



**INFOR-Projekt Nr. 106**

**Bewertung der Einsatzmöglichkeit von Hochleistungs-  
Ultraschall bei der Glättung von Papieroberflächen**

**Schlussbericht**

**Dezember 2009**

Technische Universität Dresden  
Institut für Holz- und Papiertechnik  
Professur für Papiertechnik

Prof. Dr.-Ing. Harald Großmann  
Dipl.-Ing. Matthias Wanske





**Abschlussbericht**

**Bewertung der Einsatzmöglichkeit von Hochleistungs-Ultraschall  
bei der Glättung von Paperoberflächen**

(INFOR-Projekt Nr. 106)

Prof. Dr.-Ing. H. Großmann,  
Dipl.-Ing. M. Wanske

Dezember 2009

Projektbegleiter:

- Fritz Brümmer (Sappi Alfeld GmbH)
- Petra Bursian (Glatfelter)
- Dr. Hans-Günter Ludwig (Moritz J. Weig GmbH & Co KG)
- Dr. Peter Engert (UPM GmbH, Werk Augsburg)
- Dr. Detlef Rhodius (Papierfabrik Schoellershammer)

Das Forschungsprojekt wird gefördert über das Kuratorium für Forschung und Technik der Zellstoff- und Papierindustrie im VDP e.V., Bonn

## Inhaltsverzeichnis

|          |                                                                                             |           |
|----------|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>EINLEITUNG .....</b>                                                                     | <b>1</b>  |
| <b>2</b> | <b>VERSUCHSANLAGE .....</b>                                                                 | <b>2</b>  |
| 2.1      | KONZEPT.....                                                                                | 2         |
| 2.2      | UMSETZUNG.....                                                                              | 3         |
| <b>3</b> | <b>PROBLEMFÄLLE UND LÖSUNGEN.....</b>                                                       | <b>7</b>  |
| 3.1      | PLANPARALLELITÄT UND ZYLINDRIZITÄT DER WALZEN IM ULTRASCHALLBETRIEB (RESONANZPROBLEM) ..... | 7         |
| 3.2      | ZYLINDRIZITÄT GEGENWALZE .....                                                              | 10        |
| 3.3      | BAHNZUGREGELUNG .....                                                                       | 10        |
| 3.4      | FEUCHTWERK.....                                                                             | 10        |
| <b>4</b> | <b>ERGEBNISSE .....</b>                                                                     | <b>11</b> |
| 4.1      | ÜBERSICHT ÜBER DIE IM PROJEKT DURCHGEFÜHRTEN VERSUCHE.....                                  | 11        |
| 4.2      | FOOD & BEVERAGE (KAFFEEFILTER 22 G/M <sup>2</sup> ) .....                                   | 11        |
| 4.2.1    | Probencharakterisierung.....                                                                | 11        |
| 4.2.2    | Versuchsplan .....                                                                          | 11        |
| 4.2.3    | Ergebnisse .....                                                                            | 12        |
| 4.2.3.1  | Dicke .....                                                                                 | 12        |
| 4.2.3.2  | Glätte.....                                                                                 | 13        |
| 4.2.4    | Fazit.....                                                                                  | 17        |
| 4.3      | OVERLAYPAPIER (24 G/M <sup>2</sup> ) .....                                                  | 18        |
| 4.3.1    | Probencharakterisierung.....                                                                | 18        |
| 4.3.2    | Versuchsplan .....                                                                          | 18        |
| 4.3.3    | Ergebnisse .....                                                                            | 18        |
| 4.3.3.1  | Dicke .....                                                                                 | 18        |
| 4.3.3.2  | Glätte.....                                                                                 | 20        |
| 4.3.4    | Fazit.....                                                                                  | 24        |
| 4.4      | GRAFISCHES PAPIER (SC-PAPIER 56 G/M <sup>2</sup> ) .....                                    | 25        |
| 4.4.1    | Papiercharakterisierung.....                                                                | 25        |
| 4.4.2    | Versuchsplan .....                                                                          | 25        |
| 4.4.3    | Ergebnisse .....                                                                            | 26        |
| 4.4.3.1  | Dicke .....                                                                                 | 26        |
| 4.4.3.2  | Glätte.....                                                                                 | 26        |
| 4.4.3.3  | Glanz.....                                                                                  | 27        |
| 4.4.3.4  | Glätte und Volumen .....                                                                    | 28        |
| 4.4.3.5  | Energetische Bewertung der Ergebnisse (SC-Papier) .....                                     | 28        |
| 4.5      | GRAFISCHES PAPIER (STREICHROHPAPIER 128 G/M <sup>2</sup> ).....                             | 31        |
| 4.5.1    | Papiercharakterisierung.....                                                                | 31        |
| 4.5.2    | Versuchsplan .....                                                                          | 31        |
| 4.5.3    | Ergebnisse .....                                                                            | 31        |
| 4.5.3.1  | Dicke .....                                                                                 | 31        |
| 4.5.3.2  | Glätte.....                                                                                 | 32        |
| 4.5.3.3  | Glanz.....                                                                                  | 32        |
| 4.5.3.4  | Energetische Bewertung des Glättprozesses.....                                              | 33        |
| 4.6      | GESTRICHENE PROBEN (EINSEITIG DOPPELT GESTRICHEN, 80 G/M <sup>2</sup> ) .....               | 35        |
| 4.7      | GRAFISCHES PAPIER (SIZED 110 G/M <sup>2</sup> ) .....                                       | 36        |
| 4.7.1    | Papiercharakterisierung.....                                                                | 36        |
| 4.7.2    | Versuchsplan .....                                                                          | 36        |
| 4.7.3    | Ergebnisse .....                                                                            | 36        |
| 4.7.3.1  | Dicke .....                                                                                 | 36        |
| 4.7.3.2  | Glätte.....                                                                                 | 37        |
| 4.7.3.3  | Glanz.....                                                                                  | 37        |
| <b>5</b> | <b>ZUSAMMENFASSENDE DISKUSSION DER ERGEBNISSE UND AUSBLICK .....</b>                        | <b>38</b> |

## Abbildungsverzeichnis

|                                                                                                          |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ABBILDUNG 1: BAHNLAUFVERSUCHSANLAGE (SCHEMATISCHE DARSTELLUNG) .....                                     | 2  |
| ABBILDUNG 2: BAHNLAUF-MODULE DES GLÄTTPROJEKTES (SCHEMATISCHE DARSTELLUNG) .....                         | 3  |
| ABBILDUNG 3: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DES ULTRASCHALLMODULS.....                                         | 4  |
| ABBILDUNG 4: PNEUMATIKBANK AM ULTRASCHALLMODUL.....                                                      | 5  |
| ABBILDUNG 5: DETAILAUFNAHMEN AM ULTRASCHALL-BAHNLAUFMODUL .....                                          | 5  |
| ABBILDUNG 6: BEDIENBILDSCHIRM.....                                                                       | 6  |
| ABBILDUNG 7: QUERPROFILPROBLEMATIK DER BAHNLAUFVERSUCHSANLAGE.....                                       | 7  |
| ABBILDUNG 8: VERTEILUNG DER SCHWINGUNGSKNOTEN UND SCHWINGUNGSBÄUCHE ÜBER DER BAHNBREITE .....            | 8  |
| ABBILDUNG 9: MÖGLICHE KASKADIERUNG ZWEIER SONOTRODE ZUR BESEITIGUNG DES OSZILLIERENDEN QUERPROFILS ..... | 8  |
| ABBILDUNG 10: NUMERISCHE SCHWINGUNGSANALYSE DER GEGENWALZE .....                                         | 9  |
| ABBILDUNG 11: DICKE-QUERPROFILE (FOOD&BEVERAGE) .....                                                    | 12 |
| ABBILDUNG 12: DICKEMESSWERTE DER EINZELNEN VERSUCHSREALISIERUNGEN (FOOD & BEVERAGE).....                 | 13 |
| ABBILDUNG 13: GLÄTTEMESSWERTE DER EINZELNEN VERSUCHSREALISIERUNGEN (FOOD&BEVERAGE) .....                 | 14 |
| ABBILDUNG 14: GLÄTTE-DICKE-KORRELATION NACH DER ULTRASCHALLBEHANDLUNG (FOOD & BEVERAGE).....             | 14 |
| ABBILDUNG 15: PARETODIAGRAMM DER EINFLUSSFAKTOREN (FOOD & BEVERAGE).....                                 | 15 |
| ABBILDUNG 16: STATISTISCHE ANALYSE DES ZIELPOLYNOMS GLÄTTE (FOOD & BEVERAGE).....                        | 16 |
| ABBILDUNG 17: POLYNOMPLOTT GLÄTTE ÜBER LINIENLAST UND BAHNGESCHWINDIGKEIT .....                          | 16 |
| ABBILDUNG 18: POLYNOMPLOTT GLÄTTE ÜBER AMPLITUDE UND LINIENLAST .....                                    | 17 |
| ABBILDUNG 19: POLYNOMPLOTT GLÄTTE ÜBER BAHNGESCHWINDIGKEIT UND AMPLITUDE .....                           | 17 |
| ABBILDUNG 20: DICKE-QUERPROFILE (OVERLAY) .....                                                          | 19 |
| ABBILDUNG 21: DICKEMESSWERTE DER EINZELNEN VERSUCHSREALISIERUNGEN (OVERLAY) .....                        | 20 |
| ABBILDUNG 22: GLÄTTEMESSWERTE DER EINZELNEN VERSUCHSREALISIERUNGEN (OVERLAYPAPIER) .....                 | 21 |
| ABBILDUNG 23: GLÄTTE-DICKE-KORRELATION NACH DER ULTRASCHALLBEHANDLUNG (OVERLAYPAPIER) .....              | 21 |
| ABBILDUNG 24: PARETODIAGRAMM DER EINFLUSSFAKTOREN (OVERLAYPAPIER) .....                                  | 22 |
| ABBILDUNG 25: STATISTISCHE ANALYSE DES ZIELPOLYNOMS (OVERLAYPAPIER) .....                                | 23 |
| ABBILDUNG 26: POLYNOMPLOTT GLÄTTE ÜBER LINIENLAST UND BAHNGESCHWINDIGKEIT (OVERLAY).....                 | 23 |
| ABBILDUNG 27: POLYNOMPLOTT GLÄTTE ÜBER AMPLITUDE UND LINIENLAST (OVERLAYPAPIER) .....                    | 24 |
| ABBILDUNG 28: POLYNOMPLOTT GLÄTTE ÜBER BAHNGESCHWINDIGKEIT UND AMPLITUDE (OVERLAYPAPIER).....            | 24 |
| ABBILDUNG 29: ENTWICKLUNG DER DICKE ÜBER DER STATISCHEN LINIENLAST (SC-PAPIER) .....                     | 26 |
| ABBILDUNG 30: ENTWICKLUNG DER GLÄTTE ÜBER DER STATISCHEN LINIENLAST (SC-PAPIER) .....                    | 27 |
| ABBILDUNG 31: ENTWICKLUNG DES GLANZES ÜBER DER LINIENLAST (SC-PAPIER) .....                              | 27 |
| ABBILDUNG 32: VERGLEICH INDUSTRIELLER UND ULTRASCHALLGLÄTTUNG (SC-PAPIERS).....                          | 28 |
| ABBILDUNG 33: ENERGETISCHE ASPEKTE DES ULTRASCHALLGLÄTTENS VON SC-PAPIER .....                           | 29 |
| ABBILDUNG 34: DICKE ÜBER DER STATISCHEN LINIENLAST UND BAHNGESCHWINDIGKEIT (STREICHROHPAPIER) .....      | 31 |
| ABBILDUNG 35: GLÄTTE ÜBER DER STATISCHEN LINIENLAST UND BAHNGESCHWINDIGKEIT (STREICHROHPAPIER) .....     | 32 |
| ABBILDUNG 36: GLANZES ÜBER DER STATISCHEN LINIENLAST UND BAHNGESCHWINDIGKEIT (STREICHROHPAPIER) .....    | 33 |
| ABBILDUNG 37: ENERGETISCHE ASPEKTE DES ULTRASCHALLGLÄTTENS (STREICHROHPAPIER) .....                      | 34 |
| ABBILDUNG 38: ENTWICKLUNG DER DICKE ÜBER DER LINIENLAST (SIZED) .....                                    | 36 |
| ABBILDUNG 39: ENTWICKLUNG DER GLÄTTE ÜBER DER LINIENLAST (SIZED) .....                                   | 37 |
| ABBILDUNG 40: ENTWICKLUNG DES GLANZES ÜBER DER LINIENLAST (SIZED) .....                                  | 37 |

## Tabellenverzeichnis

|                                                                                                   |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| TABELLE 1: BAHNLAUFPARAMETER .....                                                                | 3  |
| TABELLE 2: PROBENSPEZIFIKATION FOOD&BEVERAGE (22 g/m <sup>2</sup> ) .....                         | 11 |
| TABELLE 3: VERSUCHSPLAN ROTIERENDE SONOTRODE .....                                                | 11 |
| TABELLE 4: REGRESSIONSKOEFFIZIENTEN .....                                                         | 15 |
| TABELLE 5: PROBENSPEZIFIKATION OVERLAYPAPIER (24 g/m <sup>2</sup> ) .....                         | 18 |
| TABELLE 6: VERSUCHSPLAN ROTIERENDE SONOTRODE .....                                                | 18 |
| TABELLE 7: REGRESSIONSKOEFFIZIENTEN .....                                                         | 22 |
| TABELLE 8: PROBENSPEZIFIKATION SC-PAPIER (56 g/m <sup>2</sup> ) .....                             | 25 |
| TABELLE 9: VERSUCHSPLAN SC-PAPIER .....                                                           | 25 |
| TABELLE 10: PROBENSPEZIFIKATION STREICHROHPAPIER (128 g/m <sup>2</sup> ) .....                    | 31 |
| TABELLE 11: PROBENSPEZIFIKATION: GRAFISCHES PAPIER MIT STÄRKESTRICH (110 g/m <sup>2</sup> ) ..... | 36 |

## **1 Einleitung**

Im INFOR-Projekt 99 („Bewertung der Einsatzmöglichkeit von Hochleistungs-Ultraschall bei der Glättung von Papieroberflächen“) konnte gezeigt werden, dass es grundsätzlich möglich ist, Papier- und Kartonoberflächen mit der Wirkung des Hochleistungs-Ultraschalls zu glätten.

Die dort genutzte Anlage war für die Herstellung klebemittelfreier Wellpappe, also dem Verbinden von Papierbahnen konzipiert und optimiert. Erwartungsgemäß konnten zwar die grundsätzliche Eignung einer rotierenden Sonotrode für die Glättung von Papieroberflächen gezeigt, jedoch noch keine methodischen Untersuchungen durchgeführt werden.

Da aber die Ergebnisse zur Fortsetzung der Forschungsarbeiten motivierten, wurde dieses Anschlussprojekt initiiert, dessen Ziel es war, die Möglichkeiten und Grenzen der Ultraschall unterstützten Behandlung von Papier- und Kartonoberflächen systematisch zu untersuchen und auf diese Weise das technologische und wirtschaftliche Potenzial dieser Oberflächenbehandlung abzuschätzen.

Für die experimentellen Arbeiten im Rahmen des Projekts wurde am Lehrstuhl für Papiertechnik der TU Dresden ein Ultraschall-Modul mit rotierender Sonotrode konzipiert, gebaut und in Betrieb genommen.

Die Technologie der schwingenden Sonotrode stellt bis heute den Hersteller (Herrmann Ultraschalltechnik) vor große, jedoch nicht unlösbare Herausforderungen. Sie waren in nicht unerheblichem Maße für die Verzögerungen bei der Projektbearbeitung verantwortlich.

Nach der Fertigstellung wurde das Ultraschall-Modul in eine bestehende, leistungsfähige halbtechnische Bahnlaufversuchsanlage des Fraunhofer AVV (Dresden), die grundsätzlich über alle für einen korrekten Bahnlauf erforderlichen Aggregate verfügte (Bahnspannungsregelung, Bahnkantenführung, etc.) integriert.

Einer stabilen Versuchsumgebung standen jedoch nach erfolgter Integration verschiedenste Herausforderungen wie eine noch nicht belastbare Bahnspannungsregelung, das Verhalten von Walze und Gegenwalze unter Ultraschallbedingungen sowie die Planparallelität und Zylindrizität der verbauten Walzen entgegen.

Im diesem Abschlussbericht werden zunächst das Konzept der Anlage im Allgemeinen und das Ultraschall-Modul im Speziellen sowie die zur Lösung der genannten Probleme entwickelten Maßnahmen beschrieben. Anschließend werden die Ergebnisse der US-Bahndlung ausgewählter Papiere zusammengefasst und zumindest teilweise zu den heute in der Industrie üblichen Glättewerten und Energieverbräuchen in Relation gestellt.

Ein kurzer Ausblick auf mögliche Optimierungsansätze schließt den Bericht ab.

## 2 Versuchsanlage

### 2.1 Konzept

**Abbildung 1** zeigt die Bahnlaufversuchsanlage in schematischer Darstellung.

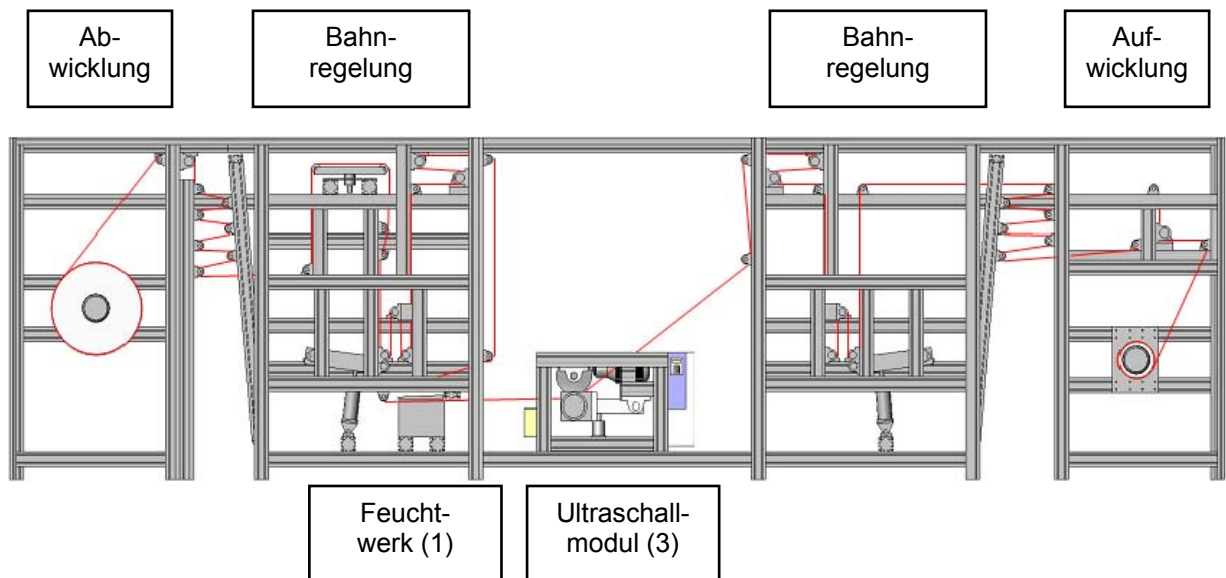


Abbildung 1: Bahnlaufversuchsanlage (Schematische Darstellung)

In die bestehende Bahnlaufversuchsanlage (für Folie, Papier, etc.) des Fraunhofer AVV, Dresden sind zwei Module zur Ultraschall unterstützten Papierbehandlung integriert worden.

**Abbildung 2** zeigt in schematischer Darstellung die beiden Behandlungsmodule, das Feuchtwerk (1) und das Ultraschallmodul (5).

Im Arbeitsbereich des Versuchsstandes passiert die Bahn zunächst das Feuchtwerk (1), welches mittels einer integrierten Pumpe aus einem Wasserreservoir (2) gespeist und mittels eines Frequenzumrichters gesteuert wird. Frequenzumrichter und Rangierklemmen für die am Feuchtwerk befindlichen Magnetventile sind in einem separaten Schaltschrank (3) eingebaut. Bevor die Papierbahn das Ultraschallbehandlungsmodul (5) erreicht, wird die Eingangsfeuchte mittels eines Mikrowellensensors (4) bestimmt. Das eigentliche Ultraschallbehandlungsmodul ist ein Walzenpaar, bestehend aus einer nicht-angetriebenen, axial an den Ultraschallgeber angekoppelten Walze und einer Gegenwalze, die über einen frequenzgesteuerten Getriebemotor angetrieben wird.

Der Anpressdruck zwischen den beiden Walzen wird durch einen Pneumatikzylinder erzeugt. Die dabei wirksame Kraft wird durch eine Kraftmessdose (F) erfasst. Steuerung und elektrische Verteilung befinden sich im Hauptschaltschrank (6). Direkt davor ist der von der Bedienerseite der Anlage erreichbare Ultraschallgenerator (7) montiert. Die Ausgangsfeuchte der behandelten Bahn wird auf dem Weg zur Aufwickelstation durch einen weiteren Mikrowellensensor (8) erfasst.

Die Steuerung des Bahnlaufes erfolgt durch einen Leitrechner (SPS, Siemens S7). Die Zusatzkomponenten (Ultraschallmodul und Feuchtwerk) werden durch ein untergeordnetes Automatisierungskonzept gesteuert (National Instruments (NIDAQ) – im Weiteren als Steuerung bezeichnet).

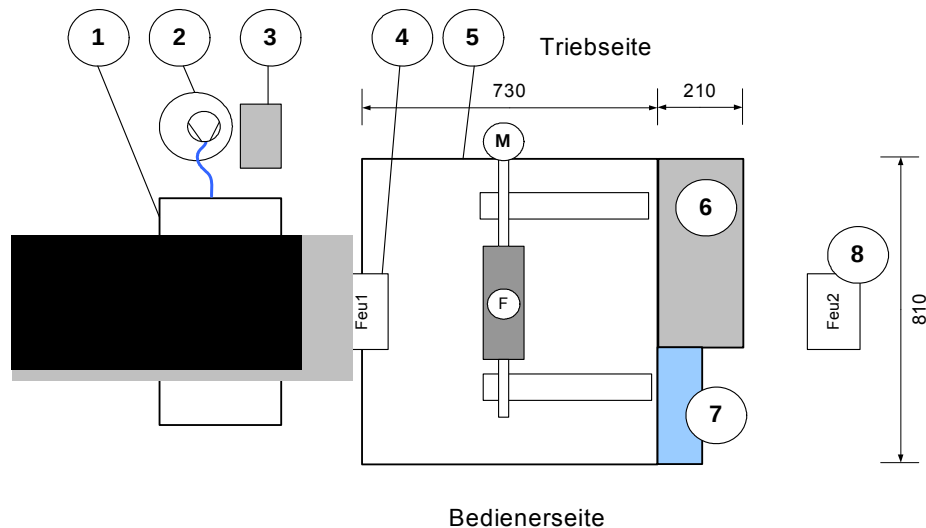


Abbildung 2: Bahnlauf-Module des Glättprojektes (Schematische Darstellung)

Die folgende Tabelle fasst die wesentlichen Bahnlaufparameter der Anlage zusammen:

Tabelle 1: Bahnlaufparameter

| Parameter                                                             | Ausprägung                                    |
|-----------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| Geschwindigkeit (v)                                                   | 0,1...120 m/min                               |
| Bahnbreite (b)                                                        | 500 mm; (350 mm bei den Ultraschallversuchen) |
| Rollendurchmesser (d)                                                 | bis 650 mm                                    |
| Bahnzug ( $F_Z$ )                                                     | 5...1000 N                                    |
| Ultraschallgenerator ( $P_{US}$ )                                     | maximal 4.000 W, 20 kHz                       |
| Linienlast Walzenpaarung ( $F_L$ )<br>(Ultraschallwalze – Gegenwalze) | 0...5 N/mm                                    |

## 2.2 Umsetzung

### Feuchtwerk

Zum Feuchtwerk gehören das mechanische Grundelement, ein Wasserreservoir sowie ein Schaltschrank. Um die zu befeuchtende Papierbahn nicht unnötig mechanisch zu belasten, wird das Feuchtwasser aufgesprüht. In erster Ausführung befanden sich zur Papierlaufrichtung sechs über Magnetventile einzeln zu schaltende Düsen, deren Sprühkegel sich überlappten. Das Zu- und Abschalten der einzelnen Düsen erfolgt direkt durch die Steuerung. Im weiteren Verlauf des Projektes wurden die sechs Düsen durch eine Mehrstoffdüse (Wasser+Luf) ersetzt, die einen feineren Flüssigkeitsnebel erzeugte.

Versorgt wird das Feuchtwerk durch ein Wasserreservoir (ca. 30 l). Zur feinfühligsten Dosierung des Durchflusses wird die Pumpe über einen Frequenzumrichter geregelt.

### Feuchtemessung (1/2)

Beide Feuchtemesssysteme sind baugleich (MW3400, TEWS-Elektronik, Hamburg) und basieren auf der Auswertung eines der Gutfeuchte proportionalen Mikrowellensignals. Die Messwerte werden als Analogwerte auf die Steuerung aufgeschaltet. Der Sensor zur Messung der Eingangsfeuchte ist direkt an das Ultraschallmodul montiert, die Messung der Ausgangsfeuchte erfolgt örtlich getrennt.

## Ultraschallsystem

Das Ultraschallsystem besteht aus einem Generator (Fa. Herrmann, 4.000 W, 20 kHz) und einem rotierendem Sonotrodensystem. Die Gegenwalze befindet sich in der beschriebenen Anordnung oberhalb der Ultraschallwalze (s. **Abbildung 3**).

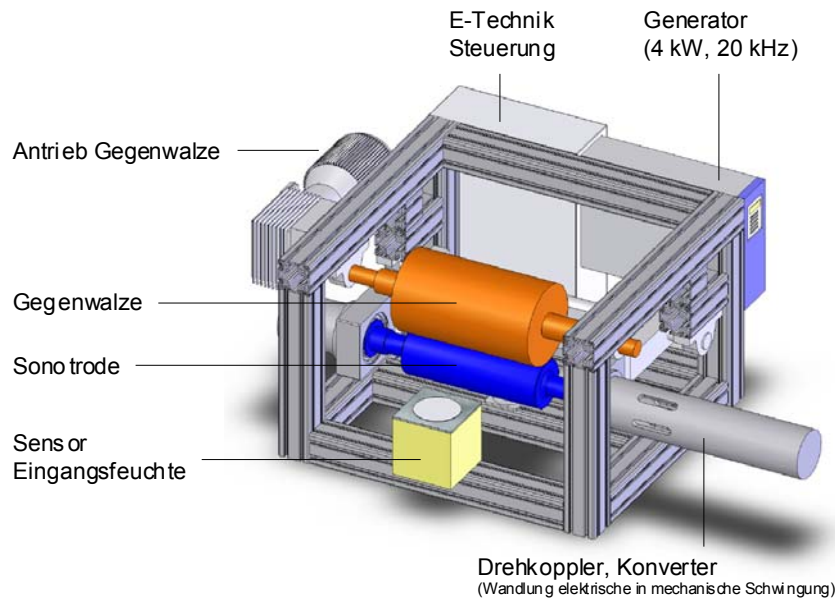


Abbildung 3: Schematische Darstellung des Ultraschallmoduls

Um ein Überhitzen des Konverters zu verhindern, wird dieser durch Anblasen von Druckluft, die durch ein 4-stufiges Filtersystem aufbereitet wird, gekühlt.

## Gegenwalze

Gegenwalze und Ultraschallwalze werden mittels eines Pneumatikzylinder aneinander gepresst. Die Druckregelung erfolgt durch das Betätigen eines Handventils (proportional). Die Gegenwalze wird zur Überwindung von Trägheitsmomenten durch einen Getriebemotor und Frequenzumrichter zusätzlich angetrieben. Die Einstellung von Drehzahlsollwert, Drehrichtung sowie die Motorenfreigabe erfolgen durch die Steuerung.

## Kraftmessung

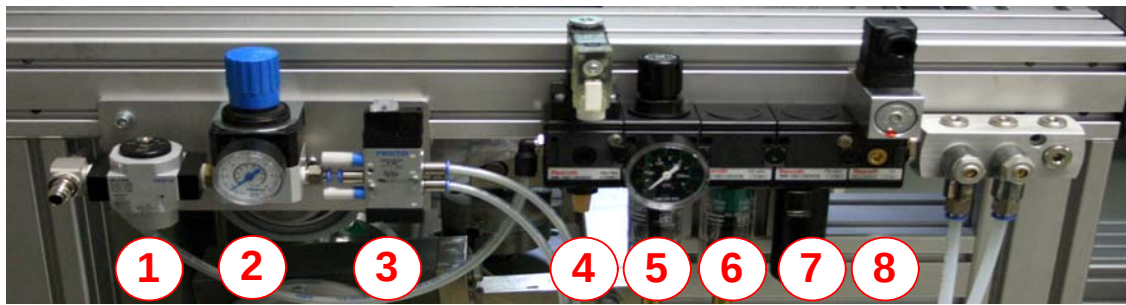
Zur Protokollierung der Versuchsbedingungen wird die Anpresskraft gemessen und am Messrechner dargestellt.

## Pneumatisches Anpressen der Walzenpaarung

Am Ultraschallmodul wird Druckluft zum Anstellen der Sonotrode gegen die Gegenwalze sowie zur Kühlung des Ultraschallkonverters benötigt. Die Druckluftversorgung erfolgt durch das in den Versuchsräumen zur Verfügung stehende Druckluftnetz (6 bar).

**Abbildung 4** zeigt die installierten Pneumatikkomponenten.

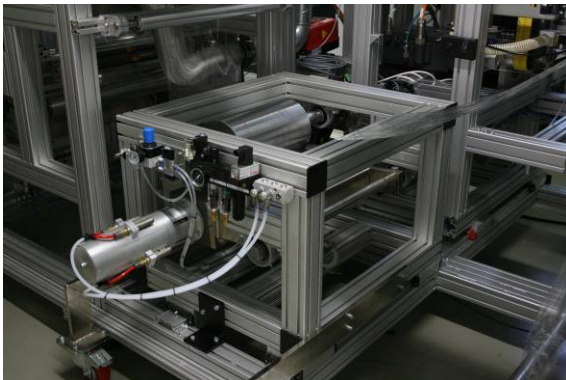
Links neben (1) befindet sich der Hauptanschlussstutzen mit Bypassabzweigung. Die Komponenten (1), (2), (3) steuern das Anpressen der Walzen. Die Elemente (4)-(8) dienen der Kühlluftversorgung des Konverters.



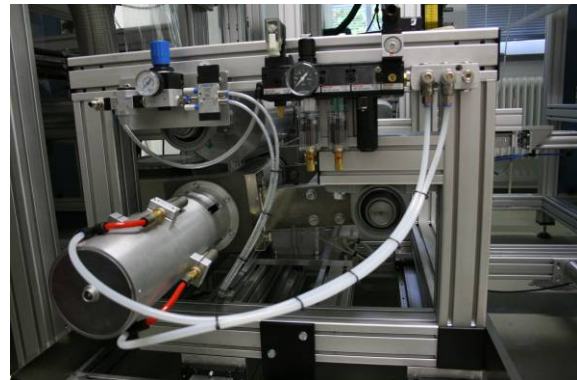
- 1 Drossel (Anstellgeschwindigkeit)
- 2 Anpressdruck (Walzen)
- 3 Magnetventil (Walze anstellen / abschwenken)
- 4 Magnetventil Kühlluft
- 5 Druckminderer Kühlluft
- 6 Filterstufe
- 7 Filterstufe
- 8 Druckwächter

Abbildung 4: Pneumatikbank am Ultraschallmodul

Die folgende Abbildung 5 (oben) zeigt das Ultraschallmodul im eingebauten Zustand. In den beiden unteren Darstellungen sind einer der beiden Feuchtemesssensoren sowie die Kraftmesseinrichtung dargestellt.



Gesamtansicht US-Modul



Sonotrode und Pneumatik



Feuchtemessung



Kraftmessung

Abbildung 5: Detailaufnahmen am Ultraschall-Bahnlaufmodul

## Bedienung

Die Interaktion mit der Versuchsanlage erfolgt an zwei Computerarbeitsplätzen. Vom Platz 1 aus wird der Bahnlauf kontrolliert. Der zweite Platz dient der Steuerung des Ultraschallmoduls und bietet darüber hinaus zusätzliche Möglichkeiten zur Messwerterfassung. **Abbildung 6** zeigt die Bedienoberfläche des zweiten Computerarbeitsplatzes. Die Anzeigen und Bedienungen sind hierbei wie folgt gegliedert:

- 1 Steuerung der Gegenwalze (Starten und Anstellen)
- 2 Kühlluft und Generator EIN / AUS
- 3 Weitere Bedienelemente (z.B. Anlage nach Abfahrplan Stillsetzen)
- 4 Diagramm Bahngeschwindigkeit
- 5 Diagramm und numerische Anzeige der Bahnzugregelung
- 6 Bahnzugsteuerung
- 7 Diagramm und numerische Anzeige der Ein- und Ausgangsfeuchte
- 8 Feuchtwerksteuerung

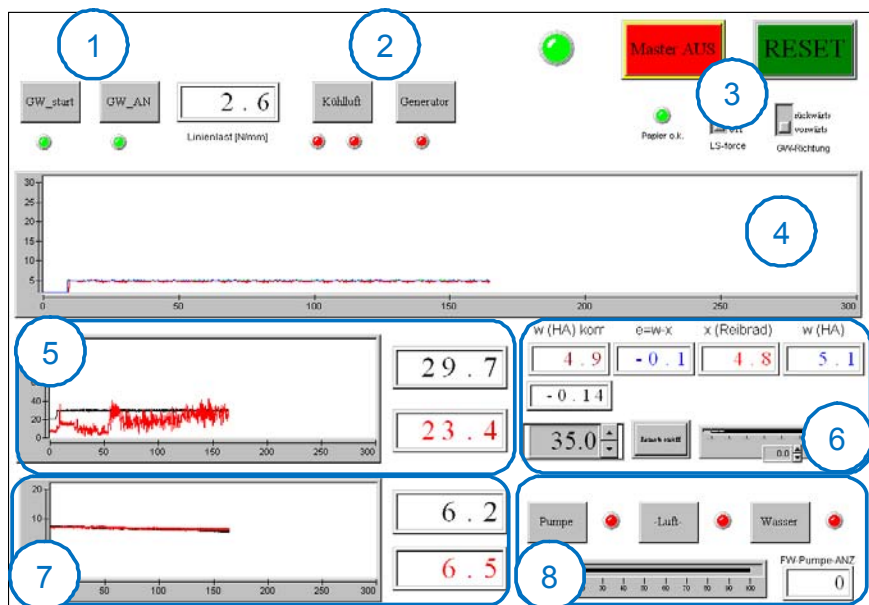


Abbildung 6: Bedienbildschirm

### 3 Problemfälle und Lösungen

#### 3.1 Planparallelität und Zylindrizität der Walzen im Ultraschallbetrieb (Resonanzproblem)

In Abbildung 7 sind vier, jeweils auf die Ursprungsdicke der Probe bezogene Dicken-Querprofile nach unterschiedlicher Behandlung dargestellt.

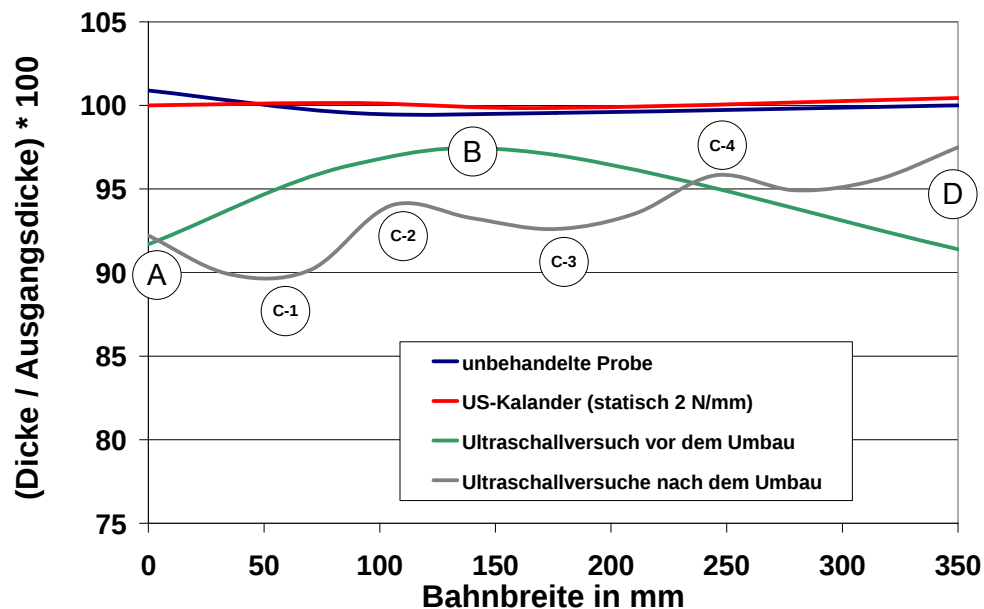


Abbildung 7: Querprofilproblematik der Bahnlaufversuchsanlage

Die blaue Kurve das Dickenprofil eines unbehandelten, industriell gefertigten Musters – es schwankt herstellungsbedingt nur um wenige Prozent. Gleiches gilt für ein Muster, welches durch den geschlossenen Walzenspalt bei nicht aktivierter Sonotrode gefahren wurde (Versuch US-Kalander (statisch 2 N/mm) – rote Kurve).

Die grüne, konvex verlaufende Kurve zeigt das Dickenprofil des gleichen Papiers nach einer Ultraschallbehandlung. Beide Ränder (A, D) wurden offenbar deutlich stärker verdichtet als der Mittelbereich (B) der Probe.

Die Ursache hierfür war zunächst unklar. Eine von der Zylinderform abweichende Geometrie konnte jedoch ausgeschlossen werden, da das Problem lediglich beim Ultraschallbetrieb, nicht aber im statischen Lastfall (rote Kurve) auftrat.

Eine mögliche Ursache dieses Effekts wurde in dem Umstand gesehen, dass die Ultraschallwalze über die sich zwischen den beiden Walzen befindliche Papierbahn an die Gegenwalze mechanisch ankoppelt. Im ungünstigsten Fall wären deshalb eine Anregung der Gegenwalze bei 20 kHz und somit ein Mitschwingen nicht auszuschließen. Dies würde sich in einem weniger ausgeprägten Behandlungsergebnis in Kombination mit einem verzerrten Querprofilergbnis niederschlagen. Tatsächlich konnte mittels numerischer Simulation (Software: ANSYS™) dieser Sonderfall nachgewiesen werden.

Als einfache Abhilfemaßnahme wurde das Aufbringen zusätzlicher Massen geeigneter Größe auf die Gegenwalze in Erwägung gezogen, die deren Resonanzfrequenz in einen Bereich möglichst weit entfernt von 20 kHz, verschieben würden. Die hierfür erforderlichen Massen wurden ebenfalls durch eine numerische Simulation ermittelt.

Das Ergebnis der Simulationen ist ausgehend vom CAD-Modell (oben), über die Darstellung der Gesamtverformung der Walze bei 20 kHz (mittig) und des Frequenzganges (unten) in Abbildung 10 dargestellt. Die gefundenen Ergebnisse wurden durch die Montage von zwei jeweils 4 kg schweren Scheiben auf die Stirnflächen der Gegenwalze umgesetzt.

Die graue Kurve in Abbildung 7 zeigt das Querprofil eines mit Ultraschall behandelten Papiers nach dem Anbringen dieser Massestücke. Idealerweise müssten nun die Punkte A und D auf gleichem Niveau liegen. Tatsächlich wird auf der Seite A etwas stärker gedrückt als auf Seite D. In Absolutwerten ausgedrückt beträgt diese Abweichung etwa  $7\text{ }\mu\text{m}$  und kann aufgrund maschinenbaulicher Limitierung an dieser Anlage ohne erheblichen Aufwand nicht wirklich verbessert werden.

Erwartungsgemäß ergab sich nun aber das Phänomen einer überlagerten Oszillation im Querprofil. Die Minima und Maxima werden durch die Punkte C-1 bis C-4 in Abb. 7 gekennzeichnet.

Zur Erklärung des Phänomens muss Abbildung 8 in die Überlegungen einbezogen werden. Dort sind die Lage der Schwingungsknoten (Amplitude 0) und der Schwingungsbäuche (maximale Amplitude) dargestellt. Die Ausprägung eines solchen Interferenzmusters im Schwingensystem ergibt sich als Resultat einer stehenden Welle in der Sonotrode im Ultraschallbetrieb. Diese ist physikalisch begründet und damit (leider) zu akzeptieren,

Für eine gleichmäßige Bahnbehandlung ist dieser, in der Physik des Ultraschalls begründete Effekt, zweifelsfrei von Nachteil.

Durch die Kaskadierung mit einer zweiten, axial um  $\lambda/4$  versetzten Sonotrode, kann der Effekt vermindert und sicherlich bis zur Akzeptanz des Gesamtprofils weitestgehend aufgehoben werden Abbildung 9.

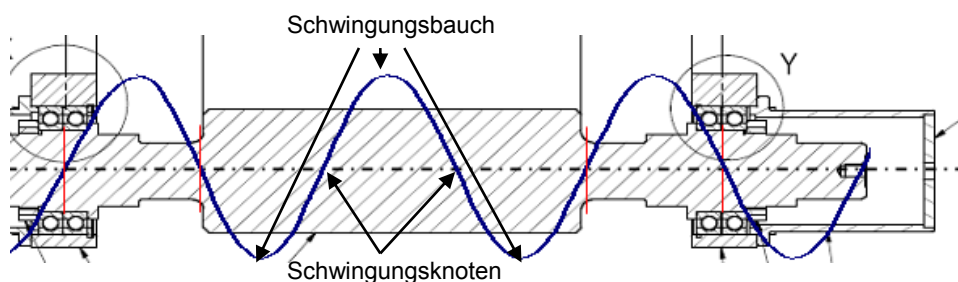


Abbildung 8: Verteilung der Schwingungsknoten und Schwingungsbäuche über der Bahnbreite

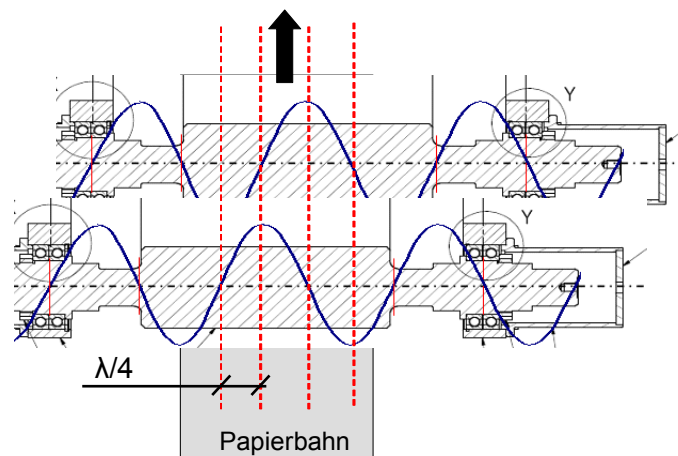


Abbildung 9: Mögliche Kaskadierung zweier Sonotrode zur Beseitigung des oszillierenden Querprofils

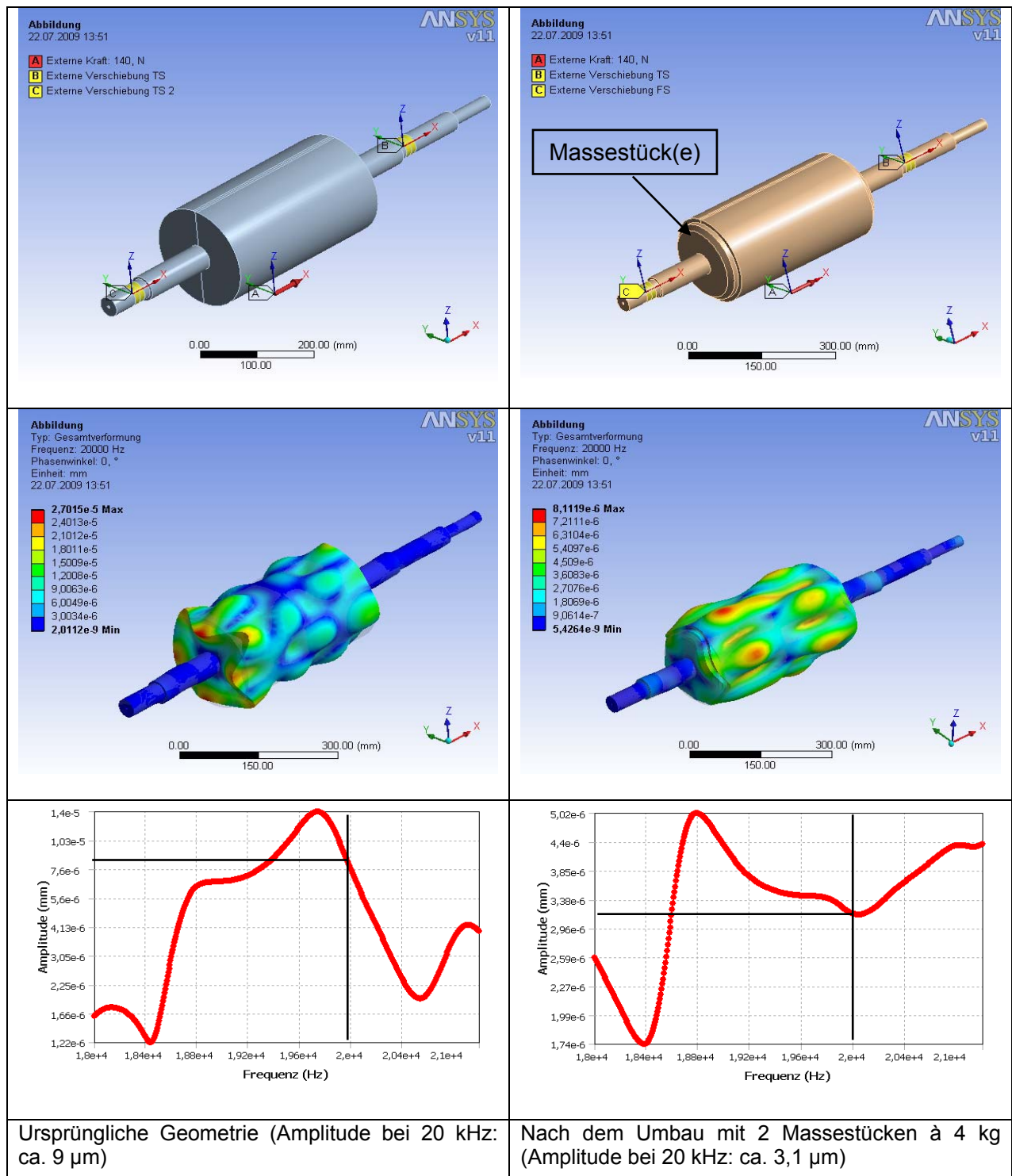


Abbildung 10: Numerische Schwingungsanalyse der Gegenwalze

Durch das Anbringen der Massestücke konnte das Schwingverhalten des Gesamtsystems erheblich verbessert werden. Die zeit- und kostensparende Voraussetzung für diesen Umbau lieferte die numerische Simulation der Einzelbauteile. Diese erfolgte mit freundlicher Unterstützung der Gebr. Bellmer GmbH Maschinenfabrik (Niefern-Öschelbronn).

### **3.2 Zylindrizität Gegenwalze**

Ursprünglich war die Gegenwalze zum Korrosionsschutz mit einem dünnen Chrommantel überzogen. Bei der Fertigung solcher Chromschichten ergeben sich oft Ränder mit stärkeren Chromschichten, was insgesamt wiederum zu einer ungleichmäßigen Härteverteilung in der Oberfläche des Bauteils führt. Mit Unterstützung der PAMA Papiermaschinen GmbH Freiberg wurde wegen der bereits beschriebenen ungleichmäßigen Bahnbehandlung – die Behandlung erfolgte an den Rändern stärker als im Mittelbereich – zunächst die Dicke der Chromschicht lokal bestimmt und anschließend komplett unter Wiederherstellung der exakten Zylindrizität der Walze entfernt.

Diese Maßnahme lieferte ebenfalls eine deutliche Verbesserung des Querprofils der behandelten Papierbahnen.

### **3.3 Bahnzugregelung**

Die vorhandene Versuchsanlage bedient sich zur Bahnspannungsregelung einem Antriebskonzeptes, innerhalb dessen die Motoren der Auf- und Abrollstationen im Verhältnis zu je einem weiteren Antrieb (dem Vor- bzw. Hauptabzug) geregelt werden. Darüber hinaus werden Vor- und Hauptabzug mit einer von der gewünschten Bahnspannung abhängigen Geschwindigkeitsdifferenz betrieben.

Das Ultraschallmodul ist genau zwischen Vor- und Hauptabzug integriert und bildet somit bei geschlossenem Walzenspalt eine Störgröße für das gesamte Regelsystem der Anlage. Da das Ultraschallmodul weiterhin mit einer eignen Steuerung ausgerüstet ist, bestand die Aufgabe, beide Automatisierungssysteme so miteinander zu vernetzen, dass der Antrieb der Gegenwalze im Ultraschallmodul unter Beibehaltung einer gleichen Bahnspannung mit den Antrieben der Gesamtanlage drehzahlsynchronisiert betrieben werden kann.

Hierfür wurde ein Konzept eines mehrschleifigen Regelkreises entwickelt, welches neben den Drehzahlen des Vor- und Hauptabzug auch Bahnspannungsmesswerte in seine Rechenalgorithmen integriert. Die programmtechnische Realisierung erfolgte in der Steuerungssoftware DIADEM 12 des Ultraschallmoduls.

Die Entwicklung des Konzeptes sowie der Aufwand für die Parametrisierung der einzelnen Reglerbausteine waren reglungstechnisch sehr anspruchsvoll und zeitintensiv.

### **3.4 Feuchtwerk**

Es ist bekannt, dass Feuchtigkeit und Wärme einen wesentlichen Einfluss auf das Plastifizierungsverhalten von Papieren besitzen. Aus diesem Grund wurde unmittelbar vor dem Ultraschallmodul ein konstruktiv relativ einfaches Feuchtwerk integriert. Die erste Inbetriebnahme des Feuchtwerkes ergab keine gleichmäßige Befeuchtung der Bahn. Auch der Umbau auf ein Zweistoffdüsensystem (Wasser und Luft werden in der Düse gemischt) wies bezüglich der Gleichmäßigkeit der Feuchteerhöhung kein wirklich befriedigendes Ergebnis auf.

Dies wurde erst nach dem Einbau eines Dampfbefeuchter erreicht, der zukünftig das Feuchtwerk ersetzen soll. Das neue Konzept lässt sich jedoch nicht mehr in das bestehende Konzept integrieren und ist daher als Ausblick auf zukünftige Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zu verstehen.

## 4 Ergebnisse

### 4.1 Übersicht über die im Projekt durchgeführten Versuche

Um die Erfüllung der primären Projektaufgabe, die Entwicklung einer Versuchsanlage zur kontinuierlichen Behandlung von Papierbahnen mittels Ultraschall, zu prüfen, mussten konsequenter Weise unterschiedliche Papiere behandelt und das Behandlungsergebnis auf Reproduzierbarkeit und Glättergebnis untersucht werden.

In Kapitel 3 wurden bereits einige der dabei auftretenden Problemfälle sowie die Schritte zu deren Lösungen diskutiert. Hieraus ergibt sich eine Zweiteilung der Versuchsergebnisse. Das sind zum einen die Ergebnisse vor dem in Kapitel 3 beschriebenen Umbau (Food & Beverage, Overlaypapier) und zum anderen die nach diesem Umbau (SC-Papier, Streichrohpapier, gestrichenes Papier, stärkegeleimtes Papier) ermittelten Ergebnisse.

Die bei der Interpretation dieser Ergebnisse zu berücksichtigenden Aspekte werden in dem jeweiligen Unterkapitel beschrieben.

### 4.2 Food & Beverage (Kaffeefilter 22 g/m<sup>2</sup>)

#### 4.2.1 Probencharakterisierung

Tabelle 2: Probenspezifikation Food&Beverage (22 g/m<sup>2</sup>)

| Parameter                                 | Wert            |
|-------------------------------------------|-----------------|
| Dicke (10 lagig) $\mu\text{m}$            | ca. 70          |
| Bruchkraft in N (MD/CD)                   | ca. 17,5 / 5,35 |
| Flächenbezogene Masse in g/m <sup>2</sup> | 21,9            |

#### 4.2.2 Versuchsplan

Die Versuchsplanung erfolgte nach den Methoden der statistischen Versuchsplanung. Zur Erfassung quadratischer Zusammenhänge zwischen den einzelnen Einflussparametern und der Zielgröße (Glätte) wurde jede Einflussgröße auf drei Niveaus variiert. Hieraus würden sich normalerweise 27 Versuchspunkte ergeben. Durch Optimierung des Planes konnte der Versuchsumfang auf 9 Versuche unter Ultraschall sowie drei Versuche ohne Ultraschall aber unter Variation der statischen Last reduziert werden. Die folgende Tabelle stellt den Versuchsplan sowie die Realisierung bezüglich der Glätte Bendtsen dar.

Tabelle 3: Versuchsplan Rotierende Sonotrode

| Nr.         | Linienlast<br>[N/mm] | Geschwindigkeit<br>[m/min] | Amplitude<br>[%] | Glätte Bendtsen<br>[ml/min] |
|-------------|----------------------|----------------------------|------------------|-----------------------------|
| V1          | 1                    | 3,0                        | 70               | 1874                        |
| V2          | 1                    | 6,5                        | 100              | 1983                        |
| V3          | 1                    | 10,0                       | 85               | 2025                        |
| V4          | 2                    | 3,0                        | 100              | 1112                        |
| V5          | 2                    | 6,5                        | 85               | 1495                        |
| V6          | 2                    | 10,0                       | 70               | 1663                        |
| V7          | 3                    | 3,0                        | 85               | 1408                        |
| V8          | 3                    | 6,5                        | 70               | 638                         |
| V9          | 3                    | 10,0                       | 100              | 830                         |
| 0.1         | 1                    | 3,0                        | 0                | 2197                        |
| 0.2         | 2                    | 3,0                        | 0                | 1990                        |
| 0.3         | 3                    | 3,0                        | 0                | 1847                        |
| unbehandelt |                      |                            |                  | 2300                        |

Die Versuche erfolgten im Normklima 23°C und 50 % relative Luftfeuchtigkeit. Dabei hatte das Papier eine Gleichgewichtsfeuchte von 5,6 %. Die Bahnzugkraft lag für alle Versuche bei 5 N.

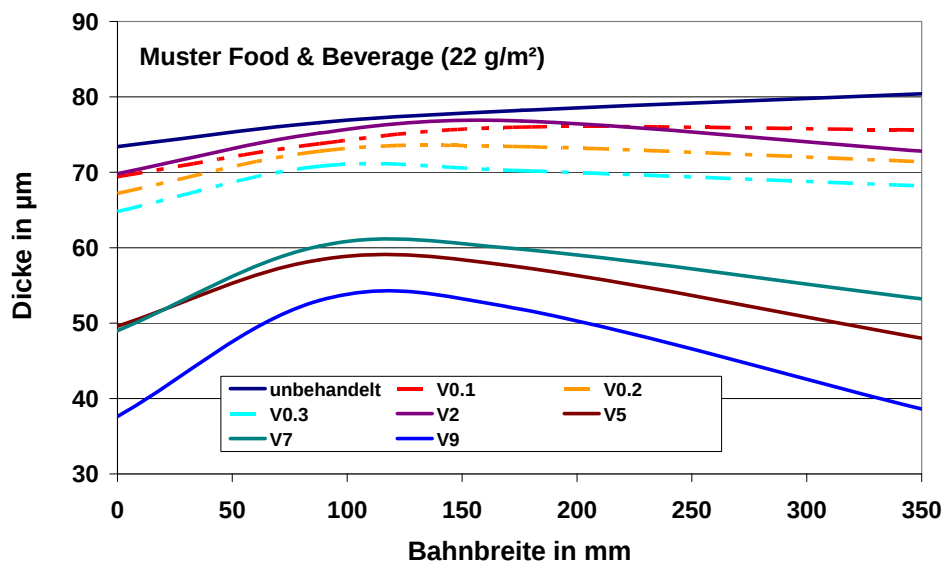
## 4.2.3 Ergebnisse

### 4.2.3.1 Dicke

Abbildung 11 zeigt die Ergebnisse für die Probendicke für ausgewählte Versuchspunkte über der Bahnbreite. Es werden zwei Phänomene deutlich:

- Eine Beschallung mit einer Linienlast von 1 N/mm führt offenbar zu keiner nennenswerten Verdichtung des Materials. Die Dickenreduktion liegt in der gleichen Größenordnung, die bei einer rein statischen Last zu erwarten gewesen wäre.
- Für höhere Linienlasten (V4-V9) ergeben sich die dargestellten konvexen Verläufe. An den Rändern der beiden Walzen ergeben sich demnach Bereiche stärkerer Dickenreduktion.

Als Konsequenz aus den konvexen Dickenverläufen - qualitativ ergeben sich diese Verhältnisse auch für die Glättewerte - wurde entschieden für die weiteren Auswertungen die Randbereiche um je 88 mm zu beschneiden. Es ergab sich demnach ein 174 mm breiter Mittelstreifen für die Auswertung.



Entwicklung der Dicke über der Bahnbreite für ausgesuchte Versuche (Legende mit Versuchsbedingungen siehe Tabelle 3)

Abbildung 11: Dicke-Querprofile (Food&Beverage)

In Abbildung 12 sind die einzelnen Dickemesswerte zusammengefasst. Unter rein statischer Last verhält sich das Papier erwartungsgemäß: eine Lasterhöhung hat eine Dickenreduktion zur Folge.

Die Versuche mit kombiniertem Ultraschall und einer Linienlast erzeugen noch keine Dickenreduktion. Sie scheinen das Papier tatsächlich weniger zu komprimieren. Die Ursache hierfür kann in einem Luftpolster gesehen werden, welches sich aufgrund der Radialschwingungen der Sonotrode im Walzenspalt aufbaut und die beiden Walzen gegeneinander abstützt. Die Bahn „schwebt“ zwischen zwei Luftpolstern.

Ab einer Linienlast von 2 N/mm kann dieses Luftpolstern offenbar soweit komprimiert werden, dass es zu einem tatsächlichen Behandlungseffekt an der Bahn kommt.

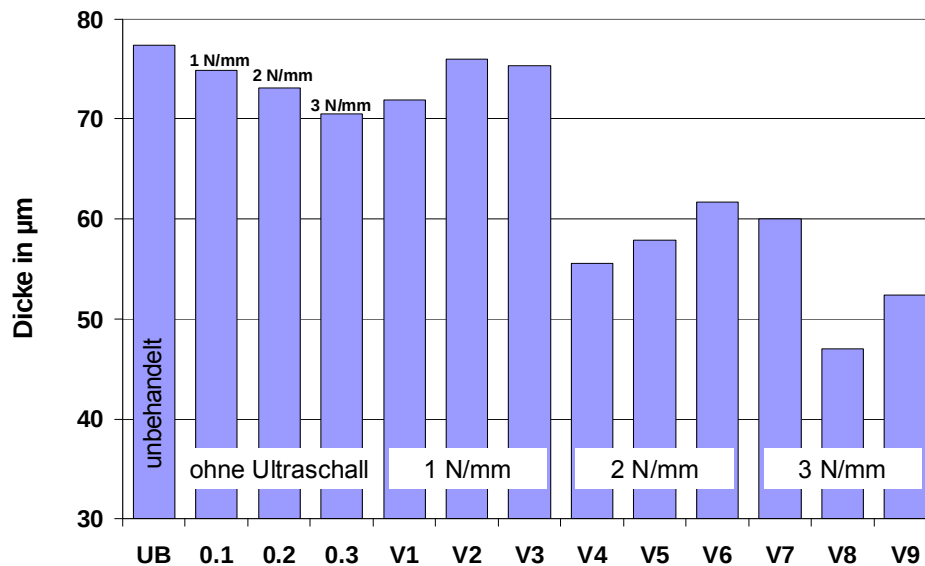


Abbildung 12: Dickemesswerte der einzelnen Versuchsrealisierungen (Food & Beverage)

Die Versuche ergaben folgende Zusammenhänge für die Dickenreduktion:

- Die Dickenreduktion ist umso höher, je höher die statische Last ist.
- Mit steigender Geschwindigkeit nimmt die Dickenreduktion bei einer Ultraschallbehandlung ab.

#### 4.2.3.2 Glätte

Abbildung 13 stellt die Glättemesswerte nach Bendtsen der einzelnen Versuchspunkte zusammen. Die Berechnung der Mittelwerte erfolgte – aus den oben angegebenen Gründen – nur an einen 174 mm breiten Mittelstreifen.

Ebenso wie bei den Dickemesswerten wird deutlich, dass eine Linienlast von 1 N/mm nicht ausreicht, um die Bahn spürbar zu behandeln. Erst ab einer Linienlast von 2 N/mm wird ein signifikanter Glättengewinn beobachtet.

Während bei einer Linienlast von 2 N/mm der Einfluss der Bahngeschwindigkeit und der Amplitude noch sehr gering ist, kommt es bei der höchsten Linienlast zu einer deutlichen Beeinflussung der Messergebnisse durch die Variation der beiden weiteren Prozessparameter.

Für das Muster Café ergibt sich für den Versuchspunkt V8 die größte Glättesteigerung. Diese beträgt, bezogen auf den Versuch mit einer statischen Linienlast von 3 N/mm, 1209 ml/min oder als relative Steigerung ausgedrückt, einem Gewinn von 300 %!. Dieser Effekt ist ausschließlich dem Ultraschall zuzuschreiben.

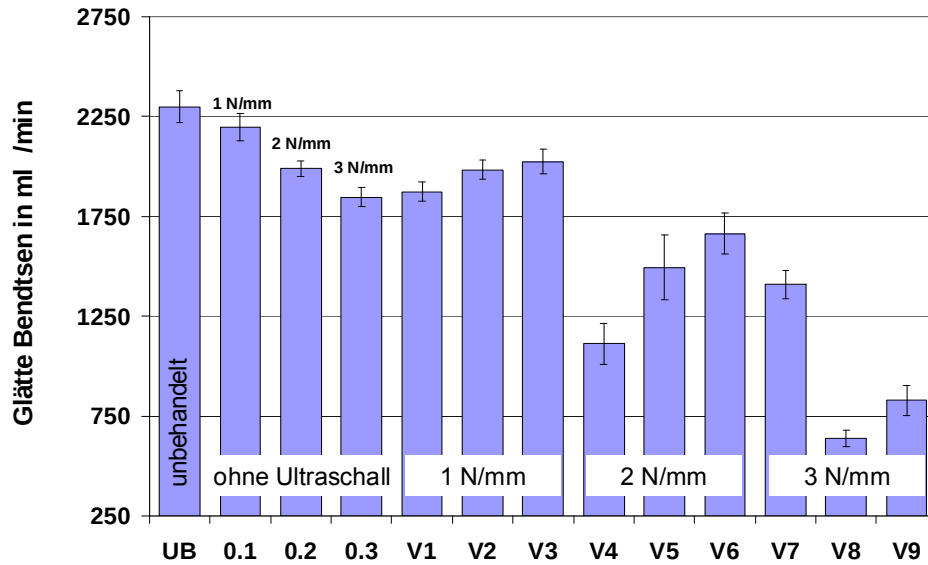


Abbildung 13: Glättemesswerte der einzelnen Versuchsrealisierungen (Food&Beverage)

Die folgende Abbildung 14 zeigt für alle Versuchspunkte die erreichte Glättesteigerung über dem damit einhergehenden Dickeverlust.

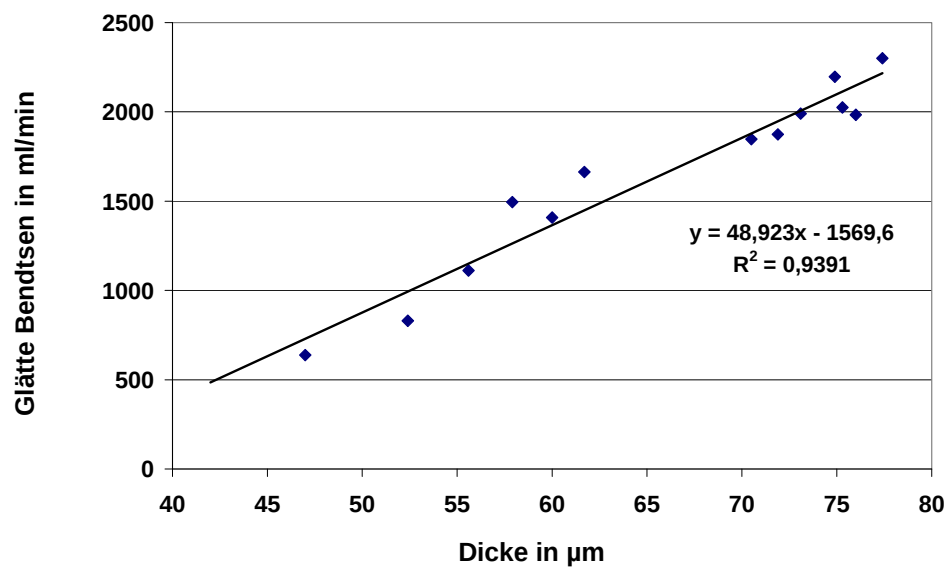


Abbildung 14: Glätte-Dicke-Korrelation nach der Ultraschallbehandlung (Food & Beverage)

### Statistische Auswertung der Glätte

Die Methoden der statistischen Versuchsplanung und –auswertung erlauben es, den Zusammenhang zwischen der Zielgröße (Glätte) und als relevant betrachteten Einflussgrößen mittels eines (nicht dimensionsrichtigen) Polynoms zu beschreiben. Für die Einflüsse von Linienlast, Bahngeschwindigkeit und Schwingungsamplitude auf die Glätte wurde auf diese Weise das folgende Polynom gefunden:

Tabelle 4: Regressionskoeffizienten

|       | Parameter                      | Koeffizient | Wert    |
|-------|--------------------------------|-------------|---------|
|       | Konstante                      | b0          | 2838,81 |
| $x_1$ | Linienlast (linear)            | b1          | -330,1  |
| $x_2$ | Geschwindigkeit (linear)       | b2          | -174,47 |
|       | Linienlast (quadratisch)       | b11         | 31,67   |
|       | Geschwindigkeit (quadratisch)  | b22         | 17,14   |
|       | Wechselwirkung $x_1$ und $x_2$ | b12         | 9,76    |
|       | Wechselwirkung $x_1$ und $x_3$ | b13         | -6,75   |
| $x_3$ | Amplitude (linear)             | b3          | -3,86   |
|       | Amplitude (quadratisch)        | b33         | 0,086   |

$$\text{Glätte} = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_{11} \cdot x_1^2 + b_{22} \cdot x_2^2 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + b_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + b_3 \cdot x_3 + b_{33} \cdot x_3^2$$

Denkbare Wechselwirkungen und direkte Abhängigkeiten welche nicht im oben genannten Polynomansatz auftauchen, konnten nach einer durchgeführten Signifikanzanalyse verworfen werden.

### Paretodiagramm

Das folgende Paretodiagramm stellt die einzelnen Effekte (normiert) mit ihrer Wertigkeit auf das Schätzergebnis, also schlussendlich auf die Prognose der Glättewerte dar.

Die Einflüsse der Linienlast (quadratisch) und der kombinierte Einfluss von Linienlast und Bahngeschwindigkeit erfüllen das Konfidenzkriterium von  $p = 0,05$  nicht ganz, sollten aber im Polynomansatz verbleiben, weil sie die Übereinstimmung mit den gemessenen Werten verbessern.

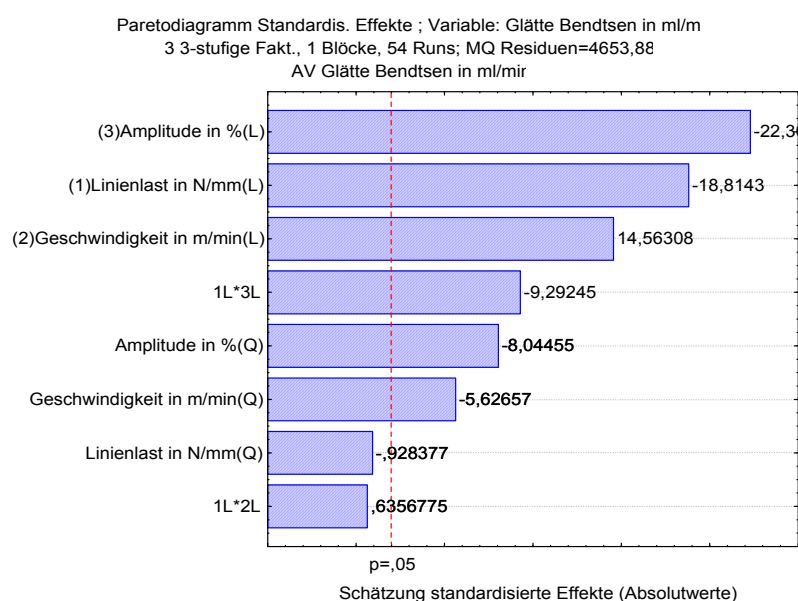
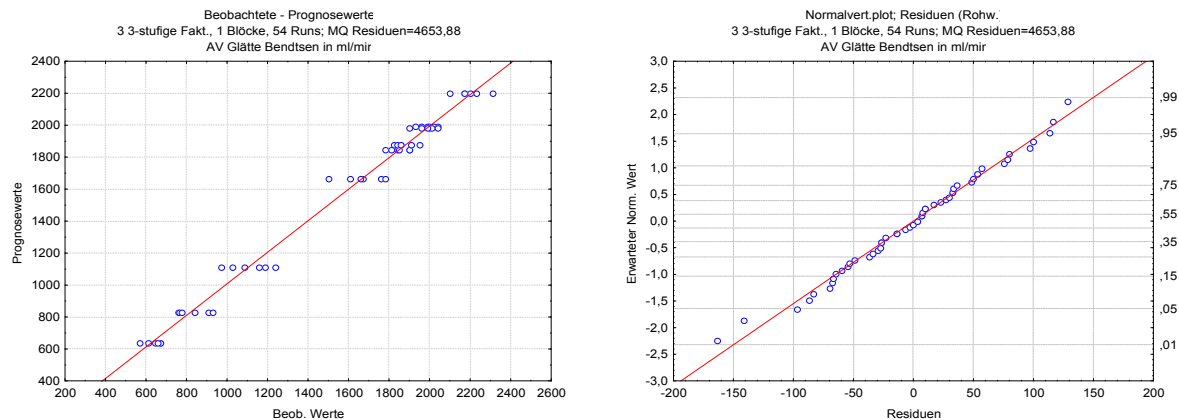


Abbildung 15: Paretodiagramm der Einflussfaktoren (Food & Beverage)

## Pognowsewerte und Residuen

Die nachstehende Abbildung 16 zeigt links den Zusammenhang zwischen beobachteten und prognostizierten Werten. Diese Darstellung dient der visuellen Qualitätsüberprüfung des Schätzpolynoms. Der berechnete Wert für die Korrelation beträgt  $R = 98\%$ .

Auf der rechten Seite der Abbildung ist die Verteilung der Residuen dargestellt. Diese sind normalverteilt.



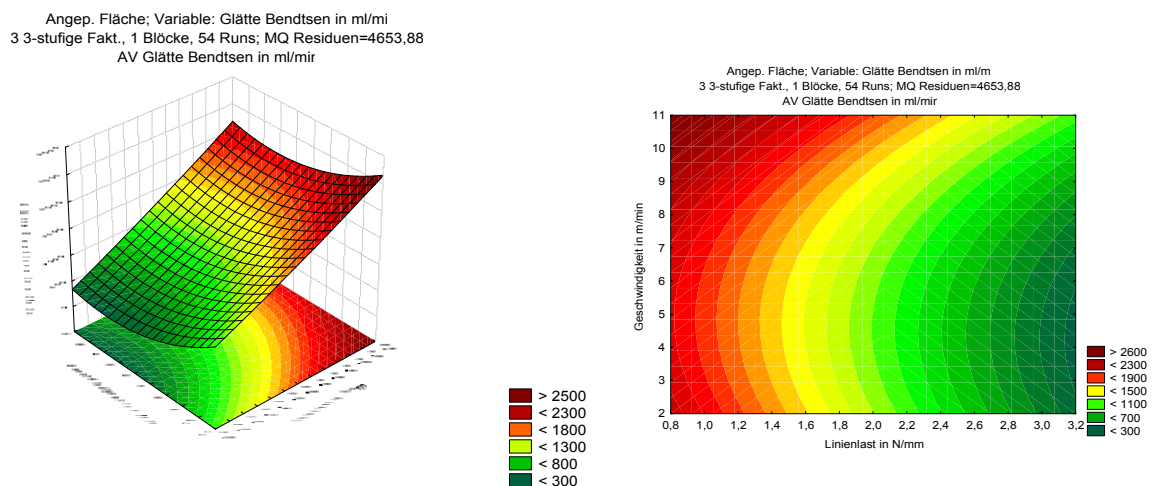
**Beobachtete Versuchswerte vs. Prognosewerte (links) sowie Normalverteilungsplot der Residuen (rechts)**

Abbildung 16: Statistische Analyse des Zielpolynoms Glätte (Food & Beverage)

Die folgenden Abbildungen zeigen Polynom- und Konturplots für die Entwicklung der Glätte nach Bendtsen über den Prozessparametern:

- Linienlast,
- Bahngeschwindigkeit und
- Schwingungsamplitude

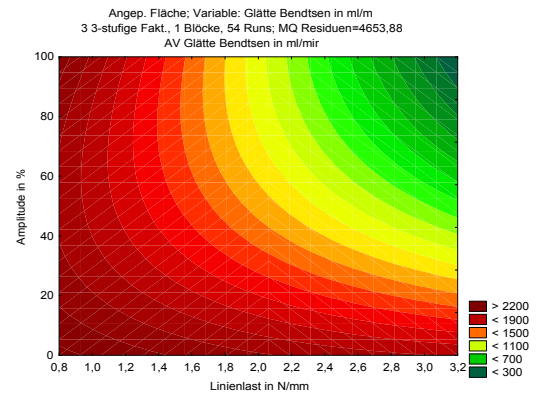
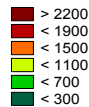
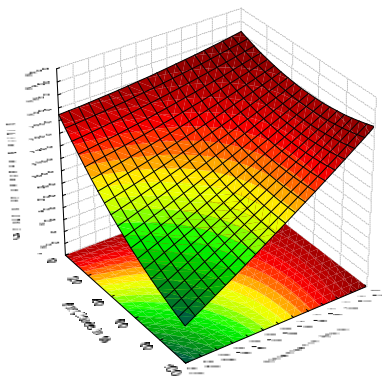
## Polynom- und Konturplots



**Amplitude: 85 %**

Abbildung 17: Polynomplot Glätte über Linienlast und Bahngeschwindigkeit

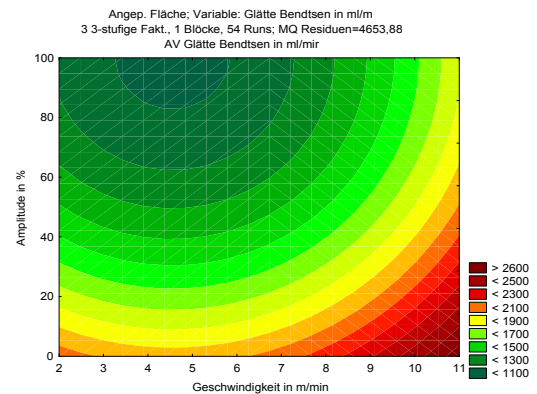
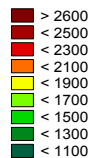
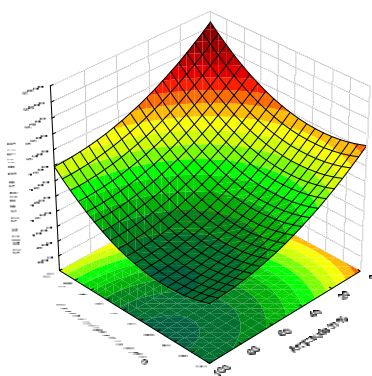
Angep. Fläche; Variable: Glätte Bendsen in ml/mi  
3 3-stufige Fakt., 1 Blöcke, 54 Runs; MQ Residuen=4653,88  
AV Glätte Bendsen in ml/mir



**Bahngeschwindigkeit 6,5 m/min**

Abbildung 18: Polynomplott Glätte über Amplitude und Linienlast

Angep. Fläche; Variable: Glätte Bendsen in ml/mi  
3 3-stufige Fakt., 1 Blöcke, 54 Runs; MQ Residuen=4653,88  
AV Glätte Bendsen in ml/mir



**Linienlast 3N/mm**

Abbildung 19: Polynomplott Glätte über Bahngeschwindigkeit und Amplitude

#### 4.2.4 Fazit

Mit der vorhandenen Bahnlaufversuchsanlage ist es möglich, dieses extrem leichtgewichtige Spezialpapier zu behandeln, wobei die Beeinflussung wie folgt zusammengefasst werden kann:

- die Linienlast zwischen Ultraschall- und Gegenwalze sollte mindestens 2 N/mm betragen,
- die Amplitude sollte möglichst hoch gewählt werden, wenn hohe Glättewerte angestrebt werden.
- eine Erhöhung der Bahngeschwindigkeit führt zu einer geringeren Verdichtung der Bahn.  
– zu erwarten ist jedoch, dass sich ab einer bestimmten Bahngeschwindigkeit negative Auswirkungen auf das Glätteergebnis einstellen.

### 4.3 Overlaypapier (24 g/m<sup>2</sup>)

#### 4.3.1 Probencharakterisierung

Tabelle 5: Probenspezifikation Overlaypapier (24 g/m<sup>2</sup>)

| Parameter                                 | Wert                  |
|-------------------------------------------|-----------------------|
| Dicke (Messung 10 lagig) $\mu\text{m}$    | ca. 80                |
| Bruchkraft in N                           | ca. 19                |
| Flächenbezogene Masse in g/m <sup>2</sup> | 24 $\pm$ 1            |
| Stapeldichte g/cm <sup>3</sup>            | ca. 0,31              |
| Rauhigkeit nach Bendtsen (OS / SS)        | 2900-3410 / 3140-3220 |

#### 4.3.2 Versuchsplan

Die Versuchsplanung erfolgte wiederum nach den Methoden der statistischen Versuchsplanung. Zur Erfassung quadratischer Zusammenhänge zwischen den einzelnen Einflussparametern und der Zielgröße (Glätte) wurde jede Einflussgröße auf drei Niveaus variiert. Hieraus würden sich normalerweise 27 Versuchspunkte ergeben. Durch Optimierung des Planes konnte der Versuchsumfang auf 9 Versuche unter Ultraschall sowie drei Versuche ohne Ultraschall aber unter Variation der statischen Last reduziert werden. Die folgende Tabelle stellt den Versuchsplan sowie die Ergebnisse bezüglich der Glätte Bendtsen dar.

Tabelle 6: Versuchsplan Rotierende Sonotrode

| Nr.         | Linienlast [N/mm] | Geschwindigkeit [m/min] | Amplitude [%] | Glätte Bendtsen [ml/min] |
|-------------|-------------------|-------------------------|---------------|--------------------------|
| V1          | 1                 | 3,0                     | 70            | 1775                     |
| V2          | 1                 | 6,5                     | 100           | 1782                     |
| V3          | 1                 | 10,0                    | 85            | 1863                     |
| V4          | 2                 | 3,0                     | 100           | 867                      |
| V5          | 2                 | 6,5                     | 85            | 843                      |
| V6          | 2                 | 10,0                    | 70            | 892                      |
| V7          | 3                 | 3,0                     | 85            | 627                      |
| V8          | 3                 | 6,5                     | 70            | 1106                     |
| V9          | 3                 | 10,0                    | 100           | 760                      |
| 0.1         | 1                 | 3,0                     | 0             | 2148                     |
| 0.2         | 2                 | 3,0                     | 0             | 1881                     |
| 0.3         | 3                 | 3,0                     | 0             | 1776                     |
| unbehandelt |                   |                         |               | 2292                     |

Die Versuche erfolgten im Normklima 23°C und 50 % relative Luftfeuchtigkeit. Dabei hatte das Papier eine Gleichgewichtsfeuchte von 6,6 %. Die Bahnzugkraft betrug jeweils 5 N.

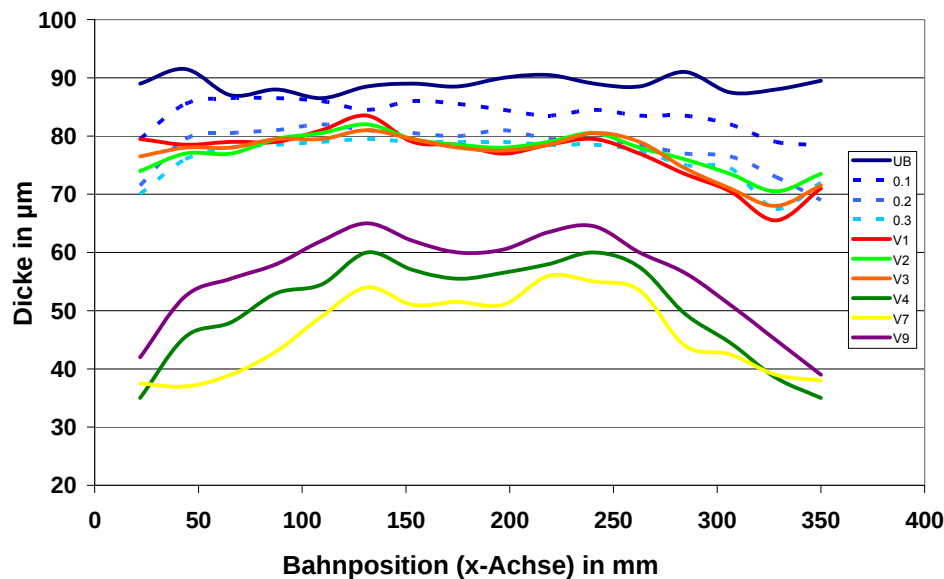
#### 4.3.3 Ergebnisse

##### 4.3.3.1 Dicke

Abbildung 11 zeigt die Probendicke für ausgewählte Versuchspunkte über der Bahnbreite. Es werden zwei Phänomene deutlich:

- Eine Beschallung mit einer Linienlast von 1 N/mm (Kurve 0.1) führt offenbar zu keiner nennenswerten Verdichtung des Materials. Die Dickenreduktion liegt in einer Größenordnung, die bei rein statischer Belastung zu erwarten gewesen wäre.
- Für höhere Linienlasten (V4-V9) ergeben sich die dargestellten konvexen Verläufe. An den Rändern der beiden Walzen ergeben sich demnach Bereiche stärkerer Kompression.

Als Konsequenz aus den konvexen Dickeverläufen - qualitativ ergeben sich diese Verhältnisse auch für die Glättewerte - wurde entschieden, für die weiteren Auswertungen die Randbereiche auf einer Breite von jeweils 88 mm von beiden Seiten abzdrehen. Für die Auswertung steht demnach ein 174 mm breiter Mittelstreifen zur Verfügung.



Entwicklung der Probendicke über der Bahnbreite für ausgesuchte Versuche (Legende mit den Versuchsbedingungen siehe Tabelle 6)

Abbildung 20: Dicke-Querprofile (Overlay)

In Abbildung 12 sind die ermittelten Dickemesswerte zusammengefasst. Ausgehend von der unbehandelten Probe kommt es bei den Versuchen mit 1 N/mm Linienlast (V1-V3) zu einer geringen Dickenabnahme von 10 µm, die sich in der Größenordnung der Dickenreduktionen aufgrund der statisch eingestellten Linienlasten bewegt. Eine Wirkung des Ultraschalls kann hier noch nicht festgestellt werden (vergleiche auch die Glättewerte). Erst bei einer Linienlast von 2 N/mm und eingeschaltetem Ultraschall kommt es zu einer spürbaren Dickenreduktion der Proben.

Der Versuchspunkt V7 ist derjenige mit der theoretisch größten Energieapplikation auf die Bahn. Hier vereinigen sich eine langsame Bahngeschwindigkeit, eine vergleichsweise hohe Amplitude und ein hoher Anpressdruck in den Versuchsbedingungen. Messtechnisch kann dies durch die Ergebnisse der Dicke und der Glätte gezeigt werden.

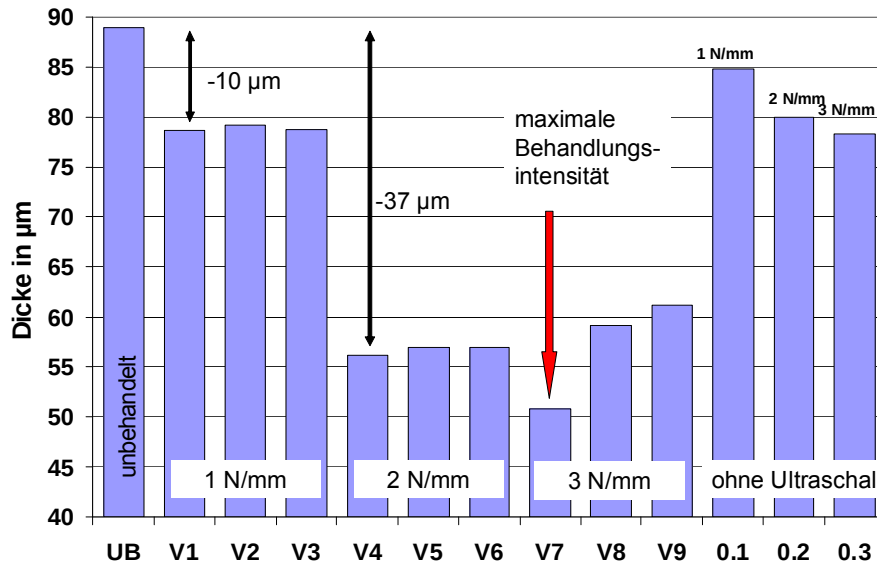


Abbildung 21: Dickemesswerte der einzelnen Versuchsrealisierungen (Overlay)

Die Versuche ergaben folgende Zusammenhänge für die Dickenreduktion:

- Die Dickenreduktion ist umso höher, je höher die statische Last ist.
- Mit steigender Geschwindigkeit nimmt die Dickenreduktion bei einer Ultraschallbehandlung ab.

#### 4.3.3.2 Glätte

Abbildung 13 stellt die Glättemesswerte nach Bendtsen der einzelnen Versuchspunkte zusammen. Die Berechnung der Mittelwerte erfolgte – aus den oben angegebenen Gründen – nur für den 174 mm breiten Mittelstreifen.

Wie bei den Dickemesswerten wird deutlich, dass eine Linienlast von 1 N/mm nicht ausreicht, um die Bahn spürbar zu behandeln. Erst ab einer Linienlast von 2 N/mm kann ein signifikanter Glättegewinn beobachtet werden.

Offenbar baut sich durch die Schwingung der Sonotrode zwischen Papier, Sonotrode und Gegenwalze ein Luftpolster auf, das durch eine zu geringe Anpresskraft nicht überwunden werden kann, so dass die zu behandelnde Bahn zwischen den beiden Walzen auf dem Luftpolster „schwebt“.

Während bei einer Linienlast von 2 N/mm der Einfluss der Bahngeschwindigkeit und der Amplitude noch sehr gering ist, kommt es bei der höchsten Linienlast zu einer deutlichen Beeinflussung der Messergebnisse durch die Variation der beiden weiteren Prozessparameter.

Der Glättegewinn nach Bendtsen, der allein durch die Ultraschallwirkung erreicht werden kann, liegt bei einer Linienlast von 2 N/mm bei ca. 1000 ml/min. Für eine höhere Linienlast sogar um noch einmal knapp 15 % höher, also bei einem Wert von ca. 1150 ml/min.

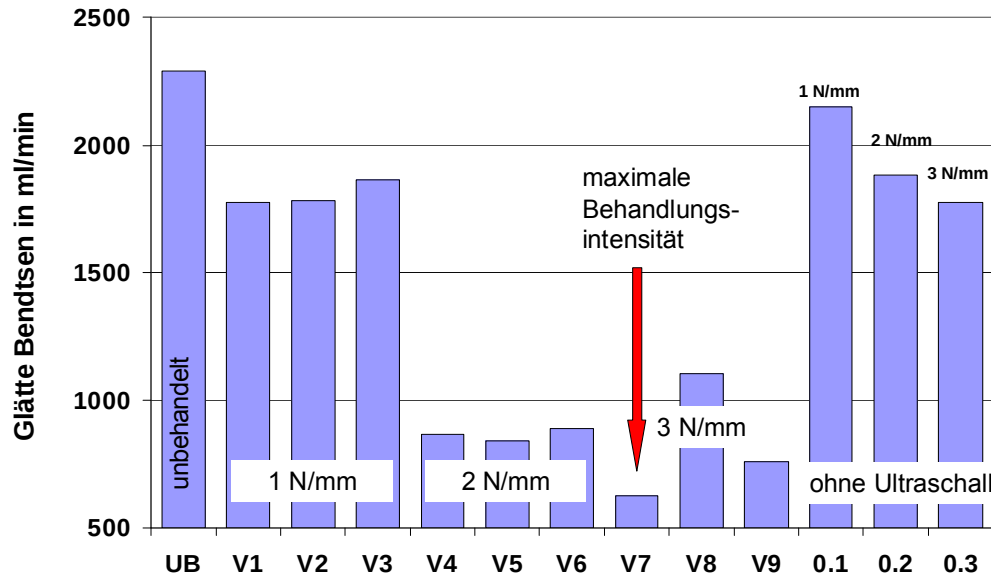


Abbildung 22: Glättemesswerte der einzelnen Versuchsrealisierungen (Overlaypapier)

Abbildung 23 zeigt die Reaktion der Probe auf die mechanische Behandlung bezüglich Glättegewinn und damit einhergehendem Dickenverlust.

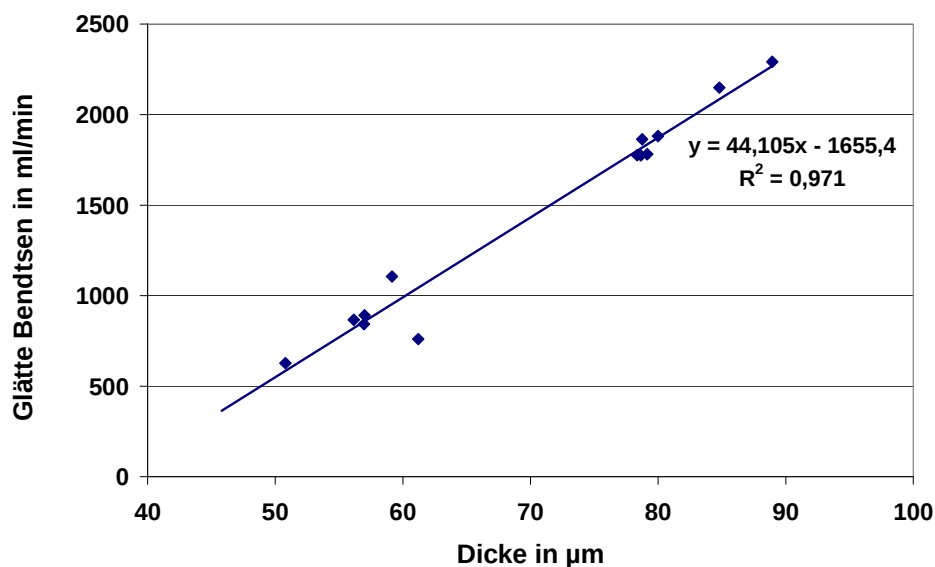


Abbildung 23: Glätte-Dicke-Korrelation nach der Ultraschallbehandlung (Overlaypapier)

### Statistische Auswertung der Glätte

Die Methoden der statistischen Versuchsplanung und –auswertung erlauben es, den Zusammenhang zwischen der Zielgröße (Glätte) und als relevant betrachteten Einflussgrößen mittels eines (nicht dimensionsrichtigen) Polynoms zu beschreiben. Für die Einflüsse von Linienlast, Bahngeschwindigkeit und Schwingungsamplitude auf die Glätte wurde auf diese Weise das folgende Polynom gefunden:

Tabelle 7: Regressionskoeffizienten

|                | Parameter                                         | Koeffizient | Wert     |
|----------------|---------------------------------------------------|-------------|----------|
|                | Konstante                                         | b0          | 3447,9   |
| x <sub>1</sub> | Linienlast (linear)                               | b1          | -1611,79 |
|                | Linienlast (quadratisch)                          | b11         | 359,23   |
| x <sub>2</sub> | Geschwindigkeit (linear)                          | b2          | 11,93    |
| x <sub>3</sub> | Amplitude (linear)                                | b3          | -8,1     |
|                | Wechselwirkung (linear: Linienlast und Amplitude) | b13         | -3,73    |
|                | Amplitude (quadratisch)                           | b33         | 0,07     |

$$\text{Glätte} = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_{11} \cdot x_1^2 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_{33} \cdot x_3^2 + b_{13} \cdot x_1 \cdot x_3$$

Wechselwirkungen und direkte Abhängigkeiten, welche nicht im oben genannten Polynomansatz auftauchen, konnten nach einer durchgeführten Signifikanzanalyse verworfen werden.

### Paretodiagramm

Das folgende Paretodiagramm stellt die einzelnen Effekte (normiert) mit ihrer Wertigkeit auf das Schätzergebnis, also schlussendlich auf die Prognose der Glättewerte dar.

Der Einfluss der Geschwindigkeit auf das Behandlungsergebnis ist von untergeordneter Bedeutung und erfüllt nur fast die Grenze von  $p = 0,05$  (Konfidenzkriterium).

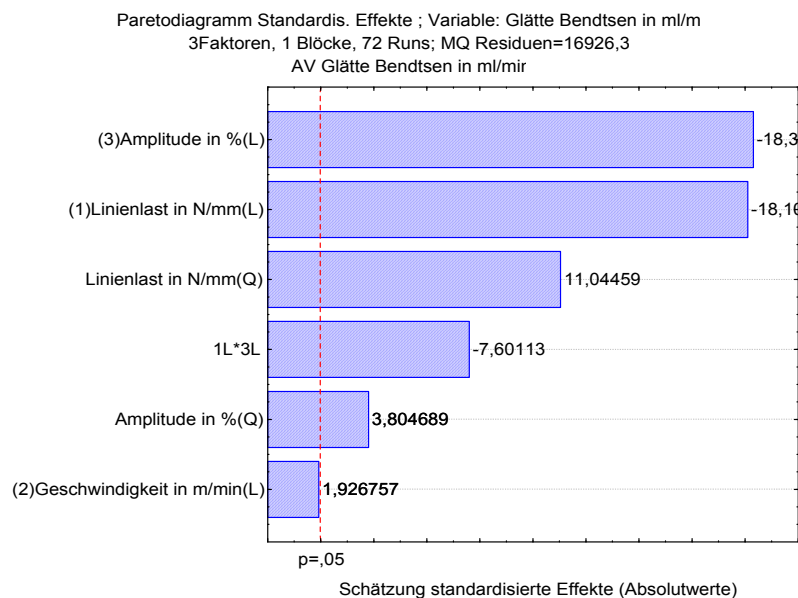


Abbildung 24:Paretodiagramm der Einflussfaktoren (Overlaypapier)

### Poggnosewerte und Residuen

Die nachstehende Abbildung 16 zeigt links den Zusammenhang zwischen beobachteten und prognostizierten Werten. Diese Darstellung dient der visuellen Qualitätsüberprüfung des Schätzpolynoms. Der berechnete Wert für die Korrelation beträgt  $R = 94 \%$ .

Auf der rechten Seite der Abbildung ist die Verteilung der Residuen dargestellt. Diese sind normalverteilt.

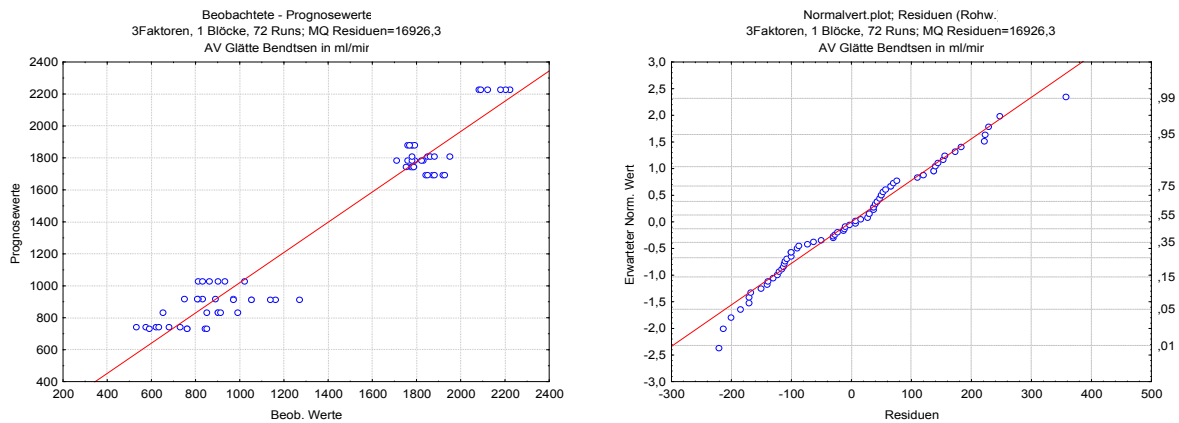
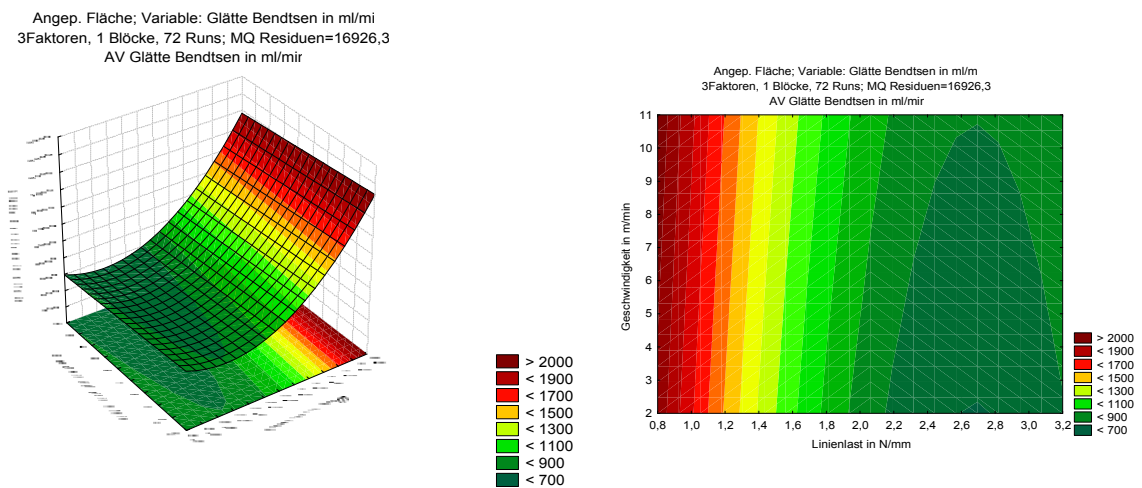


Abbildung 25: Statistische Analyse des Zielpolynoms (Overlaypapier)

Die folgende Abbildung zeigt die Polynom- und Konturplots für die Entwicklung der Glätte nach Bendtsen über den Prozessparametern:

- Linienlast,
- Bahngeschwindigkeit und
- Schwingungsamplitude

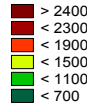
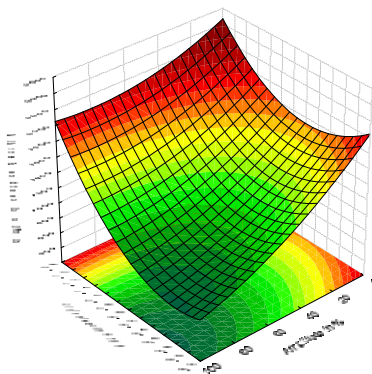
### Polynom- und Konturplots



**Amplitude 85%**

Abbildung 26: Polynomplott Glätte über Linienlast und Bahngeschwindigkeit (Overlay)

Angep. Fläche; Variable: Glätte Bendsen in ml/mi  
3Faktoren, 1 Blöcke, 72 Runs; MQ Residuen=16926,3  
AV Glätte Bendsen in ml/mir



**Bahngeschwindigkeit 6,5 m/min**

Angep. Fläche; Variable: Glätte Bendsen in ml/m  
3Faktoren, 1 Blöcke, 72 Runs; MQ Residuen=16926,3  
AV Glätte Bendsen in ml/mir

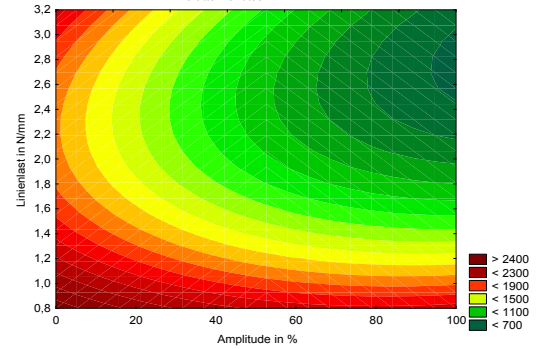
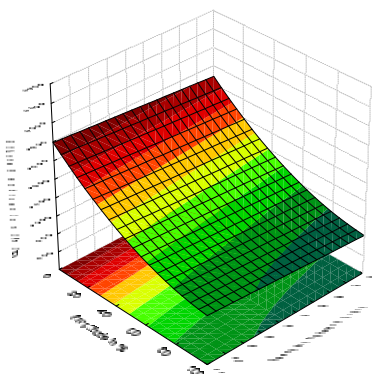


Abbildung 27: Polynomplott Glätte über Amplitude und Linienlast (Overlaypapier)

Angep. Fläche; Variable: Glätte Bendsen in ml/mi  
3Faktoren, 1 Blöcke, 72 Runs; MQ Residuen=16926,3  
AV Glätte Bendsen in ml/mir



**Linienlast 3 N/mm**

Angep. Fläche; Variable: Glätte Bendsen in ml/m  
3Faktoren, 1 Blöcke, 72 Runs; MQ Residuen=16926,3  
AV Glätte Bendsen in ml/mir

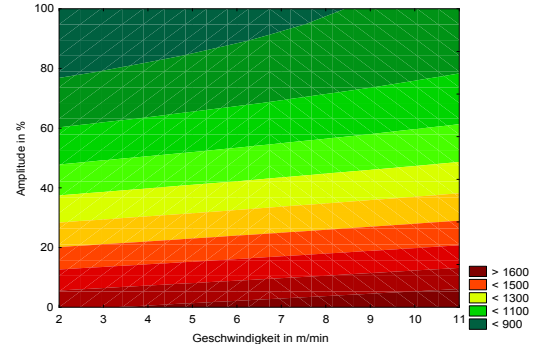


Abbildung 28: Polynomplott Glätte über Bahngeschwindigkeit und Amplitude (Overlaypapier)

#### 4.3.4 Fazit

Ziel des Versuche war entsprechend den Empfehlungen der Projektbegleiter eine Behandlung der Probe auf eine Zielglätte von 1000 ml/min (Bendsen). Dieses Ziel konnte erreicht werden.

Mit der vorhandenen Bahnlaufversuchsanlage ist es möglich, dieses extrem leichtgewichtige Spezialpapier zu behandeln, wobei die Beeinflussung wie folgt zusammengefasst werden kann:

- es sind Linienlasten von mindestens 2 N/mm für eine Bahnbehandlung vorzusehen,
- die Amplitude sollte - um hohe Glättewerte zu erreichen - möglichst hoch eingestellt sein.

Eine Erhöhung der Bahngeschwindigkeit führt zu einer geringeren Verdichtung der Bahn. – Zu beachten ist ein ab einer bestimmten Bahngeschwindigkeit sicher verstärkt eintretender Effekt einer geringeren Glättwirkung. Ursache hierfür ist die verminderte Verweilzeit der Bahn in der Behandlungszone.

## 4.4 Grafisches Papier (SC-Papier 56 g/m<sup>2</sup>)

### 4.4.1 Papiercharakterisierung

Tabelle 8: Probenspezifikation SC-Papier (56 g/m<sup>2</sup>)

| Parameter                                 | Wert |
|-------------------------------------------|------|
| Dicke $\mu\text{m}$                       | 79   |
| Flächenbezogene Masse in g/m <sup>2</sup> | 56   |
| Rauigkeit nach Bendtsen in ml/min         | 407  |

### 4.4.2 Versuchsplan

Die Versuche an den grafischen Papieren wurden nach dem oben erwähnten Umbau der Gegenwalze durchgeführt. Um eine möglichst stabile Datenbasis und somit eine Aussage über den Erfolg oder Misserfolg der Maßnahme zu gewinnen, wurde hier und im Folgenden auf eine Reduktion des Versuchsumfangs durch die Methoden der statistischen Versuchsplanung verzichtet und statt dessen ein vollständiger 3<sup>3</sup> Versuchsplan realisiert. (3<sup>3</sup>-Versuchsplan = 3 Einflussparameter auf je 3 Niveaus). Der vollständige Versuchsplan ist in Tabelle 9 wiedergegeben.

Tabelle 9: Versuchsplan SC-Papier

| Nr. | Linienlast in N/mm | Geschwindigkeit in m/min | Amplitude in % |
|-----|--------------------|--------------------------|----------------|
| 1   | 2,7                | 3                        | 50             |
| 2   | 3,7                | 3                        | 50             |
| 3   | 4,7                | 3                        | 50             |
| 4   | 2,7                | 9                        | 50             |
| 5   | 3,7                | 9                        | 50             |
| 6   | 4,7                | 9                        | 50             |
| 7   | 2,7                | 15                       | 50             |
| 8   | 3,7                | 15                       | 50             |
| 9   | 4,7                | 15                       | 50             |
| 10  | 2,7                | 3                        | 75             |
| 11  | 3,7                | 3                        | 75             |
| 12  | 4,7                | 3                        | 75             |
| 13  | 2,7                | 9                        | 75             |
| 14  | 3,7                | 9                        | 75             |
| 15  | 4,7                | 9                        | 75             |
| 16  | 2,7                | 15                       | 75             |
| 17  | 3,7                | 15                       | 75             |
| 18  | 4,7                | 15                       | 75             |
| 19  | 2,7                | 3                        | 100            |
| 20  | 3,7                | 3                        | 100            |
| 21  | 4,7                | 3                        | 100            |
| 22  | 2,7                | 9                        | 100            |
| 23  | 3,7                | 9                        | 100            |
| 24  | 4,7                | 9                        | 100            |
| 25  | 2,7                | 15                       | 100            |
| 26  | 3,7                | 15                       | 100            |
| 27  | 4,7                | 15                       | 100            |

Die Versuche erfolgten bei Normklima 23°C und 50 % relativer Luftfeuchte. Die Wechsel-feuchte des Papiers betrug dabei 4 %. Die Bahnzugkraft betrug für alle Versuche 30 N.

### 4.4.3 Ergebnisse

#### 4.4.3.1 Dicke

In Abbildung 29 ist die Entwicklung der Papierdicke über der statischen Linienlast für drei unterschiedliche Bahngeschwindigkeiten dargestellt. Vorweg ist darauf hinzuweisen, dass der sich einstellende Dickenverlust nicht mit der am Ultraschall-Generator eingestellten Amplituden korrelierte und deshalb im Folgenden nicht auf eine Diskussion der Amplitudeneffekte eingegangen wird.

Aufgrund der Datenlage kann davon ausgegangen werden, dass der Dicke linear mit steigender statischer Linienlast abnimmt.

Der Dickenverlust ist dabei umso größer, je langsamer die Papierbahn durch die Behandlungszone bewegt wird.

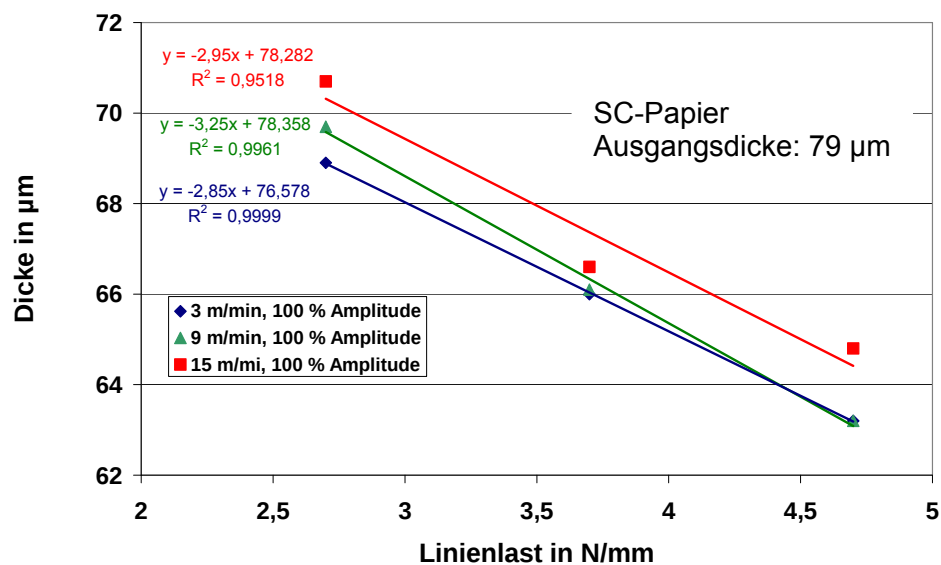


Abbildung 29: Entwicklung der Dicke über der statischen Linienlast (SC-Papier)

Beides, eine Erhöhung der statischen Linienlast und eine Verringerung der Bahngeschwindigkeit intensivieren das Behandlungsergebnis, was sich mit der grundsätzlichen Erwartungshaltung an den Prozess deckt.

Eine zusammenfassende Diskussion einer Hypothese über die wirksamen Effekte wird im Kapitel 5 gegeben.

#### 4.4.3.2 Glätte

Die Glätte nach Bendtsen folgt dem gleichen Trend wie die oben diskutierte Entwicklung der Probendicke.

Sowohl die Erhöhung der statischen Linienlast als auch eine geringere Bahngeschwindigkeit intensivieren das Behandlungsergebnis.

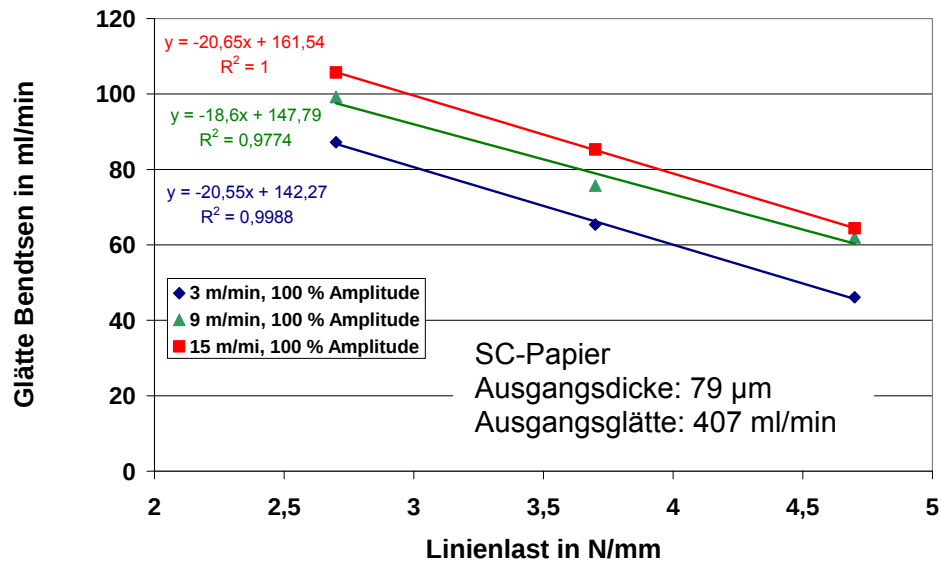


Abbildung 30: Entwicklung der Glätte über der statischen Linienlast (SC-Papier)

#### 4.4.3.3 Glanz

Auch für die Eigenschaft des Glanzes gelten die oben diskutierten Zusammenhänge, dass eine Erhöhung der Linienlast und eine geringe Bahngeschwindigkeit das Behandlungsergebnis verbessern. Trotz vergleichsweise hoher Glättewerte, welche - wie im nächsten Kapitel gezeigt wird - an die in der Industrie üblichen Glättewerte heranreichen, kann der Glanz nicht annähernd so weit entwickelt werden. Maximale Glättewerte konnten im Fall einer zusätzlichen Befeuchtung der Bahn mittels Dampf bei etwa 19 % gemessen werden. Industriell üblich sind Werte bis 40 %.

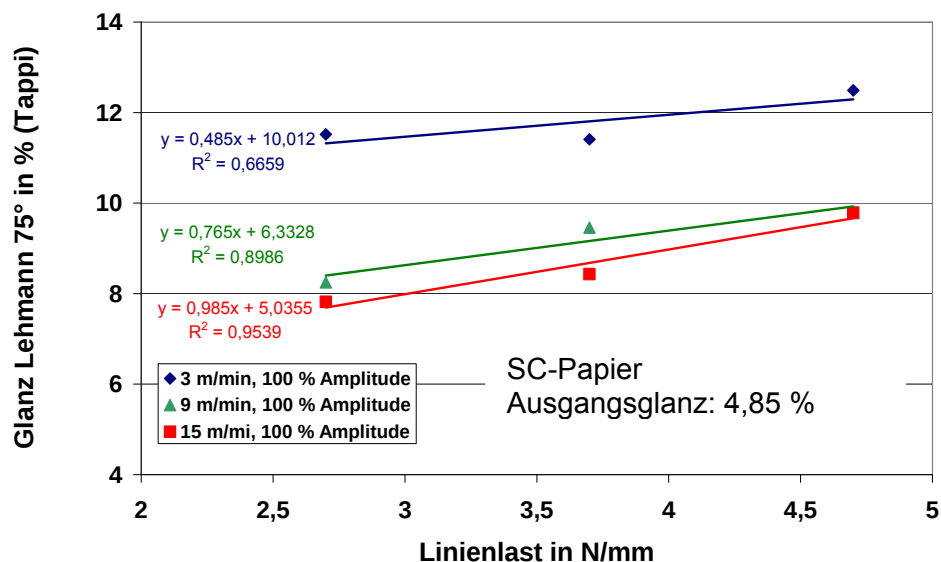


Abbildung 31: Entwicklung des Glanzes über der Linienlast (SC-Papier)

#### 4.4.3.4 Glätte und Volumen

Ziel der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten ist die Etablierung einer Methode zum volumenschonenden Glätten von Papier- und Kartonoberflächen mittels Hochleistungsschall. In der folgenden Abbildung ist die Entwicklung der Glätte nach Bendtsen über der Dicke für eine Reihe von Versuchspunkten aufgetragen.

Ausgehend von einer unbehandelten Probe (grünes Dreieck) mit einer Glätte von 407 ml/min und einer Dicke von 79 µm wird durch die industrielle Satinage mit einem Superkalander ein verkaufsfähiges Magazinpapier mit einer Dicke von 52 µm und einer Glätte von 28 ml/min erzeugt (orangefarbener Punkt).

Im Vergleich hierzu repräsentieren die blauen Rauten die Versuchsergebnisse verschiedener Ultraschallversuche bei denen:

- die Bahngeschwindigkeit zwischen 3-25 m/min,
- die statische Linienlast zwischen 2-5 B/mm und
- die Generatorleistung zwischen 50-100% variiert wurden.

Bereits aus diesen Ergebnissen kann ein scheinbar besseres Verhältnis aus Glättengewinn und Dickenverlust abgeleitet werden.

Wird die Papierbahn vor ihrer Behandlung noch mit Dampf konditioniert (rotes Viereck), können Glättewerte erreicht werden, die denen einer industriellen Satinage entsprechen. Dabei ist allerdings zu bedenken, dass die an der Versuchsanlage realisierbaren Bahngeschwindigkeiten deutlich unter denen industrieller Produktionsanlagen liegen.

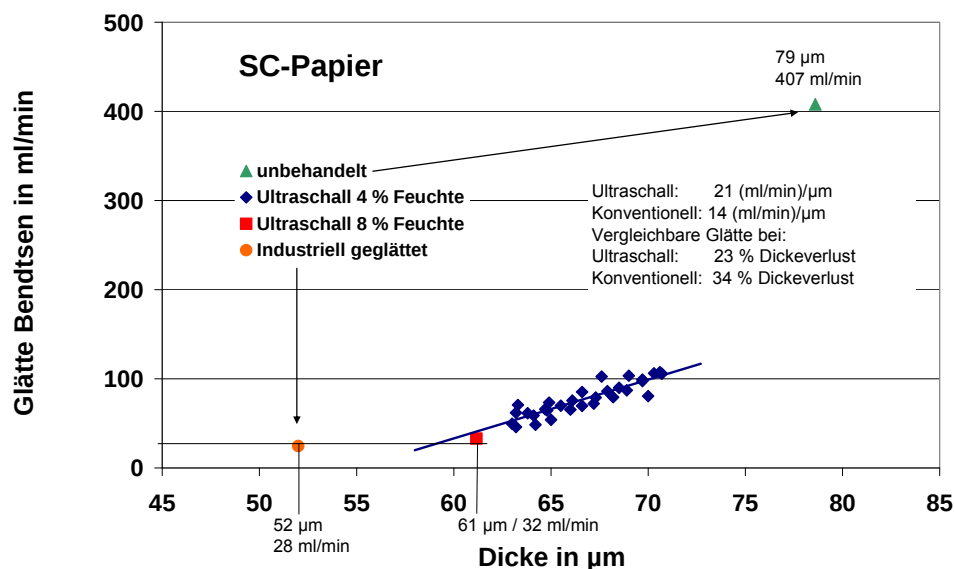


Abbildung 32: Vergleich industrieller und Ultraschallglättung (SC-Papiers)

#### 4.4.3.5 Energetische Bewertung der Ergebnisse (SC-Papier)

In Abbildung 33 sind die spezifischen Energieverbräuche für das Glätten des SC-Papiers in kJ/m<sup>2</sup> sowie in der in der Papierindustrie üblicheren Einheit kWh/t zusammengefasst. Den Ergebnissen der Ultraschallversuche ist der spezifische Energieverbrauch eines dem Stand der Technik entsprechenden Superkalenders gegenübergestellt. Die hier zitierten Werte für die industrielle Satinage wurden unter folgenden Bedingungen ermittelt:

- SC-Papier (60 g/m<sup>2</sup>),
- Maschinenbreite 7 m,
- Bahngeschwindigkeit 1.200 m/min
- Gesamtverbrauch der Anlage: 132 kWh/t bei einer Produktion von 30,2 t/h

Der entsprechende Ergebniswert (Glätte ca. 30 ml/min) ist in der Abbildung als lilafarbener Punkt dargestellt.

Dem gegenüber stehen zunächst drei Kurven aus Ultraschallversuchen, bei denen jeweils bei 100 % Amplitudeneinstellung die Linienlast bei drei unterschiedlichen Geschwindigkeiten (3-15 m/min) zwischen 2,7 und 4,7 N/mm variiert wurde.

Die in dem mit dem Buchstaben „A“ gekennzeichneten Bereich liegenden Versuchspunkten machen deutlich, dass je nach Maschineneinstellung etwa gleiche Glättewerte bei sehr unterschiedlichem Energieaufwand erzeugt werden können. Tatsächlich liegt ein Faktor von bis 1:4 zwischen den Ergebnissen der blauen und der grünen Kurve.

Die bisher diskutierten Ultraschallversuche wurden bei einer Papierfeuchte von lediglich 4 % durchgeführt. Dies war die sich unter den klimatischen Bedingungen während der Versuche einstellenden Gleichgewichtsfeuchte des Papiers.

Wegen der bekanntermaßen positiven Auswirkung einer erhöhten Papierfeuchte auf das Satinagergebnis wurde in einem weiteren Versuch die Papierbahn mittels Dampf vorkonditioniert, wobei sich eine Papierfeuchte von etwa 8 % einstellte. Bei ansonsten gleichen Maschineneinstellungen (und damit gleichem Energieverbrauch) konnte die Glätte der Probe dadurch um weitere 14 ml/min und damit auf einen für die industrielle Satinage üblichen Wert erhöht werden.

Aus diesem Ergebnis kann in erster Näherung abgeleitet werden: Um die gleiche Menge Papier mit Ultraschallunterstützung zu glätten werden etwa 45 kWh/t weniger Energie benötigt, was einer Ersparnis von beinahe 34 % bedeutet. Und das bei einem deutlich geringeren Volumenverlust wie in Abbildung 32 gezeigt werden konnte.

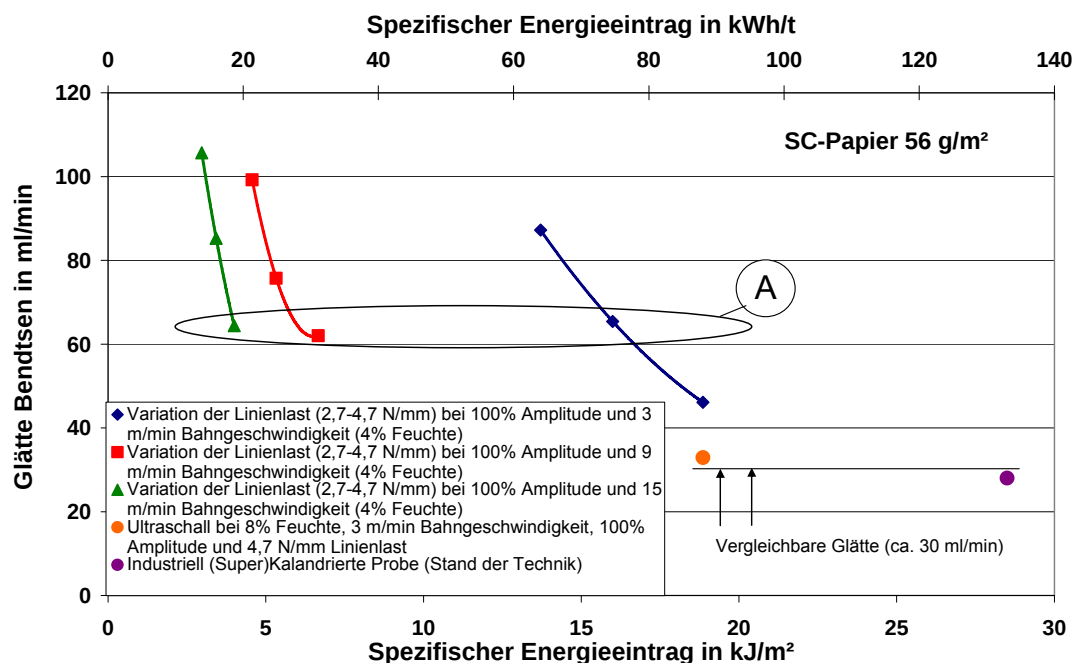


Abbildung 33: Energetische Aspekte des Ultraschallglättens von SC-Papier

So vielversprechend die oben gezeigten Versuchsergebnisse auch sind, darf nicht außer acht gelassen werden, dass sie bei Bahngeschwindigkeiten zwischen 3 und 15 m/min erreicht worden sind.

Der Umstand aber, dass es gelang, vergleichbare Glättewerte bei sehr unterschiedlichen Energieeinträgen zu erreichen (Bereich A) sowie die – nicht überraschende Erkenntnis – dass eine Vorkonditionierung der Bahn einen weiteren Glättengewinn liefert, belegen aber, dass die bisherige Behandlungsstrategie noch viel Optimierungspotenzial birgt.

Die Frage, ob solch gute Behandlungsergebnisse bei industrieüblichen Produktionsgeschwindigkeiten alleine durch die Installation einer hinreichend hohen Anzahl an Sonotrodenwalzen zu realisieren sind, konnte im Rahmen des Projektes noch nicht beantwortet werden. Aus aktueller Sicht ist jedoch sicher, dass eine Sonotrode nicht ausreichen wird, um auch bei höheren oder gar industrieüblichen Verarbeitungsgeschwindigkeiten befriedigende Ergebnisse zu generieren. Die in Kapitel 3 beschriebenen Erfahrungen besagten ja bereits, dass ohnehin mindestens zwei Sonotroden hintereinander geschaltet werden sollten, um Querprofilschwankungen aufgrund der Sonotrodenoszillation zu minimieren.

Auf der Basis der in diesem Projekt gewonnenen Ergebnisse könne bezüglich einer energetischen Betrachtung der Ultraschall-Glätttechnik folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

Das Behandlungsergebnis (zunächst als Dickeverlust und Glättengewinn ausgedrückt) hängt zum einen von der Leistung ab, mit welcher die Sonotrode im Moment der Behandlung schwingt und zum anderen von der Dauer mit der diese Leistung auf das Papier einwirkt.

Die Schwingungsleistung der Sonotrode kann dabei nicht völlig gewählt werden. Vielmehr hängt sie direkt von der Dämpfung des Schwingensystems ab. Die Dämpfung wiederum ergibt sich aus der vorgegebenen Schwingungsamplitude, der statischen Linienlast zwischen Sonotrode und Gegenwalze sowie den Materialeigenschaften des Papiers und der Oberfläche der Gegenwalze. Je weicher (E-Modul) dabei das Gegenwerkzeug ist, umso höher ist auch die Dämpfung.

Die übertragene Energie ist dann das Produkt aus der momentanen Leistung des Schwingensystems und der Verweilzeit der Papierprobe im Behandlungsnip. Der Leistungsbedarf des Schwingensystems ist unabhängig von der Bahngeschwindigkeit, die übertragbare Energie wächst jedoch mit sinkender Bahngeschwindigkeit.

Andere Forschungsarbeiten zum Ultraschall lassen die Aussage zu, dass eine Erhöhung der Behandlungsenergie nur bis zu einem bestimmten Niveau erhöhen. Wird dieser Punkt überschritten, so dürfte es zu einem überproportional starken Dickeverlust als Resultat der Beschallung kommen.

Eine optimale Maschineneinstellung wäre demnach diejenige, welche dem Schwingensystem viel Leistung entzieht und damit gleichzeitig eine hohe Bahngeschwindigkeit ermöglicht. Dies wäre bei hohen Amplituden und hohen Linienlasten zu erwarten. Hohe Linienlasten führen jedoch wiederum zu einer höheren Verdichtung des Materials. Es liegen demnach zwei gegenläufige Effekte vor, welche als Optimierungsaufgabe mit dem Ziel möglichst hoher Glätte bei gleichzeitig möglichst geringer Verdichtung zu behandeln sind.

## 4.5 Grafisches Papier (Streichrohpapier 128 g/m<sup>2</sup>)

### 4.5.1 Papiercharakterisierung

Tabelle 10: Probenspezifikation Streichrohpapier (128 g/m<sup>2</sup>)

| Parameter                                 | Wert |
|-------------------------------------------|------|
| Dicke $\mu\text{m}$                       | 155  |
| Flächenbezogene Masse in g/m <sup>2</sup> | 128  |
| Rauigkeit nach Bendtsen in ml/min         | 291  |
| Füllstoffgehalt in %                      | 24   |

### 4.5.2 Versuchsplan

Alle Versuche an diesem Muster fanden nach dem in Kapitel 3 dokumentierten Umbau statt. Die Versuche erfolgten unter Variation:

- der statischen Linienlast zwischen 2-4,7 N/mm bei 100 % Amplitude und 3 m/min Bahngeschwindigkeit,
- der Bahngeschwindigkeit zwischen 3-25 m/min bei 4,7 N/mm Linienlast und 100 % Amplitude sowie
- der Amplitude zwischen 70-100 % bei 3 m/min und einer statischen Linienlast von 4,7 N/mm
- Alle Versuche erfolgten im Normklima (23/50). Die Gleichgewichtsfeuchte des Papiers betrug 4 %. Die Bahnzugkraft betrug 30 N.

Wie bereits in den vorherigen Untersuchungen korrelierten die gefundenen Ergebnisse nicht nach der am Generator eingestellten Amplitude.

### 4.5.3 Ergebnisse

#### 4.5.3.1 Dicke

Verglichen mit der Ausgangsdicke von 155  $\mu\text{m}$  zeigt eine Behandlung mit maximaler statischer Linienlast und ausgeschalteter Sonotrode lediglich eine Dickenabnahme von nur 1  $\mu\text{m}$  (linkes Diagramm der Abbildung 34). Wird die Sonotrode zugeschaltet, so tritt bei dieser Linienlast ein Dickenverlust von knapp 10  $\mu\text{m}$  auf. Bezogen auf die Ausgangsdicke ist dies jedoch immer noch gering.

Bei gleicher Leistungsabgabe der Sonotrode verringert sich mit steigender Bahngeschwindigkeit die auf die Papieroberfläche übertragene spezifische Energie. Das rechte Diagramm der Abbildung 34 zeigt dies sehr deutlich. Bei einer Geschwindigkeit von 25 m/min ist die dargestellte Kurve bereits in ein Plateau übergegangen, welches etwa dem Niveau der Ausgangsdicke entspricht. Bezogen auf diese Konstellation (Maschineneinstellung und Papiereigenschaften) ist hier offenbar die Grenze einer möglichen Behandlung erreicht.

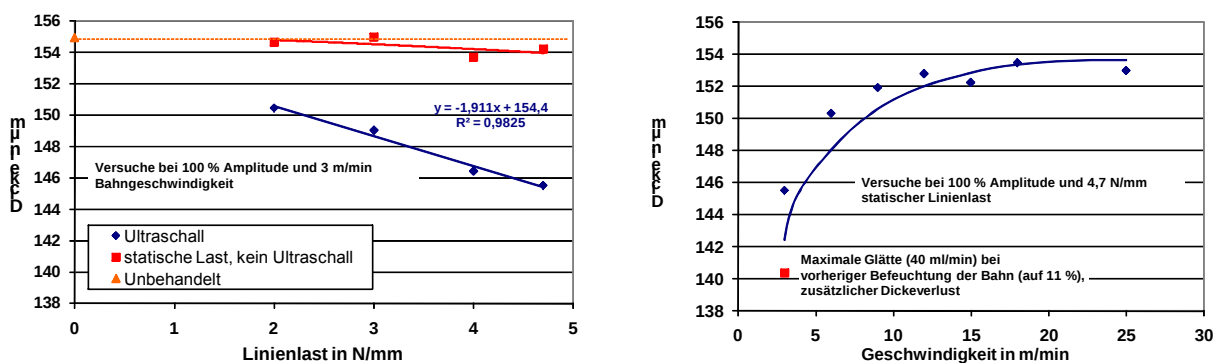


Abbildung 34: Dicke über der statischen Linienlast und Bahngeschwindigkeit (Streichrohpapier)

Eine Befeuchtung der Probe auf 11 % – bei diesem Papier erfolgte die Befeuchtung nicht mittels Dampf sondern über einen Wassernebel, also ohne zusätzliche Temperaturerhöhung – verstärkt den Behandlungseffekt ähnlich wie bei dem oben diskutierten SC-Papier.

Der Verlauf einer Behandlung bei höherer Feuchte ist daher als qualitativ gleich, jedoch mit einem Offset und dann unterhalb der blauen Kennlinie zu erwarten.

#### 4.5.3.2 Glätte

Die Beschreibung der Ergebnisdiagramme der Glättemesswerte kann grundsätzlich so wie die der Dicke erfolgen.

Durch eine Behandlung der Bahn mit rein statischer Last wird die Glätte nur unwesentlich beeinflusst. Erst das Einschalten der Ultraschallsonotrode bringt einen deutlichen Glättegewinn mit sich (Abbildung 35).

Bei einer Bahngeschwindigkeit von 25 m/min ist kein messbarer Glättegewinn mehr vorhanden. Hiermit bestätigt sich die oben getroffene Aussage der Limitierung für diese Anlagen-Papier-Kombination.

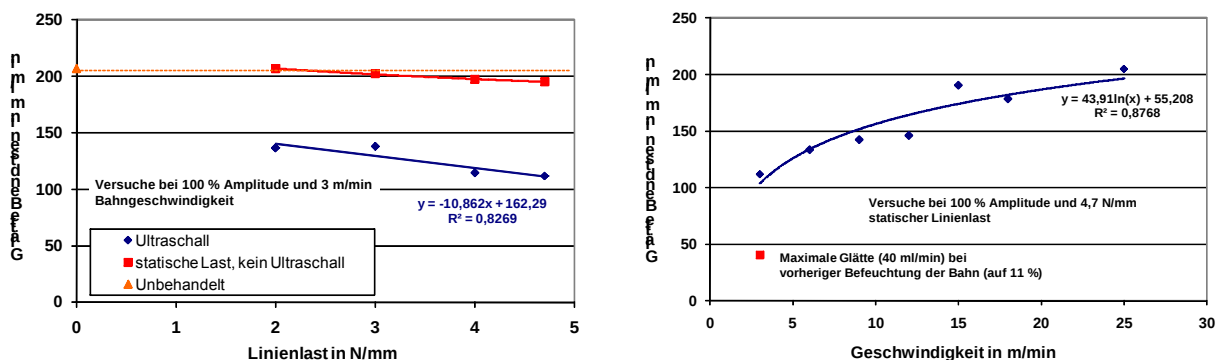


Abbildung 35: Glätte über der statischen Linienlast und Bahngeschwindigkeit (Streichrohpapier)

Bemerkenswert hingegen ist der die deutliche Glättesteigerung der Probe nach einer vorherigen Befeuchtung. Diese führt ohne weitere Optimierungsarbeiten am Prozess zu einer Glätte, welche seitens des Papierherstellers als mögliche Zielglätte des eigenen Satinageprozesses angegeben wird.

Somit lässt sich bereits an dieser Stelle festhalten, dass es mit der Ultraschall-Glättechnik grundsätzlich möglich ist, die beiden hier betrachteten grafischen Papiere auf industrieübliche Glättestufen zu behandeln.

#### 4.5.3.3 Glanz

Obwohl sich die Glanzwerte des Papiers durch eine Ultraschall-Satinage mehr als verdoppeln lassen, bleiben diese auf einem insgesamt eher niedrigen Niveau.

Ähnliches konnte für das SC-Papier beobachtet werden, auch wenn dort die Absolutwerte in ihren Maxima noch einmal deutlich über denen des Streichrohpapiers lagen.

Anders als bei den Parametern Dicke und Glätte scheint jedoch eine Limitierung der Ultraschallbehandlung auf eine Bahngeschwindigkeit von 25 m/min zu bestehen. Auch bei dieser Geschwindigkeit kommt es zu einer signifikanten Glanzsteigerung der Probe (rechtes Diagramm der Abbildung 36).

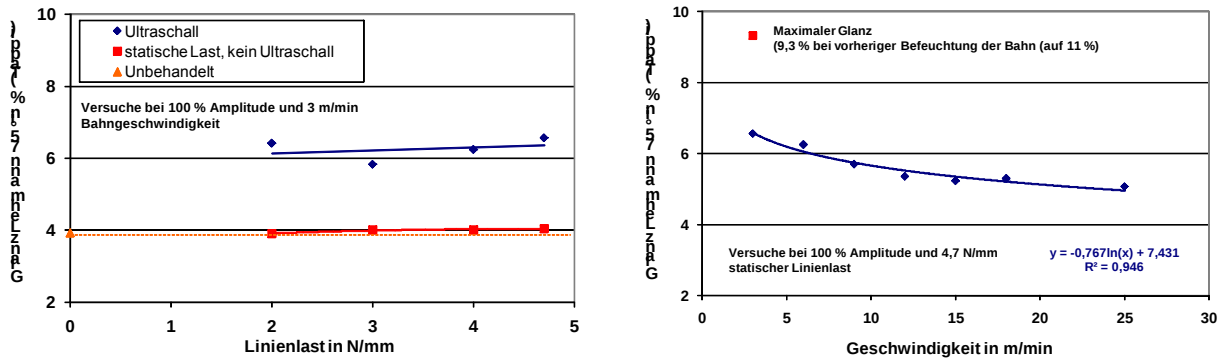


Abbildung 36: Glanzes über der statischen Linienlast und Bahngeschwindigkeit (Streichrohpapier)

Aus den Darstellungen in Abbildung 36 lassen sich weitere Aussagen ableiten:

- Eine Behandlung der Probe im geschlossenen Walzenspalt jedoch ohne Ultraschallwirkung verändert die Glanzwerte nicht.
- Wird die Ultraschallsonotrode im Behandlungsbetrieb zugeschaltet, so ergibt sich ein Sprung um ca. 2 Glanzpunkte. Mit einer Variation der Linienlast kann dann der Glanz jedoch nicht mehr signifikant beeinflusst werden. Diese Tatsache ist dahingehend interessant, da es im Fall des SC-Papiers durchaus eine Reaktion des Glanzparameters auf eine Erhöhung der Linienlast gab. Möglicherweise ist dies durch die im SC-Papier enthaltenden Komponenten (Lignin etc.) begründet, welche einen niedrigeren Plastifizierungspunkt als die Bestandteile des Zellstoffes (Streichrohpapier) besitzen. Darüber hinaus besteht ein exponentieller Zusammenhang zwischen makroskopischer Glätte und der für die Entwicklung des Glanzes wichtigen mikroskopischen Glätte. Der Glanz nimmt unter dieser Annahme exponentiell mit steigender Makroglätte (z.B. gemessen mit Bendtsen) zu. Die in Abbildung 36 dargestellten Ergebnisse liegen in ihren Glättewerte noch deutlich über denen des untersuchten SC-Papiers bei gleicher Maschineneinstellung. Es kann demnach davon ausgegangen werden, dass sich die hier betrachteten Ergebnisse noch im Bereich des wenig stark steigenden Abschnittes der Exponentialfunktion befinden und eventuelle Glättesteigerungen noch nicht auf eine gleich starke Zunahme des Glanzes wie bei der SC-Papierprobe durchschlagen. Eine eindeutigere Erklärung muss das Projekt an dieser Stelle leider schuldig bleiben.
- Die Steigerung der Bahngeschwindigkeit führt erwartungsgemäß zu einem Sinken der Glanzwerte. Wie aus den oben erwähnten Gründen ist die vermeintliche Ursache hierfür die geringere Verweildauer der Probe im Behandlungsnipp. Es wird proportional weniger Energie auf die Probenoberfläche übertragen.

#### 4.5.3.4 Energetische Bewertung des Glättprozesses

In Abbildung 37 ist die Entwicklung der Glätte nach Bendtsen über die spezifischen Energieeinträge für die Behandlung des Streichrohpapiers unter Variation der Linienlast bzw. der der Bahngeschwindigkeit aufgetragen.

Ein höherer Energieeintrag führt zu einem höheren Glättewert. Wobei auch hier, ebenso wie für das SC-Papier gilt: Gleiche Glättewerte können je nach Maschineneinstellung durch sehr unterschiedliche Energieeinträge erzeugt werden.

Ebenfalls vergleichbar ist die Möglichkeit, durch eine zusätzliche Befeuchtung der Bahn bei etwa gleich hohem Energieeintrag deutlich höhere Glättewerte zu erzielen. Hierdurch konnte eine vom Papierhersteller angegebene Zielglätte seines eigenen Prozesses mit ca. 43 kWh/t erreicht werden. Leider lagen bis zum Abschluss des Projektes keine Vergleichswerte aus der Produktion des Herstellers vor.

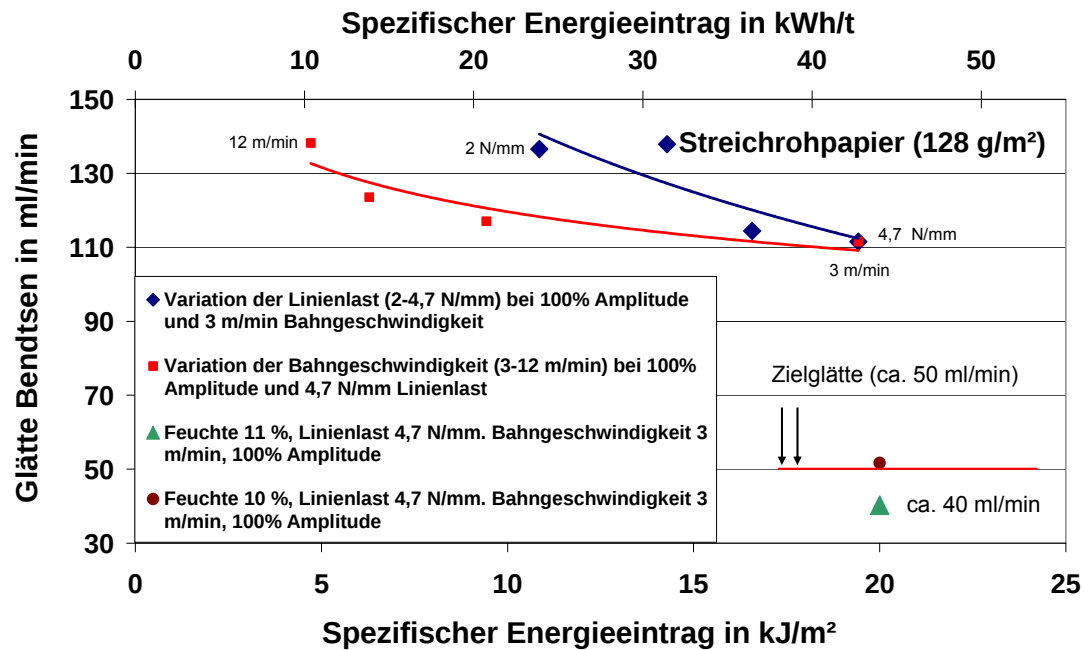


Abbildung 37: Energetische Aspekte des Ultraschallglättens (Streichrohpapier)

Die auf die Probe übertragbare Energie ist das Produkt aus der momentanen Schallleistung und der Verweilzeit der Probe im Behandlungsnipp.

Die Wirkung beider Ursachen lässt sich in Abbildung 37 ausgezeichnet verfolgen.

Eine Erhöhung der statischen Linienlast führt zu einer stärkeren Dämpfung des Schwingensystems und damit zu einer höheren Leistungsübertragung, eine Verringerung der Bahngeschwindigkeit zu einer höheren Verweilzeit des Papiers im Behandlungsnipp führt. Beides resultiert in höheren Glättewerten.

#### **4.6 Gestrichene Proben (einseitig doppelt gestrichen, 80 g/m<sup>2</sup>)**

Im Vordergrund stand die Beantwortung der Frage, ob - und wenn ja wie gut - gestrichene Papiere mittels Hochleistungsschall geglättet werden können.

Es lag ein einseitig doppelt gestrichenes Papier mit einer flächenbezogenen Masse von 80 g/m<sup>2</sup> vor. Die Ausgangsglätte wurde - abweichend zu den bisherigen Untersuchungen - mit dem Verfahren nach Parker Print Surf (PPS) durchgeführt. Herstellerangaben und Laborwerte der Professur für Papiertechnik stimmten befriedigend überein und bescheinigten der Probe eine Glätte von 1,5 µm (PPS).

Ziel war es, diese Oberfläche weiter zu glätten und mit zusätzlichem Glanz zu versehen. Als mögliche Zielwerte werden seitens des Papierproduzenten eine Glätte von 0,8 µm (PPS) und ein Glanz von 60 % angestrebt.

Diese Werte konnten nicht erreicht werden. Auch bei einer Maschineneinstellung, die nach den bisherigen Erfahrungen hohe Glätte- und Glanzwerte erwarten ließ, konnten lediglich Werte von 1,2 µm (PPS) für die Glätte sowie 47 % (Glanz nach Lehmann 75°, Tappi) erreicht werden.

Darüber hinaus waren die behandelten Proben aufgrund eines starken Abriebs der Sonotrode im Bereich der Schwingungsbäuche (vgl. Abbildung 8) gekennzeichnet. Die Sonotrode bestand aus einer Aluminiumlegierung, welche offenbar in Kombination mit den Pigmenten des Striches eine eben solche Reaktion zeigte.

Weiterhin zeigten sich starke Ungleichmäßigkeiten im Bereich des Glanzes, so dass es im Moment nicht sinnvoll erscheint, gestrichene Proben mittels Hochleistungsschall zu glätten.

## 4.7 Grafisches Papier (Sized 110 g/m<sup>2</sup>)

### 4.7.1 Papiercharakterisierung

Tabelle 11: Probenspezifikation: Grafisches Papier mit Stärkestrich (110 g/m<sup>2</sup>)

| Parameter                                 | Wert |
|-------------------------------------------|------|
| Dicke $\mu\text{m}$                       | 132  |
| Flächenbezogene Masse in g/m <sup>2</sup> | 110  |
| Rauigkeit nach Bendtsen in ml/min         | 211  |
| Füllstoffgehalt in %                      | 24   |

Das untersuchte Papier entspricht in seinem Aufbau etwa dem in Kapitel 4.5 diskutierten Streichrohrpapier. Der Unterschied liegt jedoch in der flächenbezogenen Masse sowie einem zusätzlichen Filmpressenstrich aus Stärke (Sized).

### 4.7.2 Versuchsplan

Alle Versuche an diesem Muster fanden nach dem in Kapitel 3 dokumentierten Umbau statt. Die Versuche erfolgten unter Variation:

- der statischen Linienlast zwischen 2-4,7 N/mm bei 100 % Amplitude und 3 m/min Bahngeschwindigkeit,
- der Bahngeschwindigkeit zwischen 3-25 m/min bei 4,7 N/mm Linienlast und 100 % Amplitude sowie
- der Amplitude zwischen 70-100 % bei 3 m/min und einer statischen Linienlast von 4,7 N/mm
- Alle Versuche wurden im Normklima (23/50) durchgeführt. Die Gleichgewichtsfeuchte des Papiers betrug 5 %. Die Bahnzugkraft betrug 30 N.

### 4.7.3 Ergebnisse

#### 4.7.3.1 Dicke

Ausgehend von einer Papierdicke von 132  $\mu\text{m}$  erfolgt durch die Ultraschallbehandlung eine maximale Verdichtung des Materials auf 126  $\mu\text{m}$  oder um 4,5 %. Der Dickenverlust korrelierte bei den hier durchgeführten Untersuchungen nicht mit der Behandlungsintensität.

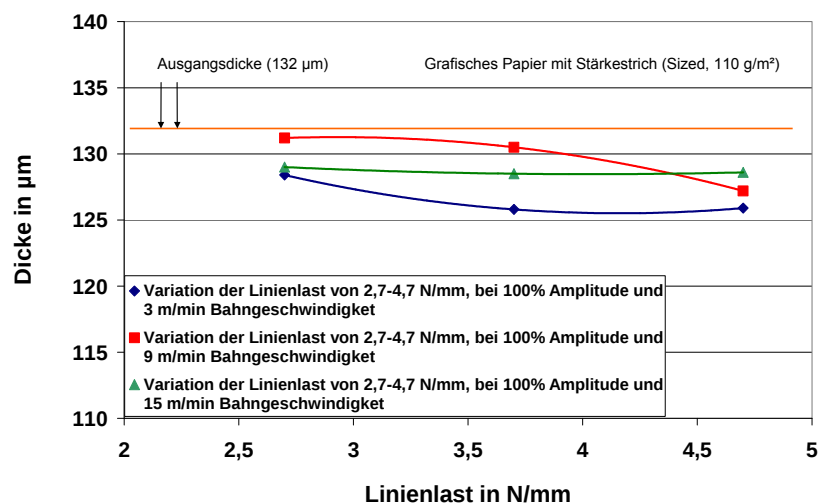


Abbildung 38: Entwicklung der Dicke über der Linienlast (Sized)

### 4.7.3.2 Glätte

In Abbildung 39 ist der Zusammenhang zwischen Linienlastvariation und Glättengewinn für drei unterschiedliche Behandlungsgeschwindigkeiten dargestellt. Anders als bei den Ergebnissen der Dicke korrelierten nun die Ergebnisse der Glätte mit der Behandlungsintensität.

Insgesamt ist die Entwicklung der Glätte mit der des ungeleimten Streichrohpapiers vergleichbar.

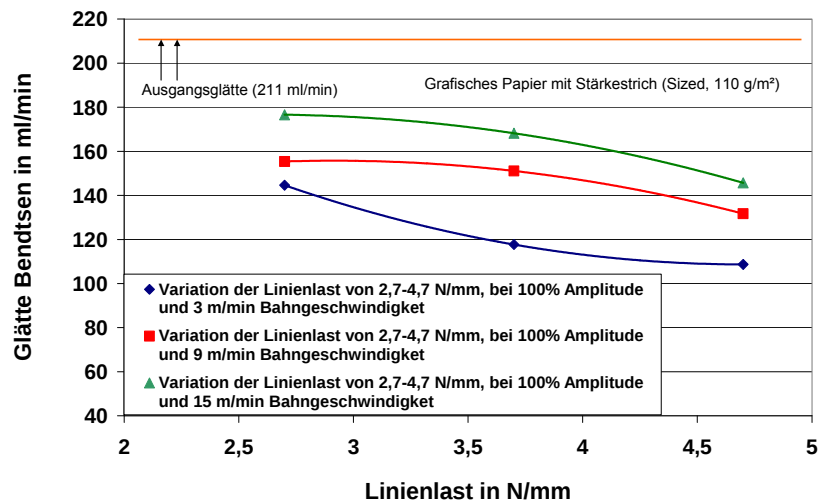


Abbildung 39: Entwicklung der Glätte über der Linienlast (Sized)

### 4.7.3.3 Glanz

Die Glanzentwicklung erfolgt ähnlich wie beim Streichrohpapier (Kapitel 4.5). Das Zuschalten der Ultraschallsonotrode führte zu einem Sprung auf ein höheres Glanzniveau. Eine Erhöhung der Linienlast führt dann jedoch zu keiner weiteren Glanzentwicklung.

Lediglich durch eine höhere Verweilzeit der Probe im Glätznipp (Verringerung der Bahngeschwindigkeit) konnte eine weitere Glanzsteigerung erreicht werden. Da sich die Glättewerte auf ähnlichem Niveau wie die des Streichrohpapiers befinden, kann davon ausgegangen werden, dass auch in diesem die Mikroglätte nicht weit genug entwickelt werden konnte, um hohe Glanzwerte zu erreichen.

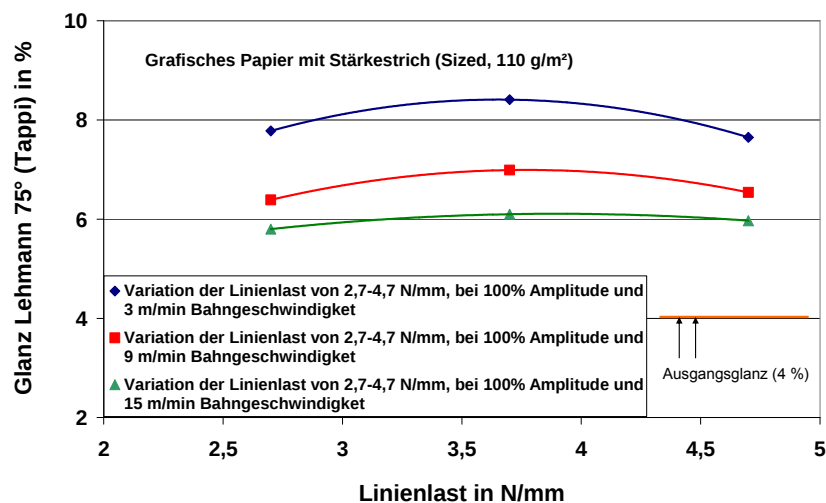


Abbildung 40: Entwicklung des Glanzes über der Linienlast (Sized)

## **5 Zusammenfassende Diskussion der Ergebnisse und Ausblick**

Im Rahmen des Projektes wurde eine Bahnlaufversuchsanlage zum Glätten von Papier- und Kartonoberflächen mittels Hochleistungsultraschall entwickelt, in Betrieb genommen und erste Erfahrungen damit gesammelt.

Es wurden 7 Papiere mit unterschiedlich hohem Erfolg behandelt. In dem vorliegenden Abschlussbericht sind die Ergebnisse einer Behandlung von Transparentpapier nicht dargestellt, da hier nur ganz geringe Glättesteigerungen erreicht werden konnten.

Neben den Arbeiten im INFOR-Projekt 106 wurden im Rahmen anderer Forschungsarbeiten zum Ultraschallglätten mittels einer fest stehenden Sonotrode (Arbeitsbreite 50 mm) eine Vielzahl von Papieren behandelt. Die durchgeführten Versuche wurden durch zusätzliche Messungen (Thermografieaufnahmen, Reibwertbestimmung, etc.) flankiert und lieferten so wertvolle Informationen über die wirksamen Mechanismen beim Ultraschallglätten. Die gewonnenen Ergebnisse ließen sich an der Bahnlaufversuchsanlage nachstellen.

Die durch diese Arbeiten gefundenen Erkenntnisse zum Mechanismus des durch eine Ultraschallbehandlung induzierten Glätteffekts kann verkürzt so zusammengefasst werden:

Für eine glättende Ultraschallbehandlung von Papier- und Kartonoberflächen ist der mechanische Kontakt zwischen Sonotrode und Papier, abgestützt auf einem Gegenwerkzeug (hier der Gegenwalze), Voraussetzung.

Die Sonotrode schwingt mit hoher Frequenz und bewegt sich so reibend (und damit verlustbehaftet) über die Papieroberfläche. Eine Erhöhung des statischen Druckes im Behandlungsnipp intensiviert die Reibungsverluste und entzieht dem Schwingssystem zusätzlich Energie (Dämpfung).

Aufgrund der Reibungsverluste entsteht in der Kontaktzone Wärme, welche anscheinend zur Plastifizierung der oberflächennahen Fasern ausreicht. Unter Plastifizierung soll hier das Erweichen einzelner Papierbestandteile verstanden werden. Dieser Vorgang ist klar vom Vorgang des Schmelzens zu unterscheiden. Eine Plastifizierung von Polymeren äußert sich durch den rapiden Abfall bestimmter Materialeigenschaften (z.B. E-Modul) beim Überschreiten einer, stoff- und feuchteabhängigen Temperatur, der so genannten Glasübergangstemperatur. Für die typischen Papierbestandteile (Cellulose, Hemicellulose und Lignin) liegt diese im Bereich um 200 °C (für die trockene Substanz). Wasser fungiert als Weichmacher und kann die Glasübergangstemperatur deutlich reduzieren. Thermografische Messungen ergaben Maximaltemperaturen im Behandlungsnipp von 230 °C.

Läuft die Papierbahn in den Behandlungsnipp ein, so wird ihre Oberfläche lokal bis auf Temperaturen oberhalb der Glasübergangstemperatur erwärmt, wodurch – zumindest kurzzeitig – die Voraussetzungen für eine Plastifizierung oberflächennaher Bereiche gegeben sind. Die Glättung dieser Bereiche kann nun mit verhältnismäßig geringem statischen Druck erfolgen. Wegen seiner geringen Wärmekapazität kühlt das Papier sich nach dem Verlassen der Behandlungszone rasch ab, die Glasübergangstemperatur wird wieder unterschritten und die neu ausgeformte Oberflächengestalt bleibt geglättet eingefroren.

Da nur ein geringer statischer Druck in der Behandlungszone herrscht, erfährt das Papiergefüge - verglichen mit der üblichen Satinage - nur eine geringe plastische Kompression: die Glättung erfolgt deshalb deutlich volumenschonender.

Der Leistungseintrag auf die Papieroberfläche hängt von der Dämpfung des Ultraschallsystems ab. Alle die Dämpfung des Systems erhöhenden Maßnahmen begünstigen demnach das Glättergebnis. Hierzu zählen die statische Linienlast, die Weichheit des Papiers, sowie der E-Modul des Gegenwerkzeuges. Um bei gleicher Schwingungsleistung der Sonotrode mehr Energie auf die Papierbahn zu übertragen, muss die Verweilzeit der Bahn im Behandlungsnipp erhöht, also die Bahngeschwindigkeit erniedrigt werden. Die letzt genannte Maßnahme steht damit im Widerspruch zum technologischen Ziel, möglichst viel Papier pro Zeit zu behandeln.

Im Projekt konnte klar gezeigt werden, dass es möglich ist, mittels Hochleistungsschall verschiedenste Naturpapiere volumenschonend zu glätten.

Im Fall des SC-Papiers gelang es, die im industriellen Prozess angestrebten Glättewerte mit einem um 34 % niedrigeren spezifischen Energieeinsatz zu erreichen, bei gleichzeitig deutlich geringerem Volumenverlust.

Eine hohe Linienlast, eine hohe Schwingungsamplitude (viel Reibweg) sowie eine geringe Bahngeschwindigkeit intensivieren das Behandlungsergebnis.

Eine Konditionierung der Bahn mittels Wasser oder besser Dampf führt zu signifikant besseren Glättergebnissen. Als Ursache hierfür darf die bekannte Wirkung des Wassers als Weichmachersubstanz unterstellt werden.

Orientierende Versuche zum Glätten pigmentgestrichener Papiere mittels Schall zeigten bisher noch keine befriedigenden Ergebnisse.

Aktuell wird das Schall-Glättprinzip hauptsächlich durch eine geringe Maximalgeschwindigkeit (25 m/min) limitiert. Diesem Bereich wird gleichzeitig das größte Optimierungspotenzial unterstellt, da in verschiedenen Versuchen gezeigt werden konnte, dass Ergebnisse gleicher Glätte mit unterschiedlichen Maschineneinstellungen (Energieeinträgen) erreicht werden konnten.

Die Kaskadierung mehrerer Sonotroden könnte hierbei eine - jedoch sicherlich nicht die alleinige - Lösung des Problems darstellen. Aus den bisherigen Ergebnissen fällt es darüber hinaus schwer, eine mögliche Mindestanzahl an Sonotroden zu benennen, die für eine Bahnbehandlung mit industrieüblichen Geschwindigkeiten benötigt wären.

Nach den bisherigen Erfahrungen sollten Maßnahmen, die es ermöglichen, eine höhere Energiemenge pro Zeit auf die Bahn zu übertragen und damit die Voraussetzung für höhere Behandlungsgeschwindigkeit schaffen, im Vordergrund zukünftiger Entwicklungsarbeiten stehen. Diese würden u. a. auch eine strukturierte Untersuchung des aktuellen Schwingverhaltens (Amplitude) der Sonotrode sowie die Variation des Gegenwalzenmaterials beinhalten.

Aufgrund der überaus positiven und auch aus anderen Bereichen der Papierherstellung bekannten Wirkung einer Bahnkonditionierung mittels Dampf ist es geplant, einen Dampfblaskasten vor dem Schallmodul zu installieren.

Die gezielte Entwicklung von mehr Glanz wäre ebenfalls eine interessante Aufgabe zukünftiger Forschungsarbeiten, welche vor allem auf die Veränderung der Oberflächenstruktur von Sonotrode und Gegenwalze fokussieren müsste.

Abschließend soll an dieser Stelle allen beteiligten Partnern, insbesondere den Mitgliedern des Projekt begleitenden Ausschusses sowie der Gebr. Bellmer GmbH Maschinenfabrik und der PAMA, Papiermaschinen AG für ihre Unterstützung im Projekt gedankt werden.