

Spritzen und Nebeln im Farbwerk bei schnelllaufenden Offsetmaschinen

Dilfer, Stefan; Hars, Christoph
(2001)

DOI (TUprints): <https://doi.org/10.25534/tuprints-00013562>

License:



CC-BY 4.0 International - Creative Commons, Attribution

Publication type: Report

Division: 16 Department of Mechanical Engineering
16 Department of Mechanical Engineering

Original source: <https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/13562>

Fachgebiet für Druckmaschinen und Druckverfahren

Technische Universität Darmstadt

Fachgebietsleiter: Prof. Dr.-Ing. Christoph Hars



„Spritzen und Nebeln im Farbwerk bei schnelllaufenden Offsetmaschinen“

von

Stefan Dilfer, Christoph Hars

Darmstadt 2001

FGD-Ergebnisbericht 2001

Vorwort

Der vorliegende Bericht schließt das von der Arbeitsgemeinschaft Industrieller Forschungsvereinigung (AiF) finanziell getragene und unter der AiF-Nr. 11349 N/1 geführte Forschungsvorhaben „Spritzen und Nebeln im Farbwerk bei schnelllaufenden Offsetdruckmaschinen“ ab, das von der FGD - Forschungsgesellschaft Druckmaschinen e. V., Frankfurt, beantragt worden war und über die Laufzeit vom 01. Oktober 1998 bis zum 31. Dezember 2000 von einer Vielzahl der Mitgliedsfirmen der FGD über einen eigens gebildeten Arbeitskreis „Spritzen und Nebeln“ aktiv gefördert wurde. Sachbearbeiter des Forschungsvorhabens war Herr Dipl.-Ing. Stefan Dilfer.

Den Mitgliedern des Arbeitskreises und insbesondere seinem Vorsitzenden, Herrn Dr. Bernhard Fritz, Hartmann Druckfarben GmbH, Frankfurt/M., möchte ich an dieser Stelle für die rege Unterstützung und Teilnahme an dem Forschungsvorhaben herzlichen Dank sagen. Die Mitglieder des Arbeitskreises haben in den Arbeitskreissitzungen mit ihrer freimütigen fachlichen Beratung und reger Diskussion wertvolle Anregung zur Durchführung des Forschungsvorhabens gegeben und haben darüber hinaus auch mit ihren Firmen die für die praktischen Untersuchungen erforderlichen Hilfsmittel stets zuvorkommend zur Verfügung gestellt. Namentlich erwähnen und danken möchte ich Herrn Hans-Jürgen Welt, Gebrüder Schmidt Druckfarben GmbH, Frankfurt/M., für die Bereitstellung der Testfarben, und Herrn Dr.-Ing. Johann Weinert, Felix Böttcher GmbH & Co, Köln, für die zahlreichen Walzensätze mit unterschiedlicher Spezifikation der Walzenbezüge. Weiterhin gebührt mein besonderer Dank Herrn Dipl.-Ing. Manfred Batke, MAN Roland Druckmaschinen AG, Augsburg, für seine zahlreichen Anregungen und seine fachliche Beratung.

Zusammenfassend sei allen beteiligten Organisationen und Personen wie auch den Mitarbeitern des Fachgebiets Druckmaschinen und Druckverfahren an dieser Stelle für ihre Unterstützung bei der Durchführung des Forschungsvorhabens gedankt.

Darmstadt, April 2001

Christoph Hars

	Seite	
1	Einleitung	4
2	Einflussfaktoren auf das Spritzen und Nebeln von Druckfarben	5
3	Begriffliche Trennung der Ausdrücke „Spritzen“ und „Nebeln“ von Flüssigkeiten	7
	<u>Literaturrecherche</u>	
	3.1 Spritzen von Flüssigkeiten	7
	3.2 Nebeln von Flüssigkeiten	11
	3.3 Unterscheidung der Phänomene des „Spritzens“ und „Nebelns“ von Druckfarben	12
4	Versuchsstand zur experimentellen Untersuchung des Spritzens und Nebelns von Druckfarben	14
	4.1 Mechanischer Aufbau	14
	4.2 Messtechnik	15
	4.2.1 Temperaturmessung	15
	4.2.2 Aerosolmessung	16
5	Experimentelle Untersuchungen zum Spritzen und Nebeln von Druckfarbe	22
	5.1 Allgemeingültige Rahmenbedingungen	22
	5.2 Messungen am Filmfarbwerk	23
	5.3 Messungen am Reihen-Versuchs-Farbwerk	25
	5.3.1 Testlauf ohne Feuchtmittel	25
	5.3.2 Messung mit Filmfeuchtwerk	27

5.3.3	Entkopplung der physikalischen Größen „Geschwindigkeit“ und „Temperatur“	31
5.3.3.1	Einfluss der Maschinengeschwindigkeit auf das Farbverhalten	31
5.3.3.2	Einfluss der Temperatur auf das Farbverhalten	34
5.3.3.3	Vergleich der Ergebnisse	37
5.3.4	Einfluss des instationären Betriebszustands auf das Spritzen und Nebeln von Druckfarben	37
5.3.5	Einfluss von Farbschichtdicken auf das Spritzen und Nebeln von Druckfarben	39
5.3.6	IR-Aufnahmen im Reihen-Versuchs-Farbwerk	43
5.3.7	Analyse des nippeinlaufseitigen Farbnebelns	46
5.3.8	Dynamische Eigenschaften von Walzenbezügen	51
5.3.9	Bestimmen der mittleren Partikelgröße auf Mess-Streifen	54
5.3.10	Klassifikation der Einflussparameter nach ihrer Größe	56
6	Zusammenfassung	60
7	Literaturverzeichnis	63

1. Einleitung

Die Steigerung der Produktivität von Rotationsdruckmaschinen wird vorrangig über eine Erhöhung der Druckgeschwindigkeit erreicht, wobei zugleich auch die Anforderungen an die Druckqualität zunehmen. Bei schnelllaufenden Offsetdruckmaschinen wächst dabei die Gefahr der Neigung zum Spritzen und Nebeln der Druckfarbe, was einerseits zu Qualitätseinbußen bis hin zu Makulatur führen oder andererseits über eine reduzierte Druckgeschwindigkeit zu geringerer Produktionsleistung zwingen, schließlich aber auch ein häufigeres Reinigen notwendig machen kann.

Das Forschungsprojekt „Spritzen und Nebeln im Farbwerk bei schnelllaufenden Offsetdruckmaschinen“ galt der Aufgabe, für die Druckmaschinenhersteller, die Zulieferindustrie und die Anwender mit Hilfe von experimentellen Untersuchungen und analytischen Ansätzen Empfehlungen zu entwickeln, um einem Spritzen und Nebeln von Druckfarbe zu begegnen. Als wichtige Einflussgrößen kommen dabei in Betracht: Die zu verwendende Druckfarbe und das Feuchtmittel, die Druckgeschwindigkeit, die Walzendurchmesser und die Walzen-Anpressdrücke, ferner die mechanisch-dynamischen Eigenschaften des Gummituchs und der Gummiwalzen sowie die Umgebungsbedingungen.

Die experimentellen Untersuchungen wurden an einem fachgebietseigenen Reihen-Versuchs-Farbwerk durchgeführt. Dieses bietet zahlreiche, an Produktionsmaschinen nicht gegebene Möglichkeiten zur unabhängigen Variation einzelner drucktechnischer Parameter. Zu seiner Besonderheit zählen

- variable Farb- und Feuchtmittelweglängen,
- die Verwendbarkeit unterschiedlicher Walzendurchmesser,
- das stufenlos einstellbare Drehzahl-Verreiberhub-Verhältnis an sechs temperierbaren Axialverreibern und
- Druckgeschwindigkeiten bis zu 15 m/s.

In einem ersten, vorangehenden Schritt wurde eine Literaturrecherche durchgeführt, um eine klare begriffliche Trennung der Begriffe „Spritzen“ und „Nebeln“ zu erzielen. Als ein weiterer Schwerpunkt in der Vorbereitung der experimentellen Untersuchungen war eine Methode

zur Erfassung und Auswertung der experimentell gewonnenen Farbnebelmengen zu entwickeln.

Der experimentelle Teil des Forschungsvorhabens erstreckte sich über

- die Untersuchung des Spritzens und Nebelns der Druckfarben im instationären Betriebszustand;
- die Untersuchung des Farbverhaltens bei eingangsseitiger Belegung der Dukturwalze mit unterschiedlichen Farbschichtdicken;
- die Untersuchung des Farbverhaltens bei veränderten Maschinengeschwindigkeiten und möglichst gleichbleibenden Walzentemperaturen;
- die Untersuchung des Farbverhaltens bei veränderten Walzentemperaturen und vorgegebenen festen Maschinengeschwindigkeit;
- die Untersuchung des Temperaturverhaltens im Farbwerk mittels IR-Kamera;
- die Charakterisierung des nippeinlaufseitigen und nippauslaufseitigen Farbverhaltens;
- die Untersuchung des Farbverhaltens mit Filmfeuchtwerk.

Die Vermeidung des Farb-Nebelns und Farb-Spritzens in Rollenrotationsdruckmaschinen ist für kleine und mittlere Unternehmen von wirtschaftlicher Bedeutung. Die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens angestellten Untersuchungen konzentrierten sich daher auf die Aufgabe, neue Erkenntnisse zu gewinnen, welche zur Sicherung der stetig steigenden Ansprüche an die Wirtschaftlichkeit und Qualität von Druckerzeugnissen und ihrer Herstellung führen. Damit sollen diese Untersuchungen eine Verbesserung der Arbeitsbedingungen ermöglichen, die sich darin ausdrücken, dass aufwendige Reinigungsarbeiten, Kapselungen und/oder arbeitshygienische Hemmnisse wie Aerosolbildung vermieden werden können. Die Untersuchungen sollen die Grundlage zur Optimierung der Druckmaschinen und/oder Druckprozesse liefern.

2. Einflussfaktoren auf das Spritzen und Nebeln von Druckfarben

Die Phänomene „Spritzen und Nebeln“ treten im Auslauf der Walzenspalte der farbführenden Walzen auf. Beim Verlassen der Walze wird die Druckfarbe geteilt. Es kommt zu Kavitation und Blasenbildung infolge einer schnellen Druckentlastung. Die Haut zwischen den Blasen wird zu Fäden verformt. Wenn die Farbfäden an mehr als an einer Stelle zerreißen, bilden sich aus den Bruchstücken mikroskopisch kleine Tropfen, welche sich als relativ dauerhafter Farbnebel um die Walzen legen können. Entsprechend gilt, je kürzer die erzeugten Fäden sind, desto geringer ist die Anzahl der erzeugten Aerosole /1/. Bei der Ausstoßung größerer Farbtropfen kommt es zum Farbspritzen. Die Ursache kann zum einen in einer zu großen Farbschichtdicke liegen und/oder an einer falschen Einstellung der Druckmaschine /1/. Die Anzahl und Größe der Farbtropfen sowie die Ursachen ihrer Entstehung sind abhängig von mehreren Faktoren:

- der Maschinentemperatur,
- der Farbschichtdicke,
- der rheologischen Eigenschaften der Druckfarbe,
- der Umgebungstemperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit,
- der Walzengeschwindigkeit,
- dem Walzendurchmesser,
- der Walzenanordnung,
- der Wasseremulsion in die Druckfarbe.

Nach /1/ wird vermutet, dass sowohl der Walzendurchmesser als auch die Härte und Zusammensetzung der Walzenbeschichtung einen wichtigen Einfluss auf das Farbverhalten ausüben, da die rheologischen Eigenschaften der Druckfarben bei ihrem Durchlauf durch eine Druckmaschine starken Veränderungen unterworfen sind.

Die aus der Literatur gewonnenen Einflussgrößen wurden von Industrieseite weitestgehend bestätigt. Nach Aussagen aus der Industrie tritt ein Spritzen der Druckfarbe vorwiegend an den Walzenrändern auf, während das Phänomen des Farbnebelns über die gesamte Länge der Walze zu beobachten ist. Direkt nach dem Anfahren der Maschine beginnt die Druckfarbe zu spritzen und zu nebeln, jedoch sei dieser Effekt für das Auge erst nach einer gewissen Maschinenlaufzeit durch anwachsende Farbverschmutzungen in der Druckmaschine erkennbar.

Weiterhin wird bestätigt, dass die materialspezifischen Eigenschaften der Walzenbezüge merklichen Einfluss auf das Farbverhalten in einem Druckprozess haben. Walzenbezüge mit weichen Materialeigenschaften und/oder glatten Oberflächen führen vermehrt zu einem Farbnebeln, während Walzenbezüge mit rauen Oberflächen verstärkt ein Spritzen der Druckfarbe zur Folge haben.

Schließlich wurde von mehreren Seiten betont, dass UV-Farben eher zu einem Nebeln als zu einem Spritzen neigen. Da die Variationsbreite der Bindemittel bei diesen Farben nicht vergleichbar groß ist wie bei konventionellen Druckfarben, können sich die rheologischen Eigenschaften von UV-Farben aus diesem Grunde nicht in der Bandbreite auswirken wie die der konventionellen Druckfarben.

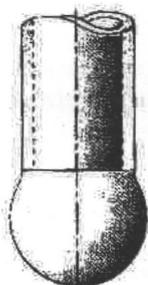
In der Literatur /4, 5, 6, 7/ wird vielfältig und unterschiedlich über den Einfluss der Walztemperatur auf die Farbspaltung und die Druckqualität berichtet. Hier sei nur auf die wichtigsten Darstellungen verwiesen.

3. Begriffliche Trennung der Ausdrücke „Spritzen“ und „Nebeln“ von Flüssigkeiten

Literaturrecherche

3.1 Spritzen von Flüssigkeiten

Vogel /10/ leitet ein „Spritzen“ von Flüssigkeit aus dem Volumen eines Tropfens ab, der sich infolge der Schwerkraft am unteren freien Ende eines senkrecht aufgehängten Röhrchens ablöst. Das Tropfenvolumen kann hierbei aus dem Kräftegleichgewicht zwischen der Schwerkraft und der an dem Rohrumfang wirkenden Oberflächenspannung der Flüssigkeit bestimmt werden. Die Oberflächenspannung wirkt hierbei parallel zur Flüssigkeitsoberfläche. Dabei ist vorausgesetzt, dass die Flüssigkeit gleichmäßig über den Querschnitt verteilt ist und sich der Tropfen direkt am Röhrchenende ablöst.



$$2 \cdot \pi \cdot R \cdot \sigma = V_T \cdot \rho \cdot g$$

$$V_T = \frac{2 \cdot \pi \cdot R \cdot \sigma}{g \cdot \rho} \quad (3.01)$$

R : Radius des Röhrchens

σ : Oberflächenspannung der Flüssigkeit

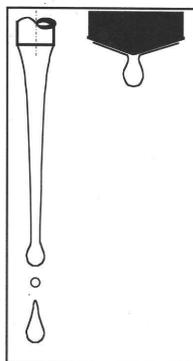
ρ : Flüssigkeitsdichte

Wird in Gleichung 3.01 die Erdbeschleunigung g durch einen Beschleunigungsfaktor a ersetzt, für den im vorliegenden Fall die Zentripetalbeschleunigung auf dem Umfang einer rotierenden Walze eingesetzt wird, so kann die Gleichung 3.01 direkt auf die Frage der zu erwartenden Tropfengröße bei einem Farbspritzen von rotierenden Walzen angesetzt werden:

$$V_T = \frac{2 \cdot \pi \cdot R \cdot \sigma}{a \cdot \rho} \quad (3.02)$$

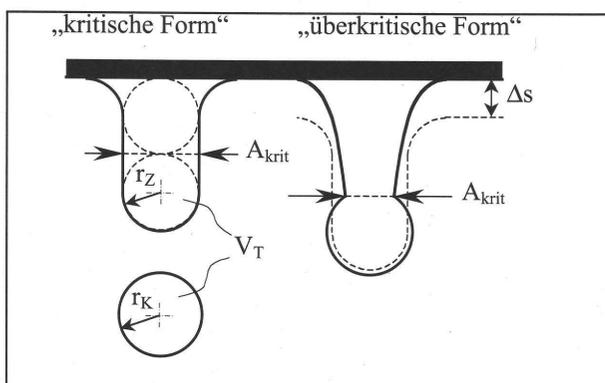
Nach Gleichung 3.02 gilt in einem Farbwerk, dass sich bei niedrigen Maschinengeschwindigkeiten und also geringen Walzen-Umfangsgeschwindigkeiten und folglich vergleichsweise

geringen Zentripetalbeschleunigungen auf den Walzenoberflächen vorzugsweise große Farbtropfen entwickeln, die mit zunehmender Maschinengeschwindigkeit kleiner werden. Da sich dieser Rückschluss mit den experimentell gewonnenen Erkenntnissen nicht allgemein gültig deckt, führt Gleichung 3.02 nur dann zu einer richtigen Aussage, wenn der Ablösequerschnitt des Tropfens dem des Röhrchens entspricht. Bei der freien Tropfenablösung von einer Farbwerkswalze ist jedoch kein fester, an eine geometrische Form gebundener Ablösequerschnitt gegeben. Das Modell einer Tropfenbildung am Ausgang eines Röhrchens ist deshalb auf die hier anstehende Frage nicht übertragbar. Aus diesem Grund wird im Folgenden das Verhalten einer wasserähnlichen Flüssigkeit in einem freien Ausfluss untersucht, um Rückschlüsse auf freie Ablösequerschnitte zu erhalten.



Am Beispiel eines fallenden Wasserstrahls zeigt sich nach Vogel /10/, dass sich der Wasserstrahl zunächst einschnürt, bis sein Querschnitt eine kritische Größe erreicht und in Tropfen zerfällt. Auch ein an einer waagrechten Fläche hängender Tropfen besitzt eine bestimmte Trennfläche, aus der er sich löst. Der Radius R des Ablösequerschnitts folgt hier aus dem Tröpfchengewicht und der Oberflächenspannung der Flüssigkeit: $R = R(_)$. Das Eigengewicht des Tropfens muss hierbei die Kraft überwinden, die ihn an dem Objekt hält.

Für eine Flüssigkeit resultiert diese aus der Oberflächenspannung in der kritischen Umrandung, für einen festen Körper ist das die resultierende Kraft, die sich aus der flächenbezogenen Spannung in dem Querschnitt ergibt, aus dem die Trennung stattfindet.



Bisher wurde der Ablösequerschnitt durch die Geometrie des Röhrchens vorgegeben /10/. Bei der freien Tropfenablösung senkrecht zu einer ebenen Fläche hingegen bildet die Flüssigkeit diesen selbst. Man kann hierfür eine kritische Flüssigkeitsdeformation angeben, bei der sich der Querschnitt zwischen den späteren Tropfen und der haftenden Flüssigkeit einzuschnüren beginnt und die Tropfenablösung nicht mehr aufzuhalten ist

/14/. Sobald diese kritische Form erreicht ist, ist ein statisches Gleichgewicht nicht mehr möglich, die Einschnürung des Querschnitts nimmt bis zum Abriss der Flüssigkeitssäule zu. Der untere Teil fällt als Tropfen ab. Dabei trachtet er sich zugleich zu einer Kugelform zu-

sammenzuziehen, dem aber der Luftwiderstand aus der zunehmenden (Fall-)Geschwindigkeit entgegenwirkt. Über den kritischen Querschnitt findet im Verlaufe der Abtrennung kein Massenaustausch statt. Im oberen Teil, dessen unteres Ende nach der Trennung der Flüssigkeitssäule zunächst zurückschnellt, ist allerdings ein Nachfließen der Flüssigkeit möglich /18/.

$$\frac{2}{3} \cdot \pi \cdot r_z^3 + \pi \cdot r_z^2 \cdot r_z = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r_K^3 \quad (3.03)$$

$$\frac{5}{3} \cdot r_z^3 = \frac{4}{3} \cdot r_K^3 \quad (3.04)$$

$$r_K = \frac{1}{2} \cdot \sqrt[3]{10} \cdot r_z = 1,077 \cdot r_z \quad (3.05)$$

$$r_K \sim r_z \quad (3.06)$$

Während im statischen Gleichgewicht die Oberflächenspannung eine Flüssigkeitssäule hält, werden während des Trennvorgangs sowohl Trägheits- als auch Zähigkeitskräfte wirksam. Dies wird mit der Weberzahl „We“ ausgedrückt. Grundsätzlich kann für unterschiedliche „We“ zwischen einer Tropfen-, Faden- oder Lamellenablösung unterschieden werden /18/.

Des Weiteren besteht auch die Möglichkeit, dass fallende Flüssigkeitstropfen durch den Luftwiderstand zerblasen werden, wenn der Staudruck für den zusammenhängenden Tropfen größer wird als der an seiner Oberfläche wirksame innere Druck /10/.

Über das Spritzen einer Flüssigkeit kann zusammenfassend Folgendes ausgesagt werden:

„Spritzer sind Tropfen, die fortgeschleudert werden, die in der Luft nicht in der Schwebe bleiben. Ihre Größe ergibt sich aus der Oberflächenspannung der Flüssigkeit, aber

auch aus ihrem viskosen Verhalten und aus den auf die Flüssigkeit bei ihrem Ablösen wirkenden Beschleunigungen. Mit zunehmender Beschleunigung werden die Spritzer kleiner.

3.2 Nebeln von Flüssigkeiten

Viele Quellen /9,16,19,20/ bezeichnen Flüssigkeitsnebel als Aerosole, die flüssige Schwebeteilchen enthalten. Diese Nebeltröpfchen haben hierbei einen Durchmesser von etwa 0,02 mm /9/. Das Schweben kann man als einen Zustand beschreiben, bei welchem die Auftriebskraft der Gewichtskraft das Gleichgewicht hält /10,16,20/.

Da die Sinkgeschwindigkeit für kleiner werdende Teilchen abnimmt, muss die Möglichkeit in Betracht gezogen werden, dass es ein „Haften in der Luft“ gibt. Dagegen spricht, dass die Möglichkeit besteht, dass es beim Auftreten von Nebel zu einem Niederschlagen der Aerosole kommen kann, der Boden wird feucht /19/. Dieses Absinken der Nebeltropfen, zeigt die Grenzen der o.g. Definition der Schwebeteilchen auf.

Eine weitere Möglichkeit, den Flüssigkeitsnebel zu definieren, wäre: „In der Schweben halten“. D.h., für einen Tropfen stellt sich eine maximale Sinkgeschwindigkeit ein, bei der er nicht weiter zerblasen wird. Diese Annahme findet Verwendung bei gewöhnlichen Regentropfen, sodass auch diese Definition nur schlecht für Farbnebel verwendet werden kann /10, 16/.

Nach Sigloch (1.3.2 /15/) und Prandtl (6.4 /17/) kann man Folgendes über die Nebeltropfen aussagen:

„Wird eine Flüssigkeit mit Luft vermischt, sodass ein weitgehend homogenes Gemisch entsteht, für das annähernd die Gesetze einer einphasigen Strömung gelten, so sind die darin enthaltenen Flüssigkeitsteilchen Nebeltropfen“.

Die hier behandelten Nebeltropfen sind Farbfragmente, die sich infolge der Reibung mit der Luft abgelöst haben. Als anschauliches Beispiel dient hierzu ein einfacher Tropfen, der sich

durch einen Raum bewegt. Im Vakuum muss dieser Tropfen seine Kugelform beibehalten. Bei einem mit Luft gefüllten Raum hingegen bildet der Tropfen seine charakteristische Tropfenform aus. Die sich am Ende des Schweißes ablösende Flüssigkeitsmenge mischt sich mit der umliegenden Luft. Gleiches gilt für jede Flüssigkeit, die sich in einer Relativbewegung mit der Luft befindet. Entscheidend für die Bildung von Nebeltropfen und deren Größe sind der Betrag der Relativgeschwindigkeit und die viskosen Eigenschaften der Flüssigkeit. Aber auch die Homogenität der Flüssigkeit ist hierbei von Bedeutung. Technische Anwendung findet dieses Prinzip z.B. in Aerosol-Geräten.

3.3 Unterscheidung der Phänomene des „Spritzens“ und „Nebeln“ von Druckfarben

Zu einem großen Teil rechnet man in der Literatur dem Phänomen „Nebeln von Druckfarben“ die bei einem Druckvorgang relativ fein verteilten Farbpartikel zu, die sich in der Luft halten; diese Partikel weisen überwiegend die Form einer Kugel auf /8, 9, 10/. Nach /8/ besteht die hauptsächliche Ursache für das Ablösen feiner Farbpartikelchen aus einem Farbfilm in den elektrostatischen Aufladungen der Druckfarbe beim Abheben der Druckform vom Bedruckstoff. Die Größe der Farbpartikel ist hierbei wesentlich geringer als beim Spritzen der Druckfarbe.

Von einem Spritzen bei Druckfarbe spricht man allgemein dann, wenn sich in einem Fortdruck Farbspritzer zeigen: Meist werden diese Farbtropfen von den Druckformen abgeschleudert /8/. Sie besitzen im Wesentlichen eine „Komma“-Form. Das Spritzen der Druckfarben tritt besonders dort auf, wo die Druckfarben nur in sehr geringem Anteil Pigmente aufweisen oder mit ungeeigneten Firnissen angerieben worden sind. Weiterhin macht sich nach Weschke /8/ oft ein Spritzen der Druckfarben beim Drucken mit harten, abgenutzten Farbwalzen bemerkbar. Ebenso können eine zu hohe Farbführung oder Farbwalzen mit einem sehr kleinen Durchmesser oder eine zu große Druckgeschwindigkeit die Ursache von Farbspritzen und Farbnebeln sein. Abhilfe kann mitunter durch eine Erhöhung der Luftfeuchtigkeit und der Temperatur im Drucksaal erreicht werden /8/.

Farbspritzer sind demnach Farbmassen, die sich aufgrund der mit der Walzenrotation einhergehenden Beschleunigung ablösen. Die Tropfengröße wird hier weitgehend durch die Oberflächenspannung bestimmt. Die Anzahl der Tropfen resultiert bei gleichbleibender Rotation und damit gleichbleibender Beschleunigung aus der Dicke der Farbschicht.

Der Unterschied zwischen Spritz- und Nebeltropfen liegt zum einen darin, dass die Nebeltropfen die Geschwindigkeit der umgebenden Luft annehmen und die Farbspritzer mit der Umfangsgeschwindigkeit der Walzen fortgeschleudert werden. Durch das Auffangen der emittierten Farbpartikel mit Hilfe eines Papierstreifens lässt sich der Unterschied auf einfache Art und Weise zeigen. Nebeltropfen schlagen sich in kreisrunder Kontur nieder, während die Farbspritzer gegen den Papierstreifen prallen, dabei zerplatzen und sich dadurch in einer zerklüfteten Kontur niederschlagen.

Luftströme können durchaus auch größere Flüssigkeitsmengen ablösen. Sofern diese nicht gleich vernebelt werden, sinken sie zu Boden, sobald ihre Eigengeschwindigkeit abgebaut ist. Unter Nebeltropfen versteht man daher nur solche Flüssigkeitsteilchen, die so klein sind, dass sie nur schwer die Luftmoleküle verdrängen können. Auf Änderungen der Luftbewegung reagieren diese Teilchen sehr schnell, so dass die Differenzen in der Relativbewegung nicht mehr ausreichen, sie weiter zu zerteilen. Die Größe der Nebeltropfen wird somit hauptsächlich aus der Festigkeit und der spezifischen Masse der Farbe und aus der Luftdichte bestimmt.

Die Trennung zwischen „Nebeln und Spritzen“ ist fließend, denn auch Farbspritzer können zumindest theoretisch so klein werden, dass sie von der Luft bis zum Schwebezustand abgebremst werden und nicht mehr von den Nebeltropfen zu unterscheiden sind. Die Abgrenzung verlangt dann zusätzliche Vereinbarungen.

Zusammenfassend lässt sich folgende Aussage treffen. Die durchgeführte Literaturrecherche führte zu keiner eindeutigen Trennung des Phänomens „Spritzen“ und „Nebeln“ von Druckfarben. Das Phänomen konnte jedoch in drei mögliche Zustände unterteilt werden.

1.) Nebeln von Flüssigkeiten:

Die Farbpartikel befinden sich in einem Schwebezustand in der Luft.

2.) Spritzen von Flüssigkeiten:

Die Farbpartikel folgen der Erdanziehung.

3.) Zwischenzustand:

In diesem Zustand können die beiden Phänomene „Spritzen“ und „Nebeln“ nicht eindeutig voneinander getrennt werden.

4 Versuchsstand zur experimentellen Untersuchung des Spritzens und Nebelns von Druckfarben

4.1 Mechanischer Aufbau

Die experimentellen Untersuchungen erfolgten an einem aus einem früheren Forschungsvorhaben vorhandenen Reihen-Versuchs-Farbwerk. Mit seinen fliegend gelagerten Farbwerkswalzen bietet diese Versuchsmaschine eine besonders gute Zugänglichkeit aller potentiellen Messpunkte. Da sie sich zudem aus nur wenigen Grundmodulen zusammensetzt, ist sie sehr flexibel gestaltbar. Zum einen besitzt sie ein Druckwerksmodul, das aus einem Plattenzylinder, einem kanalfreien Gummituchzylinder und einem Gegendruckzylinder besteht. An den Gegendruckzylinder lässt sich ein Rakel anstellen, das anstelle einer Papierbahn die durch die Maschine laufende Druckfarbe abzunehmen gestattet. Des Weiteren umfasst das Reihen-Versuchs-Farbwerk sechs senkrecht übereinander angeordnete Verreiberwalzen-Module, deren mit Rilsan beschichteten Verreiberwalzen einzeln temperierbar sind. Zwischen zwei Axialverreibern lassen sich wahlweise ein oder zwei – in diesem Fall parallel angeordnete - Gummiwalzen einsetzen. Schließlich umfasst das Reihen-Versuchs-Farbwerk ein Filmfarbwerk, das mit seinem separat angetriebenen Duktur die Farbeinbringung sehr variabel zu halten ermöglicht, und weiter ein Filmfeuchtwerk, das an verschiedenen Positionen angebracht werden konnte.

Insgesamt ergab und ergibt sich eine Vielzahl von Möglichkeiten zur Ausgestaltung einzelner Versuchsanordnungen. Ergänzend wurden die zur Verfügung stehenden Gummiwalzen durchnummeriert, womit sie innerhalb einer Versuchsreihe gezielt vertauscht oder in ihrer Positionierung sicher beibehalten werden konnten. Da sie jeweils weg- und nicht kraftbetont zugestellt sind, sichert eine feste Positionierung der Gummiwalzen, dass sich bei einer vorgegebenen Konfiguration des Reihen-Versuchs-Farbwerks die Anpressung der einzelnen Gummiwalze gegen ihre beiden jeweils benachbarten Verreiberwalzen nicht aufgrund geänderter Voreinstellung von Versuch zu Versuch ändern konnte. Andernfalls wäre eine negative, kaum kalkulierbare Beeinflussung der Messergebnisse nicht auszuschließen gewesen.

Das Druckwerk und die Verreiberwalzen werden durch einen gemeinsamen Hauptantrieb angetrieben. Im Unterschied zu einer üblichen Produktionsmaschine ist der Axialhub der Ver-

reiberwalzen mit einem separaten Antrieb ausgerüstet. Dies bietet die Möglichkeit, den Einfluss des Drehzahl-Hub-Verhältnisses auf das Spritzen und Nebeln der Druckfarben im Detail zu untersuchen. Wie ausgeführt, dient zur Farbübertragung ein Filmfarbwerk, zur Übertragung des Feuchtmittels ein Filmfeuchtwerk. Sowohl das Filmfarbwerk als auch das Filmfeuchtwerk haben jeweils einen eigenen Antrieb. Dies erlaubt es, die Feuchtmittel- bzw. Farbzufuhr alleine durch die jeweilige Duktorgeschwindigkeit zu dosieren. Filmfarbwerk und Filmfeuchtwerk lassen sich an unterschiedlichen Positionen in der Versuchseinrichtung ansetzen.

4.2 Messtechnik

4.2.1 Temperaturmessung

Die Messung der Temperaturverläufe erfolgte mit einem Strahlungspyrometer der Firma Heitronics. Dieses Gerät misst die von den Walzenoberflächen emittierten Infrarotstrahlungen und gibt die aufgenommenen Messwerte als Objekttemperatur aus.

4.2.2 Aerosolmessung

Zur Messung der emittierten Farbpartikel an den Walzenspalten standen acht Mess-Stellen zur Verfügung (Abbildung 4.1). Nippeinlaufseitig wurde an den Mess-Stellen 1E, 2E, 3E und 4E gemessen, nippauslaufseitig an den Mess-Stellen 1A, 2A, 3A und 4A. Das Auffangen der aus den Walzennipps austretenden Aerosole erfolgte mittels Mess-Streifen, welche längs der Walzenkontaktlinien in einem jeweils fest definierten Abstand von diesen positioniert waren (Abbildung 4.1). Weiterhin konnte durch eine zusätzliche, sich oberhalb des Filmfarbwerks befindliche Mess-Stelle die Farbübertragung im Farbkasten untersucht werden. Ziel der Mes-

sungen sollte sein, konkrete Aussagen bezüglich des Orts der Entstehung und der Intensität des Spritzens und Nebelns der Druckfarben an den unterschiedlichen Stellen im Farbwerk zu erhalten.

Probemessungen, die mit unterschiedlichen Maschinengeschwindigkeiten erfolgten, zeigten, dass sich das nippeinlaufseitige Farbnebeln deutlich von dem nippauslaufseitigen unterscheidet. Die Abbildungen 4.2 und 4.3 veranschaulichen die wesentlichen Merkmale und Unterschiede der Messergebnisse an den einzelnen Walzennipps.

Auf den Mess-Streifen kam es zur Ausprägung von vier verschiedenen Farbzonen, deren Farbintensitäten von der Mess-Stelle und der Maschinengeschwindigkeit abhängig waren. An den auslaufseitigen Walzennipps bildeten sich über die Messdauer auf den Mess-Streifen drei charakteristische Farbzonen aus. Farbzone „A“ an den Walzenenden, Farbzone „B“ walzenmittig und Farbzone „C“ am maschinenseitigen Walzenende der Axialverreiber. Nippeinlaufseitig bildete sich Farbzone „D“ in der Walzenmitte.

Mit Bezug auf Untersuchungen von Hermanies /2/ kann Farbzone „A“ auf Schleppestromungen der Gummiwalzen zurückgeführt werden, welche in entgegengesetzter Drehrichtung zum Axialverreiber die Druckfarbe zum Ausgang des gemeinsamen Walzennipps befördern. Hierbei bilden sich infolge der Rotation der Gummiwalzen an ihren Stirnflächen intensive Luftströmungen aus, welche durch die mit den Walzen mitgeführte Schleppestromung verursacht

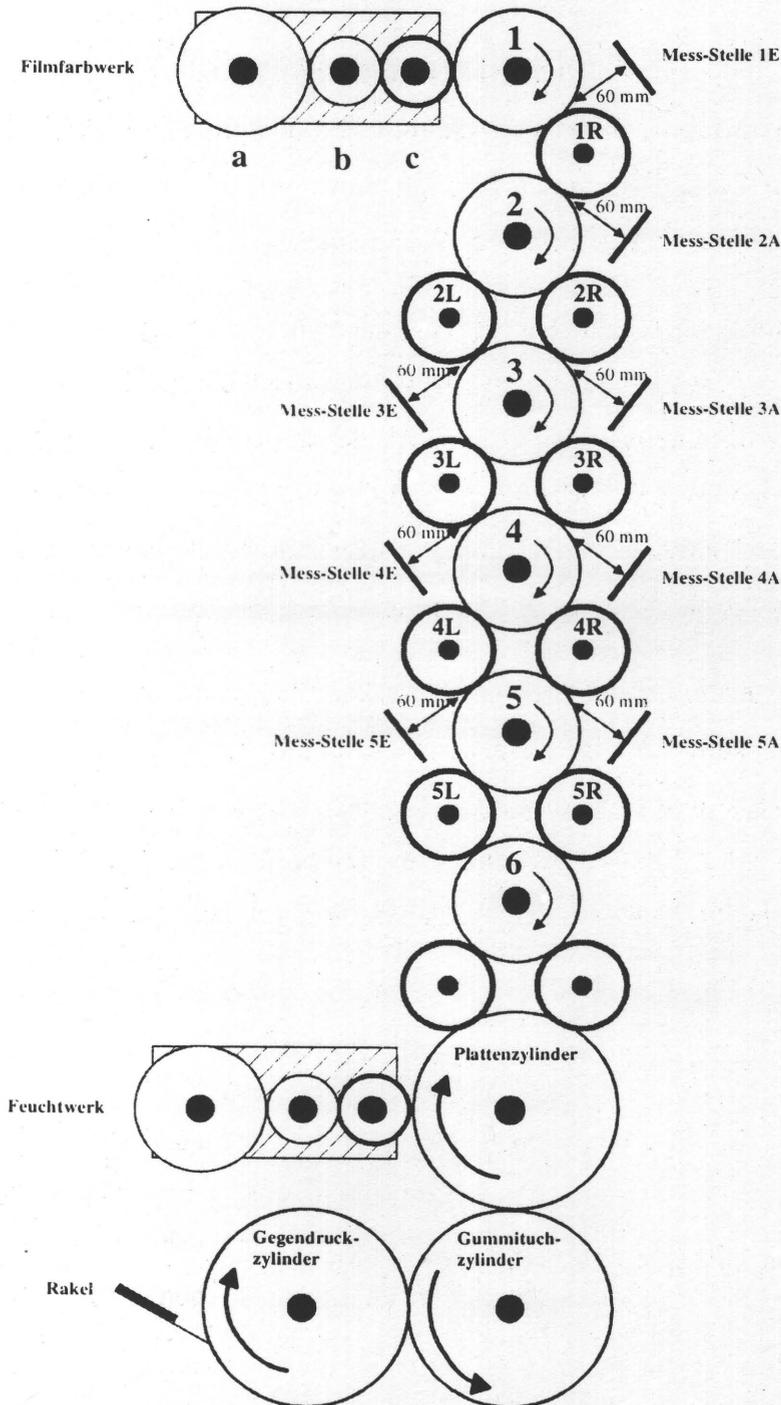


Abbildung 4.1: Schematischer Versuchsaufbau zur Untersuchung der Druckfarben-Eigenschaften unter Verwendung von Mess-Streifen

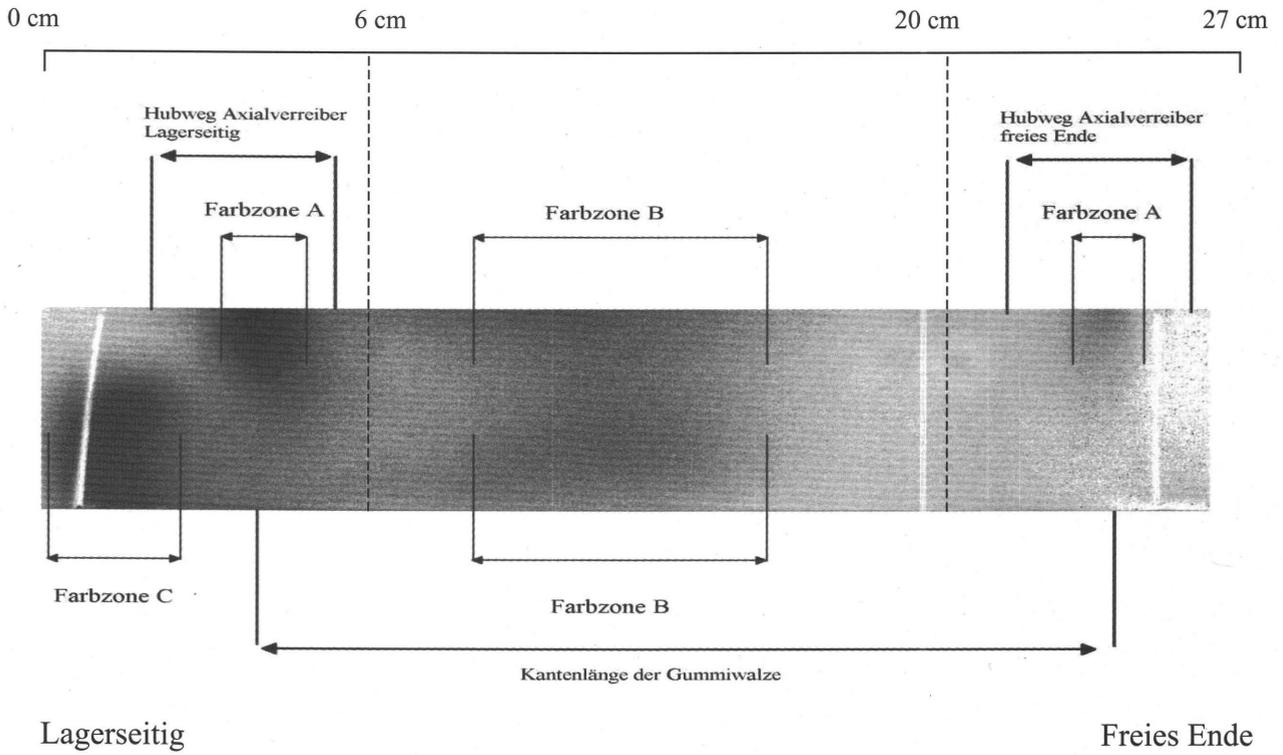


Abbildung 4.2: Spritzen und Nebeln der Druckfarbe am Beispiel einer Auslaufzone

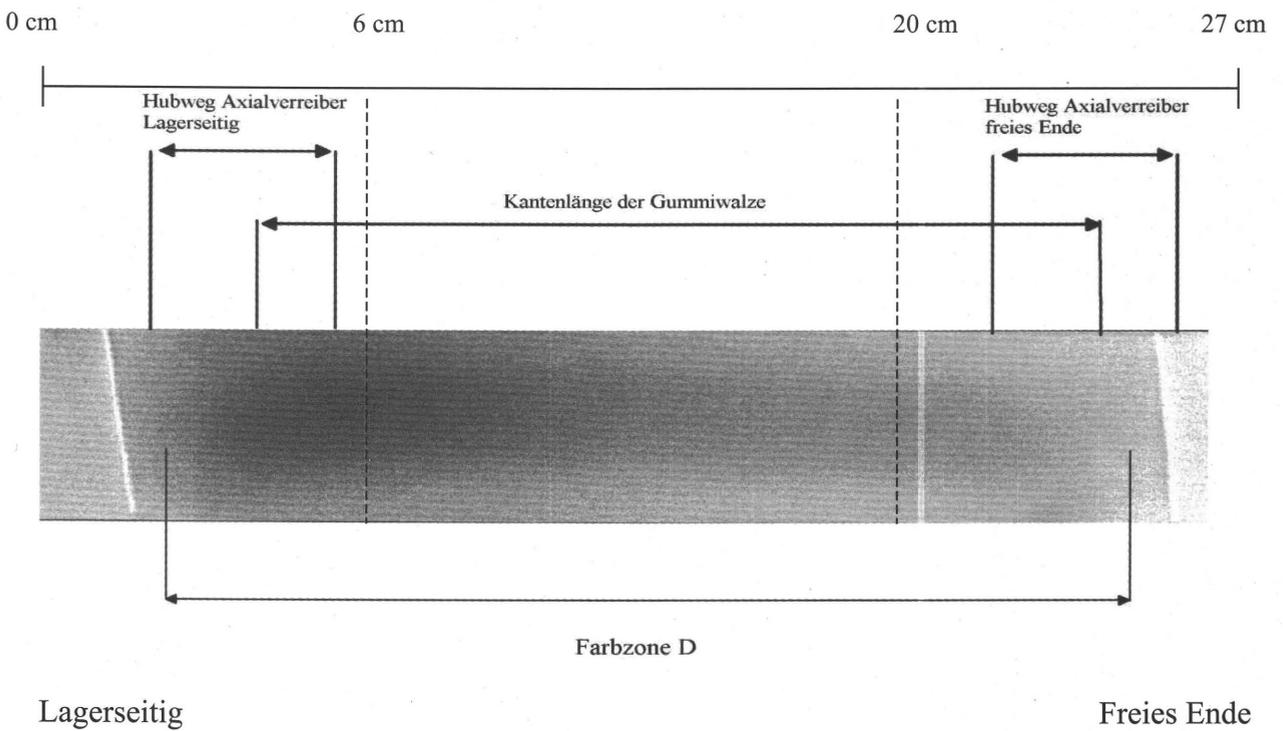


Abbildung 4.3: Spritzen und Nebeln der Druckfarbe am Beispiel einer Einlaufzone

werden. Gleichzeitig verursacht die Rotation über die Zylinderfläche der Gummiwalzen eine zweite Schleppestromung. Diese beiden Schleppestromungen beeinflussen sich an den Walzenrändern. Es kommt zu einer Verwirbelung der Luft und somit zu einer vermehrten Farbabstoußung. Mit steigender Maschinengeschwindigkeit führte dies zu einem Anwachsen der Farbzonen „A“ auf den Mess-Streifen.

In Abbildung 4.2 ist weiterhin zu erkennen, dass die Farbmengen der Farbzonen „A“ an beiden Walzenenden unterschiedlich ausgeprägt sind. Der Grund ist in der stärkeren Erwärmung der Walzen am maschinenseitigen Walzenende zu suchen. Trotz Temperierung der Verreiberwalzen gelang es nicht, ausgeglichene Temperaturverhältnisse längs der Walzenachsen zu erzielen.

Eine Farbzone „B“ in Abbildung 4.2 stellte sich erst ab Maschinengeschwindigkeiten von 7 m/s ein, für kleinere Maschinengeschwindigkeiten kam es lediglich zur Ansammlung eines gleichverteilten Farbnebels. Den Grund für dieses Farbverhalten veranschaulicht Abbildung 4.4. An einem nippauslaufseitigen Walzenspalten herrscht ein Luft-Unterdruck, da die rotierenden Walzen Luft mitschleppen. Im Gefolge dessen strömt von den beiden Walzenstirnseiten Luft nach /2/. Diese von der Umgebung angezogene Luft baut die Schleppestromung über der Zylinderoberfläche auf, die sich in Walzenmitte am ungestörtesten ausprägt. Die Stärke der Schleppestromung ist dabei abhängig von der Maschinengeschwindigkeit. Mit steigender Maschinengeschwindigkeit schlagen sich zunehmend die von der Schleppestromung mitgeführten Farbpartikeln auf den Mess-Streifen im Bereich der Farbzone „B“ nieder.

Die Farbzone „C“ aus Abbildung 4.2 lässt sich auf eine Überlagerung der Verwirbelungen der Staustromungen an den Walzenrändern und den resultierenden Luftströmungen infolge der Hubbewegung der jeweiligen Axialverreiber zurückführen. Messungen haben gezeigt, dass eine Veränderung des Hub-Zeitverhältnisses eine Änderung des Farbniederschlags auf den Mess-Streifen bewirkt.



Abbildung 4.4: Schnittdarstellung von Schlepplströmungen an rotierenden Walzengruppe mit Stau- und Zugströmungen nach /2/

An einem nippeinlaufseitigen Walzenspalt werden die von den beiden Zylinderoberflächen mitgeführten Schlepplströmungen bis in unmittelbare Nähe des nachfolgenden Walzenspalts mitgeführt und dann als Stauströmungen von dem Walzenspalt zur Seite in Walzenballenrichtung weggedrängt, wie Abbildung 4.4 verdeutlicht. Hierbei kommt es zu einer Verwirbelung der Luft, die über die gesamte Walzenlänge nahezu gleichmäßig erfolgt /2/. Das Ergebnis dieser Verwirbelungen ist in Abbildung 4.3 in Form der Farbzone „D“ zu erkennen. Auch diese Farbzone „D“ stellte sich erst ab Maschinengeschwindigkeiten von 7m/s ein. Bei geringeren Geschwindigkeiten zeigte sich nur ein leichter, gleichmäßig verteilter Farbnebel auf den Mess-Streifen.

Um die auf den Mess-Streifen niedergeschlagenen Farbnebel mengen beziffern zu können, wurde eine „Nebelzahl“ definiert und eingeführt. Diese wurde aus den mittleren Graustufen der auf den Mess-Streifen gemessenen Farbnebel niederschläge abgeleitet. Der mittlere Graustufenwert konnte mit Hilfe eines Scanners und einer Digitalisierung der Farbdichte aus den niedergeschlagenen Farbpartikeln gewonnen werden. Da nicht alle Farbpartikel eindeutig aus einem Farbnebel niederschlag ohne Farbspritzer zurückzuführen waren, sondern dies nur für jene Farbpartikel erwartet werden konnte, die sich im Bereich der Farbzone B ablagerten,

wurden ausschließlich diese bei der Bestimmung des mittleren Graustufenwerts berücksichtigt. Die Auswertung des Farbniederschlags erfolgte daher zwischen Zentimeter 6 und Zentimeter 20 auf den Mess-Streifen (Abbildung 4.2 und Abbildung 4.3).

Um einen Farbnebelniederschlag skalenmäßig korrekt mit Hilfe eines Scanners bewerten zu können, müssen die Geräteeigenschaften des Scanners bekannt sein, da sie die Güte und somit Aussagekraft der mit einer Bildabtastung gewonnenen Grafikdateien bestimmen. Der Scanner misst punktweise die Farbwerte des durch eine Durchsichtsvorlage fallenden Lichts bzw. des von einer Aufsichtsvorlage reflektierten Lichts in 255 Graustufen und speichert diese Werte in einer Datei – der Grafikdatei. Die Qualität eines gescannten Bildes richtet sich somit u. a. erheblich nach der Qualität des optischen Systems im Scanner.

In unserem Fall handelt es sich um einen CCD-Flachblattscanner vom Typ Linotype SA-PHIR. Dieser Scanner bietet eine optische Auflösung von 600 * 1200 dpi und eine Datentiefe von 36 Bit.

Die Digitalisierung eines Bildes erfolgt durch dessen pixelweise Abtastung, und jedes Pixel wird mit seinen Intensitäten in den vier Grundfarben des Druckens (drei Buntfarben und ein Grauton) registriert. In einem 8-Bit-System kann damit jedem Pixel eine von 256 verschiedenen Graustufen zugeordnet werden. Der Grauwert entspricht 0 schwarz, der Grauwert 255 weiß. Diese Graustufenwerte werden als Matrix in Grafikdateien abgelegt. Im vorliegenden Fall ist die Länge des Spaltenvektors ein Maß für die Breite des Mess-Streifens, die Länge des Zeilenvektors ist ein Maß für die Länge des Mess-Streifens.

Damit die hier eingeführte und verwendete Nebelzahl mit zunehmendem Farbnebeln und damit kleiner werdenden Graustufenwerten zunimmt, wurde sie aus der Differenz des maximal möglichen Graustufenwertes 255 und des jeweils ermittelten mittleren Graustufenwerts der Farbzone B gebildet:

$$\text{Nebelzahl} = 255 - \text{mittlerer Graustufenwert der Farbzone B}$$

5 Experimentelle Untersuchungen zum Spritzen und Nebeln von Druckfarbe

5.1 Allgemeingültige Rahmenbedingungen

Um für alle Messungen eine weitestgehend gleiche Ausgangssituation zu gewährleisten, wurde die Versuchsdruckmaschine vor dem Beginn einer Messreihe 45 Minuten im Leerlauf mit angestellten Walzen betrieben. Die Raumtemperatur in der Versuchsstätte lag zum Zeitpunkt aller Messungen im Bereich zwischen 22°C und 24°C. Die relativen Luftfeuchtigkeiten beliefen sich auf Werte zwischen 37% und 60%.

Für die Testläufe wurde ausschließlich eine Modellfarbe verwendet. Es handelte sich um die von der Firma Gebr. Schmidt Druckfarben GmbH zur Verfügung gestellte, im Zeitungsdruck eingesetzte Offsetdruckfarbe, Ro-zet Skalenblau Typ B. Sämtliche Testläufe wurden mit Gummiwalzen von 90 mm Walzendurchmesser gefahren. Das verwendete Feuchtmittel bestand aus einem einmalig festgelegten Gemisch aus Wasser, Alkohol und Zusatzmittel.

Die Walzentemperaturen wurden pro Versuchsdurchgang sowohl auf den Oberflächen der Duktur-, Raster- und Gummiwalze im Filmfarbwerk als auch auf den Oberflächen der Verreiberwalzen und Gummiwalzen im Reihen-Versuchs-Farbwerk aufgenommen und zwar jeweils an den Walzenenden. Diese Zweipunktmessung wurde gewählt, da es aufgrund der fliegenden Walzenlagerung zur Ausbildung von Temperaturprofilen in Axialrichtung kam.

5.2 Messungen am Filmfarbwerk

Der Farbtransport innerhalb des Filmfarbwerks erfolgte von der Dukturwalze über eine Rasterwalze auf die Gummiwalze und von dieser auf die erste Verreiberwalze im Versuchsfarbwerk. Da die Umlaufgeschwindigkeiten der Dukturwalze und der Rasterwalze um einen Faktor 10 bis 50 geringer eingestellt war als die Umlaufgeschwindigkeit der Farbwerkswalzen, war im Bereich der Farbübertragung vom Filmfarbwerk zur ersten Verreiberwalze des Reihen-

Versuchs-Farbwerks mit einem erheblichen Spritzen und Nebeln der Druckfarbe zu rechnen. Die Messungen erfolgten hierzu bei Maschinengeschwindigkeiten von 3, 7, 11 und 15 m/s.

Über den Zeitraum der Messung von jeweils 15 Minuten wurden die Umlaufgeschwindigkeiten der Duktur- und der Rasterwalze konstant auf 0,3 m/s gehalten. Die Oszillation der Axialverreiber war mit 20 Hub pro Minute eingestellt. Das Farbnebeln und -spritzen am Filmfarbwerk wurde mit Hilfe eines Papierbogens erfasst, der in einem Abstand von 50 mm oberhalb der Walzen positioniert war.

Das Messergebnis bestätigte die Vermutung, dass ein Spritzen und Nebeln der Druckfarbe zu einem Großteil bei der Farbübertragung zwischen Filmfarbwerk und der ersten Verreibewalze des Reihen-Versuchs-Farbwerks auftrat. Die jeweils aufgefangenen Farbmengen hingen zum einen stark ab von dem Anpressdruck zwischen der Gummiwalze des Filmfarbwerks und dem ersten Axialverreiber des Reihen-Versuchs-Farbwerks und andererseits von deren Geschwindigkeitsdifferenz. Eine zu starke Anpressung führte zu einer überproportional hohen Erwärmung der Gummiwalze im Filmfarbwerk. Dies wiederum führte zu einem vermehrten Farbnebeln in der gesamten Versuchsdruckmaschine.

Abbildung 5.1 veranschaulicht und bekräftigt dieses Ergebnis. Aufgrund des direkten Kontakts zwischen der Gummiwalze des Filmfarbwerks und dem ersten Axialverreiber im Farbwerk kommt es im Vergleich zu den beiden anderen Walzen des Filmfarbwerks zu einem überproportional starken Anwachsen der Temperaturen in der Gummiwalze, was ein vermehrtes Farbnebeln und -spritzen aus der Kontaktzone des Walzenpaares bewirkt. Abbildung 5.1 verdeutlicht weiterhin, dass die Raster- und die Dukturwalze des Filmfarbwerks nur geringfügig von den mit einer Geschwindigkeitsänderung verbundenen Temperaturveränderungen im Reihen-Versuchs-Farbwerk beeinflusst werden.

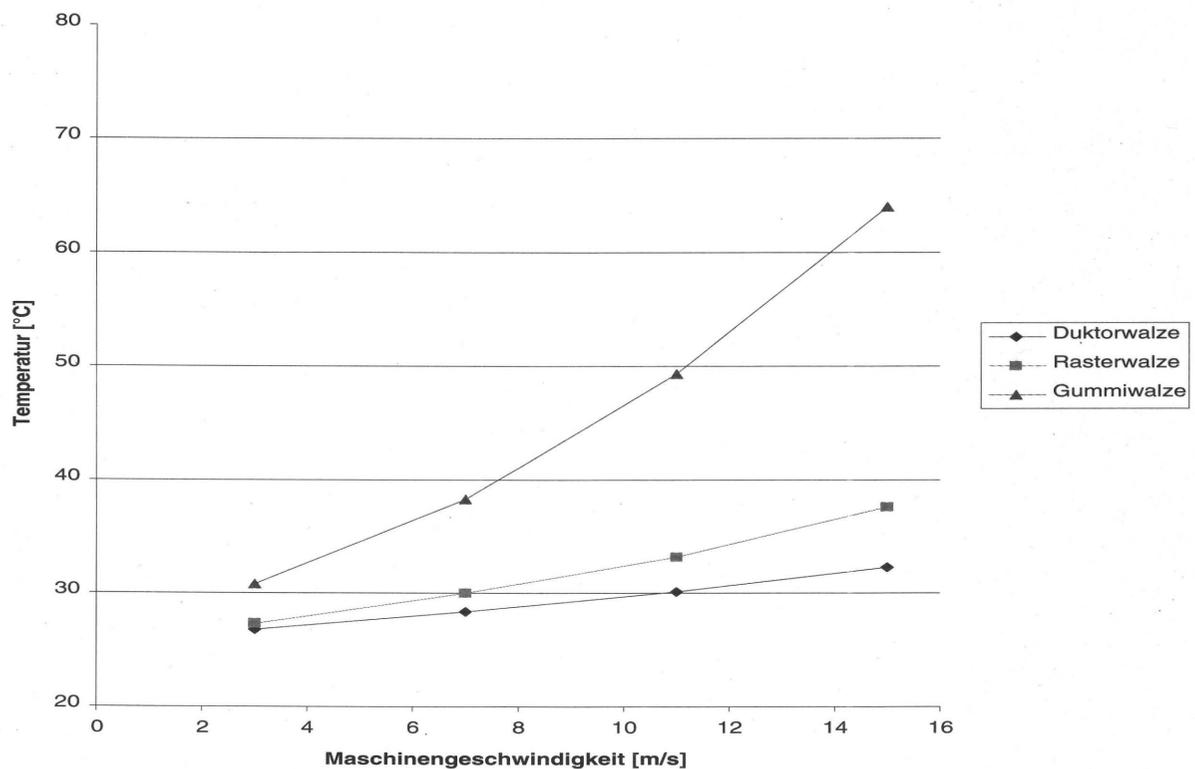


Abbildung 5.1: Mittlere Temperatur der Walzen im Filmfarbwerk

5.3 Messungen am Reihen-Versuchs-Farbwerk

5.3.1 Testlauf ohne Feuchtmittel

Um mit den üblichen pastösen Druckfarben gleichmäßig dünne Farbschichten auf den Farbauftragswalzen zu erreichen, benötigt bekanntlich ein Offsetfarbwerk eine im Vergleich zu anderen Druckverfahren größere Anzahl von Farbwerkswalzen. Der Antrieb dieses Walzensystems erfordert einen erheblichen Energieaufwand. Die elektrische Antriebsenergie wird bei der Farbspaltung in den Kontaktzonen der Walzen unter Verrichtung von Formänderungsarbeit fast ausschließlich in Wärme umgewandelt. Es kann dadurch zu einer merklichen Erwärmung der Farbwerkswalzen kommen, die mit längeren Maschinenlaufzeiten durchaus Temperaturen von 50 bis 60°C erreichen /4/. Die merkliche Erwärmung wird begleitet von Tempe-

raturprofilen in Farbtransport- und Breitenrichtung, was sich – wie gezeigt – zusätzlich erheblich auf den Farb- und Feuchtmitteltransport auswirken kann.

Im Folgenden wird das Temperaturverhalten im Reihen-Versuchs-Farbwerk exemplarisch an einer Versuchsreihe erläutert und diskutiert. Die Messungen wurden bei Maschinengeschwindigkeiten von 3, 7, 11 und 15 m/s über einen Zeitraum von jeweils 15 Minuten vorgenommen. Die Verreiberwalzen wurden mittels Farbreibertemperiergerät auf einer Temperatur von 25°C gehalten.

Mit zunehmender Maschinengeschwindigkeit erhöhte sich die Oberflächentemperatur der Gummiwalzen merklich (Abbildungen 5.2); zusätzlich zeigte sich eine deutliche und mit der Maschinengeschwindigkeit zunehmende Temperaturdifferenz zwischen den Walzenenden der Gummiwalzen. Diese Temperaturdifferenz führt zur Bildung eines Temperaturprofils längs der Walzenachse, welches die Viskosität der Druckfarbe im Walzennipp ungleichmäßig verändert. Abweichungen der Farbtransportbedingungen längs des Walzennipps sind die Folge und damit ein ungleichmäßiges Farbnebeln längs des Nipps. Der Einfluss dieser Temperaturdifferenzen auf das Farbverhalten ist deutlich in den Abbildungen 4.2 und 4.3 zu erkennen. Im Bereich der gestellseitigen Walzenlagerungen traten jeweils höhere Oberflächentemperaturen auf und damit eine stärker mit Farbpartikeln bedeckte Fläche auf den Mess-Streifen als im Bereich der freien Walzenlagerung.

Es ist des Weiteren aus Abbildung 5.2 zu entnehmen, dass es zur Ausbildung von Temperaturprofilen in Farbtransportrichtung kommt. Der Grund hierfür liegt in einer Abnahme der Farbschichtdicken in Flussrichtung. Diese Eigenart eines Walzenfarbwerks beeinflusst ebenfalls erheblich den Farb- und Feuchtmitteltransport.

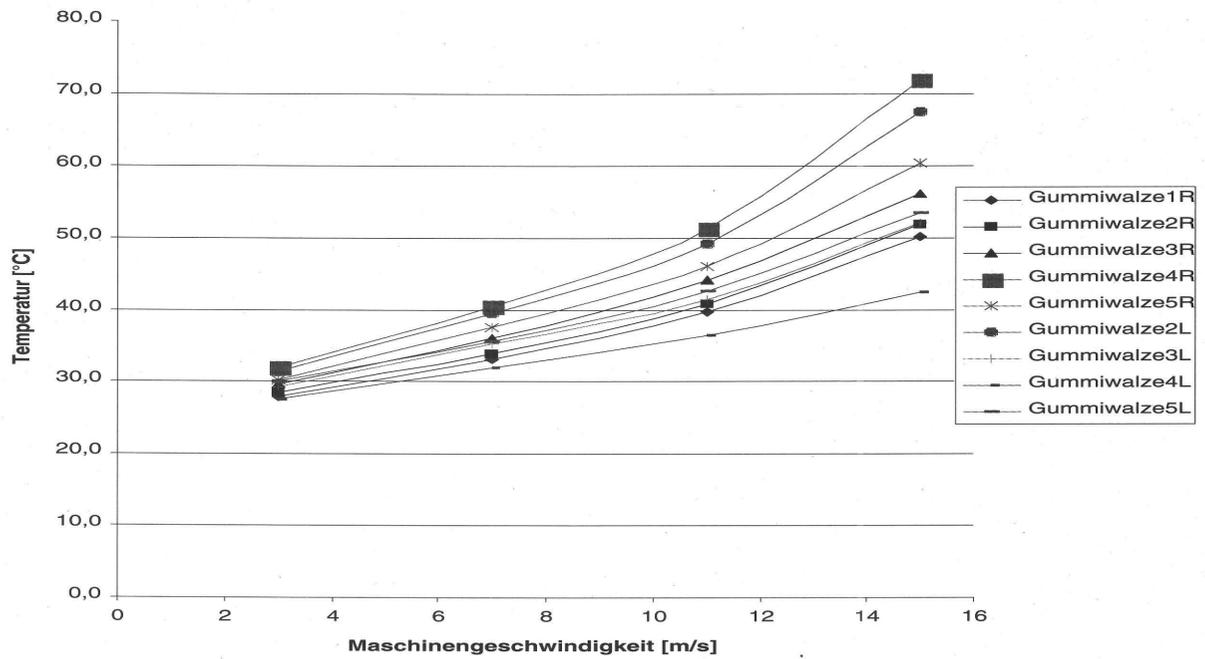


Abbildung 5.2: Mittlere Temperatur der Gummiwalzen

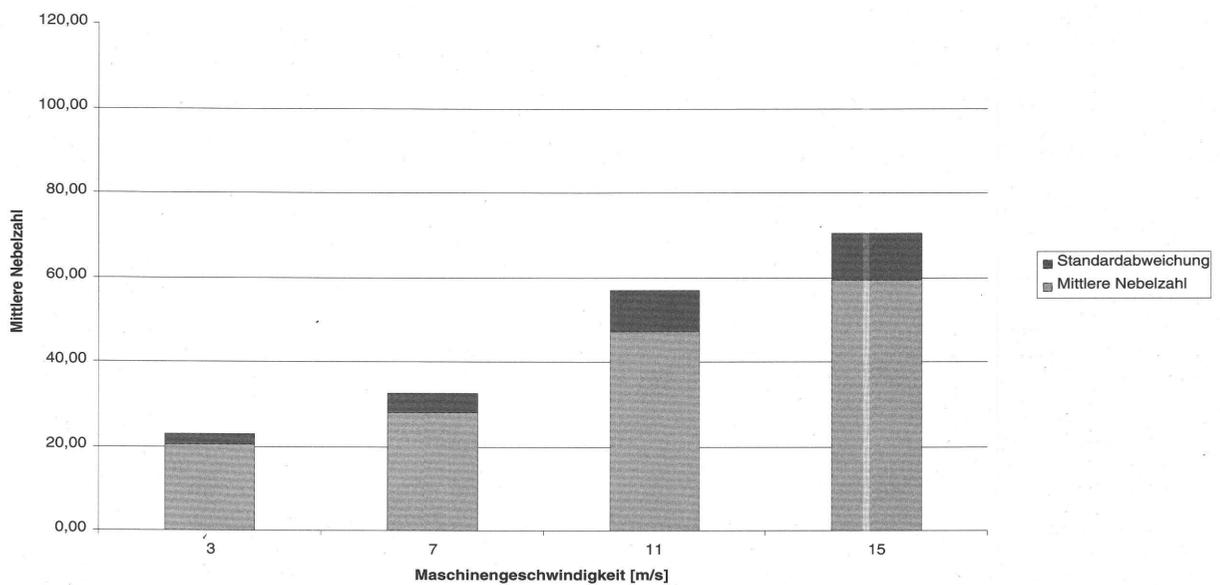


Abbildung 5.3: Mittlere Graustufenwerte in Abhängigkeit von der Maschinengeschwindigkeit

Abbildung 5.3 stellt die gemessene mittlere Farbnebelmenge in Abhängigkeit von der Maschinengeschwindigkeit dar. Man erkennt, dass die Druckfarbe mit wachsenden Maschinengeschwindigkeiten vermehrt zum Spritzen und Nebeln neigt. Keine Aussage kann hingegen getroffen werden, wie stark jeweils die Walzentemperaturen und die Maschinengeschwindigkeit das Spritzen und Nebeln der Druckfarbe begünstigen.

Ein Spritzen der Druckfarbe wurde nur in geringem Umfang gemessen und trat vorzugsweise am Ausgang der Walzennipps auf und auch hier mehrheitlich im Bereich der Walzenränder. An den Eingängen der Walzennipps konnte nur vereinzelt ein Spritzen der Druckfarbe festgestellt werden.

5.3.2 Messung mit Filmfeuchtwerk

Das in den Nass-Offset-Farbwerken zur Benetzung nicht druckender Plattenbereiche benötigte Feuchtmittel macht die Farbspaltung bei diesem Druckverfahren erheblich komplizierter als bei den anderen gängigen Druckverfahren. Bislang fehlt für den Nass-Offsetdruck ein umfassendes theoretisches Modell zur analytischen Beschreibung der in der Produktion und in experimentellen Untersuchungen beobachteten Abhängigkeiten - trotz zahlreicher Ansätze zur Erforschung der zwischen Druckfarbe und Feuchtmittel bestehenden äußerst komplexen Wechselwirkung. So tritt beispielweise das Feuchtmittel in Form feinsten Tröpfchen sowohl einmulgiert in die Druckfarbe als auch als Oberflächenwasser auf, so dass bezüglich der hydrodynamischen Vorgänge das Feuchtmittel den Farbspaltungsprozess in den Walzenspalten teilweise auch unmittelbar beeinflusst. Nach Brötz /3/ wirken sich nämlich das in die Farbe einmulgierte und das durch Adhäsionskräfte an die Farboberfläche gebundene Feuchtmittel deutlich unterschiedlich aus.

Beim Einlaufen der durch Adhäsionskräfte an die Walzenoberflächen gebundenen Farb-Feuchtmittlemulsion in einen Walzenspalt kommt es aufgrund der Spaltverengung zu einem Druckanstieg in der Flüssigkeitsschicht. Der sich nachfolgend öffnende Walzenspalt bewirkt infolge der dort mit den Adhäsionskräften konkurrierenden Kohäsionskräften innerhalb des

Farb-Feuchtmittel-Gemisches ein Druckgefälle in Bewegungsrichtung, das bis zur Entstehung eines Unterdruckes am Spaltausgang führt. Die hohen Umfangs- und demzufolge auch Trenngeschwindigkeiten der Walzenoberflächen lassen bevorzugt von Lufteinschlüssen und kleinsten Feuchtmitteltröpfchen ausgehende Kavitationsblasen entstehen. Im Verlauf fortschreitender Blasenexpansion bilden sich schlanke Farbsäulen zwischen den sich im Spaltauslauf unter Neigung gegenüber liegenden Oberflächen aus. Die Farbsäule verlängert sich mit zunehmender Spalthöhe unter gleichzeitiger Einschnürung, die nach Hübner /24/ durchaus an mehreren Stellen stattfinden kann, bis es an einer oder mehreren Einschnürungsstellen zum Zerreißen der Farbfäden kommt.

Druckfarbe und Feuchtmittel werden an unterschiedlichen Stellen im Reihen-Versuchs-Farbwerk eingespeist. Während sich der Farbkasten zur Einstellung der für den Druckprozess gewünschten dünnen und gleichmäßigen Farbschichten an den Farbauftragswalzen am „Farbwerkseingang“ befindet, wurde das Feuchtmittel zur optimalen Benetzung der Druckform am Plattenzylinder („Farbwerksende“) eingespeist. Druckfarbe und Feuchtmittel weisen daher z. T. gegenläufige Transportrichtungen im Farbwerk auf.

Offsetdruckfarben besitzen ein von ihrer Zusammensetzung und der Temperatur bestimmtes Emulgiervermögen gegenüber Feuchtmittel. Überschreitet die in einem Walzenspalt vorhandene Feuchtmittelmenge die Aufnahmekapazität der Druckfarbe, so bildet sich eine mehr oder minder geschlossene, aus Feuchtmitteltröpfchen bestehende Schicht (Oberflächenwasser) aus. Auch bei der Spaltung der Farb-Feuchtmittelschichten im Auslauf aus den Nippstellen zwischen dem Plattenzylinder und den Farbauftragswalzen kommt es zur Bildung von Oberflächenwasser auf den jeweils zwei Farboberschichten, da die Farbspaltung jeweils bevorzugt in den Zonen mit großen Anteilen einemulgierten Wassers erfolgt.

Die Bestimmung der Feuchtmittelanteile in den bei den Untersuchungen erzeugten Farb-Feuchtmittlemulsionen erfolgte mit Hilfe der Karl-Fischer-Methode im Haus der Firma Hartmann Druckfarben GmbH, Frankfurt. Die hierfür notwendigen Farbproben wurden am Reihen-Versuchs-Farbwerk während der jeweils 15-minütigen und mit Maschinengeschwindigkeiten von 3, 7, 11 und 15 m/s gefahrenen Testläufe gewonnen. Dabei wurde die Umlaufgeschwindigkeit der Dukturwalze im Filmfeuchtwerk nach praxisgerechten Vorgaben konventionell der jeweiligen Maschinengeschwindigkeit angepasst. Die Farbproben wurden von den Oberflächen der Farbwerkswalzen 1R, 3R, 5R, 3L, 5L und zusätzlich auch des Gegen-druckzylinders (Abbildung 4.1) entnommen. Die Auswertung lieferte einen Anteil von 10%

bis 20% Feuchtmittel in der Druckfarbe und stellte somit sicher, dass die gewonnenen Messergebnisse praxisrelevante Aussagen liefern.

Die Untersuchung des Farbverhaltens bei Einsatz eines Filmfeuchtwerks erfolgte analog den Testläufen ohne Feuchtmittel. Dies bedeutet im Einzelnen, dass die Messungen bei Maschinengeschwindigkeiten von 3, 7, 11 und 15 m/s über einen Zeitraum von 15 Minuten bei einer konstanten Umlaufgeschwindigkeit der Dukturwalze im Filmfarbwerk von 0,3 m/s und einem Hub-Zeitverhältnis der Verreiberwalzen von 20 Hub/Minute erfolgten. Der Versuchsaufbau entsprach der schematischen Darstellung aus Abbildung 4.1.

Ein starkes Anwachsen der Oberflächentemperatur der Gummiwalzen mit der Maschinengeschwindigkeit konnte auch bei Einbeziehung des Filmfeuchtwerks festgestellt werden (Abbildung 5.4). Analog zu den Testläufen ohne Feuchtmittel kam es auch in diesem Fall zur Ausbildung von Temperaturprofilen in Farbtransportrichtung. Parallel zu den in Farbflussrichtung abnehmenden Farbschichtdicken nehmen auch hier die Walzenoberflächentemperaturen zu, was wiederum auf Farb- und Feuchtmitteltransport erheblich rückwirkt.

Vergleicht man das Temperaturverhalten der Testläufe ohne und mit Feuchtmittel, dargestellt in den Abbildungen 5.2 und 5.4, so zeigen sich nur unwesentliche Unterschiede. Es liegt daher die Vermutung nahe, dass das Einemulgieren des Feuchtmittels in die Druckfarbe und das durch Adhäsionskräfte an die Farboberfläche gebundene Feuchtmittel keinen entscheidenden Einfluss auf den Verlauf der Oberflächentemperaturen in Farbflussrichtung und längs der Walzenachsen haben.

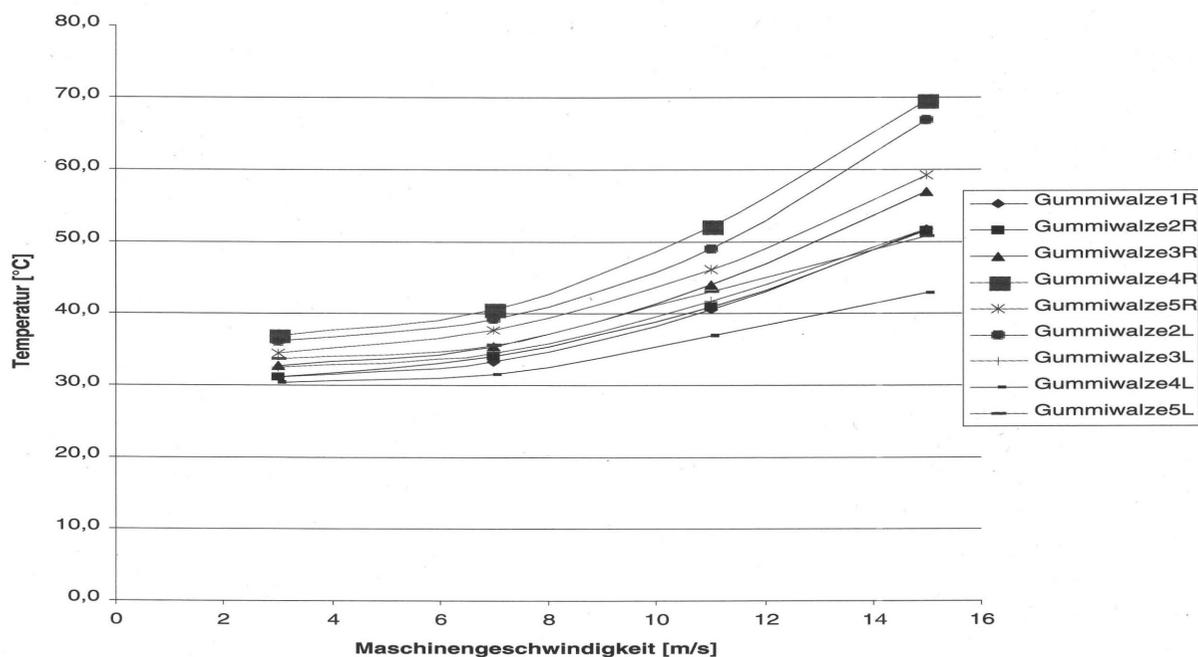


Abbildung 5.4: Mittlere Temperatur der Gummiwalzen, Testläufe mit Feuchtmittel

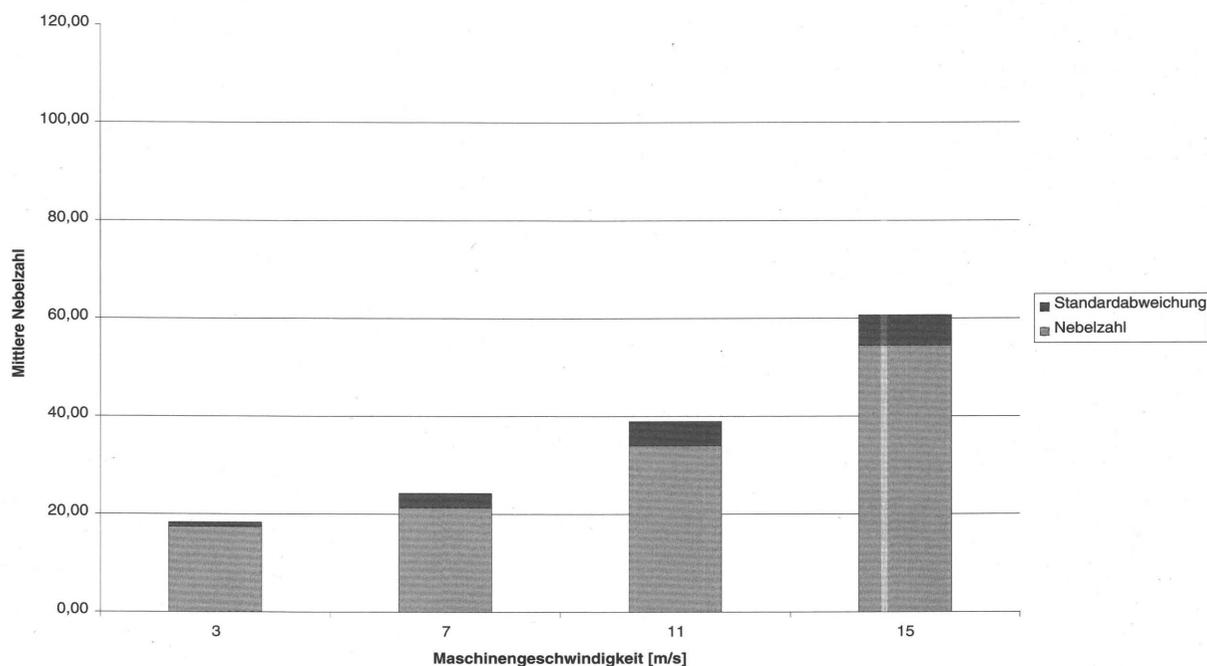


Abbildung 5.5: Mittlere Graustufenwerte in Abhängigkeit von der Maschinengeschwindigkeit, Testläufe mit Feuchtmittel

Analog den Testläufen ohne Feuchtmittel ist mit wachsenden Maschinengeschwindigkeiten ein Anwachsen der gemessenen Farbnebelmenge verbunden (Abbildung 5.5). Vergleicht man die ermittelten Farbnebelzahlen der Testläufe ohne und mit Feuchtmittel, dargestellt in den Abbildungen 5.3 und 5.5, so erkennt man, dass im Fall der Feuchtung die ermittelten Farbnebelzahlen kleinere Werte aufweisen als ohne Feuchtung. Negativ wirkte sich die Verwendung eines Feuchtmittels bezogen auf ein Farbspritzen aus. In den Testläufen konnte ein vermehrtes Farbspritzen beobachtet werden, vorzugsweise im Bereich der Walzenränder.

5.3.3 Entkopplung der physikalischen Größen „Geschwindigkeit“ und „Temperatur“

5.3.3.1 Einfluss der Maschinengeschwindigkeit auf das Farbverhalten

Die bisher durchgeführten Untersuchungen hatten gezeigt, dass sich mit steigender Maschinengeschwindigkeit auch die Temperatur insbesondere der Gummiwalzen erhöht. Aus diesen Ergebnissen ließ sich aber nicht ableiten, welche der beiden Größen – Geschwindigkeit und Temperatur – einen größeren Einfluss auf das Verhalten der Druckfarbe in einem Farbwerk ausübt.

Um diese Frage beantworten zu können, war es erforderlich, die beiden Einflussgrößen nach Möglichkeit zu entkoppeln. Zu diesem Zweck wurden die Testlaufzeiten von 15 Minuten auf zwei Minuten zurückgenommen und zwischen zwei Testläufen wurden lange Stoppzeiten geschaltet, um sicher zu gehen, dass zu Beginn eines Testlaufs sämtliche Walzen gleichmäßig temperiert waren auf die für den jeweiligen Versuch angestrebte Temperatur. Rückwirkungen der vornehmlich in den Gummiwalzen auftretenden dissipativen Formänderungen auf die Farbspaltungsvorgänge und damit auf das Spritzen und Nebeln sollte hierdurch hinreichend gering bleiben. Der Versuchsaufbau entsprach der schematischen Darstellung von Abbildung 4.1. Bei Maschinengeschwindigkeiten von 3, 7, 11 und 15 m/s erfolgten die Messungen

sowohl ohne als auch mit Feuchtmittel, wobei zur Feuchtmittelzufuhr wiederum das Filmfeuchtwerk eingesetzt wurde.

Die Testläufe zeigten jedoch, dass es nicht gelang, die Temperatur der Gummiwalzen-Oberflächen über die Zeitspanne der schon sehr kurzen Testläufe konstant zu halten (Abbildung 5.6). Die vornehmlich in den Gummiwalzen auftretenden dissipativen Formänderungen führten sehr schnell auch zur Erwärmung der Oberflächen der Gummiwalzen, und dieser Prozess wirkte sich mit zunehmender Maschinengeschwindigkeit umso schneller aus. Bei den Testläufen ohne Feuchtmittel konnten Temperaturerhöhungen bis zu 10°C gegenüber der Umgebung gemessen werden. Die von innen temperierten Axialverreiber beeinflussten die Erwärmung der Gummiwalzen nur unwesentlich.

Die Testläufe zeigten nur ein schwaches Farbnebeln. Ausgeprägte Farbzonen konnten auf den Mess-Streifen nicht festgestellt werden, ebenso wurden keine Farbspritzer beobachtet.

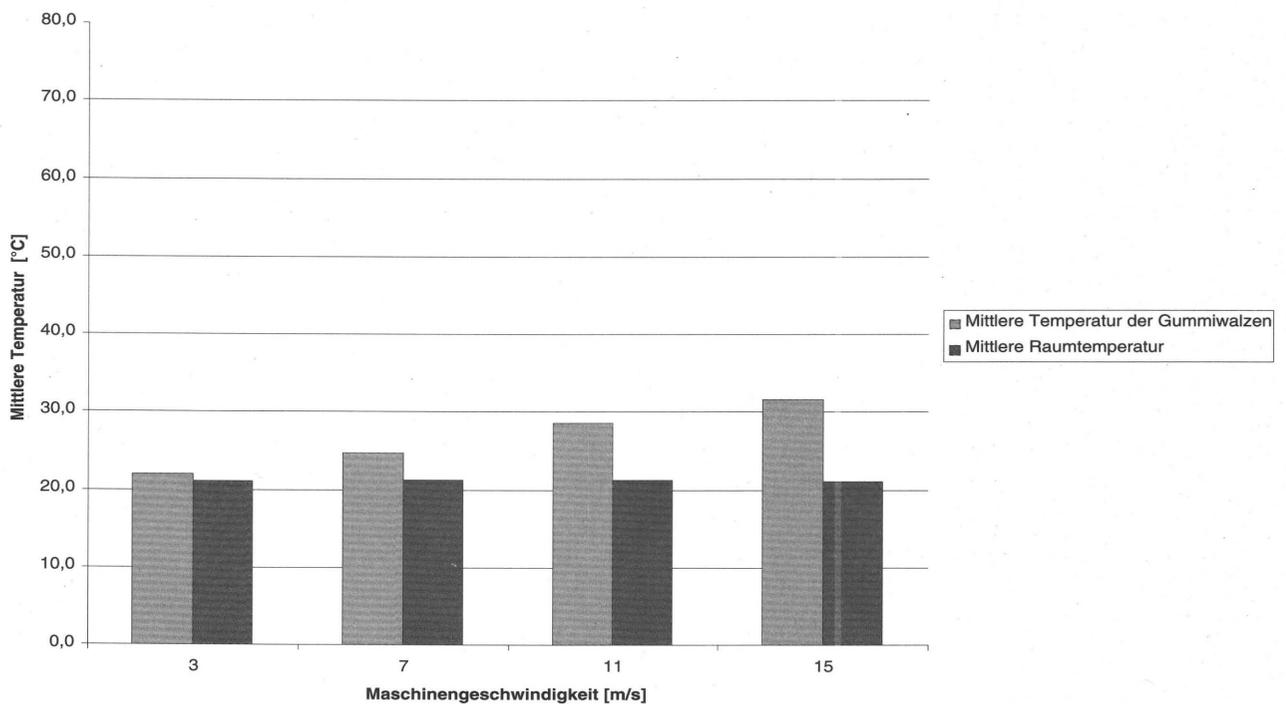


Abbildung 5.6: Mittlere Temperatur der Gummiwalzen, Testläufe ohne Feuchtmittel

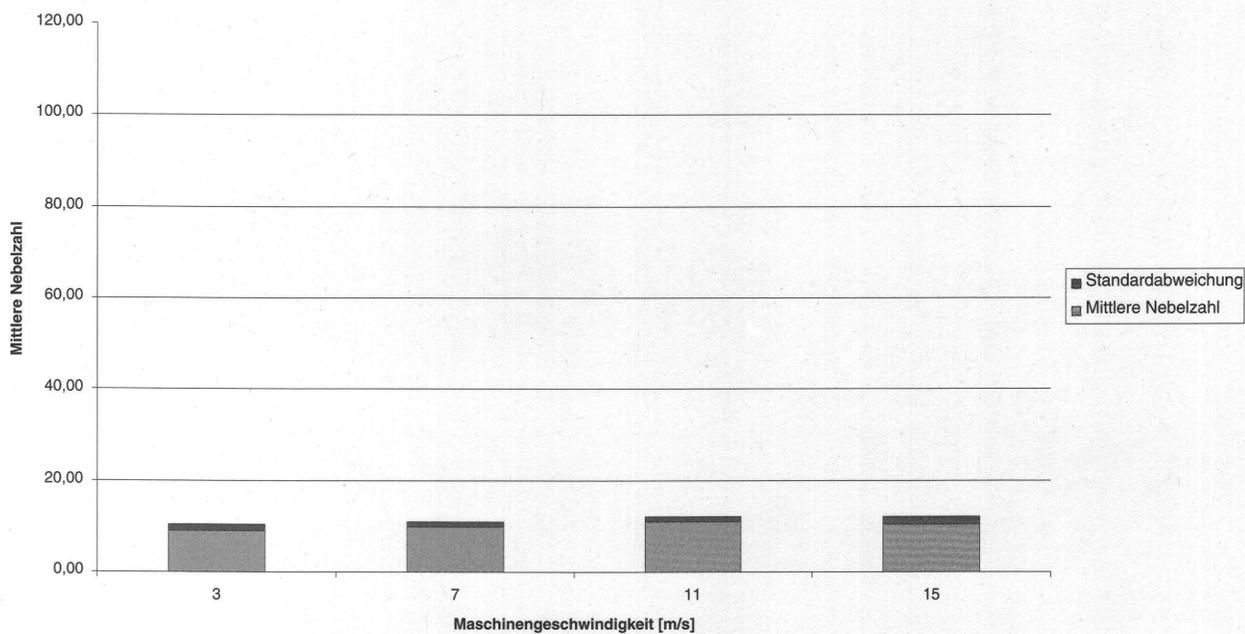


Abbildung 5.7: Mittlere Nebelzahl, Testläufe ohne Feuchtmittel

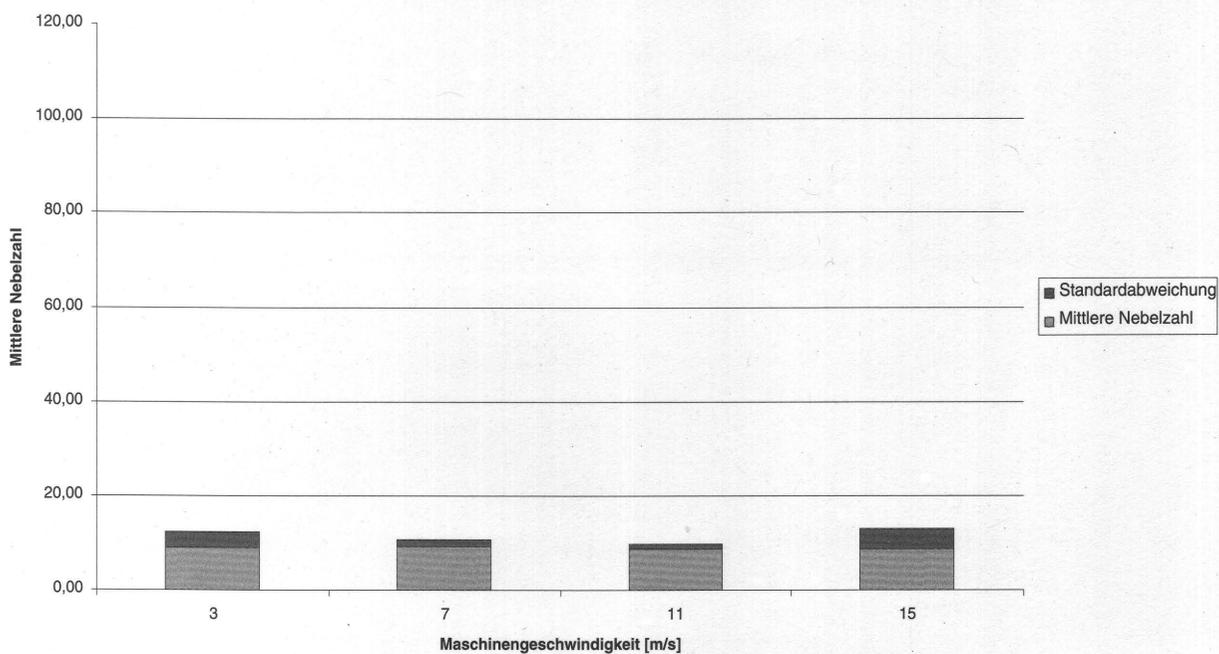


Abbildung 5.8: Mittlere Nebelzahl, Testläufe mit Feuchtmittel

Abbildung 5.7 stellt die ermittelten Farbnebelmengen über der Maschinengeschwindigkeit dar. Aufgrund der kurzen Messzeiten konnten nur wenige Farbpartikel gemessen werden. Die Farbnebelmengen waren dabei nahezu unbeeinflusst von der jeweiligen Maschinengeschwindigkeit. Auch die Testläufe mit Feuchtmittel erbrachten keine wesentliche Änderung in den Messergebnissen; die Nebelzahlen waren in den Testläufen mit und ohne Feuchtmittel in etwa gleich groß.

5.3.3.2 Der Einfluss der Temperatur auf das Farbverhalten

Der Einfluss der Temperatur auf das Farbverhalten in einem Farbwerk wurde bei einer fest vorgegebenen Maschinengeschwindigkeit von 9m/s und jeweils unterschiedlichen Walzentemperaturen von 19°C, 23°C, 26°C und 30°C untersucht. Vor Beginn eines Testlaufs wurden die Verreiberwalzen auf eine der vorgegebenen Temperaturen eingestellt.

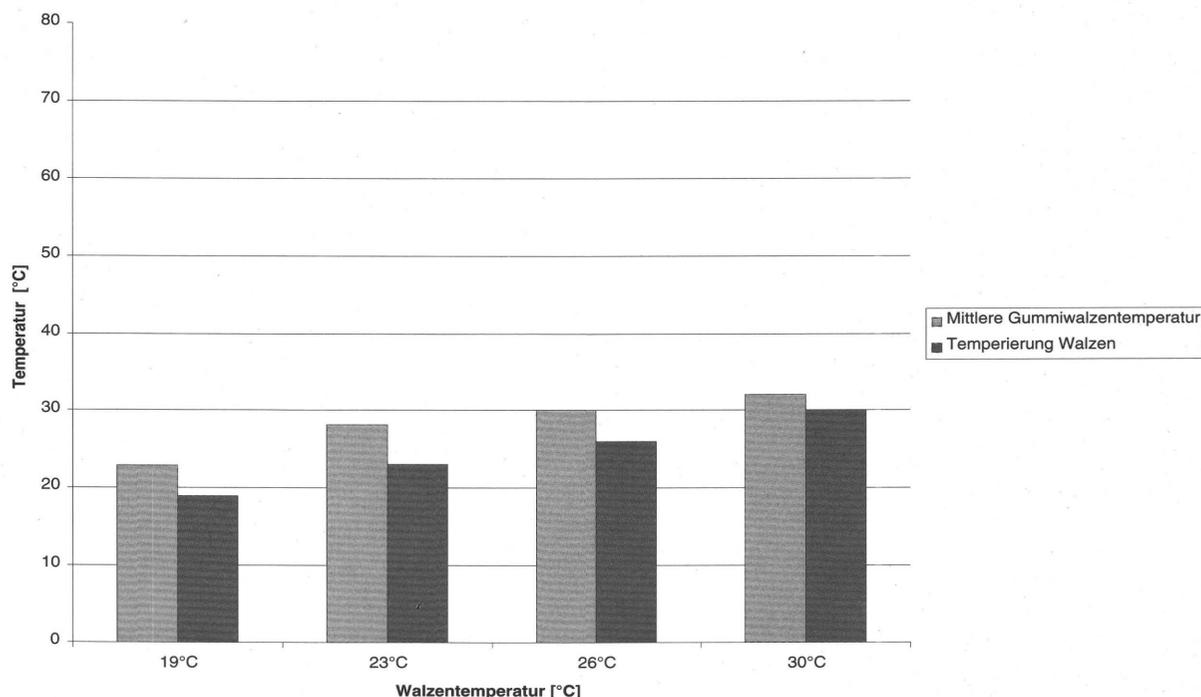


Abbildung 5.9: Mittlere Temperatur der Gummiwalzen, Testläufe ohne Feuchtmittel

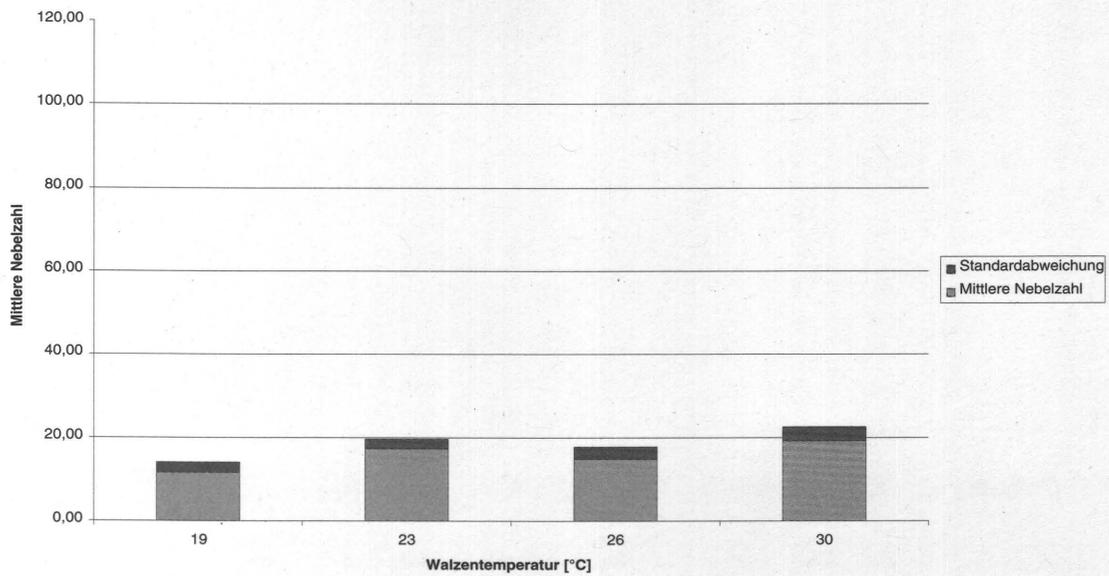


Abbildung 5.10: Mittlere Nebelzahl bei gleichbleibender Maschinengeschwindigkeit, Testläufe ohne Feuchtmittel

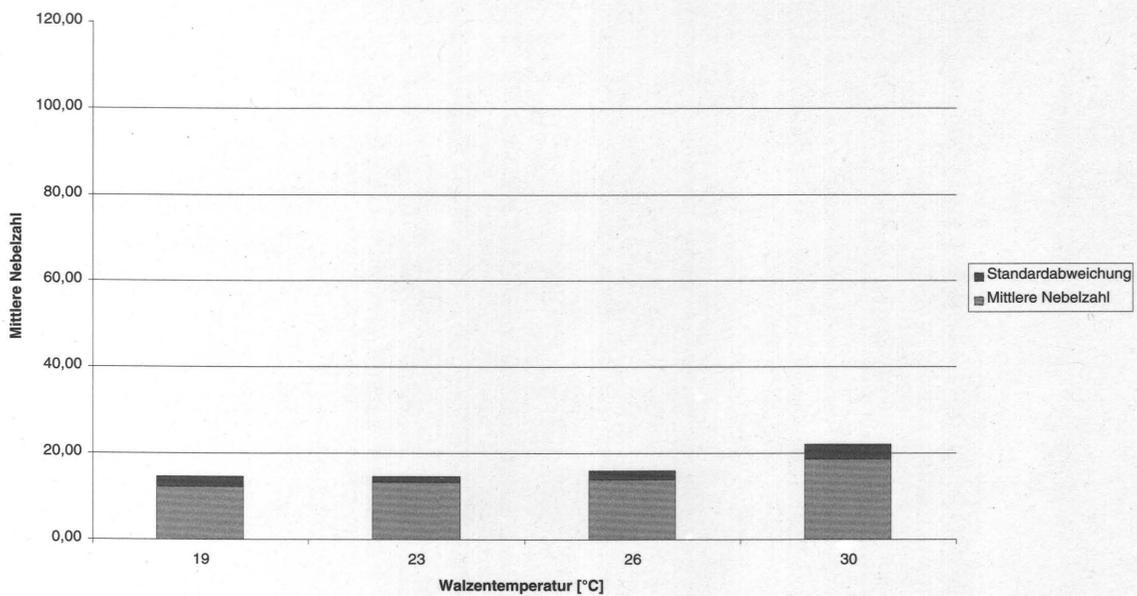


Abbildung 5.11: Mittlere Nebelzahl bei gleichbleibender Maschinengeschwindigkeit, Testläufe mit Feuchtmittel

Um darüber hinaus sicherzustellen, dass auch die Gummiwalzen zu Beginn eines jeden Testlaufs gleichmäßig temperiert waren auf die jeweils vorgewählte Temperatur, rotierten die Gummiwalzen über einen längeren Zeitraum mit einer sehr geringen Umlaufgeschwindigkeit im leichten Kontakt mit den Verreiberwalzen, deren Oszillation zudem abgeschaltet war.

Die Testlaufzeiten betragen durchweg zwei (2) Minuten. Abbildung 5.9 zeigt, dass es auch für diesen Fall nicht möglich war, über den Zeitraum der Messung die Temperatur der Walzen konstant zu halten. Es kam zu einer Erwärmung der Walzen um 2°C bis 5°C. Diese Abweichungen von den vorgegebenen Werten ist im Ergebnis jedoch als gering einzuschätzen, da diese Erwärmung deutlich gegenüber derjenigen bei den 15-minütigen Testläufen zurückblieb und also die Messergebnisse nur unwesentlich beeinflussen konnte.

Die ermittelten Farbnebelzahlen der Abbildungen 5.10 und 5.11 wiesen innerhalb der kurzen Testlaufzeiten keine wesentlichen Unterschiede für die Testläufe mit und ohne Feuchtmittel auf. Den Abbildungen ist weiterhin zu entnehmen, dass mit der fortlaufenden Erhöhung der Walzentemperaturen jeweils ein Anstieg der Farbnebelmengen verbunden war.

5.3.3.3 Vergleich der Ergebnisse

Ein Vergleich der Ergebnisse aus den Untersuchungen zu den Kapiteln 5.3.3.1 und 5.3.3.2 mit der weitgehenden Entkopplung der physikalischen Größen „Geschwindigkeit und Temperatur“ macht deutlich, dass die Walzentemperatur das Farbverhalten stärker beeinflusst als die rein mechanische Größe „Geschwindigkeit“.

5.3.4 Einfluss des instationären Betriebszustands auf das Spritzen und Nebeln von Druckfarben

Zur Abrundung der Untersuchungen wurde auch der Frage nachgegangen, ob instationäre Betriebszustände, die beim Anfahren und Abbremsen einer Druckmaschine unvermeidlich auftreten, in besonderer Weise Einfluss auf das Verhalten der Druckfarbe ausüben? Eine erkennbare Beeinflussung des Phänomens des Farbnebelns und Farbspritzens ist nicht von vornherein auszuschließen, und es stellt sich die Frage, wie groß dieser Einfluss ist. Im Rahmen mehrerer Versuchsreihen wurde hierzu die Versuchsdruckmaschine aus dem Stand zehnmal in Folge auf 15 m/s beschleunigt und wieder in den Stillstand abgebremst.

Die Messergebnisse wiesen auf den Mess-Streifen nur ein geringes Spritzen und Nebeln der Druckfarbe auf. Die Testläufe mit Feuchtmittel führten zu einer Verringerung des Farbnebelns, bewirkten aber ein relativ deutlicheres Farbspritzen an den Walzenausgängen - vorzugsweise an den Enden der Walzenlager.

Eine Darstellung der gemessenen mittleren Farbnebelmengen je Mess-Stelle geben die Abbildungen 5.12 und 5.13. Darin ist zu erkennen, dass in den Testläufen mit Feuchtmittel eine Reduzierung des Farbnebelns eintrat (Abbildung 5.13).

Ein Vergleich der ermittelten Farbnebelzahlen zwischen den Nippeinläufen (Mess-Stellen: 1E, 2E, 3E, 4E) und den Nippausläufen (Mess-Stelle: 1A, 2A, 3A, 4A) zeigt, dass unter Berücksichtigung geringer Schwankungen die Druckfarbe an den Nippein- und Nippausläufen nahezu identische Farbnebelmengen aufweist.

Als Ergebnis der Untersuchungen kann festgestellt werden, dass im Farbwerk einer Druckmaschine die Neigung der Druckfarbe zu einem „Spritzen und Nebeln“ aufgrund eines instationären Betriebszustands als gering einzuschätzen ist.

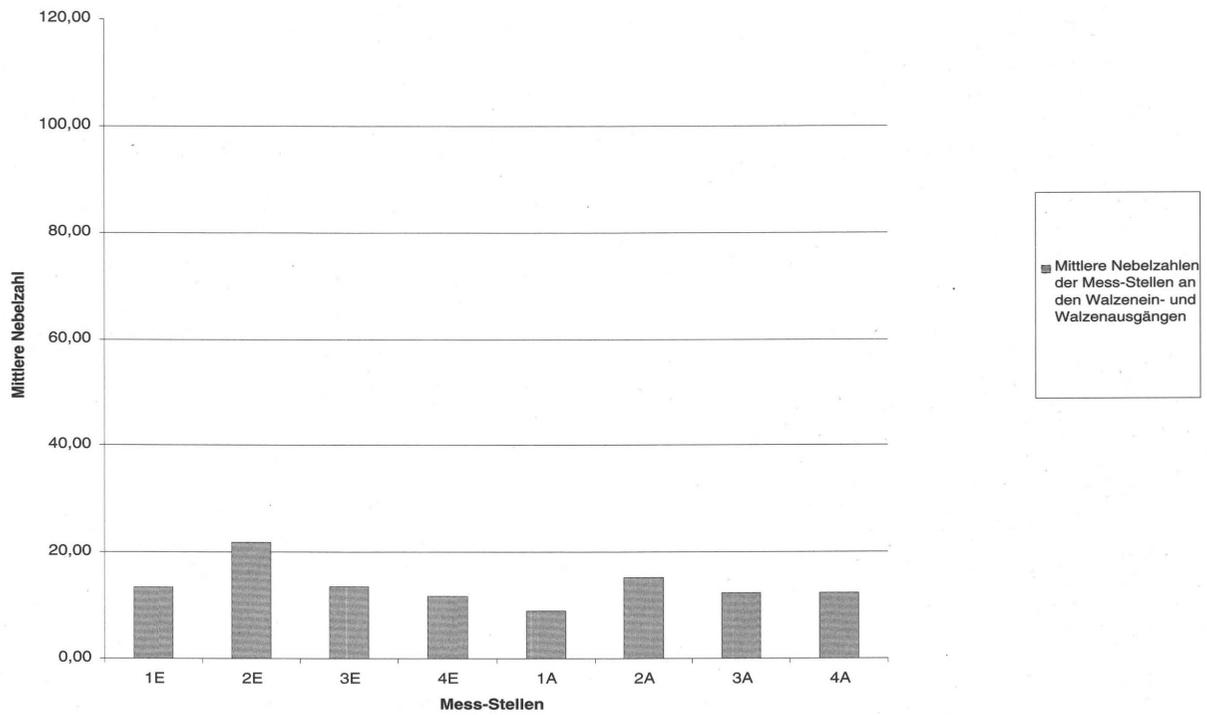


Abbildung 5.12: Mittlere Farbnebelmenge pro Mess-Stelle, Testläufe ohne Feuchtmittel

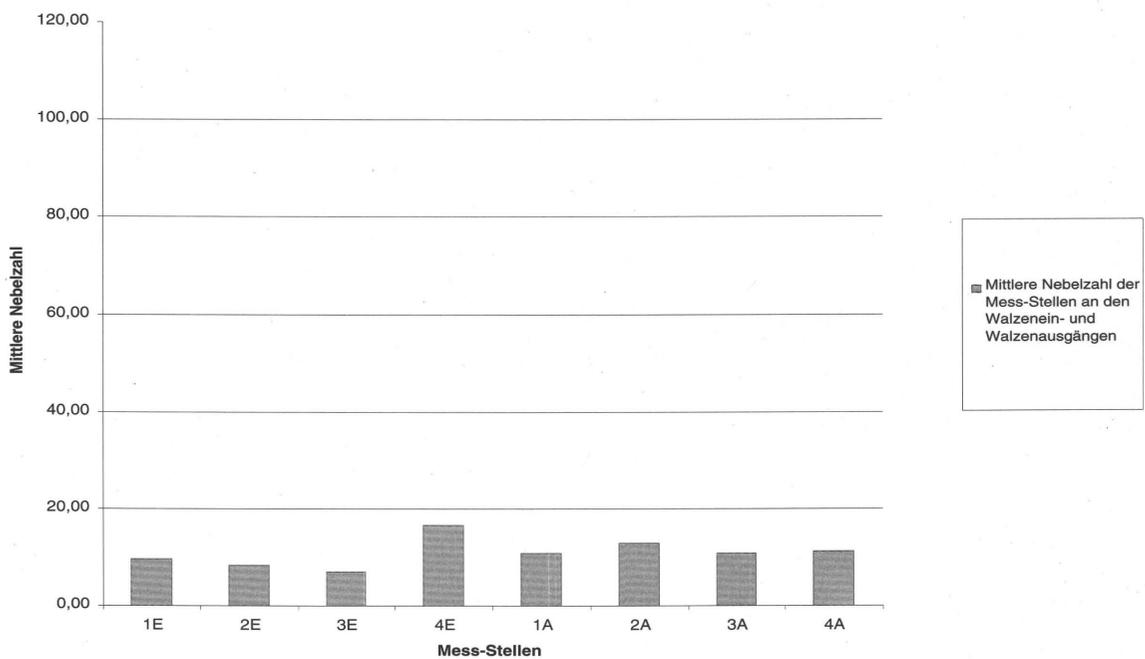


Abbildung 5.13: Mittlere Farbnebelmenge pro Mess-Stelle, Testläufe mit Feuchtmittel

5.3.5 Einfluss von Farbschichtdicken auf das Spritzen und Nebeln von Druckfarben

Der Zulauf von Druckfarbe in den Druckprozess einer Rollenrotationsmaschine mit Hilfe eines Filmfarbwerks wird – bei unveränderter Einstellung der Zonenschrauben - über die relative Geschwindigkeit der Duktorwalze gesteuert. Eine Änderung dieser Geschwindigkeitsrelation verändert die Farbschichtdicke auf der ersten Verreiberwalze und führt im Gefolge sowohl zu einem geänderten Farbfluss als auch zu einem geänderten Farbverhalten im Farbwerk.

Die Untersuchung des Farbverhaltens erfolgte mit unterschiedlichen Umlaufgeschwindigkeiten der Duktorwalze von 0,1 bis 0,4 m/s bei einer stufenweisen Erhöhung von 0,1 m/s pro Messung. Die Maschinengeschwindigkeit betrug gleichbleibend 9 m/s über die Dauer der jeweiligen Messung von 15 Minuten.

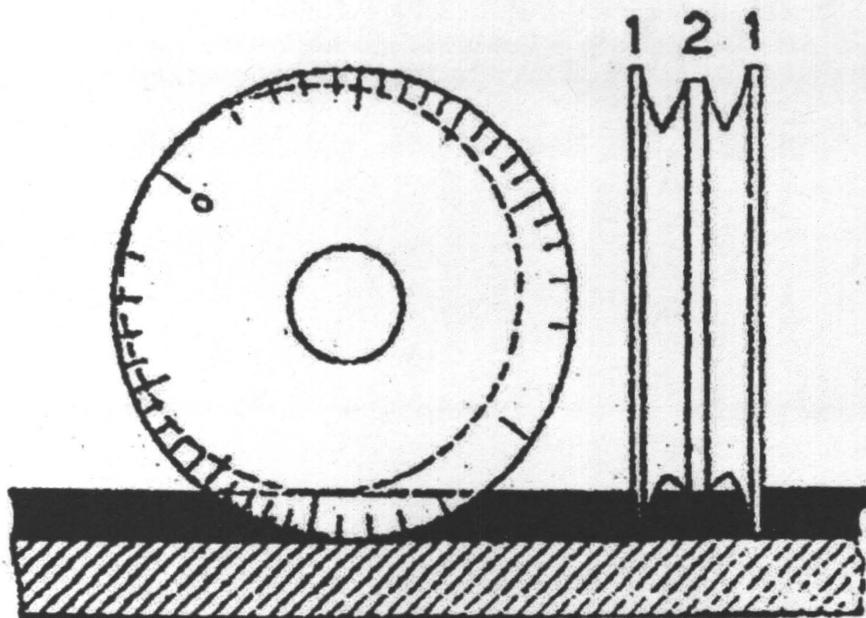


Abbildung 5.14: Naßschichtdickenmesser, Modell 234 der Firma Erichsen

Die Farbschichtdicken wurden mit einem Schichtdickenmessgerät der Firma Erichsen (Modell 234) ermittelt. Wie Abbildung 5.14 verdeutlicht, ist das scheibenförmige Messinstrument

auf der Dukturwalze abzurollen. Dabei bewegen sich zwei konzentrische Rollfelgen (1) auf dem Anstrichuntergrund, während eine dazu mittig zwischen den beiden Rollfelgen angeordnete exzentrische Messrippe (2) erst an der Stelle vom Anstrich benetzt wird, für den der Abstand der Messrippe (2) von den Rollfelgen (1) gleich der zu messenden Farbschichtdicke ist.

Mit zunehmender Farbschichtdicke lieferten die Messungen nur geringfügige Änderungen der Oberflächentemperaturen der Gummiwalzen. Wie die Abbildungen 5.15 und 5.16 verdeutlichen, lagen die Temperaturwerte in den Testläufen nahezu gleich, unabhängig ob die Messungen mit oder ohne Feuchtmittel erfolgten.

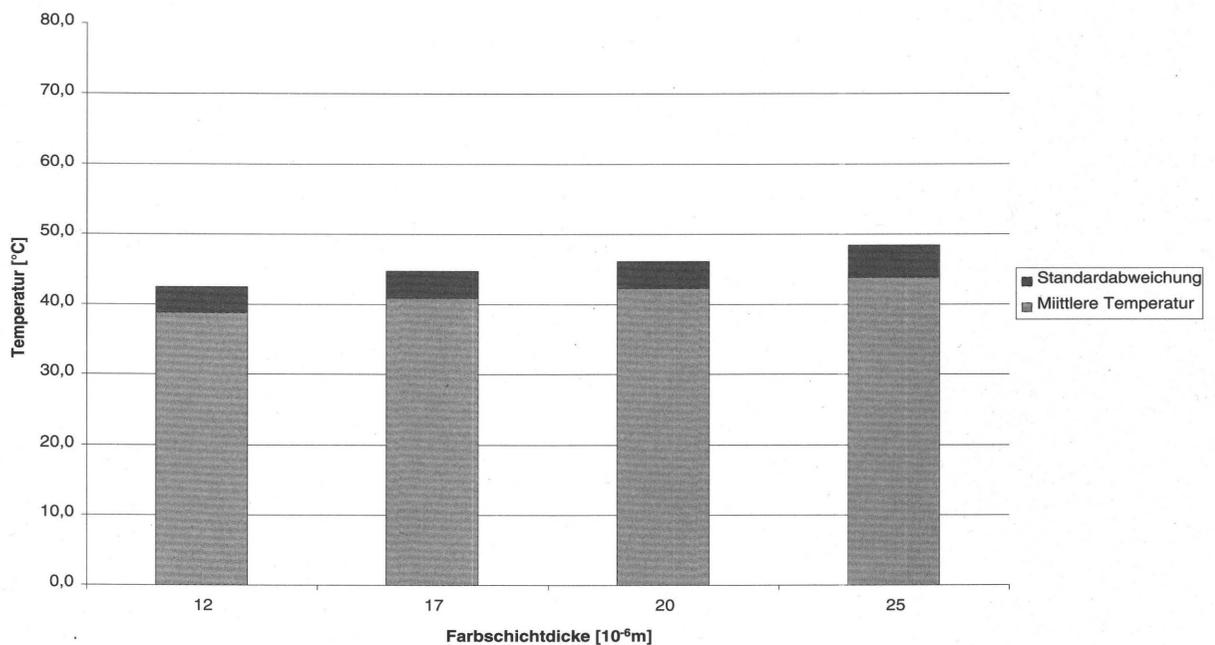


Abbildung 5.15: Mittlere Temperatur der Gummiwalzen, Testläufe ohne Feuchtmittel

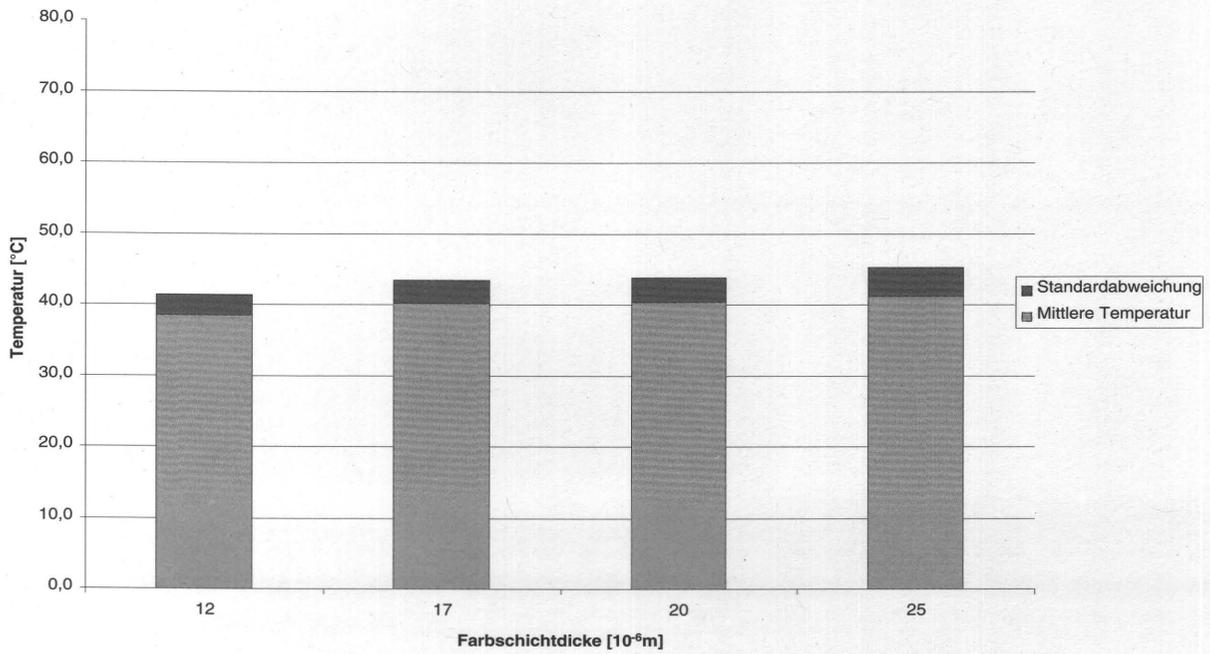


Abbildung 5.16: Mittlere Temperatur der Gummiwalzen, Testläufe mit Feuchtmittel

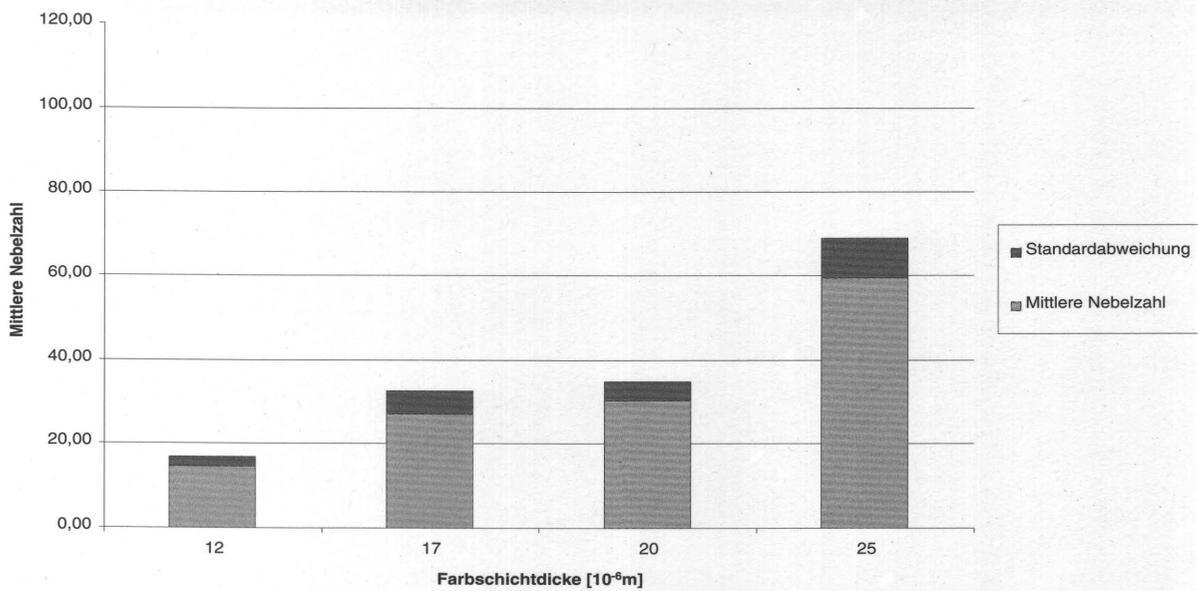


Abbildung 5.17: Mittlere Farbnebelmengen, Testläufe ohne Feuchtmittel

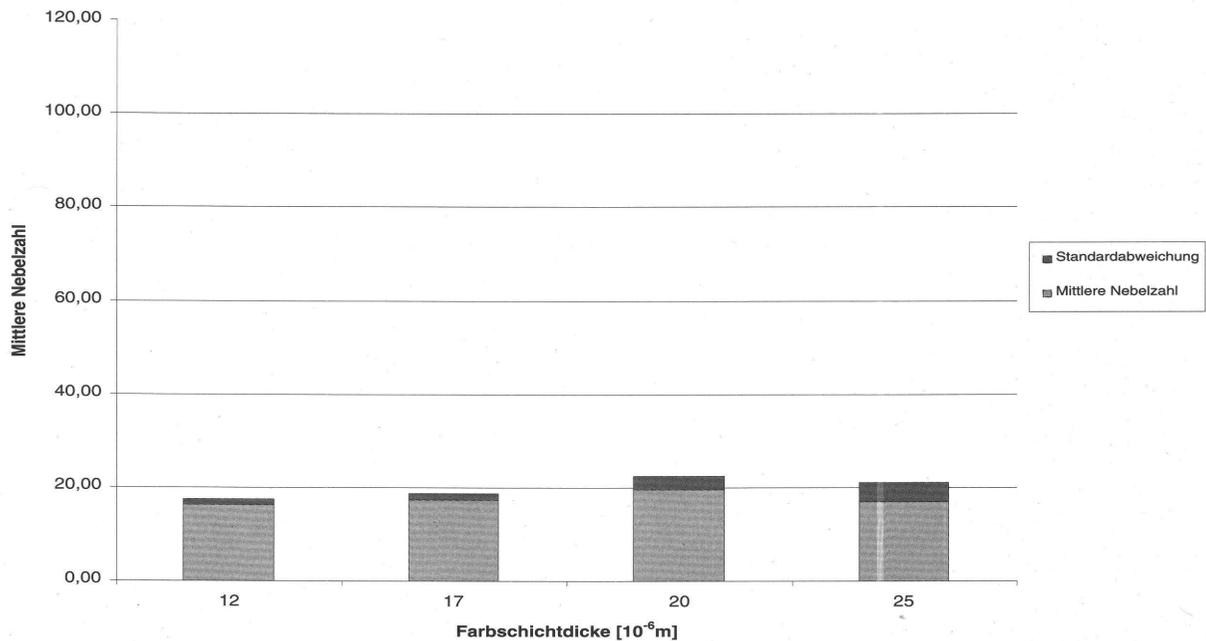


Abbildung 5.18: Mittlere Farbnebelmengen, Testläufe mit Feuchtmittel

Der Einfluss eines Feuchtmittels wird deutlich bei einem Vergleich der Abbildungen 5.17 und 5.18. Die Verwendung eines Feuchtmittels bewirkte eine drastische Reduzierung des Farbnebelns. Für große Farbschichtdicken trat eine Reduzierung der Farbnebelmenge um bis zu 30% ein. Diese Ergebnisse führen zu der Vermutung, dass durch ein Einemulgieren des Feuchtmittels in die Druckfarbe die rheologischen Eigenschaften der Druckfarbe derart verändert werden, dass der Farbspaltungsprozess im auslaufseitigen Walzennipp frühzeitiger eintritt. Die Farb-Feuchtmittel-Emulsion führt demnach zu einer Verkürzung der Farbfäden im Nippauslauf und damit zu einer Verminderung der Nebelbildung.

Die Testläufe wiesen im Rahmen der Messungen keinen Bereich im Farbwerk aus, von dem eindeutig gesagt werden konnte, er neige stärker zum Farbnebeln als andere.

5.3.6 IR-Aufnahmen im Reihen-Versuchs-Farbwerk

Am Reihen-Versuchs-Farbwerk wurden unterschiedliche Laufzustände mit einer IR-Kamera der Marke Palm IR PRO der Firma LOT ORIEL gefilmt. Die maximale Spektralempfindlichkeit dieser Kamera liegt im Wellenlängenbereich von 7- 14 μm , und sie kann mit einer Bildrate bis zu 30 Bildern pro Sekunde betrieben werden.

Die Aufnahmen sollten Aufschluss über die tatsächlichen Temperaturverhältnisse in einer Druckmaschine geben und zeigen, ob in Farbflussrichtung ein Temperaturgradient besteht. Weiterhin wurde der Einfluss eines Feuchtmittels auf die Temperaturverteilung überprüft.

Die Messungen erfolgten wiederum mit Maschinengeschwindigkeit von 3, 7, 11 und 15 m/s und jeweils über einen Zeitraum von 15 Minuten. Die Umlaufgeschwindigkeit der Duktoralze im Filmfarbwerk betrug gleichbleibend 0,3 m/s.

Die Temperaturverteilungen im Filmfeuchtwerk und im Farbwerk bei Testläufen ohne Feuchtmittel zeigen die Abbildungen 5.19, 5.20 und 5.21. Abbildung 5.19 bildet deutlich die starke Erwärmung der Gummiwalze des Filmfarbwerks ab, die sich durch ihre dunkle Färbung von den anderen Walzen abhebt. Der vermehrte Farbnebel, welcher infolge dieser starken Erwärmung entsteht, wurde bereits ausführlich in Kapitel 5.2 diskutiert.

Die Abbildungen 5.20 und 5.21 stellen die Temperaturverteilung im Farbwerk an den Nippen- und Nippausläufen der Walzenpaare dar. Auch hier ist deutlich die starke Erwärmung der Gummiwalzen durch ihre dunkle Färbung zu erkennen. Ausgeprägte Temperaturprofile in Farbflussrichtung ließen sich aus den Aufnahmen jedoch nur bereichsweise entnehmen. Zum einen zeigt Abbildung 5.21 deutlich einen Temperaturanstieg zum Druckwerk hin, dagegen ist dieses Temperaturverhalten in Abbildung 5.20 nicht zu erkennen.

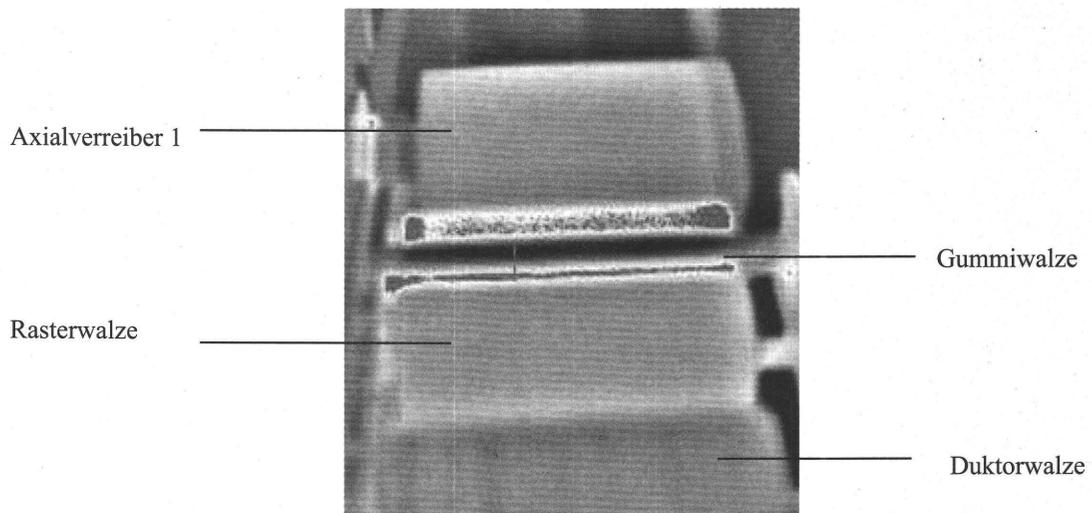


Abbildung 5.19: Temperaturverläufe im Filmfarbwerk bei 11m/s

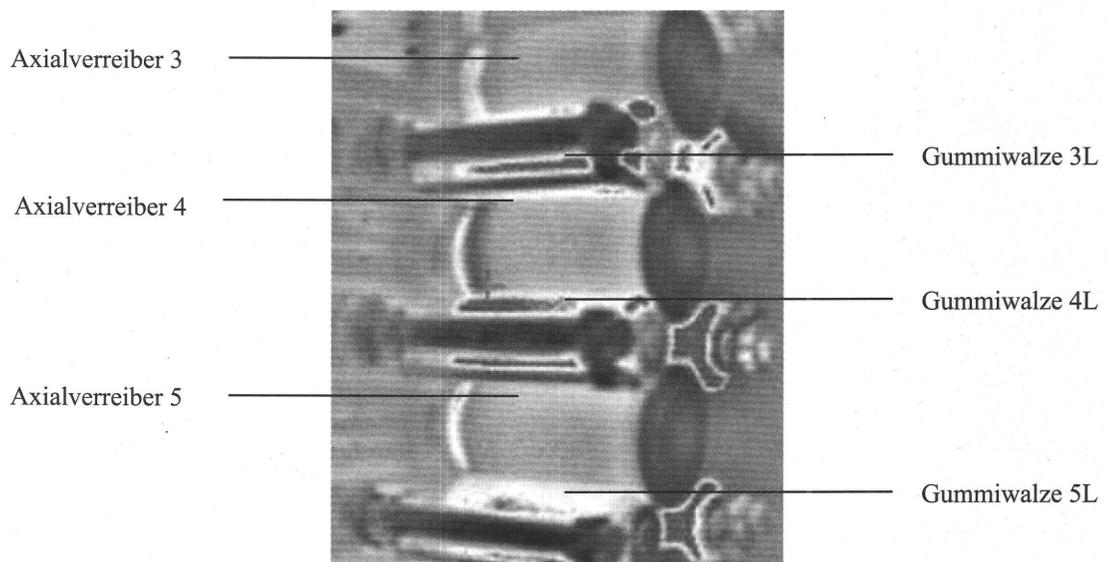


Abbildung 5.20: Walzeneingangsseitige Temperaturverläufe im Farbwerk bei 11m/s

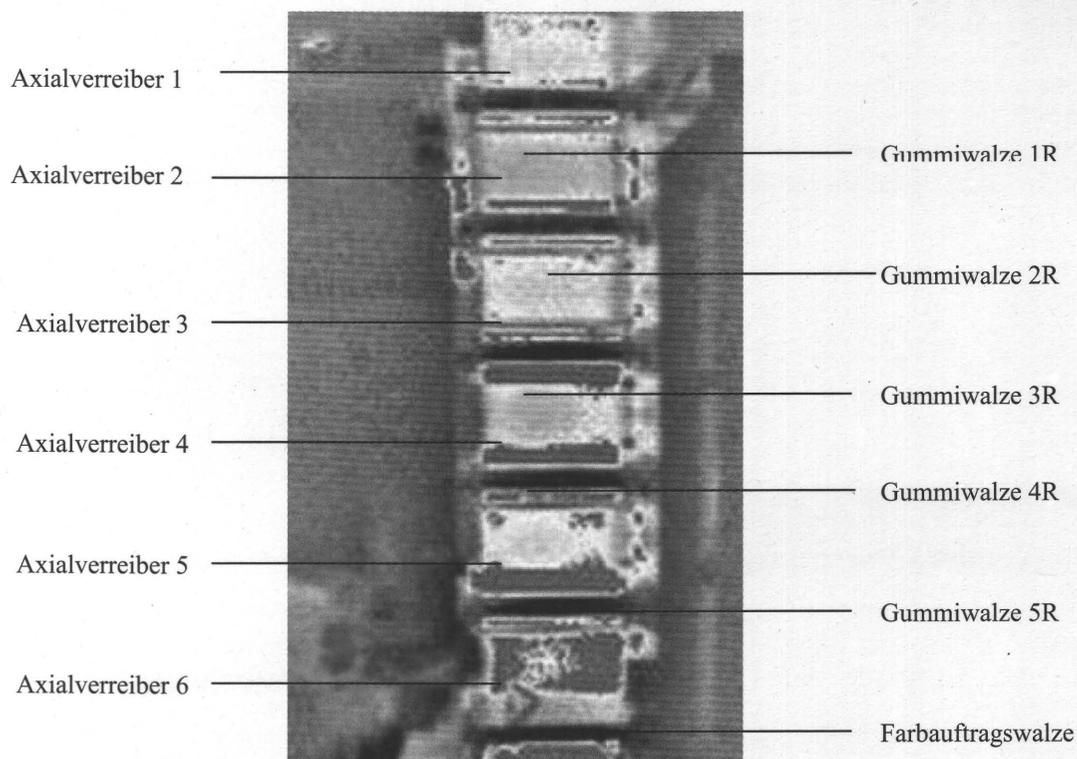


Abbildung 5.21: Walzenausgangsseitige Temperaturverläufe im Farbwerk bei 11m/s

Den Aufnahmen kann jedoch entnommen werden, dass in einem Offsetfarbwerk die Gummiwalzen die stärkste Erwärmung erfahren. Bezogen auf die Erkenntnisse der Kapitel 5.3.3.1 bis 5.3.3.3, dass die Temperatur ein Farbnebeln stärker beeinflusst als die Walzengeschwindigkeit, erscheint es zweckmäßig, geeignete Bezugswerkstoffe mit bevorzugt hohen dynamischen und anteilig geringeren viskosen Eigenschaften in einer Druckmaschine einzusetzen, um somit eine Reduzierung des Farbnebelns zu erzielen.

5.3.7 Analyse des nippeinlaufseitigen Farbnebelns

In den vorangegangenen Untersuchungen konnte das charakteristische Verhalten der Druckfarbe sowohl nippeinlauf- als auch nippauslaufseitig experimentell analysiert und dargestellt werden (Kapitel 5.3.1, 5.3.2). Es konnte anhand der Experimente jedoch nicht die Frage ge-

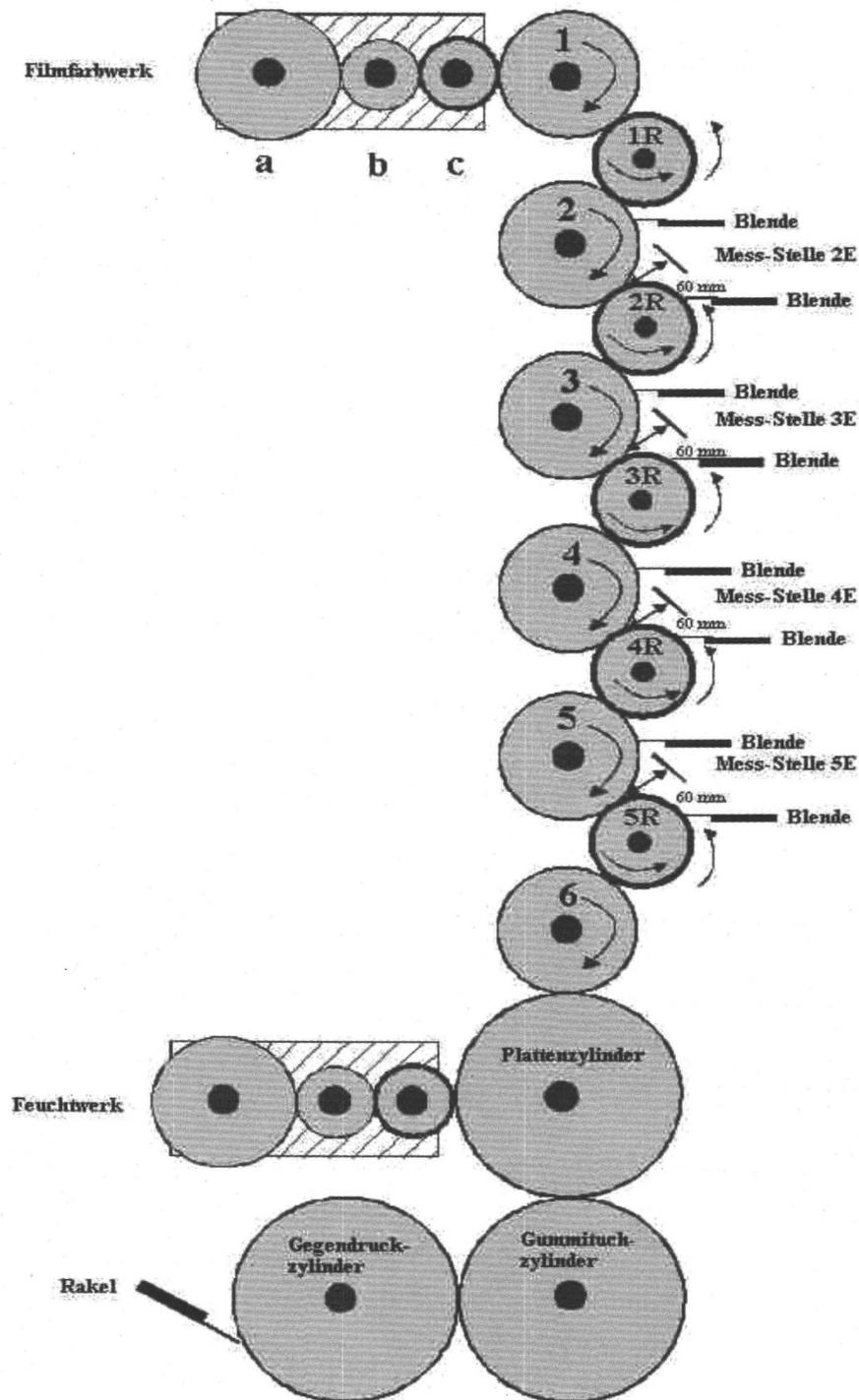


Abbildung 5.22: Schematischer Versuchsaufbau: Nippeinlaufseitige Farbnebelentstehung

klärt werden, ob das Farbnebeln beidseitig, d.h. sowohl im Einlauf als auch im Auslauf eines Walzennipps entsteht, oder ob der nippeinlaufseitig beobachtete Farbnebel ursächlich auf Schleppestromungen längs der Walzenoberflächen zurückzuführen ist.

Um diese offene Frage experimentell zu beantworten, wurde ein Versuchsaufbau gewählt, in dem mit Hilfe von Metallblenden die nippeinlaufseitigen Schleppestromungen vermindert wurden (Abbildung 5.22). Die Positionierung dieser Metallblenden erfolgte hierbei jeweils ober- bzw. unterhalb des einlaufenden Walzennipps in einem Abstand von ca. 3 mm von der jeweiligen Walzenoberfläche.

Gemessen wurde wiederum bei Maschinengeschwindigkeiten von 3, 7, 11 und 15 m/s und einem Zeitraum von jeweils 15 Minuten. Die Testläufe erfolgten sowohl ohne als auch mit Feuchtmittel. Zur Beurteilung der gewonnenen Messergebnisse wurden zusätzlich Vergleichsmessungen durchgeführt, die bei einem identischen Versuchsaufbau und bei identischen Rahmenbedingungen, jedoch unter Ausschluss der Metallblenden erfolgten.

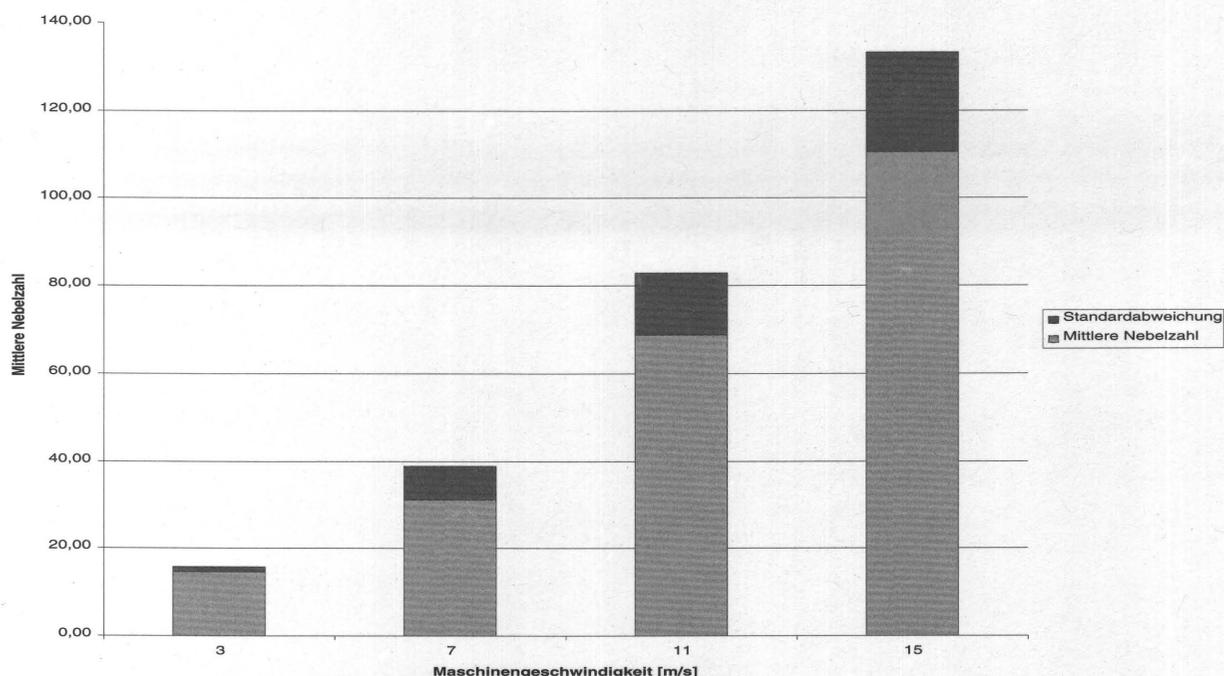


Abbildung 5.23: Mittlere Nebelzahl ohne Blende, Testläufe ohne Feuchtmittel

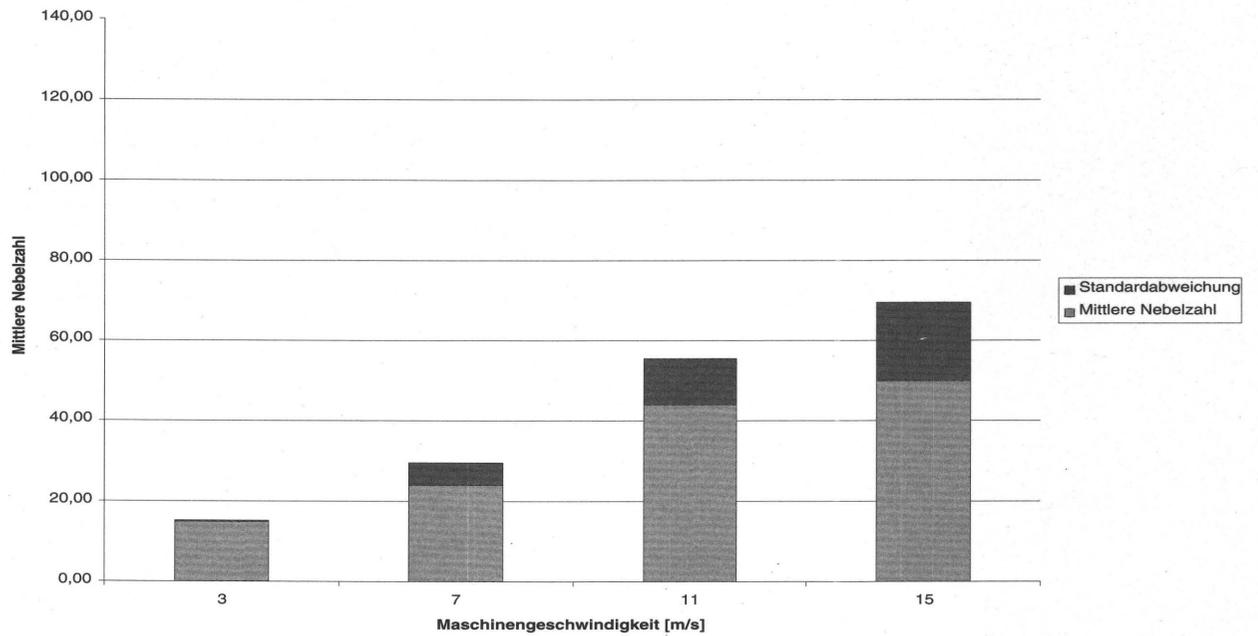


Abbildung 5.24: Mittlere Nebelzahl mit Blende, Testläufe ohne Feuchtmittel

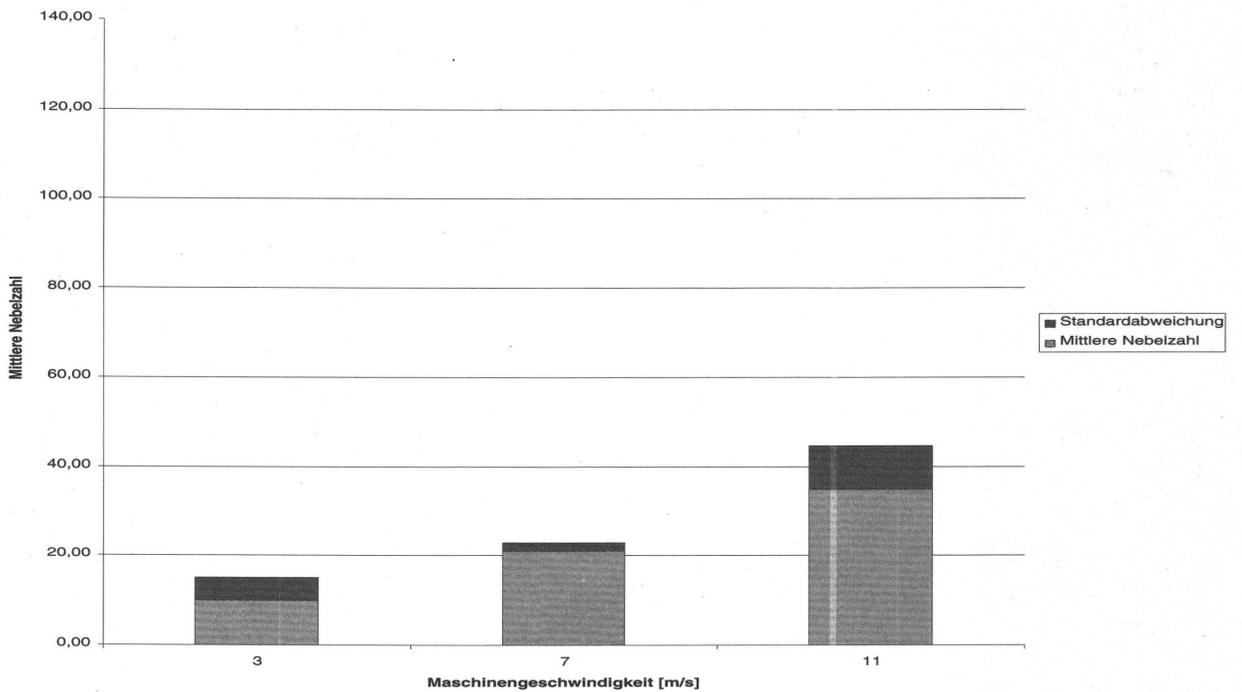


Abbildung 5.25: Mittlere Nebelzahl ohne Blende, Testläufe mit Feuchtmittel

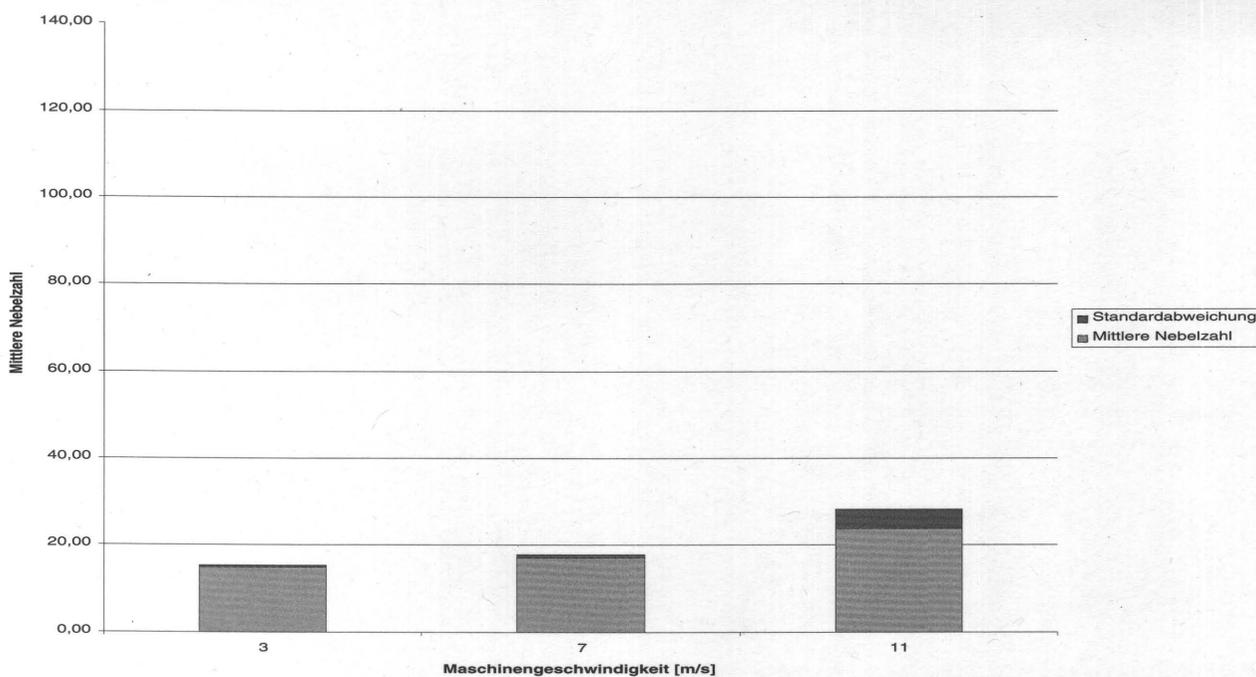


Abbildung 5.26: Mittlere Nebelzahl mit Blende, Testläufe mit Feuchtmittel

Die Untersuchungen zeigten eindeutig, dass eine mit Hilfe von Blenden behinderte nippeinlaufseitige Schlepplströmung auch die Farbnebelmenge an den Walzeneingängen verminderte (Abbildungen 5.23, 5.24). Dieses Ergebnis zeigte sich gleichermaßen in Testläufen sowohl mit als auch ohne Feuchtmittel, wie die Abbildungen 5.23 und 5.24 bzw. 5.25 und 5.26 veranschaulichen. Es ist deutlich zu erkennen, dass mit steigender Maschinengeschwindigkeit der Einfluss der Schlepplströmung zunimmt, was zu einem vermehrten Farbnebeln am nippeinlaufseitigen Walzenspalt führt.

Ein Nebeln der Druckfarbe an den Nippeinläufen kann somit auf Staustromungen zurückgeführt werden, deren Ursache Schlepplströmungen längs der freien Walzenoberflächen sind.

5.3.8 Dynamische Eigenschaften von Walzenbezügen

Von der Firma Felix Böttcher GmbH wurden Gummiwalzen mit einem anteilig stärker ausgeprägten elastischen Bezug zur Verfügung gestellt (*Walzenbezüge Type: FEBOPRINT 310-35*). Diese Walzen lassen – bei sonst gleichen Laufbedingungen – eine geringere Wärmeentwicklung erwarten als die Walzen mit dem bisher eingesetzten Bezugswerkstoff. In der Druckpraxis wird dieser Bezugswerkstoff vorzugsweise in Rollenrotationsdruckmaschinen eingesetzt.

In Übereinstimmung mit den vorangegangenen Experimenten wurden die Messungen wieder bei gleichbleibender Umlaufgeschwindigkeit der Dukturwalze des Filmfarbwerks von 0,3 m/s und unter schrittweiser Steigerung der Maschinengeschwindigkeiten durchgeführt, wobei die einzelnen Testläufe analog zu den Testläufen des vorigen Abschnitts mit einer Dauer von jeweils 15 Minuten angesetzt waren.

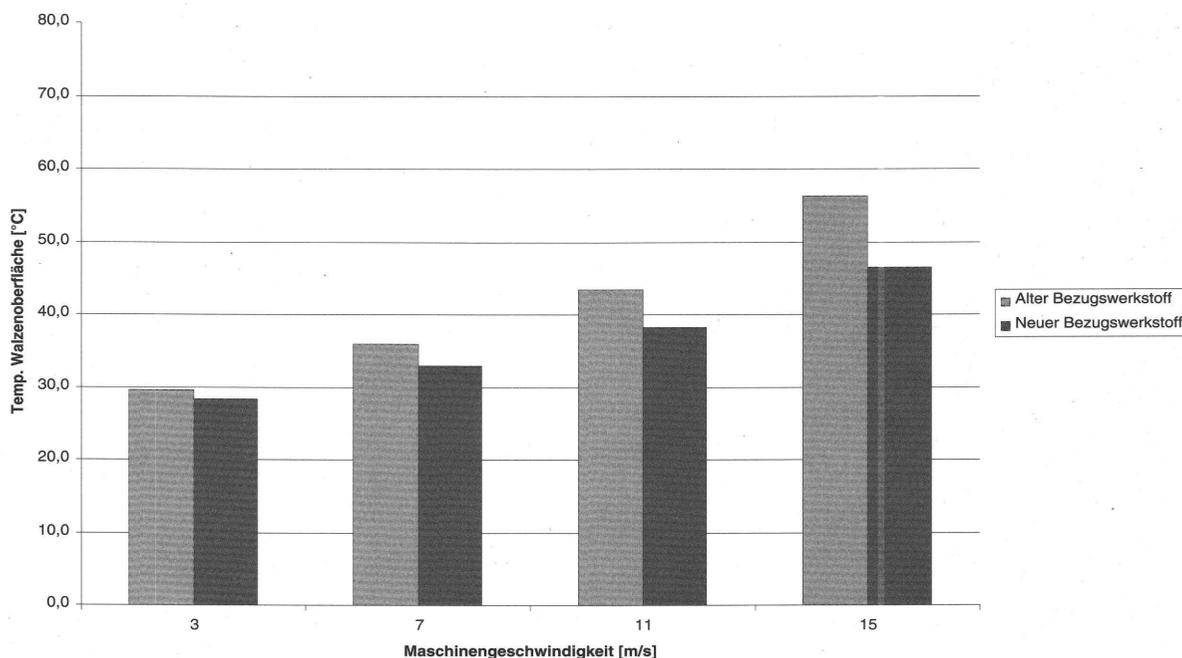


Abbildung 5.27: Temperaturvergleich der unterschiedlichen Bezugswerkstoffe

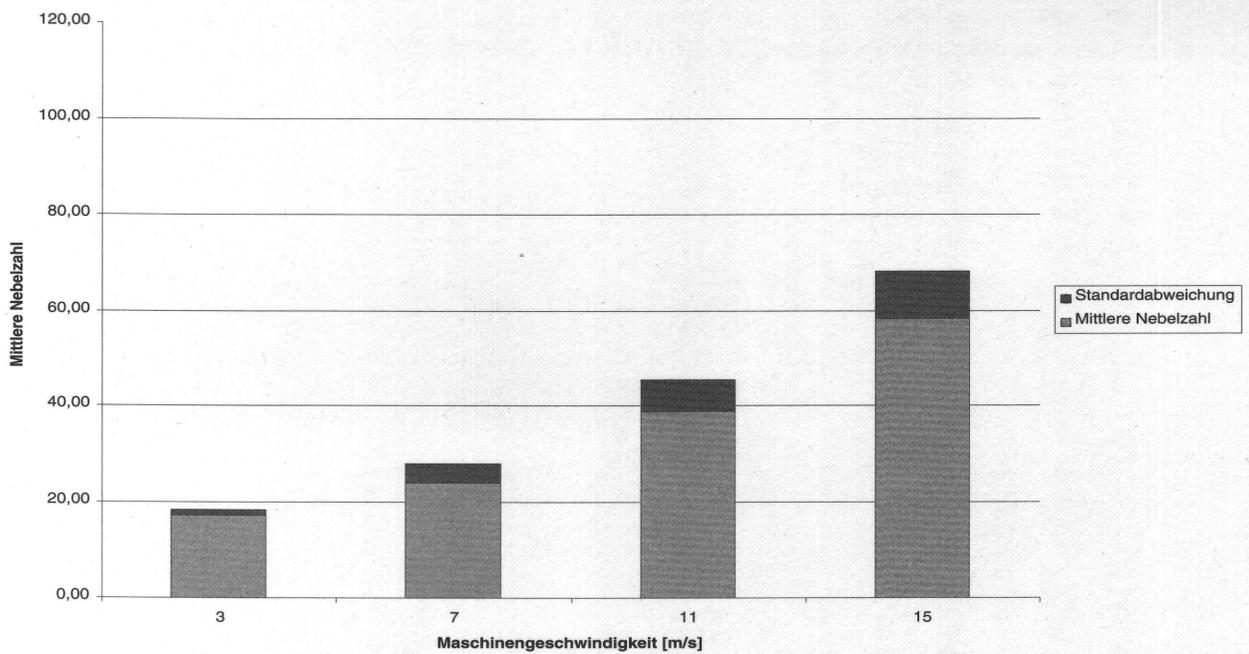


Abbildung 5.28: Bezugswerkstoff alt: Mittlere Nebelzahl plus Standardabweichung

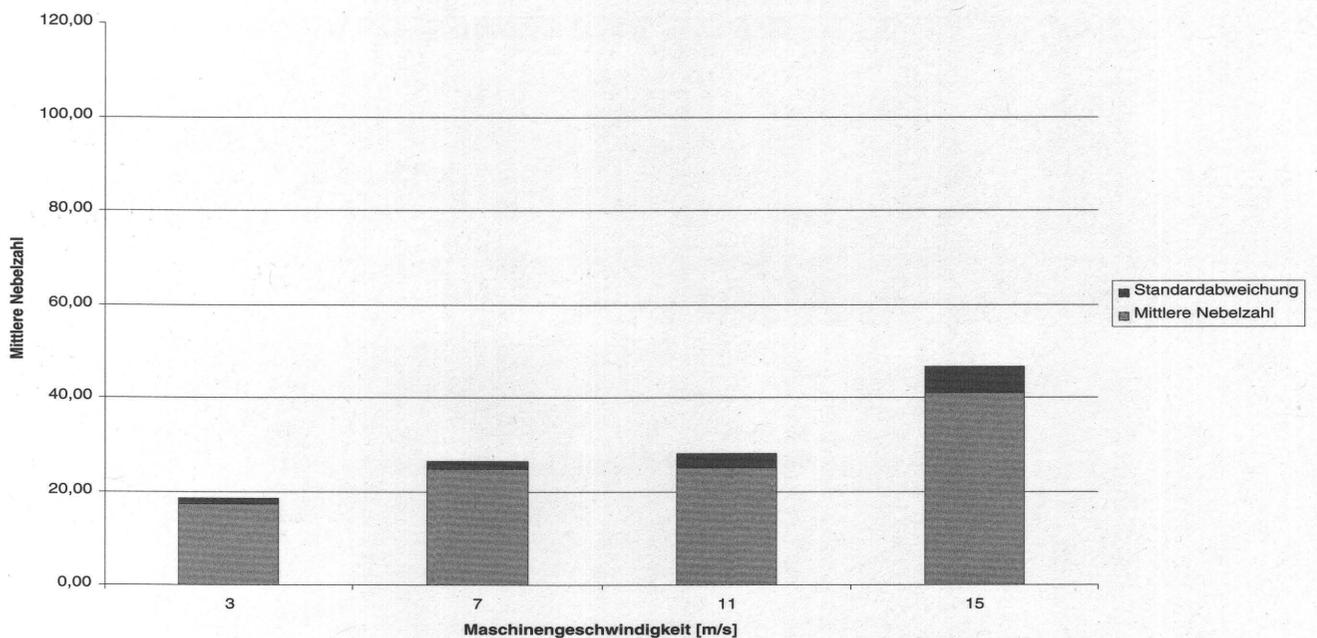


Abbildung 5.29: Bezugswerkstoff neu: Mittlere Nebelzahl plus Standardabweichung

Die Testläufe mit den neuen Gummiwalzen bestätigten die Erwartungen: Im Vergleich mit den Ergebnissen aus den Testläufen mit den ursprünglich im Versuchsstand eingesetzten Gummiwalzen führten die neuen Bezugswerkstoffe zu einer merklich geringeren Erwärmung der Walzenoberflächen. Besonders deutlich wurde dies bei hohen Maschinengeschwindigkeiten: Die in diesen Fällen gemessenen Temperaturen lagen um ca. 10°C niedriger als mit den ursprünglich eingesetzten Gummiwalzen (Abbildung 5.27).

Die Abbildungen 5.28 und 5.29 lassen erkennen, dass eine geringere Erwärmung der Walzenoberflächen von einem verminderten Farbnebeln im Farbwerk begleitet wurde. Besonders deutlich trat dieser Effekt bei größeren Maschinengeschwindigkeiten in Erscheinung. Bestätigung findet das Ergebnis dieser Untersuchungen auch durch die Erkenntnisse aus Kapitel 5.3.3. Dort konnte gezeigt werden, dass ein Farbnebeln von Druckfarben in einer Druckmaschine vermehrt durch höhere Temperaturen als durch ein rein mechanisches Erhöhen der Maschinengeschwindigkeit begünstigt wird.

5.3.9 Bestimmen der mittleren Partikelgröße auf Mess-Streifen

Zur Klärung der noch nicht beantworteten Frage nach der Flächengröße der Farbpartikeln, die sich auf den Mess-Streifen niedergeschlagen hatten, wurde die mittlere Partikelgröße mit Hilfe der Bildverarbeitungssoftware „Analysis“ im Hause der Firma Hartmann Druckfarben GmbH, Frankfurt, bestimmt. Hierbei war es zweckmäßig, nur mäßig mit Druckfarbe bedeckte Mess-Streifen - also das Ergebnis nur zeitkurzer Testläufe - zu untersuchen. Dabei ermöglichte ein softwaremäßiges Nummerieren einer Auswahl von Farbpartikeln ein direktes Zuordnen der berechneten Partikelflächen gemäß Abbildung 5.30.

Das Ergebnis der Auswertungen zeigt Abbildung 5.31. Der mittlere Durchmesser der Farbpartikel entspricht demnach einer Größe von ca. 40µm.

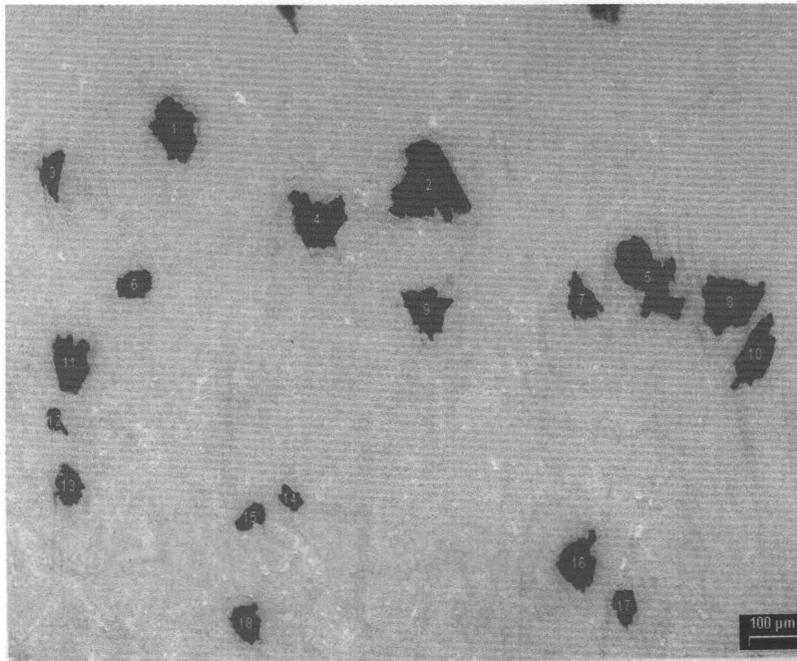


Abbildung 5.30: Darstellung einer Messprobe zur Partikelgrößenbestimmung

VR 9: v = 3 m/s Mess-Stelle: 4L			
Partikel-Nr:	Fläche 10 ⁻⁶ m ²	Umfang 10 ⁻⁶ m	Durchmesser 10 ⁻⁶ m
1	7179,72	367,62	117,02
2	14766,86	625,52	199,11
3	2630,15	266,49	84,83
4	7849,71	419,00	133,37
5	11136,26	605,87	192,85
6	2806,70	211,30	67,26
7	3354,46	286,34	91,14
8	9044,82	420,66	133,90
9	5237,66	356,06	113,34
10	6201,90	380,83	121,22
11	5568,13	349,98	111,40
12	1009,51	154,72	49,25
13	2756,90	248,26	79,02
14	1290,18	149,19	47,49
15	1801,72	177,87	56,62
16	5310,10	343,07	109,20
17	2236,31	192,97	61,42
18	3010,41	227,51	72,42
Mittelwert:	5177,31	321,29	102,27
Standardabw:	3600,23	134,58	42,84

Abbildung 5.31: Bestimmung der mittleren Partikeldurchmesser

5.3.10 Klassifikation der Einflussparameter nach ihrer Größe

Um sowohl den Druckmaschinenherstellern als auch der Zulieferindustrie und darüber hinaus auch den Anwendern konkrete Informationen zum „Spritzen“ und „Nebeln“ von Druckfarben zu geben, wurde eine Klassifizierung der aus den Untersuchungen als bestimmend hervorgegangenen Parameter vorgenommen. Es erfolgte eine Unterteilung in sechs Prioritätsklassen gemäß Abbildung 5.32.

Der Einfluss der jeweiligen Tropfengrößen wurde zum einen nach den aus der Literatur gewonnenen Erkenntnissen und zum anderen aus den durch die eigenen Untersuchungen gewonnenen Erfahrungswerten beurteilt; es wurden aber auch Informationen aus der Praxis in die Beurteilung einbezogen.

In der Abbildung 5.32 ist die Bewertung der Einflussfaktoren zum Nebeln von Druckfarbe tabellarisch zusammengestellt. Sie begründet sich wie folgt:

Die Farbschichtdicke übt nach den in Kapitel 5.3.5 beschriebenen Testläufen unmittelbar einen großen Einfluss auf das Farbverhalten aus.

Es konnte weiterhin gezeigt werden, dass sich das Farbnebeln bei Feuchtung reduziert. Der Feuchtung kann somit – bezüglich des Farbnebelns - ein unmittelbar hemmender Einfluss zugeschrieben werden.

Dem Vorgang der Ladungstrennung, der in einem Zusammenhang mit der Luftfeuchtigkeit steht, ließ in einer Produktionsmaschine kaum einen Einfluss auf das Farbnebeln erkennen.

Der direkte Einfluss der Raumtemperatur auf das Nebeln einer Druckfarbe konnte nur als „mittel“ eingestuft werden. Dennoch bedeutet dies, dass eine höhere Raumtemperatur auch zu einem vermehrten Farbnebeln führt.

Die Testläufe nach Kapitel 5.3.3 haben gezeigt, dass ein Verändern der Walzentemperatur ebenfalls ein Verändern der rheologischen Eigenschaften einer Druckfarbe bewirkt. Dies wirkt sich, wie gezeigt, erheblich auf das Nebeln einer Druckfarbe aus.

Nebeln von Druckfarben			
Einflussparameter	Einfluss		
	gering	mittel	groß
<i>Farbschichtdicke</i>		++	
<i>Feuchtung</i>			--
<i>Ladungstrennung</i>	++		
<i>Luftfeuchtigkeit</i>	++		
<i>Raumtemperatur</i>		++	
<i>Rheologie der Druckfarbe</i>			++
<i>Temperatur der Walzen</i>			++
<i>Walzenanordnung</i>	+		
<i>Walzenanpressdruck</i>			+
<i>Walzenbeschichtung</i>			+
<i>Walzendurchmesser</i>		+	
<i>Walzengeschwindigkeit unter Ausschluss der Temperatureinflüsse</i>		++	

- ++ unmittelbar bzw. stark fördernd
- + mittelbar bzw. mäßig fördernd
- mittelbar bzw. mäßig hemmend
- unmittelbar bzw. stark hemmend

Abbildung 5.32: Unmittelbarer und mittelbarer Einfluss von Parametern auf das Farbnebelverhalten

Die Walzenanordnung direkt wirkt sich nicht auf ein Farbnebeln aus. Allenfalls mittelbar kann ihr über die jeweilige Walzenposition innerhalb eines Farbwerks - und das bedeutet über die örtliche Farbschichtdicke - ein Einfluss zugeschrieben werden.

Der Walzenanpressdruck und das Walzenbeschichtungsmaterial wirken sich, wenn auch nur indirekt, stark auf das Nebeln einer Druckfarbe innerhalb eines Farbwerks aus. Direkt beein-

flussen diese beiden Parameter die örtliche Temperatur der Druckfarbe. Diese aber wirkt sich, wie gezeigt, erheblich auf das Nebeln einer Druckfarbe aus.

Der Durchmesser der Farbwerkswalzen und ihre Umfangsgeschwindigkeiten bestimmen die Geschwindigkeiten, mit denen sich die örtlichen Walzenspalte öffnen. Diese „Trenngeschwindigkeiten“ wirken sich unmittelbar auf das Farbnebeln aus, auch wenn von ihnen insgesamt nur ein Einfluss mittlerer Größe ausgeht.

Die in Abbildung 5.33 zusammengestellten Bewertungen hinsichtlich eines Spritzens von Druckfarben begründen sich wie folgt:

Sowohl interne Untersuchungen als auch Berichte aus der Industrie ergaben, dass sich sowohl die Farbschichtdicke als auch die Feuchtung erheblich auf das Spritzen einer Druckfarbe auswirken.

Ladungstrennungsvorgänge, die – wie ausgeführt – stark von der Luftfeuchtigkeit abhängen, haben – nach Beobachtungen in einer Produktionsstätte - nur einen geringen unmittelbaren Einfluss auf das Spritzen der Druckfarbe.

Auch die Raumtemperatur wirkte sich nach den experimentell gewonnenen Erkenntnissen unmittelbar nur wenig auf ein Spritzen der Druckfarbe aus.

Hingegen zeigte sich auch bei dem Vorgang des Spritzens von Druckfarbe eine starke Abhängigkeit sowohl von dem in erster Linie temperaturbedingten rheologischen Zustand der Druckfarbe als auch von der Temperatur der Walzenoberflächen.

Wie beim Farbnebeln wirkte sich die Walzenanordnung auch allenfalls mittelbar über die örtliche Farbschichtdicke auf ein Spritzen der Druckfarbe aus. Der Walzenanordnung kann infolge dessen ein mittlerer Einfluss zugeschrieben werden.

Auch der Walzenanpressdruck wirkt sich mittelbar über die Temperatur der Druckfarbe erheblich auf das Spritzen einer Druckfarbe aus.

Spritzen von Druckfarben			
Einflussparameter	Einfluss		
	gering	mittel	groß
<i>Farbschichtdicke</i>			++
<i>Feuchtung</i>			++
<i>Ladungstrennung</i>	++		
<i>Luftfeuchtigkeit</i>	++		
<i>Raumtemperatur</i>	++		
<i>Rheologie der Druckfarbe</i>			++
<i>Temperatur der Walzen</i>			++
<i>Walzenanordnung</i>		+	
<i>Walzenanpressdruck</i>			+
<i>Walzenbeschichtung</i>	+		
<i>Walzendurchmesser</i>		+	
<i>Walzengeschwindigkeit unter Ausschluss der Temperatureinflüsse</i>			++

- ++ unmittelbar fördernder Einfluss
- + mittelbar fördernder Einfluss
- mittelbar hemmender Einfluss
- unmittelbar hemmender Einfluss

Abbildung 5.33: Unmittelbarer und mittelbarer Einfluss von Parametern auf das Farbspritzverhalten

1Dagegen änderten sich bei sonst gleichen Bedingungen der Vorgang des Spritzens von Druckfarbe nur wenig in Abhängigkeit von dem Werkstoff des Walzenbezugs.

Schließlich erwies sich das Spritzen von Druckfarbe auch stark abhängig von der jeweiligen Druckgeschwindigkeit. Da – wie beim Farbnebeln – davon ausgegangen werden kann, dass hierbei die Farbtrenngeschwindigkeit vorrangig einen Einfluss ausübt, sind Walzendurchmes-

ser und Walzenumfangsgeschwindigkeit in einem entsprechenden Zusammenhang zu sehen. Sowohl Farbnebeln als auch Farbspritzen entstanden stets im Bereich der Walzenkontaktlinien – das Farbnebeln auf der Länge einer Kontaktlinie, das Farbspritzen an den Walzenrändern, an denen sich durch Farbverdrängung stets ein überstehender Farbwulst bildete. Insgesamt ergibt sich die Aussage, dass der Zusammenhalt der Farbschichten zumindest auf den freien Walzenoberflächen, wahrscheinlich aber auch in den Farbwülsten an den Walzenrändern durch die mit den Walzenrotationen verbundenen Zentripetalbeschleunigungen auch bei den heutigen hohen Druckgeschwindigkeiten der Zeitungsrotationsdruckmaschinen von 20 m/sec und mehr nicht gefährdet ist.

6 Zusammenfassung

Die Literaturrecherche führte zu keiner eindeutigen Trennung der Phänomene des „Spritzens“ und „Nebelns“ von Druckfarben. Es konnte jedoch in drei mögliche Zustände unterteilt werden:

1.) Nebeln von Flüssigkeiten:

Die Farbpartikel befinden sich in einem Schwebезustand in der Luft.

2.) Spritzen von Flüssigkeiten:

Die Farbpartikel folgen der Erdanziehung.

3.) Zwischenzustand:

In diesem Zustand können die beiden Phänomene „Spritzen“ und „Nebelns“ nicht eindeutig voneinander getrennt werden.

Um den Einfluss von Geschwindigkeit und Temperatur auf das Farbverhalten getrennt benennen zu können, musste in besonderen Testläufen versucht werden, beide physikalischen Größen so weit wie möglich zu entkoppeln. Zu diesem Zweck wurden zeitkurze Testläufe von zwei Minuten Dauer durchgeführt. In einer ersten Versuchsserie wurden Messungen bei unterschiedlichen Maschinengeschwindigkeiten durchgeführt, wobei die Walzen weitgehend auf der jeweils vorgegebenen Temperatur gehalten wurden. Dies erforderte einerseits zum Angleichen der Temperaturen sehr lange Standzeiten zwischen den einzelnen Testläufen, konnte aber trotzdem eine Erwärmung der Gummiwalzen nicht ganz ausschließen, aber doch stark einschränken.

In einer weiteren Versuchsserie wurde vorrangig dem Einfluss der Temperatur nachgegangen. Hierzu wurden Messungen bei einer fest vorgegebenen Maschinengeschwindigkeit und jeweils unterschiedlichen Walzentemperaturen durchgeführt. Auch in diesen Messungen konnte die Temperatur der Walzen über die kurze Messdauer nur nahezu konstant gehalten werden. Die Abweichungen von den vorgegebenen Walzentemperaturen blieben aber hinreichend gering und beeinträchtigten die Messergebnisse daher allenfalls untergeordnet.

Die Untersuchungen führten zu dem Ergebnis, dass der Einfluss der Walzentemperatur wesentlich stärker ein Farbnebeln begünstigt als der Einfluss der Maschinengeschwindigkeit. Die ermittelten Farbnebelmengen waren bei einer fortlaufenden Erhöhung der Walzentempera-

ren um etwa ein Drittel bis um die Hälfte größer als im Fall von anwachsenden Maschinengeschwindigkeiten bei annähernd gleichbleibenden Walzentemperaturen. Unabhängig davon, ob die Testläufe mit oder ohne Feuchtmittel durchgeführt wurden, lieferten die Messungen keine grundsätzlich voneinander abweichenden Farbnebelmengen.

Instationäre Betriebszustände ließen keine besonderen Veränderungen im Spritzen und Nebeln gegenüber den jeweils vergleichbaren stationären Laufzuständen erkennen. Darüber hinaus ist ihr zeitlicher Anteil schon an den in der Regel 15-minütigen Aufzeichnungen vernachlässigbar gering. Für Produktionsläufe gälte dies umso mehr. Die Zugabe von Feuchtmittel reduzierte die Neigung zum Farbnebeln im Vergleich zu den Testläufen ohne Feuchtmittel, erhöhte jedoch die Neigung zum Farbspritzen.

Weiter interessierte die Frage, ob und wie sich Walzenein- und -ausgänge hinsichtlich eines Nebelns und Spritzens unterscheiden. Es zeigte sich, dass bei geringeren Farbschichtdicken annähernd identisch starkes Farbnebeln sowohl am Nippeingang als auch am Nippausgang einstellt. Hingegen überwog bei größeren Farbschichtdicken deutlich ein Nebeln der Druckfarbe am Nippeingang. Feuchtmittel führten auch in diesen Versuchsreihen zu einer Reduzierung des Farbnebelns, jedoch zu keiner merklichen Absenkung der Temperatur der Druckfarbe.

IR-Filmaufnahmen an der Versuchsdruckmaschine zeigten deutlich eine überproportionale Erwärmung der Gummiwalzen im Farbwerk. Ein Temperaturprofil in Farbflussrichtung konnte im Rahmen dieser Messungen nicht eindeutig nachgewiesen werden.

Zur experimentellen Lösung der Fragestellung, ob ein Farbnebeln sowohl im Einlauf als auch im Auslauf eines Walzennipps entsteht oder ob der nippeinlaufseitig beobachtete Farbnebel ursächlich auf Schleppestömungen längs der Walzenoberflächen zurückzuführen ist, wurden zur Vermeidung der Schleppestömungen an den Nippeingängen Metallblenden angebracht. Die Experimente bestätigten, dass ein Farbnebeln an den Walzeneingängen unmittelbar mit der Existenz von Schleppestömungen verbunden ist. Schleppestömungen, die sich deutlich auf einen Nippeingang auswirken, sind wiederum sehr stark von der Maschinengeschwindigkeit abhängig. Die Messungen bestätigen somit die Vermutung, dass ein Farbnebeln an den Nippeingängen auf Staustömungen zurückzuführen ist, der sich auf Grund von Schleppestömungen an den Nippeinläufen ausbildet.

Der experimentelle Vergleich zweier unterschiedlicher Walzenbeschichtungsmaterialien lieferte die Erkenntnis, dass Gummiwalzen mit einem anteilig stärker ausgeprägten elastischen Bezug eine geringere Wärmeentwicklung aufweisen. Dieser physikalische Effekt war unmittelbar mit einer geringeren Neigung der Druckfarbe zum Farbnebeln verbunden.

Die Bestimmung der Partikelgrößen unter Verwendung des Bildverarbeitungsprogramms „Analysis“ ergab für die gemessenen Farbpartikel einen mittleren Durchmesser von ca. 40µm.

Das Klassifizieren der Einflussgrößen nach ihrem mittelbaren bzw. unmittelbaren Einfluss auf das Farbnebel- bzw. Spritzverhalten liefert eine nützliche Hilfe einerseits für die Maschinenhersteller und die Zulieferindustrie bei ihrer Planung neuer Maschinen und Komponenten und andererseits auch für den Anwender, weil dadurch die drucktechnischen Parameter gezielter an den einzelnen Druckprozess angepasst werden können, um ein Spritzen und Nebeln von Druckfarbe zumindest einzuschränken. Ein verringertes Farb-Nebeln und Farb-Spritzen in Rollenrotationsdruckmaschinen führt unmittelbar zu einer Steigerung der Qualität von Druckergebnissen und verbessert zugleich die Arbeitsbedingungen, was aufwendige Reinigungsarbeiten, Kapselungen und/oder arbeitshygienische Hemmnisse wie Aerosolbildung einzuschränken oder gar zu vermeiden hilft.

7 Literaturverzeichnis

/1/ Fetsko J.M., Lavelle J.S.

Misting Of Printing Inks

American Ink Maker (1979), Nr. 3, S.47

/2/ Hermanies R.

Die Auswirkung von Luftströmungen an rotierenden Walzen auf die Feuchtmittelzuführung im Offsetdruck

Deutscher Drucker Nr. 12/31.3.94

/3/ Brötz H.

Farbspaltungszahl im Nass-Offset-Farbwerk unter Einschluss des Feuchtmittels

Institutsbericht 3/1993

Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren, TU-Darmstadt

/4/ Schirmer K., Yoshijima S.

Rheologische Eigenschaften von Druckfarben bei verschiedener Temperatur,

Deutsche Forschungsgesellschaft für Druck- und Reproduktionstechnik E.V.,

FOGRA-Institutsmitteilung 5.008, 1973

- /5/ Traber K., Haas M., Dolezalek F.
Die Wärmebilanz der Farbwerke von Hochgeschwindigkeitsrotationen
FOGRA-Forschungsbericht Nr. 3268, 1992
- /6/ Rühle S.
Der derzeitige Erkenntnisstand auf dem Gebiet der Farbübertragung
Papier und Druck 28 (1979) 1
- /7/ Pylotis D.
Ursachen von Schwankungen der Druckqualität im Offsetdruck bei konstanter Farbwerkstemperatur
FOGRA-Forschungsbericht Nr. 3268, 1977
- /8/ Weschke H., Brandt H., Etzel A., Pauls R.
Lexikon der grafischen Technik
VEB-Fachverlag 1977, 4. Auflage, Nr.1214
- /9/ Meyers Physiklexikon
Bibliographische Institut AG, Mannheim, 1973

/10/ Vogel H.

Gerthsen Physik , 19. Auflage

Springer Verlag Berlin, Heidelberg, 1997

/11/ Stuart H., Klages G.

Kurzes Lehrbuch der Physik. Berlin, Heidelberg: Springer - Verlag, 1997, 15. Auflage.

S. 49 – 51: Oberflächenspannung

/12/ Vogel H.

Grundkurs Physik. Berlin,

Heidelberg: Springer – Verlag, 1993, 2. Auflage

/13/ Tipler P.

Physik

Berlin, Heidelberg, Oxford: Spektrum Akademischer Verlag, 1994

/14/ Hering E., Martin R., Stuhler M.

Physik für Ingenieure

Düsseldorf: VDI – Verlag GmbH, 1995, 5. Auflage

/15/ Sigloch H.

Technische Fluidmechanik

Düsseldorf: VDI – Verlag GmbH, 1996, 3. Auflage

/16/ Bohl W.

Technische Strömungslehre

Vogel Verlag und Druck KG, 1994, 10. Auflage

/17/ Prandtl L., Oswatitsch K., Wieghardt K.

Führer durch die Strömungslehre. Düsseldorf

VDI – Verlag GmbH, 1995, 9. Auflage

/18/ Bauer H.

Grundlagen der Einphasen- und Mehrphasenströmungen

Aarau, Frankfurt am Main: Sauerländer AG, 1971

/19/ Schmidt O.

Zerstäubung von Flüssigkeiten mit rotierenden Walzen, Reihe 3, Nr. 250. Düsseldorf

VDI – Verlag GmbH, 1991

/20/ Hellmann H.

Qualitative Hydrologie – Wasserbeschaffenheit und Stoff-Flüsse

Bd. 2 (Lehrbuch der Hydrologie). Berlin, Stuttgart: Gebrüder Borntraeger, 1999

/21/ Blayo A., Fang S. W., Gandini A., Le Nest J.F.

Ink Misting Phenomena

American Ink Maker (May 1998)

/22/ 41st NPIRI Technical Conference

Fort Lauderdale, October 15-17, 1997

/23/ Riedl R., Neumann D., Teubner J.

Technologie des Offsetdrucks

VEB Fachbuchverlag Leipzig, 1989

/24/ Hübner G.

Ein Beitrag zum Problem der Flüssigkeitsspaltung in der Drucktechnik

Dissertation, Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren, TU-Darmstadt, 1991