



INFOR-Projekt Nr. 116

**Grundlagenuntersuchungen zur Anwendung
Mikrowellen basierender Trocknungssysteme
in der Papierindustrie**

Schlussbericht

Juni 2008

Technische Universität Darmstadt
Fachgebiet Papierfabrikation und
Mechanische Verfahrenstechnik

Prof. Dr.-Ing. Samuel Schabel

Projektleiter:
Dipl.-Ing. Jörg-Karl Bösner

INFOR 116

Grundlagenuntersuchungen zur Anwendung mikrowellenbasie- render Trocknungssysteme in der Papierindustrie

**Fachgebiet Papierfabrikation und
Mechanische Verfahrenstechnik
TU Darmstadt**

Dipl.-Ing. Jörg-Karl Bösner
Prof. Dr.-Ing. Samuel Schabel

Juni 2008

Kontakt:

Technische Universität Darmstadt

Fachgebiet Papierfabrikation und

Mechanische Verfahrenstechnik

Prof. Dr.-Ing. Samuel Schabel

Alexanderstr. 8

D-64283 Darmstadt

Telefon: +49 – 61 51 – 16 21 54

Fax: +49 – 61 51 – 16 24 54

E-Mail: Schabel@papier.tu-darmstadt.de

Inhalt

1	Einleitung	1
2	Bewertung der Machbarkeit und grundlegende wirtschaftliche Betrachtungen	2
2.1	Messprinzip zur Bestimmung der Wechselwirkung Mikrowelle ./ . Papier.....	2
2.1.1	Ergebnisoption von Laborblättern bei 90 %, 65 % und 50 % Trockengehalt ...	3
2.1.2	Tendenzen der einzelnen Messungen	5
2.2	Betrachtung der Wirtschaftlichkeit.....	5
2.2.1	Ergebnisse für installierte Mikrowellenleistung	5
2.2.2	Betrieb der Trocknungspartie mit Mikrowellen	6
2.2.3	Benötigte Änderungen beim Einsatz von Mikrowellen	6
2.2.4	Betrieb der Referenzmaschine	7
2.2.5	Wirtschaftlichkeit: Installation der Mikrowellen-Anlage.....	8
2.2.6	Betrieb der MW Anlage	9
3	Bewertung der Wirtschaftlichkeit.....	10
3.1	Installation der Mikrowellen-Anlage	10
3.2	Betrieb der Anlage	10
3.3	Möglichkeiten zum alternativen Einsatz	10
4	Zusammenfassung	11
5	Literatur.....	12

1 Einleitung

Papiermaschinen benötigen viel Energie, der größte Teil hiervon (etwa 80 %) wird in der Trockenpartie aufgewendet, um die Papierbahn nach der Pressenpartie auf einen Endtrockengehalt von etwa 96 % zu bringen.

Um diesen Kostenfaktor zu verringern, wird – auch in Anbetracht der immer weiter steigenden Energiepreise – verstärkt nach alternativen Trocknungsmethoden Ausschau gehalten.

Die Anwendung von Mikrowellenstrahlung zur Trocknung von Papier hat bisher nur eine untergeordnete bzw. keine Bedeutung. Während die Mikrowellen-Trocknung beispielsweise von Restauratoren zur Trocknung wassergeschädigter, nass behandelte oder Kunststoff imprägnierter Einzelblätter eingesetzt wird, blieb eine Anwendung bei der Trocknung der Papierbahn in der Papiermaschine auf wenige Tests zur Korrektur der Querprofilfeuchte beschränkt, die mittlerweile schon mehr als 30 Jahre zurückliegen. Die Ergebnisse der damaligen Tests zeigten u. a., dass die Homogenität der Mikrowellenfelder unzureichend für eine gleichmäßige Trocknung war und die resultierenden Energiekosten die Kosten sowohl der Zylinder-Kontakt-trocknung als auch der Infrarot-Trocknung deutlich überstiegen. Daraufhin sank das Interesse der Papierindustrie und der Papiermaschinenhersteller an einer Mikrowellen-Trocknung praktisch auf Null.

In den letzten Jahren wurden allerdings sowohl die Mikrowellengeneratoren und –resonatoren als auch die Technologie der Mikrowellen-Trocknung hauptsächlich auf dem Gebiet der Polymerverarbeitung (Lack-trocknung, Sintern poröser Polymerelemente) weiterentwickelt. So zeigten Versuche im halbertechnischen Maßstab, dass die Anwendung von Mikrowellen bei der Härtung wasserbasierender Lacksysteme im Vergleich zur Umluft-trocknung Zeiteinsparungen zwischen 30 und 80 % und Energieeinsparungen von ca. 50 % ermöglichen. Auch bei der Trocknung von Holz treten Vorteile gegenüber der konventionellen Zuluft-, Abluft-trocknung auf.

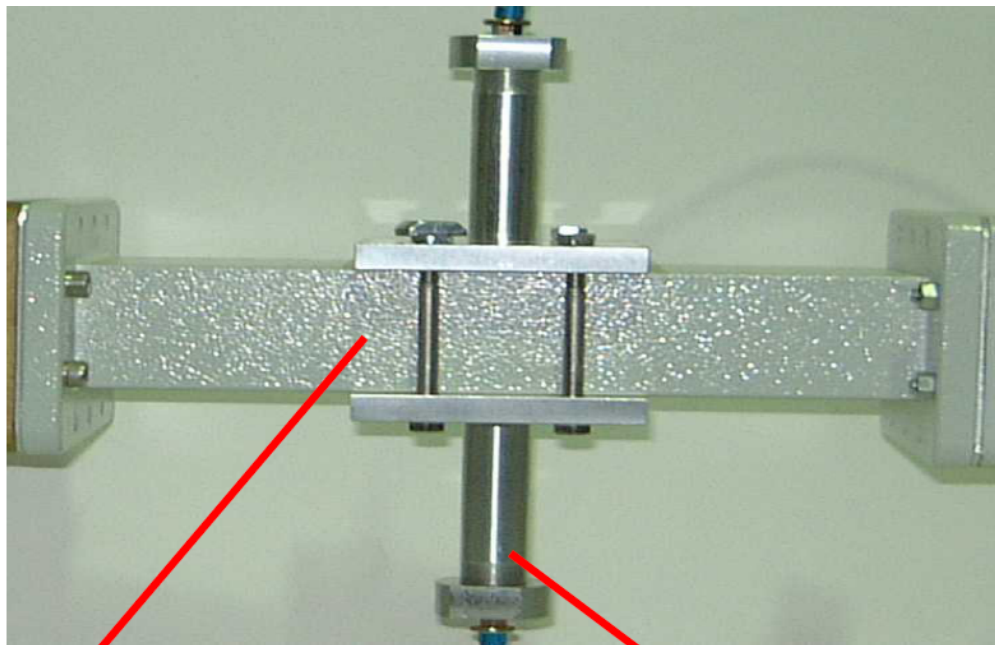
Daher wird in diesem Projekt die grundsätzliche Machbarkeit der Trocknung mit Mikrowellen untersucht. Hierbei wird hypothetisch eine Trockenpartie einer SC-Maschine durch eine Mikrowellentrockenpartie mit aktuell verfügbarer Technologie ersetzt. Hierfür werden sowohl die Installations-, als auch die Betriebskosten abgeschätzt.

Um beim Wirkungsgrad der Mikrowellen realistische Aussagen machen zu können, wurden die dielektrischen Konstanten bei verschiedenen Rohstoffsorten und Feuchtigkeiten gemessen. Aus diesen kann nun der Wirkungsgrad berechnet werden, der in die oben genannten Berechnungen einfließt.

2 Bewertung der Machbarkeit und grundlegende wirtschaftliche Betrachtungen

2.1 Messprinzip zur Bestimmung der Wechselwirkung Mikrowelle ./ Papier

Die Messung der dielektrischen Funktion mit Hilfe eines dielektrischen Resonators ist ein einfaches und sicheres Verfahren, um die Wechselwirkung eines Stoffes mit Mikrowellen zu bestimmen. In Abbildung 1 ist die verwendete Anlage dargestellt. In einer Mikrowellenstrecke wird ein resonantes Mikrowellenfeld aufgebaut. Gemessen werden die Verringerung der Güte des Resonators (Q) und die Verschiebung der Resonanzfrequenz ($f_c - f_s$) aufgrund der Beladung durch die Papierprobe.



Hohlleiterresonator

Probenhalter

Abbildung 1: Der verwendete Hohlraumresonator

Bei festgelegter Geometrie kann die dielektrische Funktion entsprechend der folgenden Formeln ausgerechnet werden, die sich aus der Verschiebung der Resonanzkurven von f_c zu f_s ergeben; der Wirkungsgrad f_s ergibt sich aus dem Verhältnis der Anteile der Feldenergie ε' und der thermischen Energie ε'' :

$$\varepsilon' = 1 + \frac{V_c(f_c - f_s)}{2V_s f_s} = E1 = \text{Anteil Feldenergie}$$

$$\varepsilon'' = \frac{V_c}{4V_s} \left(\frac{1}{Q_s} - \frac{1}{Q_c} \right) = E2 = \text{Anteil thermischer Energie}$$

$$\eta_{eff} = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}$$

Q_0 und f_c sind die Werte des unbeladenen Resonators. Aufgrund der Beladung verschiebt sich die Frequenz zu f_s und reduziert sich die Güte auf Q_0 . Mit Hilfe des Volumens kann dann die dielektrische Funktion anhand der angegebenen Formeln berechnet werden.

2.1.1 Ergebnisoption von Laborblättern bei 90 %, 65 % und 50 % Trockengehalt

Für die Messungen wurden mit einem Blattbildner standardisierte Blätter hergestellt, die für die Messungen auf die entsprechenden Bedingungen konditioniert und für den Transport mehrfach eingeschweißt wurden. Der Transport zum ICT erfolgte per Expressendung, um einen eventuellen Feuchtigkeitsverlust durch die Folie so gering wie möglich zu halten.

Die Proben wurden so ausgewählt, dass mit möglichst wenigen Proben ein großer Teil der aktuell am Markt erhältlichen Papiere abgedeckt wird. Die ausgewählten Proben sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Verwendete Proben

	Niedriger Holzstoffanteil	Mittler Holzstoffanteil	Höherer Holzstoffanteil
Niedriger Füllstoffgehalt	BSKL, Buchensulfite, Klarwasser		
Mittlerer Füllstoffgehalt		AP, Altpapier	
Höherer Füllstoffgehalt	BSPR, Buchensulfite, Prozesswasser		SC, SC-Stoff

Die Probenbezeichnung setzt sich aus den Anfangsbuchstaben der verwendeten Materialien zusammen, ergänzend wurde in den Diagrammen die Bezeichnungen LT für Lufttrocken oder der entsprechende Trockengehalt angefügt. Es wurden folgende Proben verarbeitet:

SC	SC-Stoff
AP	Altpapier
BSPR	Zellstoff aus Buchensulfite, Prozesswasser
BSKL	Zellstoff aus Buchensulfite, Klarwasser

Die Feuchtigkeitswerte wurden so gewählt, dass sie einen großen Teil der in der Trockenpartie durchlaufenden Trockengehalte abdeckt, das Blatt allerdings noch stabil ist.

Alle Proben wurden bei allen Trockengehalten gemessen; die Messergebnisse sind im Folgenden aufgeführt, höhere Werte bezeichnen eine höhere Absorption:

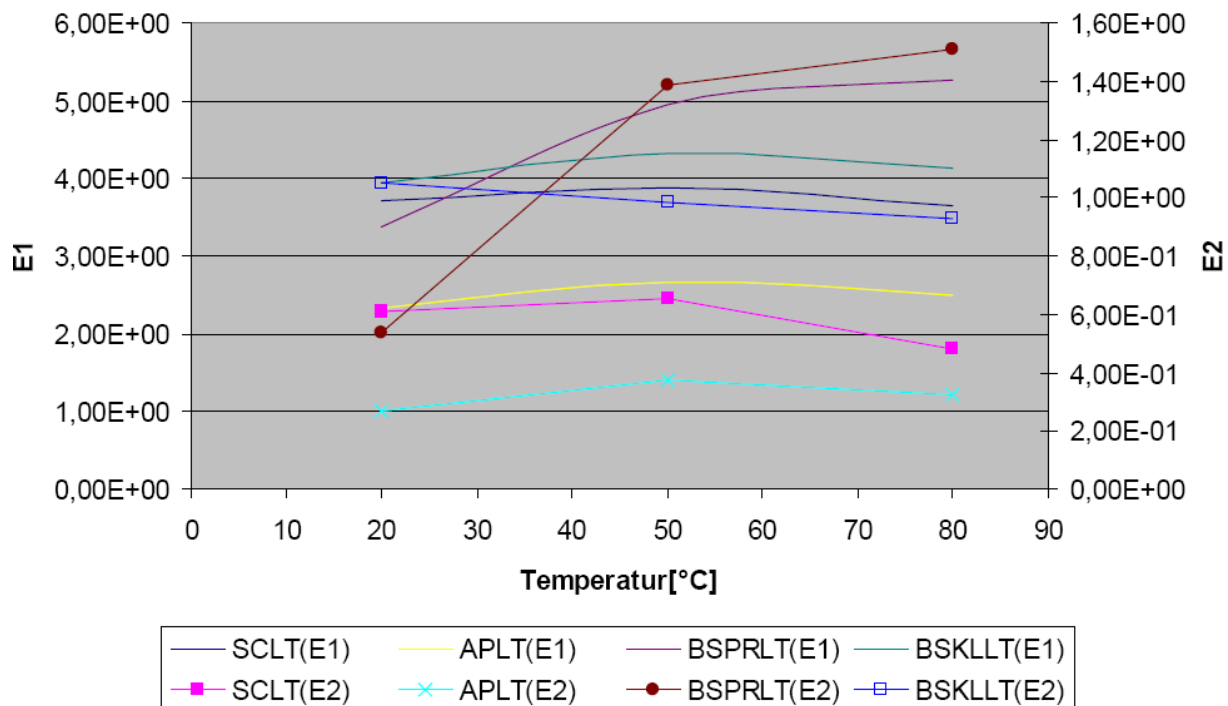


Abbildung 2: Energieabsorption bei lufttrockenem Papier

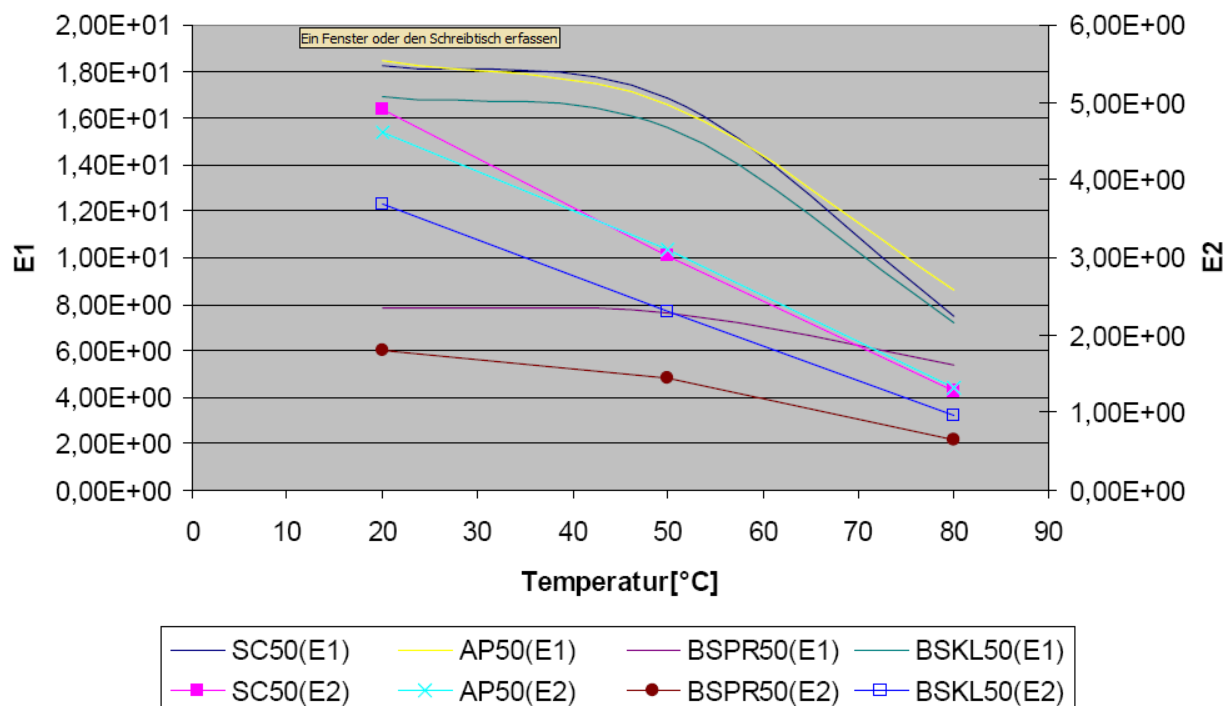


Abbildung 3: Energieabsorption bei 50 % Trockengehalt

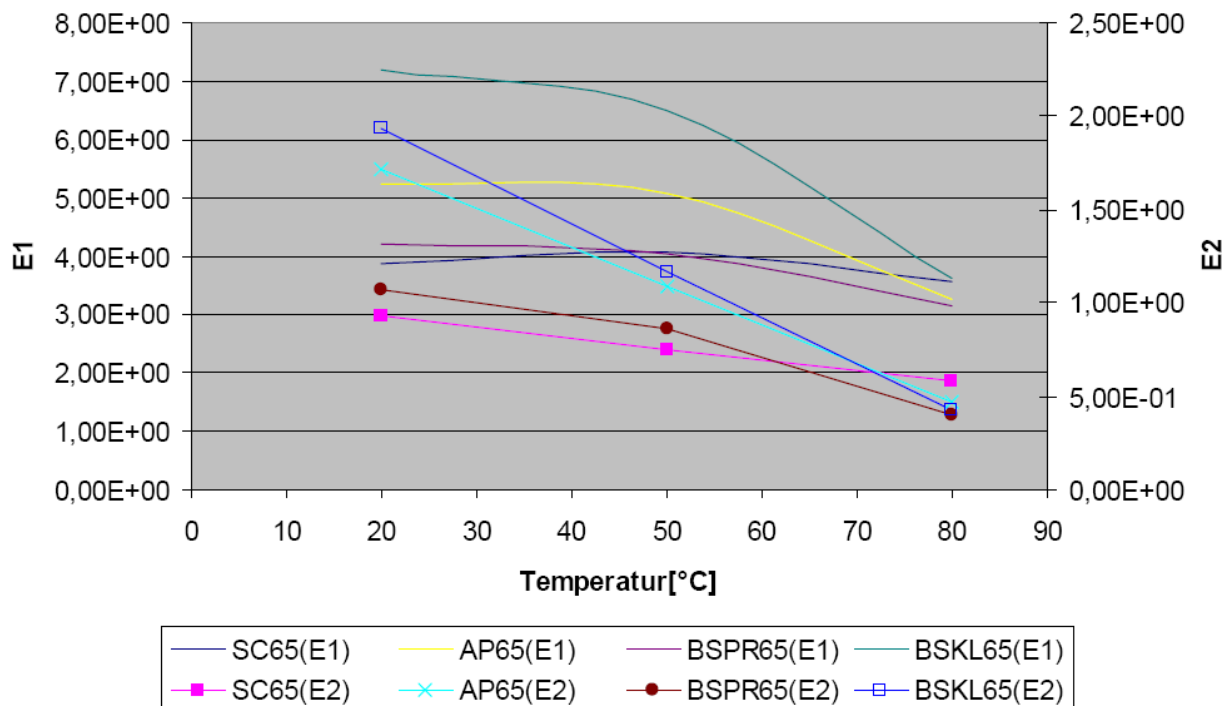


Abbildung 4: Energieabsorption bei 65 % Trockengehalt

2.1.2 Tendenzen der einzelnen Messungen

Die Messungen zeigen, dass die Energieabsorption ε'' bei niedrigen Temperaturen und hohem Wassergehalt am höchsten ist. Eine Ausnahme bildet lediglich die Probe mit starken Verunreinigungen (z. B. mit Salzen) durch das Kreislaufwasser, was sich aber mit den Ergebnissen aus früheren Untersuchungen deckt [Hankin1970].

2.2 Betrachtung der Wirtschaftlichkeit

Nachdem die dielektrischen Funktionen der einzelnen Proben bestimmt worden sind, ist es nun möglich, auf dieser Basis die Wirkungsgrade für eine Mikrowellen Trocknungspartie abzuschätzen. Mit Hilfe dieser Wirkungsgrade können die Kosten im Betrieb berechnet werden. Um die Vergleichbarkeit mit etablierten Technologien herstellen zu können, werden zusätzlich die Kosten für eine herkömmliche Trockenpartie überschlagen. Ergänzend werden die Installationskosten einer herkömmlichen Trockenpartie mit denen einer mikrowellenbasierten verglichen.

2.2.1 Ergebnisse für installierte Mikrowellenleistung

Um die benötigte Energie abzuschätzen, werden folgende Annahmen getroffen:

- Papier mit 80 g pro m² flächenbezogene Masse
- Trocknung von 50 % Trockengehalt auf 96 % Trockengehalt
- Entfernung von $m_{A,Wasser} = 75$ g Wasser pro m² Papier
- Maschinengeschwindigkeit $v_{Maschine} = 1600 \frac{m}{s}$.

$$\dot{Q} = m_{A,Wasser} \cdot X \cdot H_{Dampf} \cdot b_{Maschine} \cdot v_{Maschine} \cdot \eta_{elektrisch} \cdot \eta_{MW,Papier}$$

$$\dot{Q} = 0,075 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \cdot X \cdot 2500 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \cdot 8 \text{ m} \cdot 1600 \frac{\text{m}}{\text{min}} \cdot \frac{1}{0,60} \cdot \frac{1}{0,15} \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} = 410 \cdot X \cdot \text{MW}$$

Diese benötigte Leistung $\dot{Q}$ setzt sich aus dem pro Fläche zu entfernenden Wasser, der Bahnbreite b_{Maschine} , der Maschinengeschwindigkeit v_{Maschine} , der Verdampfungsenthalpie H_{Dampf} und den einzelnen Wirkungsgraden η der Energieumwandlung zusammen. Zusätzlich berücksichtigt der Leistungsfaktor X die Korrektur, die den Energieverlust durch die schnelle Trocknung beschreibt. Dieser Korrekturfaktor liegt bei einer herkömmlichen Trockenpartie bei 10 [Boesner2004, Stumm2007] und ist $X \geq 1$.

2.2.2 Betrieb der Trocknungspartie mit Mikrowellen

$$K_{\text{MW}} = \dot{Q} \cdot X \cdot K_{\text{Strom / kWh}} \cdot m_{\text{Papierproduktion}}$$

$$K_{\text{MW}} = 410 \text{ MW} \cdot X \cdot 0,08 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 32800 \cdot X \frac{\text{€}}{\text{h}}$$

Wenn die anfallende Abwärme bei der Mikrowellenerzeugung ebenfalls zur Papiertrocknung verwendet wird, können die Kosten noch weiter gesenkt werden, da der Gesamtwirkungsgrad steigt.

2.2.3 Benötigte Änderungen beim Einsatz von Mikrowellen

Die Verwendung von Mikrowellen zur Papiertrocknung fordert bauliche Veränderungen an der Papiermaschine:

- Kühlung für die Mikrowellenerzeuger,
- Abschirmung der Mikrowellen,
- Antennen zur Abstrahlung der Mikrowellen.

Um die Leitungsverluste von Erzeuger zu Antennen möglichst klein zu halten, müssen beide Komponenten in räumlicher Nähe angeordnet sein. Daher ist unbedingt für eine ausreichende Kühlung zu sorgen. Die Abluft kann dann z. B. zur weiteren Papiertrocknung genutzt werden. Eine mögliche Anordnung ist in Abbildung 5 zu sehen. Da die Mikrowellenantennen zur effektiven Energieabgabe einen Durchmesser kleiner ihrer halben Wellenlänge besitzen müssen, fällt die Verwendung der Walzen als Antenne weg. Von daher sind auch direkt in die Walzen integrierte Antennen denkbar. Die Lauffläche der Walze muss hierbei aus für Mikrowellen transparentem Material bestehen und die Walzen synchron laufen um „Hotspots“ zu vermeiden.

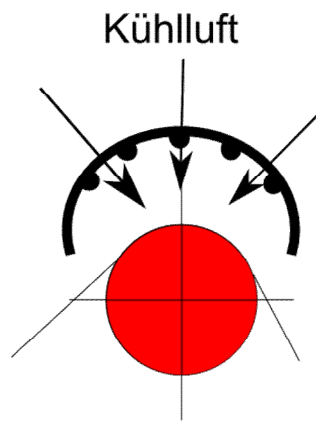


Abbildung 5: Kühlung der Mikrowellengeneratoren durch Luft

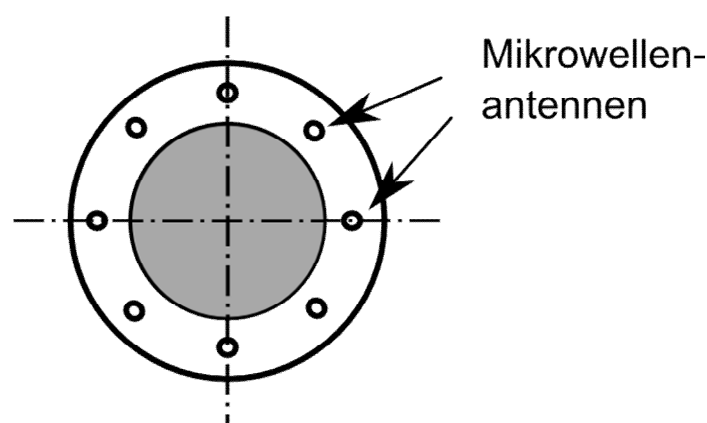


Abbildung 6: In Transferwalze integrierte Mikrowellenantennen

Diese Technologien sind allesamt noch nicht am Markt verfügbar.

2.2.4 Betrieb der Referenzmaschine

Um die Wirtschaftlichkeit vergleichen zu können, müssen Annahmen für eine „Beispielmaschine“ getroffen werden. Für den Vergleich wird eine SC-Papiermaschine mit $80 \frac{g}{m^2}$ als Referenz herangezogen.

2.2.4.1 Eckdaten der Referenzmaschine

Die Maschine besitzt folgende Eckdaten:

- $v_{\text{Maschine}} = 1600 \frac{m}{\text{min}}$
- Maschinenbreite $b_{\text{Maschine}} = 8 \text{ m}$
- $m_{\text{Dampf}} : 0,75 - 1,1 \text{ t Dampf pro t Papier}$
- $K_{\text{Dampf}} : 60-70 \text{ € Kosten pro t Dampf}$
- Die zum Betrieb verwendete elektrische Energie wird hier vernachlässigt.

Für die weitere Berechnung wird immer der obere Wert des Intervalls angenommen.

2.2.4.2 Installationskosten der Referenzmaschine

Die durchschnittlichen Kosten einer herkömmlichen Trockenpartie können laut Herstellerangabe mit ca. 15.000.000 € abgeschätzt werden.

2.2.4.3 Betrieb der Referenzmaschine

Für die Referenzmaschine ergeben sich folgende Produktionsdaten:

Die Menge m_{ref} des pro Stunde produzierten Papiers ergibt sich wie folgt aus Breite $b_{Maschine}$ und Geschwindigkeit $v_{Maschine}$:

$$m_{ref} = b_{Maschine} \cdot v_{Maschine} \cdot m_A$$

Mit den oben genannten Angaben ergibt sich hieraus:

$$m_{ref} = 8 \text{ m} \cdot 1600 \frac{\text{m}}{\text{min}} \cdot 80 \frac{\text{g}}{\text{m}^2} = 61,44 \frac{\text{t}}{\text{h}}$$

Daraus ergibt sich für die pro Stunde benötigte Energie:

$$P_{ref} = m_{ref} \cdot m_{Dampf}$$

Und die Kosten pro Tonne produziertes Papier:

$$K_{ref} = m_{Dampf} \cdot K_{Dampf}$$

Damit ergibt sich für die Energiekosten K_{ref} der Referenzmaschine:

$$P_{ref} = 61,44 \frac{\text{t}}{\text{h}} \cdot 1,1 \frac{t_{Dampf}}{t_{Papier}} = 67,58 \frac{\text{t}}{\text{h}}$$

$$K_{ref} = 67,54 \frac{t_{Dampf}}{\text{h}} \cdot 70 \frac{\text{€}}{t_{Dampf}} = 4730,88 \frac{\text{€}}{\text{h}}$$

$$K_{ref} = 1,1 \frac{t_{Dampf}}{t_{Papier}} \cdot 70 \frac{\text{€}}{t_{Dampf}} = 77 \frac{\text{€}}{t_{Papier}}$$

2.2.5 Wirtschaftlichkeit: Installation der Mikrowellen-Anlage

Mikrowellen sind momentan in folgenden Frequenzen verfügbar:

Frequenz	€ / installiertes kW	Wirkungsgrad (elek. → MW)
2,45 GHz	500 – 2500	65 %
915 MHz	500 – 2500	85 %
5,8 GHz (technisch maximal mögl.)	> 3000	?

Bei der Installation muss zusätzlich beachtet werden, dass manche in der Papiermaschine verwendeten Materialien Mikrowellen stark absorbieren. Das in Sieben verwendete Polyamid absorbiert z. B. Mikrowellen sehr gut, Polyester dagegen nur bei hohen Feldstärken.

Damit ergibt sich mit der in Kapitel 2.2.2 berechneten benötigten Leistung für die installierte Leistung:

$$K_{\text{installierte Leistung, MW}} = 410 \text{ MW} \cdot X \cdot 2500 \frac{\text{€}}{\text{kW}} = 1 \text{ Mrd. €} \cdot X$$

Dieses ist die obere Grenze für die momentan verfügbare Technologie, die allerdings von dem noch zu bestimmenden Leistungsfaktor X abhängt.

2.2.6 Betrieb der MW Anlage

Die Mikrowellen-Anlage wird mit Strom betrieben, der entweder aus dem fabrikeigenen Kraftwerk oder extern bezogen werden muss. Für die industriellen Stromkosten wird ein Preis von $0,08 \frac{\text{€}}{\text{kWh}}$ veranschlagt.

2.2.6.1 Benötigte elektrische Leistung zum Betrieb der MW-Anlage

Die zum Betrieb der Mikrowellen-Anlage benötigte elektrische Leistung $P_{\text{Eingang},MW}$ setzt sich aus den Wirkungsgraden der einzelnen Komponenten (Verluste bei der Einkopplung $WG_{\text{Einkopplung}}$, Verluste im Mikrowellenerzeuger $WG_{\text{Magnetron}}$) zusammen:

$$P_{\text{Eingang},MW} = \frac{P_{\text{eingekoppelt},MW}}{WG_{\text{Einkopplung}} \cdot WG_{\text{Magnetron}}}$$

Diese Leistung muss vom Kraftwerk zur Verfügung gestellt werden.

3 Bewertung der Wirtschaftlichkeit

3.1 Installation der Mikrowellen-Anlage

Die Installation einer Mikrowellen basierenden Trocknungspartie kommt mit 10 Mrd. € um einiges teurer als die Installation einer herkömmlichen Trockenpartie mit 15 Mio. €.

Zu den höheren Installationskosten kommen zusätzlich Änderungen an der vorhandenen Maschinerie, um parasitäre Absorptionen (z. B. an Kunststoffteilen) zu vermeiden. Für den Einsatz von Mikrowellentrocknungspartien müssen daher neue Materialien und Konzepte entwickelt und verwendet werden. Die Wirtschaftlichkeit ist damit mit der aktuell am Markt verfügbaren Technologie nicht gegeben. Durch die Entwicklung neuer Technologie können diese Kosten aber eventuell stark gesenkt werden.

3.2 Betrieb der Anlage

Der Betrieb einer MW basierten Trocknungspartie ist mit geschätzten 6300€ pro Tonne (bei $80 \frac{g}{m^2}$ Flächengewicht) teurer als der Betrieb einer herkömmlichen Zylindertrocknung mit 77 € pro Tonne. Da die meisten konzerneigenen Kraftwerke dampfgesteuert betrieben werden, ist zusätzlich eine Umstellung im Betrieb der Kraftwerke notwendig. Die Wirtschaftlichkeit ist damit im Betrieb nicht gegeben.

3.3 Möglichkeiten zum alternativen Einsatz

Durch die Möglichkeit, Mikrowellentrocknung mit einem Online-Messgerät für Querfeuchte [Baker2008] zu kombinieren, wäre es möglich, Mikrowellen zum Ausgleich der Querfeuchte einzusetzen. Ob die in [Hankin1970] erwähnte Festigkeitssteigerung der Papierbahn tatsächlich auf der Trocknung durch Mikrowellen beruht, oder ob andere Effekte eine Rolle spielen, muss in weiteren Versuchen geklärt werden.

4 Zusammenfassung

Diese Arbeit diskutiert die Interaktion zwischen Mikrowellen und Papier hinsichtlich des Trockengehalts. Dazu wurden erstmals die entsprechenden physikalischen Eigenschaften von verschiedenen Papierproben systematisch untersucht.

Die Trocknung von Papierbahnen ist prinzipiell auch mit den heute verfügbaren Technologien möglich. Im hier vorliegenden Abschlussbericht konnte auch gezeigt werden, dass bei momentan verfügbarer Technologie weder die Installation noch der Betrieb von mikrowellenbasierten Trockenpartien finanzielle Vorteile bringt. Eine direkt nach der Presse geschaltete Mikrowellentrocknung zum Ausgleich der Querprofilfeuchte ist jedoch denkbar. Die Kombination der Mikrowellentrocknung mit einer Kraftwärmekopplung kann den Gesamtwirkungsgrad der Installation noch weiter steigern.

Die Investitionskosten lassen sich allerdings durch neue Innovationen stark senken. Die Einkopplung in die Papierbahn (beschrieben durch den Wirkungsgrad und den Leistungsfaktor X) kann evtl. durch geeignetere Frequenzen erhöht werden. Hieraus können sich Vorteile durch die Mikrowellentrocknung ergeben. Zusätzlich zu diesen Berechnungen wurden erste Entwürfe für geeignete Anordnungen zur Einkopplung von Mikrowellen präsentiert.

5 Literatur

- [Baker2008] Paul Baker, Ross HacHattie, Bob Vyse: *Early measurement and Control of Paper Machine Moisture*. Control Systems / Pan-Pacific Conference, 2008
- [Hankin1970] Handkin, J.W., Leidigh, W. J., Stephansen: E.W., *Microwave paper drying experience and analysis*. TAPPI Vol. 53, pp. 1063-1070, 1970
- [Boesner2004] Bösner, Jens-Peter: *Einfluss von chemischen Additiven auf das Wasserrückhaltevermögen und die Trocknungsfähigkeit von Papierstoffen*, Studienarbeit, Ernst Berl-Institut für technische und makromolekulare Chemie, Fachgebiet nachwachsende Rohstoffe, TU Darmstadt, 2005
- [Stumm2007] Stumm, Dominik, *Untersuchungen zum chemischen Wasserrückhaltevermögen und zur Trocknungsfähigkeit von Papierstoffen unter besonderer Berücksichtigung der Rolle von chemischen Additiven*. Dissertation, Fachbereich Chemie der TU Darmstadt, 2007