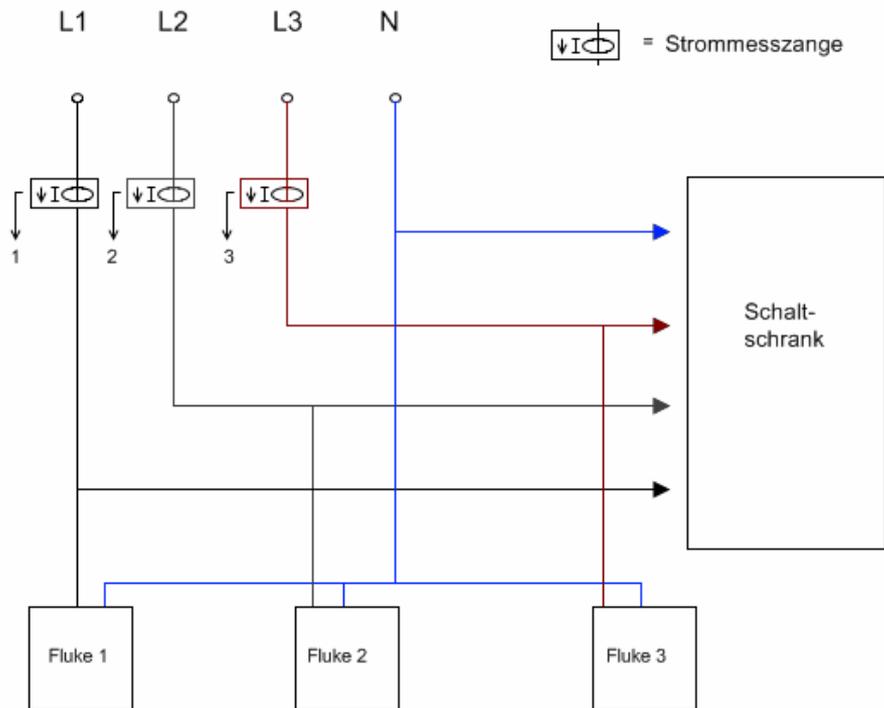


Abbildung 27: Leistungsmessung

Jedes Gerät wurde mit einer Ader und der dazugehörigen Strommesszange von L1, L2 oder L3 verbunden, und mit dem Neutralleiter als Referenz verkabelt.

Dadurch dass die Adern sinusförmig, asymmetrisch belastet waren mussten die Leistungen der jeweiligen Adern aufaddiert werden,

$$\boxed{I_1 \times U_1 + I_2 \times U_2 + I_3 \times U_3 = S_{Gesamt}}$$

um die Scheinleistung und schließlich durch Multiplizieren mit dem Cosinus Phi die Wirkleistung zu bestimmen.

$$\boxed{\cos \varphi \times S_{Gesamt} = P_{Gesamt}}$$

Die Leistungsabnahme für den Schaltschrank und seine vier Wellenleiter wurden bestimmt und nochmals unterteilt in die Leistung beim Vorheizen und jeweils während des Betriebs bei 1 kW und 2 kW. Die ermittelten Werte sind gleichzeitig kWh, weil die Abnahme konstant war und die verschiedenen Konfigurationen des Trockners hierauf keinen Einfluss hatten. Aufgrund der Fehlertoleranz des Fluke 43/43b sollte nur die erste Stelle hinter dem Komma berücksichtigt werden. [1]

Im Bereich der vollen Leistungsabnahme liegt der Trockner bei 13,62 kW.

Wirkleistung	Scheinleistung	Blindleistung
<i>Σ Vorheizen</i>	<i>Σ Vorheizen</i>	<i>Σ Vorheizen</i>
0,73 KW	1,17 KW	0,71 KW
<i>Σ1000</i>	<i>Σ1000</i>	<i>Σ1000</i>
7,09 KW	7,96 KW	3,59 KW
<i>Σ2000</i>	<i>Σ2000</i>	<i>Σ2000</i>
12,73 KW	13,62 KW	4,85 KW

**Tabelle 12:** MW-Trockner Leistungsabnahme

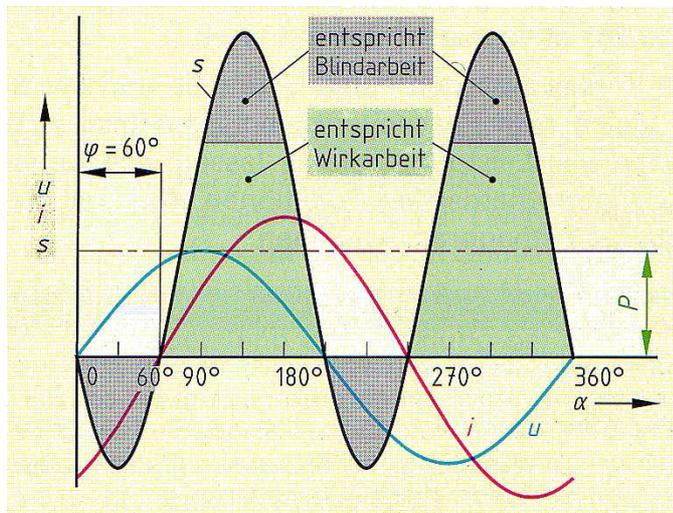


Abbildung 28: Leistung [2]

## 9.1.1 Wirkleistung (P)

Die Wirkleistung ist die elektrische Leistung die in mechanische, thermische, oder sonstige gewünschte andere Leistung umgewandelt wird. [3]

$$P = U \cdot I \cdot \cos(\varphi)$$

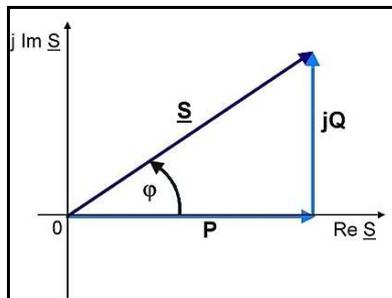
## 9.1.2 Blindleistung (Q)

Ist die Leistung die zwischen Erzeuger und Verbraucher hin und her pendelt ohne eine Wirkung zu erzielen. Bei einer zu hohen Blindleistung wird diese von den Energieversorgungsunternehmen (EVU) mit Zuschlägen zum normalen Tarif berechnet. Sie sollte bei einem Wert von über 0,9 liegen beim Verhältnis von Wirk- zu Scheinleistung. [4]

$$Q = U \cdot I \cdot \sin(\varphi)$$

## 9.1.3 Scheinleistung (S)

Die Scheinleistung ist die Leistung auf die eine Energiezufuhr (Generator, Transformatoren, Leitungen usw.) ausgelegt sein muss. Sie berechnet sich bei sinusförmigen Größen aus der Spannung mal dem Strom, oder aus der geometrische Summe von Wirkleistung und Blindleistung. [5]



$$\sqrt{P^2 + Q^2} = S$$

Abbildung 29: Leistungsdreieck

## 9.2 Auswertung

Bei Betrachtung der Leistungen ist auffällig, dass bei dem Verhältnis von Wirk- zu Scheinleistung ein Wert entsteht der für das Vorwärmen und bei 1kW unter 0,9 liegt was zur Folge hätte, dass ein höherer Strompreis zu bezahlen wäre, wenn jener Wert unterschritten wird. Abhilfe könnte eine Blindstromkompensationsanlage schaffen oder zu empfehlen wäre  
Zumindest ein mit den EVU angepasster Vertrag.

Vorwärmen = 0,62

Betrieb 1kW = 0,89

Betrieb 2kW = 0,93

$$\frac{P}{S} \geq 0,9$$

### 9.3 Leistungsberechnung Konvektionstrockner

Die Leistung für den Konvektionstrockner konnte nur theoretisch auf Grundlage von Daten des ehemaligen Maschinenherstellers Kochsiek bzw. Fischer & Krecke, welcher heute der Bobst Group angegliedert ist, ermittelt werden. Im Zeitrahmen dieser Bachelor-Thesis war es leider nicht möglich eigene Leistungsparameter zu bestimmen.

Zur Berechnung der theoretischen Daten stand Folgendes zur Verfügung:

<p><i>gegeben :</i></p> <p><i>Temperatur der zugeführten Luft :</i></p> $\Delta t = ca. 50 \text{ } ^\circ C$ <p><i>Volumenstrom :</i></p> $\dot{V} = 120 \text{ } m^3 / \text{min}$ <p><i>Wärmeleistung :</i></p> $\dot{Q} = \dot{V} \cdot 60 \cdot \Delta t \cdot 0,31$ $\dot{Q} = 120 \cdot 60 \cdot 50 \cdot 0,31 = 111600 \text{ } kcal / h$ <p><i>Laut Hersteller Angabe ca. 120000 kcal / h</i></p> $1 \text{ } kcal = 1,163 \text{ } Wh$ $120000 \cdot 1,163 = 139560 \text{ } W = 139,56 \text{ } kW$ <p><i>Da jene Leistung für die vollständige Maschine ist, es vier Druckwerke gibt und die angenommen Energieabnahme gleichverteilt ist, wird der Quotient gebildet.</i></p> $\frac{139,56}{4} = 34,89 \text{ } kW \text{ je Druckwerk}$
---

**9.4 Liste der Verbräuche**

Bei der Auflistung für die jeweilige Trocknerkonfiguration gelten die Werte für den Fall von vier in Betrieb befindlichen Druckwerken angenommen bei voller Leistungsabnahme. Zu der MW - Trocknung wird noch ein Drittel des konventionellen Trockners hinzu addiert, weil sich in der Dissertation von Saad herausgestellt hat, dass die Trocknung bei großen Mengen von Wasser sehr effizient arbeitet jedoch bei zunehmender Trocknung durch die herabgesetzte Beweglichkeit der Wassermoleküle ineffizienter wird. Daraus lässt sich schließen, dass zum abschließenden Trocknen immer noch der Konvektionstrockner benötigt wird. Die Leistungen würden aber nach Aufsummierung immer noch eine Ersparnis von 30 kW aufweisen im Vergleich zu den Werten der Maschinenhersteller.

<b>Konvektionstrockner (KT)</b>		<b>MW+KT+Gebläse</b>		
		MW*1	13,6	kW
139,56	kW	Gebläse*1	1,8	kW
		MW*4	54,4	kW
		Gebläse*4	7,2	kW
		1/3 KT	46,52	kW
139,56	kW		108,12	kW

**Tabelle 13:** Rechnung Leistungsmessung

- 
- [1] vergleiche Fachkunde Elektrotechnik Auflage 13
  - [2] vergleiche Fachkunde Elektrotechnik Auflage 13
  - [3] vergleiche Fachkunde Elektrotechnik Auflage 13
  - [4] vergleiche Fachkunde Elektrotechnik Auflage 13
  - [5] vergleiche Fachkunde Elektrotechnik Auflage 13

## Anhang

### Ausschnitte aus dem BGV B11

1 Juni 2001

**Tabelle 1: Basiswerte für unmittelbare Wirkungen**

Frequenzbereich	Effektivwert der elektrischen Stromdichte J in A/m <sup>2</sup> 2*	Spezifische Absorptionsrate SAR in W/kg 3*			Spezifische Absorption für Impulsfelder SA in J/kg 4* 5*	Leistungsabsorption für dichte S in W/m <sup>2</sup> 6* 7*
		Ganzkörpermittelwert	Lokale SAR 8*			
			Kopf und Rumpf	Gliedmaßen		
> 0 – 1 Hz	0,040	(–)	(–)	(–)	(–)	(–)
1 – 4 Hz	0,040 / f 9*	(–)	(–)	(–)	(–)	(–)
4 – 1000 Hz	0,010	(–)	(–)	(–)	(–)	(–)
1 – 100 kHz	f / 100 10*	(–)	(–)	(–)	(–)	(–)
0,1 – 10 MHz	f / 100 11*	0,4	10	20	(–)	(–)
0,01 – 10 GHz	(–)	0,4	10	20	0,01	(–)
10 – 300 GHz	(–)	(–)	(–)	(–)	(–)	50
(–) bei diesen Frequenzen nicht relevant						

### 2.3 Abgeleitete Werte im Frequenzbereich 91 kHz bis 300 GHz

Für Expositionszeiten  $t \geq 6$  Minuten (Dauerexposition) gelten die Werte nach Tabelle 8 bzw. 11. Dabei ist über jedes 6-Minuten-Intervall zu mitteln.

Neben der Angabe von zulässigen Werten für Dauerexposition sind für Expositionszeiten  $t < 6$  Minuten wegen der Thermoregulation des Körpers höhere Werte zulässig. Diese sind für jeden Einzelfall mit den in der Tabelle 9 enthaltenen Formeln zu bestimmen. Bei Anwendung der Werte der Tabelle 9 ist zusätzlich sicherzustellen, dass die Spitzenwerte nach Tabelle 10 nicht überschritten werden.

2.3.1 Zulässige Werte im Expositionsbereich 1 und im Bereich erhöhter Exposition

Tabelle 8: Werte im Expositionsbereich 1 bei Expositionszeiten  $\geq 6$  Minuten

Frequenzbereich f / MHz	Effektivwert der elektrischen Feldstärke in V/m	Effektivwert der magnetischen Feldstärke in A/m	Mittelwert der Leistungsdichte in W/m <sup>2</sup>
0,091 – 0,576	1066	4,9 / f	(–)
0,576 – 10	614 / f	4,9 / f	(–)
10 – 30	61,4	4,9 / f	(–)
30 – 400	61,4	0,163	10
400 – 2000	$3,07 \cdot \sqrt{f}$	$8,14 \cdot \sqrt{f} \cdot 10^{-3}$	f / 40
2000 – 300000	137,3	0,364	50

Tabelle 9: Werte im Bereich erhöhter Exposition (Expositionszeiten < 6 Minuten)

Frequenzbereich f / MHz	Höchstwert von $\sum E_i^2 \cdot t_i$ in (V/m) <sup>2</sup> · min	Höchstwert von $\sum H_i^2 \cdot t_i$ in (A/m) <sup>2</sup> · min	Höchstwert von $\sum S_i \cdot t_i$ in (W/m <sup>2</sup> ) · min
1 – 10	$2,26 \cdot 10^6 / f^2$	143 / f <sup>2</sup>	(–)
10 – 30	$22,6 \cdot 10^3$	143 / f <sup>2</sup>	(–)
30 – 400	$22,6 \cdot 10^3$	0,16	60
400 – 2000	$56,5 \cdot f$	$0,4 \cdot 10^{-3} \cdot f$	$0,15 \cdot f$
2000 – 300000	$113 \cdot 10^3$	0,8	300

$E_i, H_i$	gemessener oder berechneter Effektivwert der elektrischen bzw. magnetischen Feldstärke während des i-ten Intervalls
$S_i$	gemessener oder berechneter Mittelwert der Leistungsdichte während des i-ten Intervalls
$t_i$	Dauer des i-ten Intervalls

**Tabelle 10: Spitzenwerte im Bereich erhöhter Exposition (Expositionszeiten < 6 Minuten)**

Frequenzbereich f / MHz	Spitzenwert der elektrischen Feldstärke in V/m	Spitzenwert der magnetischen Feldstärke in A/m	Spitzenwert der Leistungsdichte in W/m <sup>2</sup>
0,091 – 0,1	2222	10 / f	(–)
0,1 – 0,2	22222 · f	10 / f	(–)
0,2 – 0,3	22222 · f	50	(–)
0,3 – 3	6667	50	(–)
3 – 10	20000 / f	150 / f	(–)
10 – 30	2000	150 / f	(–)
30 – 400	2000	5	10000
400 – 2000	100 · √f	0,25 · √f	25 · f
2 000 – 300 000	4472	11,2	50000

### 2.3.2 Zulässige Werte im Expositionsbereich 2

**Tabelle 11: Werte im Expositionsbereich 2 bei Expositionszeiten <sup>3</sup> 6 Minuten**

Frequenzbereich f / MHz	Effektivwert der elektrischen Feldstärke in V/m	Effektivwert der magnetischen Feldstärke in A/m	Mittelwert der Leistungsdichte in W/m <sup>2</sup>
0,091 – 0,14	333,3	16,8	(–)
0,14 – 0,826	333,3	2,35 / f	(–)
0,826 – 10	275 / f	2,35 / f	(–)
10 – 30	27,5	2,35 / f	(–)
30 – 400	27,5	0,073	2
400 – 2000	1,375 · √f	3,64 · √f · 10 <sup>-3</sup>	f / 200
2000 – 300000	61,5	0,163	10