



INFOR-Projekt Nr. 13

**Differenzierte on-line-Bestimmung des
Strichgewichtes pro Seite bei beidseitigem
Auftrag mit der Filmpresse**

SCHLUSSBERICHT

Juni 2001

Institut für Automatisierungstechnik
Universität Bremen

Papiertechnische Stiftung
München

Projektleiter:
Prof. Dr.-Ing. A. Gräser

Projektleiter:
Dr.-Ing. R. Sangl

Abschlussbericht zum INFOR-Forschungsprojekt:

Differenzierte on-line-Bestimmung des Strichgewichtes pro Seite bei beidseitigem Auftrag mit der Filmpresse

Forschungsstellen:	Institut für Automatisierungstechnik Universität Bremen Kufsteiner Straße, NW1 28359 Bremen	Papiertechnische Stiftung (PTS) Heßstraße 134 80797 München
Projektleiter:	Professor Dr.-Ing. A. Gräser	Dr.-Ing. R. Sangl
Wissenschaftlicher Mitarbeiter:	Dipl.-Ing. N. Nessar Dipl.-Ing. U. Krebs	Dipl.-Ing. M. Kröber

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
1.1	Problemstellung	3
1.2	Stand der Messtechnik	3
1.3	Projektziel	4
2	Strichdickenmessung mit Laser	5
2.1	Einflussgrößen bei der Lasertriangulation	7
2.1.1	Strahlverlauf des Laserstrahls	7
2.1.2	Eigenschaften der Objektoberfläche	9
2.1.3	Detektor und Signalauswertung	10
2.2	Messkonfiguration und Anwendung	11
2.3	Messalgorithmus und Messergebnisse	13
2.4	Optimierung der Datenauswertung – Messalgorithmus für stark gestörte Signale	17
2.4.1	Vorfilterung	17
2.4.2	Bestimmung der Periodizität	18
2.4.3	Ausrichtung des Strichprofils zum Nullprofil	19
3	Durchführung der Versuche	21
3.1	Helicoater 2000	21
3.1.1	Ergebnisse der Untersuchungen mit dem Helicoater 2000	22
3.2	2-Walzen Labormaschine	23
3.2.1	Ergebnisse der Untersuchungen mit der 2-Walzen Labormaschine	24
3.3	Filmpressenwalze	33
3.3.1	Ergebnisse der Untersuchungen an der Filmpressenwalze	33

4	Diskussion	36
----------	-------------------	-----------

5	Zusammenfassung	38
----------	------------------------	-----------

	Literaturverzeichnis	40
--	-----------------------------	-----------

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Das Beschichten von Papier und Karton dient im wesentlichen der Steuerung und Verbesserung wichtiger Oberflächeneigenschaften. Hierzu gehören v.a. die Bedruckbarkeit, Glätte, Glanz usw., aber auch z.B. der Widerstand gegen Flüssigkeitspenetration. Je nach Anwendungsfall gibt es unterschiedliche Möglichkeiten zur Applikation der Beschichtungsmasse auf das Substrat.

Der Filmpressenauftrag hat sich in den letzten Jahren mit weltweit über 300 installierten Anlagen zu einer weitverbreiteten Alternative zum konventionellen Schaberstreichverfahren für Papier und Karton entwickelt [i]. Auch der Anteil von ca. 26% in 1997 bei den Neuinstallationen von Streichaggregaten in Europa und den USA unterstreicht die Bedeutung der Filmpresse bei der Beschichtung von Papier und Karton [ii].

Im Gegensatz zum konventionellen Schaberstreichen, bei dem die Streichfarbe im Überschuss auf das Papier aufgetragen und nach einer von der Geometrie und der Maschinengeschwindigkeit abhängigen Kontaktzeit mit einem feststehenden Schaber dosiert und egalisiert wird, wird die Streichfarbe beim Filmpressenauftrag auf den gummierten Filmpressenwalzen vordosiert. Dieser Farbfilm wird im Walzennip auf das Papier übertragen, wobei es zu einer deutlich geringeren Beanspruchung des Rohpapiers als beim Schaberstreichen kommt. Vergleicht man die durch beide Auftragsverfahren erzielten Papieroberflächen, so erreicht man über das Schaberstreichen eine Einebnung der vom Rohpapier stammenden Oberflächenstruktur. Die Filmpresse hingegen überzieht das Basispapier mit einer gleichmäßigen Strichschicht, weshalb auch der Ausdruck Konturstrich benutzt wird.

Die Vorteile der Filmpresse als Auftragsaggregat für Streichfarben liegen u.a. in:

- dem relativ unproblematischen Einsatz als Online-Aggregat. Durch die nur geringe Beanspruchung des Basispapiers bei der Farbapplikation kommt es beim Streichen mit der Filmpresse zu weniger Abrissen.
- dem erzeugten Konturstrich, der eine gute Abdeckung des Rohpapiers bewirkt.
- der Möglichkeit des gleichzeitigen Streichens beider Seiten mit gleichen oder unterschiedlichen Strichzusammensetzungen bzw. -mengen.

1.2 Stand der Messtechnik

Bei der Beschichtungsmessung kommen normalerweise radiometrische Beta oder Gamma-Differenzmeßsysteme zum Einsatz. Diese Systeme scheiden an der Filmpresse aus, da eine selektive Erfassung der einzelnen Beschichtungsgewichte nicht möglich ist. Außerdem sind für die Messung beider Gewichte bei Differenzverfahren 4 radiometrische Meßsysteme und 4 Feuchtemeßsysteme notwendig, was zu einem sehr hohen Systempreis führt. Weiter hinzu kommt der sehr hohe Kalibrierungsaufwand. Dies gilt insbesonde-

re bei Strichmaterialien mit hohen organischen Anteilen und geringen Beschichtungsgewichten.

Bei speziellen Strichsubstanzen, wenn Materialien mit sehr scharfen Absorptionsspektren vorliegen, kann das Beschichtungsgewicht auch über IR-Systeme erfasst werden. Je nach Anordnung und Strichverhalten genügen dann 2 IR-Systeme. Für wasserhaltige und organische Strichmaterialien sind diese Systeme jedoch nicht einsetzbar.

1.3 Projektziel

Um die Vorteile des Filmstreichens bei beidseitig gestrichenen Papieren - im Hinblick auf eine Qualitätssteigerung und einem bewussten Umgang mit Kosten und Rohstoffen – effektiver nutzen zu können, bedarf es verbesserter und effektiverer Meßmethoden des Strichgewichtes.

Ziel dieses Projekts ist es, ein ausgewähltes Messprinzip auf seine Eignung zur Dickenbestimmung eines nassen Farbfilms auf einer rotierenden Walze zu prüfen.

2 Strichdickenmessung mit Laser

Abbildung 1 zeigt das Prinzip der Lasertriangulation. Ein Laserstrahl wird auf eine Schicht gerichtet. Am Auftreffort wird das Licht gestreut. Dieses Streulicht wird für die Beobachtung des Auftreffortes ausgenutzt. Bei einer ideal spiegelnden Objektoberfläche tritt kein diffuses Streulicht auf, sondern nur eine gerichtete Reflexion. Solche Objekte eignen sich nicht für eine Vermessung mit Hilfe der Lasertriangulation [iii]. Im allgemeinen Fall hängt das Streuverhalten von den Materialeigenschaften des Werkstücks, seiner Oberflächenstruktur und der Wellenlänge des Lasers ab [iv]. Das Streuverhalten wird durch eine Streukeule repräsentiert, wie sie im **Abbildung 1** schematisch dargestellt ist.

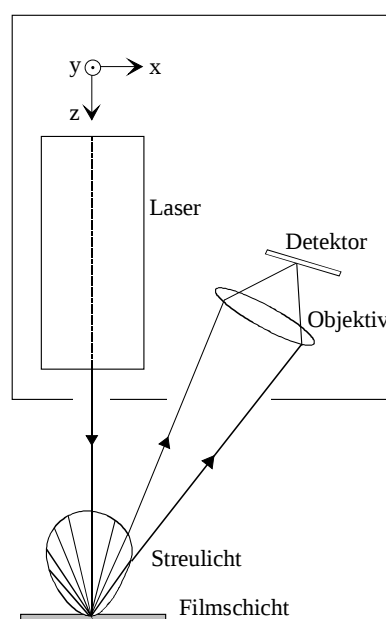


Abbildung 1: Prinzip der Lasertriangulation

Der Leuchtfleck am Auftreffort des Laserstrahls wird unter einem vorgegebenen Winkel zur Einfallrichtung mit einem Objektiv auf einen Detektor abgebildet. Dieser Winkel muss im Hinblick auf die Streukeule so gewählt werden, dass eine für die Detektion ausreichende Intensität vom Objektiv erfasst wird. Der positionsempfindliche Detektor liefert ein von der Lage des abgebildeten Leuchtflecks abhängiges Signal. Als Detektoren werden Lateraleffektdioden, oder wie bei dem eingesetzten Detektor in dieser Arbeit, CCD-Zeilen verwendet.

Die Lage des abgebildeten Leuchtflecks auf dem Detektor hängt von der Position der Schicht in z-Richtung ab. Aus der gemessenen Lage des Bildflecks sowie der bekannten Abbildungsgeometrie und Einstrahlrichtung wird der Abstand (oder Dicke) der Schicht in z-Richtung von einer Referenzebene bestimmt.

Als Laser wird bei dem verwendeten Triangulationssensor Halbleiterlaser eingesetzt. Die Strahlleistung der Halbleiterlaser lässt sich elektrisch steuern. Damit ist es möglich, starke

Schwankungen der an der Schicht gestreuten Strahlung, die durch unterschiedliche Oberflächeneigenschaften hervorgerufen werden, auszugleichen.

Um das störende Umgebungslicht unterdrücken zu können, wird in der Regel vor dem Detektor ein Bandfilter angebracht. Durch dieses Filter wird das Umgebungslicht unterdrückt, während das gestreute Laserlicht hindurchgelassen wird. Objektiv und Detektor müssen relativ zur Einstrahlrichtung so angeordnet werden, dass für verschiedene Abstände des Messobjektes der Leuchtfleck jeweils möglichst scharf auf dem Detektor abgebildet wird. Dazu wird der Detektor relativ zur optischen Achse des Objektivs (v -Achse) geneigt (vgl. **Abbildung 2**). Trifft der Laserstrahl im Punkt P_1 auf die Schicht, so wird der entstehende Leuchtfleck auf den Punkt P'_1 in der Detektorebene abgebildet. Entsprechendes gilt für P_2 und P'_2 . Da P_2 weiter vom Objektiv entfernt ist als P_1 , liegt der Bildpunkt P'_2 in einem kleineren Abstand zum Objektiv als P'_1 . Der Detektor muss offenbar gegen die v -Achse geneigt werden, um für P_2 ebenfalls eine scharfe Abbildung zu erreichen [v].

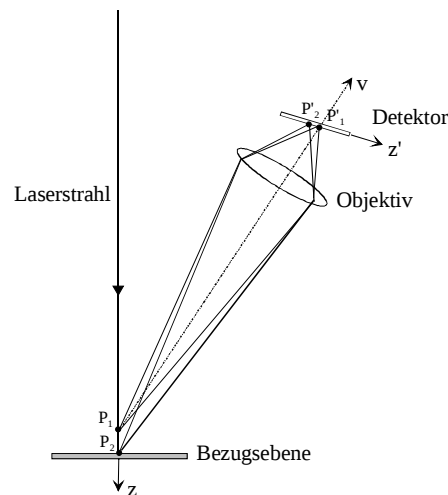


Abbildung 2: Abbildungsgeometrie für die Lasertriangulation

Zwischen den Koordinaten z und z' besteht im allgemeinen kein linearer Zusammenhang. Als Folge des im allgemeinen nichtlinearen Zusammenhanges führt eine Verschiebung des Auftreffortes des Laserstrahls um dz zu einer Verschiebung des dazugehörigen Bildpunktes um dz' , die von der Position des Auftreffortes z abhängt [v]. Der Betrag der Ableitung dz/dz' wird als Empfindlichkeit des Sensors bezeichnet und ist in **Abbildung 3** auf der rechten Ordinate aufgetragen. Diese Empfindlichkeit lässt sich auch als differentieller Abbildungsmaßstab deuten: eine Strecke dz , an der Stelle z wird in eine Strecke dz' abgebildet. Die Empfindlichkeit eines Triangulationssensors ist innerhalb seines Messbereichs nicht konstant [v]. Sie ist umso geringer, je weiter das Messobjekt vom Laser entfernt ist.

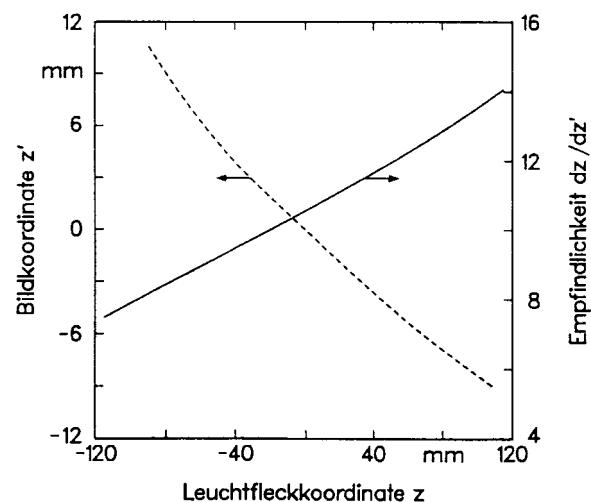


Abbildung 3: Abhängigkeit von z' und dz/dz' von der Leuchtfleckposition z bei der Lasertriangulation

2.1 Einflussgrößen bei der Lasertriangulation

Im Hinblick der Anwendung von Lasertriangulationssensoren auf die Schichtdickenmessung sind die Leistungsmerkmale der Lasertriangulation, wie z.B. die Messgenauigkeit und das Auflösungsvermögen zu beachten. Dazu werden folgende Einflussgrößen betrachtet:

- Strahlverlauf des Laserstrahls,
- Eigenschaften der Objektoberfläche und
- Detektor und Signalauswertung

2.1.1 Strahlverlauf des Laserstrahls

Strahlverlauf und Strahlprofil werden im wesentlichen durch den verwendeten Laser und die Strahlformungsoptik bestimmt. Um ein hohes Auflösungsvermögen der Triangulation zu erreichen, muss der Durchmesser des Laserstrahls innerhalb des Messbereichs möglichst klein gehalten werden. Dazu wird der Laserstrahl mit einer Linse fokussiert und der Strahl im allgemeinen so geformt, dass gilt [v]:

$$M_z = 2z_R \quad (2.1)$$

M_z Messbereich des Triangulationssensors in z -Richtung.

z_R Rayleigh-Länge, bezeichnet den Abstand in Strahlrichtung vom Fokusort, in dem der Strahldurchmesser um $\sqrt{2}$ größer ist als der Fokusbereich.

Für die Rayleigh-Länge gilt:

$$z_R \rightarrow \frac{w_0^2}{\lambda} \quad (2.2)$$

λ Wellenlänge des Lasers

w_0 Radius des Laserstrahls

Bei gegebener Rayleigh-Länge ist der Durchmesser des Strahls um so kleiner, je kürzer die Wellenlänge ist.

Für das Auflösungsvermögen bei der Triangulation betrachten wir den dargestellten Fall:

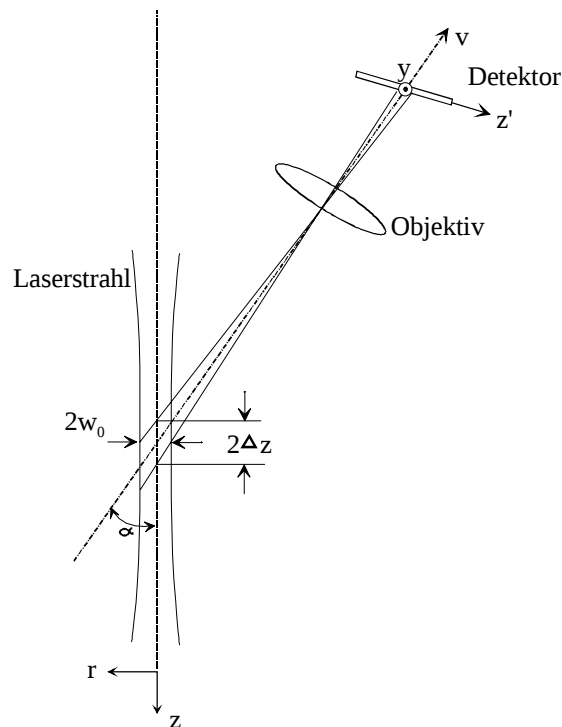


Abbildung 4: Bestimmung der Auflösung in z-Richtung

Der Fokusedurchmesser des Laserstrahls befindet sich am Ort $z=0$ auf der v -Achse. Die Oberfläche des Messobjekts stehe senkrecht zur z -Achse am Ort $z=0$. Durch die Beobachtung des Leuchtflecks unter einem Winkel $\alpha \neq 90^\circ$ führt der endliche Durchmesser des Leuchtflecks ($2w_0$) zu einer Unsicherheit bei der Bestimmung der Lage des Leuchtflecks auf der z -Achse von maximal $\pm\Delta z$ [iii]. Es gilt:

$$\Delta z = \frac{w_0}{\tan \alpha} \quad (2.3)$$

α Winkel des einfallenden Laserstrahls gegen die v -Achse.

Bei anderen Positionen des Messobjekts im Messbereich resultiert aufgrund der verschiedenen Strahldurchmesser und Beobachtungsrichtungen jeweils ein anderes Δz . Die Größe des abgebildeten Leuchtflecks bei dem Triangulationssensor variiert zwischen der Messobjektposition $z = \pm M_z/2$.

Die Zahl der unterscheidbaren Messpositionen innerhalb des Messbereichs $M_z = 2z_R$ in z -Richtung lässt sich dann wie folgt abschätzen:

$$N = \frac{2z_R}{\Delta z} \quad (2.4)$$

Für den eingesetzten Triangulationssensor mit einem Messbereich $M_z = 2\text{mm}$ und Δz 0,02% des Messbereichs ist eine Auflösung $N = 5000$ möglich.

2.1.2 Eigenschaften der Objektoberfläche

Die Eigenschaften der zu vermessenden Schichtoberfläche beeinflussen - zusammen mit dem Strahlprofil des Lasers - die Messgenauigkeit der Lasertriangulation. Dies wird anhand von **Abbildung 5** veranschaulicht. Der Laserstrahl trifft senkrecht auf die Filmschichtoberfläche, die ein gleichmäßiges Streuverhalten aufweisen soll. Das Strahlprofil $I = I(r)$ gibt die Intensitätsverteilung am Auftreffort wieder (zur Koordinate r siehe **Abbildung 4**). In **Abbildung 5(1)** ist die Intensitätsverteilung $I' = I'(z')$ des abgebildeten Leuchtflecks in der Detektorebene schematisch dargestellt. Aufgrund des Abbildungsmaßstabes und der Beobachtungsrichtung ist die Halbwertsbreite dieser Intensitätsverteilung geringer als die von $I(r)$.

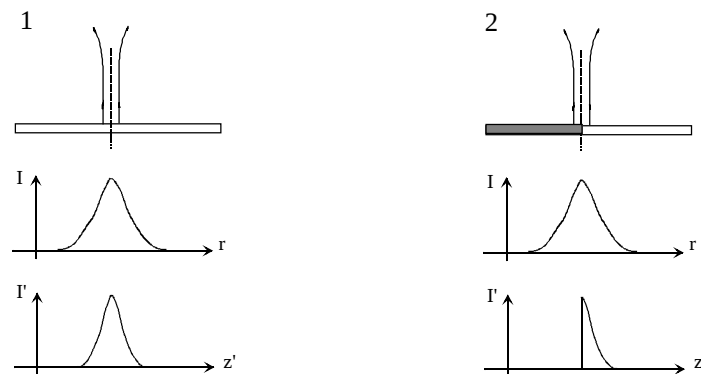


Abbildung 5: Einfluss der Objektoberfläche auf die Intensitätsverteilung im abgebildeten Leuchtfleck

Abbildung 5(2) zeigt den Fall einer Schichtoberfläche, deren Streueigenschaften nicht gleichförmig sind. Die eine Hälfte des Objekts absorbiert die einfallende Strahlung vollständig, während die andere die Strahlung streut. Die Intensitätsverteilung $I'(z')$ ist jetzt, im Gegensatz zu dem Fall (1), asymmetrisch. Bei der Bestimmung des Schwerpunktes dieser Verteilung wird nicht dasselbe Ergebnis erhalten wie im Fall (1). Die auftretende Abweichung skaliert mit der Halbwertsbreite w der eingestrahlten Intensitätsverteilung [iv].

Bei solch stark variierenden Streueigenschaften der Filmschicht ist deshalb mit einem Messfehler, im schlimmsten Fall in der Größenordnung der Strahlhalbwertsbreite, zu rechnen.

Im folgenden werden die Streueigenschaften der Schichtoberfläche näher betrachtet. Sie werden durch die Materialeigenschaften und die Oberflächenstruktur beeinflusst. **Abbildung 6** zeigt schematisch die möglichen verschiedenen Fälle.

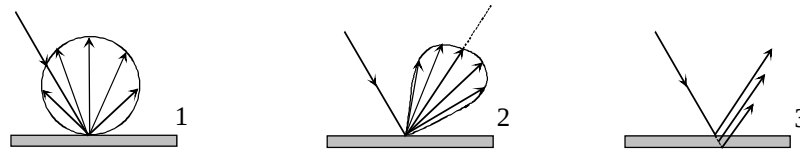


Abbildung 6: Streueigenschaften verschiedener Schichtoberflächen

In **Abbildung 6(1)** ist der Idealfall einer gleichförmig in alle Raumrichtungen streuenden Oberfläche wiedergegeben. Solche Schichten lassen sich auch bei beliebiger Raumlage mit Hilfe der Lasertriangulation vermessen [iv]. Der für die Messung hier relevante Fall ist der einer Streukeule, deren Maximum auf einer gedachten Reflexionsrichtung ausgerichtet ist, wie in **Abbildung 6(2)** gezeigt. Die Winkelhalbertsbreite dieser Streukeule hängt von der Oberflächenstruktur der Filmschicht ab. In der Regel führt eine größere Rauigkeit zu einer breiteren Streukeule [iv]. Weist die Oberflächenstruktur der Filmschicht eine Vorzugsrichtung auf, so entsteht eine nicht-rotationssymmetrische Streukeule. In diesem Fall sind die Winkelhalbertsbreiten der Streukeule in zwei zueinander senkrechten Richtungen verschieden.

In **Abbildung 6(3)** dringt der Laserstrahl teilweise in die Schicht ein. Der Laserstrahl wird im Bereich der Eindringtiefe gestreut. Der beobachtete Leuchtfleck wird dadurch vergrößert und die Messgenauigkeit nimmt ab.

2.1.3 Detektor und Signalauswertung

Für die angewandte Lasertriangulation wird eine CCD-Zeile als Detektor eingesetzt. Aufgabe des Detektors ist es, ein Signal zu liefern, aus dem die Position (Dicke) des abgebildeten Leuchtflecks ermittelt wird. Dazu wird der Schwerpunkt der Intensitätsverteilung in der Detektorebene aus den Pixelwerten berechnet.

Eine CCD-Zeile besteht aus einer Reihe nebeneinanderliegender lichtempfindlicher Elemente und einem damit verbundenen Ladungsschieberegister. Ladungen, die auf der CCD-Zeile während einer Integrationsphase entstehen, werden zu einem vorgegebenen Zeitpunkt über ein Transfergate parallel in das Schieberegister geführt. Von diesem Schieberegister werden die Ladungen seriell ausgelesen. Dieses Videosignal der CCD-Zeile wird verstärkt und digitalisiert. Die aus den Pixelwerten resultierende Intensitätsverteilung wird im nachgeschalteten Controller ausgewertet, um die Schwerpunktlage zu bestimmen.

2.2 Messkonfiguration und Anwendung

Die Lasertriangulation ist - wie schon erläutert - ein Messverfahren, mit dem die Dicke (Abstand) eines Punktes auf der Oberfläche einer Schicht von einer Referenzebene bestimmt wird. Als Referenzebene dient bei der Schichtdickenmessung an der Filmpresse die unbenetzte Filmpressenwalze (vgl. **Abbildung 7**).

Die Messung kann durch eine Verallgemeinerung des Messverfahrens, das sogenannte Lichtschnittverfahren, auf die Querprofilmessung erweitert werden. Bei diesem wird auf die Filmschicht eine Lichtlinie projiziert. Diese Linie wird aus einer anderen Richtung beobachtet. Aus dem gemessenen Verlauf der Linie wird das Dicken-Querprofil der Filmschicht ermittelt. Eine andere Möglichkeit zur Querprofilmessung kann die Kombination eines Triangulationssensors mit den bewegten Spiegeln bieten. Auf die Einzelheiten dieser Meßmethoden wird aber hier nicht eingegangen.

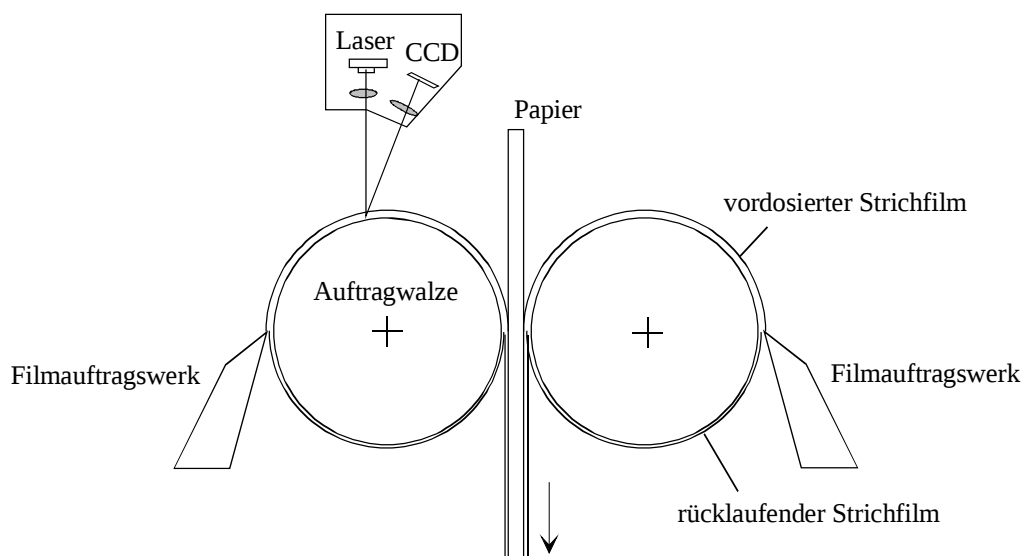


Abbildung 7: Prinzipielle Schichtdicken-Messung mit Triangulationssensoren

Bei dieser Messung werden Triangulationssensoren – für jede Walze ein Sensor - oberhalb der Auftragwalzen angebracht.

Um das Auftragsgewicht auf dem Papier bestimmen zu können, ist eine genaue Zuordnung der Strichfilm-Punkte zu einem Nullprofil (siehe Abschnitt 0) notwendig. Das aufgetragene Strichgewicht kann dann aus der Differenzbildung der beiden Messwerte berechnet werden.

Das Meßsystem zu dieser Aufgabe besteht aus folgenden Komponenten:

- Lasersensor,
- Controler,
- DSP-Karte, (Digital Signal Processor)
- Host-Rechner und

- dem Monitor zur Ausgabe der Messwerte.

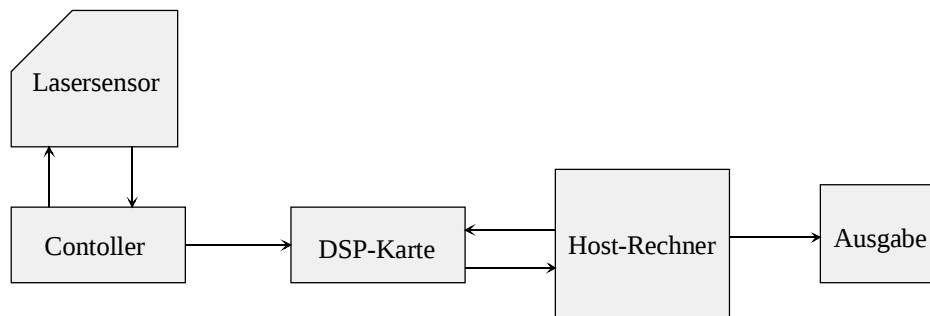


Abbildung 8: Messkonfiguration

Der Lasersensor arbeitet nach dem Triangulationsprinzip. Der projizierte Lichtpunkt durch die Laserdiode auf die Oberfläche der Strichmasse wird über eine Empfangsoptik auf die CCD-Zeile abgebildet. Die Messwerte werden digital im Controller verarbeitet und analog ausgegeben. Der Controller versorgt außerdem den Sensor mit der Spannung und bietet Möglichkeiten, wie die Messwertmittelung und das Auto-Zero, um das Sensorausgangssignal für die Referenzebene auf Null zu setzen.

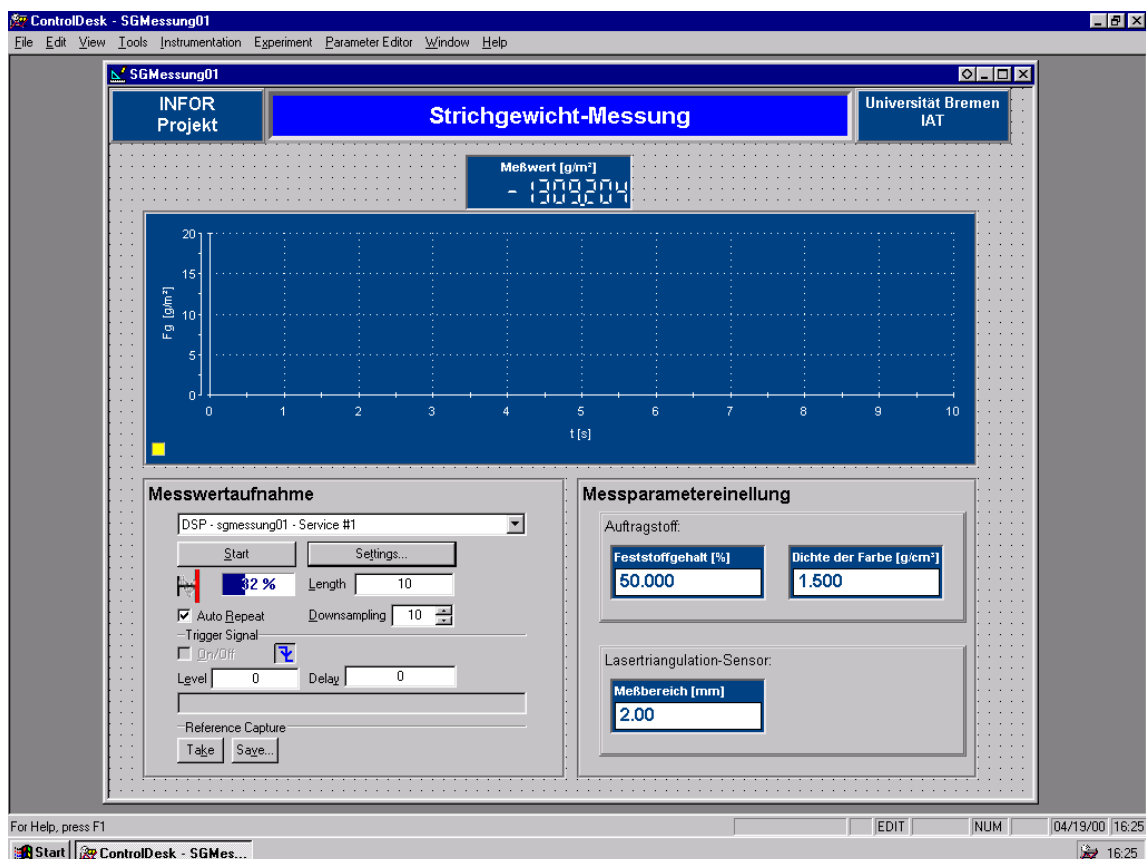


Abbildung 9: Messwertausgabe mit Benutzeroberfläche

Das analoge Ausgangssignal des Lasersensors wird auf der DSP-Karte mit 16Bit-Quantisierungsstufen digitalisiert und mit einem auf der DSP-Karte implementierten Programm online ausgewertet, d.h. die Schichtdicke ins Flächengewicht transformiert. Die ausgewerteten Messwerte werden vom Host-Rechner auf den Monitor ausgegeben. Durch die interaktive Benutzeroberfläche können die Einstellungen der Messparameter (z.B. Feststoffgehalt, Dichte der Farbe) für die Berechnung des Flächengewichtes auf der DSP-Karte durch die Eingaben im Host-Rechner (Benutzeroberfläche) online verändert werden.

2.3 Messalgorithmus und Messergebnisse

Die erste Messreihe wurde bei der PTS an einer Streichmaschine durchgeführt. Dabei wurde die aufgetragene Strichmasse auf der Walze durch den Lasertriangulationssensor gemessen.

Der Sensor ist stationär über der Walze angebracht. Zur Messung der Strichdicke wird zuvor ein Nullprofil, also die Unebenheiten des Walzensegmentes entlang des Walzenumfangs ohne Strichmasse, gemessen. Für die ‚reine‘ Strichdicke wird dann die Differenz zwischen dem Nullprofil und dem Strichdickenprofil gebildet.

Die Aufnahme des Nullprofils wird am Anfang des Streichvorganges durchgeführt und steht für die weitere online-Messung zur Verfügung. Die exakte Zuordnung von Nullprofil und Strichprofil ist durch die stationäre Positionierung des Sensors gesichert.

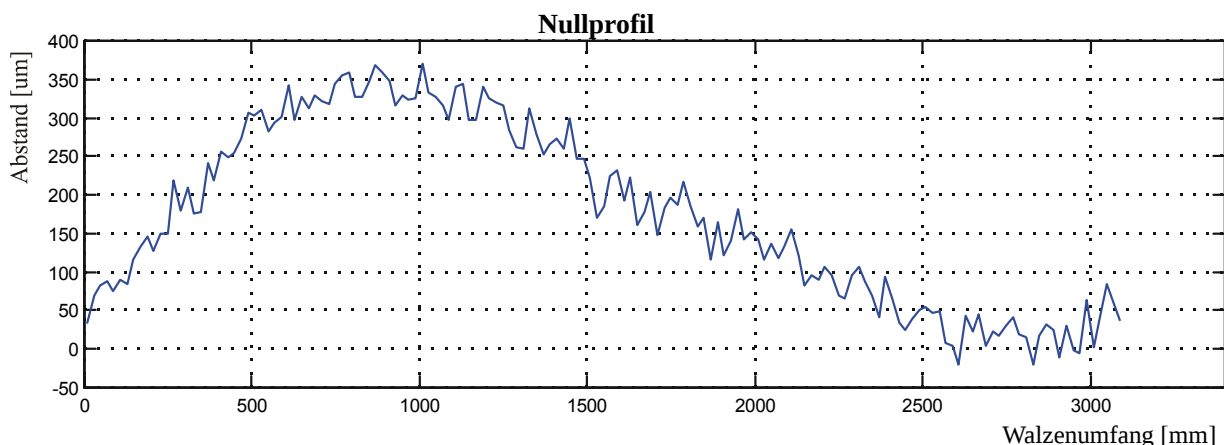


Abbildung 10: Nullprofil abhängig vom Walzenumfang

Im **Abbildung 10** ist die Abweichung der Walzenoberfläche von einem Referenzabstand dargestellt. Dieser Referenzabstand, der den Abstand zwischen einem beliebigen Punkt auf der Walze und dem Sensor wiedergibt, wird willkürlich festgelegt. Das Sensorausgangssignal wird bei diesem Abstand gleich Null gesetzt und wird als Nullpunkt festgelegt ($z = 0$, vgl. **Abbildung 4**). Die Abweichungen der Walzenoberfläche, bezogen auf den Nullpunkt, können positive oder negative Werte vorweisen. Mit dieser Messung ist nun die Unebenheit der Walzenoberfläche als Nullprofil für die Berechnung des Strichprofils für ein bestimmtes Walzensegment entlang des Umfanges festgelegt.

Die örtliche und die zeitliche Messauflösung von Nullprofil sowie Strichprofil hängen von:

- Sensor-Abtastfrequenz f_z und
- Oberflächengeschwindigkeit der Walze V_w ab.

Ändert sich einer dieser Faktoren, so muss ein neues Nullprofil unter den geänderten Messeinstellungen für die Berechnung des Strichprofils aufgenommen werden.

Die Einstellungen für die Aufnahme des Nullprofils im **Abbildung 10** betragen:

Sensor-Abtastfrequenz: $f_z = 5 \text{ kHz}$

Oberflächengeschwindigkeit: $V_w = 200 \text{ m/min}$

örtliche Auflösung: $0,667 \text{ mm}$

Radius der Walze: 500 mm

Walzenumfang: $3141,6 \text{ mm}$

Für die Berechnung des Strichgewichtsprofil werden die Messdaten blockweise ausgewertet. Die Datenblöcke, die in einem bestimmten festgelegten Zeitintervall anfallen, können aus Messdaten mehrerer Walzenumdrehungen (jedoch mind. eine Umdrehung) bestehen.

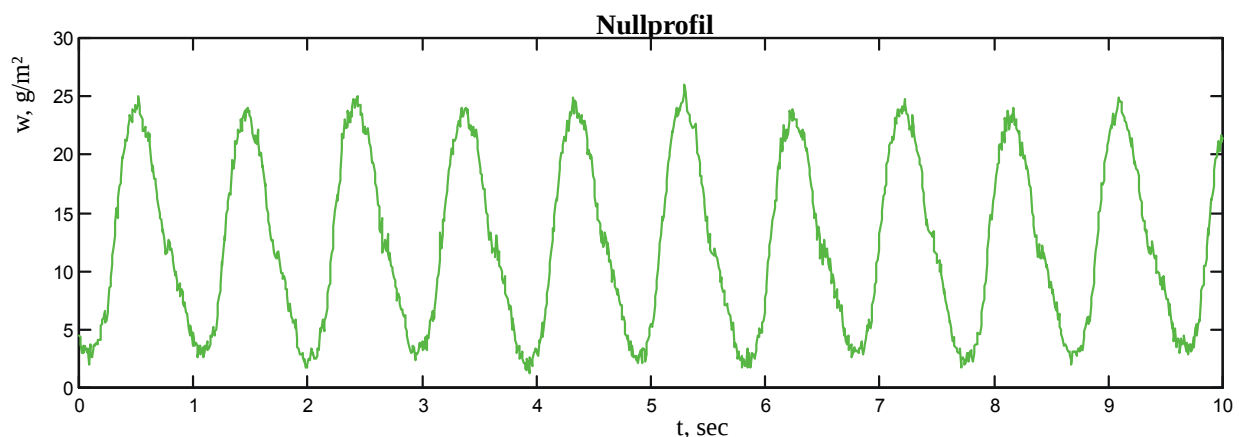


Abbildung 11: Nullprofil

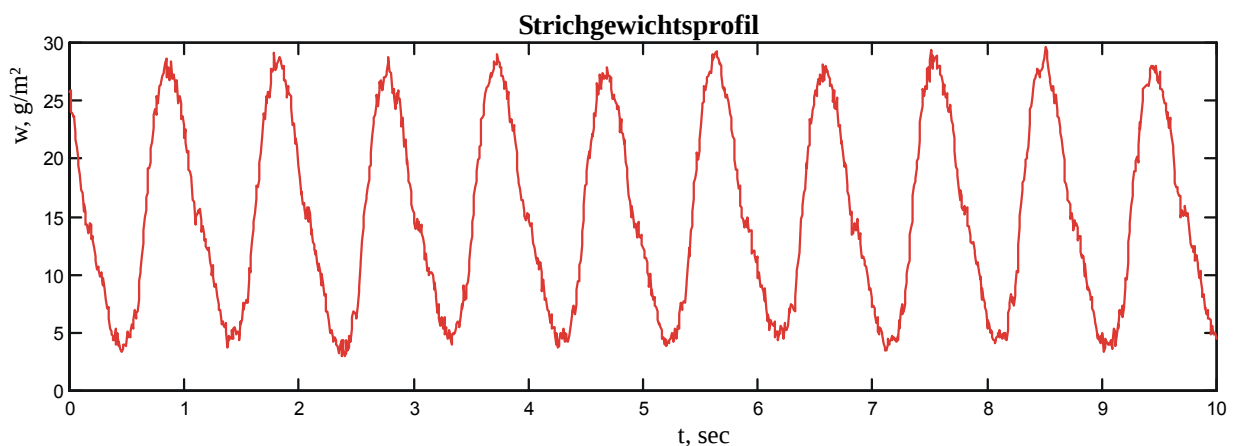


Abbildung 12: Strichgewichtsprofil

In **Abbildung 11** und **Abbildung 12** werden die Messdaten für ein Zeitintervall von 10 s dargestellt. Das Strichgewichtsprofil zu einem späteren Messintervall unter den gleichen Messeinstellungen ist im folgenden Bild dargestellt (vgl. **Abbildung 12**).

Um die örtliche Übereinstimmung der beiden Profile innerhalb der Messintervalle festzustellen, wird die Kreuzkorrelationsfunktion (KKF) zwischen dem Null- und dem Strichgewichtsprofil berechnet.

Dabei bestimmt der maximale KKF-Wert die Verschiebung τ (in Samples), bei der die örtliche Übereinstimmung der beiden Profile gekennzeichnet wird.

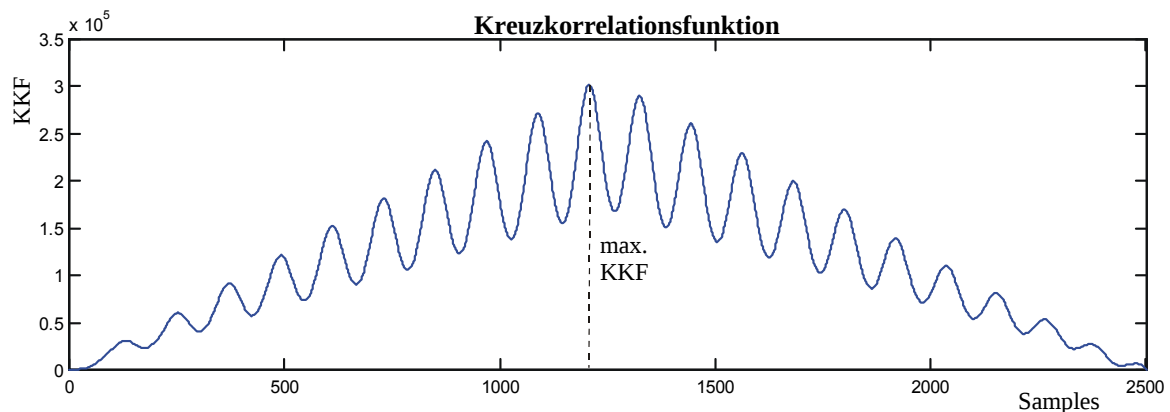


Abbildung 13: Kreuzkorrelationsfunktion zwischen Strichgewichts- und Nullprofil

Mit Hilfe der Verschiebung τ aus der KKF können nun die beiden Profile so versetzt werden, dass die beiden Profile örtlich übereinstimmen.

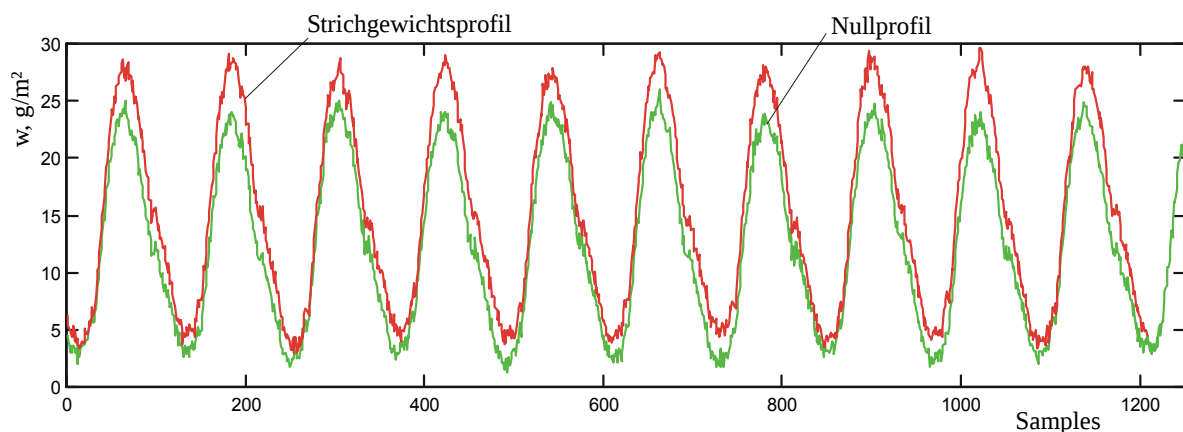


Abbildung 14: Örtliche Überlagerung der Profile

Durch die Differenzbildung aus den beiden örtlich überlagerten Profile wird das ‚Netto-Strichgewichtsprofil‘ berechnet.

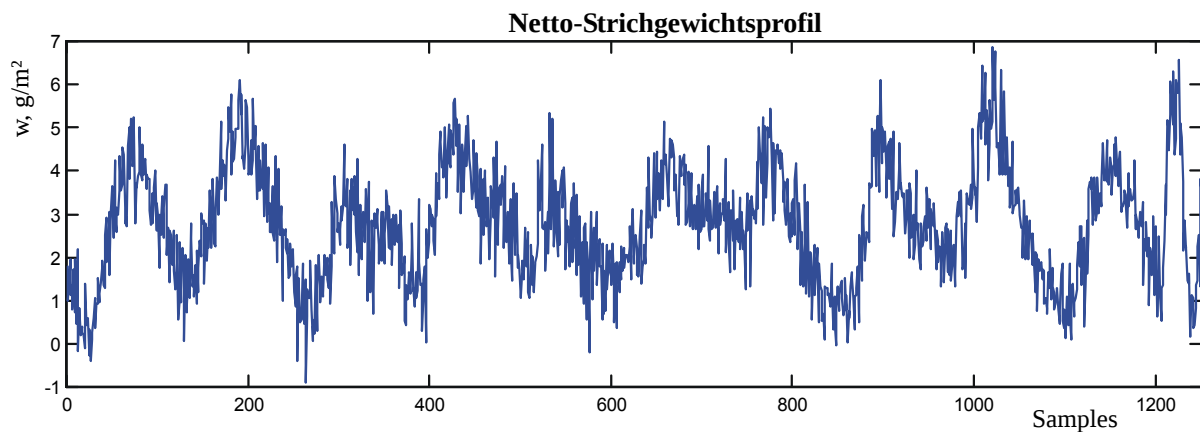


Abbildung 15: Flächengewichtsdifferenz der überlagerten Profile

Der Lasertriangulationssensor hat eine Linearität von ca. $\pm 0,12\%$ des Messbereiches, dies entspricht eine Meßungenauigkeit von $\pm 2,4\text{ }\mu\text{m}$. Diese Meßungenauigkeit in der Strichdicke führt je nach Strichmaterial (Feststoffgehalt und Dichte der Farbe) zu einer Ungenauigkeit von ca. $\pm 2,0\text{ g/m}^2$ in der Flächengewichtsberechnung und kann sich durch die Differenzbildung aus den beiden Profilen im ungünstigsten Fall verdoppeln. Damit lassen sich die stellenweise negative Flächengewichtswerte erklären.

Das erläuterte Messverfahren wird zusammenfassend im folgenden Flussdiagramm wiedergeben.

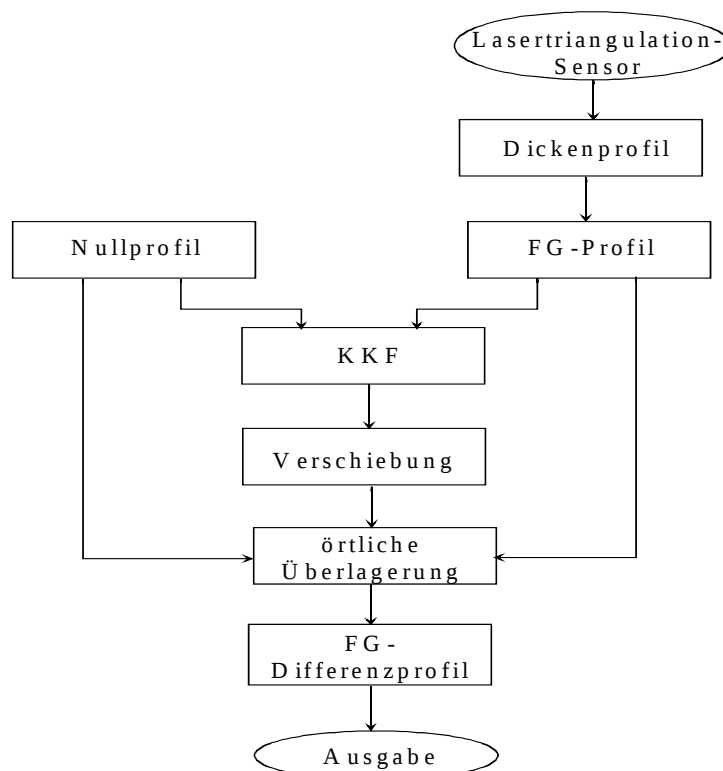


Abbildung 16: Flussdiagramm für den Messvorgang

2.4 Optimierung der Datenauswertung – Messalgorithmus für stark gestörte Signale

Bei den Messungen an der Streichmaschine tauchten des öfteren starke Störungen auf, für die sich der Messalgorithmus mittels KKF als ungeeignet erwies. Die örtliche Zuordnung verlief nicht mehr zufriedenstellend. Für Signale mit einer dominanten sinusförmigen Grundstörung, verursacht durch eine minimal exzentrische Lagerung der Walze, wurde ein Algorithmus entwickelt, der mittels der schnellen Fouriertransformation Ähnlichkeiten zwischen dem Nullprofil und dem Strichprofil ermittelt. Dieser Algorithmus zeigt sich sehr robust gegenüber Oberwellen im Messsignal, wie sie z.B. durch Partialschwingungen des Meßsystems verursacht werden.

2.4.1 Vorfilterung

Zur Verbesserung der optischen Beurteilbarkeit der Messergebnisse wurden die Datensätze vorgefiltert. Als Filter wurde der aus der Bildverarbeitung bekannte Medianfilter angewandt, der insbesondere bei Störungen kurzer Zeitdauer sehr gute Ergebnisse liefert, da die Störungen nicht herausgemittelt, sondern verworfen werden. **Abbildung 17** zeigt das ungefilterte und darunter das gefilterte Messsignal. Die auf der Walze angebrachte Markierung ist erst im gefilterten Messsignal erkennbar.

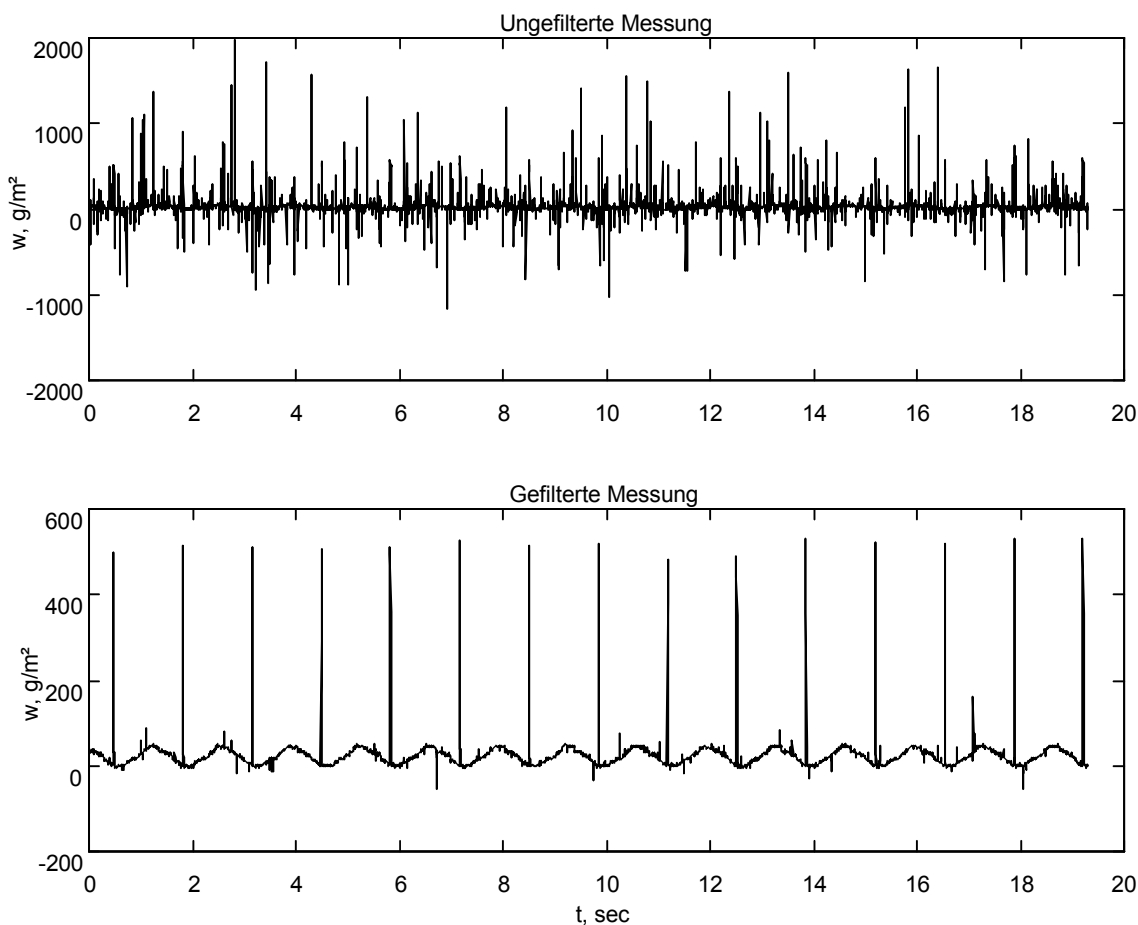


Abbildung 17: Messsignal vor und nach der Medianfilterung

2.4.2 Bestimmung der Periodizität

Im Anschluss an die Filterung erfolgt die Bestimmung der Periodizität des Messsignals. Hierfür wird das Signal mittels der schnellen Fouriertransformation (FT) in seine spektralen Komponenten zerlegt. **Abbildung 18** zeigt die Amplituden der ersten 100 Oberwellen des gefilterten Signals:

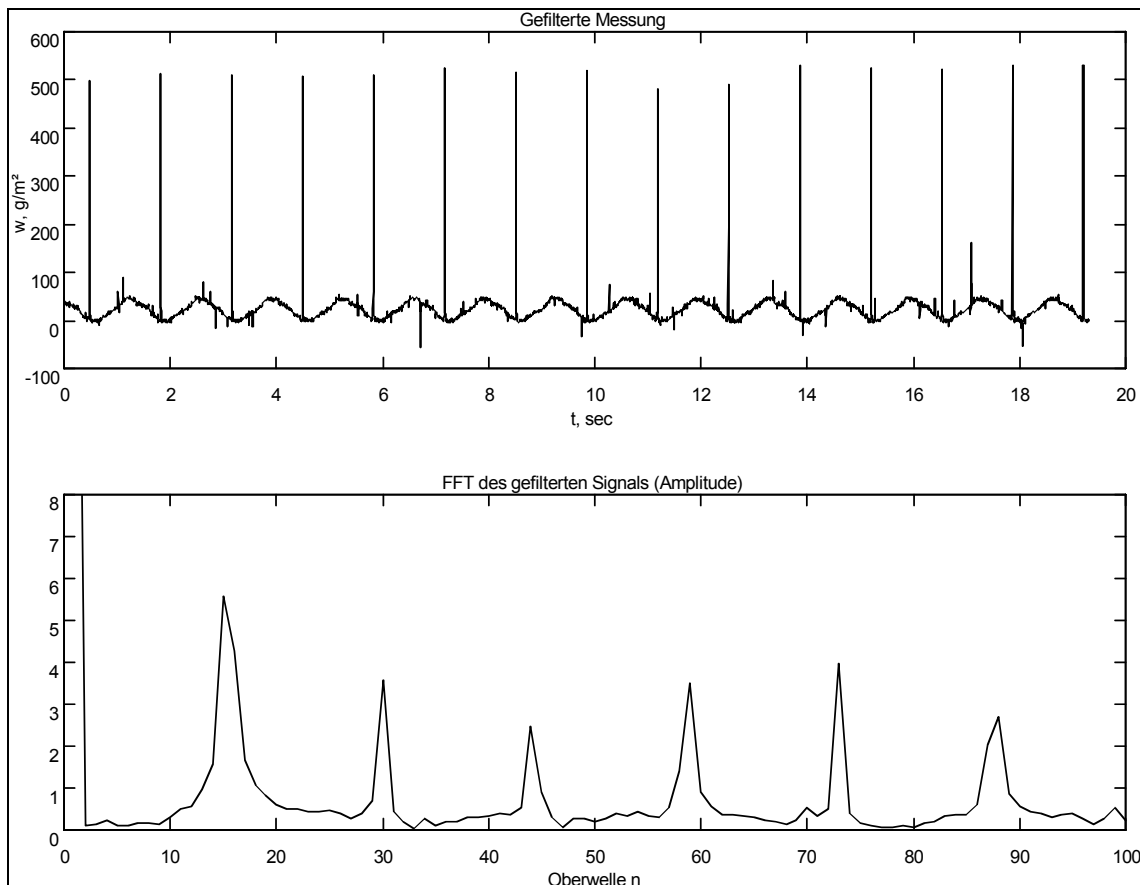


Abbildung 18: FT des Messsignals

Die größte Amplitude neben dem Gleichanteil (0-te Oberwelle) besitzt die 14. Oberwelle, was den erkennbaren 14 Umdrehungen der Walze entspricht. Zudem ist erkennbar, dass eine Reihe von Oberschwingungen auftauchen, die auf Störungen der Messung wie z. B. Partialschwingungen bzw. Walzenunebenheiten zurückzuführen sind.

Eine erste Näherung für die Periodizität ergibt sich nun durch Teilen der Datensatzlänge durch die Nummer der Oberwelle mit der größten Amplitude.

In einem nächsten Schritt wird die Messreihe so gekürzt, dass die Amplitude der Oberwelle mit der größten Amplitude oder aber ihr direkter Vorgänger maximal in der Amplitude wird. Hierdurch wird sichergestellt, dass die Messreihe nur aus vollständigen Wellenzügen (ganzen Walzenumdrehungen) besteht. Die endgültige Periodizität ergibt sich dann durch Teilen der gekürzten Datensatzlänge durch die Nummer der Oberwelle mit der größten Amplitude.

Durch die Sicherstellung der Vollständigkeit der Wellenzüge wird zudem die Mittelwertbildung präziser, da keine angefangenen Wellenzüge das Ergebnis verfälschen können.

2.4.3 Ausrichtung des Strichprofils zum Nullprofil

Im letzten Schritt erfolgt die Ausrichtung des Strichprofils zum Nullprofil. Hierfür wird das Ergebnis der FT des Nullprofils im Punkt ihrer maximalen Amplitude herangezogen. Aus dem Real- und Imaginärteil der Spektralkomponente lässt sich der Phasenwinkel φ_{np} dieser Schwingung berechnen:

$$\varphi_{np} = \arctan \frac{\text{Im}}{\text{Re}}$$

Ebenso lässt sich aus dem Strichprofil die entsprechende Komponente φ_{sp} berechnen. Es ergibt sich die Verschiebung *shift* in Samples dann aus der Differenz der Phasenwinkel $\Delta\varphi = \varphi_{sp} - \varphi_{np}$:

$$\text{shift} = \frac{P \cdot \Delta\varphi}{2 \cdot \pi}$$

mit P =Periodenlänge einer Walzenumdrehung in Samples.

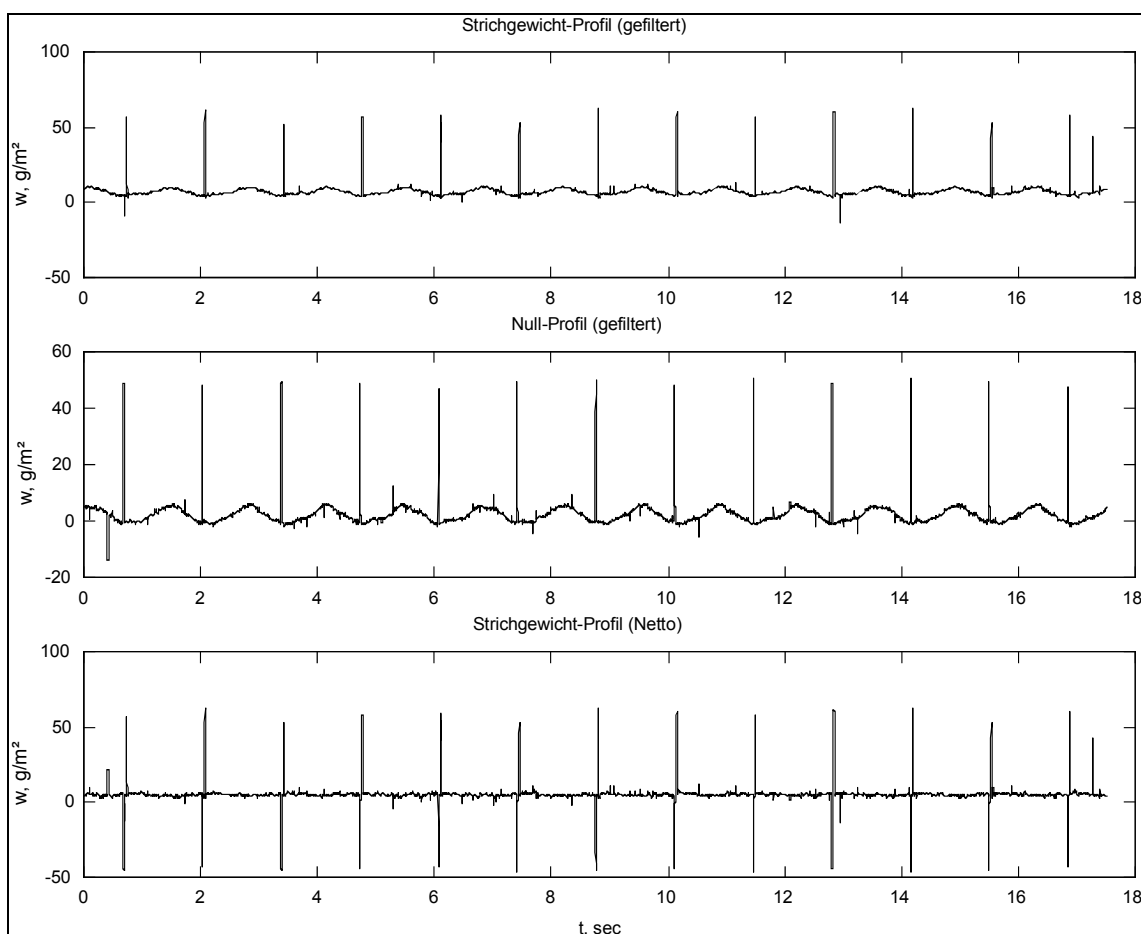


Abbildung 19: Ergebnis der Verschiebung

Nach der Verschiebung erfolgt die Berechnung des Strichprofils dann analog zum herkömmlichen Verfahren durch Differenzbildung aus Strichprofil und Nullprofil.

Abbildung 19 zeigt das Ergebnis der Filterung und Verschiebung. An den Markern ist ersichtlich, dass die Verschiebung auf wenige Samples genau erfolgte. Die Ursprungssignale entsprachen dabei der Signalqualität aus **Abbildung 17**.

3 Durchführung der Versuche

Das beschriebene Messsystem wurde an verschiedenen Walzensystemen getestet. Wichtige Kriterien für die Auswahl der Walzensysteme waren:

- Definiert einzustellende und zu variierende Walzendrehzahl
- Möglichkeiten zur Variation der Filmdicke
- Möglichkeiten zur Kontrolle der Messergebnisse

3.1 Helicoater 2000

Der Helicoater 2000 (Fa. ECC) ist ein schnelllaufender Laborcoater, mit dem praxisnahe Untersuchungen zum Streichprozess durchgeführt werden können. Für den Helicoater 2000 stehen verschiedene Bladestreichköpfe zur Verfügung. Durch die Variation des Klingenliniendrucks und der Walzendrehzahl lassen sich verschiedene Filmdicken und damit Strichgewichte einstellen. In **Abbildung 20** ist die realisierte Messanordnung dargestellt.

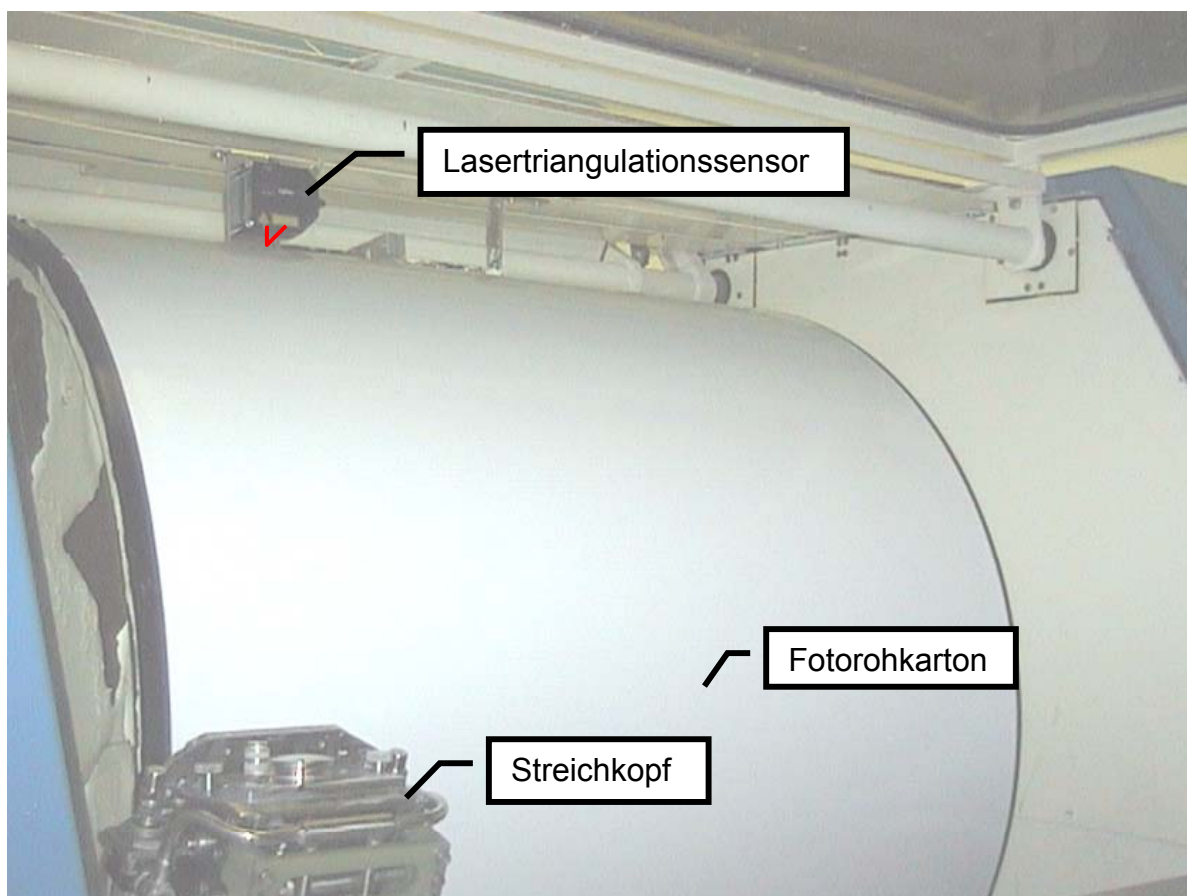
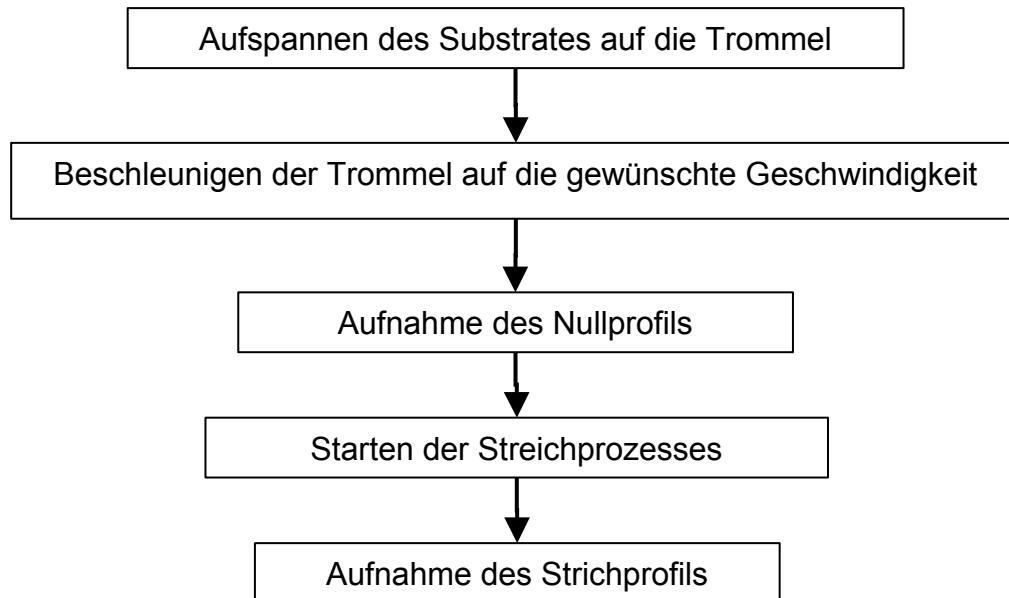


Abbildung 20: Einbausituation beim Helicoater 2000

Für den Streichprozess wird eine Lage Streichrohrpapier auf die Trommel (Durchmesser = 1 m) gespannt. Anschließend beschleunigt die Trommel auf eine vorgewählte Geschwin-

digkeit ($v_{\max} = 2000 \text{ m/min}$) und der Streichkopf traversiert über die Trommelbreite. Dadurch wird eine 75 – 125 mm breite Helix auf das Streichrohpapier aufgebracht. Für den hier beschriebenen Anwendungsfall wurde ein PE-beschichtetes Fotorohpapier verwendet.

Der Messablauf wurde wie folgt durchgeführt:



Der beschichtete Fotorohkarton wird anschließend getrocknet und das trockene Strichgewicht gravimetrisch bestimmt (Differenz zwischen beschichtetem und unbeschichtetem Papier).

Durch die PE-Beschichtung wird verhindert, dass die wässrige Phase der Streichfarbe in das Substrat penetriert und es dadurch zu Fehlern bei der Filmdickenmessung kommt.

3.1.1 Ergebnisse der Untersuchungen mit dem Helicoater 2000

Bei der Inbetriebnahme des Versuchsaufbaus wurden Probleme mit der Signalstabilität beobachtet. D.h. es kam zu einem unregelmäßigen Anstieg des Lasersignals bei ruhender Trommel. Nach Rücksprache mit dem Hersteller des Sensors wurden verschiedene Parameter wie Trommeloberfläche und Befestigung des Sensors variiert, ohne dass eine Verbesserung der Signalstabilität erreicht wurde. Als verbleibende mögliche Fehlerquelle, deren Einfluss auf diese Untersuchungen auch nicht zu verhindern war, ist noch die Umgebungstemperatur zu nennen. Bedingt durch die räumlichen Gegebenheiten am Standort des Helicoater 2000 (u.a. die Nähe zur Versuchsstrechanlage) konnten Temperaturschwankungen während den Messungen nicht verhindert werden. Neben der Temperaturempfindlichkeit des Sensors (lt. Hersteller ca. $1 \mu\text{m}/^\circ\text{C}$), kommen auch Temperatureffekte (unterschiedliche Wärmeausdehnungskoeffizienten) bei der Sensor- und Walzenhalterung zum Tragen. Durch die hohen Anforderungen, die an die Auflösung und die Genauigkeit des Sensors gestellt werden müssen, können sich diese Temperatureffekte in nicht tolerierbaren Schwankungen des Messsignals auswirken.

Aus den oben genannten Gründen wurden keine weiterführenden Untersuchungen zur Messung der Filmdicke am Helicoater 2000 durchgeführt.

3.2 2-Walzen Labormaschine

Die weiteren Untersuchungen wurden an einer 2-Walzen Labormaschine durchgeführt. Im Gegensatz zu den Versuchen mit dem Helicoater 2000 kann hier der Streichfarbenfilm direkt auf einer rotierenden Walze gemessen werden. Damit werden in dieser Messanordnung die Gegebenheiten eines späteren Einsatzes an einer Filmpresse nachgestellt. In **Abbildung 21** ist der Versuchsaufbau skizziert.

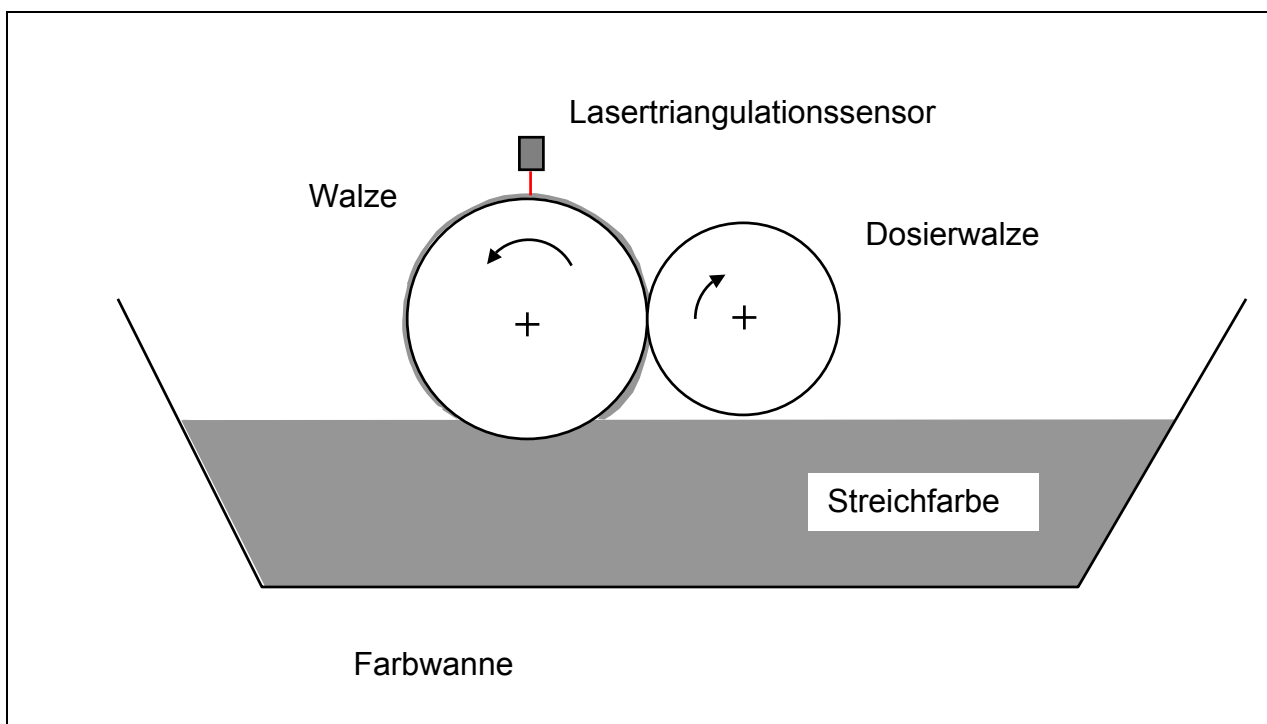


Abbildung 21: Schematischer Versuchsaufbau der 2-Walzen Labormaschine

Zum Aufbau der Maschine: Der Durchmesser der Walze beträgt 160 mm, die Geschwindigkeit der beiden Walzen ist stufenlos regelbar ($v_{\max} = 35 \text{ m/min}$). Über den Nipdruck, der mittels Mikrometerschraube einstellbar ist, kann die Filmdicke auf der Walze variiert werden. Die Kontrolle der Messergebnisse des Lasertriangulationssensors erfolgte durch manuelles Abrakeln des Farbfilms von der Walze. Aus dem Gewicht der abgerakelten Farbe und einigen Prozess- und Geometriedaten lässt sich das otre Filmgewicht auf der Walze wie folgt berechnen:

$$\text{Filmgewicht}_{\text{otro}} \left[\frac{\text{g}}{\text{m}^2} \right] = \frac{60 \cdot \text{Gewicht der abgerakelten Farbe [g]}}{\text{Messdauer [s]} \cdot \text{Rakelbreite [m]} \cdot \text{Maschinengeschwindigkeit [m/min]}}$$

3.2.1 Ergebnisse der Untersuchungen mit der 2-Walzen Labormaschine

Die Leistungsfähigkeit des Messsystems sollte durch Variation verschiedener Parameter getestet werden. Folgende Punkte wurden in den Untersuchungen berücksichtigt:

- Maschinengeschwindigkeit
- Dicke des Farbfilms auf der Walze
- Feststoffgehalt der Farbe
- Rezeptur der Farbe
 - © Pigmentverhältnis CaCO_3 / Kaolin
 - © Bindemittelsystem Stärke / synthetischer Binder
 - © Einsatz von optischen Aufhellern

Da diese Untersuchungen zur Identifizierung möglicher Betriebsfenster für die Messung der Filmdicke mittels Lasertriangulation dienen sollen, wurden für die oben genannten Parameter jeweils extreme Einstellungen gewählt. In **Tabelle 1** sind die jeweiligen Variationsschritte für die Parameter genannt.

Tabelle 1: Parameter und Variationsstufen der Versuche mit der 2-Walzen Labormaschine

Parameter	Variationsstufen
Maschinengeschwindigkeit [m/min]	22,1 und 32,7
Gewicht des Farbfilms auf der Walze [g/m ²]	6; 10; 12; 19; 25; 33; 39; 61; 162
Feststoffgehalt der Farbe [%]	18; 46; 50; 64; 66; 76
Pigmentverhältnis	100 T CaCO_3 ; 70 T CaCO_3 + 30 T Kaolin; 60 T CaCO_3 + 40 T Kaolin; 45 T CaCO_3 + 55 T Kaolin
Bindemittelsystem	12 T synthetischer Binder; 11 T synthetischer Binder + 1 T Stärke; 10 T Stärke
Optischer Aufheller	0 T; 0,4 T, 5 T

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Untersuchungen im Einzelnen dargestellt. Angegeben ist jeweils die Farbrezeptur, der Feststoffgehalt der Farbe, die Maschinengeschwindigkeit sowie die Ergebnisse der Messungen. Die Ergebnisse der Lasertriangulationsmessungen wurden mit beiden, in Kapitel 2 beschriebenen Auswertalgorithmen berechnet. Die Resultate der Kontrollmessungen durch Abrakeln des Farbfilms sind ebenfalls angegeben. Aufgeführt sind jeweils die minimalen und maximalen Messwerte sowie die Mittelwerte aus den Einzelmessungen (drei Einzelmessungen mit dem Lasersensor, zehn Werte bei der Kontrollmessung).

In **Tabelle 2** sind die Rezepturen der Farben angegeben, die bei den Untersuchungen mit der 2-Walzen Labormaschine zur Anwendung kamen.

Tabelle 2: Farbrezepturen 2-Walzen Labormaschine

Farbe 1	Farbe 2	Farbe 3	Farbe 4	Farbe 5
100 T CaCO ₃	100 T CaCO ₃	60 T CaCO ₃	70 T CaCO ₃	45 T CaCO ₃
10 T Stärke		40 T Kaolin	30 T Kaolin	55 T Kaolin
0,8 T Hilfsmittel		12 T Latex	12 T Latex	11 T Latex
		0,75 T Verdicker	0,75 T Verdicker	1 T Stärke
		0,4 T opt. Aufheller	0,4 T opt. Aufheller	0,45 T Verdicker

Variation der Maschinengeschwindigkeit:

Farbe 1						
Feststoffgehalt	64 %					
Geschwindigkeit [m/min]	32,7			22,1		
	Min	Mittelwert	Max	Min	Mittelwert	Max
Laser KKF [g/m ²]	13,9	16,7	18,8	4,9	8,9	12,2
Laser FT [g/m ²]	14,6	16,3	18,0	9,6	10,6	11,6
Rakel [g/m ²]	35,1	35,8	36,3	21,5	23,1	24,2

Farbe 2						
Feststoffgehalt	76%					
Geschwindigkeit [m/min]	32,7			22,1		
	Min	Mittelwert	Max	Min	Mittelwert	Max
Laser KKF [g/m ²]	13,0	15,1	18,8	7,8	12,2	16,1
Laser FT [g/m ²]	12,1	14,8	17,6	1,0	12,6	24,2
Rakel [g/m ²]	37,9	39,2	41,2	9,5	10,0	10,4

Berechnet man die mittlere Abweichung des Lasersensors nach folgender Gleichung,

$$\text{mittlere Abweichung [\%]} = \frac{\text{Mittelwert}_{\text{Rakel}} - \text{Mittelwert}_{\text{Laser}}}{\text{Mittelwert}_{\text{Rakel}}} * 100\%$$

so ergibt sich für die Farbe 1 ein Wert von ca. 54% bei beiden Geschwindigkeiten. Bei der Farbe 2 liegen die Abweichungen bei ca. -24% (niedrige Drehzahl) und bei 62% für die hohe Geschwindigkeit.

Aus den dargestellten Ergebnissen kann die Tendenz zu einer besseren Messgenauigkeit bei niedrigeren Maschinengeschwindigkeiten abgeleitet werden, ein eindeutiger Zusammenhang ergibt sich jedoch nicht.

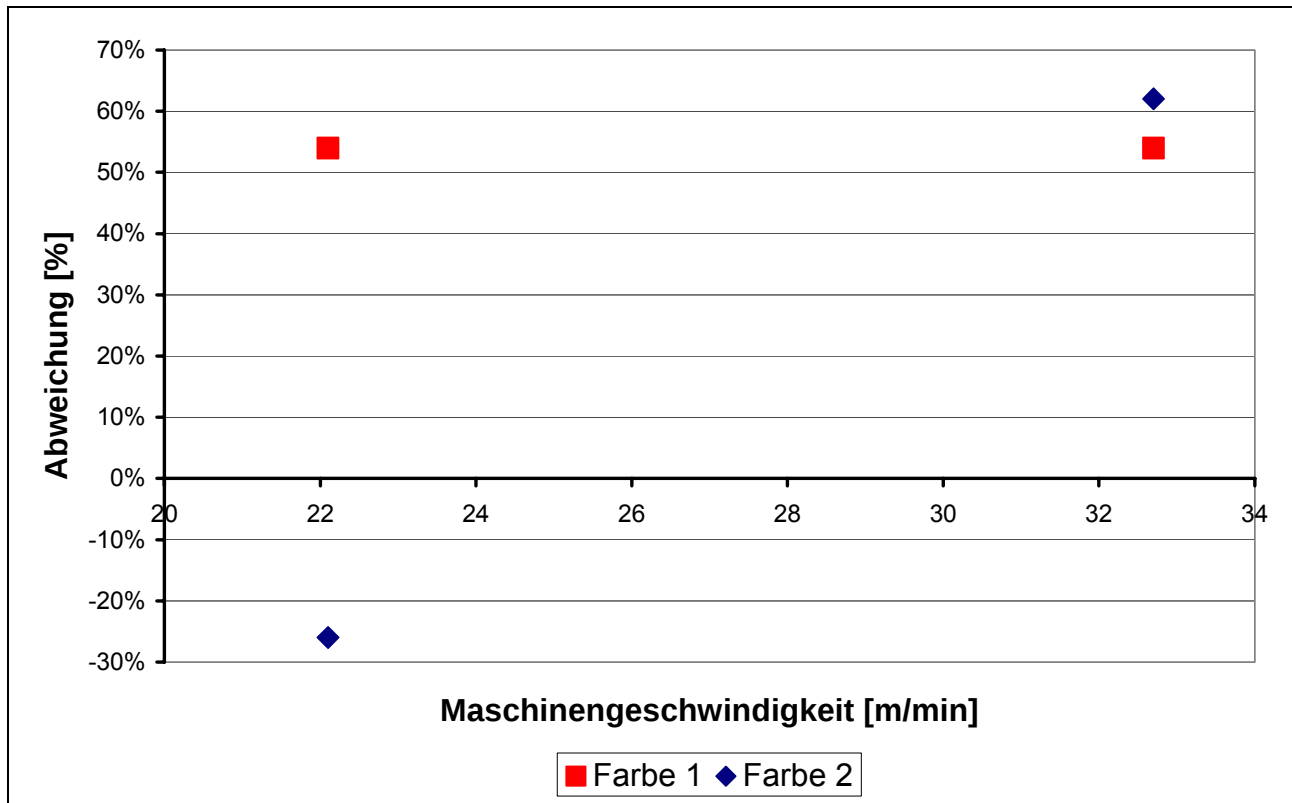


Abbildung 22: Untersuchungen zum Einfluss der Maschinengeschwindigkeit

Variation der Filmdicke:

Farbe 3						
Feststoffgehalt	66,7%					
Geschwindigkeit [m/min]	32,7					
	Min	Mittelwert	Max	Min	Mittelwert	Max
Laser KKF [g/m ²]	48,9	53,0	58,4	10,0	17,2	24,7
Laser FT [g/m ²]	54,1	55,8	58,1	18,8	21,2	23,3
Rakel [g/m ²]	55,2	60,7	63,5	23,5	25,4	27,1

Farbe 4						
Feststoffgehalt	50,0%					
Geschwindigkeit [m/min]	32,7					
	Min	Mittelwert	Max	Min	Mittelwert	Max
Laser KKF [g/m ²]	17,3	19,4	20,7	-10,0	-5,5	-2,0
Laser FT [g/m ²]	19,1	21,2	22,9	-7,8	-3,3	0,1
Rakel [g/m ²]	27,1	28,6	30,4	5,6	6,3	6,6

Die Variation der Filmdicke wurde ebenfalls an verschiedenen Farben durchgeführt. Die oben dargestellten Ergebnisse deuten darauf hin, dass bei sonst gleichen Bedingungen, höhere Genauigkeiten bei dickeren Filmen (bzw. höheren Filmgewichten) zu erzielen sind. Bei einem Auftragsgewicht auf der Walze von etwa 6 g/m² sind Abweichungen von ca. 160% zu beobachten. Für höhere Auftragsgewichte (61 g/m²) liegt der Messfehler bei ca. 10%.

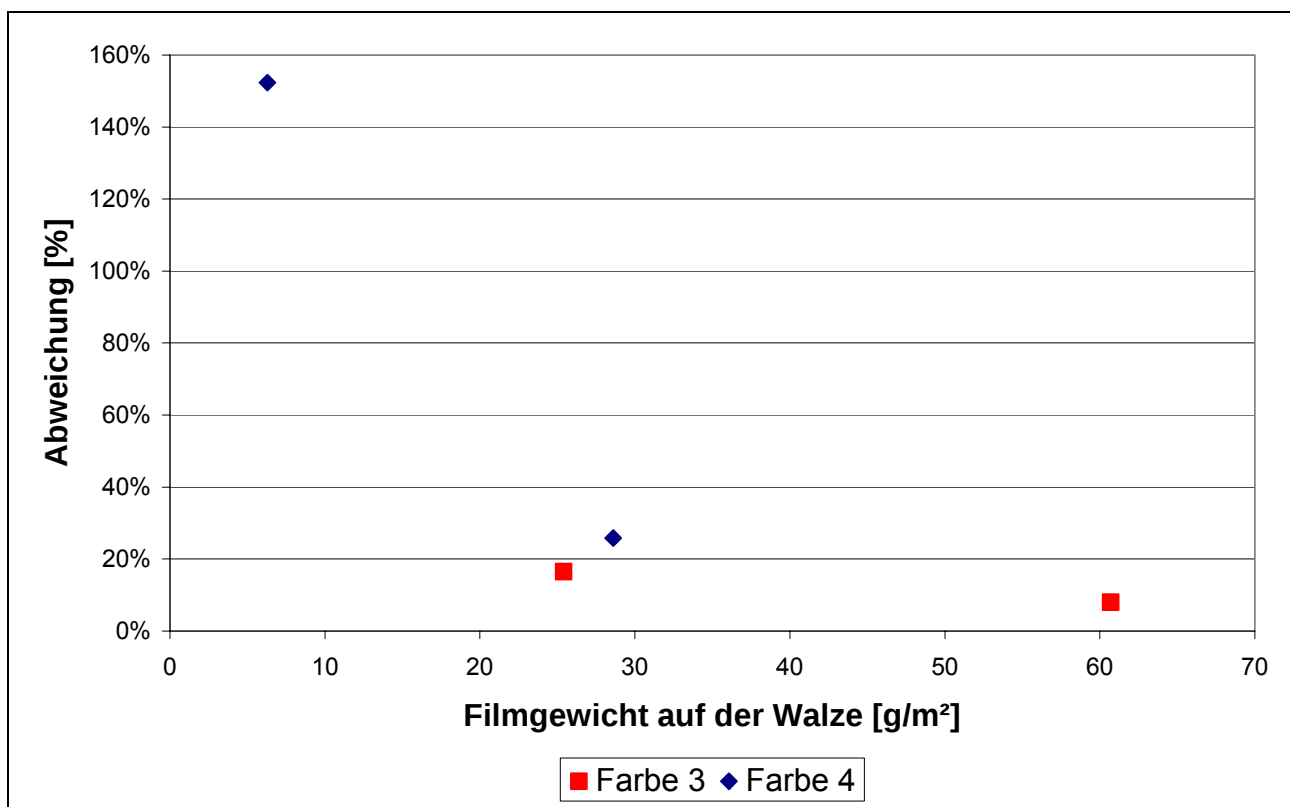


Abbildung 23: Untersuchungen zum Einfluss der Filmdicke

Variation des Feststoffgehaltes:

Farbe 2						
Geschwindigkeit [m/min]	22,1					
Feststoffgehalt [%]	76,0			18,0		
	Min	Mittelwert	Max	Min	Mittelwert	Max
Laser KKF [g/m ²]	7,8	12,2	16,1	5,3	5,4	5,5
Laser FT [g/m ²]	1,0	12,6	24,2	5,1	5,1	5,2
Rakel [g/m ²]	9,5	10,0	10,4	5,2	5,6	5,8

Farbe 3									
Geschwindigkeit [m/min]	32,7								
Feststoffgehalt [%]	66,7			52,8			46,4		
	Min	Mittelwert	Max	Min	Mittelwert	Max	Min	Mittelwert	Max
Laser KKF [g/m ²]	10	17,2	24,7	3,3	5,7	7,6	28,6	29,1	30,1
Laser FT [g/m ²]	18,8	21,2	23,3	3,9	5,9	7,6	28,8	29,9	29,9
Rakel [g/m ²]	23,5	25,4	27,1	12,0	12,2	12,4	30,4	33,3	33,7

Farbe 4						
Geschwindigkeit [m/min]	32,7					
Feststoffgehalt [%]	64,9			50,0		
	Min	Mittelwert	Max	Min	Mittelwert	Max
Laser KKF [g/m ²]	151,6	153,2	155,3	17,3	19,4	20,7
Laser FT [g/m ²]	152,1	152,8	153,6	19,1	21,2	22,9
Rakel [g/m ²]	155,1	162,3	168,0	27,1	28,6	30,4

Die Ergebnisse zur Variation des Feststoffgehaltes lassen keine eindeutigen Rückschlüsse auf einen Zusammenhang zwischen dem Feststoffgehalt der Farbe und der Genauigkeit der Laserabstandsmessungen zu.

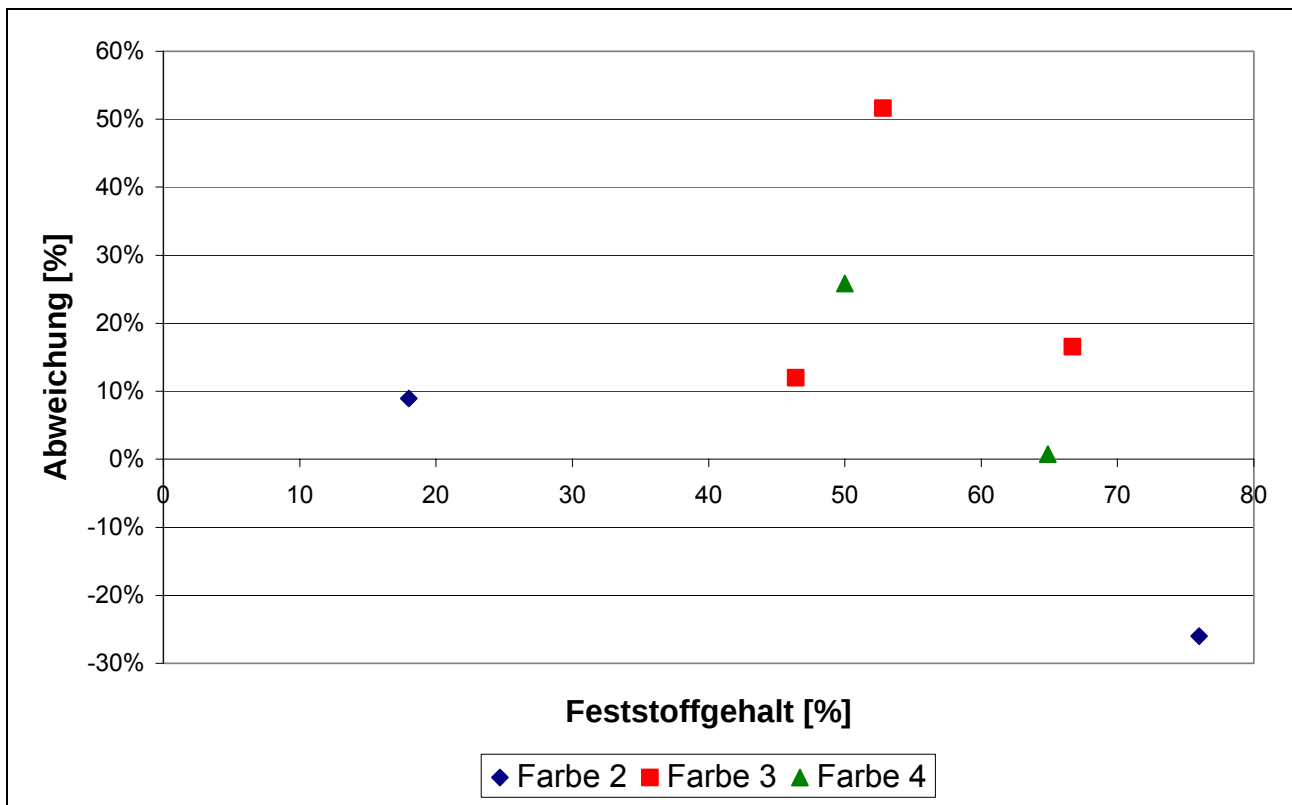


Abbildung 24: Untersuchungen zum Einfluss des Feststoffgehaltes

Variation des Pigmentverhältnisses:

	Farbe 4			Farbe 3		
Feststoffgehalt	64,9 %			66,7 %		
Geschwindigkeit [m/min]	32,7					
	Min	Mittelwert	Max	Min	Mittelwert	Max
Laser KKF [g/m²]	151,6	153,2	155,3	10,0	17,2	24,7
Laser FT [g/m²]	152,1	152,8	153,6	18,8	21,2	23,3
Rakel [g/m²]	155,1	154,0	168,0	23,5	25,4	27,1

	Farbe 1			Farbe 5		
Feststoffgehalt	64 %			61,8 %		
Geschwindigkeit [m/min]	32,7					
	Min	Mittel- wert	Max	Min	Mittel- wert	Max
Laser KKF [g/m²]	13,9	16,7	18,8	24,6	28,7	32,9
Laser FT [g/m²]	14,6	16,3	18,0	19,4	26,4	33,3
Rakel [g/m²]	35,1	35,8	36,3	28,5	28,6	28,7

Die Ergebnisse zur Variation des Pigmentverhältnisses lassen darauf schließen, dass mit höheren Anteilen von Kaolin in der Streichfarbe bessere Übereinstimmungen zwischen den Laserabstands- und Kontrollmessungen erreicht werden können. Dies wird auf Veränderungen in der Reflexion des Laserstrahls aufgrund von unterschiedlichen Teilchenformen und/oder Weißgraden der Pigmente zurückgeführt. Die Abweichung von diesem Trend bei einem Pigmentverhältnis von 70/30 wird mit den oben beschriebenen Ergebnissen zur Variation des Filmgewichts erklärt. Mit 154 g/m² lag hier ca. die fünffache Filmdicke vor. Dieser Einfluss darf nicht vernachlässigt werden.

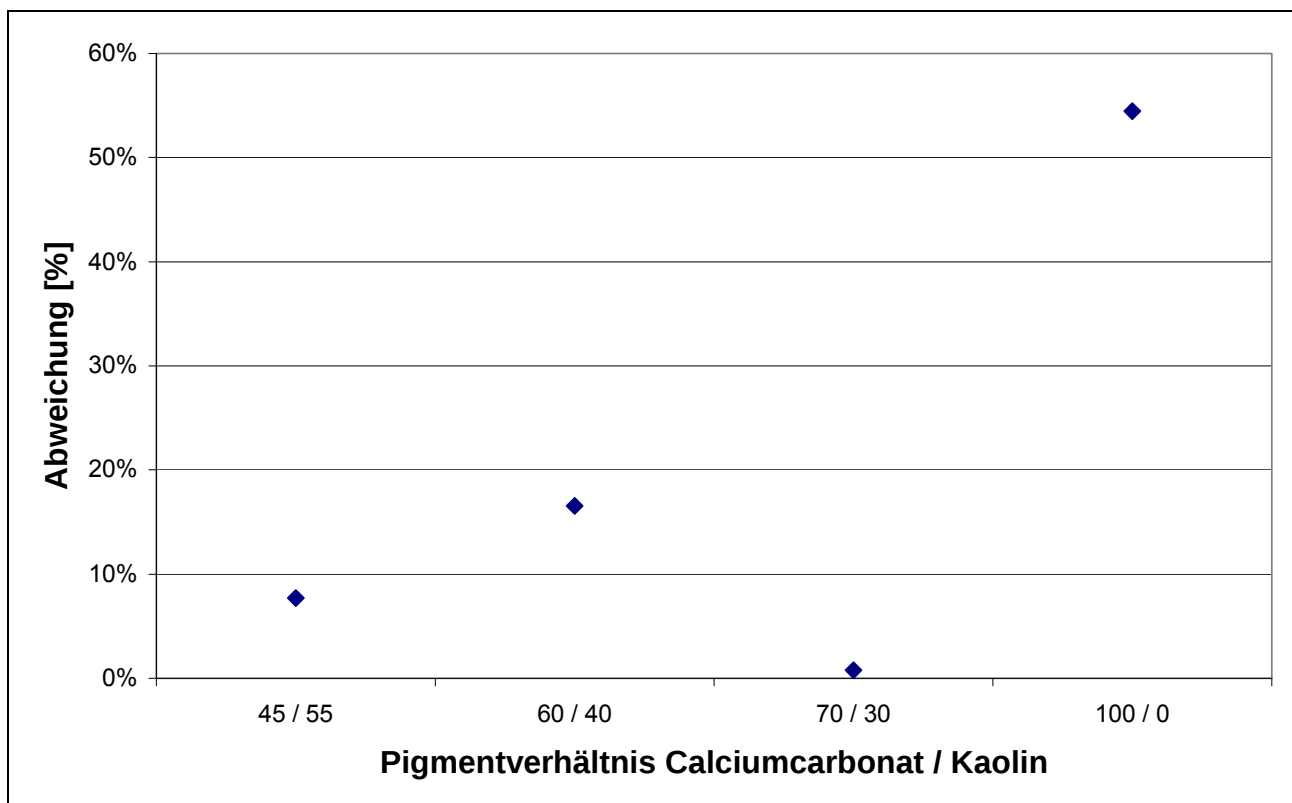


Abbildung 25: Untersuchungen zum Einfluss des Pigmentverhältnisses

Variation des Bindemittelsystems:

	Farbe 1			Farbe 3			Farbe 5		
Feststoffgehalt	64,0 %			66,7 %			61,8 %		
Geschwindigkeit [m/min]	32,7								
	Min	Mittelwert	Max	Min	Mittelwert	Max	Min	Mittelwert	Max
Laser KKF [g/m²]	13,9	16,7	18,8	10,0	17,2	24,7	24,6	28,7	32,9
Laser FT [g/m²]	14,6	16,3	18,0	18,8	21,2	23,3	19,4	26,4	33,3
Rakel [g/m²]	35,1	35,8	36,3	23,5	25,4	27,1	28,5	28,6	28,7

Das Bindemittelsystem wurde in drei Schritten variiert. Es wurden reine Stärke- bzw. Latexfarben sowie eine Mischung aus Latex und Stärke getestet. Eine Abhängigkeit der Genauigkeit konnte nicht festgestellt werden.

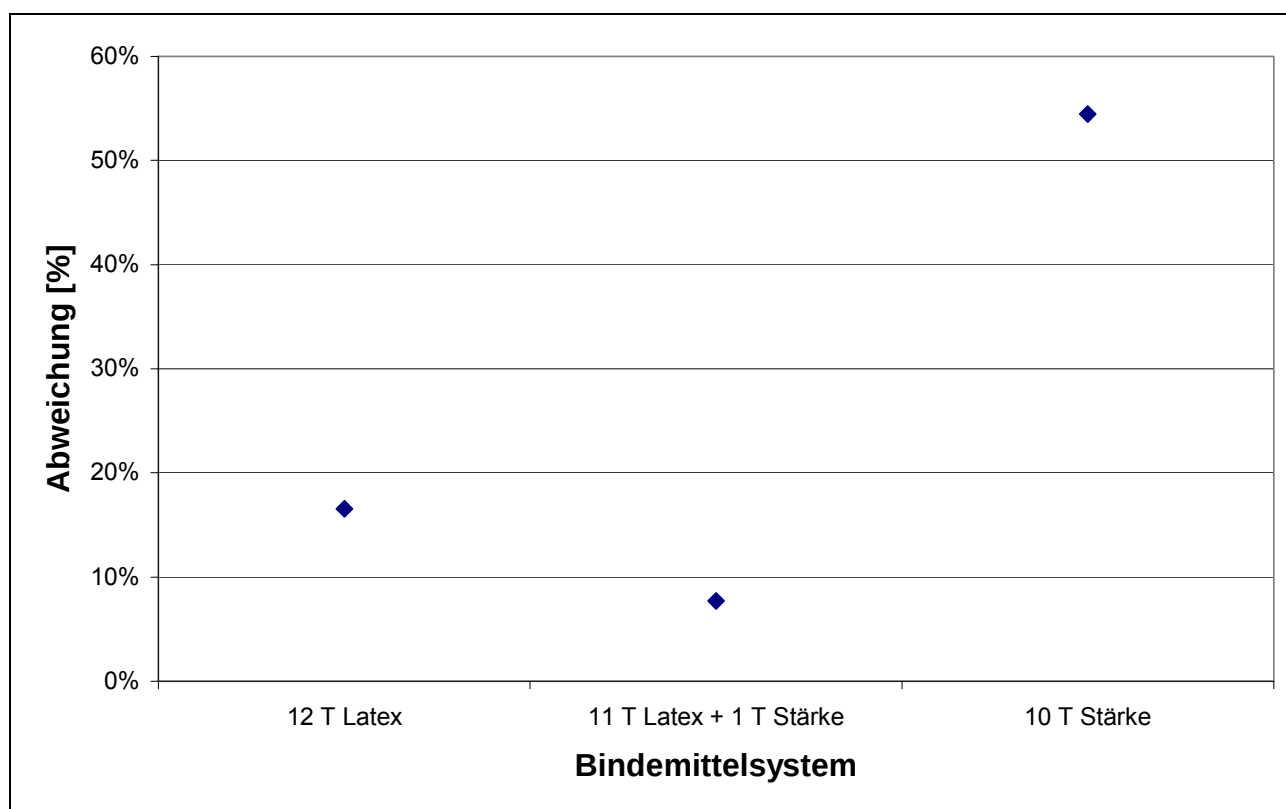


Abbildung 26: Untersuchungen zum Bindemittelsystem

Optischer Aufheller:

Farbe 5						
Feststoffgehalt	61,8 %			58,7%		
Geschwindigkeit [m/min]	32,7					
Opt. Aufheller	-			5 Teile		
	Min	Mittelwert	Max	Min	Mittelwert	Max
Laser KKF [g/m²]	24,6	28,7	32,9	13,3	15,8	17,8
Laser FT [g/m²]	19,4	26,4	33,3	13,9	16,2	18,7
Rakel [g/m²]	28,5	28,6	28,7	18,2	18,6	19,2

Der Einfluss des optischen Aufhellers auf die Messgenauigkeit des Lasertriangulations-sensors wurde anhand von zwei extremen Einstellungen geprüft. Signifikante Unterschiede zwischen den Messergebnissen von den Farben mit oder ohne optischen Aufheller wurden nicht beobachtet.

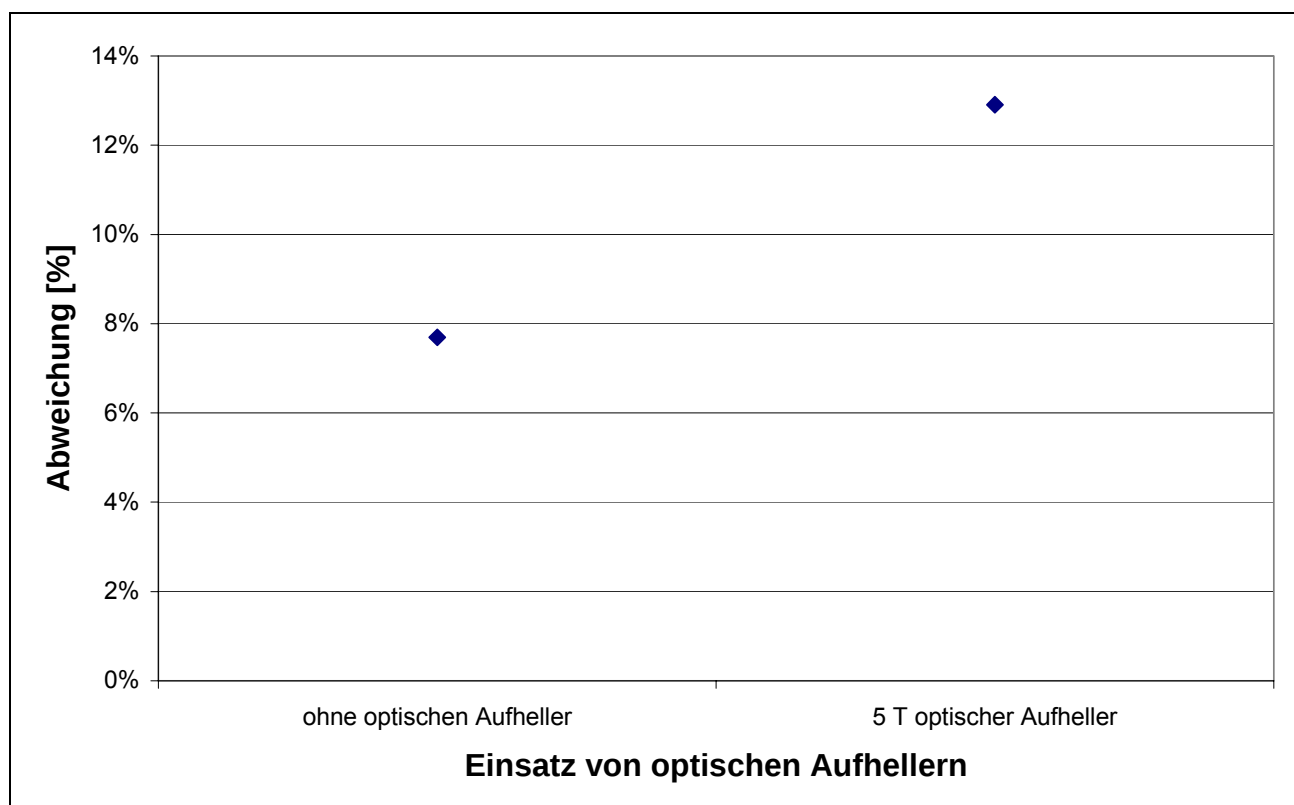


Abbildung 27: Untersuchungen zum Einfluss des optischen Aufhellers

3.3 Filmpressenwalze

Nach Abschluss der Untersuchungen mit der 2-Walzen Labormaschine und Auswertung der Ergebnisse, wurde das Messsystem an einem dritten Walzensystem getestet. Hierbei handelte es sich um eine Filmpressenwalze (Durchmesser = 1 m), bei der die Dosierung des Farbfilms mittels gerillter Rollraket erfolgte. In **Abbildung 28** ist der Versuchsaufbau skizziert. Mit diesen Untersuchungen, die gänzlich unter Praxisbedingungen stattfanden, konnten sämtliche Restriktionen, die eventuell aus den speziellen Verhältnissen eines Laborgerätes resultieren können, ausgeschlossen werden.

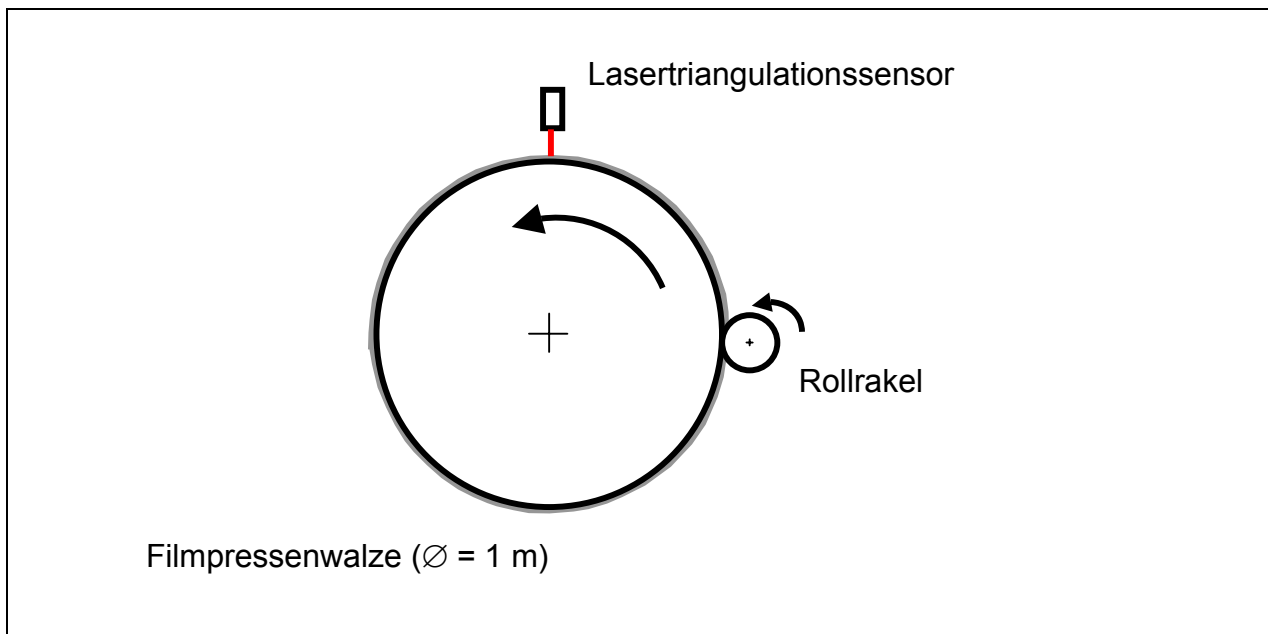


Abbildung 28: Schematischer Versuchsaufbau an der Filmpressenwalze

3.3.1 Ergebnisse der Untersuchungen an der Filmpressenwalze

Alle Untersuchungen an der Filmpressenwalze wurden mit gleicher Farbzusammensetzung durchgeführt. Ausgewählt wurde eine Rezeptur, die Annähernd der von Farbe 4 aus der Versuchsreihe mit der 2-Walzen Labormaschine entsprach. Variiert wurde die Maschinengeschwindigkeit. Die Kontrollmessungen erfolgten analog zu den Untersuchungen an der 2-Walzen Labormaschine durch Abrakeln. Zusätzlich bietet die volumetrische Dosierung durch die gerillte Rakel eine weitere Kontrollmöglichkeit. Für die hier gewählten Farb- und Prozessparameter wird vom Hersteller ein Bereich von 8 – 12 g/m² für das Auftragsgewicht angegeben.

Farbe:	70 T CaCO ₃					
	30 T Kaolin					
	12 T Latex					
Feststoffgehalt	62,5 %					
Geschwindigkeit [m/min]	50			100		
	Min	Mittelwert	Max	Min	Mittelwert	Max
Laser KKF [g/m ²]	-1,0	-0,21	0,8	25,4	26,0	26,7
Laser FT [g/m ²]	-1,3	-0,44	0,4	25,7	26,3	26,4
Rakel [g/m ²]	13,6	14,0	14,4	13,6	13,9	14,1

Geschwindigkeit [m/min]	200			400		
	Min	Mittelwert	Max	Min	Mittelwert	Max
Laser KKF [g/m ²]	39,5	39,8	40,5	55,2	55,5	55,9
Laser FT [g/m ²]	39,7	40,2	40,5	55,2	55,6	55,8
Rakel [g/m ²]	13,4	14,5	15,1	15,1	15,3	15,4

Wie aus den oben angegebenen Ergebnissen hervorgeht, herrscht eine gute Korrelation zwischen den manuellen Messungen durch abrakeln und den Angaben des Maschinenbauers. Die Lasertriangulationsmessungen zeigen eine höhere Genauigkeit bei niedrigeren Geschwindigkeiten (50 und 100 m/min). Bei der maximalen Geschwindigkeit in dieser Versuchsreihe (400 m/min) werden auch die größten Abweichungen der Messergebnisse beobachtet.

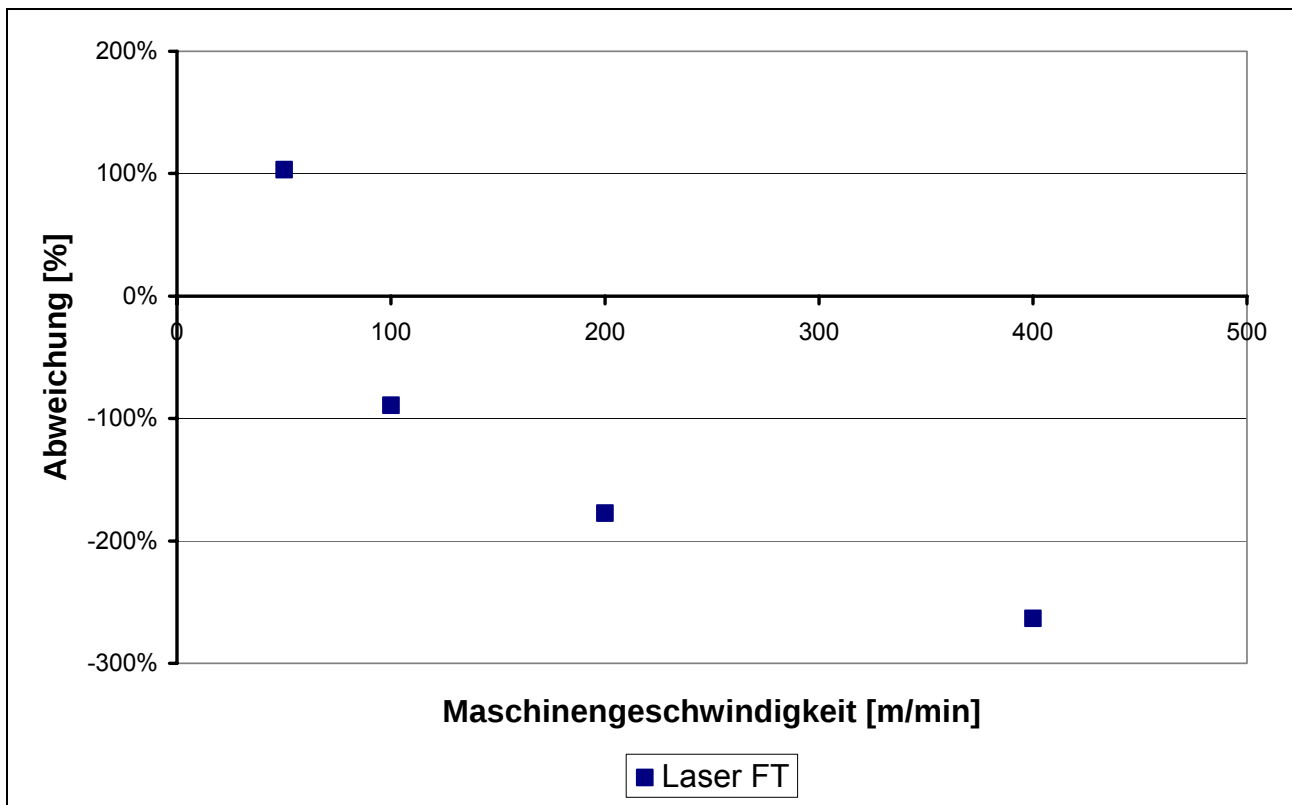


Abbildung 29: Untersuchungen zum Einfluss der Maschinengeschwindigkeit

4 Diskussion

Die in Kapitel 3 vorgestellten Ergebnisse der Lasertriangulationsmessungen weisen – unabhängig vom verwendeten Walzensystem - bei beinahe allen Versuchen erhebliche Abweichungen von den Ergebnissen der Kontrollmessungen auf. In **Abbildung 30** ist beispielhaft für die Untersuchungen an der 2-Walzen Labormaschine, die Abweichung der Lasermessungen in Abhängigkeit vom Filmgewicht dargestellt. Es wird deutlich, dass mit der Laserabstandsmessung überwiegend ein zu geringes Filmgewicht gemessen wird. Die Auswertung der Messungen mittels Fouriertransformation ergibt tendenziell eine höhere Genauigkeit, d.h. eine bessere Übereinstimmung zwischen Laser- und Kontrollmessung. Zufriedenstellenden Resultate konnten allerdings auch durch die Optimierung der Datenauswertung nicht erzielt werden.

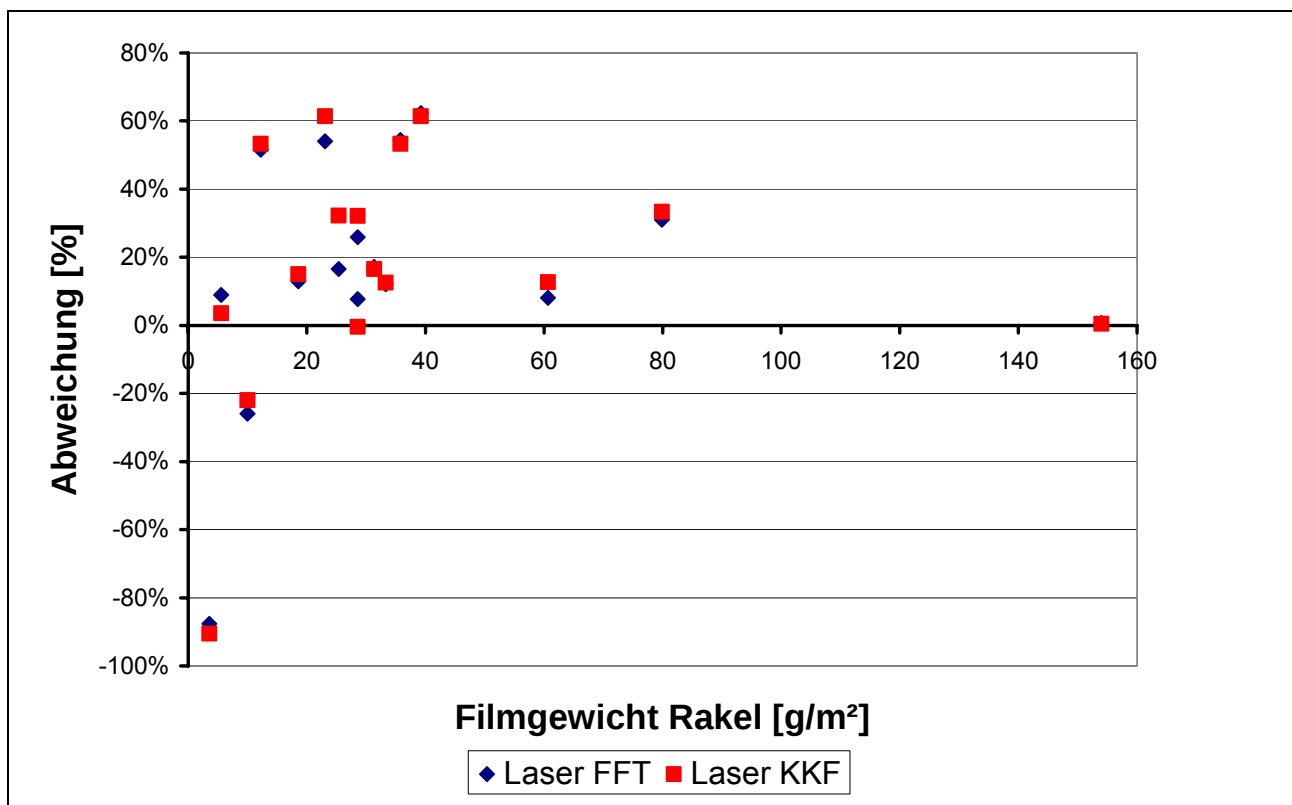


Abbildung 30: Variation des Filmgewichtes an der 2-Walzen Labormaschine

Mögliche Ursachen für diese Abweichungen werden im verwendeten Messsystem, den Prozessbedingungen und den Eigenschaften der Streichfarben gesehen.

Messsystem:

Neben der Linearität des Lasertriangulationssensors von 0,12% des Messbereiches ist auch ein Einfluss der Temperatur zu berücksichtigen. Nach Angaben des Herstellers sind hier Abweichungen von 1 $\mu\text{m}/^\circ\text{C}$ zu erwarten.

Prozessbedingungen:

Temperaturschwankungen haben aber nicht nur direkte Einflüsse auf den Sensor. Durch unterschiedliche Wärmeausdehnungskoeffizienten sind auch Veränderungen in den Geometrieverhältnissen zu erwarten. Für Stahl beträgt der lineare Wärmeausdehnungskoeffizient $\alpha = 1,15 \cdot 10^{-5}/\text{K}$, Kunststoffe haben sogar Werte von $5 - 10 \cdot 10^{-5}/\text{K}$. In **Tabelle 3** ist angegeben, welche Auswirkung eine Temperaturerhöhung von 1°C auf die Durchmesser der verwendeten Walzen nur durch die Wärmedehnung des Stahls hat.

Tabelle 3: Lineare Wärmeausdehnung

Walzensystem	Durchmesser [mm]	Wärmedehnung [mm/°C]
2-Walzen Labormaschine	160	0,00184
Filmpressenwalze	1000	0,0115

Obwohl versucht wurde, Temperaturschwankungen während der Messungen zu vermeiden (z.B. durch Ausschalten jeglicher Trocknungsaggregate, Temperierung der Streichfarben auf Raumtemperatur und indem die Zeitintervalle zwischen den Messungen möglichst kurz gehalten wurden), konnten sie doch nicht gänzlich ausgeschlossen werden. Für die gedachte Praxisanwendung an der Filmpresse könnten diese Einflüsse bei paralleler Verwendung von zwei Sensoren minimiert werden. Unbenetzte Walze und Strichprofil könnten gleichzeitig erfasst werden und diese Temperatureffekte würden ohne Einfluss auf das Messergebnis bleiben.

Eigenschaften der Streichfarben:

Wie in Kapitel 2.1.2 angeführt, bestimmt die Objektoberfläche auch die Messgenauigkeit des Lasertriangulationssensors. Bei Schichtoberflächen, deren Absorptions-, Reflexions- und Streueigenschaften nicht gleichmäßig sind, gilt es, auch diesen Messfehler zu berücksichtigen. Durch die Variation verschiedener Farbparameter (Farbzusammensetzung, Feststoffgehalt, Dichte) wurde versucht, Veränderungen in der Oberfläche des nassen Streichfarbenfilms zu erzeugen. Wie mit den Ergebnissen zur Variation des Pigmentverhältnisses gezeigt werden konnte, besitzt die Farbe der verwendeten Pigmente und/oder die Teilchenform einen erheblichen Einfluss auf die Reflexion des Laserstrahls und damit auf den Messfehler des Triangulationssensors.

5 Zusammenfassung

Im Rahmen dieses Projekts wurde ein Messsystem zur Bestimmung der Dicke eines nas- sen Farbfilms für den Praxiseinsatz an einer Filmpresse getestet. Für die Vermessung der nur wenige μm dicken Farbfilme ist eine sehr feine Auflösung notwendig. Das Prinzip der Lasertriangulation verspricht dieses Potential und wurde deshalb ausgewählt. Die La- sertriangulation ist ein Messverfahren, mit dem der Abstand eines Punktes auf der Ober- fläche einer Schicht von einer Referenzebene bestimmt wird. Als Referenzebene diente bei diesen Untersuchungen die unbenetzte Walze.

Die Untersuchungen fanden an verschiedenen Walzensystemen statt. Dafür wurde jeweils ein Messstand geplant und aufgebaut. Besonderes Augenmerk galt hierbei einer, gegen- über Vibrationen möglichst unempfindlichen Befestigung des Sensors und einer sehr prä- zisen Justierung des Abstands zwischen der Walzenoberfläche und dem Lasertriangulati- onssensor. Für die Messwerterfassung und -verarbeitung mussten geeignete Programme entwickelt werden. Die Auswertung der Messdaten, d.h. die Überlagerung von Referenz- ebene und Farbebene, erfolgte nach zwei verschiedenen mathematischen Modellen (Kreuzkorrelationsfunktion sowie Fouriertransformation). In den eigentlichen Untersuchen- gen zur Bestimmung der Filmdicke wurden sowohl Prozess- als auch Farbparameter in Eckpunkten variiert.

Die vorgestellten Ergebnisse zeigen – unabhängig vom verwendeten Walzensystem und von den Farb- und Prozessparametern- für annähernd alle Versuche erhebliche Ungenau- igkeiten bei der Filmgewichtsbestimmung mittels Laserabstandsmessung.

Hinsichtlich der Farbparameter wurde festgestellt, dass ein Einfluss von den eingesetzten Pigmenten ausgeht. Höhere Anteile an Kaolin bringen hier Vorteile. Bei den Prozesspara- metern deuten die Messwerte bei der Filmdickenvariation darauf hin, dass, bei sonst kon- stanten Bedingungen, höhere Messgenauigkeiten bei größeren Filmdicken erzielt werden können, vgl. **Abbildung 31**.

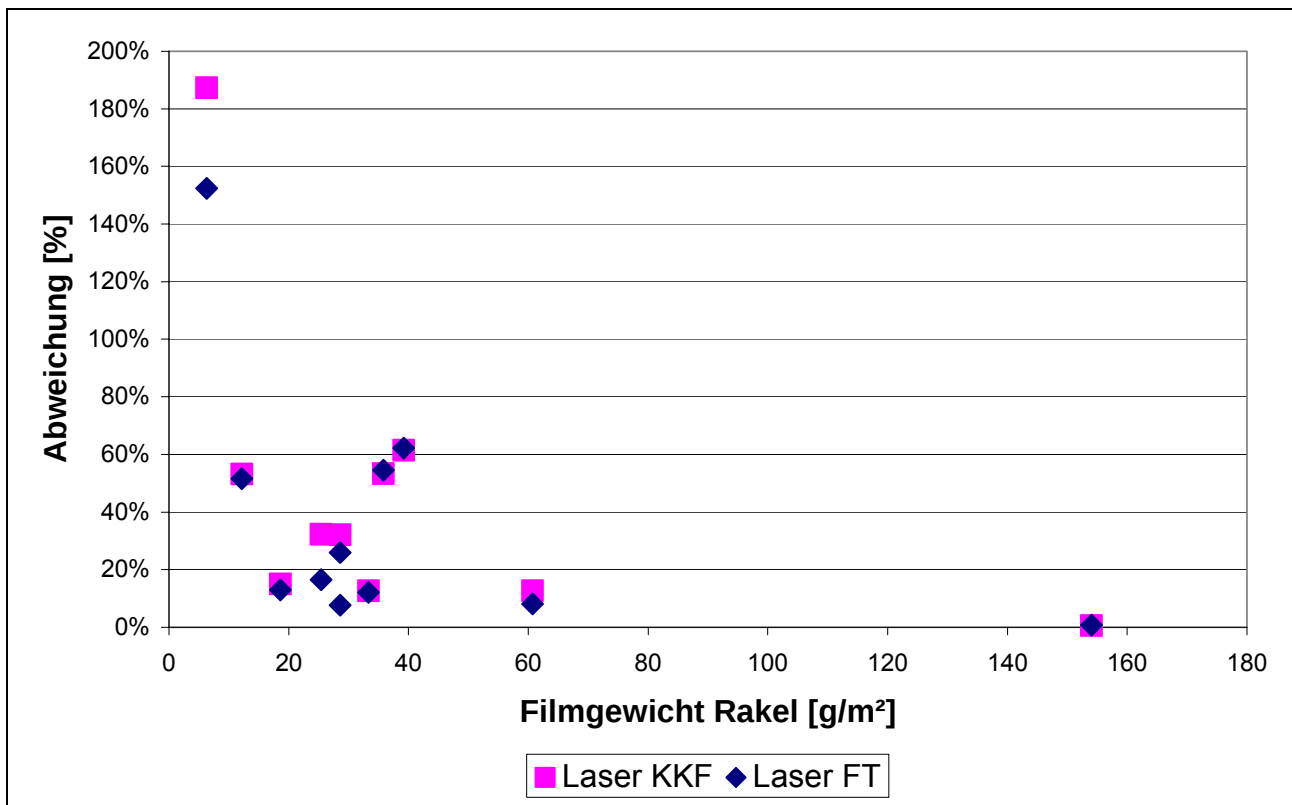


Abbildung 31: Zusammenhang zwischen Filmgewicht und Messfehler bei konstanter Maschinengeschwindigkeit

Weiterhin wurde auch ein Zusammenhang zwischen der Drehzahl der Walze (d.h. der Maschinengeschwindigkeit) und der Messgenauigkeit festgestellt.

Zusammenfassend lässt sich feststellen: Solange die Einflüsse aus nicht konstanten Umgebungsbedingungen und den Oberflächeneigenschaften des Farbfilms durch eine Optimierung der Messtechnik nicht behoben sind, wird ein Praxiseinsatz des hier getesteten Messsystems nicht für sinnvoll erachtet.

Literaturverzeichnis

- [i] Kohl Ch., Lex R., Sommer H., ter Veer B.C.A., Wanzek C.
Austausch der Leimpresse durch die Filmpresse – eine wirtschaftliche und qualitätsmäßige Betrachtung
Wochenblatt für Papierfabrikation 127; 394 – 396 (1999); Nr.6
- [ii] Linnonmaa J., Rajala P., Ringbom K., Solin R.
Future developments of the coating machine
1998 Coating Papermakers Conference. Book 2. Conference; 05.04.-05.06.1998, New Orleans.
Atlanta: TAPPI Press 1998; S. 963 – 977
- [iii] Optische Messtechnik in der industriellen Fertigung, Bremer Innovations-Agentur GmbH(Hrsg.); 1998
- [iv] Alexander W. Koch, Optische Messtechnik an technischen Oberflaechen, Renningen-Malmsheim: 1998
- [v] Handbuch der Messtechnik, hrsg. von Joerg Hoffmann, Muenchen : Hanser, 1999