



INFOR-Projekt Nr. 150

**Einsatz von Hochleistungs-Ultraschall zur Steigerung
der Entwässerungsleistung in der Pressenpartie**

Schlussbericht

März 2012

Technische Universität Dresden
Professur für Papiertechnik

Prof. Dr.-Ing. Harald Großmann

Projektleiter:
Dipl.-Ing. Tobias Brenner



Schlussbericht

Einsatz von Hochleistungs-Ultraschall zur Steigerung der Entwässerungsleistung in der Pressenpartie (INFOR-Projekt Nr. 150)

Prof. Dr.-Ing. H. Großmann,
Dipl.-Ing. T. Brenner,
Uwe Müller

März 2012

Projektbegleiter: - Dipl.-Ing. Wolfram Gerspach (SCA Packaging Containerboard Deutschland GmbH) - Dr. Jürgen Höckel (Papierfabrik Scheufelen GmbH & Co. KG) - Dr. Kai Klopp (Heimbach GmbH & Co. KG) - Dipl.-Ing. Hendrik Krug (Gebr. BELLMER GmbH Maschinenfabrik)	Das Forschungsprojekt wird gefördert über das Kuratorium für Forschung und Technik der Zellstoff- und Papierindustrie im VDP e.V., Bonn
--	--

Inhaltsverzeichnis

1	Ausgangssituation / Problemstellung	1
2	Forschungsziel.....	1
3	Stand des Wissens	2
3.1	Entwässerung und Trocknung von Papier	2
3.2	Einführung Ultraschall.....	2
4	Material und Methoden	5
4.1	Versuchsstand zur Ultraschall unterstützten Entwässerung von Papier	5
4.2	Untersuchte Papiere	7
4.3	Untersuchte Besspannungen und Gewebe	7
4.4	Messmethoden	8
4.5	Thermografie	9
5	Arbeitsplan	11
6	Ergebnisse und Diskussion der Untersuchungen	13
6.1	Visuelle Bewertung der Ultraschall unterstützten Entwässerung	13
6.2	Bewertung der Schwankungen von Einflussgrößen (Schritt 0 des Arbeitsplanes).....	13
6.3	Untersuchungen zur Abschätzung der Einflussfaktoren - Voruntersuchungen (Schritt 1 des Arbeitsplanes).....	13
6.4	Untersuchungen zur Abschätzung der Einflussfaktoren - Hauptuntersuchungen (Schritt 1 des Arbeitsplanes).....	20
6.5	Einfluss der Ultraschallanwendung auf den Verschleiß der Besspannung	30
6.6	Einfluss der Ultraschallanwendung auf das Papier	32
6.7	Wirkmechanismen bei der Ultraschall unterstützten Entwässerung von Papier (Thermografie).....	36
6.8	Untersuchungen zur Abschätzung weiterer Einflussfaktoren (Schritt 2 des Arbeitsplanes).....	39
6.9	Untersuchungen mit einem Prototypen zur Ultraschall unterstützten Entwässerung (Schritt 3 des Arbeitsplanes)	43
6.10	Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen (Schritt 4 des Arbeitsplanes)	47
7	Zusammenfassung und Ausblick	50
Anhang		52
Literaturverzeichnis		67

Danksagung

Die Autoren bedanken sich beim Verband Deutscher Papierfabriken für die Finanzierung dieser Arbeiten und bei den Projektbegleitern für die hilfreichen Diskussionsbeiträge sowie die praktische Unterstützung.

Abkürzungsverzeichnis

Abk.	Bedeutung
0-pk	Amplitude, Abstand des Maximums der Schwingungsauslenkung zum Nullpunkt der Schwingungsauslenkung (sero to peak)
A	Probentisch A (Amboss)
AP	Altpapier
B	Probentisch B (ohne Amboss)
EMSR	Elektro-, Mess-, Steuer- und Regelungstechnik
lutro	Lufttrocken (im Normklima)
m	Masse
MW	Mittelwert
otro	Ofentrocken (105°C)
pkpk	Schwingweite, Abstand des positiven Maximums der Schwingungsauslenkung zum negativen Maximum der Schwingungsauslenkung (peak to peak)
PU	Polyurethan
R.-Koeff.	Regressionskoeffizient
SD	Standardabweichung (Standard deviation)
SP	Siebspannung
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
TG	Trockengehalt
US	Ultraschall
VK	Variationskoeffizient
ZS	Zellstoff

Verzeichnis der Symbole, Formelzeichen mit Indizes

Symbol	Einheit	Bedeutung
m_A	g/m^2	Flächengewicht
m_F	g	Masse der Probe feucht
m_T	g	Masse der Probe trocken (105°C)

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Schallkenngrößen ausgewählter Materialien.....	4
Tabelle 2	Papiereigenschaften	7
Tabelle 3	Untersuchte Gewebe	8
Tabelle 4	Faktorstufenkombinationen des zentral zusammengesetzten Versuchsplan der Hauptuntersuchungen mit Metallgewebe	20
Tabelle 5	Versuchsraum der Hauptuntersuchungen mit Metallgewebe	20
Tabelle 6	Regressionskoeffizienten des Modells der Hauptuntersuchungen für die Zielgrößen Wasserentfernung aus Papiervlies („m-Differenz“) und Energiebedarf („Energie“).....	21
Tabelle 7	Vergleich von unterschiedlich behandeltem Papier (Löschpapier, Basis Altpapier) durch Schräglicht-Scan und Durchlicht-Scan.....	34
Tabelle 8	Verweildauer der Ultraschallsonotrode über einem 10 mm breiten Streifen (entspricht Abstand der Ultraschallsonotrode zum Rand des Probentisches von 5 mm) bei verschiedenen Geschwindigkeiten.....	36
Tabelle 9	Thermografieaufnahmen von beschallten Papieren.....	37
Tabelle 10	Kostenübersicht für Ultraschall unterstützte Entwässerung in einer Papiermaschine	48
Tabelle 11	Messwerte Hauptuntersuchungen mit Metallsieb mit Ultraschallschwingung (Teil 1)	52
Tabelle 12	Messwerte Hauptuntersuchungen mit Metallsieb mit Ultraschallschwingung (Teil 2)	53
Tabelle 13	Konstante Parameter der Hauptuntersuchungen mit Metallsieb	54
Tabelle 14	Messwerte Hauptuntersuchungen mit Metallsieb ohne Ultraschallschwingung (Teil 2)	54
Tabelle 15	Beispielhafte Markierungen/Abdrücke des Trockensiebs G6 im Papiermuster nach Ultraschallentwässerung, (Messung Heimbach) ...	61
Tabelle 16	Markierungen im Papiermuster nach Ultraschallentwässerung mit Trockensieb G6, (Messung Heimbach).....	62

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Entwicklung des Trockengehalts des Papiers entlang der Papiermaschine	2
Abbildung 2:	Prinzipskizze einer Anlage zur Erzeugung von Ultraschall durch Nutzung des piezoelektrischen Effektes	3
Abbildung 3	Schematische Darstellung der labortechnischen Versuchsanlage zur Behandlung von feuchten Papiervliesen mit Ultraschall, Probentisch A	5
Abbildung 4	Schema Probentisch A (nicht maßstabgerecht)	6
Abbildung 5	Schema Probentisch B (nicht maßstabgerecht)	6
Abbildung 6	Probentisch A	6
Abbildung 7	Probentisch B	7
Abbildung 8	Methode zur Befeuchtung der Papierproben []	9
Abbildung 9	Versuchsaufbau Thermografiemessung bei Ultraschall unterstützter Entwässerung	10
Abbildung 10	Versuchsaufbau Thermografiemessung bei der Ultraschall unterstützten Entwässerung (Prinzipskizze, nicht maßstabgerecht) ..	10
Abbildung 11	Modellvorstellung der Ultraschall unterstützten Entwässerung (links) und visuelle Überprüfung im Versuch (rechts), Ultraschall (Fa. Hielscher): UIP1000, 20 kHz, Sonotrode BS2d22, Schwingweite 53 µm, Siebgewebe: Formiersieb (Fa. Heimbach), Papier: Kopierpapier, 80 g/m ² , Trockengehalt: ca. 30 %	13
Abbildung 12	Einfluss der Gewebeart auf die Entwicklung des Trockengehalts	15
Abbildung 13	Einfluss Linienlast auf die Entwicklung des Trockengehalts	15
Abbildung 14	Einfluss der Papierart auf die Entwicklung des Trockengehalts	16
Abbildung 15	Einfluss der Vortriebsgeschwindigkeit der Ultraschallsonotrode auf die Entwicklung des Trockengehalts	17
Abbildung 16	Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus, Winkel der Ultraschallsonotrode relativ zum Probentisch, nicht maßstabgerecht ..	18
Abbildung 17	Einfluss der des Winkel der Ultraschallsonotrode auf die Entwicklung des Trockengehalts	18
Abbildung 18	Einfluss der des Winkel der Ultraschallsonotrode auf die Entwicklung des spezifischen Energieeintrages und die Leistung des Ultraschallsystems, Gewinn an Trockengehalt durch Ultraschallbehandlung	19
Abbildung 19	Versuchsplan der Hauptuntersuchungen mit Metallgewebe	20
Abbildung 20	Entwicklung des Gewinns an Trockengehalt im Papier durch Ultraschallbehandlung in Abhängigkeit von der Behandlungsdauer, Amplitude 34 µm (0-pk)	22
Abbildung 21	Entwicklung des Gewinns an Trockengehalt im Papier in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit, Amplitude 34 µm (0-pk)	22
Abbildung 22	Entwicklung des Gewinns an Trockengehalt im Papier durch Ultraschallbehandlung in Abhängigkeit der Geschwindigkeit, Linienlast 1,8 N/mm	23
Abbildung 23	Entwicklung des Gewinns an Trockengehalt im Papier durch Ultraschallbehandlung in Abhängigkeit der Linienlast, Amplitude 34 µm (0-pk)	24
Abbildung 24	Entwicklung des Gewinns an Trockengehalt im Papier durch Ultraschallbehandlung in Abhängigkeit der Linienlast, Geschwindigkeit 1,0 m/min	24

Abbildung 25 Entwicklung des spezifischen Energieeintrages (bezogen auf Masse entferntes Wasser) durch Ultraschallbehandlung in Abhängigkeit der Geschwindigkeit, Amplitude 42 µm (0-pk)	25
Abbildung 26 Entwicklung des spezifischen Energieeintrages (bezogen auf Masse entferntes Wasser) durch Ultraschallbehandlung in Abhängigkeit der Geschwindigkeit, Linienlast 1,8 N/mm	26
Abbildung 27 Trockengehaltssteigerung und spezifischer Energieeintrag (bezogen auf Masse entferntes Wasser) in Abhängigkeit der Linienlast (in N/mm) und der Amplitude (in µm (0-pk)) durch Ultraschallbehandlung, Geschwindigkeit 0,6 m/min	26
Abbildung 28 Trockengehaltssteigerung und spezifischer Energieeintrag (bezogen auf Masse entferntes Wasser) in Abhängigkeit der Linienlast (in N/mm) und der Amplitude (in µm (0-pk)) durch Ultraschallbehandlung, Geschwindigkeit 3,0 m/min	27
Abbildung 29 3D Flächendiagramm der Massendifferenz in Abhängigkeit von Amplitude und Beschallungsdauer (Zeit)	28
Abbildung 30 3D Flächendiagramm zur spezifischen Energie in Abhängigkeit von Amplitude und Beschallungsdauer (Zeit)	28
Abbildung 31 Verschleiß der Bespannung am Beispiel von Probentisch A mit Sonotrode MP1 und Bespannung G6 (Skizze nicht maßstabsgerecht)	30
Abbildung 32 Verschleiß der Bespannung am Beispiel von Probentisch A mit Sonotrode MP1 und Bespannung G8 (Skizze nicht maßstabsgerecht)	31
Abbildung 33 Markierung des Papiers (rechts) durch Ultraschallbehandlung bei Metallgewebe G8 (links), Messsystem InfiniteFocus.....	32
Abbildung 34 3D-Aufnahmen von Papier in Falschfarben nach Behandlung in Sieb G1 ohne US (oben) und Sieb G1 mit US (unten) in Probentisch A, Messsystem InfiniteFocus	33
Abbildung 35 Entwicklung der Bruchkraft von beschallten und unbeschallten Papieren	35
Abbildung 36 Entwicklung der Bruchkraft von beschallten und unbeschallten Papieren in Abhängigkeit von der Amplitude.....	35
Abbildung 37 Entwicklung des Gewinns an Trockengehalt im Papier durch Ultraschallbehandlung in Abhängigkeit des Probentisches, Geschwindigkeit und der Amplitude	39
Abbildung 38 Entwicklung des spezifischen Energieeintrages, Netto (bezogen auf Masse entferntes Wasser) durch Ultraschallbehandlung in Abhängigkeit des Probentisches, Geschwindigkeit und der Amplitude.....	40
Abbildung 39 Entwicklung des spezifischen Energieeintrages, Netto (bezogen auf Masse entferntes Wasser) durch Ultraschallbehandlung bei Probentisch B in Abhängigkeit der Geschwindigkeit und der Amplitude	41
Abbildung 40 Einfluss des Spannungsmaterials in Abhängigkeit der Amplitude auf die Entwässerung des feuchten Papiervlieses und dem dabei aufgewandten Energieeintrag	42
Abbildung 41 Einfluss der Gewebekombination auf Massendifferenz, Tisch A.....	43
Abbildung 42 Einfluss der Gewebekombination auf spezifischen Energieeintrag, Tisch A.....	43
Abbildung 43 Vergleich der thermischen Trocknung mit der Ultraschall unterstützten Trocknung anhand der spezifischen Energiekosten.....	49
Abbildung 44 Entwicklung des Trockengehalt-Gewinns in Abhängigkeit der Amplitude der Ultraschallsonotrode (Fehlergrenze 1s), Realisierungen des Versuchplanes	55

Abbildung 45 Entwicklung des Trockengehalt-Gewinns in Abhängigkeit der Behandlungszeit (Fehlergrenze 1s), Realisierungen des Versuchplanes	55
Abbildung 46 Entwicklung des Trockengehalt-Gewinns in Abhängigkeit der Geschwindigkeit des Probestisches (Fehlergrenze 1s), Realisierungen des Versuchplanes.....	56
Abbildung 47 Entwicklung des Trockengehalt-Gewinns in Abhängigkeit der Linienlast (Fehlergrenze 1s), Realisierungen des Versuchplanes.....	56
Abbildung 48 Entwicklung des spezifischen Energiebedarfs in Abhängigkeit der Geschwindigkeit des Probestisches (Fehlergrenze 1s), Realisierungen des Versuchplanes.....	57
Abbildung 49 Trockensieb Muster „G6_u“ nach Ultraschallentwässerung: Trockensieb auf Sonotrode zugewandte Seite, Kontakt zur Ultraschallsonotrode, lichtmikroskopische Aufnahme mit Keyence VHX-1000 (Messung Heimbach).....	57
Abbildung 50 Trockensieb Muster „G6_u“ nach Ultraschallentwässerung: Trockensieb auf Sonotrode zugewandte Seite, Papierkontaktseite, lichtmikroskopische Aufnahme mit Keyence VHX-1000 (Messung Heimbach).....	58
Abbildung 51 Trockensieb Muster „G6_t“ nach Ultraschallentwässerung: Trockensieb auf Sonotrode abgewandte Seite, Papierkontaktseite, lichtmikroskopische Aufnahme mit Keyence VHX-1000 (Messung Heimbach).....	58
Abbildung 52 Trockensieb Muster „G6_t“ nach Ultraschallentwässerung: Trockensieb auf Sonotrode abgewandte Seite, Kontaktseite zu Tisch des Ultraschallversuchaufbaus, lichtmikroskopische Aufnahme mit Keyence VHX-1000 (Messung Heimbach).....	59
Abbildung 53 Markierungen Trockensieb Muster „G6_t“: Papierkontaktseite, Schräglightscan und Auswertung durch PTS-DOMAS-Methode (Messung Heimbach)	59
Abbildung 54 Markierungen Trockensieb Muster „G6_u“: Papierkontaktseite, Schräglightscan und Auswertung durch PTS-DOMAS-Methode (Messung Heimbach)	60
Abbildung 55 Markierungen der Abdrücke in Trockensieboberfläche Muster „G6_u“: Trockensieb auf Sonotrode zugewandte Seite, Papierkontaktseite, Trockensiebmuster im Schräglichtverfahren gescannt und mit PTS- DOMAS-Methode auf Markierungen untersucht (Messung Heimbach)	60
Abbildung 56 Markierungen der Abdrücke in Trockensieboberfläche Muster „G6_t“: Trockensieb auf Sonotrode abgewandten Seite, Papierkontaktseite, Trockensiebmuster im Schräglichtverfahren gescannt und mit PTS- DOMAS-Methode auf Markierungen untersucht (Messung Heimbach)	61
Abbildung 57 Nanofocus (Lasermesssystem) Papiermuster e, 13 s Ultraschallentwässerung mit 34 µm Amplitude, (Messung Heimbach).	62
Abbildung 58 Nanofocusprofil (Lasermesssystem) Papiermuster e, 13 s Ultraschallentwässerung mit 34 µm Amplitude, (Messung Heimbach).	63
Abbildung 59 Nanofocus (Lasermesssystem) Papiermuster f, 13 s Ultraschallentwässerung mit 34 µm Amplitude, (Messung Heimbach).	63
Abbildung 60 Nanofocusprofil (Lasermesssystem) Papiermuster f, 13 s Ultraschallentwässerung mit 34 µm Amplitude, (Messung Heimbach).	64
Abbildung 61 Nanofocus (Lasermesssystem) Papiermuster b, 40 s Ultraschallentwässerung mit 34 µm Amplitude, (Messung Heimbach).	64

Abbildung 62 Nanofocusprofil (Lasermesssystem) Papiermuster b, 40 s	
Ultraschallentwässerung mit 34 µm Amplitude, (Messung Heimbach).	65
Abbildung 63 Nanofocus (Lasermesssystem) Papiermuster c, 40 s	
Ultraschallentwässerung mit 34 µm Amplitude, (Messung Heimbach).	65
Abbildung 64 Nanofocusprofil (Lasermesssystem) Papiermuster c, 40 s	
Ultraschallentwässerung mit 34 µm Amplitude, (Messung Heimbach).	66
Abbildung 65 Emissionsgrad verschiedener Stoffe	66

1 Ausgangssituation / Problemstellung

Die klassischen Techniken zur Entwässerung/Trocknung von Papier und Karton bieten nur noch sehr begrenzte Optimierungspotenziale. Da die Trocknung zu den energieintensivsten Teilprozessen der Papiererzeugung gehört, können nur von neuen Techniken, insbesondere solchen, die bereits vor der thermischen Entwässerung, also der Trocknung einen höheren Anteil des Wasser mechanisch entfernen, nennenswerte Energieeinsparungen erwartet werden. Dieses Einsparpotenzial ergibt sich daraus, dass für die mechanische Entfernung von Wasser aus einem porösen Medium ein etwa 80 % niedrigerer Energieaufwand erforderlich ist als für die thermische Entfernung (Verdampfung) der gleichen Wassermenge. Das dieses Potenzial grundsätzlich gegeben ist, belegen u. a. die Untersuchungen von Prof. Naujock (INFOR-Projekt 141R), in denen gezeigt wurde, dass der Anteil freien – also grundsätzlich mechanisch entfernbaren - Wassers nach der Pressenpartie signifikant über dem heute erreichbaren mechanisch entfernbaren Anteil liegt.

Der in der Papierindustrie allenfalls sporadische und überwiegend auf die Papierverarbeitung (Schneiden, Kleben und Laminieren) beschränkte Einsatz von Hochleistungs-Ultraschall (US), ist das Resultat einer nach wie vor gegebenen, ausgeprägten Skepsis hinsichtlich der Leistungsfähigkeit und der Zuverlässigkeit dieser Technik. Die Ergebnisse eigener Forschungsarbeiten auf den Gebieten der US unterstützten Glättung, Mahlung sowie Druckfarbenentfernung führen jedoch zu anderen Schlussfolgerungen.

Als besonders vorteilhaft erwies sich dabei die Möglichkeit, mittels der Ultraschalltechnologie hohe Energiedichten zu realisieren. In anderen Industrien (Textil- und Nahrungsmittelindustrie) wird dies bereits mit großem Erfolg auch zur Entwässerung von porösen Materialien genutzt. Ziel dabei ist es, die extrem energieintensive thermische Entwässerung zumindest teilweise durch das mechanische Austreiben von flüssigem Wasser aufgrund der im Gut durch die Beschallung bewirkten hochfrequenten mechanischen Wechselladungen zu unterstützen.

Vor diesem Hintergrund wurden an der Forschungsstelle erste orientierende Versuche zur Ultraschall unterstützten Entwässerung durchgeführt, deren Ergebnisse belegen, dass auch der Trockengehalt nasser Papiere und Kartons auf diese Weise signifikant gesteigert werden kann.

Wenn die beobachteten Phänomene in großtechnischem Maßstab ohne Beeinträchtigung der wesentlichen Produkteigenschaften umgesetzt werden könnten, ergäbe sich ein Energieeinsparpotenzial, das weit über diejenigen der in jüngerer Zeit erreichten Prozessoptimierungen hinausgehen würde.

2 Forschungsziel

Ziel des Forschungsprojektes ist die Bewertung des möglichen Beitrags des Hochleistungs-Ultraschalls zur Reduktion des Energieeinsatzes bei der Entwässerung/Trocknung von Papier und Karton durch die Erhöhung des Einlaftrockengehaltes in die Trockenpartie.

Diese Bewertung soll im labortechnischen Maßstab, mit dem an der TU Dresden verfügbaren Ultraschall-Equipment erreicht werden.

3 Stand des Wissens

3.1 Entwässerung und Trocknung von Papier

Bei der industriellen Papierherstellung erfolgt die Entwässerung und Trocknung der Papierbahn in der Siebpartie, der Pressenpartie und der Trockenpartie.

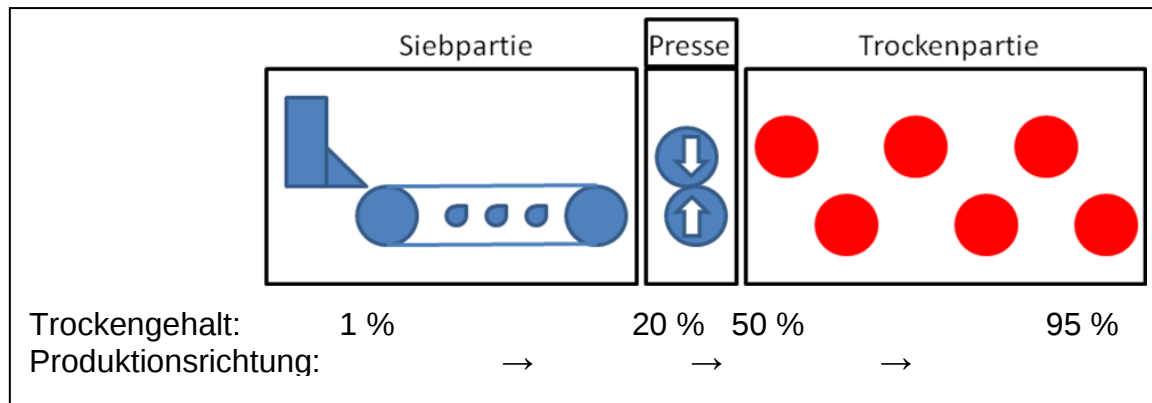


Abbildung 1 Entwicklung des Trockengehalts des Papiers entlang der Papiermaschine

Die spezifische Energie (Dampfenergie) innerhalb der Trockenpartie einer Papiermaschine hängt stark vom Grad der Optimierung ab. Als Bereich kann ein spezifischer Bedarf an Dampfenergie von ca. 2850 bis 5000 kJ/kg entferntes Wasser veranschlagt werden. Ältere Anlagen können auch bis zu 7000 kJ/kg entferntes Wasser benötigen. [1, 2]. Die Anwendung der Ultraschall unterstützten Trocknung würde insbesondere in wenig optimierten Papierfabriken sinnvoll sein.

3.2 Einführung Ultraschall

Als Ultraschall werden in der Akustik die Schallfrequenzen oberhalb der menschlichen Hörschwelle, d. h. von rund 20 kHz, bis zu einer Frequenz von 1 GHz, verstanden. [3]

Es handelt sich also um mechanische Wellen, die den Gesetzen der Akustik folgen. Die heute üblicherweise genutzten Systeme zur Erzeugung von Ultraschall basieren auf dem piezoelektrischen Effekt. Hierbei werden zumeist Keramiken auf der Basis von Bariumtitanat und Bleizirkonattitanat genutzt. In Abbildung 2 ist schematisch ein Gerät zur Erzeugung von Ultraschall auf Basis des piezoelektrischen Effektes aufgeführt. Im Generator wird ein niederfrequentes elektrisches Signal (bspw. 50 Hz) in ein hochfrequentes elektrisches Signal (bspw. 20 kHz) umgewandelt. Im Ultraschallwandler wird das hochfrequente elektrische Signal über Piezoelemente in eine hochfrequente mechanische Schwingung umgewandelt. Über mechanische Elemente wird diese Schwingung zur Sonotrode geleitet, die direkt mit dem Medium in Kontakt steht.

Ultraschallschwingungen können sowohl als Longitudinalwelle (Schwingungen in Fortpflanzungsrichtung) als auch als Transversalwelle (Schwingungen senkrecht zur Fortpflanzungsrichtung) auftreten. In Flüssigkeiten und Gasen können ausschließlich Longitudinalwellen übertragen werden. In Festkörpern können zusätzlich Transversalwellen auftreten. [4]

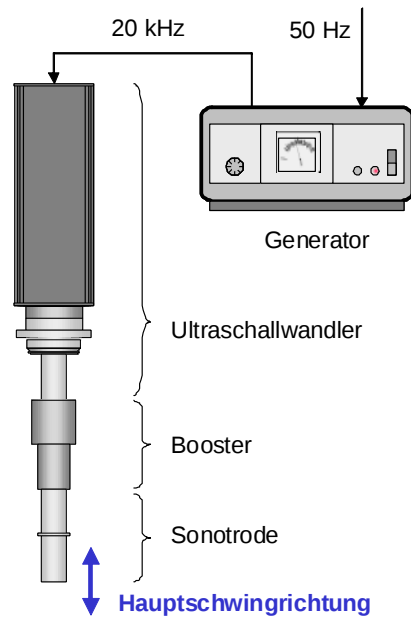


Abbildung 2: Prinzipskizze einer Anlage zur Erzeugung von Ultraschall durch Nutzung des piezoelektrischen Effektes

Der Ultraschall wird insbesondere durch folgende Größen charakterisiert [5]:

Schallintensität in W/cm^2

Die Schallintensität ist die pro Fläche und Zeiteinheit senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der fortschreitenden Welle transportierte Energie.

Schallleistung in W

Die Gesamtleistung P eines Strahlers umfasst die gesamte Energie, die von diesem pro Zeiteinheit abgestrahlt wird.

Schwingungsamplitude in μm

Die Schwingungsamplitude charakterisiert die Schwingungsbewegungen des durchstrahlten Mediums.

Die Schwingungsamplitude ist im physikalischen Sinne der Weg der Auslenkung von der Ruhelage bis zum Maximum einer Schwingung. Die Schwingweite hingegen ist der Abstand von einem Maximum der Bewegung zum anderen Maximum der Bewegung und entspricht damit der doppelten Amplitude. Die Schwingweite wird daher auch mit dem Kürzel „pkpk“ (Peak to Peak) versehen.

In der Praxis wird die Schwingungsamplitude oder kurz Amplitude des Ultraschallwerkzeuges (Sonotrode) aber oft fälschlicherweise mit dem Wert der Schwingweite angegeben.

Schallkennimpedanz in $N \cdot s/m^3$

Die Schallkennimpedanz ist das Produkt aus Dichte und Schallgeschwindigkeit eines Stoffes. An Phasengrenzen zwischen zwei Medien ist die Reflexion des Schalls umso geringer, also die Durchlässigkeit umso größer, je ähnlicher die Schallkennimpedanzen der angrenzenden Medien sind.

Die Schallimpedanz von ausgewählten Materialien ist in Tabelle 1 enthalten. Für die Ankopplung der meist aus Titan bestehenden Ultraschallsonotrode ist als angrenzendes Medium ein metallischer Werkstoff besser geeignet, als ein Werkstoff auf Ba-

sis Kunststoff, da an der Phasengrenze Metall zu Metall eine geringere Reflexion des Schalls auftritt.

Tabelle 1 Schallkenngrößen ausgewählter Materialien

Stoff	Dichte	Schallge- schwindigkeit	Schallkenn- impedanz
	g/cm ³	m/s	kNs/m ³
Luft	0,001	344	0,4
Papier, trocken	0,8	1500	1200
Wasser	1	1485	1485
Holz	0,5	4000	2000
Polyethylen	0,94	2340	2200
Polystyrol	1,06	2380	2523
Polyamid	1,1	2620	2882
PVC hart	1,4	2395	3353
Nickel	8,8	5630	49544
Aluminium	2,7	6320	17064
Kupfer	8,9	4700	41830
Stahl	7,8	5100	39780
Titan	4,54	6230	28284

4 Material und Methoden

4.1 Versuchsstand zur Ultraschall unterstützten Entwässerung von Papier

Die Professur für Papiertechnik der TU Dresden verfügt über eine labortechnische Versuchsanlage, die die Untersuchung der Auswirkungen einer Ultraschallbehandlung von feuchten Papiervliesen erlaubt (Abbildung 3). Dabei wird ein Papierstreifen zwischen zwei Gewebestreifen auf einem Proben-tisch fixiert. Das Ultraschallwerkzeug (Sonotrode) wird auf das obere Gewebe mit einer definierten Linienlast gedrückt und in Schwingung versetzt (Frequenz 20 kHz). Mittels einer SPS-Steuerung wird der Proben-tisch relativ zur Sonotrode in Bewegung gesetzt.

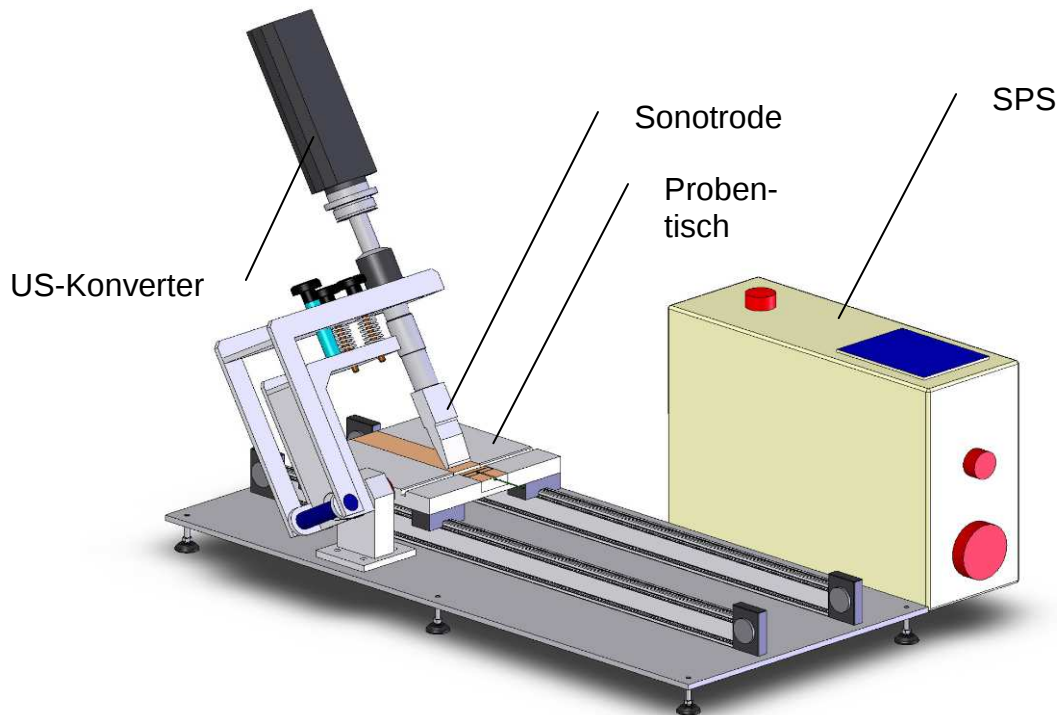


Abbildung 3 Schematische Darstellung der labortechnischen Versuchsanlage zur Behandlung von feuchten Papiervliesen mit Ultraschall, Proben-tisch A

Der Versuchsstand verfügt über die Ultraschalleinheit UIP1000, bestehend aus Generator und Konverter / Wandler (Fa. Hielscher Ultrasonics GmbH).

Technische Daten der labortechnischen Versuchsanlage (Auswahl):

Ultraschall Schwingfrequenz:	20 kHz
max. Leistung Ultraschallgenerator:	1.000 W
Arbeitsbreite, US-Werkzeug:	50 mm (Keil-Sonotrode MP1)
Anpresskraft US-Werkzeug:	15 ... 250 N
Anstellwinkel, US-Werkzeug:	15 ... 165°
Amplitude, US-Werkzeug:	10 ... 44 μ m (0-pk), (Keil-Sonotrode MP1)
Vortriebsgeschwindigkeit, Proben-tisch:	10 ... 210 mm/s

Für die Untersuchungen wurden zwei Proben-tische gefertigt, die unterschiedliche Applikationsformen für die Ultraschallentwässerung in der Pressenpartie nachbilden (Abbildung 4, Abbildung 5).

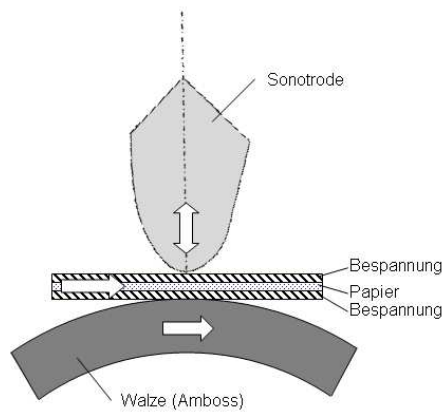


Abbildung 4 Schema Probestisch A (nicht maßstabgerecht)

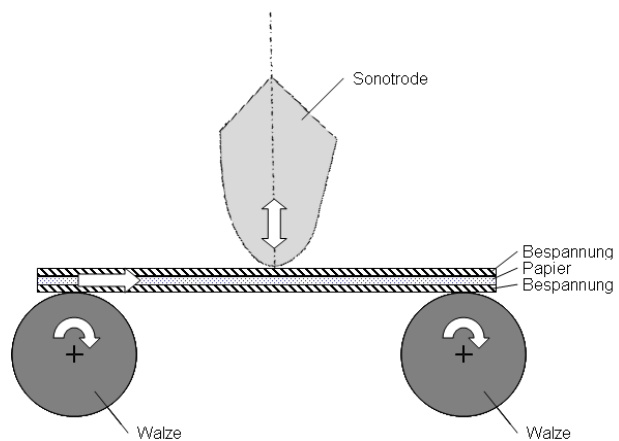


Abbildung 5 Schema Probestisch B (nicht maßstabgerecht)

Bei Probestisch A ist die Probe auf einer Unterlage (Amboss) in Form einer Loch-Schlitzplatte fixiert. Probestisch A bildet einen Pressnipp nach, bei dem einseitig eine Ultraschall-Schwingung auf die Papierbahn übertragen wird.

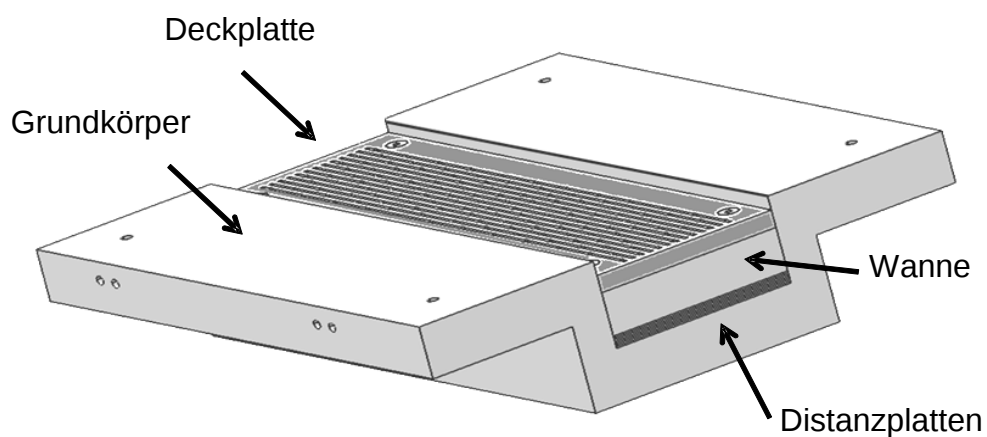


Abbildung 6 Probestisch A

Bei Probestisch B wird das zu behandelnde Papiervlies zwischen zwei Gewebematerialien eingebettet. Die Gewebe sind frei „hängend“ in einen Rahmen gespannt (ohne Amboss). Die Ultraschallsonotrode wird auf das obere Gewebe mit definierter Linienlast angelegt.

Die Gewebematerialien werden unter definierter Spannung (SP) in die Rahmen eingespannt.

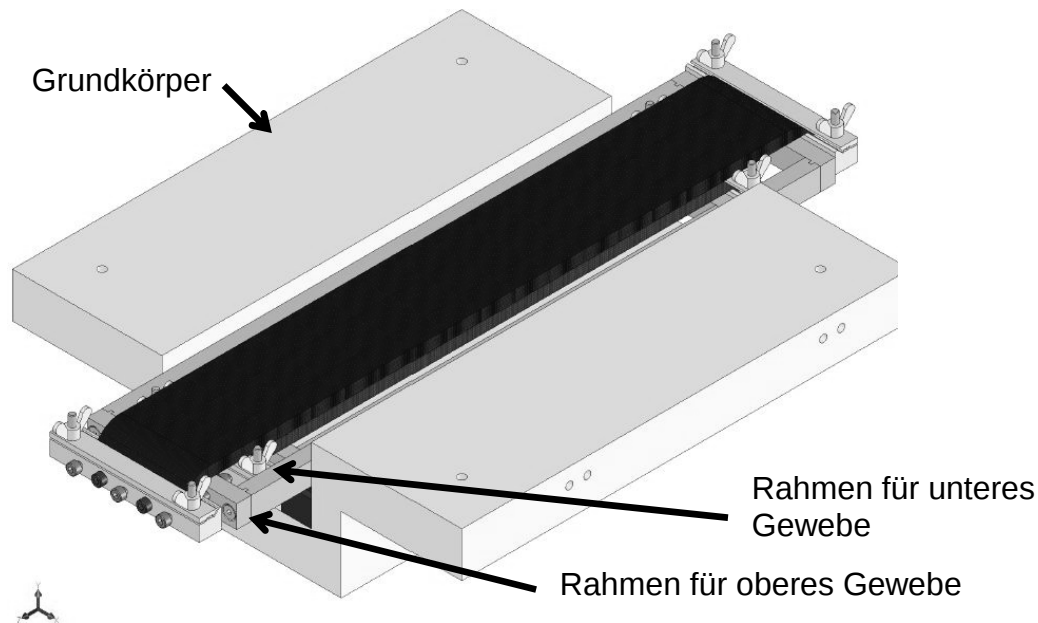


Abbildung 7 Probestisch B

Die Versuche werden unter Normklima gemäß DIN EN 20187-1993 durchgeführt.

Sowohl bei Probestisch A als auch bei Probestisch B ist bei den Untersuchungen das Papiervlies zwischen zwei Geweben eingeschlossen.

4.2 Untersuchte Papiere

Als Papiervlies werden bei den Untersuchungen Löschpapiere eingesetzt (Tabelle 2). Das Papier wird für einen Versuch in einen Streifen mit 250 mm Länge und 50 mm Breite geschnitten.

Beide Löschpapiere haben ein unterschiedlich großes Wasseraufnahmevermögen, so dass nicht die gesamte Menge an zugegebenem Wasser vom Papier aufgenommen wird. Daraus resultiert ein unterschiedlich hoher Ausgangs-Trockengehalt.

Tabelle 2 Papiereigenschaften

Probe	Rohstoff	mA	Dicke	zugegebene Wassermenge	Ausgangs-Trockengehalt
		g/m ²	µm	ml	%
Löschpapier ZS	Zellstoff	70	120	2,0	35,0
Löschpapier AP	Altpapier	75	108	1,5	41,5

4.3 Untersuchte Besspannungen und Gewebe

In Tabelle 3 sind die in den Untersuchungen der in Schritt 1 des Arbeitsplanes eingesetzten Gewebe aufgeführt. Die Gewebe bzw. Besspannungen G1 bis G7 und G10 sind aus Kunststoff die mit G8 und G9 bezeichneten hingegen aus Metall (Bronze, Nickel) gefertigt.

Tabelle 3 Untersuchte Gewebe

Art	Forming		Pressing			Drying		Forming		Pressing
Beschreibung	Formiersieb		Pressenfilz			Trocken-sieb gewebt	Trockensieb (Spiralsieb mit Fülldrähten)	Metallsieb		Pressenfilz
Gewebe-Nr.	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	G9	G10
Dicke in mm	0,84	0,73	4,1	4,5	3,4	1,54	1,75	0,6	0,13	2,86

4.4 Messmethoden

Papiere

Die Bewertung der Entwässerungsleistung der Ultraschallapplikation erfolgt durch die Bestimmung des Trockengehaltes des Papiervlieses vor und nach der Ultraschallbehandlung. Zur Bestimmung des Trockengehaltes der Papiere wurde die Waage KB1000-2 der Fa. Kern & Sohn GmbH eingesetzt. Für die Bestimmung der Schwankungsbreite der Masse der Papierstreifen wurde die Waage PS-200 (d = 0,1 mg) der Fa. Fisherbrand benutzt.

Die Bestimmung des Trockengehaltes (TG) des Papiers erfolgt in Anlehnung an DIN EN ISO 638 nach der Formel

$$TG = \frac{m_T}{m_F} \cdot 100 \quad \text{Gleichung 1}$$

m_F Masse der Probe feucht

m_T Masse der Probe trocken (105°C)

Bei den Untersuchungen zur Ultraschall unterstützte Entwässerung wurden verschiedene Gewebe eingesetzt. Da nicht auszuschließen war, dass diese zusammen mit den gewählten Betriebsbedingungen zu Beeinträchtigungen der Eigenschaften des Papiervlieses führen, wurde die Rauigkeit bzw. die Markierung am Papier gemessen.

Die Topografiebewertung der Paperoberfläche erfolgte mit einem Schräglichtscanner. Die so gewonnenen Aufnahmen wurden mit dem Bildanalysesystem DOMAS ausgewertet. Zusätzlich wurde die Topografieaufnahmen sowie lichtmikroskopische Aufnahmen mit dem Messsystem InfiniteFocus der Fa. ALICONA an Papierproben und Bespannungen durchgeführt

Die Beeinflussung der Formation wurde durch das Scannen der Papierprobe mit einem Flachbett-Scanner (Fa. EPSON) im Durchlichtbetrieb untersucht.

Die Bewertung der Bruchfestigkeit der Papiere erfolgt nach EN DIN 1924-2:2008.

Methode zur Probenbefeuchtung

Nachfolgend wird die Methode zur Befeuchtung der Papierstreifen aufgeführt.

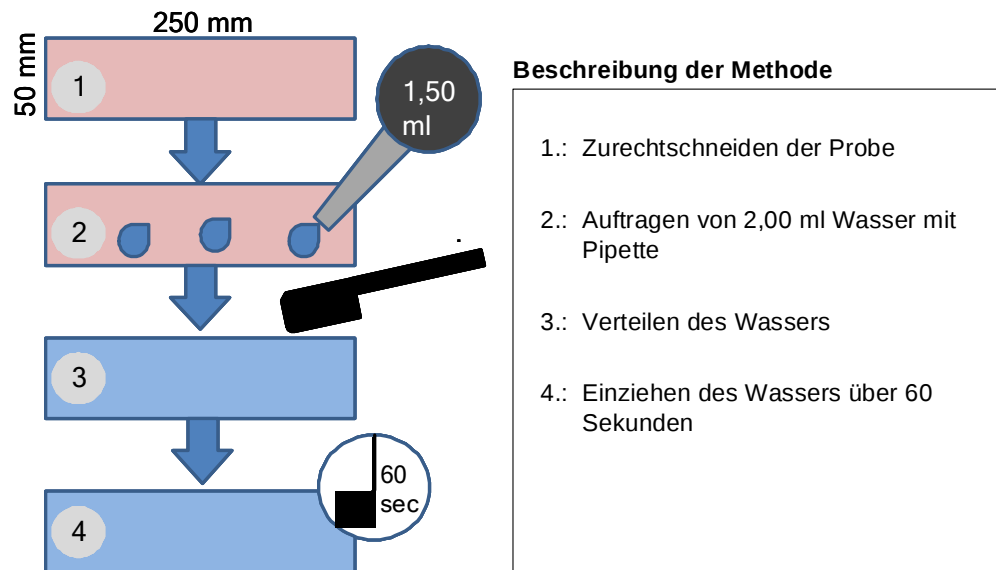


Abbildung 8 Methode zur Befeuchtung der Papierproben [6]

Bespannungen und Gewebe

Die bei den Untersuchungen eingesetzten Bespannungen und Gewebe erfahren durch die Ultraschallbehandlung eine Verschleißbeanspruchung, die mit einem optischen 3D Mikrokoordinatenmesssystem zur Form- und Rauheitsmessung (InfiniteFocus der Fa. Alicona) erfasst wird.

4.5 Thermografie

Zur Bewertung der Wirkmechanismen bei der Ultraschall unterstützten Entwässerung von Papier wurde die Temperaturverteilung im feuchten Papiervlies während der Ultraschallbehandlung mit einem thermografischen Messsystem erfasst.

Thermografie-Kamera:	VarioCAM, Fa JENOPTIK / Laser, Optik, Systeme GmbH
Temperaturmessbereich:	40 ... 1.200 °C
Messgenauigkeit:	2 K
Aufnahmeverfahren:	Focal Plane Array, Einzelaufnahme
Bildformat:	320 x 240 Pixel
Software:	IRBIS, Fa InfraTec

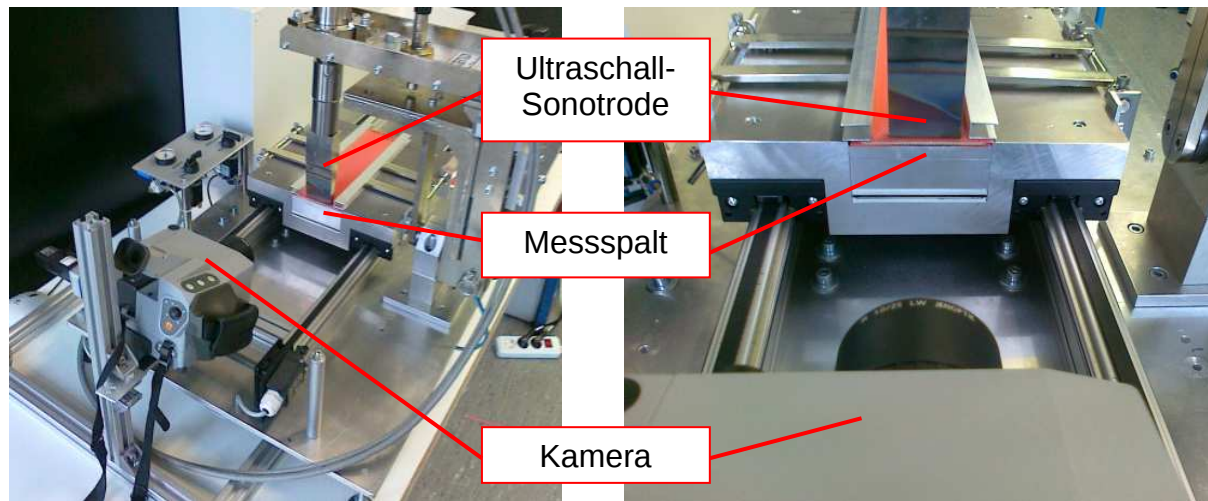


Abbildung 9 Versuchsaufbau Thermografiemessung bei Ultraschall unterstützter Entwässerung

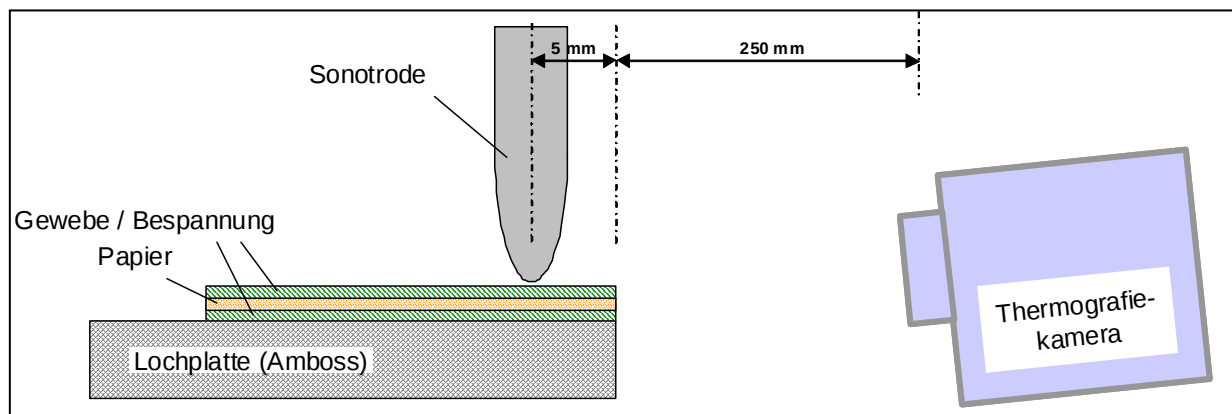


Abbildung 10 Versuchsaufbau Thermografiemessung bei der Ultraschall unterstützten Entwässerung (Prinzipskizze, nicht maßstabsgerecht)

5 Arbeitsplan

Um möglichst viele der maschinenseitig vorhandenen Einflussparameter zunächst auszublenden und die Untersuchungen so methodisch wie möglich durchzuführen, wurden die grundlegenden Wechselwirkung der Beschallung von feuchtem Papierfaservlies auf einer labortechnischen Versuchsanlage der TU Dresden, Professur für Papiertechnik, untersucht.

Die Versuchsanlage ist so ausgerüstet, dass unterschiedliche Anordnungen von Pressfilzen und Papier simuliert werden können. Hierdurch kann abgeschätzt werden, an welcher Position der Presse die Ultraschallapplikation am sinnvollsten ist. Darüber hinaus ermöglicht die Versuchsanlage eine vakuumunterstützte Absaugung der aus dem Papier entfernten Feuchtigkeit.

Die Schallankopplung an das Medium (hier an das System Bespannung/Papier) ist bei jeder Ultraschallapplikation von zentraler Bedeutung. Eine grundsätzlich ungeeignete Installationsvariante, aber auch eine ungünstige Kombination der Prozessparameter (Anpressdruck, Amplitude und Geschwindigkeit) kann aufgrund der hohen Energie- und Leistungsdichten des Ultraschalls zur Beschädigung des behandelten Gutes führen. Solche Applikations- und Prozessparametervarianten sollen in den labortechnischen Untersuchungen identifiziert, beschrieben und abstrahiert werden. Aus den so erarbeiteten Ergebnissen werden dann Empfehlungen für die Installation von Hochleistungs-Ultraschallkomponenten in der Pressenpartie abgeleitet sowie Hinweise für mögliche Betriebsfenster dieser Technologie gegeben.

Schritt 0

Für die Bewertung des Einflusses der Ultraschallbehandlung auf den Trockengehalt der beschallten Papiere sind verschiedene Einflussfaktoren maßgebend. Dies sind insbesondere der Leistungsbedarf des Ultraschallsystems und die Probenvorbereitung (Zuschnitt des Papierstreifens). Da beide Faktoren Schwankungen unterworfen sind, wurde zuerst der Einfluss dieser Schwankungen auf die Zielgröße (Trockengehalt des Papierstreifens) bewertet. Daraus konnte die notwendige Anzahl an Einzelversuchen je Versuchspunkt abgeleitet werden, die für eine reproduzierbare Generierung von Ergebnissen erforderlich ist.

Schritt 1

In Schritt 1 des Arbeitsplanes wurden Untersuchungen mit der Keil-Sonotrode und dem Probestisch A durchgeführt. Variiert wurden folgende Parameter:

- Art des Trägermaterial Siebgewebe / Filz / Bespannung
- Anpressdruck der Sonotrode an das Trägermedium / die Papierbahn
- Amplitude der Sonotrode
- Geschwindigkeit der zu beschallenden Papierbahn
- Winkel der Sonotrode
- Ausgangstrockengehalt des Papiervlieses

Mit diesen Variationen soll eine möglichst allgemeine Beschreibung der Vorgänge einer Beschallung feuchter Papierbahnen ermöglicht werden. Hierbei steht immer die mechanische Entfernung des Wassers aus dem Gefüge, nicht dessen thermisches Verdampfen im Vordergrund.

Schritt 2

In Schritt 2 des Arbeitsplanes wurden weitere Parameter variiert:

- Kombination verschiedener Bespannungen / Gewebe
- Applikationsform (Probentisch)

Die Variation der Feuchte des Filzes wurde in der ersten Sitzung der Projektbegleiter diskutiert. Dabei wurde erörtert, dass derzeit keine Methoden mit vertretbarem Aufwand existieren, die eine reproduzierbare Einstellung der Feuchte des Filzes ermöglichen.

Schritt 3

Gemeinsam mit der Gebr. Bellmer GmbH Maschinenfabrik wurden mit einem Prototyp zur Ultraschall unterstützten Entwässerung in der Pressenpartie Untersuchungen in einer Papierfabrik angestrebt.

Schritt 4

Am Ende der Untersuchungen erfolgte eine Kosten-Nutzenabschätzung dieser Technologie. Hierbei sollten die Investitions- und Betriebskosten für die Ultraschallanlage den möglichen Einsparungen durch einen verminderten Energiebedarf in der Trockenpartie aufgrund der geringeren Eingangsfeuchte gegenüber gestellt werden.

6 Ergebnisse und Diskussion der Untersuchungen

6.1 Visuelle Bewertung der Ultraschall unterstützten Entwässerung

Die Entwässerung des Papiervlieses sollte vorrangig mechanisch erfolgen, da dies gegenüber einer thermischen Entwässerung energetisch sehr viel günstiger ist. Die prinzipielle Eignung der Ultraschalltechnologie zur mechanischen Entfernung des im Papiervlies gebundenen Wassers ist in Abbildung 11 veranschaulicht. Bei dieser Versuchsanordnung war das Papiervlies zwischen zwei Geweben fixiert. Durch das Anlegen der hochfrequenten Schwingung des Ultraschalls an den Gewebe-Papiervlies-Gewebe-Aufbau erfolgte ein Herauslösen des Wassers aus dem Papiervlies. Dabei wurden feine Wassertröpfchen auf der der Ultraschallsonotrode gegenüber liegenden Seite in Form eines Sprühnebels abgesondert.

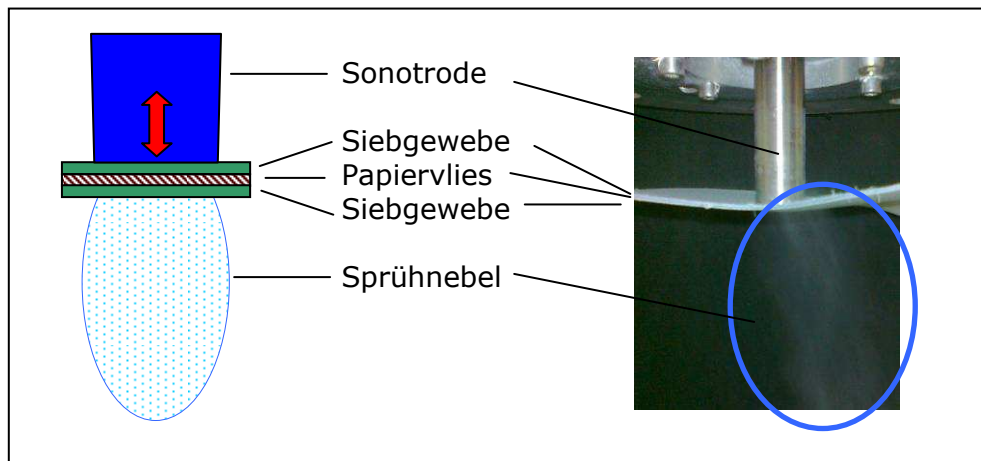


Abbildung 11 Modellvorstellung der Ultraschall unterstützten Entwässerung (links) und visuelle Überprüfung im Versuch (rechts), Ultraschall (Fa. Hielscher): UIP1000, 20 kHz, Sonotrode BS2d22, Schwingweite 53 μm , Siebgewebe: Formiersieb (Fa. Heimbach), Papier: Kopierpapier, 80 g/m^2 , Trockengehalt: ca. 30 %

6.2 Bewertung der Schwankungen von Einflussgrößen (Schritt 0 des Arbeitsplanes)

Für die Bewertung der Schwankung der Papiermuster-masse (Probenstreifen) wurde die Masse von verschiedenen Probenstreifen des Löschpapiers (Basis Altpapier) im Normklima (Iutro) sowie nach Trocknung bei 105°C (o tro) bestimmt. Bei einem Stichprobenumfang von 6 Papieren beträgt der Variationskoeffizient des Trockengehaltes ca. 1 %.

Für die Abschätzung des Einflussfaktors Leistungseintrag wurde der Proben-tisch A benutzt. Die Schwankung des Leistungseintrages des Ultraschall-Systems ergibt bei einem 6 Proben einen Variationskoeffizienten von ca. 4 %. Die Anwendung der Ausreißeranalyse nach Grubbs führt dabei zu einer Reduzierung des Variationskoeffizienten auf ca. 2 %.

6.3 Untersuchungen zur Abschätzung der Einflussfaktoren - Voruntersuchungen (Schritt 1 des Arbeitsplanes)

Nachfolgend sind die Ergebnisse aus Untersuchungen mit dem Proben-tisch A und der Sonotrode MP1 (Keil-Sonotrode) aufgeführt.

Die Arbeiten wurden in „Voruntersuchungen“ und „Hauptuntersuchungen“ unterteilt. Bei den Voruntersuchungen wurde der Einfluss verschiedener Parameter der Ver-

suchsanordnung bewertet, um sinnvolle Grenzen für die statistische Versuchsplannung in den Hauptuntersuchungen festlegen zu können.

Bespannung und Gewebe

In einer ersten Versuchsreihe wurden bei konstanten Betriebsparametern verschiedene Bespannungen und Gewebe untersucht (Nachfolgend wird der Begriff Gewebe auch für Bespannungen benutzt). Dazu wird die Ultraschallsonotrode mit den definierten Betriebsparametern (Linienlast, Vortriebsgeschwindigkeit, etc.) und unter Einsatz der hochfrequenten Schwingung (20 kHz, 55 μ m (pkpk)) über das obere Gewebe geführt („US Entwässerung“).

Da das Gewebe auch ohne die Ultraschallbehandlung eine gewisse Menge an Wasser aus dem feuchten Papiervlies abführt, ist bei allen Geweben auch ein statischer Versuch durchgeführt worden. Dabei wird die Ultraschallsonotrode ebenfalls über das obere Gewebe geführt, aber nicht aktiviert („Statische Entwässerung“).

Aus Abbildung 12 ist ersichtlich, dass bei der Behandlung sowohl ohne als auch mit Schwingung der Ultraschallsonotrode eine Steigerung des Trockengehaltes des Papiervlieses erfolgt. Bei der Behandlung mit Schwingung der Ultraschallsonotrode wird jedoch bei den untersuchten Formiersieben (G1, G2) und den untersuchten Pressenfilzen (G3, G4, G5) keine Steigerung des Trockengehaltes gegenüber dem statischen Fall beobachtet.

Anders ist es bei dem Trockensieb G6 und dem Metallsieb G8. Hier wird der Ausgangstrockengehalt des unbehandelten Papiervlieses (41 %) durch die Behandlung ohne Ultraschallschwingung auf 44,9 % (G6) bzw. 43,7 % (G8) gesteigert. Durch die Behandlung mit Ultraschallschwingung erfolgt bei beiden Gewebetypen eine weitere Steigerung um ca. 3 %.

Das Nickel-Gewebe (G9) wurde bei statischer Behandlung (ohne Ultraschall) stark verformt und fließt daher nicht mit in die Untersuchungen ein.

Aus den Untersuchungen kann abgeleitet werden, dass die Wahl des Gewebes einen entscheidenden Einfluss auf die Wirkung der Ultraschall unterstützten Entwässerung hat.

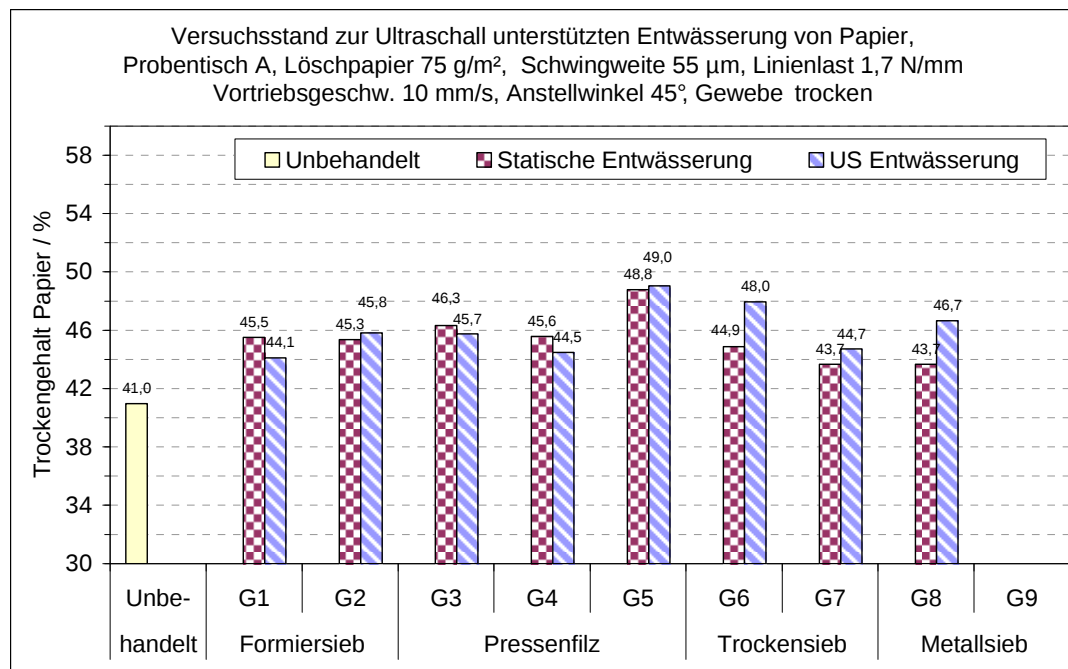


Abbildung 12 Einfluss der Gewebeart auf die Entwicklung des Trockengehalts

Linienlast

Der Einfluss der Linienlast auf die Ultraschall unterstützte Entwässerung ist in Abbildung 13 für die Versuche mit einem Pressenfilzes bzw. einem Metallsieb dargestellt. Bei der Beschallung des Kupfersiebes kann bereits mit einer Linienlast von 1,7 N/mm eine gleich hohe Steigerung des Trockengehaltes realisiert werden wie bei einer Linienlast von 2,8 N/mm.

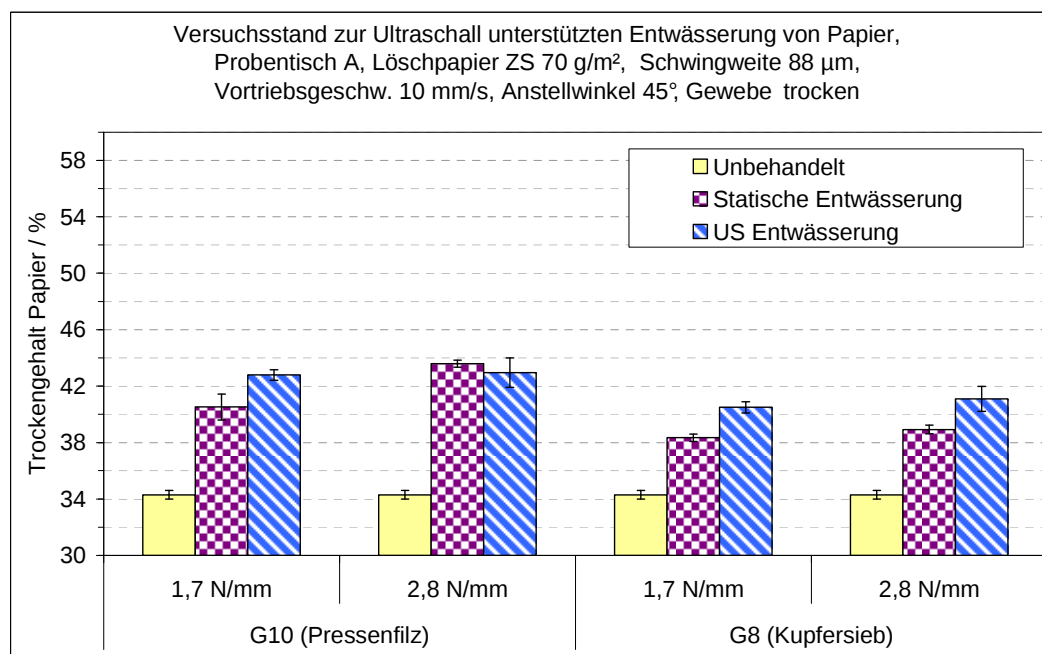


Abbildung 13 Einfluss Linienlast auf die Entwicklung des Trockengehalts

Eine weitere Minimierung der Linienlast auf weniger als 1,0 N/mm führte zu keiner Entfernung des Wassers aus dem Papiervlies. Daraus kann abgeleitet werden, dass

die Linienlast mindestens 1,0 N/mm betragen muss, damit eine Ankopplung des Ultraschalls an das feuchte Papiervlies zur Entfernung von Wasser gegeben ist.

Beide Gewebe führen bei statischer Behandlung, also ohne Ultraschallschwingung, zu einer Entwässerung des Papiervlieses. Dabei wird bei der statischen Behandlung mit dem Pressenfilz mehr Wasser aus dem Papiervlies entfernt als mit dem Kupfersieb. Dies entspricht der Erwartung, da der ca. 3 mm starke Pressenfilz mehr Wasser aufnehmen kann als das nur 0,6 mm starke Kupfersieb.

Die insgesamt höhere Trockengehalte im Papier nach der Behandlung mit Ultraschall bei dem Pressenfilz gegenüber dem Kupfersieb sind auf die bessere statischen Entwässerungseigenschaften des Filzes zurückzuführen.

Papierart

In den bisherigen Untersuchungen wurden zwei Papiere einbezogen, die der Produktgruppe Löschpapier zuzuordnen sind und ein ähnlich hohes Flächengewicht von 70 g/m² bzw. 75 g/m² besitzen. Das verwendete Löschpapier auf Basis Zellstoff war bei der Benetzung in der Lage, 2 ml Wasser rückstandfrei aufzunehmen, wohingegen das Löschpapier auf Basis Altpapier nur 1,5 ml rückstandfrei aufnehmen konnte. Bei beiden Papieren kann der Trockengehalt durch die Ultraschallbehandlung um ca. 7 % (Zellstoff) bzw. 6 % (Altpapier) gesteigert werden.

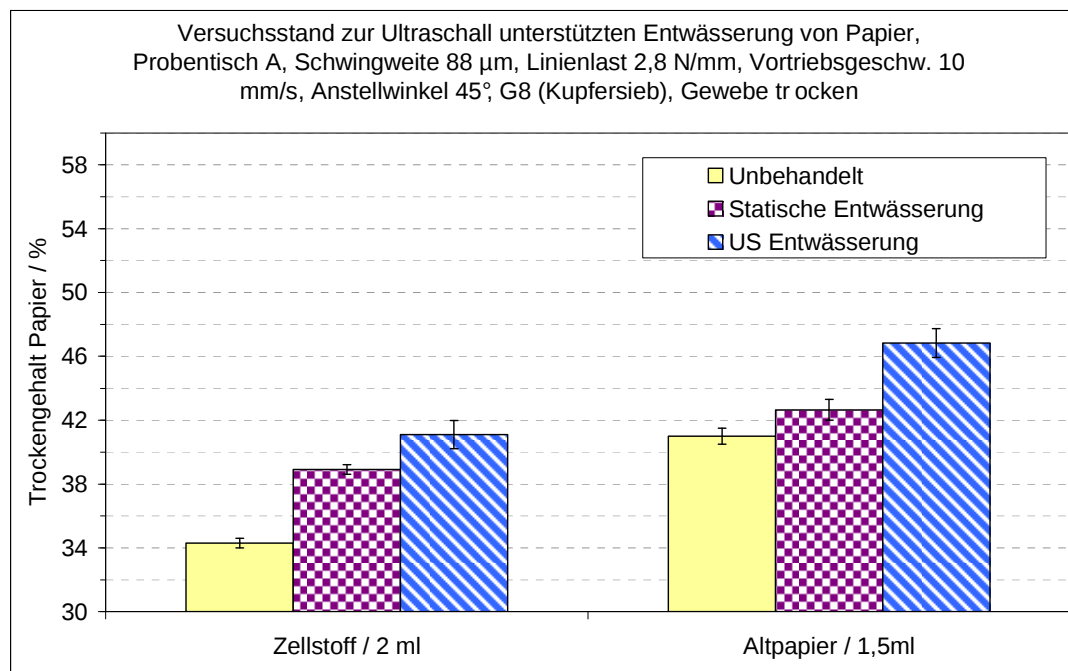


Abbildung 14 Einfluss der Papierart auf die Entwicklung des Trockengehalts

Ultraschall-Amplitude

Bei den Untersuchungen zum Einfluss der Amplitude wurde festgestellt, dass bei einer Linienlast von 1,7 N/mm das Ultraschallsystem in der Konfiguration (Booster B2-1.2, B2-1.8, Sonotrode MP1) nur bei einer minimalen Schwingweite von 45 µm (pkpk) betrieben werden kann. Bei der elektronischen Vorgabe von Schwingweiten kleiner 45 µm (pkpk) erfolgte eine Umschaltung in einen Pulsationsbetrieb, der keine

reproduzierbaren Betriebsbedingungen des Ultraschall-Systems erlaubt. Dies liegt in der elektronischen Schaltung des Ultraschall-Systems begründet, so dass bei anderen Systemen auch Schwingweiten kleiner $45\text{ }\mu\text{m}$ (pkpk) (entspricht Amplitude $23\text{ }\mu\text{m}$ (0-pk)) realisiert werden können.

Geschwindigkeit der Papierbahn

Der Einfluss der Geschwindigkeit auf das Entwässerungsverhalten im statischen Fall (ohne Ultraschallschwingung) ist vernachlässigbar. Bei der Behandlung mit Ultraschallschwingung hingegen nimmt die Trockengehaltssteigerung mit zunehmender Geschwindigkeit und damit mit abnehmender Behandlungsdauer ab.

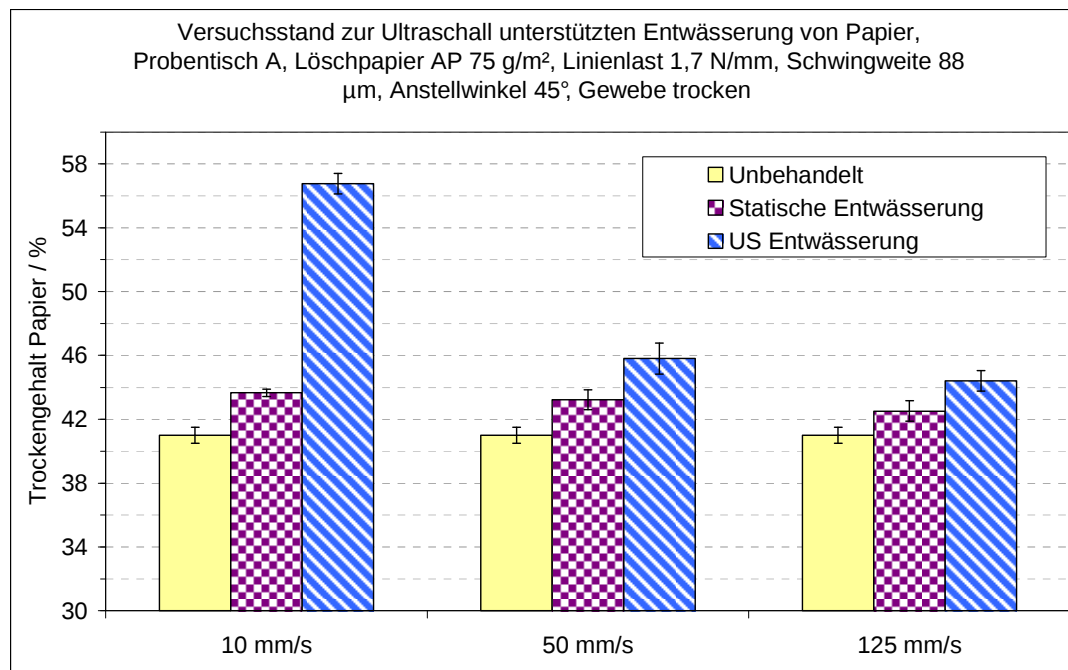


Abbildung 15 Einfluss der Vortriebsgeschwindigkeit der Ultraschallsonotrode auf die Entwicklung des Trockengehalts

Anstellwinkel der Ultraschallsonotrode

Aus der Theorie der Akustik kann abgeleitet werden, dass die Reflexion des Ultraschalls beim Übergang von einem Medium in ein zweites Medium für einen Winkel von 90° senkrecht zu Grenzfläche am geringsten ist. Für die Ankopplung des Ultraschalls an die Papierbahn ist somit bei einem Winkel von 90° die Schallübertragung in die Papierbahn am größten. In den Untersuchungen wurden zwei Anstellwinkel, 45° und 90° , bewertet, wobei bei einem Anstellwinkel von 45° die Ultraschallsonotrode entgegen der Bewegungsrichtung des Probentisches gestellt war (Abbildung 16).

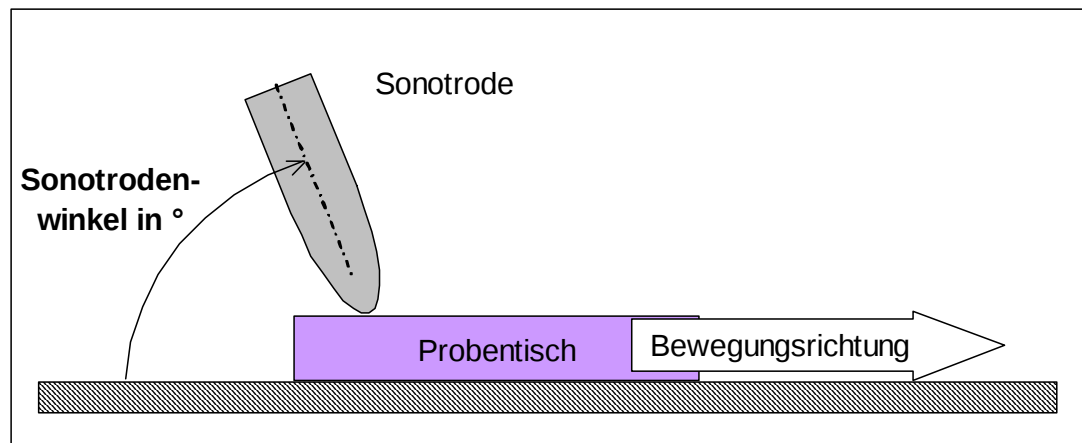


Abbildung 16 Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus, Winkel der Ultraschallsonotrode relativ zum Probentisch, nicht maßstabgerecht

In den Untersuchungen wurde neben dem Anstellwinkel der Ultraschallsonotrode auch die Wirkung des Ultraschalls auf zwei Niveaus variiert (lange Behandlungszeit / geringe Geschwindigkeit und hohe Amplitude vs. kurze Behandlungszeit / hohe Geschwindigkeit und geringe Amplitude).

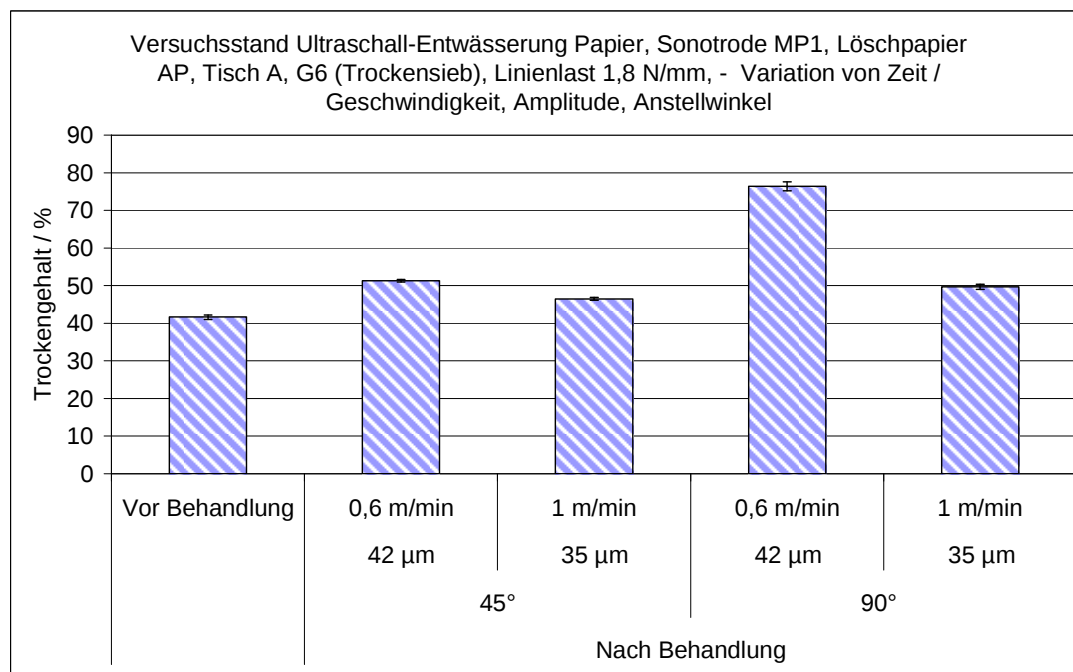


Abbildung 17 Einfluss der des Winkel der Ultraschallsonotrode auf die Entwicklung des Trockengehalts

Wie aus Abbildung 17 ersichtlich, kann bei einem Anstellwinkel von 90° deutlich mehr Wasser aus dem Papiervlies entfernt werden als bei einem Winkel von 45°. Die aus der Theorie abgeleitete bessere Ankopplung des Ultraschalls bei einem Anstellwinkel von 90° resultiert somit auch in einer verbesserten Entwässerungswirkung des Ultraschalls bei diesem Anstellwinkel.

Die Leistung, die das Ultraschallsystem bei einem Anstellwinkel von 90° aufbringen muss, ist jedoch höher als bei einem Anstellwinkel von 45°, so dass sich der spezifische Energieeintrag nur unwesentlich unterscheidet.

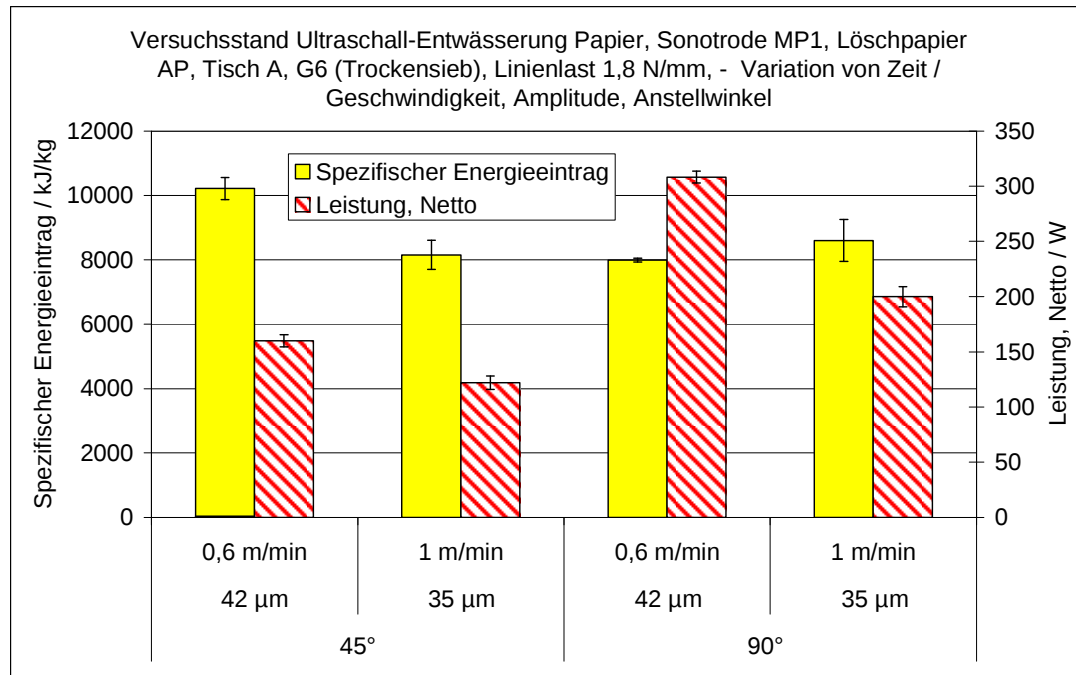


Abbildung 18 Einfluss der des Winkel der Ultraschallsonotrode auf die Entwicklung des spezifischen Energieeintrages und die Leistung des Ultraschallsystems, Gewinn an Trockengehalt durch Ultraschallbehandlung

Für die industrielle Praxis, in der sich die Papierbahn mit deutlich höheren Geschwindigkeiten bewegt als in diesen Laboruntersuchungen, ist unter Umständen eine Verbesserung der Wirkung bei einem Winkel ungleich 90° zu erzielen, da hier dynamische Effekte zum Tragen kommen können.

In den weiteren Untersuchungen im Labormaßstab wurde vorrangig mit einem Winkel der Ultraschallsonotrode von 90° gearbeitet.

6.4 Untersuchungen zur Abschätzung der Einflussfaktoren - Hauptuntersuchungen (Schritt 1 des Arbeitsplanes)

Versuchsplan

Für die Hauptuntersuchungen wurde ein Versuchsplan erstellt, in dem die drei Parameter

- Amplitude der Spitze der Ultraschallsonotrode,
 - Geschwindigkeit der Papierbahn relativ zur Ultraschallsonotrode und
 - Linienlast, mit der die Ultraschallsonotrode auf das Sieb / die Bespannung gepresst wird,
- variiert wurden.

Bei der Versuchsplanung wurde für diese drei Faktoren ein zentral zusammen gesetzter Versuchsplan genutzt (Tabelle 4, Abbildung 19)

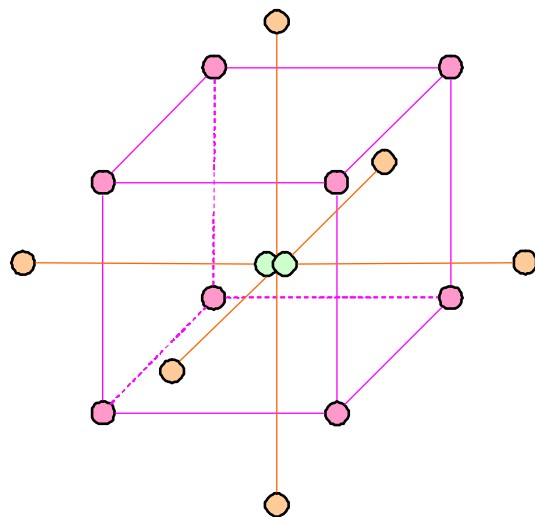


Abbildung 19 Versuchsplan der Hauptuntersuchungen mit Metallgewebe

Tabelle 4 Faktorstufenkombinationen des zentral zusammengesetzten Versuchsplan der Hauptuntersuchungen mit Metallgewebe

Versuchsnummer	Amplitude	Zeit / Geschw.	Linienlast	Erläuterung
1	1	1	1	Würfel
2	-1	1	1	
3	1	-1	1	
4	-1	-1	1	
5	1	1	-1	
6	-1	1	-1	
7	1	-1	-1	
8	-1	-1	-1	
9	0	0	a	Stern
10	0	0	-a	
11	0	a	0	
12	0	-a	0	
13	a	0	0	
14	-a	0	0	
15	0	0	0	Zentrum
16	0	0	0	

Der betrachtete Versuchsraum für die Hauptuntersuchungen wurde aus den Voruntersuchungen abgeleitet und ist in Tabelle 5 aufgeführt.

Tabelle 5 Versuchsraum der Hauptuntersuchungen mit Metallgewebe

Faktor		Zusammenhang	Faktorstufen					Einheit
			-a	-1	0	1	+a	
Amplitude	A	⇒	43,7	50	72	94	100	%
		⇒	24	26	34	42	44	µm (0-pk)
Zeit / Geschw.	Z	⇐	27,9	25,0	15,0	5,0	2,1	s
		⇒	9,0	10,0	16,7	50,0	119,0	mm/s
		⇒	0,5	0,60	1,0	3,0	7,1	m/min
Linienlast	F	⇒	3,45	3,6	4,1	4,6	4,75	bar
		⇒	0,9	1,1	1,8	2,6	2,8	N/mm

Die Durchführung dieses Versuchsplanes erfolgte mit dem Probestisch A (Amboss) sowie dem Metallsieb (G8) als Gewebe. Abweichend zu den Voruntersuchungen wurde bei den Hauptuntersuchungen die Ultraschallsonotrode mit einem Winkel von 90° an die Papierprobe gestellt. Alle Parameter des Versuchsplanes, die nicht variiert wurden, sind im Anhang in Tabelle 15 aufgeführt. Die Messergebnisse (Realisierungen) sind im Anhang tabellarisch (Tabelle 13, Tabelle 14) und grafisch (Abbildung 45 bis Abbildung 48) dargestellt. In Voruntersuchungen wurde ermittelt, dass eine Linienlast kleiner 0,9 N/mm zu keiner Entfernung von Wasser durch den Ultraschall führt.

Die **Ausgangs-Trockengehalt** des Papiers betrug **41,5 %** (SD 0,4 %). Durch eine statische Behandlung des Papiers mit der **Ultraschallsonotrode ohne Schwingung** (Ultraschall ausgeschaltet) wird der Trockengehalt des Papiers auf **43,9 %** (SD 0,2 %) erhöht, was einem Gewinn an Trockengehalt von 2,4 %-Punkten entspricht. Dieser Gewinn an Trockengehalt ist dabei unabhängig von den Parametern Linienlast und Geschwindigkeit (Anhang Tabelle 16).

Regressionsmodell

Aus den Realisierungen des Versuchsplanes wurde mit dem Programm STATISTICA der Fa. StatSoft ein Regressionsmodell gemäß Gleichung 2 erstellt, deren Regressionskoeffizienten in Tabelle 6 aufgeführt sind. Als Zielgrößen wurden zum einen der Austrag an Wasser aus dem Papiervlies („m-Differenz“) sowie der dafür notwendige Energiebedarf („Energie“) des Ultraschallsystems gewählt.

$$Y = B_0 + B_1 \cdot A + B_2 \cdot Z + B_3 \cdot F + B_{12} \cdot A \cdot Z + B_{13} \cdot A \cdot F + B_{23} \cdot Z \cdot F + B_{11} \cdot A^2 + B_{22} \cdot Z^2 + B_{33} \cdot F^2$$

Gleichung 2 Gleichung des Regressionsmodells der Hauptuntersuchungen mit Metallgewebe

Tabelle 6 Regressionskoeffizienten des Modells der Hauptuntersuchungen für die Zielgrößen Wasserentfernung aus Papiervlies („m-Differenz“) und Energiebedarf („Energie“)

Faktorkombination		-	A	A ²	Z	Z ²	F	F ²	A · Z	A · F	Z · F
		B ₀	B ₁	B ₁₁	B ₂	B ₂₂	B ₃	B ₃₃	B ₁₂	B ₁₃	B ₂₃
m-Differenz	R.-Koeff.	1,725762	-0,080271	0,000983	-0,040777	-0,000124	-0,149639		0,001102	0,003698	0,006208
	Fehler	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,029532	0,000702		0,000000	0,002000	0,000000
Energie	R.-Koeff.	-3098,737	-197,514		-306,367	-0,349	3331,114	-636,256	8,246	49,583	60,408
	Fehler	0,003080	0,000000		0,000000	0,013912	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000

Ergebnisse - Steigerung des Trockengehaltes

Nachfolgend sind die mit dem Regressionsmodell ableitbaren Zusammenhänge zwischen den drei Einflussgrößen (Amplitude, Geschwindigkeit, Linienlast) auf die Zielgröße „m-Differenz“, dargestellt als „Gewinn an Trockengehalt“, in der Papierprobe aufgeführt.

Der Gewinn an Trockengehalt im Papier steht - für den betrachteten Versuchsraum - annähernd linear in Zusammenhang mit der Beschallungsdauer (Abbildung 20). Die Beschallungsdauer ist umgekehrt proportional zur Geschwindigkeit. Daher ergibt sich für den Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und Gewinn an Trockengehalt eine Hyperbelfunktion. Die Geschwindigkeit der Papierbahn relativ zur Sonotrode hat

einen hohen Einfluss auf den erzielbaren Trockengehalt. Ab einer Geschwindigkeit > 3 m/min liegt die erzielbare Steigerung des Trockengehalt unter 5 % (Abbildung 21).

Die Linienlast hat bei einer Geschwindigkeit $> 1,0$ m/min einen untergeordneten Einfluss auf den Trockengehalt. Dieser Parameter bietet somit nur geringes Potenzial zur Optimierung des Prozesses unter den hier gegebenen Randbedingungen.

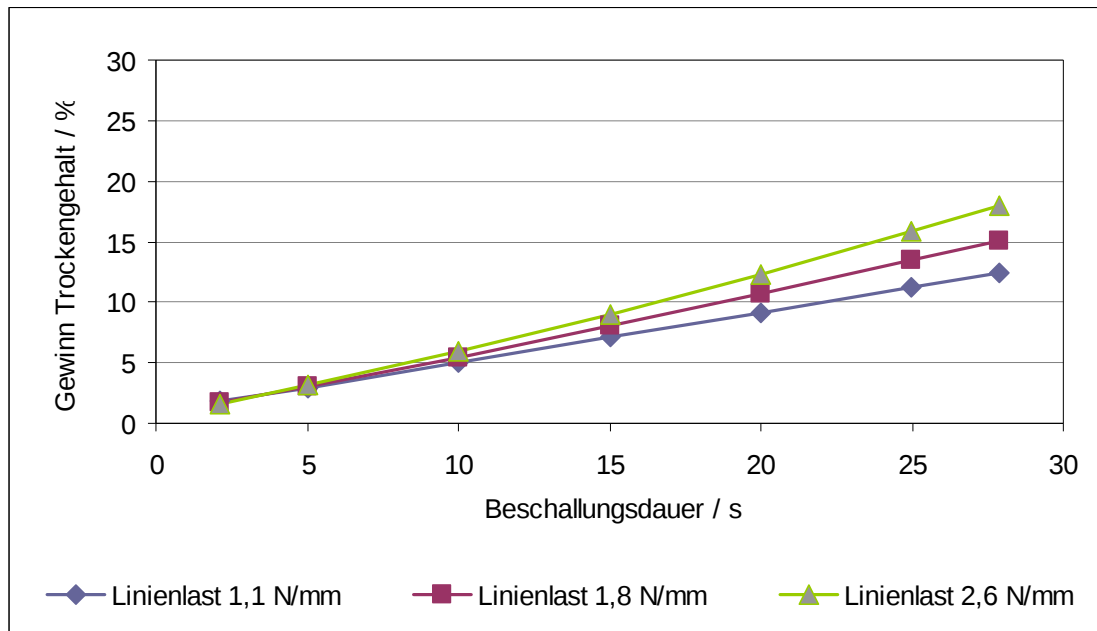


Abbildung 20 Entwicklung des Gewinns an Trockengehalt im Papier durch Ultraschallbehandlung in Abhängigkeit von der Behandlungsdauer, **Amplitude 34 µm (0-pk)**

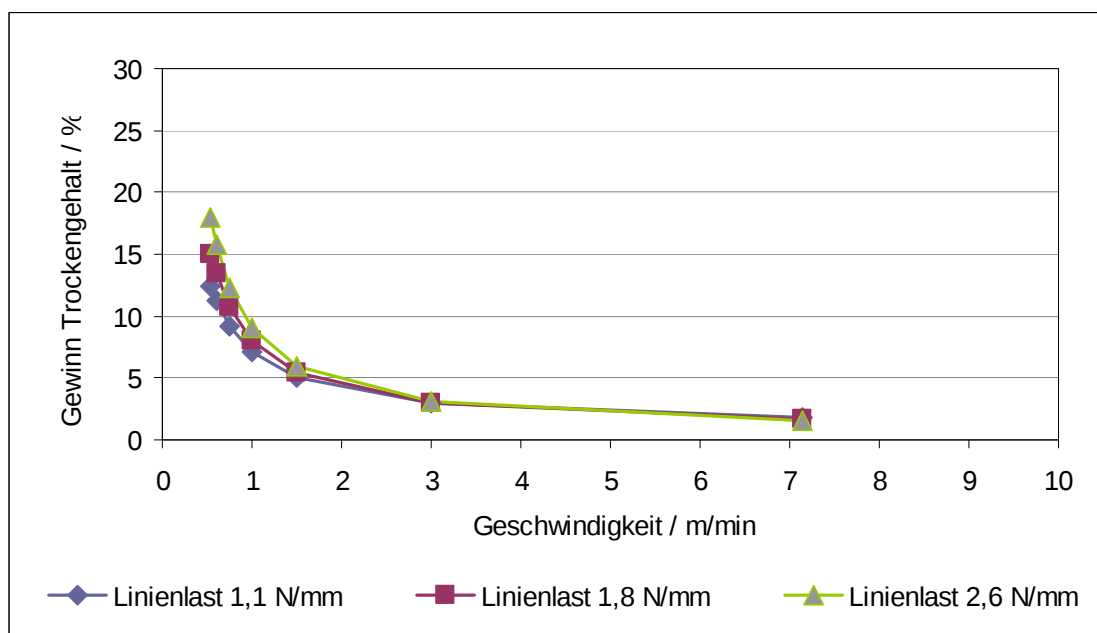


Abbildung 21 Entwicklung des Gewinns an Trockengehalt im Papier in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit, **Amplitude 34 µm (0-pk)**

Die Erhöhung der Amplitude führt bei Geschwindigkeiten < 1 m/min zu einer hohen Steigerung des Trockengehalts. Der Ausgangstrockengehalt des Papiers von 41,5 % kann bei einer Amplitude von 44 μm (0-pk) auf bis zu 76 % gesteigert werden.

Anzumerken ist dabei, dass bei diesen Versuchseinstellungen der Papierstreifen an den Rändern feuchter war als in der Mitte, was einer Rückbefeuchtung durch das Sieb am Rand des Papierstreifens und damit dem Versuchsaufbau geschuldet sein kann. Eine Steigerung des Trockengehaltes des Papiers auf über 75 % mit Ultraschall ist daher denkbar.

Auch bei einer Geschwindigkeit größer 1 m/min führt eine hohe Amplitude von 42 μm zu einer größeren Steigerung an Trockengehalt (5 %) gegenüber einer geringeren Amplitude. Unter dem Aspekt einer möglichst hohen Trockengehaltssteigerung ist daher bei einer industriellen Applikation eine möglichst hohe Amplitude des Ultraschallschwingers anzustreben. (Abbildung 22)

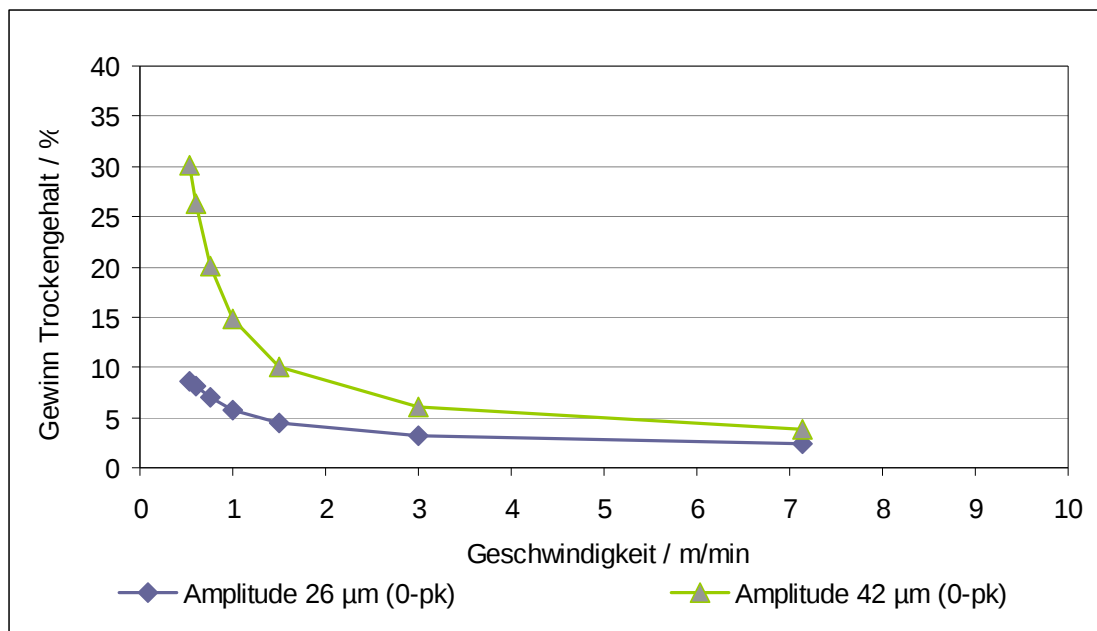


Abbildung 22 Entwicklung des Gewinns an Trockengehalt im Papier durch Ultraschallbehandlung in Abhängigkeit der Geschwindigkeit, **Linienlast 1,8 N/mm**

Wie schon die Beschallungsdauer so steht auch der Parameter Linienlast annähernd linear in Zusammenhang zur Steigerung des Trockengehaltes (Abbildung 23).

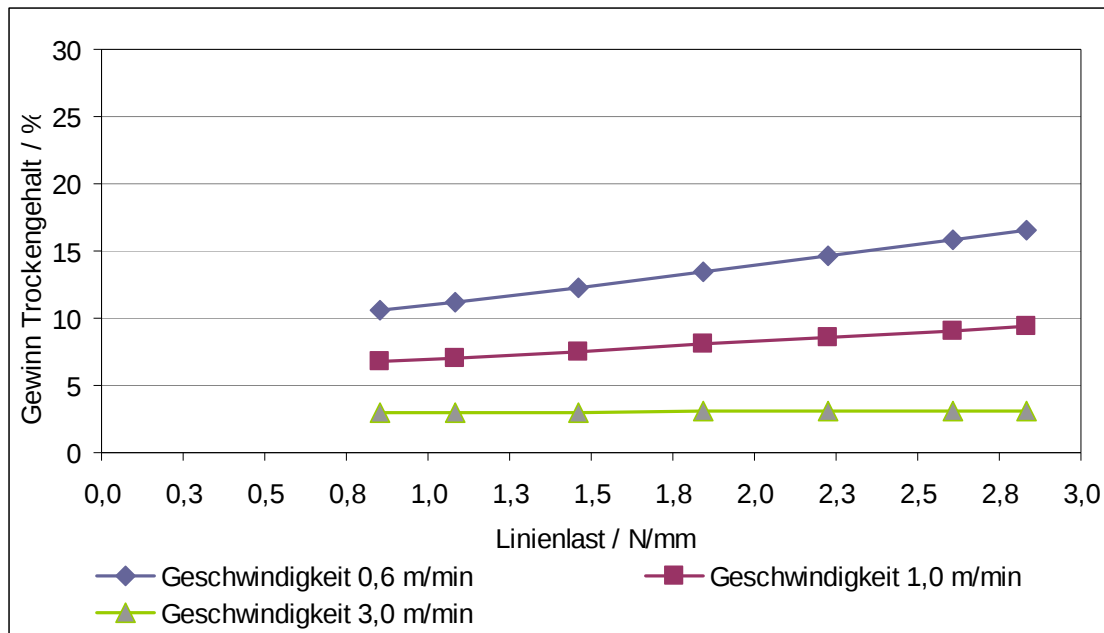


Abbildung 23 Entwicklung des Gewinns an Trockengehalt im Papier durch Ultraschallbehandlung in Abhängigkeit der Linienlast, **Amplitude 34 μm (0-pk)**

Der Parameter Amplitude hingegen steht in einem quadratischen Zusammenhang zur Steigerung des Trockengehaltes. Eine Erhöhung der Amplitude des Ultraschallschwingensystems wirkt sich daher positiv auf die Entwicklung des Trockengehaltes im Papiervlies aus. (Abbildung 24)

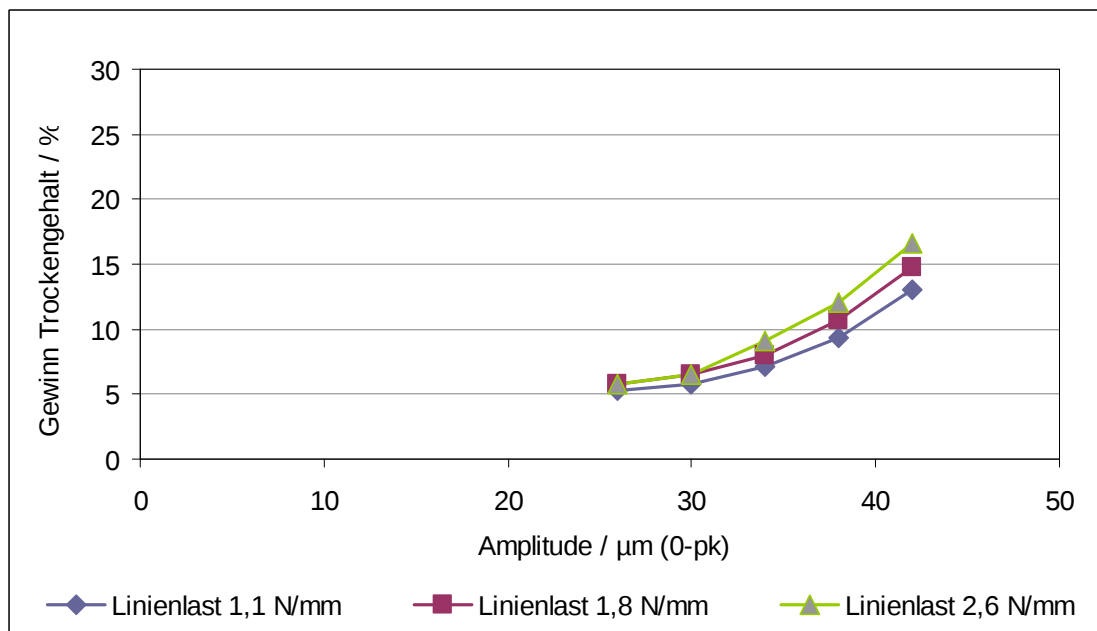


Abbildung 24 Entwicklung des Gewinns an Trockengehalt im Papier durch Ultraschallbehandlung in Abhängigkeit der Linienlast, **Geschwindigkeit 1,0 m/min**

Ergebnisse - Energieeintrag

Für die thermische Entfernung von Wasser durch Verdampfen ist eine Energie von 2260 Ws/g Wasser aufzuwenden [7]. Der Dampf-Energiebedarf (ohne Elektroenergie) in der Trockenpartie der Papiermaschine wird mit 5000 - 7000 Ws/g Wasser angegeben und beinhaltet die Verluste beim industriellen Prozess [8].

Wie aus Abbildung 25 und Abbildung 26 ersichtlich wird, konnten in dieser Versuchsserie mit der Ultraschall unterstützten Entwässerung Betriebszustände realisiert werden, bei denen spezifisch weniger Energie für die Entfernung des Wassers aus dem Papiervlies aufgewandt wurde, als dies für die thermische Entfernung des Wassers in der Trockenpartie einer Papiermaschine notwendig ist.

Eine geringere Linienlast wirkt sich bei einer Amplitude von 42 μm (0-pk) positiv auf den Energiebedarf aus, was mit einer geringeren Dämpfung des Ultraschallsystems bei geringerer Linienlast erklärt werden kann. (Abbildung 25)

Bei einer Geschwindigkeit von mehr als 1 m/min ist bei einer Amplitude von 26 μm (0-pk) der spezifische Energiebedarf geringer als bei einer Amplitude von 42 μm (0-pk). (Abbildung 26)

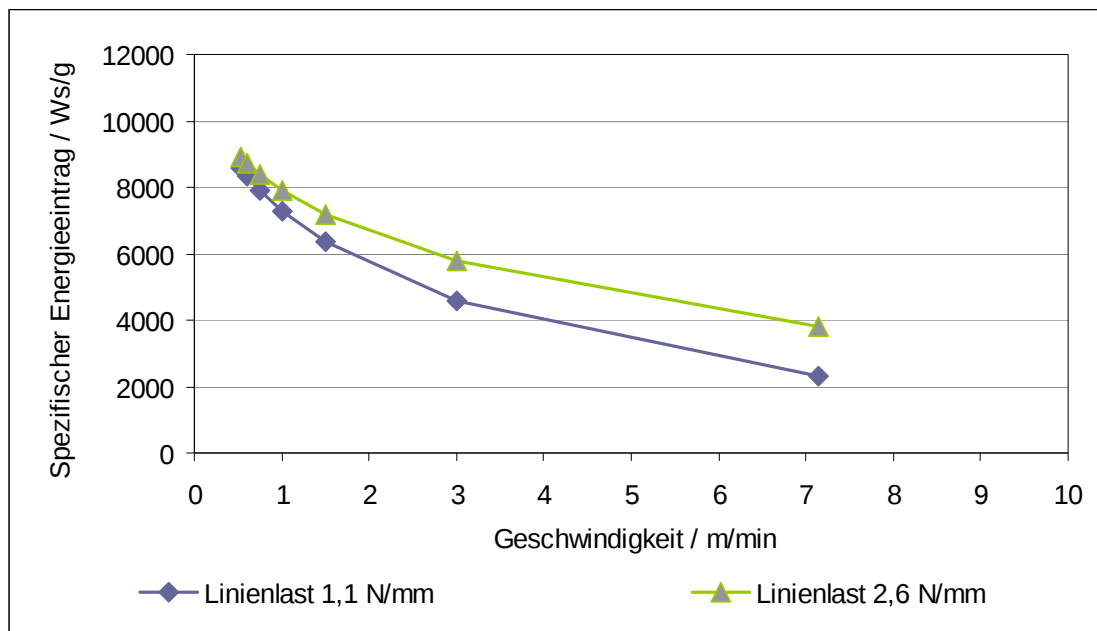


Abbildung 25 Entwicklung des spezifischen Energieeintrages (bezogen auf Masse entferntes Wasser) durch Ultraschallbehandlung in Abhängigkeit der Geschwindigkeit, **Amplitude 42 μm (0-pk)**

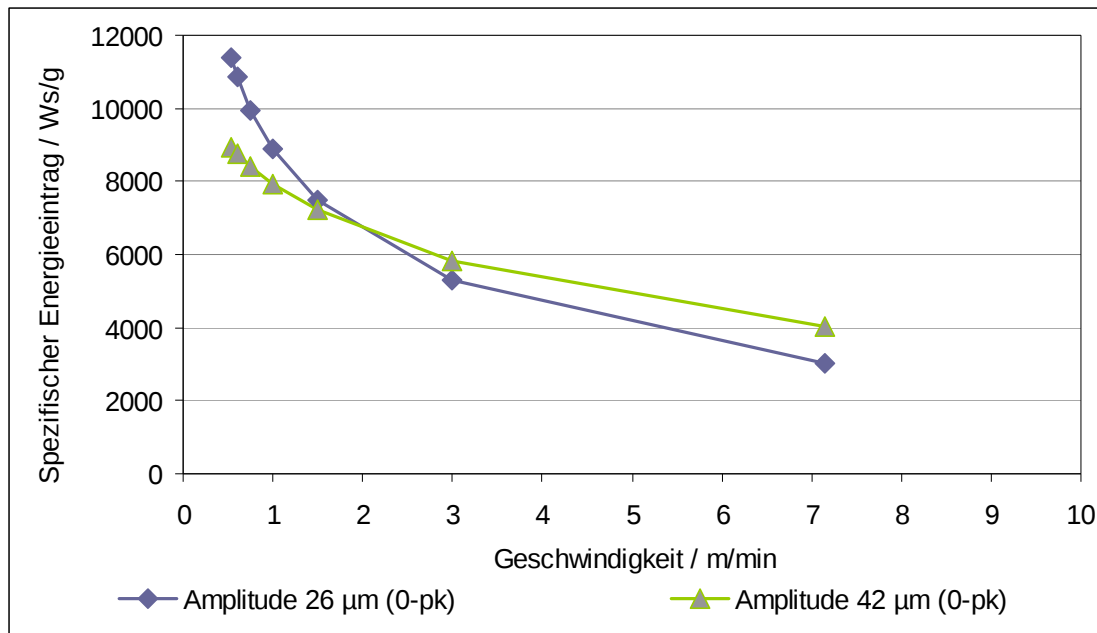


Abbildung 26 Entwicklung des spezifischen Energieeintrages (bezogen auf Masse entferntes Wasser) durch Ultraschallbehandlung in Abhängigkeit der Geschwindigkeit, **Linienlast 1,8 N/mm**

Aus Abbildung 27 (Geschwindigkeit 1,0 m/min) geht hervor, dass die Amplitude einen sehr viel höheren Einfluss auf den Trockengehalt des Papiers hat als die Linienlast. Der spezifische Energieeintrag kann aber bei dieser Geschwindigkeit durch die Variation der Parameter Amplitude und Linienlast nur unwesentlich beeinflusst werden.

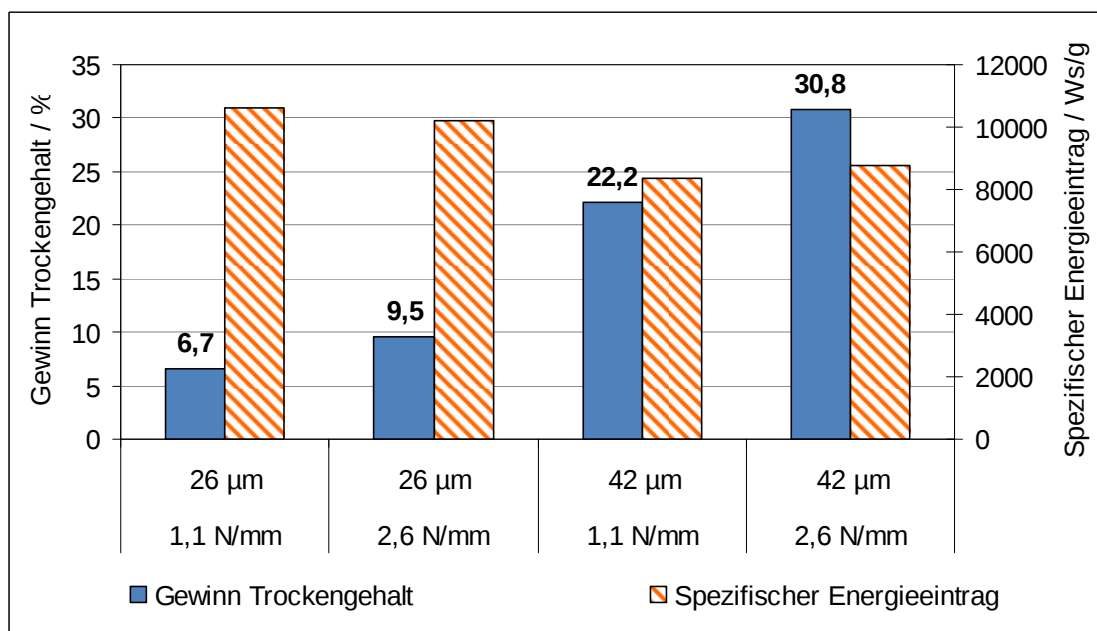


Abbildung 27 Trockengehaltssteigerung und spezifischer Energieeintrag (bezogen auf Masse entferntes Wasser) in Abhängigkeit der Linienlast (in N/mm) und der Amplitude (in µm (0-pk)) durch Ultraschallbehandlung, **Geschwindigkeit 0,6 m/min**

Bei einer Verdreifachung der Geschwindigkeit auf 3,0 m/min kann der Trockengehalt im Papier um ca. 3 bis 6 % gesteigert werden. Der spezifische Energiebedarf wird

durch diese Geschwindigkeitserhöhung aber drastisch gesenkt. Die Steigerung des Trockengehaltes bei einer Amplitude von 26 μm (0-pk) beträgt 2,9 bis 3,4 % und liegt damit nur geringfügig höher als die Steigerung des Trockengehaltes ohne eingeschaltetem Ultraschall (Steigerung TG bei statischer Behandlung 2,4 %).

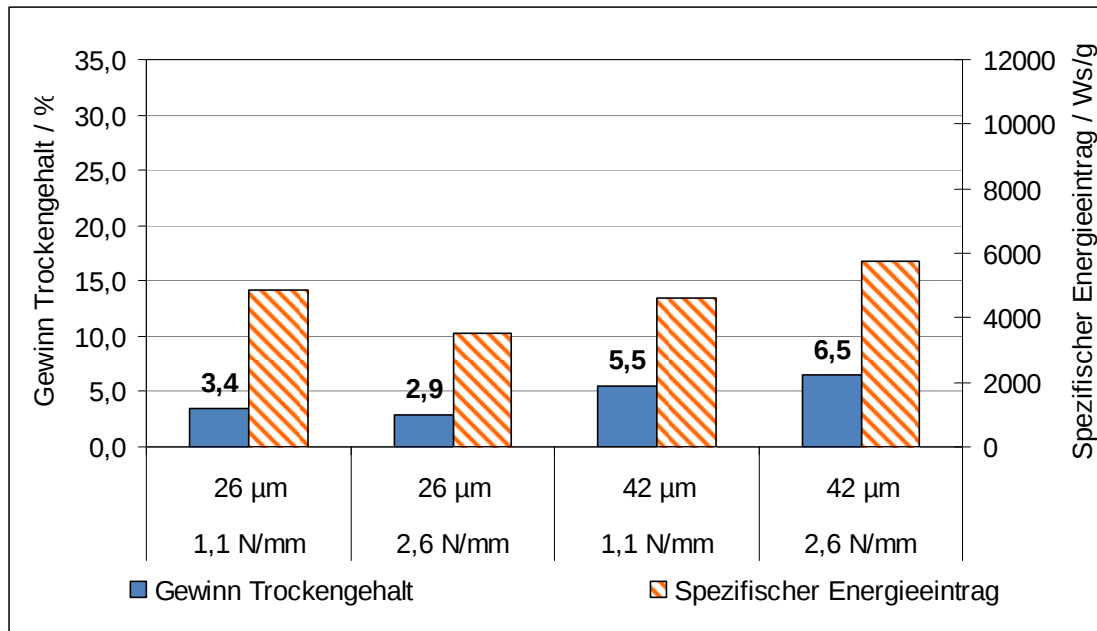


Abbildung 28 Trockengehaltssteigerung und spezifischer Energieeintrag (bezogen auf Masse entferntes Wasser) in Abhängigkeit der Linienlast (in N/mm) und der Amplitude (in μm (0-pk)) durch Ultraschallbehandlung, **Geschwindigkeit 3,0 m/min**

Die Leerlaufleistung des Ultraschallsystems beinhaltet beispielsweise aktive Kühlelemente des Generators und beträgt bei einer Amplitude von 44 μm (0-pk) ca. 100 W. Nach Abzug dieser Leerlauf-Leistung beträgt die Netto-Leistung bis zu 50 % der Brutto-Leistung. Der hohe Anteil der Leerlaufleistung ist in dem Versuchsaufbau begründet. Die Sonotrode mit 50 mm Arbeitsbreite hat nur eine kleine Auflagefläche auf dem Sieb bzw. der Bespannung und setzt dem Ultraschallsystem nur einen geringen Widerstand entgegen. Für eine spätere industrielle Applikation ist daher die Reduzierung der Leerlaufleistung auf ca. 15 % möglich. Dafür kann die Größe der eingesetzten Ultraschallsonotrode auf die Leistungsgröße des Ultraschallsystems abgestimmt werden.

Für die Beantwortung der Frage, inwieweit eine mechanische Entfernung des Wassers aus dem Papiervlies durch die Ultraschallbehandlung möglich ist, ist es sinnvoll, nicht die Brutto-Energiebedarf sondern den Netto-Energiebedarf des Ultraschallsystems - also nach Abzug der Leerlaufleistung - zu betrachten.

Vergleich des spezifischen Energieeintrages bei gleich hohen TG-Steigerungen

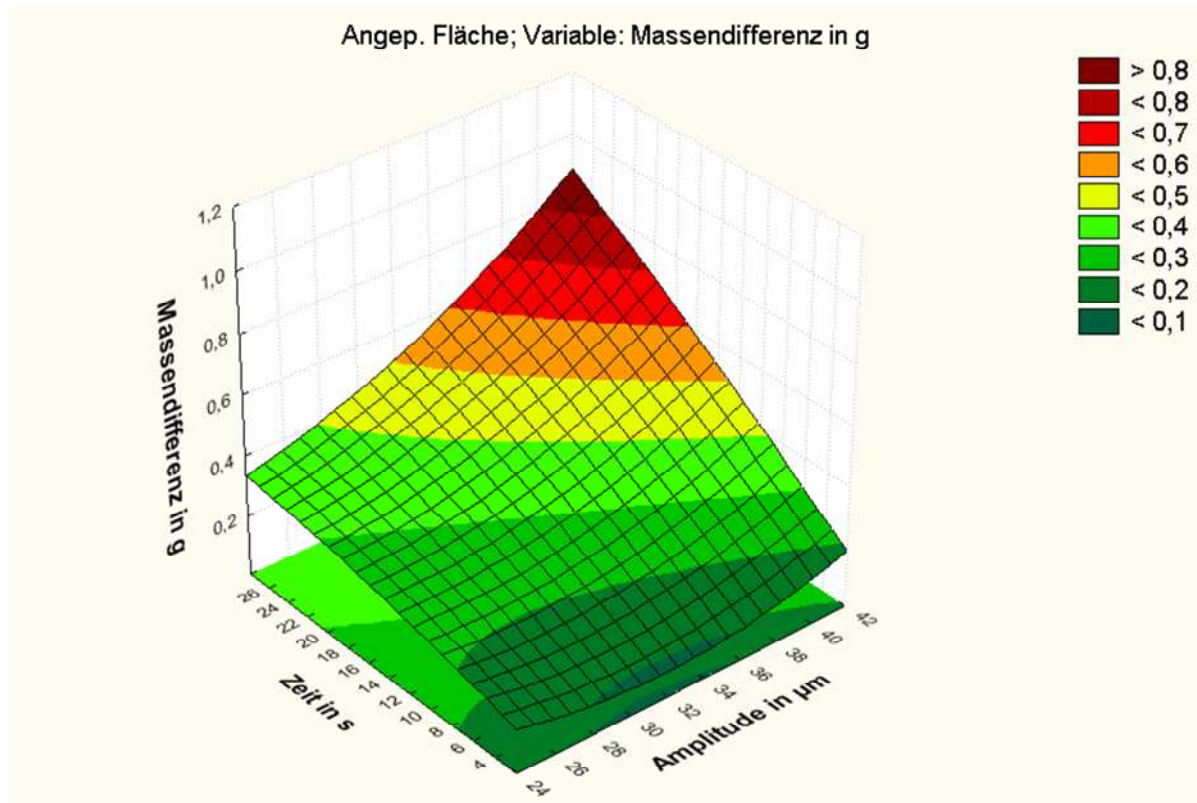


Abbildung 29 3D Flächendiagramm der Massendifferenz in Abhängigkeit von Amplitude und Beschallungsdauer (Zeit)

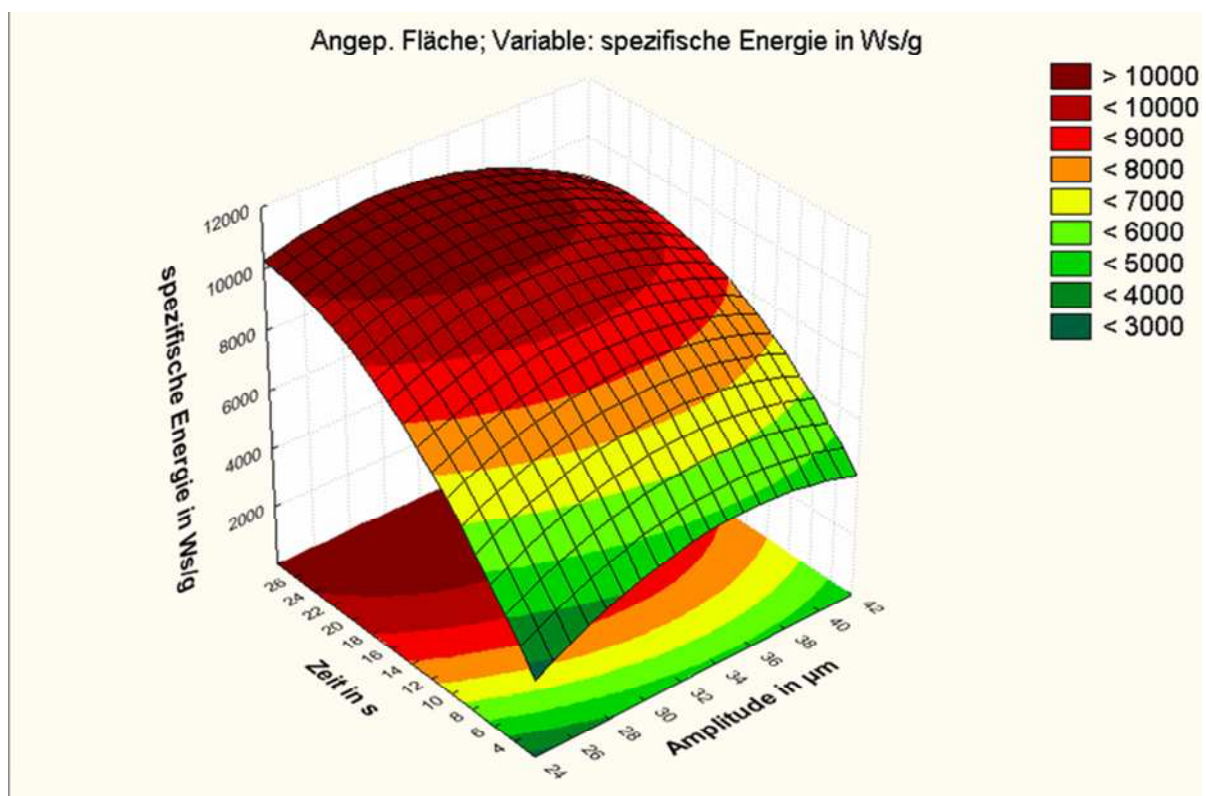


Abbildung 30 3D Flächendiagramm zur spezifischen Energie in Abhängigkeit von Amplitude und Beschallungsdauer (Zeit)

Der Vergleich der Abbildung 29 und Abbildung 30 zeigt, dass für eine hohe Trockengehaltssteigerung bei gleichzeitig niedrigem spezifischen Energieeintrag die Amplitude hoch und Beschallungszeit kurz sein sollte.

Fazit

Mit der Ultraschall unterstützten Entwässerung konnte im Rahmen von Versuchen der Trockengehalt von Papiervliesen von 41,5 % auf bis zu 76,3 % gesteigert werden.

Sowohl die Geschwindigkeit des Papiervlieses relativ zur Sonotrode als auch die Amplitude der Ultraschallsonotrode haben einen wesentlichen Einfluss auf den erzielbaren Trockengehalt im Papiervlies. Der Einfluss der Linienlast ist dagegen weit geringer.

Die Erhöhung der Geschwindigkeit führt zu einer Erniedrigung des spezifischen Energiebedarfs, allerdings auf Kosten der Trockengehaltssteigerung. Bei einer Geschwindigkeit von 3 m/min konnte der Trockengehalt um ca. 5 bis 6 % gesteigert werden, wobei ein spezifischer Energiebedarf von netto ca. 5.000 Ws/g aufgewendet werden musste. Der Dampf-Energiebedarf (ohne Elektroenergie) in der Trockenpartie der Papiermaschine wird mit 5.000 – 7.000 Ws/g Wasser angegeben.

Aus diesen Ergebnissen ergibt sich die Fragestellung, ob bei einer Erhöhung über die in der Versuchsserie realisierten Geschwindigkeit von 7 m/min hinaus eine Steigerung des Trockengehaltes realisiert werden kann.

6.5 Einfluss der Ultraschallanwendung auf den Verschleiß der Bespannung

Die Bewertung des Verschleißes der Bespannung erfolgt durch mikroskopische 3D-Aufnahmen im Messsystem InfiniteFocus.

Bei dem Trockensieb G6 wird die der Sonotrode zugewandte Seite und die dem Probenstisch (Lochplatte) zugewandte Seite der Bespannung aufgeraut. Die gezeigte Aufrauung ist das Ergebnis einer ca. 10-maligen Behandlung der Bespannung mit Ultraschall. Die Schädigung ist auf der der Sonotrode zugewandten Seite größer als auf der dem Probenstisch zugewandten Seite.

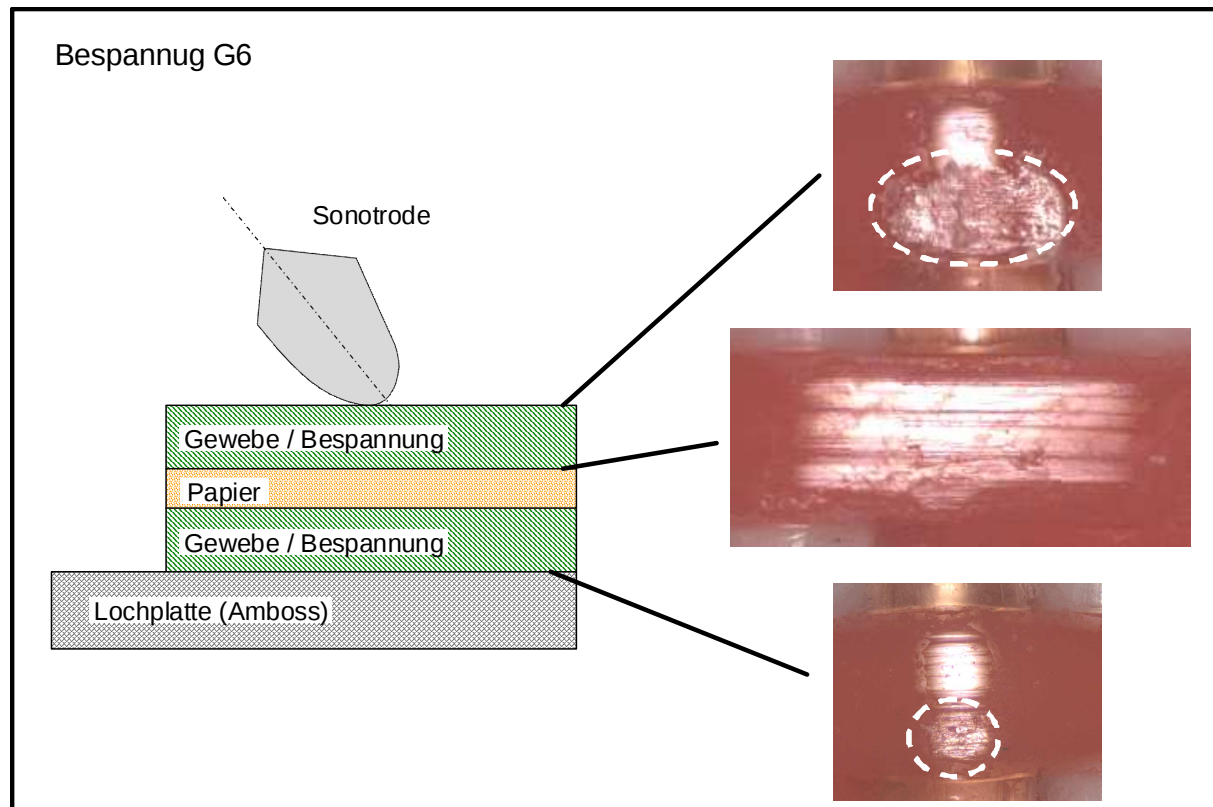


Abbildung 31 Verschleiß der Bespannung am Beispiel von Probenstisch A mit Sonotrode MP1 und Bespannung G6 (Skizze nicht maßstabsgerecht)

Wie schon bei der Bespannung G6 ist auch bei dem Metallgewebe G8 nur die der Sonotrode zugewandte Seite und die dem Probenstisch zugewandten Seite durch die Ultraschallanwendung beeinflusst worden. Die dem Papier zugewandte Seite des Metallgewebes zeigt keine Verschleißspuren.

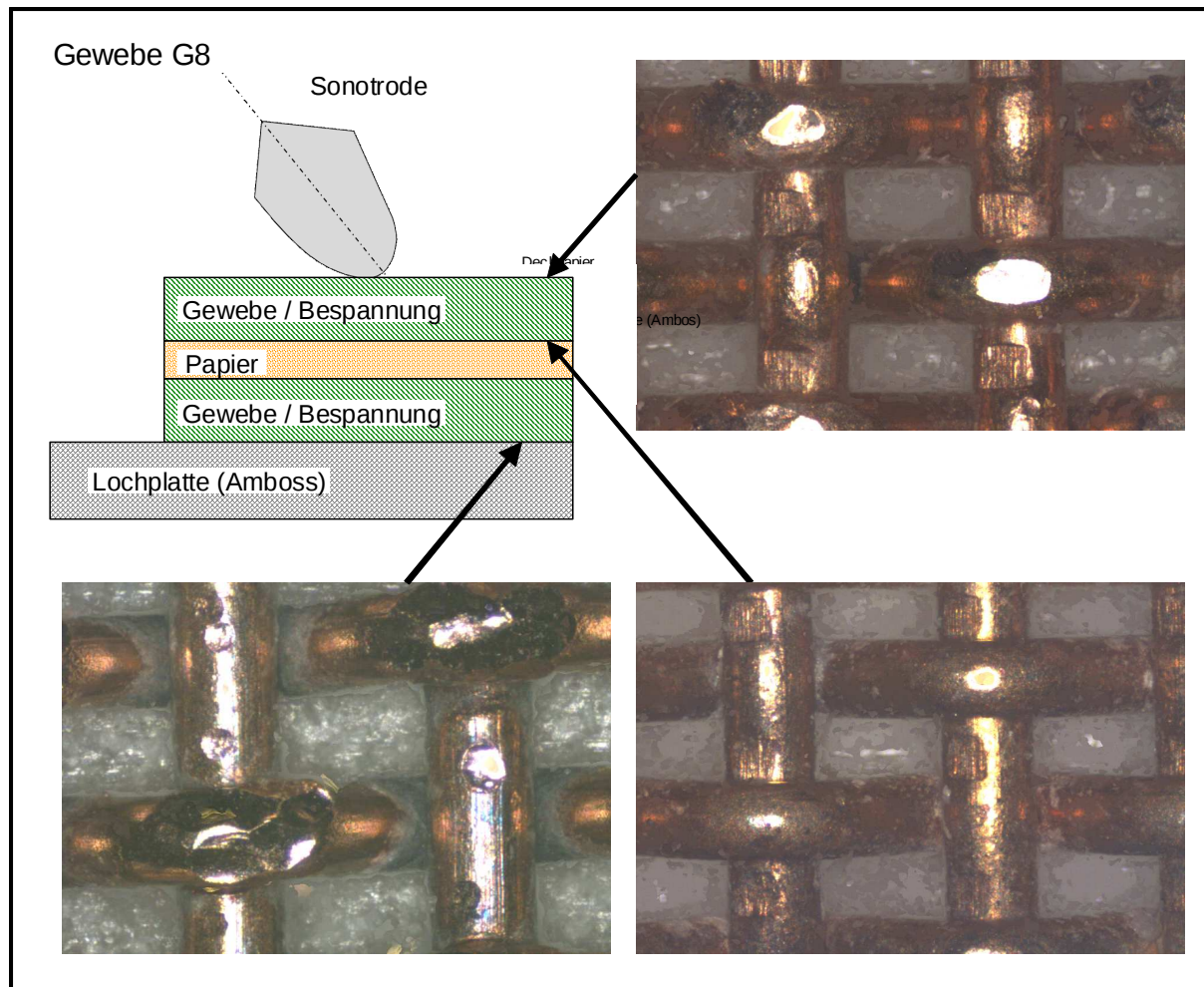


Abbildung 32 Verschleiß der Bespannung am Beispiel von Probestisch A mit Sonotrode MP1 und Bespannung G8 (Skizze nicht maßstabsgerecht)

6.6 Einfluss der Ultraschallanwendung auf das Papier

Papierstruktur

Durch die Behandlung des feuchten Papiervlieses mit Ultraschall erfolgt eine Markierung des Papiervlieses mit dem Muster der Bespannung bzw. des Gewebes. Die Bewertung dieser Markierung erfolgt auf drei verschiedenen Wegen.

- Durch mikroskopische Aufnahmen im Messsystem InfiniteFocus können kleine Ausschnitte der Papieroberfläche hinsichtlich der Beeinflussung in z-Richtung bewertet werden.
- Als Erweiterung dazu können Schräglicht-Scan der Papierprobe mit der Auswertesoftware DOMAS analysiert werden, wobei der Parameter Druckungleichmäßigkeit (Powerspektrum) als Bewertungsgröße genutzt wird.
- Durch einen Durchlicht-Scan kann die Änderung der Formation der Papierproben bewertet werden.

Abbildung 33 zeigt in einer Aufsichtaufnahme auf das Metallgewebe und das damit behandelte Papier, inwieweit sich die Struktur des Siebes auch im Papier wiederfinden lässt.

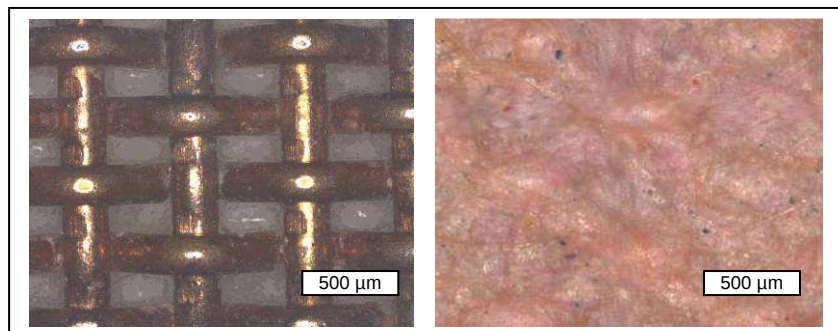


Abbildung 33 Markierung des Papiers (rechts) durch Ultraschallbehandlung bei Metallgewebe G8 (links), Messsystem InfiniteFocus

Nachfolgend sind 3D-Aufnahmen (InfiniteFocus) von Papier in Falschfarben dargestellt, das mit dem Formiersieb G1 entwässert wurde. Die obere Abbildung gibt dabei die Papieroberfläche nach statischer Behandlung (Ultraschallsonotrode fährt über Sieb, aber ohne Schwingung) und die untere Abbildung nach Behandlung mit Ultraschall wieder. Deutlich ist in der unteren Abbildung zu erkennen, dass die Ultraschallschwingung die Struktur des Siebes in das Papier überträgt.

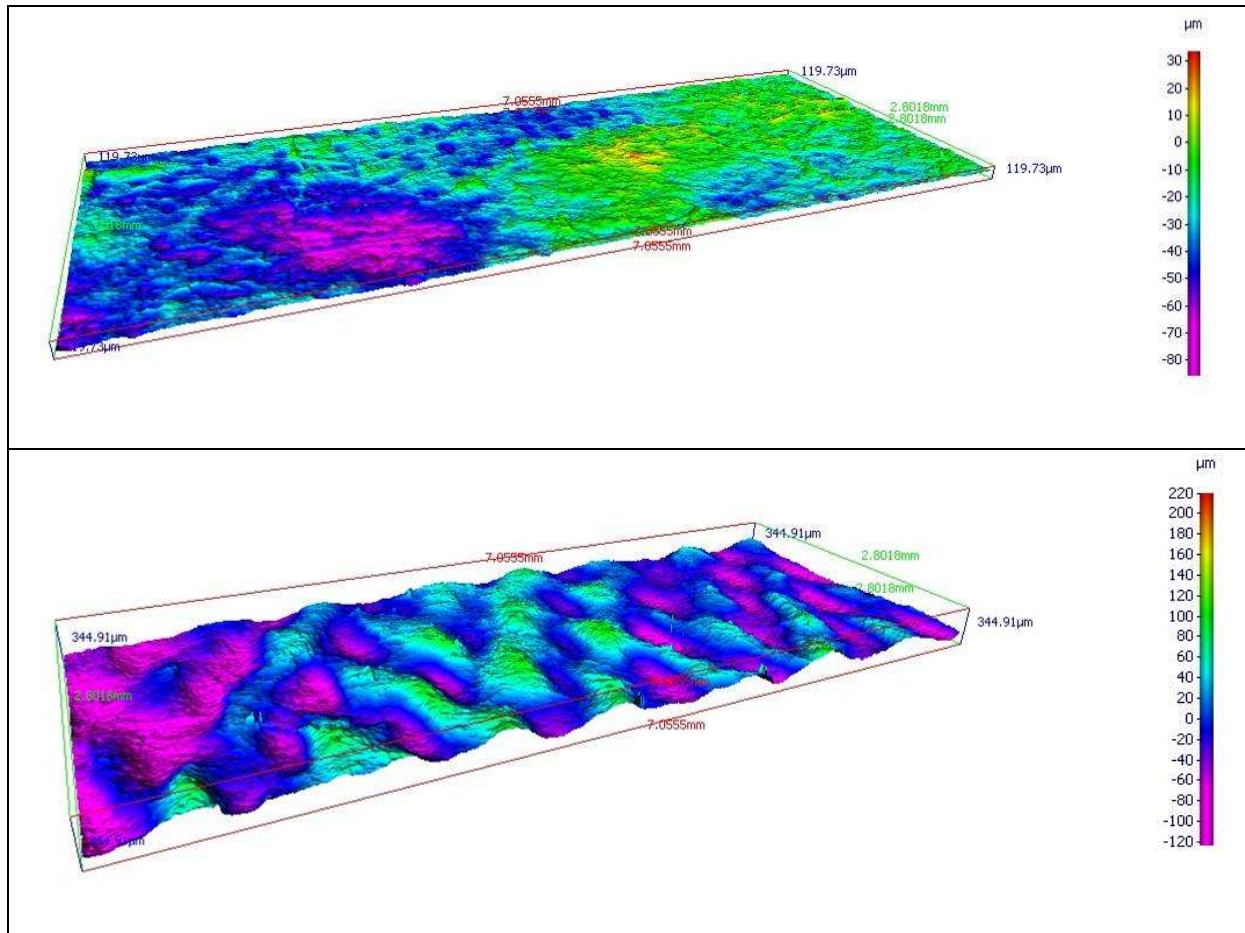


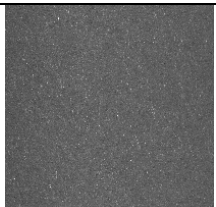
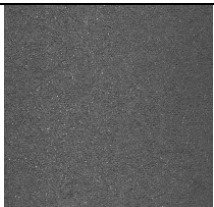
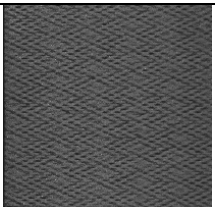
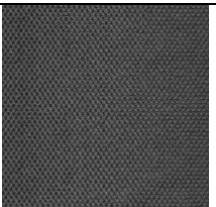
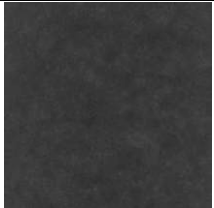
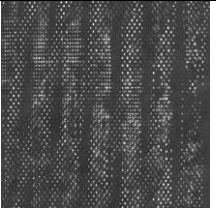
Abbildung 34 3D-Aufnahmen von Papier in Falschfarben nach Behandlung in Sieb G1 ohne US (oben) und Sieb G1 mit US (unten) in Probenstisch A, Messsystem InfiniteFocus

Den in der Abbildung 34 aufgezeigten Einfluss der Ultraschallschwingung auf das z-Profil des Papiers zeigt auch Tabelle 7. Die Änderung der Papieroberfläche - gemessen als Druckungleichmäßigkeitsindex eines Schräglicht-Scan - zeigt für die Papier-Probe „Sieb G1 ohne US“ mit einem Wert von 587 keine wesentliche Änderung gegenüber dem unbehandelten Papier (574). Diese Beobachtung deckt sich somit mit der 3D-Aufnahme in Abbildung 34.

Die Papier-Probe „Sieb G1 mit US“ hat hingegen einen deutlich höheren Druckungleichmäßigkeitsindex (2497). Die in der 3D-Aufnahme sichtbare Siebstruktur im Papier kann somit auch im Schräglicht-Scan in dem Parameter Druckungleichmäßigkeitsindex wiedergefunden werden.

Das Metallgewebe G8 hat beim Betrieb der Ultraschallsonotrode mit Schwingung („Sieb G8 mit US“) eine starke Beeinflussung der Papieroberfläche zur Folge, die in einem hohen Druckungleichmäßigkeitsindex (3096) resultiert. Gleichzeitig wird bei diesem Sieb die Formation des Siebes stark beeinflusst, was deutlich mit dem Durchlicht-Scan erkennbar ist.

Tabelle 7 Vergleich von unterschiedlich behandeltem Papier (Löschpapier, Basis Altpapier) durch Schräglicht-Scan und Durchlicht-Scan

Papier-Probe	Unbehandelt	Sieb G1 ohne US	Sieb G1 mit US	Sieb G8 mit US
Druckungleichmäßigkeitsindex	574	587	2497	3096
Schräglicht-Scan				
Durchlicht-Scan				

Die Beeinflussung der Papiere durch Markierungen ist nicht bei dem Metallgewebe (G8) sondern auch bei dem Einsatz eines Trockensiebes aus Kunststoff (G6) zu beobachten. Dazu wurden Trockensiebmuster (G6) und Papiermuster (Löschpapier ZS) im Versuchsstand an der TU Dresden mit Ultraschall behandelt und diese Proben durch die Fa. Heimbach messtechnisch bewertet. Bei diesen Untersuchungen wurden folgende Parameter des Ultraschallsystems genutzt:

- Befeuchtung der Papiermuster mit 2 ml Wasser
- Tisch A
- Ultraschallamplitude 34 μm
- Geschwindigkeit 0,9 m/min
- Andruck 4,1 bar, Linienlast 1,8 N/mm
- Ultraschallbehandlung 1-fach (ca. 13 s), 3-fach (ca. 40 s)

Als Papiermuster wurde das Löschpapier ZS (80 g/m²) eingesetzt.

Aus den Messungen der Fa. Heimbach geht hervor, dass die Papiermuster durch die Behandlung mit der Ultraschallsonotrode eine Verformung und Markierung erhalten. Die Markierungsanalyse mittels PTS-DOMAS-Methode und Nanofocusscan zeigen sehr deutlich, dass die Verformungen durch das Trockensieb entstehen. Teilweise überlagern sich die Verformungen des Papiers durch die Oberfläche des oberen und unteren Trockensiebes (siehe Anhang Tabelle 17 und Tabelle 18, Abbildung 50 bis Abbildung 65).

Papierfestigkeit

Der Einfluss der Ultraschallapplikation auf die Papierfestigkeit ist anhand der Bruchkraft in Abbildung 35 dargestellt. Der Referenzwert der unbehandelten Probe („unbeschallt, unbehandelt“) ist 41,18 N. Wird das Papier in die Trägermaterialien eingelegt und anschließend mit definiertem Anpressdruck und definierter Geschwindigkeit, aber ohne Schwingung der Ultraschallsonotrode, an der Ultraschallsonotrode vorbeigeführt („unbeschallt, statisch“), so resultiert daraus eine Senkung der Bruchkraft auf

34 bis 37 N. Wird das Papier bei der Vorbeiführung an der Sonotrode auch beschallt („beschallt“), so wird die Bruchkraft auf 21 bis 25 N gesenkt.

Es zeigt sich ein besonders starker Einfluss des Bronzesiebes (G8) auf die Bruchkraft der Papiere. Ein Unterschied zwischen Kunststoffsieb (G6) und den Versuchen mit der Gewebekombination (G8 + G6) ist nicht ersichtlich. (Abbildung 35)

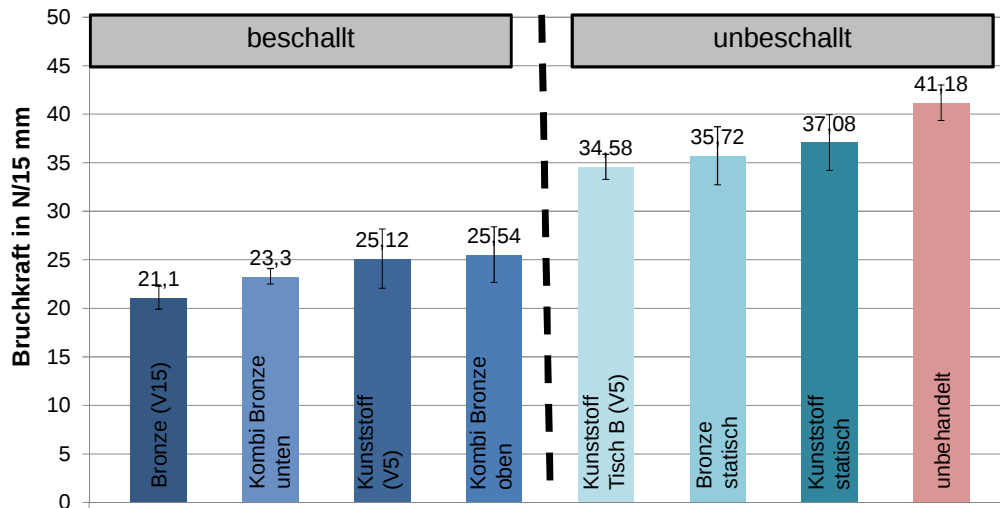


Abbildung 35 Entwicklung der Bruchkraft von beschallten und unbeschallten Papieren

Neben dem Einfluss der Gewebe war eine Reduzierung der Bruchkraft durch eine Amplitudenerhöhung festzustellen (Abbildung 36). Ein Vergleich der Bruchkraft mit den Messwerten der unbehandelten sowie statisch behandelten Probe zeigte einen deutlich niedrigeren Wert der beschallten Proben, welcher tendenziell mit zunehmender Amplitude weiter fällt.

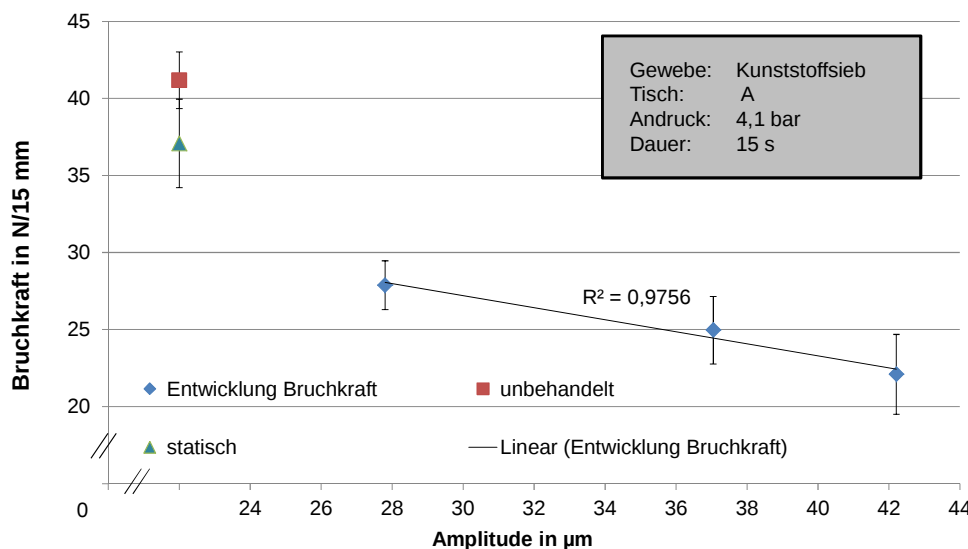


Abbildung 36 Entwicklung der Bruchkraft von beschallten und unbeschallten Papieren in Abhängigkeit von der Amplitude

6.7 Wirkmechanismen bei der Ultraschall unterstützten Entwässerung von Papier (Thermografie)

Die Untersuchungen der Mechanismen der Ultraschall unterstützten Entwässerung eines feuchten Papiervlieses hatten das Ziel, zu bewerten, inwieweit die Entfernung des Wassers durch den Ultraschall thermisch induziert ist. Dabei wurde angenommen, dass bei Erreichen der Siedetemperatur von Wasser (ca. 100°C), die Entfernung des Wassers zu einem gewissen Teil thermisch erfolgt durch verdampfen. Dazu wurde mit der in Kapitel 4.5 aufgeführten Thermografiekamera sowie dem dort aufgeführten Versuchsaufbau die Temperatur des Papiers bei der Beschallung mit Ultraschall bestimmt.

Für die Untersuchungen an einem beschallten Papiervlies wurden folgende Einstellungen genutzt:

- *Material:* Bierdeckel 600 g/m², Löschpapier (AP) 80 g/m²,
- *Trockengehalt:* 40 %
- *Trägermaterial:* Trockensieb (G6) oben und unten
- *Tisch:* A,
- *Winkel der Sonotrode:* 90°,
- *Linienlast:* 1,8 N/mm,
- *Amplitude:* 34 µm,
- *Zeitdauer der Beschallung:* 1 und Sekunde(n),
(kleinster Zeitschritt des Ultraschallsystems: 1 Sekunde).

Die Ultraschallsonotrode wurde bei den Untersuchungen ca. 5 mm vom Rand des Probenbügels entfernt auf die Bepannung gedrückt. Der Tisch wurde dabei nicht bewegt, so dass der Ultraschall auf ein und dieselbe Stelle wirkte. Eine weitere Annäherung der Ultraschallsonotrode an den Rand des Tisches führt zu einem Abrutschen der Ultraschallsonotrode bei Schwingung.

Unterstellt man eine Wirkzone des Ultraschalls von 10 mm beidseitig der Ultraschallsonotrode, so kann die Verweildauer der Ultraschallsonotrode gemäß Tabelle 8 berechnet werden. Eine Geschwindigkeit des Papierstreifens von 10 mm/s entspricht demnach einer Verweildauer von 1 Sekunde.

Tabelle 8 Verweildauer der Ultraschallsonotrode über einem 10 mm breiten Streifen (entspricht Abstand der Ultraschallsonotrode zum Rand des Probenbügels von 5 mm) bei verschiedenen Geschwindigkeiten

Geschwindigkeit in m/min	0,12	0,3	0,6	1,2	3
Geschwindigkeit in mm/s	2	5	10	20	50
Verweildauer Sonotrode in s	5,0	2,0	1,0	0,5	0,2
Realisierte Messung		x	x		

Der Emissionsgrad des Objektes hat einen großen Einfluss auf das Messergebnis. Der Emissionsgrad eines Stoffes liegt im Bereich von 0 bis 1. In der Literatur sind für verschiedene Papiere der Emissionsgrad angegeben, jedoch nicht für feuchte Papiere. Papiere bei Gleichgewichtsfeuchte besitzen meist einen Emissionsgrad zwischen 0,6 bis 0,9. Wasser hingegen hat einen Emissionsgrad von 0,95 bis 0,98 (Anhang Abbildung 66).

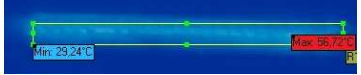
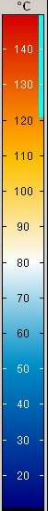
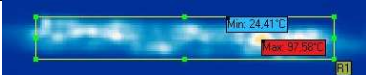
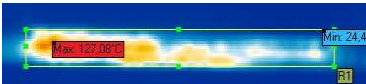
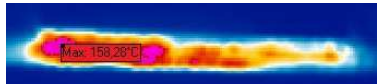
Wie aus Tabelle 9 ersichtlich ist, wird bei der Beschallung des Bierdeckels für eine Sekunde eine maximale Temperatur von 60°C bzw. 70°C, abhängig vom gewählten Emissionsgrad, erreicht. Die Erwärmung dieser Probe liegt demnach weit unterhalb der Verdampfungstemperatur des Wassers, so dass in diesem Versuch eine vorrangig mechanisch induzierte Entfernung des Wassers gegeben sein sollte.

Bei der Probe Löschpapier, die eine wesentlich geringere Dicke gegenüber dem Bierdeckel aufweist, werden hingegen Temperaturen im Bereich von 100°C bis 120°C, abhängig vom Emissionsgrad, erreicht. Die Entfernung des Wassers ist hier demnach zu einem gewissen Teil thermisch induziert. Gemäß dem Regressionsmodell ist bei den oben aufgeführten Parametern und einer theoretisch berechenbaren Geschwindigkeit von 10 mm/s eine Steigerung des Trockengehaltes im Papier von 40 % in der unbehandelten Probe auf 58 % in der beschallten Probe zu erzielen, wobei eine spezifische Energie (Netto) von 5000 Ws/g entferntes Wasser aufzuwenden sind.

Eine Verdopplung der Beschalldauer auf 2 Sekunden, was einer Erniedrigung der theoretisch berechenbaren Geschwindigkeit auf 5 mm/s entspricht, resultiert in einer maximalen Temperatur von ca. 127°C ($\epsilon = 1$) in der Papierprobe.

Bei einer Verringerung der Beschalldauer auf weniger als 0,5 Sekunden respektive eine Erhöhung der theoretisch berechenbaren Geschwindigkeit auf größer 20 mm/s (größer 1 m/min) sollten daher auch Betriebspunkte möglich sein, bei denen eine maximale Temperatur in der Papierprobe deutlich unter 100°C erzielt wird. Somit würde bei diesen Betriebspunkten eine vorwiegend mechanisch induzierte Entfernung des Wassers durch den Ultraschall vorliegen.

Tabelle 9 Thermografieaufnahmen von beschallten Papieren

Emissionsgrad	$\epsilon = 1$	$\epsilon = 0,7$	Temp.-Skala
Bierdeckel 600 g/m ² 1 Sekunde	 Max.: 57°C	 Max.: 70°C	
Löschpapier, 80 g/m ² 1 Sekunde	 Max.: 98°C	 Max.: 121°C	
Löschpapier, 80 g/m ² 2 Sekunden	 Max.: 127°C	 Max.: 158°C	

Fazit

Der Ultraschall führt zu einer Erhöhung der Temperatur sowohl im Papier als auch in der Bespannung.

Bei sehr geringen Geschwindigkeiten der Papierbahn (< 1 m/min) wird bei der Beschallung von Papier mit einem hohen Flächengewicht (600 g/m^2) eine Temperatur im Papier deutlich unter 100°C erzielt. Die Entfernung des Wassers in diesem Papier ist demnach vorwiegend mechanisch induziert.

Bei einer Geschwindigkeit < 1 m/min und einem Papier mit einem Flächengewicht von 80 g/m^2 erwärmt sich das Papier durch die Beschallung auf 100°C , so dass die Entfernung des Wassers zu einem gewissen Teil auch thermisch induziert ist.

Das Ergebnis wird dabei zu einem durch den Versuchsaufbau beeinträchtigt, da die Messstelle (der Rand der Bespannung bzw. des Papiers) 5 mm von der Wirkstelle der Ultraschallsonotrode entfernt liegt. Bei weiteren Untersuchungen sollte daher die Nutzung einer Ultraschallsonotrode mit flächiger Stirnfläche in Erwägung gezogen werden.

Außerdem war die zeitliche Auflösung dieser Untersuchungen mit einer Mindestbeschalldauer von einer Sekunde zu lang, so dass nur sehr geringe Geschwindigkeiten (< 1 m/min) abgebildet werden konnten. In weiterführenden Untersuchungen sollten daher vorzugsweise Messgeräte genutzt werden, die zeitlich hochauflösende thermografische Videoaufnahmen ermöglichen, um im Bereich kleiner einer Sekunde den Temperaturanstieg wiedergeben zu können.

6.8 Untersuchungen zur Abschätzung weiterer Einflussfaktoren (Schritt 2 des Arbeitsplanes)

Applikationsform (Variation Probentisch)

Die Form der Applikation des Ultraschalls beeinflusst wesentlich die Ultraschall unterstützte Entwässerung. Bei der Versuchsanordnung „Tisch A“ ist der Ultraschallsonotrode ein Amboss gegenübergestellt. Bei der Versuchsanordnung „Tisch B“ wird die Ultraschallsonotrode auf das frei gelagerte Trägermaterial angedrückt (siehe Abbildung 4 und Abbildung 5 in Kapitel 4.1.)

Mit der Versuchsanordnung „Tisch A“ kann ein sehr viel größerer Gewinn an Trockengehalt im Papier realisiert werden, als dies bei der Versuchsanordnung „Tisch B“ der Falls ist (Abbildung 37). Der Einfluss der Geschwindigkeit ist bei „Tisch A“ deutlich stärker ausgeprägt als bei „Tisch B“. Bei einer Geschwindigkeit von 3 m/min ist der Gewinn an Trockengehalt bei „Tisch B“ ca. 4 %.

Allerdings ist der spezifische Energiebedarf bei „Tisch A“ deutlich höher als bei „Tisch B“ (Abbildung 38).

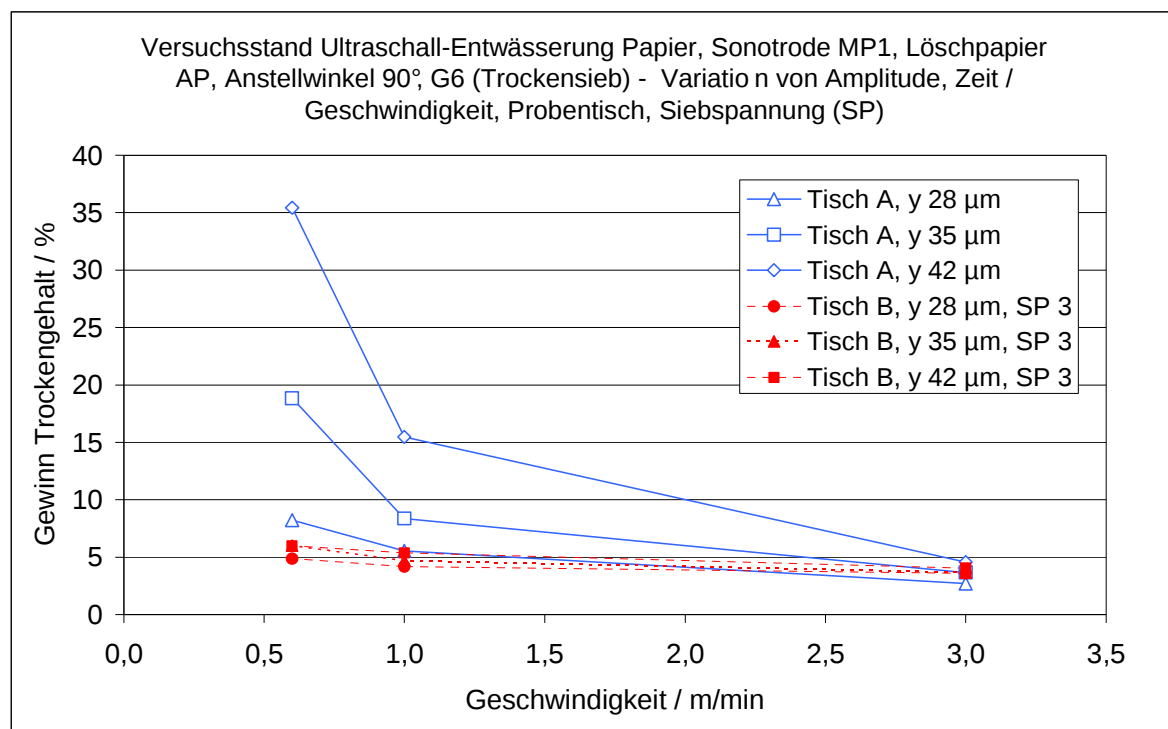


Abbildung 37 Entwicklung des Gewinns an Trockengehalt im Papier durch Ultraschallbehandlung in Abhängigkeit des Probentisches, Geschwindigkeit und der Amplitude

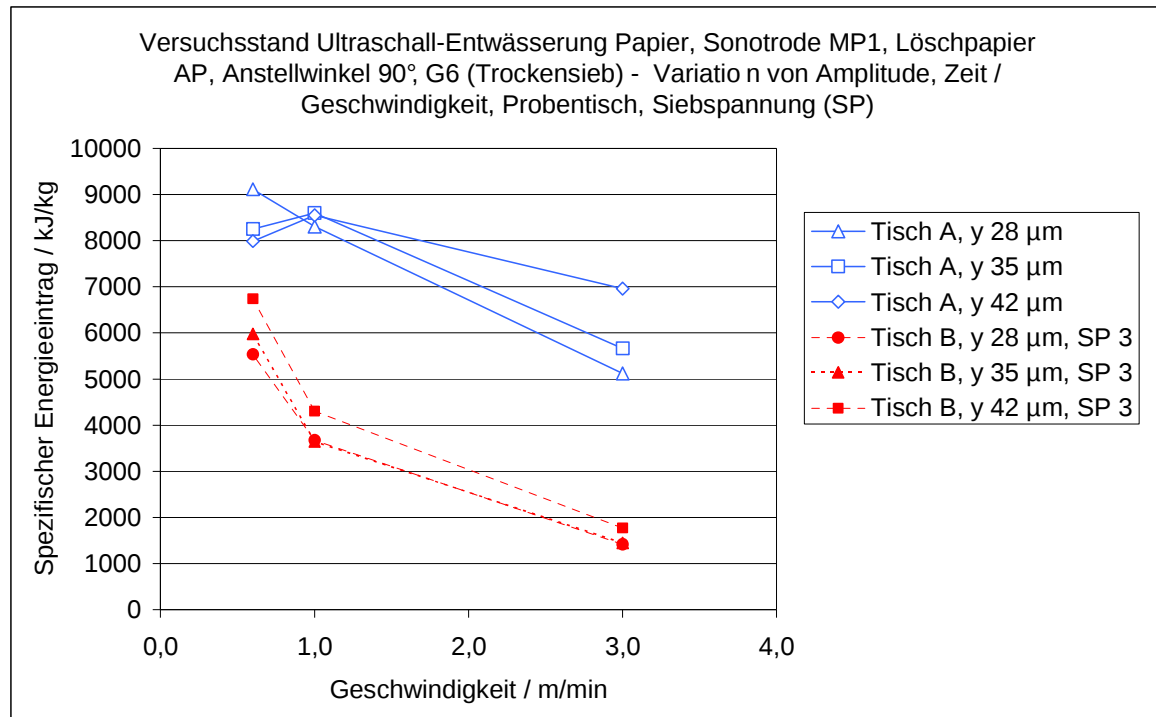


Abbildung 38 Entwicklung des spezifischen Energieeintrages, Netto (bezogen auf Masse entferntes Wasser) durch Ultraschallbehandlung in Abhängigkeit des Probestisches, Geschwindigkeit und der Amplitude

Bewertung des Energiebedarfs

In Abbildung 39 ist der Energiebedarf für den „Tisch B“ aufgeführt und dem physikalisch notwendigen Energiebedarf gegenüber gestellt. Der physikalisch notwendige Energiebedarf ergibt sich aus einem Anteil, der zur Erwärmung des Wassers bzw. der Fasern notwendig ist und aus einem Anteil, der für den Wechsel des Aggregatzustandes des Wassers, also das Verdampfen notwendig ist. Da das Papiervlies eine Mischung aus 40 % Fasern und 60 % Wasser ist, wird für den Anteil der Erwärmung mit ca. 260 kJ/kg abgeschätzt. Damit ergibt sich ein physikalisch notwendiger Energiebedarf zur thermischen Entfernung von Wasser von ca. 2500 kJ/kg.

Wie aus Abbildung 39 ersichtlich wird, ist insbesondere bei höheren Geschwindigkeiten bei der Ultraschall unterstützten Entwässerung ein Energiebedarf aufzuwenden, der kleiner als die für das Verdampfen notwendigen Energiemenge ist. Zu beachten ist hierbei allerdings, dass bei Ultraschall unterstützten Entwässerung auch immer ein gewisser Teil des Wassers auch ohne das Schwingen der Ultraschallsonotrode entfernt wird. Zieht man diesen Anteil an „statisch“ entfernten Wassers ab, so ergibt sich für die in Abbildung 39 dargestellten Versuchspunkte bei einer Geschwindigkeit von 3 m/min ein spezifischer Energiebedarf von ca. 4000 kJ/kg.

Eine Erhöhung der Geschwindigkeit lässt erwarten, dass der spezifische Energiebedarf noch weiter gesenkt werden kann.

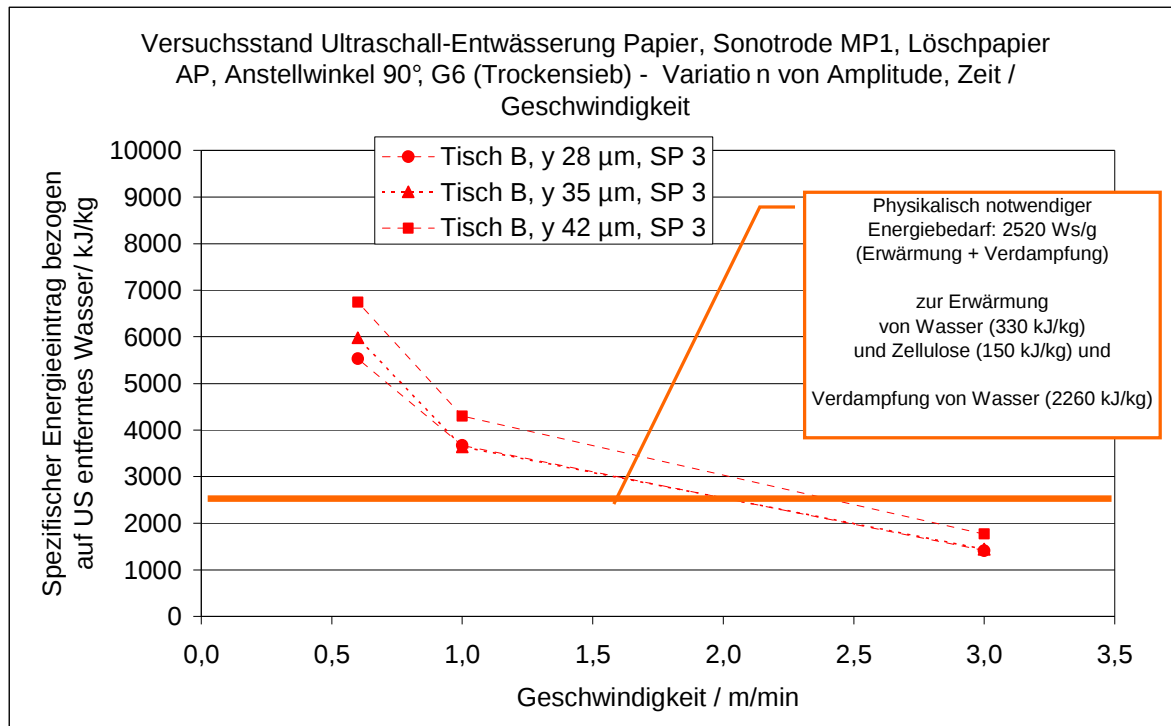


Abbildung 39 Entwicklung des spezifischen Energieeintrages, Netto (bezogen auf Masse entferntes Wasser) durch Ultraschallbehandlung bei Probestisch B in Abhängigkeit der Geschwindigkeit und der Amplitude

Einfluss des Spannungsmaterials / des Gewebes

Die Wahl des Spannungsmaterials und damit die Ankopplung des Ultraschalls an das feuchte Papiervlies haben einen Einfluss auf das Behandlungsergebnis. Die zwei nachfolgenden Abbildungen sind auf Grundlage von Modellrechnungen erstellt wurden. Der zur Erfassung der Rohdaten angewandte vollständig faktorielle Versuchsplan hatte die Form k_p ($k = 3$; $p = 2$). Auf Grundlage der Ergebnisse des Hauptversuches wurde der Anpressdruck bei 1,8 N/mm (4,1 bar) konstant gehalten.

Als Kenngröße der Wasserentfernung ist in den nachfolgenden Diagrammen nicht der Trockengehalt angegeben sondern die Massendifferenz der Papierprobe. Aus Abbildung 40 ist ersichtlich, dass nicht nur bei dem Bronzesieb (G8) sondern auch bei dem Kunststoffsieb (G6) die Amplitude die entfernbare Masse Wasser deutlich beeinflusst, wobei bei höheren Amplituden mit dem Bronzesieb deutlich mehr Wasser entfernt werden kann als mit dem Kunststoffsieb. Der spezifische Energiebedarf steigt beim Kunststoffsieb annähernd linear an mit steigender Amplitude. Das Bronzesieb hingegen hat bei einer Amplitude von 33 µm ein Maximum, so dass bei einer Amplitude größer 33 µm der spezifische Energieeintrag wieder sinkt.

Als Referenzwert wurde in Abbildung 40 ein spezifischer Energieeintrag von 5.500 Ws/g H₂O rot markiert, was einem durchschnittlichen Energiebedarf in einer Trockenpartie entspricht [8]. Dabei wird deutlich, dass nur das Kunststoffsieb bei Betrieb mit einer Amplitude kleiner 34 µm weniger Energie benötigt gegenüber dem Referenzwert.

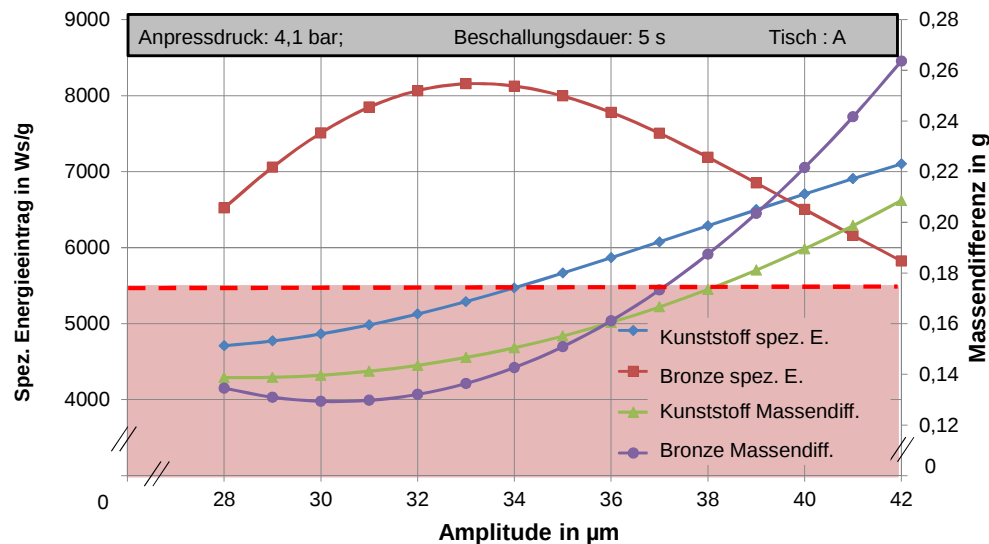


Abbildung 40 Einfluss des Bespannungsmaterials in Abhängigkeit der Amplitude auf die Entwässerung des feuchten Papiervlieses und dem dabei aufgewandten Energieeintrag

Unterschiedliche Materialien in oberer und unterer Bespannung/Gewebe

In ausgewählten Versuchen wurde auch die Kombination von verschiedenen Materialien der oberen und unteren Bespannung untersucht. Aus Abbildung 41 und Abbildung 42 geht hervor, dass die Kombination von unterschiedlichen Materialien zu deutlich anderen Ergebnissen führt als bei der Anwendung nur eines Materials in der oberen und unteren Bespannung.

Als Optimum kann hierbei die Nutzung des Metallsiebes als obere Bespannung, also zwischen Sonotrode und Papier, und der Einsatz eines Kunststoffsiebes als untere Bespannung angesehen werden. Diese Kombination resultiert in einer höheren Wasserentfernung als der ausschließliche Einsatz eines Metall- oder Kunststoffsiebs als Bespannung. Gleichzeitig erforderte diese Kombination (Metall oben, Kunststoff unten) im Vergleich mit anderen Varianten den geringsten Energieeintrag. Auch bei der Kombination von verschiedenen Bespannungsmaterialien resultiert eine höhere Amplitude in einer höheren Trockengehaltssteigerung.

Dass die Kombination (Metall oben, Kunststoff unten) Vorteile hinsichtlich der Wasserentfernung und des spezifischen Energieeintrages bietet, kann wie folgt begründet werden: Die Ankopplung des Ultraschalls an das feuchte Papiervlies gelingt mit einem metallischen Werkstoff besser als mit einem Kunststoff, da hier die Reflexion aufgrund der ähnlichen Schallkennimpedanzen von Sonotrode (Titan) und Bespannung (Bronze) geringer ist, während sich die Schallkennimpedanz von Kunststoff und der Sonotrode stark unterscheiden. Der Einsatz des Kunststoffes als untere Bespannung führt dazu, dass die Reflexion zwischen dem metallischen Tisch des Versuchstandes und der Bespannung hoch ist und damit ein größerer Anteil des Schalls ins feuchte Papier zurückgeführt wird.

Die Verhältnisse bei der Anwendung des Ultraschalleintrages entsprechend dem Prinzip des Tisches B, bei dem eine Seite der unteren Bespannung an Luft angrenzt, unterscheiden sich allerdings zu denen der mit Tisch A durchgeführten Untersuchungen.

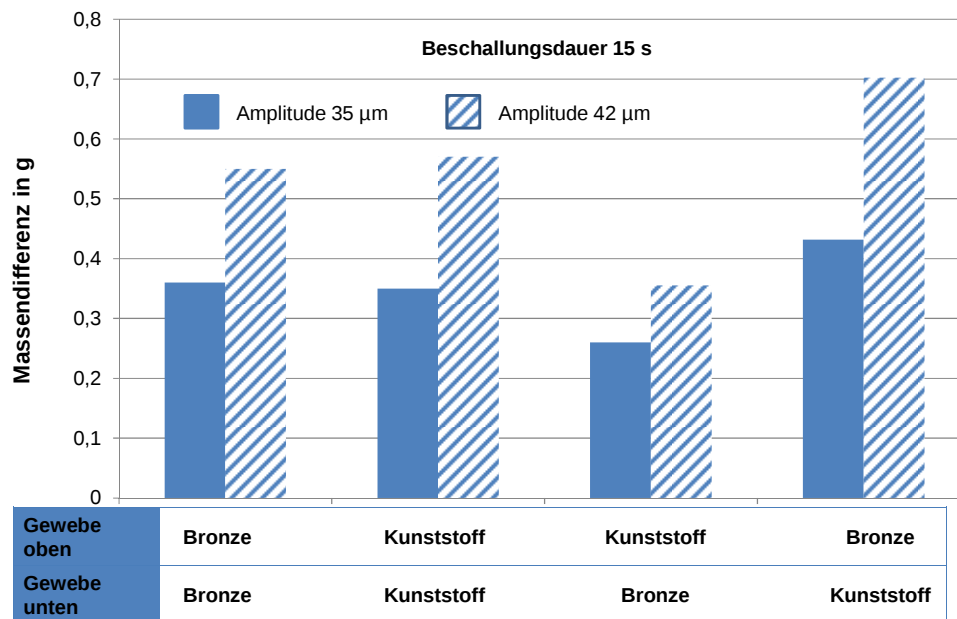


Abbildung 41 Einfluss der Gewebekombination auf Massendifferenz, Tisch A

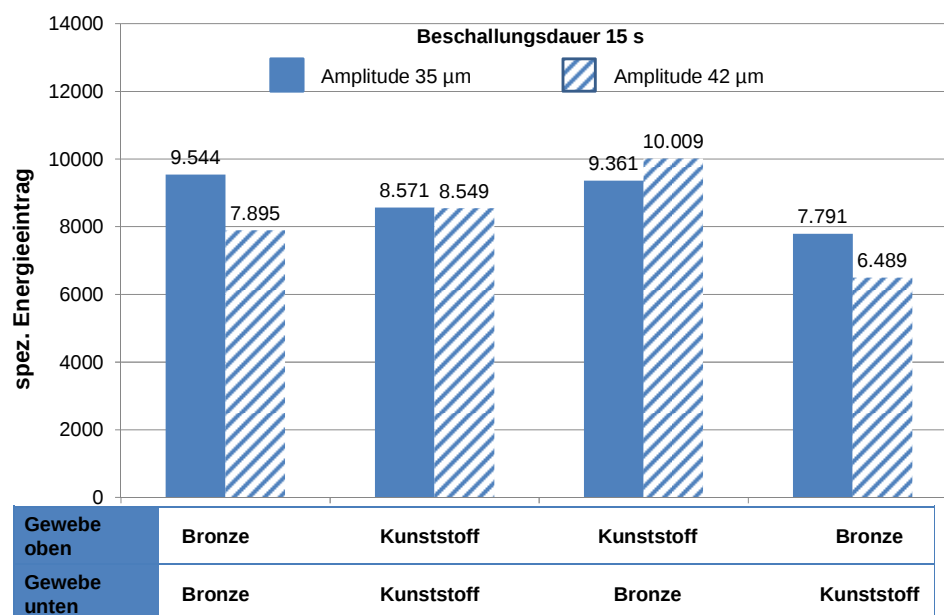


Abbildung 42 Einfluss der Gewebekombination auf spezifischen Energieeintrag, Tisch A

6.9 Untersuchungen mit einem Prototypen zur Ultraschall unterstützten Entwässerung (Schritt 3 des Arbeitsplanes)

Applikationsstelle

Die praktischen Untersuchungen zur Ultraschall unterstützten Entwässerung erfolgten in Zusammenarbeit mit der Gebr. Bellmer GmbH. Die für die Untersuchungen gewählte Papiermaschine produzierte Wellenstoff aus 100 % Altpapier. Die Blattbildung erfolgte auf einem Langsieb bei einer Geschwindigkeit von ca. 360 m/min. Die Pressenpartie ist zweistufig, wobei die zweite Stufe als Schuhpresse gestaltet ist.

In einer ersten Begehung wurden vier Applikationsstellen in der Pressenpartie sowie der Trockenpartie der Papiermaschine bestimmt, an denen Untersuchungen zur Ultraschall unterstützten Entwässerung erfolgen sollten:

- 0,5 m vor der ersten Presse, (Trockengehalt ca. 20 %),
- 0,5 m nach der ersten Presse, (Trockengehalt ca. 35 %),
- 0,5 m vor der zweiten Presse, (Trockengehalt ca. 35 %),
- 0,5 m nach dem erstem Trockenzylinder, (Trockengehalt ca. 51 %),

Für die Bewertung des Trockengehaltes der Papierbahn war eine Messung in-situ am Ende der Pressenpartie bzw. am Beginn der Trockenpartie notwendig. Dazu wurden für zwei Sensoren der Fa TEWS (SPP-160-011, MW 3400) untersucht, inwieweit eine Messung im Bereich des Trockengehaltes im Bereich zwischen 20 % bis 60 % möglich ist. Dabei erwies sich der Sensor SPP-160-011 als hinreichend geeignet.

Ein Versuch mit dem Ultraschall-Prototypen zur Ultraschall unterstützten Entwässerung konnte während der Projektlaufzeit nicht realisiert werden. Abweichend davon wurden aber Untersuchungen mit dem Ultraschall-Prototypen im Bereich der Siebpartie durchgeführt.

Beeinflussung der Wasserlinie in der Siebpartie durch Ultraschall

Gerät / Einbau in Siebpartie

Ultraschall-Generator:

- UIP1000, 1 kW (1 Stück), Fa. Hielscher Ultrasonics GmbH

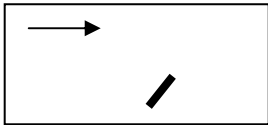
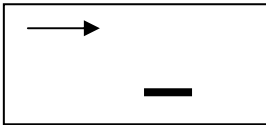
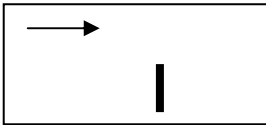
Ultraschall-Schwinger:

- Ultraschall-Wandler (1 kW) mit ca. 25 μm Schwingweite (pk to pk) am Horn,
- Booster-Horn B2-1.8 (Übersetzung 1,8),
- Sonotrode (Übersetzung 5,0)
 - Sonotrodenspitze ca. 15 x 100 mm mit 2 ca. 2 mm breiten Querstreifen,
 - Schwingweite an Sonotrodenspitze ca. 225 μm (pk to pk) bei 100% Poti
ca. 132 μm (pk to pk) bei 50% Poti

Einbau:

- Drei Ausrichtungen der Sonotrode (Tabelle 10)
- Abstand zu Siebseite ca. 200 mm

Tabelle 10 Einbau der Schweißsonotrode in Siebpartie, Fotografien zeigen Sonotrode während diese an das Sieb geführt ist, aber kein Ultraschall eingeschaltet ist

Ausrichtung	A	B	C
Draufsicht			

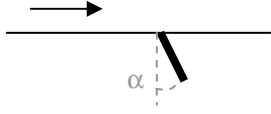
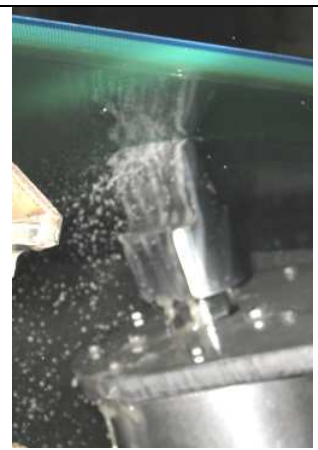
Ausrichtung	A	B	C
Seiten-ansicht			
Fotografie			



Abbildung 43 Halterung für den Ultraschallwandler mit Sonotrode in Siebpartie

Versuche

Bei den Versuchen mit der Schweißsonotrode zur Übertragung von Ultraschall in die Faserstoffsuspension der Siebpartie wurde die Leistung des Ultraschalls (Potentiometer 50 oder 100%), die Ausrichtung der Sonotrode zum Sieb (Tabelle 10) sowie der Anpressdruck der Schweißsonotrode variiert.

Die Produktionsgeschwindigkeit am Tambour betrug ca. 360 m/min. Produziert wurde Fluting mit einem Flächengewicht lutro von ca. 112 g/m² und einer Dicke von ca. 180 µm.

Tabelle 11 Ultraschallversuche mit Plattenschwinger in Siebpartie

Versuchsnummer	Position	Anpressung an Sieb	Potentio-meter in %	Leistung in W
8a	A	normal	50	n.b.
8b	A	hoch	100	n.b.
9	B	normal	100	350
10	C ($\alpha \approx 10^\circ$)	normal	100	550
11	C ($\alpha \approx 10^\circ$)	gering	100	270

Ergebnisse

Bei Versuch 10 (Einbauposition C) konnte beobachtet werden, dass sich die Wasserlinie hinter der Sonotrode bei eingeschaltetem Ultraschall um ca. 50 cm in Richtung Stoffauflauf verschob. Dies deutet auf eine erhöhte Entwässerung in der Siebpartie infolge der Ultraschalleinwirkung hin.

Die Leistungsaufnahme des Ultraschallgenerators hängt von der Ausrichtung der Sonotrode relativ zum Sieb und der Kraft, mit der die Sonotrode an das Sieb gepresst wird, ab.

6.10 Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen (Schritt 4 des Arbeitsplanes)

Abschätzung der Investitionskosten der Ultraschall unterstützten Entwässerung

Wie die Untersuchungen gezeigt haben, kann die Applikation des Ultraschalls in die feuchte Papierbahn über konventionelle Besspannungen erfolgen. Die Papierbahn muss dabei zwischen zwei Besspannungen fixiert werden. Im Folgenden soll daher ein Ausführungsbeispiel erörtert werden, bei dem die Papierbahn auf der einen Seite von der in der Papiermaschine vorhandenen Besspannung gestützt wird. Dies könnte beispielsweise am Ende der Pressenpartie oder am Anfang der Trockenpartie sein. Zwischen der Ultraschallsonotrode und der Papierbahn würde eine zusätzliche Besspannung notwendig sein, die - synchron zur Papierbahn - um Ultraschallsonotrode und -wandler bewegt wird. Eine zusätzliche Absaugung des ausgetragenen Wassernebels wird in diesem Beispiel nicht betrachtet. Ebenfalls wird der Ultraschall in diesem Beispiel nur an einer Stelle appliziert.

Bei einer industriellen Umsetzung wären daher folgende Komponenten erforderlich:

- *Ultraschallsonotrode,*
- *Ultraschallwandler und Ultraschallgenerator,*
- *Besspannung um Ultraschallsonotrode und -wandler inkl. Lagerung und Antrieb,*
- *Lagerung des Ultraschallwandlers an der Papierbahn*
- *EMSR*

Die Ultraschallsonotroden sind derzeit bis zu einer Breite von 400 mm verfügbar, wobei der Preis für eine derartige Ultraschallsonotrode mit durchschnittlich 3.500 EUR pro Stück abgeschätzt werden kann. In den im Projekt getätigten Untersuchungen wurde eine Leistung des Ultraschallsystems von 100 W bis 350 W Netto benötigt. Die Leerlaufleistung wurde für das in diesen Untersuchungen verwendete Ultraschallsystem (UIP1000, Booster B2-1.8, B2-1.2 und Sonotrode MP-1) bei voller Amplitude mit 105 W bestimmt, wobei allein der Betrieb des Ultraschallgenerators (ohne angeschlossenen Wandler, Booster und Sonotrode) bereits 80 W benötigt. Für eine Sonotrode mit 400 mm Arbeitsbreite kann daher die Leerlaufleistung eines Ultraschallsystems mit maximal 150 W abgeschätzt werden. Für den Betrieb einer Ultraschallsonotrode mit 400 mm Arbeitsbreite wären demnach ein Ultraschallgenerator und -wandler mit 500 W installierter Leistung ausreichend. Je Meter Bahnbreite wären 1.250 W installierte Leistung Ultraschall erforderlich. Der Preis je 1.000 W installierte Leistung Ultraschall kann mit 8.000 EUR abgeschätzt werden.

In Tabelle 12 sind für verschiedene Arbeitsbreiten einer Papiermaschine die theoretisch erforderlichen Investitionskosten abgeschätzt. Bei einer Papiermaschine mit einer Arbeitsbreite von 5 Metern ergeben sich somit ca. 200 T EUR Investitionskosten, wovon allein ca. 100 T EUR für das Ultraschallsystem aufzuwenden sind.

Nicht enthalten in dieser Berechnung sind die Lagerung (Walzen) und der Antrieb für die zusätzlich erforderliche Besspannung.

Tabelle 12 Kostenübersicht für Ultraschall unterstützte Entwässerung in einer Papiermaschine

Arbeitsbreite	m	3	5	10
Breite der Sonotrode	m	0,4		
Installierte Leistung je Sonotrode	W	500		
Kosten für Ultraschallgenerator + Wandler	EUR / 500W	4.000		
Kosten für Ultraschallsonotrode	EUR / Stück	3.500		
Installierte Leistung	W	3.750	6.250	12.500
Anzahl Ultraschallgenerator + Wandler	W	8	13	25
Kosten für Ultraschallgenerator + Wandler	EUR	32.000	52.000	100.000
Kosten für Ultraschallsonotrode	EUR	26.250	43.750	87.500
Zwischensumme	EUR	58.250	95.750	187.500
Kosten Bspannung (theoretisch angen.)	EUR / m ²	200		
Kosten Bspannung bei 10 m Lauflänge	EUR	6.000	10.000	20.000
Lagerung der Ultraschallwandler, (geschätzt)	EUR	45.000	50.000	55.000
Zwischensumme	EUR	51.000	60.000	75.000
EMSR 20 %	EUR	21.850	31.150	52.500
Kapitaldienst 7%	EUR	9.177	13.083	22.050
SUMME	EUR	140.277	199.983	337.050

Bewertung von Entwässerungs- und Trocknungsprozessen anhand der Energieform

Bei der Entwässerung und Trocknung von Papier werden verschiedene Energieformen genutzt, die unterschiedlich spezifische Erzeugungskosten aufweisen. Die Trocknung in der Trockenpartie erfolgt über dampfbeheizte Stahlzylinder. Für die Entwässerung mit Ultraschall hingegen muss elektrische Energie bereitgestellt werden.

Der Preis für die Dampferzeugung kann mit ca. 2 EUR-Cent / kWh abgeschätzt werden. Der Elektroenergiepreis betrug in den Jahren 2006 bis 2010 durchschnittlich 8,8 EUR-Cent / kWh [9]. Bei Großverbrauchern wie dies üblicherweise für Papierfabriken gilt, sind die Kosten in der Regel etwas geringer.

In der Trockenpartie einer Papiermaschine wird für die Trocknung des Papiers in Abhängigkeit des Optimierungsgrades der Papiermaschine eine spezifische Energie (Dampfenergie) von ca. 2.850 bis 5.000 kJ / kg entferntes Wasser benötigt [1, 2].

Die spezifische Energie von 2.850 kJ/kg entferntes Wasser wird in stark optimierten Trockenpartien benötigt. In einer solchen Fabrik können die spezifischen Kosten für die Dampfenergie mit 15,8 EUR/t entferntes Wasser abgeschätzt werden.

In Fabriken, in denen beispielsweise die Luftherhitzung, die Trockenhaube oder die Kondensation des Entspannungsdampfes nicht optimiert sind, können bis zu 5.000 kJ/kg entferntes Wasser notwendig sein. Die spezifischen Kosten für Dampf in der Trockenpartie können in einer solchen Fabrik mit 27,8 EUR /t entferntes Wasser abgeschätzt werden.

Aus Abbildung 44 ist ersichtlich, dass der höhere Energiepreis für Elektroenergie (Strom), der bei der Ultraschall unterstützten Entwässerung aufzuwenden ist, sich deutlich auf die spezifischen Energiekosten auswirkt. So sind bei einem spezifischen Energiebedarf von 3.000 GJ/t entferntes Wasser für die Dampfenergie spezifischen Kosten von ca. 18 EUR/t entferntes Wasser aufzuwenden. Für die gleiche Energie-

menge wären bei der Ultraschall unterstützten Entwässerung 41,7 EUR/t entferntes Wasser aufzuwenden, bei einem Strompreis von 5 EUR-Cent/kWh. (hellblauer Pfeil)

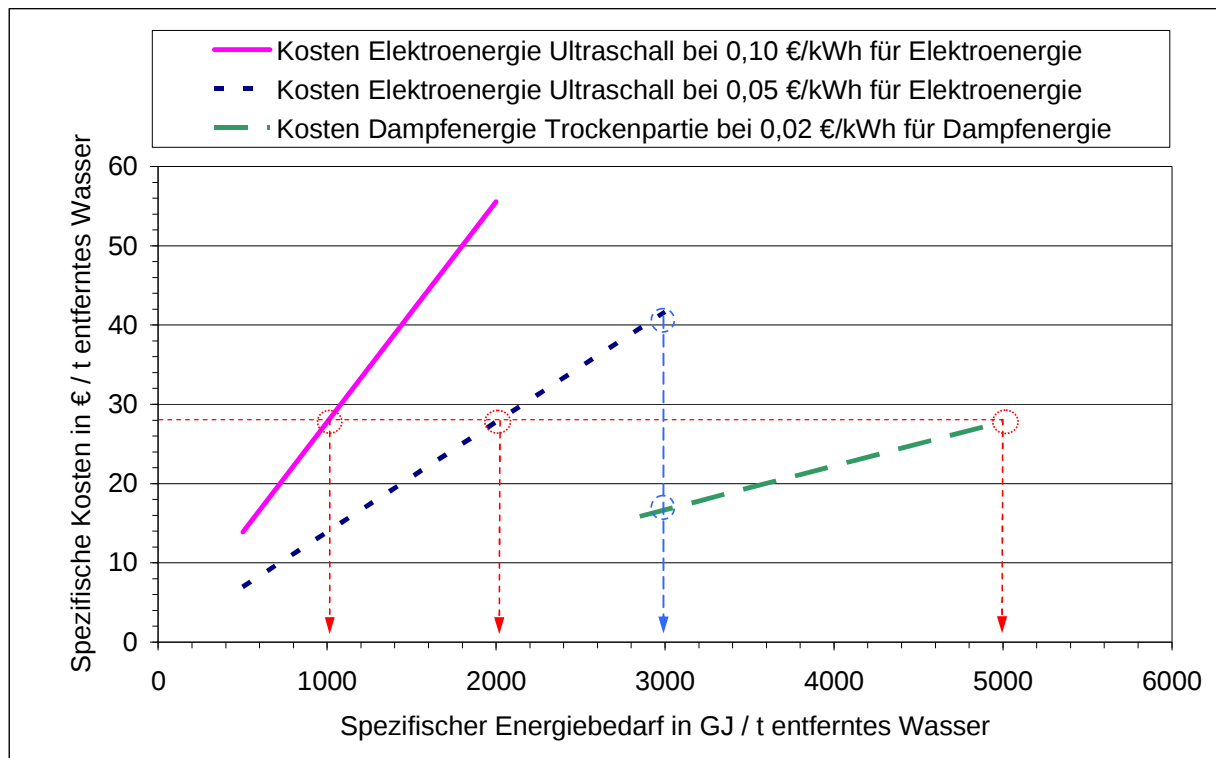


Abbildung 44 Vergleich der thermischen Trocknung mit der Ultraschall unterstützten Trocknung anhand der spezifischen Energiekosten

Würde in einer Papierfabrik mit nicht optimierter Trockenpartie (Spezifischer Dampfenergiebedarf 5.000 GJ / t entferntes Wasser) bei einem Strompreis von 5 bis 10 EUR-Cent / kWh die Ultraschall unterstützte Entwässerung eingesetzt werden, so müsste der Energiebedarf des Ultraschalls geringer als 2.000 bzw. 1.000 GJ / t entferntes Wasser sein, um einen ökonomischen Vorteil gegenüber der Trockenpartie zu erzielen (rote Pfeile).

Dabei bleibt folgendes anzumerken. Der in den Untersuchungen ermittelte spezifische Energiebedarf ist in einer Laboranlage bestimmt wurden, die ursprünglich nicht zu diesem Zwecks konstruiert wurde. Auch die verwendete Ultraschallsonotrode (MP-1) ist nicht für die Entwässerung von Papiervliesen ausgelegt. Es wird daher davon ausgegangen, dass noch ein großes Potenzial zur Senkung des spezifischen Energiebedarfs bei der Ultraschall unterstützten Entwässerung gegenüber den Laboruntersuchungen gegeben ist.

Als zusätzlicher Nutzen der Ultraschall unterstützten Entwässerung kann die Erwärmung des Wassers angesehen werden, so dass die dafür notwendige Energiemenge nicht mehr in der Trockenpartie aufgewendet werden muss.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Die Bewertung der Fragestellung, inwieweit mit Ultraschall ein feuchtes Papiervlies getrocknet werden kann, erfolgte in einem Versuchsstand mit einer linienförmigen Ultraschallsonotrode, an der ein Papierstreifen definiert vorbei geführt wird.

Als wesentliche Kenngrößen wurde die entfernbare Menge Wasser sowie der dazu aufzuwendende Energieaufwand des Ultraschallsystems ermittelt. Daneben wurden die Veränderungen am Papier und an den Trägermaterialien bewertet.

Die Entfernung von Wasser aus einem feuchten Papiervlies durch ein direktes Einleiten von Ultraschall (20 kHz) an dieses Papiervlies ist möglich. Um einen Schutz des feuchten Papiervlieses beim Vorbeiführen an der starren Ultraschallsonotrode zu gewährleisten, wurde ein Trägermaterial (Bespannung / Gewebe) zwischen der Ultraschallsonotrode und dem Papiervlies benutzt. Um einen ausreichenden Anpressdruck des Papiervlieses an die Ultraschallsonotrode zu gewährleisten, wurde ein weiteres Trägermaterial (Bespannung / Gewebe) auf der der Ultraschallsonotrode abgewandten Seite eingesetzt.

Die Wahl des Trägermaterials (Material, Strukturaufbau) hat einen entscheidenden Einfluss auf das Ergebnis. Bei der Applikationsform mit Amboss kann durch die Wahl eines metallischen Trägermaterials auf der der Ultraschallsonotrode zugewandten Seite und einem Material aus Kunststoff auf der der Ultraschallsonotrode abgewandten Seite der Gewinn an Trockengehalt verbessert werden und gleichzeitig der spezifische Energiebedarf verringert werden.

Eine höhere Amplitude der Ultraschallsonotrode führt zu einer höheren Austrag von Wasser aus dem Papiervlies. Eine höhere Geschwindigkeit, mit der das Papier an der Sonotrode vorbei geführt wird, senkt zwar den spezifischen Energiebedarf aber auch die Entwässerungsleistung.

Der Anpressdruck, mit der das feuchte Papiervlies an die Sonotrode gepresst wird, hat einen untergeordneten Einfluss auf die Entfernung von Wasser, sollte aber eine Linienlast von 1 N/mm nicht unterschreiten, da sonst keine ausreichende Ankopplung des Ultraschalls an das feuchte Papiervlies möglich ist.

Die entfernbare Wassermenge ist für einen Anstellwinkel der Ultraschallsonotrode an das Papier von 90° größer als für einen Winkel von 45°.

Ist an der Wirkstelle der Ultraschallsonotrode kein Körper (Amboss) angeordnet, so ist der spezifische Energiebedarf geringer als in Anwesenheit eines Ambosses.

In den Untersuchungen konnten Betriebspunkte identifiziert werden, die eine Steigerung des Trockengehaltes von mehr als 3 % und gleichzeitig einen spezifischen Energiebedarf aufwiesen, der geringer als der spezifische Energiebedarf von wenig optimierten Trockenpartien ist (ca. 5.500 kJ/kg entferntes Wasser). Aus den bisherigen Untersuchungen kann noch nicht abschließend geklärt werden, ob eine Entfernung von Wasser aus einem Papiervlies mit Ultraschall wirtschaftlich möglich ist. Insbesondere die Bewertung, ob die Ultraschall unterstützte Entwässerung bei Geschwindigkeiten deutlich über 7 m/min funktioniert, steht noch aus. Die Untersuchungen zeigen jedoch, dass durch weitere Optimierungen im Versuchsaufbau, beispielsweise durch den Einsatz ausgewählter Trägermaterialien, durchaus die Appli-

kation von Ultraschall zur Entfernung von Wasser aus einer feuchten Papierbahn wirtschaftlich möglich werden könnte.

Anhang

Hauptuntersuchungen

Tabelle 13 Messwerte Hauptuntersuchungen mit Metallsieb mit Ultraschallschwingung (Teil 1)

Versuchsnr.	Vorgaben						Messwerte			Berechnungen					
	Amplitude	Amplitude (0-pk)	Zeit	Geschw.	Andruck	Linienlast	Energie	Streifen trocken	Streifen behandelt	m-Differenz	Spez. Energieeintrag	Leistung	MW TG Gewinn	SD TG Gewinn	VK TG Gewinn
	%	µm	Sek.	m/min	bar	N/mm	Ws	g	g	g	Ws/g	W	%	%	%
1	94	42	5,0	3,0	4,6	2,6	1484	0,92	1,83	0,25	5936	297	6	1	9
	94	42	5,0	3,0	4,6	2,6	1436	0,91	1,81	0,27	5319	287			
	94	42	5,0	3,0	4,6	2,6	1408	0,89	1,82	0,26	5415	282			
	94	42	5,0	3,0	4,6	2,6	1421	0,92	1,86	0,22	6459	284			
	94	42	5,0	3,0	4,6	2,6	1485	0,91	1,83	0,25	5940	297			
2	94	42	5,0	3,0	4,6	2,6	1466	0,91	1,80	0,28	5236	293	3	1	20
	50	26	5,0	3,0	4,6	2,6	742	0,90	1,92	0,16	4638	148			
	50	26	5,0	3,0	4,6	2,6	747	0,91	1,88	0,2	3735	149			
	50	26	5,0	3,0	4,6	2,6	750	0,92	1,97	0,11	6818	150			
	50	26	5,0	3,0	4,6	2,6	739	0,90	1,91	0,17	4347	148			
3	94	42	5,0	3,0	4,6	2,6	746	0,90	1,93	0,15	4973	149	32	2	6
	50	26	5,0	3,0	4,6	2,6	752	0,90	1,92	0,16	4700	150			
	94	42	25,0	0,6	4,6	2,6	7868	0,91	1,14	0,94	8370	315			
	94	42	25,0	0,6	4,6	2,6	7985	0,91	1,13	0,95	8405	319			
	94	42	25,0	0,6	4,6	2,6	7603	0,91	1,18	0,9	8448	304			
4	94	42	25,0	0,6	4,6	2,6	7668	0,91	1,21	0,87	8814	307	10	0	2
	94	42	25,0	0,6	4,6	2,6	7981	0,91	1,19	0,89	8967	319			
	94	42	25,0	0,6	4,6	2,6	7961	0,91	1,16	0,92	8653	318			
	50	26	25,0	0,6	4,6	2,6	3828	0,89	1,68	0,4	9570	153			
	50	26	25,0	0,6	4,6	2,6	3869	0,91	1,68	0,4	9673	155			
5	94	42	25,0	0,6	4,6	2,6	3830	0,90	1,67	0,41	9341	153	5	0	9
	50	26	25,0	0,6	4,6	2,6	3848	0,91	1,68	0,4	9620	154			
	50	26	25,0	0,6	4,6	2,6	3764	0,92	1,67	0,41	9180	151			
	50	26	25,0	0,6	4,6	2,6	3798	0,92	1,69	0,39	9738	152			
	94	42	5,0	3,0	3,6	1,1	1257	0,92	1,87	0,21	5986	251			
6	94	42	5,0	3,0	3,6	1,1	1284	0,92	1,88	0,2	6420	257	3	0	10
	94	42	5,0	3,0	3,6	1,1	1223	0,91	1,83	0,25	4892	245			
	94	42	5,0	3,0	3,6	1,1	1247	0,90	1,86	0,22	5668	249			
	94	42	5,0	3,0	3,6	1,1	1250	0,91	1,87	0,21	5952	250			
	94	42	5,0	3,0	3,6	1,1	1284	0,90	1,85	0,23	5583	257			
7	50	26	5,0	3,0	3,6	1,1	690	0,91	1,97	0,11	6273	138	21	1	5
	50	26	5,0	3,0	3,6	1,1	658	0,91	1,94	0,14	4700	132			
	50	26	5,0	3,0	3,6	1,1	671	0,91	1,95	0,13	5162	134			
	50	26	5,0	3,0	3,6	1,1	654	0,92	1,96	0,12	5450	131			
	50	26	5,0	3,0	3,6	1,1	674	0,91	1,97	0,11	6127	135			
8	50	26	5,0	3,0	3,6	1,1	662	0,90	1,96	0,12	5517	132	7	1	10
	94	42	25,0	0,6	3,6	1,1	5740	0,92	1,40	0,68	8441	230			
	94	42	25,0	0,6	3,6	1,1	5701	0,92	1,42	0,66	8638	228			
	94	42	25,0	0,6	3,6	1,1	6021	0,92	1,39	0,69	8726	241			
	94	42	25,0	0,6	3,6	1,1	5764	0,92	1,40	0,68	8476	231			
	94	42	25,0	0,6	3,6	1,1	5625	0,91	1,35	0,73	7705	225			
	94	42	25,0	0,6	3,6	1,1	5739	0,91	1,37	0,71	8083	230			
	50	26	25,0	0,6	3,6	1,1	3192	0,91	1,75	0,33	9673	128			
	50	26	25,0	0,6	3,6	1,1	3148	0,92	1,81	0,27	11659	126			
	50	26	25,0	0,6	3,6	1,1	3167	0,92	1,78	0,3	10557	127			
	50	26	25,0	0,6	3,6	1,1	3334	0,91	1,81	0,27	12348	133			
	50	26	25,0	0,6	3,6	1,1	3281	0,92	1,77	0,31	10584	131			
	50	26	25,0	0,6	3,6	1,1	3171	0,91	1,75	0,33	9609	127			

Tabelle 14 Messwerte Hauptuntersuchungen mit Metallsieb mit Ultraschallschwingung (Teil 2)

Versuchs-nr.	Vorgaben						Messwerte			Berechnungen					
	Amplitude	Amplitude (0-pk)	Zeit	Geschw.	Andruck	Linienlast	Energie	Streifen trockenlutro	Streifen behandelt	m-Differenz	Spez. Energieeintrag	Leistung	MW TG Gewinn	SD TG Gewinn	VK TG Gewinn
	%	µm	Sek.	m/min	bar	N/mm	Ws	g	g	g	Ws/g	W	%	%	%
9	72	34	15,0	1,0	4,75	2,8	3494	0,90	1,77	0,31	11271	233	8	1	8
	72	34	15,0	1,0	4,75	2,8	3501	0,90	1,75	0,33	10609	233			
	72	34	15,0	1,0	4,75	2,8	3458	0,92	1,75	0,33	10479	231			
	72	34	15,0	1,0	4,75	2,8	3463	0,91	1,74	0,34	10185	231			
	72	34	15,0	1,0	4,75	2,8	3500	0,90	1,71	0,37	9459	233			
10	72	34	15,0	1,0	4,75	2,8	3489	0,91	1,72	0,36	9692	233	8	1	6
	72	34	15,0	1,0	3,45	0,9	2700	0,91	1,75	0,33	8182	180			
	72	34	15,0	1,0	3,45	0,9	2685	0,92	1,77	0,31	8661	179			
	72	34	15,0	1,0	3,45	0,9	2696	0,92	1,75	0,33	8170	180			
	72	34	15,0	1,0	3,45	0,9	2686	0,91	1,74	0,34	7900	179			
11	72	34	15,0	1,0	3,45	0,9	2651	0,91	1,72	0,36	7364	177	3	0	16
	72	34	15,0	1,0	3,45	0,9	2600	0,90	1,72	0,36	7222	173			
	72	34	2,1	7,1	4,1	1,8	407	0,92	1,97	0,11	3700	194			
	72	34	2,1	7,1	4,1	1,8	425	0,92	1,92	0,16	2656	202			
	72	34	2,1	7,1	4,1	1,8	425	0,91	1,95	0,13	3269	202			
12	72	34	2,1	7,1	4,1	1,8	413	0,92	1,97	0,11	3755	197	15	3	23
	72	34	2,1	7,1	4,1	1,8	418	0,92	1,96	0,12	3483	199			
	72	34	2,1	7,1	4,1	1,8	428	0,91	1,94	0,14	3057	204			
	72	34	27,9	0,5	4,1	1,8	6203	0,92	1,44	0,64	9692	222			
	72	34	27,9	0,5	4,1	1,8	6022	0,91	1,65	0,43	14005	216			
13	72	34	27,9	0,5	4,1	1,8	6135	0,91	1,64	0,44	13943	220	19	1	6
	72	34	27,9	0,5	4,1	1,8	5977	0,91	1,55	0,53	11277	214			
	72	34	27,9	0,5	4,1	1,8	6342	0,91	1,49	0,59	10749	227			
	72	34	27,9	0,5	4,1	1,8	6265	0,91	1,45	0,63	9944	225			
	100	44	15,0	1,0	4,1	1,8	4953	0,89	1,44	0,64	7739	330			
14	100	44	15,0	1,0	4,1	1,8	4850	0,89	1,41	0,67	7239	323	5	1	15
	100	44	15,0	1,0	4,1	1,8	4627	0,90	1,43	0,65	7118	308			
	100	44	15,0	1,0	4,1	1,8	4739	0,91	1,39	0,69	6868	316			
	100	44	15,0	1,0	4,1	1,8	4813	0,89	1,43	0,65	7405	321			
	100	44	15,0	1,0	4,1	1,8	5000	0,89	1,37	0,71	7042	333			
15	43,7	24	15,0	1,0	4,1	1,8	1939	0,90	1,80	0,28	6925	129	8	0	3
	43,7	24	15,0	1,0	4,1	1,8	1875	0,89	1,80	0,28	6696	125			
	43,7	24	15,0	1,0	4,1	1,8	1902	0,90	1,83	0,25	7608	127			
	43,7	24	15,0	1,0	4,1	1,8	1911	0,91	1,89	0,19	10058	127			
	43,7	24	15,0	1,0	4,1	1,8	1875	0,90	1,85	0,23	8152	125			
16	43,7	24	15,0	1,0	4,1	1,8	1918	0,90	1,85	0,23	8339	128	8	1	9
	72	34	15,0	1,0	4,1	1,8	3194	0,90	1,75	0,33	9679	213			
	72	34	15,0	1,0	4,1	1,8	3213	0,92	1,76	0,32	10041	214			
	72	34	15,0	1,0	4,1	1,8	3150	0,91	1,76	0,32	9844	210			
	72	34	15,0	1,0	4,1	1,8	3181	0,91	1,76	0,32	9941	212			
16	72	34	15,0	1,0	4,1	1,8	3204	0,92	1,74	0,34	9424	214	8	1	9
	72	34	15,0	1,0	4,1	1,8	3179	0,93	1,76	0,32	9934	212			
	72	34	15,0	1,0	4,1	1,8	3304	0,92	1,74	0,34	9718	220			
	72	34	15,0	1,0	4,1	1,8	3313	0,91	1,76	0,32	10353	221			
	72	34	15,0	1,0	4,1	1,8	3279	0,92	1,75	0,33	9936	219			
16	72	34	15,0	1,0	4,1	1,8	3296	0,92	1,77	0,31	10632	220	8	1	9
	72	34	15,0	1,0	4,1	1,8	3253	0,91	1,70	0,38	8561	217			
16	72	34	15,0	1,0	4,1	1,8	3238	0,90	1,72	0,36	8994	216			

Tabelle 15 Konstante Parameter der Hauptuntersuchungen mit Metallsieb

SOLL-Parameter		Einheit	Versuch
Ultraschall	Generator Geräte-Nr.		Wandler 390504638, Generator 390705302
	Booster 1 + 2		B1.8+B1.2
	Sonotrode		Keil (MP1)
	Generator	%	Variiert
	Schwingweite (pkpk)	µm	Variiert
	Sonotrodenwinkel	°	90
	Leistung, Brutto	W	siehe Ergebnisse
Probentisch	Name		A (Amboss)
	Anzahl Einlegeplatten		13
	Geschwindigkeit	mm/s	Variiert
	Absaugung	mbar	nein
	Anpressdruck	bar	Variiert
	Linienlast	N/mm	Variiert
Gewebe			
Seite US	Gewebe-Nr.		G8
	Bezeichnung		Metallsieb
	Zuschnitts-Nr.		Variiert
	Papierseite		nicht beachtet
	Gewebefeuchte	%	keine
Seite Tisch	Gewebe-Zuschnitts-Nr.		G8
	Bezeichnung		Metallsieb
	Zuschnitts-Nr.		Variiert
	Papierseite		nicht beachtet
	Gewebefeuchte	%	keine
Papier	Papiername		L-Pf
	Papiergröße [B x L]	mm	50 x 250
	Wassermenge	ml	1, 5
	Rohstoff	ZS / AP	AP
	Streifenmasse feucht		2, 08
	Siebseite		nicht beachtet

Tabelle 16 Messwerte Hauptuntersuchungen mit Metallsieb ohne Ultraschallschwingung (Teil 2)

Geschwindigkeit t	Linienlast	m-Differenz
		Statisch
m/min	N/mm	g
3,0	2,6	43,78
3,0	2,6	44,22
3,0	2,6	43,78
0,6	2,6	43,78
0,6	2,6	44,00
0,6	2,6	44,00
3,0	1,1	43,78
3,0	1,1	44,00
3,0	1,1	43,78
0,6	1,1	43,78
0,6	1,1	43,78
0,6	1,1	44,22

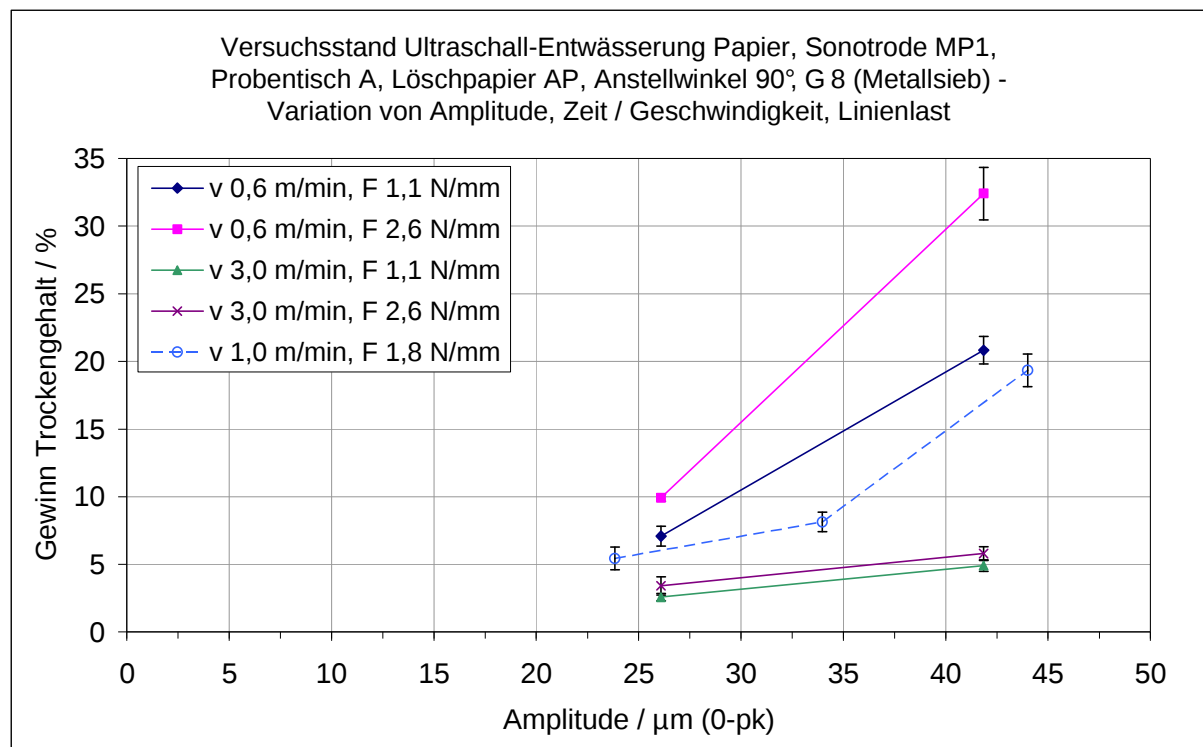


Abbildung 45 Entwicklung des Trockengehalt-Gewinns in Abhängigkeit der Amplitude der Ultraschallsonotrode (Fehlergrenze 1s), Realisierungen des Versuchplanes

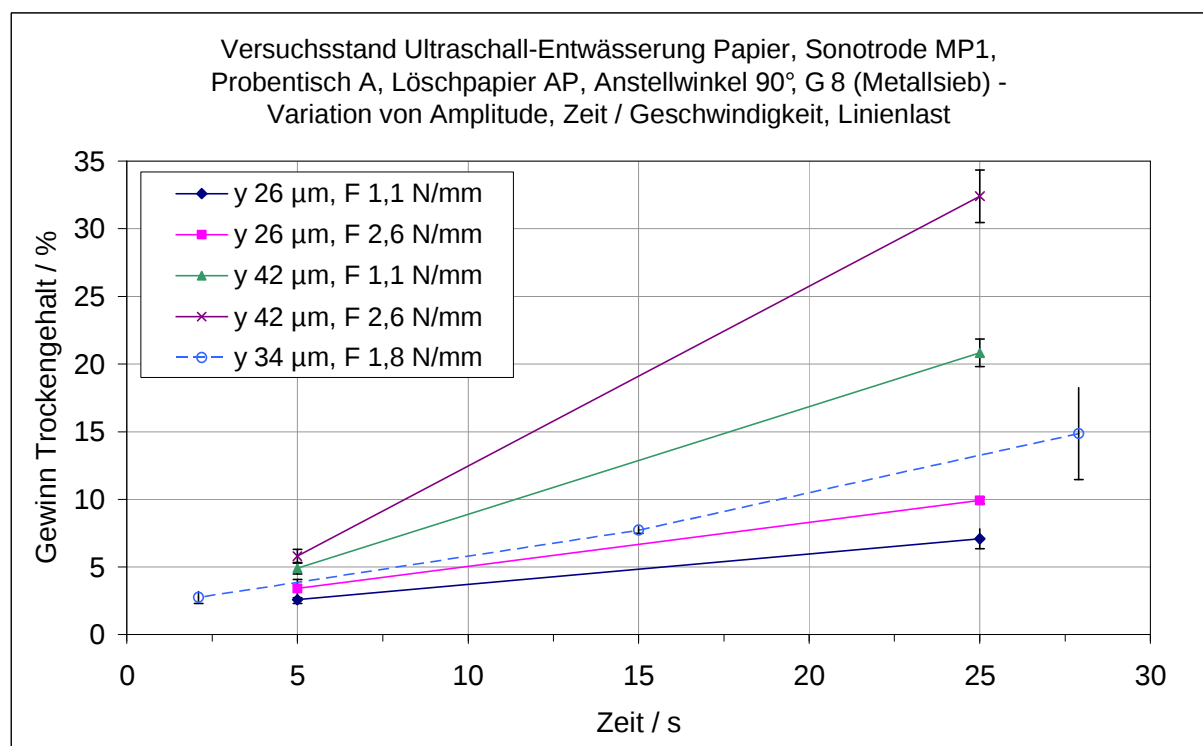


Abbildung 46 Entwicklung des Trockengehalt-Gewinns in Abhängigkeit der Behandlungszeit (Fehlergrenze 1s), Realisierungen des Versuchplanes

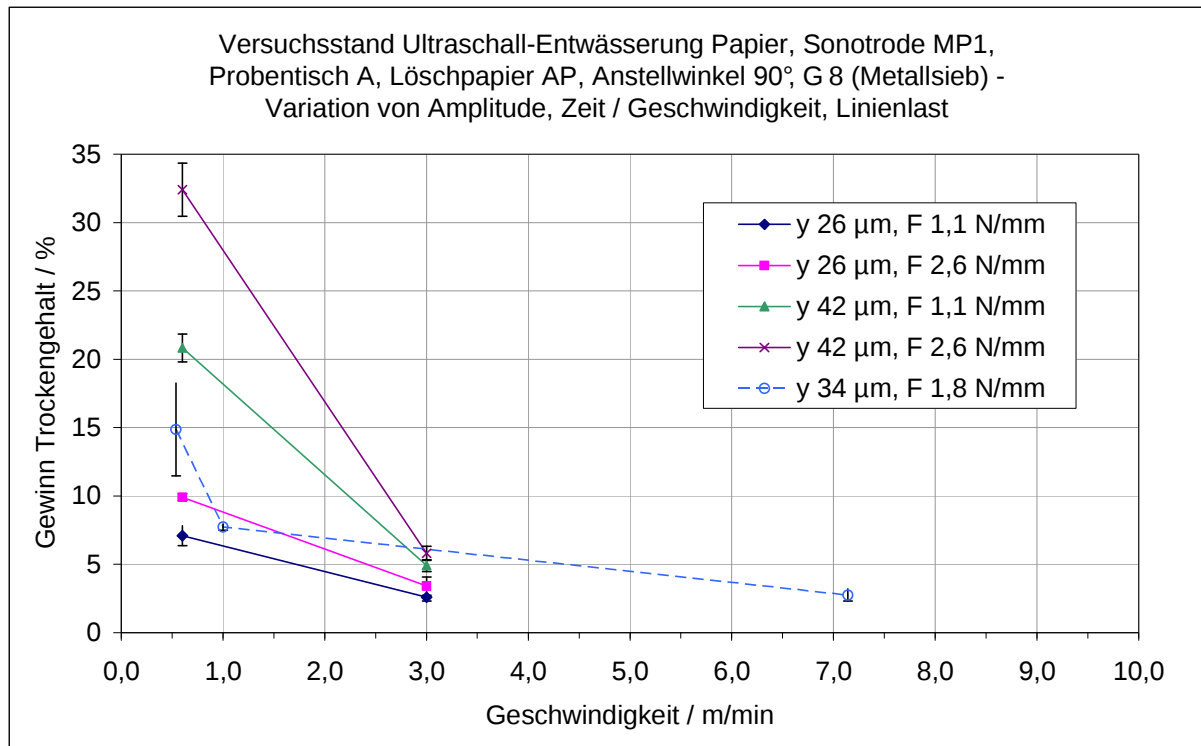


Abbildung 47 Entwicklung des Trockengehalt-Gewinns in Abhängigkeit der Geschwindigkeit des Probenstückes (Fehlergrenze 1s), Realisierungen des Versuchplanes

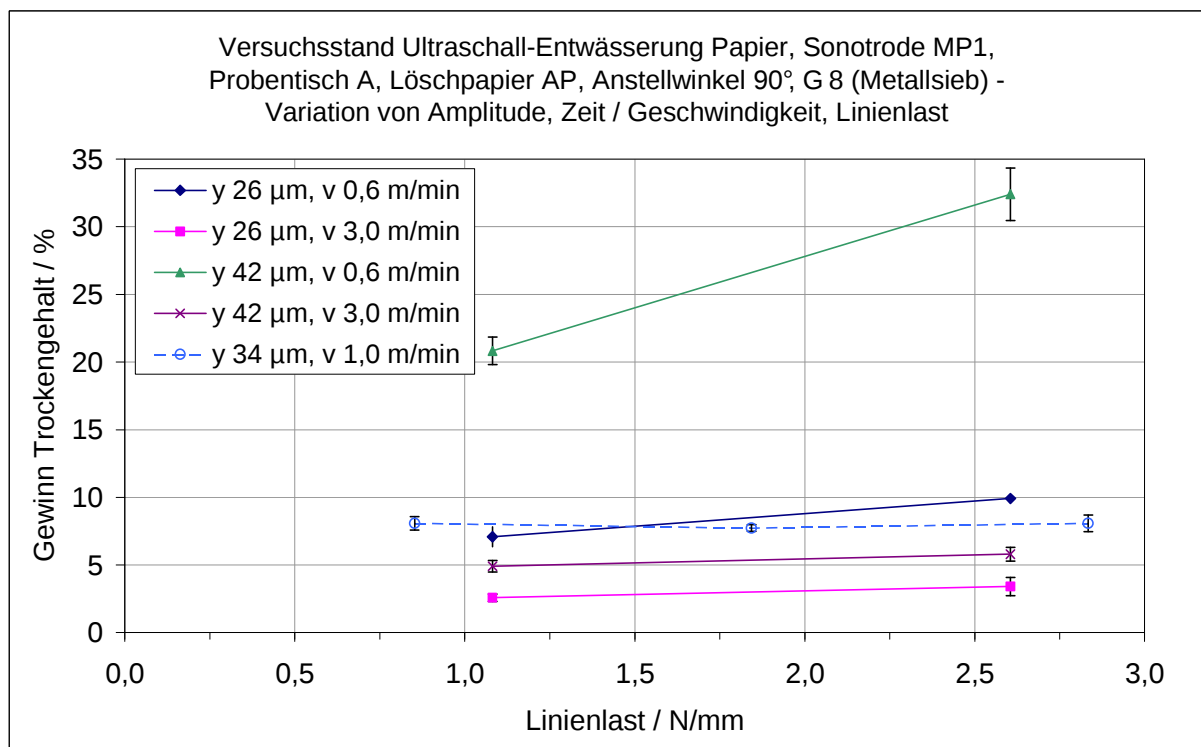


Abbildung 48 Entwicklung des Trockengehalt-Gewinns in Abhängigkeit der Linienlast (Fehlergrenze 1s), Realisierungen des Versuchplanes

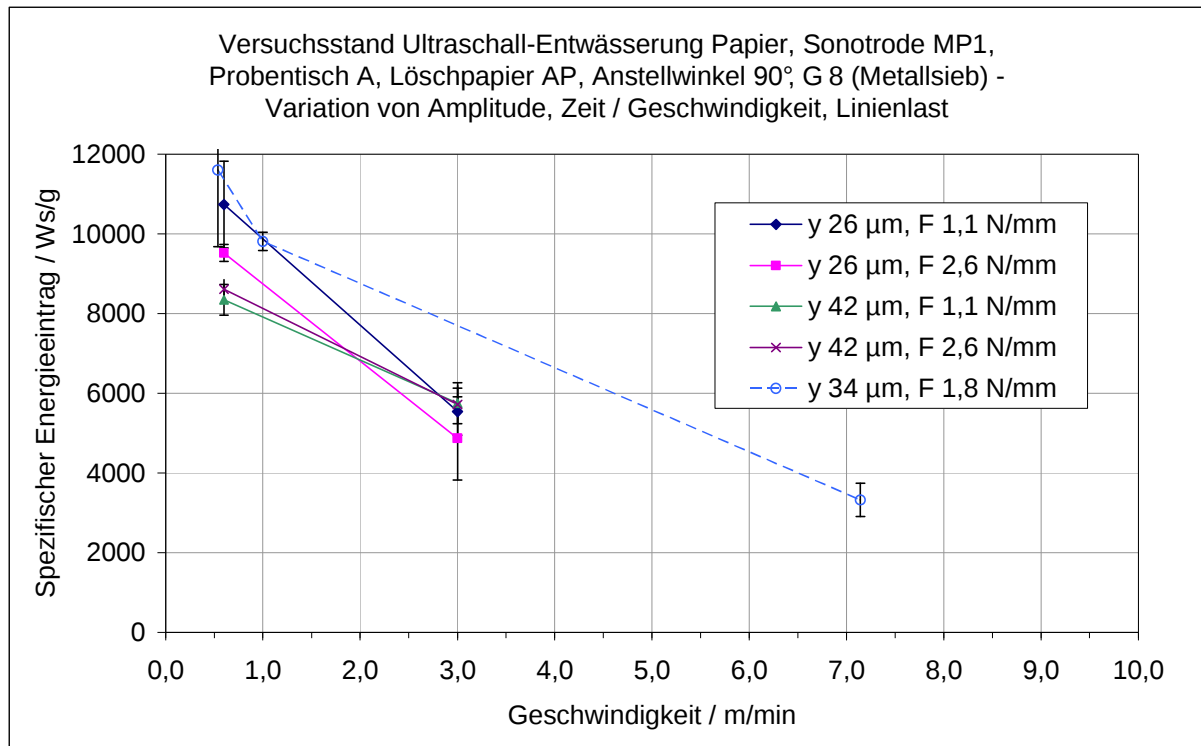


Abbildung 49 Entwicklung des spezifischen Energiebedarfs in Abhängigkeit der Geschwindigkeit des Probestisches (Fehlergrenze 1s), Realisierungen des Versuchplanes

Einfluss der Ultraschallanwendung auf das Papier

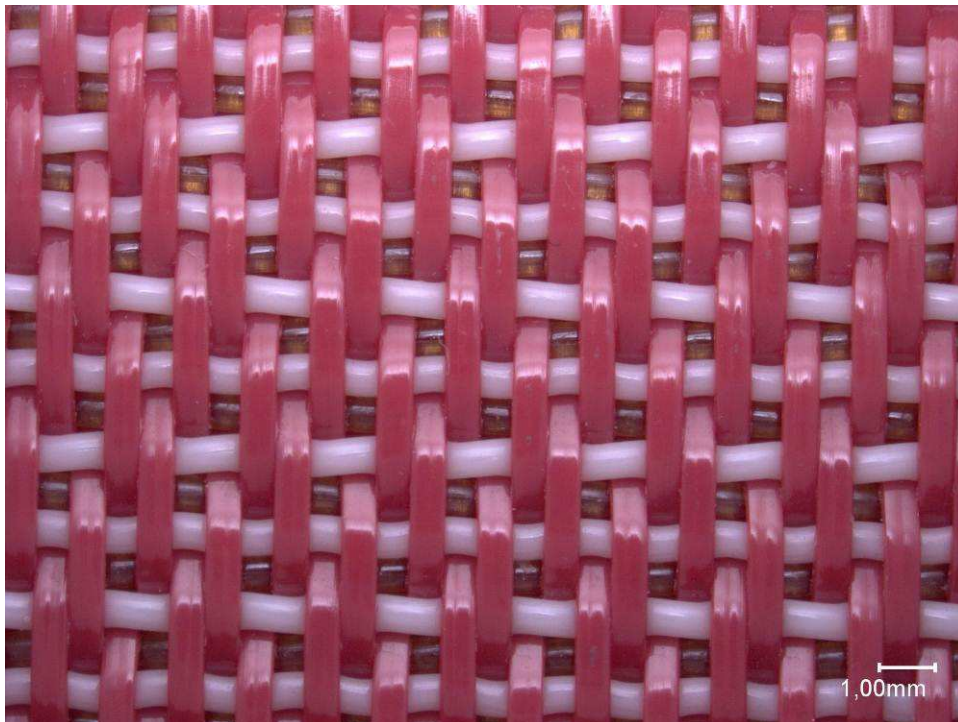


Abbildung 50 Trockensieb Muster „G6_u“ nach Ultraschallentwässerung: Trockensieb auf Sonotrode zugewandte Seite, Kontakt zur Ultraschallsonotrode, lichtmikroskopische Aufnahme mit Keyence VHX-1000 (Messung Heimbach)



Abbildung 51 Trockensieb Muster „G6_u“ nach Ultraschallentwässerung: Trockensieb auf Sonotrode zugewandte Seite, Papierkontaktseite, lichtmikroskopische Aufnahme mit Keyence VHX-1000 (Messung Heimbach)

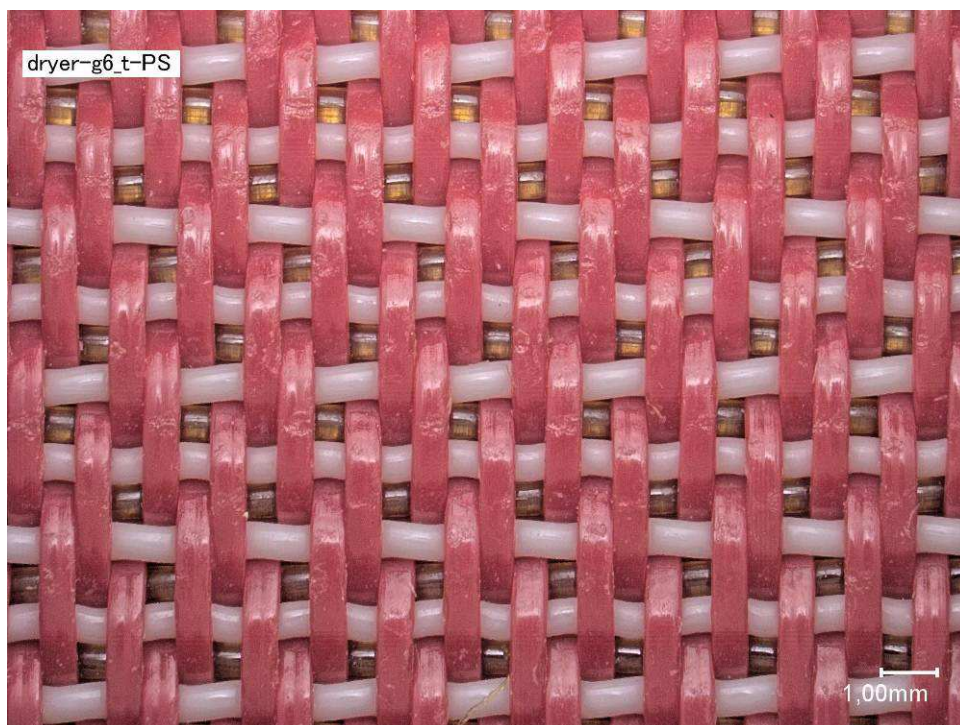


Abbildung 52 Trockensieb Muster „G6_t“ nach Ultraschallentwässerung: Trockensieb auf Sonotrode abgewandte Seite, Papierkontaktseite, lichtmikroskopische Aufnahme mit Keyence VHX-1000 (Messung Heimbach)

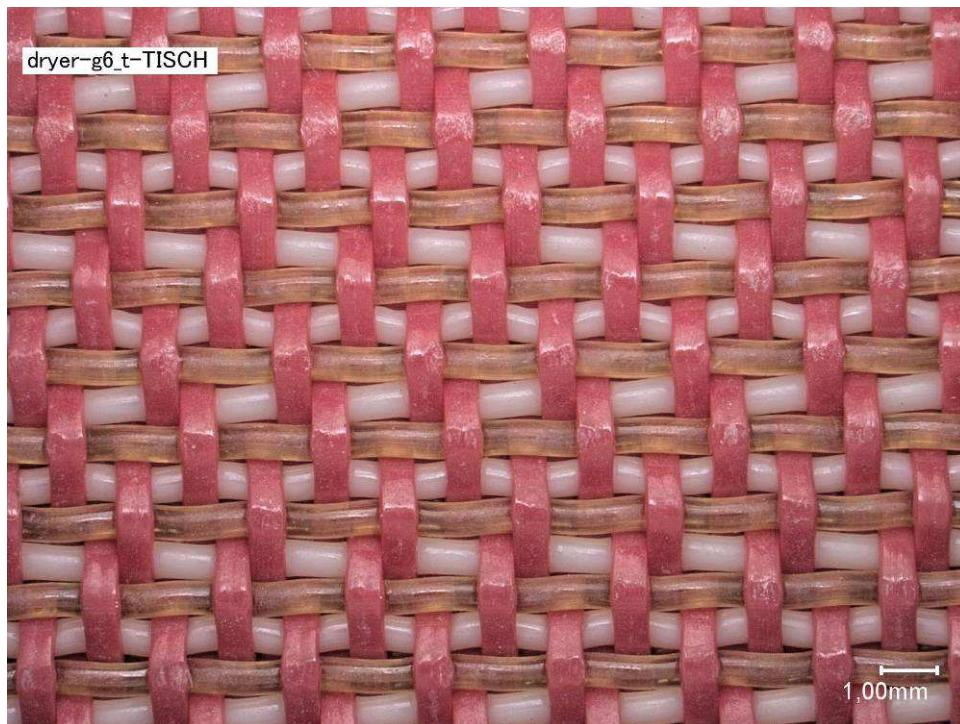


Abbildung 53 Trockensieb Muster „G6_t“ nach Ultraschallentwässerung: Trockensieb auf Sonotrode abgewandte Seite, Kontaktseite zu Tisch des Ultraschallversuchaufbaus, lichtmikroskopische Aufnahme mit Keyence VHX-1000 (Messung Heimbach)

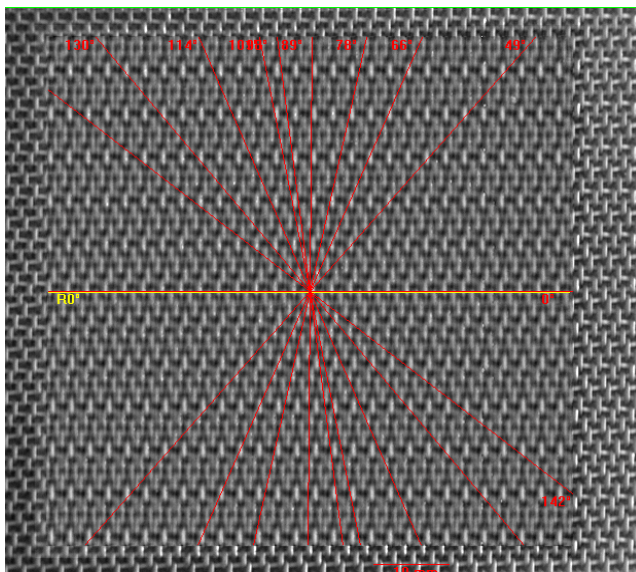


Abbildung 54 Markierungen Trockensieb Muster „G6_t“: Papierkontaktseite, Schräglichtscan und Auswertung durch PTS-DOMAS-Methode (Messung Heimbach)

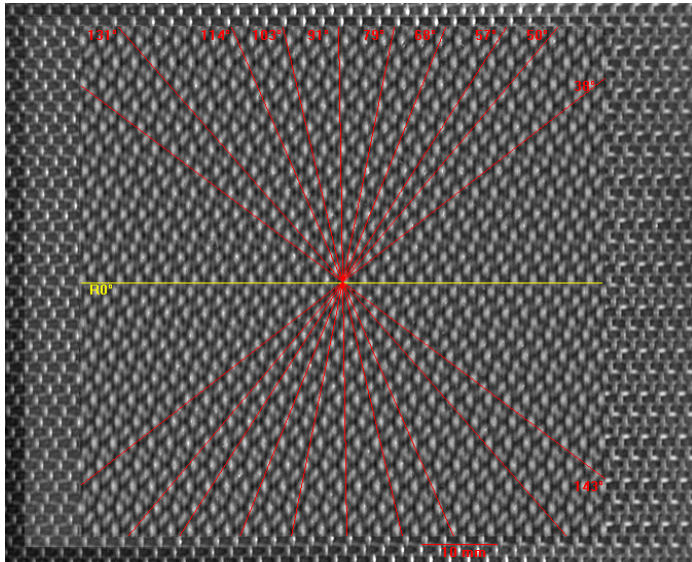


Abbildung 55 Markierungen Trockensieb Muster „G6_u“: Papierkontaktseite, Schräglichtscan und Auswertung durch PTS-DOMAS-Methode (Messung Heimbach)

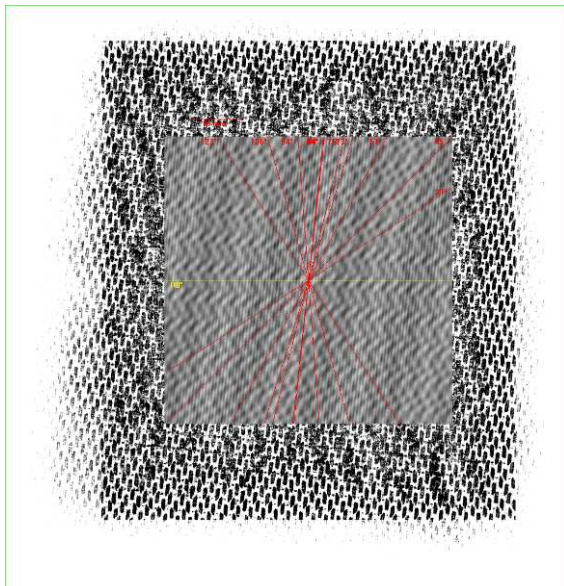


Abbildung 56 Markierungen der Abdrücke in Trockensieboberfläche Muster „G6_u“: Trockensieb auf Sonotrode zugewandte Seite, Papierkontaktseite, Trockensiebmuster im Schräglichtverfahren gescannt und mit PTS-DOMAS-Methode auf Markierungen untersucht (Messung Heimbach)

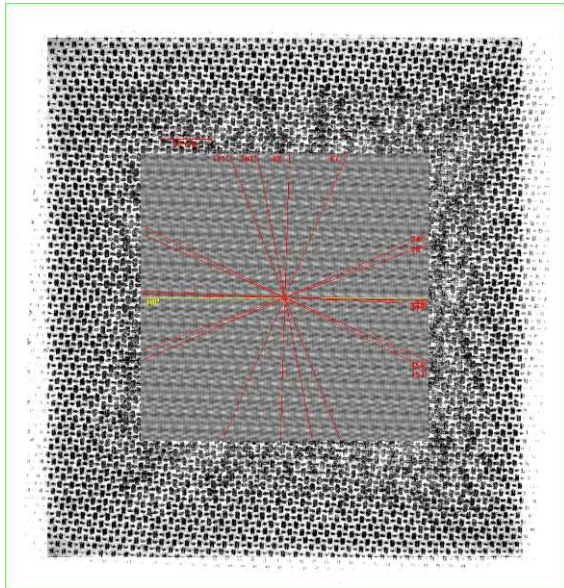
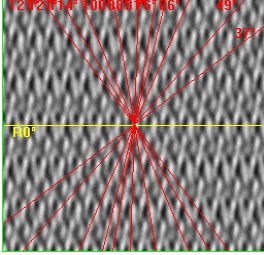
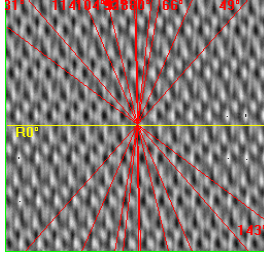
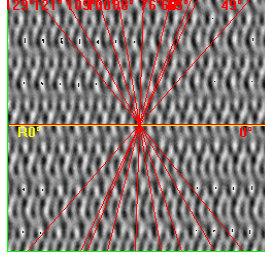
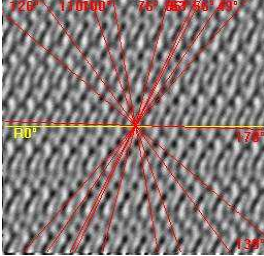
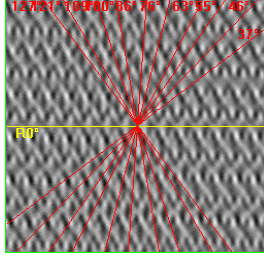
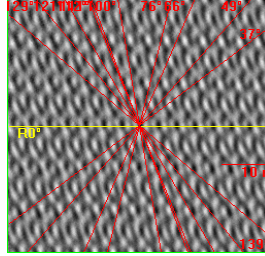


Abbildung 57 Markierungen der Abdrücke in Trockensiebbooberfläche Muster „G6_t“: Trockensieb auf Sonotrode abgewandten Seite, Papierkontaktseite, Trockensiebmuster im Schräglichtverfahren gescannt und mit PTS-DOMAS-Methode auf Markierungen untersucht (Messung Heimbach)

Tabelle 17 Beispielhafte Markierungen/Abdrücke des Trockensiebs G6 im Papiermuster nach Ultraschallentwässerung, (Messung Heimbach)

Amplitude 34 μm Geschwindigkeit 0,9 m/min Linienlast 1,8 N/mm Zeit 13 s (1 x)		
Amplitude 34 μm Geschwindigkeit 0,9 m/min Linienlast 1,8 N/mm Zeit 40 s (3 x)		

Tabelle 18 Markierungen im Papiermuster nach Ultraschallentwässerung mit Trockensieb G6, (Messung Heimbach)

Amplitude 34 μm Geschwindigkeit 0,9 m/min Linienlast 1,8 N/mm Zeit 13 s (1 x)	 Muster a	 Muster e	 Muster f
Amplitude 34 μm Geschwindigkeit 0,9 m/min Linienlast 1,8 N/mm Zeit 40 s (3 x)	 Muster a	 Muster b	 Muster c

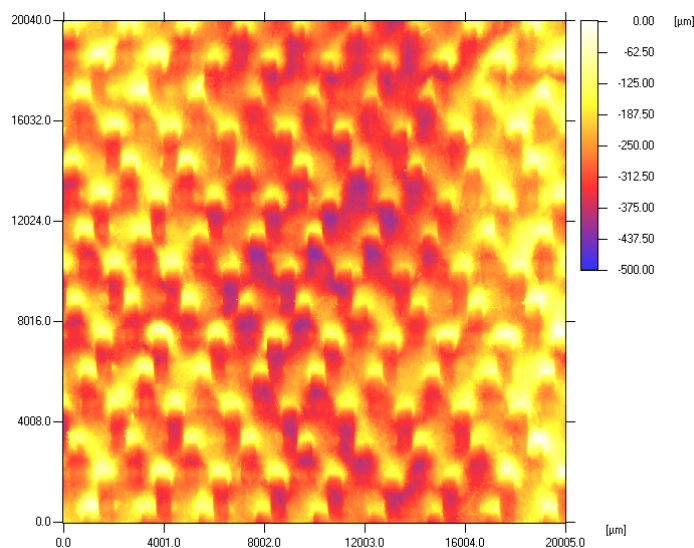


Abbildung 58 Nanofocus (Lasermesssystem) Papiermuster e, 13 s Ultraschallentwässerung mit 34 μm Amplitude, (Messung Heimbach)

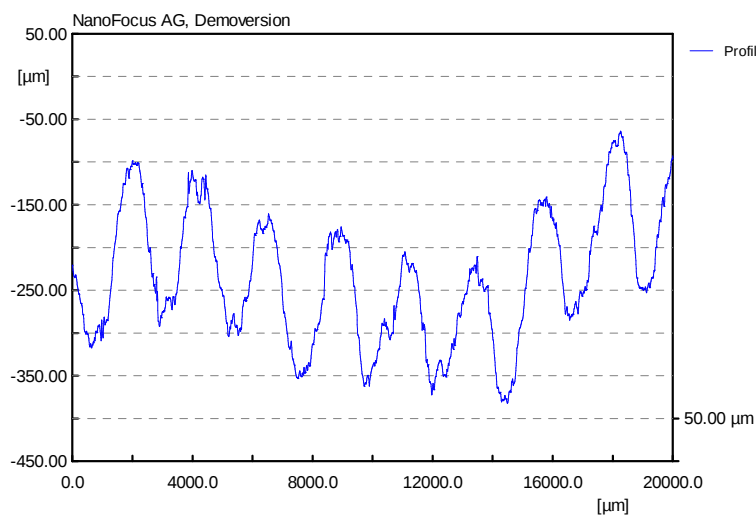


Abbildung 59 Nanofocusprofil (Lasermesssystem) Papiermuster e, 13 s Ultraschallentwässerung mit 34 μm Amplitude, (Messung Heimbach)

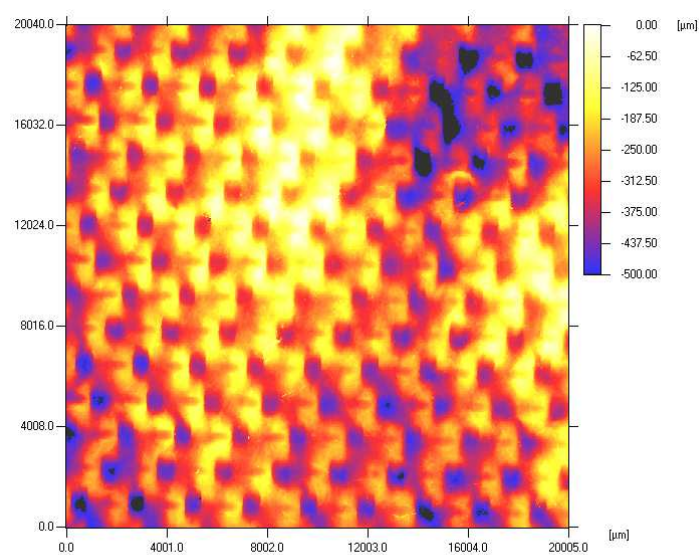


Abbildung 60 Nanofocus (Lasermesssystem) Papiermuster f, 13 s Ultraschallentwässerung mit 34 μm Amplitude, (Messung Heimbach)

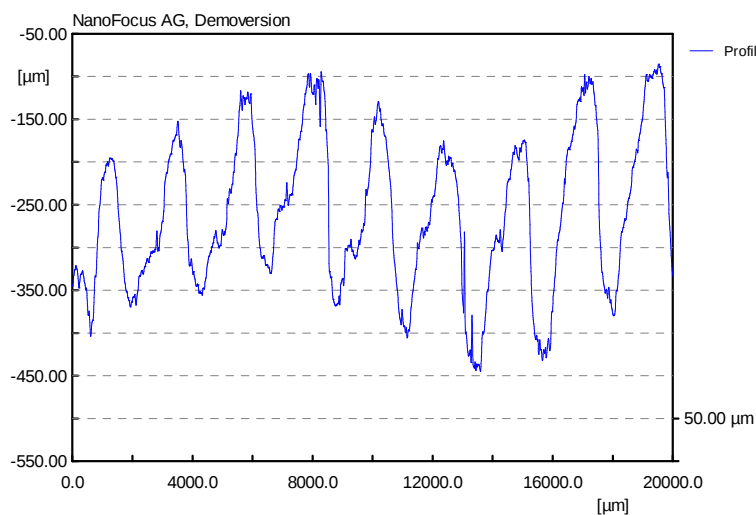


Abbildung 61 Nanofocusprofil (Lasermesssystem) Papiermuster f, 13 s Ultraschallentwässerung mit 34 μm Amplitude, (Messung Heimbach)

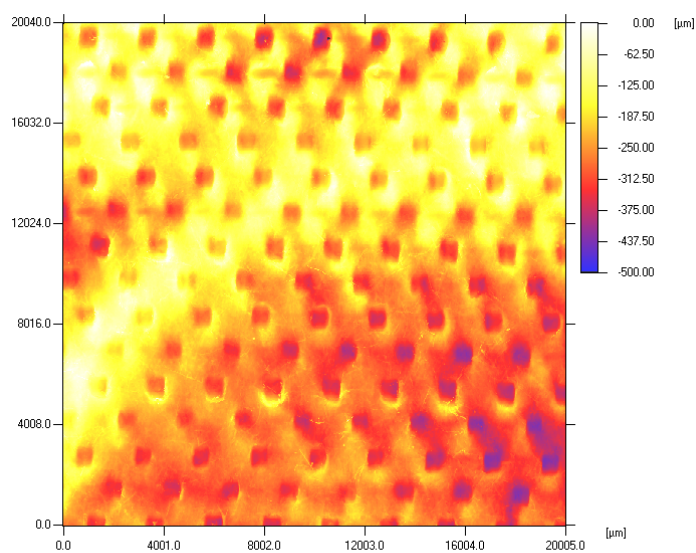


Abbildung 62 Nanofocus (Lasermesssystem) Papiermuster b, 40 s Ultraschallentwässerung mit 34 μm Amplitude, (Messung Heimbach)

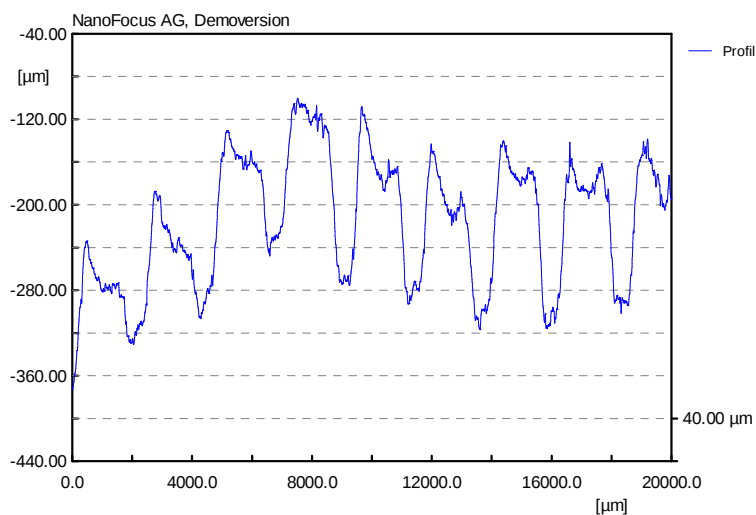


Abbildung 63 Nanofocusprofil (Lasermesssystem) Papiermuster b, 40 s Ultraschallentwässerung mit 34 μm Amplitude, (Messung Heimbach)

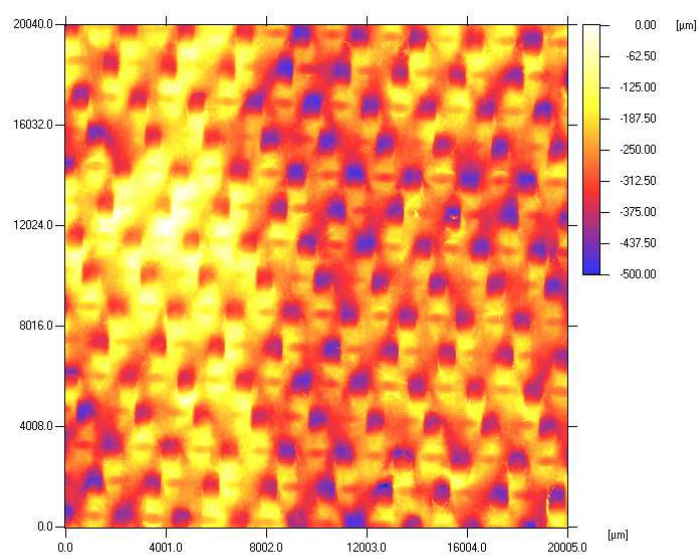


Abbildung 64 Nanofocus (Lasermesssystem) Papiermuster c, 40 s Ultraschallentwässerung mit 34 μm Amplitude, (Messung Heimbach)

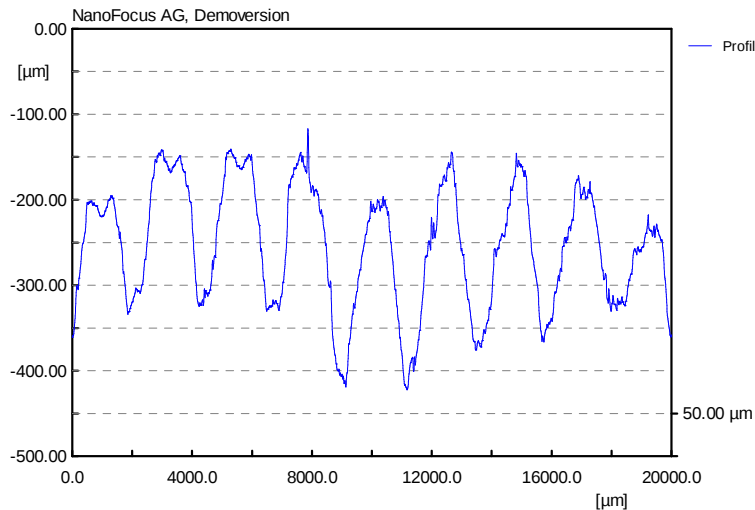


Abbildung 65 Nanofocusprofil (Lasermesssystem) Papiermuster c, 40 s Ultraschallentwässerung mit 34 µm Amplitude, (Messung Heimbach)

6.7 Wirkmechanismen bei der Ultraschall unterstützten Entwässerung von Papier (Thermografie)

Material	Temp. in °C	Emissionsgrad ε	Quelle
Kunststoff, PU-Isolier-platte	70	0,29	2
Kunststoff, PVC stumpf	70	0,94	2
Holz, weiß, feucht	20	0,70 – 0,80	1
Holz, Buche/Eiche	20 - 70	0,80 – 0,90	1
Holz gehobelte Eiche	20	0,90	2
Holz gehobelte Eiche	70	0,88	2
Papier, matt-hell in Bahnen		0,65	1
Papier, grau		0,80	1
Papier, dunkel		0,86	1
Papier, schwarz, stumpf	70	0,89	2
Wasser, destilliert	20	0,96	2
Eisen und Stahl, oxidiert	100	0,74	2
Eisen und Stahl, poliert	100	0,07	2

1) www.bartec.de, 2) www.thermoografie-xtra.de

Abbildung 66 Emissionsgrad verschiedener Stoffe

Literaturverzeichnis

- 1 Heikkilä, P., et. al., Multicylinder Dryer, In: Karlsson, M.: Papermaking Part 2, Drying, Book 9, Finnland: Fapet Oy, 2010, (Papermaking Science and Technology), Kapitel 3
- 2 Kappen, J., et. al., Wasserhaushalt und Energienutzung, In: Blechschmidt, J., Taschenbuch der Papiertechnik, Leipzig: Carl Hanser Verlag, 2010, Kapitel 14
- 3 Bandelin, S.: Niederfrequenter Ultraschall: Grundlagen, Technik, Anwendungen, Landsberg, Verlag Moderne Industrie, 2006
- 4 Millner, R.: Wissensspeicher Ultraschalltechnik, 1. Aufl., Leipzig: VEB Fachbuchverlag 1987
- 5 Herforth, L.: Winter, H.: Ultraschall – Grundlagen und Anwendungen in Physik, Technik, Industrie, Biologie und Medizin, 1. Aufl., Leipzig: Teubner, 1958, S. 30-32
- 6 Müller, U.: Untersuchungen zur Steigerung der Entwässerungsleistung in der Pressenpartie mittels Hochleistungsultraschall, Interdisziplinäre Projektarbeit Nr. 619, TU Dresden, 2010
- 7 N. N.: Formeln und Tabellen für die Sekundarstufen I und II, 5. Aufl., Berlin: Paetec, 1994, S. 16
- 8 Blechschmidt, J.: Taschenbuch der Papiertechnik, 1. Aufl., Leipzig: Fachbuchverlag Leipzig, 2010, S. 548
- 9 BMWi, <http://www.bmwi.de/DE/Themen/Energie/Energiedaten/gesamtausgabe.html>, 10. Mai 2012