

Thorey Gera Textilveredelung GmbH, Gera
WORK Microwave GmbH, Holzkirchen
LLA Instruments GmbH & Co. KG, Berlin
Leibniz-Institut für Oberflächenmodifizierung e.V., Leipzig
Textilforschungsinstitut Thüringen-Vogtland e.V., Greiz

EcoTextileFinishProcessing

**Material- und energieeffiziente Textilveredelung für technische Spezialtextilien
in kleinen Losgrößen mittels Real-Time-Prozesskontrolle
basierend auf einem Mikrowellensensorsystem mit stark reduziertem Kalibrieraufwand
und NIR-spektroskopischem Chemical Imaging**

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,
gefördert unter dem Az: 33864 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Marcel Bäuml, Dr. Olesya Daikos, Dr. Dominique Mario Gampe, Andreas Ludwig,
Dipl.-Ing. Hinrich Römhild, Dr.-Ing. Steffen Rösler, Dr. Tom Scherzer,
Dr.-Ing. Carsten Steckert und Dipl.-Phys. A. Volland

April 2020

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	33864	Referat	21/2	Fördersumme	510 607 €
Antragstitel	EcoTextileFinishProcessing: Material- und energieeffiziente Textilveredlung für technische Spezialtextilien in kleinen Losgrößen mittels Real-Time-Prozesskontrolle basierend auf einem Mikrowellensensorsystem mit stark reduziertem Kalibrieraufwand und NIR-spektroskopischem Chemical Imaging				
Stichworte	Textilveredlung, Prozesskontrolle, Energieeinsparung, Abfallvermeidung, NIR-Spektroskopie, Mikrowellensensoren				
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)		
24 Monate	1.11.2017	31.1.2020 (+Verl.)	1		
Zwischenberichte	2 (07/2018 & 01/2019)				
Bewilligungsempfänger	Thorey Gera Textilveredlung GmbH Lange Str. 71 07551 Gera			Tel	0365 / 7352-44
				Fax	0365 / 7352-55
				Projektleitung	Andreas Ludwig
				Bearbeiter	Marcel Bäuml
Kooperationspartner	WORK Microwave GmbH, Rudolf-Diesel-Ring 2, 83607 Holzkirchen LLA Instruments GmbH & Co. KG, Justus-von-Liebig-Str. 9/11, 12489 Berlin Leibniz-Institut für Oberflächenmodifizierung e.V. (IOM), Permoserstr. 15, 04318 Leipzig Textilforschungsinstitut Thüringen Vogtland e.V. (TITV), Zeulenrodaer Str. 42, 07973 Greiz (Unterauftragnehmer)				

Zielsetzung und Anlaß des Vorhabens

Das Anliegen dieses Projektes bestand in der Entwicklung verschiedener messtechnischer Verfahren für die In-line-Überwachung von Textilveredelungsprozessen (insbes. Imprägnierung) und deren Implementierung in eine entsprechende technische Anlage mit den konkreten Zielen (i) einer effizienteren Gestaltung des Trocknungsprozesses und damit einer Reduzierung des dafür erforderlichen Energieaufwandes sowie (ii) der schnelleren Einstellung der korrekten Auftragsmenge an Veredelungschemikalien und der Sicherstellung der Homogenität des Auftrages und einer gleichbleibenden Qualität zur Verringerung bzw. weitgehenden Vermeidung von Produktionsabfällen.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Die Entwässerung von veredelten Textilien erfolgt dreistufig. Die zweite Stufe erfolgt durch Unterdruck mit Hilfe eines Saugbalkens. Um diesen bedarfsgerecht steuern zu können, wurden Mikrowellensensoren entwickelt, getestet und kalibriert, die den Wassergehalt nach dem Saugbalken quantitativ erfassen können. Die dritte Stufe der Trocknung erfolgt in einem Trocknungsöfen. Die nunmehr sehr geringe Feuchte kann mit solchen Sensoren nicht mehr korrekt erfaßt werden. Deshalb wurde dafür ein spektroskopisches Verfahren auf der Basis des NIR Spectral Imaging entwickelt. Das umfaßte sowohl die Auswahl und die Adaption der Messtechnik an die Textilveredelungsanlage als auch die Entwicklung spezieller Kalibrierverfahren auf der Basis leistungsfähiger chemometrischer Methoden. Die NIR-Methode sollte neben der Bestimmung der Restfeuchte auch die quantitative Erfassung des Auftragsgewichtes sowie die Überwachung der Homogenität ermöglichen. Der Test der verschiedenen Messverfahren und deren Kalibrierung erfolgten mit einem breiten Spektrum veredelter Textilien, die zum üblichen Produktionsprofil der Fa. Thorey gehören. Abschließend wurden alle Messverfahren in eine Textilverarbeitungsmaschine, die dafür modifiziert werden mußte, eingebunden und im realen Betrieb umfassend getestet.

Ergebnisse und Diskussion

Zunächst wurde an der Textilveredelungsmaschine verschiedene mögliche Montagepunkte für die verschiedenen Sensoren untersucht, damit diese (i) den Produktionsprozess nicht stören und (ii) optimale Ergebnisse liefern können. Dabei stellte sich heraus, dass die ursprünglich geplante NIR-Kamera aus Platzgründen durch ein NIR-Multilex-Spektrometer ersetzt werden mußte. Das machte wiederum die Konstruktion einer mechanisch anspruchsvollen Messbrücke mit verbesserten Reflektoroptiken für die Anordnung der Einzelsensoren erforderlich. Weiterhin machten messtechnische Ansprüche (waagerechte Bahnführung, Laufruhe) die Umrüstung der Textilmaschine bzgl. Bahnführung (Einbau einer neuen Umlenkwalze) notwendig. Die spektroskopische Erfassung der Restfeuchte bzw. des Auftragsgewichtes am Prozessende kann somit nunmehr über die volle Bahnbreite (3.6 m) erfolgen.

Parallel dazu wurden grundlegende Untersuchungen zur Eignung chemometrischer Kalibriermodelle für die quantitative Erfassung von Restfeuchte bzw. Auftragsgewicht durchgeführt und konkrete Modelle für eine Vielzahl von Materialkombinationen (Textilien & Veredelungschemikalien) entwickelt. Es konnte gezeigt werden, dass beide Parameter mit hoher Präzision quantitativ bestimmt werden können. Für die Feuchte liegt der Vorhersagefehler generell bei ca. 0.5 %, für das Auftragsgewicht hängt er vom konkreten System, insbesondere von der Menge der applizierten Substanzen, ab. Weiterhin wurde demonstriert, dass die Methode sich in der erwarteten Weise zur Überwachung der Homogenität der Beschichtungen bzw. zur Detektion von Verarbeitungsfehlern eignet. Aufgrund des oben erwähnten Wechsels der Messtechnik wurden ergänzende Untersuchungen mit einem Multiplex-Spektrometer vorgenommen.

Für die quantitative Erfassung der Feuchte nach der zweiten Stufe der Grobentwässerung der Textilien wurden neuartige Mikrowellensensoren mit Frequenzen von 1 bis 5 GHz entwickelt und umfassend getestet. Für Polyester- und Baumwollgewebe wurde dabei eine gemeinsame lineare Kalibrierkurve für die quantitative Bestimmung der Feuchte gefunden, während Polyamid wegen seiner Quellfähigkeit ein abweichendes Verhalten aufweist. Weiterhin wurde gefunden, dass man vor allem bei höheren Feuchten mit Frequenzmessungen eine wesentlich bessere Auflösung erreicht als über die Amplitude des Signals. Die 5 GHz-Sensoren erwiesen sich wegen ihrer geringen Reichweite als zu kritisch hinsichtlich der Positionierung relativ zur Textilbahn und wurden daher nicht weiter berücksichtigt. Außerdem wurden Mehrkopfsensoren entwickelt, in denen die Sensoren alternierend messen. Dies ermöglicht perspektivisch Sensoren, die bei unterschiedlichen Frequenzen arbeiten und damit unterschiedliche Eindringtiefen in das Material ermöglichen.

Abschließend wurden alle NIR- und Mikrowellensensoren an einer Textilveredelungsmaschine montiert und umfassend unter produktionsnahen Bedingungen getestet. Alle Tests verliefen erfolgreich, die Ergebnisse entsprachen den Erwartungen. Die Messwerte der Sensoren wurden, soweit möglich, mit parallel erhaltenen Laborwerten verglichen und zeigten eine sehr gute Korrelation mit diesen.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Vortrag durch A. Ludwig auf dem Forum der Thüringer Energie- und GreenTech-Agentur (ThEGA) am 24.10.2019 in Weimar (gemeinsame Session von ThEGA und DBU)

Diverse Publikationen zu den Arbeiten mit NIR Spectral Imaging befinden sich derzeit in Vorbereitung (IOM)

Fazit

Alle technischen Ziele des Projektes, d.h. die Entwicklung der notwendigen Messtechnik und Messverfahren, wurden in vollem Umfang erreicht. Damit wurden alle erforderlichen Voraussetzungen für die Bereitstellung quantitativer Daten, die eine effiziente Prozesssteuerung ermöglichen sollen, geschaffen. Die Einbindung der anfallenden Messdaten in die Prozessleittechnik war nicht Gegenstand des Projektes, soll jedoch zeitnah realisiert werden. Konkrete Aussagen über mit Hilfe der Messdaten mögliche Energieeinsparungen im Trocknungsprozess sowie zur Verringerung des Abfallaufkommens erfordern einen Testbetrieb der Textilveredelungsanlage über einen längeren Zeitraum und lassen sich daher zum Zeitpunkt des Projektabschlusses noch nicht ableiten.

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der Abbildungen und Tabellen	5
Verzeichnis von Begriffen und Definitionen	8
Zusammenfassung	9
1. Einleitung	10
2. Erstellung eines Anforderungsprofils und Erarbeitung der maschinenseitigen Grundlagen für die Entwicklung eines material- und energieeffizienteren Verfahrens für die Textilveredlung	13
2.1. Aufbau und Funktionsweise eines Spannrahmens	13
2.2. Positionen der neuen Prozessmesstechnik am Spannrahmen	16
2.3. Auswahl von repräsentativen Textilmustern für die Evaluierung der Prozesskontrolltechnik	18
2.4. Auswahl und Bereitstellung von Rezepturen bzw. Flotten	20
3. Entwicklung eines Mikrowellensensors für die Bestimmung des Wassergehaltes von Textilien nach dem Saugbalken	22
3.1. Sensorkonzept und Voruntersuchungen	22
3.2. Messungen an einem Foulard	26
3.3. Messungen mit 2 Sensoren an einer laufenden Textilbahn	27
3.4. Vergleich von Frequenzmessungen mit gravimetrischen Daten der Feuchte auf einer Waage	30
3.5. Simulation der Resonatoren	32
3.6. Quantitativer Zusammenhang zwischen Messwert und Restfeuchte	32
3.7. Aufbau eines Mehrkopfsensors	34
4. Entwicklung von NIR-Messverfahren für die Überwachung von Feuchtegrad und Auftragsgewicht	36
4.1. Quantifizierung spektroskopischer Daten mittels chemometrischer Ansätze	36
4.2. Entwicklung chemometrischer Modelle für die quantitative Bestimmung der Feuchte	36
4.3. Entwicklung chemometrischer Modelle für die quantitative Bestimmung des Auftragsgewichtes	41
4.4. Chemometrische Modelle für den Multiplexer	44

5. Entwicklung und Aufbau der NIR-Messtechnik für die Prozessüberwachung	48
5.1. Mechanische Konstruktion der Beleuchtungseinheit	48
5.2. Optische Konstruktion der Beleuchtungseinheit	48
5.3. Integration der Messtechnik in die Textilausrüstungsstraße	52
6. Praktische Erprobung der entwickelten Sensoren und Messverfahren an einer Textilveredelungsanlage der Fa. Thorey Textilveredelung GmbH	54
6.1. Überwachung des Auftragsgewichtes	54
6.2. Überwachung der Restfeuchte am Saugbalken	58
6.3. Überwachung der Restfeuchte am Prozessende	59
Literaturverzeichnis	64

Verzeichnis der Abbildungen und Tabellen

Abb. 2.1:	Prinzipieller Aufbau eines Spannrahmens	13
Abb. 2.2:	Saugbalken an einer Textilveredelungsanlage der Fa. Thorey	14
Abb. 2.3:	Position der Mikrowellensensoren am Saugbalken eines Spannrahmens	16
Abb. 2.4:	Montage der NIR-Messtechnik im Auslauf des Spannrahmens	17
Abb. 2.5:	Mögliche Montagepositionen der NIR-Messtechnik	17
Abb. 3.1:	Sensor mit Mikrowellenresonator	22
Abb. 3.2:	Resonanzkurven vom unbelasteten und belasteten Mikrowellenresonator	22
Abb. 3.3:	In der Voruntersuchung gemessene Restfeuchten	23
Abb. 3.4:	Messwerte Sensor aufgetragen gegen Wassergewicht	23
Abb. 3.5:	Resonatorköpfe für unterschiedliche Frequenzen	24
Abb. 3.6:	Abstandsabhängigkeit Mikrowellenresonator	24
Abb. 3.7:	Mikrowellensensor unter einer Textilbahn	25
Abb. 3.8:	Foulard mit Endlostextilband und Mikrowellensensor	26
Abb. 3.9:	Feuchtemessungen mit Mikrowellensensor am Foulard	26
Abb. 3.10:	Versuchsaufbau Saugbalken	27
Abb. 3.11:	Versuchsaufbau mit Saugbalken und Sensoren	27
Abb. 3.12:	Messungen an der Textilprobe T9 (Sonnenschutz Rohware 112 g/m ²)	28
Abb. 3.13:	Messungen an der Textilprobe T10 (Premium Backlit Rohware 241 g/m ²)	28
Abb. 3.14:	Messung Resonanzfrequenz in Abhängigkeit von der Feuchte der Textilbahn	29
Abb. 3.15:	Umrechnung der Feuchtwerte in den Wassergehalt	29
Abb. 3.16:	Messaufbau mit Waage	30
Abb. 3.17:	Messung des Feuchtegehalts mit der Waage sowie mit Sensor 71 / Resonator 132	30
Abb. 3.18:	Messung des Feuchtegehalts mit der Waage sowie mit Sensor 71 / Resonator 198	31
Abb. 3.19:	Zusätzliche Messung des Feuchtegehalts an einer Textilprobe aus Polyamid	31
Abb. 3.20:	Simulation des Resonators mit dicker Keramik 0.5 mm	32
Abb. 3.21:	Simulation des Resonators mit dünner Keramik 0.25 mm und geänderter Geometrie	32
Abb. 3.22:	Ergebnis der Regressionsrechnung für Resonator 132	33
Abb. 3.23:	Ergebnis der Regressionsrechnung für Resonator 198	34
Abb. 3.24:	Mehrkopfsensor mit 2 Resonatorköpfen	35

Abb. 4.1:	NIR-Spektren von hellem Polyestergewebe (243 g/m ² , behandelt mit einem optischen Aufheller, 19 g/m ²) bei unterschiedlichen Feuchtegehalten	37
Abb. 4.2:	PLS-Kalibrierung der NIR-Spektren von mit einem optischen Aufheller behandelten Polyestergewebe auf die Feuchte	38
Abb. 4.3:	Externe Validierung des Kalibriermodells in Abb. 4.2. mit unabhängigen Proben	38
Abb. 4.4:	Spectral Images von mit optischem Aufheller behandeltem Polyestergewebe bei unterschiedlichen Feuchtegraden	38
Abb. 4.5:	NIR-Spektren von schwarzem Mischgewebe (324 g/m ² , behandelt mit einem Flammhemmer, 59 g/m ²) bei unterschiedlichen Feuchtegehalten	39
Abb. 4.6:	PLS-Kalibrierung der NIR-Spektren von mit Flammhemmer behandeltem Mischgewebe auf die Feuchte	39
Abb. 4.7:	Externe Validierung des Kalibriermodells in Abb. 4.6 mit unabhängigen Proben	39
Abb. 4.8:	Spectral Images von mit Flammhemmer behandeltem Mischgewebe bei unterschiedlichen Feuchtegraden	40
Abb. 4.9:	PLS-Kalibrierung der NIR-Spektren von Baumwollgewebe auf die Feuchte	40
Abb. 4.10:	Externe Validierung des Kalibriermodells in Abb. 4.9 mit unabhängigen Proben	40
Abb. 4.11:	Spectral Images von Baumwollgewebe nach partieller Trocknung nach unterschiedlichen Szenarien	41
Abb. 4.12:	NIR-Spektren von Polyestergewebe (243 g/m ²), auf das eine PVAc-Dispersion als Appretur mit unterschiedliche Auftragsgewichten appliziert wurde	42
Abb. 4.13:	PLS-Kalibrierung der NIR-Spektren auf das Auftragsgewicht einer PVAc-Appretur auf Polyestergewebe	42
Abb. 4.14:	Externe Validierung des Kalibriermodells in Abb. 4.13 mit unabhängigen Proben	42
Abb. 4.15:	Spectral Images von Polyestergewebe, das mit unterschiedlichen Auftragsgewichten einer PVAc-Appretur behandelt wurde	43
Abb. 4.16:	Messbrücke des NIR-Multiplex-Spektrometers an einer Testanlage bei LLA Instruments	44
Abb. 4.17:	NIR-Spektren von Polyamidgewebe (aufgenommen mit einem Multiplexer-Spektrometer) bei unterschiedlichen Feuchtegehalten	45
Abb. 4.18:	PLS-Kalibrierung der NIR-Spektren von Polyamidgewebe auf den Feuchtegehalt	45
Abb. 4.19:	Spectral Images von Polyamidgewebe bei unterschiedlichen Feuchtegraden	46
Abb. 4.20:	NIR-Spektren (aufgenommen mit einem Multiplexer-Spektrometer) von mit einem Haftvermittler behandeltem Polyestergewebe	46
Abb. 4.21:	PLS-Kalibrierung der NIR-Spektren von mit einem Haftvermittler behandeltem Polyestergewebe auf das Auftragsgewicht	46
Abb. 4.22:	Spectral Images von Polyestergewebe, das mit unterschiedlichen Auftragsgewichten einer Latex-Dispersion als Haftvermittler behandelt wurde	47

Abb. 5.1:	Mechanische Konstruktion der Beleuchtungseinheit	48
Abb. 5.2:	Vertikales Schnittbild der Beleuchtung mit dem bisherigen Reflektor	49
Abb. 5.3:	Neuer Reflektor mit polynomförmigem Außenbereich	50
Abb. 5.4:	Layout des neuen Reflektors mit Polynomform im Außenbereich	51
Abb. 5.5:	Lampe mit 2 mm durchgebogener Wendel in bisherigem bzw. neuem Reflektor	51
Abb. 5.6:	Geplante Einbauposition der Messbrücke kurz vor dem Warenauslauf und Umsetzung nach Montage in der Anlage	52
Abb. 6.1:	Montage der Mikrowellensensoren hinter dem Saugbalken einer Textilveredelungsanlage der Fa. Thorey	54
Abb. 6.2:	NIR-Spektren von mit optischen Aufheller behandeltem Polyester-Gewirke, ausgerüstet mit Flammhemmer bzw. ohne Flammhemmer	55
Abb. 6.3:	Aufzeichnung der Beschichtung eines Polyester-Gewirkes mit einem Flammhemmer	56
Abb. 6.4:	NIR-Spektren von Polyester-Gewebe mit Schlichte und ohne Schlichte	57
Abb. 6.5:	Einlaufprozess des Herunterwaschens der Schlichte von einem Polyestergerewebe	57
Abb. 6.6:	Einfluss unterschiedlicher Unterdrücke am Saugbalken auf den Anzeigewert des Sensors	58
Abb. 6.7:	Umrechnung der Messwerte des Sensors in Feuchtwerte für Polyestergerewebe mit einem Flächengewicht von 120 g/m ²	58
Abb. 6.8:	Umrechnung der Messwerte des Sensors in Feuchtwerte für Polyestergerewebe mit einem Flächengewicht von 65 g/m ²	59
Abb. 6.9:	Überwachung der Restfeuchte eines Polyestergerewebes nach dem Durchlauf durch den Trockenofen (mit Variation der Trocknungsbedingungen)	60
Abb. 6.10:	Überwachung der Restfeuchte eines gewaschenen Polyestergerewebes nach dem Durchlauf durch den Trockenofen	61
Abb. 6.11:	Überwachung der Restfeuchte eines mit einem optischen Aufheller veredelten Polyestergerewebes nach dem Durchlauf durch den Trockenofen	62
Tab. 2.1:	Für die Untersuchungen in diesem Projekt ausgewählte Materialien	19
Tab. 3.1:	Untersuchte Textilproben	25

Verzeichnis von Begriffen und Definitionen

Abquetschwalzen	auch Foulardwalzen; gummiertes Walzenpaar am Ausgang des Foulards zum Abquetschen der Flotte zur Grobentwässerung der Textilbahn (erste Trocknungsstufe)
Appretur	allgemein eine veredelnde Behandlung von Textilien, die oft durch Imprägnierung erfolgt; im engeren Sinne eine Veränderung der Eigenschaften, z.B. Versteifung
externe Validierung	Test eines Kalibriermodells mit unabhängigen Proben (also solchen, die nicht bereits in der Kalibrierung enthalten waren)
Faktoren	Eigenvektoren der multidimensionalen Datenmatrix, die für die multivariate Kalibrierung verwendet wird. Werden auch als (Haupt-)Komponenten bezeichnet.
Flotte	meist wässrige Formulierung, in der Textilien gewaschen, gebleicht, gefärbt oder imprägniert werden
Hyperspektralkamera	NIR-Kamera
interne Validierung	Arbeitsschritt bei der Erstellung eines Kalibriermodells, der u.a. der Optimierung des Modells dient
Multiplex-Spektrometer	Mehrkanal-Spektrometer, bei der die einzelnen Kanäle (z.B. optische Fasern mit Messkopf) mit Hilfe eines „Umschalters“ (Multiplexers) nacheinander analysiert werden
multivariate Kalibrierung	Kalibrierung auf mehrere oder alle Wellenlängen eines Spektrums (im Gegensatz dazu wird bei einer univariaten Analyse nur eine Wellenlänge/Bande zur Quantifizierung genutzt wird, z.B. mittels Bandenintegration)
PLS	Partial Least Squares Regression: etabliertes multivariates Kalibrationsverfahren in der Chemometrie
PVAc	Polyvinylacetat
R^2	Erklärte Varianz. R^2 gibt an, wieviel Prozent der Varianz in den Spektren durch das chemometrische Modell erklärt wird. Ein gutes Modell sollte Werte $R^2 \geq 90\%$ aufweisen.
RMSEP	Root Mean Square Error of Prediction: Vorhersagefehler eines chemometrischen Modells
Saugbalken	im vorliegenden Kontext ein perforiertes Rohr zur Entwässerung der darüber laufenden Textilbahn durch Anlegen von Unterdruck (zweite Trocknungsstufe)
Spectral Imaging	Bildgebende Spektroskopie

Zusammenfassung

Das Anliegen dieses Projektes bestand in der Entwicklung verschiedener messtechnischer Verfahren für die In-line-Überwachung von Textilveredelungsprozessen (insbes. Imprägnierung) und deren Implementierung in eine entsprechende technische Anlage mit den konkreten Zielen (i) einer effizienteren Gestaltung des Trocknungsprozesses und damit einer Reduzierung des dafür erforderlichen Energieaufwandes sowie (ii) der schnelleren Einstellung der korrekten Auftragsmenge an Veredelungschemikalien und der Sicherstellung der Homogenität des Auftrages und einer gleichbleibenden Qualität zur Verringerung bzw. weitgehenden Vermeidung von Produktionsabfällen.

Die zweite Stufe Entwässerung von veredelten Textilien erfolgt durch Unterdruck mit Hilfe eines Saugbalkens. Um diesen bedarfsgerecht steuern zu können, wurden Mikrowellensensoren mit Frequenzen von 1 bis 5 GHz entwickelt, getestet und kalibriert, die den Wassergehalt nach dem Saugbalken quantitativ erfassen können. Dabei wurde gefunden, dass man vor allem bei höheren Feuchten mit Frequenzmessungen eine wesentlich bessere Auflösung erreicht als über die Amplitude des Signals.

Für die Bestimmung der sehr geringen Feuchte nach der anschließenden Trocknung in einem Trockenofen wurde ein spektroskopisches Verfahren auf der Basis des NIR Spectral Imaging entwickelt. Das umfaßte sowohl die Auswahl und die Adaption der Messtechnik an die Textilveredelungsanlage als auch die Entwicklung spezieller Kalibrierverfahren auf der Basis leistungsfähiger chemometrischer Methoden. Die NIR-Methode ermöglicht neben der Bestimmung der Restfeuchte auch die quantitative Erfassung des Auftragsgewichtes sowie die Überwachung der Homogenität. Es konnte gezeigt werden, dass beide Parameter mit hoher Präzision quantitativ bestimmt werden können. Für die Feuchte liegt der Vorhersagefehler generell bei ca. 0.5 %, für das Auftragsgewicht hängt er vom konkreten System, insbesondere von der Menge der applizierten Substanzen, ab. Weiterhin wurde demonstriert, dass die Methode sich zur Überwachung der Homogenität der Beschichtungen bzw. zur Detektion von Verarbeitungsfehlern eignet.

Während die Mikrowellensensoren problemlos hinter dem Saugbalken angeordnet werden konnten, mußte für die NIR-Messtechnik sichergestellt werden, dass diese einerseits den Produktionsprozess nicht stört, die Maschine aber andererseits den Messprozess nicht beeinträchtigt. Dazu wurde eine 3.6 m breite Messbrücke für die Anordnung der NIR-Sensoren des Multiplexspektrometers über der Textilbahn entwickelt, die aufgrund der hohen Empfindlichkeit der Methode höchsten Ansprüchen an die mechanische und optische Stabilität (erschütterungsfreie Messung) gerecht werden mußte.

Abschließend wurden die Mikrowellensensoren und die NIR-Messtechnik an der Textilveredelungsmaschine unter produktionsnahen Bedingungen umfassend getestet. Die Ergebnisse dieser Test entsprachen in vollem Umfang den Erwartungen. Die Messwerte der Sensoren wurden, soweit möglich, mit parallel erhaltenen Laborwerten verglichen und zeigten eine sehr gute Korrelation mit diesen.

Damit wurden alle erforderlichen Voraussetzungen für die Bereitstellung quantitativer Daten, die eine effiziente Prozesssteuerung ermöglichen sollen, geschaffen. Die Einbindung der anfallenden Messdaten in die Prozessleittechnik war nicht Gegenstand des Projektes, soll jedoch zeitnah realisiert werden. Konkrete Aussagen über mit Hilfe der Messdaten mögliche Energieeinsparungen im Trocknungsprozess sowie zur Verringerung des Abfallaufkommens durch materialsparenderes Anfahren des Prozesses nach Produktwechseln und Vermeidung von Fehlchargen erfordern einen Testbetrieb der Textilveredelungsanlage über einen längeren Zeitraum und lassen sich daher zum Zeitpunkt des Projektabschlusses noch nicht ableiten.

1. Einleitung

Mit der Neuorientierung der Textilindustrie in Europa auf technische, medizinische und smarte Textilien steigen die Umsätze bei immer kleineren Losgrößen und hohem Kostendruck. Das trifft vor allem die Textilveredelung. Die Ausrüstung von technischen Textilien mit spezifischen Funktionalitäten erfolgt in der Regel mit Hilfe wässriger Lösungen oder Dispersionen, das Material muss somit nach dem Veredelungsschritt getrocknet werden. Die Textilveredelung ist daher ein außerordentlich energieintensiver Prozess, so dass eine energetische Optimierung ein hohes Einsparpotential für Energie und Kosten birgt. Ausgangspunkt des vorliegenden Projektes war die Tatsache, dass die sukzessive Entwässerung / Trocknung des behandelten textilen Materials mehrstufig erfolgt: zunächst erfolgt eine mechanische Grobentwässerung („Quetschen“) mit Hilfe eines Foulards, anschließend eine weitere Entwässerung mit Hilfe eines Saugbalkens (Anlegen von Unterdruck), die im Vorfeld des Projektes zu einem Restwassergehalt von ca. 30 % führte. Die abschließende thermische Trocknung erfolgt in einem gasbeheizten Trockenofen. Da eine messtechnische Erfassung des Feuchtegehaltes des Textils vor Projektbeginn nicht erfolgte, musste dabei ein „Sicherheitspuffer“ eingeplant werden (Übertrocknung). Energieeinsparpotential ergab sich somit einerseits aus der Optimierung des Verhältnisses von Unterdruckentwässerung zu thermischer Trocknung, da die erste energetisch günstiger zu erreichen ist, andererseits aus der Vermeidung von Übertrocknung am Prozessende, indem nur noch bis auf das technisch notwendige Maß getrocknet wird. Dieses ergibt sich u.a. daraus, dass Materialien wie Baumwolle oder Polyamid, aber auch bestimmte Veredelungsmittel (z.B. Appreturen aus Polyvinylalkohol oder Stärke) eine von den Umgebungsbedingungen abhängig Gleichgewichtsfeuchte aufweisen und daher nach einer Übertrocknung wieder Feuchtigkeit aufnehmen.

Für die nasschemische Behandlung von Textilien mussten durch die Fa. Thorey im Jahr 2019 ca. 820.000 kWh Elektroenergie sowie 515.000 m³ Erdgas eingesetzt werden (Bilanz Gesamtbetrieb). Ein wesentlicher Anteil des Energieaufwandes entfiel dabei auf die Trocknung der textilen Materialien nach der Imprägnierung. Die beiden in den Veredelungsstraßen installierten Vakuumentwässerungsanlagen haben eine elektrische Leistung von jeweils 55 kW. An der Ausrüstungsstraße 1 wurden in 2019 ca. 160.000 m³ Gas und an der Ausrüstungsstraße 2 ca. 195.000 m³ Gas für die thermische Trocknung verbraucht, was einem spezifischen Gasverbrauch von 0,280 m³/kg Ware bzw. 0,347 m³/kg Ware entspricht. Ziel des Projektes war es daher, die Voraussetzungen dafür zu schaffen, dass die Entwässerung perspektivisch so geregelt werden kann, dass bei optimaler Restfeuchte nach Foulard und Saugbalken nur ein minimaler Gasverbrauch zur Zwischentrocknung vor dem Appretieren aufgewendet werden muss. Da es sich bei den beiden Veredelungsstrecken um die Hauptarbeitsprozesse der Fa. Thorey handelt, werden Einsparungen von 5 % beim spezifischen Gasverbrauch – und somit auch bei den CO₂-Emissionen – erwartet, d.h. ca. 25.000 m³ pro Jahr, was einer Einsparung von mehr als 10.000 € pro Jahr entspricht. Hinzu kommt die angestrebte Einsparung von Elektroenergie. Gelingt es, die Vakuumerzeuger durch eine stärker bedarfsorientierte Fahrweise effizienter zu betreiben und so die aufgenommene elektrische Leistung um 10 % zu senken, so würde dies jährliche Einsparungen von ca. 7.500 € bedeuten.

Zur Erreichung dieser Ziele ist vor allem eine ausgefeilte mehrstufige Prozessanalytik zur Bestimmung der aktuellen Wassergehalte des Textils nach dem Saugbalken bzw. am Prozessende, d.h. nach der Trocknung, notwendig. Dabei soll die erste Stufe einen optimierten Betrieb des Saugbalkens ermöglichen, während die zweite Stufe den finalen Restwassergehalt überwacht. Die Entwicklung der dafür notwendigen Prozesskontrollanalytik und deren Implementierung in eine kommerzielle Textilveredelungsanlage war Gegenstand des vorliegenden Projektes. Obwohl die Entwicklung der Messtechnik auf

der Basis grundsätzlich bekannter Verfahren erfolgte, musste diese so neu- bzw. weiterentwickelt werden, dass sie den Erfordernissen des konkreten Prozesses gerecht wird. Für die Bestimmung des Wassergehaltes nach dem Saugbalken wurden neuartige Mehrfrequenz-Mikrowellensensoren entwickelt, die die große Variabilität textiler Verarbeitungsprozesse berücksichtigen (Toleranz gegenüber den Variationsbreiten von textilen Materialien und Wassergehalten, Selbstkalibrierung etc.). Die Überwachung der Restfeuchte am Prozessende erfolgt mit Hilfe eines Multiplex-NIR-Messsystems.

Neben der Energieeinsparung war auch ein zweiter umweltrelevanter Aspekt Gegenstand des Projektes: die Vermeidung prozessbedingter Abfälle. Für deren Entstehung gibt es mehrere Ursachen. Die Kunden der Textilveredelung – insbesondere aus der Automobilindustrie, aber zunehmend auch im Fall anderer technischer Textilien – erwarten hochwertige und individuelle Ware zu konkurrenzfähigen Kosten bei immer weiter sinkenden Losgrößen. Diese Erwartungen der Kunden lassen sich auf den bestehenden Anlagen, auf denen schon allein für die Einstellung der Prozessparameter 50-200 m Warenbahn notwendig sind, nicht erfüllen. Gerade bei kleinen Losgrößen ist eine solche Prozessführung nicht nur aus wirtschaftlicher, sondern insbesondere auch aus ökologischer Sicht – betrachtet man allein die Warenabfälle und den ungenutzten Energieeintrag – nicht mehr vertretbar. Die für die Veredlung eingesetzten Chemikalien (u.a. Phosphat- und Harnstoffverbindungen, Fluorcarbonharze) sind zwar auf der Ware unbedenklich, dennoch stellt der ungenutzte Abfall, der vor allem aus den Einstellungsschritten resultiert und daher mit sinkenden Losgrößen exponentiell wächst, ein erhebliches Umweltproblem dar. Für eine raschere und damit effizientere Einstellung der Prozessparameter ist auch hier eine leistungsfähige Prozessanalytik erforderlich, die – anders als ein off-line betriebenes Labor – unmittelbar an der Produktionsanlage Daten zum aktuellen Zustand der Warenbahn (Auftragsmenge, Homogenität etc.) liefert. Solche Aussagen kann man mit Hilfe des NIR Chemical (oder Spectral) Imaging erhalten, für das das bereits oben erwähnte NIR-Messsystem alternativ genutzt werden kann. Die damit aufgezeichneten spektralen Daten werden dann nicht bezüglich des Wassergehaltes, sondern hinsichtlich chemischer und physikalischer Parameter ausgewertet. Bei geeigneter Kalibrierung stehen diese Daten sofort, also ohne jeglichen Zeitverzug, zur Verfügung und können für die Einstellung der Anlage genutzt werden. Die Analyse erfolgt vollflächig, also über die komplette Warenbahn.

Neben den bei der Einstellung der Anlage anfallenden Abfällen können Fehlchargen, deren Parameter außerhalb der erforderlichen Spezifikation liegen, ein erhebliches ökologisches wie wirtschaftliches Problem darstellen. Bislang erfolgt der Veredelung der Textilien im „Blindflug“, d.h. die Auftragsmengen können nur nach Abschluss des Prozesses off-line im Labor bestimmt werden. Eine umfassende Überwachung der Homogenität des Auftrages ist auf diese Weise nicht möglich. Diese Vorgehensweise macht Eingriffe in den Prozess unmöglich, bestenfalls kann der Prozess vor der nächsten Charge modifiziert werden. Bei erheblichen Abweichungen von der Spezifikation sind u.U. tausende Meter veredelte Textilbahn nicht verwendbar und erfordern im günstigsten Falle eine mit hohem Zeitaufwand verbundene, ressourcenverschlingende (u.a. erneute energieaufwändige Trocknung) und damit teure Nacharbeit bzw. müssen andernfalls als modifizierter Kunststoffabfall aufwändig und umweltgerecht entsorgt werden. Mit einer In-line-Überwachung der exakten Auftragsmengen sowie der Gleichmäßigkeit des Auftrages der zu applizierten Chemikalien auf Basis des Spectral Imaging soll das vermieden werden. Damit könnte man bei Abweichungen von den Sollwerten bzw. der Homogenität sofort in den Prozess eingreifen und Fehler korrigieren. Neben den oben beschriebenen Energieeinsparungen ist somit die Vermeidung von Abfall, also möglicher Fehlchargen, das zweite Hauptziel des Projektes.

Schließlich sei noch darauf hingewiesen, dass hinsichtlich der Menge der applizierten Chemikalien derzeit ebenfalls ein Sicherheitspuffer berücksichtigt werden muss, um den Auftrag der technisch bedingten Mindestmenge sicher garantieren zu können. Mit Hilfe des NIR Chemical Imaging wird man diesen Sicherheitspuffer im unteren Toleranzbereich halten und somit den spezifischen Verbrauch an Veredelungschemikalien deutlich reduzieren können. Neben den ökologischen Effekten würde angestrebte Verringerung des Chemikalieneinsatzes um 5 % Einsparungen von ca. 20.000 €/Jahr ergeben.

Wie oben dargelegt, lag der Schwerpunkt des Projektes auf der Entwicklung der notwendigen Messtechnik und -verfahren für die Prozessüberwachung und -steuerung, dem Test der diversen Einzelkomponenten und deren Zusammenspiel sowie der Implementierung der Messtechnik in eine Textilveredelungsanlage der Fa. Thorey. Dadurch werden am Ende umfangreiche orts- und zeitaufgelöste Daten über den Feuchtegehalt der veredelten Textilien während des mehrstufigen Trocknungsprozesses sowie Daten zum Auftragsgewicht und zur Homogenität des Auftrages bereitgestellt. Diese bilden die Grundlage für nachfolgende Änderungen an der Anlagensteuerung, die eine feuchteabhängige Steuerung des Saugbalkens bzw. des Trockenofens ermöglichen sollen. Erst diese bedarfsgerechte Steuerung des Trocknungsprozesses wird tatsächlich zu den angestrebten Energieeinsparungen gegenüber dem derzeitigen Stand führen. Ähnliches gilt sinngemäß für die Auftragsmenge. Die Umstellung der Anlagensteuerung auf eine stärker bedarfsorientierte Fahrweise des Prozesses war jedoch nicht mehr Gegenstand des von der DBU geförderten Projektes und wird daher im vorliegenden Bericht auch nicht berücksichtigt. Die tatsächlichen Einsparungen an Energie (Elektroenergie, Gas) und Chemikalien die Verringerung der CO₂-Emissionen sowie die Reduzierung des Abfallaufkommens (Fehlchargen, prozessbedingte Abfälle) werden nach Abschluss des Gesamtvorhabens letztendlich über einen längeren Zeitraum unter Produktionsbedingungen zu erfassen sein und somit erst in der Zukunft zur Verfügung stehen.

2. Erstellung eines Anforderungsprofils und Erarbeitung der maschinenseitigen Grundlagen für die Entwicklung eines material- und energieeffizienteren Verfahrens für die Textilveredlung (Bearbeitung des Teilprojektes: Thorey Gera Textilveredelung GmbH, Gera)

2.1. Aufbau und Funktionsweise eines Spannrahmens

Ziel des Projektes war es, eine Inline-Überwachung an einem Spannrahmen zu installieren und gleichzeitig eine automatisierte Steuerung für die Vakuumentwässerung zu entwickeln. Dafür wurden zwei unterschiedliche Systeme benötigt. Die Automatisierung der Vakuumentwässerung am Spannrahmen sollte mittels von Mikrowellensensoren der Firma Work Microwave realisiert werden. Die Überwachung des Prozessablaufes sollte mit Hilfe einer NIR-Kamera der Firma LLA Instruments realisiert werden. Diese beiden Systeme werden an zwei unterschiedlichen Einbaustellen an dem Spannrahmen installiert.

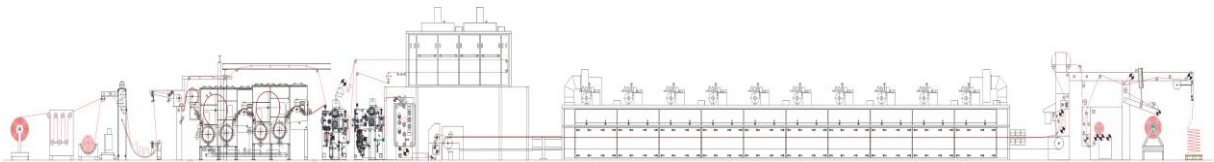


Abb. 2.1: Prinzipieller Aufbau eines Spannrahmens

Zunächst sollen Aufbau und Funktionsweise eines Spannrahmens kurz erläutert werden (siehe Abb. 2.1). An einem Spannrahmen (auch Spanntrockenfixiermaschine genannt) werden Textilien gewaschen oder entschlichtet. Für diesen Prozess ist eine Breitwaschmaschine an dem Spannrahmen installiert, in welcher Textilien in einer Breite von bis zu 360 cm kalt oder bei Kochtemperatur gewaschen oder entschlichtet werden.

Diverse Textilien haben durch den Herstellungsprozess Verunreinigungen oder auch nur Spinnöle auf dem Garn, welche vorab entfernt werden müssen, um weitere Veredelungsprozesse durchführen zu können. Ziel ist, für den jeweils nachfolgenden Prozess eine einheitliche Basis an Grundware zu schaffen. Bei Artikeln, die geschlichtet werden, wird die Schlichte in einer kontinuierlichen Wäsche bei 95°C in der Breitwaschmaschine entfernt. Um die Schlichte vollständig zu entfernen, wird das Waschwasser auf einen pH-Wert von 9 eingestellt. Für eine höhere Waschwirkung wird 1 g Waschmittel/l Waschwasser zudosiert.

Bei Textilien, bei denen im Herstellungsprozess statt einer Schlichte eine Avivage (Öl) auf das Garn aufgetragen wurde, ist es einfacher, die Verunreinigungen zu entfernen, die durch den Herstellungsprozess beim Weben oder Wirken entstanden sind. Die Avivage dient, genau wie die Schlichte, dazu, dass bei der Flächenbildung die Reibung zwischen den Fäden verringert wird und somit ein schnellerer Flächenbildungsprozess realisiert werden kann. Somit reißen die Fäden weniger und die Stabilität der Fasern wird dadurch signifikant erhöht. Diese Avivage lässt sich auch in einer kontinuierlichen Wäsche in einer Breitwaschmaschine entfernen. Bei der Entfernung der Avivagen werden nicht die hohen Waschttemperaturen benötigt wie bei Textilien mit einer Schlichte. Ausreichend sind hier üblicherweise 40°C warmes Wasser und 1 g/l Waschmittel.

Die Funktionsweise einer Breitwaschmaschine beruht auf dem Prinzip des Gegenstroms. Sie besteht aus 4 Waschabteilen mit je 800 Liter Wasser, durch die die die Ware mit Hilfe verschiedener Umlenkwellen und Siebtrommeln geführt wird. Wasser fließt von Abteil 4 bis ins Abteil 1, und Rotoren drücken

das Wasser durch die Ware. Gleichzeitig erhöhen Spritzrohre den Wascheffekt. Somit erreicht man ein optimales und effektives Waschverhalten. Das Waschmittel wird dabei erst ab dem zweiten Abteil zudosiert. Die Abteile 3 und 4 dienen lediglich zum Spülen der Ware.

Anschließend wird mittels zweier gummierter Walzen und eines definierten Anpressdruckes überschüssiges Wasser abgequetscht.

Danach läuft die Ware über einen Saugbalken (siehe Abb. 2.2), der mittels Unterdruck weiteres Wasser aus der Ware entfernt. Dafür ist an der Maschine ein Drehkolbengebläse mit einer Leistung von 55 kW installiert. Der Unterdruck kann je nach den geforderten Articleigenschaften eingestellt werden.



Abb. 2.2: Saugbalken an einer Textilveredelungsanlage der Fa. Thorey. Vorderseite (oben) bzw. Rückseite (unten).

Nach dem Saugprozess wird die Ware im Vortrockner bei 120°C auf eine Restfeuchte von nahezu 0 % getrocknet. Dies ist wichtig, um später einen homogenen Auftrag der Flotten zu gewährleisten.

Bei der Veredelung von Textilien werden die Flotten im Tauchverfahren aufgetragen. Anschließend wird über zwei gummierte Gummiwalzen die überschüssige Flotte von der Textilbahn wieder abgequetscht. Dafür wird mit einem definierten Abquetschdruck von 5 bar gearbeitet. Dies hat den Vorteil, dass ein gleichmäßiger Auftrag der Flotte gewährleistet wird und somit ein homogener Auftrag möglich ist. Der zweite Vorteil ist, dass Flotte gespart wird, weil die überschüssige Flotte wieder zurück in den Trog fließt.

Damit das Textil auch fadengerade hergestellt werden kann, läuft die Ware durch ein Schußfadenrichtgerät. Im diesem zeichnen Sensoren und Kameras den Fadenverlauf in Quer- und Kettrichtung auf.

Um die Flotten zu vernetzen und/oder die Ware zu trocknen oder zu fixieren, wird die Ware in Quer- richtung auf eine Nadelkette aufgenadelt und im Spannrahmen bei bis zu 210°C thermisch für eine bestimmte Dauer (z.B. textile Bahnen aus Polyester für 20 Sekunden) fixiert.

Nach der Fixierung und dem Vernetzen der Flotte wird die Ware entweder auf eine Großdocke aufgekault oder mittels Non-Stop-Wickler aufgewickelt.

Es besteht die Möglichkeit, diesen Prozess im Labormaßstab mit Hilfe eines Laborfoulards und eines entsprechenden Spannrahmens so nachzubilden, dass er den Bedingungen an der Produktionsanlage sehr nahekommt. Das ermöglicht Simulationen und Tests unter produktionsnahen Bedingungen.

Der Auftrag der Flotte an der Anlage wird zweimal pro Jahr überprüft. Dafür werden Quetschfuge, Shorehärte und Flottenaufnahme an 7 verschiedenen Stellen an der Foulardwalze gemessen. Dadurch wird jedoch nur der momentane Zustand des Flottenauftrages ermittelt. Für eine kontinuierliche Überprüfung der Auftragsmenge soll aus den mit einer Hyperspektralkamera-Kamera aufgezeichneten NIR-Spektren der Flottenauftrag ermittelt werden. Dies dient dazu, den Effekt von Einflussgrößen ab dem ersten Meter bis hin zum letzten Meter der Ware kontinuierlich zu kontrollieren.

Derzeit werden jeweils Muster vom Anfang und vom Ende einer Rolle entnommen und nach vom Kunden vorgegebenen Kriterien entsprechend der vorliegenden Spezifikation auf die relevanten Eigenschaften geprüft. Dafür kommen sowohl physikalische als auch chemische Prüfmethode zur Anwendung. Im Ergebnis dieser Prüfungen geht man davon aus, dass die restliche Warenmenge zwischen Anfang und Ende identische Eigenschaften besitzt. Zu den gemäß Spezifikation zu garantierenden Eigenschaften zählen z.B. eine Flammschutzwirkung oder spezielle Eigenschaften zur Penetration von Drucktinte bei den für den Ink Jet-Druck vorzubehandelnden textilen Flächen.

Viele der Artikel, die bei der Firma Thorey zur Veredlung beauftragt werden, müssen speziell gewaschen werden, da gemäß Spezifikation eine maximale Restauflage nach der Veredlung nicht überschritten werden darf. Dies trifft z.B. auf Ware zu, welche nach der Veredlung beschichtet werden soll. Ebenso werden an Waren, die für Verwendungen in der Medizintechnik oder Lebensmittelindustrie eingesetzt werden, besondere Anforderungen an die Sauberkeit und damit an die maximale Restauflage von Begleitstoffen und die Gleichmäßigkeit des Auswaschprozesses gestellt.

Sollte eine zu hohe Restauflage von Avivagen auf der Ware nach dem Waschprozess vorhanden sein, können bei einem nachfolgenden Beschichtungsprozess die erreichbaren Haftwerte zwischen Textil und Beschichtung zu gering sein. Dies führt im Extremfall zur Trennung zwischen den Komponenten und damit zur Zerstörung des fertigen Verbundes.

Zur Prüfung der Restauflagen werden, wie auch bei der Prüfung des Flammschutzes Muster entnommen und im Labor einer Restextraktionsprüfung durchgeführt. Auch in diesem Fall wird nach derzeitigem Stand der Technik von den festgestellten Eigenschaften der geprüften Muster auf die Eigenschaften der Gesamtware geschlossen. Somit geht man davon aus, dass die ungeprüften Warenmengen innerhalb der Veredlungspartie genau die Eigenschaften entsprechend der geprüften Muster aufweisen.

Durch die thermische Behandlung der textilen Fläche und der auf ihr aufgetragenen Textilhilfsmittel haben diese die Möglichkeit, zu vernetzen oder im einfachsten Fall abzutrocknen – das enthaltene

Wasser wird ausgetrieben. Sollten Fehler durch den thermischen Prozess entstehen, z.B. reservierte Stellen, so können auch diese sofort detektiert werden.

Um aber den immer höheren Anforderungen und immer kleineren von den Kunden gewünschten und vorgegebenen Toleranzen gerecht zu werden sowie um kleine Losgrößen qualitätsgerecht zu produzieren, benötigt man eine Inline-Überwachung der Parameter der laufenden Partie an den Spannrahmen. Dieses dient gleichzeitig der Fehlererkennung, damit gegebenenfalls hohe Reklamationskosten, die durch fehlerhafte Produktion entstehen könnten, vermieden werden.

Die NIR-Messtechnik wurde am Auslauf des Spannrahmens installiert. Somit kann man nach dem Fixierprozess die Ware auf ihre Eigenschaften oder eventuelle Fehler kontrollieren und gegebenenfalls im Prozess notwendige Änderungen und Korrekturen vornehmen und deren Wirksamkeit sofort überprüfen.

2.2. Positionen der neuen Prozessmesstechnik am Spannrahmen

Der beiden Mikrowellensensoren (jeweils 2 GHz, aber mit unterschiedlichen Resonatorgehäusen und somit unterschiedlicher Geometrie des austretenden Feldes) wurden unmittelbar hinter dem Saugbalken des Spannrahmens installiert. Details zeigt Abb. 2.3.

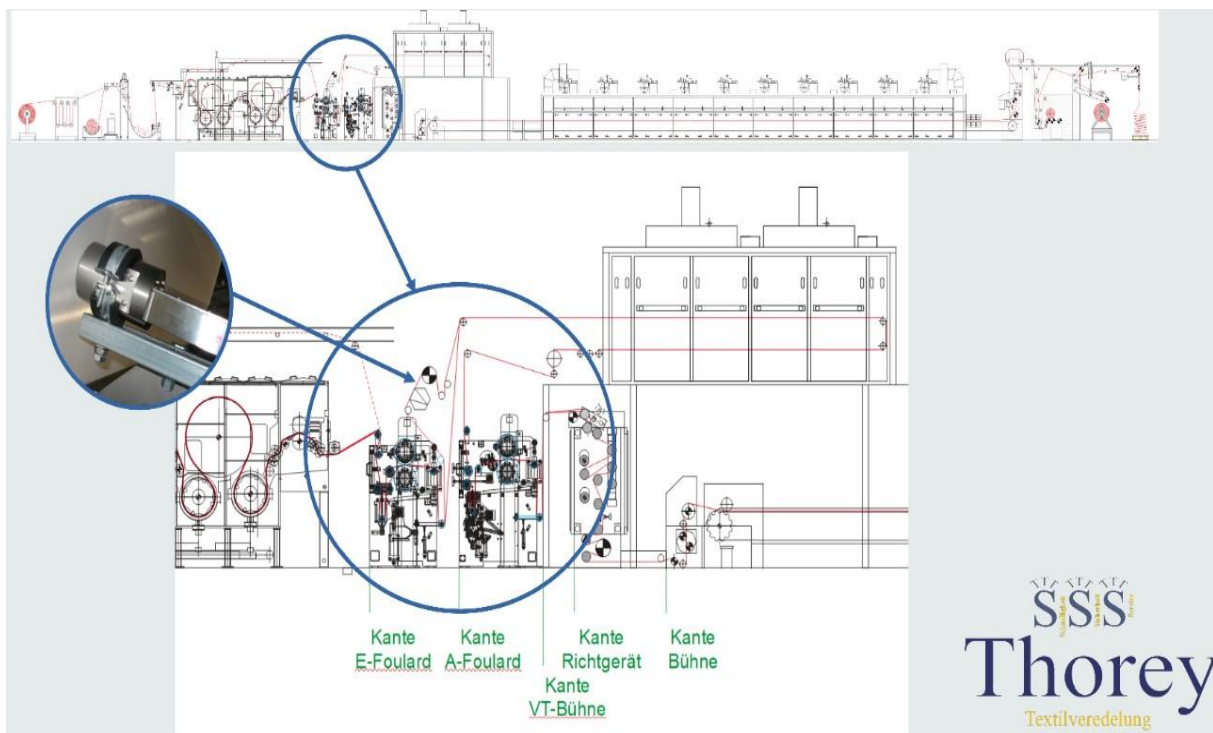


Abb. 2.3: Position der Mikrowellensensoren am Saugbalken eines Spannrahmens

Die Anordnung des Sensors direkt hinter dem Saugbalken stellt sicher, dass für die Ansteuerung des Saugbalkens Daten zur aktuellen Feuchte an dieser Position zur Verfügung stehen. Die nachfolgende Umlenkwalze stellt einen ruhigen Lauf der Bahn an dieser Stelle sicher. Der Sensor wurde so installiert, dass er leicht in die Bahn hineindrückt, so dass ein für die Messung optimaler Kontakt zwischen Sensor und Textilbahn sichergestellt ist (vergleiche dazu Ausführungen in Kapitel 3).

Die NIR-Messtechnik dient sowohl der Bestimmung der finalen Restfeuchte als auch der Überwachung der Auftragsmenge und der Homogenität der Veredelungsschichten. Daher muss die NIR-Technik am Prozessende, also am Auslauf des Spannrahmens installiert werden (siehe Abb. 2.4). Für die Montage der Kamera sind eine Reihe von Anforderungen zu beachten. Die Kamera benötigt für das optische Erfassen eine waagerechte Lage der Ware. Weiterhin ist ein ruhiger Lauf der Bahn der betreffenden Stelle sicherzustellen, d.h. die Kamera sollte idealerweise zwischen zwei nahe zueinander liegenden Umlenkrollen installiert werden. Aus optischen Gründen muss die Kamera relativ weit von der Bahn entfernt installiert werden, damit diese auch abgebildet werden kann. Die sich aus diesen Anforderungen ergebenden prinzipiell möglichen Montagepositionen zeigt Abb. 2.5.

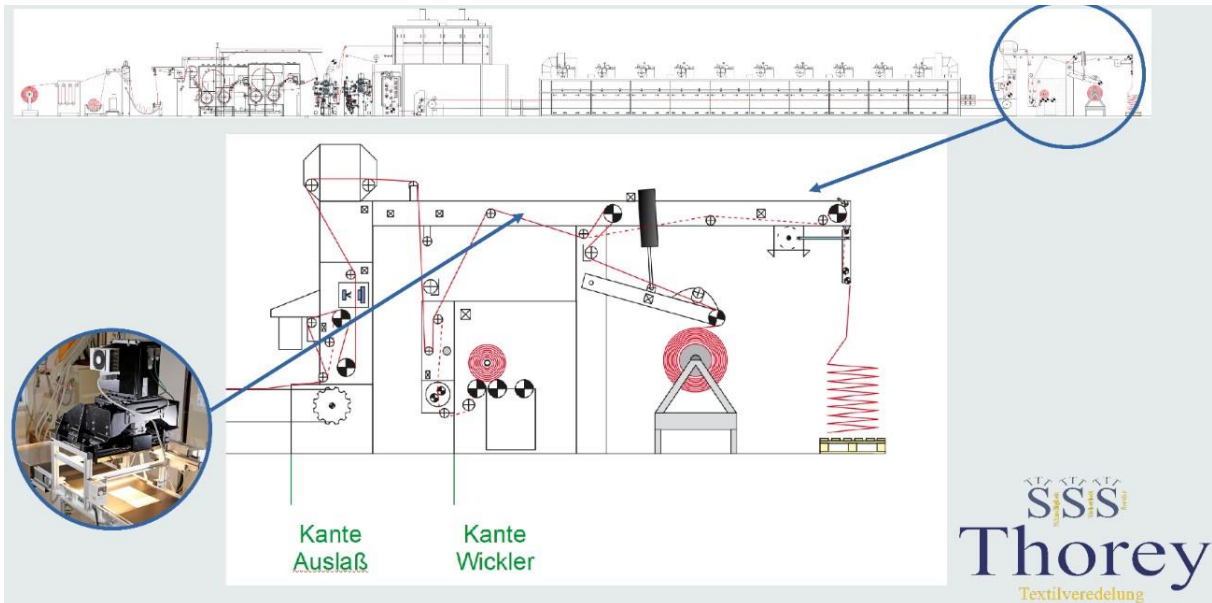


Abb. 2.4: Montage der NIR-Messtechnik im Auslauf des Spannrahmens

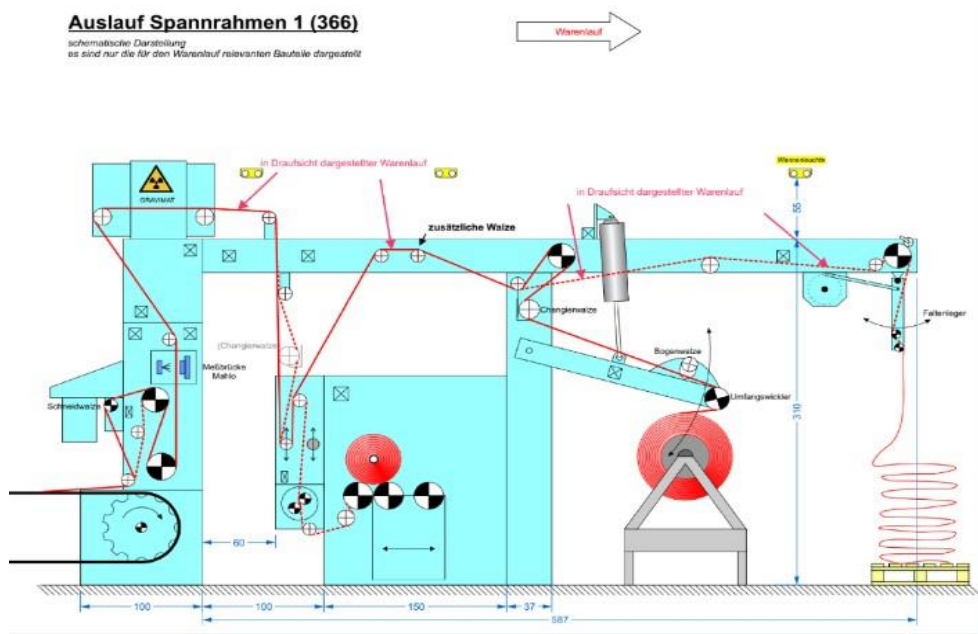


Abb. 2.5: Mögliche Montagepositionen der NIR-Messtechnik (gelb markiert)

Grundsätzlich wurden drei mögliche Montagepositionen identifiziert. In der linken Position (neben der Mahlo-Messbrücke) kann eine Wechselwirkung mit dem unmittelbar benachbarten Sensor für das Gesamt-Flächengewicht (β -Strahler) nicht ausgeschlossen werden. Eine Montage an dieser Stelle wurde daher verworfen. In der rechten Position wäre eine Überwachung von aufzuwickelnder Ware nicht möglich gewesen, daher wurde auch von dieser Anordnung abgesehen. In der mittleren Position stand ursprünglich nur eine Umlenkwalze zur Verfügung, und die Bahn lief hinter dieser Walze leicht nach unten. Daher wurde eine zusätzliche Walze am Spannrahmen eingebaut (siehe Abb. 2.5), die nun einen waagerechten und ruhigen, d.h. flatterfreien, Lauf der Bahn unter der NIR-Messtechnik sicherstellt. Die dritte Anforderung für die Installation einer NIR-Kamera, nämlich ausreichend freie Bauhöhe über der Bahn, ist an dieser Montageposition wegen der Höhe der Halle, in der die Textilanlage steht, jedoch nicht gewährleistet. Das führte im Verlaufe des Projektes letztendlich zu der Entscheidung der beteiligten Projektpartner, von einer Verwendung einer NIR-Kamera abzusehen und dieses durch ein Multiplex-NIR-Zeilenspektrometer zu ersetzen. Dieses beruht auf einer Vielzahl kleiner Messköpfe, die jeweils durch eine Lichtleitfaser über den Multiplexer (optischer Umschalter) an das NIR-Spektrometer angebunden sind. Details dazu werden in Kapitel 5 dargestellt. Die Messköpfe werden auf einer Brücke in relativ geringem Abstand über der Bahn angeordnet. Dadurch benötigt ein solcher Aufbau eine wesentlich geringere Bauhöhe als eine NIR-Kamera. Außerdem wird dadurch die Abdeckung der gesamten Breite der Textilbahn mit Sensoren vereinfacht.

Die nunmehr am Spannrahmen gewählte Position für die NIR-Messbrücke kann bei 2 von 3 möglichen Endaufmachungen der Textilanlage benutzt werden, dem Aufkaulen als derzeit am häufigsten genutzter Variante sowie dem sogenannten Abtafeln. Beim Aufkaulen können je nach Warengewicht und Warendicke mehrere hundert bis tausende Meter auf eine Kaule gewickelt werden. Dies hat den Vorteil, dass der Spannrahmen kontinuierlich produzieren kann und Stopps zum Wechseln auf ein geringes Maß reduziert werden können. Die Aufrollfunktion über den Steigdockenwickler ist die am wenigsten benutzte Funktion. Daher stellt die gewählte Messposition keine signifikante Einschränkung bezüglich des universellen Einsatzes der NIR-Messtechnik für die Prozessüberwachung dar.

2.3. Auswahl von repräsentativen Textilmustern für die Evaluierung der Prozesskontrolltechnik

Für alle Projektpartner wurde eine Auswahl an diversen Artikel zusammengestellt, die das Produktsortiment der Fa. Thorey repräsentativ abbilden. Dafür wurden zunächst unterschiedliche Materialien mit unterschiedlichen Flächenmassen und unterschiedlichen Bindungsarten zusammengestellt. Tab. 2.1 listet die ausgewählten Materialien auf.

Der Artikel 16000640 ist ein Filter, der in der Lebensmittelindustrie eingesetzt wird. Die Flächenmasse beträgt 21 g/m^2 . Dieser Artikel wird am Spannrahmen bei Kochtemperatur gewaschen, anschließend wird das im Waschprozess aufgenommene und aus der Waschmaschine ausgeschleppte Wasser abgequetscht. Danach wird auf minimale Restfeuchte abgesaugt. Nach dem Absaugen wird der Artikel im Spannrahmen thermisch fixiert und aufgekault.

Artikel	Schichte / Präparationen / Appretur	Bindungsart	Materialzusammensetzung
16000640	Avivage	Gewebe	100 % Polyester
12SO2250	Avivage	Gewebe	100% Polyamid
Sonnenschutz	PVA Schlichte	Gewebe	100% Polyester
Skisack	Avivage	Gewebe	100% Polyester
Premium Backlit	Polyester Schlichte	Gewebe	100 % Polyester
Country Cotton	natürliche Wachse	Gewebe	100 % Baumwolle
7058	Bedrucktes Banner	Gewirke	100% Polyester
R080970101	Resorcin-Formaldehyd-Latex (Rußschwarz eingefärbt)	Gewebe	100% Polyamid
256045	Resorcin-Formaldehyd-Latex	Gewebe	65% Polyester 35% Baumwolle

Tab. 2.1: Für die Untersuchungen in diesem Projekt ausgewählte Materialien

Gemäß Kundenforderung ist es bei diesem Artikel wichtig, die im Spinnprozess auf das Garn als Gleitmittel aufgebrachten Spinnöle in hohem Maße zu entfernen. Deshalb müssen bei jeder Ausrüstungskampagne Restextraktionsprüfungen durchgeführt, die Restauflagemenge bestimmt und mit dem in der Kundenspezifikation vorgegebenen Grenzwert abgeglichen werden. Da der Artikel in der Lebensmittelindustrie weiterverarbeitet wird, werden hier besonders hohe Anforderungen an das Entfernen der Spinnöle und anderen Auflagestoffe gestellt. Dies soll die NIR-Messtechnik an der laufenden Warenbahn in-line überwachen.

Der Artikel 12SO2250 wird am Spannrahmen gewaschen und fixiert. Die Flächenmasse des Materials beträgt 120 g/m². Da es sich um ein Polyamidgewebe handelt, hat dieser Artikel ein sehr hohes Wasseraufnahmevermögen. Allerdings muss das Wasser nach dem Waschprozess wieder aus der Ware ausgetrieben werden. Dafür ist es notwendig, dass der Artikel nach dem Waschprozess abgequetscht und abgesaugt wird. Für eine optimale Entwässerung benötigt man die möglichst exakte Angabe Restfeuchte nach dem Saugbalken, dafür soll der Sensor von Work Mikrowave dienen.

Der Artikel Sonnenschutz wird in einem Arbeitsgang in der dem Spannrahmen vorgeschalteten Waschmaschine entschlichtet und am Spannrahmen fixiert. Die Flächenmasse beträgt 110 g/m². Die Entschlichtung ist notwendig, da bei späteren Verarbeitungsprozessen entweder eine Beschichtung einseitig auf der Ware aufgetragen wird oder der Artikel noch gefärbt wird. Die Beschichtung dient dazu, einen Blackout-Sonnenschutz herzustellen. Sollte die Schlichte nicht komplett und vor allem gleichmäßig entfernt worden sein, besteht die Gefahr, dass die Haftwerte von Textil zur Beschichtungsmasse nicht ausreichend sind bzw. reservierte Stellen, d.h. Fehlstellen, entstehen. Auch eine gleichmäßige Färbung der Ware wäre in einem solchen Fall nicht mehr möglich, und es käme zu Farbunterschieden.

Der Artikel Skisack wird am Spannrahmen gewaschen und fixiert. Die Flächenmasse liegt bei 120 g/m². Bei diesem Artikel wird nach jeder Produktion eine Restextraktionsprüfung im Labor durchgeführt, um

die Restauflage zu bestimmen. In einem späteren Prozess beim Kunden wird der Artikel einseitig beschichtet. Er kommt anschließend in der Automobilbranche zum Einsatz. Der Artikel wurde für die Untersuchungen ausgewählt, da das Garn spindüsengefärbt ist. Die schwarze Färbung wurde gewählt um zu untersuchen, ob die NIR-Technik auch Textilien erkennen kann, die schwarz sind.

Premium Backlit ist ein Artikel, der am Spannrahmen entschlichtet, aufgehellt und fixiert wird. Das Polyestergewebe hat eine sehr hohe Flächenmasse von 260 g/m². Daher enthält das Material auf dem Gewebe eine hohe Menge an Polyesterschlichte, resultierend aus der Schlichtung des Rohgarnes vor dem Webprozess. Somit stellt dieser Artikel ein ideales Untersuchungsobjekt für die Detektion des Entschlichtungsgrades dar.

Der Artikel Country Cotton wurde als typisches Material aus Baumwolle ausgewählt. Das Baumwollgewebe hat eine hohe Saugfähigkeit und kann dadurch viel Wasser speichern. Die zweite Besonderheit ist, dass es sich im Gegensatz zu den anderen Artikeln um eine Naturfaser und nicht um eine chemisch hergestellte Faser handelt. Damit weist er als Naturprodukt Schwankungen in der Homogenität auf.

Der Artikel 7058 wurde ausgewählt, weil es sich hierbei um einen Artikel handelt, welcher als Bedruckstoff für den Direktdruck mittels Ink Jet-Drucker mit Dispersionsfarben dient. Durch die unterschiedlichen Farben, die gedruckt werden, sollte untersucht werden, ob unterschiedliche Farbtöne Unterschiede in den Spektren aufzeigen. Der Artikel wird als Banner verwendet und hat eine Flächenmasse von 205 g/m².

Artikel R080970101 und Artikel 256045 erhalten bei Thorey eine identische Ausrüstung, wobei die Flotte für Artikel R080970101 zusätzlich mit Ruß schwarz eingefärbt wurde. Die Flächenmasse beider Artikel liegt bei 90 g/m². Beide Artikel werden in der Automobilbranche verwendet und in späteren Kundenprozessen gummiert. Bei der Gummierung ist es wichtig, dass eine hohe Haftung zwischen Textil und Gummi entsteht. Schlussendlich entstehen aus diesen Artikeln Reifen für die Automobilindustrie bzw. Hochdruckschläuche für Betonpumpen. Eine schlechte Haftung beeinflusst die Sicherheit des Reifens. Je höher die Haftung des Gummis zum Textil ist, desto höher ist auch die Sicherheit des Reifens. Sollte es zu unterschiedlichen Haftungen kommen, wäre dies an allererster Stelle ein Sicherheitsrisiko und könnte neben Leid und Trauer auch zu hohen Reklamationskosten führen.

Mit der Auswahl der Artikel wurde versucht, ein großes Artikelsortiment widerzuspiegeln. Gleichfalls wurden unterschiedliche Materialien, unterschiedliche Bindungsarten und unterschiedliche Ausrüstungen berücksichtigt.

2.4. Auswahl und Bereitstellung von Rezepturen bzw. Flotten

Die bereitgestellten Muster stammen alle aus der Produktion der Firma Thorey und wurden nicht im Labormaßstab hergestellt. Im Gegensatz dazu wurden die Flotten im Labor hergestellt. Dies war notwendig, da den Projektpartnern zusätzlich zu den Standardproduktionsrezepturen Rezepturen mit variierenden Konzentrationen für die Untersuchungen zur Verfügung gestellt werden mussten. Es ist nicht möglich, Proben mit unterschiedlichen Schichtdicken / Auftragsmengen direkt in der Produktion herzustellen. Dort können unterschiedliche Auftragsmengen auf dem Textil mittels variierender Abquetschdrücke eingestellt werden. Da es sich bei allen verwendeten Artikeln um kundeneigene Ware handelt und der Kunde immer eine gleichbleibende Qualität gemäß Kundenspezifikation haben möchte, konnten keine Änderungen am laufenden Verfahren vorgenommen werden. Damit trotzdem unter-

schiedliche Auftragsmengen untersucht werden können, wurde dem TITV e.V. im Rahmen eines Unterauftrages die Rohware der jeweiligen Artikel und die formulierten Flotten entsprechend der zu untersuchenden Rezepturen zur Verfügung gestellt. Das TITV e.V. hat damit ein breites Sortiment an Mustern mit unterschiedlichen Auftragsgewichten hergestellt, die insbesondere für die Kalibrierung von chemometrischen Modellen für die NIR-Spektroskopie, d.h. für das Teilprojekt des IOM, benötigt wurden.

Folgenden Rezepturnummern wurden hergestellt:

102019	Resorcin, Formaldehyd Latex
302106	Styrylbenzol – Derivat / organische Phosphorverbindung
104333	Styrylbenzol - Derivat
104035	Organischer Stickstoff- und Phosphorverbindung / Stickstoffhaltiges Phosphonsäuresalz
101049	Polyvinylacetat und Polyvinylalkohol

Die Rezeptur 102019 ist eine Flotte, die einen relativ hohen Feststoffgehalt besitzt und nur wenig Wasser beinhaltet. Somit sind hohe Schichtdicken auf dem Textil möglich. Wie bereits bei den Artikeln R080970101 und dem Artikel 256045 beschrieben, werden diese Artikel gummiert. Dafür benötigt man spezielle Chemikalien als Haftvermittler.

Die Rezeptur 302106 wird für das Aufhellen in Kombination mit einer flammenhemmenden Wirkung verwendet. Die Rezeptur ist eine Mischung aus optischem Aufheller und Flammschutzmitteln. Der Hauptanteil der Flotte ist Wasser. Die Flotte wurde bei dem Artikel 7058 appretiert.

Die Rezeptur 104333 ist eine Aufhellerrezeptur und wird beim ersten Spannrahmendurchlauf des Artikels Premium Backlit, dessen Arbeitsplan mehrere Spannrahmendurchläufe beinhaltet, zum Einsatz. Es handelt sich dabei aber weder um den gleichen Aufheller noch um die gleiche Einsatzmenge wie bei der Rezeptur 302106. Infolgedessen werden unterschiedliche Weißgrade des Fertigproduktes erzielt.

Die Rezeptur 104035 ist eine Flotte, bei der ein nicht permanentes Flammschutzmittel im zweiten Produktionsprozess auf den Artikel Premium Backlit appretiert wird. Die Rezeptur ist eine Mischung aus einem nicht permanenten Flammschutzmittel und einem Textilhilfsmittel zur Verbesserung des Konturenstandes des später aufzubringenden Druckes.

Die Rezeptur 101049 ist eine Flotte für die Versteifung von Textilien. Das TITV e.V. benötigte eine hochkonzentrierte Flotte für die Versteifung von Textilien. Diese Rezeptur wird nicht in der Produktion auf Textilien appretiert.

3. Entwicklung eines Mikrowellensensors für die Bestimmung des Wassergehaltes von Textilien nach dem Saugbalken

(Bearbeitung des Teilprojektes: Work Microwave GmbH, Holzkirchen)

3.1. Sensorkonzept und Voruntersuchungen

Im Rahmen dieses Projektes sollte ein Sensor entwickelt werden, um die Restfeuchte einer Textilbahn nach dem Waschprozess und Trocknung über einen Saugbalken und/oder Foulard zu bestimmen. Folgende Werte bestimmen dabei das Anforderungsprofil für den Sensor:

- Flächengewichte der zu messenden Textilien: 20 ... 500 g/m²
- Restfeuchte der Textilien nach Trocknung über Saugbalken: 20 ... 50 %
- Restfeuchte der Textilien nach Trocknung über Foulard: 50 ... 80%
- Geschwindigkeit der Textilbahn: bis 100 m/min

Die Textilbahn nach dem Saugbalken oder Foulard entspricht dann im Wesentlichen der Rohware. Weiterhin ist das Flächengewicht meist nicht bekannt. Zur Bestimmung der Restfeuchte muss daher neben dem Wassergewicht auch ein Wert für das Flächengewicht ermittelt werden.

$$\text{Restfeuchte} = \text{Wassergewicht} / \text{Flächengewicht} \quad (1)$$

Als Sensor soll ein Sensor mit einem Mikrowellenresonator verwendet werden. Der Mikrowellenresonator ist dabei zu einer Seite offen und mit einer Keramikscheibe verschlossen. In Abb. 3.1 erkennt man die weiße Keramikscheibe vorne am zylindrischen Resonatorkopf.



Abb. 3.1: Sensor mit Mikrowellenresonator

Durch den einseitig offenen Resonator kann das elektromagnetische Feld vom Resonator zu einem kleinen Teil nach außen dringen. Bringt man jetzt ein Material in diesen Bereich wird die Resonanzfrequenz des Mikrowellenresonators zu tieferen Frequenzen verschoben. Diese Änderung der Frequenz kann sehr genau ausgewertet werden. In Abb. 3.2 ist dies dargestellt.

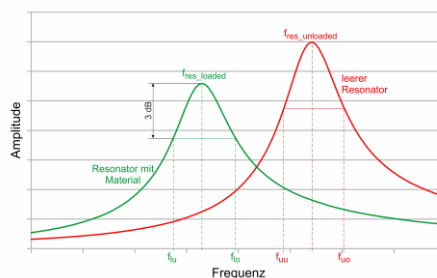


Abb. 3.2: Resonanzkurven vom unbelasteten und belasteten Mikrowellenresonator

Die grüne Kurve ist die durch ein eingebrachtes Material verschobene Resonanzkurve. Man erkennt, dass sich zusätzlich die Güte verringert (erkennbar an der kleineren Amplitude). Die Messung der Güte bzw. Amplitude ist in der Regel aufwendiger und ungenauer und wird deshalb nicht verwendet.

In einer Voruntersuchung wurden mehrere verschiedene Textilien vermessen. Für 12 verschiedene Stoffe wurde nach Entwässerung über einen Foulard mit dem Mikrowellensensor gemessen und parallel im Labor die Restfeuchte bestimmt. In Abb. 3.3 sind die Anzeigewerte vom Sensor (AZW) gegen die im Labor bestimmten Restfeuchten aufgetragen.

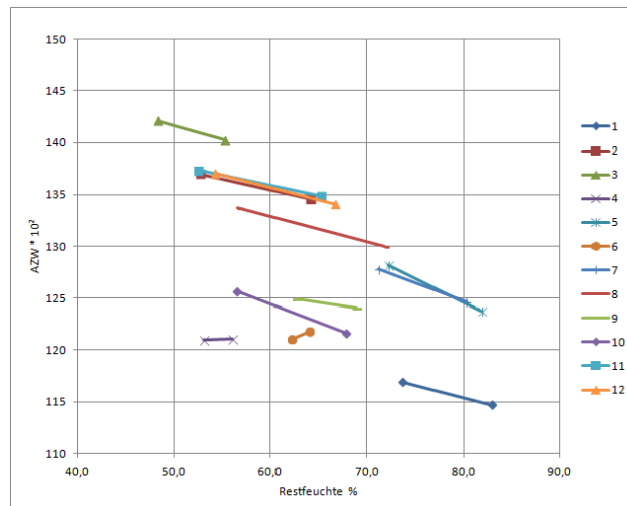


Abb. 3.3: In der Voruntersuchung gemessene Restfeuchten

Man sieht, dass sich für jedes Textil eine andere Messkurve ergibt. Oder anders gesagt, für den praktischen Einsatz müsste für jede Textilsorte eine eigene Kalibrierung erstellt werden.

Da die Flächengewichte der verwendeten Textilproben bekannt waren, wurden die gemessenen Restfeuchten nach Gleichung 1 in ein Wassergewicht umgerechnet. In Abb. 3.4 sind die Werte für die Wassergewichte gegen die Messwerte vom Sensor (U Sensor) aufgetragen.

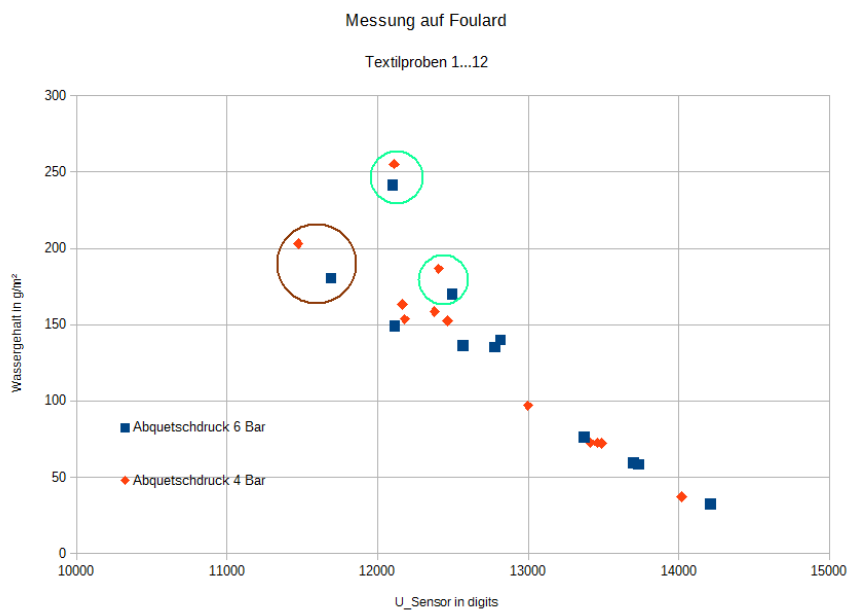


Abb 3.4: Messwerte Sensor aufgetragen gegen Wassergewicht

Die Messungen wurden mit 2 Abquetschdrücken von 4 Bar und 6 Bar am Foulard durchgeführt. Die grün markierten Messwerte stammen von Textilproben aus Polyamid. Die Messwerte der braun markierten Textilproben aus Baumwolle und die restlichen Textilproben aus Polyester liegen, aufgetragen gegen das Wassergewicht, näherungsweise auf einer Geraden. Für die 2 Proben aus Polyamid ergeben sich abweichende Werte, der Grund dürfte in den hygroskopischen Eigenschaften von Polyamid liegen. Durch den Sensor mit Mikrowellenresonator wird im Wesentlichen die resultierende Dielektrizitätskonstante ausgewertet. Da der Wert für Wasser mit $\epsilon_r=80$ sehr viel höher als der der Textilien mit $\epsilon_r=4...5$ ist, liegen die Messwerte auf einer Geraden.

Es soll jetzt mit 2 Sensoren gemessen werden, um mit den dann 2 Messwerten neben dem Wert für das Wassergewicht auch einen Wert für das Flächengewicht der zu messenden Textilbahn zu erhalten. Damit wäre dann die Bestimmung der Restfeuchte ohne Kenntnis des genauen Flächengewichts möglich. Um voneinander unabhängige Messwerte zu bekommen, werden Sensoren mit unterschiedlichen Resonatorköpfen untersucht.

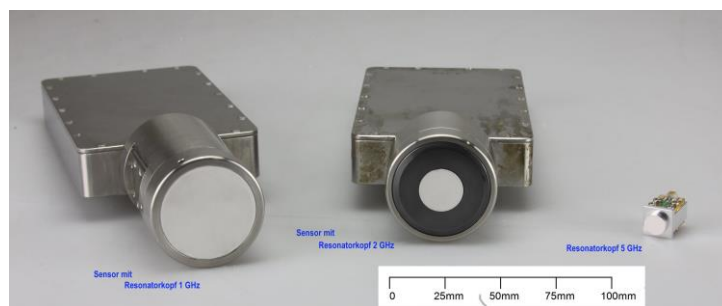


Abb. 3.5: Resonatorköpfe für unterschiedliche Frequenzen

In Abb. 3.5 sind zwei Sensoren mit einem Mikrowellenresonator bei 1 bzw. bei 2 GHz sowie ein einzelner Mikrowellenresonator für 5 GHz zu sehen. Die mechanischen Abmessungen sind dabei jeweils um den Faktor 2 skaliert.

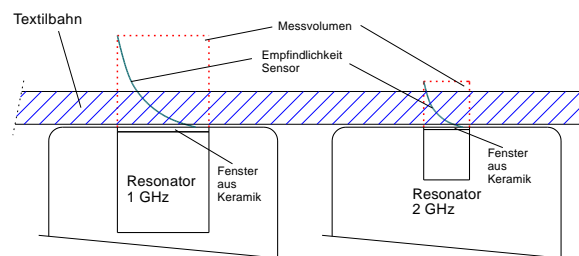


Abb. 3.6: Abstandsabhängigkeit Mikrowellenresonator

Die Mikrowellenresonatoren sind einseitig offen, und das dort austretende elektromagnetische Feld klingt mit der Entfernung ab. In erster Näherung kann hier ein quadratischer Verlauf angenommen werden. In Abb. 3.6 ist dies für Mikrowellenresonatoren bei 1 GHz und 2 GHz schematisch gezeigt. Durch die zusätzlich gezeichnete Textilbahn erkennt man, dass sich unterschiedliche Messkurven für die beiden Resonatoren ergeben sollten. Einen gleichen Effekt sollte man auch erhalten, wenn man z.B. 2 Mikrowellenresonatoren bei gleicher Frequenz, aber unterschiedlicher Resonatorgeometrie verwendet.

Ein weiterer wichtiger Punkt ergibt sich aus Abb. 3.6. Die höchste Messempfindlichkeit ergibt sich direkt am Sensor. Das zu messende Material sollte also möglichst direkten Kontakt zum Sensor haben.

Im ersten Moment mag das sicher für die Messung von Textilien eher unerwünscht sein. Die Versuche haben aber gezeigt, dass dies in der großen Mehrzahl der Fälle keinerlei Probleme verursacht. Im Gegenteil: damit kommt die einfache Montage des Sensors von nur einer Seite voll zum Tragen. In Abb. 3.7 ist die provisorische Testhalterung für erste Messungen an einer Textilbahn zu sehen. Selbst mit dieser einfachen Halterung kann problemlos gemessen werden.

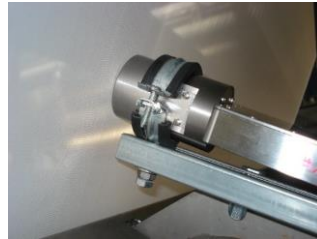


Abb. 3.7: Mikrowellensensor unter einer Textilbahn

Probe-Nr	Bezeichnung	Material	Flächengewicht in g/m ²	Bindung	Dicke 25in mm
T1	Sonnenschutz Fertigware	Polyester	114	Webware	0.33
T2	Premium Backlit Rohware gewaschen aufgehellt Flammenschutz	Polyester	270		0.45
T3	PES Gewirke aufgehellt	Polyester	231	Gewirke	0.41
T4	PES Gewirke aufgehellt	Polyester	110	Gewirke	0.31
T5	Skisack Fertigware	Polyester	167		0.25
T6	Country Cotton Baumwolle 100% Gewebe Rohware	Baumwolle	265	Webware	0.55
T7	16000640 Polyester 100% Schmelzgarn Gewebe Rohware	Polyester	21	Webware	0.09
T8	12S02250 Polyamid 100% Gewebe Rohware	Polyamid	240	Webware	0.58
T9	Sonnenschutz Rohware	Polyester	112		0.38
T10	Premium Backlit Rohware	Polyester	241		0.56
T11	Gewirke	Polyester	210	Gewirke	0.4
T12	Vlies	Polyester	95	Vlies	0.29
T13	Gewirke	Polyester	320	Gewirke	0.62

Tab. 3.1: Untersuchte Textilproben

Die Messungen wurden mit den in Tab. 3.1 aufgeführten Textilproben durchgeführt. Für die Auswertungen wurden dabei nur die Messungen an Textilproben aus Polyester verwendet. Für die Textilprobe aus Polyamid wurde nur eine vergleichende Messung durchgeführt, aufgrund der andersartigen Materialeigenschaften wurde diese Messung jedoch nicht in die Auswertung einbezogen.

3.2. Messungen an einem Foulard

In Abb. 3.8 ist ein Testaufbau mit Endlostextilband am Foulard zusehen.



Abb. 3.8: Foulard mit Endlostextilband und Mikrowellensensor (Bildmitte)

Auch hier ist eine sehr provisorische Halterung für den Sensor sehen, die aber eine einwandfreie Messung gestattete. Aus den Messwerten in Abb. 3.9 ist zu sehen, dass es vorteilhaft ist, die Frequenzinformation auszuwerten und zu verwenden. In schwarz sind die Messwerte der Frequenz und in rot die Messwerte für die Amplitude dargestellt. Gerade bei höheren Feuchten ist gut zu erkennen, dass man über die Frequenzmessung eine wesentlich bessere Auflösung erreicht.

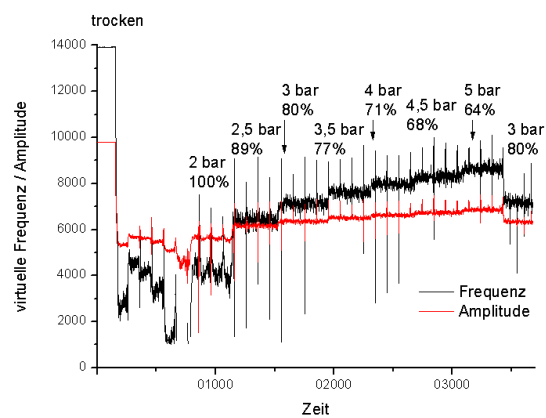


Abb. 3.9: Feuchtemessungen mit Mikrowellensensor am Foulard

Der Sensor mit dem 5 GHz Resonator wurde vorab im Labor untersucht. Durch die hohe Frequenz und damit geringere Reichweite hat sich dieser als zu kritisch hinsichtlich der Positionierung relativ zur Textilbahn erwiesen. Für die weiteren Versuche wurden daher nur die Sensoren mit Resonatoren bei 2 GHz und 1 GHz verwendet.

3.3. Messungen mit 2 Sensoren an einer laufenden Textilbahn

Für die Messungen mit 2 Sensoren wurde ein umfangreicher Testaufbau erstellt. In Abb. 3.10 ist der prinzipielle Aufbau gezeigt.

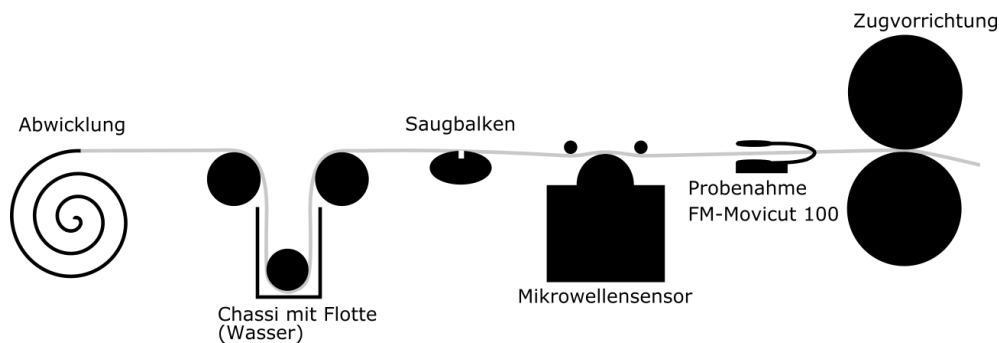


Abb. 3.10: Versuchsaufbau Saugbalken

Nach der Abwicklung durchläuft die Textilbahn das Chassis mit Flotte. In vorliegendem Fall ist dafür nur Wasser verwendet worden. Danach wird die Textilbahn über einen Saugbalken geführt, direkt danach sind die 2 Sensoren angeordnet. Über eine Freistrecke kann eine Probe durch Ausstanzen entnommen werden, wobei die Textilbahn allerdings immer beschädigt wird. Zum Aufrollen und als Zugvorrichtung kam wieder der Foulard zum Einsatz.



Abb. 3.11: Versuchsaufbau mit Saugbalken und Sensoren

Für diesen Messaufbau werden 2 einzelne Sensoren verwendet, mit denen parallel gemessen wird (siehe Abb. 3.11). Wegen des offenen Resonators war ein ausreichender Abstand vorzusehen, damit sich die Sensoren nicht gegenseitig beeinflussen. Für 2 gleiche Sensoren bei 2 GHz hat sich bei Vorversuchen ein Abstand von mindestens 15 cm als notwendig erwiesen, für 2 Sensoren unterschiedlicher Frequenz, z.B. 1 GHz und 2 GHz, kann der Abstand etwas geringer sein. Im Bügel des Messaufbaus zur Aufnahme der Sensoren sind 3 Positionen vorgesehen, außen jeweils für Sensoren bei 2 GHz und in der Mitte für einen Sensor bei 1 GHz.

Die Ansteuerung der Sensoren und das Auslesen der Messwerte erfolgt über eine Ethernet-Schnittstelle. Die Elektronik im Sensor kann eine Messung / msec ausführen. Verwendet man eine Messwertglättung über eine Mittelwertbildung von 10 und veranschlagt man für die Übertragung über die Ethernet-Schnittstelle mit dem TCP-Protokoll weitere 100 msec, kommt man für eine Bahngeschwindigkeit von 5 m/min auf ca. 100 Messungen / m. Diese Messgeschwindigkeit sollte mehr als ausreichend sein, denn die verwendeten Bahngeschwindigkeiten für obigen Messaufbau liegen zwischen 1...10 m/min.

Die senkrechte Position der Sensoren über der Textilbahn ist durch den Bügel vom Messaufbau mit hoher Genauigkeit gegeben. Die Eindringtiefe in die Textilbahn kann über Stellschrauben justiert werden. Vor und nach den Sensoren ist eine Umlenkrolle montiert. Zu exakten Höhenstellung wird darauf ein Blech gelegt. Damit werden beide Sensoren auf die gleiche Höhe eingestellt. Dies erfolgt über die Klemmung am Bügel des Messaufbaus. Danach werden die Sensoren über die Stellschrauben um die Blechdicke nach unten gefahren. Für einen guten Kontakt wurden die Sensoren 0,5 ... 1 mm in die Textilbahn gedrückt. Dies kann gut über das Messsignal überprüft werden, wenn eine Erhöhung der Eindringtiefe keine Änderung mehr bewirkt. Diese Einstellung erfolgte einmal am Anfang und musste dann nicht mehr nachjustiert werden.

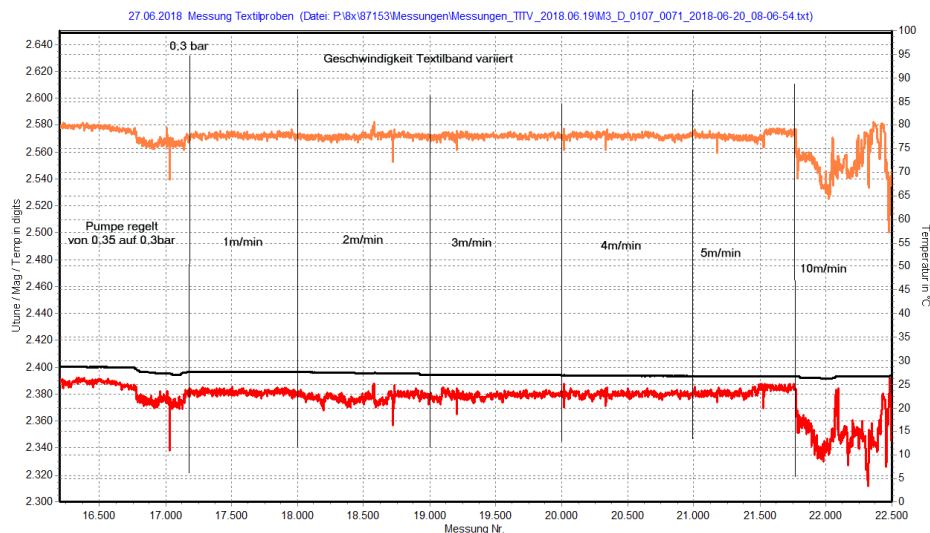


Abb. 3.12: Messungen an der Textilprobe T9 (Sonnenschutz Rohware 112 g/m²)

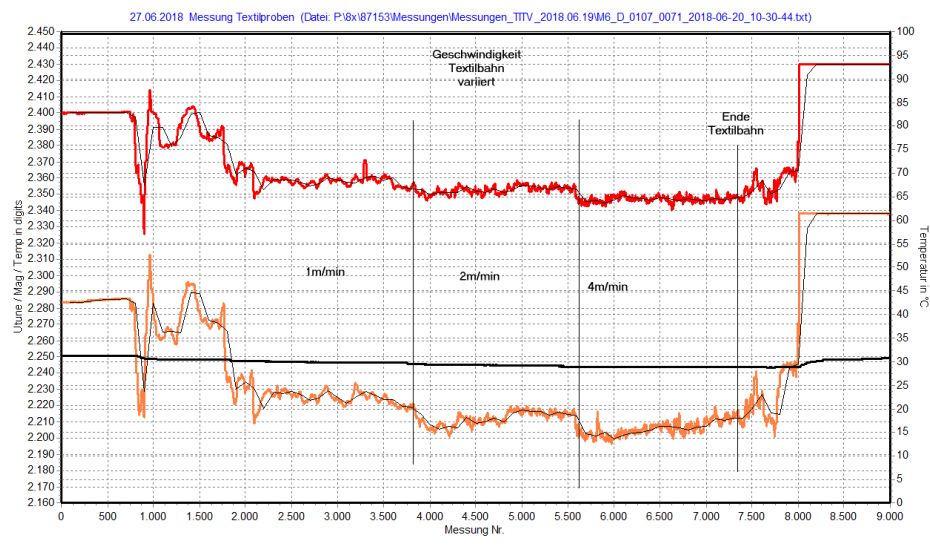


Abb. 3.13: Messungen an der Textilprobe T10 (Premium Backlit Rohware 241 g/m²)

Abb. 3.12 und 3.13 sind Messungen an Textilien unterschiedlichen Flächengewichts zu sehen. Für die Messung der Textilien wurden jeweils verschiedene Bahngeschwindigkeiten eingestellt. Der Unterdruck am Saugbalken wurde dabei konstant gelassen. Man erkennt schön, dass bei der dickeren Textilbahn in Abb. 3.13 bei höheren Bahngeschwindigkeiten eine geringere Frequenz gemessen wird. Der Unterdruck am Saugbalken reicht folglich nicht aus, um bei der dickeren Textilbahn bei zunehmender

Bahngeschwindigkeit eine gleichbleibende Trocknung zu erreichen. Bei der dünneren Textilbahn in Abb. 3.12 kann der Saugbalken auch bei höherer Geschwindigkeit noch eine gleichbleibende Trocknung erreichen.

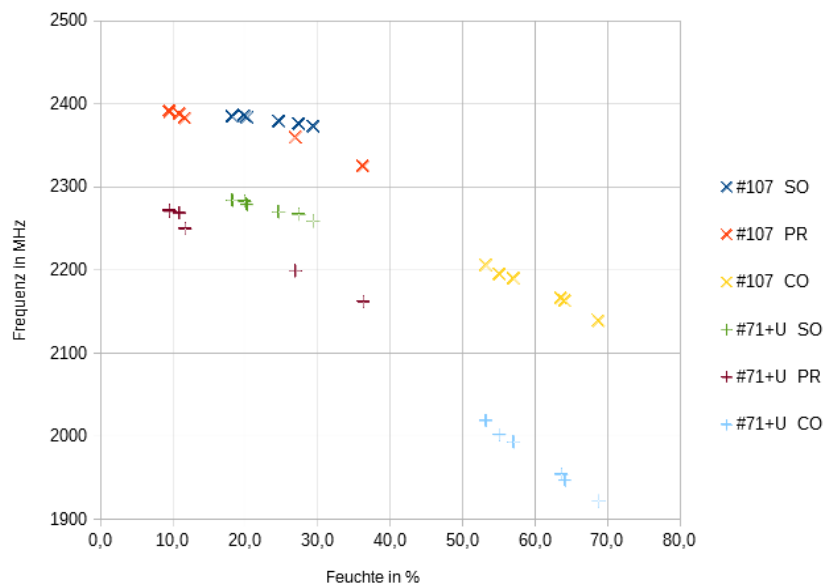


Abb. 3.14: Messung Resonanzfrequenz in Abhängigkeit von der Feuchte der Textilbahn

Nachfolgend wurden mehrere verschiedene Textilbahnen vermessen und durch Ausschießen vom Proben im Labor die Feuchte bestimmt. Die Ergebnisse zeigt Abb. 3.14.

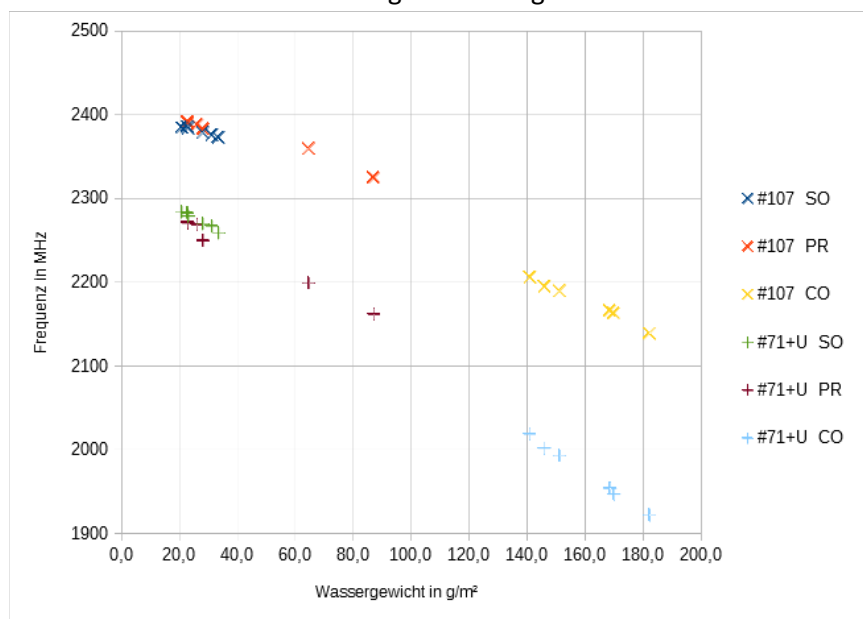


Abb. 3.15: Umrechnung der Feuchtwerte in den Wassergehalt

In Abb. 3.15 sind die gemessenen Werte für die Feuchte in den Wassergehalt umgerechnet worden. Die Messwerte liegen dann in erster Näherung wieder auf einer Geraden. Das Bestimmen der Restfeuchte über das Ausschießen von Proben ist ein recht aufwendiger Prozess. Außerdem erfolgt eine Beschädigung der Textilbahn, die für weitere Messungen zunächst geflickt werden muss. Da nach einem quantitativen Zusammenhang zwischen den gemessenen Werten der Sensoren, den Frequenzwerten und dem Wassergewicht gesucht wird, wurde nach einer Möglichkeit gesucht, auf einfachere

Weise ausreichend Messwerte zu bekommen. Dafür wurden Messungen von einem Sensor zusammen mit der Textilprobe auf einer Waage durchgeführt.

3.4. Vergleich von Frequenzmessungen mit gravimetrischen Daten der Feuchte auf einer Waage

Als einfachere Möglichkeit hat sich die Messung des Sensors zusammen mit der Textilprobe auf einer Waage herausgestellt. Die Gewichte vom Sensor und der trockenen Textilprobe wurden im Vorhinein bestimmt. Die Textilproben wurden so in einem Rahmen befestigt, dass sich eine definierte Fläche ergibt (siehe Abb. 3.16). Die Textilprobe wurde dann mit Wasser befeuchtet und auf den Sensor auf der Waage gelegt. Es wurden dann kontinuierlich der Sensorwert und das Gewicht der Probe ausgelesen und protokolliert. Über das Abtrocknen der Textilprobe erhält man dann Messwerte über einen großen Feuchtebereich.

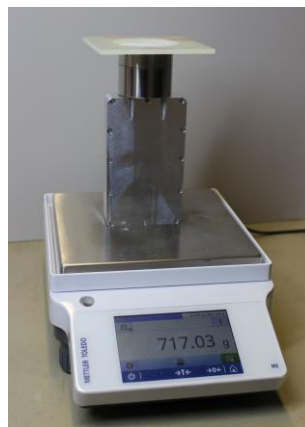


Abb. 3.16: Messaufbau mit Waage

Anschließend wurden Messungen mit einem Sensor mit einem Resonator mit dicker Keramik (Dicke 0,5 mm) durchgeführt (siehe Abb. 3.17).

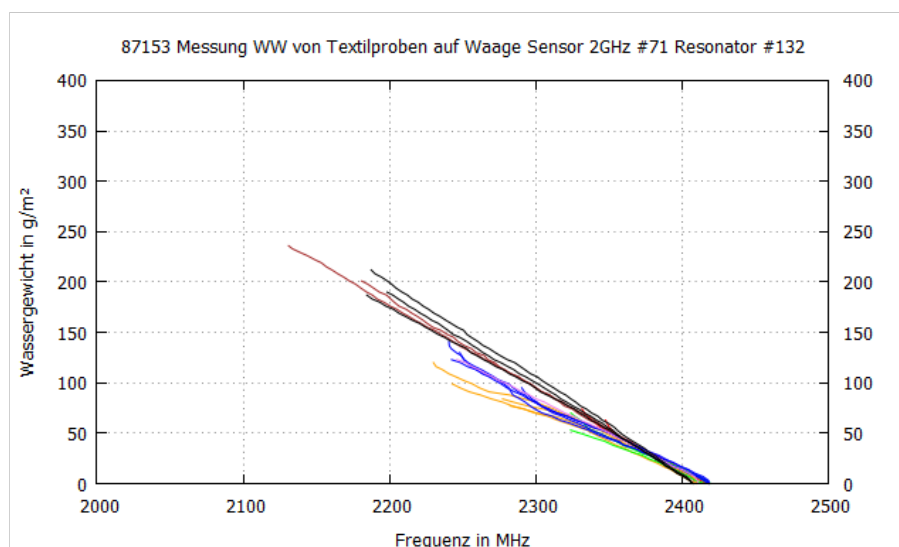


Abb. 3.17: Messung des Feuchtegehalts mit der Waage sowie mit Sensor 71 und Resonator 132

Weiterhin wurden Messungen mit einem Sensor mit einem Resonator mit dünner Keramik (Dicke 0,25 mm) und mit geänderteter Geometrie durchgeführt (siehe Abb. 3.18).

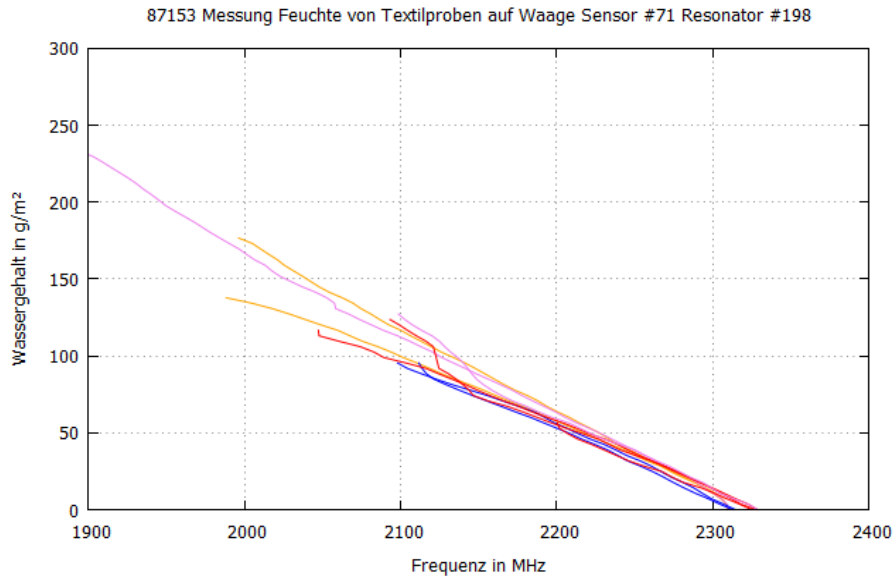


Abb. 3.18: Messung des Feuchtegehalts mit der Waage sowie mit Sensor 71 und Resonator 198

Für die beiden Sensoren mit verschiedenen Resonatoren ergeben sich unterschiedliche Kurvenverläufe für die Messung von jeweils mehreren Textilproben. Bei Messungen mit Sensor 71 und Resonator 198 ergeben sich näherungsweise parallel verschobene Kurvenverläufe. Bei den Messungen mit Sensor 71 und Resonator 132 ist dagegen ein Schnittpunkt der Messkurven zu erkennen.

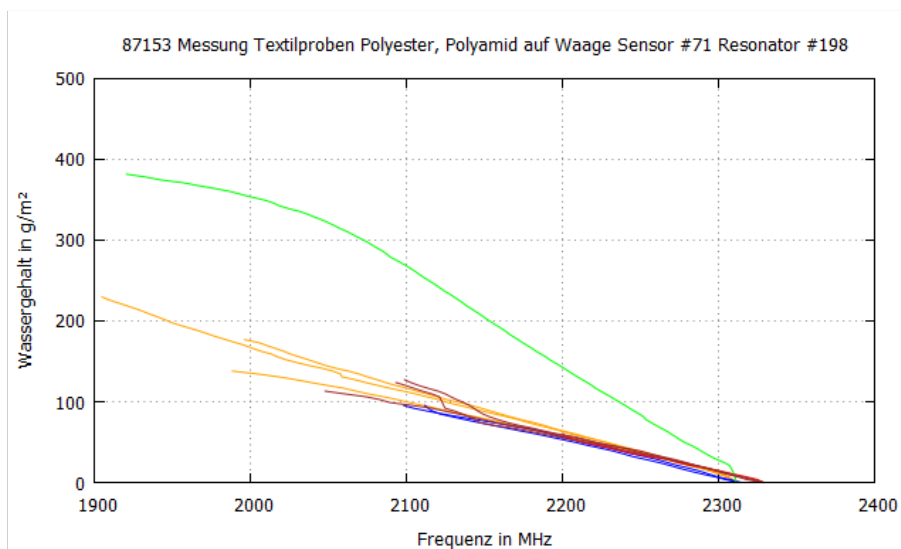


Abb. 3.19: Zusätzliche Messung des Feuchtegehalts an einer Textilprobe aus Polyamid (grün)

Im Abb. 3.19 ist zusätzlich die Messung an einer Textilprobe aus Polyamid zu sehen (grüne Kurve). Die Eigenschaft von Polyamid, geringe Mengen Wasser aufnehmen zu können, dürfte für den steileren Anstieg der Messkurve verantwortlich sein. In dem steilen Bereich ergibt sich dann eine geringere Permittivität. Wird eine Sättigung erreicht, ergibt sich dann eine sehr ähnliche Steigung wie bei den anderen Textilproben.

Alle weiteren Messungen und Auswertungen erfolgten ausschließlich mit Textilproben aus Polyester.

3.5. Simulation der Resonatoren

Zur Untersuchung der unterschiedlichen Kurvenverläufe bei den Messungen auf der Waage wurden für die 2 Resonatoren mit 2 GHz eine Simulationsrechnung in einem 3D Feldberechnungsprogramm durchgeführt. Von Interesse ist dabei der Feldverlauf vor dem offenen Resonator, d.h. dort wo die Textilbahn vorbeigeführt wird. In den Abb. 3.20 und 3.21 ist der Verlauf der elektrischen Feldstärke zu sehen. Beide Darstellungen haben die gleiche Skalierung. Rot bedeutet eine hohe, blau eine geringe elektrische Feldstärke.

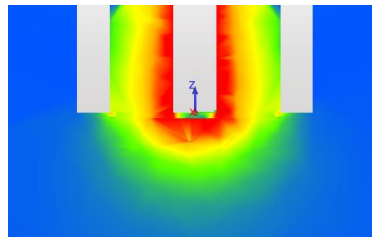


Abb. 3.20: Simulation des Resonators mit dicker Keramik 0,5 mm

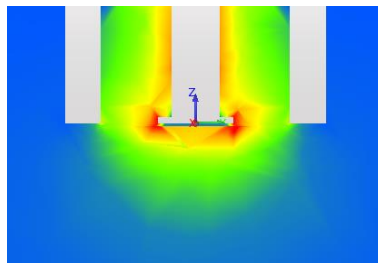


Abb. 3.21: Simulation des Resonators mit dünner Keramik 0,25 mm und geänderter Geometrie

Es kamen zwei verschiedene Resonatoren zum Einsatz. Bei Resonator 132 wird eine Keramik mit einer Dicke von 0,5 mm verwendet. Bei Resonator 198 ist die Keramik halb so dick; zusätzlich ist die Resonatorgeometrie des Innenleiters verändert. Aus der Simulation in Abb. 3.20 ist zu ersehen, dass sich mit Resonator 132 eine höhere Reichweite ergibt, d.h. das elektromagnetische Feld kommt weiter aus dem Resonator heraus. Mit Resonator 198 ergibt sich dagegen eine viel geringere Reichweite (siehe Abb. 3.21).

Durch die geringe Reichweite mit Resonator 198 wird im Wesentlichen im Bereich der Textilbahn gemessen, wodurch sich die Kurvenläufe mit parallel verschobenen Kurvenverläufen erklären lassen. Mit Resonator 132 wird aufgrund der größeren Reichweite immer durch das Textil hindurch gemessen. Nimmt man modellhaft das Wasser der Textilprobe als in einer Ebene „konzentriert“ an, folgt daraus, dass mit zunehmendem Flächengewicht und damit Dicke des Materials der Abstand zwischen gedachtem "Wasserschwerpunkt" und Sensor ansteigt. Bei gleichem Wassergehalt misst der Sensor somit bei höherem Flächengewicht eine höhere Frequenz. Dies gilt insbesondere, da die Dielektrizitätskonstante von Wasser deutlich größer ist als von Textilien. Das erklärt die gemessenen Kurven mit dem Resonator 132.

3.6. Quantitativer Zusammenhang zwischen Messwert und Restfeuchte

Es soll ein formelmäßiger Zusammenhang zwischen gemessenen Frequenzwerten vom Sensor und der Restfeuchte der Textilbahn angegeben werden. Dabei wird von einem linearen Ansatz ausgegangen.

Für den Sensor mit dem Resonator 132 mit dickerer Keramik ergibt sich in erster Näherung eine lineare Abhängigkeit von Messwert zu Wassergewicht. Zusätzlich ergibt sich aber noch eine unterschiedliche Steigung in Abhängigkeit vom Flächengewicht. Neben dem linearen Ansatz wird daher ein zusätzlicher quadratischer Anteil in der Gleichung berücksichtigt. Der quadratische Anteil beschreibt die Abhängigkeit.

$$f = f_0 + df/dFG * FG + df/dWW * WW + df/(dFGdWW) * FG * WW \quad (2)$$

Messwert des Sensors: Gemessene Resonanzfrequenz: f

zu bestimmendes Wassergewicht der Textilbahn: WW

zu bestimmendes Flächengewicht der Textilbahn: FG

Die Parameter werden dabei jeweils als konstant angenommen.

Die Parameter für die Gleichungen werden über eine Regressionsrechnung bestimmt (Abb. 3.22).

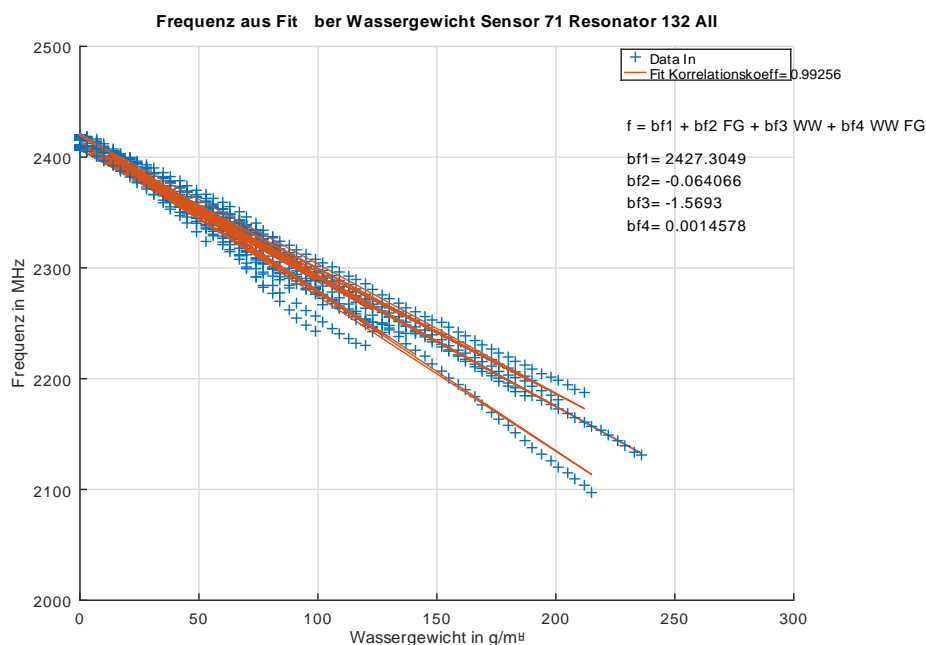


Abb. 3.22: Ergebnis der Regressionsrechnung für Resonator 132

Für die Sensoren mit dem Resonator 198 mit dünner Keramik ergibt sich in erster Näherung auch eine lineare Abhängigkeit von Messwert zu Wassergewicht. Des Weiteren verlaufen die Messkurven aber in erster Näherung parallel, d.h. es gibt keinen Schnittpunkt wie beim Sensor mit Resonator 132.

$$f = f_0 + df/dFG * FG + df/dWW * WW \quad (3)$$

Messwert vom Sensor: Gemessene Resonanzfrequenz: f

zu bestimmendes Wassergewicht der Textilbahn: WW

zu bestimmendes Flächengewicht der Textilbahn: FG

Die Parameter werden dabei jeweils als konstant angenommen.

Die Parameter für die Gleichungen werden wieder über eine Regressionsrechnung bestimmt (Abb. 3.23).

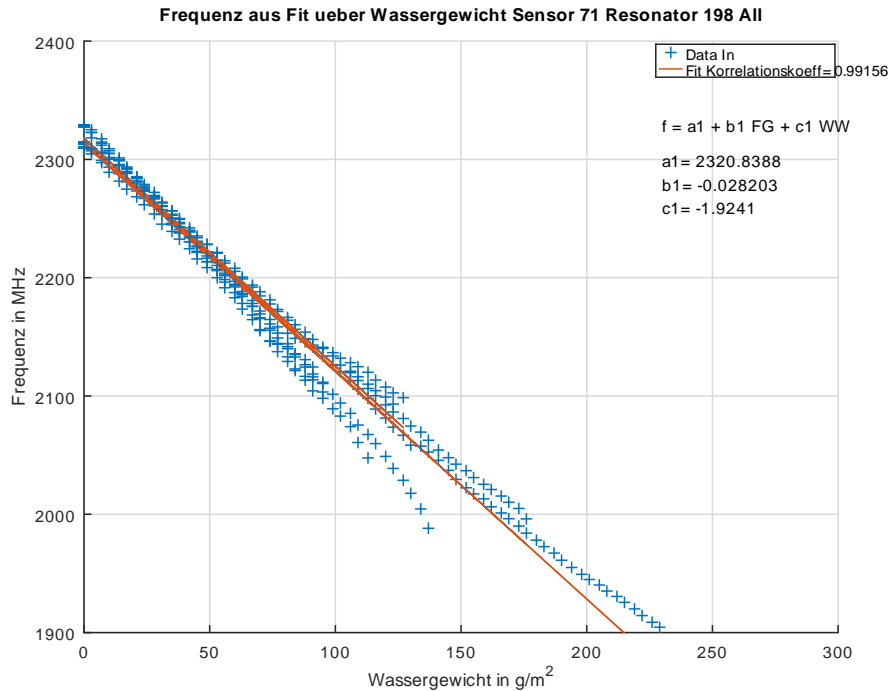


Abb. 3.23: Ergebnis der Regressionsrechnung für Resonator 198

Aus der Regressionsrechnung erhält man dann die Parameter für die beiden Gleichungen. Als Ergebnis ergibt sich dann folgendes Gleichungssystem:

$$f_1 = 2320,8 - 0,0282 * FG - 1,9241 * WW \quad (4)$$

$$f_2 = 2427,3 - 0,0641 * FG - 1,5693 * WW + 0,00146 * WW * FG \quad (5)$$

Die gemessenen Frequenzen sind in MHz einzugeben und die Werte für Flächengewicht und Wassergewicht ergeben sich dann in g/m^2 .

3.7. Aufbau eines Mehrkopfsensors

Die bisherigen Tests und Messungen wurden mit jeweils 2 einzelnen Sensoren durchgeführt. In einem weiteren Arbeitspaket wurde ein Gehäuse konstruiert, welches 2 Resonatorköpfe mit der zugehörigen Elektronik aufnehmen kann (siehe Abb. 3.24). In dieser ersten Version wurden dafür 2 Resonatorköpfe mit 2 GHz verwendet. Der Abstand zwischen den beiden Resonatorköpfen beträgt jetzt nur noch 60 mm. Ein gleichzeitiger Betrieb ist damit nicht mehr möglich, da die Felder der beiden Resonatoren sich gegenseitig beeinflussen würden. Die Hochfrequenzelektronik ist jedoch so ausgelegt, dass schnell zwischen den beiden Resonatorköpfen umgeschaltet werden kann. In den verwendeten Sensoren kann mit der Elektronik eine Messung pro Millisekunde durchgeführt werden. Die Umschaltung zwischen den Resonatorköpfen benötigt jetzt zusätzliche Zeit. Nach dem Umschalten muss eine Einschwingzeit abgewartet werden, bis wieder ein stabiler Messwert anliegt. Mit der vorhandenen Möglichkeit zur Umschaltung kann eine Messung, bestehend aus Umschalten, Einschwingen und Aufnahme des Messwertes, aber auch noch im 1 msec-Raster erfolgen. Für eine komplette Messung mit beiden Resonatorköpfen ist damit eine Zeit von 2 msec notwendig. Verwendet man wieder eine Mittelwertbildung über 10 Werte, ergibt sich eine Zeit von 20 msec / Messung. Bei einer Geschwindigkeit der Textilbahn von z.B. 20 m/min würden 150 Messungen/m durchgeführt, d.h. der räumliche Versatz in Richtung der

Bewegung der Textilbahn, der zwischen den Messungen mit den beiden Resonatorköpfen liegt, betrüge 7mm. In diesem Bereich von $7 \times 60 \text{ mm}^2$ der Textilbahn kann man zweifellos davon ausgehen, dass die Restfeuchte ausreichend konstant ist.

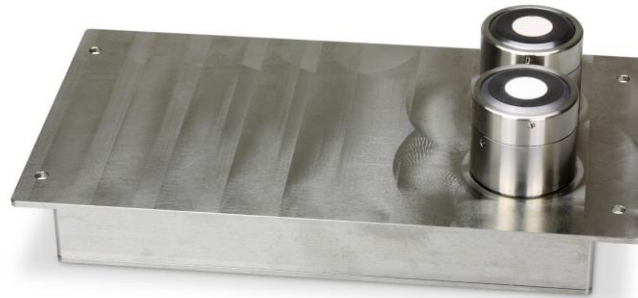


Abb. 3.24: Mehrkopfsensor mit 2 Resonatorköpfen

4. Entwicklung von NIR-Messverfahren für die Überwachung von Feuchtegrad und Auftragsgewicht (Bearbeitung des Teilprojektes: Leibniz-Institut für Oberflächenmodifizierung e.V., Leipzig)

4.1. Quantifizierung spektroskopischer Daten mittels chemometrischer Ansätze

Nahinfrarot- (NIR-)spektroskopische Methoden finden als berührungslose Messverfahren zunehmend Anwendung in der Qualitätssicherung und Prozesskontrolle. Während in der Vergangenheit vor allem Landwirtschaft, Lebensmitteltechnologie, Pharmazie und Wertstoffsartierung wichtige Einsatzfelder bildeten, gewinnen mittlerweile auch andere Gebiete wie z.B. die chemische Industrie immer mehr an Bedeutung [Bur08]. NIR-Spektren werden häufig in Reflexion aufgenommen. Zum Einsatz kommen dabei entweder Prozessspektrometer mit einzelnen oder mehreren Messköpfen (im letzten Fall unter Verwendung eines Multiplexers) oder Hyperspektralkameras, die größeren Flächen orts aufgelöst auf einen Sensorchip abbilden und damit bildgebende Spektroskopie (spectral oder chemical imaging) ermöglichen. Hyperspektralkameras eignen sich daher vor allem für die In-line-Charakterisierung flächiger Materialien wie z.B. Papier-, Folie oder Textilbahnen. Obwohl die Extinktionskoeffizienten im nahen Infrarot wesentlich niedriger als im mittleren Infrarot der „klassischen“ IR-Spektroskopie sind, konnte in der jüngeren Vergangenheit doch gezeigt werden, dass sich NIR-Methoden zur quantitativen Analytik von Beschichtungen, Drucken, Laminaten u.ä. Systemen eignen [Dai18, Mir14, Mir16].

NIR-Spektroskopie wird zumeist als indirekte analytische Methode eingesetzt, d.h. sie liefert quantitative Daten nicht direkt, sondern muss mit Hilfe einer unabhängigen Referenzmethode off-line kalibriert werden. Die Wahl dieser Methode hängt von der Problemstellung ab. Im vorliegenden Projekt wurden dafür gravimetrische Verfahren verwendet (Feuchtwage bzw. Analysenwaage). Die mittels NIR-Verfahren erreichbare Genauigkeit kann nicht besser sein als jene der Referenzmethode. Die Verknüpfung NIR-spektroskopischer Daten mit den Referenzwerten der Kalibrierproben erfolgt mit Hilfe chemometrischer Methoden wie z.B. dem PLS-Verfahren (partial least squares) [Mar89]. Vereinfacht gesprochen handelt es sich dabei um multidimensionale Regressionsverfahren in Kombination mit mathematischen Methoden zur Reduktion der Zahl der Dimensionen (Hauptkomponentenanalyse) und damit des Rechenaufwandes. Darüber hinaus ist meist eine Vorbehandlung der spektralen Daten notwendig. Die Abfolge der verschiedenen Verfahrensschritte wird als chemometrisches „Modell“ bezeichnet. Neben der Wahl der Referenzmethode und der Anzahl und der Qualität der Kalibrierproben, deren Daten in das Modell einfließen, spielt das Modell die entscheidende Rolle für die Präzision und die Stabilität von Vorhersagen aus den NIR-Spektren. Der Entwicklung und Optimierung chemometrischer Modelle kommt daher entscheidende Bedeutung für den Erfolg quantitativer Vorhersagen aus den NIR-Daten zu. Die Entwicklung spezifischer Modelle für verschiedene Anwendungen war Gegenstand des vorliegenden Teilprojektes.

4.2. Entwicklung chemometrischer Modelle für die quantitative Bestimmung der Feuchte

Chemometrische Modelle für die quantitative Bestimmung des Feuchtegehalts wurden für eine Vielzahl von Materialkombinationen aus Textil und Veredelungschemikalien erstellt. Bei den Textilien erstreckte sich die Variation nicht nur auf die Materialien (überwiegend Baumwolle, Polyester und Polyamid), sondern auch auf weitere Parameter wie Flächengewicht, Farbe, Gewebestruktur u.a. Die Veredelungschemikalien umfassten insbesondere Appreturen, Haftvermittler, Flammhemmer und optische Aufheller. Für jede Materialkombination mussten separate Modelle erstellt und optimiert werden. Dazu mussten entsprechende Proben in geeigneter Weise gleichmäßig befeuchtet werden. Nach

Gleichgewichtseinstellung wurden zunächst NIR-Spektren mit der Kamera aufgenommen. Anschließend wurden die Feuchte mit der Feuchtwage bestimmt. Der konkrete Feuchtebereich hing von der jeweiligen Materialkombination ab, deckte jedoch im Hinblick auf den vorgesehenen Einsatzort am Prozessende zumeist den Bereich von ca. 0.5 bis maximal 10 %, im Einzelfalle bis ca. 15 % ab. Typischerweise gingen in jedes Kalibriermodell etwa 30 unterschiedlich befeuchtete Proben ein.

NIR-Verfahren sind aufgrund hoher Extinktion für OH-Schwingungen sehr empfindlich gegenüber Wasser, was einer der Gründe für deren weitere Verbreitung in Landwirtschaft und Lebensmitteltechnologie ist. Abb. 4.1 zeigt exemplarisch gemittelte NIR-Spektren (jeweils aus ca. 30 Einzelspektren) eines veredelten Polyesterwebes bei unterschiedlichen Feuchtegehalten. Dort ist die Kombinationsbande aus symmetrischer und asymmetrischer Streckerschwingung des Wassers bei ca. 1440 nm gut zu erkennen [Wor08]. Von einer weiteren Wasserbande bei ca. 1920 nm (=Kombination aus asymmetrischer Streck- und einer Deformationsschwingung) wird mit der verwendeten Kamera (KUSTA1.9MSI; LLA Instruments) nur noch die Flanke erfasst.

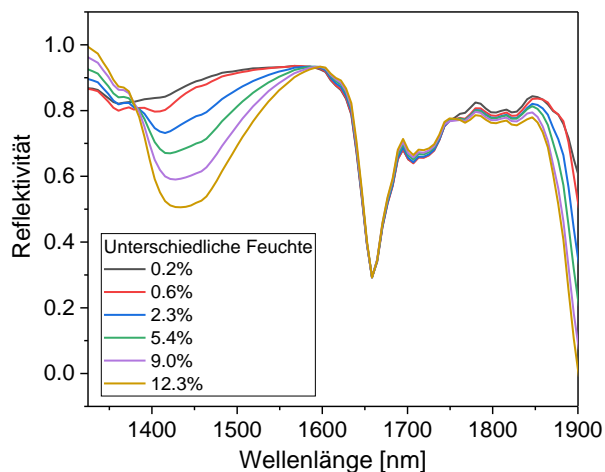


Abb. 4.1: NIR-Spektren von hellem Polyesterwebes (243 g/m², behandelt mit einem optischen Aufheller, 19 g/m²) bei unterschiedlichen Feuchtegehalten. Die Spektren sind Mittelwerte aus jeweils ca. 30 Einzelspektren und wurden auf die Aromatenbande des Polyester bei 1660 nm normiert.

Auf Basis von 16 Mittelwert-Spektren je Probe wurden jeweils mehrere PLS-Modelle erstellt und optimiert. Die Optimierung war darauf ausgerichtet, die Zahl der Eigenvektoren („Faktoren“) und den Vorhersagefehler (RMSEP) zu minimieren sowie die erklärte Varianz (R^2) zu maximieren. Um dieses Ziel zu erreichen, wurden unterschiedliche Methoden der Spektrenvorbehandlung (z.B. Normierung, Basislinienkorrektur, Ableitungen, Mittelung, etc. sowie Kombinationen aus diesen Verfahren; vereinzelt auch ohne Vorbehandlung) erprobt. Für die weitere Verwendung ausgewählt wurde am Ende das Modell, das den obigen Vorgaben am besten entsprach. Dieses wurde dann mit unabhängigen Proben (also solchen, die nicht bereits in der Kalibrierung enthalten waren) getestet. In diesem als externe Validierung bezeichneten Schritt wurde wiederum der Vorhersagefehler RMSEP bestimmt, der Aussagen über die tatsächliche Vorhersagegenauigkeit des Modells liefert. Die Abb. 4.2 und 4.3 zeigen die auf Basis der Spektren in Abb. 4.1 erhaltene optimierte Kalibrierung sowie die zugehörige externe Validierung. Der Vorhersagefehler der gezeigten Kalibrierung ($RMSEP_{Kal}$) beträgt 0.6 Gew.-%. Dieser wird hier vor allem durch die Vorhersagegenauigkeit der Feuchtwage bestimmt. Nahezu alle Modelle, die im vorliegenden Projekt entwickelt wurden, weisen daher Vorhersagefehler um 0.5 % auf. Entscheidend für die tatsächliche Vorhersagegenauigkeit eines Kalibriermodells für unbekannte Proben liefert der RMSEP-Wert der externen Validierung ($RMSEP_{Val}$), der hier bei 0.7 Gew.-% liegt. $RMSEP_{Val}$ ist grundsätzlich immer größer als $RMSEP_{Kal}$. Bei einem guten Modell unterscheidet er sich aber nur geringfügig von $RMSEP_{Kal}$. Bei den auf die Feuchte bezogenen Modellen in diesem Projekt lag er zumeist um ca. 0.1 Gew.-% über $RMSEP_{Kal}$.

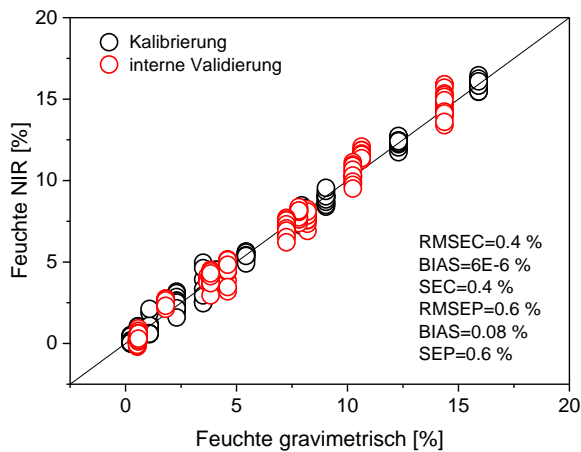


Abb. 4.2: PLS-Kalibrierung der NIR-Spektren von mit einem optischen Aufheller behandelten Polyestergerewebe auf die Feuchte.

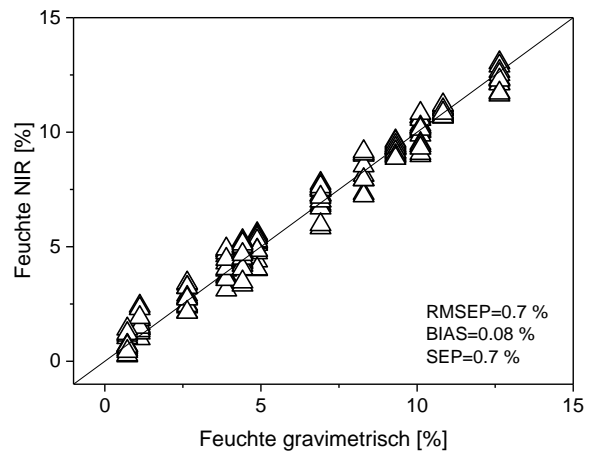


Abb. 4.3: Externe Validierung des Kalibriermodells in Abb. 4.2. mit unabhängigen Proben

Mit Hilfe des Kalibriermodells in Abb. 4.2 können nunmehr aus den mit der NIR-Kamera ortsaufgelöst aufgezeichneten Spektren des feuchten Polyestergerewebes Spectral Images erhalten werden, die quantitative Angaben zum Feuchtegehalt enthalten. Dazu wurden 15 weitere Muster mit unterschiedlichem Feuchtegehalt hergestellt und spektroskopisch analysiert. Eine Auswahl an Spectral Images zeigt Abb. 4.4. Jedes Pixel entspricht dabei einem NIR-Spektrum, aus dem auf Basis der Kalibrierung ein Feuchtewert abgeleitet worden ist. Die Aufnahme der Spectral Images an der Bandanlage des IOM ist äquivalent zum späteren Einsatz von Kamera und Messmethode an der Produktionsanlage bei der Fa. Thorey.

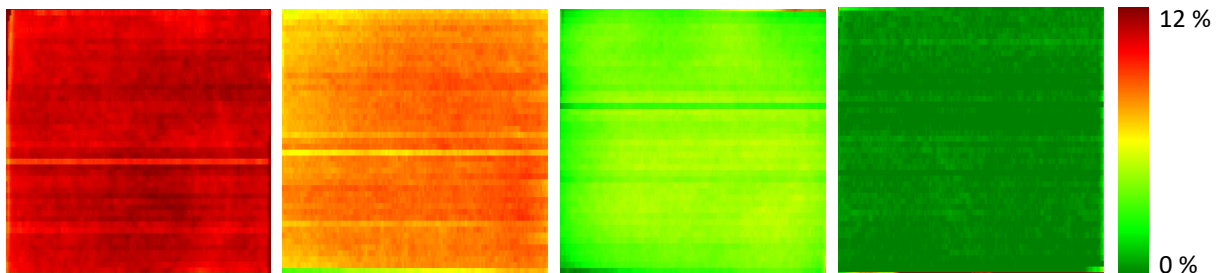


Abb. 4.4: Spectral Images von mit optischem Aufheller behandeltem Polyestergerewebe bei unterschiedlichen Feuchtegraden (von links nach rechts: 10.8, 7.8, 4.1 bzw. 0.5 %; mittels Feuchtwaaage bestimmte Vergleichswerte)

Exemplarisch werden hier Ergebnisse der Kalibrierung auf die Feuchte für ein weiteres Probensystem gezeigt. Während in Abbn. 4.1 bis 4.4 Daten für ein Textil aus rein synthetischem Gewebe dargestellt wurden, zeigen Abbn. 4.5 bis 4.7 Ergebnisse für ein Mischgewebe (64 % Baumwolle / 36 % Polyester; 324 g/m²), also ein Material aus synthetischen und Naturfasern. Dieses wurde nasschemisch mit einem Flammhemmer ausgerüstet. Anders als das obige Polyestergerewebe (das ohne optischen Aufheller einen blas-beigen Farbton aufwies) ist dieses Gewebe schwarz und stellt somit eine besondere Herausforderung für eine auf Reflexion beruhende Messmethode dar. Dies wird in den Spektren (Abb. 4.5)

schon daran deutlich, dass die Wasserbande bei 1440 nm trotz ähnlicher Feuchtegehalte wie bei der vorherigen Serie mit Polyestergewebe nur eine vergleichsweise geringe Intensität aufweist.

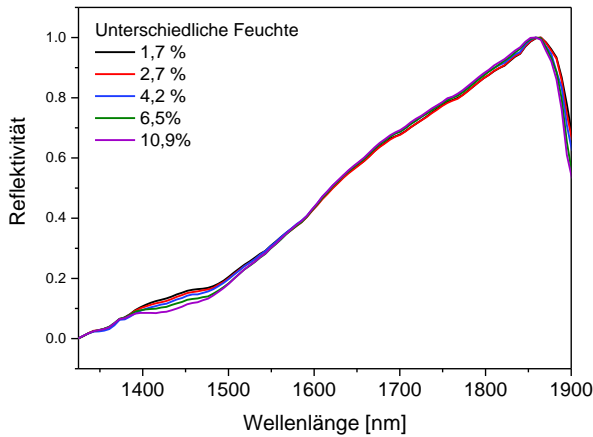


Abb. 4.5: NIR-Spektren von schwarzem Mischgewebe (324 g/m², behandelt mit einem Flammschutzmittel, 59 g/m²) bei unterschiedlichen Feuchtegehalten. Die Spektren sind Mittelwerte aus jeweils ca. 300 Einzelspektren.

In Abbn. 4.6 und 4.7 werden wiederum Kalibrierung und Validierung dargestellt. Trotz des dunklen Farbtons liegt RMSEP_{kal} hier – ähnlich wie in der obigen Kalibrierung für veredeltes Polyestergewebe – bei 0.55 Gew.-% (Abb. 4.6), während für RMSEP_{Val} ein Wert von 0.57 Gew.-% erhalten wurde (Abb. 4.7). Die externen Validierungen beider Systeme – wie auch die der meisten anderen im Projekt untersuchten Materialkombinationen – lassen daher präzise und stabile Vorhersagen unter In-line-Bedingungen erwarten.

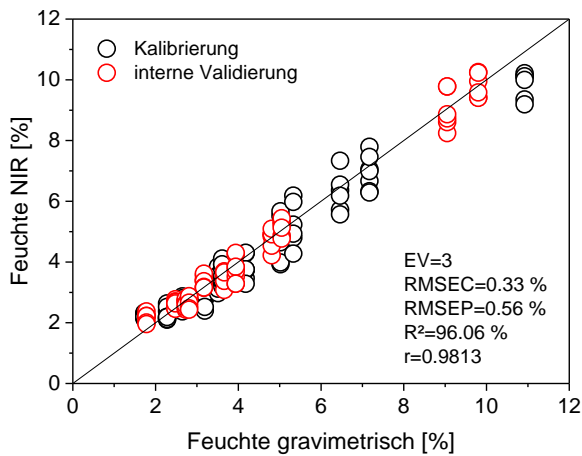


Abb. 4.6: PLS-Kalibrierung der NIR-Spektren von mit Flammschutzmittel behandeltem Mischgewebe auf die Feuchte

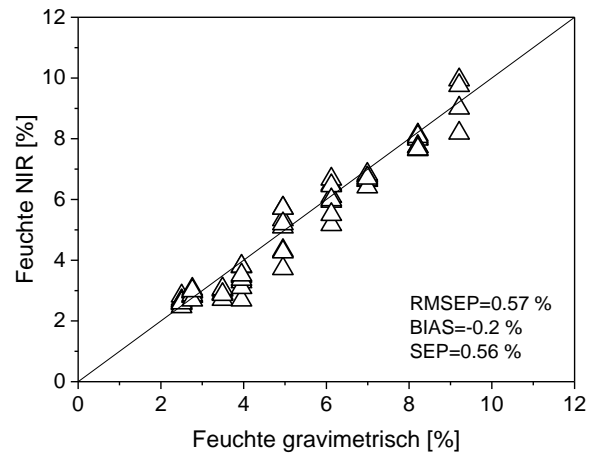


Abb. 4.7: Externe Validierung des Kalibriermodells in Abb. 4.6 mit unabhängigen Proben

Abb. 4.8 zeigt die Spectral Images von schwarzen Mischgewebeprobe mit unterschiedlichen Feuchtegehalten. Anders als das Polyestergewebe in Abb. 4.4, das eine außerordentliche gleichmäßige Trocknung aufwies, werden hier leichte Inhomogenitäten der Feuchteverteilung erkennbar, die jedoch mit zunehmender Trocknung mehr und mehr verschwinden.

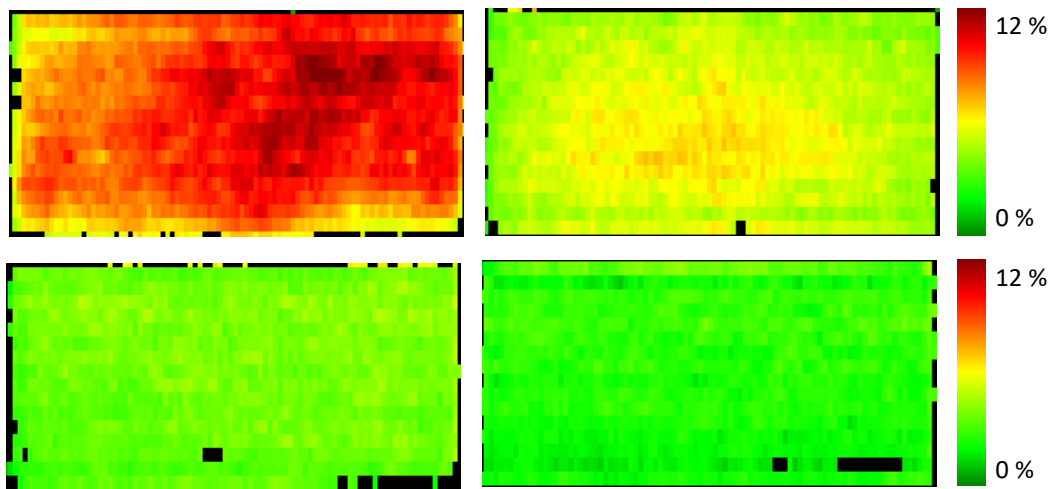


Abb. 4.8: Spectral Images von mit Flammhemmer behandeltem Mischgewebe bei unterschiedlichen Feuchtgraden (von links nach rechts: 9.1, 5.1, 3.7 bzw. 1.8 %; mittels Feuchtwage bestimmte Vergleichswerte)

Schließlich soll hier auch noch ein Beispiel für Baumwollgewebe als wichtigstes Material für ein technisches Textil aus Naturfasern angeführt werden. Im konkreten Falle wurde das Gewebe nur gewaschen, aber nicht veredelt. Dabei handelte es sich um einen Zwischenschritt in den oft mehrstufigen Veredelungsprozessen. Dennoch ist auch hier eine sorgfältige Trocknung der Textilbahn notwendig, da das Material im feuchten Zustand im Ballen bis zur Weiterverarbeitung leiden würde. Abb. 4.9 zeigt die Kalibrierung der NIR-Spektren von naturfarbenem Baumwollgewebe (265 g/m²) auf die Feuchte, während die zugehörige externe Validierung mit unabhängigen Proben in Abb. 4.10 dargestellt ist.

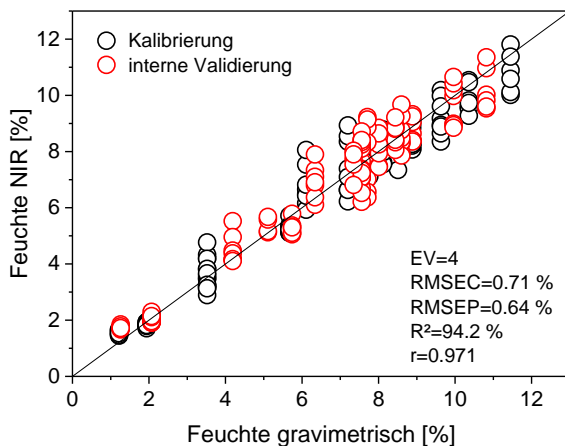


Abb. 4.9: PLS-Kalibrierung der NIR-Spektren von Baumwollgewebe auf die Feuchte

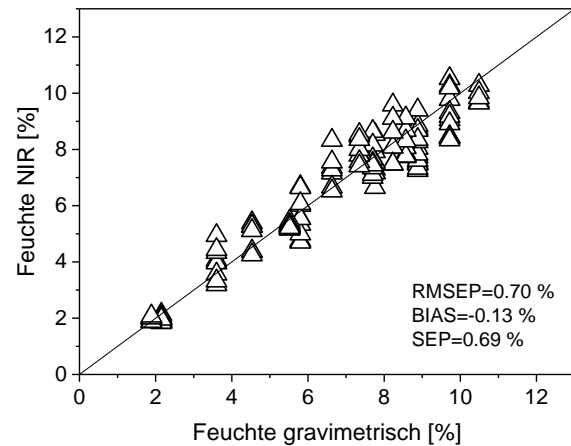


Abb. 4.10: Externe Validierung des Kalibriermodells in Abb. 4.9 mit unabhängigen Proben

Am Beispiel einiger Baumwollproben soll der Effekt einer vorsätzlich ungleichmäßigen Trocknung dargestellt werden, um das Potential der entwickelten Messmethode für die industrielle Prozesskontrolle, insbesondere in der Textilveredelung, zu demonstrieren. Abb. 4.11 zeigt zwei Muster, die unterschiedlichen Trocknungsszenarien ausgesetzt waren, die zu lokal ungleichmäßiger Trocknung führten.

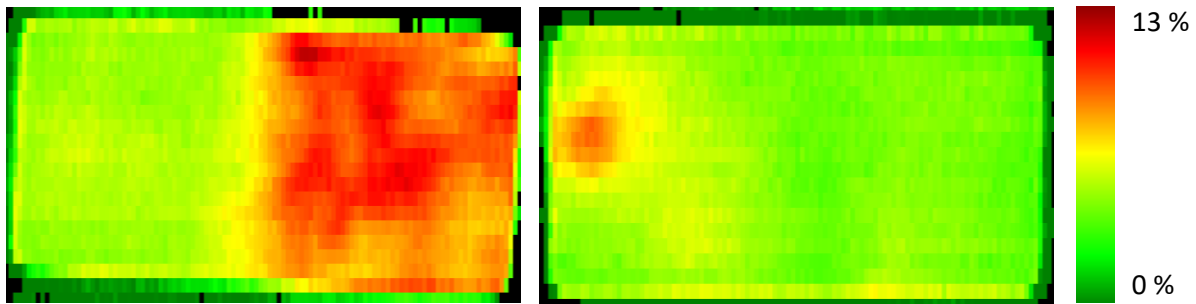


Abb. 4.11: Spectral Images von Baumwollgewebe nach partieller Trocknung nach unterschiedlichen Szenarien. Mittels Feuchtwage bestimmte „mittlere“ Feuchtegrade: 5.1 % (links) bzw. 4.2 % (rechts).

Es ist klar erkennbar, dass die Spectral Images charakteristische Fehlerbilder (eine Seite der Bahn trocken, die andere noch feucht bzw. feuchte Flecken auf der Bahn) sichtbar machen können und somit zielgerichtete Eingriffe in den Produktionsprozess ermöglichen. Die mittels Feuchtwage bestimmten „mittleren“ Feuchtegrade sagen hingegen naturgemäß nichts über die Feuchteverteilung aus.

4.3. Entwicklung chemometrischer Modelle für die quantitative Bestimmung des Auftragsgewichtes

Neben der Kalibrierung auf die Feuchte war die Kalibrierung auf das Auftragsgewicht der durch Imprägnierung applizierten Schichten der zweite wesentliche Schwerpunkt des Arbeitsprogrammes des IOM. Ziel solcher Kalibrierungen ist es, (1) das Auftragsgewicht quantitativ zu bestimmen und (2) die Homogenität des Auftrages über die Fläche zu überwachen. Beides dient der Gewährleistung der spezifizierten Funktionalität der veredelten Textilien und somit der Vermeidung von Fehlchargen, soll aber auch für eine raschere und damit effizientere Einstellung der Prozessparameter bei Produktwechseln sorgen, die in Abhängigkeit von den aktuellen Aufträgen ggf. mehrmals täglich erfolgen müssen. Außerdem soll der Sicherheitspuffer für das Auftragsgewicht im unteren Toleranzbereich gehalten werden. Alle diese Maßnahmen dienen der Vermeidung prozessbedingter Abfälle / Fehlchargen sowie der Verringerung des spezifischen Verbrauches an Veredelungschemikalien auf das technologische bedingte Mindestmaß.

Die grundsätzliche Vorgehensweise entspricht der bei der Kalibrierung auf die Feuchte. Zunächst müssen Kaliberproben mit unterschiedlichen, aber wohldefinierten Auftragsgewichten hergestellt werden. Die Quantifizierung des spezifischen Auftragsgewichtes erfolgt wiederum gravimetrisch. Anschließend wurden Spektren der Kaliberproben mit der NIR-Kamera aufgenommen. Auf Basis der gravimetrischen Referenzdaten und der wiederum aus ca. 300 Einzelspektren gemittelten NIR-Spektren wurden dann chemometrische Modelle aufgebaut und optimiert.

Abb. 4.12 zeigt NIR-Spektren von Polyestergerewebe (243 g/m^2), auf das eine Polyvinylacetat (PVAc)-Dispersion als Appretur durch Imprägnierung aufgetragen wurde. Die aus der Applikation verschiedener Auftragsgewichte resultierenden Unterschiede sind in den Spektren deutlich zu erkennen, wenngleich sie sich nicht in spezifischen Banden der Appretur manifestieren, sondern eher einen breiten Spektralbereich abdecken.

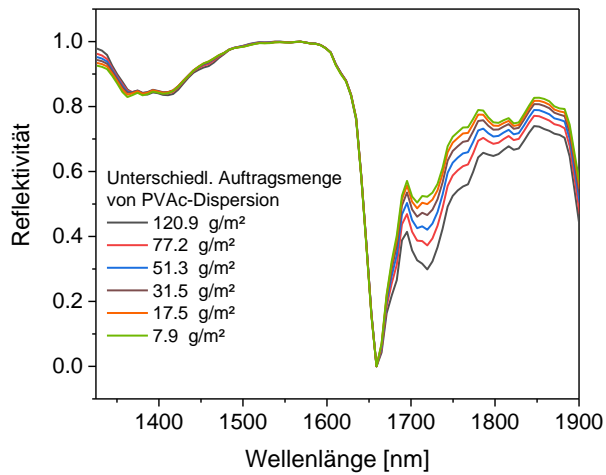


Abb. 4.12: NIR-Spektren von Polyestergerewebe (243 g/m²), auf das eine PVAc-Dispersion als Appretur mit unterschiedliche Auftragsgewichten appliziert wurde. Die Spektren sind Mittelwerte aus jeweils ca. 300 Einzelspektren und wurden auf die Aromatenbande des Polesters bei 1660 nm normiert.

In Abb. 4.13 ist die entsprechende optimierte PLS-Kalibrierung für das Auftragsgewicht dargestellt. Für den durch die Kalibrierung abgedeckten Wertebereich von ca. 8 bis 120 g/m² wurde ein Vorhersagefehler von 3 g/m² gefunden. Die externe Kalibrierung in Abb. 4.14 findet einen ähnlichen RMSEP-Wert und bestätigt damit die Qualität des erstellten chemometrischen Modells.

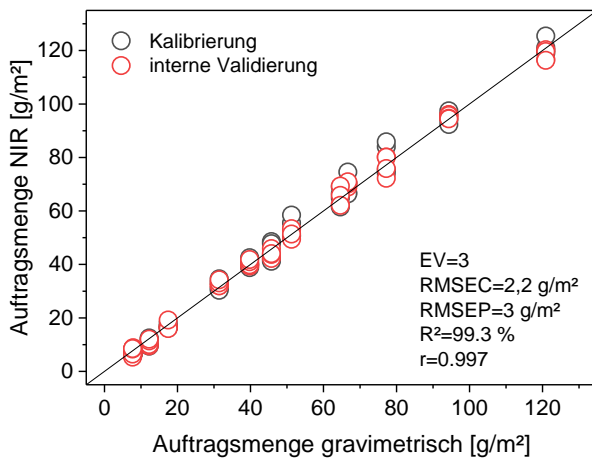


Abb. 4.13: PLS-Kalibrierung der NIR-Spektren auf das Auftragsgewicht einer PVAc-Appretur auf Polyestergerewebe

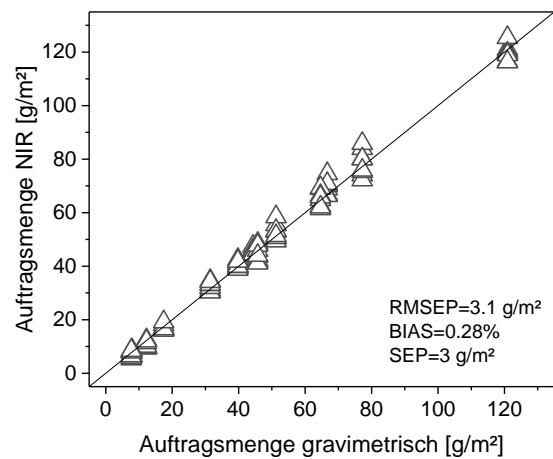


Abb. 4.14: Externe Validierung des Kalibriermodells in Abb. 4.13 mit unabhängigen Proben

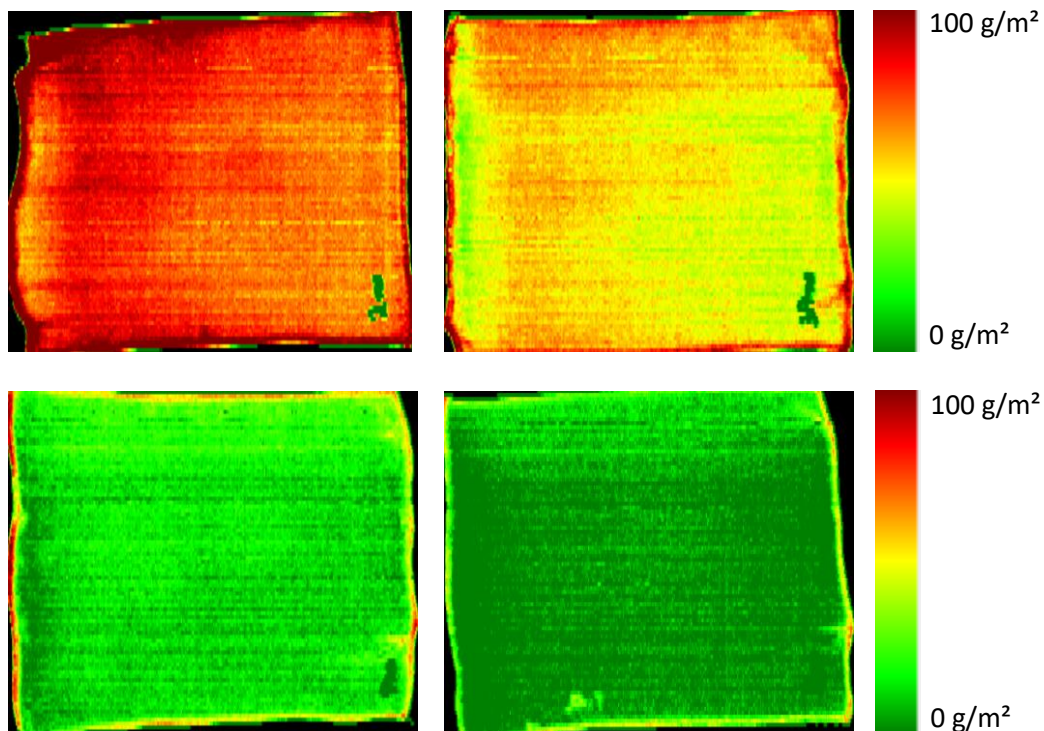


Abb. 4.15: Spectral Images von Polyestergewebe, das mit unterschiedlichen Auftragsgewichten einer PVAc-Appretur behandelt wurde (von links oben nach rechts unten: 77.2, 51.3, 17.5 bzw. 7.7 g/m²; mittels Gravimetrie bestimmte Vergleichswerte). Die unregelmäßigen grünen Strukturen in der rechten unteren Ecke eines jeden Images resultieren aus der Beschriftung der Proben.

Abb. 4.15 zeigt ausgewählte Spectral Images von mit unterschiedlichen Auftragsgewichten einer PVAc-Appretur behandeltem Polyestergewebe. Diese Vorgehensweise simuliert wiederum die spätere Überwachung der Textilbahn an einer Textilveredelungsanlage. Die Spectral Images zeigen nicht nur sehr deutlich quantitative Unterschiede zwischen den einzelnen Mustern, vielmehr ist auch – vor allem bei den beiden oberen Images – die etwas inhomogene Verteilung der Appretur über die Probenfläche erkennbar. Damit liefert das Spectral Imaging wie erwartet Informationen zur Homogenität der auf das Textilgewebe aufgetragenen Schichten und ermöglicht auf diese Weise Eingriffe in den Prozess, sofern das aus funktionalen Gründen als erforderlich angesehen wird. Als Beispiel sei hier auf die Ausrüstung von Polyestergewebe mit einer Druckvorbehandlung verwiesen, die die Farbaufnahme des Polyestergewebes ermöglicht und das textile Material somit überhaupt erst bedruckbar macht. Bedrucktes Polyestergewebe wird vor allem für Werbebanner verwendet. Wenn hier ein ungleichmäßiger Auftrag der Farbaufnahmeschicht auftreten sollte, würde sich das beim späteren Bedrucken durch ungleichmäßige Farbaufnahme (und somit der Farbintensität) oder gar Fehlstellen bemerkbar machen: Das Material wäre Ausschuss. Die obigen Ergebnisse belegen, dass Spectral Imaging helfen kann, solche Probleme zu vermeiden.

4.4. Chemometrische Modelle für den Multiplexer

Die ursprünglichen Planungen für dieses Projekt sahen den Einsatz einer Hyperspektralkamera an einer Veredelungsstrecke der Fa. Thorey Textilveredelung Gera vor. Die Arbeiten im Teilprojekt der Firmen Thorey und LLA (s. Kapitel 2 und 5) haben jedoch ergeben, dass die NIR-Kamera an der vorgesehenen Einsatzstelle in der Anlage aus Platzgründen nicht eingebaut werden kann. Die Kamera benötigt aus optischen Gründen einen Abstand von rund einem Meter von der Textilbahn, dazu kommt die Höhe der Kamera selbst (ca. 40 cm). Eine freie Bauhöhe von ca. 1.5 steht über der Anlage an dieser Stelle aber nicht zur Verfügung. Die Einbauposition der Kamera kann auch nicht beliebig verschoben werden, da sie ja den Prozess an einer bestimmten Stelle, nämlich unmittelbar nach dem Trockenofen überwachen soll. Außerdem waren Fragen der Zugänglichkeit zur Maschine zu berücksichtigen, da am Prozessende die Entnahme der veredelten Textilballen mittels Gabelstapler etc. zu gewährleisten ist. Abhilfe aus diesem Dilemma verschafft der Wechsel der Messtechnik. Dazu wurde die NIR-Kamera durch NIR-Multiplexer-Spektrometer ersetzt. Ein solches Gerät erfordert eine wesentlich geringere Bauhöhe und lässt sich einfacher an die Breite der Textilbahn von ca. 3.8 m anpassen. Die prinzipiellen Eigenschaften ähneln den einer NIR-Kamera: Spektren lassen sich quer über die Bahn und damit ortsaufgelöst aufzeichnen, wobei die Ortauflösung des Multiplexer-Spektrometers niedriger als die der Kamera ist.

Der Wechsel der Messtechnik hat auch weitreichende Konsequenzen für die Kalibrierung der NIR-Messungen: aufgrund der völlig anders gearteten optischen Bedingungen gegenüber der Hyperspektralkamera, lassen sich die dafür erstellten Kalibrierungen nicht für das Multiplex-Spektrometer nutzen und mussten daher neu erstellt werden (nur einige Kalibrierproben-Sätze ließen sich dafür auch weiterhin verwenden). Da sich der Wechsel der Messtechnik erst im Verlaufe der Projektdurchführung als notwendig herausgestellt hat, konnte auch die Umstellung der Kalibrierprozesse auf das Multiplex-Spektrometer erst in einer fortgeschrittenen Phase des Projektes erfolgen. Dies wird im Folgenden an repräsentativen Beispielen dargestellt. Dennoch bleibt festzuhalten, dass die umfangreichen Untersuchungen mit der Hyperspektralkamera wertvolle Erkenntnisse für die finale Gestaltung des Messprozesses geliefert haben.



Abb. 4.16: Messbrücke des NIR-Multiplexer-Spektrometers an einer Testanlage bei LLA Instruments. Gut zu erkennen ist die linear angeordnete Messkopfzeile mit den zugehörigen Lichtleitkabeln. Spektrometer und Multiplexer befinden sich im Gehäuse auf der linken Seite.

Die notwendigen Messungen für die Kalibrierung des Multiplex-Spektrometers wurden in enger Kooperation mit dem Team bei LLA Instruments an einer Testanlage der Firma (Abb. 4.16) durchgeführt. Im Falle der Kalibrierung auf das Flächengewicht wurden die bereits zuvor (d.h. bei den Kalibrierungen für die NIR-Kamera) bestimmten gravimetrischen Referenzdaten für die Erstellung der chemometrischen Modelle genutzt. Für Kalibrierungen auf die Feuchte mussten hingegen neue Referenzdaten für

unterschiedlich befeuchtete Kalibrierproben mit Hilfe einer Feuchtwage gewonnen werden. Die Erstellung und Optimierung der chemometrischen Modelle entsprach der oben beschriebenen Vorgehensweise. Die Bahngeschwindigkeit des Transportbandes wurde in Analogie zur Vorgehensweise mit der Hyperspektralkamera auf 10 m/min festgesetzt.

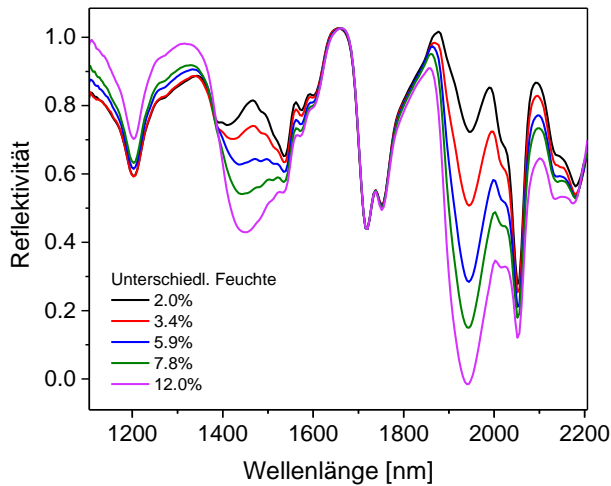


Abb. 4.17: NIR-Spektren von Polyamidgewebe (aufgenommen mit einem Multiplexer-Spektrometer) bei unterschiedlichen Feuchtegehalten. Die Spektren wurden auf den Doppelpeak bei 1720 / 1750 nm (erste Harmonische von C-H Streckschwingungen) normiert.

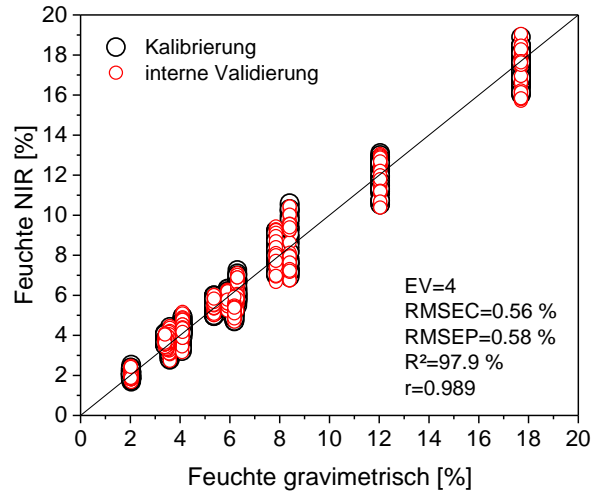


Abb. 4.18: PLS-Kalibrierung der NIR-Spektren von Polyamidgewebe auf den Feuchtegehalt

Abbn. 4.17 und 4.18 zeigen NIR-Spektren und die Kalibrierung auf die Restfeuchte für ein 240 g/m² dickes Polyamidgewebe. Dieses wurde lediglich gewaschen (und später thermofixiert), jedoch nicht veredelt. Dennoch sollte die Restfeuchte während eines simulierten Trocknungsprozesses monitoriert werden. Die Spektren enthalten hier beide Wasserbanden (bei 1440 und 1920 nm), da das mit dem Multiplexer verbundene Spektrometer einen wesentlich breiteren Spektralbereich abdeckt als die Hyperspektralkamera. Beide Banden weisen eine deutliche Abhängigkeit vom Feuchtegehalt des Polyamids auf (Abb. 4.17). Für die optimierte Kalibrierung – wurde wie schon zuvor für andere Kalibrierungen auf die Feuchte – ein Vorhersagefehler von rund 0.5 g/m² gefunden, der durch die externe Validierung (nicht dargestellt) bestätigt wurde.

Abb. 4.19 zeigt Spectral Images bei ausgewählten Feuchtegraden. Dabei werden nicht nur quantitative Unterschiede zwischen den einzelnen Mustern deutlich, die gut mit den integralen Daten der Feuchtwage korrelieren, sondern zumindest bei hohen Feuchtegraden auch lokale Unterschiede, die auf eine ungleichmäßige Trocknung über die Fläche hindeuten.

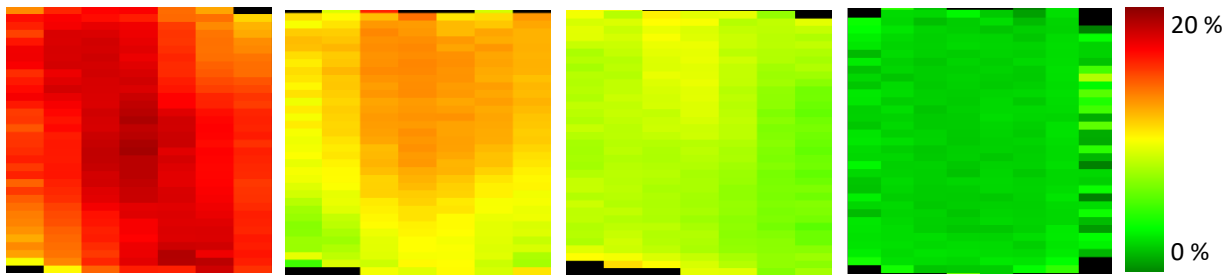


Abb. 4.19: Spectral Images von Polyamidgewebe bei unterschiedlichen Feuchtegraden (von links nach rechts: 17.7, 12.0, 7.9 bzw. 2.0 %; mittels Feuchtwage bestimmte Vergleichswerte)

Klar zu erkennen ist in allen Spectral Images darüber hinaus auch die im Vergleich zur NIR-Kamera wesentlich niedrigere Ortsauflösung der Daten, die durch die im Vergleich zum Sensorchip der Kamera relativ großen Abstände der fasergekoppelten Einzelmessköpfe auf der Messbrücke (20 mm) bedingt ist. Die geringere Ortsauflösung der neuen Konfiguration wird jedoch nicht als entscheidender Nachteil gegenüber den ursprünglichen Planungen angesehen. Die in Abb. 4.19 gezeigten Muster sind ca. 10x10 cm groß und lassen dennoch Unterschiede im Feuchtegehalt für Areale im Zentimetermaßstab erkennen. Bei 3.80 m Arbeitsbreite ist nicht zwingend davon auszugehen, dass noch kleinskaligere Variationen von Feuchte oder Auftragsgewicht auftreten. Für eine effiziente Prozesssteuerung sollte somit auch die gröber gerasterte Auflösung der jetzigen Lösung ausreichen.

Eine Kalibrierung auf das Auftragsgewicht ist am Beispiel eines mit einem Haftvermittler ausgerüsteten Polyestergewebes (243 g/m²), das in der Reifenindustrie verwendet wird, dargestellt. Der Haftvermittler basiert auf einer komplexen farbigen Latexdispersion, die in unterschiedlichen Mengen auf das relativ grobmaschige Gewebe appliziert wurde. Abb. 4.20 zeigt die entsprechenden NIR-Spektren. Die Kalibrierung ist in Abb. 4.21 dargestellt. RMSEP liegt hier nur bei etwas mehr als 1 g/m² und erlaubt somit sehr präzise Vorhersagen. Die zugehörige externe Validierung (nicht dargestellt) belegt diese hohe Genauigkeit der Vorhersage mit dem optimierten Kalibriermodell.

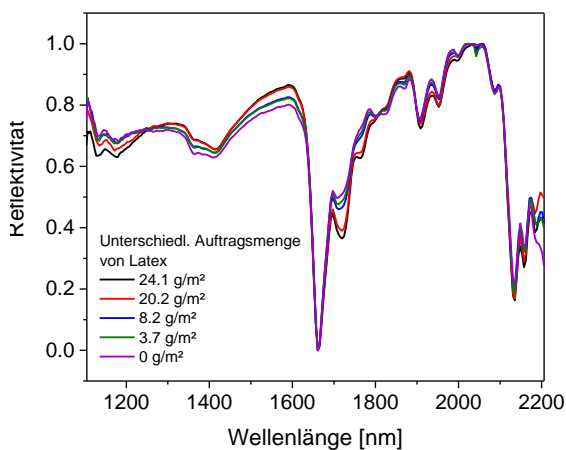


Abb. 4.20: NIR-Spektren (aufgenommen mit einem Multiplexer-Spektrometer) von mit einem Haftvermittler behandeltem Polyestergewebe.

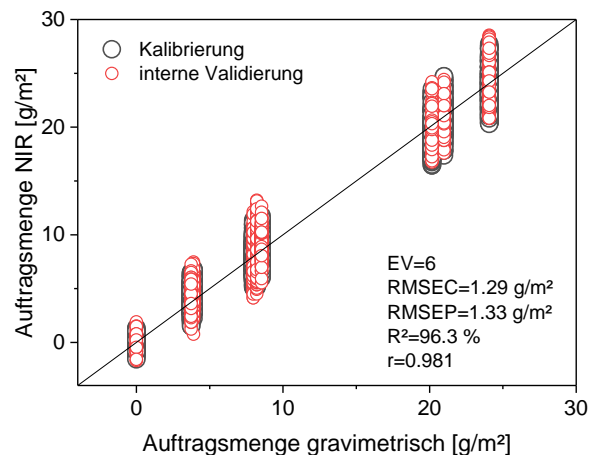


Abb. 4.21: PLS-Kalibrierung der NIR-Spektren von mit einem Haftvermittler behandeltem Polyester-gewebe auf das Auftragsgewicht

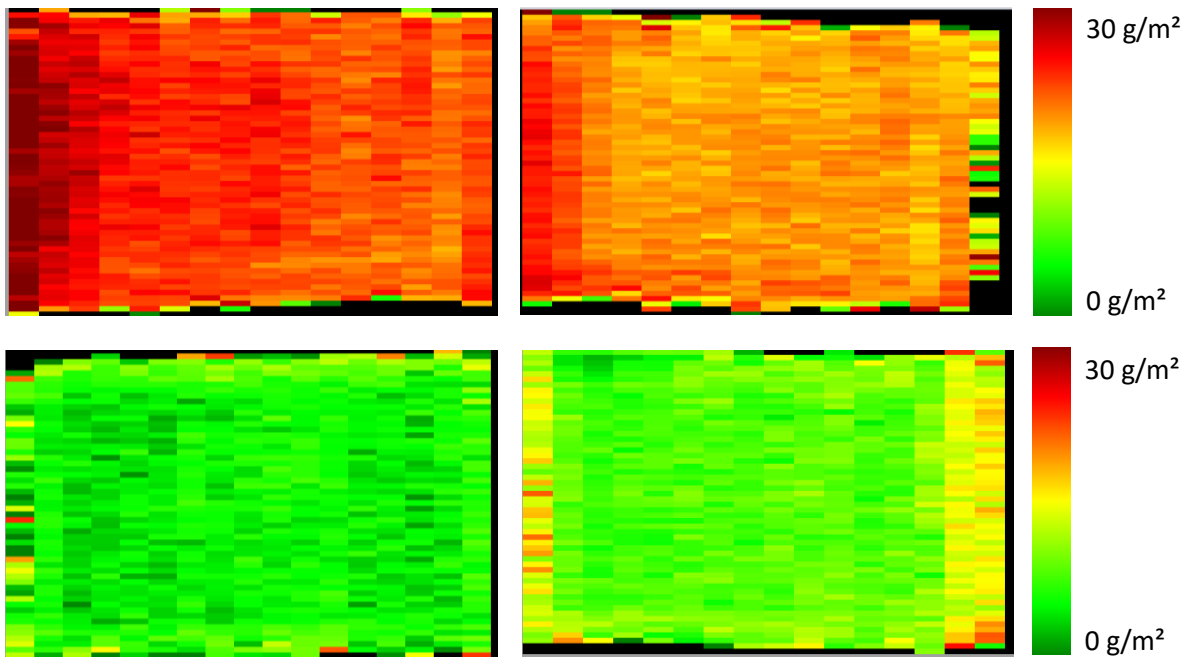


Abb. 4.22: Spectral Images von Polyestergewebe, das mit unterschiedlichen Auftragsgewichten einer Latex-Dispersion als Haftvermittler behandelt wurde (von links oben nach rechts unten: 24.1, 20.2, 8.2 bzw. 3.7 g/m²; mittels Gravimetrie bestimmte Vergleichswerte). Die Bewegungsrichtung des Transportbandes verlief – bezogen auf die Images – von unten nach oben.

Abb. 4.22 belegt, dass auch mit dem Multiplexer-Spektrometer quantitative orts aufgelöste Daten zur Homogenität des Auftragsgewichtes erhalten werden können, wobei diese nunmehr freilich eine geringere Ortsauflösung als im Falle der Hyperspektral-Kamera aufweisen. Die vielfarbigen Streifen links und rechts außen sind durch Randeffekte der außen gelegenen Sensoren bedingt, da deren Signal offenbar auch durch Bereiche außerhalb der Probe (also des Transportbandes) beeinflusst wird. Ein vergleichbarer, wenngleich deutlich schwächer ausgeprägter Effekt am oberen und unteren Rand der Spectral Images resultiert aus ähnlichen Randeffekten beim Herein-/Herauslaufen der Probe in das Sichtfeld der Sensoren. Derartige Randeffekte werden jedoch bei einer durchlaufenden Textilbahn von 3.8 m Breite nur am äußersten Rande auftreten und somit insgesamt eine untergeordnete Rolle spielen.

5. Entwicklung und Aufbau der NIR-Messtechnik für die Prozessüberwachung

(Bearbeitung des Teilprojektes: LLA Instruments GmbH, Berlin)

5.1. Mechanische Konstruktion der Beleuchtungseinheit

Die bislang von LLA als Beleuchtungszeilen verwendeten Stranggussprofile konnten auf der vollen Breite der Textilbahn (3,6 m) nicht als selbsttragende Elemente eingesetzt werden, da hierfür die Biegesteifigkeit nicht ausreichend war. Dazu kam, dass die tatsächliche Breite der Anlage etwa 4,7 m betrug. Die Konstruktion der Beleuchtungseinheit hat sich daher an den folgenden Grundprinzipien orientiert:

- Modularer Aufbau der Beleuchtungseinheit, bestehend aus zwei Einheiten einer Breite von etwa 2 m (siehe Abb. 5.1).
- Tragende Stützkonstruktion aus verschweißten Stahlblechbaugruppen zum Abfangen der Last und zur Befestigung an der Textilanlage.
- Adaption der Stützkonstruktion, sodass seitlich die Lüfter zur Kühlung sowie die Kabelführungen für die Lichtleitkabel und die elektrischen Anschlussleitungen daran befestigt werden konnten.

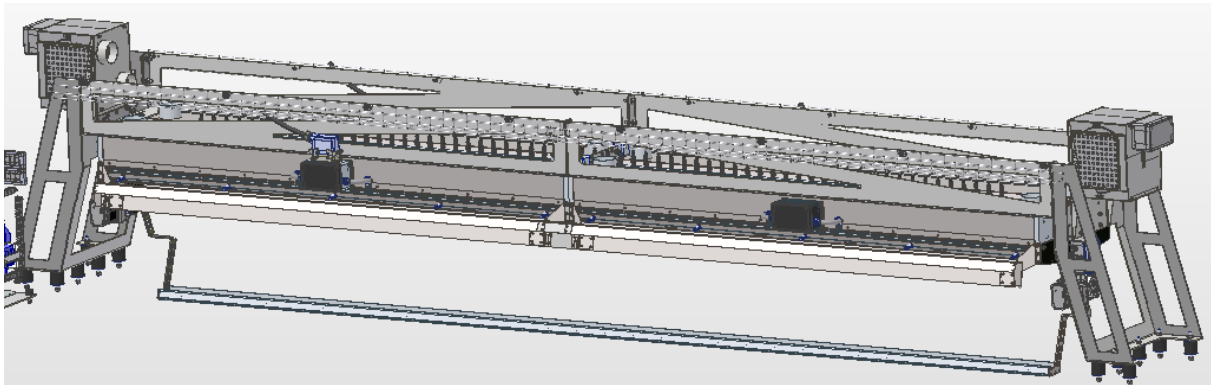


Abb. 5.1: Mechanische Konstruktion der Beleuchtungseinheit. Konstruktionsmodell. Oben links und rechts: Lüftungseinheiten mit Staubfilter, Die Brückenkonstruktion aus Stahlblechbiegeteilen (oben und seitlich) trägt die Beleuchtungseinheiten und die Einkoppeloptiken für die Lichtleitkabel.

Die Stabilität wurde im Rahmen einer Belastungsanalyse im Konstruktionsprogramm *Inventor* simuliert. Dabei wies die Stützkonstruktion unter voller Belastung durch das Gewicht der Beleuchtungseinheit eine Durchbiegung von wenigen Millimetern auf. Dies war für die Erfordernisse im Prozess und im Hinblick auf die Zielsetzung mehr als ausreichend. Die Konstruktion wurde aufgebaut und die geringe Durchbiegung eingehalten. Das Arbeitspaket wurde erfolgreich abgeschlossen.

5.2. Optische Konstruktion der Beleuchtungseinheit

Da die analytische Präzision bei der vorliegenden quantitativen Aufgabenstellung wesentlich von der homogenen und reproduzierbaren Ausleuchtung der aktiven Messfläche abhängt, befasste sich dieses Arbeitspaket mit der Optimierung der in den Beleuchtungseinheiten eingesetzten Reflektoren. Das Ziel dabei war es, diese so zu optimieren, dass sie einerseits toleranter gegenüber einer Defokussierung

der Lampen (Glühwendel) wurden und andererseits die Messfläche möglichst homogen, d.h. ohne erkennbare Streifenbildung oder Hot Spots, ausleuchteten. Alterungsbedingt ist insbesondere bei den Lampen immer mit einer gewissen Defokussierung zu rechnen, da sich mit höherer Lebensdauer die Wendel um bis zu 3 mm nach unten durchbiegen kann, sodass eine andere Abbildung entsteht, die häufig mit einer für die Messung ungünstigen Streifenbildung einhergeht. Abb. 5.2 zeigt die Verhältnisse in einer Anlage, die mehrere Monate ohne Lampenwechsel in Betrieb war, sodass einige Lampen eine deutliche Durchbiegung der Wendel aufwiesen. Dies äußert sich in einer deutlichen Streifenbildung, da verschiedene Lampensegmente bzw. Lampen unterschiedlich fokussieren.

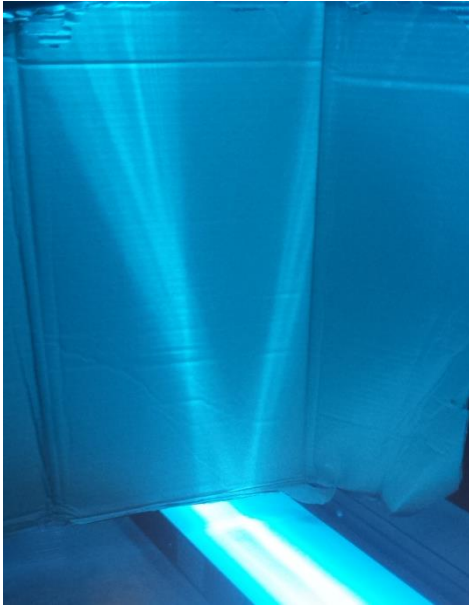


Abb. 5.2: Vertikales Schnittbild der Beleuchtung mit dem bisherigen Reflektor. Die Lampen(-segmente) fokussieren deutlich unterschiedlich aufgrund von Alterungseffekten (Durchbiegung der Wendel). Weißer Streifen unten: Mess- und Fokusebene, in welcher sich deutlich dunkle Streifen abzeichnen.

Erste Versuche bestanden darin, die Lampen geringfügig in den Reflektoren „nachzujustieren“, in der Absicht, die Lichtbündelung in der Messebene diffuser und homogener zu machen. Dies brachte jedoch nicht den gewünschten Erfolg. Genaue Untersuchungen ergaben, dass die beobachtete Streifenbildung primär von der Reflexion an den Rändern der Reflektoren abhing. Der Lösungsansatz bestand deshalb darin, den Reflektor im Außenbereich definiert aufzuweiten, während er in einem zu definierenden inneren Bereich die bisherige Ellipsoidform beibehalten sollte.

Anhand umfangreicher Simulationen mit dem Optikprogramm ZEMAX wurde eine Reflektorform gefunden, die gegenüber einer leichten Defokussierung der Glühwendel deutlich toleranter war als die bisherige. Der neue Reflektor besteht dabei in einem inneren Bereich aus der bisherigen Ellipsoidform und im Außenbereich aus einer Polynomform, die gegenüber dem Ellipsoid weiter öffnet (Abb. 5.4). Um die Abbildung und die Toleranz berechnen zu können, wurden in der ZEMAX-Simulation 50 mm vor und hinter dem Fokus des inneren Ellipsoids virtuelle Detektoren (d.h. ohne Auswirkung auf den optischen Strahlengang) angeordnet, welche die lokale Intensitätsverteilung aufzeichneten.

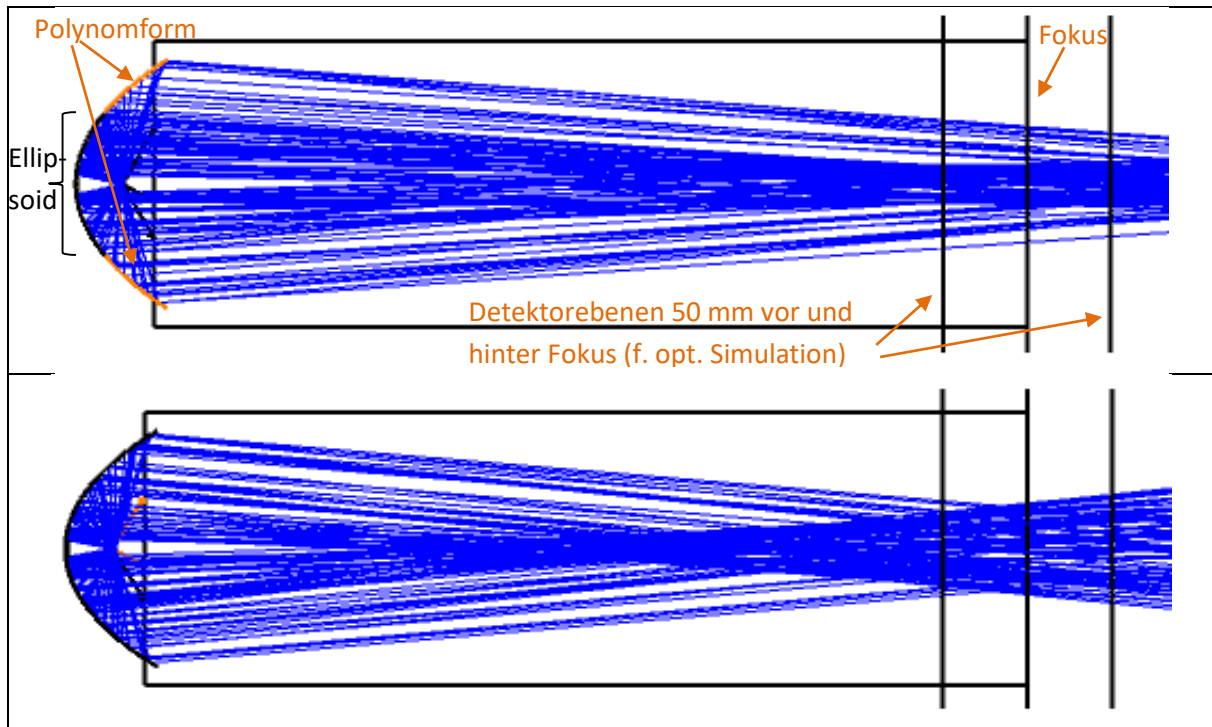


Abb. 5.3: Neuer Reflektor mit polynomförmigem Außenbereich: Oben: Wendel im Fokus des inneren Ellipsoids. Unten: Wendel 1,5 mm vor dem Fokus des inneren Ellipsoids (29,5 mm vom Scheitelpunkt).

In Abb. 5.3 ist zu erkennen, dass bei Anordnung der Wendel im Brennpunkt des Reflektors (oberes Bild) die am Ellipsoid reflektierten Strahlen in der Fokusebene zusammenlaufen bzw. schon geringfügig davor. Gleichzeitig fokussieren die am polynomförmigen äußeren Teil reflektierten Strahlen erst hinter der Fokusebene. Positioniert man die Wendel dagegen 1,5 mm vor den Brennpunkt des Ellipsoids (unteres Bild), so kompensiert die bessere Fokussierung der Randstrahlen gerade das zunehmende Divergieren der am inneren Ellipsoid reflektierten Strahlen. Insgesamt wurde so eine deutlich homogenere Ausleuchtung in der Fokusebene erreicht. Die folgende Reflektorform hat sich dabei in der Simulation als optimal erwiesen:

- 1) Von $y = 0 \text{ mm}$ bis $y = 43 \text{ mm}$ wurde das bisherige Ellipsoid mit den beiden Halbachsen $a=297,5 \text{ mm}$ und $b = 126 \text{ mm}$ beibehalten, d.h. in Mittelpunktkoordinaten $\frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{a^2} = 1$ bzw. bezüglich des Scheitelpunktes $\frac{y^2}{b^2} + \frac{(z-a)^2}{a^2} = 1$. Aufgelöst nach $z(y)$ hat man damit für y zwischen 0 und 43 mm:

$$z(y) = a - a \sqrt{1 - \frac{y^2}{b^2}}$$

- 2) Von $y = 43 \text{ mm}$ bis zum Reflektorrand bei $y = 60 \text{ mm}$ wurde an das bisherige Ellipsoid ein polynomförmiger Reflektor stetig angefügt, welcher durch den Scheitel des Ellipsoids geht und im Außenbereich gegenüber der ursprünglichen Ellipsenform 2,5 mm weiter öffnet:

$$z(y) = 0,009495124 \cdot y^2 + 8,88671 \cdot 10^{-8} \cdot y^4$$

Abb. 5.4 zeigt die bisherige Ellipsoidform und das Ellipsoid mit angefügtem Polynom im Vergleich.

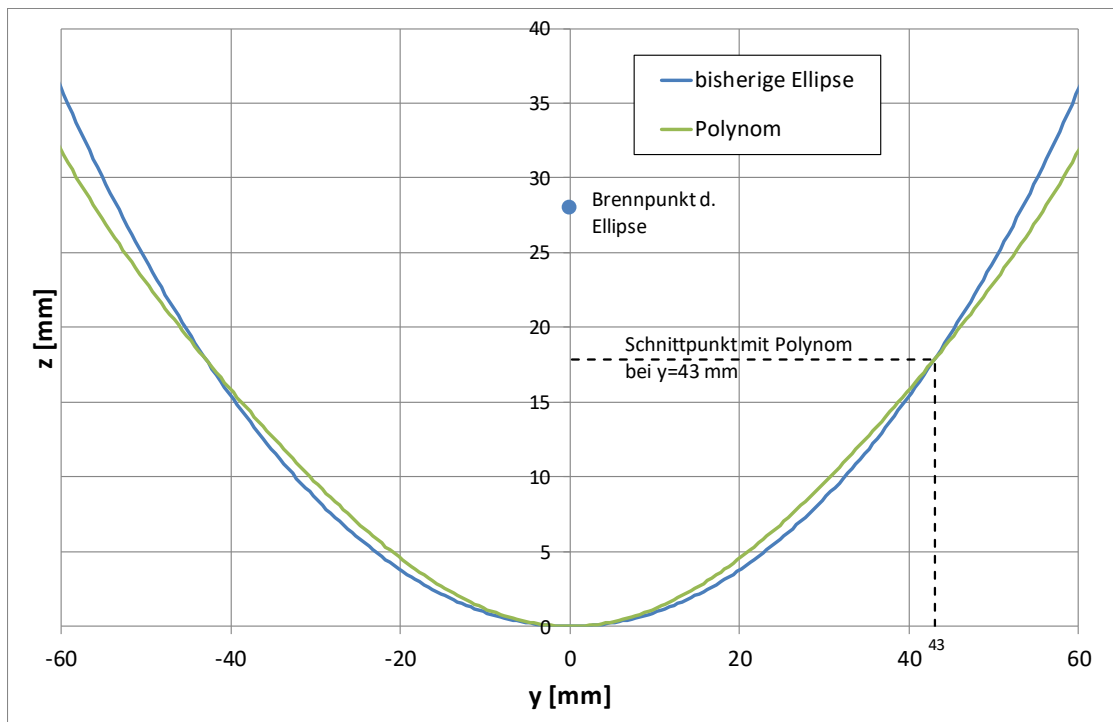


Abb. 5.4: Layout des neuen Reflektors mit Polynomform im Außenbereich (grüne Kurve für $y > 43$). Bisheriges Ellipsoid (blaue Kurve).

Ein Prototyp mit der modifizierten Reflektorform wurde hergestellt und getestet. Abb. 5.5 zeigt den optischen Strahlengang für eine Lampe mit deutlich gealterter Glühwendel als vertikalen Schnitt bis hinunter auf die Messebene.

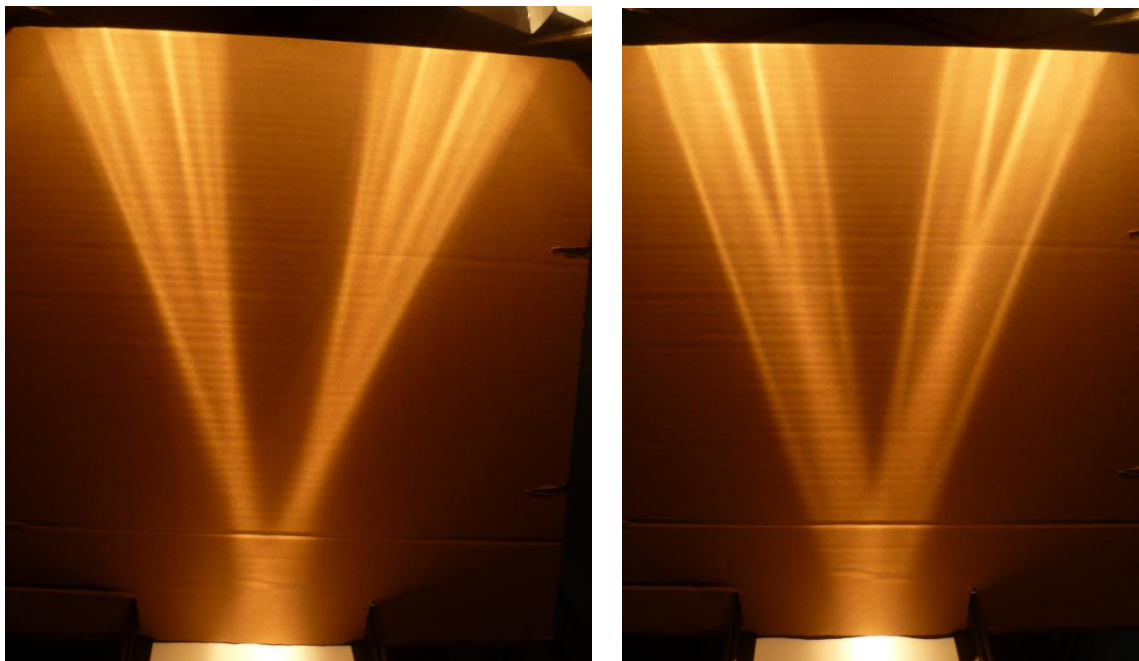


Abb. 5.5: Lampe mit 2 mm durchgebogener Wendel. Links: bisheriger Reflektor. Rechts: neue Reflektorform. Genau wie aus der Simulation zu erwarten war, zeigt der neue Reflektor eine größere Homogenität und geringere Neigung zur Streifenbildung in der Brennebene.

Mit der neuen Reflektorform wurde die Homogenität der Einstrahlung und die Toleranz gegenüber Alterungseffekten somit deutlich verbessert. Das Arbeitspaket wurde erfolgreich abgeschlossen.

5.3. Integration der Messtechnik in die Textilausrüstungsstraße

Aufgrund der baulichen Gegebenheiten an der Textilveredelungsmaschine der Fa. Thorey, der höheren spektralen Auflösung und des größeren Spektralbereiches wurde entschieden, statt einer Hyperspektalkamera (1330 nm – 1900 nm) ein gemultiplextes Zeilenspektrometer (1100 – 2200 nm) einzusetzen. Das Spektrometer ist dabei über 64 optische Lichtleitkabel mit dem Messkopf verbunden, der die gesamte Bahnbreite von 3,6 m abdeckt. Die 64 Einkoppeloptiken der einzelnen Messspuren wurden in einer individuell angepassten Optikleiste, welche in die Messbrücke integriert wurde, in einem Raster von 54 mm angeordnet.

Für die Messbrücke mit Beleuchtungseinheit wurde in Absprache mit Thorey eine Einbauposition in der Textilausrüstungsstraße festgelegt, bei der die Bahn in kurzem Abstand über zwei aufeinanderfolgende Rollen geführt wird. Damit wurde sichergestellt, dass sich die Textilbahn immer exakt im Fokus befindet und nicht durch Schwingungen aus diesem herauslaufen kann. Die seitlichen Halterungen der Messbrücke wurden so angepasst, dass sie genau auf den tragenden Stahlprofilen der Textilanlage aufgesetzt werden konnten.

Abb. 5.6 zeigt die Konstruktionsplanung sowie die Umsetzung in der Anlage. Für die Bedienung des Gerätes und für die Onlineanzeige der Messdaten wurde ein industrietaugliches Bedienpanel mit dem Schutzgrad IP65 vorgesehen.

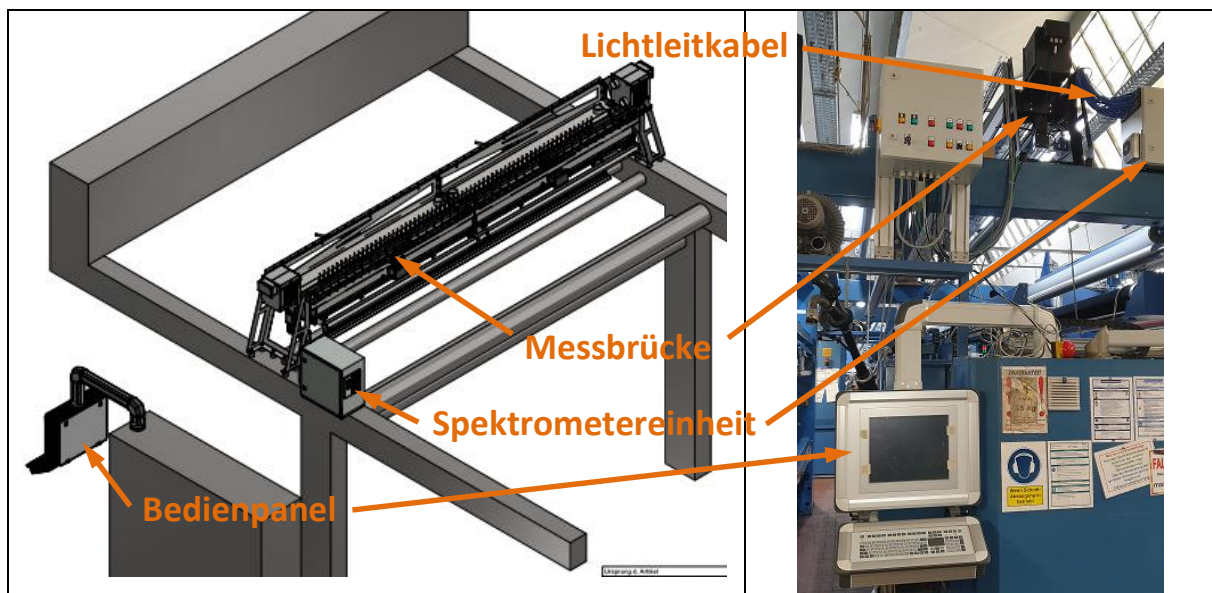


Abb. 5.6: Links: geplante Einbauposition der Messbrücke kurz vor dem Warenauslauf. Rechts: Umsetzung nach Montage in der Anlage.

Die Gerätesoftware wurde um eine grafische Benutzeroberfläche für den Endanwender erweitert. In dieser kann die zu analysierende quantitative Größe (Materialfeuchte, Auftragsmenge etc.) übersichtlich über eine ganze Rollenbahn (d.h. bis ca. 40 Minuten Produktion) dargestellt werden. Insbesondere kann der Anlagenführer auf einen Blick erkennen, ob für die zu überwachende Größe bestimmte Gren-

zen eingehalten werden. Die Messwerte werden in einer Grauskala angezeigt, wenn sie innerhalb dieser Grenzen liegen. Liegen die Messwerte oberhalb eines vom Benutzer vorgegebenen Maximalwertes, werden die entsprechenden Bereiche rot eingefärbt. Liegen sie unterhalb eines vom Benutzer vorgegeben Minimalwertes, werden sie blaugrün eingefärbt. Ein Beispiel einer solchen Darstellung folgt in Kapitel 6 (Abb. 6.6).

6. Praktische Erprobung der entwickelten Sensoren und Messverfahren an einer Textilveredelungsanlage der Fa. Thorey Textilveredelung GmbH (gemeinsame Bearbeitung durch alle Projektpartner)

6.1. Überwachung des Auftragsgewichtes

Zum Abschluss des Projektes erfolgte die praktische Erprobung aller entwickelten Sensoren und Messverfahren an einer Textilveredelungsanlage der Fa. Thorey. Im Rahmen einer regulären Wartungskampagne, für die die normalerweise im Dreischichtbetrieb genutzte Anlage außer Betrieb genommen wurde, erfolgte die Installation der Messbrücke für den NIR-Multiplexer im Bereich zwischen dem Ausgang des Trockenofens und der Aufwicklung der Textilbahn. Abb. 5.6 zeigt die in einer Höhe von ca. 4 m montierte Messbrücke. Weiterhin wurden auch die Mikrowellensensoren an der Veredelungsanlage installiert. Ihre Montage erfolgte unmittelbar hinter dem Saugbalken, der damit in Zukunft gesteuert werden soll (siehe Abb. 6.1).



Abb. 6.1: Montage der Mikrowellensensoren hinter dem Saugbalken (im Vordergrund) einer Textilveredelungsanlage der Fa. Thorey

Unmittelbar vor dem Wiederanfahren der Textilanlage nach dem Wartungsintervall wurde die Textilveredelungsmaschine für den Praxistest der neu entwickelten Sensorik genutzt. Aufgrund der Dimensionen der Anlage (ca. 40 m Länge 3.60 m Arbeitsbreite) und des damit einhergehenden Materialaufwandes (ca. 70 m Bahnlänge innerhalb der Maschine) konnte im Vergleich zu den diversen Vorversuchen in Labors und Technika nur ein sehr eingeschränktes Produktspektrum in die Untersuchungen einbezogen werden. Des Weiteren ist darauf hinzuweisen, dass die Fa. Thorey ein Lohnveredler ist und somit nicht alle im Vorfeld untersuchten Materialien und deren Kombinationen (Textilien, Veredelungschemikalien) ständig zur Verfügung stehen. Im Rahmen der Maschinenversuche für dieses Projekt wurde helles Polyestergewirke mit Flächengewichten von 100 bzw. 200 g/m² als textiles Substrat verwendet.

In einem ersten Versuch wurde das Polyester-Gewirke im Prozess gewaschen, fixiert und anschließend mit einem optischen Aufheller behandelt. Es zeigte sich, dass die Behandlung mit dem Aufheller nicht zu einer visuell erkennbaren spektralen Veränderung der Absorptionsstruktur in nahen Infrarot führte (inwieweit chemometrische Ansätze hier Abhilfe verschafften könnten, konnte während der Maschinenversuche nicht geklärt werden). Daher wurde in einem zweiten Schritt zusätzlich ein phosphorbasierter Flammhemmer aufgetragen. Abb. 6.2 zeigt einen Ausschnitt aus den NIR-Spektren beider Versuchsreihen im Vergleich. Bei entsprechender Normierung auf die Hauptbande des Polyesters bei

1663 nm treten deutliche Veränderungen in der Absorptionsstruktur hervor, welche dem Flamm-
schutzmittel zugeordnet werden können.

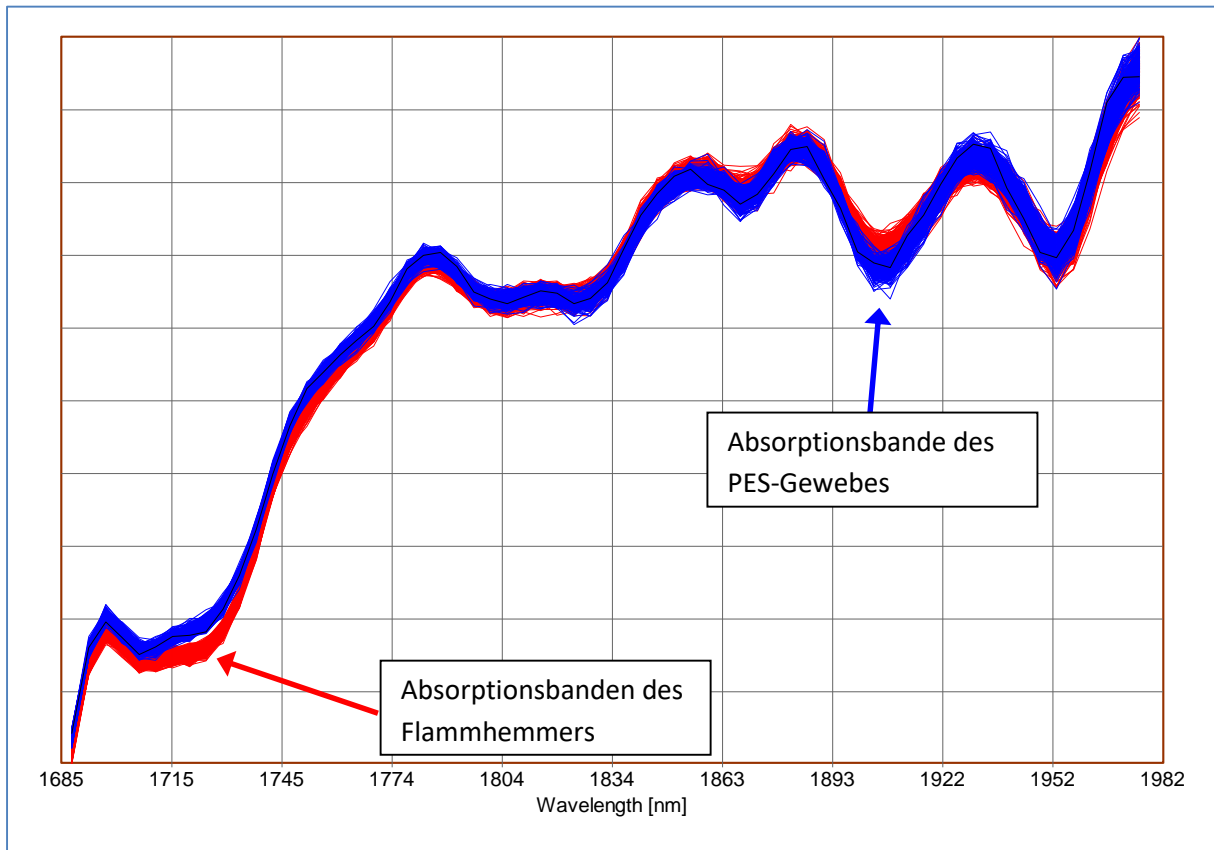


Abb. 6.2: NIR-Spektren von mit optischen Aufhellung behandeltem Polyester-Gewirke, ausgerüstet mit Flammhemmer (blaue Kurven) bzw. ohne Flammhemmer (rote Kurven). Normierung auf die PET-Bande bei 1663 nm (im Ausschnitt nicht abgebildet).

Anhand der Spektren aus diesen Versuchsreihen wurde eine einfache chemometrische Methode auf der Basis des PLS-Algorithmus erstellt, welche das unbeschichtete Gewirke auf 0 % Flammhemmer und das beschichtete auf 100 % (=Sollauftrag in willkürlichen Einheiten) skalierte. In einer dritten Versuchsreihe wurde nun während des Beschichtungsprozesses der Abquetschdruck hinter dem Durchlauf durch die Auftragsflotte kurzfristig von 5 bar auf 0 bar reduziert und anschließend langsam wieder auf 5 bar erhöht. Da mit dem Abquetschdruck reguliert wird, wie stark die Flotte mit dem Flammhemmer aus dem Gewirke ausgepresst wird, sollte ein zu geringer Druck zu einer erhöhten Auftragsmenge führen und umgekehrt. Das Ergebnis der Prozessaufzeichnung ist in Abb. 6.3 dargestellt. Wie zu erwarten war, steigt die gemessene Auftragsmenge von 100 % (= Sollauftragsmenge, grau) am Anfang auf über 150 % der Sollauftragsmenge an (zunehmende Schwarzfärbung). Bereiche, in denen 157 % des Sollauftrags überschritten wurden, sind in der Prozessaufzeichnung entsprechend des eingestellten Grenzwertes rot eingefärbt. Mit Hilfe einer spezifischen Kalibrierung und einem darauf basierenden ausgefeilteren chemometrischen Modell lassen sich statt semiquantitativer präzise quantitative Daten erhalten.

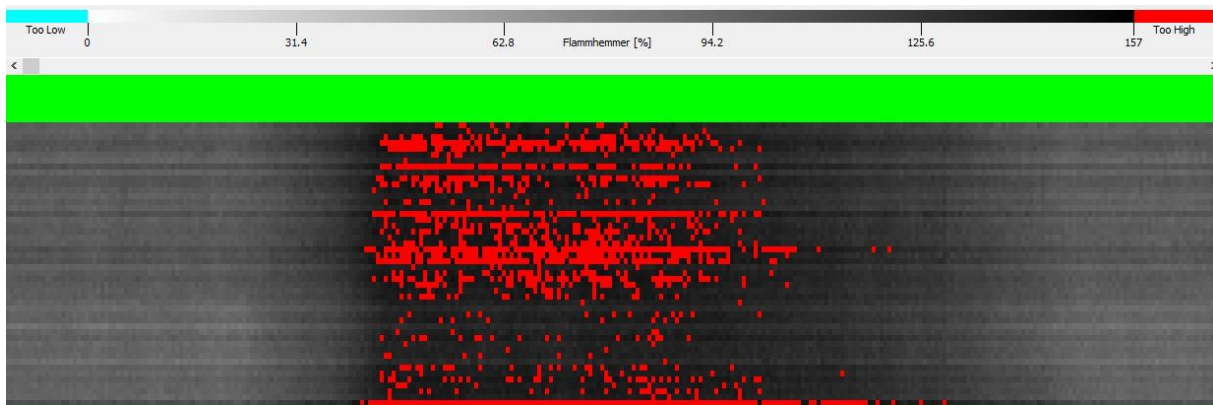


Abb. 6.3: Beschichtung eines Polyester-Gewirkes mit einem Flammhemmer. Im mittleren Bereich der Aufzeichnung wurde der Abquetschdruck hinter dem Durchlauf durch die Flotte vorübergehend deutlich reduziert, weshalb mehr Flammschutzmittel aufgebracht wurde. Zu hoher Auftrag, d.h. mehr als 157 % der Soll-Auftragsmenge, wurde rot eingefärbt. Grün: keine Messdaten auf diesen Spuren.

In einem weiteren Versuch wurde das Herunterwaschen einer aliphatischen Polyester-Schlichte von einem Polyester-Gewebe im Prozess untersucht. Das Rohgewebe hatte eine Grammaturn von 260 g/m^2 und einen Schlichteauftrag von ca. 15 g/m^2 , der im Prozess entfernt werden sollte. Zunächst wurden NIR-Daten für das Rohgewebe mit Schlichte aufgezeichnet und diese als 100 % Auftrag definiert. Anschließend wurde der Prozess mit einer niedrigen Geschwindigkeit von 10 m/min angefahren, sodass sichergestellt war, dass die Schlichte hier vollständig entfernt wurde. Dieser Bereich wurde anschließend als 0 % Schlichte definiert (nachträgliche gravimetrische Untersuchungen ergaben eine Restschlichteauftrag von 0.5 g/m^2). Da die Schlichte eine andere polymere Struktur als das zugrundeliegende Polyester-Gewebe hat, zeigen die Absorptionsbanden der Schlichte (siehe Abb. 6.4) im NIR-Spektralbereich signifikant abweichende Strukturen [Sie02]. Anhand der aufgezeichneten Spektren wurde wiederum eine PLS-Methode erstellt, welche die Menge der auf dem Gewebe verbliebenen Schlichte quantitativ bewertet und dabei – wie oben beschrieben – die Analysenwerte zwischen 0 % (ohne Schlichte) und 100 % (mit Schlichte = Rohware) skalierte. Das Ergebnis der Prozessauswertung zeigt Abb. 6.5. Man erkennt sehr gut, dass bei der langsamen anfänglichen Bahngeschwindigkeit von 10 m/min die Schlichte vollständig entfernt wurde, während nach Erhöhung der Bahngeschwindigkeit auf 20 m/min und später bei allmählich zunehmender Konzentration der Schlichte in der Waschflotte die Schlichte zum Ende der Aufzeichnung hin nicht mehr vollständig entfernt werden konnte und dabei teilweise der (willkürlich gesetzte) Grenzwert von 57 % überschritten wurde (rot dargestellte Punkte).

Der erste Teil dieses Arbeitspaket wurde erfolgreich abgeschlossen und damit insgesamt eine der beiden Hauptzielstellungen des Projektes – die Überwachung der Auftragsmenge der applizierten Chemikalien – erreicht. Anhand der entwickelten Applikationen können Beschichtungsfehler bzw. Abweichungen vom Sollwert der Auftragsmenge frühzeitig erkannt und die Anlage entsprechend nachgeregelt werden. Dadurch kann eine unnötige Ausschussproduktion reduziert oder gänzlich vermieden werden. Außerdem konnte bei der Beschichtung mit potentiell umweltschädlichen Chemikalien (Flammhemmer) die Auftragsmenge online überwacht werden, sodass ein unnötig hoher Einsatz von Chemikalien frühzeitig erkannt und somit die Umweltbelastung reduziert werden kann.

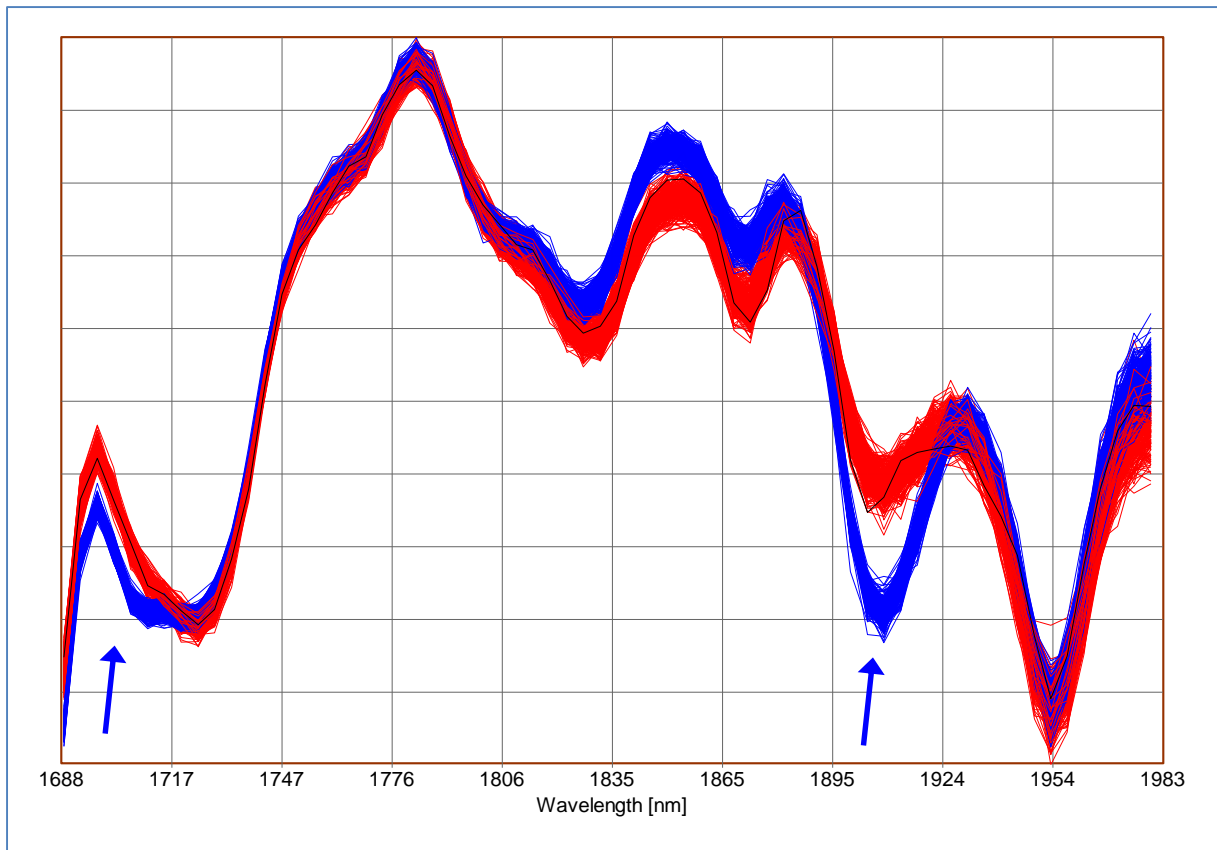


Abb. 6.4: NIR Spektren von Polyester-Gewebe mit Schlichte (rot) und ohne Schlichte (blau). Mathematische Normierung auf die Polyesterbande bei 1663 nm (nicht im Bildausschnitt gezeigt). Mit Pfeilen markiert: die für die chemometrische Analyse hauptsächlich relevanten spektralen Unterschiede.

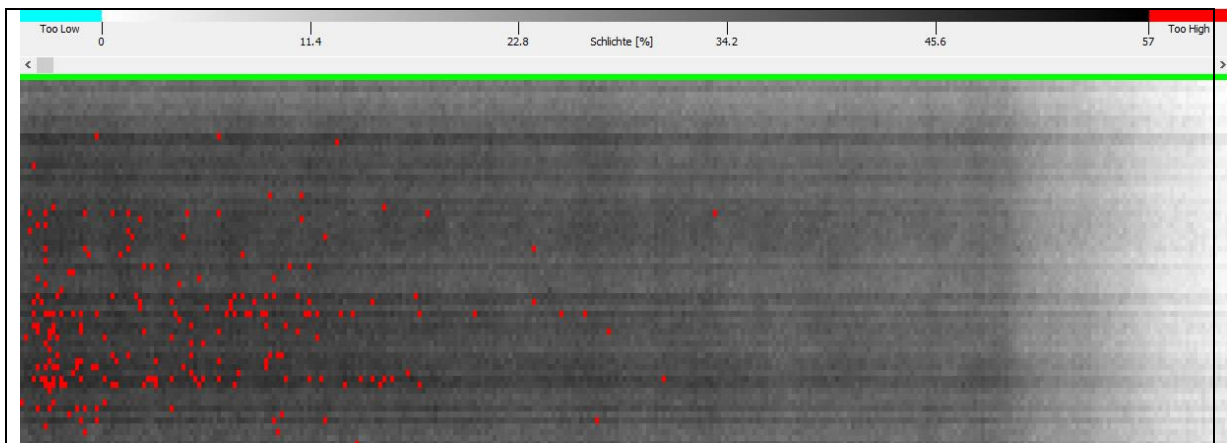


Abb. 6.5: Einlaufprozess des Herunterwaschens der Schlichte vom Polyestergerewebe. Anfänglich wurde die Schlichte vollständig heruntergewaschen (weißer bis hellgrauer Bereich rechts). Die zunehmende Dunkelfärbung zum linken Bereich hin zeigt, dass beim Hochfahren der Anlage auf 20 m/min Schlichte auf dem Gewebe verblieb. Die roten Bereiche zeigen lokale Stellen an, in denen der Grenzwert von 57% Schlichte (willkürliche Einheiten) überschritten wurde. Grün: keine Messdaten Spur 1.

6.2. Überwachung der Restfeuchte am Saugbalken

Für praktische Tests der Mikrowellensensoren an der Textilveredelungsanlage der Fa. Thorey wurden 2 Einzelsensoren verwendet. Eine typische Messreihe zeigt Abb. 6.6. Der Temperaturfühler, der vorn im Resonatorkopf montiert ist, wies eine Temperatur von ca. +30 °C aus, die über alle Messungen bis auf wenige Grad konstant war (blaue Kurve). Die rote und braune Kurve zeigen die Messwerte der beiden (unterschiedlichen) Sensoren. Bis Messung Nr. 12400 wurden verschiedene Unterdrücke am Saugbalken eingestellt. Nach einer Produktionspause wurde die Produktion bei Messung Nr. 13200 fortgeführt.

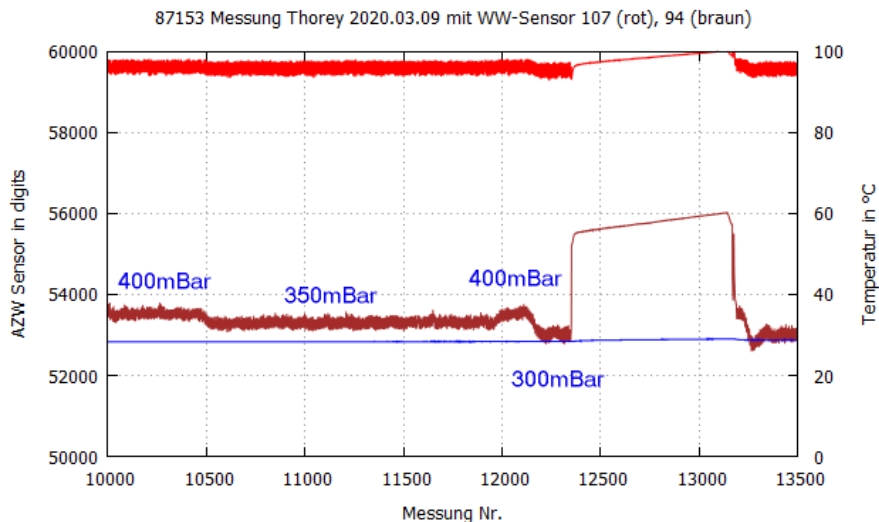


Abb. 6.6: Einfluss unterschiedlicher Unterdrücke am Saugbalken auf den Anzeigewert des Sensors

Für die Auswertung standen nur Messwerte von Tests mit niedrigen Flächengewichten zur Verfügung. In der Abb. 6.7 dargestellten Messreihe wurde eine Textilbahn mit einem Flächengewicht von 120 g/m² und einer Dicke von ca. 0.4 mm vermessen. Die Produktionspause bei Messung Nr. 3800 wurde dabei ausgeblendet. Die Messwerte der Sensoren wurden mit den Formeln im Abschnitt 3.6 in einen Feuchtwert umgerechnet. Zur Kurvenglättung wurden zuvor Mittelwerte über jeweils 10 Messwerte berechnet.

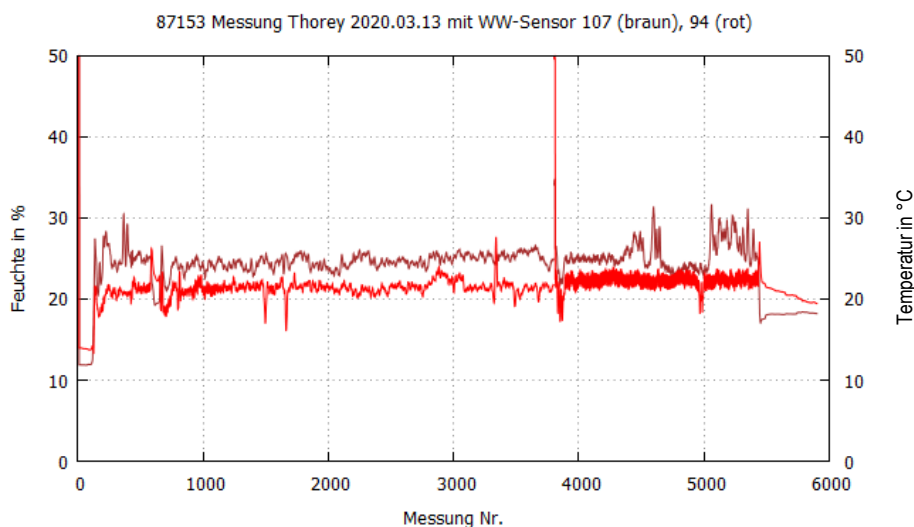


Abb. 6.7: Umrechnung der Messwerte des Sensors in Feuchtwerte für Polyestergewebe mit einem Flächengewicht von 120 g/m²

Da das Flächengewicht bekannt ist, kann für beide Sensoren ein Feuchtwert ermittelt werden. Die braune und die rote Kurve zeigen die umgerechneten Messwerte der Sensoren. Im Idealfall liegen die beiden Kurven dabei übereinander. Im vorliegenden Beispiel ergibt sich eine Differenz von 3...5 %, die für diese Konfiguration als typischer Messfehler angenommen werden kann. Für einen ersten Test kann dieses Ergebnis als sehr gut angesehen werden. Mit weiteren Messungen bei anderen Flächengewichten des Textils sollte sich die Genauigkeit noch steigern lassen. Bei Messungen in anderen Projekten hat sich gezeigt, dass mit diesen Sensoren Genauigkeiten bis ± 1 % erreichbar sind.

In Abb. 6.8 sind die in Feuchtwerte umgerechneten Messdaten für eine Textilbahn mit einem Flächengewicht von nur 65 g/m^2 zu sehen. Die sich ergebende Differenz zwischen beiden Sensoren ist mit ca. 10 % deutlich größer.

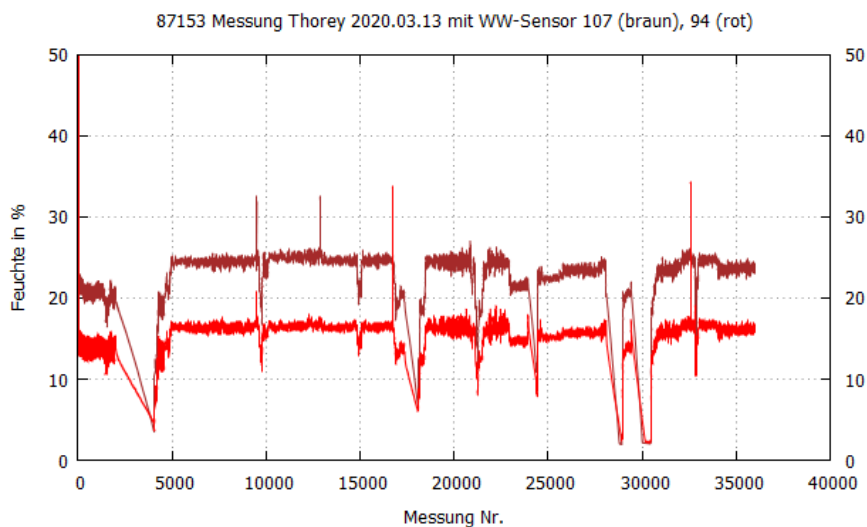


Abb. 6.8: Umrechnung der Messwerte des Sensors in Feuchtwerte für Polyestergewebe mit einem Flächengewicht von 65 g/m^2

Die beiden obigen Messungen wie auch die bisherigen Erfahrungen aus anderen Projekten zeigen, dass Sensoren mit Mikrowellenresonatoren immer nur für bestimmte Bereiche gut anzupassen sind und nur dann hohe Genauigkeiten erreichbar sind. Für die verwendeten Sensoren ergibt das einen Einsatzbereich für Flächengewichte ab ca. 100 g/m^2 bei einer Feuchte von ca. 20 %.

6.3. Überwachung der Restfeuchte am Prozessende

Zur Demonstration der Inline-Überwachung der Restfeuchte am Prozessende mittels NIR-Multiplex-Spektroskopie wurde ein Polyestergewebe durch die Anlage gefahren und dabei gewaschen und getrocknet. Während der Messreihe wurden die Trocknungsbedingungen variiert, sodass das Material teilweise zunächst leicht feucht, später völlig trocken aus der Anlage kam. Zusätzlich wurde nach dem Durchlauf durch den Trockenofen stellenweise manuell Wasser aufgebracht, um besonders hohe Feuchtwerte zu erzeugen. Einen Ausschnitt aus der Messreihe zeigt Abb. 6.9.

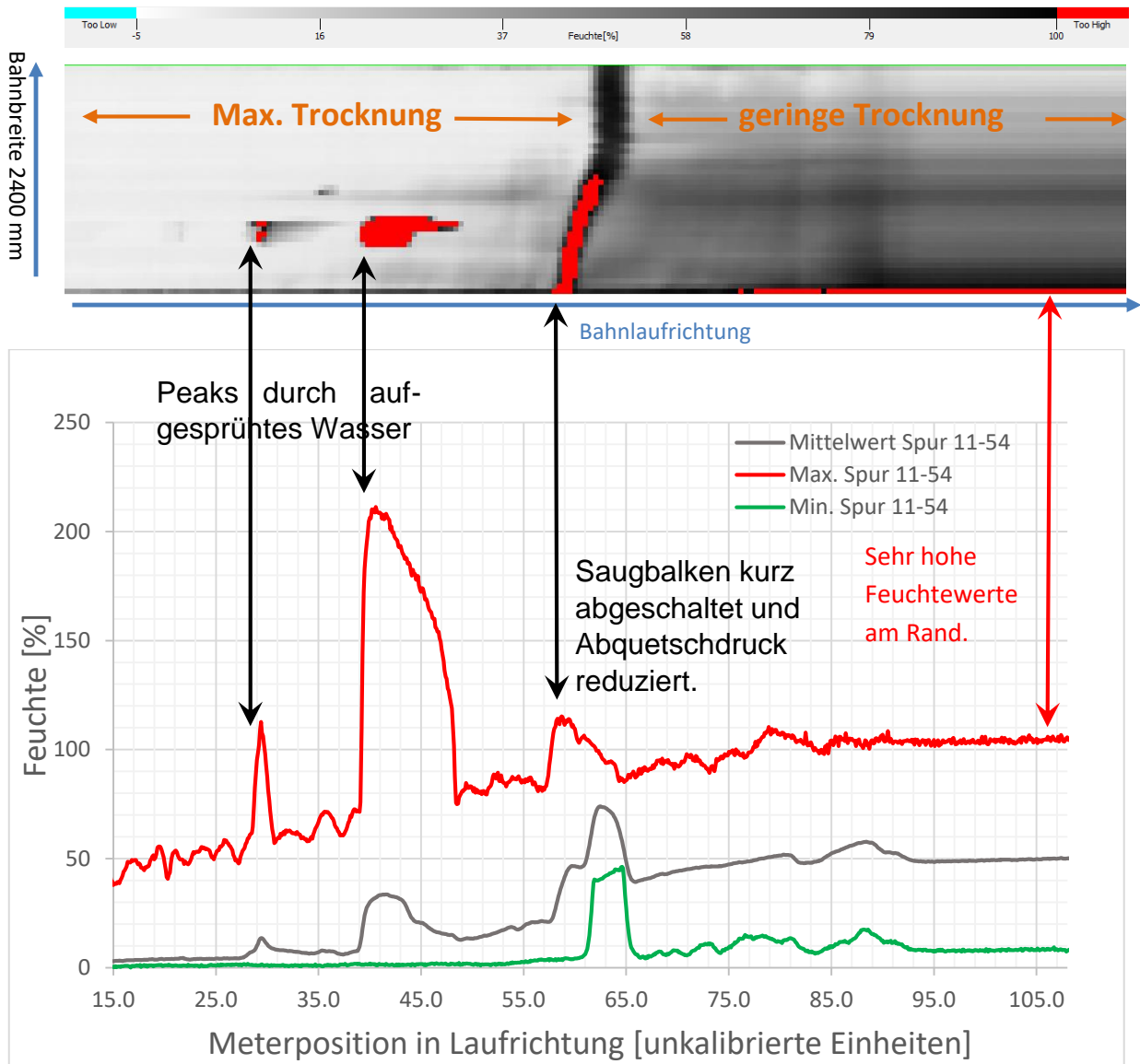


Abb. 6.9: Überwachung der Restfeuchte eines Polyestergewebes (oben: Darstellung in der Bedienersoftware, unten: quantitatives Längsprofil) nach dem Durchlauf durch den Trockenofen. Die Trocknung erfolgte unter verschiedenen Bedingungen. Zu Demonstrationszwecken wurde stellenweise Wasser auf die getrocknete Bahn gespritzt.

Der Übergang von feuchter zu trockener Ware ist als abnehmende Graufärbung des Abbildes der Bahn gut zu erkennen. Weiß entspricht dabei dem Zustand „ideal trocken“ und schwarz dem Zustand „100% der noch tolerierbaren Feuchte“. Auch die manuell aufgebrauchten Wasserspritzer zeichnen sich als rot dargestellte Grenzwertüberschreitung gut ab.

Der untere Teil der Abbildung zeigt eine nachträgliche genauere Auswertung der Messdaten. Dargestellt ist der über alle genutzten Spuren (hier 11 bis 54) gemittelte Feuchtwert sowie der entsprechende Maximal- bzw. Minimalwert. Auch hier zeichnen sich die manuell aufgebrauchten Wasserspritzer durch scharf lokalisierte Peaks gut ab. Vor allem lassen sich aber Aussagen über die Homogenität des Trocknungsprozesses ableiten. Nachdem der Saugbalken kurz abgeschaltet wurde (ungefähr in der Mitte der Aufzeichnung) und auch der Abquetschdruck an den Foulardwalzen deutlich reduziert wurde, steigt die mittlere Feuchte erwartungsgemäß deutlich an. Darüber hinaus zeichnet sich jedoch eine

asymmetrische Verteilung der Feuchte über die gesamte Breite der Bahn ab. Zur Randspur 54 (ganz unten im oberen Bild) hin steigt der Feuchtwert sogar bis über das gesetzte Limit von 100 % an. Dies deutet darauf hin, dass die pneumatische Führung der Foulardwalzen nicht exakt justiert ist. Bei höheren Drücken scheint dies nicht relevant zu sein, da die Gummierung der Walzen nachgibt. Bei den niedrigen Abquetschdrücken des vorliegenden Experimentes jedoch zeigt die Onlinemessung schon dann eine leichte Dejustage an, wenn der normale Prozess noch gar nicht beeinträchtigt wäre. Das vorliegende In-line-Messverfahren für die Feuchte ergänzt und verbessert somit die bislang nur zweimal jährlich erfolgende manuelle Überprüfung der Gleichmäßigkeit des Andruckes der Walzen und ermöglicht somit eine zeitnahe Nachjustage. Je gleichmäßiger aber die Trocknung über die ganze Bahnbreite erfolgt, desto weniger Energie muss bei der thermischen Trocknung insgesamt aufgewendet werden.

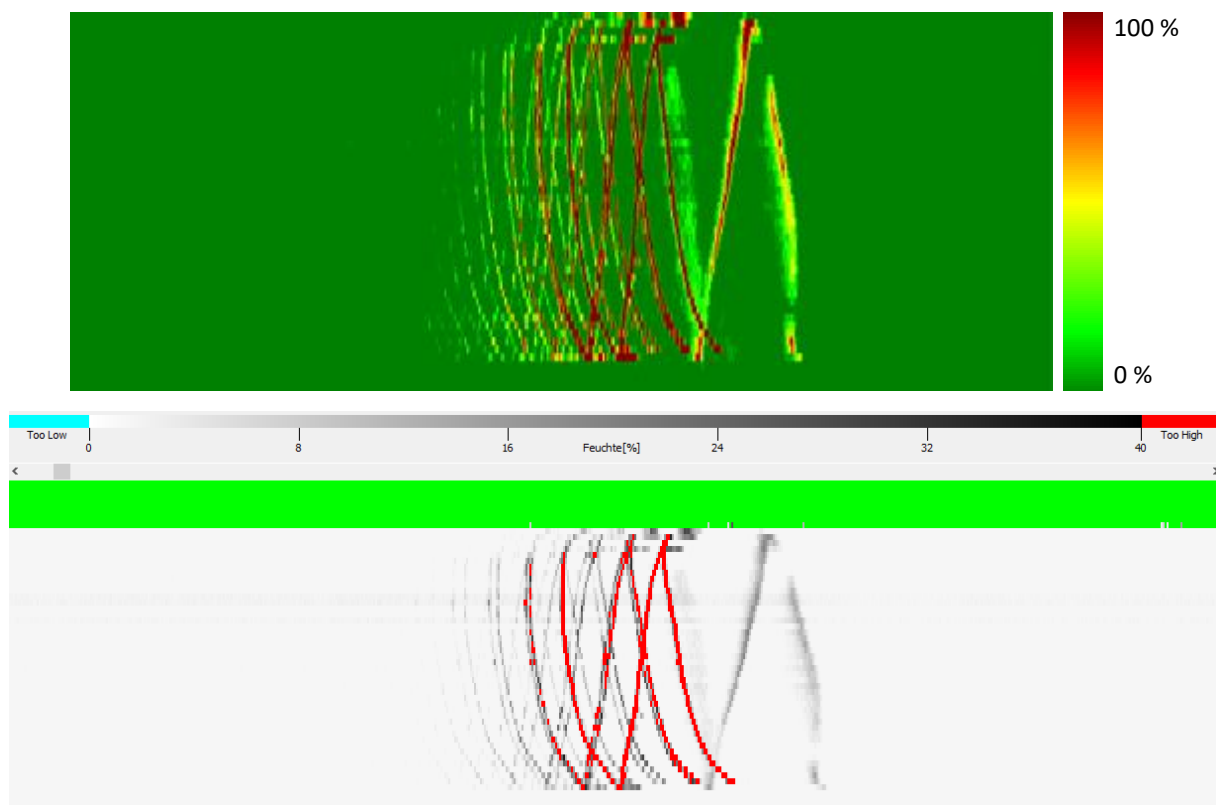


Abb. 6.10: Überwachung der Restfeuchte eines 100 g/m² Polyestergewebes nach dem Durchlauf durch den Trockenofen (Bahnlaufrichtung v.l.n.r.). Zu Demonstrationszwecken wurde Wasser auf die getrocknete Bahn gesprüht. Oben: Quantitative Darstellung in der Auswertesoftware. Unten: Darstellung am Bedienpanel an der Textilanlage. Grün: keine Daten auf diesen Spuren, da die Textilbahn schmaler war als die Messbrücke. Rot: Überschreitung des willkürlich gesetzten Grenzwertes von 40 % durch aufgespritztes Wasser. Weitere Erläuterungen im Text.

Abb. 6.10. zeigt eine weitere Messreihe, die an der Textilveredelungsanlage aufgezeichnet wurde. Dabei wurde ein 100 g/m² dickes Polyestergewebe nach dem Waschen regulär, d.h. unter den üblichen Bedingungen, getrocknet. In der Darstellung ist zu erkennen, dass die Trocknung gleichmäßig niedrige Werte im unteren Feuchtebereich, d.h. zwischen 0 und 3 %, liefert. Nach dem Durchlauf durch den Trockenofen wurde Wasser in einem dünnen Strahl in Form eines umgekehrten „V“ aufgespritzt (rechte rote Struktur im unteren Bild). Diesem läuft scheinbar ein Schatten mit ebenfalls erhöhter, aber geringerer Feuchte voraus. Der Effekt ist dadurch zu erklären, dass das Wasser an einer Stelle aufge-

sprüht wurde, an welcher die Bahn nach unten und in geringem Abstand dazu wieder nach oben geführt wurde (siehe Abb. 2.5). Das auf die nach unten führende Bahn aufgesprühte Wasser hat offenbar einen Sprühnebel erzeugt, der die unmittelbar dahinter nach oben führende Bahn getroffen hat. Die Messung zeigt deutlich, dass auch derart kleine Feuchteunterschiede in Echtzeit erfasst und online dargestellt werden können. Die ebenfalls mehrfach auftretende V-förmigen „Echos“ *hinter* der besprühten Stelle wurden durch Abklatsch des aufgetragenen Wassers auf den Führungsrollen erzeugt und schwächen sich nach mehrfachem Kontakt mit der Textilbahn allmählich ab.

Eine analoge Messreihe wurde mit einem 200 g/m² dicken Polyestergewebe durchgeführt, das zu Beginn des Prozesses mit einem optischen Aufheller versehen worden war (Abb. 6.11) und damit einem typischen veredelten Produkt der Fa. Thorey entspricht. Auch hier führte intensives Besprühen mit Wasser zum Durchdringen der Textilbahn und der Befeuchtung der dahinter verlaufenden Bahn und somit zu einem „vorausgehenden Signal“ an der NIR-Messbrücke. Die nachlaufenden Echos durch Abklatsch von der Walze sind nur in der oberen Darstellung deutlich erkennbar (während die Bedienersoftware die schwachen Feuchteänderungen als noch tolerierbar klassifiziert hat) und verdeutlichen damit die außerordentlich hohe Empfindlichkeit der Methode.

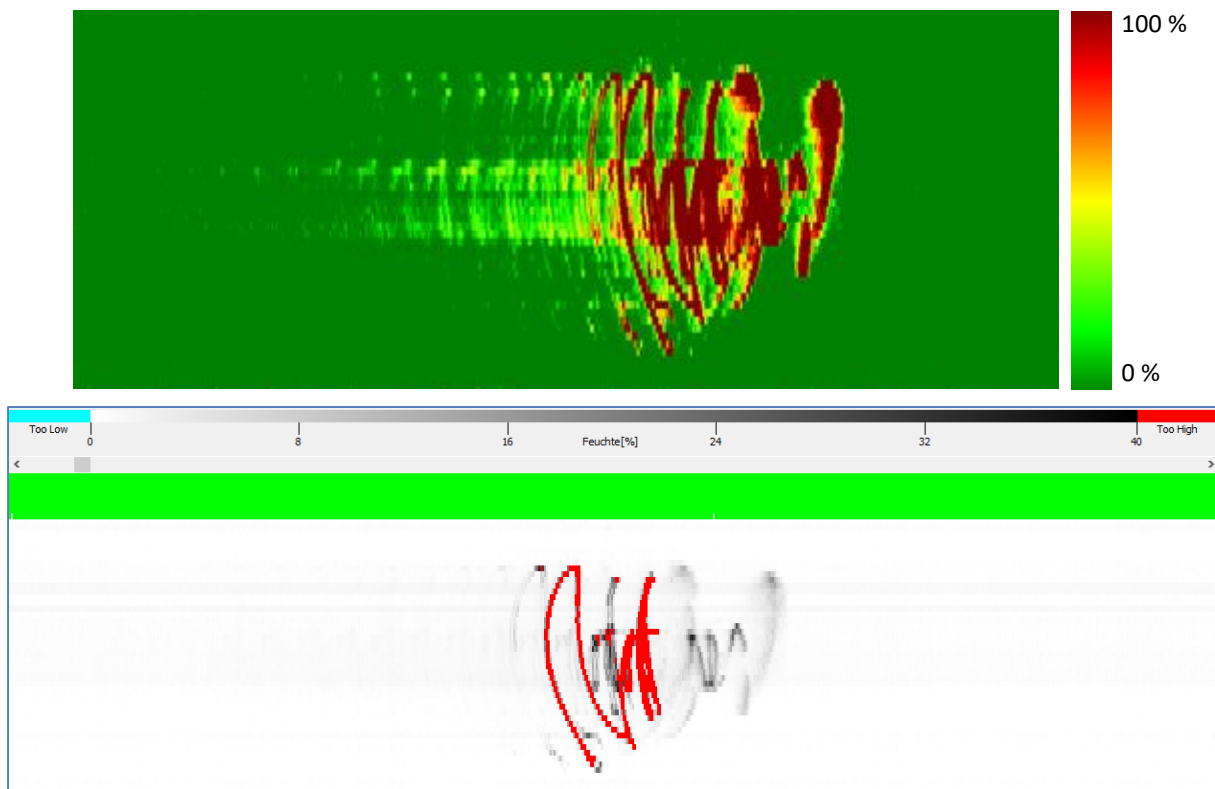


Abb. 6.11: Überwachung der Restfeuchte eines mit einem optischen Aufheller veredelten Polyestergewebes nach dem Durchlauf durch den Trockenofen (Bahnaufrichtung v.l.n.r.). Zu Demonstrationszwecken wurde Wasser auf die getrocknete Bahn gesprüht. Darstellung in Analogie zu Abb. 6.10.

Mit den in den Abschnitten 6.2 und 6.3 dargestellten Ergebnissen wurde auch der zweite Teil dieses gemeinsamen Arbeitspakets erfolgreich abgeschlossen und damit auch die zweite Hauptzielstellung des Projektes – die Überwachung des aktuellen Feuchtegehaltes der Textilbahn an zwei wesentlichen Punkten des Textilveredelungsprozesses – erreicht. Damit wurden alle erforderlichen Voraussetzun-

gen für die Bereitstellung quantitativer Feuchtedaten, die eine bessere Steuerung des Prozesses ermöglichen sollen, geschaffen. In einem weiteren Schritt soll die Einbindung der anfallenden Messdaten in die Prozessleittechnik der Fa. Thorey erfolgen, die nicht Gegenstand des Projektes war. Dies wird einen energieeffizienteren Betrieb des Saugbalkens wie auch des Trockenofens ermöglichen und damit zu entsprechenden Einsparungen an Energie, aber auch an CO₂-Emissionen führen. Konkrete Aussagen über den Umfang der tatsächlichen Energieeinsparungen im Trocknungsprozess erfordern einen Testbetrieb der Textilveredelungsanlage über einen längeren Zeitraum und lassen sich daher zum Zeitpunkt des Projektabschlusses noch nicht ableiten.

Literaturverzeichnis

- [Bur08] BURNS, B.A. and CIURCZAK, E.W. (Editors): *Handbook of Near-Infrared Analysis*. CRC Press, Boca Raton, 3rd edition, 2008.
- [Dai18] DAIKOS, O., HEYMANN, K., SCHERZER, T.: *Monitoring of Thickness and Conversion of Thick White Pigmented Coatings by NIR Hyperspectral Imaging*. *Progr. Org. Coat.* **125**, 8-14 (2018).
- [Mar89] MARTENS, H. and NÆS, T.: *Multivariate Calibration*. John Wiley and Sons, Chichester, 1989.
- [Mir14] MIRSCHEL, G., DAIKOS, O., HEYMANN, K., SCHERZER, T., GENEST, B., SOMMERER, C., STECKERT, C.: *In-line Monitoring of the Conversion in UV-Cured Printed Layers by NIR Spectroscopy in an Offset Printing Press*. *Progr. Org. Coat.* **77**, 719-724 (2014).
- [Mir16] MIRSCHEL, G., DAIKOS, O., SCHERZER, T., STECKERT, C.: *Near-Infrared Chemical Imaging Used for In-line Analysis of Inside Adhesive Layers in Textile Laminates*. *Anal. Chim. Acta* **932**, 69-79 (2016).
- [Sie02] SIESLER, H.W. and OZAKI, Y. and KAWATA, S. and HEISE, H.M. (Editors): *Near-Infrared Spectroscopy*. Wiley-VCH Verlag, Weinheim, 2002.
- [Wor08] WORKMAN J. and WEYER, J.: *Practical Guide to Interpretive Near Infrared Spectroscopy*. CRC Press, Boca Raton, 2008.