

Die Bearbeitung von Warenbahnen in kontinuierlichen Prozessen ist ein etabliertes Hochdurchsatzverfahren zur Fertigung und Veredelung von Rollenware. Bekannte Erzeugnisse sind Printmedienprodukte wie Tageszeitungen, Fachmagazine und Bücher oder Verpackungsmaterialien wie mehrlagige Barrierefolien aus Kunststoffen und metallische Folien. Seit Ende des 20. Jahrhunderts wurden Technologien aus der Halbleiterfertigung in kontinuierliche Fertigungsfolgen überführt. Die geringen Produktionskosten und die kontinuierliche Massenproduktion machen Rolle-zu-Rolle-Prozesse zu einer der Top-Ten-Technologien fortschrittlicher Fertigungs- und Automationsverfahren.

Kontinuierliche UV-NIL-Prozesse sind hinsichtlich ihrer Ausbringungsmenge jedoch nicht mit etablierten Druckerzeugnissen zu vergleichen. Die Erschließung des wirtschaftlichen Potentials bedarf somit Forschungs- und Entwicklungsaufwand zur Untersuchung des Rolle-zu-Rolle-UV-NIL-Prozesses. Dies gilt insbesondere hinsichtlich seiner Skalierbarkeit in Bezug auf Bahngeschwindigkeit bei gleichbleibend hoher Produktqualität. Das Produktionssystem selbst bildet meist nicht den Kern der Prozessbetrachtung, obgleich mit seiner Auslegung Rahmenbedingungen für wichtige Stellgrößen vorgegeben werden.

Mit der vorliegenden Arbeit wird die Steigerung der Wirtschaftlichkeit von Rolle-zu-Rolle-UV-NIL-Prozessen angestrebt. Im Fokus der Betrachtung steht die Identifikation qualitätsrelevanter Prozessgrößen im Hinblick auf die Skalierung der Produktionsmenge. Es wird aufgezeigt, inwieweit sich Replikationsfehler durch die Modifikation dieser Prozessgrößen kompensieren lassen. Die wissenschaftliche Aufarbeitung ist dazu in die folgenden Teilaspekte gegliedert:

- Klassifizierung bekannter Fehlerbilder und Identifikation relevanter Prozessgrößen
- Konzeption und Aufbau eines modularen Rolle-zu-Rolle-Entwicklungsprüfstands für die Replikation optischer Mikrostrukturen im UV-NIL-Verfahren
- Empirische Untersuchung der identifizierten Prozessgrößen, Priorisierung ihrer Relevanz und Ableitung einer iterativen Vorgehensweise für die Skalierung der kontinuierlichen Replikationsprozesse
- Ergebnisvalidierung durch Transfer der Untersuchungsergebnisse auf weitere optische Mikrostrukturen
- Betrachtung der Limitationen möglicher Kompensationsstrategien durch empirische und simulative Analyse bekannter Fehlerbilder

Die Demonstration der Prozessfähigkeit erfolgt anhand einer beispielhaften kontinuierlichen Fertigung endloser, optischer Folien.

ISBN 978-3-86359-917-1



9 783863 599171



Thomas Bastuck

Skalierbarkeit von Rolle-zu-Rolle-UV-Nano-Imprint-Prozessen

Thomas Bastuck

Skalierbarkeit von Rolle-zu-Rolle-UV-Nano-Imprint-Prozessen



Skalierbarkeit von Rolle-zu-Rolle-UV-Nano-Imprint-Prozessen

Scalability of Roll-to-Roll UV Nano Imprint Processes

Von der Fakultät für Maschinenwesen
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Thomas Bastuck

Berichter:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christian Brecher
Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Peter Loosen

Tag der mündlichen Prüfung: 22. Oktober 2020

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Universitätsbibliothek online verfügbar.

ERGEBNISSE AUS DER PRODUKTIONSTECHNIK

Thomas Bastuck

Skalierbarkeit von Rolle-zu-Rolle-UV-Nano-Imprint-
Prozessen

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. T. Bergs
Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. G. Schuh
Prof. Dr.-Ing. C. Brecher
Prof. Dr.-Ing. R. H. Schmitt

Band 31/2020



Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <https://portal.dnb.de> abrufbar.

Thomas Bastuck:

Skalierbarkeit von Rolle-zu-Rolle-UV-Nano-Imprint-Prozessen

1. Auflage, 2020

Gedruckt auf holz- und säurefreiem Papier, 100% chlorfrei gebleicht.

Apprimus Verlag, Aachen, 2020

Wissenschaftsverlag des Instituts für Industriekommunikation und Fachmedien
an der RWTH Aachen

Steinbachstr. 25, 52074 Aachen

Internet: www.apprimus-verlag.de, E-Mail: info@apprimus-verlag.de

Printed in Germany

ISBN 978-3-86359-917-1

D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2020)

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand neben meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Bereich Produktionsmaschinen am Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT in Aachen.

Mein Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christian Brecher für die wissenschaftliche Betreuung und das mir entgegengebrachte Vertrauen bei der Erstellung dieser Arbeit. Ebenso danke ich Herrn Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Peter Loosen für die Übernahme des Korreferats. Bei Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Georg Jacobs bedanke ich mich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Die Entstehung dieser Arbeit wurde insbesondere durch das Umfeld am Fraunhofer IPT begünstigt. Mein persönlicher Dank gilt daher allen Kolleginnen und Kollegen, die in vielfältiger Weise direkt oder indirekt einen Beitrag zum Gelingen dieser Arbeit geleistet haben. Besonders hervorheben möchte die ehemaligen Kollegen Daniel De Simone, Titus Gotthardt, Bernd Meiers, Tobias Müller, Sebastian Sauer, Martin Priwisch, Dominik Sensen und Daniel Zontar. Die gemeinsame Zeit am Fraunhofer IPT war fachlich sowie menschlich stets sehr motivierend und bereichernd. Bei den Herren Maximilian Kosel, Dr.-Ing. Bernd Meiers, Dr.-Ing. Richard Schares und Dr. rer. nat. Lukas Zimmer möchte ich mich für die eingehende fachliche Durchsicht der Arbeit und die wertvollen Anregungen bedanken.

Des Weiteren gilt mein Dank meinen studentischen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern sowie den Studierenden deren Projekt-, Studien- und Abschlussarbeiten, die ich betreuen durfte. Durch Ihre engagierte Tätigkeit haben sie direkt und indirekt an der Entstehung der Rolle-zu-Rolle-Produktionsplattform und dieser Arbeit mitgewirkt. Hervorheben möchte ich an dieser Stelle Robin Bisselink, Sangwook Lee, Mareike Roling, Christoph Serio und Lien Ta.

Für die vielfältige und kompetente Unterstützung bei der Konstruktion und Inbetriebnahme der Rolle-zu-Rolle-Produktionsplattform gilt mein Dank der Bosch Rexroth AG und vor allem Herrn Manuel Gallardo. Weiter möchte ich mich bei den Technikern und Facharbeitern des Fraunhofer IPT bedanken, die mich bei der Entwicklung und dem Aufbau der Maschinenmodule mit Rat und Tat begleitet haben.

Besonders freut es mich zu sehen, wenn die Ergebnisse jahrelanger Anstrengungen zur Beantwortung aktueller Fragestellungen aufgegriffen und sie zur Basis neuer Forschungs- und Entwicklungsthemen werden. Daher möchte ich den Herren Sebastian Dormann, Maximilian Kosel und Martin Priwisch nicht nur für die vielen Diskussionen während der Entstehung der Arbeit danken, sondern insbesondere dafür, dass sie die Maschinenplattform und das mit ihr gewonnene Prozesswissen erweitern.

Herrn Dr.-Ing. Christoph Baum danke ich neben der finalen Durchsicht des Manuskripts für die großzügigen Freiräume zur Gestaltung des Themenbereichs der Rolle-zu-Rolle-Produktionsmaschinen sowie für das mir entgegengebrachte Vertrauen bei der Leitung nationaler und internationaler Industrie- und Forschungsprojekte.

Besonderer Dank gebührt meiner Familie. Meinen Eltern Mariluse und Hans-Georg, die mir in allen Lebenssituationen mit unbedingter und uneingeschränkter Unterstützung zur Seite standen. Meinen Geschwistern Elisabeth und Michael, die mit motivierenden Worten und Gelegenheiten der Zerstreuung an meiner Seite waren. Meinem Großvater Hans danke ich für seine unermüdliche Neugier und seine Begeisterung für mein Tun. Ohne euch wäre diese Arbeit nie entstanden.

Schließlich danke ich meiner lieben Kerstin für ihr Verständnis und ihre Geduld in den zahlreichen Stunden, die ich am Schreibtisch verbracht habe. Deine lieben Worte und deine moralische Unterstützung haben mich nie das Ziel aus den Augen verlieren lassen.

Rommersheim, im Herbst 2020

Thomas Bastuck

Kurzzusammenfassung

Intention dieser Arbeit ist es, Erkenntnisse zur Beherrschung der Rolle-zu-Rolle-UV-Nanoimprint-Lithografie zu erarbeiten, um die Attraktivität des Prozesses für industrielle Anwendungen zu erhöhen. Obgleich dem Verfahren durch unterschiedliche Studien zahlreiche Applikationsszenarien zugeschrieben werden und erfolgreiche Einsätze in industriellen Anwendungen bekannt sind, ist das Spektrum der kommerziellen Anwendungen im Vergleich zum akademisch belegten Potenzial gering. Erkenntnisse zur Stabilisierung und Kontrolle des kontinuierlichen Replikationsprozesses sind Wettbewerbsvorteile. Sie werden seitens der freiwettbewerblichen Unternehmen nicht kommuniziert. Key-Enabler zur weiteren Marktdurchdringung der Technologie ist die Steigerung des Durchsatzes bei reproduzierbarer Produktqualität. Vor diesem Hintergrund bildet die Identifikation relevanter Prozessparameter mit signifikantem Einfluss auf die Produktqualität den Kern der im Folgenden dokumentierten Arbeiten.

Die Aufarbeitung des Stands der Technik konzentriert sich zum einen auf die Charakteristika des UV-basierten Replikationsprozesses. Der Prozess wird gegenüber kompetitiven Ansätzen abgegrenzt und seine ökonomische Relevanz verdeutlicht. Zum anderen umfasst die Recherche die Produktionstechnik zur Mikro- und Nanostrukturierung in kontinuierlichen UV-NIL-Prozessen.

Eine Analyse bekannter Fehlerausprägungen und Fehlerquellen in kontinuierlichen UV-NIL-Prozessen dient der Eingrenzung der relevanten Maschinenparameter für die spätere Prozessbetrachtung. Fünf maschinenseitige Stellgrößen werden als ergebniskritisch identifiziert. Diese sind die Bahngeschwindigkeit v_{Bahn} , die Andruckkraft F_{an} , die initiale Beschichtungshöhe h_0 , die Bestrahlungsstärke E_{UV} und die Temperierung T_{Lack} des UV-Lacks.

Basierend auf dieser Erkenntnis wird ein Rolle-zu-Rolle-Produktionssystem präsentiert, mit dem die Kontrolle der genannten Parameter gewährleistet ist.

Die Auswirkungen der fünf Parameter auf das Replikationsergebnis werden anhand empirischer Versuchsreihen ermittelt. Zielgröße ist die Minimierung der unstrukturierten Restschichtstärke h_{R} bei vollständiger und fehlerfreier Replikation von Mikro- und Nanogeometrien bei steigender Produktionsgeschwindigkeit. Die Auswertung der Ergebnisse dient zur Beschreibung eines Vorgehens zur Skalierung und Optimierung des Produktionsdurchsatzes in einem einfachen Algorithmus. Dieser legt fest, in welcher Sequenz die Maschineneinstellungen vorzunehmen sind, welche Qualitätsindikatoren zu überprüfen sind und welche Voraussetzungen gegeben sein müssen, um einen stabilen Rolle-zu-Rolle-UV-NIL-Prozess zu gewährleisten.

Transfer und Validierung der Untersuchungsergebnisse erfolgen durch Abformung dreiseitiger Mikropyramiden, sogenannter Corner-Cubes. Es ergeben sich strukturabhängige Einstellgrenzen der Parameter, deren Überschreitung zu Replikationsdefekten führt. Eine Betrachtung der beiden häufigsten Fehlerbilder erschließt deren Entstehungsmechanismen.

Short summary

The intention of this thesis is to elaborate findings on the control of roll-to-roll UV-nanoimprint lithography in order to increase the attractiveness of the process for industrial utilization. Although numerous application scenarios are attributed to the process by various studies and successful usage in industrial environments are known, the spectrum of commercial usage in comparison to the academically proven potential is rather small. Findings on the stabilization and control of the continuous replication process are competitive advantages. They are not communicated by free-market companies. The key enabler for further market penetration of the technology is the increase of throughput while reproducible product quality. In this context the core of the results documented here, is the identification of relevant process parameters with a significant influence on product quality.

On the one hand the review of the state of the art concentrates on the characteristics of an UV-based replication process. A differentiation of the UV-NIL process from competitive approaches states its economic relevance. On the other hand, the review includes an insight view on production technology for micro- and nanostructuring in continuous UV-NIL processes.

An analysis of known error characteristics and error sources in continuous UV-NIL processes serves to narrow down the relevant machine parameters for later process assessment. Five machine parameters are identified as critical for the results. These are the web speed v_{Bahn} , the pressure force F_{an} , the initial coating height h_0 , the irradiation energy E_{UV} and the temperature control T_{Lack} of the coating.

Based on this knowledge, a roll-to-roll production system is presented with which the control of these parameters could be guaranteed.

The effects of the five parameters on the replication result are determined based on empirical test series. The objective is to minimize the unstructured residual layer thickness h_{R} with defect-free replication of micro- and nanogeometries at increasing production speed. A low residual layer with ideal replication is the quality indicator for a stable, reproducible and resource-efficient replication process. The evaluation of the results serves to describe a procedure for scalability and optimization of the production throughput in a simple algorithm. The algorithm determines in which sequence the machine settings have to be set, which quality indicators are to be checked and which requirements must be met in order to guarantee a stable roll-to-roll UV-NIL process.

Transfer and validation of the test results were carried out by imprinting three-sided micropyramids, so-called corner cubes. Setting limits of the parameters are shown, whose exceedance result in replication defects. An investigation on two most common error patterns gives a clue on their formation mechanisms.

Inhaltsverzeichnis

Content

1	Einleitung	1
2	Stand der Technik in Forschung und Industrie	9
2.1	UV-basierter Replikationsprozess zur Herstellung von Mikro- und Nanostrukturen.....	9
2.1.1	Diskontinuierlicher UV-NIL-Prozess	10
2.1.2	Merkmale kontinuierlicher UV-NIL-Produktionssysteme	12
2.1.3	Charakteristika eines kontinuierlichen Prozesses	13
2.1.4	Anwendungsspektrum.....	16
2.1.5	Abgrenzung gegenüber kompetitiven Verfahrensansätzen... ..	22
2.2	Produktionstechnik zur Mikro- und Nanostrukturierung in kontinuierlichen UV-NIL-Prozessen	26
2.2.1	UV-härtende Lacke	26
2.2.2	Auftrageinheiten	29
2.2.3	Replikationswerkzeuge	32
2.2.4	UV-Strahlquellen	37
2.2.5	Anlagenkonzepte	41
2.3	Zwischenfazit	46
3	Aufgabenstellung und Zielsetzung	47
4	Analyse potentieller Fehlerquellen in kontinuierlichen UV-NIL-Prozessen.....	51
4.1	Kategorisierung der Fehlerausprägungen	51
4.2	Klassifizierung möglicher Fehlerquellen	53
4.3	Analytische Ansätze zur Bestimmung der Prozessparameter.....	56
4.4	Zwischenfazit	64
5	Konzeption und Realisierung eines folienverarbeitenden UV-Imprint-Moduls.....	65
5.1	Modulares Rolle-zu-Rolle-Anlagenkonzept	65
5.2	Ab- und Aufwickler	69
5.3	UV-Imprint-Modul	70
5.3.1	Reinigung und Deionisierung	72
5.3.2	Lackauftrageinheit	72
5.3.3	Replikationseinheit	73
5.3.4	Bahninspektion und Qualitätssicherung	76
5.4	Regelungskonzepte	78
5.4.1	Bahnzugregelung	78
5.4.2	Lage- und Kraftregelung	80
5.5	Zwischenfazit	82

6	Empirische Untersuchung der Skalierbarkeit eines UV-NIL-Prozesses	83
6.1	Beschreibung der Rahmenbedingungen.....	83
6.2	Analyse der Entwicklung der Restschichtdicke h_R	86
6.3	Vollfaktorieller Versuch.....	90
6.4	Vorgehensweise zur Produktionsskalierung.....	95
6.5	Zwischenfazit	98
7	Transfer und Validierung der Untersuchungsergebnisse	101
7.1	Beschreibung der Rahmenbedingungen.....	101
7.2	Validierung	103
7.3	Limitationen und Optimierungsgrenzen.....	104
7.3.1	Andruckkraft F_{an}	104
7.3.2	Bahngeschwindigkeit v_{Bahn}	106
7.4	Zwischenfazit	107
8	Untersuchung möglicher Füllfehler – Lunker	109
8.1	Entstehungsmechanismen.....	109
8.2	Kompensationsstrategien.....	110
8.2.1	Andruckkraft F_{an}	110
8.2.2	Viskosität $\eta(T)$	112
8.3	Zwischenfazit	114
9	Untersuchung möglicher Füllfehler – Evakuierung	115
9.1	CFD-Simulation.....	116
9.1.1	Problemanalyse und -abstraktion.....	116
9.1.2	Geometrische Modellierung	117
9.1.3	Diskretisierung des Modells	118
9.1.4	Randschichtbedingungen.....	119
9.1.5	Solver-Einstellungen	121
9.1.6	Post-Processing und Validierung	122
9.2	Entstehungsmechanismen.....	124
9.3	Kompensationsstrategien.....	126
9.3.1	Andruckkraft F_{an}	129
9.3.2	Viskosität $\eta(T)$	131
9.4	Zwischenfazit	133
10	Zusammenfassung und Ausblick	135
10.1	Zusammenfassung.....	135
10.2	Ausblick.....	137
11	Literaturverzeichnis	143

Formelzeichen und Abkürzungsverzeichnis

Formula Symbols and Abbreviations

Lateinische Zeichen und mathematische Sonderzeichen

Zeichen	Einheit	Benennung
a	μm	Halbe Kontaktlänge zwischen Walzenpaar
A_{Kontakt}	mm^2	Kontaktfläche zwischen Walzenpaar
b_0	mm	Beschichtungsbreite
$b_{\text{Kavität}}$	μm	Breite einer Walzenkavität
$b_{\text{Küvette}}$	cm	Breite einer Küvette
b_{Schlitz}	mm	Breite der Schlitzdüsenöffnung
b_{Steg}	μm	Breite eines Walzenstegs
c	$\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	Stoffkonzentration
$d_{\text{Zylinder},n}$	mm	Durchmesser n-ter Zylinder am Strukturgrund
$D_{\text{Zylinder},n}$	mm	Durchmesser n-ter Zylinder auf Strukturspitze
E	N/mm^2	Elastizitätsmodul
$E_{\text{Ext.}}$	-	Extinktion, optische Dichte
E_n	N/mm^2	Elastizitätsmodul des n-ten Körpers
E_{UV}	mW/cm^2 %	Bestrahlungsstärke der UV-Einheit, Elektrische Leistungsaufnahme in Prozent des Maximalwertes
$E_{\text{UV, min.}}$	mW/cm^2 %	Minimale Bestrahlungsstärke der UV-Einheit, Minimale elektrische Leistungsaufnahme in Prozent des Maximalwertes
E_{λ} -Spektrum	J	Energie des Lichtspektrums
F_{an}	N	Andruckkraft
$F_{\text{an, max.}}$	N	Maximale Andruckkraft
$F_{\text{an, min.}}$	N	Minimale Andruckkraft
$F_{\text{Bahn, Ist}}$	N	Ist-Bahnzugkraft
$F_{\text{Bahn, Soll}}$	N	Soll-Bahnzugkraft
F_{Klemm}	N	Klemmkraft
F_{Zug}	N	Bahnzugkraft

h_0	μm	Beschichtungshöhe
$h_{0, \text{initial}}$	μm	Initiale Beschichtungshöhe
$h_{0, \text{min.}}$	μm	Minimale Beschichtungshöhe
$h_{0, \text{theor.}}$	μm	Theoretische (Mindest-)Beschichtungshöhe
H_{Fokus}	mm	Fokusslänge/ Abstand UV-Strahler – Substrat
$h_{\text{Kavität}}$	μm	Höhe einer Walzenkavität
h_{P}	μm	Schichthöhe/ Höhe der geprägten Lage ($h_{\text{R}} + h_{\text{S}}$)
h_{R}	μm	Restschichtstärke, Restschichtdicke
$h_{\text{R, modifiziert}}$	μm	Modifizierte Restschichtstärke
h_{S}	μm	Strukturhöhe
h_{Schlitz}	mm	Schlitzhöhe einer Schlitzdüse
I_{λ}	W/cm^2	transmittierte Intensität einer Wellenlänge λ
$I_{\lambda,0}$	W/cm^2	Anfangsintensität einer Wellenlänge λ
$I_{\lambda\text{-Spektrum}}$	W/cm^2	Beleuchtungsstärke
$K_{\text{exp.}}$	-	Geometrischer Korrekturfaktor
$l_{\text{füll}}$	μm	Mindestlänge zur Füllung der Walzenkavitäten
l_{kontakt}	mm	Kontaktlänge der Walzenpaarung quer zum Bahnlauf
l_{Schlitz}	mm	Länge der Schlitzdüsenöffnung
n		Brechungsindex
p	bar; N/mm^2	Druck
p_{an}	bar; N/mm^2	Anpressdruck
p_{Medium}	bar; N/mm^2	Förderdruck des Beschichtungsmediums
Q_{Lack}	mm^3/min ; ml/min	Lackvolumenstrom
R^2	%	Bestimmtheitsmaß
R_{Aspekt}		Aspektverhältnis
$r_{\text{neutrale Faser}}$	mm	Radius der neutralen Faser
R_{Relief}	mm	Radius der Strukturspitzen
r_{Relief}	mm	Radius der Strukturtäler
$R_{\text{Replikation}}$	%	Replikationsrate
R_{Schlitz}	$\text{N}\cdot\text{min}/\text{mm}^5$	Strömungs-/Fließwiderstand
$r_{\text{Zylinder,n}}$	mm	Radius n-ter Zylinder am Strukturgrund

$R_{\text{Zylinder},n}$	mm	Radius n-ter Zylinder auf Strukturspitze
S	-	Standardabweichung
T	°C	Temperatur
$t_{\text{füll}}$	s, ms	Füllzeit
T_g	°C	Glasübergangstemperatur
$t_{\text{härt}}$	s, ms	Aushärtezeit
T_{Lack}	°C	Lacktemperatur
T_m	°C	Schmelztemperatur
T_{RT}	°C	Raumtemperatur
$T_{\text{Trans.}}$	-	Optische Transmission
T_{Walze}	°C	Walzentemperatur
v	mm/s; $\mu\text{m}/\text{ms}$	Geschwindigkeit
v_{Bahn}	m/min	Bahngeschwindigkeit
$v_{\text{konst.}}$	m/min	Konstante Bahngeschwindigkeit
V_{Relief}	mm^3	Strukturvolumen
$v_{\text{Soll},n}$	m/min	Soll-Bahngeschwindigkeit
W_{Fokus}	mm	Strahlaufweitung im Fokuspunkt
x	m, mm, μm	Laufkoordinate der X-Achse, Laufkoordinate entlang des Bahnlaufs
y	m, mm, μm	Laufkoordinate der Y-Achse, Laufkoordinate quer zur Bahn (in Folienebene)
z	m, mm, μm	Laufkoordinate der Z-Achse, Laufkoordinate senkrecht zur Folienebene

Griechische Zeichen

Zeichen	Einheit	Benennung
α_N	Grad	Neigungswinkel
α_{Niveau}	-	Signifikanzniveau
α_{Struktur}	Grad	Winkelfehler
Δh_s	μm	Gefüllte Strukturkavität
Δt	min, s, ms	Zeitintervall

Δx	mm, μm	Wegintervall
γ_1	Grad	Winkel im Strukturgrund des Prägezyinders
γ_2	Grad	Winkel im Strukturgrund der Folie
ε_1	Grad	Winkel an der Strukturspitze des Prägezyinders
ε_2	Grad	Winkel an der Strukturspitze der Folie
$\varepsilon_{\text{Ext}}(\lambda)$	$\text{L}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$	Molarer dekadischer Extinktionskoeffizient
η	mPa·s	Dynamische Viskosität
η_{Lack}	mPa·s	Dynamische Viskosität des Lacks
θ_{Cu}	Grad	Kontaktwinkel UV-Lack auf Kupfer
θ_{PET}	Grad	Kontaktwinkel UV-Lack auf PET
λ	nm	Wellenlänge
ν	-	Poissonzahl, Querkontraktionszahl
ρ	g/cm^3	Materialdichte
σ_i	mN/m	Oberflächenenergie
$\sigma_{i, \text{Lack}}$	mN/m	Oberflächenspannung des UV-Lacks
σ_s	mN/m	Oberflächenspannung
$\sigma_{s, \text{Substrat}}$	mN/m	Oberflächenspannung des Substratmaterials
$\sigma_{s, \text{Werkzeug}}$	mN/m	Oberflächenspannung des Werkzeugwerkstoffs

Abkürzung**Benennung**

2k	Zwei-Komponenten
3D	Dreidimensional
Abk.	Abkürzung
Ag	Silber (Argentum)
AlGaN	Aluminiumgaliumnitrid
AlInGaN	Aluminiumindiumgaliumnitrid
AlN	Aluminiumnitrid
Ar	Argon
BN	Bornitrid
CAGR	Compound Annual Growth Rate
CFL	Courant-Friedrichs-Lewy-Zahl

CML65	Bosch Rexroth Embedded-Steuerung Typ 65
CMOS	Complementary Metal-Oxide-Semiconductor
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
Cr	Chrom
Cu	Kupfer
CuO _x	Kupferoxid
DBC	Double Bond Conversion
DDK	Dynamisch Differenzkalorimetrie
DMS	Dehnungsmessstreifen
DPI	Dots Per Inch
DTA	Differenzthermoanalyse
E/A-Modul	Eingangs-/Ausgangsmodul
EDM	Electrical Discharge Machining
EPL	Elektronenprojektionslithografie
EPO	European Patent Office, München
ESH	Elektronenstrahlhärtung
ESL	Elektronenstrahlithografie
ESR	Elektronenspinresonanz
ETFE	Ethylen-Tetrafluorethylen-Copolymer
Fa.	Firma
Fe	Eisen (Ferrum)
FEM	Finite-Elemente-Methode
FSO	Full Scale Output
FTIR	Fourier-Transformations-Infrarotspektrometer
GA	Grant Agreement
GUI	Graphical User Interface
H	Wasserstoff (Hydrogenium)
HMI	Human-Machine Interface
Hg	Quecksilber (Hydragyrum)
IEEE	Institute Of Electrical And Electronics Engineering, New York (USA)

IPT	Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie, Aachen
IR	Infrarot
KIMM	Korean Institute Of Machinery & Materials, Daejeon (Südkorea)
KrCl	Kryptonchlorid
LCD	Liquid Crystal Display
LED	Light-Emitting Diode
Lfm.	Laufmeter
LISA	Lithografisch-induzierte Selbstassemblierung
MEMS	Microelectromechanical Systems
MIBL	Maskenbasierte Ionenstrahlithografie
Mio.	Million
ML ²	MultiLayer MicroLabs (Forschungsprojekt)
Mrd.	Milliarde
MWC	Mini Web Cleaner
N ₂	Stickstoffdioxid
NE-Werkstoff	Nichteisen-Werkstoff
NIL	Nanoimprint-Lithografie
NMR	Kernspinresonanz
No.	Number
OCT	Optical Coherence Tomography, Optische Kohärenztomografie
OE-A	Organic And Printed Electronics Association, Frankfurt am Main
OLED	Organic Light-Emitting Diode
P2P	Platte-zu-Platte (Plate-to-Plate)
Pb	Blei (Plumbum)
PDMS	Polydimethylsiloxan
PEMS	Printed Electro Mechanical System, Daejeon (Südkorea)
PFPE	Perfluorpolyether
Plast4Future	Plast-For-Future (Forschungsprojekt)

PMMA	Polymethylmethacrylat
PUA	Polyurethan-Acrylat
R2P	Rolle-zu-Platte (Roll-To-Plate)
R2R	Rolle-zu-Rolle (Roll-To-Roll)
REM	Rasterelektronenmikroskopie
RFID	Radio-Frequency Identification
Si	Silizium
SiO ₂	Siliziumdioxid (Quarzglas)
SMD	Surface-Mounted Device
T-NIL	Thermische-Nanoimprint-Lithografie
TTL	Transistor-Transistor-Logik
UKP	Ultrakurzpuls
UMS-2	UV-Messsystem
USD	United States Dollar
USPTO	United States Patent and Trademark Office, Alexandria (USA)
UV	Ultraviolett
UV-A	Ultraviolettes Licht Spektrum A (315 – 380 nm)
UV-B	Ultraviolettes Licht Spektrum B (280 – 315 nm)
UV-C	Ultraviolettes Licht Spektrum C (100 – 280 nm)
UV-NIL	Ultraviolette-Nanoimprint-Lithografie
V	Volt
VTT	Technisches Forschungszentrum Finnland, Espoo (Finnland)
W-LAN	Wireless Local Area Network
WIPO	World Intellectual Property Organisation, Genf (Schweiz)
Xe ₂	Xenon
XeCl	Xenonchlorid

1 Einleitung

Introduction

Die Bearbeitung von Warenbahnen in kontinuierlichen Prozessen ist ein etabliertes Hochdurchsatzverfahren zur Fertigung und Veredelung von Rollenware. Historisch betrachtet wurden diese Verfahren genutzt, um große Mengen an Einwegprodukten kostengünstig herzustellen. Bekannte Erzeugnisse sind Printmedienprodukte wie Tageszeitungen, Fachmagazine und Bücher oder Verpackungsmaterialien wie mehrlagige Barrierefolien aus Kunststoffen und metallische Folien [BLEC13, FUEG14, LAUT15]. Sowohl die Herstellung des Grundmaterials (Papier, Gewebe, Metalle, etc.) als auch die Veredelung (Bedruckung, Versiegelung, Strukturierung, etc.) und die Konfektionierung erfolgen in kontinuierlichen, sequentiellen Prozessen. Rohmaterial und Endprodukt liegen als Wickel vor. Das Produktionsverfahren wird daher als „Rolle-zu-Rolle-Produktion“ bezeichnet.

Seit Ende des 20. Jahrhunderts wurden Technologien aus der Halbleiterfertigung in kontinuierliche Fertigungsfolgen überführt. Eine ist die 1995 von CHOU et al. erstmalig vorgestellte Nanoimprint-Lithografie (Abk.: NIL) [CHOU95]. Ein hochauflösendes Strukturierungsverfahren, das eine kosteneffiziente Produktion geometrischer Muster mit Dimensionen unter 50 nm auf großflächigen Substraten ermöglicht. Die UV-strahlungsbasierte Verfahrensvariante wurde 1996 von HAISMA et al. vorgestellt und 2006 von AHN et al. in einen kontinuierlichen Prozess überführt (Abk.: UV-NIL) [HAIS96, AHN06]. Dabei wird die Mikro- oder Nanostruktur eines Prägestempels auf ein beschichtetes Trägersubstrat übertragen. Die Beschichtung des Substrats ist ein als „Prägelack“ bezeichnetes, flüssiges Mono- und/oder Oligomer-Gemisch. Durch Ultraviolettstrahlung (kurz: UV-Licht) vernetzt das Fluid, härtet aus und nimmt dauerhaft das Abbild des Prägestempels an. Industrielle Anwendung findet das Verfahren bei der Herstellung von optischen Folien, flexibler Elektronik, Medizin- und Pharmazieprodukten, Solar- und Batteriezellen sowie Wasseraufbereitungsanlagen oder modifizierten Haftoberflächen [GOTO07, BHUS10, PALF15, KHAN15].

Die geringen Produktionskosten und die kontinuierliche Massenproduktion machen Rolle-zu-Rolle-Prozesse zu einer der Top-Ten-Technologien fortschrittlicher Fertigungs- und Automationsverfahren. Für das Jahr 2021 wird ein weltweiter Jahresumsatz von 30,14 Mrd. US-Dollar prognostiziert (vgl. Bild 1.1). Das jährliche Marktwachstum ab 2016 wird mit 12,6 % angenommen. Die stetig wachsende Nachfrage an elektronischen Konsumgütern ist als ein enormes Entwicklungspotential zu bewerten. Der Markt für elektronische Konsumgüter ist daher die zentrale Schlüsselindustrie. Automobil-, Energie- und Gesundheitssektor sind weitere Key-Enabler. Nordamerika ist der größte Markt für Rolle-zu-Rolle-Technologien. Auf Platz zwei ist der asiatisch-pazifische Wirtschaftsraum. Europa gilt als rückständig. [FROS17]

Besonders attraktive Wachstumsmärkte sind LC-Displays und Solarzellen. Bis 2019 wird ein weltweites, jährliches Umsatzwachstum von 31 % (2019: \$ 362,87 Mrd. Umsatz) bzw. 9,5 % (2019: \$ 166,56 Mrd. Umsatz) erwartet [FROS13a, FROS16]. Die

elektrischen Funktionen dieser komplexen Mehrlagensysteme werden durch optische Lagen ergänzt. Optische Folien fungieren durch einfache Mikrogeometrien (Prismen, Mikrolinsen) als Diffusoren. Die Realisierung komplexer, holografischer Oberflächen ist gleichermaßen möglich [AHN08, JIAN14]. Anti-Reflex-Oberflächen werden durch nanoskalige Strukturen in Größenordnungen unterhalb des Wellenlängenbereichs sichtbaren Lichts erzeugt [CHUA17]. Sowohl die Beleuchtungs- als auch die Elektronikindustrie entwickeln stetig neue, innovative Produkte und treiben die Funktionalität optischer Folien konsequent voran. Weitere Wachstumsmärkte sind 3D- und Head-Up-Displays sowie Smart-Buildings. [OCON16]

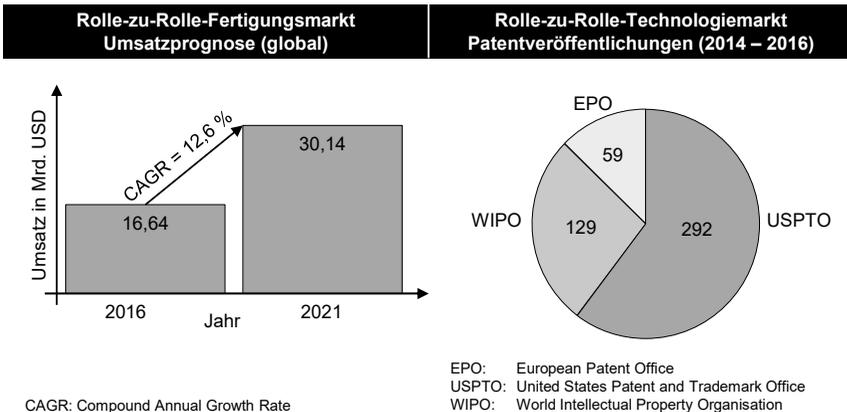


Bild 1.1: Rolle-zu-Rolle-Fertigungsmarkt und Patentanmeldungen (global) [FROS17]
Roll-to-roll manufacturing market and patent publication trend (global)

Kontinuierliche UV-NIL-Prozesse sind hinsichtlich ihrer Ausbringungsmenge nicht mit etablierten Druckerzeugnissen zu vergleichen [DUMO12a]. Kosten für Prägelacke und Replikationswerkzeuge sind ungleich höher als die Kosten für Tinten und Tief- oder Hochdruckzylinder. Variationen in der Produktionsgeschwindigkeit führen zu Welligkeiten im Lackauftrag, Luftpfeinschlüssen oder Lacküberschuss. Im ungünstigsten Fall setzt sich der aufwändig strukturierte, kostenintensive Prägezylinder durch Lackanhaftungen zu. Häufig kann er nur unter großem Aufwand gereinigt werden oder er muss nachbearbeitet bzw. neu hergestellt werden.

Seit der Vorstellung des kontinuierlichen UV-Nanoimprint-Verfahrens wurden eine Vielzahl von Strukturen, Werkstoffen und Systemkonzepten erforscht [GOTO07, KOOY14, Y115a, NEES15]. Bild 1.1 (rechts) zeigt beispielhaft die veröffentlichten Patentschriften der Jahre 2014 – 2016. In diesem Zeitraum wurden insgesamt 788 Patente veröffentlicht. Mehrheitlich beinhalten sie Herstellungsprozesse für flexible Displays, MEMS und Halbleiter in Dünnschichttechnik. [FROS17] Der Transfer von Laborlösungen zu robusten, industriellen Produktionslösungen ist bisher nur in Ansätzen gelungen. Prozesskontrolle und Reproduzierbarkeit der erzielten Ergebnisse sind die zu verbessernden Aspekte, um eine wirtschaftlich vertretbare Replikation auf großflächigen Substraten zu ermöglichen.

Die Erschließung des wirtschaftlichen Potentials bedarf somit Forschungs- und Entwicklungsaufwand zur Untersuchung des Rolle-zu-Rolle-UV-NIL-Prozesses. Dies gilt insbesondere hinsichtlich seiner Skalierbarkeit in Bezug auf Bahngeschwindigkeit bei gleichbleibend hoher Produktqualität. Das Produktionssystem selbst bildet meist nicht den Kern der Prozessbetrachtung, obgleich mit seiner Auslegung Rahmenbedingungen für wichtige Stellgrößen vorgegeben werden. In der Regel werden die Herstellbarkeit neuer Strukturen erforscht und Werkstoffentwicklungen vorangetrieben. Ansätze zur Prozessoptimierung finden sich vor allem im universitären und institutionellen Umfeld. In der Industrie, vor allem im asiatisch-pazifischen Raum, werden Rolle-zu-Rolle-Prozesse zur Herstellung optischer Folien im Display-Bereich eingesetzt. Der wettbewerbliche Konkurrenzdruck verhindert jedoch einen kooperativen Austausch zur Verbesserung der Herstellungsprozesse.

Mit der vorliegenden Arbeit soll demzufolge ein Beitrag zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit von Rolle-zu-Rolle-UV-NIL-Prozessen im Wirtschaftsraum Europa geleistet werden. Die Forschungsarbeiten hierzu wurden zum Teil im Rahmen des europäisch geförderten Verbundprojekts „ML² - MultiLayer MicroLab“ (GA No.: 318088) durchgeführt. Im Fokus der Betrachtung dieser Arbeit steht die Identifikation qualitätsrelevanter Prozessgrößen im Hinblick auf die Skalierung der Produktionsmenge. Weiter soll aufgezeigt werden, inwieweit sich Replikationsfehler durch die Modifikation dieser Prozessgrößen kompensieren lassen. Die wissenschaftliche Aufarbeitung ist dazu in die folgenden Teilaspekte gegliedert:

- Klassifizierung bekannter Fehlerbilder und Identifikation relevanter Prozessgrößen
- Konzeption und Aufbau eines modularen Rolle-zu-Rolle-Entwicklungsprüfstands für die Replikation optischer Mikrostrukturen im UV-NIL-Verfahren
- Empirische Untersuchung der identifizierten Prozessgrößen, Priorisierung ihrer Relevanz und Ableitung einer iterativen Vorgehensweise für die Skalierung der kontinuierlichen Replikationsprozesse
- Ergebnisvalidierung durch Transfer der Untersuchungsergebnisse auf weitere optische Mikrostrukturen
- Betrachtung der Limitationen möglicher Kompensationsstrategien durch empirische und simulative Analyse bekannter Fehlerbilder

Die Demonstration der Prozessfähigkeit erfolgt anhand einer beispielhaften kontinuierlichen Fertigung endloser, optischer Folien. Als Replikationswerkzeug wird ein verkupferter Prägezylinder verwendet. Die optischen Strukturen werden durch Ultrapräzisions-Diamantzerspanung nahtlos eingebracht. Der UV-härtende Prägelack besitzt eine Acrylat-Basis. Das Trägersubstrat ist ein hochtransparentes PET-Substrat (Polyethylenterephthalat). Als Kriterien zur Validierung der Produktqualität werden die Güte der Abformung sowie die Ausprägung der unstrukturierten Restschichtdicke herangezogen.

Aufbauend auf den im Rahmen dieser Forschungsarbeit erarbeiteten Erkenntnissen werden weiterführende Ansätze für die zukünftige Forschung im Bereich der UV-basierten, kontinuierlichen Nanoimprint-Lithografie aufgezeigt.

Introduction

The processing of web material in continuous approaches is an established high-throughput method for the production and finishing of those goods. Historically, these methods have been used to lower the cost to produce large quantities of disposable products. Print media such as newspapers, magazines and books or packaging material such as multilayer barrier films made of plastics and metallic foils are well-known representatives of this kind [BLEC13, FUEG14, LAUT15]. Both, the production of the base (paper, fabric, metals, etc.) as well as their finishing (printing, sealing, structuring, etc.) and the assembly take place in continuous, sequential processes. Raw materials and end products are stored and handled on rolls. The production process is therefore called "roll-to-roll production".

Since the beginning of the 20th century, technologies from semiconductor manufacturing have been transferred into continuous production sequences. One of them is the nanoimprint lithography presented first by CHOU et al. in 1995 [CHOU95]. A high-resolution patterning process that enables cost-efficient production of nanostructures smaller than 50 nm on large area substrates. The UV radiation-based process variant was developed and published in 1996 by HAISMA et al.. The transfer into a continuous process was introduced by AHN et al. in 2006 [HAIS96, AHN06]. In this process, the micro- or nanostructure of an embossing stamp is replicated onto a coated carrier substrate. The coating of the substrate is a liquid mono- and/or oligomer mixture called "embossing lacquer" or "resist". Ultraviolet radiation (UV light) initiates the cross-linking within the fluid. It cures and adopts the pattern of the embossing master permanently. The process is used for the production of optical films, flexible electronics, medical and pharmaceutical products, solar and battery cells as well as water treatment plants or modified adhesive surfaces [GOTO07, BHUS10, PALF15, KHAN15].

Low production costs and continuous mass production make roll-to-roll processes one of the top ten technologies in advanced manufacturing and automation processes. A global annual turnover of 30.14 billion US dollars is forecasted for 2021 (see Figure 1.1). The annual market growth is supposed to be 12.6 % starting from 2016. The steadily increasing demand for electronic consumer goods is seen as an enormous development potential. Therefore, the electronic consumer goods market is the key industry in this case. The automotive, energy and healthcare sectors are further key enablers. North America is the largest market for roll-to-roll technologies. In the second place it's the Asia-Pacific Economic Area. Europe is ranked as behind. [FROS17]

Particularly attractive growth markets are LC displays and solar cells. By 2019, global annual revenue growth of 31 % (2019: \$ 362.87 billion turnover) respectively 9.5 % (2019: \$ 166.56 billion revenue) is expected [FROS13a, FROS16]. The electrical functions of these complex multi-layer systems are complemented by optical layers. By simple micro structures (prisms, microlenses) optical films function as diffusers. The realization of complex, holographic surfaces is possible, too [AHN08, JIAN14]. Anti-reflective surfaces are created through nanoscale structures of magnitudes which are below the wavelength range of visible light [CHUA17]. Both, the lighting and electronics

industry are constantly developing new and therefore promote the functionality of optical films consistently. Further growth markets are 3D and head-up displays as well as smart buildings. [OCON16]

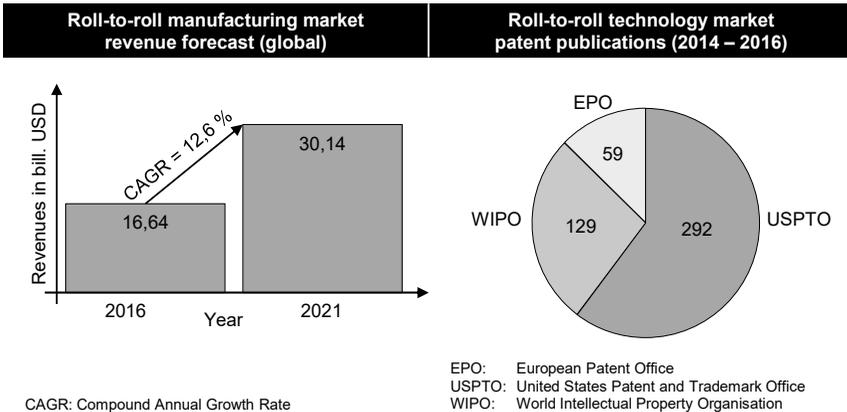


Fig. 1.1: Roll-to-roll manufacturing market and patent publication trend (global) [FROS17]
Rolle-zu-Rolle-Fertigungsmarkt und Patentanmeldungen (global)

Continuous UV-NIL processes cannot be compared with established print products in terms of their output [DUMO12a]. Costs for embossing lacquer and replication tools are a higher than costs for inks and gravure printing or offset printing cylinders. Variations production speeds result in ripples in the resist coating, air entrapments or excess resist. In a worst case scenario, the elaborately structured, cost-intensive embossing cylinder is clogged up by a cured resist layer. Often it can only be cleaned with extraordinary charges or needs be reworked or even re-manufactured completely.

Since the introduction of the continuous UV nanoimprint process, a large number of structures, materials and system concepts have been investigated [GOTO07, KOOY14, YI15a, NEES15]. Figure 1.1 (right) shows an example of the published patents from 2014 to 2016. A total of 788 patents were published during this period. The majority of them includes manufacturing processes for flexible displays, MEMS and thin-film semiconductors. [FROS17] The transfer of laboratory approaches to robust, industrial production solutions has only been partially successful, yet. Process control and reproducibility of the results achieved in the laboratory are the aspects to be improved in order to enable economically viable replication on large-area substrates.

Thus, the exploitation of the economic potential requires research and development efforts to study the roll-to-roll UV-NIL process. Especially in terms of its scalability of web speed with remaining high product quality. In most cases, the production system itself is not the focus of the process analysis, although its design provides the framework conditions for important control variables. Usually, the manufacturability of new structures and material developments are propelled. Approaches for process optimization are found mainly in university and institutional environments. In the industrial

sector, especially in the Asia-Pacific region, roll-to-roll processes are used for the production of optical films in the display sector. However, the competitive pressure prevents a cooperative exchange to improve the manufacturing processes.

Therefore, the aim of this thesis is to contribute to increase the economic viability of roll-to-roll UV-NIL processes within the European region. Some parts of the research presented in this thesis were carried out as contribution to the European funded joint project "ML² - MultiLayer MicroLab" (GA no.: 318088). The focus of this thesis is the identification of quality-relevant process variables with regards to the scalability of the production quantity. Furthermore, it should be demonstrated to what extent replication errors can be compensated by the modification of these process parameters. The research and development activity is therefore structured to the following sub-aspects:

- Classification of known defects/error patterns and identification of relevant process parameters
- Conception and design of a modular roll-to-roll development test bench for replication of optical microstructures in the UV-NIL process
- Experimental investigation of the identified process parameters, prioritization of their relevance and derivation of an iterative algorithm for the scalability of the continuous replication processes
- Result validation by transferring the experimental results to additional optical microstructures
- Analysis of the limitations of possible compensation strategies by empiric and simulative trials with known error patterns

The demonstration of process capability will be shown by an exemplary continuous production of endless optical films. The replication tool is a copper-plated embossing cylinder. The optical structures are seamlessly cut by ultra-precise diamond turning. The UV-curing embossing lacquer has an acrylic base. The polymer carrier film is a highly transparent PET substrate (polyethylene terephthalate). The replication accuracy and the residual layer thickness are used as criteria for product quality validation.

Based on the findings of this thesis, further approaches for future research in the field of UV-based, continuous nanoimprint lithography will be summarized and given in the outlook.

2 Stand der Technik in Forschung und Industrie

State of the Art in Research and Industry

Der Mikro- und Nanotechnologie wird seit Jahrzehnten ein stetig wachsendes Anwendungspotential zugeschrieben. Eine Herausforderung ist die Funktionalisierung großer Flächen durch Mikro- und Nanostrukturierung. Ein performanter Lösungsansatz ist die Kombination von etablierten Technologien zur großflächigen, kontinuierlichen Verarbeitung von Folienmaterialien mit lithografischen Verfahren. In der Vielfalt möglicher Lösungen ist die UV-basierte Imprint-Lithografie (deutsch: Prägelithografie) im Rolle-zu-Rolle-Verfahren ein Ansatz, der in der Industrie erste Anwendung gefunden hat. Die Forschungslandschaft beschäftigt sich mit der Replikation neuer, komplexer Strukturen sowie der Optimierung des Herstellungsprozesses.

Dieses Kapitel informiert über das Prinzip der UV-basierten Imprint-Lithografie und die Anwendung im kontinuierlichen Prozess. Zuerst wird auf die Motivation und Entstehung der Imprint-Lithografie eingegangen (Abschnitt 2.1.1). Anhand der konventionellen, diskontinuierlichen UV-basierten Imprint-Lithografie werden die Prozessschritte erläutert (2.1.2). Im darauffolgenden Abschnitt (2.1.3) wird auf die Charakteristika eines kontinuierlichen Prozesses eingegangen. Es folgt eine Betrachtung des Anwendungsspektrums der UV-Imprint-Lithografie anhand einiger Beispiele aus Forschung und Industrie (2.1.4) sowie eine Abgrenzung gegenüber kompetitiven, kontinuierlichen Produktionsansätzen (2.1.5).

Das Unterkapitel 2.2 beschreibt die Befähigung der kontinuierlichen UV-basierten Imprint-Lithografie durch produktionstechnische Entwicklungen. Prozessrelevante Elemente und ihre Variationsmöglichkeiten werden vorgestellt. Im Abschnitt 2.2.1 wird die Zusammensetzung UV-härtender Lacksysteme und deren Einfluss auf die Prozessqualität erläutert. Es werden verschiedene Verfahren zur Herstellung endloser und formatgebundener Replikationswerkzeuge aufgezeigt (2.2.3). Etablierte Systeme zur präzisen Ausbringung (2.2.2) und schnellen Härtung (2.2.4) der Lacksysteme werden anhand ihrer Leistungsfähigkeit sowie ihrer Vor- und Nachteile diskutiert. Abschließend werden bekannte Konzepte ganzheitlicher Produktionsanlagen vorgestellt (2.2.5).

Entwicklungspotentiale und Forschungsbedarfe werden im Abschnitt (2.3) resümiert.

2.1 UV-basierter Replikationsprozess zur Herstellung von Mikro- und Nanostrukturen

UV based replication process for manufacturing micro- and nanostructures

Die Nanoimprint- oder Nanoprägelithografie umfasst verschiedene kontaktbehaftete Verfahren zur Herstellung von Mikro- und Nanostrukturen. In einen Stempel eingebrachte Strukturen werden je nach Verfahrensvariante unter Einwirkung thermischer (T-NIL) oder photonischer Energie (UV-NIL) sowie einer definierten Prägekraft in ein Trägersubstrat repliziert. Bei der T-NIL wird ein festes Substrat thermisch destabilisiert.

Der Prägestempel formt das erweichte Material mit reduzierter Kraft um. Bei der UV-NIL wird ein photoreaktives, flüssiges Mono-/Oligomergemisch mit kurzwelligem Licht bestrahlt und im Kontakt mit dem Prägestempel zur Aushärtung gebracht. Das Replikationswerkzeug trägt ein Negativabbild der Zielstruktur und ist bei beiden Varianten mehrfach verwendbar. [BHUS10]

Die NIL-Verfahren werden als „alternative Lithografie“ bezeichnet. Zu den konventionellen Lithografie-Verfahren zählen die Fotolithografie und die Teilchenstrahlverfahren Elektronenstrahl- und Ionenstrahlolithografie. Dies sind kontaktlose Strukturierungsansätze. Das Potential der Nanoimprint-Lithografie liegt in der hochauflösenden Replikation großer Flächen. Die Auflösungsgrenze unterliegt nicht der Beugungsgrenze des Lichts oder der Interaktion hochenergetischer Photonen wie bei der konventionellen Lithografie. Die Verfahren können auf einer Vielzahl von Substraten angewendet werden. Neben den bekannten Silizium-Wafern sind Metalle, Keramiken, Polymere oder Nanomaterialien wie beispielsweise Graphen, Kohlenstoffnanoröhrchen oder metallische Nanopartikel als Substrate erprobt. Zudem besteht die Möglichkeit der Replikation auf dreidimensionale Oberflächen. [SOTO03, ACIK11, YU15]

1995 stellten CHOU et al. ein thermisches Prägeverfahren vor, mit dem Nano-Bohrungen und Nuten von 25 nm Breite und 100 nm Tiefe hergestellt werden konnten [CHOU95]. 1996 präsentierten HAISMA et al. einen Ansatz bei dem in eine UV-aushärtende Beschichtung geprägt wurde [HAIS96]. Beide Varianten finden ihre Anwendung in der Halbleitertechnologie. Die Erhöhung des Auflösungsvermögens bei minimalem Kostenaufwand in der Hochdurchsatzproduktion begünstigte die Herstellung neuartiger, hochkomplexer integrierter Schaltkreise gemäß dem Mooreschen Gesetz. 1998 wurde von TAN et al. erstmalig ein Prägezyylinder als Replikationswerkzeug für das thermisch-basierte Prägen elektronischer Komponenten genutzt [TAN98]. AHN et al. zeigten 2006 den Transfer der UV-strahlungsunterstützten Variante in einen kontinuierlichen Rolle-zu-Rolle-Prozess [AHN06].

Anwendungen einer kontinuierlichen, thermischen Verfahrensvariante zur Erzeugung optischer Strukturen im Mikrometerbereich sind aus den Jahrzehnten zuvor bekannt. PRICONE und HEENAN sicherten sich mit ihrem Patent „Method and apparatus for embossing a precision optical pattern in a resinous sheet“ (deutsch: Verfahren und Vorrichtung zum Prägen eines präzisen, optischen Musters in eine harzhaltige Folie) 1984 die Erfindung einer kontinuierlich arbeitenden Heißpräganlage. Hergestellt werden Retroreflektoren, sogenannte „Cube-corner type reflectors“, auf transparentem, thermoplastischem Folienmaterial. [PRIC84]

2.1.1 Diskontinuierlicher UV-NIL-Prozess

Discontinuous UV-NIL process

Die ultraviolettstrahlungsbasierte Nanoimprint-Lithografie (Abk.: UV-NIL) ist ein In-Situ-Polymerisationsverfahren („in situ“ lat. für: an Ort und Stelle). Eine genormte Beschreibung des Begriffs bzw. des Verfahrens existiert nicht. Beispielhaft zeigt Bild 2.1

den Ablauf eines UV-unterstützten NIL-Prozesses. Die Abformung des Replikationswerkzeugs erfolgt in ein niederviskoses Fluid. Es wird als Resist oder Prägelack bezeichnet. Die Viskosität η beträgt in Abhängigkeit von Anwendung und Rohmaterialien $5 \cdot 10^{-2} - 2 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ (lösungsmittelfreie Polyacrylate) [SCHW07]. Das Fluid ist eine Mischung aus mono- bzw. oligomerem Basismaterial, Vernetzungsmitteln und UV-sensitiven Photoinitiatoren (vgl. Abschnitt 2.2.1). Es wird gleichmäßig auf dem Substrat ausgebracht. Der Stempel wird parallel zum Substrat ausgerichtet und in den Lack eingedrückt. Die Füllung der Strukturen während des Prägens erfolgt sowohl durch druckinduzierte Verdrängungsmechanismen als auch durch Kapillarkräfte [STEP12]. Der Prägedruck p liegt zwischen 0 – 5 bar [BHUS10].

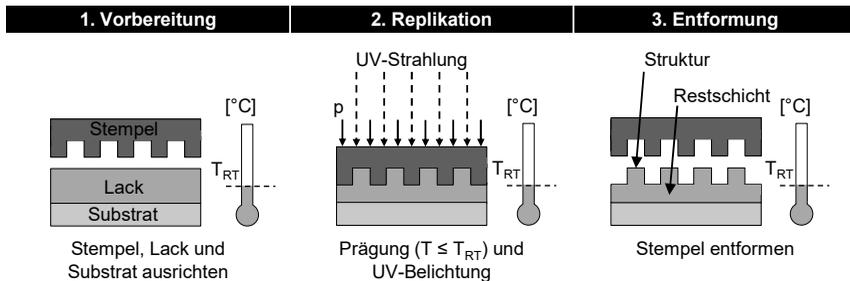


Bild 2.1: UV-NIL-Prozessablauf (Platte-zu-Platte) [BHUS10, STEP12]

UV-NIL process sequence (plate-to-plate)

Die Aushärtung des Prägelacks erfolgt während das Werkzeug darin eingetaucht ist. Die Belichtung mit Lichtwellen des UV-Spektrums ($100 \text{ nm} \leq \lambda \leq 380 \text{ nm}$) löst einen Zerfall der Initiator-Moleküle aus. Die Zerfallsprodukte bewirken eine Vernetzung der Mono- und Oligomere zu langkettigen Polymeren. Diese Polymerstränge verknüpfen sich im weiteren Reaktionsablauf untereinander zu verzweigten Komplexen. Der Zusammenschluss mehrerer, loser Polymerketten wird als Quervernetzung (engl.: Cross-Linking) bezeichnet. Je nach Transmission von Substrat und Werkzeug erfolgt die Belichtung des Lacks durch das Werkzeug oder das Substrat. Der letzte Prozessschritt ist die Entformung von Werkzeug und Lack-Substrat-Kombination. Zu diesem Zeitpunkt liegt der Lack vollständig ausgehärtet vor. Eigenschaften wie Transmission, Oberflächenenergie, Härte oder Schmelztemperatur T_m sind durch die Formulierung des Lacks vorgegeben. Sie sind durch Belichtungsdauer und Lackschichtstärke zu beeinflussen. [BHUS10, AMIR11, STEP12]

Die beschriebenen Prozessschritte können bei Raumtemperatur T_{RT} ($20 - 25^\circ\text{C}$) ausgeführt werden. Die Belichtung initiiert eine exotherme Vernetzungsreaktion. Überschüssige photonische Energie wird von Substrat, Werkzeug oder anderen Anlagenanteilen absorbiert und in thermische Energie umgewandelt. Bei hohem Produktdurchsatz ist eine Kühlung von Substrat und Replikationswerkzeug vorzusehen.

Ein Charakteristikum der UV-unterstützten Replikation ist die stets vorhandene Restschichtlage (engl.: Residual Layer). Bei einer Prägung wird der flüssige Lack niemals

vollständig verdrängt. Das Substrat ist somit auch in den Tiefenlagen des strukturierten Profils immer von ausgehärtetem Lack bedeckt (vgl. Bild 2.1). Die Restschicht kann durch optimierte Prozessparameter auf wenige Nanometer reduziert werden [MAEK07]. Mittels zusätzlicher Prozessschritte wie bspw. einem Ätzverfahren ist die Schicht vollständig zu entfernen. [BHUS10, MORO15]

Charakteristisch für die beschriebenen Prozesse ist ebenso die Schrumpfung des Prägelacks während der Vernetzung. Abhängig von der Formulierung des Materials ergibt sich eine Volumenkontraktion von 3 – 15 %. Dies beeinträchtigt die Replikationsgüte. Die Volumenreduktion ist beim Design des Replikationswerkzeugs und während der Abformung nur bedingt vorzuhalten bzw. zu kontrollieren. Zudem wird die Entformung durch den Schrumpf erschwert, weil die Volumenkontraktion ein Aufschumpfen des Lacks auf die Werkzeugstrukturen bewirkt. Übermäßige UV-Belichtung resultiert in starkem Schrumpf und Brüchigkeit des Lacks. Dies begünstigt wiederum Anhaftungen, Risse, Brüche und somit unvollständiges Lösen der Strukturen aus dem Werkzeug. [ACIK11]

Atmosphärischer Sauerstoff beeinflusst die Quervernetzung ebenfalls. Dies kann zum einen in einer unvernetzten, flüssigen Grenzschicht an der Oberfläche der geprägten Strukturen resultieren. Zum anderen verlängert eine sauerstoffhaltige Atmosphäre die Belichtungsdauer, erhöht die erforderliche Strahlungsintensität sowie den erforderlichen Anteil an Photoinitiatoren und beeinträchtigt die Replikationsqualität somit negativ. UV-NIL-Prozesse werden daher häufig in inerter Atmosphäre durchgeführt. Zur Inertisierung eignen sich Stickstoff (N_2), Argon (Ar), Kohlenstoffdioxid (CO_2) oder andere Inertgase. [SCHW07]

2.1.2 Merkmale kontinuierlicher UV-NIL-Produktionssysteme

Properties of production systems for continuous UV NIL

Bei der UV-NIL im Rolle-zu-Rolle-Verfahren erfolgen die Prozessschritte wie in Abschnitt 2.1.1 erläutert in einer zeitlichen Sequenz abhängig von der Materialgeschwindigkeit des Trägersubstrats. Dieser Zusammenhang wird bei der Betrachtung des Aufbaus einer Rolle-zu-Rolle-Produktionsanlage, wie in Bild 2.2 zu sehen, deutlich. Das Trägersubstrat wird von einem Materialwickel gespult und der Beschichtungseinheit zugeführt. Die Beschichtungseinheit verteilt den Prägelack homogen auf dem Folienmaterial. Die Ausbringungsmenge bzw. der Lackvolumenstrom ist unter Berücksichtigung der gewünschten Auftragsdicke mit der Bahngeschwindigkeit abzustimmen. Die beschichtete Bahn läuft im nächsten Schritt in die Prägeeinheit ein. Dabei wird sie durch eine Andruckwalze gegen die strukturierte Prägewalze gedrückt. Prägezylinder, beschichtetes Trägersubstrat und Gegendruckwalze berühren sich entlang einer Kontaktlinie. Hier findet die Füllung des Mikro- oder Nano-Reliefs des Prägezylinders statt. Prägedruck und/oder Prägespalt werden über die Zustellung der Gegendruckwalze eingestellt. Nach dem Passieren der Kontaktstelle erfolgt die Belichtung des UV-härtenden Lacks durch die UV-Beleuchtungseinheit. Die Strahlungsenergie ist auf die Geschwindigkeit des Substrats abgestimmt, um eine optimale Aushärtung zu gewährleisten. In Bild 2.2 ist eine direkte Belichtung des Lacks dargestellt. In der Regel

findet die Aushärtung statt, solange der Lack in Kontakt mit der strukturierten Walze ist. Zur Verdeutlichung der Prozesssequenz sind die Teilschritte „Strukturieren“ und „Bestrahlen“ getrennt voneinander dargestellt. Die Belichtung kann ebenfalls durch das Trägersubstrat erfolgen, falls das Substratmaterial transmissiv für UV-Strahlung ist.

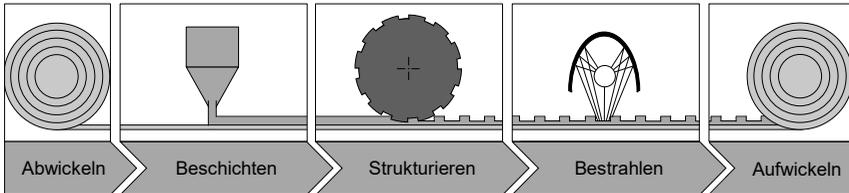


Bild 2.2: Sequentielle Abfolge eines Rolle-zu-Rolle UV-NIL-Fertigungsprozesses
Sequence of a roll-to-roll UV-NIL manufacturing process

Abschnitt 2.2 zeigt verschiedene Varianten zur Realisierung von Auftragseinheit, Prägewalze, UV-Beleuchtungseinheit und daraus resultierende Anlagenkonzepte auf. Ab- und Aufwicklungseinheit sind neben den genannten Baugruppen wichtige Subsysteme. Es wurde eingangs erläutert, dass eine präzise kontrollierte Substratgeschwindigkeit essentiell für die Qualität des Replikationsergebnisses ist. Eine niedrige Bahnspannung und ihre gleichmäßige Verteilung über die Substratbreite gewährleisten geringe Deformationen der Strukturen durch innere Spannungen. Die Umsetzung dieser Funktionen wird durch die Antriebstechnik, die Bahnzugmesssysteme und die Bahnlaufregleinheiten in der Ab- und Aufwicklung erzielt.

2.1.3 Charakteristika eines kontinuierlichen Prozesses

Characteristics of continuous replication processes

Wie in Bild 2.3 illustriert, steht der hohen Produktivität des kontinuierlichen Rolle-zu-Rolle-Verfahrens eine vergleichsweise geringe Kontrollierbarkeit der Prozessschritte gegenüber. Dieser Aspekt bezieht sich insbesondere auf die zeitliche Unabhängigkeit der Prozessparameter. Alle Einzelprozesse sind durch den Lauf der Materialbahn verknüpft und müssen mit diesem synchronisiert sein. Die Modifikation der Prozesszeit eines Einzelschritts wirkt sich somit auf sämtliche Teilprozesse aus. Die Verlängerung der Belichtungsdauer resultiert bspw. in der Reduktion der Materialgeschwindigkeit.

Das Replikationswerkzeug ist ein strukturierter Prägezylinder. Durch die Krümmung des Zylinders findet die Entformung der replizierten Strukturen niemals entlang der Normalen zur Werkzeugoberfläche statt (vgl. Bild 2.4, Platte-zu-Platte). Die Ablösung erfolgt tangential zum Umfang des Zylinders. Konstruktiv kann die Entformungskinematik z. B. durch eine Andruckwalze entlang der Entformungslinie variiert werden. Die Entformung vom rotierenden Zylinder kann zur Deformation oder zum Bruch der geprägten Strukturen führen. Ein flacher Entformungswinkel kann dazu führen, dass die replizierten Strukturen gegen den Prägezylinder gedrückt werden und über dessen Oberfläche reiben.

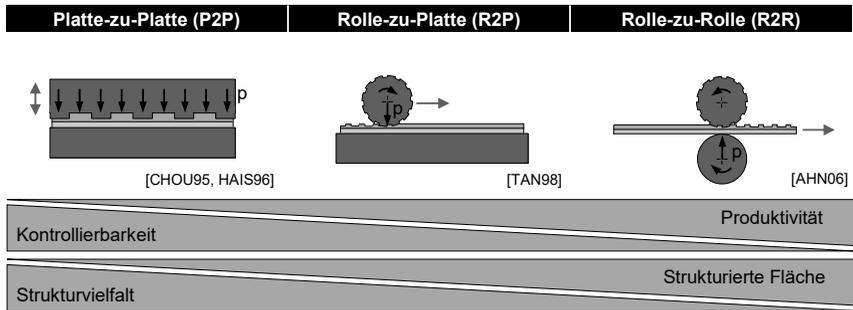


Bild 2.3: Systemischer Aufbau und charakteristische Eigenschaften diskontinuierlicher, semi-kontinuierlicher und kontinuierlicher UV-NIL-Prozesse [WORG09]
Systemic composition and characteristic properties of discontinuous, semi-continuous and continuous UV-NIL processes

Die Deformation ist eine Funktion der Strukturhöhe und des Zylinderdurchmessers. Um hohe Strukturen mit großen Aspektverhältnissen zu entformen sind große Walzendurchmesser erforderlich. Dies impliziert wiederum die Verfügbarkeit von Fertigungseinrichtungen für Zylinder mit großem Durchmesser. Im Gegensatz zur strukturierten Breite eines Zylinders ist dies ein stark limitierender Faktor. Die Verfügbarkeit breiter Prägezyylinder und die kontinuierliche Replikation erlauben große strukturierte Flächen. Dem gegenüber steht jedoch die Beschränkung der Strukturvielfalt auf geringe Aspektverhältnisse bedingt durch kinematischen Randbedingungen der Entformung (vgl. Bild 2.4). [WORG09]

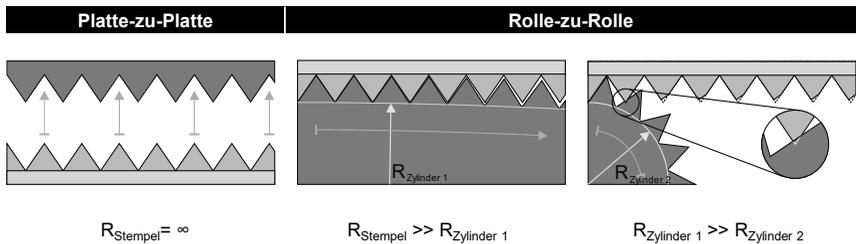


Bild 2.4: Entformungskinematiken
Kinematics of demolding

Für den Rolle-zu-Rolle-UV-Imprint-Prozess finden sich Analogien im kinematischen Ablauf zu dem in DIN 8583-5 beschriebenen „Wälzprägen“ [DIN03] und dem in DIN EN 12301 behandelten „Kalandern“ von Kunststoffen [DIN15].

Sind darüber hinaus die Strukturen im Vergleich zum Walzendurchmesser relativ groß, können die replizierten Strukturen durch die Übertragung von der gekrümmten Walze auf das ebene Substrat verzerrt sein. Bild 2.5 zeigt links eine entformte Struktur im ebenen Zustand. Im rechten Teilbild sind die geometrischen Verhältnisse bei der

Umschlingung des Prägezyinders dargestellt. Zur einfachen Darstellung wird als Beispielstruktur von axial verlaufenden V-Nuten ausgegangen. Der Winkel γ_1 im Nutgrund des Prägezyinders wird als gleich dem Spitzenwinkel γ_2 der entformten Nuten (Negativabbild) angenommen. Der Winkel zwischen den Flanken der entformten Nuten ist ε_2 und entspricht gemäß der Gesetzmäßigkeit der Wechselwinkel im Betrag γ_2 und somit gleichermaßen γ_1 . Die Höhen, die sich im Querschnitt der V-Nuten auf dem Prägezyinder ergeben, konvergieren im Mittelpunkt des Prägezyinders und sind somit nicht parallel. Es gilt keine Wechselwinkelbeziehung. Aus den geometrischen Gegebenheiten lässt sich ableiten, dass ε_1 um den Winkel α_{Struktur} kleiner ist als ε_2 . Der freie Winkel zwischen den V-Nuten weicht vom eingepprägten Winkel ε_1 ab. Der Winkelfehler α_{Struktur} ist proportional zum Quotienten der Grundfläche der Mikro- oder Nanostruktur und dem Radius des Prägezyinders. Folglich sind für verhältnismäßig große Strukturen zur Kompensation des beschriebenen Effekts Prägezyinder mit großen Radien bzw. Durchmessern zu wählen.

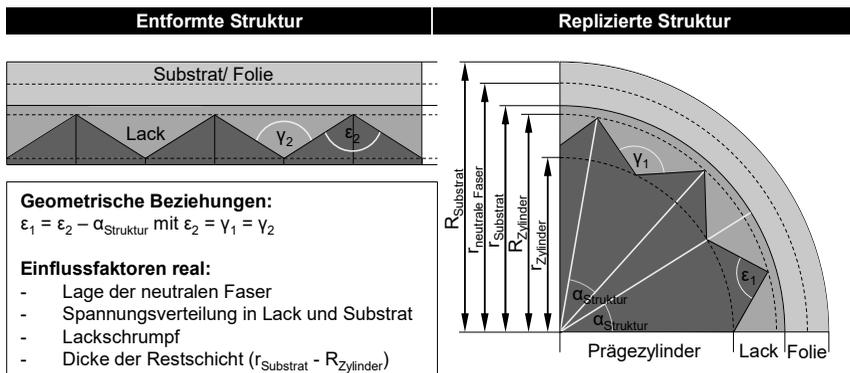


Bild 2.5: Einfluss von Strukturhöhe und Walzendurchmesser auf die Verzerrung des entformten Musters

Effect of structure height and drum diameter on deformation of the demolded pattern

Die Mikro- und Nanogeometrien werden üblicherweise bei Bahngeschwindigkeiten von bis zu 5 m/min in den Lackfilm repliziert [NEES15, TING08]. Die UV-härtenden Prägelacke sowie die polymeren Substrate sind den Materialien in der Platte-zu-Platte-Verarbeitung ähnlich. In Abhängigkeit von der Substratgeschwindigkeit und dem Ausbringungsverfahren besitzen die Lacke unterschiedliche Viskositäten. Die Substratmaterialien müssen als Folien verfügbar und biegsam bzw. wickelbar sein. [DUMO12a]

Im kontinuierlichen UV-NIL-Prozess ist die erforderliche Prägekraft signifikant kleiner als bei dem Platte-zu-Platte-Ansatz. Der Kontakt zwischen Replikationswerkzeug und Prägemedium besteht lediglich entlang einer Linie. Der Linienkontakt ist aufgrund der Deformation von Präge-, Gegendruckzylinder, Substrat und Lack durch die Hertz'sche Pressung lediglich ein theoretisches Ideal. Dennoch ist die linienförmige Kontaktzone in ihrer dimensional Ausdehnung gering und die erforderliche Kraft zur Umformung

des Prägelacks somit vergleichsweise niedrig. Die verringerten Prozesskräfte reduzieren die Wahrscheinlichkeit des Verzugs bzw. der Beschädigung des Replikationswerkzeugs. Sie begünstigen somit die Auslegung und Konstruktion eines kostengünstigen Prägezyllinders.

Störungen in der Oberflächenkontur des Replikationswerkzeugs, Ungleichmäßigkeiten im Lackauftrag oder Fremdpartikel im Prägespalt erzeugen Fehler in der Ausrichtung des Werkzeugs zum Material. Beim flächigen Prägen resultiert eine punktuelle Störgröße in einem globalen Replikationsfehler. Die Eindimensionalität des Linienkontakts wirkt sich positiv auf die Sensitivität der Replikation gegenüber den genannten Störgrößen aus. Ihr Einfluss ist entlang des linienförmigen Prägekontakts begrenzt. Ebenso sind die Konsequenzen von Gaseinschlüssen im Lackauftrag im Rolle-zu-Rolle-Ansatz weniger weitreichend. Blasen werden durch das Abrollen des Zylinders aus der Prägezone herausgedrückt. Offene Konturen im Replikationsergebnis sind meist die Folge einer unvollständigen Füllung des Strukturreliefs.

Ebenso wie die Prägekraft ist die Kraft zur Entformung von Werkzeug und Prägemedium geringer als im Platte-zu-Platte-Verfahren. Die Ablösung der Strukturen geschieht ebenfalls entlang einer Linie und nicht über die gesamte Fläche des Stempels. Zusätzlich verbessern Antihafbeschichtungen das Ablöseverhalten des Prägelacks. Solche Beschichtungen werden besonders bei Werkzeugoberflächen aus Silizium (Si), Nickel (Ni) oder anderen Materialien mit einer intrinsisch hohen Oberflächenenergie verwendet (vgl. Abschnitt 2.2.3). Alternativ werden Polymerwerkstoffe wie ETFE (Ethylen-Tetrafluorethylen-Copolymer) oder PDMS (Polydimethylsiloxan) für die Mantelfläche des Prägezyllinders verwendet. Sie besitzen eine geringere Oberflächenenergie [AHN08].

Die Registrierung und Ausrichtung von Replikationswerkzeug und Substrat kann nicht im Nanometerbereich ausgeführt werden, wie es im Platte-zu-Platte-Ansatz möglich ist. Eine exakte, dynamische Regelung der Positionierung ist aufgrund der hohen Materialgeschwindigkeiten ökonomisch nicht sinnvoll. Flexible Werkzeug- oder Substratmaterialien erschweren die Aufgabe zudem. Thermisch und mechanisch induzierte Dehnung oder Biegung verhindert die präzise Ausrichtung im Sub-Mikrometerbereich. Für Anwendungen, die eine präzise Ausrichtung oder Strukturüberlagerung $\leq 1 \mu\text{m}$ erfordern, ist ein Platte-zu-Platte-Prozess mit starrem Werkzeug- und Substratmaterial zu nutzen. [DUMO12a]

2.1.4 Anwendungsspektrum

Range of applications

Der Rolle-zu-Rolle-Nanoimprint-Lithografie wird ein großes Entwicklungspotential zugeschrieben [DUMO12a, OCON16, FROS17]. Vergleichsweise geringe Investitions- und Produktionskosten, hoher, kontinuierlicher Durchsatz und eine großflächige Ausbringung komplexer Mikro- und Nanostrukturen sind die Kernfaktoren für ihren Transfer von der wissenschaftlichen Erprobung in die industrielle Praxis. Entwicklungspotential bietet besonders die Produktionsgeschwindigkeit. Die Demonstration einer

Durchsatzfähigkeit von 60 m/min (1 m/sec) mit einer Forschungs- oder Pilotanlage wäre ein wichtiger Meilenstein, um viele kostengünstige, hochvolumige Anwendungen wirtschaftlich erscheinen zu lassen [DUMO12a]. Bild 2.6 gliedert das Anwendungsfeld für mikro- und nanostrukturierte Folienprodukte in fünf Märkte. Aus der Entwicklungshistorie heraus gelten die Optik sowie die Elektronik als die Märkte mit der höchsten Technologieverwertung. Optische Folien finden seit Etablierung der Flachbildschirme ihren Hauptnutzen in der Display- und Beleuchtungsindustrie. Zuvor wurden optische Folien besonders in Anwendungen mit Retroreflektorfunktionen eingesetzt (z. B. Straßenschilder). Im Energiesektor werden optische Strukturen zur Effizienzsteigerung von Solarzellen genutzt. Die Erforschung biomimetischer Mikro- und Nanostrukturen eröffnet überdies Anwendungsfelder in der Biomedizin und Pharmazie sowie in der Umwelttechnologie.

Prognosen unterschiedlicher Quellen beschreiben einheitlich das in Bild 2.6 dargestellte Portfolio potentieller Absatzmärkte für kontinuierlich gefertigte Produkte. Die Größe der Märkte in den nächsten 5 bis 10 Jahren und die umsatzstärksten Anwendungen werden von den Analysten jedoch nicht einheitlich identifiziert [OCON16].

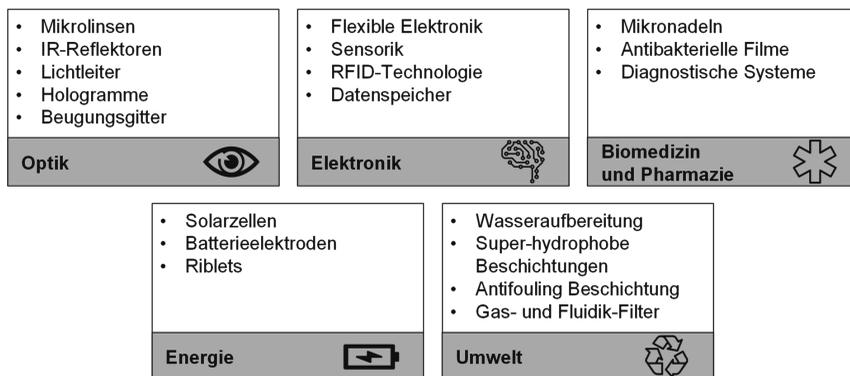


Bild 2.6: Anwendungsspektrum mikro- und nanostrukturierter Folien [OCON16]

Range of applications for micro- and nanostructured films

Technologietreiber für optische Folien ist der Display- und Beleuchtungsmarkt mit stetig wachsendem Bedarf an großflächigen Flacherzeugnissen zur Lichtleitung und -lenkung. Das Produktspektrum reicht von einfachen Diffusoren hin zu komplexen Hologrammen. Mit der Replikation von Beugungsgittern [JOHN13] geht der Trend zu Nanostrukturen mit Dimensionen kleiner als die Wellenlängen des Lichtspektrums.

Das Strukturportfolio umfasst Prismen [SHEN14], Mikrolinsen [YAO06a, YAO06b] und weitere Formen im Mikro- und Nanometerbereich zur Diffusion und Lenkung von Licht. In Anlehnung an die Oberflächenstruktur von Mottenaugen werden Folien mit Nanosäulen bzw. abgerundeten Nanokegeln geprägt. Die biomimetischen Geometrien bilden eine Antireflexionsschicht [ZHAN15a]. Bild 2.7 zeigt eine Auswahl an Strukturen, die in der Optik- und Elektronikbranche eingesetzt werden. Künftige Anwendungen

optischer Folien sind 3D- oder Head-Up-Displays sowie Smart-Buildings-Technologien. Einige Anwendungen, in denen aktuell optische Folien verwendet werden, finden sich ebenso in der Photovoltaik, der OLED-Technologie und der Fensterherstellung. [KLAM12, OCON16]

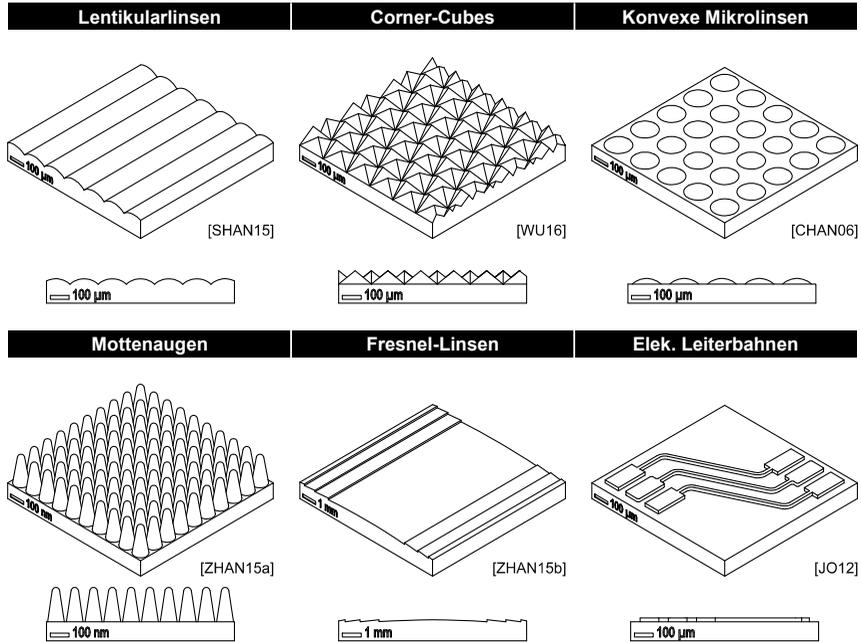


Bild 2.7: Strukturen mit Anwendung in der Optoelektronik nach [SHAN15, WU16, CHAN06, ZHAN15a, ZHAN15b, JO12]

Patterns used for optoelectronic applications

Biomedizin und Pharmazie nutzen die kontinuierliche Replikationstechnik zur Massenproduktion von antibakteriellen Beschichtungen, diagnostischen Systemen und Arzneimittelabgabesystemen.

Folien mit antimikrobieller Funktion werden in Krankenhäusern und Pflegeeinrichtungen eingesetzt. Die Sterilität hochfrequentierter Oberflächen soll unterstützt werden, um kostenintensive, umgebungsinduzierte Zusatzerkrankungen zu vermeiden. Bild 2.8 (links) zeigt die Replikation einer Haifischhaut [ABBO07, SHAR17]. Die natürlichen, originären Strukturen wurden zur Vereinfachung der Herstellung des Werkzeugs in ihrer Geometrie abstrahiert. Zur Verstärkung der Wirkung werden die Folien mit antimikrobiell wirkenden Zusätzen wie Kupfer (Cu), Silber (Ag) oder ätherischen Ölen versetzt [HEX117a]. Weitere Anwendungsfelder finden sich im öffentlichen Transportwesen, dem Sanitärwesen oder in der Verpackungsindustrie [HEX117b].

Die Point-Of-Care-Diagnostik mittels sogenannter Lab-On-A-Chip beschreibt die dezentrale, patientennahe Durchführung von Analysen zur Bestimmung von Vitalfunktionen und Krankheitsbildern. Gerade in infrastrukturell schwachen Regionen besitzen die komplexen Testgeräte großes Anwendungspotential [FROS13b]. Die kostengünstigen Einwegprodukte besitzen mikrofluidische Strukturen zur Absorption, Förderung, Verarbeitung und Bevorratung von Reagenzien und Proben [VELT08, WIER09, METW12]. Die Abbildung in der Mitte (s. Bild 2.8) zeigt eine mäandrische Struktur zum Mischen verschiedener Reagenzien. In den Forschungsprojekten „ML² - MultiLayer MicroLab“ oder „LabOnFoil“ wurden kontinuierlich gefertigte, mikrofluidische Strukturen erfolgreich in diagnostischen Systemen eingesetzt [ML217, LABO17].

Mikronadeln perforieren die oberen Hautschichten eines Patienten und ermöglichen präzise Dosierungen von Medikamenten und Impfstoffen. Die Applikation auf der Haut erfolgt flächig als Pflaster [KIM12, LARR16]. In Bild 2.8 (rechts) ist eine Mikronadelanordnung zu sehen. Obgleich dieser Technologie ein großes Potential beigemessen wird, wurde die Produktion im Rolle-zu-Rolle-Ansatz noch wenig erforscht [OCON16].

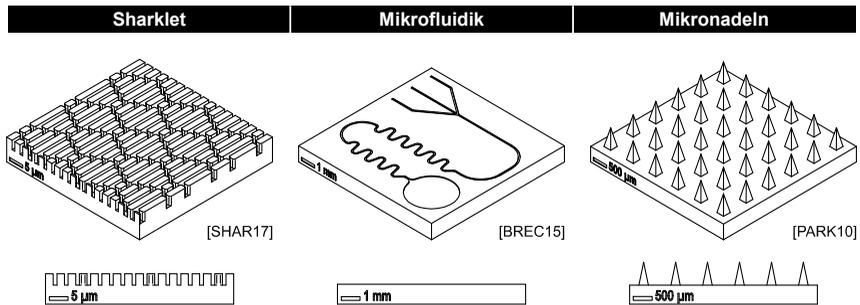


Bild 2.8: Strukturen mit Anwendung in der Biomedizin und Pharmazie nach [SHAR17, BREC15, PARK10]

Patterns used for biomedical and pharmaceutical applications

Der Energiesektor besitzt hinsichtlich der verwendeten Strukturen Überschneidungen mit den bereits genannten optischen und elektronischen Strukturen. Die Kosten für die Raumklimatisierung lassen sich durch optische Folien auf konventionellen Fenstern reduzieren. Beschichtung und Struktur der Folien reflektieren Infrarotlicht, welches folglich nicht ins Gebäude gelangt und dieses aufheizt. Der Bedarf an künstlichem Licht zur Raumbeleuchtung kann reduziert werden. Bei dieser Anwendung begünstigen Folien die Lenkung und Kollimation des natürlichen Lichteinfalls ins Gebäudeinnere. Bild 2.9 zeigt drei Strukturtypen die zur Steigerung der Energieeffizienz eines übergeordneten Systems genutzt werden.

Rückreflektoren von Solarzellen werden mit nanoskaligen Texturen versehen, um die Lichtabsorption zu verbessern, ohne die Materialstärke der aktiven Materialien zu erhöhen. Regelmäßig oder zufällig angeordnete Pyramiden reflektieren die einfallende Strahlung in flachen Winkeln zur Substratoberfläche. Der Weg der Photonen durch die Solarzelle verlängert sich. Mehr Energie kann aus der Strahlung gewonnen werden.

Eine optimale Beschränkung des Lichtwegs ergibt sich, wenn die Größe der Strukturen annähernd im Bereich des zu zerstreuen Wellenlängenspektrums liegt. Regelmäßige Pyramidenmuster zeigten bessere Lichtstreuungseigenschaften als zufällige. Ihr Nachteil liegt in einer höheren geometrischen Sensitivität. [GONZ12]

Pyramiden mit hexagonaler Grundfläche werden im Aufbau einer Solarzelle eingesetzt, um Lichtenergie effizienter einzukoppeln. Durch eine Mehrfachreflexion entlang und zwischen den Wabenstrukturen sowie auftretende Beugungseffekte kann die Transmission schräg einfallenden Lichts gesteigert werden. Traditionell werden in der Solartechnik statistisch geätzte Mikrostrukturen zur Reduzierung optischer Verluste eingesetzt. [PLAC13] Mit einer Wabenstruktur lässt sich der Wirkungsgrad von Solarzellen im Vergleich zu isotexturierten Solarzellen um 0,5 % steigern [VOLK15]. Bild 2.9 (links) zeigt beispielhaft eine regelmäßige Wabenstruktur.

Ein vergleichbarer Effekt kann mit den in Bild 2.9 (Mitte) gezeigten Nanogittern erzeugt werden. Die rückseitig auf einer Solarzelle aufgetragenen Beugungsgitter manipulieren den Strahlengang des Lichts [BLAE16]. Durch die Metallisierung der Strukturen lassen sich hochpräzise, verlustarme Drahtgitterpolarisatoren herstellen [AHN08, OK13]. Des Weiteren ermöglichen die metallisierten Strukturen den Aufbau flexibler Solarzellen sowie energieeffizienter flexibler Elektronik wie E-Papern [THAN16].

Bild 2.9 (rechts) zeigt V-förmige Stege. Diese Stege werden als Riblets bezeichnet. Seit über 20 Jahren ist bekannt, dass eine Riblet-Oberflächenstruktur den Strömungswiderstand in Fluiden reduzieren kann. Ein Beispiel für eine komplexe Riblet-Geometrie ist die bereits bekannte Haifischhaut. Natürliche Haifischhaut vermag den Strömungswiderstand um bis zu 24,5 % gegenüber nicht strukturierten Oberflächen zu senken. Die Herstellung von dreidimensionalen Riblet-Strukturen ist kompliziert. Daher werden häufig vereinfachte, zweidimensionale Riblet-Strukturen eingesetzt. Es wurde nachgewiesen, dass die Verkleidung von 30 % der Außenhaut eines Airbus A340 mit einer Riblet-Struktur 1,5 % des Treibstoffverbrauchs einsparen kann. Für die meisten Anwendungen wird eine Strukturhöhe zwischen 2,5 μm und 125 μm benötigt. [KORD15]

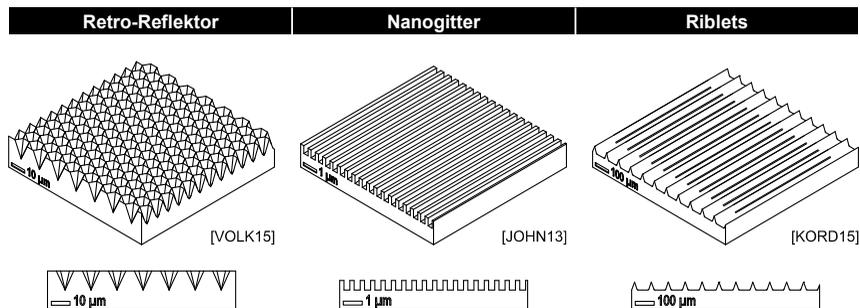


Bild 2.9: Strukturen mit Anwendung im Energiesektor nach [VOLK15, JOHN13, KORD15]

Patterns used for energy generation and saving applications

In der Umwelttechnik werden geometrisch-modifizierte Oberflächen eingesetzt, um beispielsweise den Einsatz von belastenden, chemischen Additiven zu reduzieren. Bild 2.10 (links) zeigt die Abstraktion der hydrophoben Oberfläche eines Lotusblattes. Durch Variation von Durchmesser, Höhe und Abstand der Mikrosäulen sowie eine Nanotexturierung kann der Kontaktwinkel zwischen der Oberfläche und einem Fluid (z. B. Wasser) eingestellt werden. [ABBO07, BHUS10] Verunreinigungen werden von abperlenden Wassertropfen aufgenommen und abtransportiert.

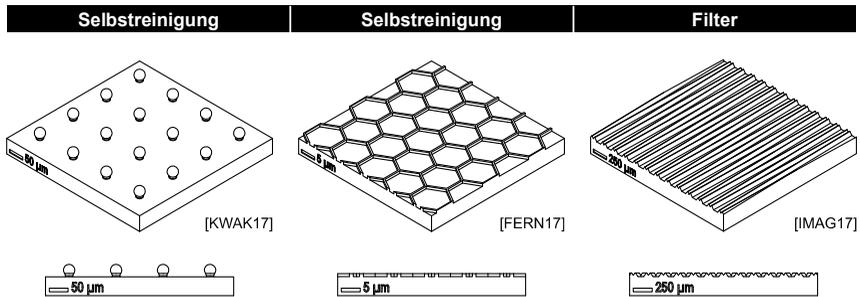


Bild 2.10: Strukturen mit Anwendung in der Umwelttechnik nach [KWAK17, FERN17, IMAG17]

Patterns used for environmental technology applications

Ein weiteres Beispiel für biologisch-inspirierte Oberflächenmodifikationen ist der lamellare Aufbau von Gecko-Füßen. Die Spatulae (deutsch: Schäufelchen) an den lamellenartig angeordneten Borsten ihrer Füße erzeugen Adhäsion auf Basis einer Van-der-Waals-Wechselwirkung mit dem Untergrund. [ABBO07] Haftverbindungen ohne chemische Klebstoffe lassen sich durch Nachahmung der Geometrie herstellen. Der Feilenfisch hat eine anisotrope, ölabweisende Haut. Öltröpfchen perlen vom Kopf des Fisches in Richtung Schwanz ab. Als Anwendung künstlicher Feilenfischhaut kommen ölabweisende Textilien und Beschichtungen, Ölleitsysteme und Unterwasser-Ölkollektionssysteme in Betracht. [CAI14] Die Abstraktion der beiden letztgenannten Strukturen ist aufgrund ihres hierarchischen Aufbaus komplex und noch nicht ausreichend erforscht, um eine kostengünstige Herstellung der Replikationswerkzeuge zu ermöglichen.

Farbeindrücke lassen sich durch die Gestaltung der Oberflächentopografie verändern [STE116]. Strukturelle Farben, auch als Struktur- oder Interferenzfarben bezeichnet, sind optische Phänomene, bei denen die Topografie der Oberfläche das reflektierte Lichtspektrum bestimmt. In der Natur kommen strukturelle Farben bei Schmetterlingen, wie dem blauen Morphofalter, und bei Käfern vor. Die Wirkmechanismen struktureller Farben sind Dünnschicht-Interferenz, Mehrschicht-Interferenz, optische Beugungseffekte und Effekte photonischer Kristalle. [CHR113]

Kunststoffe mit strukturellen Farben haben das Potential sich einfacher recyceln zu lassen. Konventionell mit Pigmenten gefärbte Kunststoffe lassen sich schlecht recyceln, da die kräftigen Pigmente dünner Dekorationsschichten im wiederaufbereiteten

Zustand die Farbe des Grundmaterials kontaminieren können. [CHRI13] In dem Forschungsprojekt „Plast4Future“ wurde die strukturelle Farbgebung anhand von Spritzgussbauteilen erforscht [PLAS17]. AHN et al. sowie JIANG et al. haben die gleichen Effekte anhand von Beugungsgittern für kontinuierlich strukturierte Folien gezeigt [AHN08, JIAN14].

Bild 2.10 (rechts) zeigt kontinuierlich gefertigte Filterstrukturen. Das Trägersubstrat wird beidseitig mit unterschiedlichen Mikrostrukturen versehen. Durch das Aufwickeln des Films entsteht ein zylinderförmiger Filter, der entlang seiner Längsachse von einem Fluid durchströmt wird. Die Porosität des Filters ergibt sich durch Schlitze und Spalte zwischen den Strukturen von Vorder- und Rückseite. [IMAG17] Der Hersteller des Produkts hat den Aufbau des Filters speziell für die Herstellung mit kontinuierlicher NIL entwickelt. Eine entsprechende Umsetzung des Produkts ist nicht bekannt.

2.1.5 Abgrenzung gegenüber kompetitiven Verfahrensansätzen

Differentiation from competitive approaches

In Abschnitt 2.1 ist beschrieben, dass die Nanoimprint-Lithografie als Alternative zur konventionellen optischen Lithografie entwickelt wurde. VIGNESWARAN et al. [VIGN14] unterscheiden elf alternative Ansätze (vgl. Bild 2.11). Das Portfolio umfasst sowohl kontaktlose Verfahren wie beispielsweise die Elektronenstrahl- und die Ionenstrahl-Lithografie als auch das kontaktbehaftete Mikro- und Nano-Kontaktdruckverfahren. Die Strukturierung erfolgt sowohl additiv (Dip-Pen-Lithografie) als auch subtraktiv (Nano-Shaving) auf dem Trägersubstrat. Das Auflösungsvermögen variiert von mehreren Mikrometern (Nanoimprint-Lithografie) bis in den Sub-Nanometerbereich (Rastersonden-Lithografie, Dip-Pen-Lithografie). [BHUS10, VIGN14]

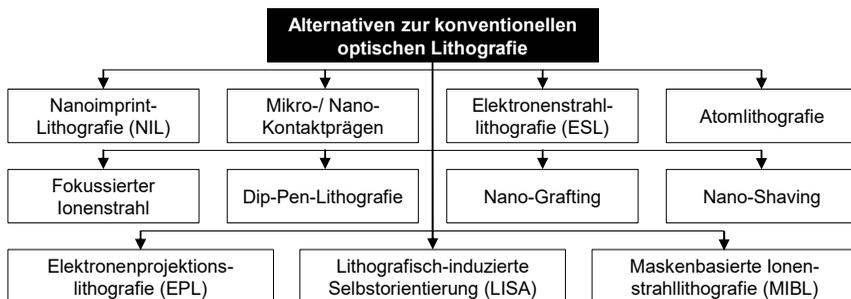


Bild 2.11: Alternative Lithografie-Verfahren nach VIGNESWARAN et al. [VIGN14]

Alternative lithography processes categorized by VIGNESWARAN et al.

Nicht alle der gezeigten Verfahren sind in einen Rolle-zu-Rolle-Prozess zu überführen. Randbedingungen wie Vakuum- oder Inertgas-Atmosphären, Reinraumbedingungen oder die maximale strukturierbare Fläche und die Beschaffenheit des Substrats lassen die Überführung in eine kontinuierliche Folienbearbeitung technisch nicht zu oder machen sie wirtschaftlich unattraktiv.

YANG, BALDESI und DATAR haben in ihren Arbeiten die Systementwicklung für ein kontinuierliches Mikrokontaktdruckverfahren beschrieben [YANG09, BALD09, DATA09, AHN14]. Ein mikro- oder nano-strukturierter Zylinder aus Elastomer wird mit einer Tinte benetzt und überträgt diese beim Kontakt mit dem Trägersubstrat. Selbst-orientierte Monolagen aus Monomeren der Tinte (engl.: Self-Assembled Monolayers) bleiben auf dem Substrat zurück. Die Zielstruktur wird in einem Ätzprozess in das Trägersubstrat eingebracht. Die Tinte dient als Maske für diesen Schritt. [SOTO03] Das Transferprinzip ist vergleichbar mit Hochdruckverfahren wie dem Flexodruck.

Eine größere Verbreitung in der Forschung und Produktentwicklung haben die Varianten der Nanoimprint-Lithografie. Neben der UV-NIL existiert die sogenannte thermische Nanoimprint-Lithografie (T-NIL) (vgl. Bild 2.12). Das thermische Verfahren ist historisch bedingt länger erforscht. Das Prinzip findet seit den 1970er-Jahren Anwendungen in Replikation optischer Strukturen. Eingesetzt werden bevorzugt Polycarbonat (PC) und Polymethylmethacrylat (PMMA). Im umformenden Prozess wird das thermoplastische Trägersubstrat selbst durch Erwärmung erweicht. [YU15] Die Umformung erfolgt in der Regel durch harte Prägwerkzeuge. Im allgemeinen Sprachgebrauch wird von einem direkten, thermischen Prägeprozess ausgegangen. Der Ausdruck „Heißprägen“ (engl.: Hot Embossing) wird äquivalent verwendet.

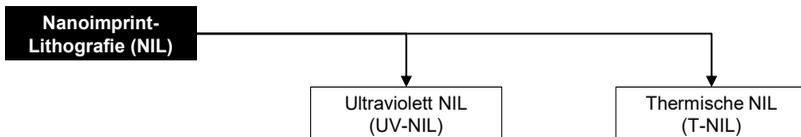


Bild 2.12: Nanoimprint-Lithografie-Verfahren nach YU et al. und VIGNESWARAN et al. [YU15, VIGN14]

Nanoimprint lithography processes categorized by YU et al. and VIGNESWARAN et al.

Das Heißprägen von Flächen bis 2.000 x 1.000 mm² im Step-And-Stamp- bzw. Step-And-Repeat-Ansatz wurde am Fraunhofer IPT im Projekt FlexPAET erforscht. Ergebnisse dieser Forschung wurden in kontinuierliche Prägeprozesse überführt. Bild 2.13 illustriert den Prozessablauf, der sowohl für Platte-zu-Platte als auch für Rolle-zu-Rolle-Verfahren gültig ist.

Das thermisch unterstützte Prägen basiert auf der Deformation bzw. Umformung eines dünnen thermoplastischen Films an der Oberfläche des Trägersubstrats. Das thermoplastische Material wird über seine Glasübergangstemperatur (T_g) erwärmt, um es formbar zu machen. Die Erwärmung erfolgt meist nur lokal mit einer geringen Eindringtiefe. Das Substrat verliert somit nur wenig an Festigkeit. Im Vergleich zur UV-NIL wird mit großer Kraft der Stempel in den Thermoplasten gepresst. Das Material fließt in die Kavitäten des Werkzeugs. Nach einer spezifischen Umformzeit, die vom Design und der Topografie des Werkzeugs abhängt, werden Werkzeug und Substrat abgekühlt. Werkzeug und Substrat werden entformt, wenn eine Temperatur unterhalb der Glasübergangstemperatur erreicht ist. So lassen sich Deformationen bei der Entformung vermeiden. [WORG09, STEP12]

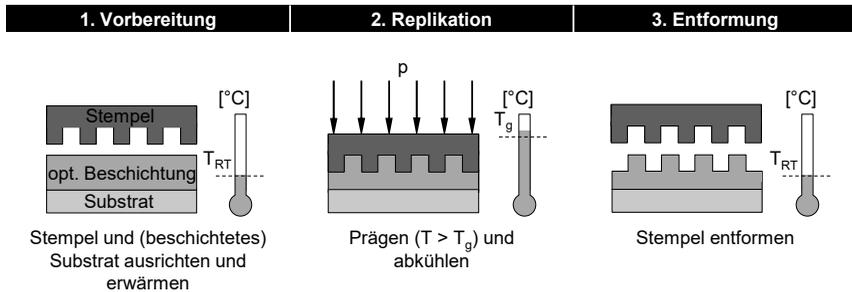


Bild 2.13: Prozessablauf einer thermischen NIL [BHUS10, STEP12]

Process sequence of a thermal NIL

Umformung und Abkühlung des Thermoplasten, wie in Schritt 2 von Bild 2.13 gezeigt, erfolgen im Rolle-zu-Rolle-Prozess in der kurzen Zeitspanne während das Substrat den Prägezyylinder passiert. Die Erwärmung des Substrats erfolgt vorab beispielsweise durch Infrarotstrahlung, Laserstrahlung oder Heizplatten [VELT07, VELT10, VELT11, VIGN14]. Das Prägewerkzeug wird ebenfalls temperiert, um thermisch induzierte Prozessschwankungen zu vermeiden. Thermische Prozesszonen sind über den Werkzeugumfang einstellbar [FAGA08, FAGA09]. Die Kontaktzeit von Substrat und Prägezyylinder wird durch größere Umschlingungswinkel und den Einsatz von Andruckgurten erhöht [YUN13].

Eine Sonderform der thermischen NIL im Rolle-zu-Rolle-Ansatz ist das ultraschallunterstützte Prägen [MEME14, LIAO15]. Die Erwärmung des Substrats wird durch mechanische Schwingungen herbeigeführt. Die Schwingungen im Ultraschallspektrum werden über eine Sonotrode in das Substrat eingekoppelt. Die Replikationstreue sowie die Oberflächengüte der Replikationen ist bedingt durch Mikroschwingungen wesentlich geringer als bei anderen Erwärmungsmethoden.

LIU et al. zeigen eine weitere Verfahrensvariante bei der eine kurz zuvor extrudierte Folie thermisch strukturiert wird [LIU12]. Dieser Prozess ist besonders energieeffizient. Die Restwärme des extrudierten Materials bildet das Grundniveau zur Erreichung der Glasübergangstemperatur T_g .

Der thermischen NIL wird aus Versuchen in Platte-zu-Platte-Verfahren ein geringfügig schlechteres Auflösungsvermögen zugeschrieben. Das Auflösungslimit für UV-NIL-Prozesse wird bei 2–5 nm angegeben. Das Limit für die T-NIL liegt bei 5 nm. [BHUS10]

Die Gegenüberstellung der beiden Verfahrensvarianten zeigt ihre spezifischen Vor- und Nachteile wie in Tabelle 2.1 zusammengefasst. Die Vorteile des UV-basierten Ansatzes ergeben sich vornehmlich aus der Verwendung der flüssigen Lacke. Die niederviskosen Materialien füllen die Strukturen der Prägezyylinder schneller als die zähfließenden, erwärmten Thermoplaste. Eine Temperierung der Lacke ist optional möglich, nicht aber zwingend erforderlich.

Tabelle 2.1: Vor- und Nachteile UV-basierter und thermischer NIL [VOGL07, ACIK11, KOOY14]

Advantages and drawbacks of UV based and thermal NIL

	UV-Nanoimprint-Lithografie	Thermische Nanoimprint-Lithografie
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> • Kurze Prozesszeiten • Hohe Produktionsgeschwindigkeiten • Prozess bei Raumtemperatur • Hard- und Soft-Molds einsetzbar • Geringer Prägedruck • Hohes Auflösungsvermögen • Hohe Replikationsgüte • Lackhaftung auf Trägersubstrat anpassbar 	<ul style="list-style-type: none"> • 1-Komponenten-System • Keine Restschichtlage • Keine chemische Beanspruchung des Prägewerkzeugs • Keine Materialschäden durch UV-Strahlung (Vergilbung)
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> • 2-Komponenten-System • Geringe chemische Beständigkeit von Antihafbeschichtungen • Stets Restschichtlage vorhanden • 3 bis 15 % Volumenkontraktion (Schrumpf) während der Aushärtung 	<ul style="list-style-type: none"> • Nur für Thermoplasten anwendbar • Erhöhter Verschleiß der Prägewerkzeuge durch thermische und mechanische Belastung • Thermische Dehnungsunterschiede zwischen Substrat und Prägewerkzeug • Komplexe Prozesstemperierung

Konventionelle Rolle-zu-Rolle-Druckverfahren konkurrieren bei der Herstellung gedruckter Elektronik gleichfalls mit den lithografischen Verfahren. Die Organic-Electronics-Association (OE-A) bewertet die Rolle-zu-Rolle-NIL als das Verfahren mit dem vergleichsweise höchsten Auflösungsvermögen (s. Bild 2.14). Verglichen mit dem Tief- oder dem Flexodruck ist die Produktausbringung um mehr als den Faktor zehn geringer. Eine Substitution der Technologien ist nur eingeschränkt möglich. [HECK15]

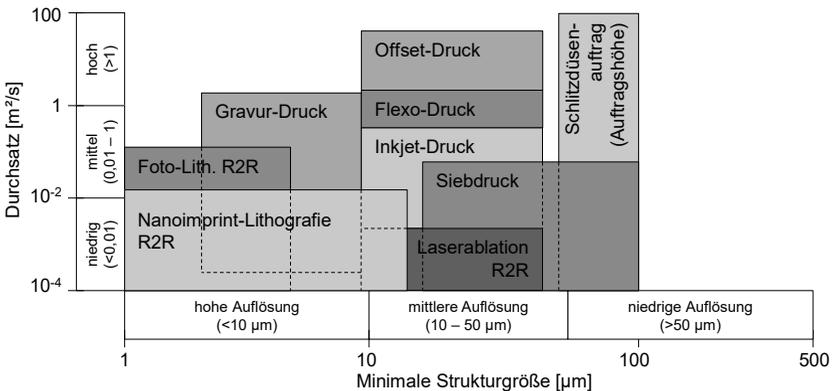


Bild 2.14: Vergleich der Nanoimprint-Lithografie mit konventionellen Drucktechniken nach [HECK15]

Comparison of nanoimprint lithography to conventional (im-)printing techniques

Tatsächlich liegt das Auflösungsvermögen der abgebildeten lithografischen Verfahren im zweistelligen Nanometerbereich. Das Potential der Technologien ist somit weitaus höher als dargestellt. Die Skala der ursprünglichen Abbildung wurde nicht verändert, weshalb in Bild 2.14 der Sub-Mikrometerbereich nicht aufgeführt ist.

2.2 Produktionstechnik zur Mikro- und Nanostrukturierung in kontinuierlichen UV-NIL-Prozessen

Production technology for micro- and nanostructuring in continuous UV-NIL processes

In diesem Unterkapitel werden die Teilsysteme zur Beherrschung der Rolle-zu-Rolle-UV-NIL eingehend betrachtet. Die Komposition geeigneter Lacksysteme sowie die konstruktiven Varianten zur Realisierung der Materialausbringung, Strukturierung und Härtung werden vorgestellt. Anhand von Anlagenkonzepten aus Forschung und Industrie werden Beispiele für ganzheitliche Produktionssysteme aufgezeigt.

2.2.1 UV-härtende Lacke

UV curable resists

UV-härtende Lacke sind photoinduzierte Systeme. Die Aushärtung erfolgt bei Raumtemperatur durch Einwirkung elektromagnetischer Strahlung im Spektralbereich von 100 – 380 nm (UV-A/B/C) [DIN84]. Thermische Energie oder chemische Additive sind nicht erforderlich. [VOGL07]

Die Entwicklung eines anwendungsoptimierten Lacksystems ist ein Kompromiss, der aus Rahmenbedingungen von Anwendung, Produktionsequipment und Materialchemie herzuleiten ist (s. Bild 2.15).

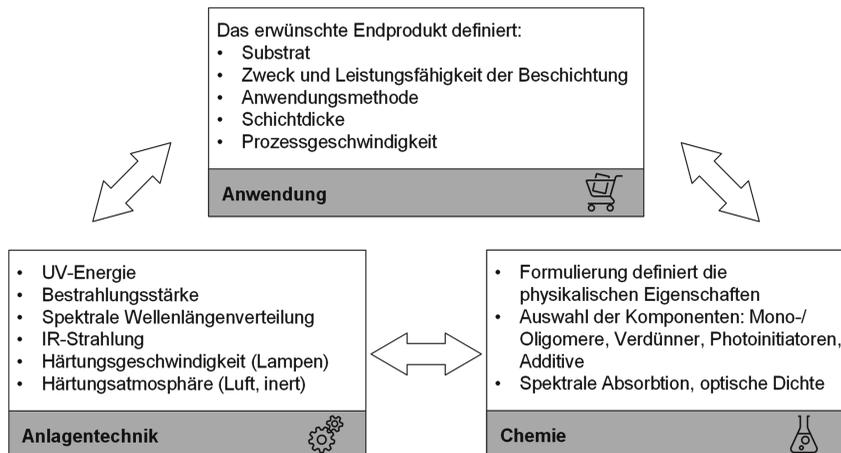


Bild 2.15: Wechselwirkung der UV-NIL-Prozessparameter nach SCHWALM [SCHW07]

Interaction of UV NIL process parameters summarized by SCHWALM

Die Komposition und die Materialeigenschaften des Lacks im flüssigen wie im vernetzten Zustand sind auf die Anforderung des Produktionssystems und des Produkts abzustimmen. Die Herausforderungen bestehen darin einen Lack zu formulieren, der

- eine optimale Balance aller Eigenschaften bietet (vgl. Bild 2.15),
- ein defektfreies Füllen durch ein ideales, blasenfreies Fließverhalten ermöglicht,
- innerhalb kürzester Zeit in-situ aushärtet,
- eine hohe Replikationsqualität durch geringen Volumenschwund bietet und
- sich anschließend rückstandsfrei und vollständig ausschließlich vom Prägewerkzeug, nicht aber vom Substrat lösen lässt. [ABBO07]

Charakteristische Eigenschaften eines UV-härtenden Lacks sind Viskosität, Oberflächenenergie, Elastizitätsmodul, Schrumpf und Ätzverhalten. Sie beeinflussen das Fließ- und Füllverhalten sowie den Aushärtungs- und Entformungsprozess. [Y115a]

Eine geringe Viskosität wirkt positiv auf das Fließ- und Füllverhalten des Lacks. Im Lack gebundene Luftblasen entweichen schneller und die Topografie des Prägewerkzeugs ist in kürzerer Zeit ausgefüllt. [ABBO07] Die Viskosität bei lösungsmittelfreien Systemen (100%-Systeme) variiert zwischen $5 \cdot 10^{-2} - 10^2$ Pa·s (Polyacrylate: 0,05 – 2 Pa·s) [SCHW07]. Die Oberflächenenergie beeinflusst sowohl den Füll- als auch den Entformungsprozess. Ist die Oberflächenenergie des Substrats höher als die des flüssigen Lacks, resultiert dies in einer homogenen Benetzung. Ein umgekehrtes Verhältnis zwischen Prägezylinder und Lack begünstigt die Entformung. Die Entformung kann zusätzlich durch die Beimischung von Silanen [AMIR11, AMIR10] oder Fluorverbindungen [OTSU14] verbessert werden. Das Ätzverhalten ist für nachgeschaltete Transferprozesse und die chemische Beständigkeit entscheidend. Speziell zyklische und aromatische Komponenten in der Formulierung bestimmen die Eigenschaft. [VOGL07, Y115a]

Die UV-härtenden Lackssysteme, die in der Rolle-zu-Rolle-UV-NIL Anwendungen finden, vernetzen sich ausschließlich nach dem Prinzip der photoinduzierten Polymerisation (s. Bild 2.16). Die Aushärtungsmechanismen der Polyaddition und der Polykondensation werden nicht eingesetzt.

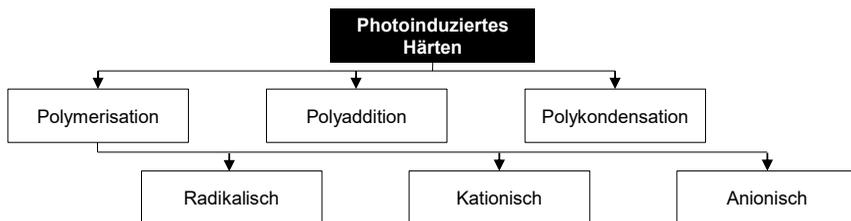


Bild 2.16: Varianten des photoinduzierten Härtens nach SCHWALM [SCHW07]

Possibilities of photoinduced curing summarized by SCHWALM

Das Lacksystem setzt sich aus Vernetzungsmitteln (engl.: Cross-Linking Agent), Mono- und/oder Oligomeren sowie Photoinitiatoren zusammen. Das Vernetzungsmittel ist in seinem molekularen Aufbau den verwendeten Monomeren ähnlich. Das Molekül verfügt jedoch über eine Vielzahl funktionaler Gruppen, welche die (Quer-)Vernetzung der Polymerketten ermöglichen. Epoxid- und Acrylmonomere haben die größte Verbreitung als Basis der Lacksysteme. Der Photoinitiator (auch: Photostarter) dient zur Aktivierung der Polymerisationsreaktion. Bei der Bestrahlung mit hochenergetischem UV-Licht erzeugen sie freie Radikale oder Photosäuren, die im System die Quervernetzung und Polymerisation anregen. In Abhängigkeit der Mono- und Oligomere kann der Polymerisationsmechanismus in radikalische Polymerisation (acryl-basierte Lacke) und kationische Polymerisation (epoxid-basierte Lacke) unterteilt werden. [VOGL07, SCHW07, BEND03] Eine dritte Kategorie von minderer Bedeutung bilden die anionisch polymerisierenden Systeme. Die radikalische Polymerisation gilt als der wichtigste der drei Mechanismen und besitzt die weiteste Verbreitung in Forschung und Industrie. Die ionischen Aushärtungsreaktionen sind wenig erforscht. [SCHW07] Hybride Systeme als Kombinationen aus radikalischer und kationischer Polymerisation sind verfügbar [MATT06].

Bei der radikalischen Polymerisation werden die Photoinitiatoren durch die Photonen der hochenergetischen UV-Strahlung zur Freisetzung freier Radikale angeregt. Trifft das freie Radikal auf ein Monomer wird dessen Kohlenstoffdoppelbindung aufgebrochen. Radikal und Monomer bilden eine kovalente Bindung aus. Diese Reaktion hinterlässt ein freies, ungepaartes Elektron am Monomer, was wiederum eine Bindung mit einem weiteren Monomer eingehen kann. Es bildet sich eine Kettenreaktion aus, die solange anhält, bis alle reaktionsfähigen Moleküle gebunden sind oder ein Kettenabbruch erfolgt. Grund für einen Kettenabbruch sind die Verbindung zweier Radikale (Rekombination), eine Disproportionierung oder der Abbruch durch Zugabe von Molekülen (engl.: Terminator Molecules). Die hohe Reaktivität, die schnelle Polymerisationsrate und die vielfältige Auswahl an Materialien machen die freie radikalische Polymerisation zum bevorzugten Mechanismus für Forschung und Industrie. [BEND03, SCHW07]

Bei der kationischen Polymerisation werden Photosäuren durch Anregung des Photoinitiators erzeugt. Die Photosäuren initiieren die Kettenreaktion. Im Vergleich zur radikalischen Polymerisation ist die kationische langsamer. Die vollständige Aushärtung dauert somit länger. Die Auswahl geeigneter Materialien ist beschränkt. Die Polymerisation ist empfindlich gegenüber Temperatur- und Feuchtigkeitseinflüssen. Die Anwendungsmöglichkeiten sind beschränkt, da Rückstände von Säuren im gehärteten System verbleiben. Vorteile der kationischen Polymerisation sind der geringere Schrumpfung und die Unempfindlichkeit gegenüber Sauerstoff (s. Tabelle 2.2). Bei kationischer Polymerisation unter Sauerstoffatmosphäre bildet sich keine Sauerstoffinhibitionsschicht aus. Von CHENG et al. wurde ein kationisch vernetzender Lack mit weniger als 3 % Volumenschrumpfung vorgestellt [CHEN05]. Für Acrylate liegt der Volumenschrumpfung während der Polymerisation bei 10 – 15 %. Die spezifische molekulare Struktur hat einen wesentlichen Einfluss auf das Ausmaß des Schrumpfung. Ein kleinerer

Volumenschumpf ist mit anderen Materialkombinationen auch für radikalisch vernetzende Polymere möglich. [VOGL07, BEND03, SCHW07]

Tabelle 2.2: Vergleich der Polymerisationsmechanismen

Comparison of polymerization mechanisms

	radikalische Polymerisation	kationische Polymerisation
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> • Große Materialvielfalt • Hohe Polymerisationsrate • Säurefrei 	<ul style="list-style-type: none"> • Geringer Volumenschumpf • Keine Sauerstoffinhibition

Der Sauerstoffinhibition kann durch chemische oder physikalische Methoden, wie bspw. Additive im Lacksystem (hybride Systeme) oder eine Inertisierung der Umgebungsatmosphäre, entgegengewirkt werden [SCHW07].

Bei der Verwendung der Lacksysteme ist zu beachten, dass die Härtungsergebnisse nicht zwangsläufig auf andere Produktionssysteme übertragbar sind. Die Photoinitiatoren sind auf das Spektrum einer Strahlquelle abgestimmt. Das Spektrum einer UV-Strahlung sowie die Intensität der verschiedenen Wellenlängen kann je nach Art und Alter der Strahlquelle variieren (vgl. 2.2.4). [VOGL07]

Opazität der Materialien, eine ungleichmäßige Ausleuchtung des Substrats über die Bahnbreite oder Abschattung von Bereichen durch Anlagenteile verschlechtern die Aushärtung ebenfalls [SCHW07].

Ein weiterer Nachteil UV-basierter Systeme ist die initiale Vergilbung (engl.: Initial Photoyellowing). Der Ausdruck beschreibt das Phänomen einer teilweise bis vollständig reversiblen Vergilbung des Lacksystems direkt nach der Aushärtung. Es ist nicht zu verwechseln mit der Vergilbung des Lacks aufgrund von Witterung oder Alterung. Die tatsächliche Farbe oder Transparenz eines Prägebildes kann demnach erst einige Stunden nach der Aushärtung bewertet werden [SCHW07].

2.2.2 Auftragseinheiten

Coating units

Die Auftragseinheit dient der gleichmäßigen Ausbringung des Lacksystems auf dem Trägersubstrat. Eine Auftragseinheit für die kontinuierliche Rolle-zu-Rolle-NIL hat folgende Kriterien zu erfüllen:

- Ausbildung sehr dünner, homogener Lackfilme (bis $h_0 \leq 1 \mu\text{m}$)
- Blasen- und schmutzfreier Auftrag (hohe Reinheitsanforderungen)
- Ausbringungsmenge skalierbar mit der Substratgeschwindigkeit
- Variabilität der Materialviskosität
- Variabilität des Substrats bzw. der Substratoberfläche
- Beschichtung lösungsmittelhaltiger Lacksysteme

Konzepte von Auftragssystemen aus konventionellen Druck-, Beschichtungs- und Kaschieranwendungen werden für die kontinuierliche NIL adaptiert und modifiziert. In der

Literatur finden sich Beispiele für Rakelsysteme [DUMO14, JOHN13], Walzenauftragsysteme [LIU14b, AHN09a, AHN08, MAEK07], Spritzen [HWAN09, MAUR11, LIM14, LIM12, LIM14] inkl. Inkjet-Systeme [DUMO12b, DUMO14, JAIN13, LIU14a, THES14] sowie Schlitzdüsen [SHAN11, ZHON11, PARK08]. Bild 2.17 zeigt eine Auswahl der Systemaufbauten für die vier Hauptgruppen.

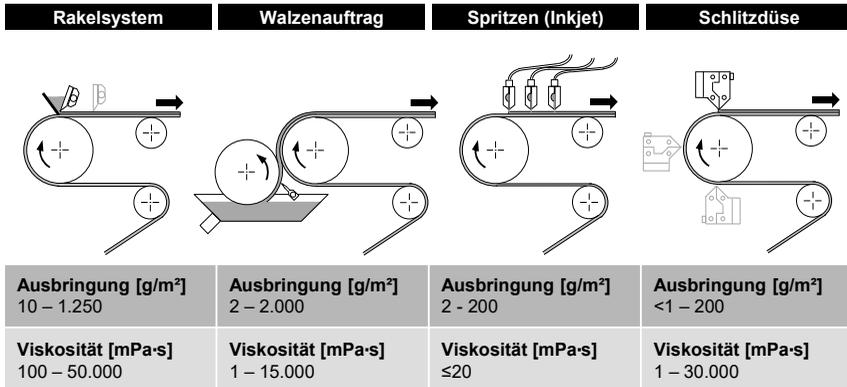


Bild 2.17: Auftragseinheiten [GIES10, COAT17a]

Coating units

Rakelsysteme existieren neben der Ausführung als Walzen- oder Lufrakel (s. Bild 2.17) auch als Gummituch-, Stütz-, Tisch-, Spiral- sowie Kastenrakel oder Kommabar [GIES10]. Das Rakel, im Englischen als „Doctor Blade“ oder „Knfie“ bezeichnet, hat die Form eines Messers (Streichmesser). Es erstreckt sich über die Gesamtbreite der Substratbahn. Die Spalthöhe zwischen Rakelspitze und Substrat bestimmt die Auftragshöhe. Überschüssiges Material wird abgestrichen und dem Materialreservoir zugeführt. Offene Systeme sind anfällig für eine Kontamination des Lacksystems bei mehrmaliger Nutzung.

Walzenauftragsysteme mit gravierter bzw. strukturierter Beschichtungswalze sind aus dem Tief-, Offset- und Flexodruck bekannt. In der Rolle-zu-Rolle-NIL werden sowohl Gravurwalzensysteme [MAEK07, LIU14b] als auch Ein- und Mehrwalzenantragswerke mit glatten Oberflächen [AHN09a, AHN08, AHN06] eingesetzt. Tiefe und Form der Gravur bestimmen die mögliche Ausbringungsmenge. Änderungen der Ausbringungsmenge sind in größerem Umfang nur durch Wechsel der Walze möglich. Der Auftrag wird allein über die Beschichtungswalze übertragen. Streichmesser dienen lediglich dem Abstreifen von überschüssigem Lack und dem Glattstreichen des aufgetragenen Mediums. Es werden die Systemaufbauten Reverse-Roll-Coater, Contra-Coater, Roll-Coater und Kiss-Coater unterschieden. [GIES10]

Spritzen und Düsenbeschichtung zählen zu den kontaktlosen Auftragssystemen. Die kontaktlosen Auftragsverfahren werden in den letzten Jahren häufiger verwendet, da sie deutliche Vorteile gegenüber den anderen Systemen haben. Der Systemaufbau ist

meist einfach, kompakt und kostengünstig. Die Prozessgeschwindigkeit und Anpassbarkeit an Prozessvarianzen sind gut. Der Materialverlust ist gering, das Auflösungsvermögen des Auftrags ist hoch und das Ausbringungssystem ist mit wenigen Parametern zu kontrollieren. [KHAN15]

Spritzen ist das Auftragen eines Lacksystems aus einer Spritzvorrichtung. Der Lack wird durch Druckluft aus einem Druckbehälter durch die Düsen eines Spritzkopfs auf einen Träger gesprüht. In der Literatur sind Tropfenauftrag [LIM12], Valve-Jet-Verfahren [MAUR11] sowie eine Sprühbeschichtung [HWAN09] publiziert. In Anlehnung an die historische Entwicklung von Jet-Dispensern mit einzelnen Düsen hin zu MEMS-basierten Druckköpfen mit nativen Auflösungen von bis zu 1.200 dpi [FUJI17b, XAAR17] kann das Inkjet-Verfahren (deutsch: Tintenstrahldruck) zur Spritztechnologie gezählt werden. Die Beschichtung mittels Inkjet wurde von DUMOND et al. [DUMO12b, DUMO14], JAIN und BONNECAZE [JAIN13], LIU et al. [LIU14a] sowie THESSEN et al. [THES14] für die kontinuierliche Nanoimprint-Lithografie untersucht. Als vorteilhaft gilt die selektive, zonale Ausbringung des Lacks, die Möglichkeit Gradienten aufzutragen und die Ressourceneffizienz der Druckköpfe. Nachteilig ist die eingeschränkte Toleranz gegenüber Viskositätsschwankungen. Bei Raumtemperatur lassen sich lediglich Lacksysteme mit Viskositäten ≤ 20 mPa·s ausbringen. [THES14]

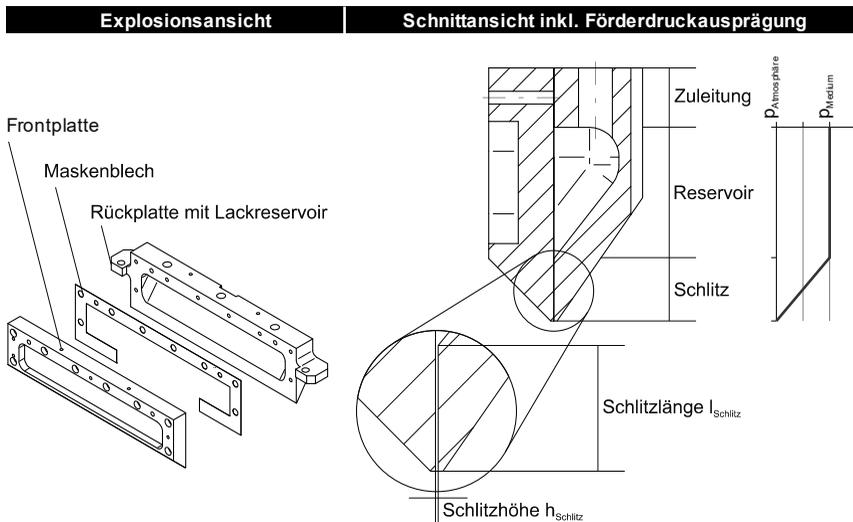


Bild 2.18: Systemischer Aufbau einer Schlitzdüse

Systemic composition of a slot die nozzle

Schlitzdüsen (engl.: Slot Die) werden in Forschung und Industrie für den Auftrag von Medien mit stark unterschiedlichen Eigenschaften genutzt. Schlitzdüsen sind geschlossene Beschichtungssysteme. Das Medium ist bis zum Auftreffen auf das Substrat vor Verschmutzung aus der Umgebung geschützt. Lösungsmittel können nicht aus dem geschlossenen System entweichen. Eine Düse besteht im einfachsten Fall

aus zwei Metallplatten, die miteinander verspannt werden. Zwischen die Platten werden polymere oder metallische Masken eingelegt. Die offene Breite der Maske bestimmt die Beschichtungsbreite.

Der erforderliche Mediendruck zur Materialausbringung p_{Medium} ist, wie in den Gleichungen (2.1) und (2.2) gezeigt, von Querschnitt und Ausdehnung des Schlitzes abhängig. Aus der Geometrie resultiert der Fließwiderstand R_{Schlitz} . Der kausale Zusammenhang sowie das Formelwerk sind Analogien aus der Hydrostatik [NEUG12].

$$p_{\text{Medium}} = R_{\text{Schlitz}} * Q_{\text{Lack}} \quad (2.1)$$

$$R_{\text{Schlitz}} = \frac{p_{\text{Medium}}}{Q_{\text{Lack}}} = \eta * \frac{12 * l_{\text{Schlitz}}}{b_{\text{Schlitz}} * h_{\text{Schlitz}}^3} \quad (2.2)$$

Das Design der Zufuhrille, die Länge des Auslaufschlitzes l_{Schlitz} und die Düsenlippe sind somit weitere Konstruktionsparameter, die sich auf das Beschichtungsverhalten auswirken. Breite und Stärke des Beschichtungsfilms lassen sich sehr genau einstellen. Schlitzdüsen eignen sich für niedrig- bis mittelviskose Beschichtungsmaterialien (1 – 30.000 mPa·s). Sofern das System vor Benutzung vollständig entgast wird, ist der Auftrag unabhängig vom Trägersubstrat gleichmäßig, geschlossen und blasenfrei. Der Abstand der Düse zum Substrat gibt an, ob von kontaktbehaftetem Beschichten (Bead-Coating) oder kontaktlosem Curtain-Coating gesprochen wird. Beim Curtain-Coating ist die Düse mehrere Millimeter über dem Substrat positioniert. Das austretende Medium fällt wie ein Vorhang (engl.: Curtain) auf die bewegte Materialbahn. Im Gegensatz dazu befindet sich die Düse beim Bead-Coating unmittelbar über dem Substrat (Abstand ≤ 1 mm). Kapillarkräfte im verbleibenden Spalt bewirken die zur Ausformung Meniskus am Schichtenanfang. Das Bead-Coating eignet sich besonders zur Ausbringung dünner Beschichtungen ($\sim 1 \mu\text{m}$) bei niedrigen Bahngeschwindigkeiten (≤ 100 m/min). [EGGE12] Unter Berücksichtigung von Viskosität und Auftragsgewicht sind Einstellpositionen von sechs bis zwölf Uhr möglich (vgl. Bild 2.17). Zur Düse gehört ein Zuführsystem aus Filtern, Materialspeicher und Pumpe. Für einen gleichmäßigen Auftrag sind pulsationsarme bzw. pulsationsfreie Fördersysteme zu wählen. Je nach Charakteristik des Lacksystems sind Membranpumpen, Schlauchpumpen, Mikrozahnpumpen oder Druckbehälter geeignet. [COAT17a, GIES10]

Die Ausbildung einer Restschichtlage und eine unvollständige Füllung der Strukturen sind Nachteile der Beschichtung des Substrats. Alternativ kann der Prägezylinder direkt beschichtet und überflüssiger Lack mittels Rakel abgezogen werden. Nur die gefüllten Strukturen des Werkzeugs werden auf das Substrat übertragen. Dieser Prozess wird als „Reverse Imprint“ (deutsch: Rückwärts-Prägen) bezeichnet. [HUAN09, YU15]

2.2.3 Replikationswerkzeuge

Replication tools

Die strukturierten Prägezylinder tragen die Mikro- und Nanostrukturen als Negativabbild. Die Oberflächengüte und Strukturauflösung des Werkzeugs übertragen sich in

das UV-Lacksystem und bestimmen so die Qualität der Prägung. Das Oberflächenmaterial des Zylinders beeinflusst das Fließ- und Benetzungsverhalten des Lacks und somit den Füll- und Entformungsprozess [AMIR11].

Die Replikationswerkzeuge können nach Beschaffenheit des Oberflächenwerkstoffs in die Kategorien „Hard-Molds“ und „Soft-Molds“ (deutsch: harte und weiche Formen) unterschieden werden. Eine weitere Unterscheidungsmöglichkeit bietet die Art der Strukturierung. Es werden die Kategorien „Seamless“ (deutsch: nahtlos) und „Wrap-Around“ (deutsch: umwickelt) unterschieden. In der Literatur sind alle kombinatorischen Ausprägungen dokumentiert (vgl. Bild 2.19). Mit nahtlosen Prägezyindern können Strukturen endlos repliziert werden. Mit umwickelten Zylindern ist die Struktur an das Format gebunden, das durch den Umfang des Zylinders vorgegeben ist.

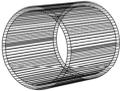
Variationsmöglichkeiten zur Ausführung von Prägezyindern		
Hard-Molds		Soft-Molds
<ul style="list-style-type: none"> - Kupfer (Cu) - Aluminium (Al) - Nickel (Ni) - Quarzglas (SiO₂) 	<p>Seamless</p> <ul style="list-style-type: none"> - Diamantzerspanung - Elektronenstrahl - Fotolithografie - Laser-Prozesse, etc. 	<ul style="list-style-type: none"> - Polydimethylsiloxan (PDMS) - Polyurethan-Acrylat (PUA)
	<p>Wrap-Around</p> <ul style="list-style-type: none"> - Abguss-Verfahren - Galvanische Prozesse - Lithografie - Laser-Prozesse, etc. 	<ul style="list-style-type: none"> - Ethylen-Tetrafluorethylen-C. (ETFE) - Perfluorpolyether (PFPE)

Bild 2.19: Kategorisierung der Replikationswerkzeuge nach Werkstoff und Nahtvorkommen

Categorization of replication tools by material and existence of a seam

Für harte Prägezyylinder werden Kupfer (Cu) [HSU11], Nickel (Ni) [GONZ12, WU10a, TING08], Aluminium (Al) [CHUA17] oder Quarzgläser (SiO₂) [LEE08, MATT06] verwendet. Weiche Stempel bestehen aus Polydimethylsiloxan (PDMS) [TSAI16, PARK12], Polyurethan-Acrylat (PUA) [DUMO14, LEE12, KWAK17], Ethylen-Tetrafluorethylen-Copolymer (ETFE) [AHN09b, AHN08] oder Perfluorpolyether (PFPE) [JOHN13]. Die Auswahl des Werkstoffs wird bestimmt durch die Anwendbarkeit geeigneter Mikro- und Nanostrukturierungsprozesse, die Materialhärte, die Oberflächenbeschaffenheit und die Standzeit. Die Polymere haben eine niedrigere Oberflächenenergie als die metallischen Werkstoffe [KOOY14]. Die Oberflächenenergie von PDMS liegt bspw. bei 15–25 mJ/m² während der Wert für elementares Kupfer mit 1.960–2.310 mJ/m² angegeben wird [SKRI92]. Tatsächlich bilden die Kupferoberflächen eine Oxidschicht aus, deren Oberflächenenergie gravierend geringer ist (CuOx-Schicht gemessen am Fraunhofer IPT: 30,73 mJ/m²). Soft-Molds neigen bei höheren Andruckkräften zu Strukturdeformationen, die als „Sagging“ und „Pairing“ bezeichnet werden [XIA98]. Eine präzise Einstellung und Regulierung des Anpressdrucks ist erforderlich. Die Elastizität des polymeren Materials ist jedoch vorteilhaft bei der Entfor-

mung. Vor allem bei Strukturen mit großem Aspektverhältnis kann es zu Beschädigungen (z. B. Verkratzen, Strukturbruch) bei der Entformung aus Hard-Molds kommen. Nachteil der polymeren Werkstoffe ist die geringe chemische Beständigkeit gegenüber Lösungsmitteln und Nebenprodukten der Polymerisationsreaktion (freie Radikale, Photosäuren). Die intensive UV-Strahlung beschleunigt die Alterung des Materials, was sich nachteilig auf die Standzeit auswirkt. Soft-Molds werden häufig über ein Gussverfahren aus einer harten Dauerform gewonnen [TSAI16]. Die Herstellung einer Soft-Mold ist in diesem Fall kostengünstig. Die strukturierte Form für die Gussabformung kann entweder flach (Wrap-Around) oder zylindrisch (Wrap-Around oder Seamless) ausgeführt sein.

Zur Herstellung eines endlos strukturierten Prägwerkzeugs werden Direktstrukturierungsverfahren, lithografische Verfahren oder selbstorientierende Verfahren eingesetzt. Charakteristische Eigenschaften wie bspw. Materialeignung, Strukturauflösung oder Prozessgeschwindigkeit erfordern eine anwendungsspezifische Verfahrensauswahl. Die ultrapräzise Diamantbearbeitung ist ein weit verbreitetes Direktstrukturierungsverfahren. Die Bearbeitung erzielt auf großen Flächen hohe Genauigkeiten im Mikrometerbereich. Sie ist daher besonders für großflächige Mikrostrukturen wie bspw. Mikrooptiken geeignet. Die Neigung der Diamantschneide zur Graphitisierung schließt eisenhaltige Werkstoffe von der Bearbeitung aus. Üblicherweise werden Kupfer-, Aluminium-, Nickel- oder Messingoberflächen strukturiert. Kontaktlose Direktstrukturierungsverfahren sind das Laser-Direct-Writing, UKP-Laserbearbeitung (Ultrakurzpulslaser) oder Laserinterferenz-Lithografie. Soft-Lithografie, Elektronenstrahlschreiben oder eine an die zylindrische Form des Werkstücks angepasste Fotolithografie (engl.: Step-And-Rotate-Lithography) sind indirekte Strukturierungsverfahren. Für den lithografischen Prozess werden die Zylinderoberflächen mit Lacken beschichtet, die mittels UV-, Elektronen- oder Laserstrahlung strukturiert werden. Der Lithografie kann ein Ätz-, ein Beschichtungs- oder ein elektrischer Polierprozess angeschlossen sein. [YI15a] CHUANG et al. zeigen einen Strukturierungsansatz durch Anodisierung eines Aluminiumzylinders [CHUA17]. Der Vorgang ist selbstorientierend bzw. selbstorganisiert (engl.: Self-Assembled). Die Strukturdimensionen und ihre Anordnung werden lediglich beeinflusst durch die Zusammensetzung des Ätzbades, die angelegte Spannung und die Bestromungsdauer [ZHAN15a, SON13].

Ist eine endlose Strukturierung der Prägwalze aus technischen oder ökonomischen Gründen nicht möglich, kann der Walzenkörper mit einem strukturierten Bogen umwickelt werden. Die Strukturierung des biegsamen Materials erfolgt in der Ebene. Der sog. „Shim“ (deutsch: dünne Platte) wird auf den Walzenkörper geklebt, geschraubt, geklemmt oder magnetisch befestigt. Der Shim kann durch Verkleben oder Verschweißen zu einer tubularen Manschette bzw. Buchse gefügt und auf den Walzenkörper aufgezogen werden. Eine solche Hülse aus dünnwandigem Material wird als „Sleeve“ bezeichnet (deutsch: Hülse). Zur Strukturierung der Bögen steht eine große Auswahl direkter und lithografischer Mikro- und Nanostrukturierungsverfahren zur Verfügung. Die Ultrapräzisionszerspannung mit Diamanten wird ebenso angewendet wie Mikro-

EDM (Electro Discharge Machining), Laserablation und die Bearbeitung mit Femtosekunden-Lasern. Ebenso finden sich Anwendungen für UV-Lithografie, Laser-Lithografie, Elektronen- und Röntgenstrahl-Lithografie. [Y115a]

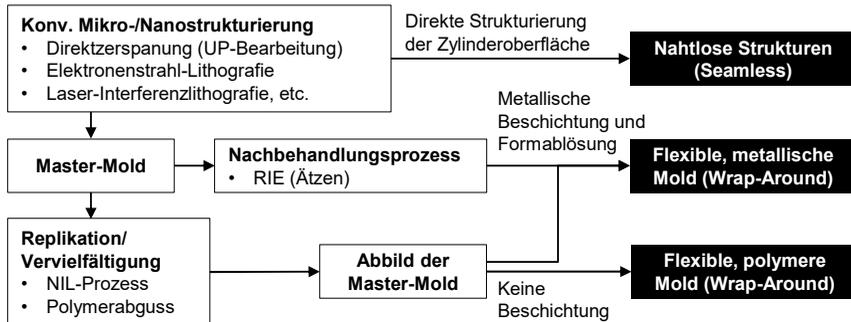


Bild 2.20: Methoden zur Herstellung eines strukturierten Prägezyinders [KOOY14]

Methods to fabricate a structured mold

Die Anordnung und Verteilung der Mikro- und Nanostrukturen auf dem Prägezyinder beeinflussen nachweislich den Verschleiß und die Standzeit des Werkzeugs. Die Struktur selbst ist somit von maßgeblicher Relevanz für die Qualität und die Stabilität des Replikationsprozesses. NEES et al. konnten folgende Zusammenhänge als Konstruktionsregeln für den Entwurf einer Strukturierung belegen:

- Je größer das Aspektverhältnis, desto schlechter die Prozessstabilität und die Replikationsqualität bei Langzeitversuchen.
- Linienartige Strukturen parallel zur Förderrichtung weisen eine höhere Replikationsgüte auf als querorientierte Strukturen.
- Gitter, die um 45° zur Förderrichtung gedreht sind, lassen sich stabiler replizieren als solche deren Linien längs und quer zur Laufrichtung angeordnet sind.
- Je dichter einzelne Muster angeordnet sind, desto stabiler erfolgt deren Abformung. Isolierte Einzelstrukturen sind tendenziell fehleranfälliger.
- Benachbarte Strukturen haben einen gegenseitigen Einfluss auf das Abformverhalten (engl.: Proximity-Effect). Querlinien erodieren beispielsweise schneller wenn sie an ein Feld mit Längslinien grenzen, als wenn sie neben einer Gitterstruktur angelegt sind.
- Die Kanten eines Musters, die zuerst in den Lack eintauchen und entformt werden, weisen die höchste Abnutzung auf (engl.: Entry-Exit-Effect). Defekte wie Lackanhaftung oder Ausbrüche aus dem Werkzeug ergeben sich ebenfalls am häufigsten dort. [NEES15]

Neben der Strukturierung stellt eine geeignete Beschichtung des Werkzeugs zur Vermeidung von Anhaftung des Lacks am Werkzeug im flüssigen oder ausgehärteten Zustand eine Herausforderung bei der Herstellung dar. Es werden Antihafbeschichtungen aufgetragen. Ein Haften des Lackes wird durch eine große Differenz der Oberflä-

chenenergien von Lack und zu benetzter Oberfläche begünstigt. Die Oberflächenenergie des Lacks muss dabei niedriger als die der Kontaktfläche sein, um eine gute Haftung zu erzielen. Die Antihafbeschichtungen verfügen über eine niedrige Oberflächenenergie. Dies resultiert in einer schlechten Benetzbarkeit der Werkzeuge und einer geringen Haftneigung des Lacks. In Bild 2.21 sind die Antihafbeschichtungen nach Stoffgruppen in vier Klassen unterteilt (vgl. [KIRC12]).



Bild 2.21: Antihafbeschichtungen

Anti-adhesion coatings

Die Stoffgruppe der Silane bezeichnet chemische Verbindungen, die aus einem Silizium-Grundgerüst (Si) und Wasserstoffatomen (H) bestehen. Silane sind als Haftvermittler bekannt. Sie können sowohl zum Aufbau nachfolgend aufgebracht Beschichtungen als auch zur Realisierung von Antihafbeschichtungen verwendet werden. Perfluorierte Silane sind durch ihre geringe Oberflächenenergie besonders zur Vorbeugung und Vermeidung von Anhaftungen geeignet. Die chemische Absorption der Silane begünstigt eine gute Haftung auf dem Werkzeugwerkstoff, wodurch besonders stabile und robuste Schichten ausgebildet werden. Ein adäquater Beschichtungsprozess erzeugt Quasi-Monolagen. So ist eine detailgetreue Beschichtung ohne Strukturdeformationen selbst bei großen Aspektverhältnissen möglich. [OKAD14]

Polymere oder metallische Haftminderer lassen sich in Schichtstärken von mehreren Mikrometern auf den Grundwerkstoff aufbringen. PDMS, PTFE und ETFE bzw. Al, Cr oder Ni werden eingesetzt. Chrom- oder Nickelschichten werden beispielsweise in 2 - 5 μm Stärke galvanisch abgeschieden. Die vergleichsweise hohe Schichtstärke führt zu Kantenverrundung und einem Verlust von Konturtreue.

Zur letzten Klasse der Antihafbeschichtungen zählen vor allem die sog. „Diamond-Like-Carbon“-Beschichtungen. Dies sind amorphe Kohlenstoffschichten, die ebenfalls als fluorierte Verbindungen aufgetragen werden können. Ihre Klassifikation erfolgt nach VDI 2840 [VDI12]. Im Gegensatz zu den weit verbreiteten Fluorosilan-Beschichtungen werden sie während des UV-Härtungsprozesses nicht durch Bestandteile der Methacrylate- oder Vinylesther-Lacke angegriffen [DUMO12a]. Ihre niedrige Reaktivität bzw. geringe Degradation und ihre niedrige Oberflächenenergie zeichnen sie als alternative Beschichtung aus. [HOUL07, NAKA06]

In Ergänzung zur beschriebenen Oberflächenmodifikation der Prägezyylinder sind die Substratoberflächen ebenfalls modifizierbar. Mechanisch kann die Oberfläche zur Optimierung der Lackanhaftung aufgeraut oder chemisch vorbehandelt werden. Physikalische Methoden, wie Beflammung oder Korona- bzw. Plasmabehandlung, sind gleich-

ermaßen Industriestandards. Eine weitere Alternative zu den herkömmlichen physikalischen Verfahren ist die Oberflächenaktivierung mit UV-Licht/Ozon. [ROTH11, SOFT02, MELA12]

2.2.4 UV-Strahlquellen

UV light sources

Ultraviolett-Strahlung (kurz: UV-Strahlung) sind elektromagnetische Wellen im Spektralbereich von 100 – 380 nm. UV-Strahlung wird unterschieden in UV-C- (100 – 280 nm), UV-B- (280 – 315 nm) und UV-A-Spektrum (315 – 380 nm) (vgl. Bild 2.22). UV-Strahlung liegt außerhalb des Bereichs sichtbaren Lichts. [DIN84] LED-UV-Strahlquellen erzeugen überdies Strahlung der Wellenlänge 405 nm. Diese ist für das menschliche Auge bereits als bläuliches Licht wahrnehmbar. Hier wird gleichermaßen der Begriff „UV-Strahlung“ verwendet.

Lacksysteme und UV-Strahler werden aufeinander abgestimmt, um eine schnelle Aushärtung bei minimalem Energieverbrauch zu erreichen. Jeder Photoinitiator reagiert nur auf einen spezifischen Teil des UV-Spektrums. UV-Strahler emittieren Wellenlängen des UV-Spektrums in unterschiedlichen Intensitäten (vgl. Bild 2.22). Aus diesem Grund ist ein Abgleich der Charakteristika ebenfalls technisch notwendig. Wichtige Faktoren bei der Auswahl eines geeigneten UV-Strahlers sind die Energiedichte (mJ/cm^2), Bestrahlungsstärke (W/cm^2), die Verteilung der Strahlungsleistung, der Wellenlängenbereich und die Spektralverteilung. [SCHW07]

Drei Klassen von UV-Strahlungsquellen existieren: Excimerlampen, UV-LED-Lampen und konv. UV-Gasentladungslampen.

Excimerlampen besitzen die geringste Verbreitung. Die Strahlquelle ist ein doppelwandiger Quarzglaszylinder, der mit Xenon-Gas (Xe) befüllt ist. Hochfrequente Hochspannung zwischen Elektroden auf der äußeren und inneren Wand des Zylinders erzeugt Mikroentladungen im Gas, die zur Photonenemission führen. Je nach Gasfüllung ergeben sich folgende monochromatische Strahlungen:

- Xe_2 : 172 nm, verwendet zur UV-Mattierung
- KrCl : 222 nm, verwendet zur UV-Härtung
- XeCl : 308 nm, verwendet zur UV-Härtung

Atmosphärischer Sauerstoff ist besonders affin für die Absorption von Photonen im Vakuum-UV-Bereich (100 – 200 nm, UV-C). Die Bestrahlung eines Auftrags muss daher in Inertgas-Atmosphäre z. B. unter Stickstoff-Atmosphäre (N_2) erfolgen. [SCHW07, IOT17]

UV-LEDs bieten bei Härtungsanwendungen die typischen Vorteile der LED-Technologie (vgl. Tabelle 2.3). Die Strahlquellen haben eine hohe Lebensdauer (≥ 20.000 h) und sind wartungsfrei. Sie enthalten keine Schwermetalle wie Quecksilber und erzeugen im Betrieb kein Ozon. Energieverbrauch und Wärmeentwicklung sind signifikant geringer als bei konventionellen UV-Lampen. Die Strahlleistung ist ohne Aufheiz- oder Abkühlphase abrufbar und stufenlos zu regeln. Zur Herstellung der UV-

LEDs werden beispielsweise Materialsysteme aus Aluminiumnitrid (AlN), Aluminiumgalliumnitrid (AlGaN), Aluminiumindiumgalliumnitrid (AlInGaN), Diamant (C) oder hexagonalem Bornitrid (BN) verwendet. Das Spektrum einer UV-LED kann als monochromatisch (± 10 nm) bezeichnet werden [PHOS17b]. Es beschränkt sich auf die Hauptwellenlängen 365, 385, 395 oder 405 nm. UV-Strahler nutzen üblicherweise LEDs eines Typs, worauf der Photoinitiator abgestimmt werden muss. UV-LED-Strahler mit verschiedenen Wellenlängen sind am Markt verfügbar, besitzen jedoch eine verminderte, wellenlängenspezifische Energiedichte. [SCHW07, PHOS17a, GEW17a, NORD17, IST17b]

Tabelle 2.3: Vor- und Nachteile von UV-LEDs und konventioneller UV-Lampentechnologie [NORD17, IST17b, PHOS17b]

Advantages and drawbacks of UV-LEDs and conventional UV-lamp technology

	UV-LED	UV-Lampe
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> • Taktbarkeit • Zonenschaltung • Kein Ozon • Lange Lebensdauer (≥ 20.000 h) • Kompakte Bauweise • Geringe Wärmeentwicklung ($\sim 60^\circ\text{C}$) • Kein Quecksilber • Hohe Energieeffizienz (bis zu 80%) • Keine Abluftinstallation • Kaskadierbar • Nach Einschalten sofort einsatzbereit • Dimmbar von 0 – 100% • Wartungsfrei 	<ul style="list-style-type: none"> • Etablierte Technologie • Breitbandiges Lampenspektrum • Breite Verfügbarkeit von Lacken • Geringe Anschaffungskosten • Desinfektion/Reinigung durch Ozon • Unkomplizierter Wechsel des Spektrums • Hohe Bestrahlungsintensitäten • Spektralverteilung durch Dotierung einstellbar
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> • Schmalbandiges Lampenspektrum • Begrenzte Spektrenauswahl • Geringere Strahlungsintensitäten 	<ul style="list-style-type: none"> • Begrenzte Lebensdauer (≤ 2.000 h) • Ozon-Bildung • Latenzzeit beim Ein- und Ausschalten • Wärmeentwicklung (ca. 350°C) • Geringere Energieeffizienz • Glimmen im Stand-By • Lampenreinigung erforderlich

Konventionelle UV-Strahler sind Gasentladungslampen auf Quecksilberbasis. Die Gasentladung wird als Lichtbogen zwischen zwei Elektroden gezündet oder durch Mikrowellen angeregt. Das emittierte Spektrum ist breitbandig und nur etwa 35 % der Strahlung liegen im UV-Spektrum. Dennoch sind höhere Energiedichten zu erzielen als mit der LED-Technologie. Die Leistungsaufnahme der Lampen kann je nach Typ (Niederdruck-, Mitteldruck- oder Hochdrucklampe) bei ≥ 360 W/cm liegen. Quecksilberdampflampen weisen besonders im UV-C-Bereich eine hohe Emission auf. Ein Spektrum mit dominierender Strahlung im längerwelligen Spektralbereich kann durch eine Metallhalogen-Lampe mit Gallium-Indium-Dotierung erzielt werden. Metallhalogenlampen mit Eisen-Dotierung sind im UV-A und UV-B Bereich leistungsstärker. Eine Blei-Dotierung bewirkt eine hohe UV-A Emission. [IST17a]

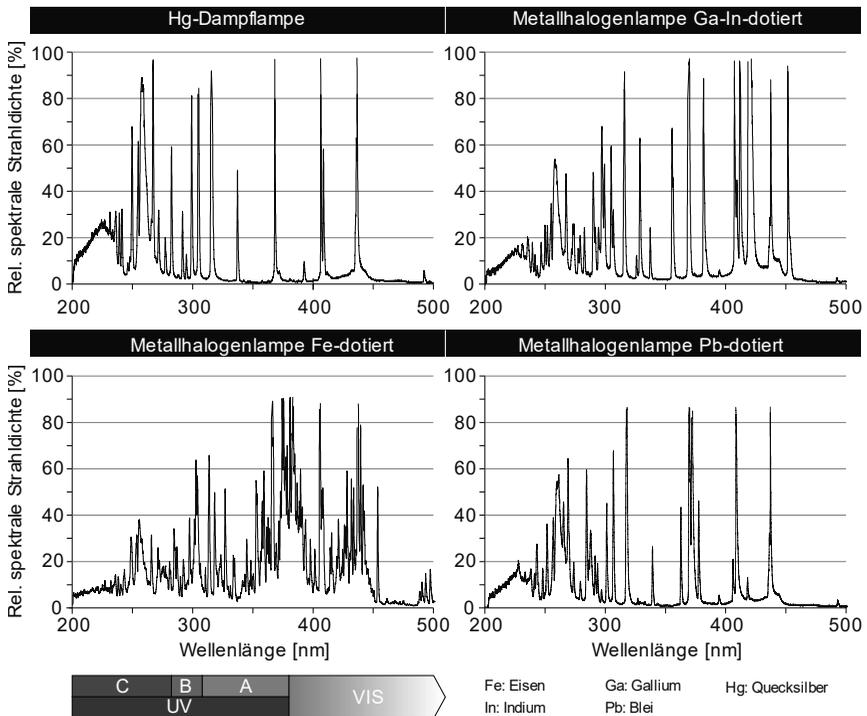


Bild 2.22: Spektrale Strahlendichte in Abhängigkeit von der Dotierung [IST17a]

Spectral radiation density depending on lamp doping

Die Quarzzyylinder sind anfällig für Verschmutzungen und müssen regelmäßig gereinigt werden. Konventionelle Strahler haben eine deutlich geringere Lebensdauer als LED-Quellen (≤ 2.000 h). Die Betriebsbereitschaft setzt eine Aufwärmphase voraus. Die Lampe ist somit nicht direkt einsatzbereit und muss nach dem Betrieb kontrolliert abgekühlt werden. Im betriebsbereiten Zustand glimmt der Lichtbogen bei reduzierter Leistungsaufnahme. Die Intensität einer UV-Gasentladungslampe ist daher im unteren Leistungsbereich nicht frei regelbar. Die minimale Leistungsaufnahme der Lampe liegt bei ca. 20 – 30 %. Mit Hilfe einer Blende (engl.: Shutter) wird die entstehende Strahlung im Lampengehäuse gehalten. In der Produktion wird die Blende geöffnet. Die Krümmung eines rückwärtigen Reflektors bestimmt die Fokussierung der UV-Strahlung (vgl. Bild 2.23). Durch spezielle Beschichtungen des Reflektors, wie beispielsweise einer dichroitischen (griech.: zweifarbig) Beschichtung (vgl. Farbfilter), können Spektralbereiche selektiv reflektiert werden. Strahlung aus dem Infrarot-Bereich wird direkt vom Shutter bzw. von dem Reflektor absorbiert. [VICT15, KIPP00] Die Erwärmung des bestrahlten Produkts wird so reduziert. Blende und Lampengehäuse sind je nach Lampenleistung luft- oder wassergekühlt. [SCHW07]

Kombinationen aus UV-LED- und Gasentladungstechnologie sind als hybride Systeme verfügbar. Periphere Systemkomponenten wie Leistungselektronik, Steuergerät, Lüftung, Lampengehäuse und Kühlung sind dann universell nutzbar. Die Strahlquelle ist in einer Wechselkassette gekapselt. [GEW17b]

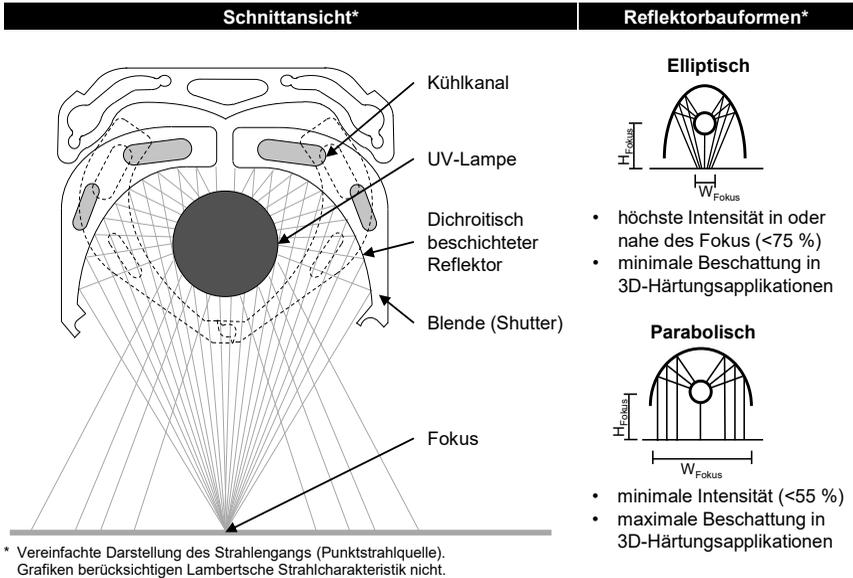


Bild 2.23: Systemischer Aufbau eines konventionellen UV-Strahlers [JING17] und Fokussierungscharakteristik der unterschiedlicher Reflektorformen [KIPP00, SCHW07]

Systemic setup of a conventional UV-source and focusing characteristics of different reflector shapes

Eine Alternative zur UV-Bestrahlung ist die Elektronenstrahlhärtung (ESH). Elektronenstrahlung ist eine ionisierende Strahlung. Sie ist so energiereich, dass die Moleküle im Lacksystem alleine durch den Elektronenbeschuss Radikale ausbilden. Auf teure Photoinitiatoren kann dadurch teilweise oder sogar vollständig verzichtet werden. Allerdings muss die Bestrahlung unter Inertgas-Atmosphäre erfolgen. Zudem entsteht beim Auftreffen der Elektronen auf umliegende Metallkörper Röntgenstrahlung, die aufwändig abzuschirmen ist. [KIPP00]

2.2.5 Anlagenkonzepte

Machine concepts

Eine Rolle-zu-Rolle-Anlage für die UV-Nanoimprint-Lithografie besitzt fünf Funktionsbaugruppen. Wie in Bild 2.2 (Abschnitt 2.1.2) schematisch dargestellt, sind die Hauptfunktionen: Abwicklung, Beschichtung, Strukturierung, UV-Härtung und Aufwicklung. Möglichkeiten zur technischen Umsetzung von Beschichtung, Strukturierung und UV-Härtung wurden in den vorhergehenden Abschnitten dargestellt. Zur Umsetzung der Funktionen Ab- und Aufwickeln werden etablierte Systeme aus der Druckindustrie verwendet. Während der Substratförderung werden Bahnspannung und Bahnlauf präzise kontrolliert. Somit lassen sich Deformationen oder Welligkeiten durch Spannungsfehlverteilung oder Überdehnung des Substrats sowie eine Fehlpositionierung des Substrats bei der Beschichtung oder der Prägung verhindern. Die Grundfunktionen können durch vor- und nachgelagerte Zusatzprozesse erweitert werden. So wird vor der Beschichtung häufig eine Reinigung oder Oberflächenaktivierung des Polymersubstrats vorgenommen (vgl. Abschnitt 2.2.3). AHN et al. integrieren nachgelagert eine Vakuumkammer zu Abscheidung einer metallischen Lage auf den replizierten Strukturen [AHN08].

Die Anzahl an konstruktiven Variationen ist groß. KANG, AHN et al. [KANG04, AHN06] beschreiben ein einfaches Anlagenkonzept, das sich sowohl für Folien als auch für Plattenmaterial eignet. Die beschichtete Bahn wird tangential am Prägezyylinder vorbeigeführt. Kurz nach der Kontaktlinie von Lackauftrag und Prägezyylinder wird das Substrat bestrahlt. Die Bestrahlung erfolgt durch das Substrat hindurch. Wie in Bild 2.24 gezeigt, ist der Prägespalt über die Positionierung der Gegendruckwalzen oder eines Gegenhalters geregelt.

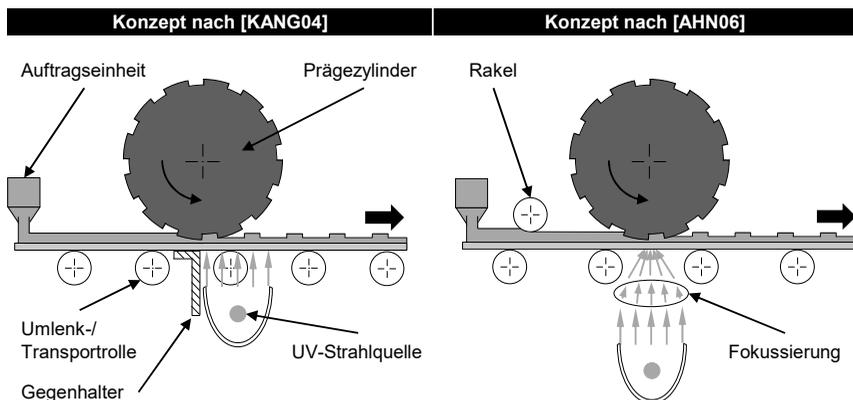


Bild 2.24: Einfaches Anlagenkonzept für die Bearbeitung von Folien und Platten [KANG04, AHN06]

Basic machine concept for processing films and plates

KANG, AHN et al. und SHAN et al. [SHAN11, AHN06, KANG04] stellen ebenfalls Anlagenkonzepte vor, bei denen die Folie ein Segment des Prägezyinders umschließt. Durch eine positionsgeregelte Andruckwalze wird die beschichtete Folie gegen den Prägezyinder gepresst. Die UV-Bestrahlung erfolgt während der Umschlingung. Die Entformung der ausgehärteten Strukturen wird durch die Umlenkung des Substrats über eine Ablösewalze (engl.: Release-Roller) unterstützt. Der Lack ist während der Bestrahlung zwischen Prägezyinder und Substrat eingeschlossen und somit von der umgebenden Atmosphäre abgeschirmt. Eine Sauerstoffinhibierung bei radikalischer Polymerisation (vgl. Abschnitt 2.2.1) findet selbst bei sauerstoffreicher Umgebung nicht statt. Auf eine künstliche Inertgas-Atmosphäre kann verzichtet werden. Der flächige Kontakt durch die Umschlingung steigert die mögliche Füll- und Aushärtungsdauer ($t_{\text{füll}}$, $t_{\text{härt}}$, vgl. Abschnitt 4.3). Es ist möglich, komplexere Reliefs zu füllen oder die Produktionsgeschwindigkeit zu erhöhen.

Im Reverse-Coating-Prozess (Bild 2.25, links) wird der strukturierte Prägezyinder mit der Lackschicht überzogen. Anschließend wird die Substratbahn hinzugefügt. Vorteile bestehen für die Füllung und Entgasung der Mikro- und Nanostrukturen. Der niederviskose Lack fließt in die Kavitäten des Prägezyinders und verdrängt die Umgebungsluft. Wie dargestellt, können Luftpfeinschlüsse durch den unbedeckten Lackfilm entweichen, bevor das Trägersubstrat den Film abdeckt.

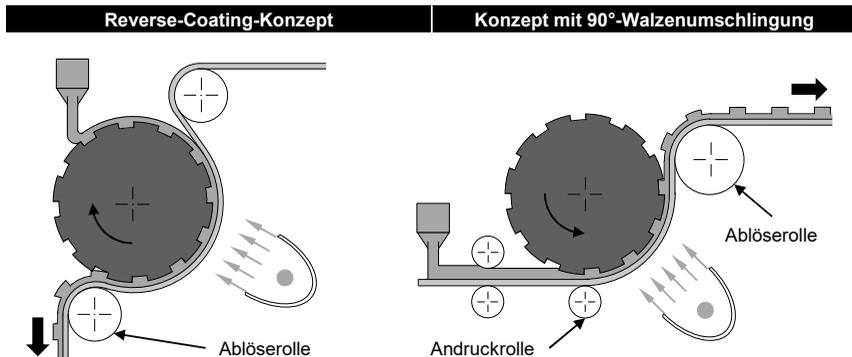


Bild 2.25: Anlagenkonzepte mit teilweiser Umschlingung des Prägezyinders [KANG04, AHN06]

Machine concepts with partial enlacement of the replication drum

Zur Erweiterung der Kontaktfläche stellen Wu et al. einen alternativen Ansatz zum Andruck von Soft-Molds vor (vgl. Bild 2.26, links) [WU10b]. Bei dieser Lösung ist die strukturierte Soft-Mold zu einem Sleeve gefügt und sitzt lose auf einer Welle. Die Welle ist senkrecht zum Substrat verfahrbar. Sie ist mit einem dehnbaren Schlauch umgeben. Der Schlauch wird mit Druckluft oder einem anderen komprimierten Gas befüllt, bläst sich auf und drückt den Sleeve von innen gegen das beschichtete Substrat. Das isobare Gas erzeugt eine isotrope Druckverteilung über die gesamte Kontaktfläche.

Opake Substrate lassen die bisher gezeigte, rückseitige Bestrahlung nicht zu. Prägezyylinder aus hochtransparentem Quarzglas ermöglichen eine UV-Bestrahlung durch den Prägezyylinder hindurch [CARP17c, LIM14]. Bild 2.26 (rechts) zeigt einen solchen Aufbau.

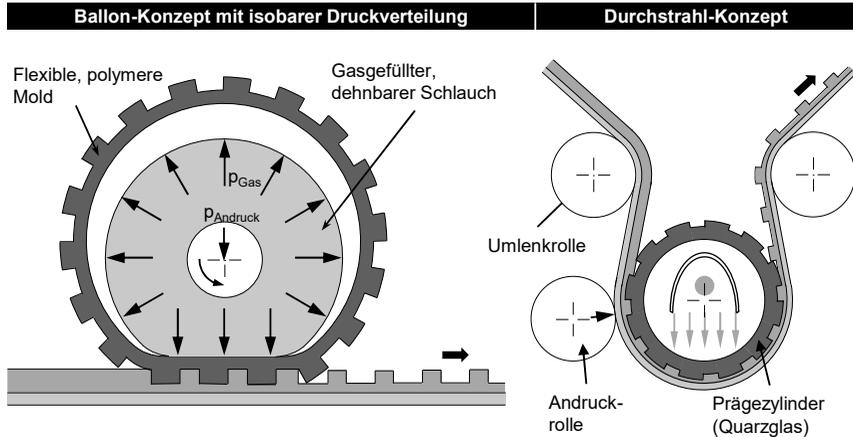


Bild 2.26: Andruckmechanik mit aufblasbarem Druckschlauch (links) [WU10b] und transparenter Prägezyylinder [CARP17c]

Contact pressure mechanism with inflatable pressurized tube (left) and transparent replication drum

AHN et al. präsentieren ein weiteres Anlagenkonzept bei dem konstruktiv die Kontaktfläche vergrößert und somit die Füllzeit gesteigert wird [AHN09a].

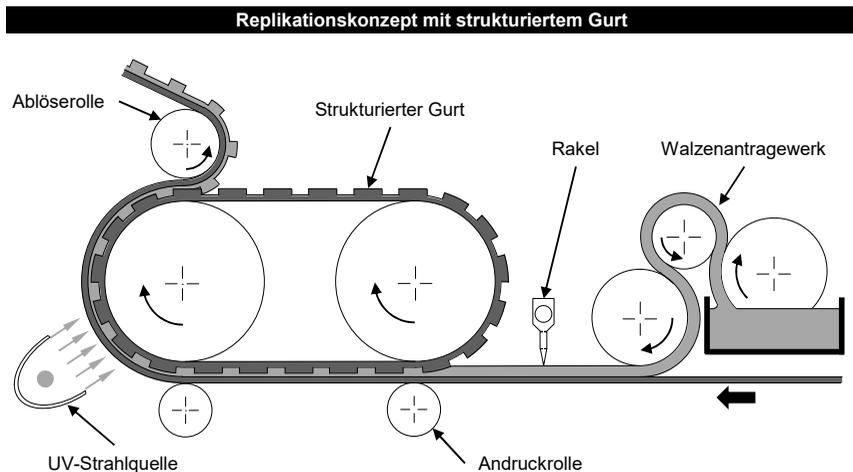


Bild 2.27: Maschinenkonzept mit strukturiertem Gurt [AHN09a]

Machine concept with structured belt

Anstatt eines Prägezyinders wird ein Gurt aus ETFE zwischen Umlenkwalzen gespannt (s. Bild 2.27). Der vorgespannte Gurt wird gegen das beschichtete Substrat gepresst. Zusätzlich wird das Material über zwei Andruckwalzen von der Gegenseite angedrückt. Durch die Position der Ablösewalze kann der Winkel zwischen Gurt und Substrat so eingestellt werden, dass sich eine annähernd orthogonale Entformungsrichtung wie beim Platte-zu-Platte-Verfahren ergibt.

Im Forschungsumfeld werden oftmals einfache Anlagenkonzepte verwendet, die von der Forschungseinrichtung selbst konstruiert wurden. Aus einer Patentrecherche zu dieser Arbeit ist bekannt, dass Unternehmen wie Hon Hai Precision Industry Co. Ltd. (Foxconn) oder Samsung Displays Ltd. sich Strukturen und die Methoden zur Herstellung dieser in Patenten sichern. Mit den Methoden werden Anlagenkonzepte beschrieben, die durch interne Abteilungen entwickelt werden [HSU14b, HSU14a, HSU14a, HSU11, HSU12, KIM16, KIM16]. Es gibt wenige Unternehmen, die kommerziell verfügbare R2R-NIL-Standardanlagen anbieten. In Tabelle 2.4 finden sich einige Beispiele.

Coatema Coating Machinery GmbH ist ein Anlagenbauer aus der Textil- und Beschichtungsindustrie. Das Anlagenportfolio erstreckt sich von Tischgeräten (LabCoater) bis hin zu industriellen Großanlagen. Die Abbildung in Tabelle 2.4 zeigt das modulare Anlagenkonzept Click-&-Coat. Pilot- und kleinere Industrieanlagen können aus einem Modulbaukasten von 20 Einheiten zusammengestellt werden. Die Expertise des Unternehmens liegt in der Entwicklung präziser Auftragsysteme. Das Fraunhofer IPT verfügt über eine Maschine dieser Bauart. Die Ausbringung des Lacks erfolgt mittels Schlitzdüse. Die Installation anderer Auftrageinheiten ist konstruktiv vorgesehen. Zur Aushärtung wird ein breitbandiger UV-Strahler mit Quecksilber-Dampflampe eingesetzt. [COAT17b]

Temicoat ist eine Marke der Temicon GmbH und der Coatema Coating Machinery GmbH. Temicon ist Anbieter mikro- und nanostrukturierter Oberflächen für Replikationswerkzeuge. Unter dem Markennamen wird ein kompaktes, standardisiertes Anlagenkonzept vertrieben. Es können sowohl Folien als auch Platten verarbeitet werden. Für den Auftrag kann eine Schlitzdüse oder ein Tiefdruckwerk installiert werden. Die UV-Quelle ist kundenspezifisch konventionell, LED-basiert oder hybrid. Das Konzept sieht Raum für eine Bahnreinigung oder Oberflächenaktivierung vor. [TEMI17a, TEMI17b]

Carpe Diem Technologies bietet kundenspezifische Lösungen für das UV-basierte und thermische Rolle-zu-Rolle-Prägen an. Die Standardanlagen sind modular aufgebaut, wobei Umlenk- und einige Prozessrollen innerhalb eines vordefinierten Rasters in den Modulen versetzt werden können. Das Standardkonzept bietet eine Tiefdruck-Auftrageinheit an. Sowohl die UV-Bestrahlung durch das Substrat als auch durch den Zylinder werden standardmäßig angeboten. [CARP17a, CARP17b, CARP17c]

PTMTEC Oy ist ein finnisches Unternehmen und eine Ausgründung von Mitarbeitern der Forschungseinrichtung VTT. PTMTEC bietet kundenspezifische Lösungen für Rolle-zu-Rolle-UV- und T-NIL-Anlagen an. Als Standard gibt es kleine Anlagen bis zu

einer Materialbreite von 100 mm zum Aufbau auf Labortischen und Stand-Alone-Lösungen bis zu einer Breite von 200 mm. Der Lackauftrag erfolgt im Tiefdruckverfahren (gravierter Zylinder). [PTMT17a, PTMT17b]

Tabelle 2.4: Industrielle R2R-NIL-Produktionsanlagen

Industrial R2R NIL production systems

<p>Coatema Coating Machinery Click-&-Coat-Konzept [COAT17a/b]</p>  <p>Materialbreite >100 mm</p> <p>Geschwindigkeit >1 m/min</p> <p>Auftragswerk verschiedene</p>	<p>Temicoat UV-NIL 300 [TEMI17a/b]</p>  <p>Materialbreite ≤300 mm</p> <p>Geschwindigkeit ≤20 m/min</p> <p>Auftragswerk Schlitzdüse Walzenauftrag</p>
<p>Carpe Diem Technologies Rolle-zu-Rolle-Plattform [CARP17a]</p> <p>Materialbreite ≤300 mm</p> <p>Geschwindigkeit ≤20 m/min</p> <p>Auftragswerk Walzenauftrag</p> 	<p>PTMTEC R2R 200 UV [PTMT17a/b]</p> <p>Materialbreite ≤200 mm</p> <p>Geschwindigkeit ≤10 m/min</p> <p>Auftragswerk Walzenauftrag</p> 
<p>3D-Micromac AG microFLEX 300 [3DMI17]</p>  <p>Materialbreite ≤300 mm</p> <p>Geschwindigkeit ≤20 m/min</p> <p>Auftragswerk Schlitzdüse verschiedene</p>	<p>Printed Electro Mechanical System RIP 300 [PEMS17]</p>  <p>Materialbreite ≤300 mm</p> <p>Geschwindigkeit unbekannt</p> <p>Auftragswerk unbekannt</p>

Der Fokus der 3D-Micromac AG liegt auf der kontinuierlichen Laserbearbeitung. Die Modulplattform microFLEX™ bietet 23 Prozessmodule zur Konfiguration einer Anlage mit 50, 300 oder 1.000 mm Materialbreite. Angebotene Auftragsverfahren sind Inkjet-, Flexo- oder Rotationssiebdruck und Schlitzdüsenauftrag. [3DMI17]

Printed Electro Mechanical System PEMS ist eine Ausgründung des Korean Institute of Machinery and Materials KIMM. PEMS bietet Maschinenlösungen für die maschinelle Fertigung von gedruckter Elektronik, Beschichtungsanlagen für die Massenproduktion sowie Rolle-zu-Rolle-NIL-Anlagen an. Die RIP-300 ist ein System zum kontinuierlichen Heißprägen mit Shims, was auf Kundenwunsch für UV-NIL angepasst werden kann. [PEMS17]

2.3 Zwischenfazit

Interim conclusion

Die UV-basierte Rolle-zu-Rolle-Imprint-Lithografie ist ein performantes Verfahren zur kosteneffizienten Herstellung großflächiger, funktionaler Folienherzeugnisse. Gegenüber alternativen Lithografie-Prozessen ist der kontinuierliche Prozess hinsichtlich der verarbeiteten Formate mit geringen Investitionen zu skalieren. Gegenüber konventionellen Druckverfahren zeichnet sich die R2R-UV-NIL durch ihr hohes Auflösungsvermögen und die große Bandbreite möglicher Strukturdimensionen aus. Potentielle Anwendungen sind vielfach in der wissenschaftlichen Literatur dokumentiert. Das Anwendungsfeld umfasst die Optik, die Elektronik, Biomedizin und Pharmazie sowie Energie- und Umwelttechnik. Marktanalysen belegen zum einen den fortschreitenden Aufbau von Produktionssystem- und -prozess-Know-How anhand einer wachsenden Anzahl von Patenten. Zum anderen prognostizieren sie eine positive Entwicklung des Absatzmarktes mit jährlichen Wachstumsraten $>10\%$ im Zeitraum von 2016 bis 2021.

Sowohl das Spektrum der Substratmaterialien als auch die anwendungsspezifische Formulierung der UV-härtenden Lacke sind wissenschaftlich intensiv erforscht. Die Bandbreite der Werkzeuge erstreckt sich von verschiedenen NE-Werkstoffen, wie Ni, Cu und Al über Silikone und andere Polymere hin zu Silizium und Quarzgläsern. Dabei können die Zylinder direkt und endlos strukturiert sein oder als Wrap-Around-Molds um einen Walzenkern gelegt werden. Die Vielfalt der Werkzeugherstellungsverfahren ist entsprechend groß. Sie umfasst einfache Gravur- und Zerspanungsverfahren, Diamantbearbeitung, Laser-Strukturierung sowie Interferenz- und andere Lithografie-Verfahren. Anlagentechnik für den Materialauftrag, die UV-Aushärtung oder die Bahnlaufkorrektur sind aus konventionellen Folien-, Papier- und Printmedien-Industrie bekannt.

Für die Herstellung von optischen Folien wie Retroreflektorschichten oder Brightness-Enhancement-Filmen wird vor allem das thermische Verfahren (T-NIL) seit Jahrzehnten eingesetzt. In der Forschung initiierte vor allem der Bedarf der Elektronikindustrie die Auseinandersetzung mit dem kontinuierlichen UV-NIL. In Serienproduktionen beispielsweise von Solarzellen oder Bildschirmen werden Platte-zu-Platte-Produkte den kontinuierlich erzeugten Produkten vorgezogen. Am Markt existieren nur wenige Anlagenhersteller, die R2R UV-NIL-Systeme anbieten. Ihr Portfolio konzentriert sich auf den forschungsnahen Einsatz. Technologieanwender, vornehmlich aus den asiatischen Regionen, schützen ihr System- und Prozesswissen durch Patente und strikte Geheimhaltung. In vielen Fällen ist der Prozess nicht in einem wirtschaftlichen Maße beherrschbar und lässt sich nicht reproduzierbar und robust abbilden. Trotz der intensiven Erforschung fehlt es an Wissen zur Kontrolle und Einstellung der sequentiellen Abläufe. Auch sind kaum Informationen zur konstruktiven Umsetzung eines robusten Produktionssystems bekannt.

Verbesserte Kenntnis der relevanten Prozessparameter, des Umfangs ihres Einflusses und eine Anpassung des Produktionssystems an die Prozessanforderungen sind essentiell für die Etablierung der R2R-UV-NIL am Markt. In diesen Punkten besteht daher weiterhin Bedarf zur wissenschaftlichen Aufarbeitung der Fragestellungen.

3 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Tasks and objectives of the thesis

Diese Arbeit hat den Anspruch die Attraktivität der Rolle-zu-Rolle-UV-Nanoimprint-Lithografie für den industriellen Einsatz in innovativen Produkten und Produktionsabläufen zu steigern. Dazu sollen die Herausforderungen an die Gestaltung von Produktionssystem und Prozess erforscht werden, um die Skalierung des Produktdurchsatzes bei gleichbleibender Produktqualität systematisch beherrschbar und reproduzierbar zu machen. Ziel dieser Arbeit ist die Identifikation der essentiellen Prozessparameter, die über Konstruktion und Einstellung des Produktionssystems die Qualität des Replikationsergebnisses signifikant beeinflussen. Die Modifikation der Materialchemie des UV-Lacks und des Foliensubstrats oder die Modifikation der Oberflächenbeschaffenheit der Prägewalze durch Antihafbeschichtungen werden nicht betrachtet. Unter diesen Prämissen wird die Beantwortung folgender Forschungsfragen angestrebt:

- Welches sind die relevanten maschinenseitigen Prozessparameter, mit denen ein signifikanter Einfluss auf die Produktqualität genommen werden kann? Wie ist ein entsprechendes Produktionssystem zu gestalten?
- Welche Korrelationen existieren zwischen den Parametern eines kontinuierlichen Rolle-zu-Rolle-UV-NIL-Prozesses? Besteht eine Abhängigkeit von der replizierten Struktur?
- Mit welchen Ansätzen lassen sich auftretende Qualitätsmängel kompensieren? Gibt es Limitationen bei der Mängelkompensation?

Es ist anzunehmen, dass die Andruckkraft der Prägewalze den Replikationsprozess grundlegend beeinflusst und die Geschwindigkeit des Substrats selbst einen essentiellen Einfluss auf die Entstehung verschiedener Defektausprägungen besitzt.

Obleich der UV-NIL-Prozess im diskontinuierlichen Platte-zu-Platte-Ansatz für ein breites Produktspektrum Anwendung findet, ist der kontinuierliche Prozess trotz seines technologischen und ökonomischen Potentials in der Industrie nur in wenigen Anwendungsbereichen etabliert. Im ersten Teil des Stands der Technik in Forschung und Industrie wurde daher das Verfahrensprinzip beschrieben. Die Charakteristika sowie die Restriktionen des kontinuierlichen Prozesses gegenüber den Platte-zu-Platte- und Rolle-zu-Platte-Ansätzen wurden herausgestellt. Anhand mehrerer Anwendungsbeispiele verschiedener Industrien wurde ein Überblick der Anforderungen an die Produktspezifikationen erarbeitet. Mit einer Abgrenzung gegenüber kompetitiven Rolle-zu-Rolle-Produktionsansätzen - insbesondere der thermischen Nanoimprint-Lithografie - schloss dieser Teil. Im zweiten Unterkapitel wurde der Stand der Komponenten- und Materialtechnik aufgearbeitet. Das bekannte Lösungsspektrum soll zur Vorauswahl und Definition eines geeigneten Maschinenkonzepts herangezogen werden. Die Betrachtung bekannter Systemkonzepte zeigte marktfähige Best-Practice-Konzepte auf.

In Kapitel 4 werden die bekannten Defekte anhand ihrer Ausprägungsmerkmale in Kategorien geordnet. Ebenso wird eine Klassifizierung bekannter Fehlerquellen vorgenommen und eine Zuordnung der Fehlerquellen nach ISHIKAWA zu den Defekten unternommen. Abschließend werden bekannte, analytische Modelle zur Berechnung verschiedener Prozessparameter vorgestellt und zur Identifikation der kritischen Größen herangezogen.

Im Folgenden (Kapitel 5) wird die Konzeption und Ausgestaltung eines modularen Produktionssystems beschrieben, dessen Fokus auf der steuerung- und regelungstechnischen Kontrolle der zuvor identifizierten, kritischen Prozessparameter liegt. Die Maschinenteknik einschließlich des modularen Konzepts wird eigens für den Untersuchungsrahmen dieser Arbeit entwickelt und erprobt.

Einleitung und Motivation (Kap. 1)		Stand der Technik (Kap. 2)	
Zielsetzung, Aufgabenstellung und Vorgehensweise (Kap. 3)			
Forschungshypothese			
Um einen Rolle-zu-Rolle-UV-NIL-Prozess hinsichtlich seines Durchsatzes skalierbar zu machen, ist die Andruckkraft F_{an} mit der Substratgeschwindigkeit v_{Bahn} anzupassen. Es ist anzunehmen, dass die Andruckkraft der Prägewalze den Replikationsprozess grundlegend beeinflusst und die Geschwindigkeit des Substrats selbst einen essentiellen Einfluss auf die Entstehung verschiedener Defektausprägungen besitzt.			
Forschungsfragen	Welches sind die relevanten maschinenseitigen Prozessparameter, mit denen ein signifikanter Einfluss auf die Produktqualität genommen werden kann? Wie ist ein entsprechendes Produktionssystem zu gestalten?	→	Analyse möglicher Fehlerquellen in kontinuierlichen UV-NIL-Prozessen (Kap. 4)
		→	Konzeption und Realisierung eines folienverarbeitenden UV-Imprint-Moduls (Kap. 5)
	Welche Korrelationen existieren zwischen den Parametern eines kontinuierlichen Rolle-zu-Rolle-UV-NIL-Prozesses? Besteht eine Abhängigkeit von der replizierten Struktur?	→	Empirische Untersuchung der Skalierbarkeit eines UV-NIL-Prozesses (Kap. 6)
		→	Transfer und Validierung der Untersuchungsergebnisse (Kap. 7)
	Mit welchen Ansätzen lassen sich auftretende Qualitätsmängel kompensieren? Gibt es Limitationen bei der Mängelkompensation?	→	Untersuchung möglicher Füllfehler – Lunker (Kap. 8)
		→	Untersuchung möglicher Füllfehler – Evakuierung (Kap. 9)
Zusammenfassung, Reflexion und Ausblick (Kap. 10)			

Bild 3.1: Vorgehensweise und inhaltlicher Aufbau der Arbeit

Scientific approach and structure of the thesis

Mit empirischen Versuchsreihen werden die Relevanz der definierten Größen sowie ihre wechselseitige Wirkung auf das Replikationsergebnis betrachtet. Die Untersuchungen sind in Abschnitt 6 dokumentiert. Sie erfolgen an einer einfachen, endlos umlaufenden Nutgeometrie, die mit Diamantbearbeitung in eine verkupferte Prägewalze

strukturiert ist. Über einen vollfaktoriellen Versuch ist eine Rangfolge des Signifikanzniveaus der Parameter und ihrer Wechselwirkungen zu erstellen. Über diese wird eine Vorschrift zur Produktionsskalierung hergeleitet.

Das Kapitel 7 dokumentiert die Validierung der Verfahrensvorschrift durch ihren Transfer auf eine komplexe Mikropyramidengeometrie. Gleichzeitig werden Limitationen bei der Steigerung des Produktionsdurchsatzes und der relevanten Prozessparameter dargelegt. Auftretende Fehlerbilder werden entsprechend der erarbeiteten Fehlerarten kategorisiert.

Die Analyse ihres Entstehens sowie die Erarbeitung geeigneter Kompensationsstrategien ist Inhalt der Kapitel 8 und 9.

Das letzte Kapitel (Abschnitt 10) fasst die Erkenntnisse der konstruktiven Systementwicklung sowie der empirischen und numerischen Prozessuntersuchung zusammen. Im Abschnitt 10.2 wird ein Ausblick auf Fragestellungen gegeben, die sich im Verlauf dieser Arbeit ergeben haben und in künftigen Untersuchungen wissenschaftlich aufzuarbeiten sind.

4 Analyse potentieller Fehlerquellen in kontinuierlichen UV-NIL-Prozessen

Analysis of potential sources of defects in continuous UV NIL processes

Die Teilprozesse der kontinuierlichen UV-Imprint-Lithografie sind zeitlich durch das bewegte Substrat verknüpft. Prozessparameter sind somit nur begrenzt unabhängig voneinander einzustellen. Die Einstellung idealer Prozessfenster ist komplex. In diesem Kapitel sollen daher die kritischen Prozessparameter identifiziert werden, mit denen sich das Replikationsergebnis während des laufenden Prozesses beeinflussen lässt. Dazu werden im ersten Abschnitt (4.1) die verschiedenen Fehlerausprägungen betrachtet und kategorisiert. Darauf folgend wird anhand eines Ursache-Wirkungsdiagramms die Vielfalt möglicher Fehlerquellen in sechs Klassen eingeteilt und die Abhängigkeit einer Fehlerausprägung von verschiedenen Ursachen betrachtet (Abschnitt 4.2). Weiter werden analytische Ansätze zur Bestimmung idealer Prozessparameter vorgestellt (4.3). Die prozesskritischen Parameter sowie die Relevanz der Auslegung und Ausführung des Produktionssystems wird herausgestellt.

4.1 Kategorisierung der Fehlerausprägungen

Characterization of replication defects

Bereits kleine Defekte in der Replikation stören die Funktion der großflächigen Folien-erzeugnisse erheblich. Besonders kritisch sind Qualitätsschwankungen bei optischen Folien. Bei der Durchleuchtung oder Beleuchtung der Nano- und Mikrostrukturen werden beispielsweise eingeschlossene Luftblasen und Schmutzpartikel schon bei geringem Vorkommen deutlich sichtbar. Die resultierende Fehlreflexion bzw. Streuung des Lichts ist ein Ausschlusskriterium für den Produkteinsatz. In Bild 4.1 sind die zehn bekanntesten Fehlerausprägungen anhand einer einfachen Pyramidenstruktur schematisch dargestellt. Die Zusammenstellung basiert auf Ergebnissen aus der Literatur sowie aus Versuchsreihen am Fraunhofer IPT.

Fehlerart a. „Füllung“ beschreibt eine unvollständige Ausformung der Idealstruktur mit einem plateauähnlichen Abschluss. WANG et al., die lediglich vier Defektformen beim kontinuierlichen Heißprägen unterscheiden, bezeichnen diesen Defekt daher als „Platform-Like-Defect“ [WANG15]. Die Strukturkavität im Prägezylinder wird lediglich anteilig gefüllt. Ursache dieses Phänomens ist ein zu geringer Lackauftrag.

Wird hingegen zu viel Lack ausgebracht oder ist der Anpressdruck des beschichteten Substrats gegen den Prägezylinder zu gering, bildet sich zwischen Werkzeug und Substrat eine als „Restschichtlage“ bezeichnete, unstrukturierte Lackschicht aus (vgl. b.). Das überschüssige Material wirkt sich negativ auf das Schrumpfverhalten und die Anhaftung am Substrat sowie die optischen und mechanischen Eigenschaften des Produkts aus (Trübung, Brüchigkeit). Eine ressourceneffiziente Produktion erfordert ebenfalls die Minimierung der Restschichtlage. AHN et al. sowie MÄKELÄ et al. haben die

Einflussfaktoren zur Reduktion der Restschicht untersucht [AHN09b, MAEK07]. Obgleich die Optimierung von Ausbringungsmenge, Anpressdruck und Materialgeschwindigkeit signifikanten Einfluss auf die Ausprägung der Restschichtlage haben, lässt sich diese nicht vollständig vermeiden.

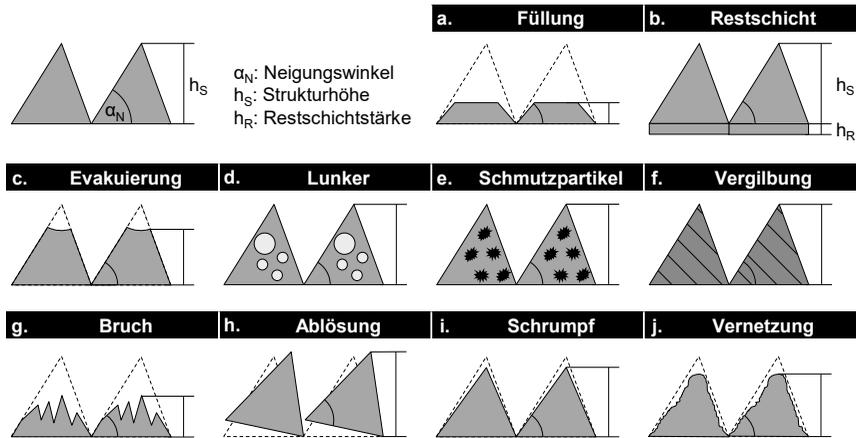


Bild 4.1: Kategorisierung der geläufigsten Replikationsfehler

Categorization of most common replication defects

Die unter c. „Evakuierung“ und d. „Lunker“ illustrierten Fehler sind mit dem Begriff Blasendefekte zusammenzufassen. WANG et al. bezeichnen die unvollständige Füllung der Zylinderkavitäten durch Einschluss von Atmosphärgas (Luft oder Inertgase) in c. als „Bubble-Like-Defect“ [WANG15]. MORIHARA et al. unterscheiden die unvollständige Evakuierung der Kavitäten in zwei Unterarten [MORI09]: Zum einen entstanden durch Verzweigung des Lackflusses an den Rändern der Kavitäten (Gaseinschluss), zum anderen entstanden durch Entleerung der Kavitäten durch lateralen Lackfluss (Unterdruck). Wie bei PENG et al. sowie WU et al. werden die Viskosität des Lacks und die Benetzungseigenschaften von Substrat und Prägezyylinder als Einflussfaktoren identifiziert. In den Arbeiten von PENG und WU wird vor allem die Produktionsgeschwindigkeit als zentrale Stellgröße für das Fehlerauftreten beschrieben [WU16, PENG16].

Blasendefekte, bei denen Gase als Lunker in den Strukturen eingeschlossen sind, beschreibt Bild 4.1 d. Anders als in c. liegen sie nicht an der Strukturoberfläche. YE et al. nehmen an, dass Blasen durch die Rotation des Prägezyinders in den Lackauftrag „ingerührt“ werden [YE14]. Dieser Effekt konnte bei Versuchen am Fraunhofer IPT bestätigt werden. Weitere Ursachen für den Blaseneinschluss sind Leckagen im Lackfördersystem oder Blasenbildung bei der unsachgemäßen Befüllung von Lackbehältern.

Verunreinigungen des Lacks, des Substrats oder der Arbeitsumgebung führen zu oberflächlichen Anhaftungen oder Einschlüssen von Schmutzpartikeln (vgl. Bild 4.1 e.). Arbeitsanweisungen, Materialprüfungen oder konstruktive Anpassungen können diese Qualitätsmängel beseitigen.

Die Fehlerarten f. – j. sind im Wesentlichen auf die Formulierung des Lacks zurückzuführen. Der Fehler „Vergilbung“ bezieht sich auf die gelbliche Verfärbung des Lacks beim Aushärten. Der Effekt aus f. ist vornehmlich auf eine Überdosierung der UV-Bestrahlung zurückzuführen. [SCHW07]

Das Abbrechen von Strukturen, wie in g. dargestellt, erfolgt durch mechanische Überlastung bei der Entformung (vgl. Bild 4.1). Die Lackformulierung und übermäßiges Bestrahlen begünstigen die Sprödigkeit des ausgehärteten Lacks. Ein weiterer Faktor ist die Geometrie der Mikro- und Nano-Strukturen - insbesondere ihr Aspektverhältnis.

Ein vollständiges oder partielles Ablösen des strukturierten Lacks (vgl. Bild 4.1 h.) lässt auf geringe Adhäsionskräfte zwischen Lack und Substrat schließen. NEES et al. haben gezeigt, dass neben den chemischen Eigenschaften des Lacks gleichermaßen die Art und die Orientierung der Strukturen einen Einfluss auf das Ablöseverhalten haben [NEES15]. Lackabschnitte, die sich bei den beiden letztgenannten Fehlern ablösen, sind häufig Ursache für das Zusetzen des Prägezyinders.

Wie in Abschnitt 2.2.1 beschrieben, schrumpfen UV-härtende Lacke bei der Polymerisation um bis zu 15 %. Chemische Formulierung, Bestrahlungsintensität und -dauer sowie Materialkondition (z. B. Alter, Durchmischung) sind entscheidende Parameter für die Ausbildung des in Teilbild i. gezeigten schrumpfbedingten Formfehlers.

Zu wenig UV-Strahlung, ein falsches Bestrahlungsspektrum, eine zu geringe Menge Photoinitiatoren oder eine Sauerstoffatmosphäre erzeugen Vernetzungsfehler j. Instabilität der Strukturen, Restklebrigkeiten oder oberflächliche Schmierfilme sind Ausprägungen dieser Fehlerart.

4.2 Klassifizierung möglicher Fehlerquellen

Classification of potential sources of defects

Die beschriebenen Fehler sind sowohl mono- als auch multikausal. Nicht jeder Fehler ist eindeutig auf eine Ursache zurückzuführen. Die Eingrenzung der Fehlerquellen sowie die Identifikation der relevanten Optimierungsparameter sind somit essentiell. Das in Bild 4.2 gezeigte Ursache-Wirkungsdiagramm nach KAORU ISHIKAWA bietet einen methodischen Ansatz zur Ursachenfindung. Das Konzept des Ishikawa-Diagramms basiert auf der Annahme, dass jegliche Schwankung in der Produktqualität auf Ursachen in sechs Teilbereichen der Produktion beruht. Die Teilbereiche sind: Mensch, Management, Mitwelt, Material, Maschine und Methode. In Abhängigkeit vom betrachteten System bzw. Fehler besitzen die Bereiche unterschiedliche Relevanz für das vorliegende Problem. Die Ausdetaillierung der Teilbereiche ist beliebig.

Das Management verursacht lediglich indirekt Produktfehler. Die Einhaltung von organisatorischen und administrativen Vorgaben wie Sicherheitsrichtlinien und Arbeitsanweisungen erhöht die generelle Arbeitsqualität. Mangelhafte Ausbildung und unregelmäßige Schulung der Mitarbeiter wirken sich jedoch direkt auf die Qualität der Arbeitstätigkeit aus. Der Prozess der Rolle-zu-Rolle-Nanoimprint-Lithografie bedarf selbst in

den wenigen industriellen Anwendungen eines fundierten Expertenwissens. Der Faktor „Mensch“ ist somit eine Hauptfehlerquelle. Bedienerfehler auf Grund von Unkenntnis der Prozesszusammenhänge sind die zentrale Ursache für Schwankungen in der Produktqualität.

Der Teilbereich „Mittelwelt“ umfasst die Konditionierung des un- und mittelbaren Produktionsumfelds. Aufstellort einer Produktionsanlage und die bereitgestellte Infrastruktur beeinflussen den Replikationsprozess. Schwankungen der Umgebungsbedingungen wie Temperatur, Luftfeuchte, Luftverschmutzung, Sonneneinstrahlung, Maschinenkälte oder Inertgas- und Druckluftversorgung gefährden die Stabilität des Replikationsprozesses.

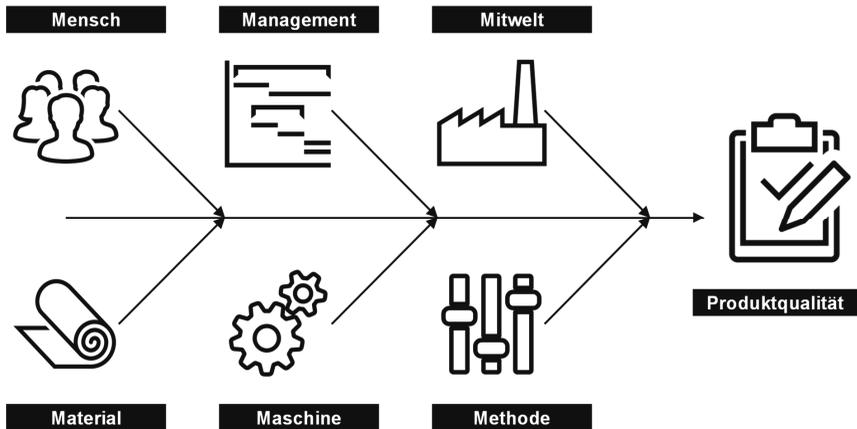


Bild 4.2: Ishikawa-Darstellung potentieller Fehlerursachen

Ishikawa illustration of potential defect causes

Lack-, Substrat- und Werkzeugmaterialien werden speziell auf den Produktionsprozess, die Strukturgeometrie und den Anwendungsfall der Folien zugeschnitten. Besonders die Formulierung des Lacksystems wird ausgiebig beforscht. Die Auswahl und Dosierung kostengünstiger Photoinitiatoren, die Verbesserung der Benetzungseigenschaften von Lack, Substrat und Prägezyylinder durch Additivierung und Antihafbeschichtungen oder die anwendungsspezifische optische und mechanische Optimierung des Lacks bieten zahlreiche Fehlerquellen.

Zwischen den Teilbereichen „Methode“ und „Maschine“ besteht eine unmittelbare Abhängigkeit. Prozesse und Methoden sind nur ausführbar, wenn die konstruktiven, anlagentechnischen Voraussetzungen existieren. Auftragsmethode (vgl. 2.2.2), Strahlquelle (vgl. 2.2.4), Atmosphäre (Vakuum, Luft oder Inertgas) und Bestrahlungsrichtung (vgl. 2.1.5) müssen für den jeweiligen Produktionsprozess geeignet bzw. konstruktiv umsetzbar sein. Maschinentechnisch muss ein präziser Bahnlauf sowie eine ausreichende Bahnzugkraft des Substrats gewährleistet und in angemessenen Dimensionen regelbar sein. Weiter können unzureichend dimensionierte Grundfunktionen, wie die Skalierung und Regelung von Anpressdruck und Prägespalt oder die Kapselung der

Maschine gegenüber Atmosphäreneinflüssen, Fehlerquellen darstellen. Zudem sind die Fertigungstoleranzen (z. B. Taumel, Rundlauf) und die mechanische Ausrichtung der Prägezyylinder Ursache für systematische Produktfehler wie Schichtdickenschwankungen. Das Maschinenbedienkonzept hat ebenfalls Einfluss auf die Beherrschbarkeit eines Rolle-zu-Rolle-Replikationsprozesses.

In Bild 4.3 sind die Abhängigkeiten zwischen den in Bild 4.1 dargestellten Fehlerarten und den Ursachenkategorien aus Bild 4.2 grafisch aufbereitet. Durch die Konzeption, Dimensionierung und Gestaltung des Produktionssystems kann demnach entscheidend auf die Produktqualität bzw. die Behebung von Qualitätsmängeln eingegangen werden. Die Zusammenstellung berücksichtigt Faktoren wie Fehlerhäufigkeit oder Auftretenswahrscheinlichkeit nicht. Es wird angenommen, dass jeder Fehler von gleicher Relevanz ist. Tatsächlich stellt der Bediener die größte Unsicherheit für die Prozessstabilisierung und -optimierung dar. Die Auswertung der bekannten Literatur zeigt, dass viele Anstrengungen zur Optimierung des verwendeten Materials - vornehmlich des Lacks - vorgenommen werden.

						
Füllung	<input type="radio"/>			<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Restschicht	<input type="radio"/>			<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Evakuierung	<input type="radio"/>			<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Lunker	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>			<input type="radio"/>	
Schmutz	<input type="radio"/>					
Vergilbung	<input type="radio"/>			<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Bruch				<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ablösung	<input type="radio"/>			<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Schrumpf	<input type="radio"/>			<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Vernetzung	<input type="radio"/>			<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Abhängigkeit:

Bild 4.3: Fehler-Fehlerursachen-Matrix

Defect and defect cause relation scheme

Auf Grund der signifikanten Relevanz des Produktionssystems für die Produktqualität, betrachtet die vorliegende Arbeit dieses näher. Im folgenden Abschnitt werden die relevanten, maschinentechnischen Stellgrößen analysiert.

4.3 Analytische Ansätze zur Bestimmung der Prozessparameter

Analytical approaches for determination of process parameters

Die Optimierung jeder Produktion besteht in der Maximierung des Produktdurchsatzes bei Einhaltung der Produktspezifikationen. Die Auslegung und Ausführung des Produktionssystems ist maßgeblich für die Einstellbarkeit und Regelgüte der prozessrelevanten Maschinenparameter. Diese sind die Substratgeschwindigkeit v_{Bahn} , der Lackvolumenstrom Q_{Lack} , die Andruckkraft der Gegendruckwalze F_{an} , die Temperierung der Prägewalze T_{Walze} und die Bestrahlungsstärke der UV-Einheit E_{UV} . Beschaffenheit des Substrats, des Lacks oder der Prägewalze sind durch die Produkthanforderungen vorgegeben.

Der Lackvolumenstrom berechnet sich aus der Beschichtungsbreite b_0 , der Beschichtungshöhe h_0 und der Substratgeschwindigkeit v_{Bahn} .

$$Q_{Lack} = b_0 \cdot h_0 \cdot v_{Bahn} \quad (4.1)$$

Die Beschichtung wird ideal über die gesamte Strukturbreite ausgebracht. Überschüssiges Material bildet eine Wellenfront im Walzspalt und wird quer zur Bahnaufrichtung verdrängt. Die initiale Beschichtungshöhe h_0 ist so zu wählen, dass wenig Material über die strukturierte Breite hinaus verdrängt wird. Theoretisch lässt sich h_0 annähern mit dem Volumen der zu füllenden Strukturräume geteilt durch die mittlere Mantelfläche des rohrartigen Hüllkörpers mit dem Außenradius R_{Relief} und dem Innenradius r_{Relief} :

$$h_0 = \frac{\text{invertiertes Volumen des Walzenreliefs}}{\text{mittlere Mantelfläche des Reliefs}} \quad (4.2)$$

$$= \frac{(R_{Relief}^2 - r_{Relief}^2) \cdot \pi \cdot b_0 - V_{Relief}}{(R_{Relief} + r_{Relief}) \cdot \pi \cdot b_0}$$

Die präzise Vermessung der Walzenradien r_{Relief} am tiefsten und R_{Relief} am höchsten Punkt des strukturierten Reliefs sowie die exakte Ermittlung des verdrängten Volumens V_{Relief} sind für komplexe, unregelmäßige Strukturen nur mit großem Aufwand durchzuführen. Für einfache, gleichmäßig über die Mantelfläche verteilte Regelgeometrien wie Längs- und Quernuten, Gitter oder Pyramiden ist h_0 leicht zu berechnen.

Die vollständige Füllung des Strukturreliefs ist nicht nur von einer ausreichenden Menge an Lackmaterial abhängig. Ebenso ist sie eine Funktion der Materialviskosität η und des Prägedrucks p_{an} . In Anlehnung an die Berechnung der Füllzeit $t_{füll}$ in Plattezu-Platte-Prozessen von HEYDERMAN et al. [HEYD00] geben DUMOND [DUMO12a] sowie SEO et al. [SEO06] folgende Näherung für die kontinuierliche UV-NIL an:

$$t_{füll} = \frac{\eta(T) \cdot b_{Steg}^2}{2 \cdot p_{an}(t)} \left(\frac{1}{h_R^2} - \frac{1}{h_0^2} \right) \quad (4.3)$$

$$= \frac{\eta(T) \cdot l_{Kontakt} \cdot 2 \cdot a \cdot b_{Steg}^2}{2 \cdot F_{an}(t)} \left(\frac{1}{h_R^2} - \frac{1}{h_0^2} \right)$$

Die geometrischen Zusammenhänge sind in Bild 4.4 dargestellt. Die Länge der Kontaktlinie zwischen Prägezyylinder und Andruckwalze wird mit l_{Kontakt} beschrieben. Sie verläuft in die Bildebene hinein und ist daher nicht abgebildet.

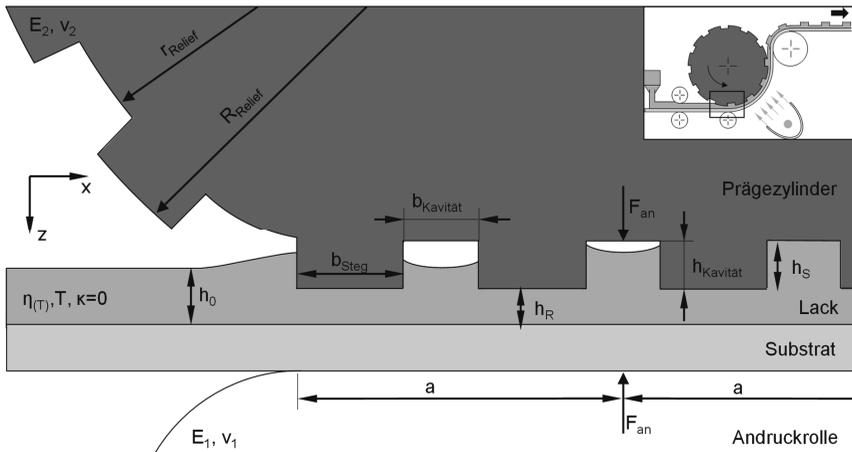


Bild 4.4: Schematische Darstellung des eindimensionalen, viskoelastischen Materialflusses im Prägespalt [DUMO12a, SEO06]

Schematic illustration of one-dimensional, viscoelastic material flow within the imprinting area

Die Abschätzung beruht auf den Annahmen:

- Die Verteilung des Prägelacks auf der Substratoberfläche ist uniform. Es gibt keine unbenetzten Bereiche.
- $r_{\text{Zylinder}} \gg l_{\text{Kontakt}}$: Der Radius r_{Zylinder} des Prägezyinders ist sehr viel größer als die Kontaktlänge l_{Kontakt} . Der Krümmungsradius des Zylinders beeinträchtigt das Fließverhalten des Prägelackes nicht.
- $p_{\text{an}}(l_{\text{Kontakt}}) = \text{konst.}$: Der Anpressdruck ist an jeder Stelle entlang der Kontaktlänge l_{Kontakt} gleich.
- $l_{\text{Kontakt}} \gg h_0(t)$: Die Kontaktlänge l_{Kontakt} ist stets um ein Vielfaches größer als die Schichtdicke h_0 . Der hydrostatische Druck hat lediglich eine laterale Abhängigkeit.
- Es liegt ein rein viskoses Fließverhalten vor. Der Prägelack ist ein newtonsches Fluid.
- Der Prägelack ist inkompressibel.
- Es herrschen ideale Haftbedingungen zwischen Prägelack und -zylinder.

Die Bedingung, dass die vollständige Füllung der Strukturkavitäten stattgefunden hat, ehe das Material die Kontaktzone mit der Länge $l_{\text{füll}} = 2 \cdot a$ passiert hat, formuliert sich in der Gleichung:

$$t_{f\u00fcll} \geq \frac{l_{f\u00fcll}}{v_{Bahn}} \quad (4.4)$$

Hieraus folgt f\u00fcr die Bahngeschwindigkeit v_{Bahn} :

$$\begin{aligned} v_{Bahn} &\leq \frac{l_{f\u00fcll}}{t_{f\u00fcll}} = \frac{2 \cdot l_{f\u00fcll} \cdot p_{an}(t)}{\eta(t) \cdot b_{Steg}^2} * \left(\frac{h_0^2 \cdot h_R^2}{h_0^2 - h_R^2} \right) \\ &= \frac{2 \cdot 2 \cdot a \cdot F_{an}(t)}{\eta(t) \cdot l_{Kontakt} \cdot 2 \cdot a \cdot b_{Steg}^2} \cdot \left(\frac{h_0^2 \cdot h_R^2}{h_0^2 - h_R^2} \right) \end{aligned} \quad (4.5)$$

Generell ist die F\u00fclldauer $t_{f\u00fcll}$ kein limitierender Faktor f\u00fcr die Prozessgeschwindigkeit. Viel erheblicher wird diese durch die Aush\u00e4rtungsdauer $t_{h\u00e4rt}$ beeinflusst. [DUMO12a]

Eine niedrigere Viskosit\u00e4t der verwendeten Pr\u00e4gelacke beg\u00fcnstigt die F\u00fcllgeschwindigkeit. NAGAOKA et al. zeigten in ihren Simulationen, dass die F\u00fcllzeit proportional mit der Gr\u00f6\u00dfe der mikroskaligen Strukturen abnimmt. Allerdings belegt ihre Arbeit ebenfalls einen Anstieg der F\u00fcllzeit mit abnehmender Strukturgr\u00f6\u00dfe im Nanometerbereich [NAGA12]. Zu vergleichbaren Erkenntnissen kamen zuvor YOA und KIM [YOA02]. Sie erkl\u00e4ren das Ph\u00e4nomen mit einer Gr\u00f6\u00dfenabh\u00e4ngigkeit der Viskosit\u00e4t, den Gleitbedingungen an den Kanalw\u00e4nden (engl.: Wall-Slip) und der Oberfl\u00e4chenspannung des Lacks. Y1 gibt an, dass die Viskosit\u00e4t in Mikrokan\u00e4len 50 – 80 % h\u00f6her sein kann als in makroskopischen Umgebungen [Y115a].

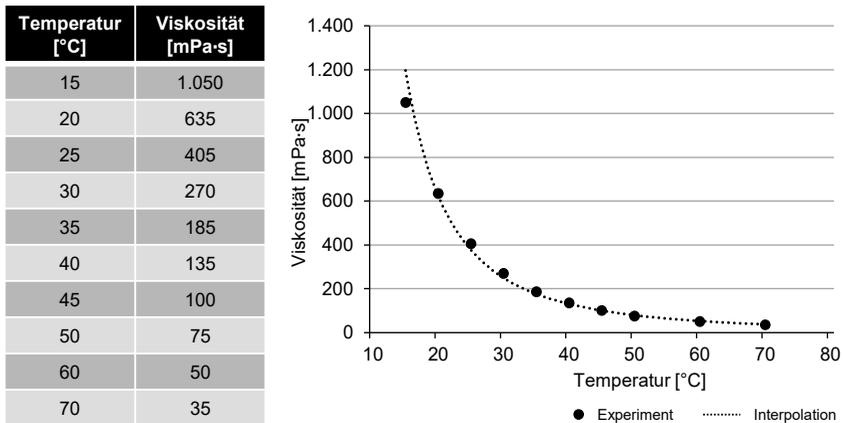


Bild 4.5: Temperaturabh\u00e4ngigkeit der Viskosit\u00e4t eines UV-Lacks (MO-5, C-Coatings B.V.)

Temperature dependency of a UV lacquer's viscosity (MO-5, C-Coatings B.V.)

Die Viskosit\u00e4t η eines Lacks ist abh\u00e4ngig von der Materialtemperatur T_{Lack} . Bild 4.5 zeigt diesen Zusammenhang exemplarisch f\u00fcr einen beliebigen UV-Pr\u00e4gelack. Die Viskosit\u00e4tskurven werden mit einem Viskosimeter empirisch ermittelt. Der exponentielle Verlauf des Graphen belegt eine starke Temperaturabh\u00e4ngigkeit. Beispielf\u00fcr l\u00e4sst sich feststellen, dass eine Temperaturerh\u00f6hung um 10°C - von 20°C auf 30°C - die

Viskosität mehr als halbiert - von 635 mPa·s auf 270 mPa·s. Nach Gleichung (4.5) ermöglicht dies theoretisch eine Erhöhung der Produktionsgeschwindigkeit v_{Bahn} um denselben Faktor.

Die Temperatur des UV-Lacks kann über die Temperierung des Vorratsbehälters bzw. der Lackzuführeinrichtung oder die Temperierung von Prägezylinder und Gegendruckwalze eingestellt werden. Die Maximaltemperatur ist durch die Zusammensetzung des Lacks limitiert. Bei erhöhten Temperaturen kommt es zu thermisch-induziertem Aus härten des Lacks.

Die Bewertung einer ausreichenden Füllung kann nach LAN et al. [LAN10] anhand der Replikationsrate $R_{\text{Replikation}}$ erfolgen. Die Replikationsrate beschreibt das Verhältnis von gefüllter Strukturhöhe Δh_s zur Gesamthöhe $h_{\text{Kavität}}$ einer Kavität (vgl. Bild 4.6). Die Beschreibung wurde für einen Roll-zu-Platte-Heißprägeprozess entwickelt. Die Fließmechanismen sind denen im Rolle-zu-Rolle-UV-NIL ähnlich.

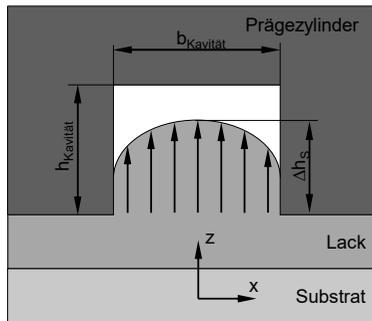


Bild 4.6: Ausdehnung des UV-Lacks in Mikrokanalitäten [LAN10]

Spreading of a UV lacquer in microcavities

Zur A-priori-Bestimmung des zu erwartenden Füllgrades dient die Gleichung (4.6).

$$R_{\text{Replikation}} = \frac{\Delta h_s}{h_{\text{Kavität}}} = \frac{1}{R_{\text{Aspekt}}} \cdot \left(\frac{p_{\text{an}} \cdot 2 \cdot a}{12 \cdot v_{\text{Bahn}} \cdot \eta} \right)^{1/2} \quad (4.6)$$

Das Aspektverhältnis R_{Aspekt} ist der Quotient aus Höhe $h_{\text{Kavität}}$ und Breite $b_{\text{Kavität}}$. Die Flächenlast im Kontaktbereich der Walzen bzw. von Walze und Platte ist mit $p_{\text{an}} = F_{\text{an}} \cdot (l_{\text{Kontakt}} \cdot 2 \cdot a)^{-1}$ gegeben. Gleichung (4.6) setzt sich aus dem Prägedruck p_{an} , der Materialgeschwindigkeit v_{Bahn} und der temperaturabhängigen Viskosität $\eta(T)$ als veränderliche Größen zusammen. Bild 4.7 zeigt den Zusammenhang zwischen Replikationsrate $R_{\text{Replikation}}$ und Bahngeschwindigkeit v_{Bahn} sowie Replikationsrate $R_{\text{Replikation}}$ und Anpressdruck p_{an} auf.

Experiment und Simulation belegen zum einen, dass mit steigender Bahngeschwindigkeit die Kavitäten immer weniger befüllt werden - die Replikationsrate sinkt mit steigender v_{Bahn} (vgl. Bild 4.7, links). Zum anderen zeigt sich, dass die Andruckkraft F_{an} einen positiven Einfluss auf die Füllung der Kavitäten und somit auf die Replikationsrate $R_{\text{Replikation}}$ hat (vgl. Bild 4.7, rechts).

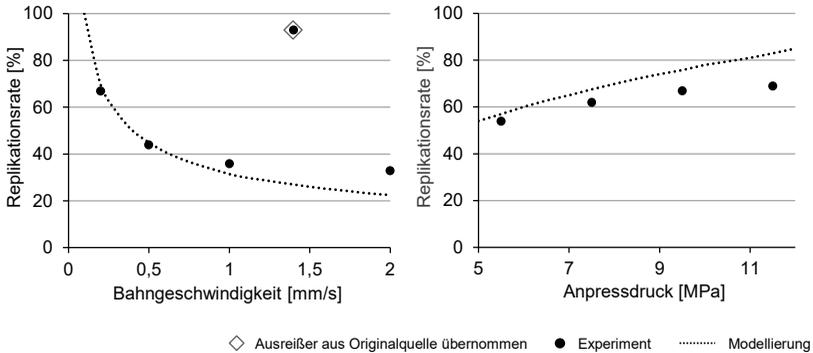


Bild 4.7: Einfluss von Bahngeschwindigkeit und Anpressdruck auf die Replikationsrate [LAN10b]

Influence of web speed and loading pressure on replication ratio

Die Prägekraft F_{an} verteilt sich entgegen der Idealvorstellung nicht als Linienlast, sondern gemäß der Hertz'schen Kontaktbedingung für zylindrische Körper als Druck p_{an} über die Fläche $A_{Kontakt} = 2 \cdot a \cdot l_{Kontakt}$. $l_{Kontakt}$ ist die Länge der Berührungslinie von Präge- und Andruckwalze parallel zu ihren Rotationsachsen. Die Länge a ergibt sich wie in Bild 4.8 gezeigt als halbe Kontaktlänge in Bahnlaufrichtung.

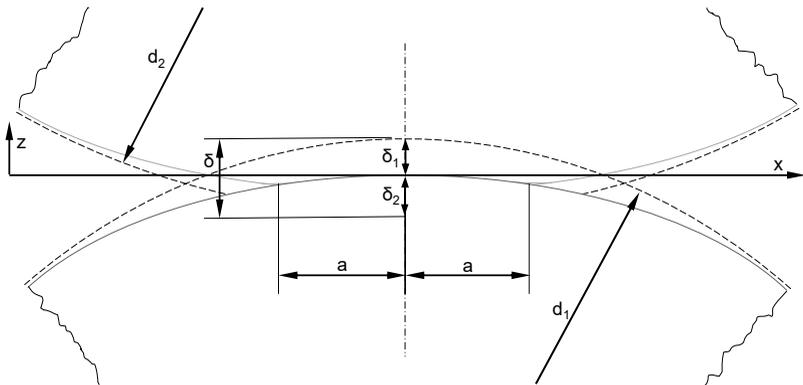


Bild 4.8: Hertz'sches Kontaktmodell

Hertzian contact model

Gemäß [SCHA17] wird sie berechnet zu:

$$a = \sqrt{\frac{4 \cdot F_{an} \cdot (1 - \nu^2)}{\pi \cdot E \cdot l_{Kontakt} \left(\frac{1}{d_{Zylinder 1}} + \frac{1}{d_{Zylinder 2}} \right)}} \quad (4.7)$$

Die Druckverteilung im Walzspalt wird beschrieben durch [JOHN85]

$$p_{an}(x) = \frac{8 \cdot F_{an}}{\pi \cdot a^2 \cdot l_{Kontakt}} \left(\left(\frac{a}{2} \right)^2 - x^2 \right)^{1/2} \tag{4.8}$$

Für den zweidimensionalen, elastischen Kontakt der zylindrischen Körper gelten die Annahmen:

- Die Oberflächen sind stetig und nicht konform (winkeltreu): $a \ll r$.
- $a \ll d_{Zylinder}$: Die Verformung ist viel kleiner als der Zylinderdurchmesser.
- Jeder Festkörper kann als elastischer Halbraum angesehen werden: $a \ll r_{1,2}$, $a \ll l_{Kontakt}$.
- Die Oberflächen sind reibungsfrei.

HONGYAN et al. haben die Hertz'schen Kontaktbedingungen einer elastischen, gummierten Walze und eines steiferen Walzenkörpers in einer FEM-Simulation untersucht. Obgleich bei großen Deformationen in der Kontaktzone die Werte der Flächenpressung aus Simulation und theoretischem Modell sehr nahe beieinanderliegen, zeigen sich große Unterschiede in der Ausprägung der halben Kontaktlänge a . Der Untersuchung zur Folge eignet sich die Hertz'sche Theorie nicht zur Berechnung der maximalen Flächenpressung zwischen zwei aufeinander abrollenden Zylindern. [HONG16] Dennoch erläutert die Theorie das Phänomen der auftretenden Abflachung der Walzenradien in der Kontaktzone anschaulich. Zur genauen Bestimmung der Kontaktfläche ist diese durch digitale Messtechnik oder Druckmessfolien zu ermitteln.

Basierend auf den Gleichungen (4.3) und (4.8) erarbeiteten AHN et al. [AHN09a] eine Gleichung zur analytischen Bestimmung der zu erwartenden Restschichtstärke h_R .

$$h_R = \left(\frac{F_{an}(t)}{\eta(T) \cdot b_{Steg}^2 \cdot l_{Kontakt} \cdot v_{Bahn}} + \frac{1}{h_0^2} \right)^{-1/2} \tag{4.9}$$

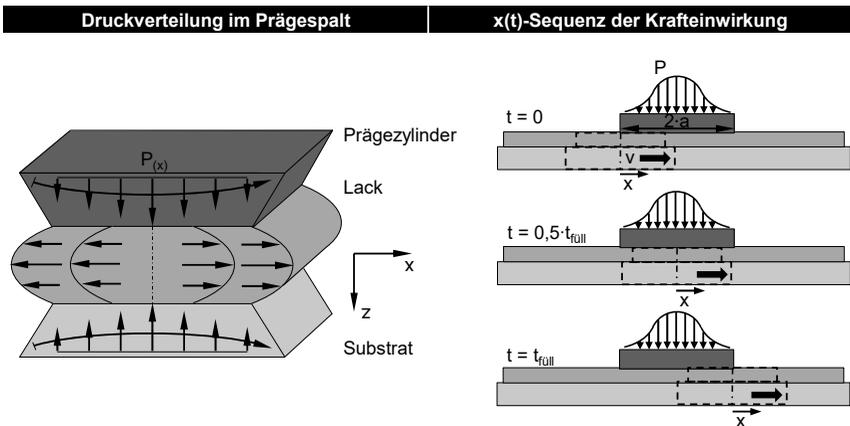


Bild 4.9: Dynamisch-elastisches Walzmodell [AHN09]

Dynamic elastic roller contact model

Die Modellierung berücksichtigt die Dynamik einer Rolle-zu-Rolle-Prägung, bei welcher der flüssige Lack zwischen den rotierenden elastischen Zylindern gewalzt wird (vgl. Bild 4.9, links). Aspekte wie die zeitlich abweichende parabolische Druckverteilung oder das dynamisch-elastische Rollenkontaktmodell werden ebenfalls berücksichtigt. In diesem Modell ist jedes finite Element im Lack einer Druckverteilung als Funktion der Zeit t ausgesetzt, wenn es sich zwischen den Rollen bewegt (Bild 4.9, rechts).

Das dynamische Modell beschreibt, wie in Bild 4.10 gezeigt, die zu erwartende Restschichtstärke in sehr guter Näherung. Weiter zeigen die Graphen den Zusammenhang zwischen Ausprägung der Restschichtlage und Bahngeschwindigkeit bzw. Andruckkraft. Bild 4.10 zeigt neben dem dynamisch-elastischen Modell nach Gl. (4.9) empirisch ermittelte Vergleichswerte. Die weiteren Graphen bilden die Ergebnisse eines starren Zwei-Platten-Modells (P2P) sowie eines rein-elastischen Modells ab.

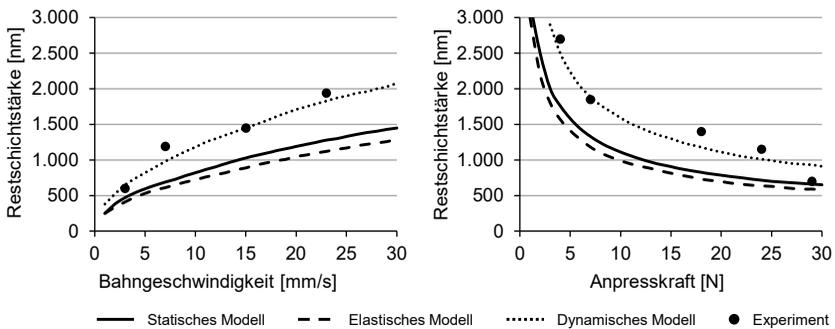


Bild 4.10: Beeinflussung der Restschichtlage durch Bahngeschwindigkeit v_{Bahn} und Andruckkraft F_{an} [AHN09a]

Influence on the residual layer by web speed v_{Bahn} and compressive normal force F_{an}

Der Modellvergleich setzt folgende Annahmen voraus:

- Der druckinduzierte Materialfluss ist in den Dimensionen entlang und senkrecht der Bahnaufrichtung symmetrisch.
- $a \ll l_{\text{Kontakt}}$: Die Kontaktlänge l_{Kontakt} entlang der Zylinderachse ist sehr viel größer als die Kontaktlänge a .
- Die initiale Beschichtungshöhe h_0 sowie die Kontaktlänge a ist in allen Modellen sowie in den empirischen Versuchen gleich.
- Es wird ein Schrumpf von 3 % angenommen, um die Ergebnisse der Modelle mit den empirisch gemessenen Werten vergleichbar zu machen.

Anhand der beschriebenen analytischen Ansätze können die Beschichtungsstärke h_0 bzw. der Lack-Volumenstrom Q_{Lack} , der Prägedruck p_{an} , die zu erwartende Restschichtstärke h_R und die Fülldauer $t_{\text{füll}}$ in ausreichender Näherung a-priori bestimmt werden. Für die Aushärtungsdauer $t_{\text{härt}}$ bzw. die erforderliche UV-Strahlungsintensität in Abhängigkeit der Bahngeschwindigkeit existiert kein analytisches A-priori-Modell.

Die emittierte Gesamtenergie einer UV-Strahlquelle wird beschrieben durch das Integral der wellenlängenspezifischen Beleuchtungsstärken über das gesamte Spektrum einer Strahlquelle [SCHW07]. Sie wird empirisch ermittelt.

$$E_{\lambda\text{Spektrum}} = \int I_{\lambda\text{Spektrum}} dt \quad (4.10)$$

Die emittierte Strahlung wirkt allerdings nicht unmittelbar und im vollen Umfang auf den UV-Lack ein. Sie durchdringt in der Regel zuerst verschiedene Medien wie die Umgebungsluft bzw. eine Inertgas-Atmosphäre, das Foliensubstrat und den UV-Lack. Dabei erfahren die verschiedenen Wellenlängen des Strahlungsspektrums eine mediennabhängige Abschwächung. Diese wird als Extinktion E_{Ext} bezeichnet. Die Extinktion der Intensität eines monochromatischen Lichtstrahls bei der Durchdringung eines absorbierenden, homogenen Körpers ist durch das Lambert-Beersche-Gesetz beschrieben. [KUNZ09, OTTO14]

$$E_{\text{Ext}} = \lg \frac{1}{T_{\text{Trans.}}} = \lg \frac{I_{\lambda,0}}{I_{\lambda}} = \varepsilon_{\text{Ext}}(\lambda) \cdot b_{\text{Küvette}} \cdot c \quad (4.11)$$

Der molare dekadische Extinktionskoeffizient $\varepsilon_{\text{Ext}}(\lambda)$ ist für jede Wellenlänge des UV-Spektrums sowie für jedes Medium separat zu bestimmen. Das Lambert-Beersche-Gesetz gilt nur in verdünnten Lösungen exakt, da die Brechzahl des Mediums von der Konzentration c abhängig ist. Nebenreaktionen und nicht streng monochromatische Strahlung erschweren eine präzise Bestimmung der Abschwächung.

Die Unschärfe dieses Ansatzes und der Umfang der erforderlichen Messungen zur Bestimmung der material- und wellenlängenspezifischen Koeffizienten haben seine Etablierung in der Praxis bisher verhindert. Stattdessen werden UV-sensitive Folien am Ort der Aushärtung anstelle der Beschichtung auf das Trägersubstrat aufgebracht. Diese verfärben sich je nach Intensität der Bestrahlung. Anhand der Verfärbung kann eine Aussage über die Strahlungsenergie (mJ/cm^2) getroffen werden [FUJ17a]. Eine Auflösung der Intensitäten nach Spektren oder einzelnen Wellenlängen ist nicht möglich.

HE und HE simulierten die Intensitätsverteilung einer linearen UV-Strahlquelle und sich linear ausbreitendem UV-Lichts mit einem parabolischen Reflektor auf einem flachen Substrat. Das physikalische Modell und die reale Verteilung stimmten in guter Näherung überein. [HE10] HIRAI und SHIBATA et al. erarbeiteten ebenfalls Prozesssimulationen zur Untersuchung der elektromagnetischen Ausbreitung des eingestrahnten UV-Lichts [HIRA10, SHIB10].

Weder die Berechnung noch die Messung der Bestrahlungsstärke gewährt eine ausreichend zuverlässige Bestimmung der Aushärtungszeit $t_{\text{härt.}}$. Die chemische Interaktion des Lacks mit den Photonen kann lediglich mit umfangreichem Wissen über die optischen Eigenschaften der Beschichtung, die Bestrahlungsparameter und die Rahmenbedingungen der radiometrischen Messungen empirisch ermittelt werden [SCHW07]. Informationen zu den Eigenschaften der UV-Strahlquellen machen den

Prozess lediglich in guter Näherung auf andere Produktionssysteme übertragbar [SCHW07].

$t_{\text{h\u00e4rt}}$ ist in einem iterativen Prozess empirisch zu bestimmen, in dem die Zusammensetzung des Lacks und/oder die Bestrahlungsparameter variiert werden. Anhand der mechanischen (Haftfestigkeit, Kratzfestigkeit, Biegefestigkeit, etc.), optischen (Transparenz, Absorptionsverhalten, etc.) und chemischen Eigenschaften (Vernetzungsgrad, etc.) wird die Qualit\u00e4t des Pr\u00e4geergebnisses evaluiert [SCHW07].

4.4 Zwischenfazit

Interim conclusion

Fehler bei der Replikation im kontinuierlichen Rolle-zu-Rolle-UV-Imprint lassen sich in zehn verschiedene Auspr\u00e4gungen unterteilen (Abschnitt 4.1). Die Ursache eines Fehlers ist h\u00e4ufig multikausal und bedarf einer genauen Betrachtung zur Identifikation der relevanten Optimierungsparameter. Neben dem Faktor Mensch als Prozessexperte und der Komposition der verwendeten Materialien ist die Auslegung und Gestaltung des Produktionssystems entscheidend f\u00fcr die Herstellung qualitativ hochwertiger Produkte (Abschnitt 4.2). Die analytischen Ans\u00e4tze zur Herleitung idealer Parameter (Abschnitt 4.3) verdeutlichen, dass das Replikationsergebnis insbesondere durch die Parameter Bahngeschwindigkeit v_{Bahn} , Andruckkraft F_{an} und die Temperatur T des Lacks im Prozess beeinflusst wird. Zudem muss die initiale Beschichtungsh\u00f6he h_0 auf die Strukturgeometrie abgestimmt sein, um ein ausreichendes, aber zugleich ressourceneffizientes F\u00fcllen zu garantieren. Gleiches gilt f\u00fcr die Bestrahlungsst\u00e4rke. Die Modellierung ber\u00fccksichtigt die Dynamik einer Rolle-zu-Rolle-Pr\u00e4gung, bei welcher der fl\u00fcssige Lack zwischen den rotierenden elastischen Zylindern gewalzt wird (vgl. Bild 4.9, links). Aspekte wie die zeitlich abweichende parabolische Druckverteilung oder das dynamisch-elastische Rollenkontaktmodell werden ebenfalls ber\u00fccksichtigt. In diesem Modell ist jedes finite Element im Lack einer Druckverteilung als Funktion der Zeit t ausgesetzt, wenn es sich zwischen den Rollen bewegt (Bild 4.9, rechts).

E_{UV} . Lacke sind f\u00fcr die jeweilige UV-Strahlquelle zu entwickeln. Ergebnisse bezogen auf die G\u00fcte der Aush\u00e4rtung oder den Grad der Vernetzung sind nicht auf andere UV-Strahlquellen \u00fcbertragbar. Dies ist bedingt durch die unterschiedlichen Emissionsspektren der Quellen. Abweichungen in den Bestrahlungsergebnissen sind durch eine Adaption der Bestrahlungsst\u00e4rke oder eine Anpassung der Lackformulierung zu korrigieren. Die M\u00f6glichkeit einer Regelung des UV-Strahlers ist bei der Auslegung des Produktionssystems zu ber\u00fccksichtigen. Als ergebniskritische Konzeptparameter sind die Bahngeschwindigkeit v_{Bahn} , Andruckkraft F_{an} , die initiale Beschichtungsh\u00f6he h_0 , die Bestrahlungsst\u00e4rke E_{UV} und die Temperatur T des Lacks zu erachten.

5 Konzeption und Realisierung eines folienverarbeitenden UV-Imprint-Moduls

Conception and realization of a foil processing UV imprint module

Das für die Prozessuntersuchungen dieser Arbeit eingesetzte Rolle-zu-Rolle-UV-NIL-System ist Teil einer Rolle-zu-Rolle-Produktionsplattform des Fraunhofer IPTs. Sie wurde auf Basis der Voruntersuchungen zu dieser Dissertation konzipiert, da keine geeigneten Forschungsanlagen am Markt verfügbar waren. Das Anlagenkonzept folgt dem Baukastenprinzip und gliedert einzelne Bearbeitungsschritte in Module, die dem „Plug-And-Produce“-Gedanken folgend zu verwenden sind. Im ersten Unterkapitel (5.1) wird die Motivation für dieses Konzept sowie der generelle Aufbau der verschiedenen Prozessmodule erläutert. Im Folgenden, zweiten Unterkapitel werden die Ab- und Aufwickler-Module vorgestellt und in ihrer Funktion detailliert beschrieben (Abschnitt 5.2). Ebenso wird das UV-Imprint-Modul im Unterkapitel 5.3 betrachtet. Ausgehend von einem morphologischen Kasten, dessen Ausprägungen bereits im Stand der Technik (2.2) hinreichend diskutiert wurden, wird die konstruktive Umsetzung der Bahnreinigungsfunktion (5.3.1), des Lackauftrags (5.3.2), Strukturierung und Aushärtung (5.3.3) sowie der Qualitätskontrolle (5.3.4) dargelegt. Abschließend wird auf das den Modulen übergeordnete Konzept zur Regelung der Bahnspannung in verschiedenen Maschinenabschnitten eingegangen (Abschnitt 5.4).

5.1 Modulares Rolle-zu-Rolle-Anlagenkonzept

Modular roll-to-roll machine concept

Im Rahmen des europäischen Forschungsprojekts „ML² - Multilayer MicroLab“ (Grant-Agreement-No.: 318088; Laufzeit: 2012 – 2016) [ML217] wurde die Herstellung miniaturisierter, diagnostischer Systeme aus funktionalisierten Folien erforscht. Das Fraunhofer IPT entwickelte eine industrienaher Rolle-zu-Rolle-Produktionsplattform, mit der optische, elektrische und mikrofluidische Funktionen auf Foliensubstrate aufgebracht und durch Kaschierung der Einzellagen, mehrlagige Diagnoseeinheiten erstellt werden. Neben dem UV-Imprint zur Replikation optischer und mikrofluidischer Strukturen sind bis 2020 folgende Funktionen im Produktionssystem verfügbar:

- Zu- und Abführung des Foliensubstrats in bzw. aus Fertigungsprozessen, Erzeugung und Regelung der Bahnspannung sowie Korrektur von Wickel- und Bahnlauffehlern
- Single-Pass-Inkjet-Druck zur generativen Fertigung elektrischer Leiterbahnen aus Gold-, Silber- und Kupfer-Nanopartikelintinten
- Photonisches Sintern zum Trocknen gedruckter Leiterbahnen
- Bestückung gedruckter Schaltbilder mit konventionellen SMD-Bauteilen und selektives, lokales Dispensieren chemischer Reagenzien in mikrofluidische Reservoirs

- Präzises Ausrichten und Verkleben einer funktionalen Lage auf ein anderes Substrat oder einen Substratverbund.

Die Funktionen sind in spezifische Prozessmodule zusammengefasst. Die Abfolge der Module zur Bearbeitung eines Foliensubstrats kann der Fertigungssequenz angepasst werden. Standardisierte mechanische, pneumatische und elektrische Schnittstellen ermöglichen diese flexible Kombinatorik. In allen Modulen ist eine Bahnlaufgeschwindigkeit von 20 m/min oder mehr zu erreichen. Die maximalen Bearbeitungsgeschwindigkeiten variieren je nach Prozess. Die Materialbreite ist auf 100 – 250 mm festgelegt. Die Breite der Umlenk-, Antriebs- und Funktionsrollen beträgt 300 mm. Bahnzugkräfte bis 2 N/mm Bahnbreite sind möglich. Folienstärken bis 250 μm sind konstruktiv in allen Modulen berücksichtigt, wobei die Verwendung steifer bzw. brüchiger Materialien durch Biegeradien ≥ 30 mm an einigen Umlenkwalzen begrenzt ist.

Die Regelung der Antriebe sowie die Verarbeitung der Logikbefehle erfolgt über das Motion-Control-System „IndraControl CML65“ der Bosch Rexroth AG. Antriebsregler, E/A-Module sowie die Sicherheitstechnik sind über das Sercos-III-Kommunikationsprotokoll mit der zentralen Steuerung verbunden. Die Sercos-III-Schnittstelle basiert auf Standard-Ethernet IEEE 802.3 und setzt auf eine ringförmige Netzwerktopologie. Die Rechenleistung der CML65 erlaubt die simultane Steuerung von bis zu 64 Achsen (virtuell und real). Vordefinierte Funktions- und Technologiebausteine ermöglichen eine schnelle Inbetriebnahme und Parametrierung von Wickelachsen, Bahnzugreglern oder Andruckmechaniken.

Bild 5.1 zeigt CAD-Modell und Fotografie der Rolle-zu-Rolle-Produktionsplattform in der Konfiguration für den UV-Imprint-Replikationsprozess. Diese besteht aus den drei Modulen: Abwickler, UV-Imprint und Aufwickler. Die Module sind als Rahmenkonstruktionen aus Aluminium-Konstruktionsprofilen ausgeführt. Der Rahmen ist in vier Sektionen unterteilt. Wie in Bild 5.1 zu erkennen, befindet sich im oberen Teil der dem Bediener zugewandten Modulseite, der Prozessraum. Umlenk-, Sensor- oder Bearbeitungswalzen sowie weitere Baugruppen sind an der Maschinenwand befestigt und ausgerichtet. In der dahinterliegenden Sektion ist Raum für Antriebsmotoren und weitere Aktorik vorgesehen. Unterhalb des Prozessraums befinden sich periphere Komponenten wie das Lackfördersystem und die Bedieneinheit des UV-Strahlers sowie Stauraum für Folienmaterial. Die hintere, untere Sektion dient als Schaltschrank. Der Prozessraum ist durch sicherheitstechnisch überwachte Falttüren von dem Bediener abgekapselt. LED-Leisten oberhalb der Türen zeigen dem Bediener durch Farbcodierung die Maschinenzustände an. Unterhalb der Türen sind entlang der gesamten Modullänge Schalleisten angebracht, die als Not-Aus-Schalter fungieren. Auf der Oberseite der Module ist eine Führungsschiene montiert, an der das Bedienpult entlang der Maschine geführt werden kann. Somit kann auch bei Konfigurationen mit großer Länge an jedem Ort der Maschinenstatus abgelesen, auf die Bedienoberfläche zugegriffen oder ein Not-Aus ausgelöst werden. Die Maschinenfüße sind eine Kombination aus Gewindefuß zur Nivellierung der Maschine und Schwerlastrollen. Bei eingedrehten

Gewindefüßen steht ein Modul auf den Schwerlastrollen und lässt sich ohne Hubwagen oder Gabelstapler positionieren bzw. in eine andere Maschinenkonfiguration rollen.

Jedes Modul ist dazu in sich ausgerichtet. Die Walzen und Rollen eines Moduls sind parallel zueinander positioniert. Bahnlauffehler durch ungleiche Spannungsverteilungen über den Bahnquerschnitt werden durch die exakte Orientierung der bahnführenden Elemente vermieden. Überdies sind die Übergabehöhe der Materialbahn und der nominale Abstand der Bahnmitte zur Maschinenfront für alle Module vorgeschrieben.

Zur Zusammenstellung einer Anlagenkonfiguration werden die Module durch Ausrichtung der Gestelle vorpositioniert. Das erste Modul, der Abwickler, wird mit Maschinenwasserwaagen über die Gewindefüße von den Schwerlastrollen in einen festen, ausnivellierten Stand gebracht. Die Feinpositionierung der weiteren Module erfolgt über die Ausrichtung der ersten Rolle/Walze des neuen Moduls zur letzten Walze des Vorgängermoduls. Die Konfiguration wird abschließend mit Flanschblechen stabilisiert.

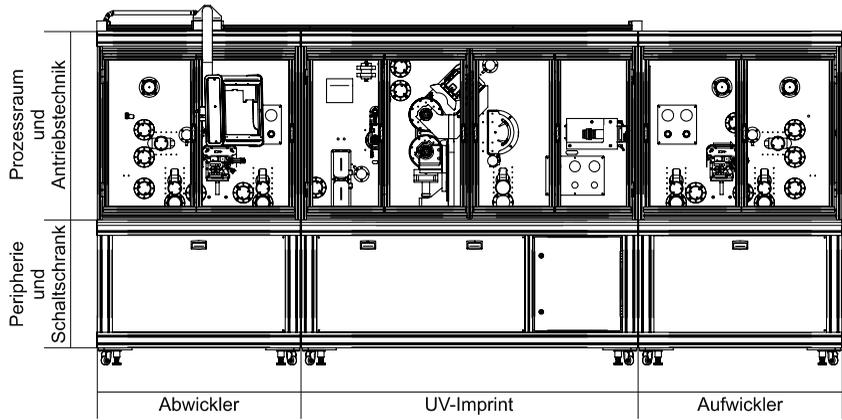


Bild 5.1: Modulare Rolle-zu-Rolle-Produktionsplattform in UV-Imprint-Konfiguration
Modular roll-to-roll production platform configured for UV-imprint processes

Spannungs- und Druckluftversorgung sowie der Signalaustausch werden über Steckverbindungen von Modul zu Modul übertragen. Zentrales Element ist das obligatorische Abwickler-Modul. Hier befinden sich die bauseitigen Anschlüsse zur Spannungs- und Druckluftversorgung sowie die Motion-Logic-Steuerung und ein 24V-Netzteil. Die Versorgung der Leistungselektronik (3-phasig, 400V) sowie die 24V-Versorgung werden über Steckverbindungen an Anfang und Ende eines jeden Moduls durchgeleitet. Es wird ein konfektionierbares Steckersystem der Fa. Harting verwendet. Gleiches gilt für den Ethernet-basierten Sercos-III-Bus, dessen Ringtopologie durch ein separates, steckbares Verbindersystem erzeugt wird. Die Druckluftversorgung ist als erweiterbare Zentralleitung über alle Module angelegt. Vakuum wird im Bedarfsfall dezentral durch Vakuumgeneratoren in den Modulen erzeugt.

Die Steuerung der Produktionsplattform ist ebenfalls nach dem „Plug-And-Produce“-Gedanken konzipiert. Bei Inbetriebnahme einer neuen Konfiguration sind die zu verwendenden Module in der Steuerung auszuwählen. Abläufe und Busteilnehmer jedes Moduls sind im Hauptprogramm der Produktionsplattform hinterlegt. Über die Vorwahl (vgl. Bild 5.2, „Anlagenkonfiguration“) der Module werden die Busteilnehmer modulweise aktiviert bzw. deaktiviert. Nach Bestätigung der Vorwahl wird der Sercos-III-Bus gemäß der Vorwahl implementiert und die modulspezifischen Benutzeroberflächen im HMI (deutsch: Mensch-Maschine-Schnittstelle) aktiviert. Auf Abweichungen zwischen Hardware- und Software-Konfigurationen wird der Bediener hingewiesen.

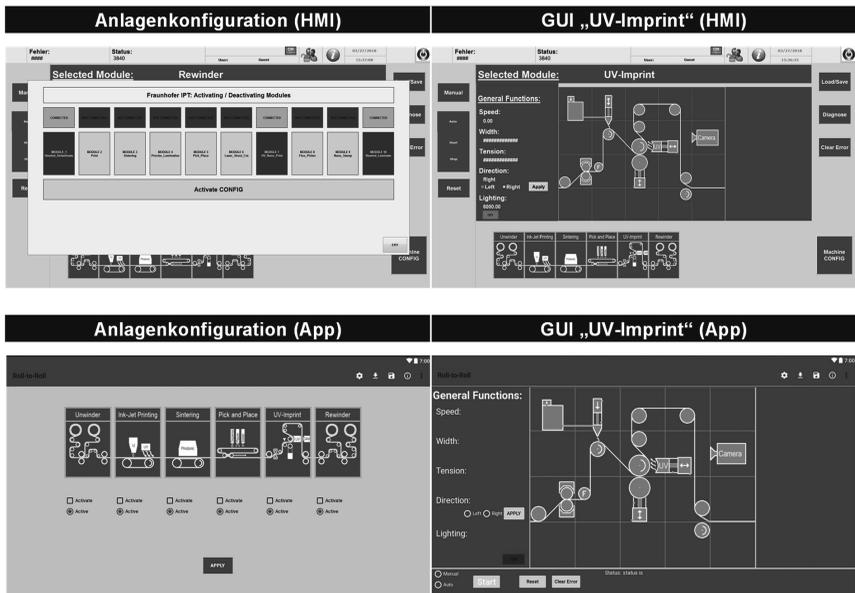


Bild 5.2: Bedienoberflächen der Rolle-zu-Rolle-Produktionsplattform
Operator interface of the roll-to-roll production platform

Die Bedienung der Produktionsplattform kann über das HMI an der Maschine oder per Android-App auf einem entsprechenden Endgerät (W-LAN-fähiges Tablet) erfolgen.

Jedes Modul ist über eine separate Bedienoberfläche zu steuern. Bild 5.2 zeigt die Benutzeroberfläche für das UV-Imprint-Modul am Bedienpult (rechts oben) und in der Android-App (rechts unten). Jedes Modul ist vereinfacht grafisch dargestellt. Handfunktionen und Parametereingaben werden durch Anklicken der Unterbaugruppen ausgewählt. Der Zugriff auf generelle Funktionen wie beispielsweise Bahngeschwindigkeit, Produktionsmodus (manuell/automatisch) oder Fehler-Reset erfolgt über Bedienfelder an der linken Seite der GUI (deutsch: grafische Benutzeroberfläche). Diese werden unabhängig von der Einblendung eines bestimmten Funktionsmoduls permanent angezeigt. Die Einstellung dieser Parameter ist modulübergreifend.

5.2 Ab- und Aufwickler

Un- and rewinder

Ab- und Aufwickler sind mit identischen Komponenten ausgestattet. Auf Grund ihrer Funktion sind die Module von der Abfolge der Teilprozesse spiegelsystemmetrisch aufgebaut. Daher wird im Folgenden lediglich der Aufbau des Abwicklers vorgestellt. Im Schaltschrank des Abwicklers, als Basismodul eines jeden Prozesses, sind zusätzlich die Steuerung sowie ein Industrie-PC und die Anschlüsse für die Medienversorgung untergebracht. Bild 5.3 zeigt die Maschinenwand des Abwicklers mit sämtlichen Komponenten.

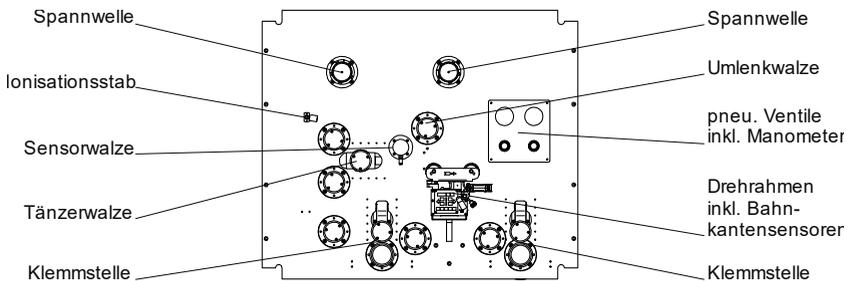


Bild 5.3: Aufbau des Abwickler-Moduls (vereinfachtes CAD-Modell)

Setup of the unwinding module (simplified CAD model)

Das Modul verfügt über zwei Wickelwellen. So kann, simultan zur Förderung der Trägerfolie, eine Schutzfolie abgezogen bzw. aufkaschiert werden. Die Wellen verfügen über pneumatisch betätigte, zentrisch spannende Spannleisten zur Fixierung der Folienwickel und der Kraftübertragung (vgl. Bild 5.3, „Spannwellen“). Jede Spannwellen wird von einem Servomotor mit Präzisionsgetriebe angetrieben. Folienwickel mit einem Kerninnendurchmesser von 3“ (~76 mm) und einem Außendurchmesser bis zu 340 mm lassen sich aufnehmen. Das entspricht rund 800 lfm einer 100 µm starken Folie. Das Wickelverfahren auf einer Welle wird als Zentralwickler bezeichnet [SIEM13]. Der Verlauf der Materialbahn ist in Züge unterteilt. Als Zug oder Zone wird der Abschnitt zwischen einem Wickler und einer Klemmstelle oder zwischen zwei

Klemmstellen bezeichnet, in dem die Bahnspannung unabhängig von anderen Bahnabschnitten eingestellt werden kann. Die Bahnspannung wird im linken Zug durch eine direkte Zugregelung mit servo-pneumatischem Tänzer erzeugt. Im rechten Zug wird die direkte Zugregelung mit einer Zugsmessdose („Sensorwalze“) realisiert. Eine indirekte Zugregelung alleine über das Motormoment bzw. den Motorstrom liefert eine unzureichende Kontrolle der Bahnspannung. Daher wurde dieser Regelungsansatz nicht realisiert, obgleich er ökonomisch günstiger und konstruktiv einfacher ist.

Klemm- oder Nip-Stellen (engl.: Walzenspalt oder kneifen, zwicken, quetschen) dienen der Bahnzugentkopplung. Sie sind in der Rolle-zu-Rolle-Produktionsplattform als einseitig gelagertes Walzenpaar ausgeführt. Der Abwickler verfügt über zwei Klemmstellen (vgl. Bild 5.3, unten). Die untere Walze ist in ihrer Position fix. Zur Korrektur ihrer horizontalen und vertikalen Ausrichtung ist sie über Positionierschrauben zu manipulieren. Sie rotiert mittels eines getriebelosen Servomotors. Mit der oberen Walze wird die Klemmkraft aufgebracht. Sie wird mit pneumatischen Zylindern angedrückt oder in eine berührungsfreie Parkposition gefahren. Geringfügige Geschwindigkeits-Offsets zur Ist-Bahngeschwindigkeit am Umfang der angetriebenen Klemmwalze erhöhen bzw. reduzieren die Bahnspannung im vor- und nachgelagerten Zug. Die Klemmkraft ist manuell über pneumatische Regelventile (s. Bild 5.3, rechts Mitte) einstellbar.

Polymerfolien laden sich durch Reibung beim Ab- und Aufwickeln elektrostatisch auf. Schmutzpartikel aus der Umgebung werden vermehrt angezogen und gelangen in die nachgelagerten Bearbeitungsprozesse. Zudem können elektrostatische Entladungen elektronische Bauteile in der Maschine beschädigen. Die installierten Gleichstrom-Ionisationsstäbe erzeugen ionisierte Luftströme. Die positiven und negativen Ionen neutralisieren die Aufladung der Folien.

Ein Drehrahmen mit zwei Ultraschall-Bahnkantensensoren korrigiert Bahnlauf- und Wickelfehler. Die Ultraschallsensoren lösen die Position einer Bahnkante mit $\pm 0,02$ mm Genauigkeit auf [ERHA17]. Die Detektion beider Bahnkanten erlaubt die Regelung der Mittenposition des Materials. Die Folie wird den Folgeprozessen stets mit derselben Position der Bahnmitte übergeben. Die Regelgenauigkeit der Mechanik beträgt dabei $\leq \pm 0,1$ mm [ERHA18]. Die Genauigkeit der Regelung ist vom verwendeten Material abhängig und variiert bei Polymersubstraten auch mit der Dicke und der Transparenz des Materials.

5.3 UV-Imprint-Modul

UV imprint module

Beschichten, Strukturieren und Bestrahlen sind, wie in Abschnitt 2.1.2 dargelegt, die wesentlichen Prozessschritte der kontinuierlichen UV-NIL. In Unterkapitel 2.2 wurden produktionstechnische Ansätze zur konstruktiven Realisierung dieser Schritte vorgestellt. Überdies sind unterstützende Prozesse bzw. Funktionen wie Bahnreinigung, Lackförderung, Inertisierung oder Qualitätssicherung im UV-Imprint-Modul umzusetzen. Lösungsoptionen zu deren Ausführung sind im morphologischen Kasten (Bild 5.4)

zusammengefasst. Der eingezeichnete Pfad zeigt die finale Kombination aus den möglichen Teillösungen für das UV-Imprint-Modul.

	Lösungsvarianten			
Bahnzugregelung	Tänzerwalze inkl. Sensor	Klemmstelle inkl. Sensor		
Bahnreinigung	berührend	kontaktlos		
Ionisation	berührend	kontaktlos		
Auftragseinheit	Rakel	Walzenauftrag	Spritzen	Schlitzdüse
Krafterzeugung	Pneumatisch	Hydraulisch	Elektrisch	
Prägezylinder	Wrap-Around	Sleeve	Direktstruktur	
Temperierung	Keine	Wasser	Öl	
UV-Strahlquelle	Elektronenstrahl	Gasentladung	LED	Excimer
Inertisierung	Keine	Stickstoff	Argon	
Lackförderung	Zahnringpumpe	Schlauchpumpe	Druckbehälter	Membranpumpe
Bahninspektion	Flächenkamera	Zeilenkamera	Ellipsometrie	OCT

Bild 5.4: Morphologischer Kasten für die Konzeption des UV-Imprint-Moduls
Morphological box for the conception of the UV imprint module

Die Bahnzugregelung erfolgt direkt über Klemmstellen und Zugmessdosen. Umlenkwalzen, Klemmstellen und Sensorwalzen sind gleich denen in Ab- und Aufwickler. Das in Bild 5.5 gezeigte UV-Imprint-Modul ist in vier Baugruppen aufgeteilt. Die Ausführung von Bahnreinigung, Laufauftragseinheit, Replikationseinheit und Bahninspektion wird in den folgenden Abschnitten beschrieben.

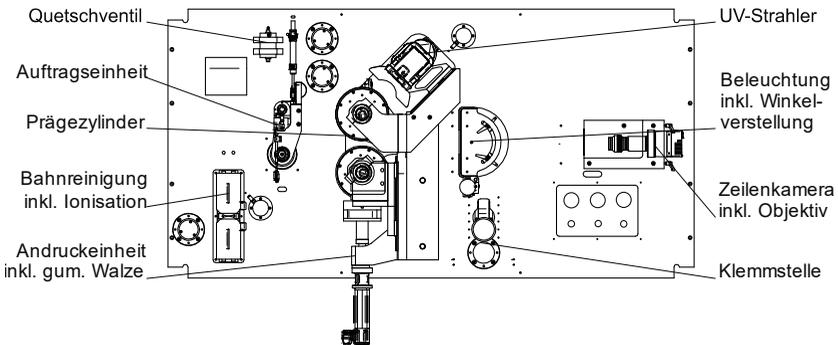


Bild 5.5: Aufbau des UV-Imprint-Moduls (vereinfachtes CAD-Modell)
Setup of the UV imprint module (simplified CAD model)

5.3.1 Reinigung und Deionisierung

Cleaning and deionization

Zur Reinigung der Polymersubstrate wird ein Mini-Web-Cleaner MWC 300 der Fa. Teknek verwendet. Das System reinigt die Folien beidseitig. Schmutzpartikel werden von einer gummierten, permanent klebrigen Walze aufgenommen und auf eine zweite Walze übertragen. Diese trägt einen Sleeve mit mehreren Klebefilmschichten, die bei starker Verschmutzung abgezogen bzw. erneuert und entsorgt werden. Die Reinigungsfunktion ist zuschaltbar. Im Gegensatz zu berührungslosen Alternativen wie einem Luftmesser, werden Schmutzpartikel direkt gebunden und müssen nicht über eine Absaugung abgeführt werden. Ionisationsstäbe am Ausgang der Einheit neutralisieren eine etwaige elektrostatische Aufladung und verhindern das Anhaften neuer Schmutzpartikel.

5.3.2 Lackauftragseinheit

Coating unit

Der UV-härtende Lack wird mit einer (Breit-)Schlitzdüse aufgetragen (vgl. Abschnitt 2.2.2). Die Schlitzdüse ist aus zwei Hälften aufgebaut, zwischen die Maskenbleche unterschiedlicher Dicke eingelegt werden. Die Schlitzhöhe h_{Schlitz} (s. Bild 2.18) ist gleich der Dicke des eingelegten Maskenblechs. Sie ist der Ausbringungsmenge und den rheologischen Eigenschaften des Lacks anzupassen. In dieser Arbeit wird eine Konstruktion aus einer Al-Legierung verwendet. Das Fließverhalten wurde durch die UP-Diamantbearbeitung der innenliegenden Flächen im Fly-Cutting-Verfahren optimiert. Für eine gleichmäßige Druckverteilung im Reservoir wird der Lack an zwei Punkten in diese Düse gefördert.

Das Foliensubstrat wird mit einer 90°-Umschlingung über eine Gegenwalze geführt, um den Einfluss von Welligkeiten, Vibrationen oder anderen Bahnauffehlern zu vermeiden. Die Beschichtung erfolgt in der 12-Uhr-Position auf dem Scheitelpunkt der Gegenwalze (s. Bild 5.6). Sowohl Bead- als auch Curtain-Coating-Methode sind ausführbar (vgl. Abschnitt 2.2.2, S. 31). Die Düse kann für das Curtain-Coating über einen pneumatischen Zylinder von der Gegenwalze abgefahren werden. In der oberen Position ist sie bis zu 180° schwenkbar, um die Lackzuführung entlüften zu können.

Die Einstellung des Beschichtungsspalts für die Bead-Coating-Methode erfolgt über Mikrometerschrauben an den Seiten der Düse. Sie wirken der Kraft des pneumatischen Zylinders entgegen, verspannen das System und ermöglichen somit eine spielfreie Feinpositionierung der Düse. Die Spalthöhe wird über tastende Sensoren abgefragt (Distanzmessstifte). Die eingesetzten digitalen Messtaster der Fa. Keyence bieten eine Messgenauigkeit von $\pm 1 \mu\text{m}$ bei einer Auflösung von $0,1 \mu\text{m}$ [KEYE16].

Die Lackzuführung erfolgt über ein Zeit-Druck-Fördersystem. Das Material wird in einem Druckbehälter mit wechselbaren Einsätzen bevorratet. Der Förderdruck wird über ein digitales, pneumatisches Druckregelventil eingestellt. Der Regelbereich liegt zwischen 0 – 6 bar und ist in Schrittweiten von 1 mbar gestuft. Der Druckbehälter kann

über einen Vakuumpgenerator in einen Unterdruckzustand versetzt werden. Die Evakuierung des Behälters dient der Entgasung des Lackmaterials vor der Ausbringung. Ein unmittelbarer Anlauf der Beschichtung und ein kurzweiliges Nachlaufen werden durch ein Quetschventil gewährleistet. Dieses sperrt bzw. öffnet die Lackzufuhr unabhängig vom Zustand des Druckbehälters. Versuche mit Mikrozahnring-, Membran- und Schlauchpumpen stellten diese als ungeeignet heraus. Prinzipbedingt sind sie entweder nicht pulsationsfrei, erreichen nicht die erforderliche Fördermenge oder setzen das Material hohen Scherkräften aus, wodurch eine mechanisch induzierte Aushärtung ausgelöst wird.

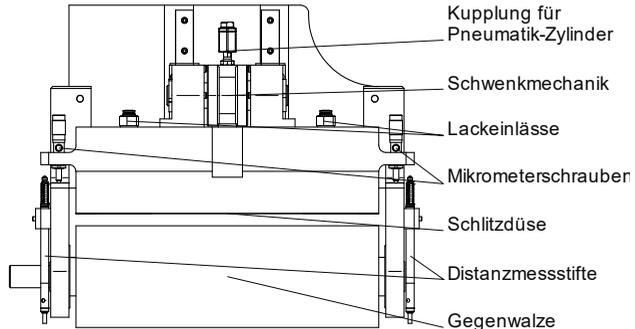


Bild 5.6: Lackauftragseinheit mit Schlitzdüse

Coating unit with slot die

Die initiale Beschichtungshöhe h_0 wird mit einem chromatisch-konfokalen Messkopf der Precitec GmbH & Co. KG direkt gemessen. Der Dickenmessbereich des Messkopfs beträgt $\leq 450 \mu\text{m}$ ($n = 1,5$). Mit einer Abtastrate von $\leq 4.000 \text{ Hz}$ ist auch bei Bahngeschwindigkeit von bis zu 20 m/min eine schnelle Messung zur Regelung des Förderdrucks gegeben. [PREC18a, PREC18b] Nachteilig ist, dass die Dicke von Lackauftrag und Foliensubstrat gemessen wird, wenn die Brechungsindizes von Lack und Substrat ähnlich sind. In diesem Fall sind die Messsignale mit einem interpolierten Brechungsindex auszuwerten, der in Vorversuchen zu ermitteln ist. Zudem kann das Messverfahren nur für transparente Lacke angewendet werden. Intransparente, scherschleibende Medien können mit einem Volumenstrahmsensor dosiert werden. Die Beschichtungshöhe h_0 ist über die Gleichung (4.1) indirekt zu bestimmen. Hierzu steht ein Durchflusssensor mit einer Auflösung von $0,0125 \text{ ml}$ zur Verfügung [VSE13].

5.3.3 Replikationseinheit

Replication unit

Die Replikationseinheit besteht aus den Unterbaugruppen UV-Strahlquelle, Prägezyylinder und Andruckeinheit (vgl. Bild 5.7). Sie führt die anfänglich erwähnten Prozesse Strukturieren und Bestrahlen aus.

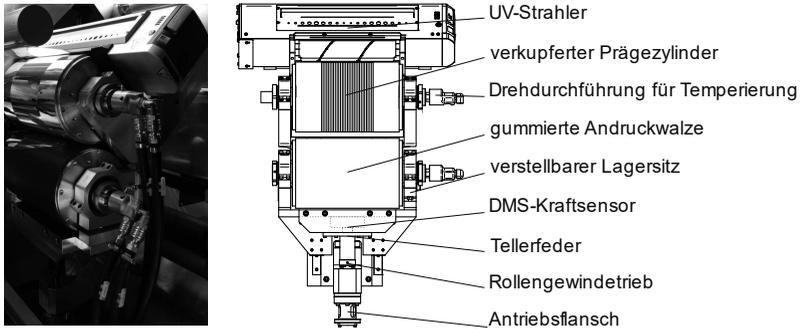


Bild 5.7: Andruckeinheit mit UV-Strahlquelle
Imprinting unit with UV light source

Die UV-Strahlquelle ist ein luftgekühltes Hybridsystem der IST Metz GmbH. Konventionelle UV-Lampen oder UV-LEDs sind in Einschubkassetten verbaut und lassen sich ohne Wechsel des Vorschaltgeräts gegeneinander austauschen. Aufgrund der hohen Leistungsdichte und des breitbandigen Strahlungsspektrums wird eine undotierte Quecksilber-Dampflampe mit einer maximalen Leistungsaufnahme von 145 W/cm eingesetzt. Besonders im UV-C Bereich weist diese Lampe eine hohe Emission auf [IST17a]. Bild 5.8 zeigt die Verteilung der Bestrahlungsstärke über das Spektrum der Leistungsaufnahme.

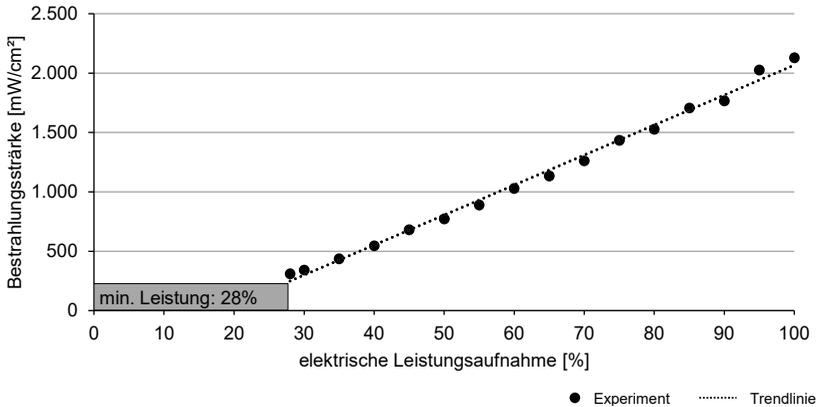


Bild 5.8: Leistungsspektrum der UV-Lampe (gemessene Daten)
Performance of UV light source (measured data)

Die Bestrahlungsstärke skaliert linear mit der elektrischen Leistungsaufnahme. Die Werte wurden mit einem mobilen UV-Messgerät UMS-2 der Fa. Eta Plus über eine Messlanze im Beschichtungsprozess aufgenommen. Die Kommunikation zwischen Lampensteuerung und Produktionsanlage ermöglicht die automatische Anpassung der Bestrahlungsstärke bzw. Leistungsaufnahme bei wechselnder Bahngeschwindigkeit.

Die Größe des Prägezyinders ist auf eine Länge von 300 mm und einen Durchmesser von 200 mm begrenzt. Die maximale Formatlänge für Wrap-Around-Molds beläuft sich somit auf ca. 628 mm. Durch konstruktive Anpassungen der Lagersitze und der UV-Einheit können kleinere Walzen aufgenommen werden. Sowohl der Prägezyinder als auch die gummierte Andruckwalze sind beidseitig gelagert. Die Position der Lagersitze ist zur präzisen Einstellung der Kraftverteilung im Prägespalt nach dem Einbau des Prägezyinders justierbar. Beide Walzen können über eine Drehdurchführung für Kühlwasser temperiert werden. Die Prägewalze ist mit einem getriebelosen Servomotor verbunden, während die Andruckwalze passiv angetrieben wird. Das Foliensubstrat umschlingt die Prägewalze in einem Winkel von 180°. In der 6-Uhr-Position (unterer Scheitelpunkt) wird das beschichtete Substrat angedrückt. Die Aushärtung findet durch das Substrat hindurch zwischen der 3-Uhr- und der 12-Uhr-Position statt. Eine Inertisierung der Prozessatmosphäre ist nicht vorgesehen, da sich der UV-Lack zum Zeitpunkt der Aushärtung zwischen Prägezyinder und Folie befindet und somit von der vorherrschenden sauerstoffhaltigen Atmosphäre abgekapselt ist.

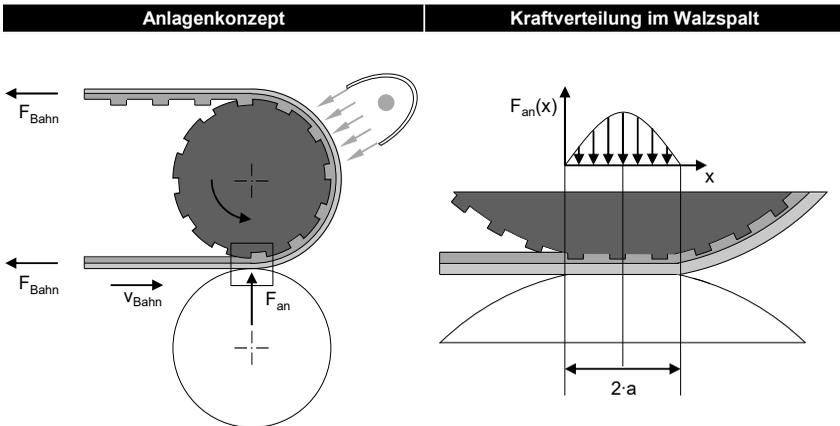


Bild 5.9: Schematische Darstellung der Verteilung des Prägekraft F_{an} im Walzspalt
Schematic illustration of imprinting pressure distribution by the compressive normal force F_{an}

Durch die 180°-Umschlingung wirken zwei Kräfte auf den flüssigen Lack ein (vgl. Bild 5.9). Zum einen die Andruckkraft F_{an} im Walzspalt. Entsprechend der Hertz'schen Kontakttheorie erwirkt diese Kraft eine Abflachung der Walzenradien sowie eine parabel-förmige Kraftverteilung im Walzspalt. Für den dynamischen Fall ist die einwirkende Kraft somit eine zeitabhängige Größe. Zum anderen erzeugt die Bahnspannung des Substrats, wie in Bild 5.9 gezeichnet, eine ebenfalls ungleichmäßig verteilte Andruckkraft F_{Bahn} auf den Lack. Diese existiert im Bereich der Umschlingung von 6 bis 12 Uhr und nicht in der Kontaktzone. Hier beträgt der Winkel zwischen dem Substrat und der Flächennormalen der Walze 90°. Die Bahnzugkraft verläuft tangential zu den Walzenoberflächen und besitzt keine radiale Komponente. Für den Füllvorgang in der Kontaktzone ist der Einfluss der Bahnspannung somit zu vernachlässigen.

Position und Andruckkraft der gummierten Andruckwalze werden über einen Servomotor mit Rollengewindetrieb vorgegeben. Beide Kennwerte werden über externe Sensoren gemessen. Zur Lageregelung wird ein gekapselter Linearmaßstab der Genauigkeitsklasse $\pm 3 \mu\text{m}$ eingesetzt [HEID17]. Die Prägekraft wird mittels DMS-Kraftsensor der Fa. Kistler im Übergang von der Spindelmutter zum Schlitten gemessen. Der Messbereich des Sensors liegt bei 0 bis 2 kN mit einer Messgenauigkeit von $\leq \pm 0,2\%$ FSO [KIST11]. Replikationsprozesse können wahlweise mit Lage- oder Kraftregelung durchgeführt werden.

Im Rahmen der Charakterisierung des Rolle-zu-Rolle-UV-NIL-Entwicklungsprüfstands wurde die Abflachung der Walzenpaarung ermittelt. Wie Bild 5.10 zeigt, ist diese mit steigendem Andruck degressiv. Zur Charakterisierung wurden PreScale-Druckmessfolien der Fa. Fujifilm der Stufe „Ultra Super Low (LLLW)“ eingesetzt. Sie reagiert farbwechselnd auf Drücke von 0,2 – 0,6 N/mm².

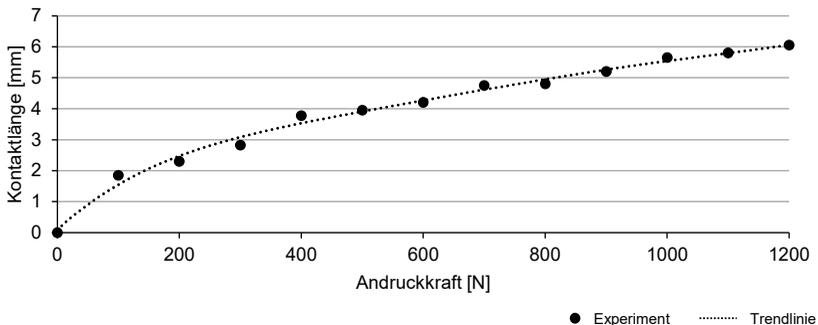


Bild 5.10: Abflachung der Walzenradien in der Kontaktzone durch Hertz'sche Pressung
Flattening of drum radia within the contact area by Hertzian stress

5.3.4 Bahninspektion und Qualitätssicherung

Web inspection and quality control

Für eine erste Bewertung des Replikationsergebnisses wird eine optische Bahninspektion vorgenommen. Die Inspektionseinheit setzt sich aus einer Zeilenkamera mit zwei bi-direktionalen Zeilenbeleuchtungen zusammen (Bild 5.11). Die Kamera der Fa. Teledyne Dalsa verfügt über einen monochromen CMOS-Multi-Line-Zeilensensor mit 16.352 Bildpunkten auf einer Sensorlänge von 81,8 mm (Pixelgröße: 5 μm). Die maximale Zeilenfrequenz beträgt 125 kHz, wodurch kontinuierliche Aufnahmen bei ≥ 20 m/min möglich sind [BERG16].

Die Bildfrequenz wird über einen externen Trigger vorgegeben. Das TTL-Signal eines hochauflösenden Encoders wird über den Framegrabber der Kamera ausgewertet. Der Encoder ist an eine gummierte Laufwalze angeflanscht. Eine zweite Walze presst das Foliensubstrat mittels Federkraft an, wodurch sichergestellt wird, dass bei Vibrationen der Bahn oder Schwankungen der Bahnspannung stets ausreichend Reibkraft

vorhanden ist, um die Geschwindigkeit der Bahn verlustfrei auf den Encoder zu übertragen.

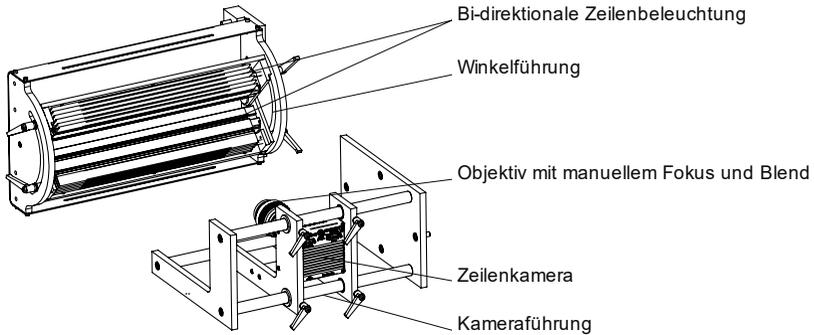


Bild 5.11: Bahninspektionseinheit mit Dunkelfeldbeleuchtung
Vision inspection system and dark field illumination

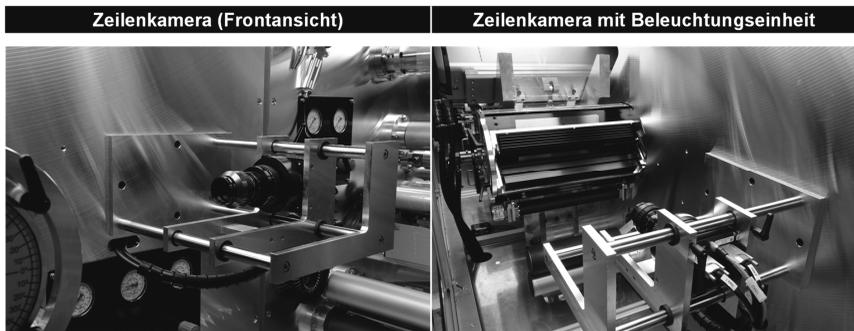


Bild 5.12: Bahninspektions- und Beleuchtungseinheit im installierten Zustand
Vision inspection and illumination system installed

Das optische System verfügt über einen einstellbaren Fokus und kann mit zwei Objektiven unterschiedlicher Vergrößerung aufgebaut werden. Ein Objektiv mit 0,33-facher Vergrößerung ermöglicht die Abbildung einer 327 mm breiten Linie auf dem Kamera-Chip. Die Qualität des Folienmaterials kann so über die gesamte Breite bewertet werden. In der zweiten Konfiguration projiziert ein Objektiv mit 0,76x-facher Vergrößerung einen Bereich von 96,9 mm auf den Chip. Die Auflösung eines Bildpunkts liegt somit rechnerisch bei 15,2 μm bzw. 6,6 μm . Die verwendeten Objektive sind für eine Kombination mit hochauflösenden Zeilenkameras mit einer Pixelgröße von 5 μm optimiert. Die Auslegung hinsichtlich einer idealen Abbildungsgüte (Kontrastübertragung, Verzerrung) erfolgte in Zusammenarbeit mit dem technischen Support der Stemmer Imaging AG. Makroskopische Defekte wie Blaseneinschlüsse, Verschmutzung oder Lackablösungen (vgl. Abschnitt 4.1) sind so zu detektieren. Eine Bewertung des Replikationsergebnisses hinsichtlich geometrischer Kennwerte ist nicht möglich.

Die Belichtung des Bildbereichs ist mit zwei quer zur Bahnaufrichtung installierten, bi-direktionalen Zeilenbeleuchtungen der Fa. CCS Inc. realisiert. Sie können kontinuierlich oder gepulst betrieben werden. Das Bild wird im Spalt zwischen den Leuchten aufgenommen. Sie werden als bi-direktional bezeichnet, da die integrierten, optischen Elemente das emittierte Licht so lenken, dass es nicht frontal, sondern von zwei Seiten schräg auf die Folienbahn trifft [CCS15]. Es entsteht eine Dunkelfeld-Beleuchtung mit der besonders die Kanten transparenter Elemente gut sichtbar werden. Intensität und Dauer der Beleuchtung sind über ein programmierbares Vorschaltgerät anzupassen. Über eine einfache Winkelführung kann der Einfallswinkel jeder Einheit zwischen 0° und 60° zur Normalen der Folienebene variiert werden.

5.4 Regelungskonzepte

Control concepts

Die Grundfunktion eines folienverarbeitenden Systems ist die Gewährleistung eines gleichmäßigen Bahnlaufs. Verschiedene Regelungskonzepte können angewandt werden, um diesen zu ermöglichen. In Abhängigkeit vom konstruktiven Aufbau werden mehrere Konzepte innerhalb einer Anlage umgesetzt.

Für die Aufbringung der Prägekraft im Walzspalt existieren ebenfalls unterschiedliche Konzepte. Beide können im Rolle-zu-Rolle-Entwicklungsprüfstand für die Erforschung der UV-NIL eingesetzt werden.

5.4.1 Bahnzugregelung

Web tension control

Für ein gutes Replikationsergebnis ist eine robuste und präzise Regelung von Bahngeschwindigkeit und Bahnspannung im gesamten Produktionssystem entscheidend. Göb [GOEB12] unterscheidet in seiner Dissertation zwischen den Regelungskonzepten:

- **Downstream-Regelung**
Es wird ausschließlich die hintere, einen Bahnzug begrenzende Klemmstelle oder Wickeleinheit als Stellglied zur Regelung der Bahnzugkraft verwendet. Die vorgelagerte Einheit - Klemmstelle oder Wickler - wird nicht für die Regelung des Bahnabschnitts benötigt und kann, falls diese nicht als Stellglied des vorangehenden Bahnabschnitts dient, konstant mit der stationären Arbeitspunktgeschwindigkeit betrieben werden.
- **Upstream-Regelung**
Es wird ausschließlich die vordere, einen Bahnzug begrenzende Klemmstelle oder Wickeleinheit als Stellglied zur Regelung der Bahnzugkraft verwendet. Die nicht geregelte Klemmstelle wird analog wie bei der Downstream-Regelung betrieben.
- **Differenz-Regelung**
Es werden sowohl die vordere als auch die hintere begrenzende Einheit als Stellglied zur Regelung der Bahnzugkraft verwendet.

Bild 5.13 stellt die Konzepte in vereinfachten Blockschaltbildern dar.

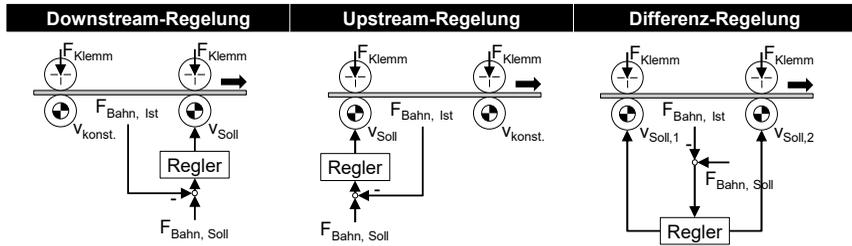


Bild 5.13: Ansätze zur Regelung der Bahnspannung [GOEB12]

Approaches for web tension control

In der Maschinenkonfiguration für UV-Imprint-Prozesse werden die beiden ersten Konzepte genutzt. Das Produktionssystem wird durch drei Klemmstellen in vier unabhängig regelbare Bahnspannungszonen unterteilt (vgl. Bild 5.14). Am Ende des Abwickler- und des UV-Imprint-Moduls wird die Substratbahn jeweils durch eine Klemmstelle geführt. Zusätzlich fungiert die Kombination aus Präge- und Andruckwalze im geschlossenen Zustand als Klemmstelle. Die Bahnzugkraft wird in allen vier Zonen über Kraftmesswalzen (S) aufgenommen. In Zone 1 ist der Antrieb der Spannweite das Stellglied. Der Klemmstelle am Ausgang des Moduls wird eine konstante Bahngeschwindigkeit vorgegeben. Die Zone wird „upstream“ (engl.: stromaufwärts, vorgeschaltet) geregelt.

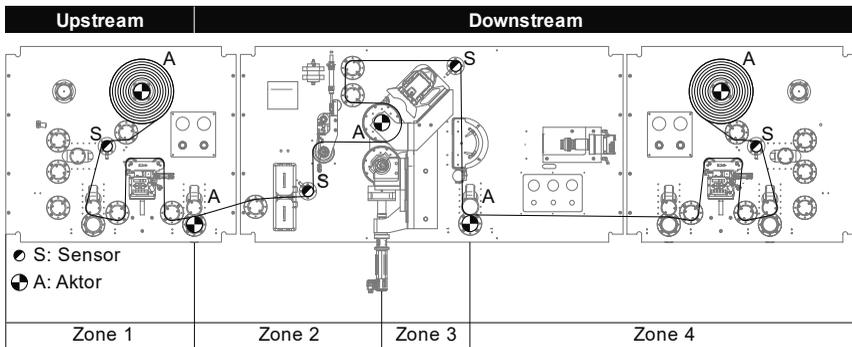


Bild 5.14: Umsetzung des zonalen Regelungskonzepts

Realization of the zonal control concept

In den weiteren drei Zonen ist der Sensor dem Stellantrieb vorgelagert. Hier wird eine Downstream-Regelung (engl.: stromabwärts, nachgeschaltet) genutzt. In Zone 2 wird die Bahnspannung über den direkt angetriebenen Prägezyylinder eingestellt. Eine Klemmstelle am Ausgang von Zone 3 dient für diesen Abschnitt als Stellglied. Zone 4 deckt den Bahnlauf vom Austritt aus dem UV-Imprint-Modul bis zur Wickelwelle des Aufwicklers ab. Stellglied ist die angetriebene Wickelwelle des Aufwicklers. Die Überwachung der Bahnzugkraft erfolgt hier über eine vorgelagerte Sensorwalze (S). Das

Antriebsmoment des Aufwicklers regelt zum einen die Bahnzugkraft im letzten Abschnitt. Zum anderen wird hierüber die Festigkeit des Materialwickels bzw. Spannungsverteilung im aufgewickelten Material beeinflusst.

Die Einstellung des Regelverhaltens erfolgt über die PID-Regler des jeweiligen Antriebs. Die verschiedenen Durchmesser der angetriebenen Wellen gehen als Übersetzungsfaktor ein. Für die Bestimmung des proportionalen Regleranteils ist die Masse bzw. die Massenträgheit der Walzen zu berücksichtigen. Die Parametrierung des Reglers der Prägeeinheit basiert auf Werten für einen mit Kühlwasser befüllten Zylinder. Die Funktion der beiden Wickelwellen in Ab- und Aufwickler ist durch einen vordefinierten Funktionsbaustein des Motion-Logic-Systems realisiert. Eine Besonderheit ergibt sich für diese Wellen aus dem zeitveränderlichen Trägheitsmoment sowie der zeitveränderlichen Winkelgeschwindigkeit. Durch das Ab- bzw. Aufwickeln des Bahnmaterials sind der Durchmesser und somit folglich die Masse der Materialrollen nicht über den gesamten Produktionsprozess konstant. Bahnzugkraft sowie Bahngeschwindigkeit haben ohne steuernde Eingriffe von außen (Bedienereingabe) jedoch über den gesamten Prozessverlauf unverändert zu sein. Die zeitlichen Veränderungen des Rollenfüllgrads müssen somit in der Parametrierung der Regler nachgehalten werden. Bei einem Materialrollenwechsel werden durch die Eingabe des tatsächlichen Rollendurchmessers über die Benutzerschnittstelle (HMI) die initialen Werte für den Geschwindigkeitsregelkreis der Ab- und Aufwicklung voreingestellt. Die Einstellung der Bahnspannung erfolgt über eine Initialisierungsroutine beim Start des Bahnlaufs. Vor dem Anlaufen der Bahn wird in allen Zonen die voreingestellte Bahnspannung aufgebaut. Die Bahnspannungssensoren geben eine Rückmeldung über den Ist-Wert der Bahnzugkraft. Die Veränderung der Durchmesser wird im weiteren Prozess berechnet und die Reglerparameter werden automatisch angepasst.

Zur Ermittlung idealer Reglerparameter wurden Studien mit verschiedenen Bahngeschwindigkeiten und unterschiedlichen Füllgraden der Materialrollen durchgeführt. Die Bewertung der Reglergüte erfolgte anhand der Tracing-Daten der Bahnspannungssensoren sowie der Antriebsgeschwindigkeiten. Nach Optimierung der Reglerparameter ist in allen Zonen eine Bahnzugregelung mit Schwankungen des Ist-Werts von ± 2 N erzielt worden.

5.4.2 Lage- und Kraftregelung

Position and force control

Die Regelung der Andruckkraft F_{an} bzw. des daraus resultierenden Anpressdrucks p_{an} im Walzspalt ist über zwei Konzepte zu realisieren. Zum einen ist eine direkte Kraftregelung möglich. Die zwischen dem Walzenpaar aus Präge- und Andruckzylinder wirkende Kraft wird über die im Kraftfluss befindliche Kraftmessdose aufgenommen und an den Antriebsregler der linearen Verstellachse übermittelt. Ein Funktionsbaustein verarbeitet die Eingangsgröße im Kraftregelkreis und reagiert auf Abweichungen vom vorgegebenen Sollwert mit Korrekturen der Achsposition.

Zum anderen ist die Position der Andruckwalze über den zusätzlichen Linearmaßstab präzise zu erfassen. Sein Signal wird ebenfalls direkt an den Antriebsregler der Linearachse übergeben. Ein Lageregelkreis korrigiert Abweichungen vom Sollwert. Die Andruckkraft wird indirekt beeinflusst und schwankt für eine Walzenposition mit der Höhe des Auftrags oder des tatsächlichen Walzspalts.

Die Auswirkungen von Kraft- und Lageregelung sind in Bild 5.15 dargestellt. Die obere Kurve zeigt den Verlauf der Andruckkraft. Die untere Kurve zeigt die Ausprägung des Walzspalts. Die Kurven wurden bei einer Bahngeschwindigkeit von 1 m/min über einen Zeitraum von 4 min. aufgenommen. Zunächst befindet sich das System in Kraftregelung. Die voreingestellte Kraft von 125 N wird mit Schwankungen von $\pm 0,75$ N um den Sollwert gehalten. Ab der zweiten Minute wird zur Lageregelung gewechselt. Der Walzspalt wird konstant mit 0,392 mm ausgegeben. Der Messschrieb des jeweils nicht geregelten Parameters weist periodische Schwankungen auf, deren Frequenz der Dauer einer Walzenumkehrung entspricht (37,70 s). Sie sind das Resultat der überlagerten Rundlauffehler von Prägezyylinder und Andruckwalze. Die Rundlauffehler der Walzen sind durch mechanische Überarbeitung nicht vollständig zu kompensieren.

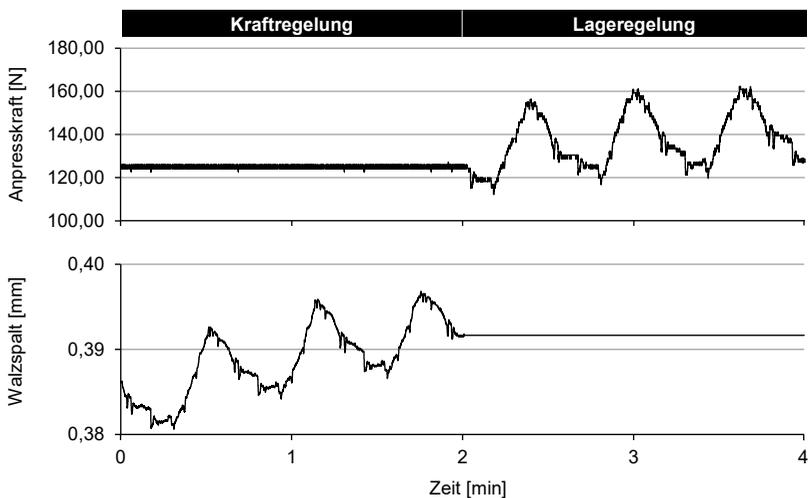


Bild 5.15: Kompensation von Rundlauffehlern und Fertigungstoleranzen durch Kraft- und Lageregelung ($v_{\text{Bahn}} = 1$ m/min)

Compensation of concentricity errors and manufacturing tolerances by force and position control ($v_{\text{Bahn}} = 1$ m/min)

Die Recherche zur Entstehung der Replikationsfehler lässt erwarten, dass die Veränderung der Andruckkraft F_{an} einen größeren Einfluss auf die Qualität des NIL-Prozesses hat, als die Regelung des Walzspalts (vgl. Kapitel 4). Für die folgenden Untersuchungen wird daher die Kraftregelung gegenüber der Lageregelung bevorzugt.

5.5 Zwischenfazit

Interim conclusion

Das Produktionssystem folgt dem modularen Gedanken. Jeder Kernprozess, wie z. B. die UV-Imprint-Lithografie, ist in einem Funktionsmodul gekapselt. Jedes Modul kann mechanisch, elektrisch und steuerungstechnisch nach dem Plug-And-Produce-Gedanken in eine bestehende Konfiguration eingebunden werden. Das UV-Imprint-Modul wurde ausgehend von den Ergebnissen der Literaturrecherche und bekannten Maschinenkonzepten eigens für die vorliegende Dissertation entwickelt. Der Fokus der Konstruktion liegt auf der Beherrschbarkeit bzw. der Überwachungs- und Steuerungsmöglichkeit der als ergebniskritisch identifizierten Parameter Substratgeschwindigkeit v_{Bahn} , Andruckkraft F_{an} , initialer Beschichtungshöhe h_0 , Bestrahlungsstärke E_{UV} und Temperierung T_{Lack} bzw. Viskosität η (T_{Lack}) des Lacks.

Das Funktionsmodul setzt sich aus den Baugruppen Bahnreinigungs-, Lackauftrags-, Replikations- und Inspektionseinheit zusammen. Die Substratgeschwindigkeit wird über Servo-Direktantriebe vorgegeben. Der Lack wird durch eine Schlitzdüse ausgebracht und die Beschichtungshöhe über einen nachlaufenden konfokalen Sensor ermittelt. Der Druck wird über einen Rollengewindetrieb von einem Servomotor erzeugt. Im Kraftfluss befindet sich eine DMS-Kraftmessdose, die ein direktes Feedback der Krafterwirkung liefert. Das Walzenpaar aus strukturiertem Prägezyliner und gummierter Andruckwalze ist wassergekühlt und kann bis zu einer Temperatur von 95°C erwärmt werden. Die Folienbahn ist mit der beschichteten Seite innenliegend in einer 180°-Umschlingung um die Prägewalze geführt. Eine Inertisierung der Aushärtungszone ist somit nicht erforderlich. Die Bestrahlung erfolgt durch das Substrat hindurch. Es wird eine undotierte Quecksilber-Dampfampe eingesetzt, die bedarfsweise gegen andere konventionelle Lampen oder LED-Einschübe auszutauschen ist. Das Replikationsergebnis kann inline über eine Zeilenkamera inspiziert werden.

Das System verfügt über die Möglichkeit einer zonalen Bahnspannungsentkopplung. In den einzelnen Zügen zwischen den Klemmstellen ist die Bahnzugkraft unabhängig von den nachgelagerten Bereichen wählbar. Zur Kontrolle der Andruckkraft im Walzspalt ist zwischen Lage- und Kraftregelung auszuwählen, wobei für die folgenden Versuche und in der bekannten Literatur die Kraftregelung eingesetzt wird.

Obgleich das System als Forschungsprüfstand entwickelt wurde, orientiert sich die Konstruktion an dem Vergleich mit industriellen Lösungen und dem Anspruch der Übertragbarkeit aller Lösungen in vermarktungsfähige Produktionsanlagen.

6 Empirische Untersuchung der Skalierbarkeit eines UV-NIL-Prozesses

Empirical study on the scalability of a UV-NIL process

Die Qualität einer replizierten Mikro- und Nanostruktur ist nach verschiedenen Kriterien zu bewerten. Das Ausbleiben einzelner Fehler (Abschnitt 4.1) ist ein solcher Bewertungsmaßstab. Grundsätzlich wird erwartet, dass die Materialkombination von Substrat und Lack so gewählt ist, dass die ausgehärteten Strukturen auf dem Substrat haften und nicht durch Biegen oder Knicken delaminieren (vgl. Bild 4.1, h.). Zudem wird vorausgesetzt, dass der UV-Lack durch eine moderate Bestrahlung vollständig (Vernetzung/Doppelbindungsumsatz), aber nicht übermäßig (Vergilbung, Bruch), aushärtet. Ein Arbeiten in sauberer Umgebung verhindert den Einschluss von Schmutzpartikeln.

Die Ausprägung einer Restschichtlage h_R ist ein Fehler, der durch geeignete Parameterfenster (vgl. Abschnitt 4.4) über einen beachtlichen Bereich einzustellen ist. In Abschnitt 4.3 sind analytische Ansätze vorgestellt, die zur Eingrenzung der Wertebereiche der verschiedenen Parameter heranzuziehen sind. Das Formelwerk basiert auf simulierten und empirisch ermittelten Ergebnissen verschiedener Forschergruppen. Eine Übertragbarkeit auf andere Strukturen, Walzen oder Maschinenkonzepte als die untersuchten ist nicht zwangsläufig gegeben. Eine generelle Herangehensweise zur Skalierung eines Rolle-zu-Rolle-Replikationsprozesses existiert nicht.

Ziel dieses Kapitels ist es daher, anhand eigener Untersuchungen mit dem Fokus auf der Beeinflussung der Restschichtlage, eine Vorgehensweise zur Optimierung des Replikationsergebnisses bei steigender Produktionsgeschwindigkeit zu erarbeiten. Auf Grund der Vielfalt an Materialien, Strukturen und Maschinenkonzepten, sind die gezeigten Daten als Entwicklungstrends und nicht als absolute Werte zu erachten.

Im Abschnitt 6.1 werden die Ausgangsbedingungen für die Versuchsdurchführung beschrieben. Folgend werden die Ergebnisse der Parameterstudien hinsichtlich ihres Einflusses auf die Restschichtlage (Abschnitt 6.2) vorgestellt. Die Auswertung eines vollfaktoriellen Versuchs zeigt die Wechselwirkungen zwischen den Parametern auf (Abschnitt 6.3) und identifiziert statistisch signifikante Parameter. Eine Ordnung der Parameter anhand der Größe ihres Einflusses wird vorgenommen. Hiervon wird eine Vorgehensweise zur Optimierung eines UV-Rolle-zu-Rolle-Prozesses abgeleitet (6.4). Eine Zusammenfassung der gewonnenen Erkenntnisse wird im Zwischenfazit gegeben (6.5).

6.1 Beschreibung der Rahmenbedingungen

Explanation of constraints

Das Replikationswerkzeug für die folgenden Versuche ist eine galvanisch mit Gravurkupfer (Härte: 210 – 230 HV) beaufschlagte, 300 mm breite Walze mit einem Durch-

messer von 200 mm. Die Mikrostrukturen sind mittig auf einer Breite von 150 mm eingebracht. Es werden V-Nuten mit einem Öffnungswinkel von 90° und einer Tiefe von $50\ \mu\text{m}$ eingebracht. Zwischen den Nuten sind keine Abstände vorgesehen (vgl. Bild 6.1), sodass der UV-Lack in keinem Bereich vollständig verdrängt wird. Ähnliche Strukturen finden als Diffusoren Anwendung in der Optik oder dienen als Riblets der Strömungsoptimierung von Oberflächen [HOU17, ABU18]. Die Nuten sind mittels UP-Diamantbearbeitung umlaufend und endlos direkt in den Kupferwerkstoff geschnitten.

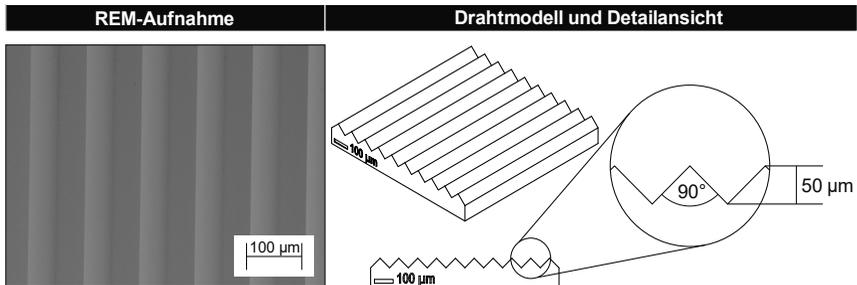


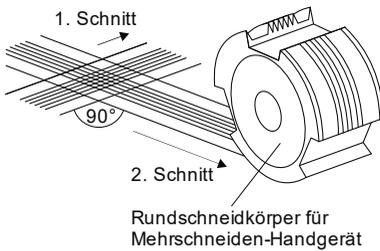
Bild 6.1: Diamant-bearbeitete, nahtlose V-Nuten-Strukturen (Riblets)

Diamond turned, seamless V-groove structures (riblets)

Das Substratmaterial ist eine 250 mm breite und $175\ \mu\text{m} \pm 4\%$ starke, hochtransparente PET-Folie der Mitsubishi Polyester Film GmbH. Die Transparenz wird vom Hersteller mit 91 % angegeben. Die Trübung beträgt bei der vorliegenden Materialstärke 0,7 %. [MITS16] Zur Verbesserung der Benetzungs- und Haftigenschaften ist das Material beidseitig mit einem Acryl-Copolymer beschichtet. Anhand von Vorversuchen wurde belegt, dass sich das Material ausreichend gut für die Durchstrahlung mit UV-Licht eignet und kaum Absorptionsverluste auftreten (spektrale Transmissionskurve).

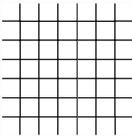
Der UV-Lack ist ein Standardprodukt für optische Anwendungen der Firma C-Coatings B.V.. Der acrylbasierte Lack hat eine stark temperaturabhängige Viskosität (vgl. Bild 4.5). Bei 25°C beträgt diese $405\ \text{mPa}\cdot\text{s}$ [CROM08]. Der Lack ist radikalisch polymerisierend und beinhaltet den Photoinitiator mit dem Handelsnamen Omnirad 4817. Seine Aktivierungswellenlängen liegen bei 231 nm und 307 nm. Der durchschnittliche Schrumpf bei Aushärtung wird vom Hersteller mit 7,5% angegeben [CROM09]. Entmischungprozesse und Alterung führen jedoch zu Abweichungen von diesem Wert. Eigene Messungen unmittelbar vor der Versuchsdurchführung ergaben einen Schrumpfungswert von 9,3 % [MATH18].

Die Haftungseigenschaften des UV-Lacks wurden in Gitterschnitttests nach DIN EN ISO 2409 [DIN13] überprüft. Alle Prüfdurchgänge zeigten eine sehr gute bis gute Haftung (Gitterschnittkennwert 0 – 1). Zur Durchführung der Prüfung wurde ein Mehrschneidengerät vom Typ Multi Cross Cutter Model 295 der Erichsen GmbH & Co. KG genutzt. In Bild 6.2 ist die Prüfvorschrift mit einem Mehrschneiden-Handgerät illustriert. Weiter ist für die Kennwerte 0 – 2 jeweils ein Anschauungsbeispiel sowie die Beschreibung der Fehlerbeurteilung nach Norm gegeben. Detailliertere Informationen finden sich in der Normschrift [DIN13].

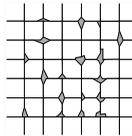
Gitterschnittprüfung nach DIN EN ISO 2409 [DIN13]*

1. Sechs parallele Schnitte in äquidistantem Abstand in die Beschichtungsoberfläche einbringen.
2. Sechs weitere Schnitte im Winkel von 90° zu den vorhandenen einbringen.
Es ergibt sich ein Gitter in der Oberfläche.
3. Lose Partikel durch Bürsten, Verwendung von Klebeband oder Druckluft entfernen.
4. Bewertung der Schichthaftung anhand der Gitterschnittkennwerttabelle (Kennwerte: 0 - 5).

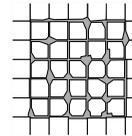
* Ausführliche Beschreibung der Messergeometrien, der Versuchsvorbereitung, -durchführung und -auswertung enthält die geltende Normschrift.

Gitterschnitt-Kennwerte**Kennwert „0“**

Die Schnittländer sind vollkommen glatt; keines der Quadrate des Gitters ist abgeplatzt.

**Kennwert „1“**

An den Schnittpunkten der Gitterlinien sind kleine Splitter der Beschichtung abgeplatzt. Abgeplatzte Fläche nicht größer als 5 % der Gitterschnittfläche.

**Kennwert „2“**

Die Beschichtung ist längs der Schnittländer und/oder an den Schnittpunkten der Gitterlinien abgeplatzt. Abgeplatzte Fläche größer als 5 %, aber nicht größer als 15 % der Gitterschnittfläche.

Bild 6.2: Gitterschnittprüfung - Durchführung und Kennwerte [BLOC19, DIN13]

Cross cut test – execution and result classification

Zur weiteren Abschätzung von Benetzungs- und Haftungsverhalten wurden Messungen der Oberflächenenergien des Kupfers und des PET-Substrats sowie der Oberflächenspannung des UV-Lacks durchgeführt. Beide Messungen erfolgten mit dem Kontaktwinkelmessgerät OCA20 LHT der DataPhysics Instruments GmbH [DATA02]. Nach DIN 55660 Teil 2 [DIN11] (Sessile-Drop-Verfahren) beträgt die ermittelte Oberflächenenergie des Kupfers $\sigma_{s,Werkzeug}$ 30,73 mJ/m² und die des Foliensubstrats $\sigma_{s,Substrat}$ 43,37 mJ/m². Als Referenzflüssigkeiten dienten Wasser, Ethylenglycol und Diiodmethan. Zur Messung wurden für die Oberflächenspannung sowie den polaren und dispersen Anteil die Vorgaben nach GEBHARDT für Wasser und Ethylenglycol sowie nach BUSCHER et al. für Diiodmethan aus der Datenbank des Geräts genutzt.

Der Lack wird über die Schlitzdüse auf 150 mm Breite aufgetragen. Die Schlitzhöhe $h_{Schlitz}$ beträgt 100 μm . Nach Formel 4.2 ist die theoretische Mindestbeschichtungsstärke $h_{0,min}$ 25 μm . Die Ausbringung des Lacks erfolgt mit der Bead-Coating-Methode.

Die Temperierung von Präge- und Andruckwalze wird 45 min. vor den Experimenten gestartet und unmittelbar vor der Produktion kontrolliert.

Untersuchungsparameter sind die Beschichtungshöhe h_0 , die Andruckkraft F_{an} , die Bahngeschwindigkeit v_{Bahn} , die Walzentemperatur T und die Bestrahlungsstärke E_{UV} .

Die Parameter werden entsprechend Tabelle 6.1 variiert. Die Andruckkraft ist über die Steuerung in Newton einstellbar. Der eingeklammerte Wert ist die Umrechnung in die theoretisch wirkende Linienlast über eine Breite von 250 mm (Folienbreite). Die Bestrahlungsstärke wird in Prozent der maximalen, elektrischen Leistungsaufnahme geregelt. Der eingeklammerte Wert gibt den gemessenen Wert der Bestrahlungsstärke an. Die Bestrahlungsintensität wird nicht automatisch mit steigender Bahngeschwindigkeit skaliert, da dieser Einfluss nicht ausreichend genug bekannt ist.

Tabelle 6.1: Parameterfeld der empirischen Untersuchung

Range of parameters for the empirical study

	Parameterausprägung				
Anfangsschichtdicke [µm]	25	30	35	40	45
Anpresskraft [N (N/mm)]	62,5 (0,25)	125 (0,5)	187,5 (0,75)	250 (1,0)	312,5 (1,25)
Bahngeschw. [m/min]	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
Walzentemperatur [°C]	25		35		45
Bestrahlungsenergie [% (mW/cm ²)]	28 (311)		38 (503)		48 (736)

Zur Vermessung der Restschichtdicke werden Schlibbilder des Folienquerschnitts erstellt. Die Messdaten werden in den Tälern – an den tiefsten Punkten – der replizierten V-Nuten-Struktur aufgenommen.

6.2 Analyse der Entwicklung der Restschichtdicke h_R

Analysis of the growth of the residual layer thickness h_R

In der ersten Versuchsreihe wird der Einfluss der Beschichtungsstärke h_0 auf die Ausbildung der Restschichtlage h_R untersucht. Alle anderen Parameter werden auf den jeweils niedrigsten, in Tabelle 6.1 definierten Wert eingestellt. Für die Anfangsschichtdicke von 25 µm zeigt sich, dass die Strukturen nicht vollständig ausgefüllt werden und nicht die erwartete Höhe von 50 µm erreichen. Hieraus resultiert der Wert „0“ der Restschichtlage (vgl. Bild 6.3). Die theoretisch erforderliche, minimale Beschichtungsstärke ist somit nicht ausreichend für ein gutes Abformungsergebnis. Grund hierfür sind Schrumpfeffekte sowie die Verdrängung des Auftrags in die unstrukturierten Randbereiche der Walze. Bereits eine Steigerung der Beschichtungshöhe um 5 µm erzeugt eine vollständige Füllung der Strukturen und die Ausbildung einer durchschnittlichen Restschichtlage von 1,44 µm. Dies entspricht einer Steigerung des Fördervolumens um 0,75 ml/min (bei $v = 1$ m/min) bzw. um 20 % des Ausgangswerts. Weitere Steigerungen der Lackausbringung erhöhen die Restschichtlage bis auf 2,90 µm bei einem Auftrag h_0 von 45 µm. Die Restschichtlage entwickelt sich nicht in der gleichen Dimension wie der Lackauftrag. Ein Fließen des Lacks quer zur Bahnaufrichtung stellt sich

ein, welches zu einer zunehmenden Ausbreitung des Lacks in die unstrukturierten Bereiche des Prägezyinders führt. Eine Beschichtungshöhe von 50 μm resultiert in einer Ausbreitung des Lacks über die Folienränder hinaus und Lackanhäufungen auf dem Prägezyinder. Ein degressiver Kurvenverlauf bildet sich ab. Bei höheren Prägekräften ergibt sich das Phänomen des Herausquellens bereits bei geringeren Auftragsstärken.

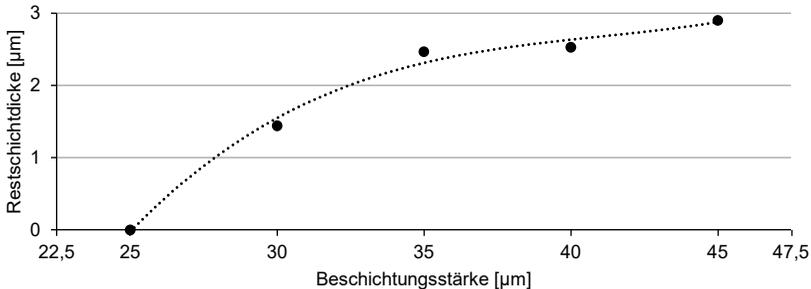


Bild 6.3: Einfluss der Beschichtungsstärke h_0 auf die Restschicht h_R ($F_{an} = 62,5 \text{ N}$, $v_{Bahn} = 1 \text{ m/min}$, $T = 25^\circ\text{C}$, $E_{UV} = 28\%$)

Effect of coating thickness h_0 on the residual layer h_R ($F_{an} = 62,5 \text{ N}$, $v_{Bahn} = 1 \text{ m/min}$, $T = 25^\circ\text{C}$, $E_{UV} = 28\%$)

Für die Versuchsreihe mit variierender Andruckkraft sowie für alle weiteren Reihen wird h_0 auf 30 μm eingestellt. Wie in Bild 6.4 zu erkennen, hat die Steigerung der Andruckkraft einen positiven Einfluss auf die Ausprägung einer Restschicht - die Schichtstärke sinkt.

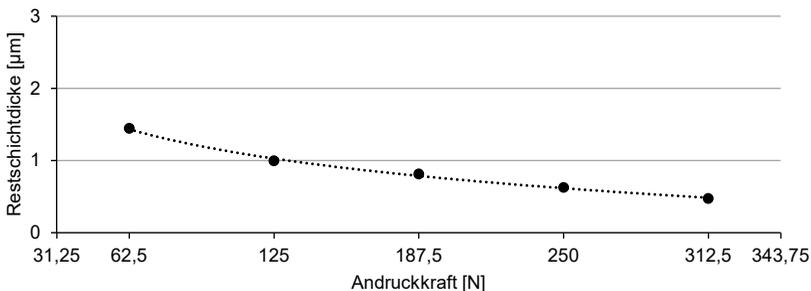


Bild 6.4: Einfluss der Andruckkraft F_{an} auf die Restschicht h_R ($h_0 = 30 \mu\text{m}$, $v_{Bahn} = 1 \text{ m/min}$, $T = 25^\circ\text{C}$, $E_{UV} = 28\%$)

Effect of compressive normal force F_{an} on the residual layer h_R ($h_0 = 30 \mu\text{m}$, $v_{Bahn} = 1 \text{ m/min}$, $T = 25^\circ\text{C}$, $E_{UV} = 28\%$)

Bei einer Kraft von 312,5 N (1,25 N/mm) wird eine mittlere Restschicht von 0,47 μm erzielt. Für die vorliegenden Versuchsbedingungen bedeutet eine Erhöhung der Andruckkraft um Faktor 5 eine Reduktion der Zielgröße h_R um das 3,0-fache. AHN et al.

[AHN09a] haben die Interpretation ihrer Versuche zu diesem Einfluss mit verschiedenen Simulationsmodellen unterstützt (vgl. Bild 4.10). In Anlehnung an diese kann der Verlauf der Wertekurve als regressiv angenommen werden. Ab einer Andruckkraft $\geq 312,5$ N kommt es zu einem Übertreten des Lacks über die Folienränder. Die Änderung der Restschicht ist zunehmend weniger signifikant.

Der Durchsatz eines kontinuierlichen Prozesses skaliert mit der Materialgeschwindigkeit v_{Bahn} , welche die generelle Optimierungsgröße und somit den wichtigsten Produktionsparameter darstellt. Die in Bild 6.5 gezeigte Kurve weist einen negativen Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit v_{Bahn} und Restschichtstärke h_{R} auf.

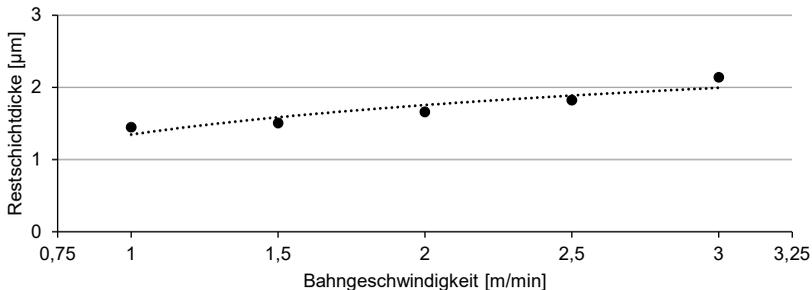


Bild 6.5: Einfluss der Bahngeschwindigkeit v_{Bahn} auf die Restschicht h_{R} ($h_0 = 30$ µm, $F_{\text{an}} = 62,5$ N, $T = 25^\circ\text{C}$, $E_{\text{UV}} = 28\%$)

Effect of web speed v_{Bahn} on the residual layer h_{R} ($h_0 = 30$ µm, $F_{\text{an}} = 62,5$ N, $T = 25^\circ\text{C}$, $E_{\text{UV}} = 28\%$)

Mit zunehmender Geschwindigkeit bildet sich eine größere Restschicht aus. Läuft die Lackschicht in die Kontaktzone von Präge- und Andruckzylinder ein, wird der UV-Lack an erhabenen Stellen verdrängt und in die Kavitäten des Prägezylinders gedrückt. Dies geschieht auf Grund der Trägheit des viskosen Materials nicht instantan, sondern bedarf einer Füllzeit $t_{\text{füll}}$ (vgl. Formel 4.4). Mit zunehmender Bahngeschwindigkeit reduziert sich die Zeit in der überschüssiger Lack, z. B. in die unstrukturierten Seitenbereiche des Prägezylinders, verdrängt werden kann. Der so verbleibende Lack bildet die Restschicht aus. Diese steigt von $1,44$ µm bei $v_{\text{Bahn}} = 1$ m/min bis auf $2,14$ µm bei 3 m/min Produktionsgeschwindigkeit.

AHN et al. [AHN09a] belegen dieses Ergebnis mit einer simulierten Datenbasis. Bild 4.10 zeigt einen degressiven Verlauf für die Entwicklung der Restschichtstärke h_{R} .

Die Auswirkung der Viskosität auf die Ausprägung der Restschicht ist in Formel 4.9 dokumentiert. Dieser entsprechend, sinkt mit der Viskosität ebenfalls der Wert für h_{R} . Die Begründung des Phänomens liegt in der bereits zuvor beschriebenen Verdrängung des Lacks in der Walzenkontaktzone. Niederviskose Medien fließen bei gleicher Einwirkdauer und -kraft schneller als hochviskose. Die Viskosität η der UV-Lacke ist ohne Änderung der chemischen Zusammensetzung über die Temperierung des Lacks

zu beeinflussen. Wie in Bild 4.5 dargestellt, halbiert sich die Viskosität $\eta(T)$ des verwendeten UV-Lacks in etwa mit einer Erwärmung um 10°C (25°C : 405 mPa·s, 35°C : 185 mPa·s, 45°C : 100 mPa·s). Für die Versuchsreihe werden Präge- und Andruckzylinder temperiert, da für sie ohnehin eine Kühlung zum Abführen der thermischen Energie aus der UV-Bestrahlung vorgesehen ist. Eine Temperierung des Lackbehälters und der Schlitzdüse ist im Versuchsaufbau nicht möglich.

Eine gesteigerte Walzentemperatur wirkt sich positiv auf die Ausbildung der Restschicht h_R aus (vgl. Bild 6.6). Die Temperaturerhöhung um 20°C wirkt sich in einer Reduzierung um Faktor 1,97 aus. Bei 45°C Walzentemperatur wird eine Restschichtstärke h_R von $0,73\ \mu\text{m}$ erreicht. Der Vorteil einer Verarbeitung bei Raumtemperatur ist nicht mehr gegeben. Eine übermäßige Erwärmung des Lacks kann zu thermisch-induzierten Aushärtungsprozessen und thermisch-bedingtem Schrumpf führen.

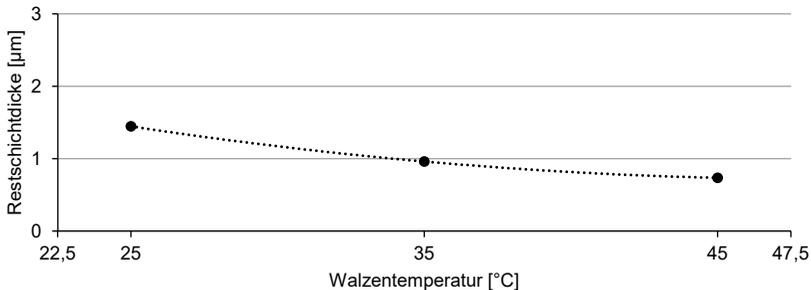


Bild 6.6: Einfluss der Walzentemperatur T auf die Restschicht h_R ($h_0 = 30\ \mu\text{m}$, $F_{an} = 62,5\ \text{N}$, $v_{Bahn} = 1\ \text{m/min}$, $E_{UV} = 28\%$)

Effect of drum temperature T on residual layer h_R ($h_0 = 30\ \mu\text{m}$, $F_{an} = 62,5\ \text{N}$, $v_{Bahn} = 1\ \text{m/min}$, $E_{UV} = 28\%$)

Zuletzt wird die Auswirkung der Bestrahlungsleistung auf die Ausprägung der Restschicht h_R untersucht. Eine gute Aushärtung liegt bei einem Doppelbindungsumsatz von $\geq 85\%$ vor [STRO09]. Er beschreibt den Grad der Umwandlung der Kohlenstoffdoppelbindungen zu Einfachbindung durch die Polymerisationsreaktion. Der DBC gibt das Verhältnis der verbleibenden Doppelbindungen im ausgehärteten Polymer zu den ursprünglich im flüssigen Lack vorhandenen Doppelbindungen der Monomere an. [MORA08, HU16] Die Berechnungsvorschrift lautet:

$$DBC = \left(1 - \frac{\int \text{Absorptionsspektrum}_{\text{Polymer}}}{\int \text{Absorptionsspektrum}_{\text{Monomer}}} \right) \cdot 100\% \quad (6.1)$$

Der Doppelbindungsumsatz DBC (engl.: Double Bond Conversion) wird üblicherweise mittels Infrarotspektroskopie (FTIR Abk. für: Fourier-Transformations-Infrarotspektrometer) bestimmt. Andere Verfahren sind die Raman-Spektroskopie, die Elektronenspin- (ESR) und Kernspinresonanz (NMR) sowie die dynamische Differenzkalorimetrie (DDK) und die Differenzthermoanalyse (DTA).

Der Umsatz ist im beschriebenen Versuchsaufbau bereits bei der minimalen Lampenleistung (28%, 311 mW/cm²) erreicht. Die weitere Erhöhung der Strahlungsdosis erzeugt ein höheres Maß an Schrumpfung, wodurch auch die Restschicht schrumpft (Bild 6.7). Eine Intensitätssteigerung um den Faktor 2,37 reduziert die Schicht um das 1,81-fache von 2,54 µm auf 1,40 µm. Schrumpfung ist mehrdirektional. Dadurch kommt es, vor allem bei komplexen Strukturen, zum Verzug der Geometrien und einem Verlust an Formtreue. Übermäßige Bestrahlung kann überdies weitere Fehler hervorrufen (vgl. Abschnitt 4.1).

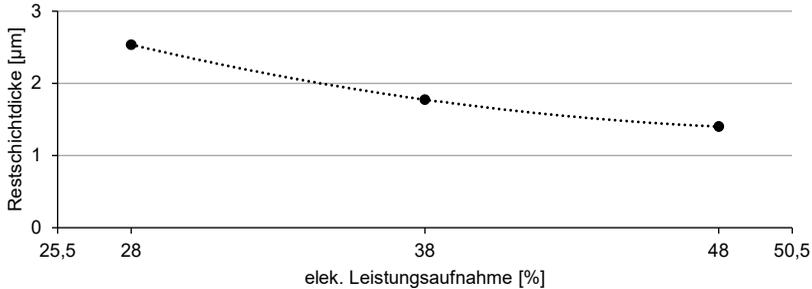


Bild 6.7: Einfluss der Bestrahlungsstärke E_{UV} auf die Restschicht h_R ($h_0 = 30 \mu\text{m}$, $F_{an} = 62,5 \text{ N}$, $v_{Bahn} = 1 \text{ m/min}$, $T = 25^\circ\text{C}$)

Effect of irradiance E_{UV} on the residual layer h_R ($h_0 = 30 \mu\text{m}$, $F_{an} = 62,5 \text{ N}$, $v_{Bahn} = 1 \text{ m/min}$, $T = 25^\circ\text{C}$)

Die Betrachtung der fünf Parameter h_0 , F_{an} , v_{Bahn} , T und E_{UV} belegt ihren Einfluss auf die Ausbildung der Restschicht h_R . Aussagen über die Relevanz bzw. eine Priorisierung der einzelnen Parameter sowie mögliche Wechselwirkungen sind nicht zu treffen.

6.3 Vollfaktorieller Versuch

Full factorial experiment

Die statistische Versuchsmethodik DOE (engl.: Design Of Experiments) bietet mit der Aufstellung, Durchführung und Auswertung voll- und teilfaktorieller Versuchspläne ein Werkzeug zum besseren Verständnis von Haupteffekten, ihren Wechselwirkungen und ihrer Relevanz für den Prozess. Mit einer entsprechenden Versuchsreihe werden diese für den Rolle-zu-Rolle-UV-Imprint-Prozess analysiert.

Es wird ein 2³-vollfaktorieller Versuchsplan erarbeitet. Aus den fünf bekannten Parametern werden die drei Faktoren v_{Bahn} , h_0 und F_{an} gewählt und in zwei Stufen (Faktorstufen) variiert. Die Faktorstufen sind jeweils die Maximalwerte der vorherigen Versuchsreihen. Daraus ergeben sich 2³ = 8 Stufenkombinationen. Zusätzlich wird ein Zentralpunkt untersucht. Dieser ergibt sich als Kombination aus dem Mittelwert der Stufen eines jeden Faktors. Er ist die „mittlere Einstellung“ für alle Faktorstufen. Voraussetzung für lediglich einen Zentralpunkt ist, dass jeder Faktor eine mittlere Aus-

prägung besitzt. Die Ausprägungen aller untersuchten Parameter folgen einer metrischen Absolutskala und sind somit ausreichend fein einstellbar. Bild 6.8 zeigt die untersuchte Kombinatorik in ihren Ausprägungen. Die Optimierungs- bzw. Bewertungsgröße ist für diese Versuche die Restschichtdicke h_R . Sie wird über Schlibbilder der Folienquerschnitte ermittelt.

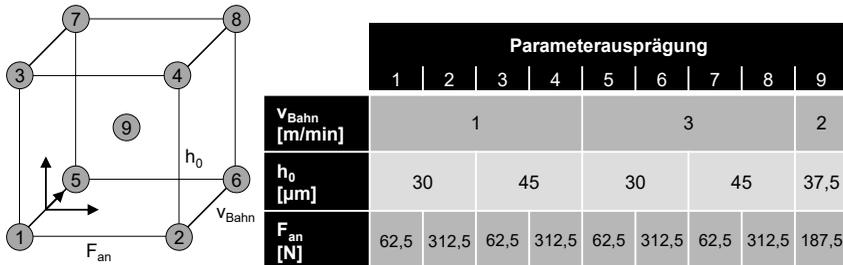


Bild 6.8: 2^3 -vollfaktorieller Versuchsplan
 2^3 -factorial design of experiment

Die Walzentemperatur T wird nicht als Faktor betrachtet. Zum einen ist sie lediglich mittelbarer Parameter zur Modifikation der Viskosität $\eta(T)$. Zur Optimierung einer Hochdurchsatzproduktion würde die Viskosität durch Überarbeitung der Lackzusammensetzung angepasst. Zum anderen geht durch die Temperierung der Walzen bzw. des Lacks der Vorteil einer Prozessierung bei Raumtemperatur verloren (vgl. Abschnitt 2.1.5, S.20). Die Energieeffizienz sinkt und der konstruktive Aufwand wächst an. Zudem ergeben sich durch die thermische Wechselbelastung Dehnungs- und Schrumpfeffekte in Substrat und Lack die sich negativ auf die Formtreue der replizierten Strukturen auswirken.

E_{UV} wird ebenfalls nicht als Faktor variiert, sondern konstant auf 28% elek. Leistungsaufnahme geregelt. Produktionsdurchläufe mit $v_{\text{Bahn}} = 10$ m/min und dieser niedrigen Lampenleistung zeigten eine ausreichend gute Vernetzung. Der in Bild 6.7 aufgezeigte Effekt der Reduzierung von h_R basiert im Gegensatz zum Einfluss von v_{Bahn} , h_0 und F_{an} nicht auf einer Änderungen durch vermehrtes Fließen bzw. Verdrängung, sondern auf Erhöhung der Schrumpfung. Diese mindert die Formtreue der gesamten Struktur und ist zu vermeiden. Eine Skalierung der Bestrahlungsleistung mit der Substratgeschwindigkeit v_{Bahn} ist zur optionalen Nutzung im Prüfstand vorgesehen. Der Skalierungsfaktor sollte an die verwendete Materialkombination angepasst werden, um eine überdosierte Exposition zu vermeiden. Die Ermittlung einer angemessenen Skalierung ist nicht Bestandteil dieser Arbeit.

Der vollfaktorielle Versuchsplan wird mit der Statistik-Software Minitab 17 der Minitab Inc. erstellt und ausgewertet. Es werden Haupteffekte, Wechselwirkungen und deren Rangfolge hinsichtlich ihres Einflusses auf die Zielgröße h_R analysiert.

Das Haupteffektendiagramm (Bild 6.9) lässt erkennen, ob ein Faktor Haupteffekt ist und wie stark - in Relation zu den restlichen Faktoren - seine Wirkung auf die Zielgröße ist.

Die Steigung, der aus den Ergebnismittelwerten der jeweiligen Faktorstufen gebildeten Geraden, ist Indikator für die Größe des Haupteffektes. Bei einem waagerechten Verlauf liegt entsprechend kein Haupteffekt vor. Zusätzlich sind in den Diagrammen der Mittelwert der Zielgröße (gestrichelte Linie) sowie das Versuchsergebnis am Zentralpunkt (Einzelpunkt) eingetragen. [MINI18a]

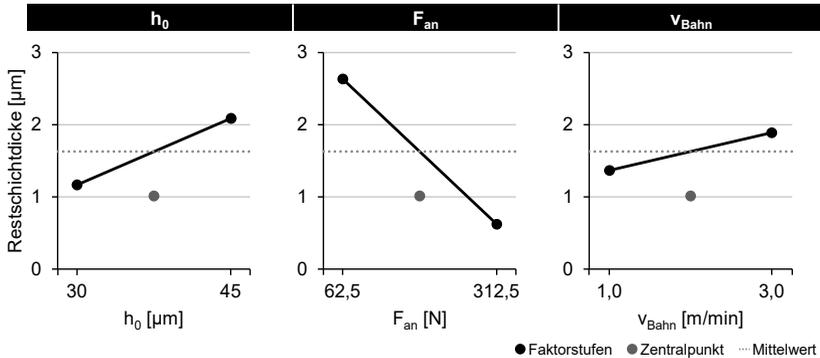


Bild 6.9: Haupteffektediagramm

Main effects plot

Alle drei Faktoren sind Haupteffekte. Anhand der Geradensteigung ist zu erkennen, dass F_{an} den größten Einfluss auf die Zielgröße hat und eine Erhöhung der Faktorstufe die Ausprägung von h_R positiv. Dies stimmt mit den Erkenntnissen aus den Vorversuchen (Abschnitt 6.2) überein. Die Substratgeschwindigkeit v_{Bahn} hat innerhalb des gegebenen Parameterraums den geringsten Einfluss. Der Ergebnisbereich für F_{an} umfasst den Zentralpunkt des Versuchsplans. Dies spricht für eine hohe Signifikanz dieses Faktors im Rahmen des Versuchsplans.

Das Wechselwirkungsdiagramm (Bild 6.10) lässt folgern, in welcher Weise die Beziehung zwischen einem Faktor und der stetigen Antwortvariablen h_R vom Wert des zweiten Faktors abhängt. Im Diagramm werden Mittelwerte für die Stufen eines Faktors auf der x-Achse und eine separate Linie für jede Stufe des zweiten Faktors angezeigt. Bei einem 2^3 -vollfaktoriellen Versuchsplan ergeben sich drei mögliche Doppelwechselwirkungen durch Vermengung von je zwei Faktoren sowie eine Dreifachwechselwirkung durch Vermengung aller drei Faktoren. Es werden im Diagramm lediglich die Doppelwechselwirkungen betrachtet. Die Dreifachwechselwirkung wird aufgrund der geringen zu erwartenden Relevanz vernachlässigt [SIEB17]. Der Verlauf der beiden Linien zueinander gibt Aufschluss darüber, wie sich die Wechselwirkungen auf die Beziehung zwischen den Faktoren und der Antwortvariablen auswirken. Parallel verlaufende Linien implizieren keine Wechselwirkung, konvergierende Linien deuten eine Wechselwirkung an. Je weiter die Linien von der Parallelität abweichen, desto stärker ist die Wechselwirkung. [MINI18b]

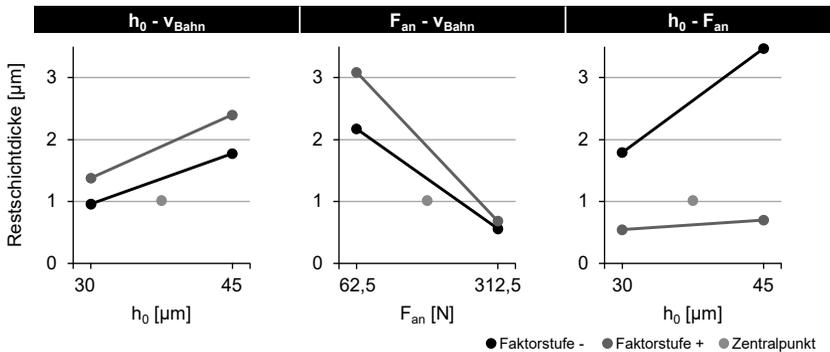


Bild 6.10: Wechselwirkungsdiagramm

Interaction plot

Während für die Faktorkombinationen h_0 - F_{an} und F_{an} - v_{Bahn} eine relativ starke Wechselwirkung besteht, existiert eine solche für die Beziehung zwischen h_0 und v_{Bahn} nicht. Beschichtungsstärke und Substratgeschwindigkeit sind unabhängig voneinander einzustellen und beeinflussen sich nicht. Dies ist zu erwarten, da der Lackvolumenstrom bzw. die Beschichtungsstärke einer wechselnden Substratgeschwindigkeit angepasst wird, sodass $h_0(v_{Bahn})$ konstant ist. Leichte Abweichungen von der idealen Parallelität ergeben sich durch Schwankungen im Förderdruck sowie Messunsicherheiten des Konfokalsensors.

Der Öffnungswinkel zwischen den Geraden der beiden anderen Diagramme lässt den Schluss zu, dass die Wechselwirkung F_{an} - v_{Bahn} geringer ist als die Wechselwirkung h_0 - F_{an} (größerer Winkel) ausfällt.

Die Wechselwirkung F_{an} - v_{Bahn} erklärt sich durch das Fließverhalten des Lacks im Kontaktbereich von Präge- und Andruckzylinder. Ankommender Lack füllt die Kavitäten des Prägezylinders und wird so abgeführt. Überschüssiger Lack sammelt sich je nach Menge als konvexer Meniskus oder wellenartige Lackfront vor der Kontaktzone und fließt durch Querströmungen in die seitlichen, unstrukturierten Bereiche ab. Diese sind gegenüber dem strukturierten Bereich zurückgesetzt und nehmen den Lack auf. Höhere Andruckkräfte erhöhen den Fließwiderstand zum Passieren der Kontaktzone. Eine erhöhte Anströmungsgeschwindigkeit des ankommenden Lacks wirkt sich zwar nach Bild 6.5 negativ auf h_R aus, begünstigt aber auch ein Abfließen des Lacks durch Querströmungen nach dem Prinzip des geringsten Widerstands.

Die Beziehung zwischen F_{an} und h_0 ergibt die markanteste Wechselwirkung. Bei einer hohen Andruckkraft wird, wie eben beschrieben, Lack vor der Kontaktzone in die Randbereiche der Walze verdrängt. Bei geringerer Kraft kann nicht ausreichend Walkarbeit geleistet werden, um den Lack im gleichen Maße zu verdrängen. Es bildet sich eine größere Restschicht. Dieser Effekt wird durch eine Erhöhung der Beschichtungsstärke h_0 in nicht-linearem Ausmaß verstärkt.

Der Nachweis bzw. die Existenz von Haupt- und Wechselwirkungseffekten ist kein Indiz für eine statistische Signifikanz dieser [MINI18b]. Mit einem Pareto-Diagramm für die verschiedenen Effekte lassen sich die Größe und die Bedeutung der Effekte ermitteln. Balken, die im Pareto-Diagramm die Referenzlinie überschreiten, sind statistisch signifikant. [MINI18c] Es wird ein Signifikanzniveau α_{Niveau} von 0,05 als ausreichend gut geeignet angenommen. Ein Signifikanzniveau von 0,05 bedeutet ein Risiko von 5 %, dass auf eine vorhandene Relevanz eines Effektes geschlossen wird, während tatsächlich keine vorhanden ist. [MINI18d]

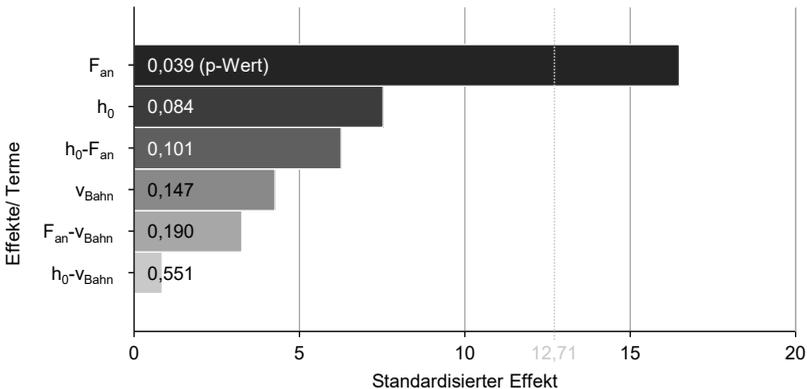


Bild 6.11: Pareto-Diagramm der standardisierten Effekte ($\alpha_{\text{Niveau}} = 0,05$)

Pareto plot of standardized effects ($\alpha_{\text{Niveau}} = 0,05$)

Das Pareto-Diagramm der standardisierten Effekte (Bild 6.11) zeigt unter Vernachlässigung der Dreifachwechselwirkung auf, dass einzig der Faktor F_{an} statistisch signifikant ist. Auch eine Modellreduzierung - ein iterativer Ausschluss unbedeutender Terme - ändert an dieser Alleinstellung nichts. Bemerkenswert ist, dass der Wechselwirkung h_0-F_{an} eine größere Bedeutung zugemessen wird als dem Faktor v_{Bahn} . Der Einfluss des Faktors v_{Bahn} sowie möglicher Wechselwirkungen ist vergleichsweise gering. Dies ist für die Skalierung des Rolle-zu-Rolle-UV-Imprint-Prozesses eine essentielle Erkenntnis.

Die Zusammenfassung des Modells in Minitab zeigt eine geringe Streuung S von $0,173 \mu\text{m}$ sowie ein hohes Bestimmtheitsmaß R^2 von 99,76%. Das vorliegende Modell erklärt 99,76% der Streuung der Restschichtlagen und ist somit sehr gut an die Datenbasis angepasst. Aus der Varianzanalyse (p-Werte) geht hervor, dass F_{an} mit einer Wahrscheinlichkeit von 3,9 % keinen Einfluss auf h_R hat.

Die Werte besitzen keinen absoluten Anspruch, sondern geben lediglich Tendenzen wieder. Andere Strukturtypen, Maschinen- oder Werkzeug-Designs sowie Materialkombinationen können Verschiebungen der Tendenzen hervorrufen.

6.4 Vorgehensweise zur Produktionsskalierung

Strategy for production ramp-up

Die kostengünstige und ressourceneffiziente Produktion mikro- und nanostrukturierter Folien erfordert die Maximierung des Produktionsdurchsatzes bei gleichbleibender Qualität des Produkts. Die Substratgeschwindigkeit v_{Bahn} ist zu maximieren. Die Restschicht h_R ist zu minimieren bzw. auf ein tolerables Maß zu reduzieren. Weitere Produktfehler entsprechend Bild 4.1 sind auszuschließen. Für ein valides Modell aus einem teil- oder vollfaktoriellen Versuch bietet die Minitab-Software die Funktion "Zielgrößenoptimierung" zur Bestimmung der optimalen Faktoreinstellungen an. Die Datenbasis ist für jede Änderung der Materialkombination, der Mikro- und Nanostrukturen oder des Maschinenaufbaus zu erzeugen. Dieser Ansatz bietet ein statistisch abgesichertes Ergebnis, ist jedoch kosten- und zeitintensiv.

Auf Basis der Erkenntnisse aus den vorgegangenen Untersuchungen (Abschnitt 6.1 - 6.3) wird daher eine einfache, iterative Vorgehensweise erarbeitet, die in Bild 6.12 zu sehen ist. Der Algorithmus erfordert die Erfüllung grundlegender Voraussetzungen, welche als notwendige Einstiegsbedingungen für eine erfolgreiche Produktion zu sehen sind. Diese sind a-priori in Platte-zu-Platte-Untersuchungen überprüfbar. Vorversuche mit dem tatsächlichen Produktionsequipment - besonders der UV-Strahlquelle - steigern die Zuverlässigkeit. Zu prüfen sind:

- *UV-Durchlässigkeit des Substrats*

Die Aushärtung des UV-Lacks erfolgt im vorliegenden Maschinenaufbau durch das Substrat (vgl. Abschnitt 5.3.3). Eine gute Transmission des Polymers im spektralen Bereich von 100 – 380 nm (UV-A/B/C) ist für eine energiearme, effiziente Bestrahlung grundlegend. Strahlungsabsorption dämpft nicht nur die Bestrahlungsintensität, sondern begünstigt den Eintrag thermischer Energie und somit das Aufheizen und Erweichen der Folie. Eine Transmission $\geq 90\%$ für das UV-Spektrum ist wünschenswert.

- *Adhäsionsneigung/ Benetzung des Lacks*

Der UV-Lack sollte das Polymersubstrat störungsfrei homogen benetzen und darf nach der Aushärtung nicht an der Oberfläche des Prägezyinders haften. Die Adhäsionsneigung des UV-Lacks und sein Benetzungsverhalten sind daher vorab zu überprüfen. Dies ist in Beschichtungsversuchen (z. B. Spin-Coating) und mit Kontaktwinkelanalysen zur Messung der Oberflächenenergien und -spannungen möglich. Die Oberflächenenergie des Prägwerkzeugs sollte geringer und die des Substrats deutlich höher als die Oberflächenspannung des UV-Lacks sein, um die genannten Kriterien zu erfüllen ($\sigma_{s,\text{Werkzeug}} < \sigma_{l,\text{Lack}} \ll \sigma_{s,\text{Substrat}}$).

- *Vernetzungsgrad*

Eine gute UV-Transmission des Substrats resultiert nicht unmittelbar in einer guten Aushärtung des UV-Lacks. Bestrahlungsdauer, Aktivierungswellenlänge des Photoinitiators, spektrale Zusammensetzung des UV-Lichts und andere Faktoren begünstigen das Ergebnis. Nach STROPP ist eine befriedigende UV-

Härtung bei einem DBC von 81 – 85 % erreicht. Von guter Härtung spricht er bei DBC >85 %. [STRO09] In den erforderlichen Vorversuchen ist die minimale Bestrahlungsstärke $E_{UV,min}$ zu bestimmen.

- **Haft Eigenschaften**

Die Haftung des UV-Lacks am Substrat wird mit einem Gitterschnitttest überprüft. Die Erfüllung der vorangegangenen Einstiegsbedingungen ist keine Garantie für ein positives Testergebnis. Ein solches liegt vor, falls das Prüfergebnis einen Kennwert von 0 – 1 nicht überschreitet.

Weiter ist vorauszusetzen, dass eine Entformbarkeit der Strukturen unter den kinematischen Gegebenheiten eines Rolle-zu-Rolle-Prozesses vorliegt (vgl. Bild 2.4). Hinterschnitte sind auszuschließen und große Aspektverhältnisse zu vermeiden. Entformungsschrägen bzw. Verjüngungen begünstigen das Ablösen von der strukturierten Fläche.

Die Strukturen des Prägezyinders müssen nach ihrer Herstellung (z. B. durch UP-Diamantbearbeitung) vermessen werden. Eine genaue Kenntnis der Strukturdimensionen, insbesondere der Strukturhöhe h_s , ist für den späteren Optimierungsprozess zwingend. Am Fraunhofer IPT werden unter kontrollierten Bedingungen (Klimakammer) Silikonabdrücke des Prägezyinders abgeformt und mittels Rasterelektronenmikroskop (Abk.: REM) und Konfokalmikroskop vermessen.

Für den Produktionsanlauf sind die Parameter wie folgt zu wählen:

- **Beschichtungshöhe $h_0 = h_{0,theor}$**

Die Beschichtungshöhe wird nach Vorschrift 4.2 berechnet, welche ein ideales Füllverhalten voraussetzt.

- **Andruckkraft $F_{an} = F_{an,min}$**

Minimale Andruckkraft der Maschine (Rolle-zu-Rolle-Prüfstand: 0,25 – 0,5 N/mm). Sie ist der Viskosität und dem Fließverhalten des UV-Lacks anzupassen.

- **Bahngeschwindigkeit $v_{Bahn} = v_{Bahn,min}$**

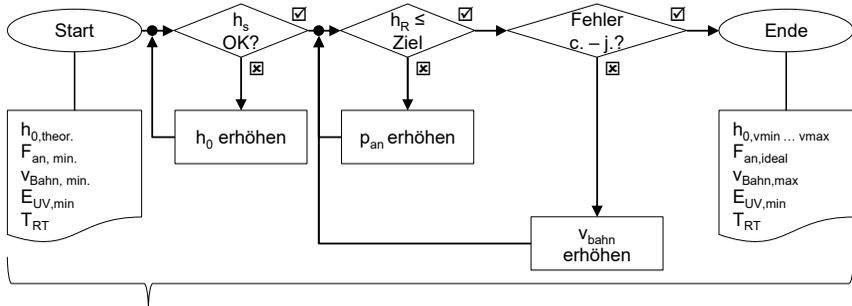
Minimale Bahngeschwindigkeit, die von der Maschine bei gleichmäßiger Bahnspannung einstellbar ist (0,5 – 1,0 m/min). Unter Umständen ist v_{Bahn} in Abhängigkeit von der Formulierung des UV-Lacks größer zu wählen. Dies ist der Fall, wenn bereits die minimale Strahlendosis $E_{UV,min}$ einer konventionellen UV-Lampe Schrumpfungseffekte oder Vergilbung hervorruft.

- **Bestrahlungsstärke $E_{UV} = E_{UV,min}$**

Die Bestrahlungsstärke einer konventionellen UV-Lampen sollte bei Versuchsbeginn stets auf den minimalen Wert eingestellt werden. $E_{UV,min}$ ist dem Ergebnis der Vernetzungsuntersuchungen anzupassen.

- **Lack-/ Walzentemperatur $T = T_{RT}$**

Der UV-Lack wird bei Raumtemperatur (25°C) verarbeitet. Die Walzentemperatur ist entsprechend anzupassen.



Voraussetzung	Indikator	Zielgröße
UV-Durchlässigkeit des Substrats	Spektrale Transmissionskurve	≥ 90 % (UV-A/B/C)
Adhäsionsneigung/ Benetzung des Lacks	Oberflächenenergien/ -spannungen	$\sigma_{s,Werkzeug} < \sigma_{l,Lack} \ll \sigma_{s,Substrat}$
Vernetzungsgrad	Doppelbindungsumsatz	DBC ≥ 85 %
Haftigenschaften	Gitterschnitt	Kennwert 0 - 1

Bild 6.12: Algorithmus zur iterativen Steigerung des Produktionsdurchsatzes

Algorithm for iterative increase of the production output

Nach Anlauf der Produktion ist zuerst zu prüfen, ob die Strukturen vollständig gefüllt sind. Ist dies nicht so bzw. ist die Strukturhöhe h_s zu gering, muss die Beschichtungsstärke h_0 erhöht werden. Eine Überdosierung des Lacks wird durch mehrmaliges Durchlaufen der Schleife mit jeweils kleinen Änderungen des Volumenstroms vermieden. Nach Erreichen der erwarteten Strukturhöhe h_s wird anschließend die Höhe der Restschicht h_R überprüft. Durch iterative Steigerung der Andruckkraft F_{an} (signifikanter Parameter, vgl. Abschnitt 6.3), ist h_R auf einen zu definierenden Maximalwert zu reduzieren. Abschließend wird überprüft, ob keiner der in Abschnitt 4.1 spezifizierten Fehler das Produktionsergebnis beeinträchtigt, bevor die Substratgeschwindigkeit gesteigert wird. In Abschnitt 6.2 ist gezeigt, dass sich eine steigende Produktionsgeschwindigkeit negativ auf die Restschicht auswirkt (vgl. Bild 6.5). Daher ist zur Fortsetzung der Durchsatzsteigerung der Sprungpunkt nach negativer Fehlerprüfung im Flussdiagramm vor die Überprüfung der Restschicht h_R gelegt. Eine positive Fehlerprüfung, ein Fehlerauftreten, beendet den Algorithmus.

Der Algorithmus liefert folgende Erkenntnisse:

- Bahngeschwindigkeit $v_{Bahn,max}$
Eine maximale Bahngeschwindigkeit, bei der unter den gegebenen Voraussetzungen eine fehlerfreie Produktion realisiert werden kann
- Beschichtungsstärke $h_{0,vmin} \dots v_{max}$
Eine Auftragsstärke, bei der eine ausreichend gute Füllung über den gesamten Geschwindigkeitsbereich gegeben ist
- Andruckkraft $F_{an,ideal}(v_{min} \dots v_{max})$

In Abhängigkeit von der Substratgeschwindigkeit eine Andruckkraft mit der die Restschicht h_R auf den zulässigen Maximalwert reduziert wird.

Die erarbeiteten Parameter können für nachfolgende Produktionsanläufe genutzt werden. Die Rolle-zu-Rolle-UV-Imprint-Produktion ist stets in einer Anlaufphase auf die finale Produktionsgeschwindigkeit zu bringen. Ein abrupter Prozessstart bei $v_{\text{Bahn,max}}$ (z. B. bei 7,5 m/min) kann trotz optimierter Parameter bspw. zu einem Anhaften des Lacks am Prägezylinder führen.

Der Algorithmus reduziert die Komplexität des Rolle-zu-Rolle-Prozesses auf ein idealisiertes System mit optimalen Rahmenbedingungen. Regelungsfehler in der Bahngeschwindigkeit und -spannung, wechselnde Materialqualität oder Bedienerfehler sind nicht berücksichtigt. Zudem ist für Fehler über die Strukturfüllung und die Restschicht hinaus keine Kompensationsstrategien untersucht und vorgegeben.

Die Überprüfung der Füllung, der Strukturhöhe h_s , der Restschicht h_R und des allgemeinen Auftretens von Fehlern ist trotz des einfachen Algorithmus aufwendig. Für eine schnelle Optimierungsphase ist zur Fehlerdetektion auf die optische Inspektionseinheit zurückzugreifen. Inline-Schichtdickenmessungen sind mit einem induktiv und/oder magnetisch messenden Schichtdickenmessgerät durchführbar. Die finale Optimierung von h_R bei $v_{\text{Bahn,max}}$ ist auf Basis von Vermessungen des Folienquerschnitts und REM-Aufnahmen vorzunehmen. Am Fraunhofer IPT wird ein MiniTest 745 der ElektroPhysik Dr. Steingroever GmbH & Co. KG mit Fe-Sonde eingesetzt. Die Sonde hat eine nachgewiesene Messunsicherheit von $\pm(0,5 \mu\text{m} + 0,75 \%$ vom Messwert).

6.5 Zwischenfazit

Interim conclusion

In fünf Parameterstudien wurde der Einfluss von Beschichtungsstärke h_0 , Andruckkraft F_{an} , Bahngeschwindigkeit v_{Bahn} , Walzentemperatur T und Bahnstrahlungsintensität E_{UV} auf die Füllung der Struktur und die Ausbildung der Restschicht h_R im Rolle-zu-Rolle-UV-Imprint-Prozess untersucht. Umlaufende, endlose 90° -V-Nuten wurden zu diesem Zweck in einen acrylbasierten UV-Lack auf PET-Substrat abgeformt. Rahmenbedingungen wie Adhäsionsneigung, UV-Transmission des Substrats, erforderliche Bestrahlungsstärke wurden vorab getestet und dokumentiert.

Die Steigerung von Beschichtungsstärke h_0 und Bahngeschwindigkeit v_{Bahn} zeigen negative Auswirkungen auf die Ausbildung der Restschicht, welche möglichst gering zu sein hat. Mittels F_{an} lässt sich diese jedoch über einen großen Wertebereich einstellen und durch Krafterhöhung reduzieren. Ebenso wirken sich erhöhte Werte für T und E_{UV} positiv aus. Sie beeinflussen allerdings das Schrumpfverhalten der gesamten Struktur ungünstig.

Die drei erstgenannten Parameter wurden als Faktoren für einen 2^3 -vollfaktoriellen Versuchsplan eingesetzt und ihre Wirkung sowie ihre Wechselwirkungen auf statistische Signifikanz geprüft. Die Relevanz der Einzel- und Wechselwirkungsterme ist durch eine Pareto-Analyse klar abgegrenzt worden. Lediglich die Bedeutung von F_{an}

stellte sich als statisch signifikant ($\alpha_{\text{Niveau}} = 0,05$) für die Optimierung der Restschicht h_R heraus. Die Validität des Modells wurde mit Varianz- und Residuenanalyse überprüft.

Auf Grundlage der erarbeiteten Erkenntnis wurde ein Algorithmus zur Beschreibung des Vorgehens bei der Skalierung und Optimierung des Produktionsdurchsatzes erstellt. Dieser wird an der Bahngeschwindigkeit gemessen. Eine ausreichende Strukturfüllung bei minimaler Restschichtdicke stehen im Bewertungsfokus der Produktqualität. Mögliche weitere Fehler werden überprüft und als Abbruchkriterien gewertet. Neben den Iterationsschritten umfasst dieser vier zwingend notwendige Voraussetzungen zur erfolgreichen Durchführung eines Rolle-zu-Rolle-UV-Imprint-Prozesses.

7 Transfer und Validierung der Untersuchungsergebnisse

Transfer and validation of the empirical results

Im vorliegenden Kapitel werden die erarbeiteten Ergebnisse anhand einer zweiten Referenzstruktur validiert. Zu zeigen ist, dass die beschriebenen Einflüsse auf die Ausprägung der Restschicht sowie das abgeleitete Vorgehen auf andere Strukturen übertragbar sind. Die bekannten Veröffentlichungen - insbesondere das publizierte Formelwerk (vgl. Abschnitt 4.3) - beziehen Unterschiede in der Geometrie oder Formfaktoren nicht in die Berechnungsansätze ein.

Wie in Abschnitt 6.1 werden im ersten Teil dieses Kapitels die Ausgangsbedingungen für die Versuchsdurchführung beschrieben. Die Versuchsergebnisse sind im zweiten Abschnitt (7.1) dokumentiert. Die Ausprägung der Schichthöhe h_P ($h_S + h_R$) in Abhängigkeit von Substratgeschwindigkeit v_{Bahn} und Andruckkraft F_{an} werden analysiert. Die Restschichtstärke h_R kann im Querschliff nicht sicher bestimmt werden. Die Querschnitte durch die Strukturtopologie (dreiseitige Pyramiden) können nicht so präzise angelegt werden, dass stets tiefster und höchster Punkt der Prägung im Schliffbild erfasst sind. Die messbare Gesamthöhe h_P und die gemessene Höhe der Walzenstruktur h_S lassen Rückschlüsse auf die Ausprägung der Restschichtstärke h_R zu. Bedingt durch die Komplexität der gewählten Referenzstruktur ergeben sich Limitationen für die Skalierung der Produktion, die im dritten Abschnitt diskutiert werden (7.3). Das Kapitel schließt mit einer Zusammenfassung des Erkenntnisgewinns in einem Zwischenfazit (7.4).

7.1 Beschreibung der Rahmenbedingungen

Explanation of constraints

Zur Validierung der Ergebnisse aus den Versuchen mit umlaufenden V-Nuten wird eine diskontinuierliche Mikrostruktur eingesetzt. Ein verkupfelter Prägezyylinder gleichen Aufbaus (300 mm Breite, 200 mm Durchmesser, wassergekühlt) wird über UP-Drehbearbeitung mit monokristallinem Diamanten direkt zerspannt. Das Diamantwerkzeug mit 110° -Spitzenwinkel wird in drei Schnittrichtungen (axial/ 60° / 120°) angesetzt und erzeugt so dreiseitige Pyramiden über den gesamten Umfang des Zylinders (vgl. Bild 7.1). Ihre Höhe beträgt $50 \mu\text{m}$. Strukturiert wird eine Breite von 150 mm. Die unstrukturierten Randbereiche sind in Referenz zur Pyramidengrundfläche um $20 \mu\text{m}$ zurückgesetzt.

Bild 7.1 zeigt links das REM-Bild eines Silikonabdrucks der strukturierten Walze. Die replizierten Mikrostrukturen sind das Negativ der Walze und somit pyramidenförmige Trichter. Die Pyramidenspitze bildet den tiefsten Punkt, während die Kantenlinien der Grundfläche erhaben sind. Diese Geometrie wird als „Corner-Cube“ (vgl. deutsch: Tripelspiegelelement) bezeichnet. Charakteristisch für Corner-Cubes ist der Aufbau aus drei zueinander orthogonalen, reflektierenden Oberflächen, die eine konkave Ecke

ausbilden (Eckreflektor). Die gegenseitige Orthogonalität gewährleistet, dass einfallendes Licht von den Eckreflektoren zur Quelle zurückgeworfen wird. Voraussetzung hierfür ist, dass die einfallende Strahlung innerhalb des Akzeptanzbereichs auftrifft. Ein üblicher Akzeptanzwinkel von $\pm 60^\circ$ sichert eine große Funktionstoleranz gegenüber Fehlansichtungen zur Flächennormalen. [GRAS04] Vergleichbare Strukturen finden Verwendung als Retroreflektoren zur Effizienzsteigerung von Solar-Panels [CAO11, PIET08] oder als Brightness-Enhancement-Layer zur Lichtverstärkung bzw. -lenkung in Beleuchtungseinheiten von Displays oder Raumleuchten [LIN00, CHEN07].

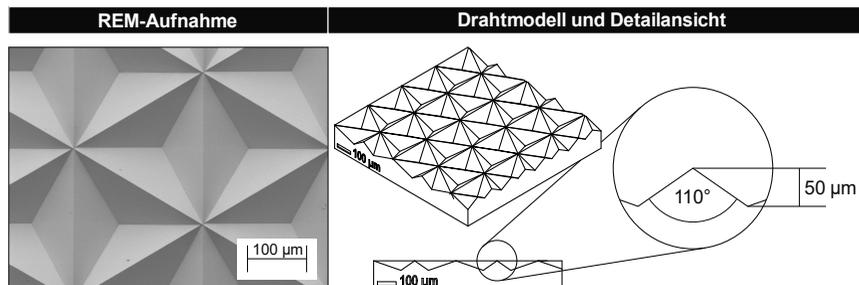


Bild 7.1: Diamant-bearbeitete, nahtlose, dreiseitige Mikropyramiden (Corner-Cubes)
Diamond turned, seamless, three-sided micropyramides (corner cubes)

Die Materialkombination Substrat-Lack ist dieselbe wie in den vorangegangenen Versuchen. Die Dicke des Substratmaterials beträgt $96 \mu\text{m} \pm 4 \%$. Die Vorbehandlung des Substrats durch den Hersteller ist beidseitig und chemisch identisch. Auf eine Präparation des Prägezyinders mit Antihaftbeschichtung wird verzichtet. Die Einstellungen der Schlitzdüse, des Temperiergeräts sowie der UV-Lampe sind ebenfalls gleich.

Tabelle 7.1: Versuchsbedingungen zur Replikation der Corner-Cubes
Experimental conditions of corner cubes' replication

	Ausprägung
Substrat	Mitsubishi Polymer Films 96 μm , beidseitig vorbehandelt
UV-Lack	C-Coatings $\eta = 405 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ (bei 25°C), acrylbasierter Lack
Strukturtyp	dreiseitige Pyramiden 50 μm Strukturhöhe
Walzenmaterial	Gravurkupfer, galvanisch abgeschieden Oberfläche unbehandelt
UV-Lampe	Quecksilber-Dampflampe 28 % Leistungsaufnahme ($311 \text{ mW}/\text{cm}^2$)
Schlitzdüse	150 mm Beschichtungsbreite 100 μm Schlitzhöhe
Walzentemperatur	Wasserkühlung $T = 25^\circ\text{C}$

7.2 Validierung

Validation

Die Replikationsversuche erfolgen entsprechend der in Abschnitt 6.4 vorgestellten Vorgehensweise zur Skalierung einer Rolle-zu-Rolle UV-Imprint-Produktion. Die theoretisch minimale Beschichtungshöhe $h_{0,theor.}$ errechnet sich zu $33,33 \mu\text{m}$. Eine ausreichend gute Füllung zeigt sich bei einer Beschichtungshöhe h_0 von $40 \mu\text{m}$. Die akzeptable Restschichtstärke h_R wird für die weitere Betrachtung auf $1 \mu\text{m}$ festgelegt.

Die minimale Andruckkraft $F_{an,min.}$ wird auf $62,5 \text{ N}$ festgelegt. Sie wird in Schritten von $62,5 \text{ N}$ bis auf einen Maximalwert von $312,5 \text{ N}$ gesteigert. Dies entspricht einer Steigerung der Linienlast von $0,25 \text{ N/mm}$ pro Iterationsschritt. Bild 7.2 zeigt die Entwicklung der Höhe der replizierten Strukturen über den Anstieg der Prägekraft. Unabhängig von der Bahngeschwindigkeit v_{Bahn} zeigt sich eine Abnahme derselben mit steigender Kraft F_{an} (vgl. Bild 6.4). Die replizierten Pyramiden erreichen die erwartete Höhe von $\geq 50 \mu\text{m}$ ausschließlich beim Aufbringen der minimalen Andruckkraft.

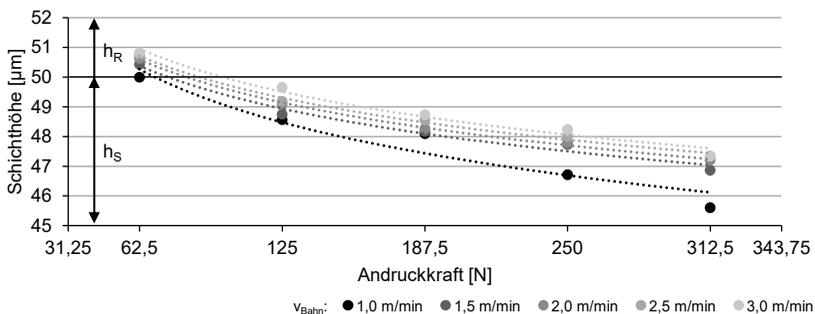


Bild 7.2: Einfluss der Andruckkraft F_{an} auf die Höhe der Mikropyramiden h_s ($h_0 = 40 \mu\text{m}$, $T = 25^\circ\text{C}$, $E_{UV} = 28\%$)

Effect of compressive normal force F_{an} on the height of the micopyramids h_s ($h_0 = 40 \mu\text{m}$, $T = 25^\circ\text{C}$, $E_{UV} = 28\%$)

Der Auftrag der Strukturhöhe über die Bahngeschwindigkeit (s. Bild 7.3) bestätigt diese Beobachtung. Mit $62,5 \text{ N}$ Andruckkraft kann im Geschwindigkeitsbereich von $1 - 3 \text{ m/min}$ eine Restschichtlage $h_R \leq 1 \mu\text{m}$ erzielt werden. Wie bereits für die V-Nuten-Strukturen gezeigt, hat eine steigende Bahngeschwindigkeit einen negativen Einfluss auf die Ausbildung der Schichthöhe h_P der geprägten Schicht bzw. der Restschicht h_R (vgl. Bild 7.3).

Für den betrachteten Parameterbereich bestätigen sich die Beobachtungen und Annahmen aus Kapitel 6 für die diskontinuierlichen, dreiseitigen Pyramiden. Die erarbeitete Vorgehensweise (vgl. Bild 6.12) liefert h_0 zu $40 \mu\text{m}$ und F_{an} zu $62,5 \text{ N}$ als optimale Einstellparameter für v_{Bahn} von $1 - 3 \text{ m/min}$, sofern $h_R \leq 1 \mu\text{m}$ tolerierbar ist.

Die Erkenntnisse zur Entwicklung der Strukturfüllung sowie der Restschicht h_R , welche anhand der Untersuchung kontinuierlicher, umlaufender V-Nuten erforscht wurden,

lassen sich auf andersartige, diskontinuierliche Strukturen übertragen. Die erarbeitete Vorgehensweise lässt sich gleichermaßen für beide Geometrien anwenden.

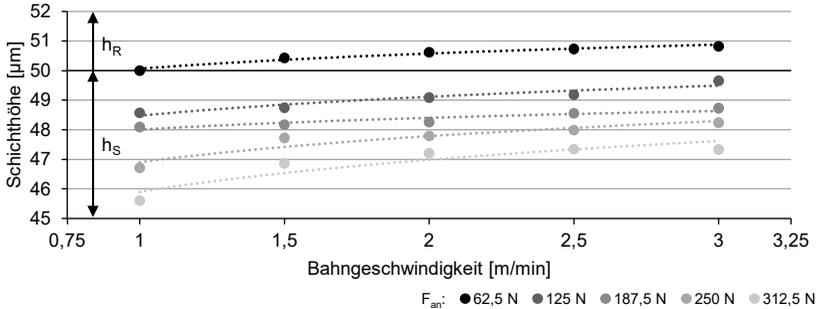


Bild 7.3: Einfluss der Bahngeschwindigkeit v_{Bahn} auf die Höhe der Mikropyramiden h_s ($h_0 = 40 \mu\text{m}$, $T = 25^\circ\text{C}$, $E_{UV} = 28\%$)

Effect of web speed v_{Bahn} on the height of the micropyramids h_s ($h_0 = 40 \mu\text{m}$, $T = 25^\circ\text{C}$, $E_{UV} = 28\%$)

7.3 Limitationen und Optimierungsgrenzen

Limitations and limits of production optimization

Die beschriebene Vorgehensweise zur Skalierung der Produktion und Erhebung geeigneter Parameter für einen fehlerfreien Rolle-zu-Rolle-UV-Imprint-Prozess beinhaltet eine Fehlerüberprüfung am Ende jeder Iterationsschleife. Ist keine fehlerfreie Replikation gegeben, wird der Skalierungsvorgang abgebrochen (vgl. Bild 6.4).

7.3.1 Andruckkraft F_{an}

Compressive normal force F_{an}

Bild 7.4 zeigt den Grund der pyramidenförmigen Kavitäten in 50-facher Vergrößerung. Die Aufnahmen wurden mit einem konfokalen 3D-Laserscanning-Mikroskop vom Typ VK-9710 der Keyence Corp. erstellt. Im Fokus steht der Tripelpunkt der Kantenlinien, welcher als ideal spitz bzw. punktförmig anzunehmen ist.

Entsprechend des Algorithmus wurde die zu Prozessbeginn eingestellte Andruckkraft F_{an} nicht gesteigert, weil h_R den erwünschten Toleranzwert von $1 \mu\text{m}$ nicht überschreitet (1. Spalte). Der positive Einfluss der Prägekräften auf die Ausbildung der Restschicht lässt erwarten, dass eine maximale Kräfteinwirkung den optimalen Arbeitspunkt darstellt (vgl. Gleichung 4.9). Es wird so das technisch-mögliche Höchstmaß an Arbeit zur Verdrängung des UV-Lacks aufgebracht. Die Strukturkavitäten werden unter höchstem Druck befüllt und der Lack aus erhabenen Strukturbereichen ausgetrieben. Bild 7.2 und Bild 7.3 stellen dar, dass bei Prägekräften $>62,5 \text{ N}$ die erwartete Strukturhöhe nicht mehr erreicht wird. Die qualitative Analyse der Replikationsqualität in Bezug auf die Abformungsgüte der Pyramidenspitzen (Bild 7.4) zeigt, dass diese Kräfte zur Deformation der replizierten Spitze im Strukturgrund (Tripelpunkt) führen. Beispielhaft

ist die Abflachung im Strukturgrund bei einer Prägekraft von 312,5 N und 3 m/min Bahngeschwindigkeit im Bild 7.4 eingekreist. Der UV-Lack wird vollständig verdrängt und die Pyramidenspitzen des Prägezylinders in das PET-Substrat gedrückt. Für eine eingestellte Substratgeschwindigkeit v_{Bahn} nimmt die Deformation mit steigender Kraft F_{an} zu. Zu erkennen ist dies bei zeilenweiser Betrachtung der Aufstellung in Bild 7.4. Weiter ist festzuhalten, dass mit zunehmender Geschwindigkeit die Deformation bei gleichbleibender Prägekraft abnimmt (spaltenweise Betrachtung). Dies entspricht den Beobachtungen zur Entwicklung der Strukturhöhe aus dem vorangegangenen Abschnitt.

Eine angemessene, an die replizierte Struktur angepasste Andruckkraft F_{an} ist somit unbedingt erforderlich. Neben einer Deformation der Replikation ist so zudem eine Beschädigung des Prägewerkzeugs vermeidbar.

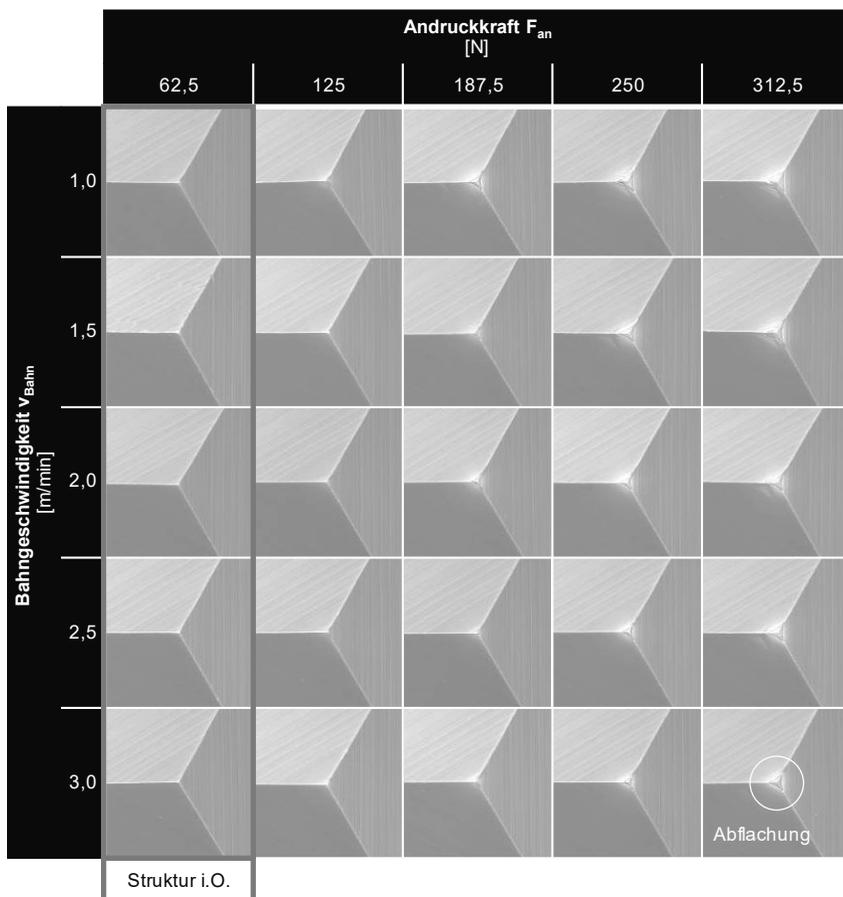


Bild 7.4: Druckkraftabhängige Deformation der Pyramiden-Näpfchen

Compressive normal force-dependent deformation in replicated pyramid cavities

7.3.2 Bahngeschwindigkeit v_{Bahn}

Web speed v_{Bahn}

Eine Steigerung der Produktionsgeschwindigkeit über 3,0 m/min hat das Auftreten weiterer Fehlerbilder zur Konsequenz. Versuche mit einer Substratgeschwindigkeit v_{Bahn} bis zu 10 m/min zeigen ein stetig wachsendes Vorkommen vollständig eingeschlossener Blasen in der Lackschicht sowie Mikrokavitäten an den erhabenen Punkten der Replikation. Die Phänomene entsprechen den Fehlerarten „Lunker“ und „Evakuierung“ aus Bild 4.1.

Die Lunker verändern das optische Erscheinungsbild der Folie so sehr, dass sie vom geschulten Bediener im Produktionsprozess wahrgenommen werden. Durch die Bahninspektionseinheit ist ihr Vorkommen mittels geeigneter Bildverarbeitungsalgorithmen zu detektieren und zu quantifizieren.

Die Mikro- und Nanokavitäten beeinträchtigen die optische Funktion der Folien ebenso wie die Lunker. Sie sind weder mit dem menschlichen Auge noch mit der optischen Inspektionseinheit zu erfassen. In Bild 7.5 ist links die 250-fache Vergrößerung der Lunker gezeigt. Rechts ist die 1.000-fach vergrößerte Aufnahme von Evakuierungsfehlern abgebildet. Für beide Aufnahmen wurde ein Digitalmikroskop der Serie VHX-700F mit Zoomobjektiv VH-Z250R der Keyence Corp. verwendet.

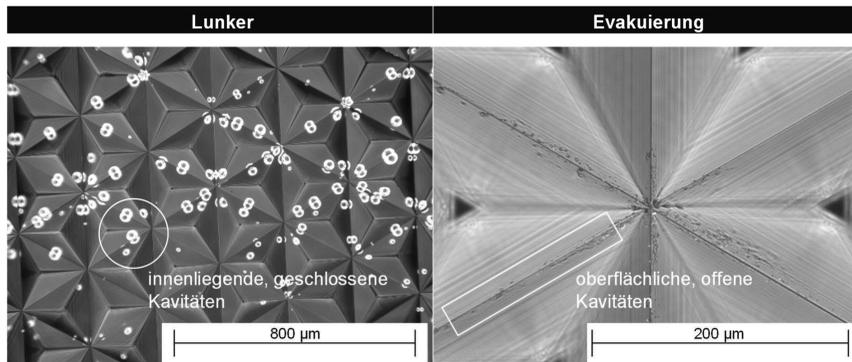


Bild 7.5: Geschwindigkeitsabhängige Fülldefekte ($h_0 = 40 \mu\text{m}$, $F_{\text{an}} = 125 \text{ N}$, $v_{\text{Bahn}} = 10 \text{ m/min}$, $T = 25^\circ\text{C}$, $E_{\text{UV}} = 28\%$)

Web speed-dependent filling defects ($h_0 = 40 \mu\text{m}$, $F_{\text{an}} = 125 \text{ N}$, $v_{\text{Bahn}} = 10 \text{ m/min}$, $T = 25^\circ\text{C}$, $E_{\text{UV}} = 28\%$)

Für das Auftreten beider Fehler ist ein Akzeptanzlevel festzulegen, das als Abbruchkriterium für die Produktionsskalierung zu dienen hat.

7.4 Zwischenfazit

Interim conclusion

Der Transfer der Ergebnisse aus Kapitel 6 wurde mit der Abformung einer diskontinuierlichen Struktur aus dreiseitigen Mikropyramiden überprüft. Die Resultate hinsichtlich des Einflusses von Andruckkraft F_{an} und Substratgeschwindigkeit v_{Bahn} sind vergleichbar. Die in Abschnitt 6.4 vorgestellte Anweisung zur Steigerung des Produktionsdurchsatzes ist für den zweiten Strukturtyp anwendbar.

Im Abschnitt 7.3 wurden Replikationsfehler vorgestellt, die auf unangemessene Einstellung der Andruckkraft F_{an} bzw. die Bahngeschwindigkeit v_{Bahn} zurückzuführen sind. Die Erkenntnisse sind:

- Die Prägekraft ist so zu skalieren, dass die Restschicht h_R unterhalb eines tolerierbaren Höchstmaßes gehalten wird. Eine willkürliche Erhöhung resultiert in Deformationen der replizierten Strukturen oder Beschädigung des Prägezyllinders.
- Mit zunehmender Bahngeschwindigkeit steigt die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Lunker- oder Evakuierungsfehlern. Während Blaseneinschlüsse durch den Bediener oder geeignete Bahninspektionseinrichtungen im Prozess erkannt werden können, ist dies für die Mikro- und Nanokavitäten, die bei einem Evakuierungsfehler auftreten, in der Regel nicht möglich.

Entstehungsmechanismen und Kompensationsstrategien zur Vermeidung der beiden letztgenannten Fehlerarten werden in den nächsten Kapiteln untersucht und diskutiert.

8 Untersuchung möglicher Füllfehler – Lunker

Investigation of potential filling defects – bubble enclosures

Lunker – Blaseneinschlüsse im ausgehärteten UV-Lack – treten vermehrt mit steigender Produktionsgeschwindigkeit v_{Bahn} auf. Sie mindern die optische Qualität und die optische Funktion des Folienmaterials. Im Folgenden wird auf die Entstehungsmechanismen dieser Fehlerart eingegangen (Abschnitt 8.1). Mit Analogien aus Untersuchungen und Simulationen von Kalenderprozessen werden Lösungsansätze zur Reduzierung der Blaseneinschlüsse entwickelt. Andruckkraft F_{an} (8.2.1) und Lackviskosität $\eta(T)$ (8.2.2) werden als relevante Prozessgrößen identifiziert und ihr Einfluss in drei Versuchsreihen dokumentiert.

8.1 Entstehungsmechanismen

Formation mechanisms

Die Blaseneinschlüsse im ausgehärteten Lack können auf zwei Phänomene zurückgeführt werden (vgl. Abschnitt 4.1).

Einerseits ergeben sie sich, falls der UV-Lack bei der Beschichtung nicht blasenfrei ausgebracht wird. Bereits die unstrukturierte Lackschicht enthält somit Luftpneinschlüsse. Gründe dafür sind:

- Luftpneinschlüsse durch Verwirbelungen des UV-Lacks bei Umfüll- oder Rührvorgängen und unzureichende Entgasung des Lacks im Vorratsbehältnis
- Mischvorgänge bei der Ausbringung des UV-Lacks z. B. durch Sprühbeschichtung (vgl. 2.2.2 „Spritzen“)
- Abtrag von Totvolumina oder Leckagen in der Materialzuleitung oder in der Schlitzdüse
- Benetzungsstörungen durch verunreinigte Substratoberflächen oder mangelnde Benetzungseignung (Oberflächenspannung bzw. -energie)

Diese Fehlerquellen sind durch Überprüfung der Lackkondition und der Funktion des Auftragssystems vor Prozessbeginn zu beseitigen. Die generelle Benetzungseignung des Lacks für das verwendete Material ist vor Produktionsbeginn zu bewerten (Abschnitt 6.1).

Andererseits postulieren YE et al. [YE14], dass Atmosphärgase durch Rühren des UV-Lacks in das flüssige Medium eingearbeitet werden. Für P2P-Ansätze sehen KIM et al. einen Zusammenhang zwischen Blaseneinschluss und Aspektverhältnis der Strukturen. Je größer das Aspektverhältnis, desto weniger Zeit ist für eine vollständige Evakuierung und Füllung der Kavitäten vorhanden, bevor der Lackfluss ihre Öffnung umfließt und verschließt. Es wird gefolgert, dass sich mit niedrigen Aspektverhältnissen die Blasenbildung reduziert. [KIM08] RYU et al. sehen die Prozessgeschwindigkeit, welche für Rolle-zu-Rolle-Prozesse der Substratgeschwindigkeit v_{Bahn} gleichzusetzen ist, als zentralen Parameter für die Reduzierung des Blasenvorkommens [RYU14].

Aus experimentellen und numerischen Betrachtungen des Kalandrierens von Polymeren ist bekannt, dass sich vor dem Walzspalt eine Front aus überschüssigem Material ansammelt. Diese Front wird als „Knet“ bezeichnet und ist bei Rolle-zu-Rolle-Imprint-Prozessen gleichermaßen zu beobachten. Die gegen das flüssige Material im Knet rotierende Kalenderwalze erzeugt durch Reibungseffekte verschiedene Wirbelströmungen, die zu Lufteinschlüssen führen (Knet-, Einlauf- und Auslaufwirbel). In Analogie zum kinematisch ähnlichen Kalenderprozess ist dieser Vorgang ebenfalls für einen Rolle-zu-Rolle-Imprint-Prozess anzunehmen. LUTHER belegt die Entstehung der Wirbel in ihrer Dissertation durch numerische Simulationen unter Annahme von newtonschem und strukturviskosem Fließverhalten. Sie schlägt eine Erhöhung der Druckkraft des Walzenpaares und eine Reduktion der Materialviskosität - z. B. durch Temperierung - vor, um die Blaseneinschlüsse zu reduzieren. Die optimalen Prozessfenster sind für das jeweilige Material zu ermitteln. [LUTH03]

8.2 Kompensationsstrategien

Compensation strategies

Lunker durch Einschluss von Blasen im unstrukturierten Lackauftrag sind nach Überprüfung der Auftragseinheit sowie des ausgebrachten Lackfilms auszuschließen. Bekannte Lösungsansätze lassen erwarten, dass die Erhöhung der Druckkraft F_{an} sowie eine Herabsetzung der Lackviskosität η das Blasenvorkommen verringern.

Die Überprüfung der Theorien erfolgt in empirischen Versuchsreihen. Die Produktionsgeschwindigkeit v_{Bahn} steigert sich im Bereich von 0,5 – 10,0 m/min um 0,5 m/min pro Arbeitspunkt. Die Druckkraft F_{an} ist auf 62,5 N oder 125 N eingestellt. Die Viskosität η wird durch die Temperierung von Präge- und Gegendruckzylinder auf 25°C bzw. 50°C von 405 mPa·s auf 75 mPa·s reduziert.

8.2.1 Druckkraft F_{an}

Compressive normal force F_{an}

In der ersten empirischen Studie wird die Druckkraft von 62,5 N auf 125 N gesteigert. Die Temperierung des Walzenpaares wird bei 25°C gehalten. In beiden Versuchsreihen wird jeweils der definierte Geschwindigkeitsbereich durchlaufen. Bild 8.1 zeigt fotografische Aufnahmen der gesamten, strukturierten Breite (150 mm) eines Folienabschnitts (40 mm). Exemplarisch ist das Produktionsergebnis bei $v_{Bahn} = 10,0$ m/min gezeigt.

Die Produktion mit geringerer Druckkraft (Bild 8.1, oben) weist ein deutlich größeres Lunkervorkommen auf als die Vergleichsproduktion mit $F_{an} = 125$ N. Die strukturierte Fläche ist über die gesamte Breite opak und erscheint - vor einem schwarzen Hintergrund abgebildet - weiß-grau. Besonders die Randbereiche zeigen vergleichsweise große Lunker. Regionen bzw. Zonen sowie schleierartige Verläufe mit unterschiedlich starkem Blaseneinschluss sind an den verschiedenen Graustufen zu erkennen. Mikroskopische Aufnahmen bestätigen das lokal variierende Lunkervorkommen und die sich ergebenden visuellen Differenzen. Die optische Funktion der Folie ist nicht

mehr in einem akzeptablen Maße gegeben. Zufällige Lichtbrechungen an den Übergängen zwischen Lunker und UV-Lack bedingen undefiniertes Streulicht.

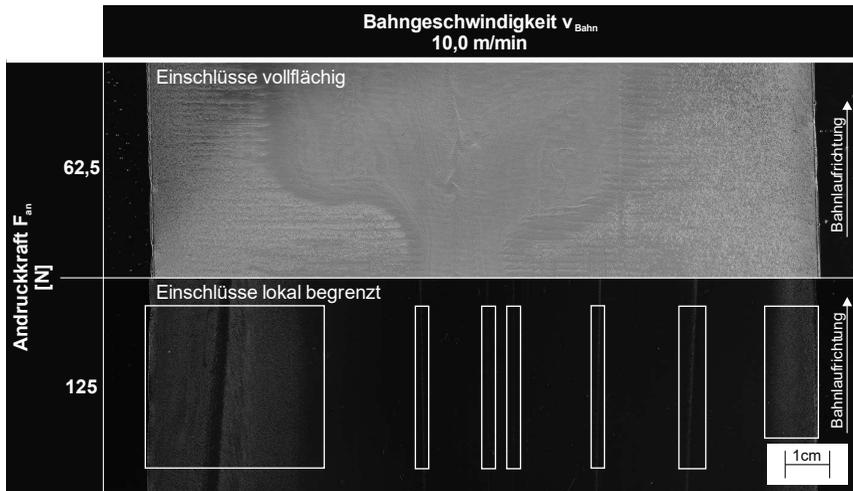


Bild 8.1: Einfluss der Andruckkraft F_{an} auf die Bildung von Blaseneinschlüssen ($h_0 = 40 \mu\text{m}$, $T = 25^\circ\text{C}$, $E_{UV} = 28\%$)

Effect of compressive normal force F_{an} on the generation of bubble enclosures ($h_0 = 40 \mu\text{m}$, $T = 25^\circ\text{C}$, $E_{UV} = 28\%$)

Die Produktion mit erhöhter Andruckkraft zeigt eine verbesserte optische Qualität (Bild 8.1, unten). Lunker treten vermehrt in den Randbereichen auf (weiße Umrahmung links und rechts außen). Sie ziehen sich schleierartig in Bahnlaufrichtung und skalieren in Bezug auf Fehlerdichte und Defektbreite mit der Produktionsgeschwindigkeit. Die Mitte der 150 mm breiten Struktur ist transparent – der schwarze Hintergrund ist ungetrübt sichtbar – und weist vereinzelt linienförmige Ansammlungen von Lunkern in Laufrichtung auf. Im Bild als vertikale, weiße Linien erkennbar (weiß umrandet). Die optische Funktion der Folie ist in Teilbereichen (dunkle Bereiche) gegeben.

Die Strukturen, die mit größerer Andruckkraft F_{an} hergestellt sind, umschließen in allen zwanzig Arbeitspunkten weniger Lunkerdefekte. Dies zeigt sowohl die makroskopische Begutachtung als gleichermaßen die mikroskopische Untersuchung der Einschlüsse. Aus der gesteigerten Andruckkraft resultiert ein verminderter Walzspalt. Dies ist unter anderem aus der reduzierten Strukturhöhe h_s bzw. Restschicht h_R bei wachsendem F_{an} zu folgern (vgl. Bild 6.4, Bild 7.2). Die Einschlüsse gelangen aufgrund ihrer Größe und ihres Auftriebs weniger schnell in den Spalt am Grund des Lackauftrags. Der Materialdruck im Walzspalt nimmt zu, wodurch die dort eingebrachten Blaseneinschlüsse aus den Strukturen bzw. aus dem Walzspalt verdrängt werden. Die in der Materialwelle (Knet) vorherrschenden Turbulenzen durchmischen den überschüssigen Lack. Sie tragen die Blasen an die Grenzfläche zur umgebenden Atmosphäre, wo diese zerfallen.

In Abschnitt 7.3.1 ist belegt, dass die Andruckkraft F_{an} nicht beliebig gesteigert werden kann, ohne die Pyramiden-Replikation zu deformieren. Die Reduzierung des Lunckerfehlers durch Steigerung von F_{an} ist somit begrenzt.

8.2.2 Viskosität $\eta(T)$

Viscosity $\eta(T)$

In einer dritten Versuchsreihe wird die Walzentemperatur von 25°C auf 50°C gesteigert. Dies entspricht einer Reduzierung der Viskosität η des UV-Lacks von 405 mPa·s auf 75 mPa·s, bei vollständiger Durchdringung der thermischen Energie. Die Andruckkraft F_{an} wird bei 125 N gehalten. Der Geschwindigkeitsbereich wird in denselben Abstufungen wie in den vorangehenden Versuchsreihen durchlaufen. Bild 8.2 zeigt fotografische Aufnahmen der gesamten, strukturierten Breite (150 mm) eines Folienabschnitts (40 mm). Exemplarisch ist das Produktionsergebnis bei $v_{Bahn} = 10,0$ m/min gezeigt.

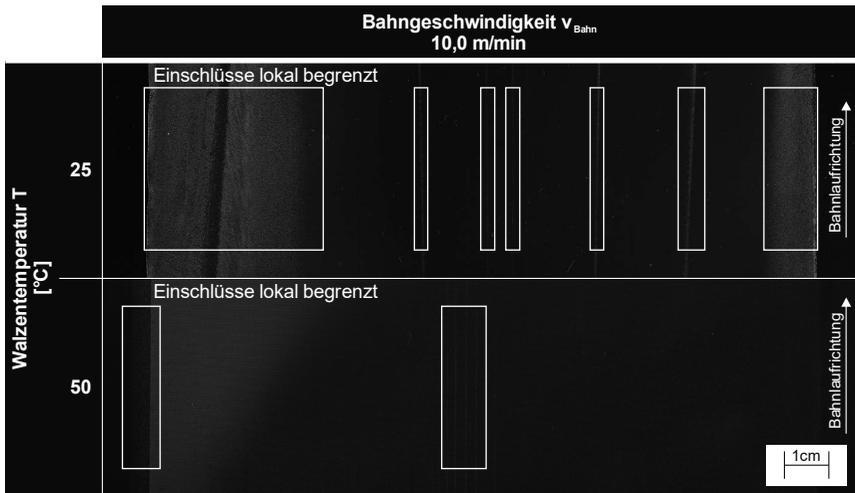


Bild 8.2: Effekt der Walzentemperatur T auf die Bildung von Blaseneinschlüssen ($h_0 = 40 \mu\text{m}$, $F_{an} = 125 \text{ N}$, $E_{UV} = 28\%$)

Effect of drum temperature T on the generation of bubble enclosures ($h_0 = 40 \mu\text{m}$, $F_{an} = 125 \text{ N}$, $E_{UV} = 28\%$)

Das Folienmaterial der dritten Versuchsreihe bei 50°C weist ein nahezu homogenes Erscheinungsbild auf. Der helle Bildbereich links ist lediglich eine Reflexion der Folie bei der Bildaufnahme; kein Defektareal. In der Bahnmitte finden sich in Laufrichtung mehrere linienförmige Lunckeransammlungen, wie in der zweiten Versuchsreihe (weiß umrandet). Makroskopisch sind keine zonalen, schleierartigen Lunkervorkommen auszumachen. Die strukturierte Fläche ist transparent und die optische Funktion ist über die gesamte Folienbreite gegeben. Lediglich in den randnahen Bereichen sind ver-

mehrt Blasen eingeschlossen. Mikroskopische Aufnahmen bestätigen dies. Die Dimensionen der einzelnen Blasen sind wesentlich geringer als in der Versuchsreihe mit 25°C Walzentemperatur. Die verringerte Viskosität begünstigt die Entgasung des Knets. Entstehende Luftblasen entweichen schneller aus dem niederviskosen, verwirbelten Lackmaterial. Eine weitere Temperaturerhöhung verringert die Viskosität aufgrund des Materialverhaltens (exponentiell fallend, vgl. Bild 4.5) nicht mehr signifikant. Ab 60°C einsetzende, thermisch-induzierte Aushärtungsprozess verschlechtern das Ergebnis [CROM08].

Die Entwicklung der Lackflussgeschwindigkeit quer zur Bahnaufrichtung erklärt das verstärkte Auftreten von Lunkern in den Randbereichen der strukturierten Fläche bzw. der beschichteten Breite. In ihren Untersuchungen belegt LUTHER, dass in Walzenmitte das einströmende Material direkt durch den Walzspalt geführt wird. Es ist keine Geschwindigkeitskomponente in Querrichtung vorhanden. Aufgrund des Druckgradienten im Knet strömt das Material innerhalb des Knetwirbels spiralförmig in Richtung der Walzenenden. Die Strömungsgeschwindigkeit in Querrichtung steigt mit Annäherung an die Walzenenden. [LUTH03] Gaseinschlüsse können somit im Knetwirbel aus der Mitte in die Randbereiche getragen werden. Die zunehmende Querströmungskomponente in den Walzenendebereichen verstärkt die turbulente Durchmischung im Knet. Umgebungsgase werden schneller eingeschlossen und länger in den Verwirbelungen gehalten. Mit zunehmender Substratgeschwindigkeit v_{Bahn} breiten sich die Lunker schleierartig aus den Randbereichen der Strukturen zur Bahnmitte hin aus.

In Bild 8.3 ist dieses Phänomen anhand von Makroaufnahmen der Randbereiche aus den Versuchsreihen zwei und drei belegt. Für die zweite Versuchsreihe ($F_{\text{an}} = 125 \text{ N}$, $T = 25^\circ \text{C}$) zeigt sich die Ausbreitung des Lunkervorkommens mit steigender Substratgeschwindigkeit v_{Bahn} deutlich.

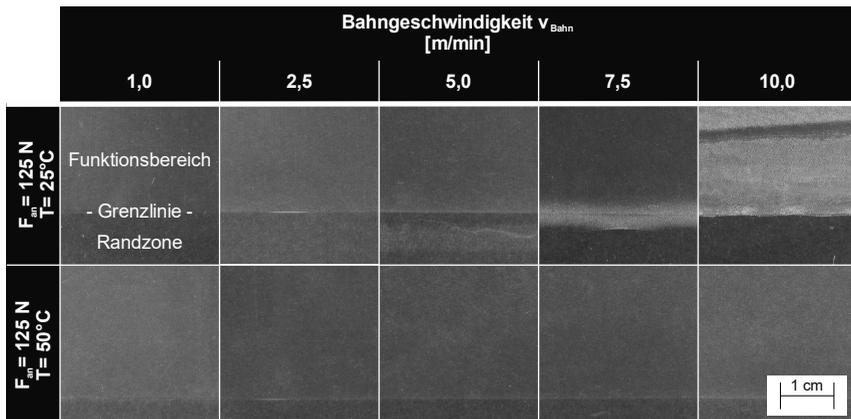


Bild 8.3: Entstehung und Ausbreitung der Blaseneneinschlüsse in strukturierten Randbereichen

Generation and spreading of the bubble enclosures at the structured edges

Bei $v_{\text{Bahn}} = 2,5$ m/min zeigen sich erste grau-weiße Streifen im Übergang zwischen strukturierter und unstrukturierter Fläche. Mit 5,0 m/min sind im unstrukturierten Bereich deutliche Fehlstellen zu erkennen. Diese breiten sich zunehmend in den Funktionsbereich aus (vgl. $v_{\text{Bahn}} = 7,5$ m/min) und erzeugen dort die beschriebenen, opaken Zonen bzw. Schleier (vgl. $v_{\text{Bahn}} = 10,0$ m/min).

Das Lunkervorkommen lässt sich durch Temperierung von Präge- und Gegendruckzylinder bzw. Herabsetzung der Viskosität signifikant reduzieren. Im unteren Teil der Aufstellung ($F_{\text{an}} = 125$ N, $T = 50^\circ\text{C}$) ist die Ausbildung von Lunkern aus den Randbereichen zur Bahnmitte hin anhand der Aufnahmen nicht zu erkennen.

Die Modifikation der Materialviskosität η mittels Temperierung ist durch die Kondition der Photoinitiatoren limitiert. Temperaturen von mehr als 60°C bewirken eine thermisch-induzierte Polymerisation. Die prozessspezifische Optimierung der Viskosität über chemische Anpassung der Lackformulierung ist daher empfehlenswert. Die Auswirkung einer geänderten Lackformulierung ist nicht Bestandteil des vorliegenden Untersuchungsumfangs.

8.3 Zwischenfazit

Interim conclusion

Bei defekt- bzw. einchlussfreiem Lackauftrag entstehen die als Lunker bezeichneten Blaseneinschlüsse durch Verwirbelungen im „Knet“, dem überschüssigen UV-Lack vor dem Walzspalt.

Analog zu den Untersuchungsergebnissen aus Kalanderverfahren von Polymermaterialien nach [LUTH03] sind Andruckkraft F_{an} sowie Materialtemperatur T bzw. die temperaturabhängige Lackviskosität $\eta(T)$ geeignete Parameter zur Reduzierung von Lunkern. Eine Steigerung der Andruckkraft bzw. eine Verringerung der Viskosität verbessern das Replikationsergebnis.

Die Andruckkraft kann nur soweit gesteigert werden, dass die replizierten Strukturen noch defektfrei abgeformt werden (vgl. Abschnitt 7.3.1). Ein Absenken der Viskosität durch Erwärmung des UV-Lacks ist nur möglich, solange keine thermisch-induzierte Polymerisation ausgelöst wird. Es empfiehlt sich daher eine prozessspezifische Viskositätsanpassung durch Optimierung der chemischen Zusammensetzung des UV-Lacks.

9 Untersuchung möglicher Füllfehler – Evakuierung

Investigation of potential filling defects – evacuation

Fehler durch unzureichende Evakuierung der Walzenkavitäten sind Hohlräume im ausgehärteten Lack mit einer Öffnung zur Umgebung. Ausprägungen dieser Art liegen somit unmittelbar unter bzw. an der Oberfläche der replizierten Strukturen. Wie in Abschnitt 4.1 beschrieben, sind es unvollständige Füllungen der Zylinderkavitäten durch Einschluss von Atmosphärgas (Luft oder Inertgas) [WANG15]. Die Größe der Defekte ist um ein Vielfaches kleiner als die der Lunker. Zur Analyse der Proben dieser Arbeit wurden lichtmikroskopische Aufnahmen mit 250- bis 1.000-facher Vergrößerung sowie REM-Aufnahmen angefertigt. Obgleich die Füllfehler klein sind, mindern sie die optische Qualität der Folienprodukte entscheidend. Das Wissen um die Entstehungsmechanismen und etwaige Fehlerkompensations- bzw. Vermeidungsstrategien ist essentiell, da die Fehlstellen, anders als Lunker, nicht mit konventioneller Bahninspektion (Bildverarbeitung) zu erfassen sind.

Mit einer Fluid-Simulation lässt sich die Füllung der dreiseitigen Pyramidenstruktur detailliert untersuchen, der Entstehungsmechanismus visualisieren und Kompensationsstrategien ableiten. Mit empirischen Methoden sind vergleichbare Untersuchungen und Beobachtungen nicht zu realisieren. Die Arbeiten von KIM et al., MORIHARA et al., HIRAI, YE et al., PENG et al. und WU et al. stellen Simulationen des UV-NIL-Prozesses sowie wichtige Einflussgrößen der Füllung vor [KIM08, MORI09, HIRA10, ZHAN15a, YE14, PENG16, WU16]. WU und PENG behandeln die Simulation der Füllung einer vergleichbaren dreiseitigen Pyramidenstruktur. In der vorliegenden Arbeit werden allerdings Pyramiden-Näpfcchen in den Lack geprägt (invertierte Pyramiden), während in den genannten beiden Veröffentlichungen hervorstehende Pyramiden erzeugt werden. Folgend wird die Füllung mehrerer aneinandergrenzenden Pyramiden untersucht. In den bekannten Untersuchungen werden entweder zweidimensionale Modelle analysiert oder das dreidimensionale Füllverhalten einer einzigen Struktur untersucht. Die Interaktion der Strömungen aus benachbarten Kavitäten wird vernachlässigt. Eine quantitative Beziehung zwischen Simulation und Realverhalten wird nicht in Experimenten untersucht.

Im Folgenden wird daher zunächst das numerische Simulationsmodell und seine Implementierung vorgestellt (9.1). Die Ergebnisse der CFD-Simulation (engl.: Computational Fluid Dynamics; deutsch: Strömungssimulation) werden mit den Versuchsergebnissen abgeglichen und die Simulation somit validiert. Das zweite Unterkapitel (9.2) behandelt die Klärung des Entstehungsmechanismus der Evakuierungsfehler. Im Abschnitt 9.3 werden der Einfluss von Bahngeschwindigkeit v_{Bahn} , Andruckkraft F_{an} sowie den Materialparametern Viskosität η , Oberflächenenergie σ_l und -spannung σ_s der berührenden Medien betrachtet. Abschließend werden Handlungsempfehlungen zur Vermeidung von Evakuierungsfehlern gegeben und die Ergebnisse im Kapitel „Zwischenfazit“ (9.4) zusammengefasst. Thermische Einflüsse auf die Viskosität werden nicht

betrachtet. Stattdessen wird eine Simulation mit den Materialeigenschaften von Wasser als Referenz herangezogen. Die Simulation abstrahiert und idealisiert die Füllvorgänge im Walzspalt bzw. unmittelbar davor. Materialbewegungen durch Aushärtungsmechanismen oder Turbulenzen im Knet werden nicht betrachtet. In Analogie zu den bekannten Untersuchungen in Kalenderprozessen ist anzunehmen, dass die Strömung im Walzspalt laminar ist [LUTH03].

9.1 CFD-Simulation

CFD simulation

Die Strömungssimulation wird mit dem CFD-Paket der FEM-Software (Abk. für „Finite-Elemente-Methode“) Ansys der Ansys Inc. erstellt. Der Erstellungsprozess ist in Bild 9.1 in sechs Schritten dargestellt.

	Schritt	Resultate
1.	Analyse	<ul style="list-style-type: none"> • Geometrische und physikalische Rahmenbedingungen • Vereinfachung/ Modellreduktion • Prozessparameter-Design
2.	Geometrie Solidworks 2016 ANSYS SpaceClaim	<ul style="list-style-type: none"> • Geometrische Modellierung • Modellparametrierung
3.	Diskretisierung/ Vernetzung ANSYS Mesh	<ul style="list-style-type: none"> • Vernetzungselemente • Konvergenzstudien
4.	Modellübergänge ANSYS Fluent	<ul style="list-style-type: none"> • Grenzbedingungen (Boundary-Conditions)
5.	Solver-Einstellungen ANSYS Fluent	<ul style="list-style-type: none"> • Mathematische Modellierung • Konvergenzkriterien • Diskretisierungsschema • Solver-Typ • Zeitschrittwertensteuerung • Parallelverarbeitung (Multi-Core-Processing)
6.	Nachbearbeitung ANSYS CFD-Post	<ul style="list-style-type: none"> • Ergebnisanalyse • Visualisierung

Bild 9.1: Vorgehensweise zur Erarbeitung des Simulationsmodells

Approach for definition numerical simulation model

9.1.1 Problemanalyse und -abstraktion

Process analysis and abstraction

Die Problemdefinition resultiert aus der Zielsetzung einer Minderung von Evakuierungsfehlern bei möglichst geringer Restschicht h_R und hoher Substratgeschwindigkeit v_{Bahn} . Die Problemanalyse konzentriert sich auf den Walzspalt bzw. seine unmittelbare Umgebung. Gemäß dem dynamischen Kraftverteilungsmodell im Walzspalt nach AHN et al. [AHN09a] herrscht dort eine parabolische Druckverteilung orthogonal zur Bahnlaufrichtung vor. Sie stellt sich aufgrund der Hertz'schen Pressung zwischen Präge- und Andruckwalze ein (vgl. Bild 4.9). Der Einfluss der Bahnzugkraft wird vernachlässigt

(vgl. Bild 5.9). Eine weitere vereinfachende Annahme ist, dass die Walzenkrümmung in der Kontaktzone durch die wirkenden Kräfte abflacht und als Ebene anzunehmen ist. YE et al. führen diese Vereinfachung unter der Bedingung ein, dass das Verhältnis der simulierten Muster zum Walzenradius kleiner als 0,03 ist [YE14]. In der vorliegenden Konstellation darf der betrachtete Strukturausschnitt demnach nicht länger als 3 mm sein. Die Strömungsausprägung wird als laminar angenommen (vgl. [LUTH03]). Die Einlaufrichtung des Lacks wird entgegen der Bahnlaufrichtung angenommen. Durch die synchrone Bewegung der rotierenden Walzen und des beschichteten Substrats füllen sich die Kavitäten der Walze in Bahnlaufrichtung gesehen von hinten nach vorne. Hinsichtlich der wiederkehrenden, symmetrischen Anordnung der Pyramiden ist dieser Aspekt jedoch von geringer Bedeutung für die Richtigkeit des Modells. Vielmehr sind die Fließ- und Benetzungseigenschaften des UV-Lacks elementar für ein optimales Füllverhalten. Zur exakten Abbildung der Wandhaftungs- und Wandreibungsbedingungen bzw. des Benetzungsverhaltens werden die Kontaktwinkel des UV-Lacks auf PET $\theta_{\text{PET}} = 31,837^\circ$ sowie auf dem Kupfer $\theta_{\text{Cu}} = 62,882^\circ$ empirisch ermittelt (Kontaktwinkelmessgerät OCA20 LHT, DataPhysics Instruments GmbH). Weiterhin fließen Materialdichte $\rho = 1.060,088 \text{ g/cm}^3$, dynamische Viskosität $\eta(25^\circ\text{C}) = 405 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ und die Oberflächenspannung des Lacks $\sigma_{\text{Lack}} = 38,879 \text{ mN/m}$ in das Materialmodell ein. Entsprechend der Resultate aus Kapitel 6 und 7 wird angenommen, dass lediglich die Andruckkraft F_{an} und die Substratgeschwindigkeit v_{Bahn} einen signifikanten Einfluss auf die Ausbildung der Restschicht h_{R} haben. Andere Variablen werden zur Beherrschung der Modellkomplexität vernachlässigt.

9.1.2 Geometrische Modellierung

Geometric modelling

Die geometrische Modellierung erfolgt mit der 3D-Software Solidworks 2016 der Fa. Dassault Systèmes sowie Ansys Space Claim der Ansys Inc. zur Vereinfachung und Parametrierung des Pyramidenmusters. Die Anzahl der Pyramiden wird auf vier festgelegt. Das Modell ist somit $873 \mu\text{m}$ lang. Entsprechend des zuvor beschriebenen Kriteriums nach YE et al. [YE14] sind bis zu 13 Pyramiden zulässig. Eine große Anzahl betrachteter Strukturen steigert jedoch nicht die Qualität der Simulation, aber den Berechnungsaufwand. Vier Pyramiden erbrachten in Voruntersuchungen eine hinreichend belastbare Aussage über die Interaktion der Strömungen aus benachbarten, regelmäßigen Mikrostrukturen. Die Breite des geometrischen Modells ist auf die Hälfte der achssymmetrischen Pyramidenreihe reduziert (vgl. Bild 9.1). Sie beträgt $126 \mu\text{m}$. Diese Annahme nutzt symmetrische Randbedingungen, die in Voruntersuchungen validiert wurden (vgl. Abschnitt 9.1.4). Die Höhe des Modells setzt sich aus der fixen Höhe der dreiseitigen Pyramiden $h_{\text{S}} = 50 \mu\text{m}$ sowie dem variablen Anteil der Restschicht h_{R} zusammen. Sie ist entsprechend der wirkenden Andruckkraft F_{an} und der Substratgeschwindigkeit v_{Bahn} anzupassen. Außer der invertierten Pyramiden auf der Oberseite des Raummodells sind alle weiteren Seiten als ideal flach und senkrecht zueinander angenommen.

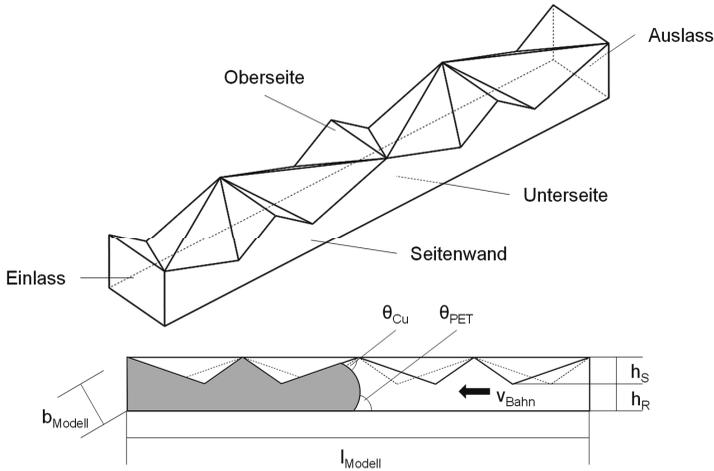


Bild 9.2: Dimensionen und Randzonen des geometrischen Modells
Dimensions and boundary zones of the geometric model

9.1.3 Diskretisierung des Modells

Modell discretization

Die Diskretisierung des Volumenmodells erfolgt mit polyedrischen, finiten Elementen. Sie sind aus tetraedrischen Gittern in Ansys Fluent zu erzeugen. Bild 9.3 zeigt beispielhaft das vernetzte Objekt. Vorteile dieser Vernetzung gegenüber einer tetraedrischen sind:

- bessere Darstellung von Gradienten aufgrund höherer Anzahl benachbarter Elemente (Tetraeder: 4 Seiten),
- höhere Ergebnisgenauigkeit bei geringeren Anzahl an Elementen,
- schnellere Konvergenz bei weniger Iterationen pro Zeiteinheit und somit
- kürzere Berechnungszeiten.

Einlass und Auslass sowie Ober- und Unterseite des Modells sind mit drei Lagen prismatischer Elemente versehen. Diese entstehen aus der Extrusion angrenzender Polyederflächen und sind somit gleichermaßen vielseitig. Zum einen sind die Randbedingungen an Ober- und Unterseite mit diesem Elementen-Typ gut zu erfassen (z. B. Wandreibung). Zum anderen wird das Streuverhalten an Ein- und Auslass reduziert.

Der ideale Vernetzungsgrad bzw. die ideale Elementgröße und -anzahl wird in einer Konvergenzstudie ermittelt. Hierzu werden die Materialeigenschaften von Wasser und Luft sowie die entsprechenden Randbedingungen (Kontaktwinkel, etc.), eine Anströmgeschwindigkeit von 10 m/min, Auslass bei Atmosphärendruck sowie eine Restschichtstärke von $h_R = 50 \mu\text{m}$ angenommen. Konvergenzkriterien sind der durchschnittliche Druck sowie die durchschnittliche Fließgeschwindigkeit. Die Studie zeigt, dass

die Ergebnisse ab Elementen kleiner $12\ \mu\text{m}$ in allen Dimensionen konvergieren. Dies entspricht 54.864 tetraedrischen oder 26.940 polyedrischen Elementen.

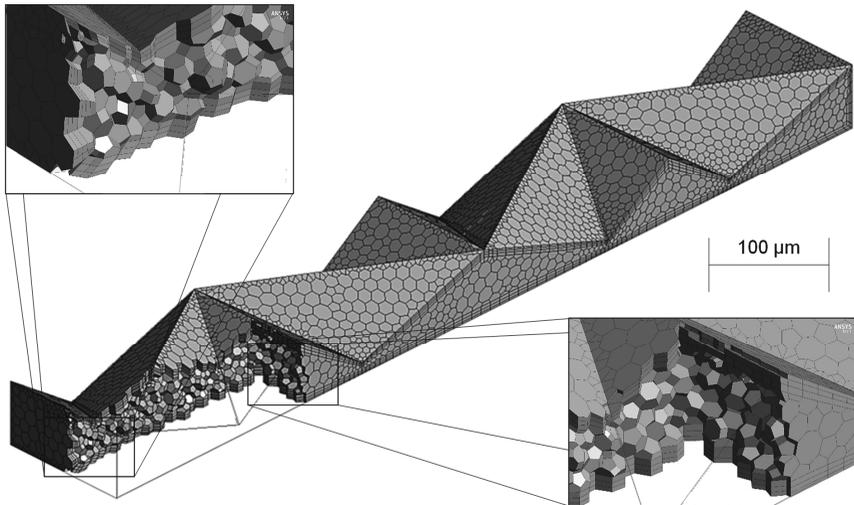


Bild 9.3: Verteilung der prismatischen und polyedrischen Elemente
Distribution of prismatic and polyhedral elements

9.1.4 Randschichtbedingungen

Boundary conditions

Die physikalischen Eigenschaften der Flächen des Volumenmodells sind entsprechend ihrer realen Funktion parametrisiert.

Tabelle 9.1: Definition der Randbedingungen

Boundary conditions settings

	Grenzbedingung
Einlass	<ul style="list-style-type: none"> • Strömungsgeschwindigkeit: v_{Bahn} • Strömungsrichtung: Flächennormale • Initialer Volumenanteil: 1
Auslass	<ul style="list-style-type: none"> • Mediendruck: Atmosphäre
Oberseite	<ul style="list-style-type: none"> • Kontaktwinkel $\theta_{\text{Cu}} = 62,17^\circ$
Unterseite	<ul style="list-style-type: none"> • Kontaktwinkel $\theta_{\text{PET}} = 32,72^\circ$
Seitenwände	<ul style="list-style-type: none"> • Symmetrische Strömungen

Ober- und Unterseite sind Schnittstellen zwischen UV-Lack und Prägezylinder bzw. Foliensubstrat. Zum einen gelten die Randbedingungen für laminare Ströme zwischen parallelen Platten. Zum anderen werden die gemessenen Kontaktwinkel berücksichtigt (s. Tabelle 9.1). Die Einlassgeschwindigkeit entspricht der Substratgeschwindigkeit

v_{Bahn} und ist orthogonal zur Eintrittsfläche. Das eintretende Medium ist blasenfrei (Volumenanteil = 1). Entsprechend des dynamischen Druckmodells ist der Mediendruck nach dem Passieren der Andruckzone gleich dem Atmosphärendruck.

Für die Längsseiten werden symmetrische Randbedingungen angenommen. Dies erfolgt unter der Annahme, dass aufgrund der achssymmetrisch geteilten Pyramidenstruktur das Fließ- bzw. Füllverhalten sowie die übrigen Randbedingungen gleichermaßen symmetrisch sind.

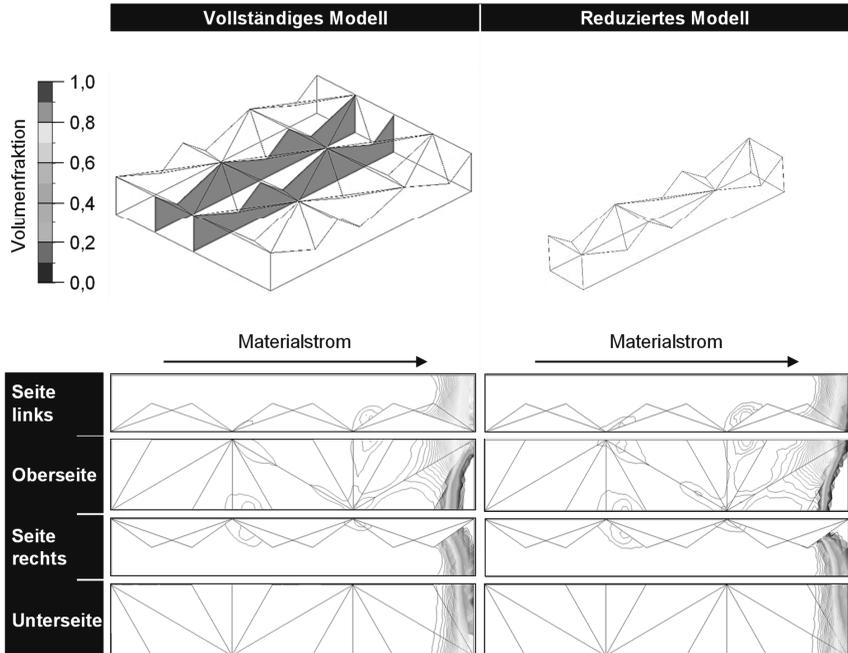


Bild 9.4: Validierung der symmetrischen Randbedingungen anhand vollständiger und reduzierter Pyramidenstrukturen

Validation of symmetric boundary conditions by full-featured and reduced pyramid structures

Die Verifikation der Annahme erfolgt durch Berechnung des Strömungsverhaltens in einem vierfach breiteren Modell. Es umfasst über die Breite zwei gleich orientierte Pyramiden (s. Bild 9.4). Für die Längsseiten werden Haftreibungsbedingungen angenommen. Alle weiteren Randbedingungen bleiben gleich. In Bild 9.4 ist der Gradient des Volumenanteils Lack je finitem Element entlang der Strukturen bei Erreichen der Auslassfläche gezeigt. Für das große Referenzmodell ist ein Segment aus der Mitte gleich dem reduzierten Modell zu betrachten, um die Einflüsse der Wandreibungsbedingungen vernachlässigen zu können.

Obleich kleinere Unterschiede in der Ausprägung des Gradienten erkennbar sind, zeigt sich, dass Verortung und Form der Gradientenlinien annähernd gleich sind. Die

Abweichungen sind auf Unterschiede in der Vernetzungsdichte und der Orientierung der Elemente zurückzuführen. Insgesamt ist die Reduzierung des Modells sowie die Verwendung symmetrischer Randbedingungen als zulässig anzunehmen.

9.1.5 Solver-Einstellungen

Solver settings

Die mathematische Modellierung erfolgt mit dem Volume-Of-Fluid-Modell (VOF), welches sich durch eine hervorragende Performance bzgl. Interface-Tracking in Bezug auf geschichtete Strömungen auszeichnet. Konvergenzkriterien sind die Residuen der Kontinuitäts- und der Impulsgleichungen, welche den Wert von 10^{-4} innerhalb von 200 Iterationen zu erreichen haben. Die Einstellungen für die Diskretisierung und den Solver sind folgender Tabelle zu entnehmen:

Tabelle 9.2: Zusammenfassung der gewählten Simulationseinstellungen

Summary of the chosen simulation settings

	Lösungsansatz
Numerisches Modell	• Volume-Of-Fluid (VOF)
Konvergenzkriterium	• Residuen der Kontinuitäts- und Impulsgleichungen $\leq 0,0001$
Diskretisierungsschema	• Gradient: zellbasierte Least-Squares-Methode • Druck: PRESTO! • Impuls: MUSCL 3. Ordnung • Volumenfraktion: CICSAM • Zeit: explizit
Solver-Typ	• Druckbasierter Solver für instationäre Prozesse
Zeitschrittwweitensteuerung	• Variable Zeitschritte (Courant-Zahl= 1)
Parallelverarbeitung	• Hauptachsenmethode (8 Kerne)

Die Courant-Friedrichs-Lewy-Bedingung (Courant-Zahl, CFL < 1) wird durch Implementierung variabler Zeitintervalle eingehalten. Der Wert der CFL gibt an, wie viele numerische Elemente pro Zeitschritte maximal vom Materialstrom durchdrungen werden.

$$CFL = \frac{v \cdot \Delta t}{\Delta x} \quad (9.1)$$

Je betrachtetem Zeitintervall darf maximal ein Volumenelement vom Fluid durchdrungen werden (CFL < 1), damit das angewandte Lösungsverfahren (explizites Euler-Verfahren) stabil ist. Die Restriktion des Massenerhalts bedingt über den signifikant veränderlichen Querschnitt der Strukturen wechselnde Strömungsgeschwindigkeiten, die so zu berücksichtigen sind.

Zur Beschleunigung der Rechenvorgänge wird der Volumenkörper in acht Segmente annähernd gleicher Elementen- und Teilflächenzahl zerlegt. Die Partitionierung erfolgt entlang der Längsachse in Flussrichtung (Hauptachsenmethode).

9.1.6 Post-Processing und Validierung

Post-processing and validation

Die numerischen Ergebnisse werden mit Ansys CFD-Post visualisiert und aufbereitet. Zur Validierung der Simulationsergebnisse werden diese mit Erkenntnissen aus empirischen Untersuchung abgeglichen.

Für den Abgleich der Ergebnisse sind Simulation und Realversuch gleich parametrisiert. Die Bahngeschwindigkeit v_{Bahn} wird in einer Schrittweite von 0,5 m/min von 0,5 m/min bis 10 m/min variiert, die Andruckkraft F_{an} beträgt 125 N, die Beschichtungshöhe h_0 wird auf 40 μm eingestellt und der Prozess findet bei einer Walzentemperatur T_{Walze} von 25°C statt. Der Auftrag ist makroskopisch blasenfrei. Eine Probe jeder Geschwindigkeitsstufe wird an fünf Stellen auf Füllfehler überprüft. Mit einem Digitalmikroskop der Serie VHX-700F mit Zoomobjektiv VH-Z250R der Keyence Corp. werden Aufnahmen mit 500- und 1.000-facher Vergrößerung analysiert. Vollständig eingeschlossene, großvolumige Lunker werden wegen ihres bekannten Entstehungsmechanismus (vgl. Kapitel 8) als irrelevant vernachlässigt.

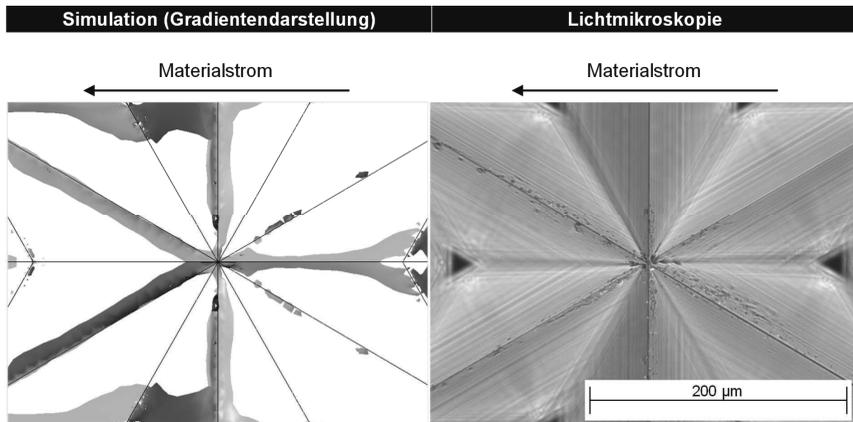


Bild 9.5: Vergleich der Füllung von Simulation (links) und Experiment ($h_0= 40 \mu\text{m}$, $F_{\text{an}}= 125 \text{ N}$, $v_{\text{Bahn}}= 10 \text{ m/min}$, $T= 25^\circ\text{C}$, $E_{\text{UV}}= 28\%$)

Comparison of filling in simulation (left) and experiment ($h_0= 40 \mu\text{m}$, $F_{\text{an}}= 125 \text{ N}$, $v_{\text{Bahn}}= 10 \text{ m/min}$, $T= 25^\circ\text{C}$, $E_{\text{UV}}= 28\%$)

Simulation und Realversuch werden in zwei Punkten abgeglichen: Zum einen hinsichtlich der Verortung der Fülldefekte und zum anderen hinsichtlich des Einflusses der Substratgeschwindigkeit auf die Quantität des Fehlers. Bild 9.5 zeigt in beiden Bildausschnitten den Schnittpunkt der Kantenlinien von sechs benachbarten Mikropyramiden. Die sternförmig aus der Mitte herauslaufenden Linien bilden den Abschluss der höchstgelegenen Bereiche der Pyramidennäpchen. Für beide Fälle liegt die Substratgeschwindigkeit bei 10 m/min.

Im linken Teil der Darstellung ist das Ergebnis der Simulation unmittelbar hinter der Lackfront dargestellt. Die grau hervorgehobenen Areale sind Iso-Flächen gleichen Volumenanteils. Hier stellen sie eine Füllung mit 30 % UV-Lack dar. Sie zeigen die Phasengrenze zwischen der gasförmigen, zu verdrängenden Atmosphäre und dem flüssigen Prägelack auf. In den großen Arealen am linken und rechten Rand der oberen Bildhälfte ist die Lackwelle zum Betrachtungszeitpunkt nicht so weit vorgedrungen wie in der Bildmitte. Hier sammelt sich die nicht evakuierte Luft entlang der Firstlinien der Strukturen. Im Verlauf des Prozesses vereinzeln sich die durchgängigen Kanäle zu Blasen bzw. oberflächlichen Kavitäten wie sie in der unteren Bildhälfte bereits erkennbar sind. In der mikroskopischen Aufnahme des Realversuchs (Bild 9.5, rechts), zeigt sich das gleiche Phänomen. Entlang der beschriebenen Linien finden sich ebenfalls als dunkle Punkte erkennbare, offene Nanokavitäten. Sie finden sich nicht entlang der in die Näpfcchen verlaufenden Kantenlinien oder auf den Seitenflächen. Die Ergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung für die Lokalisierung der Defekte.

Der reale Füllfehler ist kaum volumetrisch quantifizierbar. Das Volumen der Fülldefekte im betrachteten Probenausschnitt ist mit den verfügbaren Messverfahren nicht ausreichend präzise zu ermitteln. Der nicht gefüllte Volumenanteil lässt sich aus den Simulationsergebnissen leicht berechnen. Mit steigender Substratgeschwindigkeit ist somit ein Anstieg des nicht gefüllten Volumens zu erwarten (vgl. Bild 9.6, links). Diese Tendenz zeigt die Auswertung der Realversuche ebenfalls. Dazu wurden über den betrachteten Geschwindigkeitsbereich die erkennbaren Nanokavitäten an fünf Stellen je Probe gezählt und ihr Wert gemittelt. Das resultierende Diagramm in Bild 9.6, rechts belegt die Tendenz der Auftretenshäufigkeit bzw. der Defektwahrscheinlichkeit.

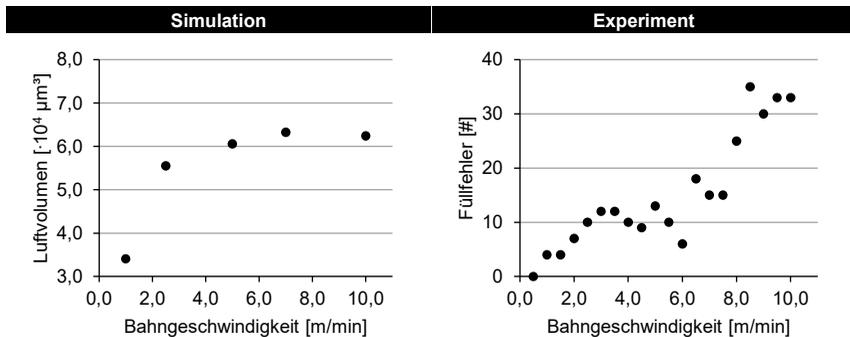


Bild 9.6: Fülldefekte mit steigender Bahngeschwindigkeit v_{Bahn} in Simulation (links) und Experiment ($h_0 = 40 \mu\text{m}$, $F_{\text{an}} = 125 \text{ N}$, $T = 25^\circ\text{C}$, $E_{\text{UV}} = 28\%$)

Filling defects in correlation to web speed v_{Bahn} by simulation (left) and experiment ($h_0 = 40 \mu\text{m}$, $F_{\text{an}} = 125 \text{ N}$, $T = 25^\circ\text{C}$, $E_{\text{UV}} = 28\%$)

Obleich die kalkulierten Volumina des Simulationsmodells und die empirisch ermittelten Blasenanzahlen nicht direkt vergleichbar sind, ist jeweils ein ähnlicher Trend erkennbar. In beiden Fällen zeigen das Auftreten der Blasendefekte und die Substratgeschwindigkeit eine positive Korrelation.

9.2 Entstehungsmechanismen

Formation mechanisms

Die unvollständige Füllung der Strukturen konzentriert sich auf die erhabenen Kantenlinien der Mikropyramidennäpfcchen. Für die Analyse der Defekentstehung werden die Simulationsergebnisse für eine Substratgeschwindigkeit $v_{\text{Bahn}} = 10 \text{ m/min}$ und eine Restschichthöhe $h_R = 3 \text{ }\mu\text{m}$ herangezogen. Ursächlich für das Füllverhalten ist die replizierte Geometrie. Zur besseren Visualisierung wird die simulierte Geometrie nachfolgend an der rechten Seite gespiegelt abgebildet (vgl. Bild 9.7). Hierdurch ergibt sich eine Reihe vollständiger Pyramidennäpfcchen, woran das Fließverhalten anschaulich zu erläutern ist. Trotz der vergleichsweise einfachen Regelgeometrie der Mikropyramiden ist das Strömungsbild des UV-Lacks komplex. Durch die geneigten Wände der Pyramiden wird der Lack in unterschiedliche Richtungen abgelenkt und durchfließt ein stetig veränderliches Höhenprofil. Der variierende Querschnitt der Kavitäten resultiert in wechselnden Strömungsgeschwindigkeiten. Parallele, divergierende und konvergierende Strukturflächen erzeugen alternierende Regionen unterschiedlichen Strömungs- und Füllverhaltens. Das Pyramidenmuster ist für die Betrachtung der Defekentstehung im Weiteren in zwei Regionen unterteilt. Die Volumina abgedeckt von Kantenlinien parallel zur Materialflussrichtung und den angrenzenden Dreiecksflächen werden als „parallele Regionen“ bezeichnet (vgl. Bild 9.7). In den übrigen Abschnitten verlaufen die Kantenlinien im Winkel von $\pm 30^\circ$ zur Einlassrichtung des Lacks. Diese Volumina sind unter dem Begriff „diagonale Regionen“ zusammengefasst.

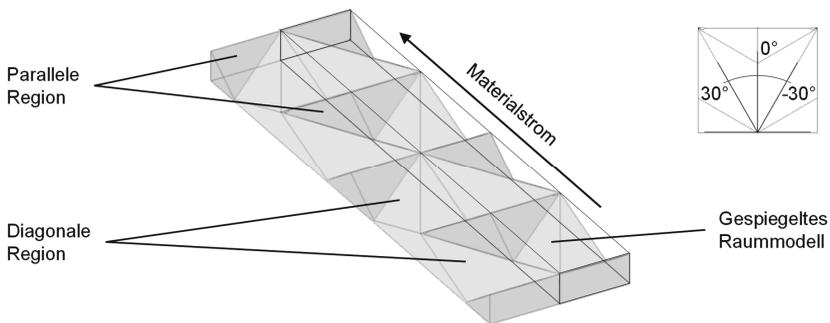


Bild 9.7: Pyramidenmuster in Regionen unterschiedlichen Strömungsverhaltens

Pyramid pattern in regions of different flow behavior

Die schrägen Seitenflächen in den diagonalen Regionen lenken den orthogonal zur Einflussebene einströmenden Lack entlang der Kantenlinien ab. Die Lackfront bildet eine Strömungsspitze in der Mitte des Strukturquerschnitts aus. Hier herrschen die höchsten Fließgeschwindigkeiten und der Einfluss der Wandreibung ist am geringsten. Bei Erreichen einer parallelen Region wird die Lackfront abrupt durch die orthogonal zur ursprünglichen Fließrichtung angeordneten Strukturflächen blockiert und umgelenkt. Die Strömungsvektoren orientieren sich entlang der parallelen Kantenlinien. Die parallele Region wird von zwei Seiten mit Lack befüllt bis die Lackfronten vom rechten

und linken Schnittpunkt der Kantenlinien ausgehend kollidieren. Nach der Kollision der Lackströme und der Befüllung der parallelen Region orientiert sich der Lackfluss wieder in Richtung der nachfolgenden diagonalen Region. Entsprechend des wechselnden Querschnitts wird die zu anfangs parallele Region langsam befüllt. Mit abnehmender Strukturhöhe wird der UV-Lack in Richtung der diagonalen Regionen beschleunigt.

In diesem Zusammenhang ist die Entstehung der Evakuierungsdefekte auf zwei Effekte zurückzuführen. Der erste Effekt ist die Kollision des Materialflusses in den parallelen Regionen. Bild 9.8 zeigt die Kontur bzw. die Iso-Linie der Lackfront mit einem Volumenanteil von 0,3 für vier Stadien des Füllprozesses in einer parallelen Region.

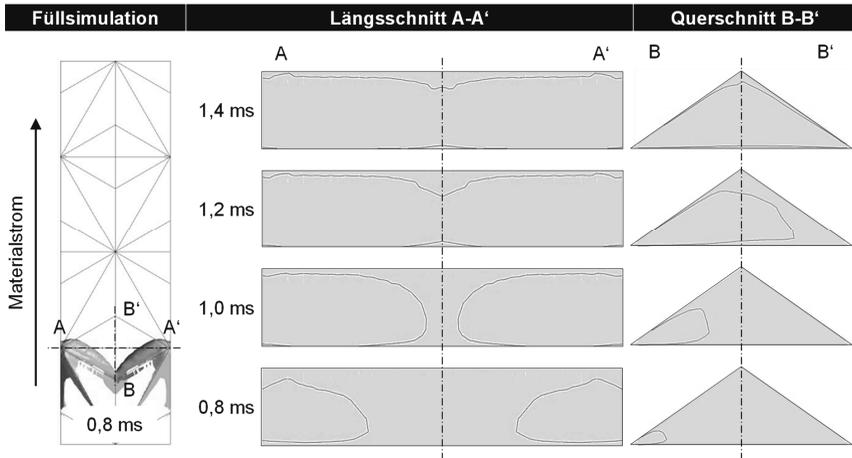


Bild 9.8: Stadien des Füllprozesses in parallelen Regionen ($h_R = 3 \mu\text{m}$, $v_{\text{Bahn}} = 10 \text{ m/min}$)
Stages of filling process in parallel regions ($h_R = 3 \mu\text{m}$, $v_{\text{Bahn}} = 10 \text{ m/min}$)

Die Schnittfläche A-A ist die Querschnittsfläche entlang der Kantenlinien und somit orthogonal zur initialen Strömungsrichtung. Die Schnittfläche B-B orientiert sich senkrecht zu ihr und liegt in der Spiegelachse des Volumenmodells. Die durch Iso-Linien eingeschlossenen Flächen sind mit Lack gefüllt. Flächen zwischen den Linien und den Wänden enthalten ausschließlich Luft. Die dreidimensionale Darstellung der Iso-Flächen im linken Bildteil veranschaulicht den Füllstatus bei 0,8 ms. Bild 9.8 bei 0,8 ms und 1,0 ms zeigen im Schnitt A-A die Bewegung der beiden Lackfronten zur Mitte hin. Mit fortschreitender Zeit kollidieren sie und die Lackströme vermischen sich (Bild 9.8, 1,2 ms). Aus den Schnittansichten B-B wird deutlich, dass die erhöhten Areale nahe der Firstlinie nicht vollständig befüllt bzw. evakuiert werden, bevor der UV-Lack zur rechten Seitenfläche des Querschnitts B-B gelangt und den Weg zur Entgasung der übrigen Luft verschließt. Ist ein Abströmen in die verbundenen, diagonalen Regionen ebenfalls nicht mehr möglich, sammelt sich die Luft in Blasenform.

Der zweite Effekt ergibt sich aus dem Einfluss der Viskosität. Die Viskosität des UV-Lacks begünstigt die Anhaftung der Blasen an den Flächen des Prägezyinders. Dieses Verhalten wird durch die spitz zulaufenden Flächen verstärkt. Die Einschlüsse

werden durch den einströmenden Lack und ihre Auftriebskraft dorthin verdrängt. Die Kontaktfläche ist entlang der Kantenlinien aufgrund der zulaufenden Seiten erhöht und hindert das Mittreiben in der Strömung. Dieses Verhalten tritt in allen Regionen auf. In Bild 9.9 sind Querschnitte einer diagonalen Region sowie deren Füllung in vier Stadien abgebildet. Die Schnittansicht A-A verläuft hier ebenfalls mit der Kantenlinie. Schnitt B-B liegt orthogonal zu A-A in der Mitte der diagonalen Region. Die abgebildete Iso-Linie gibt die Position aller finiten Elemente mit einem Volumenanteil von 0,3 an. Die Iso-Flächendarstellung am linken Bildrand illustriert den Status bei 2,1 ms Füllzeit. Die zeitliche Abfolge der vier Querschnittsansichten zeigt, dass die Struktur in der Mitte der diagonalen Region ideal ausgefüllt bzw. evakuiert wird. Schnittansicht B-B belegt eine gasarme Füllung der Spitzen des Querschnitts. Am rechten Rand der Ansicht A-A ist über alle Füllstadien eine nicht entgaste Fläche am oberen Rand der Struktur erkennbar. Dies ist der Übergangsbereich zwischen paralleler und diagonaler Region. Dieses Phänomen belegt, dass die Viskosität des UV-Lack eine Bewegung entstandener Luftreservoirs erschwert und die Ausbildung von Totvolumina bzw. Evakuierungsfehlern begünstigt.

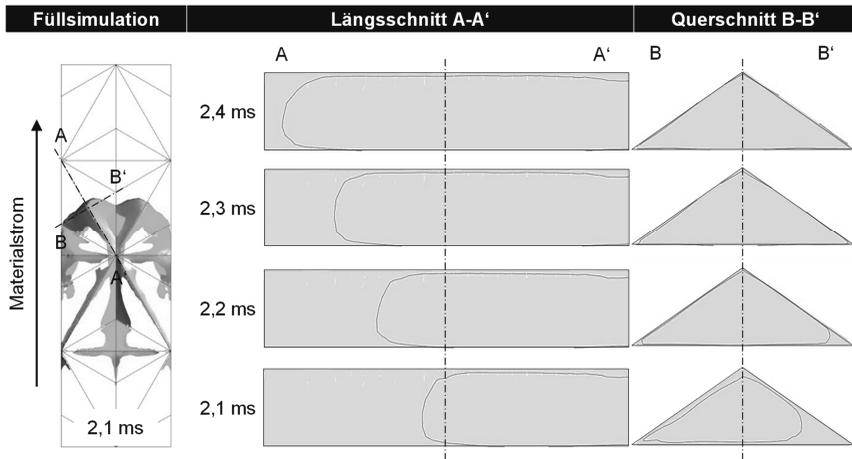


Bild 9.9: Stadien des Füllprozesses in diagonalen Regionen ($h_R = 3 \mu\text{m}$, $v_{\text{Bahn}} = 10 \text{ m/min}$)
Stages of filling process in diagonal regions ($h_R = 3 \mu\text{m}$, $v_{\text{Bahn}} = 10 \text{ m/min}$)

Zusammenfassend kann belegt werden, dass Blasendefekte aufgrund von Evakuierungsfehlern stark abhängig von der geometrischen Form der Mikro- und Nanostrukturen sind. Materialeigenschaften wie die Viskosität begünstigen die Entstehung.

9.3 Kompensationsstrategien

Compensation strategies

Zur Untersuchung der Korrelation der Blasendefekte mit der Substratgeschwindigkeit v_{Bahn} , der Andruckkraft F_{an} und dem Einfluss der Viskosität $\eta(T)$ wird das eingeschlos-

sene Luftvolumen analysiert. Für die numerische Simulation wird dieses über die Integral-Funktion von Ansys CFD-Post bestimmt. Das Zeitkriterium ist für alle Substratgeschwindigkeiten als der Zeitpunkt definiert, an dem die Lackfront mit einem Volumenanteil von 0,9 auf die Austrittsfläche des Raummodells trifft. Betrachtungsraum sind die ersten zwei aufeinanderfolgenden Mikropyramiden. Für die empirische Versuchsreihe zum Einfluss der Viskosität wird die Anzahl der auftretenden Blasendefekte ermittelt.

Bild 9.10 verdeutlicht den Einfluss der Substratgeschwindigkeit auf die Entstehung von Evakuierungsfehlern. Der Plot zeigt das summierte Volumen im Bilanzbereich der zwei ersten Pyramiden für eine Andruckkraft $F_{an}= 62,5 \text{ N}$, $187,5 \text{ N}$ und $312,5 \text{ N}$. Alle drei Kurven steigen in der unteren Hälfte des Geschwindigkeitsbereichs an. Das eingeschlossene Luftvolumen erhöht sich signifikant bei kleinen Änderungen der Substratgeschwindigkeit. In der zweiten Hälfte des Plots zeigt sich ein Abflachen der Kurvenverläufe, ein konvergentes Verhalten. Innerhalb des betrachteten Geschwindigkeitsbereichs stellt sich eine gleichbleibende Defektausbildung ein. Der Grad der unvollständigen Evakuierung ist über die Wahl geeigneter Prozessparameter bei der Produktionsskalierung zu kompensieren. Anhand des Einsatzbereichs des Folienprodukts ist ein tolerables Fehlerniveau zu bestimmen.

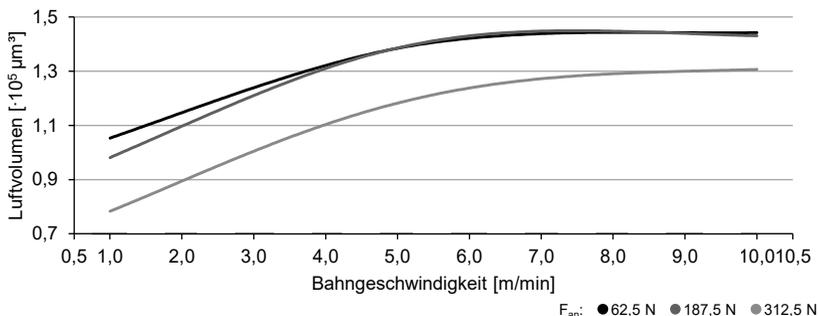


Bild 9.10: Eingeschlossenes Luftvolumen bezogen auf Bahngeschwindigkeit v_{Bahn}

Entrapped air volume with respect to web speed v_{Bahn}

Die Füllzeit t_{Fall} und somit das Zeitfenster für die Evakuierung der Kavitäten wird durch die Bahngeschwindigkeit v_{Bahn} vorgegeben. In Bild 9.11 ist ein Vergleich der Strukturfüllung bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten aufgezeigt. Verglichen wird die Verteilung der finiten Elemente mit einem Volumenanteil von 0,3 bei $v_{Bahn}= 1 \text{ m/min}$, 5 m/min und 10 m/min (graue Teilflächen). Die Betrachtungszeitpunkte sind entsprechend der Geschwindigkeiten angepasst, um innerhalb einer Spalte dasselbe Füllstadium abbilden zu können. Aus der letzten Spalte wird deutlich, dass eine niedrige Füllgeschwindigkeit bzw. eine höhere Füllzeit die Qualität der Replikation positiv beeinträchtigt. Die grauen Teilflächen stellen die Phasengrenze zwischen der zu verdrängenden Atmosphäre und dem flüssigen Prägelack dar (Lackfront). Die pyramidalen Strukturen werden in Materialstromrichtung gefüllt. Bei idealer Füllung existieren keine

grauen Teilflächen in den Kavitäten nachdem die Lackfront diese passiert hat. Die Kavitäten sind vollständig mit Lack befüllt. Sind jedoch nach Passieren der Lackfront graue Teilflächen in den Kavitäten zu erkennen, so deutet dies auf eine Phasengrenze, das Vorhandensein von Atmosphärendgas (Luft) und somit eine unvollständige Füllung der Strukturen hin. Während sich bei 10 m/min die ungefüllten Areale an den erhabenen Stellen der Pyramidennäpfchen entlang des gesamten Prüfvolumens ziehen (Bild 9.11, 10 m/min, 75 %), sind bei 1 m/min die ersten beiden Pyramiden einschlussfrei (Bild 9.11, 1 m/min, 75 %).

Mit steigender Substratgeschwindigkeit wächst ebenfalls der Geschwindigkeitsgradient im UV-Lack und es bildet sich eine Lackfront, welche besonders die Spitzen der Pyramidennäpfchen nicht ausfüllt.

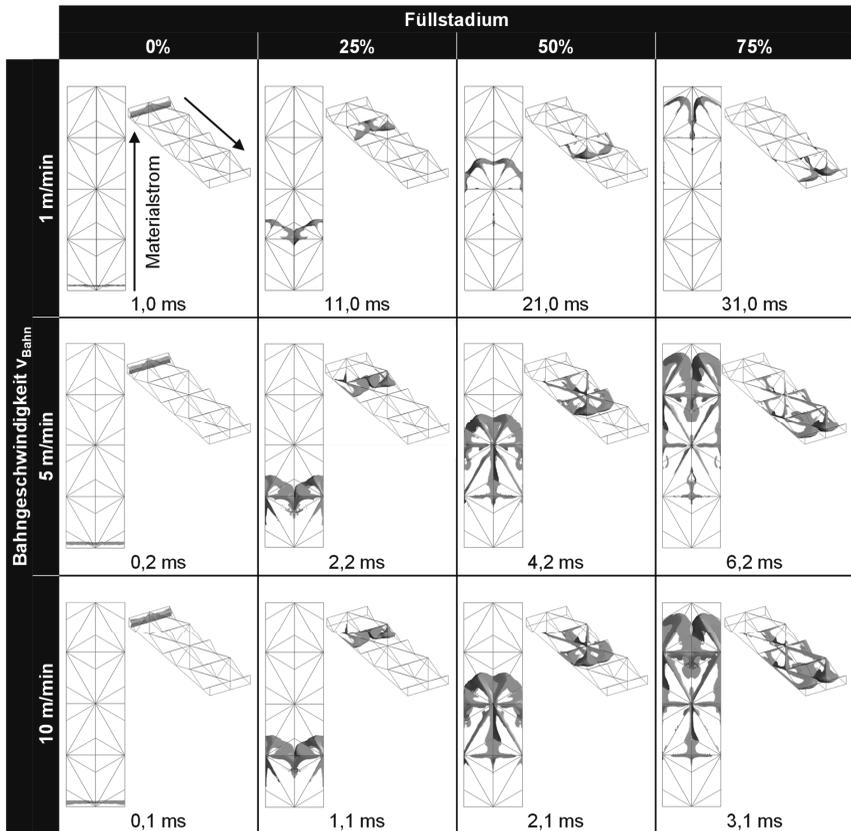


Bild 9.11: Stadien vergleichbarer Füllgrade bei unterschiedlichen Bahngeschwindigkeiten

v_{Bahn} ($h_R = 3 \mu\text{m}$, $F_{\text{an}} = 125 \text{ N}$)

Stages of comparable degrees of filling at different web speeds v_{Bahn} ($h_R = 3 \mu\text{m}$, $F_{\text{an}} = 125 \text{ N}$)

Bild 9.12 illustriert diesen Effekt im Querschnitt entlang einer diagonalen Region. Je höher die Bahngeschwindigkeit, desto mehr eilt die Spitze der Lackfront ihren Berührungspunkten mit den Seitenflächen der Kavitäten voraus. Für $v_{\text{Bahn}} = 5 \text{ m/min}$ und 10 m/min existiert kein Kontaktpunkt zwischen Oberkante der Kavität und Lack innerhalb des analysierten Querschnitts. Es bilden sich die mehrfach beschriebenen Kanäle bzw. Totvolumina. Gleichmaßen verschieben sich die Kontaktpunkte mit der Unterseite der Kavität relativ zur Spitze der Lackfront nach hinten. Dieses Verhalten ist auf die Trägheit des UV-Lacks bedingt durch seine spezifische Viskosität zurückzuführen. Für niederviskosere, newtonsche Fluide ist ein besseres Füllverhalten bzw. eine weniger starke Kanalisierung bei gleichen Geschwindigkeiten zu erwarten.

Die Füllzeit $t_{\text{füll}}$ kann bei steigender Produktionsgeschwindigkeit gemäß Formel 4.3 durch eine Verringerung der Viskosität $\eta(T)$ oder Erhöhung der Andruckkraft F_{an} gesteigert werden. Die Auswirkungen dieser Kompensationsstrategien sind in den folgenden Abschnitten analysiert.

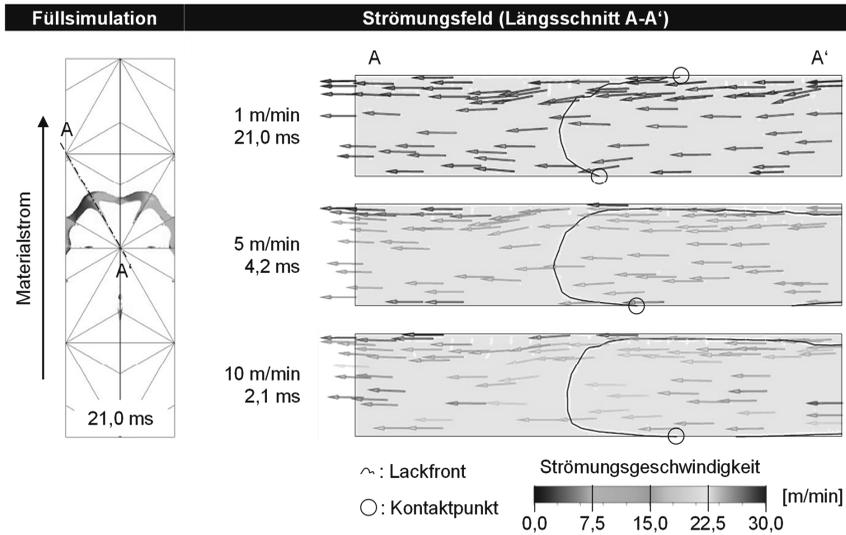


Bild 9.12: Kontur der Lackfront bei unterschiedlichen Bahngeschwindigkeiten v_{Bahn} ($h_R = 3 \mu\text{m}$, $F_{\text{an}} = 125 \text{ N}$)

Contour of the resist front with different web speeds v_{Bahn} ($h_R = 3 \mu\text{m}$, $F_{\text{an}} = 125 \text{ N}$)

9.3.1 Andruckkraft F_{an}

Compressive normal force F_{an}

Die Analyse der Krafteinwirkung wird ebenfalls über die Integral-Funktion von Ansys CFD-Post aus den Ergebnissen der numerischen Simulationen abgeleitet.

Bild 9.13 zeigt über den Betrachtungsbereich von 62,5 N bis 312,5 N einen positiven Effekt für alle drei gewählten Substratgeschwindigkeiten. Signifikant ist, dass

Kraftänderungen im Bereich >225 N einen vergleichsweise größeren Einfluss auf den Ergebniswert haben als darunter. Weiter ist festzuhalten, dass mit steigender Substratgeschwindigkeit der Gesamteinfluss der Kraftvariation innerhalb des Variablenbereichs sinkt.

Der Evakuierungsfehler ist durch eine Steigerung der Andruckkraft nur bedingt zu kompensieren. Eine Verbesserung des Effekts bei höheren Substratgeschwindigkeiten ist mit einem überproportionalen Krafteintrag verbunden. Hier ist zu beachten, dass die Mikro- und Nanostrukturen des Prägezyllinders nicht beschädigt werden.

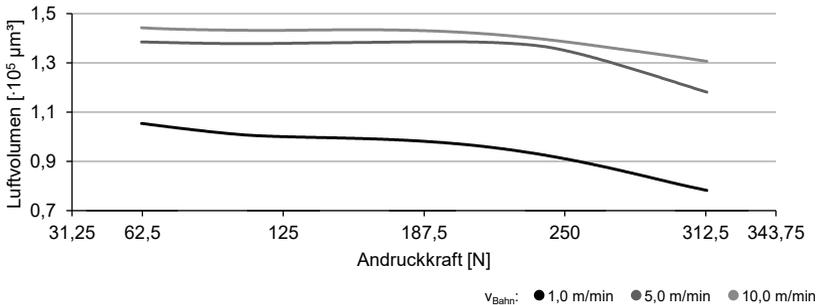


Bild 9.13: Eingeschlossenes Luftvolumen bezogen auf Andruckkraft F_{an}

Entrapped air volume with respect to the compressive normal force F_{an}

Die Andruckkraft beeinflusst insbesondere den Druck innerhalb des UV-Lacks im Walzspalt (vgl. Bild 4.9). Die Druckverteilung in den Kavitäten ist in den Plots in Bild 9.14 illustriert. Es wird die Druckverteilung im UV-Lack bei den Andruckkräften $F_{\text{an}} = 67,6$ N, $120,7$ N und $272,5$ N zum Zeitpunkt $2,1$ ms bei einer Substratgeschwindigkeit von 10 m/min betrachtet.

In allen drei Fällen ist der maximale Druck im Einlassbereich des Strukturmodells verortet (rechte Seite). Physikalisch ist dies zu erklären, da zum Betrachtungszeitpunkt von $2,1$ ms dieser Bereich im Gegensatz zum links gelegenen Auslass bereits befüllt ist und Atmosphärendruck am Auslass angenommen wird. Der Unterschied der verschiedenen Plots liegt in der Ausprägung des maximalen Drucks und der Form der Lackfront. Je größer der Druckgradient, desto schneller wird der UV-Lack in die ungefüllten Bereiche der Kavitäten beschleunigt. Hierdurch füllt das Material die Kavitäten nicht nur in Längsrichtung schneller, sondern gelangt in kürzerer Zeit auch in die oberen und unteren Randbereiche des gezeigten Querschnitts. Dies resultiert wiederum in einem höheren Füllgrad und weniger eingeschlossener Luft. Es wird mehr Lack innerhalb der gleichen Zeit in die Kavitäten gepresst. Mit gesteigerter Substratgeschwindigkeit v_{Bahn} reduziert sich dieser Effekt aufgrund der geringeren Verdrängungs- bzw. Füllzeit entsprechend.

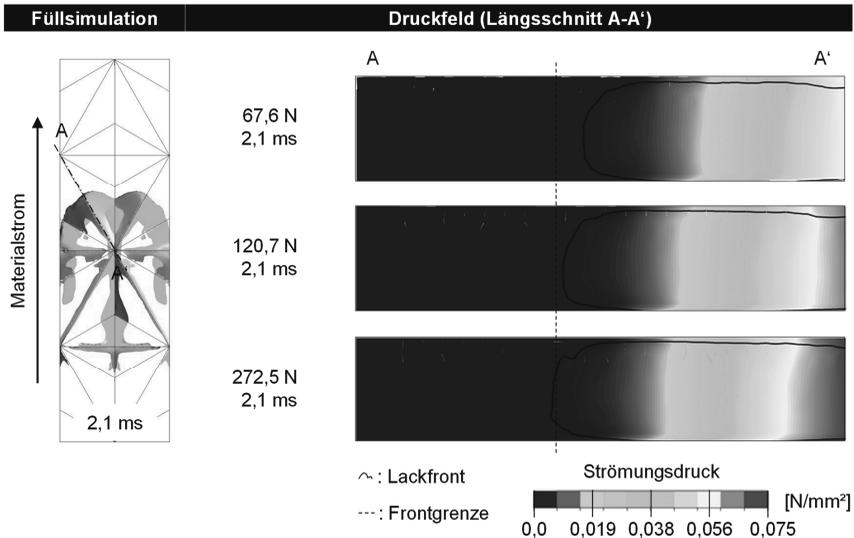


Bild 9.14: Druckverteilung bei unterschiedlichen Andruckkräften F_{an} ($h_R = 3 \mu\text{m}$, $v_{Bahn} = 10 \text{ m/min}$)

Pressure distribution with different compressive normal forces F_{an} ($h_R = 3 \mu\text{m}$, $v_{Bahn} = 10 \text{ m/min}$)

9.3.2 Viskosität $\eta(T)$

Viscosity $\eta(T)$

Der Einfluss der Viskosität wird sowohl numerisch als auch empirisch betrachtet. Als Referenzflüssigkeit mit niedriger Viskosität wird Wasser genutzt. In Tabelle 9.3 sind die Daten für Wasser bei Raumtemperatur im Vergleich zu den bekannten Daten des UV-Lacks aufgelistet.

Tabelle 9.3: Materialeigenschaften von Wasser und UV-Lack (MO-5) im Vergleich

Material properties of the water and resist (MO-5) in comparison

	Wasser	UV-Lack
Dichte ρ [g/cm ³]	0,9982	1,0601
Viskosität η [mPa·s]	1,00	400,00
Oberflächenspannung $\sigma_{I,Medium}$ [mN/m]	72,00	38,88
Kontaktwinkel θ_{Cu} [°]	84,95	62,88
Kontaktwinkel θ_{PET} [°]	66,79	31,84

Die Relevanz der Materialeigenschaften insbesondere des UV-Lacks ist hinreichend bekannt. Oberflächenspannung σ_{Lack} , die Kontaktwinkel θ_{Cu} und θ_{PET} sowie die Viskosität η variieren mit der Materialtemperatur. Die temperaturabhängigen Materialkennwerte für den UV-Lack sind nicht bekannt oder mit den zur Verfügung stehenden Möglichkeiten zu ermitteln.

Der Füllprozess bei 10 m/min ist für Wasser und den UV-Lack in Bild 9.15 in jeweils vier zeitgleichen Stadien abgebildet. Die dargestellten Iso-Flächen geben die finiten Elemente mit einem Volumenanteil von 0,3 wieder. Die Fließfront des Wassers ist vergleichsweise schmal. Anders als im viskoserem UV-Lack bildet sich keine spitze Lackfront mit einem großen Geschwindigkeitsgradienten aus. Die Wandreibungseffekte sind gering. Im Gegensatz zum UV-Lack bilden sich keinerlei ungefüllte Kanäle in den erhabenen Bereichen der Kavitäten. Diese sind demzufolge unmittelbar nach dem Passieren der Lackfront ideal gefüllt bzw. evakuiert. Aus dem Vergleich ist zu schließen, dass eine Reduzierung der Materialviskosität mit einer wesentlichen Verringerung der Fülldefekte einhergehen wird.

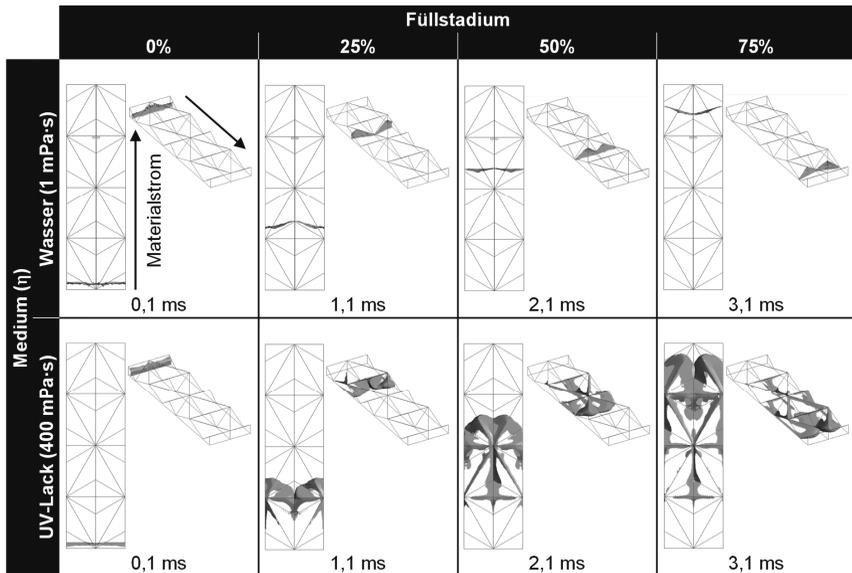


Bild 9.15: Stadien vergleichbarer Füllgrade bei unterschiedlichen Materialien ($h_R = 3 \mu\text{m}$, $v_{\text{Bahn}} = 10 \text{ m/min}$)

Stages of comparable degrees of filling with different materials $h_R = 3 \mu\text{m}$, $v_{\text{Bahn}} = 10 \text{ m/min}$

Diese Annahme wird in einem empirischen Experiment validiert. Durch die Temperierung der Präge- und Andruckwalze wird die Temperatur des UV-Lacks im Walzspalt erhöht, wodurch sich seine Viskosität entsprechend Bild 4.5 reduziert. Das Walzenpaar wird auf 50°C aufgeheizt. Als Referenz dient eine Versuchsreihe bei 25°C. Die

Pyramidenstrukturen werden im Geschwindigkeitsbereich von 0,5 – 10 m/min in Schritten von 0,5 m/min abgeformt und ausgehärtet. Fünf Stellen der so entstandenen Proben werden mikroskopisch auf das Vorkommen der Evakuierungsfehler untersucht und die Anzahl der entdeckten Defekte erfasst. Das Diagramm in Bild 9.16 zeigt die absolute Häufigkeit der Evakuierungsfehler an den Prüfstellen über die verschiedenen Bahngeschwindigkeiten aufgetragen.

Das Diagramm bestätigt die numerischen Ergebnisse. Die Produkte aus den Versuchen mit niedriger Materialviskosität besitzen deutlich weniger Defekte als die Referenzstrukturen. Ist eine Einstellung der Viskosität über chemische Zusammensetzung des Materials nicht möglich, kann demzufolge eine Temperierung des UV-Lacks eine markante Verbesserung in Bezug auf Fülldefekte erzielen.

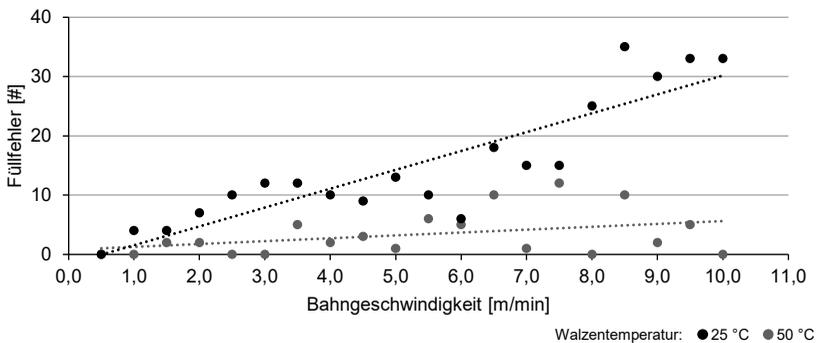


Bild 9.16: Anzahl der Füllfehler (gezählt) bezogen auf die Bahngeschwindigkeit v_{Bahn} ($h_0 = 40 \mu\text{m}$, $F_{\text{an}} = 125 \text{ N}$, $E_{\text{UV}} = 28\%$)

Number of filling defects (counted) with respect to web speed v_{Bahn} ($h_0 = 40 \mu\text{m}$, $F_{\text{an}} = 125 \text{ N}$, $E_{\text{UV}} = 28\%$)

9.4 Zwischenfazit

Interim conclusion

Blasendefekte aufgrund von unzureichender Füllung bzw. Evakuierung der Walzenkavitäten skalieren in ihrem Auftreten mit der Substratgeschwindigkeit. Zur Analyse der Entstehungsmechanismen und mögliche Kompensationsstrategien wurde ein numerisches Simulationsmodell entwickelt. Im Gegensatz zu den bekannten Veröffentlichungen wurde die Replikation dreiseitiger Pyramiden (invertierte Pyramiden) simuliert. Eine Besonderheit des numerischen Modells ist, dass mehrerer aneinandergrenzenden Pyramiden in einem dreidimensionalen Raummodell untersucht wurden. So konnte die Interaktion der Strömungen aus benachbarten Kavitäten in die Ergebnisfindung einfließen. Eine quantitative Beziehung zwischen Simulation und Realverhalten wurde experimentell validiert.

Die Aufbereitung der Simulationsergebnisse ermöglichte die Erklärung des Entstehungsmechanismus der Evakuierungsfehler für die betrachteten Strukturen. Die Skalierung des Fehlers mit der Substratgeschwindigkeit konnte nachgewiesen werden. Im Weiteren wurde der Einfluss der Andruckkraft F_{an} und der Viskosität η auf die Defektausprägung untersucht, um geeignete Fehlerkompensationsstrategien ableiten zu können. Obgleich der positive Einfluss der Andruckkraft nachweisbar ist, ist der Umfang des Einflusses gering. Vor dem Hintergrund der Deformation von Prägezylinder und Substrat durch übermäßige Kräfteinwirkung, sollte dieser Parameter nur bedingt zur Fehlerkompensation genutzt werden. Zielführender ist eine Modifikation der Materialviskosität. Numerische sowie empirische Resultate zeigten eine signifikante Verbesserung der Evakuierungsdefekte bei Verminderung der Viskosität. Selbiges kann durch Anpassung der Materialformulierung oder Temperierung des Lacks erfolgen.

10 Zusammenfassung und Ausblick

Summary and Outlook

10.1 Zusammenfassung

Summary

Intention dieser Arbeit war es, Erkenntnisse zur Beherrschung der Rolle-zu-Rolle-UV-Nanoimprint-Lithografie zu erarbeiten, um die Attraktivität des Prozesses für industrielle Anwendungen zu erhöhen. Obgleich dem Verfahren durch unterschiedliche Studien zahlreiche Applikationsszenarien zugeschrieben werden und erfolgreiche Einsätze in industriellen Anwendungen bekannt sind, ist das Spektrum der kommerziellen Anwendungen im Vergleich zum akademisch belegten Potenzial gering. Erkenntnisse zur Stabilisierung und Kontrolle des kontinuierlichen Replikationsprozesses sind Wettbewerbsvorteile. Sie werden seitens der freiwettbewerblichen Unternehmen nicht kommuniziert. Key-Enabler zur weiteren Marktdurchdringung der Technologie ist die Steigerung des Durchsatzes bei reproduzierbarer Produktqualität. Vor diesem Hintergrund bildete die Identifikation relevanter Prozessparameter mit signifikantem Einfluss auf die Produktqualität den Kern der hier dokumentierten Arbeiten. Anders als in der Mehrzahl der bekannten Publikationen wurde sich auf maschinenseitige Einstellgrößen konzentriert und eine mögliche Korrelation mehrerer Größen untersucht. Weiter wurde analysiert, inwieweit sich die Qualitätsmängel im Prozess durch die identifizierten Größen korrigieren lassen.

Die Aufarbeitung des Stands der Technik (Kapitel 2) konzentrierte sich zum einen auf den UV-basierten Replikationsprozess. Die Charakteristika des Verfahrens wurden erarbeitet und die Besonderheiten der Verfahrensdurchführung in einem kontinuierlichen Prozess herausgestellt. Die Strukturvielfalt wurde mit 15 Beispielen aus den Branchen Optik, Elektronik, Biomedizin und Pharmazie sowie Energie und Umwelt belegt. Besonders Mikro- und Nanogeometrien mit optischer Funktion finden in allen Märkten Einsatzszenarien. Eine Abgrenzung des UV-NIL-Verfahrens gegenüber kompetitiven Ansätzen verdeutlichte seine ökonomische Relevanz. Sowohl die Replikation auf großen Flächen als auch die geringen Anforderungen an die Produktionstechnik und die Erwartung hoher Produktionsgeschwindigkeiten bestätigten diese. Zum anderen umfasste die Recherche die Produktionstechnik zur Mikro- und Nanostrukturierung in kontinuierlichen UV-NIL-Prozessen. Neben den einzelnen technischen Funktionsgruppen und ihren Varianten wurden als Hinführung auf das im Weiteren vorgestellte Maschinenkonzept, bekannte Anlagenkonzepte aus Forschung und Industrie vorgestellt.

Eine Analyse bekannter Fehlerausprägungen und Fehlerquellen in kontinuierlichen UV-NIL-Prozessen diente der Eingrenzung der relevanten Maschinenparameter für die spätere Prozessbetrachtung (Kapitel 4). Einerseits konnten zehn Kategorien identifiziert werden, denen die Defekte aus eigenen Vorversuchsreihen und die in der Literatur dokumentierten Defekte zuzuschreiben sind. Andererseits wurden publizierte, analytische Ansätze des UV-NIL-Prozesses zusammengetragen. Aus dem bekannten

Formelwerk wurden fünf maschinenseitige Stellgrößen als ergebniskritisch identifiziert. Diese sind die Bahngeschwindigkeit v_{Bahn} , die Andruckkraft F_{an} , die initiale Beschichtungshöhe h_0 , die Bestrahlungsstärke E_{UV} und die Temperierung T_{Lack} des UV-Lacks.

Basierend auf dieser Erkenntnis wurde eigens ein Rolle-zu-Rolle-Produktionssystem entwickelt, mit dem die Kontrolle der genannten Parameter gewährleistet werden konnte. Das Produktionssystem wurde modular konzipiert und folgt dem Plug-And-Produce-Gedanken. Ein Abwickler-Modul mit Bahnaufregeleinrichtung sowie ein funktional identisches Aufwickler-Modul und eine UV-Imprint-Einheit bildeten die Versuchsplattform (vgl. Kapitel 5).

Die Auswirkungen der fünf Parameter auf das Replikationsergebnis wurden anhand empirischer Versuchsreihen ermittelt (Kapitel 6). Zielgröße war die Minimierung der unstrukturierten Restschichtstärke h_{R} bei vollständiger und fehlerfreier Replikation von Mikro- und Nanogeometrien bei steigender Produktionsgeschwindigkeit. Eine geringe Restschicht bei idealer Strukturabformung ist das Qualitätsmerkmal für einen stabilen, reproduzierbaren und ressourceneffizienten Replikationsprozess. UP-diamantzerspante, endlos umlaufende 90° -V-Nuten mit einer Höhe von $50 \mu\text{m}$ waren die Formvorgabe. Die Eignung von Substratmaterial und UV-Lack sowie die Anfangsparameter wurden in Vorversuchen ermittelt. Für die Bestrahlungsstärke E_{UV} und die Temperierung T_{Lack} zeigte sich eine Reduzierung der Restschicht h_{R} mit steigender Energieeintrbringung. Eine überdosierte Bestrahlungsstärke resultierte in Schrumpfungs- und Deformationseffekten. Die Viskosität des Lacks $\eta_{\text{Lack}}(T)$ wurde über die Temperierung verringert. Diese Optimierung ist durch chemische Modifikationen des Lacks präziser und energieeffizienter zu realisieren. Die weiteren Versuchsreihen konzentrierten sich entsprechend auf die Effekte und die Wechselwirkungen der Parameter: v_{Bahn} , h_0 und F_{an} . Die Pareto-Analyse der Versuche nach vollfaktoriellem Versuchsplan stellte heraus, dass F_{an} eine statistisch signifikante Relevanz für die Optimierung der Restschicht h_{R} besitzt. Die Auswertung der Ergebnisse diente zur Beschreibung eines Vorgehens zur Skalierung und Optimierung des Produktionsdurchsatzes in einem einfachen Algorithmus. Eine vergleichbare Vorgehensbeschreibung existierte bisher nicht. Der Algorithmus legt fest, in welcher Sequenz die Maschineneinstellungen vorzunehmen sind, welche Qualitätsindikatoren zu überprüfen sind und welche Voraussetzungen gegeben sein müssen, um einen stabilen Rolle-zu-Rolle-UV-NIL-Prozess zu gewährleisten. Die Beschichtungshöhe h_0 ist in einer ersten Optimierungsschleife so zu wählen, dass die Strukturen der Prägewalze bei der Anfangsgeschwindigkeit $v_{\text{Bahn, min}}$ vollständig gefüllt werden. Die Beschichtungshöhe ist dann für steigende Bahngeschwindigkeiten konstant zu halten. F_{an} ist der Bahngeschwindigkeit v_{Bahn} anzupassen, um eine vollständige Füllung der Walzenkavitäten zu gewährleisten.

Transfer und Validierung der Untersuchungsergebnisse erfolgten durch Abformung dreiseitiger Mikropyramiden, sogenannter Corner-Cubes, von $50 \mu\text{m}$ Höhe (Kapitel 7). Substrat-, Material- und nicht untersuchte Prozessparameter wurden wie in den Untersuchungen der 90° -V-Nuten gewählt. Die Vorgehensweise zur Steigerung der Produk-

tionsgeschwindigkeit erfolgte gemäß dem erarbeiteten Algorithmus. Variation der Andruckkraft F_{an} und der Bahngeschwindigkeit v_{Bahn} zeigten die erwarteten Trends in der Entwicklung der Gesamtstrukturhöhe bzw. der Restschichtstärke h_R . Die Übertragbarkeit der Resultate auf weitere, komplexere Strukturen wurde somit nachgewiesen. Im Weiteren wurden Einstellgrenzen der Parameter aufgezeigt. Übermäßige Andruckkräfte resultieren in Strukturdeformationen. Mit steigender Bahngeschwindigkeit traten vermehrt Blaseneinschlüsse im Replikationsergebnis auf. Diese konnten in die Fehlerkategorien „Lunker“ und „Evakuierung“ eingeteilt werden.

Als Ursache für die Lunker – Blaseneinschlüsse im ausgehärteten Lack – konnte in Analogie zum Kalanderverfahren das Einarbeiten von Atmosphärgasen in die Lackfront vor dem Walzspalt identifiziert werden (Kapitel 8). Experimente mit erhöhter Andruckkraft oder reduzierter Lackviskosität zeigten, dass die Auftretenshäufigkeit der Einschlüsse so reduziert werden kann. Im Versuchsgebiet bis $v_{Bahn} = 10\text{m/min}$ ließen sich so gute Replikationsergebnisse erzielen.

Evakuierungsfehler sind Resultat einer unvollständigen Füllung der Walzenkavitäten. Sie können ebenfalls durch eine Steigerung der Krafteinwirkung im Walzspalt oder verminderte Viskosität des Lacks kompensiert werden. Die Entstehung und Kompensation des Fehlers wurde mit einer CFD-Simulation des Fließverhaltens bei der Füllung der dreiseitigen Mikropyramiden untersucht (Kapitel 9).

10.2 Ausblick

Outlook

Die in dieser Arbeit präsentierte Aufarbeitung des Rolle-zu-Rolle-UV-Imprint bietet eine fundierte Grundlage zur weiteren Erforschung des Prozesses hinsichtlich seiner Eignung für eine vielfältige, industrielle Anwendung. Der Transfer der erarbeiteten Vorgehensweise zur Produktionssteigerung auf weitere, komplexere Strukturen bietet Raum für die Präzisierung des Algorithmus.

Großes Potenzial für vertiefende Forschungsarbeiten bietet die Entwicklung einer strukturunabhängigen Closed-Loop-Regelung der Andruckkraft F_{an} zur Stabilisierung der Restschichtstärke h_R . In den vorliegenden Versuchen konnte der Einfluss der Andruckkraft lediglich im Nachgang der Versuche in einer zerstörenden Prüfung kontrolliert werden. Punktuelle Messungen wurden mit einem Schichtdickenmessgerät im Prozess durchgeführt. Ein präzises In-Line-Messverfahren für die Strukturhöhe bzw. die Restschichtstärke ist Voraussetzung für eine stabile Regelung.

Nicht betrachtet wurde der Einfluss der Bahnspannung bzw. der Einfluss von Bahnzugschwankungen auf das Replikationsergebnis. Temporäre Unterschiede in der Materialdehnung beeinträchtigen die Mikro- und Nanogeometrien und können zu lokalen Deformationen oder anderen Fehlerbildern führen. Präzise geregelte Bahnspannungen können besonders bei Replikationen auf dünnen Trägerfolien die Formhaltigkeit der Replikation über große Flächen steigern.

Ferner sind folgende Aspekte eingehender zu analysieren:

- Materialschrumpf
- Lackviskosität
- Antihafbeschichtungen
- Strukturorientierung

Der Materialschrumpf als eine Konsequenz der Bestrahlungsintensität ist ein Aspekt, der reproduzierbar und vorzugsweise für unterschiedliche Produktionsgeschwindigkeiten konstant zu halten ist. Regelungen zur Adaption der Bestrahlungsleistung an die Bahngeschwindigkeit existieren. In der Regel ist die Skalierung linear. Dieser Ansatz ist im Hinblick auf das unterschiedliche Schrumpfverhalten der Lackformulierungen und die altersabhängige Kondition zu hinterfragen.

Optimierung von Lackviskosität und Beschichtung von Substrat und Replikationswerkzeug sind vielfach erforscht. Hier liegt jedoch großes Potenzial zur Erzeugung idealer Ausgangsbedingungen für einen leistungsfähigen Replikationsprozess.

Die Simulationen in Kapitel 9 belegen, dass die Orientierung der Mikro- und Nanokavitäten zur Fließrichtung des Lacks die Füllung bzw. Evakuierung maßgeblich beeinflussen. Je nach Komplexität der Struktur ist ein verbessertes Füllergebnis lediglich durch die Anordnung der Strukturen auf dem Prägezyylinder zu erwarten.

Summary and Outlook

The intention of this thesis was to elaborate findings on the control of roll-to-roll UV-nanoimprint lithography in order to increase the attractiveness of the process for industrial utilization. Although numerous application scenarios are attributed to the process by various studies and successful usage in industrial environments are known, the spectrum of commercial usage in comparison to the academically proven potential is rather small. Findings on the stabilization and control of the continuous replication process are competitive advantages. They are not communicated by free-market companies. The key enabler for further market penetration of the technology is the increase of throughput while reproducible product quality. In this context the core of the results documented here, was the identification of relevant process parameters with a significant influence on product quality. Unlike in the majority of known publications, the focus of this thesis was on machine parameters and possible correlations of several parameters were investigated. Furthermore, it was analyzed to which extent the quality deficiencies in the process can be corrected by these parameters.

On the one hand the review of the state of the art (chapter 2) concentrated on the UV-based replication process. The characteristics of the process were elaborated and the peculiarities of the process execution in a continuous process were highlighted. The structural diversity was illustrated with 15 examples from the fields of optics, electronics, biomedicine and pharmaceuticals as well as energy and environment. In particular, micro- and nanogeometries with optical functions are utilized in all markets. A differentiation of the UV-NIL process from competitive approaches stated its economic relevance. The request for replication on large surfaces as well as the low requirements regarding production technology and the expectation of high production speeds confirmed this. On the other hand, the review included an insight view on production technology for micro- and nanostructuring in continuous UV-NIL processes. In addition to the various technical function groups and their variants, well-known machine concepts from research and industry were presented as an introduction to the machine concept presented later on.

An analysis of known error characteristics and error sources in continuous UV-NIL processes served to narrow down the relevant machine parameters for later process assessment (chapter 4). Ten categories were identified to which the defects from preliminary test series and the defects documented in literature can be attributed. Furthermore, published analytical approaches to the UV-NIL process were analyzed. From the known mathematical process descriptions, five machine parameters were identified as critical for the results. These are the web speed v_{Bahn} , the pressure force F_{an} , the initial coating height h_0 , the irradiation energy E_{UV} and the temperature control T_{Lack} of the coating.

Based on this knowledge, a roll-to-roll production system was developed specifically for this purpose, with which the control of these parameters could be guaranteed. The production system was designed modularly and follows the Plug-And-Produce idea.

An unwinder module with web guiding functions as well as a functionally identical rewinder module and a UV imprint unit formed the test platform (chapter 5).

The effects of the five parameters on the replication result were determined based on empirical test series (chapter 6). The objective was to minimize the unstructured residual layer thickness h_R with defect-free replication of micro- and nanogeometries at increasing production speed. A low residual layer with ideal replication is the quality indicator for a stable, reproducible and resource-efficient replication process. UP-diamond turned, endless 90° -V-grooves with a height of $50\ \mu\text{m}$ were the target structure. The suitability of substrate material and UV resist as well as the initial parameters were determined in preliminary tests. For irradiation energy E_{UV} and temperature control T_{Lack} a reduction of the residual layer h_R with increasing energy input was shown. An overdosed irradiation energy resulted in shrinkage and deformation effects. The viscosity of the resist $\eta_{Lack}(T)$ was reduced by thermal control. This optimization can be realized more precisely and energy-efficiently by a chemical modification of the resist. Therefore, further test series concentrated on the effect and interaction of the parameters: v_{Bahn} , h_0 and F_{an} . The Pareto analysis of the experiments according to the full factorial test plan showed that F_{an} has the statistically significant relevance for the optimization of the residual layer h_R . The evaluation of the results served to describe a procedure for scalability and optimization of the production throughput in a simple algorithm. A comparable procedure description did not exist so far. The algorithm determines in which sequence the machine settings have to be set, which quality indicators are to be checked and which requirements must be met in order to guarantee a stable roll-to-roll UV-NIL process. In a first optimization loop, the coating height h_0 must be selected in such way that the structures of the embossing roll are filled completely at the initial speed of $v_{Bahn, min.}$. The coating height must then be kept constant for increasing web speeds. F_{an} must be adapted to the web speed v_{Bahn} to ensure complete filling of the roll cavities.

Transfer and validation of the test results were carried out by imprinting three-sided micropyramids, so-called corner cubes, of $50\ \mu\text{m}$ height (chapter 7). Substrate, resist and non-investigated process parameters were selected as in the 90° -V-groove experiments. The procedure for increasing the production speed was carried out according to the algorithm developed. Variation of the pressure force F_{an} and the web speed v_{Bahn} showed the expected trends in the development of the overall structure height and the residual layer thickness h_R respectively. The transferability of the results to other, more complex structures was thus proven. In addition, setting limits of the parameters were shown. Excessive pressure loads result in structural deformations. With increasing web speed, bubble inclusions in the replication result increased. These could be divided into the error categories "bubble-enclosure" and "evacuation".

In analogy to the calendering process, the inclusion of atmospheric gases in the coating front before the nip was identified as the cause of the bubbles - inclusions in the cured coating. Experiments with increased pressure force or reduced coating viscosity

showed that the frequency of inclusions can be reduced through this. Good replication results were achieved in the test range up to $v_{\text{Bahn}} = 10\text{m/min}$ (chapter 8).

Evacuation errors result from incomplete filling of the drum cavities. They can also be compensated by increasing the force applied to the nip or reducing the viscosity of the coating. The formation and compensation of the defect was investigated with a CFD simulation of the flow behavior during the filling of the three-sided micropyramids (chapter 9).

The research on the roll-to-roll UV imprint presented in this paper provides a profound basis for further research on the process with regard to its suitability for a variety of industrial applications. The transfer of the elaborated approach to increase production to further, more complex structures offers opportunities for the specification of the algorithm.

The development of a structure-independent closed-loop control of the pressure force F_{an} for stabilizing the residual layer thickness h_{R} offers great potential for further research. In the presented experiments, the influence of the pressure force could only be verified in a destructive measurement after the tests. Selective measurements were carried out with a coating thickness gauge in-line. A precise in-line measurement method for the structure height or the residual layer thickness is a requirement for stable control.

The influence of the web tension or the influence of web tension fluctuations on the replication result was not considered. Temporary differences in material elongation affect the micro- and nanogeometries and can lead to local deformations or other defect patterns. Precisely controlled web tensions can increase the dimensional stability of replication over large surfaces, especially when replicating on thin carrier films.

Furthermore, the following aspects must be analyzed in more detail:

- Material shrinkage
- Resist viscosity
- Anti-adhesion coatings
- Structural orientation

Material shrinkage as a consequence of irradiation intensity is an aspect that must be reproducible and preferably kept constant for different production speeds. Controls exist for adapting the irradiation power to the web speed. Normally, the scaling is linear. This approach must be examined with regard to the different shrinkage behavior of the coating formulations and the age-dependent condition.

Optimization of resist viscosity and coating of substrate and replication tool are already investigated in many ways. However, there is still great potential to create ideal starting conditions for an efficient replication process.

The simulations in chapter 9 proved that the orientation of the micro- and nano-cavities to the flow direction of the coating significantly influences the filling and evacuation

respectively. Depending on the complexity of the structure, an improved filling result can only be expected from the arrangement of the structures on the embossing cylinder.

11 Literaturverzeichnis

References

- [3DMI17] 3D-Micromac AG: microFLEX. Roll-to-Roll System for Processing of Flexible Substrates. Chemnitz, 2017. Firmenschrift
- [ABBO07] Abbott, S. J.; Gaskell, P. H.: Mass production of bio-inspired structured surfaces. In: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. 221. Jg., 2007, Nr. 10, S. 1181–1191
- [ABU18] Abu Rowin, W.; Hou, J.; Ghaemi, S.: Turbulent channel flow over riblets with superhydrophobic coating. In: Experimental Thermal and Fluid Science. 94. Jg., 2018, S. 192–204
- [ACIK11] Acikgoz, C.; Hempenius, M. A.; Huskens, J.; Vancso, G. J.: Polymers in conventional and alternative lithography for the fabrication of nanostructures. In: European Polymer Journal. 47. Jg., 2011, Nr. 11, S. 2033–2052
- [AHN06] Ahn, S.; Cha, J.; Myung, H.; Kim, S.-M.; Kang, S.: Continuous ultraviolet roll nanoimprinting process for replicating large-scale nano- and micropatterns. In: Applied Physics Letters. 89. Jg., 2006, Nr. 21, S. 213101-1–213101-3
- [AHN08] Ahn, S. H.; Guo, L. J.: High-Speed Roll-to-Roll Nanoimprint Lithography on Flexible Plastic Substrates. In: Advanced Materials. 20. Jg., 2008, Nr. 11, S. 2044–2049
- [AHN09a] Ahn, S. H.; Guo, L. J.: Large-area roll-to-roll and roll-to-plate nanoimprint lithography: a step toward high-throughput application of continuous nanoimprinting. In: ACS nano. 3. Jg., 2009, Nr. 8, S. 2304–2310
- [AHN09b] Ahn, S. H.; Guo, L. J.: High-speed roll-to-roll nanoimprint lithography on flexible substrate and mold-separation analysis. In: Suleski, T. J.; Schoenfeld, W. V.; Wang, J. J. (Hrsg.): SPIE MOEMS-MEMS: Micro- and Nanofabrication. (Reihe: SPIE Proceedings). 7025. Jg.; 2009, S. 72050U-1–72050U-10
- [AHN14] Ahn, S. H.; Miller, M.; Yang, S.; Ganapathisubramanian, M.; Menezes, M.; Singh, V.; Wan, F.; Choi, J.; Xu, F.; LaBrake, D.; Resnick, D. J.; Hofemann, P.; Sreenivasan, S. V.; Miller, M.: High Volume Nanoscale Roll-based Imprinting Using Jet and Flash Imprint Lithography. In: Proceedings of SPIE, Alternative Lithographic Technologies VI. 9049. Jg., 2014, S. 1–14
- [AMIR10] Amirsadeghi, A.; Lee, J.; Park, S.: Dependence of demolding force on resist composition in ultraviolet nanoimprint lithography.

- Technical proceedings of the 2010 NSTI Nanotechnology Conference and Expo. In: NSTI-Nanotech. 2. Jg., 2010, S. 272–275
- [AMIR11] Amirsadeghi, A.; Lee, J. J.; Park, S.: Surface adhesion and demolding force dependence on resist composition in ultraviolet nanoimprint lithography. In: Applied Surface Science. 258. Jg., 2011, Nr. 3, S. 1272–1278
- [BALD09] Baldesi, P.: Design and development of high precision five-axis positioning system for roll-to-roll multi-layer microcontact printing. Thesis MIT. Cambridge, 2009
- [BEND03] Bender, M.: Untersuchungen zur Verwendung UV-härtender Resistmaterialien für die Nanoimprint-Lithographie. Diss. RWTH. Aachen, 2003
- [BERG16] Berger, T.: Bedienungsanleitung. CVB BV-System mit DALSA Xtium-CLHS Grabber und DALSA PX Zeilenkamera. Stemmer Imaging GmbH. Puchheim, 2016. Handbuch
- [BHUS10] Bhushan, B.: Springer Handbook of Nanotechnology. (Reihe: Springer Handbook of). 3. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010
- [BLAE16] Bläsi, B.; Tucher, N.; Höhn, O.; Kübler, V.; Kroyer, T.; Wellens, C.; Hauser, H.: Large area patterning using interference and nanoimprint lithography. In: Thienpont, H. et al. (Hrsg.): SPIE Photonics Europe. (Reihe: SPIE Proceedings). 9888. Jg., 2016, 98880H-1–9888H-9
- [BLEC13] Blechschmidt, J., (Hrsg.); Derra, R.; Eichhorn, S.; Großmann, V.; Heinze, I.; Herzau, E.; Holik, H.; Mensing, H.; Pollex, I.; Schinkoreit, W.; Strunz, A.-M.; Tenzer, H.-J.; Wilken, R.: Papierverarbeitungstechnik. 1. Aufl. München: Hanser Verlag, 2013
- [BLOC19] Bloch GmbH: Gitterschnitt-Prüfer.
URL: <https://bloch.at/produkte/byk-gardner/physikalische-testgeraete/hafffestigkeit/gitterschnitt-pruefer.html> [Stand: 30.09.2019]
- [BREC15] Brecher, C.; Baum, C.; Bastuck, T.: Comparison of roll-to-roll replication approaches for microfluidic and optical functions in lab-on-a-chip diagnostic devices. In: Gray, B. L.; Becker, H. (Hrsg.): SPIE BiOS. (Reihe: SPIE Proceedings). 2015, S. 932008-1–932008-7
- [CAI14] Cai, Y.; Lin, L.; Xue, Z.; Liu, M.; Wang, S.; Jiang, L.: Filefish-Inspired Surface Design for Anisotropic Underwater Oleophobicity. In: Advanced Functional Materials. 24. Jg., 2014, Nr. 6, S. 809–816

- [CAO11] Cao, W.; Myers, J. D.; Zheng, Y.; Hammond, W. T.; Wrzesniewski, E.; Xue, J.: Enhancing light harvesting in organic solar cells with pyramidal rear reflectors. In: Applied Physics Letters. 99. Jg., 2011, Nr. 2, 023306-1–023306-3
- [CARP17a] Carpe Diem Technologies: Nano Imprint Lithography. URL: <https://carpediemtech.com/products/systems/nanoimprint-lithography/> [Stand: 29.09.2017]
- [CARP17b] Carpe Diem Technologies: UV Nano Imprint Lithography through the Web. URL: <https://carpediemtech.com/products/systems/nanoimprint-lithography/uv-nil-through-the-web/> [Stand: 29.09.2017]
- [CARP17c] Carpe Diem Technologies: UV Nano Imprint Lithography through the Drum. URL: <https://carpediemtech.com/products/systems/nanoimprint-lithography/uv-nil-through-the-drum/> [Stand: 29.09.2017]
- [CCS15] CCS Inc.: LNIS/ LNIS-FN series. Oblique angled lights for line sensor. Kyoto, 2015. Firmenschrift
- [CHAN06] Chang, C. Y.; Yang, S. Y.; Sheh, J. L.: A roller embossing process for rapid fabrication of microlens arrays on glass substrates. In: Microsystem Technologies. 12. Jg., 2006, Nr. 8, S. 754–759
- [CHEN05] Cheng, X.; Guo, L. J.; Fu, P.-F.: Room-Temperature, Low-Pressure Nanoimprinting Based on Cationic Photopolymerization of Novel Epoxysilicone Monomers. In: Advanced Materials. 17. Jg., 2005, Nr. 11, S. 1419–1424
- [CHEN07] Chen, M.-L.; Wei, A.-C.; Shieh, H.-P. D.: Increased organic light-emitting diode panel light efficiency by optimizing structure and improving Alignment of Pyramidal Array Light-Enhancing Layers. In: Japanese Journal of Applied Physics. 46. Jg., 2007, S. 1521–1525
- [CHOU95] Chou, S. Y.; Krauss, P. R.; Renstrom, P. J.: Imprint of sub-25 nm vias and trenches in polymers. In: Applied Physics Letters. 67. Jg., 1995, Nr. 21, S. 3114–3116
- [CHRI13] Christiansen, A. B.; Højlund-Nielsen, E.; Clausen, J.; Caringal, G. P.; Mortensen, N. Asger; Kristensen, A. (Hrsg.): Imprinted and injection-molded nano-structured optical surfaces. (Reihe: Proceedings Volume 8818, Nanostructured Thin Films VI). 8818 Jg., 2013, S. 881803-1–881803-12

- [CHUA17] Chuang, C.-H.; Lu, D.-M.; Wang, P.-H.; Lee, W.-Y.; Shaikh, M. O.: Antireflective polymer films via roll to roll UV nanoimprint lithography using an AAO mold. In: *Microsystem Technologies*. 20. Jg., 2017
- [COAT17a] Coatema Coating Machinery GmbH: From Lab to Fab. Für jeden Auftrag die passende Lösung.
URL: <http://www.coatema.de/de/produkte/einzellaggregate/auftragssysteme.html> [Stand: 21.09.2017]
- [COAT17b] Coatema Coating Machinery GmbH: Click&Coat. Click&Coat - Das revolutionäre Konzept für unendlich viele Prozessvarianten.
URL: <http://www.coatema.de/de/produkte/pilotanlagen/click-coat.html> [Stand: 29.09.2017]
- [CROM08] Crombach, B.: MO-5. Material data safety sheet. C-Cotiangs BV. Velp, 2008. Firmenschrift
- [CROM09] Crombach, B.: MO-5. Physical properties. C-Cotiangs BV. Velp, 2009. Firmenschrift
- [DATA02] DataPhysics Instruments GmbH: Betriebsanleitung DataPhysics OCA-Serie. OCA 5, OCA 10, OCA 15, OCA 15 plus, OCA 20, OCA 30 sowie OCAH 200 und 230. Filderstadt, 2002. Handbuch
- [DATA09] Datar, C. A.: Design and development of high precision elastomeric-stamp wrapping system for roll-to-roll multi-layer microcontact printing. Thesis MIT. Cambridge, 2009
- [DIN03] Norm DIN 8583-5 (September 2003): Fertigungsverfahren Druckumformen. Teil 5: Eindrücken. Einordnung, Unterteilung, Begriffe
- [DIN11] Norm DIN 55660-2 (Dezember 2011): Beschichtungsstoffe - Benetzbarkeit. Teil 2: Bestimmung der freien Oberflächenenergie fester Oberflächen durch Messung des Kontaktwinkels
- [DIN13] Norm DIN EN ISO 2409 (Juni 2013): Beschichtungsstoffe - Gitterschnittprüfung
- [DIN15] Norm DIN EN 12301 (Dezember 2015): Kunststoff- und Gummimaschinen - Kalander - Sicherheitsanforderungen
- [DIN84] Norm DIN 5031-7 (Januar 1984): Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik. Benennung der Wellenlängenbereiche
- [DUMO12a] Dumond, J. J.; Yee Low, H.: Recent developments and design challenges in continuous roller micro- and nanoimprinting. In:

- Journal of Vacuum Science & Technology B, Nanotechnology and Microelectronics: Materials, Processing, Measurement, and Phenomena. 30. Jg., 2012, Nr. 1, 010801-1–010801-28
- [DUMO12b] Dumond, J. J.; Mahabadi, K. A.; Yee, Y. S.; Tan, C.; Fuh, J. Y. H.; Lee, H. P.; Low, H. Y.: High resolution UV roll-to-roll nanoimprinting of resin moulds and subsequent replication via thermal nanoimprint lithography. In: Nanotechnology. 23. Jg., 2012, Nr. 48, S. 485310-1–485310-9
- [DUMO14] Dumond, J. J.: Ultraviolet roll-to-roll nanoimprint lithographic fabrication of flexible polymer moulds. Diss. NUS. Singapur, 2014
- [EGGE12] Eggerath, D.: From curtain coating to bead mode slot die-coating – contact free coating procedures for thin functional-coating layers. In Proceedings of 2012 web coating and handling conference USA. Myrtle Beach (SC), USA, 21.-24. Oktober 2012. Fort Mill (SC, USA): Association of International Metallizers, Coaters and Laminators (Veranst.), 2012, S. 337-347
- [ERHA17] Erhardt+Leimer GmbH: Elguider - Bahnlaufregelsysteme. Kontinuierliche Erfassung und Regelung der Bahnposition. Stadtbergen, 2017. Firmenschrift
- [ERHA18] Erhardt+Leimer GmbH: Elguider DRS22 - Bahnlaufregelsysteme. Datenblatt. Stadtbergen, 2018. Firmenschrift
- [FAGA08] Fagan, M. D.: A novel process for continuous thermal embossing of large-area nanopatterns onto polymer films. Thesis UM-ass. Amherst, 2008
- [FAGA09] Fagan, M. D.; Kim, B. H.; Yao, D.: A novel process for continuous thermal embossing of large-area nanopatterns onto polymer films. In: Advances in Polymer Technology. 28. Jg., 2009, Nr. 4, S. 246–256
- [FERN17] Fernández, A.; Francone, A.; Thamdrup, L. H.; Johansson, A.; Bilenberg, B.; Nielsen, T.; Guttman, M.; Sotomayor Torres, C. M.; Kehagias, N.: Hierarchical surfaces for enhanced self-cleaning applications. In: Journal of Micromechanics and Microengineering. 27. Jg., 2017, Nr. 4, S. 45020-1–45020-9
- [FROS13a] Sinha, N.; Rammohan, L.; Unni, K.: Analysis of the Global LCD Market. Wide Adoption of LCD Displays in Television Creates Demand. Frost & Sullivan. Mountain View, 2013. Bericht
- [FROS13b] Sashidhar, S. K.; Brice, J.; Witonska, J.; Gopinathan, R.; Balakrishnan, V.; Ghosal, R.; A, J. S.: Global Point-of-Care Testing (POCT) Market. Increasing Adoption of POCT in Emerging

- Countries will Provide Impetus to Market Growth. Frost & Sullivan. Mountain View, 2013. Bericht
- [FROS16] Frost & Sullivan: Global Solar Power Market, 2016. Galvanized by Environment-friendly Agendas, Solar PV Gains Momentum. Frost & Sullivan. Mountain View, 2016. Bericht
- [FROS17] Frost & Sullivan: Top Technologies in Advanced Manufacturing and Automation, 2017. Metal 3D Printing and Robotics Drive Opportunities in Multiple Industries. Frost & Sullivan. Mountain View, 2017. Bericht
- [FUEG14] Fügmann, U. (Hrsg.): Qualitätssicherung im Bahnlauf. Proceedings zum 12. Bahnlaufseminar 2014. Advances in print and media technologies. (Reihe: pmTUC series - advances in print and media technologies, 2). Chemnitz: Institut für Print- und Medientechnik der TU Chemnitz, 2014
- [FUJI17a] FujiFilm Corporation: UVSCALE. Visualizes UV light amount distribution by color density.
URL: http://www.fujifilm.com/products/industrial_products/uv-scale/#features [Stand: 29.07.2017]
- [FUJI17b] Fujifilm Dimatix Inc.: Fujifilm Dimatix hails the Samba printhead, the most advanced technology available in the industry.
URL: http://www.fujifilmusa.com/press/news/display_news?newsID=880745 [Stand: 21.09.2017]
- [GEW17a] GEW (EC) Ltd.: LED UV Curing System LW2.
URL: <http://www.gewuv.com/gew-uv-systems/lw2-led-uv-curing-system/> [Stand: 22.09.2017]
- [GEW17b] GEW (EC) Ltd.: Arc lamp and LED hybrid UV curing systems.
URL: <http://www.gewuv.com/gew-uv-systems/arcled-hybrid-uv-curing-systems/> [Stand: 22.09.2017]
- [GIES10] Giessmann, A.: Substrat- und Textilbeschichtung. Praxiswissen für Beschichtungs- und Kaschiertechnologien. (Reihe: VDI-Buch). 2., überarb. und erw. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010
- [GOEB12] Göb, M.: Dynamische Bahnzugkraft- und Geschwindigkeitsverhalten kontinuierlicher Fertigungsanlagen unter rheologischen, klimatischen und regelungstechnischen Aspekten. Diss. FAU. Erlangen-Nürnberg, 2012
- [GONZ12] González Lazo, M. A.; Teuscher, R.; Leterrier, Y.; Månson, J.-A. E.; Calderone, C.; Hessler-Wyser, A.; Couty, P.; Ziegler, Y.; Fischer, D.: UV-nanoimprint lithography and large area roll-to-roll texturization with hyperbranched polymer nanocomposites for

- light-trapping applications. In: *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 103. Jg., 2012, S. 147–156
- [GOTO07] Goto, H.: Overview on Nanoimprint Technology. Process, Tools, Applications and Technical Issues for Industrialization. In: *Key Engineering Materials*. 345-346. Jg., 2007, S. 1073–1077
- [GRAS04] Grasso, R. J.; Odhner, J. E.; Stewart, H.; McDaniel, R. V. (Hrsg.): Laser radar range and detection performance for MEMS corner cube retroreflector arrays. (Reihe: *Advanced Free-Space Optical Communications Techniques and Technologies*). 5614 Jg., 2004, S. 43–51
- [HAIS96] Haisma, J.; Verheijen, M.; van den Heuvel, K.; van den Berg, J.: Mold-assisted nanolithography. A process for reliable pattern replication. In: *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*. 14. Jg., 1996, Nr. 6, S. 4124ff.
- [HE10] He, J. Y.; He, Z. P.: Computer Simulation on Intensity Distribution of UV Irradiation System. In: *Applied Mechanics and Materials*. 34-35. Jg., 2010, S. 591–594
- [HECK15] Hecker, K.; Fisher, B.; Kuhl, S.; Breitung, S.; Lupo, D.; Clemens, W.: *Organic and Printed Electronics. Summary - OE-A Roadmap, 6th Edition*. Hecker, K. Frankfurt am Main, 2015. Bericht
- [HEID17] Dr. Johannes Heidenhain GmbH: *Längenmessgeräte für gesteuerte Werkzeugmaschinen*. Traunreut, 2017. Firmenschrift
- [HEXI17a] Hexis S. A.: *HEXIS Health Antimicrobial Films. Characteristics of the product*. URL: <http://www.hexishealth.com/en/characteristics-of-the-products/> [Stand: 10.10.2017]
- [HEXI17b] Hexis S. A.: *HEXIS Health Antimicrobial Films. Applications*. URL: <http://www.hexishealth.com/en/applications-3/> [Stand: 10.10.2017]
- [HEYD00] Heyderman, L.; Schiff, H.; David, C.; Gobrecht, J.; Schweizer, T.: Flow behaviour of thin polymer films used for hot embossing lithography. In: *Microelectronic Engineering*. 54. Jg., 2000, S. 229–245
- [HIRA10] Hirai, Y.: UV-Nanoimprint Lithography (NIL) Process Simulation. In: *Journal of Photopolymer Science and Technology*. 23. Jg., 2010, Nr. 1, S. 25–32

- [HONG16] Hongyan, C.; Ran, A.; Ligang, C.: Applicability of the Hertz Contact Theory to Rolling Rubber Cylinders Model. In: International Journal of Mechanical Engineering and Applications. 4. Jg., 2016, Nr. 6, S. 242–248
- [HOU17] Hou, J.; Vajdi Hokmabad, B.; Ghaemi, S.: Three-dimensional measurement of turbulent flow over a riblet surface. In: Experimental Thermal and Fluid Science. 85. Jg., 2017, S. 229–239
- [HOUL07] Houle, F. A.; Rettner, C. T.; Miller, D. C.; Sooriyakumaran, R.: Antiadhesion considerations for UV nanoimprint lithography. In: Applied Physics Letters. 90. Jg., 2007, Nr. 21, S. 213103-1–213103-3
- [HSU11] Hsu, J.-H.; Lee, C.-H.; Chen, R.: An integrated optical pickup with roll-to-roll fabricated diffractive components. In: Optics express. 19. Jg., 2011, Nr. 14, S. 13257–13267
- [HSU12] Schutzrecht US 2012/0009293 A1 (12.01.2012). Hsu, C.-L.: Molding machine and method for forming optical film
- [HSU14a] Schutzrecht US 2014/0284826 A1 (25.09.2014). Hsu, C.-L.: Device for manufacturing optical film and method for manufacturing the same
- [HSU14b] Schutzrecht US 2014/0322499 A1 (30.10.2014). Hsu, C.-L.: Optical element and method for making same
- [HUAN09] Huang, P.-H.; Yang, S.-Y.: Complete reversal imprinting for fabricating microlens arrays with faithful shape replication. In: Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures. 27. Jg., 2009, Nr. 6, S. 2781–2785
- [HWAN09] Hwang, S.-Y.; Hong, S.-H.; Jung, H.-Y.; Lee, H.: Fabrication of roll imprint stamp for continuous UV roll imprinting process. In: Microelectronic Engineering. 86. Jg., 2009, 4-6, S. 642–645
- [IMAG17] Imagine TF: 3D Filter Technology.
URL: http://www.imagnetf.com/?page_id=346 [Stand: 18.09.2017]
- [IOT17] IOT Innovatiove Oberflächentechnologie GmbH: Excimer. Aufbau und Prinzip.
URL: <http://www.iot-gmbh.de/uv-technik/excimer/aufbau-und-prinzip>
- [IST17a] IST METZ GmbH: UV-Lampe. Nürtingen, 2017. Firmenschrift
- [IST17b] IST METZ GmbH: UV-LED vs. UV-Lampe. Alle Vorteile auf einen Blick.

- URL: <https://www.ist-uv.de/de/technologie/led-uv-technologie/uv-led-vs-uv-lampe/> [Stand: 22.09.2017]
- [JAIN13] Jain, A.; Bonnecaze, R. T.: Fluid management in roll-to-roll nanoimprint lithography. In: *Journal of Applied Physics*. 113. Jg., 2013, Nr. 23, S. 1–14
- [JIAN14] Jiang, M.; Lin, S.; Jiang, W.; Pan, N.: Hot embossing holographic images in BOPP shrink films through large-area roll-to-roll nanoimprint lithography. In: *Applied Surface Science*. 311. Jg., 2014, S. 101–106
- [JING17] JingKe Printing Equipment Co., Ltd.: JinKe UV Curing Systems. Safety, Excellence, Cheaper and no Downtime.
URL: <http://www.jkuv.org/jinke-uv-curing-systems/>
- [JO12] Schutzrecht WO 2012/144762 A2 (26.10.2012). Jo, M. G.; Hur, J.; Choi, C. H.; You, J. K.; Kim, S. M.: Method for printing a conductive circuit using a UV rotational molding machine
- [JOHN13] John, J.; Tang, Y.; Rothstein, J. P.; Watkins, J. J.; Carter, K. R.: Large-area, continuous roll-to-roll nanoimprinting with PFPE composite molds. In: *Nanotechnology*. 24. Jg., 2013, Nr. 50, S. 505307-1–505307-9
- [JOHN85] Johnson, K. L.: *Contact mechanics*. 9 Aufl. Cambridge: Cambridge University Press, 1985 - ISBN: 0521347963.
- [KANG04] Schutzrecht WO 2004/033189 A1 (22.04.2004). Kang, S.; Kim, S.-M.: Apparatus and method for continuously forming the micro pattern structure and method for fabricating a drum-type stamper used in the same
- [KEYE16] Keyence Deutschland GmbH: *Intelligente Sensoren. Jeder Situation gewachsen: überall und jederzeit*. Neu-Isenburg, 2016. Firmenschrift
- [KHAN15] Khan, S.; Lorenzelli, L.; Dahiya, R. S.: Technologies for Printing Sensors and Electronics Over Large Flexible Substrates. A Review. In: *IEEE Sensors Journal*. 15. Jg., 2015, Nr. 6, S. 3164–3185
- [KIM08] Kim, K.-D.; Kwon, H.-J.; Choi, D.-g.; Jeong, J.-H.; Lee, E.-S.: Resist flow behavior in ultraviolet nanoimprint lithography as a function of contact angle with stamp and substrate. In: *Japanese Journal of Applied Physics*. 47. Jg., 2008, Nr. 11, 8648–8651
- [KIM12] Kim, Y.-C.; Park, J.-H.; Prausnitz, M. R.: Microneedles for drug and vaccine delivery. In: *Advanced drug delivery reviews*. 64. Jg., 2012, Nr. 14, S. 1547–1568

- [KIM16] Schutzrecht US 2016/0200127 A1 (14.07.2016). Kim, T. G.; Kim, J. L.: Imprinting apparatus and method for operating imprinting apparatus
- [KIPP00] Kipphan, H.: Handbuch der Printmedien. Technologien und Produktionsverfahren. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2000
- [KIRC12] Kirchner, R.: On UV-nanoimprint-lithography as direct patterning tool for polymeric microsystems. Diss. TU. Dresden, 2012
- [KIST11] Kistler Gruppe: DMS-Kraftsensor. Typ 4578A... Winterthur, 2011. Firmenschrift
- [KLAM12] Klammt, S.; Neyer, A.; Müller, H. F. O.: Microoptics for efficient redirection of sunlight. In: Applied optics. 51. Jg., 2012, Nr. 12, S. 2051–2056
- [KOOY14] Kooy, N.; Mohamed, K.; Pin, L. T.; Guan, O. S.: A review of roll-to-roll nanoimprint lithography. In: Nanoscale research letters. 9. Jg., 2014, Nr. 1, S. 320-1–320-13
- [KORD15] Kordy, H.: Process abilities of the riblet-coating process with dual-cure lacquers. In: CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. 11. Jg., 2015, S. 1–9
- [KUNZ09] Kunze, U. R.; Schwedt, G.: Grundlagen der quantitativen Analyse. 6., aktualisierte und erg. Aufl. Weinheim: Wiley-VCH, 2009
- [KWAK17] Kwak, J.-H.; Kim, H.-B.; Park, J.-S.; Park, J.-H.; Lee, J.-H.; Lee, S.-H.; Kwak, M.-K.; Lee, D.-W.: Simple and cost-effective method for fabrication of optically transparent superhydrophobic thin film using reusable pua mold and roll-to-roll machine. In: 2017 19th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems. 2017, S. 1265–1268.
- [LABO17] LabOnFoil Integrated Project: LabOnFoil. Technology. URL: <http://labonfoil.eu/technology/technology.htm> [Stand: 11.10.2017]
- [LAN10] Lan, S.; Song, J.-H.; Lee, M. G.; Ni, J.; Lee, N. K.; Lee, H.-J.: Continuous roll-to-flat thermal imprinting process for large-area micro-pattern replication on polymer substrate. In: Microelectronic Engineering. 87. Jg., 2010, Nr. 12, S. 2596–2601.
- [LARR16] Larrañeta, E.; McCrudden, M. T. C.; Courtenay, A. J.; Donnelly, R. F.: Microneedles: A New Frontier in Nanomedicine Delivery. In: Pharmaceutical research, 33. Jg., 2016, Nr. 5, S. 1055–1073

- [LAUT15] Lautenbach, A.: Volle Auftragsbuecher. Folienhersteller setzen auf aktuellste Technologien und Nachhaltigkeit. In: Kunststoffe. Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung. 2015, Nr. 8, S. 54–56
- [LEE08] Lee, J.; Park, S.; Choi, K.; Kim, G.: Nano-scale patterning using the roll typed UV-nanoimprint lithography tool. In: Microelectronic Engineering. 85. Jg., 2008, S. 861–865
- [LEE12] Schutzrecht US 2012/0038084 A1 (16.02.2012). Lee, N.-S.; Kim, C.-H.; Lee, S.-B.: Roll mold, method for fabricating the same and method for fabricating thin film pattern using the same
- [LIAO15] Liao, S.: Tools for ultrasonic hot embossing. Diss. RWTH. Aachen, 2015
- [LIM12] Lim, H.; Kim, G.; Choi, K.-b.; Jeong, M.; Ryu, J.; Lee, J.: Nano-imprint lithography with a soft roller and focused UV light for flexible substrates. In: Microelectronic Engineering. 98. Jg., 2012, S. 279–283
- [LIM14] Lim, H.; Choi, K.-b.; Kim, G.; Lee, S.; Park, H.; Ryu, J.; Jung, S.; Lee, J.: Roll-to-roll nanoimprint lithography for patterning on a large-area substrate roll. In: Microelectronic Engineering. 123. Jg., 2014, S. 18–22
- [LIN00] Lin, L.; Shia, T. K.; Chiu, C.-J.: Silicon-processed plastic micro-pyramids for brightness enhancement applications. In: Journal of Micromechanics and Microengineering. 10. Jg., 2000, Nr. 3, S. 395–400
- [LIU12] Liu, Y.; Liu, W.; Zhang, Y.; Wu, D.; Wang, X.: A Novel Extrusion Microns Embossing Method of Polymer Film. In: Modern Mechanical Engineering. 2. Jg., 2012, Nr. 02, S. 35–40
- [LIU14a] Liu, C.-H.; Sung, C.-K.; Chang, E.-C.; Lo, C.-Y.; Fu, C.-C.: Fabricating a Silver Soft Mold on a Flexible Substrate for Roll-to-Roll Nanoimprinting. In: IEEE Transactions on Nanotechnology. 13. Jg., 2014, Nr. 1, S. 80–84
- [LIU14b] Liu, C.-H.; Niu, P.-L.; Sung, C.-K.: Integrating anti-reflection and superhydrophobicity of moth-eye-like surface morphology on a large-area flexible substrate. In: Journal of Physics D: Applied Physics. 47. Jg., 2014, Nr. 1, S. 15401-1–15401-5
- [LUTH03] Luther, S.: Berücksichtigung der freien Knetoberfläche beim Berechnen von Strömungsfeldern im Kalenderspalt. Dissertation LUH. Hannover, 2003

- [MAEK07] Mäkelä, T.; Haatainen, T.; Majander, P.; Ahopelto, J.: Continuous roll to roll nanoimprinting of inherently conducting polyaniline. In: *Microelectronic Engineering*. 84. Jg., 2007, 5-8, S. 877–879
- [MATH18] Mathar, C.: Schrumpfcharakterisierung MO-5. Prüfprotokoll. Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT. Aachen, 2018. Bericht
- [MATT06] Schutzrecht WO 2006/032493 A2 (30.03.2006). Matthiesen, J.: Apparatus and process for the printing of microstructures
- [MAUR11] Maury, P.; Turkenburg, D.; Stroeks, N.; Giesen, P.; Barbu, I.; Meinders, E.; van Bremen, A.; Iosad, N.; van der Werf, R.; Onvlee, H.: Roll-to-roll UV imprint lithography for flexible electronics. In: *Microelectronic Engineering*. 88. Jg., 2011, Nr. 8, S. 2052–2055
- [MELA12] Melamies, I. A.: Green, Fast and Secure: Atmospheric Plasma for Critical Bonding. In: *ASI Adhesives & Sealants Industry*. 2012, S. 31–35
- [MEME14] Memering, B.: Rolle-zu-Rolle Fertigung von Mikrostrukturen durch Ultraschallheißprägen_Endversion-überarbeitet2 - Kopie. Diss. RWTH. Aachen, 2014
- [METW12] Metwally, K.; Robert, L.; Queste, S.; Gauthier-Manuel, B.; Khan-Malek, C.: Roll manufacturing of flexible microfluidic devices in thin PMMA and COC foils by embossing and lamination. In: *Microsystem Technologies*. 18. Jg., 2012, Nr. 2, S. 199–207
- [MINI18a] Minitab Inc.: Interpretieren der wichtigsten Ergebnisse für Haupteffektediagramm. Support für Minitab 18.
URL: <https://support.minitab.com/de-de/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/anova/how-to/main-effects-plot/interpret-the-results/key-results/> [Stand: 01.06.2018]
- [MINI18b] Minitab Inc.: Interpretieren der wichtigsten Ergebnisse für Wechselwirkungsdiagramm. Support für Minitab 18.
URL: <https://support.minitab.com/de-de/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/anova/how-to/interaction-plot/interpret-the-results/key-results/> [Stand: 01.06.2018]
- [MINI18c] Minitab Inc.: Interpretieren der wichtigsten Ergebnisse für Faktoriellen Versuchsplan analysieren. Support für Minitab 18.
URL: <https://support.minitab.com/de-de/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/doe/how-to/factorial/analyze-factorial-design/interpret-the-results/key-results/> [Stand: 01.06.2018]

- [MINI18d] Minitab Inc.: Effektediagramme für Faktoriellen Versuchsplan analysieren. Support für Minitab 18.
URL: <https://support.minitab.com/de-de/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/doe/how-to/factorial/analyze-factorial-design/interpret-the-results/all-statistics-and-graphs/effects-plots/> [Stand: 01.06.2018]
- [MITS16] Mitsubishi Polyester Film GmbH: Hostaphan GN. Datenblatt. Wiesbaden, 2016. Firmenschrift
- [ML217] ML² - MultiLayer MicroLab: MultiLayer MicroLab. Project Objectives.
URL: <https://www.ml2.eu/en/project/objectives.html> [Stand: 11.10.2017]
- [MORI09] Morihara, D.; Hiroshima, H.; Hirai, Y.: Numerical study on bubble trapping in UV-nanoimprint lithography. In: *Microelectronic Engineering*. 86. Jg., 2009, 4-6, S. 684–687
- [MORO15] Moro, M.; Taniguchi, J.: Removal of residual layer by liquid transfer imprint lithography using roll-to-roll UV-NIL. In: *Microelectronic Engineering*. 141. Jg., 2015, S. 112–116
- [NAGA12] Nagaoka, Y.; Suzuki, R.; Hiroshima, H.; Nishikura, N.; Kawata, H.; Yamazaki, N.; Iwasaki, T.; Hirai, Y.: Simulation of Resist Filling Properties under Condensable Gas Ambient in Ultraviolet Nanoimprint Lithography. In: *Japanese Journal of Applied Physics*. 51. Jg., 2012, 06FJ07-1–06FJ07-6
- [NAKA06] Nakamatsu, K.-i.; Yamada, N.; Kanda, K.; Haruyama, Y.; Matsui, S.: Fluorinated Diamond-Like Carbon Coating as Antisticking Layer on Nanoimprint Mold. In: *Japanese Journal of Applied Physics*. 45. Jg., 2006, Nr. 35, L954–L956
- [NEES15] Nees, D.; Ruttloff, S.; Palfinger, U.; Stadlober, B.: Experiments towards establishing of design rules for R2R-UV-NIL with polymer working shims. In: *Proceedings of SPIE, Alternative Lithographic Technologies VIII*. 9777. Jg., 2015, 97770D-1–97770D-18.
- [NEUG12] Neugebauer, R. (Hrsg.): *Werkzeugmaschinen. Aufbau, Funktion und Anwendung von spanenden und abtragenden Werkzeugmaschinen*. 1 Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012
- [NORD17] Nordson EFD: BlueCure UV LED Curing Lamp.
URL: <http://www.nordson.com/en/divisions/efd/products/uv-curing-equipment/bluecure-uv-led-curing-lamp> [Stand: 22.09.2017]

- [OCON16] O'Connor, A. C.; Beaulieu, T. J.; Rothrock, G. D.: Economic Analysis of Technology Infrastructure Needs for Advanced Manufacturing. Roll-to-Roll Manufacturing. Economic Analysis Office. National Institute of Standards and Technology. Gaithersburg, 2016. Bericht
- [OK13] Ok, J. G.; Ahn, S. H.; Kwak, M. K.; Guo, L. J.: Continuous and high-throughput nanopatterning methodologies based on mechanical deformation. In: Journal of Materials Chemistry C. 1. Jg., 2013, Nr. 46, S. 7681–7691
- [OKAD14] Okada, M.; Yamashita, D.; Unno, N.; Taniguchi, J.: Defect analysis and lifetime evaluation of a release-coated nanoimprint mold. In: Microelectronic Engineering. 123. Jg., 2014, S. 117–120
- [OTSU14] Otsuka, Y.; Hiwasa, S.; Taniguchi, J.: Development of release agent-free replica mould material for ultraviolet nanoimprinting. In: Microelectronic Engineering. 123. Jg., 2014, S. 192–196
- [OTTO14] Otto, M.: Analytische Chemie. (Reihe: Bachelor). 4., überarb. und erg. Aufl., 1. Nachdruck. Weinheim: Wiley-VCH, 2014
- [PALF15] Palfinger, U.; Nees, D.; Ruttloff, S.; Leitgeb, M.; Beleggratis, M.; Stadlober, B.: Large-area patterning by roller-based nanoimprint lithography. Chemnitz, 24.06.2015. Vortrag
- [PARK08] Park, E.: Physics of coating tensioned-web over slot die. Diss. UMN. Minneapolis, 2008
- [PARK10] Park, J.-H.; Choi, S.-O.; Seo, S.; Choy, Y. B.; Prausnitz, M. R.: A microneedle roller for transdermal drug delivery. In: European journal of pharmaceutics and biopharmaceutics. 76. Jg., 2010, Nr. 2, S. 282–289
- [PARK12] Park, J.; Kim, B.: 3D micro patterning on a concave substrate for creating the replica of a cylindrical PDMS stamp. In: Microelectronic Engineering. 98. Jg., 2012, S. 540–543
- [PEMS17] PEMS Printer Electro Mechanical System: RIP-300. Roll to Roll Imprinting System.
URL: <http://www.pems-korea.com/eng/030302> [Stand: 29.09.2017]
- [PENG16] Peng, L.; Wu, H.; Yi, P.; Lai, X.: Study on bubble defects in roll-to-roll UV imprinting process for micropyramid arrays II: Numerical study. In: Journal of Vacuum Science & Technology B, Nanotechnology and Microelectronics: Materials, Processing, Measurement, and Phenomena. 34. Jg., 2016, Nr. 5, 051203-1–051203-12

- [PHOS17a] Phoseon Technology: LED-UV-Lampen nach Produktfamilie. URL: <http://www.phoseon.de/products/uv-curing-systems> [Stand: 22.09.2017]
- [PHOS17b] Phoseon Technology: UV-LED-Wellenlänge. URL: <http://www.phoseon.de/technology/led-uv-wavelength> [Stand: 22.09.2017]
- [PIET08] Pietarinen, J.; Kalima, V.; Pakkanen, T. T.; Kuittinen, M.: Improvement of UV-moulding accuracy by heat and solvent assisted process. In: *Microelectronic Engineering*. 85. Jg., 2008, Nr. 2, S. 263–270
- [PLAC13] Plachetka, U.: Replikation von Mikro- und Nanostrukturen für optische Anwendungen. Diss. RWTH. Aachen, 2013
- [PLAS17] PLAST4FUTURE: PLAST4FUTURE project. URL: <http://www.plast4future.eu/> [Stand: 18.09.2017]
- [PREC18a] Precitec GmbH & Co. KG: Optischen Sensoren. Datenblatt. Gaggenau-Bad Rotenfels, 09.05.2018. Firmenschrift
- [PREC18b] Precitec GmbH & Co. KG: Optische Messköpfe. Datenblatt. Gaggenau-Bad Rotenfels, 09.05.2018. Firmenschrift
- [PRIC84] Schutzrecht 4,486,363 (04.12.1984). Pricone, R. M.; Heenan, S. A.: Method and apparatus for embossing a precision optical pattern in a resinous sheet
- [PTMT17a] PTMTEC Oy: R2R100UV Table. Helsinki, 2017. Firmenschrift
- [PTMT17b] PTMTEC Oy: Nanoimprinters/Coaters. URL: <http://www.ptmtec.com/home/Products/nanoimprinters-coaters> [Stand: 29.09.2017]
- [ROTH11] Roth-Fölsch, A.: Eine Frage des Kontaktwinkels. In: *Kunststoffe*. 2011, Nr. 12, S. 37–39
- [RYU14] Ryu, J.; Lee, S.-H.; Lim, H.; Park, H.-H.; Lee, J.: Study of air bubble generation and its minimization during dispensing based ultraviolet nanoimprint lithography (UV-NIL). In: *Microelectronic Engineering*. 123. Jg., 2014, S. 131–135
- [SCHA17] Schaeffler Technical Documentation: Technisches Taschenbuch. Schaeffler Technologies AG & Co. KG. Herzogenaurach, November 2017. Firmenschrift
- [SCHW07] Schwalm, R.: UV coatings. Basics, recent developments and new applications. 1 Aufl. Amsterdam, London: Elsevier, 2007
- [SEO06] Seo, S.-m.; Kim, T.-i.; Lee, H. H.: Simple fabrication of nanostructure by continuous rigiflex imprinting. In: *Microelectronic Engineering*. 84. Jg., 2006, Nr. 4, S. 567–572

- [SHAN11] Shan, X. C.; Lau, S. K.; Mohahidin, M. B.; Liu, T.; Lu, A. C. W.: Formation of large format functional films via roll-to-roll (R2R) ultraviolet (UV) embossing. In: 2011 IEEE 13th Electronics Packaging. 2011, S. 521–524
- [SHAN15] Shan, X. C.; Liu, T.; Mohaime, M.; Salam, B.; Liu, Y. C.: Large format cylindrical lens films formed by roll-to-roll ultraviolet embossing and applications as diffusion films. In: Journal of Micro-mechanics and Microengineering. 25. Jg., 2015, Nr. 3, S. 35029-1–35029-8
- [SHAR17] Sharklet Technologies, I.: Technology Overview. Why Sharklet? URL: sharklet.com/our-technology/technology-overview/ [Stand: 10.10.2017]
- [SHEN14] Schutzrecht CN 204028390 U (17.12.2014). Shen, D. Y.; Xiang, G.: Visual angle deflection structure prism film
- [SHIB10] Shibata, M.; Horiba, A.; Nagaoka, Y.; Kawata, H.; Yasuda, M.; Hirai, Y.: Process-simulation system for UV-nanoimprint lithography. In: Journal of Vacuum Science & Technology B, Nanotechnology and Microelectronics: Materials, Processing, Measurement, and Phenomena. 28. Jg., 2010, Nr. 6, S. C6M108-C6M113
- [SIEB17] Siebertz, K.; van Bebber, D.; Hochkirchen, T.: Statistische Versuchsplanung. Design of Experiments (DoE). (Reihe: VDI-Buch). 2. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2017
- [SIEM13] Siemens AG: Applications & Tools. Simotion Wickler. München, 2013. Handbuch
- [SKRI92] Skriver, H. L.; Rosengaard, N. M.: Surface energy and work function of elemental metals. In: Physical Review B. 46. Jg., 1992, Nr. 11, S. 7157–7168
- [SOFT02] Softal Electronic GmbH: Korona-Vorbehandlung zur Erzielung von Benetzung und Haftung. Report Nr. 102. Hamburg, 2002. Firmenschrift
- [SON13] Son, J.; Sakhuja, M.; Danner, A. J.; Bhatia, C. S.; Yang, H.: Large scale antireflective glass texturing using grid contacts in anodization methods. In: Solar Energy Materials and Solar Cells. 116. Jg., 2013, S. 9–13
- [SOTO03] Sotomayor Torres, C. M.: Alternative Lithography. Unleashing the Potentials of Nanotechnology. 1 Aufl. Boston: Springer US, 2003

- [STEI16] Steinberg, C.; Papenheim, M.; Wang, S.; Scheer, H.-C.: Complex 3D structures via hybrid processing of SU-8. In: *Microelectronic Engineering*, 155. Jg., 2016, S. 14–18.
- [STEP12] Stepanova, M.; Dew, S.: *Nanofabrication. Techniques and principles*. Vienna: Springer Wien, 2012
- [STRO09] Stropp, J.: *Auf Nummer sichergehen*. Weilburger Graphics GmbH. Gerhardshofen, 2009. Firmenschrift
- [TAN98] Tan, H.; Gilbertson, A.; Chou, S. Y.: Roller nanoimprint lithography. In: *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*. 16. Jg., 1998, Nr. 6, S. 3926–3928
- [TEMI17a] Temicoat Nanoimprint Technologies: *UV Nanoimprint R2R*. Temicon GmbH; Coatema Coating Machinery GmbH. Dormagen, 2017. Firmenschrift
- [TEMI17b] Temicoat Nanoimprint Technologies: *Coatema UV Nanoimprint. Product brochure*. Dormagen, 2017. Firmenschrift
- [THAN16] Thanirige, R. M.; John, J.; Pradhan, N. R.; Carter, K. R.; Tuominen, M. T.: Fabrication of flexible oriented magnetic thin films with large in-plane uniaxial anisotropy by roll-to-roll nanoimprint lithography. In: *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 407. Jg., 2016, S. 273–278
- [THES14] Thesen, M. W.; Ruttloff, S.; Limberg, R.; Vogler, M.; Nees, D.; Grütznert, G.: Photo-curable resists for inkjet dispensing applied in large area and high throughput roll-to-roll nanoimprint processes. In: *Microelectronic Engineering*. 123. Jg., 2014, S. 121–125
- [TING08] Ting, C.-J.; Chang, F.-Y.; Chen, C.-F.; Chou, C. P.: Fabrication of an antireflective polymer optical film with subwavelength structures using a roll-to-roll micro-replication process. In: *Journal of Micromechanics and Microengineering*. 18. Jg., 2008, Nr. 7, S. 75001-1–75001-9
- [TSAI16] Tsai, S.-W.; Chen, P.-Y.; Huang, S.-R.; Lee, Y.-C.: Fabrication of seamless roller mold with 3D micropatterns using inner curved surface photolithography. In: *Microelectronic Engineering*. 150. Jg., 2016, S. 19–25
- [VDI12] Richtlinie VDI 2840 (Juni 2012): *Kohlenstoffsichten. Grundlagen, Schichttypen und Eigenschaften*
- [VELT07] Schutzrecht DE 10 2006 012 960 A1 (27.09.2007). Velten, T.; Schuck, H.; Knoll, T.; Bauerfeld, F.; Herrmann, J.; Haberer, W.: *Vorrichtung zum Prägen eines Foliensubstrates*

- [VELT08] Velten, T.; Schuck, H.; Richter, M.; Klink, G.; Bock, K.; Malek, C. K.; Roth, S.; Schoo, H.; Bolt, P. J.: Microfluidics on foil. State of the art and new developments. In: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. 222. Jg., 2008, Nr. 1, S. 107–116
- [VELT10] Velten, T.; Schuck, H.; Haberer, W.; Bauerfeld, F.: Investigations on reel-to-reel hot embossing. In: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 47. Jg., 2010, 1-4, S. 73–80
- [VELT11] Velten, T.; Bauerfeld, F.; Schuck, H.; Scherbaum, S.; Landesberger, C.; Bock, K.: Roll-to-roll hot embossing of microstructures. In: Microsystem Technologies. 17. Jg., 2011, Nr. 4, S. 619–627
- [VICT15] Victory Lighting (UK) Ltd.: Victory UV. UV reflector. Victory Lighting (UK) Ltd. Hertfordshire, 2015. Firmenschrift
- [VIGN14] Vigneswaran, N.; Samsuri, F.; Ranganathan, B.; Padmapriya: Recent Advances in Nano Patterning and Nano Imprint Lithography for Biological Applications. In: Procedia Engineering. 97. Jg., 2014, S. 1387–1398
- [VOGL07] Vogler, M.; Wiedenberg, S.; Mühlberger, M.; Bergmair, I.; Glinsner, T.; Schmidt, H.; Kley, E.-B.; Grützner, G.: Development of a novel, low-viscosity UV-curable polymer system for UV-nanoimprint lithography. In: Microelectronic Engineering. 84. Jg., 2007, 5-8, S. 984–988
- [VOLK15] Volk, A.-K.; Tucher, N.; Seiffe, J.; Hauser, H.; Zimmer, M.; Blasi, B.; Hofmann, M.; Rentsch, J.: Honeycomb Structure on Multicrystalline Silicon Al-BSF Solar Cell With 17.8% Efficiency. In: IEEE Journal of Photovoltaics. 5. Jg., 2015, Nr. 4, S. 1027–1033
- [VSE13] VSE Volumentchnik GmbH: Solutions for fluid technology. Bedienungsanleitung für Volumensensoren der Baureihe "VSI mit hoher Auflösung des Messvolumens". Neuenrade, 2013. Handbuch
- [WANG15] Wang, J.; Yi, P.; Deng, Y.; Peng, L.; Lai, X.; Ni, J.: Mechanism of forming defects in roll-to-roll hot embossing of micro-pyramid arrays. II. Numerical study. In: Journal of Micromechanics and Microengineering. 25. Jg., 2015, Nr. 11, S. 115030-1–115030-14
- [WIER09] Wieringa, F. P.; van Heck, G. T.; Rensing, P.; Koetse, M. M.; Kalisingh, S. S.; Schoo, H.: Systems in Foil — Opening new

- Perspectives in Medical Technology. In: Magjarevic, R. et al. (Hrsg.): 4th European Conference of the International Federation for Medical and Biological Engineering. (Reihe: IFMBE Proceedings). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009, S. 2292–2295
- [WORG09] Worgull, M.: Hot Embossing. Theory and technology of microreplication. (Reihe: Micro & nano technologies). Oxford, Burlington: W. Andrew, 2009
- [WU10a] Wu, J.-T.; Lai, H.-C.; Yang, S.-Y.; Huang, T.-C.; Wu, S.-H.: Dip coating cooperated with stepped rotating lithography to fabricate rigid microstructures onto a metal roller. In: Microelectronic Engineering. 87. Jg., 2010, Nr. 11, S. 2091–2096
- [WU10b] Wu, J.-T.; Yang, S.-Y.: A gasbag-roller-assisted UV imprinting technique for fabrication of a microlens array on a PMMA substrate. In: Journal of Micromechanics and Microengineering. 20. Jg., 2010, Nr. 8, S. 85038-1–85038-6
- [WU16] Wu, H.; Yi, P.; Peng, L.; Lai, X.: Study on bubble defects in roll-to-roll UV imprinting process for micropyramid arrays. I. Experiments. In: Journal of Vacuum Science & Technology B, Nanotechnology and Microelectronics: Materials, Processing, Measurement, and Phenomena. 34. Jg., 2016, Nr. 2, 021201-1–021201-9
- [XAAR17] XAAR plc.: Xaar setzt einen neuen Tintenstrahlstandard mit der hochauflösenden Piezo-Druckkopffamilie Xaar 5601 mit MEMS-Silizium-Dünnschichttechnologie.
URL: <http://www.xaar.com/de/media-centre/xaar-sets-a-new-inkjet-standard-with-the-xaar-5601-thin-film-silicon-mems-high-resolution-printhead-family> [Stand: 21.09.2017]
- [YANG09] Yang, W.: Design and manufacturing of high precision roll-to-roll multi-layer printing machine. Measurement and experiment. Thesis MIT. Cambridge, 2009
- [YAO06a] Schutzrecht US 2006/0238874 A1 (26.10.2006). Yao, P.-H.; Pan, I.-K.; Huang, H.-C.; Pao, Y.-N.; Sun, Y.-T.: Light modulation element
- [YAO06b] Schutzrecht US 2006/0291064 A1 (28.12.2006). Yao, P.-H.; Pan, I.-K.; Lin, B.-S.; Huang, H.-C.; Pao, Y.-N.; Sun, Y.-T.: Optical film with array of microstructures and the light source apparatus utilizing the same

- [YE14] Ye, H.; Zhang, Q.; Shen, L.; Li, M.: Bubble defect control in low-cost roll-to-roll ultraviolet imprint lithography. In: *Micro & Nano Letters*. 9. Jg., 2014, Nr. 1, S. 28–30
- [YI15a] Yi, P.; Wu, H.; Zhang, C.; Peng, L.; Lai, X.: Roll-to-roll UV imprinting lithography for micro/nanostructures. In: *Journal of Vacuum Science & Technology B, Nanotechnology and Microelectronics: Materials, Processing, Measurement, and Phenomena*. 33. Jg., 2015, Nr. 6, 060801-01–060801-23
- [YOA02] Yoa, D.; Kim, B.: Simulation of the filling process in micro channels for polymeric materials. In: *Journal of Micromechanics and Microengineering*. 12. Jg., 2002, Nr. 5, S. 604–610
- [YU15] Yu, C.-C.; Chen, H.-L.: Nanoimprint technology for patterning functional materials and its applications. In: *Microelectronic Engineering*. 132. Jg., 2015, S. 98–119
- [YUN13] Yun, D.; Son, Y.; Park, H.; Kim, B.; Kim, S. (Hrsg.): Study on the roll-to-roll hot embossing with a presurized belt. In: *Proceedings of 13th International Conference on Control, Automation and Systems*. Gwangju, Südkorea, 20.-23. Oktober 2013. IEEE. 2013, S. 485–487
- [ZHAN15a] Zhang, C.; Yi, P.; Peng, L.; Lai, X.; Ni, J.: Fabrication of Moth-Eye Nanostructure Arrays Using Roll-to-Roll UV-Nanoimprint Lithography With an Anodic Aluminum Oxide Mold. In: *IEEE Transactions on Nanotechnology*. 14. Jg., 2015, Nr. 6, S. 1127–1137
- [ZHAN15b] Zhang, X. Q.; Liu, K.; Shan, X. C.: Fabrication of linear Fresnel lens using UV embossing and a micromachined roller mold. In: *Proceedings of Symposium on Design Test Integration and Packaging of MEMS and MOEMS*. Montpellier, Frankreich, 27.-30. April 2015. IEEE. 2015, S. 1–4
- [ZHON11] Zhong, Z. W.; Shan, X. C.; Wong, S. J.: Roll-to-roll large-format slot die coating of photosensitive resin for UV embossing. In: *Microsystem Technologies*. 17. Jg., 2011, Nr. 12, S. 1703–1711