

Integration gedruckter Elektronik in Kunststoffe durch Folienhinterspritzen

Von der Fakultät für Maschinenbau der
Technischen Universität Chemnitz

genehmigte

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur
(Dr.-Ing.)

vorgelegt

von Dipl.-Ing. Karin Weigelt,
geboren am 06.01.1981 in Marienberg

eingereicht am 3. Juli 2013

Gutachter:

Prof. Dr. Arved C. Hübler
Prof. Dr. Michael Gehde

Chemnitz, den 25.01.2014

Bibliographische Beschreibung

Weigelt, Karin

Integration gedruckter Elektronik in Kunststoffe durch Folienhinterspritzen

Dissertation an der Fakultät für Maschinenbau der Technischen Universität Chemnitz, Institut für Print- und Medientechnik, Chemnitz, Januar 2014

137 Seiten, 87 Abbildungen, 16 Tabellen, 152 Literaturzitate

Referat

Ausgehend von der Anwendung von Folienhinterspritzprozessen für dekorative Zwecke wurde deren Nutzung für die Integration elektronischer Strukturen in Kunststoffbauteile untersucht. Die Herstellung der elektronischen Bauelemente erfolgte mittels verschiedener Druckverfahren mit elektrisch leitfähigen und dielektrischen Materialien auf Polycarbonatfolien. Im Fokus standen zum einen kapazitiv auslesbare Speicherstrukturen und zum anderen Elektrolumineszenzleuchten. Nach dem Druck wurden die bedruckten Folien z. T. verformt und hinterspritzt. In der Arbeit wird auf die Auswirkungen der Verform- und Hinterspritzprozesse eingegangen. Schwerpunktmäßig wird die elektronische bzw. optische Funktionalität der Bauelemente, die Beeinflussung durch Klimaveränderungen und die Haftfestigkeit der Folien betrachtet. Im Ergebnis konnten erstmals die Realisierbarkeit hinterspritzter elektronischer Bauelemente nachgewiesen sowie verschiedene Einflussfaktoren auf deren Funktionalität identifiziert werden.

Schlagworte

Drucktechnik, gedruckte Elektronik, PEDOT:PSS, Kunststofftechnik, Spritzgießen, Folienhinterspritzen, gedruckte Datenspeicher, Elektrolumineszenzleuchten, Haftfestigkeit

Abstract

Weigelt, Karin

Integration of Printed Electronic Devices into Plastic Components by Film Insert Molding

Based on the application of film insert molding for graphic purposes, the utilization of this process for the integration of electronic devices into plastic components was examined. The manufacturing of the electronic devices was realized by applying electrical conductive and dielectric inks on polycarbonate foil by various printing processes. Capacitive data storage patterns and electroluminescent lamps are the main applications. The production sequence included the printing process, forming of the foil where required and back injection molding. The impact of forming and film insert molding was investigated. The electronic and/or optical functionality of the devices, the influence of ambient conditions like temperature or humidity and the adhesion strength of the foils were in the focus of the evaluation. As a result, the feasibility of film insert molded electronic devices could be verified and various impact factors could be identified for the first time.

Keywords

printing technology, printed electronics, PEDOT:PSS, plastics engineering, injection molding, film insert molding, printed data storage, electroluminescent lamps, adhesion

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Print- und Medientechnik der Technischen Universität Chemnitz.

Mein besonderer Dank gilt dem Lehrstuhlinhaber der Professur Printmedientechnik, Herrn Prof. Dr.-Ing. Arved C. Hübler, für die Anregung dieses interdisziplinären Themas und die Betreuung der Arbeit. Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Gehde danke ich für die Möglichkeit der Nutzung von Maschinen der Professur Kunststoffe, die wertvollen Hinweise bei der Erstellung des Manuskriptes sowie die Übernahme der Gutachterfunktion.

Weiterhin möchte ich allen Mitarbeitern des Instituts für Print- und Medientechnik für die angenehme Zusammenarbeit und die Hilfsbereitschaft danken. Besonders gedankt sei Dr. Ulrich Hahn für die stete Motivation, Dr. Heiko Kempa für die unzähligen fachlichen Diskussionen und die kritische Durchsicht meiner Dissertationsschrift sowie Georg Schmidt und Mike Hamsch für stetigen fachlichen Austausch. Ebenso möchte ich allen Studien- und Diplomarbeitern, Praktikanten und studentischen Hilfskräften für ihre Unterstützung bei zahlreichen Messungen und fachlichen Diskussionen danken. Mein besonderer Dank geht an Frank Siegel, Martin Bennewitz, Michael Michel und Marko Illing für ihre wertvollen Arbeiten.

Die Forschungsarbeiten, auf denen diese Dissertation basiert, wurden von der Stiftung Industrieforschung in Köln in Form eines Stipendiums gefördert. Der Stiftung und insbesondere dem Vorstand Dr. Wolfgang Lerch gebührt mein Dank für die flexible finanzielle Förderung sowie die ideelle Förderung mit der Möglichkeit zum Austausch mit Wissenschaftlern aus unterschiedlichsten Fachgebieten.

Darüber hinaus danke ich den Mitarbeitern des Welsh Centre for Printing and Coating (WCPC) in Swansea, Wales, speziell Herrn Prof. Timothy C. Claypole, Eifion H. Jewell und Chris O. Phillips, für die Ermöglichung des Forschungsaufenthalts und die Unterstützung bei der Durchführung zahlreicher Versuche. Wesentliche Ergebnisse meiner Arbeit sind am WCPC entstanden. Weiterhin möchte ich der Bayer MaterialScience AG, insbesondere Dr. Thomas Bernert, für die Möglichkeit der Durchführung von Verformversuchen im Technikum danken. Für die Realisierung von Hinterspritzversuchen an Mehrweggetränkästen danke ich der Firma Schoeller Arca Systems, besonders Herrn Martin Fetzer.

Schließlich möchte ich mich herzlich bei meiner Familie, besonders bei meinen Eltern, meiner Schwester, meinem Mann und meinem Sohn, sowie meinen besten Freunden für die ständige Unterstützung und Motivation während der gesamten Bearbeitungszeit bedanken.

Karin Weigelt

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	9
Symbolverzeichnis	11
Abbildungsverzeichnis	14
Tabellenverzeichnis	17
1 Einführung	18
1.1 Motivation, Zielsetzung und Beitrag der Arbeit	18
1.2 Aufbau der Arbeit	21
2 Stand der Technik	22
2.1 Automatische Identifikation	22
2.1.1 Begriffe und Grundlagen	22
2.1.2 Optische Codes	24
2.1.3 RFID	26
2.1.4 Kapazitive Informationsträger	27
2.1.5 Vergleich von automatischen Identifikationstechnologien	29
2.1.6 Weitere Funktionen	29
2.2 Technologien zur Herstellung von Smart Objects im Überblick	32
2.2.1 Konventionelle Kennzeichnungsmethoden	32
2.2.2 Herstellung von RFID-Transpondern	34
2.2.3 Räumliche spritzgegossene Schaltungsträger	36
2.3 Gedruckte Elektronik	38
2.3.1 Materialien	38
2.3.2 Verfahren	42
2.3.3 Bauelemente	42
2.4 Folienhinterspritzen	43
2.4.1 IMD-Verfahren	45
2.4.2 IML-Verfahren	46
2.4.3 FIM-Verfahren	46
2.4.4 Verformen der Folien	47
2.4.5 Anforderungen an die Foliensubstrate	48
2.4.6 Dehnung, Schwindung und Verzug beim Folienhinterspritzen	49
2.5 Funktionsintegration in Kunststoffbauteile durch Folienhinterspritzen	51
2.5.1 Hinterspritzen von Schaltungsträgern	51
2.5.2 RFID-Integration	52
2.5.3 Hinterspritzen gedruckter elektronischer Komponenten	52

3	Materialien und Verarbeitung	55
3.1	Verwendete Materialien	55
3.1.1	Substratmaterialien	55
3.1.2	Druckstoffe	55
3.1.3	Formmasse	56
3.2	Entwurf von Drucklayouts	56
3.2.1	Speicherstrukturen	56
3.2.2	Elektrolumineszente Anzeigen	58
3.3	Probenherstellung: Drucken	60
3.3.1	Drucken von Speicherstrukturen	60
3.3.2	Drucken von elektrolumineszenten Anzeigen	61
3.4	Probenherstellung: Hinterspritzen und Verformen	62
3.4.1	Prozessparameter	62
3.4.2	Probekörper	62
3.4.3	Verformversuche	63
4	Analysemethoden und Versuchsauswertung	64
4.1	Geometrische Charakterisierung und Oberflächencharakterisierung	64
4.2	Rheologische Charakterisierung	64
4.3	Benetzbarkeit und Oberflächenspannung	65
4.4	Mechanische Charakterisierung	67
4.4.1	Spannungs-Dehnungs-Verhalten der Folien	67
4.4.2	Schälfestigkeit hinterspritzter Folien	68
4.5	Elektrische Charakterisierung	70
4.5.1	Elektrischer Widerstand	70
4.5.2	Kapazitätsmessungen	70
4.6	Untersuchung von Umwelteinflüssen	72
4.7	Charakterisierung der elektrolumineszenten Anzeigen	73
5	Ergebnisse und Diskussion	74
5.1	Eigenschaften der Bedruckstoffe	74
5.1.1	Foliendicke und Rauheit	74
5.1.2	Mechanische Eigenschaften	74
5.1.3	Oberflächenspannung	75
5.2	Eigenschaften der Druckstoffe	76
5.2.1	Rheologische Eigenschaften	76
5.2.2	Oberflächenspannung	76
5.3	Elektrische Eigenschaften vor und nach dem Hinterspritzen	77
5.3.1	Elektrischer Widerstand	77
5.3.2	Kapazitätsmessungen	81
5.4	Ergebnisse der Klimatests	90
5.4.1	Einfluss der relativen Luftfeuchte	90
5.4.2	Einfluss der Temperatur	93
5.4.3	Beeinflussung durch feuchte Wärme	93
5.5	Haftfestigkeit der hinterspritzten Folien	94
5.6	Eigenschaften der EL-Leuchten	99
5.6.1	Einfluss von Ansteuerfrequenz und Ansteuerspannung	99

5.6.2	Bidirektionale EL-Leuchten	101
5.6.3	Hinterspritzen von EL-Leuchten	106
5.6.4	Verformen von EL-Leuchten	112
5.7	Ausblick	114
6	Zusammenfassung	116
	Literaturverzeichnis	118
	Anhang	137

Abkürzungsverzeichnis

3D-MID	dreidimensionale räumliche spritzgegossene Schaltungsträger
AC	alternating current, Wechselstrom
ACA	anisotropic conductive adhesive, anisotrop leitender Klebstoff
AIT	advanced interconnect technology, fortgeschrittene Verbindungstechnik
Al	Aluminium
Auto-ID	automatische Identifikation
BaTiO₃	Bariumtitanat
Cl	Chlor
CNT	carbon nanotube, Kohlenstoffnanoröhre
Cu	Kupfer
DC	direct current, Gleichstrom
E-Modul	Elastizitätsmodul
EAN 13	Europäische Artikelnummer
EAS	Elektronische Artikelsicherung
EEPROM	electrically erasable programmable read only memory, elektrisch löschbarer programmierbarer Nur-Lese-Speicher
EL	Elektrolumineszenz
FIM	film insert moulding, Folienhinterspritzen
GPS	global positioning system, globales System zur Positionsbestimmung
GS	Gesamtschwindung
GSM	global system for mobile communications, globales System für mobile Kommunikation
HCCB	high capacity color barcode, spezieller 2D-Barcode der Firma Microsoft
HF	high frequency, Hochfrequenz
HPF	high pressure forming, Hochdruckverformung
ICA	isotropic conductive adhesive, isotrop leitender Klebstoff
ID	Identifikator
IMD	in-mould decoration, Folienhinterspritzen
IML	in-mould labelling, Etikettenhinterspritzen
ITO	indium tin oxide, Indiumzinnoxid
LCD	liquid crystal display, Flüssigkristallanzeige
LED	light emitting diode, lichtemittierende Diode
LF	low frequency, Niederfrequenz
Mn	Mangan
NCA	nonconductive adhesive, nichtleitender Klebstoff
NFC	near field communication, Nahfeld-Kommunikationstechnologie
NS	Nachschwindung

OCR	optical character recognition, optische Zeichenerkennung
OFET	organic field effect transistor, organischer Feldeffekttransistor
OLED	organic light emitting diode, organische lichtemittierende Diode
OPVC	organic photovoltaic cell, organische Solarzelle
PA	Polyamid
PANI	Polyanilin
PARC	Palo Alto Research Center, Forschungszentrum der Firma Xerox
PBT	Polybutylenterephthalat
PC	Polycarbonat
PE	Polyethylen
PEDOT:PSS	[Poly(3,4-ethylendioxi-thiophen) Poly(styrolsulfonat)]
PEEK	Polyetheretherketon
PEN	Polyethylenaphthalat
PET	Polyethylenterephthalat
PMMA	Polymethylmethacrylat
PP	Polypropylen
PVC	Polyvinylchlorid
PZN	Pharma Zentral Nummer (Strichcode)
QR-Code	quick response code, spezieller 2D-Barcode
RFID	radio frequency identification, Radiofrequenz-Identifikation
RW	Rasterwalze
SMD	surface-mounted device, oberflächenmontiertes Bauelement
TFT	thin film transistor, Dünnschichttransistor
UHF	ultra high frequency, Ultrahochfrequenz
URL	uniform resource locator, einheitlicher Quellenanzeiger
VS	Verarbeitungsschwindigkeit
WLAN	wireless local area network, lokales drahtloses Netzwerk
ZnS	Zinksulfid

Symbolverzeichnis

Lateinische Buchstaben

A	m^2	Fläche
A_0	mm^2	Querschnitt der Probe im undeformierten Zustand
A_K	m^2	Elektrodenfläche eines Plattenkondensators
a	mm	Abstand
b	mm	Probenbreite
b_0	mm	nomielle Probenbreite
b_K	mm	Breite der Elektrodenfläche eines Plattenkondensators
b_L	mm	Breite der Leiterbahn
b_V	mm	Breite der Verbindungsleitbahn
C	F	elektrische Kapazität
C_A	F/cm^2	flächenbezogene Kapazität
C_e	F	Einzelkapazität
C_{ges}	F	Gesamtkapazität
D	cm^2/s	Diffusionskoeffizient
d	μm	Schichtdicke
d_F	μm	Foliendicke
E_e	W/m^2	Bestrahlungsstärke
F	N	Kraft
F_A	N	Anreißkraft
FD	%	relative Flächendeckung
f	Hz	Frequenz
f_g	Hz	Grenzfrequenz
I_v	cd	Lichtstärke
L_0	mm	Anfangslänge
L_v	cd/m^2	Leuchtdichte

ΔL	mm	Längenänderung
l_K	mm	Länge der Elektrodenfläche eines Plattenkondensators
l_L	mm	Länge der Leiterbahn
l_V	mm	Länge der Verbindungsleitbahn
p_{Sp}	mN/m	Spreitungsdruck
R	Ω	elektrischer Widerstand
R_a	μm	arithmetischer Mittenrauwert
RH	%	relative Luftfeuchtigkeit
R_S	Ω	elektrischer Schichtwiderstand
R_z	μm	gemittelte Rautiefe
s	mm	Weg
s_{ges}	mm	Gesamtschälweg
T	$^{\circ}\text{C}$	Temperatur
T_C	$^{\circ}\text{C}$	Curie-Temperatur
T_g	$^{\circ}\text{C}$	Erweichungstemperatur, Glasübergangstemperatur
W_A	mN/m	Adhäsionsarbeit
W_K	mN/m	Kohäsionsarbeit
W_S	%	Sättigungswert der Wasseraufnahme
X_C	Ω	kapazitiver Blindwiderstand eines Kondensators
Z	Ω	Scheinwiderstand
\underline{Z}	Ω	Impedanz, komplexer Wechselstromwiderstand

Griechische Buchstaben

α		Basiswinkel eines gleichschenkligen Dreieckes
γ	mN/m	Oberflächenspannung
γ^d	mN/m	disperser Anteil der Oberflächenspannung
γ_{lv}	mN/m	Grenzflächenspannung Flüssigkeit-Luft
γ^p	mN/m	polarer Anteil der Oberflächenspannung
γ_{sl}	mN/m	Grenzflächenspannung Festkörper-Flüssigkeit
γ_{sv}	mN/m	Grenzflächenspannung Festkörper-Luft
$\dot{\gamma}$	s^{-1}	Schergeschwindigkeit

ε		Dehnung
ε_0	As/(V m)	elektr. Feldkonstante $\varepsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12}$ As/(V m)
ε_B		Bruchdehnung
ε_r		relative Permittivität
ε_{tB}		nominale Bruchdehnung
ε_Y		Streckdehnung
η	Pa s	dynamische Viskosität
Θ		Kontaktwinkel
λ	nm	Wellenlänge
σ	N/mm ²	Nennspannung
σ_B	N/mm ²	Bruchspannung
σ_M	N/mm ²	Zugfestigkeit
σ_Y	N/mm ²	Streckspannung
σ'	N/mm	Schälfestigkeit
σ'_{abs}	N/mm	absolute Schälfestigkeit
σ'_{rel}	N/mm	relative Schälfestigkeit
τ		Zeitkonstante
τ_S	Pa	Schubspannung
Φ	W	Strahlungsfluss

Abbildungsverzeichnis

1.1	Entwicklungsphasen der Informationsverarbeitung	19
1.2	Pyramide der Informationsverarbeitung	20
2.1	Allgemeiner Aufbau von Strichcodes	24
2.2	Aufbau eines kapazitiven Datenträgers und elektrische Kodelesevorrichtung für kapazitive Informationsträger	28
2.3	Kennzeichnungskosten für verschiedene Auto-ID-Technologien	31
2.4	Funktionen von Smart Objects	31
2.5	Blockschaltbild eines RFID-Datenträgers mit Speicherfunktion	35
2.6	Übersicht über die Herstellungsverfahren für räumliche spritzgegossene Schaltungsträger	36
2.7	Verfahrensablauf der wichtigsten Herstellungsverfahren für räumliche spritzgegossene Schaltungsträger	37
2.8	Strukturformel von PEDOT:PSS	39
2.9	Varianten von Elektrolumineszenzleuchten	41
2.10	Schematische Darstellung verschiedener Druckverfahren	42
2.11	Einteilung der Verfahren zur Verbindung mehrerer Komponenten durch Spritzgießen	43
2.12	Adhäsionsmechanismen beim Verbundspritzgießen	45
2.13	Prinzip und Arbeitsschritte des IMD-Verfahrens	45
2.14	Prinzip und Arbeitsschritte des IML-Verfahrens	46
2.15	Verformen und Anformen einer Folie	47
2.16	Verfahrensablauf beim Hochdruckverformen und Hinterspritzen von Kunststofffolien	48
2.17	Verarbeitungs-, Nach- und Gesamtschwindung in Abhängigkeit von Werkzeugtemperatur, Druck, Fließweglänge und Dicke des Formteils	50
2.18	Wölbung folienhinterspritzter Bauteile in Abhängigkeit der Foliendicke und der Dicke des Probekörpers	50
2.19	Verfahrensablauf beim Einspritzen eines RFID-Transponders in einen Kunststoffbehälter	52
2.20	Schematische Darstellung des Hinterspritzvorgangs	53
2.21	Hinterspritzte Teststruktur	54
3.1	Druckformen für Druckversuche an den LaborMAN-Druckmaschinen	57
3.2	Ausgewählte Druckformen für Druckversuche am Flexoprobendruckgerät	57
3.3	Gesamtaufbau und Querschnitt einer EL-Leuchte	58
3.4	Layouts der einzelnen Schichten einer EL-Leuchte	59
3.5	Aufbau einer unidirektionalen und einer bidirektionalen EL-Leuchte	59
3.6	Layout der EL-Leuchten für Verformversuche	60

3.7	Plattenwerkzeug zur Durchführung der Hinterspritzversuche	63
4.1	Kräftegleichgewicht am liegenden Tropfen	65
4.2	Schematische Darstellung typischer Benetzungsvarianten	65
4.3	Probenaufnahme zur Untersuchung der Schälfestigkeit	68
4.4	Typische Schälkraft-Kurve beim 90°-Schälversuch	69
4.5	Aufbau der Speicherstrukturen, Messkonfiguration und Ersatzschaltbild .	71
4.6	Modell des seriellen Kapazitätsmessplatzes	72
5.1	Spannungs-Dehnungs-Diagramm von Makrofol [®] DE 1-4	75
5.2	Oberflächenspannung von Makrofol [®] DE 1-4	76
5.3	Fließkurven ausgewählter Druckstoffe	77
5.4	Schichtwiderstand gedruckter PEDOT:PSS-Strukturen in Abhängigkeit der Temperaturbelastung an Luft	78
5.5	Schichtwiderstand beim Flexodruck in Abhängigkeit der Druckgeschwindig- keit und der Vorbehandlung	79
5.6	Mikroskopaufnahmen von im Flexodruck hergestellten Leitbahnen bei ver- schiedenen Druckgeschwindigkeiten	79
5.7	Mikroskopaufnahmen von im Flexodruck hergestellten Leitbahnen mit und ohne Coronavorbehandlung des Bedruckstoffes	80
5.8	Schichtwiderstand von im Flexodruck mit unterschiedlichen Rasterwalzen hergestellten Leitbahnen vor und nach dem Hinterspritzen	81
5.9	Kapazität von Speicherstrukturen auf vorbehandelten und unvorbehandel- ten Substraten	82
5.10	Vergleich der flächenbezogenen Kapazität von Speicherstrukturen auf unter- schiedlich dicken Substratfolien	83
5.11	Vergleich der Kapazität von Speicherstrukturen vor und nach dem Hinter- spritzen	84
5.12	Kapazität von hinterspritzten Speicherstrukturen	84
5.13	Kapazität und Grenzfrequenz von hinterspritzten Speicherstrukturen, die mit unterschiedlichen Materialien gedruckt wurden	85
5.14	Abnahme der flächenbezogenen Kapazität bei hohen Messfrequenzen . . .	86
5.15	Kapazität von hinterspritzten Speicherstrukturen bei 10 kHz in Abhängig- keit der Koppelfläche	87
5.16	Kapazitäten von hinterspritzten Speicherstrukturen mit unterschiedlich großen Koppelflächen; Vergleich von verbundenen (logische Eins) und nicht verbundenen (logische Null) Strukturen	87
5.17	Vergleich der Kapazität von hinterspritzten Flexodruck- und Tiefdruck- Speicherstrukturen	88
5.18	Mikroskopaufnahmen von im Flexodruck und im Tiefdruck hergestellten Leitbahnen	89
5.19	Serielle Kapazitätsmessung: Kapazität in Abhängigkeit des Verfahrenweges .	90
5.20	Kapazitäten hinterspritzter Speicherstrukturen in Abhängigkeit der relati- ven Luftfeuchte bei einer Messfrequenz von 1 kHz	91
5.21	Kapazität in Abhängigkeit der relativen Luftfeuchte eines ausgewählten Zy- klus bei einer Messfrequenz von 1 kHz	92

5.22	Entwicklung der Kapazitäten (Messfrequenz 1 kHz) über 20 Messzyklen bei unterschiedlichen relativen Luftfeuchtwerten	92
5.23	Kapazitäten hinterspritzter Speicherstrukturen in Abhängigkeit der Temperatur bei einer Messfrequenz von 1 kHz	93
5.24	Entwicklung der Kapazität bei Lagerung bei einer Temperatur von 85 °C und einer relativen Luftfeuchte von 85 % (Messfrequenz 1 kHz)	94
5.25	Schälkraftkurven bei unterschiedlichen Flächendeckungen	95
5.26	Dreieckförmiger Abriss der hinterspritzten Folie bei Schälfestigkeitsuntersuchungen	95
5.27	Anreißkraft hinterspritzter Folien mit variierter Foliendicke, Folienseite, Vorbehandlung und Flächendeckung des Druckbildes	96
5.28	Schälfestigkeit von unbedruckten Proben	98
5.29	Schälfestigkeit von bedruckten Proben in Abhängigkeit der relativen Flächendeckung bei unterschiedlichen Foliendicken	98
5.30	Spektrum einer unidirektionalen EL-Leuchte bei variierter Ansteuerspannung und konstanter Frequenz ($f = 670 \text{ Hz}$)	100
5.31	Spektrum einer unidirektionalen EL-Leuchte bei variierter Ansteuerfrequenz und konstanter Spannung ($U = 75 \text{ V}$)	100
5.32	Fotografien der hergestellten EL-Leuchten	101
5.33	Emissionsspektren uni- und bidirektionaler EL-Leuchten	102
5.34	Kapazitäten uni- und bidirektionaler EL-Leuchten	103
5.35	Emissionsspektren bidirektionaler EL-Leuchten in beide Richtungen	103
5.36	Leuchtdichte uni- und bidirektionaler EL-Leuchten	104
5.37	Spannungs-Dehnungs-Diagramm verschiedener EL-Leuchten auf Makrofol [®] DE 1-4 200 μm	105
5.38	Schadensbild der im Zugversuch getesteten EL-Proben	106
5.39	Bildabfolge eines Zugversuches an einer eingeschalteten bidirektionale Gwent-Leuchte auf Makrofol [®] DE 1-4 200 μm	107
5.40	Spannungs-Dehnungs-Diagramm einer eingeschalteten bidirektionale Gwent-Leuchte auf Makrofol [®] DE 1-4 200 μm	107
5.41	Hinterspritzte bidirektionale Gwent-Leuchte	108
5.42	Emissionsspektren uni- und bidirektionaler EL-Leuchten	109
5.43	Leuchtdichte in Abhängigkeit der Ansteuerspannung bei konstanter Frequenz	109
5.44	Emissionsspektren verschiedener Leuchten vor und nach dem Hinterspritzen	110
5.45	Leuchtdichte verschiedener Leuchten vor und nach dem Hinterspritzen . .	110
5.46	Leuchtdichte verschiedener Leuchtentypen in Abhängigkeit von der Kapazität	111
5.47	Fotos verformter EL-Leuchten	112
5.48	Emissionsspektren uni- und bidirektionaler EL-Leuchten vor und nach dem Verformen	113
A.1	Verfahrensvarianten in Abhängigkeit von Auflagenhöhe und Individualisierungsgrad	131
A.2	Prozessablauf bei der Kennzeichnung von Mehrweg-Kunststoffverpackungen	134
A.3	Prozessablauf bei der Fertigung eines Notausgangsschildes mit integrierter EL-Leuchte	136

Tabellenverzeichnis

2.1	Vergleich von Auto-ID-Technologien	30
3.1	Übersicht der verwendeten Druckstoffe	56
3.2	Verwendete Rasterwalzen für Druckversuche am Flexoprobendruckgerät . .	61
3.3	Verwendete Siebe zum Druck der EL-Leuchten	62
4.1	Überblick über die Proben zur Ermittlung der Schälfestigkeit	69
4.2	Messbedingungen der klimatischen Untersuchungen	73
5.1	Rauheitskennwerte der Makrofol [®] DE 1-4	74
5.2	Festigkeits- und Verformungskennwerte der Makrofol [®] DE 1-4	74
5.3	Oberflächenspannungen verschiedener Polymere	75
5.4	Oberflächenspannung von ausgewählten Druckstoffen	77
5.5	Elektrischer Widerstand und berechnete Grenzfrequenz der RC-Reihenschaltung für verschiedene Materialien	85
5.6	Kapazitäten bei 10 kHz und einer nominellen Koppelfläche von 30 mm ² . .	89
5.7	Versuchsreihe EL1: verwendete Materialien zur Herstellung uni- und bidirektionaler EL-Leuchten	101
5.8	Versuchsreihe EL2: verwendete Materialien zur Herstellung uni- und bidirektionaler EL-Leuchten für Hinterspritz- und Verformungsversuche	105
5.9	Phasen und Kristallsysteme von BaTiO ₃	111
5.10	Leuchtdichte uni- und bidirektionaler EL-Leuchten vor und nach dem Verformen	114

1 Einführung

1.1 Motivation, Zielsetzung und Beitrag der Arbeit

Die Integration elektronischer Funktionen in verschiedene Gegenstände gewinnt zunehmend an Bedeutung. Neben eigentlichen Elektronikprodukten werden seit einiger Zeit auch Alltagsgegenstände mit Elektronik ausgerüstet, die bisher keine derartigen Komponenten enthielten. Für diesen Trend, der seinen Ursprung in der Informationsverarbeitung hat, wurden unterschiedliche, meist englisch-sprachige Begriffe geprägt: Internet of Things (Internet der Dinge), Extended Internet oder X-Internet, ubiquitous/pervasive computing (allgegenwärtige Informationsverarbeitung), ambient intelligence (Umgebungsintelligenz), Smart Objects (intelligente Objekte) und viele andere mehr. Den Anstoß für diese Entwicklungen gab 1991 der visionäre Artikel „The Computer for the 21st Century“ von Mark Weiser^[1] mit dem Untertitel:

„Specialized elements of hardware and software, connected by wires, radio waves and infrared, will be so ubiquitous that no one will notice their presence.“

Die Vision der Forscher ist die unsichtbare und gleichzeitig allgegenwärtige Durchsetzung der Welt mit Computersystemen. Die Systeme an sich werden dabei in den Hintergrund gedrängt und die informationsverarbeitende Elektronik in Alltagsgegenstände eingebettet. Die Grundlage für die Realisierung von entsprechenden Applikationen bilden die technologischen Entwicklungen in der Kommunikations- und Informationstechnologie sowie in der Mikroelektronik der letzten Jahre. Durch die zunehmende Miniaturisierung von Speichern, Prozessoren und Sensoren und der damit verbundenen erhöhten Integrationsdichte ist es prinzipiell möglich, sehr kleine Gegenstände mit Elektronik auszurüsten. Weitere technologische Treiber^[2] sind:

Drahtlose Kommunikationstechnologien, z. B. WLAN (lokale drahtlose Netzwerke), Bluetooth, RFID (Radiofrequenzidentifikation), NFC (Nahfeld-Kommunikation) und ZigBee,

Lokalisierungstechnologien, z. B. GPS (globales System zur Positionsbestimmung), GSM (globales System für mobile Kommunikation) und WLAN,

Fortschritte bei der Energieversorgung, z. B. abnehmender Energiebedarf, erhöhte Energieeffizienz und alternative Energiequellen (Solarzellen, Brennstoffzellen u. a.),

Neue Materialien, z. B. elektrisch leitfähige Polymere und

Neue Ausgabesysteme, z. B. E-Books.

Die genannten Technologien sind durch Miniaturisierung und damit einhergehende Kostendegression charakterisiert (Abbildung 1.1). Daraus folgend werden die Stückzahlen der „Computer“ als Bestandteil von Alltagsgegenständen rasant ansteigen (Abbildung 1.2)^[3,4].

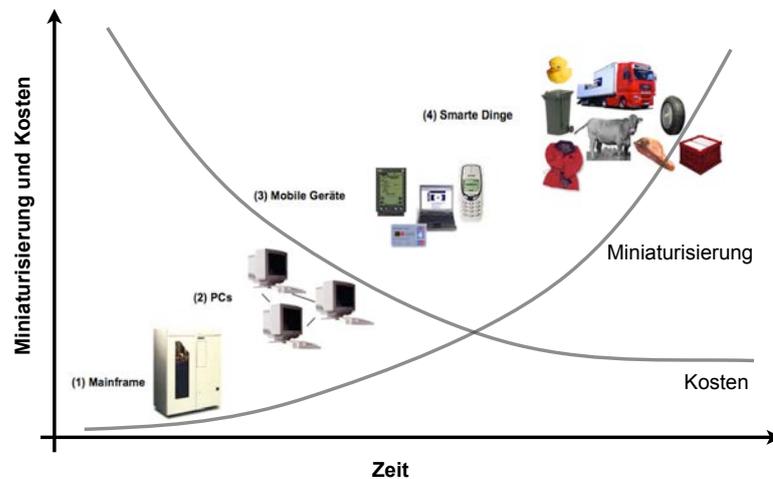


Abbildung 1.1: Entwicklungsphasen der Informationsverarbeitung (in modifizierter Form übernommen von Fleisch et al.^[3])

Die anvisierten hohen Stückzahlen bei geringen Stückkosten erfordern neben der Weiterentwicklung der grundlegenden Technologien vor allem auch die Entwicklung von entsprechenden Fertigungs- und Produktionsverfahren, die sich durch eine hohe Produktivität sowie geringe Kosten auszeichnen sollten. Das sich in den letzten Jahren rasant entwickelte Wissenschaftsgebiet der gedruckten Elektronik hat das Potential diese Anforderungen zu erfüllen. Durch die Verleihung des Nobelpreises für Chemie im Jahr 2000 an Alan J. Heeger, Alan G. MacDiarmid und Hideki Shirakawa für die Entdeckung und Entwicklung von leitenden Polymeren^[5] hat dieses Forschungsgebiet einen deutlichen Entwicklungsschub erfahren. Die technologische Grundlage ist die Löslichkeit elektrisch leitfähiger Polymere in verschiedenen Lösemitteln und die damit einhergehende mögliche Verarbeitung aus der flüssigen Phase heraus. Dadurch eröffnet sich die Chance, diese Materialien wie Farben bzw. Tinten in der grafischen Industrie zu verdrucken und einfache elektronische Bauelemente oder Schaltungen mittels Druckverfahren herzustellen.

Im nächsten Schritt können diese gedruckten, elektronischen Komponenten in Gegenstände integriert werden. Insbesondere Kunststoffbauteile sind dabei von großem Interesse, da die Bedeutung dieser Werkstoffgruppe ständig steigt^[6]. Unter den Kunststoffverarbeitungsverfahren ist das Spritzgießen das am weitesten verbreitete Verfahren^[7]. Es ermöglicht die reproduzierbare Herstellung komplex geformter Bauteile. Spritzgießen ist ein Massenfertigungsverfahren, welches mit steigenden Stückzahlen kosteneffizienter wird.

Es existieren verschiedene Spezialverfahren des Spritzgießens, die die Integration von Einlegeteilen während des Urformprozesses ermöglichen. Besonders Folienhinterspritzprozesse, die heute vorrangig zur Dekoration von Kunststoffteilen eingesetzt werden, erscheinen für die Integration gedruckter elektronischer Bauelemente geeignet.

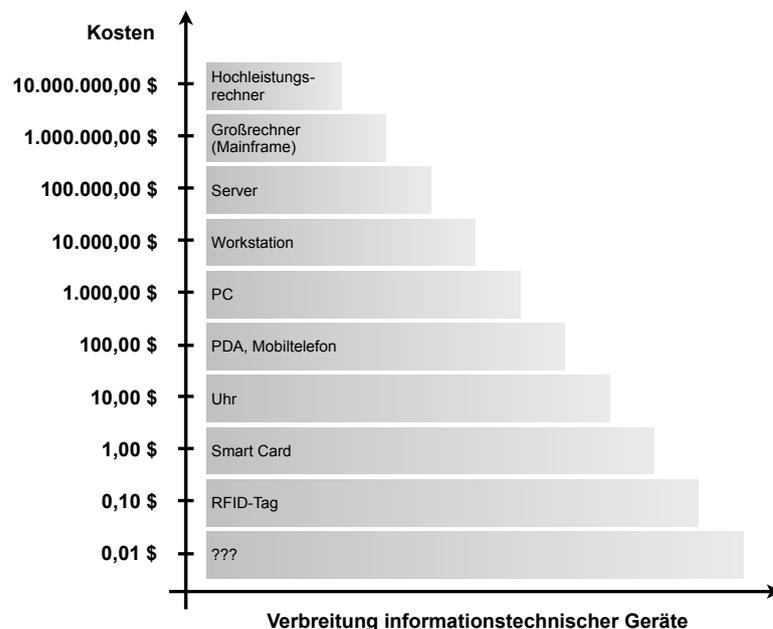


Abbildung 1.2: Pyramide der Informationsverarbeitung (in modifizierter Form übernommen von Gershenfeld^[4])

Die Zielstellung der Arbeit umfasst die Untersuchung von Folienhinterspritzprozessen zur Integration von auf Folien gedruckten elektronischen Bauelementen in Kunststoffbauteile. Das Thema wurde in folgende Teilziele gegliedert:

- Auswahl geeigneter Prozessvarianten und Materialien,
- Herstellung von Druckproben durch verschiedene Druckverfahren,
- Durchführung von Folienhinterspritzversuchen,
- Charakterisierung der Druck- sowie der Hinterspritzproben,
- Funktionsnachweis an einem einschichtigen (einfache kapazitiv auslesbare Speicherstrukturen) und einem mehrschichtigen (Elektrolumineszenzleuchten) Bauelement und
- Erstellung von Fertigungskonzepten zur Integration gedruckter Elektronik in Kunststoffbauteile.

Die vorliegende Arbeit fasst erstmals die Einflussgrößen und Zusammenhänge, die beim Hinterspritzen von gedruckten elektronischen Komponenten eine Rolle spielen, zusammen und leistet einen Beitrag zum besseren Verständnis von technologischen Einzelaspekten. Zu Beginn der Arbeiten an diesem Thema im Jahr 2007 waren keine vergleichbaren Forschungsansätze von anderen Gruppen bekannt. Somit konnte kaum auf speziellen Vorarbeiten aufgebaut werden. Im Laufe der Bearbeitung begannen auch andere Forschergruppen^[8,9] sich mit diesem Thema zu beschäftigen. Das unterstreicht die Bedeutung des Themas und zeigt das zunehmende Interesse an dieser Technologie.

1.2 Aufbau der Arbeit

Im Anschluss an diese Einführung in das Themengebiet wird im nachfolgenden Kapitel auf den Stand der Technik eingegangen. Aufgrund des hohen Maßes an Interdisziplinarität dieser Arbeit ist die Themenauswahl breit gefächert. Neben einer kurzen Einführung in die Grundlagen der automatischen Identifikation und Möglichkeiten zur Herstellung von Smart Objects, werden die Technologien der gedruckten Elektronik sowie Folienhinterspritztechnologien näher beleuchtet. Erste bereits existierende Ansätze zur Funktionsintegration in Kunststoffbauteile werden vorgestellt.

An die Darstellung der theoretischen Grundlagen und bereits vorhandenen Vorarbeiten schließt sich ein Kapitel zu den verwendeten Materialien und deren Verarbeitung an. Neben einer kurzen Beschreibung der wichtigsten Materialien wird auf die Drucklayouts eingegangen sowie die Durchführung von Druck-, Hinterspritz- und Verformversuchen beschrieben.

Im nachfolgenden Kapitel werden die genutzten Analyse- und Charakterisierungsmethoden erläutert. Dies umfasst sowohl die Charakterisierung von einzelnen Materialien, Zwischenprodukten als auch der hinterspritzten Komponenten.

Im Kapitel Ergebnisse und Diskussion werden zunächst die Eigenschaften der verwendeten Bedruckstoffe und Druckstoffe zusammengefasst. Anschließend wird auf die elektrischen Eigenschaften der gedruckten Komponenten vor und nach dem Hinterspritzen eingegangen. Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen von Umwelteinflüssen sowie der Haftfestigkeitsuntersuchungen folgen. Als Beispiel für ein mehrschichtiges Bauelement werden danach die Ergebnisse der Entwicklung und des Hinterspritzens von Elektrolumineszenzleuchten (EL-Leuchten) dargestellt. Ein Ausblick zu potentiellen weiterführenden Arbeiten schließt dieses Kapitel ab.

Eine Zusammenfassung rundet die vorliegende Arbeit ab.

2 Stand der Technik

2.1 Automatische Identifikation

2.1.1 Begriffe und Grundlagen

Das übergeordnete Ziel, welches mit Hilfe von „Smart Objects“ erreicht werden soll, ist die intensivere Verknüpfung zwischen Material- und Informationsflüssen. Pflaum^[10] definiert diese Zielsetzung wie folgt:

„Die vollständige Verknüpfung zwischen realer und virtueller Welt ist dann gegeben, wenn sämtliche Objekte eindeutig identifiziert werden können, der Zustand des einzelnen Objekts dem IT-System jederzeit bekannt, die Position des Objekts ebenfalls aktuell in den Daten hinterlegt ist, ein Objekt jederzeit in der Lage ist, mit der Umgebung zu kommunizieren bzw. bei fehlender Verbindung autonom und zielorientiert zu agieren.“

Die zunehmende Durchsetzung der Welt mit allgegenwärtigen Computersystemen wird dabei nach Ferscha^[11] in verschiedenen Stufen erfolgen:

1. die Vernetzung der Dinge („connectedness“),
2. das gegenseitige Einander-Bewusstmachen („awareness“) und
3. das unaufdringliche, intelligente Handeln („smartness“).

Die technologische Realisierung der Vernetzung der Dinge auf der Basis drahtloser Kommunikationstechnologien ist bereits weit fortgeschritten. Dagegen stellt das automatische gegenseitige Einander-Bewusstmachen von vernetzten Objekten und das darauf aufbauende Handeln noch eine Herausforderung dar. Die Verbindung von physischer und digitaler Welt erfordert Kontextbewusstsein, d. h. Objekte müssen in der Lage sein ihre Umgebung wahrzunehmen^[12]. Dies umfasst

die technische Umgebung mit verfügbaren Netzwerken und Geräten in Reichweite,

die physische Umgebung, die durch Parameter wie z. B. Temperatur oder Beleuchtung charakterisiert sein kann sowie

das menschliche Verhalten, z. B. durch die Identifizierung von Personen.

Die Grundlage für das Einander-Bewusstmachen bilden sogenannte automatische Identifikationstechnologien (Auto-ID-Technologien), die nachfolgend kurz betrachtet und im Abschnitt 2.1.5 tabellarisch gegenübergestellt werden.

Unter „Identifizieren“ versteht man das eindeutige, zweifelsfreie Erkennen eines Objektes. In DIN 6763 ist der Begriff Identifikation als „... das eindeutige und unverwechselbare Er-

kennen eines Gegenstandes anhand von Merkmalen (Identifizierungsmerkmalen) mit der für den jeweiligen Zweck festgelegten Genauigkeit“ definiert^[13]. Automatische Identifikation (Auto-ID) ist ein Oberbegriff für Verfahren zur automatischen Identifizierung von Personen, Tieren und Objekten^[14]. Im Zusammenhang mit Auto-ID-Systemen werden folgende Begriffe verwendet^[15]:

Natürliche Identifikationsmerkmale sind Eigenschaften eines Objektes, z. B. der Fingerabdruck oder die Maserung von Holz, anhand deren es identifiziert werden kann.

Identifikatoren (IDs) sind eindeutige Nummern bzw. Namen, die künstlich geschaffen und vergeben werden und die eindeutige Identifizierung von Objekten innerhalb eines Aktionsraumes ermöglichen, z. B. die Personalausweisnummer.

Ein Zeichen ist ein Element aus einer zur Darstellung von Informationen vereinbarten endlichen Menge von Objekten (Zeichenvorrat). Binärzeichen sind Zeichen mit einem Zeichenvorrat von zwei Zeichen.

Codierung bezeichnet die Umwandlung von einem Zeichenvorrat in einen anderen bzw. die eindeutige Zuordnung der Zeichen einer Urmenge zu den Zeichen einer Bildmenge.

Ein Code ist der bei der Zuordnung (Codierung) verwendete Zeichenvorrat der Bildmenge einschließlich der Abbildungsvorschrift von Urmenge auf Bildmenge.

Ein Daten- bzw. Informationsträger enthält den Code und wird am zu identifizierenden Objekt angebracht.

Je nach Anwendung werden verschiedene Anforderungen an die eingesetzte Identifikationstechnologie gestellt. Kriterien sind z. B. die Lesesicherheit, die Lesegeschwindigkeit, die Anzahl möglicher Identifikatoren, der Platzbedarf des Identifikators, der Leseabstand und die Kosteneffizienz der Kennzeichnung. Folgende Technologien kommen häufig zur automatischen Identifikation zum Einsatz:

- optische Codes,
- optische Zeichenerkennung (OCR),
- Magnetstreifen,
- Chipkarten,
- RFID und
- biometrische Verfahren.

OCR, auch unter dem Begriff Klarschrifterkennung bekannt, und die Magnetstreifen-Technologie kommen vorrangig im Bankwesen und bei der Erkennung von Dokumenten zum Einsatz. Biometrische Verfahren dienen zur Identifikation von Personen. Darüber hinaus werden kamerabasierte Systeme in Verbindung mit Verfahren der Objekterkennung zur Identifikation genutzt.

Die in der vorliegenden Arbeit vorgestellte kapazitive Identifikation zielt ebenso wie die Barcode- sowie die RFID-Technologie auf die Kennzeichnung von Gegenständen. Aus diesem Grund werden diese beiden etablierten Technologien im Folgenden kurz vorgestellt um eine Einordnung und Bewertung der kapazitiven Identifikation zu ermöglichen.

2.1.2 Optische Codes

Barcodes

Barcodes, im Deutschen auch als Strich- oder Balkencodes bekannt, sind Binärcodes und bestehen aus Balken unterschiedlicher Breite, die durch ebenso unterschiedlich breite Zwischenräume voneinander getrennt sind. Strichcodes sind von einer Ruhezone umgeben, beginnen mit einem Start- und enden mit einem Stoppsymbol (Abbildung 2.1). Es existiert eine Vielzahl unterschiedlicher Codes^[15], z. B.

- Code 2 aus 5 und der darauf aufbauende Code 2/5 interleaved,
- Code PZN (Pharma Zentral Nummer),
- EAN 13 (Europäische Artikel Nummer),
- EAN 8,
- Code 39 und
- Code 128.

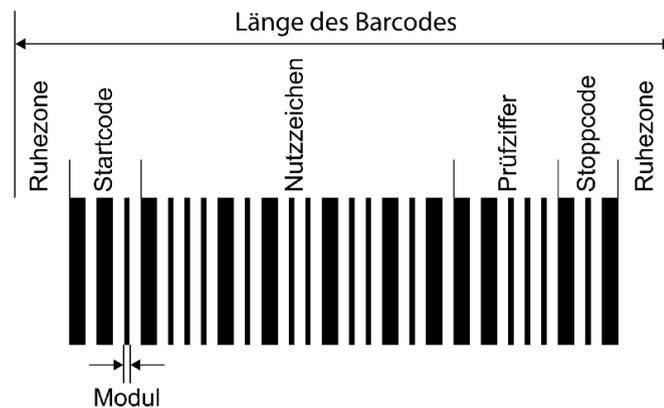


Abbildung 2.1: Allgemeiner Aufbau von Strichcodes^[15]

Die Codes unterscheiden sich hinsichtlich des darstellbaren Zeichenvorrats (Ziffern, alphanumerische Zeichen), der Fehlertoleranz, der Informationsdichte, der Länge des Codes und des Verfahrens zur Bildung einer Prüfziffer.

2D-Barcodes

Aufbauend auf den einfachen Barcodes wurden sogenannte 2D-Barcodes entwickelt, die eine zweite Achse zur Darstellung von Informationen nutzen. Es wird zwischen gestapelten Barcodes, z. B. Code 49, Codablock und PDF417^[15], und Matrixcodes, die aus vielen einzelnen, rasterförmig angeordneten Punkten oder kleinen Quadraten bestehen, unterschieden. Beispiele für Matrixcodes sind

- Aztec-Code,

- QR-Code (Quick Response Code),
- MaxiCode,
- Data Matrix Code,
- Dot Code und
- BeeTagg.

Aufgrund der höheren Informationsdichte von 2D-Barcodes kann je nach Anwendungsfall von der Hinterlegung einer Referenz zu einer Information, z. B. einer eindeutigen Nummer, dazu übergegangen werden, die eigentliche Information direkt zu speichern. Darüber hinaus können Matrixcodes mit einem Mechanismus zur Fehlererkennung und -korrektur ausgestattet werden. Diese Möglichkeit geht deutlich über die Fehlererkennung mittels Prüfziffer im eindimensionalen Barcode hinaus. Ein populäres Verfahren ist der Reed-Solomon-Algorithmus^[16]. Durch dessen Anwendung enthält der Code Redundanzen, die eine Rekonstruktion beschädigter Daten ermöglichen. Im QR-Code ist eine Rekonstruktion von 7% bis zu 30% beschädigter Daten möglich. In Data Matrix Codes ermöglicht die Fehlerkorrektur eine fehlerfreie Lesung des Codes bei Beschädigungen bis zu 25%^[15].

Matrixcodes werden z. B. auf Tickets, Dokumenten, als Brief- oder Paketmarke eingesetzt oder auch um einen Link auf eine bestimmte Website zu hinterlegen. Letzteres ist unter dem Begriff Mobile Tagging bekannt und gewinnt mehr und mehr an Bedeutung um klassische gedruckte Medien mit elektronischen Medien zu verknüpfen. Nutzer haben die Möglichkeit sich einen Reader, eine spezielle Software, auf dem Mobiltelefon zu installieren. Nach dem Anvisieren des Codes mit der integrierten Kamera wird dieser entschlüsselt und der Nutzer z. B. auf eine hinterlegte Website weitergeleitet.

Weitere Entwicklungen im Bereich der optischen Codes

Mit dem Ziel der Erhöhung der Speicherdichte werden die optischen Codes stetig weiterentwickelt. Die Verkleinerung der Strukturen als naheliegende Möglichkeit ist vor allem durch die Auflösung der optischen Lesesysteme begrenzt. Um sichere Leseergebnisse zu erzielen, wird ein Verhältnis von mindestens 5 x 5 Pixel pro Matrixzelle empfohlen^[17].

Aufbauend auf den 2D-Barcodes wurden sogenannte Farbcodes entwickelt, die als zusätzliches Kriterium die Farbe der einzelnen Matrixzellen zur Speicherung von Informationen nutzen^[18]. Diese werden auch als 3D-Codes bezeichnet^[19]. Ein Beispiel ist der Microsoft Tag, der die HCCB-Technologie (high capacity color barcode) nutzt. Die Matrixzellen sind in diesem Fall kleine, gleichseitige Dreiecke in einer der vier Prozessfarben schwarz, cyan, magenta oder gelb^[20].

Auf den Farbcodes aufbauend entwickelten Forscher der Bauhaus-Universität Weimar sog. 4D-Barcodes, die die vier Dimensionen Höhe, Breite, Farbe und Zeit zur Codierung von Informationen nutzen. Mehrere Farbcodes werden in bestimmten zeitlichen Abständen nacheinander eingeblendet. Die Anwendung dieser Codes ist jedoch auf elektronische Ausgabemedien beschränkt.^[21]

Eine Alternative zu den aufgeführten Barcodes stellt die Informationscodierung mittels Microglyph Code dar. Der Code basiert auf dem vom Palo Alto Research Center (PARC), dem Forschungszentrum von Xerox, entwickelten Dataglyph Code und weist die gleichen Codestrukturen – um 45° geneigte Linien – auf. Jede einzelne Linie repräsentiert entsprechend ihrer Richtung ein Bit. Je nach gewählter Redundanz kann eine hohe Fehlertoleranz gewährleistet werden. Auf einer Fläche von 1 cm² können ca. 400 Byte gespeichert werden. Die Codes können für Verpackungsanwendungen unauffällig in das Design integriert werden.^[22]

Die unauffällige Integration eines optischen Codes in Druckprodukte oder Verpackungen ermöglicht auch der sogenannte SnapTag der Firma SpyderLink (USA). Der SnapTag besteht aus einem beliebig wählbaren Logo, welches von einem Ring mit drei Unterbrechungen eingerahmt wird. Ähnlich wie beim Barcode benötigt der SnapTag eine Ruhezone um diesen Ring. Der Nutzer fotografiert diesen Tag mit Hilfe der Kamera eines Mobiltelefons und sendet das Bild per Multimedienachricht oder E-Mail an eine spezielle Kurzwahl oder E-Mail-Adresse und erhält daraufhin die dem Code zugeordneten Informationen zurück. Der SnapTag wird vor allem im Bereich Marketing eingesetzt.^[23]

2.1.3 RFID

RFID ist eine Technologie zur berührungslosen Erfassung und Übertragung binär codierter Daten unter Verwendung magnetischer oder elektromagnetischer Felder. Die beiden Grundbestandteile eines RFID-Systems sind^[14]

- der Transponder, der den eigentlichen Datenträger darstellt und an das zu identifizierende Objekt angebracht wird, und
- das Erfassungs- bzw. Lesegerät, das je nach Ausführung und Technologie als Lese- oder Lese-/Schreib-Einheit eingesetzt wird.

Der Transponder besteht aus einem Koppellement – der Antenne – und einem elektronischen Mikrochip. Das Erfassungsgerät besitzt ebenfalls ein Koppellement sowie eine Kontrolleinheit und ein Hochfrequenzmodul (Sender und Empfänger). Der Transponder wird aktiviert, sobald er sich im Ansprechbereich eines Lesegerätes befindet^[14].

Es existiert eine Vielzahl an unterschiedlichen RFID-Systemen. Unterscheidungsmerkmale sind z. B.^[14]

- die Betriebsart:
 - Vollduplexverfahren,
 - Halbduplexverfahren oder
 - sequentielles Verfahren,
- die Speicherkapazität:
 - 1-bit-Transponder (zur Diebstahlsicherung) oder
 - wenige Bytes bis zu mehreren KBytes,

- die Programmierbarkeit.
 - einmal beschreibbare Systeme oder
 - wiederbeschreibbare Systeme,
- die Energieversorgung:
 - passive Transponder oder
 - aktive Transponder (mit Batterie),
- der Frequenzbereich (bestimmt die Reichweite des Systems):
 - LF (Low Frequency): 125 kHz,
 - HF (High Frequency): 13,56 MHz,
 - UHF (Ultra High Frequency): 868 MHz oder
 - Mikrowelle: 2,45 GHz,
- und die Datenübertragung vom Transponder zum Lesegerät:
 - Reflexion (Frequenzverhältnis 1:1),
 - Anwendung von Subharmonischen (1/n-fache Frequenz) oder
 - Oberwellen (n-fache Frequenz).

2.1.4 Kapazitive Informationsträger

Auch wenn kapazitive Informationsträger im Vergleich zu Barcodes und RFID vergleichsweise selten im Einsatz sind, ist das Prinzip der kapazitiven Speicherstrukturen nicht neu. Im Jahr 1973 wurde in den USA ein Patent veröffentlicht, in dem die grundsätzliche Funktionalität solcher Speicherstrukturen dargestellt ist^[24]. Abbildung 2.2 a) zeigt den grundsätzlichen Aufbau eines solchen Datenträgers. Im Folgenden wird kurz die Bedeutung der Bezugszeichen erläutert:

- 10 ... flexible Leiterplatte,
- 11, 12 ... opaker Kunststoff,
- 13 ... kleine, elektrisch leitfähige Bereiche,
- 14 ... Leiterzug, der entsprechend den zu kodierenden Daten 13 mit 15 verbindet,
- 15 ... großer zentraler leitfähiger Bereich und
- 13', 14' ... Bereich zur Kontrolle der korrekten Ausrichtung (immer verbunden).

Der Informationsträger besteht aus einer flexiblen Leiterplatte mit einer strukturierten Schicht eines elektrisch leitfähigen Materials. Die flexible Leiterplatte ist zwischen zwei Kunststofflagen eingebettet. Über die kleinen leitfähigen Bereiche wird ein periodisches Signal kapazitiv eingekoppelt und über den großen zentralen Bereich detektiert. Die Hinterlegung von Informationen erfolgt durch das ausgewählte Unterbrechen einzelner Leiterzüge

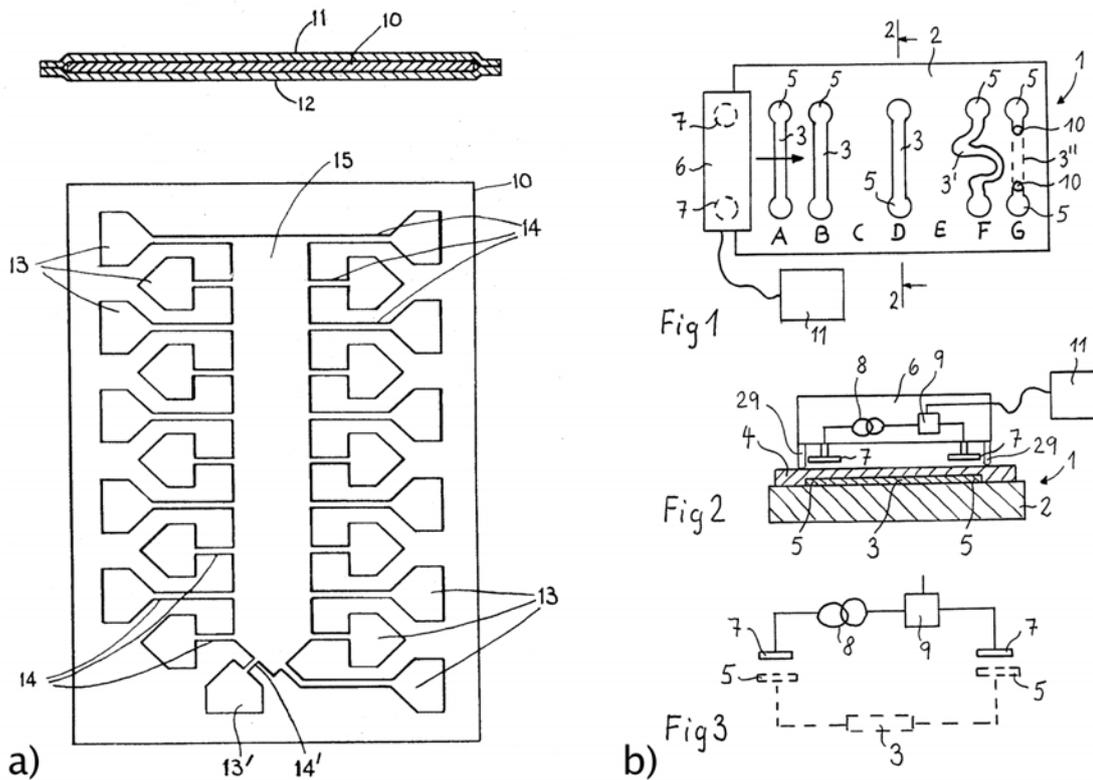


Abbildung 2.2: a) Aufbau eines kapazitiven Datenträgers^[24]; b) Elektrische Kodelesevorrichtung für kapazitive Informationsträger^[25]

(14), z. B. durch Abkratzen des elektrisch leitfähigen Materials oder Löcher der flexiblen Leiterplatte. Entsprechend wird an diesen Bereichen kein Signal detektiert. Der mit (13') gekennzeichnete Bereich ist immer durch den Leiterzug (14') verbunden um die korrekte Ausrichtung des Informationsträgers im Lesegerät zu kontrollieren.

In einem weiteren Patent aus dem Jahre 1989 ist eine entsprechende elektrische Kodelesevorrichtung beschrieben, mit deren Hilfe kapazitive Informationsträger ausgelesen werden können^[25]. Abbildung 2.2 b) zeigt den prinzipiellen Aufbau. Das Funktionsprinzip basiert auf einer relativen Bewegung zwischen Leseeinrichtung und Informationsträger. Es werden darüber hinaus verschiedene geometrische Kodeanordnungen beschrieben.

Die Bezugszeichen haben folgende Bedeutung:

- 1 ... Karte,
- 2 ... Substratplatte (elektrisch nicht leitfähig),
- 3 ... Verbindungsleiterzüge, 3' ... gewundener Leiterzug, 3'' ... Leiterzug auf der Rückseite der Karte,
- 4 ... Abdeckung (elektrisch nicht leitfähig, opak),
- 5 ... Koppelstellen,

- 6 ... bewegliche Lesevorrichtung,
- 7 ... Elektroden,
- 8 ... Wechselspannungs-Generator,
- 9 ... Detektor,
- 10 ... Durchkontaktierung,
- 11 ... Auswerteinrichtung und
- 29 ... Abstandseinrichtung in Form von Gleitfüßen.

Mit der gleichen Priorität wurde von diesem Anmelder die Erfindung „Kodiervorrichtung zum nachträglichen Kodieren elektrisch leitender Kodeanordnungen“ eingereicht^[26]. Gegenstand dieser Erfindung ist das nachträgliche Trennen der Verbindungsleiterzüge (3) durch Entfernen von Flächenteilen, z. B. mittels Laser. Somit können vorgefertigte Informationsträger nachträglich kodiert werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden kapazitiv auslesbare Informationsträger mit Hilfe von elektrisch leitfähigen Druckfarben hergestellt und anschließend hinterspritzt. Speziell kapazitiv auslesbare Speicherstrukturen sind dafür sehr gut geeignet, da kein galvanischer Kontakt zum Auslesen erforderlich ist. Diese Idee wurde von der Autorin im Jahr 2008 veröffentlicht^[27].

2.1.5 Vergleich von automatischen Identifikationstechnologien

In Tabelle 2.1 sind verschiedene Auto-ID-Technologien anhand einer Reihe von Kriterien gegenübergestellt. Abbildung 2.3 zeigt die Kosten für die jeweilige Kennzeichnung in Abhängigkeit der Speicherkapazität.

2.1.6 Weitere Funktionen

Neben der automatischen Identifikation können weitere Funktionen in Smart Objects integriert werden. Dazu gehören das Sammeln, Speichern, Verarbeiten und Kommunizieren von Daten (Abbildung 2.4)^[2]. Systeme zur Erfassung, Protokollierung, Überwachung, Regelung oder Verarbeitung von Messwerten werden häufig auch als autarke Mikrosysteme bezeichnet^[33], wobei in diesem Fall die Integration in Alltagsgegenstände eine untergeordnete Rolle spielt.

Smart Objects können Elemente zur Datenverarbeitung (Prozessoren), Datenspeicherung sowie zur Energieversorgung (-gewinnung und -speicherung) enthalten. Sensoren ermöglichen die Erfassung von Messwerten und Parametern aus der Umgebung, z. B. Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Beschleunigung, Vibration, Druck, Geräusche oder Ortsangaben^[34]. Aktoren dienen als Ausgabesystem zur Interaktion des Mikrosystems mit der Umwelt, z. B. in Form von Anzeigen, Lautsprechern oder Motoren. Schließlich spielen Kommunikationstechniken eine wichtige Rolle. Besonders drahtlose Kommunikationstechnologien, z. B. Bluetooth, GSM, RFID, WLAN oder Infrarotschnittstellen, sind für Smart Objects von Bedeutung^[33].

Tabelle 2.1: Vergleich von Auto-ID-Technologien

Kriterium	Strichcode	2D-Barcode	RFID	Magnetstreifen	Chipkarte	OCR
Schnittstelle	optisch	optisch	elektromagnetisch oder induktiv	magnetisch	ohmscher Kontakt	optisch
Handhabung	Scannen (Sichtkontakt)	Scannen (Sichtkontakt)	In Reichweite des Lesegerätes bringen	Durchziehen	Einstecken	Scannen (Sichtkontakt)
Leseabstand	0 m to 0,5 m	0 m to 0,5 m	0 m to 2 m (passiv), < 20 m (aktiv) ^[28]	0 mm	0 mm	< 1 cm
Beschreibbarkeit	nein	nein	teilweise	ja	ja	nein
Speicherkapazität	EAN13: ca. 5 Byte	100 bit bis 3 kByte ^[15]	1 bit bis 64 kByte ^[14]	ca. 1000 bit ^[29]	16 Byte bis 64 kByte ^[14]	< 100 Byte ^[28]
Lesbarkeit durch Personen	möglich	nicht möglich	nicht möglich	nicht möglich	nicht möglich	möglich
Einfluss von Schmutz auf Lesbarkeit	sehr stark	stark	kein Einfluss	stark	möglich	stark
Fälschungssicherheit	gering	gering	mittel bis hoch	mittel	mittel bis hoch	gering

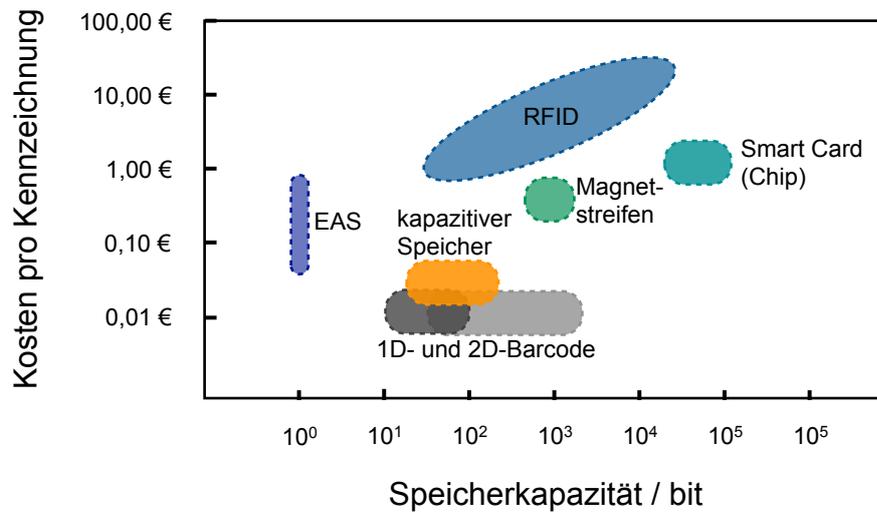


Abbildung 2.3: Kennzeichnungskosten für verschiedene Auto-ID-Technologien (eigene Darstellung, basierend auf Daten aus^[14,15,28-32])

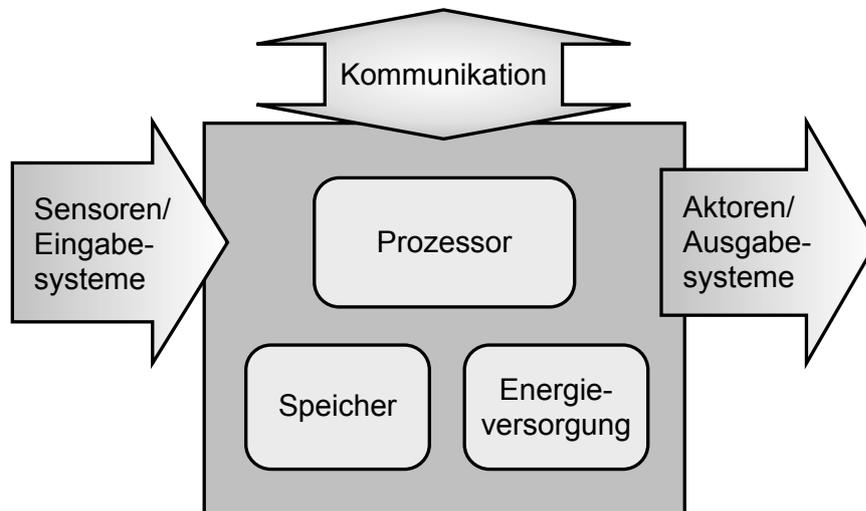


Abbildung 2.4: Funktionen von Smart Objects

Bereits am Markt erhältlich sind RFID-Transponder mit integrierten Sensoren. Besonders integrierte Temperatur-Sensoren zur Rückverfolgungen von Produkten in einer Lieferkette kommen beispielsweise beim Transport von Blutkonserven und in der Lebensmittelindustrie zum Einsatz^[35]. Bei RFID-Sensoren handelt es sich in jedem Fall um aktive Transponder, d. h. die Tags verfügen über eine integrierte Energieversorgung. Die Sensorikdaten werden zusammen mit einem Zeitstempel dezentral in einem EEPROM (Electrically Erasable Programmable Read Only Memory) auf dem RFID-Tag abgelegt und können mittels Lesegerät ausgelesen werden.

2.2 Technologien zur Herstellung von Smart Objects im Überblick

2.2.1 Konventionelle Kennzeichnungsmethoden

Die geeignete Markierungstechnologie muss je nach konkretem Anwendungsfall individuell ausgewählt werden. Im Folgenden sind einige Kriterien zur Bewertung der Verfahren aufgeführt:

- Material/Oberfläche des zu kennzeichnenden Objektes,
- Beständigkeit der Kennzeichnung entsprechend der gegebenen Einsatzbedingungen (klimatische Beeinflussung, mechanische Belastung, chemische Beständigkeit, Verschmutzung),
- Integration des Kennzeichnungsprozesses in bestehende Fertigungs- und IT-Prozesse,
- Platzbedarf der Kennzeichnung,
- Möglichkeit zur Kennzeichnung gekrümmter oder schwer zugänglicher Oberflächen,
- Kosten und Prozessstabilität der Kennzeichnung,
- Periodenkapazität (Anzahl der gekennzeichneten Objekte pro Zeiteinheit),
- Lesbarkeit der Kennzeichnung während des gesamten Produktlebenszyklus (bei optischer Kennzeichnung z. B. Kontrast, optische Dichte, Randschärfe, Auflösung) und
- Fälschungssicherheit.

Das Anbringen von Codes an das zu markierende Objekt kann direkt oder indirekt geschehen. Bei der indirekten Kennzeichnung wird mit einem zusätzlichen Trägermaterial, dem Etikett oder Label, gearbeitet. Die Etiketten werden zunächst unter kontrollierbaren Bedingungen hergestellt, z. B. gedruckt oder zu einem RFID-Tag konvertiert, und anschließend auf das Objekt appliziert. Die Vorteile dieser Variante sind minimale Beeinflussung der Werkstoffeigenschaften des Objektes, die einfache und kostengünstige Herstellung und Applizierung der Etiketten sowie die gute Lesbarkeit bei optischen Codes durch hohe erzielbare Kontraste auf einem definierten Substrat. Nachteile der indirekten Kennzeichnung sind die relativ hohen Kosten der Kennzeichnung sowie die prinzipielle Ablösbarkeit von Etiketten^[17]. Häufig lassen sich die Etiketten jedoch nur zerstörend ablösen und nicht auf ein anderes Bauteil übertragen. Damit ist eine gewisse Fälschungssicherheit gegeben.

Zur Produktkennzeichnung werden vorrangig Selbstklebeetiketten, auch Haftetiketten genannt, eingesetzt. Diese bestehen im Allgemeinen aus drei Schichten, dem Obermaterial, der Klebstoffschicht und dem silikonisierten Trägermaterial zum Schutz der Klebstoffschicht. Beim Etikettenspenden wird das Etikettenmaterial über eine Spendeleiste gezogen. Durch die höhere Steifigkeit des Obermaterials löst sich das Etikett vom Trägermaterial und wird auf das Produkt appliziert^[36].

Im Folgenden werden kurz häufig verwendete Verfahren zur Etikettenherstellung erläutert.

Der Thermotransferdruck ist ein digitales Druckverfahren, bei dem Farbe durch partielle Wärmeeinwirkung verflüssigt und von einem Farbband unter leichtem Druck auf das Etikettenmaterial übertragen wird. Der Thermokopf besteht aus einzelnen Heizelementen, die bildabhängig angesteuert werden können.

Die indirekte Lasermarkierung ist ein Verfahren zur Kennzeichnung von speziellen Etiketten, die im Folienverbund mit einer lasersensitiven Folienschicht ausgestattet sind. Der Laser wird entweder von der Oberflächenbeschichtung absorbiert, lässt sie verdampfen und legt ein Kontrastsubstrat frei oder verursacht durch Veränderungen in der Molekularstruktur des Materials einen lokalen Farbumschlag.

Der Tintenstrahldruck ist ein digitales Druckverfahren ohne physikalischen Bildträger, bei dem Tinte oder verflüssigter Wachs aus Düsen auf den Bedruckstoff gespritzt werden. Zur Herstellung von Etiketten kommt sowohl die Verfahrensvariante „Drop on Demand“ als auch der „Continuous Inkjet“ zum Einsatz.

Die Elektrofotografie ist ein digitales Druckverfahren, welches durch Belichtung eines lichtempfindlichen Fotoleiters ein latentes Ladungsbild erzeugt, welches anschließend mit Toner eingefärbt wird. Der Toner wird auf den Bedruckstoff übertragen und dort fixiert.

RFID-Transponder werden ebenfalls häufig in Form von Etiketten zur Verfügung gestellt und in diesem Fall als „Smart Label“ bezeichnet^[36]. Die Herstellung von RFID-Transpondern wird in Abschnitt 2.2.2 beschrieben.

Auch für die Direktmarkierung von Gegenständen aus Kunststoff existiert eine Vielzahl an Verfahren:

Der Tintenstrahldruck wird besonders in der Variante Continuous Inkjet auch zur direkten Produktkennzeichnung eingesetzt. Dabei wird ein kontinuierlicher, hochfrequenter Tropfenstrom erzeugt. Über eine Ladeelektrode werden die Tropfen bildabhängig elektrisch aufgeladen und anschließend im Feld eines Plattenkondensators entsprechend ihrer Ladung abgelenkt und entweder über eine Fangeinrichtung zurückgeführt oder auf dem Bedruckstoff platziert.

Die direkte Laserbeschriftung gewinnt mehr und mehr an Bedeutung. Die Markierung von Kunststoffen kann grundsätzlich durch Verfärben, Gravieren, Aufschäumen oder Abtragen erfolgen^[37]. Die am häufigsten verwendete Variante ist das Vektorverfahren, bei dem der Laserstrahl von beweglichen Spiegeln abgelenkt wird. Alternativen sind das Masken- und das Raster-Beschriften, welche z. B. in der Druckvorstufe eingesetzt werden^[38]. Prinzipiell ist die direkte Lasermarkierung ein preisgünstiges Verfahren, da es nahezu wartungsfrei ist und kein Verbrauchsmaterial erfordert.

Nadelprägen ist ein Verfahren, das auf einer rein mechanischen Umformung des Materials an der Oberfläche eines Objektes beruht. Eine oszillierende Prägenadel wird mit hoher Frequenz in die Werkstückoberfläche eingeschlagen und erzeugt kegelförmige Vertiefungen. Das Verfahren wird in den letzten Jahren besonders zur Applikation von Data-Matrix-Kodierungen eingesetzt.

2.2.2 Herstellung von RFID-Transpondern

RFID-Transponder bestehen aus einer Antenne und einem Mikrochip. Die Herstellung eines solchen Transponders kann somit in die Teilschritte Chipherstellung, Antennenherstellung, Montage des Chips auf der Antenne und die anschließende Konvertierung des sogenannten Inlays gegliedert werden.

Die Chipherstellung ist ein klassischer Prozess der Mikroelektronik und erfolgt auf Waferebene. Nach dem Funktionstest, bei dem nicht funktionsfähige Elemente markiert werden, und ggf. dem Programmieren wird der Wafer auf eine Trägerfolie geklebt und durch Sägen in Chips vereinzelt.

Antennen werden aus metallischen Werkstoffen (Kupfer, Silber oder Aluminium) durch Wickeln, Verlegen, Ätzen oder Drucken hergestellt^{[14] [39]}. Polyester, Polyimid und PVC (Polyvinylchlorid) sind typische Substratmaterialien.

Anschließend wird der Chip auf der Antenne montiert. Dies kann sowohl direkt als auch mit Hilfe eines Zwischenträgers (Strap, Interposer) erfolgen. Die wichtigste Technologie zur Applikation des Chips auf der Antenne ist die Flip-Chip-Technologie, bei der die elektrische und mechanische Verbindung je nach Variante durch Reflowlöten oder Kleben hergestellt wird. Dieser Prozess kann in einer Rolle-zu-Rolle-Konfiguration durchgeführt werden^[40].

Die so hergestellten Inlays werden anschließend laminiert und in die gewünschte Lieferform, z. B. Smart Card oder selbstklebendes Label, konvertiert.

Vollständig gedruckte RFID-Transponder

Ein häufig proklamiertes Ziel vieler Arbeitsgruppen ist der vollständig gedruckte RFID-Transponder. In den letzten Jahren wurden verschiedene gedruckte Einzelelemente präsentiert. Im Jahr 2010 wurde von Jung et al. ein vollständig gedruckter 1-bit RFID-Transponder realisiert^[41].

Zur Antennenherstellung wurden neben dem Siebdruckverfahren, welches aufgrund der erreichbaren Schichtdicken am weitesten verbreitet ist, auch der Tiefdruck^[42], der Flexodruck^[43], der Offsetdruck^[43] und das Inkjetverfahren^[44] getestet.

Der eigentliche elektronische Datenträger des RFID-Transponders umfasst das HF-Interface, die Adressierungs- und Auswertelogik sowie den Speicher (Abbildung 2.5). Das HF-Interface dient zur Energieversorgung des Transponders und der Kommunikation mit dem Lesegerät und stellt die Schnittstelle zwischen dem analogen Übertragungskanal und den digitalen Schaltungselementen des Transponders dar. Es umfasst Demodulator und

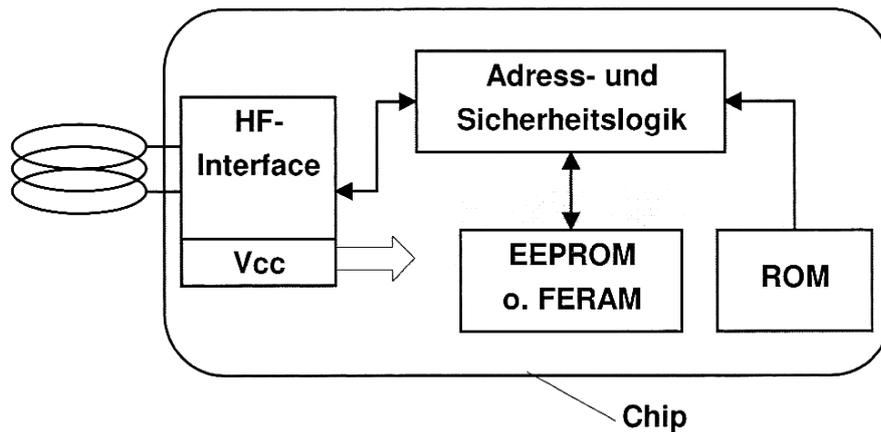


Abbildung 2.5: Blockschaltbild eines RFID-Datenträgers mit Speicherfunktion^[14]

Modulator für ein- und ausgehende Datenströme, eine Schaltung zur Gewinnung des Systemtaktes (Clock) und einen Gleichrichter zur Energieversorgung.

Die gesamte Energie zum Betrieb von passiven RFID-Transpondern wird über das Lesegerät zur Verfügung gestellt. Das hochfrequente elektromagnetische Wechselfeld vom Lesegerät induziert in der Antennenspule des Transponders eine Spannung, die anschließend gleichgerichtet wird. Gleichrichter sind aus Kondensatoren, Widerständen und Dioden aufgebaut. Gedruckte Widerstände und Kondensatoren^[45,46] sind Stand der Technik. Lilja et al. haben 2009 im Tiefdruck hergestellte Dioden gezeigt, die bis zu einer Frequenz von 10 MHz arbeiten und damit bereits nah an den geforderten 13,56 MHz für HF-Transponder liegen^[47]. Die Erzeugung des Systemtaktes kann durch einen Ringoszillator erfolgen. Vollständig gedruckte Ringoszillatoren sind jedoch hinsichtlich Frequenz und Versorgungsspannung aktuell nicht für den HF-Bereich geeignet^[48].

Die Adressierungs- und Auswertelogik basiert auf digitalen Schaltungen. Im Tiefdruck hergestellte logische Gatter wurden z. B. von Jung et al.^[49] vorgestellt. Myny et al. haben 2009 das Potential organischer Schaltungen für RFID-Anwendungen gezeigt und 64-bit sowie 128-bit Transponder präsentiert^[50]. Die größte Herausforderung zur drucktechnischen Herstellung solcher Schaltungen ist die Reproduzierbarkeit.

Zur drucktechnischen Realisierung von Speichermodulen existieren verschiedene Konzepte. Eine Möglichkeit ist die Verwendung ferroelektrischer Materialien. Das norwegische Unternehmen Thin Film Electronics setzt entsprechende Materialien in einer Passiv-Matrix-Anordnung ein. Sekitani et al. nutzen ferroelektrische Materialien als Gate-Dielektrikum in organischen Feldeffekttransistoren (OFET) und haben mittels Inkjet gedruckte Speicher präsentiert^[51]. Eine weitere Möglichkeit zur Herstellung nichtflüchtiger Speicher sind aufladbare Dielektrika, sog. Elektrete^[52]. Die Grundlagen der Herstellung solcher OFETs durch Druckprozesse und die mit der elektrostatischen Aufladung des Dielektrikums einhergehende Schwellspannungsverschiebung wurden am Institut für Print- und Medientechnik der TU Chemnitz untersucht^[53].

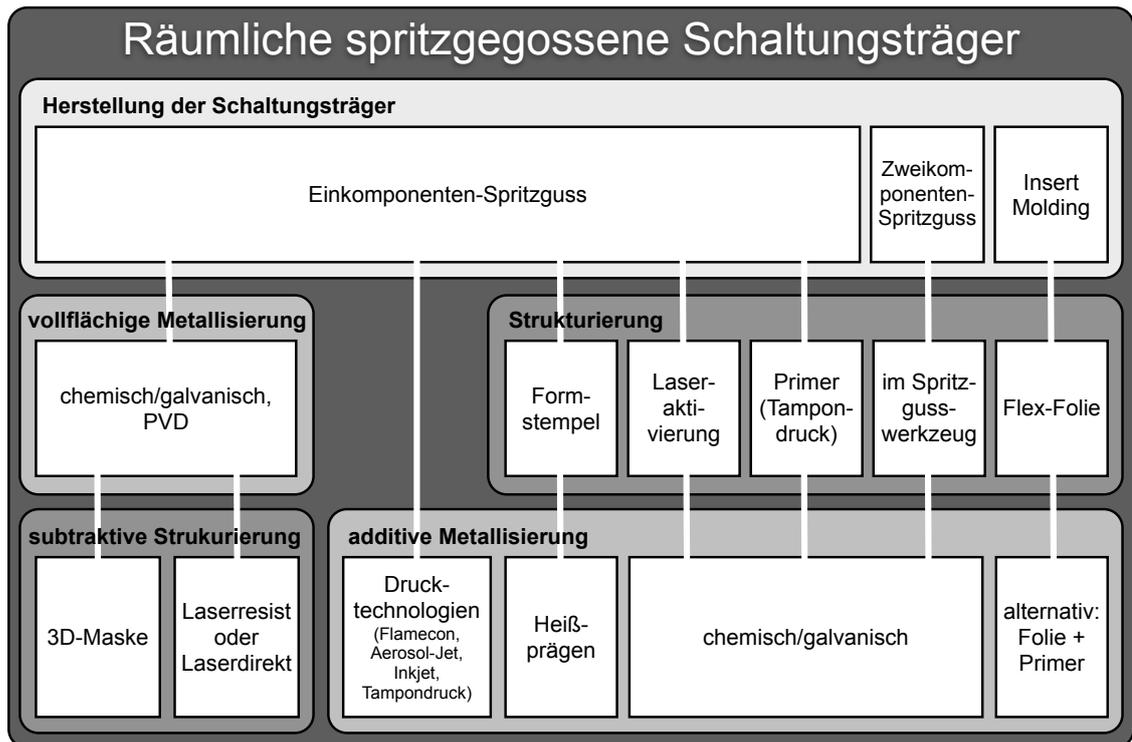


Abbildung 2.6: Übersicht über die Herstellungsverfahren für räumliche spritzgegossene Schaltungsträger (angepasst übernommen von der Forschungsvereinigung 3-D MID^[56])

2.2.3 Räumliche spritzgegossene Schaltungsträger

Als räumliche spritzgegossene Schaltungsträger (3D-MID), werden Formteile aus Kunststoff mit aufgebrachtener Leiterbildstruktur bezeichnet. Die MID-Technologie vereint die Bereiche Mechanik und Elektronik und ermöglicht somit die Herstellung funktionsintegrierter Bauteile. Anwendungsbereiche für MIDs liegen im industriellen Bereich, z. B. in der Automobilindustrie, Haushalts-, Multimedia- und Steuerungstechnik^[54]. Es stehen Anwendungen im Vordergrund, die mechanische Funktionen und vergleichbar einfache elektronische Schaltungen in einem Bauteil integrieren.

Die Herstellungsverfahren für MIDs sind sehr vielfältig^[54,55]. Abbildung 2.6 zeigt die Verfahren in einer Übersicht. Die wichtigsten Technologien sind zudem in Abbildung 2.7 grafisch dargestellt.

Im Einzelnen kommen folgende Verfahren zur Herstellung räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger zum Einsatz:

- Maskenbelichtungsverfahren,
- Laserstrukturierung,
- Heißprägen,

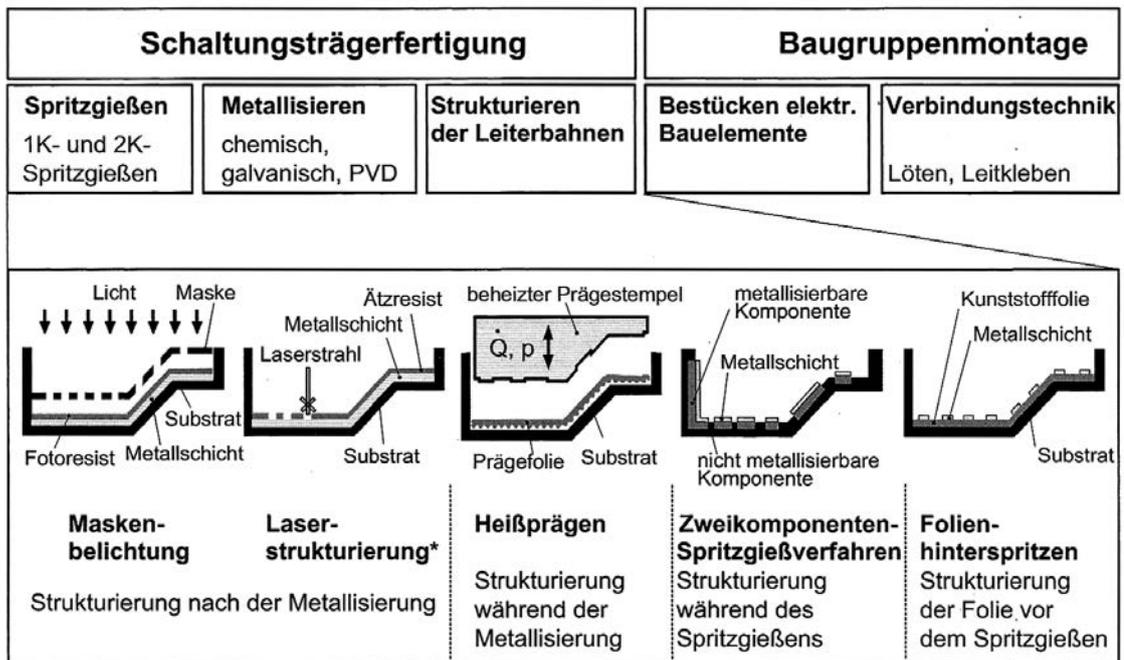


Abbildung 2.7: Verfahrensablauf der wichtigsten Herstellungsverfahren für räumliche spritzgegossene Schaltungsträger^[55]

- Zweikomponentenspritzguss,
- Flamecon-Verfahren,
- Laseraktivierung,
- Primer und
- Flex-Folien-Verfahren.

Die größte Bedeutung hat das Verfahren des Zweikomponentenspritzgießens, gefolgt vom Heißprägen und der Laserstrukturierung. Die Maskenstrukturierung sowie das Flex-Folien-Verfahren haben eine untergeordnete Bedeutung, die jedoch laut Prognosen in Zukunft zunehmen soll^[57]. Eine Beschreibung der einzelnen Verfahren findet sich u. a. im Buch "3D-MID Technologie. Räumliche elektronische Baugruppen"^[54]. Im Folgenden wird kurz auf das Flex-Folien-Verfahren eingegangen, da es dem in dieser Arbeit verwendeten Verfahren sehr nahe kommt.

Die Prozessschritte beim Flex-Folien-Verfahren, welches teilweise auch als Folienhinterspritzen bezeichnet wird, sind das Bedrucken (meist Siebdruck), Thermoformen, Hinterspritzen, Verkupfern und die Oberflächenveredlung. Die Flex-Folien-Technologie kann auch mit dem beschriebenen Primerverfahren kombiniert werden und umfasst dann folgende Prozessschritte: Siebdruck des Primers auf Folie, Folienverformung, Hinterspritzen und Metallisierung. Es existiert auch eine Variante, die auf der Übertragung des Leiterbildes von einer Trägerfolie auf das Werkstück basiert (vgl. Abschnitt 2.5.1).

2.3 Gedruckte Elektronik

Fertigungstechnologien von miniaturisierten, informationsverarbeitenden Systemen, die ihren Ursprung in der Mikroelektronik haben, sind für viele Anwendungen im „Internet der Dinge“ zu teuer. Die Ursachen dafür sind vielfältig. Zum einen sind die Kosten für die Installation und den Betrieb der speziellen Anlagentechnik sehr hoch, da die Fertigung in Reinräumen durchgeführt wird und häufig Vakuum-Prozesse zum Einsatz kommen. Zum anderen sind die eingesetzten Materialien, z. B. verschiedene Edelmetalle wie Gold oder Palladium, teuer und bezüglich ihrer Entsorgung problematisch. Zur preiswerten Herstellung großer Stückzahlen intelligenter Alltagsgegenstände sind neue Fertigungstechnologien und Prozessketten zu entwickeln.

Die Technologie der Gedruckten Elektronik hat das Potential, einen Beitrag zur effizienten Fertigung einfacher elektronischer Systeme zu leisten. Das Gebiet der Gedruckten Elektronik umfasst auf der Verfahrensseite verschiedene Druckverfahren, die ihren Ursprung in der grafischen Industrie haben. Materialeitig kommen u. a. leitende, halbleitende und isolierende Materialien zum Einsatz, die aus der flüssigen Phase heraus verarbeitet werden. Die Vorteile der Gedruckten Elektronik gegenüber klassischen Fertigungsverfahren in der Elektronik sind

- die Applikation der Funktionsschichten auf flexiblen Substraten, z. B. Folie und Papier, und die damit verbundene mechanische Flexibilität und der hohe Freiheitsgrad bezüglich der Form des Endproduktes,
- die Möglichkeit zur Realisierung großflächiger Elektronik,
- preisgünstige und effiziente Fertigungsmethoden und
- der Einsatz additiver Verfahren mit Vorteilen bezüglich der Umweltverträglichkeit und des Materialverbrauchs.

2.3.1 Materialien

Als Substratmaterialien kommen in der Gedruckten Elektronik eine Vielzahl von Kunststofffolien, z. B. Polyethylenterephthalat (PET) und Polyethylennaphthalat (PEN), oder auch Papier zum Einsatz. Die Bandbreite der verfügbaren Druckstoffe reicht von leitenden über halbleitende bis hin zu dielektrischen Materialien. Auch Stoffe mit elektrolumineszenten und photovoltaischen Eigenschaften sind verfügbar. Neben organischen Stoffen, vor allem Polymeren, werden häufig auch metallbasierte Druckstoffe oder Druckstoffe auf Basis von Nanopartikeln eingesetzt. Einen Überblick geben aktuelle Review-Artikel^[58,59]. In der vorliegenden Arbeit sind besonders das elektrisch leitfähige Polymer [Poly(3,4-ethylendioxythiophen) Poly(styrolsulfonat)] (PEDOT:PSS) sowie Materialsysteme für die Herstellung elektrolumineszenter Leuchten von Bedeutung und werden im Folgenden näher betrachtet.

PEDOT:PSS

Im Bereich der leitenden Polymere haben insbesondere das intrinsisch leitfähige Polymer PEDOT:PSS sowie Polyanilin (PANI) eine große Bedeutung. PEDOT:PSS (Abbildung 2.8) ist u. a. als wässrige Dispersion in verschiedenen Formulierungen kommerziell erhältlich, z. B. speziell abgestimmt auf die Druckverfahren Siebdruck oder Inkjetdruck. Das Material bildet bläulich-transparente Schichten. Je nach PSS-Anteil und enthaltenen Additiven variiert die elektrische Leitfähigkeit von PEDOT:PSS zwischen $1 \times 10^{-5} \text{ S/cm}$ und 1000 S/cm ^[60]. Die Anwendungsmöglichkeiten sind vielfältig und reichen von antistatischen Beschichtungen über den Einsatz als Elektrodenmaterial, beispielsweise in Kondensatoren oder Transistoren, bis hin zur Verwendung als Lochinjektionsschicht in OLEDs und transparente, leitfähige Schichten in Elektrolumineszenzleuchten. Das Material weist auch elektrochrome Eigenschaften auf: Redoxreaktionen gehen mit einer Farbänderung einher^[60].

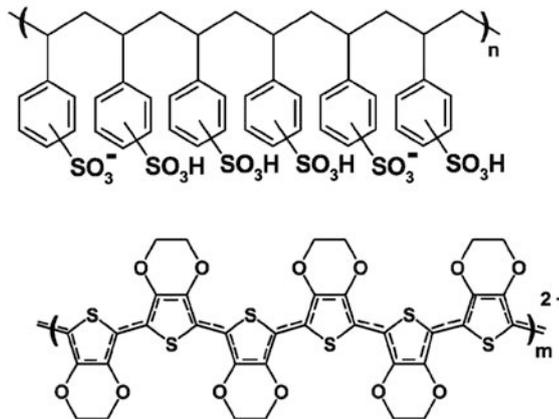


Abbildung 2.8: Strukturformel von PEDOT:PSS

Die Eigenschaften von PEDOT:PSS und deren Beeinflussung durch verschiedene äußere Einwirkungen wurden von zahlreichen Forschergruppen eingehend untersucht. Für die vorliegende Arbeit sind insbesondere die elektrischen Eigenschaften in Abhängigkeit von thermischen und mechanischen Einflüssen von Interesse. In den meisten Untersuchungen wird ein Zeitbereich von mehreren Minuten bis zu mehreren Stunden betrachtet^{[61][62]}. Es existieren kaum Daten zur kurzzeitigen Temperaturbelastung des Materials, wie sie beim Spritzgießen auftreten.

Prinzipiell gilt das Material als recht stabil. Wird PEDOT:PSS über 1000 h einer Temperatur von 100 °C an Luft ausgesetzt, kann nur eine minimale Abnahme der Leitfähigkeit beobachtet werden^[63]. Bei höheren Temperaturen nimmt die Leitfähigkeit jedoch merklich ab. Im Bereich bis ca. 140 °C führen höhere Trocknungstemperaturen zu höheren Leitfähigkeiten der PEDOT:PSS-Schichten. Bei höheren Trocknungstemperaturen beginnt jedoch die Leitfähigkeit wieder zu sinken^[64]. Zu ähnlichen Ergebnissen kommen Kiebooms et al.: ab 150 °C kann eine fortschreitende Degradation beobachtet werden. Im Bereich zwischen 390 °C und 450 °C zeigt das Material deutliche, nicht reversible strukturelle Änderungen^[65].

Der Einfluss von Feuchtigkeit ist bei Temperaturen über 100 °C besonders groß^[62]. Die Abnahme der elektrischen Leitfähigkeit von PEDOT:PSS wird vorrangig auf die Verringerung der Konzentration von Ladungsträgern durch die Reaktion mit OH-Gruppen zurückgeführt. Der Alterungsprozess wird durch die mit zunehmender Temperatur exponentiell wachsende Diffusionsgeschwindigkeit der OH-Gruppen beschleunigt^[66]. Ein weiterer Alterungsmechanismus basiert auf der mechanischen Zerstörung von PEDOT:PSS-Schichten aufgrund unterschiedlicher thermischer Ausdehnungskoeffizienten von Substratmaterial und Beschichtung^[66].

In Zugversuchen mit freitragenden PEDOT:PSS-Schichten wurden die Werkstoffkennwerte Elastizitätsmodul (E-Modul), Zugfestigkeit und die Querkontraktionszahl bestimmt. Diese Kennwerte werden stark von der Luftfeuchtigkeit beeinflusst: je geringer die Luftfeuchtigkeit, desto spröder das Material^[67].

Materialien zur Herstellung elektrolumineszenter Leuchten

Elektrolumineszenz bezeichnet die durch ein elektrisches Feld verursachte Emission elektromagnetischer Strahlung im sichtbaren Bereich des Spektrums. Es existieren zwei verschiedene physikalische Prinzipien der Elektrolumineszenz in Festkörpern^[68]:

- In lichtemittierenden Dioden basiert die Lichtemission auf der Injektion von Ladungsträgern beim Anlegen einer Gleichspannung an einem p-n-Übergang und der Rekombination der Ladungsträger unter Lichtemission. Diese werden im Folgenden nicht weiter betrachtet.
- In sogenannten Leuchtcondensatoren werden Elektronen durch ein starkes elektrisches Feld beschleunigt. Diese verursachen die Lichtemission durch Stoßanregung von Leuchtzentren.

Die Leuchtcondensatoren wiederum werden nach Aufbau und Ansteuerspannung in vier verschiedene Typen eingeteilt^[68]:

- AC Dünnschicht,
- AC Dickschicht,
- DC Dünnschicht und
- DC Dickschicht.

In Abbildung 2.9 sind die Vor- und Nachteile sowie die Einsatzbereiche der einzelnen Typen dargestellt. Die AC Dünnschicht-Leuchten werden üblicherweise auf Glas aufgebaut. Die ca. 1 µm dicke Leuchtstoffschicht befindet sich zwischen zwei isolierenden Schichten (ca. 0,3 µm to 0,5 µm) und einer Deckelektrode aus Aluminium sowie einer transparenten ITO-Elektrode (Indiumzinnoxid). AC Dickschicht-Leuchten können auf Glas oder flexibler Folie realisiert werden. Auf der transparenten ITO-Elektrode wird der Leuchtstoff mit einer Schichtdicke von bis zu 100 µm aufgetragen. Darauf befindet sich eine isolierende Schicht sowie eine Deckelektrode. DC Dünnschicht-Leuchten weisen folgenden Schichtaufbau auf: Glas, ITO, Leuchtstoff (ca. 1 µm), Elektronenbarriere-Schicht, Strombegrenzungsschicht

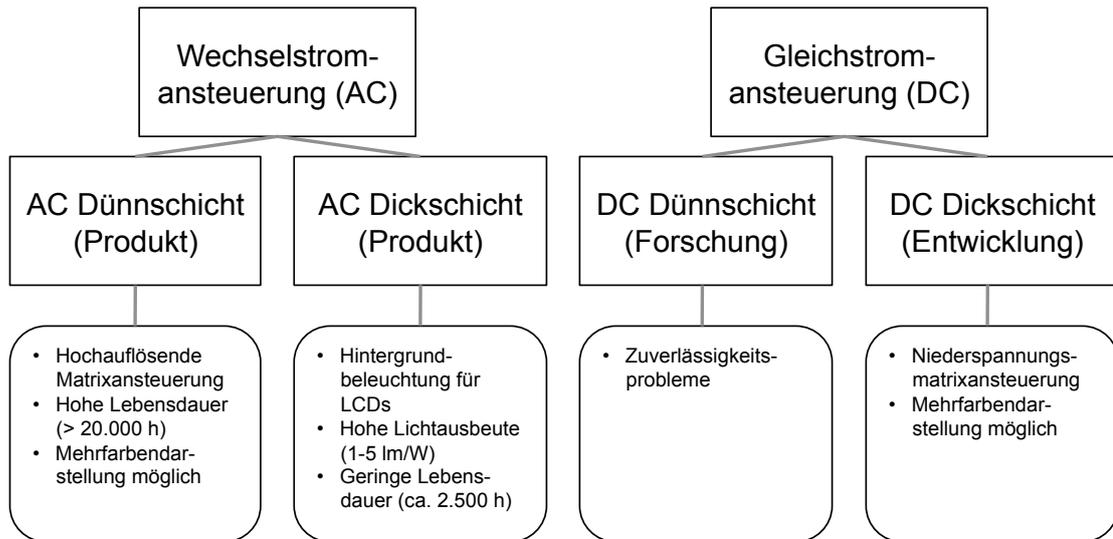


Abbildung 2.9: Varianten von Elektroluminenszenzleuchten (angepasst übernommen von Ono^[68])

und Deckelektrode (Aluminium). DC Dickschicht-Leuchten besitzen im Gegensatz zu AC Dickschicht-Leuchten keine Isolationsschicht.^[68]

Die Dickschicht-Leuchtkondensatoren, die mit Wechselspannung angesteuert werden, sogenannte EL-Leuchten, können mittels Siebdruck hergestellt werden und sind Gegenstand der Untersuchungen dieser Arbeit.

Typischerweise werden EL-Leuchten auf ITO-beschichteten Folien oder Gläsern aufgebaut^[68]. In neueren Veröffentlichungen wird ITO in Kombination mit einer dünnen PEDOT:PSS-Schicht^[69] als auch PEDOT:PSS als alleiniges Elektrodenmaterial^[60] verwendet. Auch EL-Leuchten auf Basis von Kohlenstoffnanoröhren CNT als transparente Elektrode wurden gezeigt^[70,71]. Neben leitfähigen Materialien zur Herstellung der Elektroden werden für elektrolumineszente Leuchten der eigentliche Leuchtstoff sowie ein Dielektrikum benötigt. Diese Materialien sind als Set von verschiedenen Herstellern erhältlich, z. B. von DuPont und Gwent Electronic Materials.

Als Leuchtstoff dient fast ausschließlich dotiertes Zinksulfid (ZnS). Durch das Einbringen von Leuchtzentren wird das Emissionsspektrum, d. h. die Emissionsfarbe, beeinflusst. Typische Materialien sind Kupfer (Cu), Chlor (Cl), Mangan (Mn) und Aluminium (Al)^[68]. Das ZnS-Pulver ist in einem geeigneten Dielektrikum, welches auch als Bindemittel dient, suspendiert.

Die Aufgabe des Isolators ist die Verhinderung von Kurzschlüssen zwischen den beiden Elektroden. Materialien mit einer hohen relativen Permittivität werden bevorzugt. Oft wird ein reflektierendes Material verwendet, welches die Lichtausbeute der Leuchten erhöht^[72]. Typisch sind Dielektrika auf der Basis von Bariumtitanat.

2.3.2 Verfahren

Inzwischen werden nahezu alle Druckverfahren, die aus der grafischen Industrie bekannt sind, auch in der Gedruckten Elektronik genutzt^[59], z. B. Tiefdruck^[42,47,64,73,74], Offsetdruck^[48,75,76], Flexodruck^[77-79], Inkjetdruck^[80,81] und Siebdruck^[82,83]. In der vorliegenden Arbeit wurden die Verfahren Tiefdruck, Flexodruck und Siebdruck eingesetzt. Alle drei Verfahren gehören zu den konventionellen Druckverfahren mit fester Druckform, d. h. Informationen werden vervielfältigt, indem der Druckstoff unter Verwendung eines Druckbildspeichers (Druckform) auf den Bedruckstoff aufgebracht wird. Die genannten Verfahren unterscheiden sich hinsichtlich der Druckform. Im Tiefdruck liegen die Bildstellen gegenüber den Nichtbildstellen vertieft (Abbildung 2.10 a). Dagegen gehört der Flexodruck zu den Hochdruckverfahren und zeichnet sich durch erhabene Bildstellen auf der flexiblen Druckform aus (Abbildung 2.10 b). Der Siebdruck ist ein Durchdruckverfahren, bei dem die Druckform aus einem Siebgewebe besteht, welches an den Nichtbildstellen durch eine Schablone abgedeckt ist (Abbildung 2.10 c).

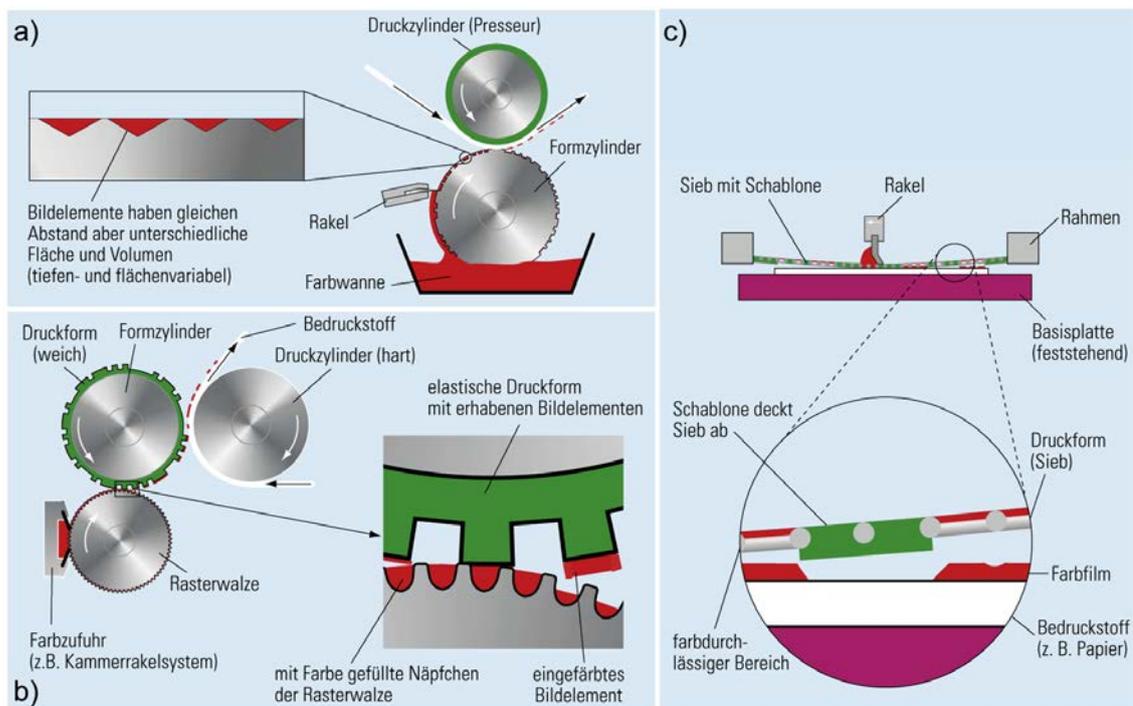


Abbildung 2.10: Schematische Darstellung verschiedener Druckverfahren^[84]: a) Tiefdruck; b) Flexodruck; c) Siebdruck

2.3.3 Bauelemente

Mit Hilfe der Technologie der Gedruckten Elektronik sind inzwischen unterschiedliche elektronische Bauelemente herstellbar. Die Bandbreite reicht von einfachen passiven Komponenten, z. B. Leiterzüge^[85], Induktivitäten^[86] oder Kapazitäten^[87,88], bis hin zu komplexeren Bauelementen, z. B. OFETs^[89,90], organischen Solarzellen (OPVCs)^[82,91] sowie

organischen Leuchtdioden (OLEDs)^[92] und Dickschicht-Leuchtkondensatoren^[93]. Aus gedruckten Bauelementen aufgebaute Schaltungen^[48] und Sensoren^[75,94] wurden ebenfalls präsentiert. Häufig wird der Begriff Gedruckte Elektronik auch für Bauelemente verwendet, bei denen nur ausgewählte Schichten mittels Druckverfahren hergestellt wurden.

2.4 Folienhinterspritzen

Spritzgießverfahren eignen sich prinzipiell dazu mehrere Komponenten in einem Arbeitsgang miteinander zu verbinden. Abbildung 2.11 zeigt die Verfahren zur Verbindung mehrerer Komponenten durch Spritzgießen in einer Übersicht. Auf dem Gebiet der Kunststoffverbindungstechnik existieren folgende grundlegende Möglichkeiten^[55]:

- mechanische Verbindungstechnik,
- Schweißen,
- Kleben,
- Fügen durch Urformen und
- Fügen durch Umformen.

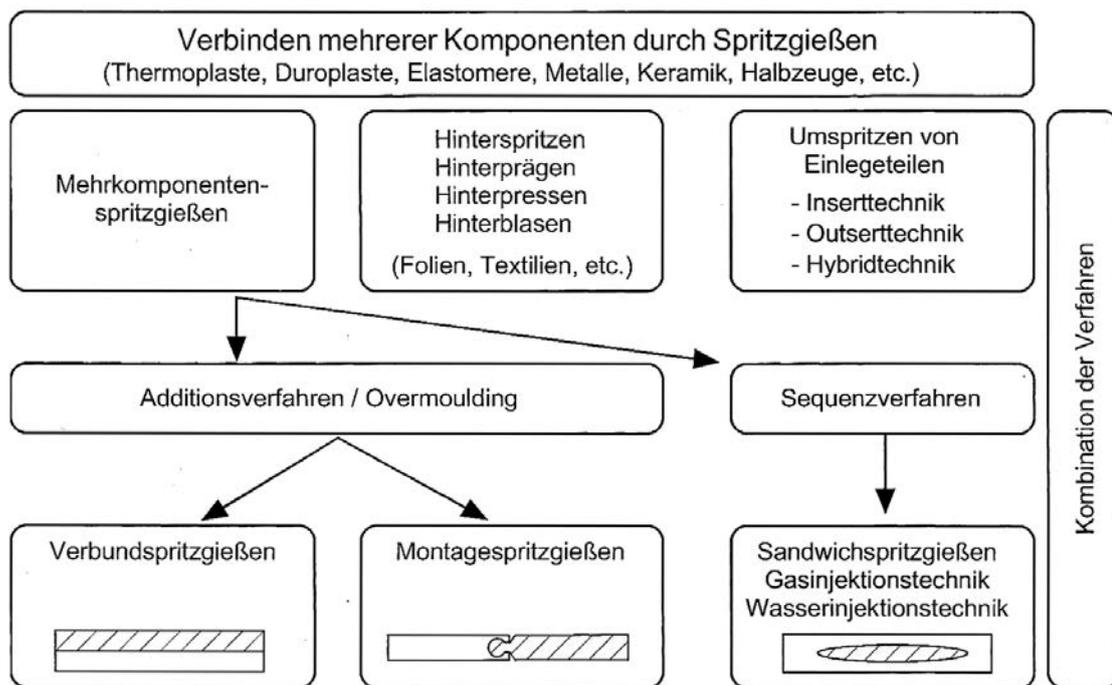


Abbildung 2.11: Einteilung der Verfahren zur Verbindung mehrerer Komponenten durch Spritzgießen^[55]

Die verschiedenen Spritzgießverfahren sind dem Fügen durch Urformen zugeordnet. Neben dem Umspritzen von Metall- und Kunststoffteilen (Insertertechnik) und dem Mehrkomponentenspritzguss bietet sich insbesondere die Hinterspritztechnik zur Gestaltung von

Oberflächen an^[95]. Dafür werden verschiedenartige Substrate in das Werkzeug eingelegt und mit der Kunststoffschmelze hinterspritzt. Neben bedruckten Folien werden z. B. auch Echtholzfuerniere, Textilien oder Aluminiumfolien hinterspritzt^[96]. Die Verwendung der Begriffe in diesem Gebiet ist nicht immer eindeutig. Die vorliegende Arbeit folgt den Konventionen, wie sie im Standardwerk „Handbuch Spritzgießen“ von F. Johannaber und W. Michaeli^[96] beschrieben sind.

Das Ziel von Hinterspritztechnologien ist im Wesentlichen die funktionale und dekorative Aufwertung der Oberfläche von Kunststoffteilen durch

- die Integration optischer oder haptischer Funktionen, Beschriftungen oder Symbolen,
- Dekoration,
- den Ersatz von Lacken oder
- die Verbesserung der mechanischen oder chemischen Beständigkeit der Oberfläche.

Im Vergleich zu konventionellen Dekorationsverfahren (nachträgliches Bedrucken, Lackieren, Metallisieren) ermöglicht das Hinterspritzen flexible Designwechsel sowie Kosteneinsparungen^[55].

Für alle Kunststoffverbindungsverfahren gilt, dass die Folie mit dem eingespritzten Kunststoff eine feste Verbindung eingehen muss. Die Haftung verschiedener Rohstoffkombinationen kann Tabellen entnommen werden^[97]. Neben den Haftungsmechanismen ist darüber hinaus die Eigenschaftskompatibilität der Verbundpartner zu berücksichtigen. So können z. B. Steifigkeitsunterschiede der Komponenten bei äußerer Belastung zu Spannungsüberhöhungen im Kontaktbereich führen. Auch Schwindungsunterschiede oder unterschiedliche thermische Ausdehnungskoeffizienten können zum Verzug oder durch die Überlagerung von Eigenspannungen zur Reduktion der Verbundfestigkeit führen^[55].

Die Verbindung zwischen Folie und Kunststoff beruht auf verschiedenen intermolekularen Wechselwirkungen. Neben physikalischen Bindungen (van-der-Waals Wechselwirkungen und Wasserstoffbrückenbindungen) spielt auch die molekulare Interdiffusion eine Rolle. Die Adhäsionsmechanismen sind in Abbildung 2.12 dargestellt. Nach der Modellannahme der Diffusionstheorie wird die Verbundhaftung durch die gegenseitige Durchdringung der Molekülketten beider Komponenten beeinflusst. Zwischen den beiden Komponenten entsteht eine Grenzschicht, die ein Gemisch aus Molekülen oder Molekülsegmenten beider Komponenten enthält^[55,98,99].

Voraussetzung für die molekulare Interdiffusion ist eine ausreichende Benetzung und ein Erweichen bzw. Anschmelzen der ersten Komponente durch die zweite aufgespritzte Komponente. Die Diffusion bzw. Bewegung der Molekülketten resultiert in einer Verschlaufung der Komponenten in der Grenzschicht. Die Verbundhaftung steigt mit längerer Kontaktzeit, höherer Temperatur der Kunststoffkomponenten, größerer Kettenflexibilität, geringerem Vernetzungsgrad und geringerem Molekulargewicht.

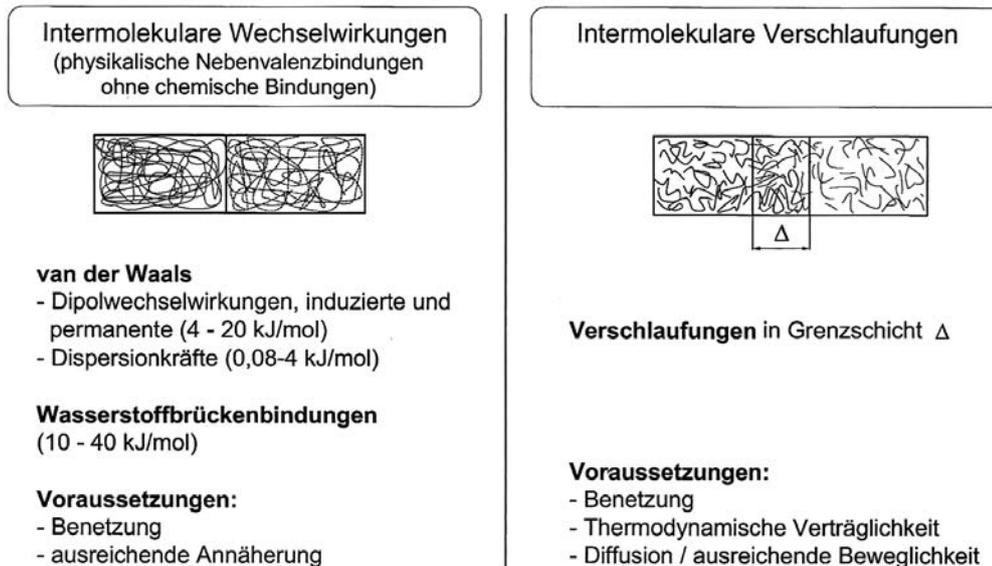


Abbildung 2.12: Adhäsionsmechanismen beim Verbundspritzgießen [55]

2.4.1 IMD-Verfahren

Unter dem In-Mould-Decoration-Verfahren (IMD) versteht man die Integration eines Heißprägeprozesses in den Spritzgießprozess. Eine modifizierte Heißprägefolie, die als Trägermaterial für ein Farb- und Schutzlacksystem dient, wird in das Spritzgießwerkzeug eingeführt und hinterspritzt. Dabei löst sich das Dekor unter dem Einfluss von Druck und Temperatur und wird auf das Spritzgießteil übertragen. Abbildung 2.13 zeigt das Prinzip und die einzelnen Arbeitsschritte des Verfahrens [36,96].

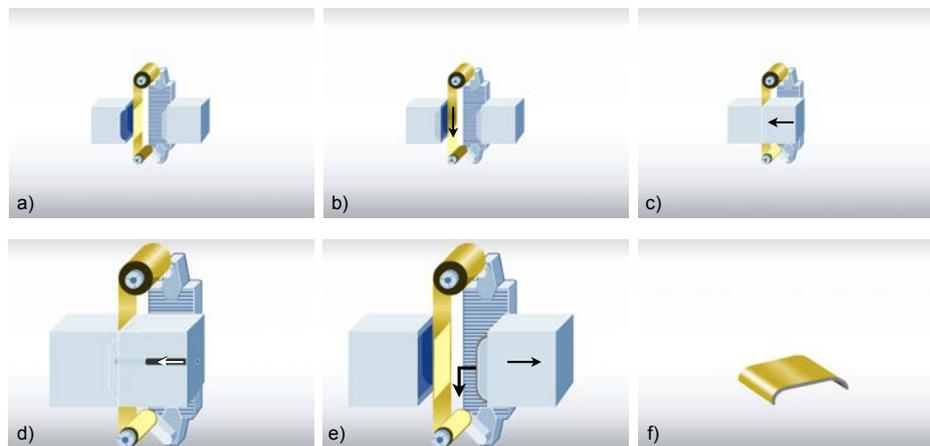


Abbildung 2.13: Prinzip und Arbeitsschritte des IMD-Verfahrens (modifiziert übernommen von Kurz^[100]): a) Ausgangssituation, b) Transport der Folie, c) Schließen der Form, d) Einspritzen, e) Öffnen der Form, f) Auswerfen

Das IMD-Verfahren ist ein gut automatisierbares, kontinuierliches Verfahren, welches schnelle Dekoranpassungen durch Wechsel der Folienrolle ermöglicht. Es können vielfältige Designmöglichkeiten realisiert werden. Nachteilig ist die geringe Verformbarkeit bis ca. 10 % der Folie, d. h. gewölbte Oberflächen lassen sich nur begrenzt dekorieren. Die Ersteinrichtung sowie das Folienmaterial ist für Kleinserien zu teuer.

2.4.2 IML-Verfahren

Das In-Mould-Labeling-Verfahren (IML) wird insbesondere in der Verpackungsindustrie zur „Etikettierung“ von Kunststoffbehältern eingesetzt^[101]. Bedruckte Etiketten (sog. Labels) werden ggf. verformt, zugeschnitten und anschließend automatisch in das Werkzeug eingelegt und hinterspritzt (Abbildung 2.14). Im Werkzeug werden die Etiketten mittels Vakuum oder elektrostatisch fixiert^[102]. Folienmaterial und eingespritzter Kunststoff sind meist gleicher Art^[96].

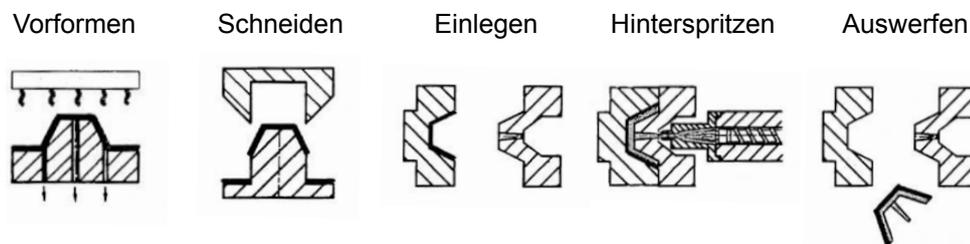


Abbildung 2.14: Prinzip und Arbeitsschritte des IML-Verfahrens^[96]

Auch mit dem IML-Verfahren lassen sich schnelle Farb- und Dekorwechsel realisieren. Das Dekor selbst ist durch die außenliegende Folie vor äußeren Einflüssen geschützt. Es können hohe Farbtiefen und auch bestimmte haptische Effekte erzeugt werden. Nachteilig ist die erhöhte Zykluszeit des Spritzgießprozesses durch die Zuführung der Etiketten, die erforderlichen sauberen Umgebungsbedingungen sowie das problematische passgenaue Stanzen und Verformen der Etiketten^[36].

2.4.3 FIM-Verfahren

Das Film-Insert-Moulding-Verfahren (FIM) entspricht prinzipiell dem IML-Verfahren. Der Begriff FIM wird jedoch hauptsächlich für Bauteile für den industriellen Einsatz verwendet, während in der Verpackungstechnik eher der Begriff IML verbreitet ist. Das FIM-Verfahren umfasst einerseits die vollflächige Dekoration von Oberflächen, z. B. als Ersatz für Lackierungen^[103], und andererseits auch die mehrfarbige Dekoration mit präzisen Bildelementen, wie sie z. B. im Armaturenbereich in PKWs zum Einsatz kommt^[104]. Im Vergleich zu Lackierprozessen ist das Folienhinterspritzen sehr umweltfreundlich, da keine Lösemittel zum Einsatz kommen.

Das Verfahren gliedert sich in die Prozessschritte Drucken, Verformen, Beschneiden und Hinterspritzen. Das Bedrucken erfolgt zumeist mittels Siebdruck auf der Innenseite der Folie. Es sind speziell entwickelte Farbsysteme erhältlich, die durch hohe Einspritztemperatu-

ren und -drücke nicht ausgewaschen werden und eine Haftverbindung mit dem Kunststoff eingehen. Bei dreidimensional geformten Oberflächen müssen die Folien verformt werden. Mögliche Verfahren werden im nachfolgenden Abschnitt näher beschrieben. Anschließend folgt das Beschneiden der Folie, z. B. durch Stanzen oder mittels Laser, sowie der eigentliche Hinterspritzprozess.

2.4.4 Verformen der Folien

Bei der Herstellung dekorierte Bauteile mit dreidimensionaler Oberfläche durch Folienhinterspritzen ist in der Regel eine Verformung der Folie erforderlich. Verformen ist die Ausbildung von Konturen durch plastische Dehnung der Folie. Dies ist von der Anformung einer abwickelbaren Folie an die Werkzeugoberfläche zu unterscheiden, bei der das Material nicht plastisch verformt wird^[105]. Beide Varianten sind in Abbildung 2.15 gegenübergestellt. Es existieren umfangreiche Arbeiten zur Simulation der unterschiedlichen Verformprozesse^[106–109].

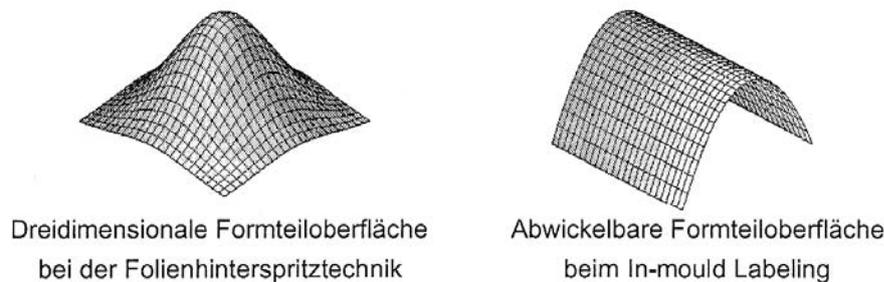


Abbildung 2.15: Verformen und Anformen einer Folie^[110]

Grundsätzlich wird zwischen Positiv- und Negativverformung unterschieden. Bei der Positivverformung wird die Folie gegen ein konvexes Werkzeug gezogen wogegen sie bei der Negativverformung in einen konkaven Hohlraum des Werkzeugs eingedrückt wird.

Weiterhin existieren Kalt- und Warmverformungsprozesse. Mittels Warmverformung werden im Allgemeinen höhere Umformgrade erzielt. Die Folie wird erwärmt und anschließend mittels Vakuum über die Form gezogen bzw. mit Hilfe eines Formstempels verformt. Der Thermoformprozess kann auch direkt in der Spritzgießmaschine erfolgen. Dazu wird die Folie in einen Rahmen eingespannt, erhitzt und durch das Eintauchen eines Kerns mechanisch deformiert. Die endgültige Ausformung erfolgt dann durch die eingespritzte Schmelze. Die Zykluszeit verlängert sich durch diesen Prozess jedoch erheblich^[105,111].

Der Vorteil der Kaltverformung unterhalb der Erweichungs- bzw. Glasübergangstemperatur T_g ist die positionsgenaue und verzugsfreie Erhaltung der aufgedruckten Informationen. Ein wichtiges Verfahren ist das Hochdruckverformen bzw. high pressure forming, Hochdruckverformung (HPF), bei dem die Folie unterhalb ihrer T_g schlagartig durch Beaufschlagung mit Druckluft von 50 bar to 300 bar verformt wird (vgl. Abbildung 2.16)^[104]. Das Verformen erfolgt berührungslos und ermöglicht gleichmäßige Verstreckungsgrade sowie Hinterschneidungen^[96,112]. Die erzielbaren Umformgrade sind jedoch geringer als bei der Warmverformung.

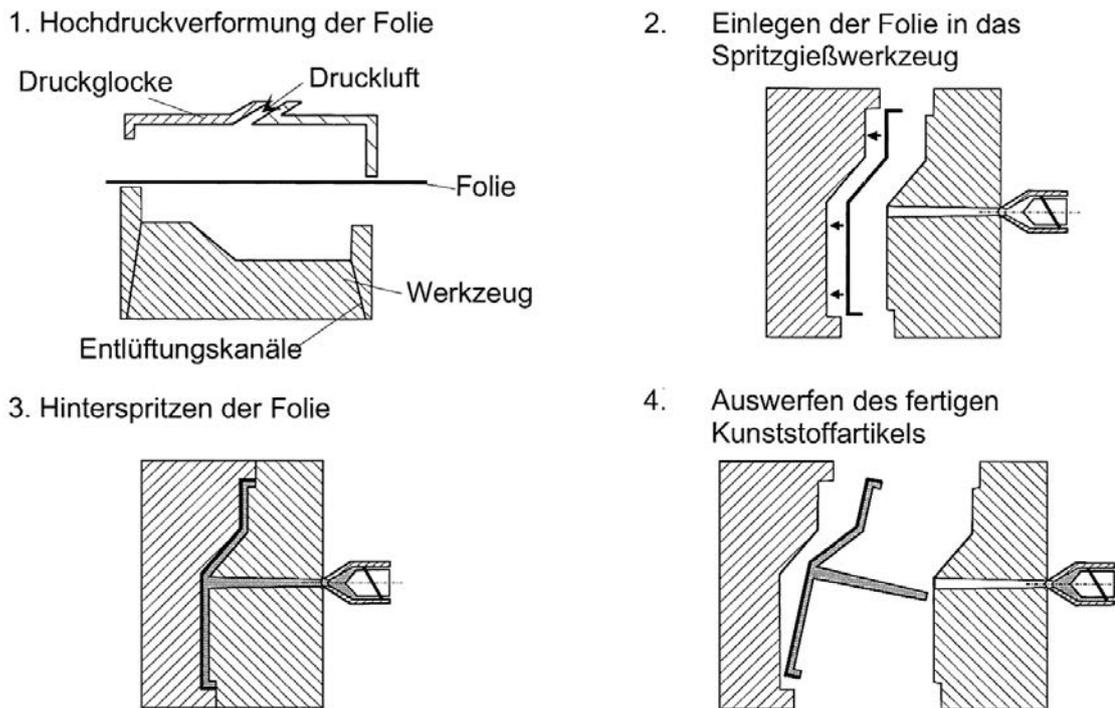


Abbildung 2.16: Verfahrensablauf beim Hochdruckverformen und Hinterspritzen von Kunststofffolien^[55]

2.4.5 Anforderungen an die Foliensubstrate

Die Substrate für die Hinterspritztechnik müssen eine Reihe von Anforderungen erfüllen^[96]:

- Unempfindlichkeit gegen hohe Temperaturen und Druckbelastung,
- hohes Rückstellvermögen, z. B. bei strukturierten Oberflächen,
- gutes Verformungsverhalten,
- gute Haftung auf dem eingespritzten Kunststoff,
- stabile Lage im Werkzeug und
- Eignung als Oberfläche des Bauteils.

Prinzipiell wird zwischen vorderseitig und rückseitig dekorierten Folien unterschieden. Vorderseitig dekorierte Folien werden vor allem für Bauteile mit kurzzeitigem Gebrauch oder Bauteile mit geringer Beanspruchung der Oberfläche eingesetzt. Das Auswaschen der Dekorschicht kann somit verhindert und die Haftung der Folie verbessert werden. Nachteilig ist, dass das Dekor im Gebrauch offen liegt und nicht gegen Abrieb geschützt ist. Formteile mit rückseitig dekorierte Folien ermöglichen neben einer gleichmäßigen Oberflächenstruktur eine hohe Farbtiefe und bieten guten Schutz gegen Abrieb. Auch Mehrschichtfolien, die z. B. beständig gegenüber UV-Strahlung sind, werden eingesetzt. Für das Bedrucken rück-

seitig dekorierte Folien sind jedoch Spezialfarben nötig, die der thermischen Belastung und der Scherung beim Einströmen der Schmelze standhalten und nicht auswaschen. Die Druckfarben müssen hoch flexibel sein und eine hohe Reißdehnung (bis zu 300 %) sowie eine gute Haftung auf dem eingespritzten Kunststoff aufweisen^[96].

2.4.6 Dehnung, Schwindung und Verzug beim Folienhinterspritzen

Beim Folienhinterspritzen müssen die Aspekte Foliendehnung, Schwindung und Verzug beachtet werden. Bei der Erwärmung von Kunststoffen wird deren freies Volumen vergrößert bzw. die Dichte verringert. Die Wärmeausdehnung von Polymeren wird u. a. durch den Kristallinitätsgrad, die Orientierung sowie die Art und Anteile von Füll- und Zusatzstoffen beeinflusst. Durch das Bedrucken und ggf. Verformen finden mehrere Erwärmungs- und Abkühlprozesse nacheinander statt. Die Foliendehnung kann durch eine geringe Werkzeugtemperatur und eine hohe Einspritzgeschwindigkeit minimiert werden^[113].

Die Volumenverringerung des Bauteils durch die Abkühlung nach dem Spritzgießen wird als Schwindung bezeichnet. Man unterscheidet die Verarbeitungsschwindung (VS) – bis 16 h nach dem Spritzgießvorgang – und die Nachschwindung (NS) nach längerer Lagerung. Beide Schwindungen zusammen ergeben die Gesamtschwindung (GS). Die Schwindung in Abhängigkeit einiger Prozessparameter ist in Abbildung 2.17 dargestellt^[7]. Beim Folienhinterspritzen sind sowohl der eingespritzte Kunststoff als auch die Folie von der Schwindung betroffen. In Abhängigkeit der Temperaturverhältnisse, des E-Moduls und des Wärmeausdehnungskoeffizienten der beteiligten Materialien ergibt sich die Schwindung des Gesamtverbundes^[113].

Unter Verzug versteht man die Gestaltsabweichungen eines Spritzgießteils von der Sollgestalt durch Wölben, Verwinden, Winkeländerungen o. ä.^[113]. Der Verzug hinterspritzter Formteile resultiert aus den Eigenspannungen im Formteil^[114], die durch lokal unterschiedliche Schwindung verursacht wird. Diese wiederum wird durch

- lokal unterschiedliche Temperaturverhältnisse,
- lokal unterschiedliche Druckverhältnisse,
- Werkstoffanisotropie oder
- eine Kombination aus diesen Faktoren

verursacht. Die Dekormaterialien weisen üblicherweise geringere Wärmeleitfähigkeiten als der hinterspritzte Kunststoff auf. Aus diesem sogenannten Isolationseffekt resultiert ein asymmetrisches Temperaturprofil und damit auch ein asymmetrisches Eigenspannungsprofil, welches zum Verzug des Bauteils zur Dekorseite hin führt^[114,115].

Mit entsprechenden Simulationsprogrammen können Schwindung und Verzug beim Folienhinterspritzen simuliert werden^[98,108,116]. So haben z. B. Kim et al.^[98] untersucht, wie die Foliendicke und die Dicke des Probekörpers den Verzug der Probekörper beeinflussen (vgl. Abbildung 2.18). Die Wölbung der Probekörper nimmt mit zunehmender Foliendicke und abnehmender Dicke der Probekörper zu. Um die Wölbung zu minimieren, sollten also möglichst dünne Folien hinterspritzt werden und der Probekörper selbst möglichst dick ausgelegt werden.

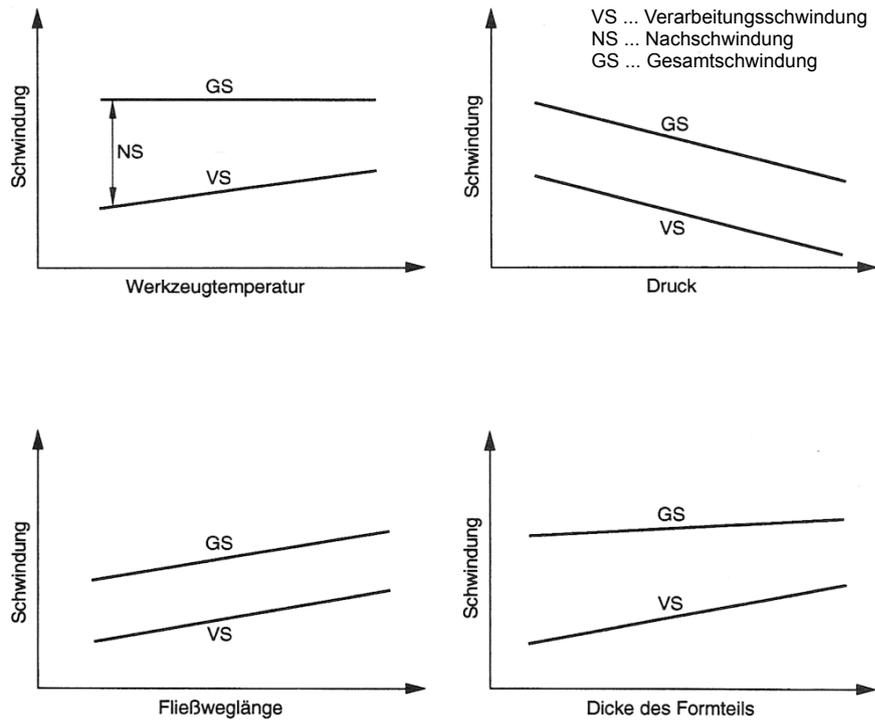


Abbildung 2.17: Verarbeitungs-, Nach- und Gesamtschwindigkeit in Abhängigkeit von Werkzeugtemperatur, Druck, Fließweglänge und Dicke des Formteils (angepasst übernommen von Schwarz et al.^[7])

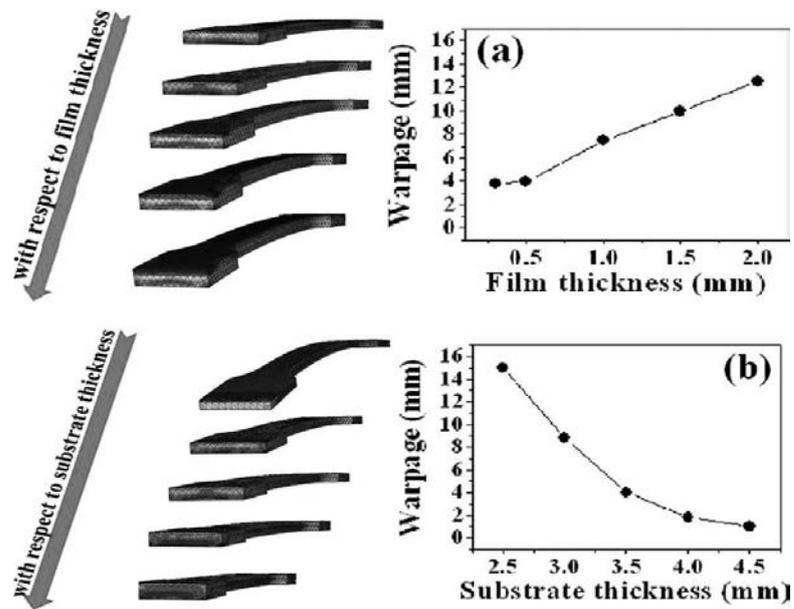


Abbildung 2.18: Wölbung (warpage) folienhinterspritzter Bauteile in Abhängigkeit (a) der Foliendicke (film thickness) und (b) der Dicke des Probekörpers (substrate thickness)^[98]

2.5 Funktionsintegration in Kunststoffbauteile durch Folienhinterspritzen

2.5.1 Hinterspritzen von Schaltungsträgern

Das Hinterspritzen von Schaltungsträgern ist eine Technologie zur Herstellung räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (vgl. auch Abschnitt 2.2.3). Beim Hinterspritzen von Schaltungsträgern wird eine ein- oder mehrlagige flexible Leiterbildfolie in ein Spritzgießwerkzeug eingelegt und mit einer geeigneten Kunststoffschmelze hinterspritzt. Ggf. ist auch hier vorab eine Verformung der Leiterfolie erforderlich. Erfahrungen aus Hinterspritzprozessen zu dekorativen Zwecken können entsprechend adaptiert werden. Die zu hinterspritzende Folie ist durch die vorbeiströmende Kunststoffschmelze verschiedenen Belastungen, z. B. Temperatur-, Druck- und Scherbelastungen, ausgesetzt. Was bei Dekorfolien zu Schädigungen in Form von An- oder Durchschmelzen der Folie, Auswaschen der aufgedruckten Farben oder zur Verzerrung oder Verschiebung des Motivs führt, verursacht bei Schaltungsträgern das elektrische Versagen der Schaltung durch Unterbrechungen oder Risse in den Leiterbahnen oder durch Kurzschlüsse in isolierenden Materialien.

Um die Belastungen auf die Folien zu reduzieren, können fließarme oder druckarme Verfahrensvarianten, z. B. Thermoplastschaumguss, Spritzprägen oder Hinterpressen, eingesetzt werden^[54]. Außerdem werden spezielle Folien, z. B. auf der Basis von Polyetheretherketon (PEEK), verwendet. In diese hochtemperaturbeständigen Folien können Füllstoffe eingearbeitet werden, die den thermischen Ausdehnungskoeffizient der Folien reduzieren^[117].

Zum Hinterspritzen von Schaltungsträgern im Sinne der 3D-MID-Technologie kommen prinzipiell folgende Prozessvarianten zum Einsatz^[54]:

- Das „Capture Decal Verfahren“ entspricht dem IML-Verfahren. Die Folie geht einen Verbund mit dem Hinterspritzwerkstoff ein. Entscheidend für die Haftfestigkeit ist die Wahl einer geeigneten Materialkombination. Das Leiterbild befindet sich üblicherweise außen auf der Folie und damit auch außen auf dem Kunststoffbauteil.
- Beim „Transfer Decal Verfahren“ wird eine Trägerfolie mit Leiterbild auf der Leiterseite hinterspritzt. Nach dem Spritzgießen wird die Trägerfolie vom Bauteil abgezogen. Das Verfahren entspricht dem IMD-Verfahren.
- Das „AIT-Verfahren“ (advanced interconnect technology) basiert auf einer Mehrschichtfolie aus Aluminium und darauf strukturierten Kupfer-Leitbahnen. Die Aluminiumschicht wird nach dem Hinterspritzen selektiv abgeätzt. Mit diesem Verfahren können hochtemperaturfeste Bauteile hergestellt werden.

Beim Hinterspritzen von Leiterbildfolien stellt die eingeschränkte Verformbarkeit, verursacht durch die geringe Bruchdehnung der Kupferleitbahnen auf der Trägerfolie, ein Problem dar. Die Verformgrade sind limitiert. Aus diesem Grund wird häufig mit einem Primer-Material gearbeitet, welches auf die Folie gedruckt wird. Diese Strukturen werden erst nach dem Verformen metallisiert – damit können höhere Verformgrade realisiert werden^[54]. Mit Hilfe dieses Verfahrens können z. B. Antennenstrukturen auf Kunststoffbauteile aufgebracht werden^[118].

2.5.2 RFID-Integration

Erste Erfahrungen zur Integration elektronischer Bauteile in Kunststoffe gibt es auch im RFID-Bereich. Das Hinterspritzen schützt RFID-Transponder vor äußeren Einflüssen, z. B. durch mechanische Einwirkungen, UV-Strahlung, Feuchtigkeit, Reinigungsmittel oder Chemikalien. Zudem sind hinterspritzte Transponder im Vergleich zu Etiketten unlösbar mit dem Bauteil verbunden und bilden einen integralen Bestandteil. Damit einher geht eine höhere Fälschungssicherheit. Der Einsatzzweck dieser Transponder liegt vor allem im Bereich von Mehrwegbehältersystemen. Die Anforderungen an die zu hinterspritzenden Transponder sind hoch. Sie müssen Temperaturen zwischen 200 °C und 250 °C sowie einem Druck von ca. 500 bar standhalten^[119].

Neben dem Hinterspritzen ist auch das vollständige Umspritzen des RFID-Transponders mit Hilfe der Kernhubtechnik möglich (vgl. Abbildung 2.19). Der RFID-Transponder wird auf der Stirnfläche eines rückziehbaren Kerns positioniert und hinterspritzt. Nachdem sich die Schmelze mit dem Transponder verbunden hat, wird der Kern zurückgezogen und der Transponder löst sich vom Kern. Anschließend wird auch der Hohlraum mit Schmelze aufgefüllt. Dieses Verfahren ist als Spezialverfahren mit aufwändiger Prozessführung einzuordnen und erfordert eine präzise Prozessregelung. Es ist für Bauteile mit Wandstärken ab 2 mm geeignet^[120].

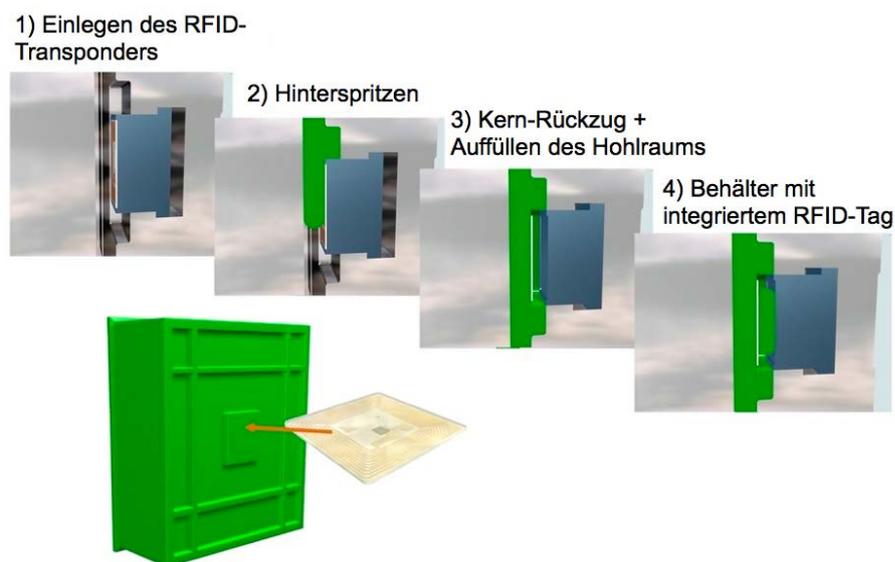


Abbildung 2.19: Verfahrensablauf beim Einspritzen eines RFID-Transponders in einen Kunststoffbehälter^[120]

2.5.3 Hinterspritzen gedruckter elektronischer Komponenten

Das Hinterspritzen gedruckter elektronischer Komponenten wurde bisher kaum näher betrachtet. Es existieren vereinzelt Ansätze zum Hinterspritzen von EL-Leuchten. Die Lumitec AG in der Schweiz hat in Zusammenarbeit mit Bayer MaterialScience die sogenannte

Smart Surface Technology entwickelt^[121]. EL-Leuchten werden auf Folien gedruckt, dreidimensional verformt, gestanzt und anschließend hinterspritzt. Lumitec hat entsprechende Patente angemeldet^[122]. Es existieren jedoch keine wissenschaftlichen Untersuchungen zu diesem Thema.

Im wissenschaftlichen Bereich sind lediglich Arbeiten einer Gruppe am VTT in Finnland (nationales Technologie-Forschungszentrum) bekannt. In Voruntersuchungen zur Haftung verschiedener Foliensubstrate, die mit unterschiedlichen Kunststoffen hinterspritzt wurden, konnten bestimmte Materialkombinationen als geeignet identifiziert werden. Eine besonders gute Haftung zeigte sich bei PC-Folien und bestimmten vorbehandelten PET-Folien, die mit Polycarbonat hinterspritzt wurden^[123]. Die genauen Materialien und Hersteller sind in der Veröffentlichung nicht angegeben.

Für Hinterspritzversuche (vgl. Abbildung 2.20 und 2.21) wurde vorbehandelte PET-Folie mit elektrisch leitfähigen Strukturen unter Verwendung von Silberpaste im Siebdruck bedruckt. Anschließend wurde das Substrat mit verschiedenen SMD-Bauelementen, z. B. Widerständen und lichtemittierenden Dioden (LED), mittels Kleben bestückt. Es kam sowohl die ICA- (isotrop leitender Klebstoff) als auch die NCA- (nichtleitender Klebstoff) und ACA-Technologie (anisotrop leitender Klebstoff) zum Einsatz. Anschließend wurden die bedruckten und bestückten Folien mit Polycarbonat hinterspritzt. Um die Bauelemente auch nach dem Hinterspritzen testen zu können, wurden Durchkontaktierungen mittels Schablonendruck hergestellt^[8].

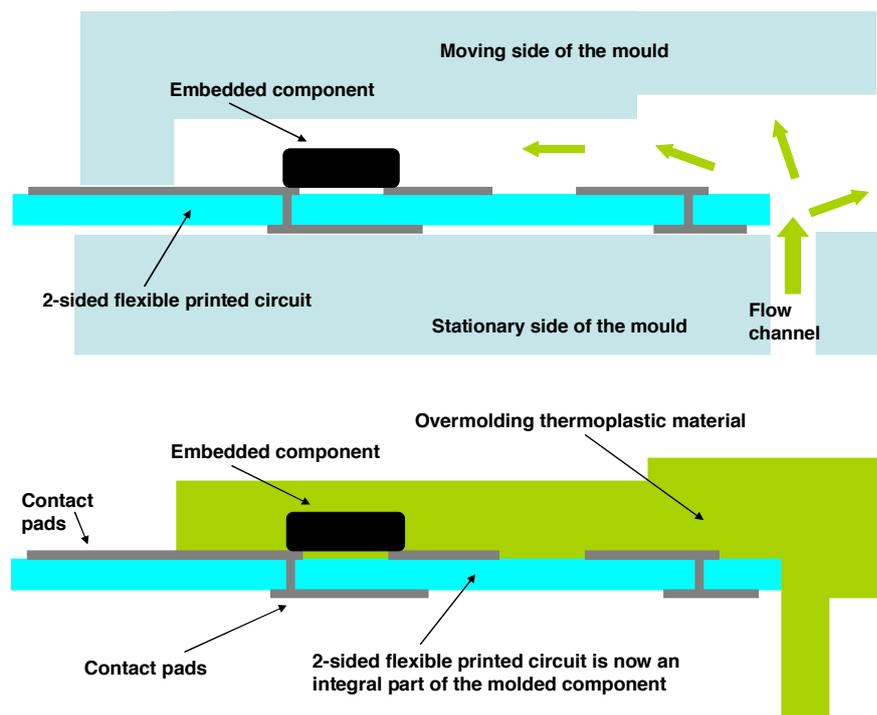


Abbildung 2.20: Schematische Darstellung des Hinterspritzvorgangs^[8]

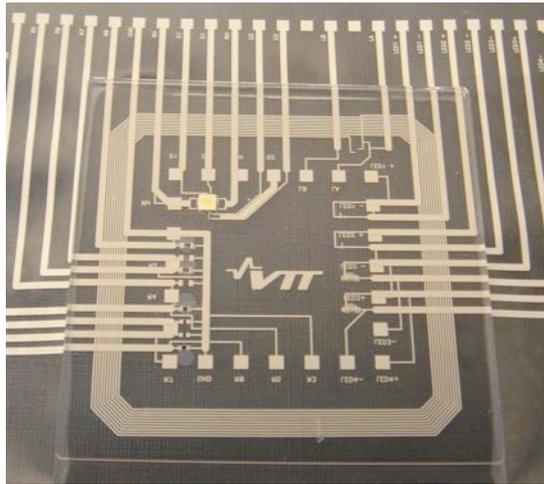


Abbildung 2.21: Hinterspritzte Teststruktur^[8]

Im Jahr 2010 verstärkte die Arbeitsgruppe ihre Tätigkeiten auf diesem Forschungsgebiet. Neben den genannten wissenschaftlichen Veröffentlichungen wurden in Präsentationen vor allem viele Visionen veröffentlicht, z. B. einen Löffel mit integrierten Sensoren, Anzeigen und Solarzellen. Publikationen dieser Art unterstreichen die zunehmende Bedeutung hybrider Fertigungstechnologien.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die elektronische Funktionsintegration in Kunststoffbauteile durch Folienhinterspritzen noch keine ausgereifte Technologie ist und bisher nur vereinzelte Nischenanwendungen realisiert wurden. Auch die wissenschaftliche Untersuchung von einzelnen Aspekten der Technologie steht noch am Anfang. Es sind nur vereinzelt Versuchsergebnisse zugänglich, auf denen aufgebaut werden kann.

3 Materialien und Verarbeitung

3.1 Verwendete Materialien

3.1.1 Substratmaterialien

In der vorliegenden Arbeit wurden Polycarbonat-Folien vom Hersteller Bayer MaterialScience AG verwendet. Zum Einsatz kam die transparente Extrusionsfolie Makrofol[®] DE. Die Folie aus Makrolon[®] – dem Polycarbonat (PC) der Bayer AG – ist in verschiedenen Oberflächenqualitäten lieferbar. Die verwendete Makrofol DE 1-4 ist durch eine hochglänzende und eine fein mattierte Seite gekennzeichnet. Es standen Folien in den Stärken 100 µm und 200 µm zur Verfügung. Makrofol[®] ist gut bedruckbar, verformbar und kann mit thermoplastischen Kunststoffen hinterspritzt werden. Die Glasübergangstemperatur liegt bei ca. 150 °C. Die Lichttransmission liegt im sichtbaren Wellenlängenbereich bei über 80 %^[124].

3.1.2 Druckstoffe

Für das Drucken von elektrisch leitfähigen Strukturen kamen verschiedene Formulierungen des Materials Clevios[™] P (vormals: Baytron[®] P) der Firma H.C. Starck (inzwischen Heraeus Clevios GmbH) zum Einsatz. Dabei handelt es sich um eine wässrige Dispersion von PEDOT:PSS. Je nach eingesetztem Druckverfahren wurden am Institut für Print- und Medientechnik geeignete Formulierungen hergestellt. Dazu wurde die Polymerkonzentration (und damit auch die Viskosität) der Dispersion durch Verdunsten des Lösemittels erhöht. Durch die Zugabe von Additiven konnte die Leitfähigkeit erhöht werden. Darüber hinaus wurden der Formulierung Tenside zugegeben, um die Oberflächenspannung einzustellen und die Benetzung der Formulierung auf dem Kunststoffsubstrat zu steuern. Der Anfangsbuchstabe der Formulierungsbezeichnung steht für das Druckverfahren (F ... Flexodruck, T ... Tiefdruck, O ... Offsetdruck). Die anschließende Zahlenkombination ermöglicht eine eindeutige Zuordnung der jeweiligen Formulierung.

Darüber hinaus wurden auch PEDOT:PSS-Formulierungen der Firma Agfa verwendet. Die Materialien Orgacon[™] EL-P 3040, 3042 und 5020 wurden speziell für das Siebdruckverfahren auf Kunststofffolien entwickelt.

Zur Herstellung von EL-Leuchten kamen zudem die Materialsysteme von DuPont Microcircuit Materials und Gwent Electronic Materials zum Einsatz. Die Leuchtstoffe und Dielektrika sind auf das Siebdruckverfahren abgestimmt. Außerdem wurden als Elektrodenmaterial die Silberpaste DuPont 5029 sowie die Silbertinte Gwent C2080815D1 verwendet. Alle in der Arbeit genutzten Druckstoffe sind in Tabelle 3.1 zusammengefasst.

Tabelle 3.1: Übersicht der verwendeten Druckstoffe

Typ	Hersteller	Materialbezeichnung	Druckverfahren
PEDOT:PSS	H.C. Starck	Clevios TM P	eigene Formulierungen für Tief- und Flexodruck
PEDOT:PSS	Agfa	Orgacon TM EL-P 3040, 3042, 5020	Siebdruck
Leuchtstoff	DuPont	Luxprint [®] 8152 B/L (blau-grün)	Siebdruck
Leuchtstoff	Gwent Electronic Materials	C2061027D13 (blau-grün)	Siebdruck
Dielektrikum	DuPont	Luxprint [®] 8153	Siebdruck
Dielektrikum	DuPont	5036	Siebdruck
Silberleitpaste	DuPont	5029	Siebdruck
Silberleitfarbe	Gwent Electronic Materials	C2080815D1	Flexodruck

3.1.3 Formmasse

Für die Hinterspritzversuche im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde der thermoplastische, amorphe Kunststoff PC Makrolon 2805 eingesetzt. PC ist durch hohe Festigkeit, Wärmeformbeständigkeit und Schlagzähigkeit gekennzeichnet. Die Wärmeformbeständigkeit liegt zwischen 135 °C und 145 °C, die Glasübergangstemperatur zwischen 140 °C und 150 °C. Das Material ist schwer entflammbar und weist gute elektrische Isolationseigenschaften auf. Mit dem Werkstoff kann eine hohe Maßgenauigkeit und Maßhaltigkeit erzielt werden, da die Schwindung und die thermische Dehnung relativ gering sind.

3.2 Entwurf von Drucklayouts

3.2.1 Speicherstrukturen

Für die Druckversuche wurden verschiedene Teststrukturen und Layouts entworfen. Links in Abbildung 3.1 ist jeweils eine Gitterstruktur zu sehen, mit deren Hilfe die geometrische Beeinflussung des Druckbildes beim Folienhinterspritzen untersucht werden kann. Rechts (Abbildung 3.1a und b) bzw. im mittleren Bereich (Abbildung 3.1c) befinden sich verschiedene kapazitiv auslesbare Speicherstrukturen zu Testzwecken. Deren Funktionsweise wird in Abschnitt 4.5 näher erläutert. Weiterhin wurden Teststrukturen für die Herstellung von Demonstratoren vorgesehen (Abbildung 3.1a und b mitte und Abbildung 3.1c rechts). Diese Layouts wurden von einem Projektpartner zur Verfügung gestellt. Die Elemente wurden in gleicher oder ähnlicher Form für die unterschiedlichen Druckverfahren berücksichtigt.

Neben den Druckformen für die großen Labordruckmaschinen (vgl. Abschnitt 3.3.1) wurden auch Layouts für das Flexoprobendruckgerät Erichsen Flexiproof 100 UV entworfen (Abbildung 3.2). Dabei wurden zusätzliche flächige Elemente zur Untersuchung klimatischer Einflüsse auf die gedruckten und hinterspritzten leitfähigen Strukturen vorgesehen.

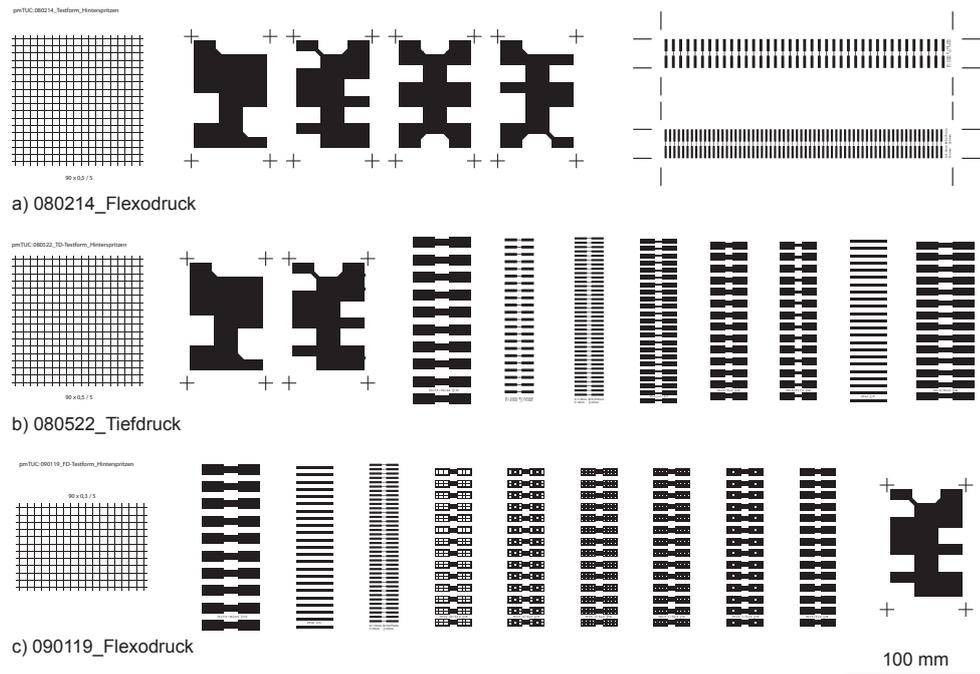


Abbildung 3.1: Druckformen für Druckversuche an den LaborMAN-Druckmaschinen

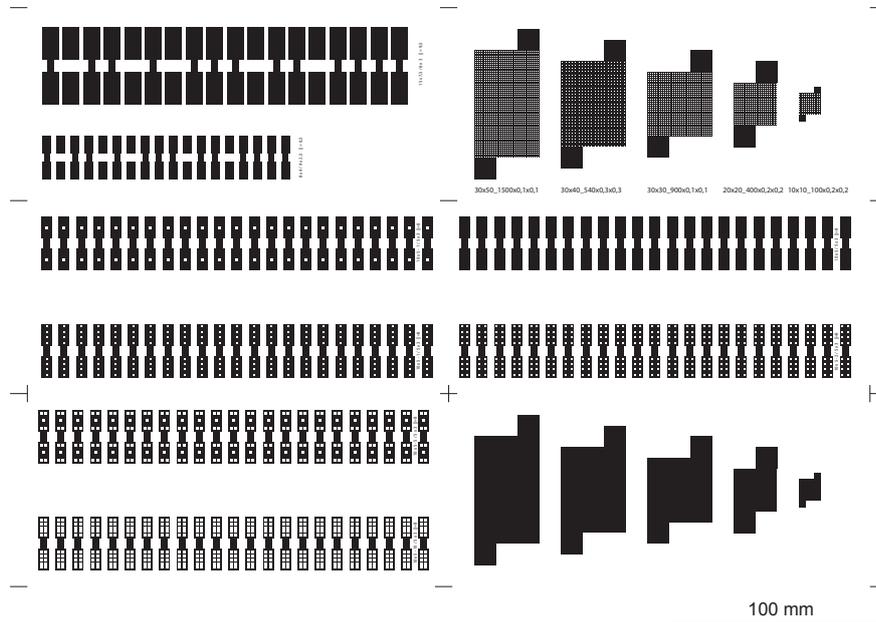


Abbildung 3.2: Ausgewählte Druckformen für Druckversuche am Flexoprobedruckgerät

3.2.2 Elektrolumineszente Anzeigen

Für die Herstellung elektrolumineszenter Anzeigen wurden die Layouts für alle Einzelschichten entwickelt. Der Grundaufbau einer gedruckten EL-Leuchte besteht aus der transparenten Grundelektrode, dem Leuchtstoff, dem Dielektrikum und der Deckelektrode. Je nach elektrischer Leitfähigkeit der Grund- und Deckelektrode kann zusätzlich noch eine Zuleitung aus einem hochleitfähigen Material (ein sogenannter busbar) gedruckt werden. Abbildung 3.3 zeigt den Gesamtaufbau einer EL-Leuchte sowie die EL-Leuchte im Querschnitt. In Abbildung 3.4 sind die Layouts der Einzelschichten dargestellt.

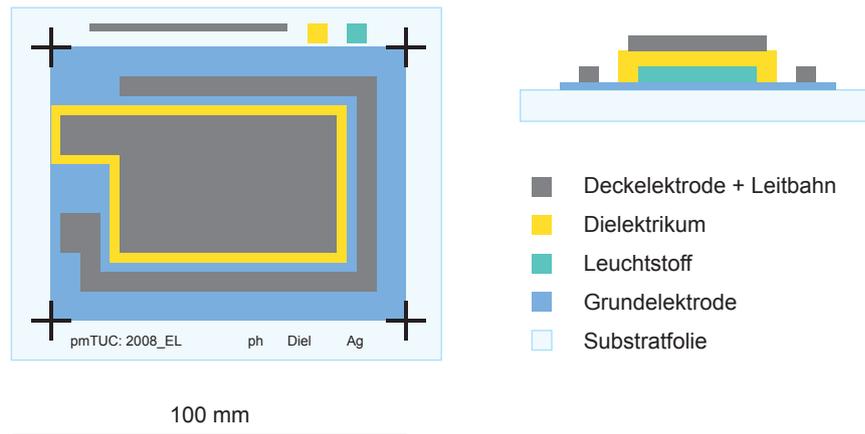


Abbildung 3.3: links: Gesamtaufbau einer EL-Leuchte, rechts: Querschnitt einer EL-Leuchte (Schichtdicken nicht maßstabsgetreu)

Der Fertigungsablauf bei der Herstellung von EL-Leuchten ist folgender:

1. Beschichtung/Druck der Grundelektrode,
2. Druck des Leuchtstoffes,
3. Druck von zwei bis drei Schichten des Dielektrikums,
4. Druck der Deckelektrode.

Im Verlauf der Versuchsdurchführung wurde der Aufbau der EL-Leuchten teilweise variiert. So wurden z. B. auch bidirektionale Leuchten, die in beide Richtungen strahlen, entwickelt und hergestellt. Dafür sind prinzipiell andere Materialien erforderlich. Sowohl das Dielektrikum als auch beide Elektroden müssen lichtdurchlässig sein.^[125] Die Anforderungen an das Dielektrikum sind neben einer hohen Transparenz vor allem eine hohe elektrische Durchschlagsfestigkeit sowie eine möglichst hohe relative Permittivität. Außerdem sind gute Schichtbildungseigenschaften erforderlich um Fehlstellen in der gedruckten Schicht zu verhindern. In Abbildung 3.5 sind der Aufbau einer unidirektionalen und der einer bidirektionalen Leuchte gegenübergestellt.

Für die Verformversuche wurden EL-Leuchten in größerem Format hergestellt, damit ein vorhandenes Verformwerkzeug genutzt werden konnte (Abbildung 3.6).

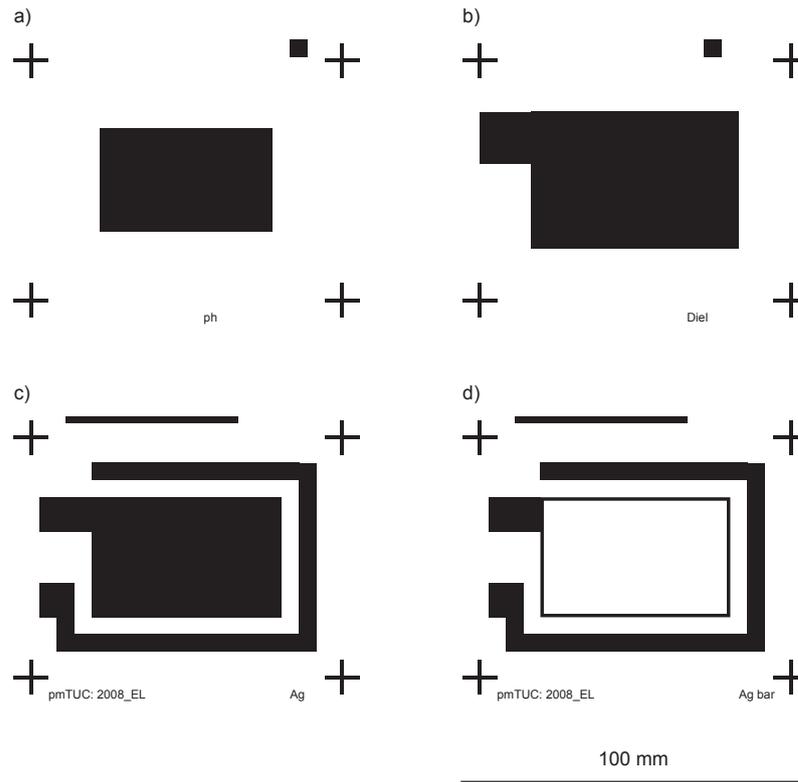


Abbildung 3.4: Layouts der einzelnen Schichten einer EL-Leuchte: a) Leuchtstoff, b) Dielektrikum, c) Deckelektrode, d) Leitbahn (busbar)

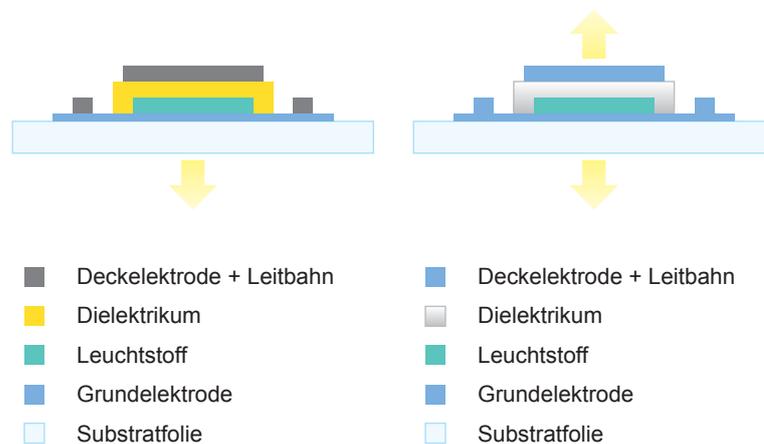


Abbildung 3.5: Aufbau einer unidirektionalen (links) und einer bidirektionalen (rechts) EL-Leuchte, bei der bidirektionalen EL-Leuchte wurden neben der Substratfolie und der Grundelektrode auch das Dielektrikum und die Deckelektrode mit transparenten Materialien realisiert (angepasst übernommen von^[125])

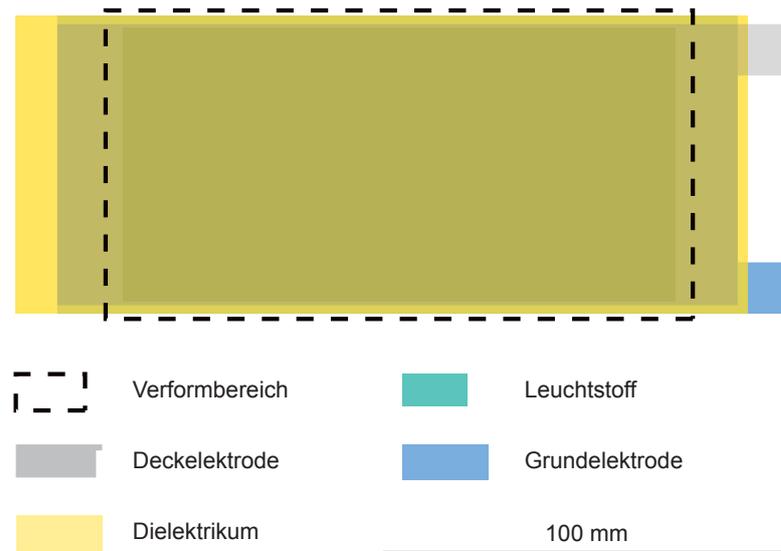


Abbildung 3.6: Layout der EL-Leuchten für Verformversuche

3.3 Probenherstellung: Drucken

3.3.1 Drucken von Speicherstrukturen

Für die Durchführung der Druckversuche standen verschiedene Labordruckmaschinen am Institut für Print- und Medientechnik zur Verfügung. Die Herstellung von Speicherstrukturen im Flexodruck wurde an der Labordruckmaschine LaborMAN I durchgeführt. Dabei handelte es sich ursprünglich um eine Vierfarben-Rollenoffsetdruckmaschine mit Heißlufttrockner. Die Maschine ist durch einseitige Lagerung aller Zylinder und Walzen gekennzeichnet. Dadurch sind alle Bauteile leicht zugänglich und Anpassungen bzw. Umbauten können vorgenommen werden. Die Zylinder werden einzeln angetrieben. Die Bahnbreite beträgt 140 mm, der Durchmesser der Druckzylinder ist 220 mm. Daraus ergibt sich eine Abschnittslänge von ca. 691 mm. Im Rahmen der Diplomarbeit von Georg Schmidt^[126] erfolgte der Umbau eines Anilox-Farbwerkes auf ein Flexodruckwerk, welches für die Herstellung der Speicherstrukturen verwendet wurde. Zum Einsatz kamen eine Keramik-Rasterwalze mit einem Schöpfvolumen von $8 \text{ cm}^3/\text{m}^2$ und Druckformen (vgl. Abbildung 3.1) des Typs DuPont DS2 mit einer Stärke von 1,14 mm, welche mit einem $110 \mu\text{m}$ dicken Klebeband auf dem Druckformzylinder montiert wurden. Die Druckgeschwindigkeit betrug 0,5 m/s to 1 m/s und wurde hauptsächlich durch die notwendige Trocknungszeit begrenzt. Die Labordruckmaschinen der LaborMAN-Reihe arbeiten mit Druckgeschwindigkeiten bis zu 5 m/s. Auf Produktionsmaschinen sind im Flexodruck aktuell Druckgeschwindigkeiten über 10 m/s möglich.

Die Herstellung von Speicherstrukturen im Tiefdruckverfahren erfolgte an der Labordruckmaschine LaborMAN II, die auf dem gleichen Maschinentyp wie die LaborMAN I basiert. Die Maschine besteht aus Abwickler, zwei Druckwerken, einer Heißlufttrockenstrecke und dem Aufwickler. Das zweite Druckwerk wurde für das Tiefdruckverfahren umge-

baut. Die Tiefdruckform wird als Sleeve auf den Druckformzylinder aufgezogen (bei der Sleeve-Technologie wird das Sujet auf einer Hülse bebildert, die mit Druckluftunterstützung auf einen Dorn aufgeschoben wird). Es wurde mit einer Druckgeschwindigkeit von 1 m/s gedruckt, die ebenfalls vor allem durch die Trocknerleistung begrenzt ist. Übliche Produktionsgeschwindigkeiten im Tiefdruck liegen bei ca. 15 m/s und höher.

Für verschiedene kleinere Tests wurden die Speicherstrukturen auch mit Hilfe des Flexoprobendruckgeräts Erichsen Flexiproof 100 UV hergestellt. Für diese Versuche wurden Druckplatten vom Typ DuPont DPN in einer Stärke von 1,7 mm in Kombination mit einem 0,5 mm starken Klebeband verwendet. Die verwendeten Rasterwalzen (RW) sind in Tabelle 3.2 aufgeführt.

Tabelle 3.2: Verwendete Rasterwalzen für Druckversuche am Flexoprobendruckgerät

Bezeichnung	Material	Rasterung in Linien/cm	Schöpfungsvolumen in cm^3/m^2
RW 1	Keramik	55	24,99
RW 2	Chrom	47	25,36
RW 3	Chrom	55	20,2
RW 4	Chrom	79	10,2

Die Pressungen zwischen Rasterwalze und Druckformzylinder sowie zwischen Druckformzylinder und Gegendruckzylinder wurden in Abhängigkeit der verwendeten Rasterwalze und der Stärke der zu bedruckenden Folie eingestellt. Die Druckversuche am Flexoprobendruckgerät wurden bei einer Druckgeschwindigkeit von 40 m/min durchgeführt.

3.3.2 Drucken von elektrolumineszenten Anzeigen

Die EL-Leuchten wurden auf dem Siebdrucker EKRA X1-SL gedruckt. Die Herstellungssequenz ist in Abschnitt 3.2.2 erläutert. Der halbautomatische Sieb- bzw. Schablonendrucker mit einem maximalen Druckformat von 460 mm x 460 mm und einer Wiederholgenauigkeit von $\pm 10 \mu\text{m}$ besitzt einen Vakuumschisch zur Aufnahme flexibler Substrate. Druckgeschwindigkeit, Absprung und der Rakelweg werden über die Software eingestellt. Rakeltiefe und Rakeldruck werden manuell eingestellt. Der Siebdrucker ist mit einem optischen Positioniersystem (zwei Kameras) ausgestattet, welches die Positionierung der einzelnen Schichten zueinander ermöglicht. Die Druckproben wurden im Modus Fluten-Drucken unter Verwendung folgender Prozessparameter hergestellt:

- Druckgeschwindigkeit: 100 mm/min,
- Rakeldruck: 1 bar,
- Absprung: 2 mm.

In Tabelle 3.3 sind die Parameter der verwendeten Siebe aufgelistet. Sieb 1 wurde zum Druck von Leuchtstoff und Dielektrikum eingesetzt. Sieb 2 kam bei der Herstellung der Grundelektroden zum Einsatz. Beide Siebgewebe wurden mit einer sogenannten Kombischicht (wasser- und lösemittelresistent) beschichtet.

Tabelle 3.3: Verwendete Siebe zum Druck der EL-Leuchten

Bezeichnung	Sieb 1	Sieb 2
Gewebezahl in Fäden/cm	61	120
nomineller Garndurchmesser in μm	64	34
Maschenweite in μm	90	45
Sieböffnungsgrad in %	30,1	29,6
theoretische Nassschichtdicke in μm	30,4	16,3

Die gedruckten Einzelschichten wurden anschließend in einem Bandtrockner in mehreren Durchläufen insgesamt ca. 3 min bei einer eingestellten Temperatur von $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ getrocknet. Bei dieser eingestellten Temperatur am Heizer erwärmt sich die Substratfolie selbst auf ca. $120\text{ }^{\circ}\text{C}$.

3.4 Probenherstellung: Hinterspritzen und Verformen

3.4.1 Prozessparameter

Die Hinterspritzversuche wurden auf einer Spritzgießmaschine von KraussMaffei (KM 90/340/B1) an der Professur Kunststoffe der TU Chemnitz durchgeführt. Folgende Prozessparameter wurden für die Herstellung der Proben verwendet:

- Massetemperatur: $280\text{ }^{\circ}\text{C}$,
- Werkzeugtemperatur: $80\text{ }^{\circ}\text{C}$,
- Einspritzen: 150 bar, 50 mm/s,
- Umschalten auf Nachdruck: 400 bar,
- Nachdruck: 40 bar, 12 s,
- Dosieren: Drehzahl 100/min, Weg 50 mm, Staudruck 8 bar, Dekompression 1 mm,
- Kühlen: 20 s.

3.4.2 Probekörper

Als Probekörper wurde ein Plattenwerkzeug mit den Abmaßen $150 \times 75 \times 4\text{ mm}$ (Abbildung 3.7) verwendet. Die zu hinterspritzende Folie wurde vorab auf einer Schneidmaschine auf ca. $120 \times 70\text{ mm}$ zugeschnitten und jeweils manuell auf der Düsenseite des Werkzeugs mittels doppelseitigem Klebeband im Werkzeug fixiert. Dabei zeigte in der Regel die fein mattierte Seite der Folie nach außen.

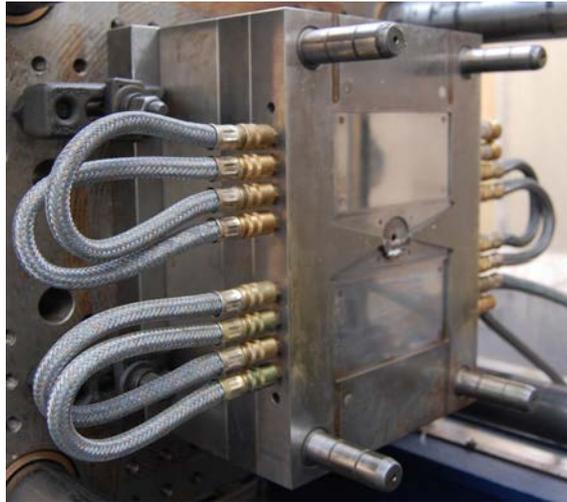


Abbildung 3.7: Plattenwerkzeug zur Durchführung der Hinterspritzversuche

3.4.3 Verformversuche

Die Verformversuche wurden im HPF-Verfahren an einer Anlage im Technikum von Bayer MaterialScience in Leverkusen durchgeführt. Es kam ein fassförmiges Positivwerkzeug mit abgeschrägten Seitenflächen zum Einsatz. Die feinmattierte Seite der bedruckten Folie zeigte zum Werkzeug. Die Verformung wurde mit folgenden Parametern durchgeführt:

- Folienheizung: 220 °C, 15 s,
- Werkzeugtemperatur: 80 °C,
- Lufttemperatur: 200 °C,
- Verformdruck: 100 bar,
- Verformzeit: 5 s.

4 Analysemethoden und Versuchsauswertung

4.1 Geometrische Charakterisierung und Oberflächencharakterisierung

Eine erste optische Bewertung von Druckergebnissen erfolgte meist am Lichtmikroskop Zeiss Axioskop 2, welches mit einer Kamera (AxioCam MRc) ausgestattet ist. Die Auswertung der Bilddaten erfolgte mit der Software AxioVision 4.5.

Zur Charakterisierung von Schichtdicken und Schichtmorphologien wurden u. a. das konfokale 3D-Laserscanmikroskop Keyence VK-9700, das Tastschnittgerät Veeco Dektak 8 und ein Weißlicht-Interferometer WYKO NT-2000 eingesetzt. Wichtige Kenngrößen der gedruckten Proben sind die lateralen Abmessungen der gedruckten Strukturen, die Schichtdicke d , der arithmetische Mittenrauwert R_a und die gemittelte Rautiefe R_z . Diese Kenngrößen lassen Rückschlüsse auf die erreichte Druckqualität zu und haben einen großen Einfluss auf die erreichbaren elektronischen Kennwerte.

4.2 Rheologische Charakterisierung

Die rheologischen Eigenschaften von Druckstoffen umfassen die dynamische und die kinematische Viskosität, die Thixotropie und die Zügigkeit (Tack) der Farbe. Diese Parameter beeinflussen die Verdruckbarkeit sowie die Schichtbildung der Druckstoffe auf dem Substrat und somit auch die zu erwartenden elektronischen Kennwerte in hohem Maße. Die dynamische Viskosität η eines Fluides ist ein Maß für seinen Widerstand gegen Schubspannungen und wird als Verhältnis von Schubspannung τ_S und Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}$ ausgedrückt:

$$\eta = \frac{\tau_S}{\dot{\gamma}} \quad (4.1)$$

Man unterscheidet prinzipiell zwischen Newtonschen und Nicht-Newtonschen Flüssigkeiten. Bei Newtonschen Flüssigkeiten steigt die Schubspannung linear mit der Schergeschwindigkeit an, d. h. die dynamische Viskosität ist konstant.

Nicht-Newtonsche Flüssigkeiten zeigen ein zeit- oder schergeschwindigkeitsabhängiges Verhalten. Materialien, deren dynamische Viskosität mit zunehmender Schergeschwindigkeit abnimmt, werden als strukturviskos bezeichnet. Im Gegensatz dazu bezeichnet der Begriff Dilatanz eine zunehmende dynamische Viskosität bei ansteigender Schergeschwindigkeit.

Die Begriffe Thixotropie und Rheopexie beschreiben zeitabhängige Strukturveränderungen des Fluides. In der Druckindustrie ist insbesondere die Strukturviskosität sowie die Thixotropie von Bedeutung.

Die rheologischen Messungen im Rahmen dieser Arbeit wurden mit dem Rotationsviskosimeter Anton Paar Physica MCR 301 durchgeführt. Zum Einsatz kam ein Kegel-Platte-System, wobei der Kegel einen Durchmesser von 50 mm und einen Winkel von 1° hatte. Während der Messung wurde die Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}$ von $0,1 \text{ s}^{-1}$ bis 5000 s^{-1} variiert, jeweils die Schubspannung τ_S ermittelt und die dynamische Viskosität η berechnet. Zur Ermittlung der Fließkurven wurden für jede Messreihe jeweils 48 Messpunkte mit einer Messpunktdauer von je 10 s aufgenommen.

4.3 Benetzbarkeit und Oberflächenspannung

Die Benetzbarkeit der zu bedruckenden Folien ist eine Grundvoraussetzung für den reproduzierbaren Druck definierter, leitfähiger Strukturen. Auch der Hinterspritzprozess und die zu erzielende Haftfestigkeit der hinterspritzten Folie am Bauteil wird durch die Benetzbarkeit der Folien beeinflusst. Charakterisiert wird die Benetzung durch den Kontaktwinkel Θ (Abbildung 4.1). Diese auch als Randwinkel oder Benetzungswinkel bezeichnete Größe ist ein Maß für die Benetzung eines Festkörpers durch eine Flüssigkeit.



Abbildung 4.1: Kräftegleichgewicht am liegenden Tropfen (modifiziert übernommen von Grundke^[127])

Es wird zwischen vollständiger Benetzung (Spreitung) ($\Theta = 0^\circ$), definierter Benetzung ($0^\circ < \Theta < 90^\circ$) und Nichtbenetzung ($90^\circ < \Theta < 180^\circ$) unterschieden (Abbildung 4.2).

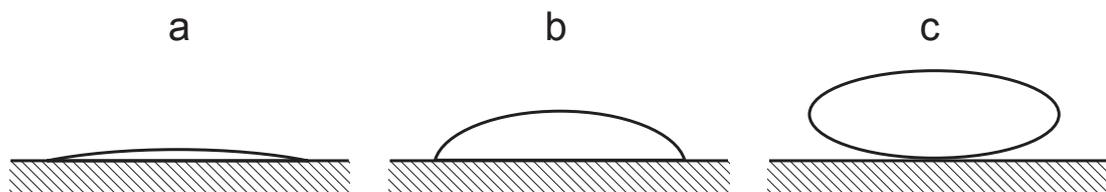


Abbildung 4.2: Schematische Darstellung typischer Benetzungsvarianten^[55]: a = völlige Benetzung, b = definierte Benetzung, c = Nichtbenetzbarkeit

Wird ein Flüssigkeitstropfen auf eine feste Oberfläche gesetzt, wird der Randwinkel durch die Grenzflächenspannungen Festkörper-Luft γ_{sv} , Flüssigkeit-Luft γ_{lv} und Festkörper-Flüssigkeit γ_{sl} beeinflusst^[127]. Die Grenzflächenspannung zwischen Festkörper und Luft

oder zwischen Flüssigkeit und Luft wird häufig auch als Oberflächenspannung bezeichnet. Auch die Begriffe Oberflächen- bzw. Grenzflächenenergie werden häufig verwendet. Die Young'sche Gleichung (Gleichung 4.2) stellt die Beziehung zwischen den genannten Größen her.

$$\cos \Theta = \frac{\gamma_{sv} - \gamma_{sl}}{\gamma_{lv}} \quad (4.2)$$

Eine Flüssigkeit spreitet auf einem Festkörper, wenn dadurch Energie gewonnen wird. Beim Spreitungsvorgang verringert sich γ_{sv} , während gleichzeitig γ_{sl} und γ_{lv} aufgewendet werden muss. Damit Spreitung auftritt, muss die Differenz der gewonnenen Energie und der aufgebrachten Energie positiv sein. Diese Differenz wird als Spreitungsdruck (p_{Sp}) bezeichnet und ist gleich der Differenz aus Adhäsionsarbeit (W_A) und Kohäsionsarbeit (W_K)^[128]:

$$p_{Sp} = \gamma_{sv} - (\gamma_{sl} + \gamma_{lv}) = W_A - W_K \quad (4.3)$$

Je größer der Spreitungsdruck, desto besser benetzt die Flüssigkeit die Festkörperoberfläche. Für eine vereinfachte Vorhersage der Benetzungseigenschaften einer Flüssigkeit auf einem Festkörper können γ_{lv} und γ_{sv} miteinander verglichen werden. Ist $\gamma_{lv} < \gamma_{sv}$, wird die freie Energie minimiert, indem die Kontaktfläche zwischen Flüssigkeit und Festkörper maximiert wird. Demnach benetzt die Flüssigkeit den Festkörper gut. Ist jedoch $\gamma_{lv} > \gamma_{sv}$, wird die freie Energie des Systems minimiert, indem die Kontaktfläche der beiden Komponenten minimiert wird, d. h. die Flüssigkeit benetzt den Feststoff nur partiell^[127,129].

Die Oberflächenspannung entsteht durch intermolekulare Wechselwirkungen, die auf unterschiedlichen Bindungsarten beruhen. Entsprechend diesen Bindungsarten wird die Oberflächenspannung in einen unpolaren, dispersen Anteil γ^d und einen polaren Anteil γ^p aufgeteilt:

$$\gamma = \gamma^d + \gamma^p \quad (4.4)$$

Der disperse Anteil beruht auf unpolaren Dispersionswechselwirkungen, der polare Anteil auf Dipolwechselwirkungen (einschließlich Wasserstoffbrückenbindungen) zwischen Atomen bzw. Molekülen^[55].

Die Bestimmung der Oberflächenspannung von Festkörpern und Flüssigkeiten erfolgte in der vorliegenden Arbeit mit Hilfe des Kontaktwinkelmessgeräts OCA 20 der DataPhysics Instruments GmbH. Zur Bestimmung der Oberflächenspannung der Substratfolien wurde die Methode des „sitzenden Tropfens“ (sessile drop method) eingesetzt. Die Standardtestflüssigkeiten destilliertes Wasser, Ethylenglycol und Diiodmethan werden auf den zu charakterisierenden Festkörper aufgetropft und jeweils der Kontaktwinkel bestimmt. Die Berechnung der Oberflächenenergie sowie des dispersen und polaren Anteils erfolgte nach Owens, Wendt, Rabel und Kälble^[130,131].

Die Oberflächenspannung von Flüssigkeiten wird mittels der Methode des „hängenden Tropfens“ (pendant drop method) bestimmt. An einer Kapillare wird ein Tropfen der zu vermessenden Flüssigkeit erzeugt. Die Tropfenkontur wird mit Hilfe der Software vermessen und die Oberflächenspannung bestimmt.

In der Drucktechnik kann sowohl die Oberflächenspannung des Druckstoffes γ_{lv} als auch des Bedruckstoffes γ_{sv} beeinflusst werden. Die Zugabe von Tensiden ist eine Möglichkeit

zur Herabsetzung der Oberflächenspannung eines Druckstoffes. Insbesondere bei wasserbasierten Farben wird diese Möglichkeit häufig angewendet. Die Oberflächenspannung der Substratfolie kann z. B. durch eine Coronabehandlung erhöht werden. Dabei wird eine hohe Wechsellspannung zwischen zwei sich gegenüberliegenden Elektroden angelegt, die zur Ausbildung eines Plasmas führt. Diese Elektronenemission führt zur Photonenemission sowie zur Ionisation und Dissoziation der Moleküle zwischen den Elektroden. Wird Luft als Arbeitsgas verwendet, bilden sich Radikale, Ionen, freie Elektronen, Ozon und Stickoxide. Die Entladung dieser Teilchen findet an der Kunststoffolie statt, die dadurch oxidiert und gleichzeitig statisch aufgeladen werden. Auch (meist unerwünschte) Vernetzungs- und Abbaureaktionen können beobachtet werden. Die Coronadosis ist daher jeweils auf die Anwendung einzustellen.

4.4 Mechanische Charakterisierung

4.4.1 Spannungs-Dehnungs-Verhalten der Folien

Zur besseren Einschätzung der Effekte bei der Verformung der bedruckten Folien wurde zunächst das Spannungs-Dehnungs-Verhalten der Folien charakterisiert. Zur mechanischen Charakterisierung wurden Zugversuche mit bedruckten und unbedruckten Substratfolien durchgeführt. Diese wurden auf einer Zugmaschine der Firma Hounsfield unter Verwendung einer 1000-N-Messzelle (HTE-1000N) durchgeführt. Die Messungen wurden bei Raumtemperatur (22 °C) durchgeführt. Die Proben wurden auf eine Breite von 2 cm zugeschnitten, die Einspannlänge betrug 48 mm. Die Folienstreifen wurden mittels Schraubklemmen eingespannt und mit einer konstanten Geschwindigkeit von 50 mm/min auseinander gezogen. Die dafür nötige Kraft wurde im Zeitabstand von 0,01 s gemessen. Anhand der aufgezeichneten Daten wurden die Dehnung ϵ anhand

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (4.5)$$

sowie die Spannung σ nach

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (4.6)$$

ermittelt und im Spannungs-Dehnungs-Diagramm dargestellt. Dabei sind ΔL die Längenänderung, L_0 die Anfangslänge, F die Kraft und A_0 der Querschnitt der Probe im undeformierten Zustand. Folgende Festigkeitskennwerte können dem Spannungs-Dehnungs-Diagramm entnommen werden^[132,133]:

die Streckspannung σ_Y ist die Zugspannung, bei der der Anstieg der Spannungs-Dehnungs-Kurve erstmalig den Wert Null annimmt,

die Zugfestigkeit σ_M ist die maximale Zugspannung bei Höchstkraft und

die Bruchspannung σ_B ist die Spannung beim Bruch.

Die dazugehörigen Verformungskennwerte sind

die Streckdehnung ϵ_Y – die der Streckspannung zugeordnete Dehnung,

die **Bruchdehnung** ε_B – die Dehnung im Augenblick des Reißens, sofern der Werkstoff vorher keine Streckspannung durchlaufen hat, und

die **nominale Bruchdehnung** ε_{tB} – die Dehnung beim Bruch des Werkstoffes, nachdem eine Streckspannung durchlaufen wurde.

4.4.2 Schälfestigkeit hinterspritzter Folien

Die Haftung der hinterspritzten Folien stellt ein wichtiges Qualitätskriterium des fertigen Bauteils dar. Zur Charakterisierung der Haftfestigkeit der Folien wurde die Schälfestigkeit ermittelt. Schälbeanspruchung ist für Verbindungen besonders ungünstig, da ein linienförmiger Lastangriff stattfindet. Zur Untersuchung der Schälfestigkeit der hinterspritzten Folien wurden Zugversuche an einer Universalprüfmaschine INSPEKT 10 der Firma Hegewald & Peschke durchgeführt. Es wurden eine 10-kN-Kraftmesszelle sowie pneumatische Probenhalter (Zwick 8497 und 8297) verwendet. Die Prüfungen wurden als 90°-Schälversuch in Anlehnung an die DIN EN 28510-1^[134] durchgeführt. Dieser Versuchsaufbau wird gewählt, wenn die Schälfestigkeit zwischen einem starren und einem flexiblen Fügepart untersuchen soll^[55,135].

Bei der Herstellung der Proben wurden 25 mm breite Folienstreifen mit variierter Vorbehandlung und variiertem Druckbild hinterspritzt. Die Folien wurden bei einer Testgeschwindigkeit von 50 mm/min in einem Winkel von 90° abgezogen. Für diese Untersuchungen wurde vorab eine spezielle Probenaufnahme (Abbildung 4.3) für die Kunststoffplatten konstruiert und gefertigt.

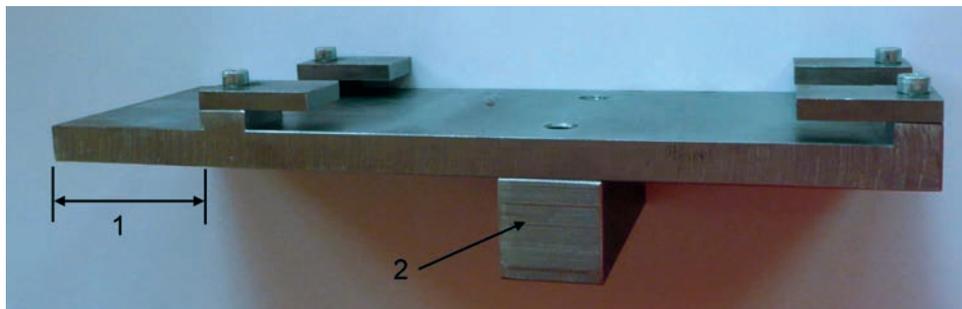


Abbildung 4.3: Probenaufnahme zur Untersuchung der Schälfestigkeit^[136]: 1) Halterung zur Durchführung von 180°-Schälversuchen; 2) Halterung zur Durchführung von 90°-Schälversuchen

Tabelle 4.1 gibt einen Überblick über die Proben zur Ermittlung der Schälfestigkeit. Alle Probenvarianten wurden je zehnfach mit beiden verfügbaren Folienstärken 100 μm und 200 μm hergestellt. Die Proben mit einer relativen Flächendeckung FD von 19 % und 50 % wurden im Flexodruckverfahren bedruckt. Bei dem Druckbild mit $FD = 19\%$ handelt es sich um eine Gitterstruktur. Das Druckbild mit $FD = 50\%$ ist streifenförmig. Die vollflächig bedruckten Proben wurden im Siebdruck hergestellt.

Tabelle 4.1: Überblick über die Proben zur Ermittlung der Schälfestigkeit

Kürzel	Beschreibung
VS	unbedruckte Vorderseite (hochglänzend) innenliegend
RS	unbedruckte Rückseite (fein mattiert) innenliegend
C	Vorderseite mit Coronavorbehandlung
FD19	Vorderseite, bedruckt mit Agfa Orgacon EL-P 3042, $FD = 19\%$
FD50	Vorderseite, bedruckt mit Agfa Orgacon EL-P 3042, $FD = 50\%$
FD100	Vorderseite, vollflächig bedruckt mit Agfa Orgacon EL-P 3042, $FD = 100\%$

Aus der gemessenen Kraft F und der Probenbreite b wird die Schälfestigkeit σ' berechnet:

$$\sigma' = \frac{F}{b} \quad (4.7)$$

Die Schälfestigkeit gibt den Widerstand gegen Schälbeanspruchung bezogen auf die Breite der Fuge an. Das Anreißen erfordert meist eine deutlich höhere Kraft als das eigentliche fortlaufende Schälen. Aus diesem Grund wird zwischen absoluter Schälfestigkeit σ'_{abs} (Schälbeginn) und relativer Schälfestigkeit σ'_{rel} (fortlaufendes Schälen) unterschieden^[137].

Abbildung 4.4 stellt den typischen Verlauf einer Schälkraft-Kurve dar. Zunächst zeigt die Kurve einen annähernd linearen Anstieg – die Folie wird gedehnt. Anschließend erfolgt der Anriss und die Folie wird abgeschält. Die dargestellte mittlere Schälkraft F wird zur Ermittlung der relativen Schälfestigkeit σ'_{rel} nach Gleichung 4.7 herangezogen.

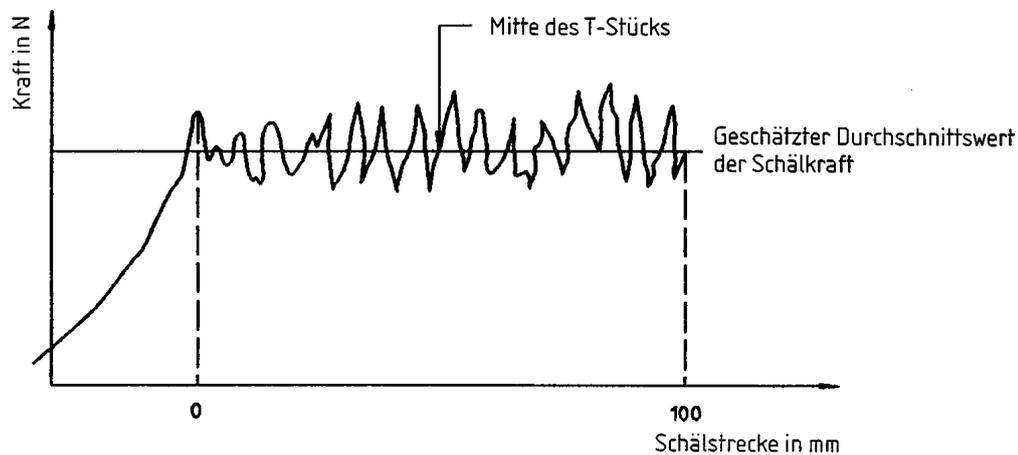


Abbildung 4.4: Typische Schälkraft-Kurve beim 90°-Schälversuch^[134]

4.5 Elektrische Charakterisierung

4.5.1 Elektrischer Widerstand

Der elektrische Widerstand als wichtigste Kenngröße gedruckter Leiterbahnen wurde vor allem zur Einschätzung der Druckqualität der elektrisch leitfähigen Schichten sowie der Beeinflussung durch nachfolgende Verarbeitungsschritte ermittelt. Die Messung des elektrischen Widerstandes von gedruckten Schichten sowie von Durchkontaktierungen erfolgte als Vier-Spitzen-Messung an einem Keithley Source-Meter oder mittels Digitalmultimeter. Zur Beurteilung der Druckqualität und für eine bessere Vergleichbarkeit der gemessenen Widerstände wurde der elektrische Schichtwiderstand R_S nach

$$R_S = R \cdot \frac{b_L}{l_L} \quad (4.8)$$

ermittelt. Dabei sind R der gemessene Widerstand und b_L und l_L die Breite und Länge der gedruckten Leiterbahn. Die Formel gilt unter der Bedingung $b_L \ll l_L$.

4.5.2 Kapazitätsmessungen

Die Kapazitätsmessung ist die wichtigste Charakterisierungsmethode für die gedruckten, hinterspritzten Speicherstrukturen, weil damit direkt die Auslesbarkeit dieser Strukturen beurteilt werden kann. Mit Hilfe des Präzisions-RC-Meters Agilent E4980A wurden die Kapazitäten der Anordnung bei verschiedenen Frequenzen gemessen. Abbildung 4.5 zeigt den prinzipiellen Aufbau der hinterspritzten Speicherstrukturen im Querschnitt sowie das Ersatzschaltbild der Anordnung. Die zu speichernde Information kann z. B. in Form von vorhandenen und nicht vorhandenen Verbindungsbrücken zwischen den beiden Kondensatorflächen repräsentiert werden. Die Kapazitätsmessung erfolgt zwischen den beiden Messelektroden, die genau über den Koppelflächen des Speicherelementes angeordnet werden.

Der Aufbau entspricht zwei in Reihe geschalteten Plattenkondensatoren, die durch einen gedruckten Leiterzug miteinander verbunden sind (RC-Reihenschaltung). Geht man von gleich großen Koppelflächen aus, ergibt sich die Einzelkapazität $C_e = C_1 = C_2$ aus der gemessenen Kapazität C_{ges} wie folgt:

$$C_e = 2 \cdot C_{ges} \quad (4.9)$$

Die Einzelkapazität C_e wird durch die Elektrodenfläche A_K sowie die Eigenschaften des Dielektrikums beeinflusst. Streng genommen stellt die Einzelkapazität C_e eine Reihenschaltung aus der Kapazität des Luftspaltes zwischen Messelektrode und Folie und der Kapazität der Folie dar. Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Messelektroden direkt auf die Rückseite der Folie gedruckt, um den Einfluss des Luftspaltes auszuschließen. Die Einzelkapazität C_e wird somit von der Foliendicke d_F und der relativen Permittivität der Folie $\epsilon_r = 3$ ^[124] beeinflusst und berechnet sich nach

$$C_e = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{A_K}{d_F}, \quad (4.10)$$

wobei ϵ_0 die elektrische Feldkonstante ist.

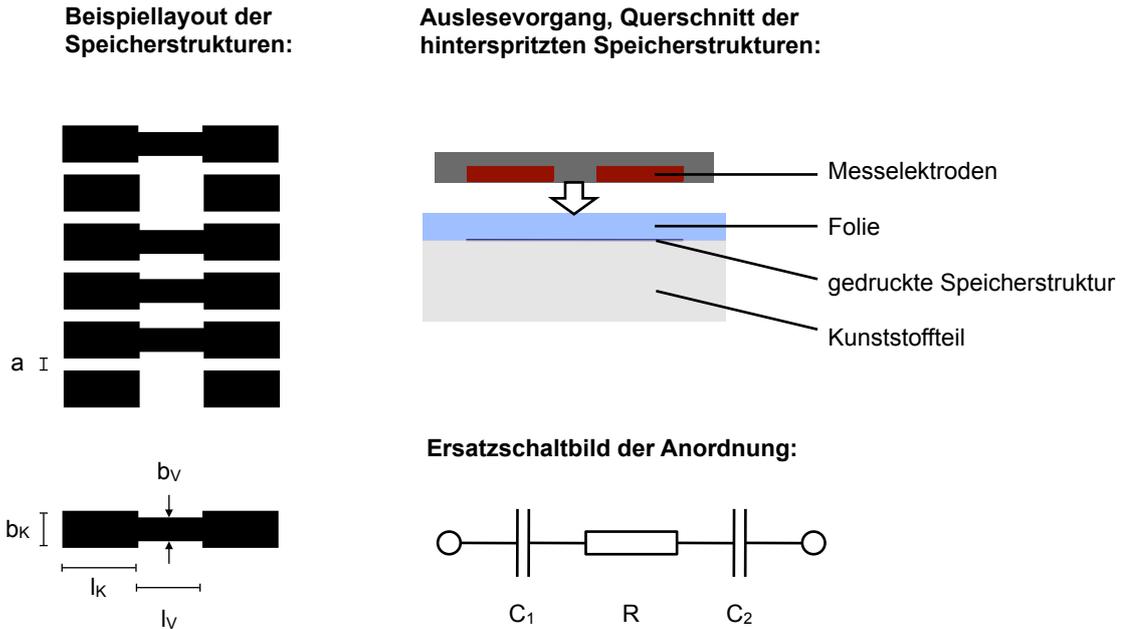


Abbildung 4.5: links: Layout der Speicherstrukturen (b_K/l_K – Breite/Länge der Koppelfläche, b_V/l_V – Breite/Länge der Verbindungsleitbahn, a – Abstand zwischen zwei Koppelflächen), rechts: Messkonfiguration und Ersatzschaltbild der hinterspritzten Speicherstrukturen

Im Wechselstromkreis wirkt der Kondensator als frequenzabhängiger Widerstand und wird durch den kapazitiven Blindwiderstand X_C charakterisiert:

$$X_C = -\frac{1}{\omega C} = -\frac{1}{2\pi f C} \quad (4.11)$$

Der Scheinwiderstand Z einer RC-Reihenschaltung berechnet sich nach

$$Z = |\underline{Z}| = \sqrt{R^2 + X_C^2} \quad (4.12)$$

Dabei ist \underline{Z} die Impedanz (komplexer Wechselstromwiderstand). Die Frequenz, bei der der Wirkwiderstand R gleich dem Blindwiderstand X_C ist, wird als Grenzfrequenz f_g bezeichnet. Die Grenzfrequenz kann auch in Abhängigkeit der Zeitkonstante τ , die das Lade- und Entladeverhalten eines Kondensators charakterisiert, dargestellt werden:

$$f_G = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi\tau} \quad (4.13)$$

Die Gleichung verdeutlicht, dass f_g indirekt proportional zu Widerstand und Kapazität der Anordnung ist. Die Amplitude des Ausgangssignals bei der Grenzfrequenz f_g beträgt das $\frac{1}{\sqrt{2}}$ -fache (70,7 %) des Eingangssignals und sinkt bei höheren Frequenzen weiter ab. Bei der Grenzfrequenz ist das Ausgangssignal zum Eingangssignal um 45° phasenverschoben.

Die Kapazitätsmessungen in der vorliegenden Arbeit erfolgten zum einen statisch und zum anderen seriell mit Hilfe eines speziell für diesen Zweck konzipierten Messplatzes

(Abbildung 4.6). Für die statischen Messungen wurden die Messelektroden direkt auf die hinterspritzte Folie gedruckt (Silberleitpaste) und mittels Messspitzen kontaktiert. Somit konnten eine genaue Positionierung der Messelektroden zu den Koppelelektroden erreicht und die Messung verfälschende Lufteinschlüsse verhindert werden.

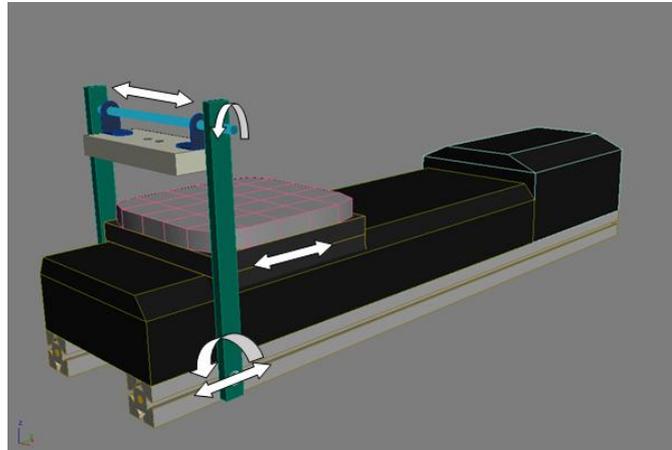


Abbildung 4.6: Modell des seriellen Kapazitätsmessplatzes^[138]

Bei der seriellen Messung wurden Messelektroden direkt auf die hinterspritzte Probe aufgesetzt. Die Probe wurde mit konstanter Geschwindigkeit unter den Messelektroden hindurchgeführt und laufend die Kapazität zwischen den Messelektroden gemessen. Der genaue Aufbau des seriellen Messplatzes kann der Projektarbeit von Marko Illing^[138] entnommen werden.

Die elektrische Charakterisierung wurde ausschließlich in einem klimatisierten Labor durchgeführt. Die durchschnittliche Raumtemperatur beträgt 21 °C und die mittlere relative Luftfeuchte 50 %.

4.6 Untersuchung von Umwelteinflüssen

Für praktische Anwendungen sind Abschätzungen der Funktionalität bei Beeinflussung durch wechselnde Umweltbedingungen essentiell. Die Auswirkungen von Umwelteinflüssen wurden anhand von Kapazitätsmessungen im Klimaschrank untersucht. Es wurden drei Messreihen durchgeführt:

- Feuchtewechsel,
- Temperaturwechsel und
- feuchte Wärme.

Die Messbedingungen sind in Tabelle 4.2 aufgeführt.

Auch für diese Messungen wurden die Messelektroden direkt auf die Rückseite der integrierten Speicherstrukturen gedruckt. Auf diesen Messelektroden wurden Kabel mittels Silberleitlack und Klebeband kontaktiert und mechanisch fixiert.

Tabelle 4.2: Messbedingungen der klimatischen Untersuchungen

	Feuchtewechsel	Temperaturwechsel	Feuchte Wärme
Temperatur T	20 °C	10 °C to 40 °C	85 °C
relative Luftfeuchte RH	25 % to 95 %	50 %	85 %
Anzahl der Zyklen	20	15	(26 h)
Messfrequenz f	1 kHz	1 kHz	1 kHz

4.7 Charakterisierung der elektrolumineszenten Anzeigen

Die gedruckten bzw. hinterspritzten EL-Leuchten wurden hinsichtlich ihrer optischen Eigenschaften charakterisiert und bewertet. Dafür wurden sie an den seitlich überstehenden Elektroden mittels Klemmen kontaktiert und mit Hilfe eines Spektralfotometers und eines Optometers charakterisiert. Die Ansteuerung erfolgte durch einen sogenannten EL-Inverter Folnet 3 der Firma BMR GmbH. Das Gerät liefert eine Ausgangsspannung von 0 V to 100 V sowie eine Ausgangsfrequenz im Bereich von 400 Hz to 1000 Hz. Der EL-Inverter kann laut Datenblatt EL-Folien bis zu einer Fläche von 1243 cm² (entspricht dem DIN-A3-Format) ansteuern. Darüber hinaus können verschiedene Effekte, z. B. Blitzen, Blinken oder Pulsieren, eingestellt werden.

Mit Hilfe des Spektralfotometers GretagMacbeth Spectrolino wurde das Leuchtspektrum bzw. die Intensitätsverteilung in einem Wellenlängenbereich von 380 nm bis 730 nm sowie die Leuchtdichte L_v gemessen. Die Leuchtdichte ist ein Maß für die Helligkeit von flächenhaften Lichtquellen und entspricht dem Quotienten aus der Lichtstärke I_v und der Fläche A :

$$L_v = \frac{dI_v}{dA} \quad (4.14)$$

Das Spectrolino wurde während der Messung direkt auf die Probe aufgesetzt. Die Messungen wurden als absolute Messungen im Emissionsmodus durchgeführt.

Darüber hinaus wurde die von der menschlichen Wahrnehmung unabhängige, radiometrische Größe Bestrahlungsstärke E_e mit dem Optometer P-9710 von Gigahertz-Optik bestimmt. Die Bestrahlungsstärke ist eine Empfängergröße und ein Maß für die Leistung der eingehenden, elektromagnetischen Energie pro Fläche. Die Bestrahlungsstärke ist als Strahlungsfluss $d\Phi$ pro Fläche dA definiert und besitzt die Einheit W/m²:

$$E_e = \frac{d\Phi}{dA} \quad (4.15)$$

Die Messungen wurden mit dem radiometrischen Messkopf RW-3703-2 durchgeführt. Dabei wurde dieser direkt auf die EL-Leuchte aufgesetzt. Es wurde im kontinuierlichen Modus (CW-mode) gearbeitet, d. h. es wurden fortlaufend Messwerte aufgenommen.

5 Ergebnisse und Diskussion

5.1 Eigenschaften der Bedruckstoffe

5.1.1 Foliendicke und Rauheit

Die gemessenen Stärken verschiedener Chargen der Folie Makrofol[®] DE 1-4 betragen $100,1 \pm 1,0 \mu\text{m}$ für die nominell $100 \mu\text{m}$ dicke Folie und $200,2 \pm 0,9 \mu\text{m}$ für die nominell $200 \mu\text{m}$ dicke Folie. Die Schwankungen der Folienstärke sind somit sehr gering.

Die Rauheit der Makrofol[®] DE 1-4 auf der Vorderseite unterscheidet sich stark von der auf der Rückseite der Folie. Die Bezeichnung Vorderseite bezieht sich immer auf die 1er Seite, d. h. die hochglänzende Seite. Als Rückseite wird die 4er Seite (fein mattiert) bezeichnet. Tabelle 5.1 fasst die gemessenen arithmetischen Mittenrauwerte sowie die gemittelten Rautiefen für beide Folienseiten zusammen.

Tabelle 5.1: Rauheitskennwerte der Makrofol[®] DE 1-4

Folienseite	R_a	R_z
Vorderseite	$10 \pm 2 \text{ nm}$	$41 \pm 6 \text{ nm}$
Rückseite	$857 \pm 65 \text{ nm}$	$5,27 \pm 0,35 \mu\text{m}$

5.1.2 Mechanische Eigenschaften

In Zugversuchen wurden die grundlegenden Festigkeits- und Verformungseigenschaften der Makrofol[®] DE 1-4 ermittelt. Abbildung 5.1 zeigt das Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Folien. Tabelle 5.2 stellt die ermittelten Kennwerte gegenüber. Zum Vergleich sind die der Literatur entnommenen Werte für PC (Standardtyp) angegeben. Die Folien sind sehr zäh und zeigen eine deutlich ausgeprägte Streckspannung.

Tabelle 5.2: Festigkeits- und Verformungskennwerte der Makrofol[®] DE 1-4

Foliendicke	σ_Y in mN/mm^2	ε_Y in %	σ_B in mN/mm^2	ε_{tB} in %
$100 \mu\text{m}$	56,1	6,2	61,2	108,4
$200 \mu\text{m}$	61,0	7,0	68,3	117,3
PC (Standardtyp) ^[139]	> 55	6	> 65	110

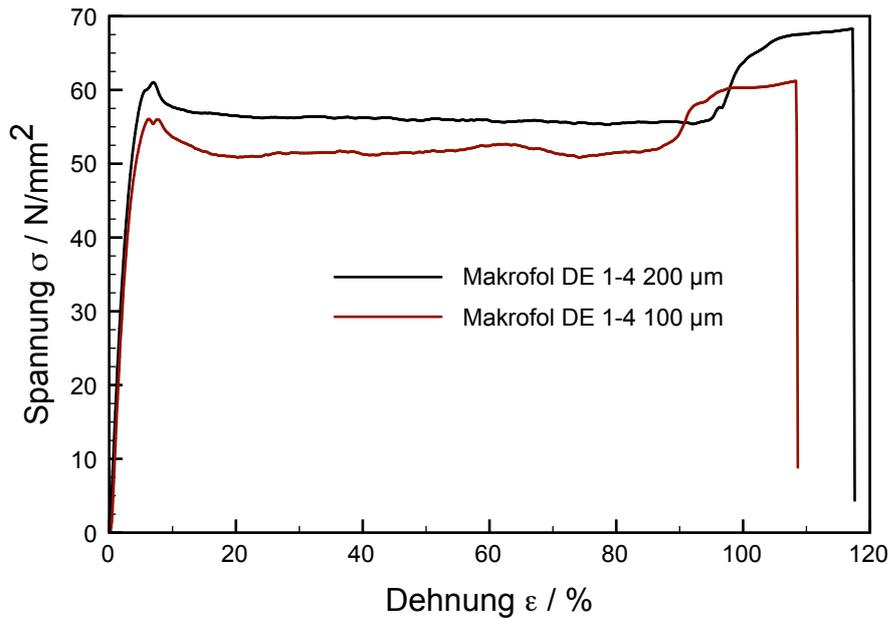


Abbildung 5.1: Spannungs-Dehnungs-Diagramm von Makrofol® DE 1-4

5.1.3 Oberflächenspannung

Abbildung 5.2 zeigt die Oberflächenspannung γ_{sv} der verwendeten Folie Makrofol® DE 1-4. Die vergleichsweise hohen Werte von 45,7 mN/m auf der Vorderseite und 49,8 mN/m auf der Rückseite ermöglichen eine gute Benetzung einer großen Bandbreite von Druckstoffen. Durch eine Coronabehandlung der Vorderseite wird die Oberflächenspannung insgesamt nur wenig auf 47,1 mN/m erhöht. Der polare Anteil kann jedoch deutlich von 0,1 % auf 17,9 % gesteigert werden. Damit ist eine deutlich bessere Benetzung durch polare Druckstoffe zu erwarten. Zum Vergleich und zur Einordnung der Werte sind in Tabelle 5.3 die Oberflächenspannungen für einige häufig verwendete Polymere angegeben.

Tabelle 5.3: Oberflächenspannungen verschiedener Polymere, gemessen bei 20 °C^[140]

Bezeichnung	γ_{sv} in mN/m	γ^d in mN/m	γ^p in mN/m
Polyamid (PA) (PA-12)	40,7	35,9	4,9
Polyethylen (PE)	35,7	35,7	0,0
Polypropylen (PP)	30,1	30,1	0,0
Polymethylmethacrylat (PMMA)	40,0	29,7	10,3
Polyethylenterephthalat (PET)	44,6	35,6	9,0

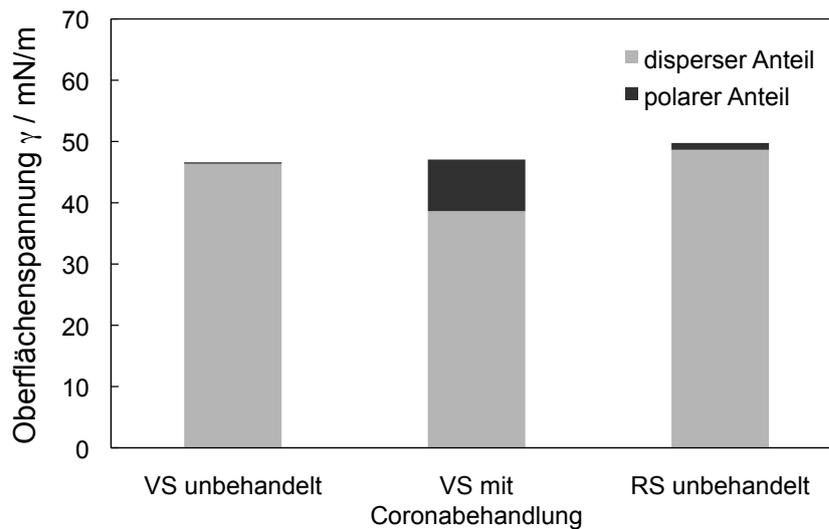


Abbildung 5.2: Oberflächenspannung von Makrofol[®] DE 1-4 (VS – Vorderseite, RS – Rückseite)

5.2 Eigenschaften der Druckstoffe

5.2.1 Rheologische Eigenschaften

Die rheologischen Eigenschaften der verwendeten Druckfarben wurden wie in Abschnitt 4.2 beschrieben ermittelt. Abbildung 5.3 zeigt die Ergebnisse der Schubspannungsmessungen an ausgewählten PEDOT:PSS-Formulierungen. Beide Materialien zeigen ein strukturviskoses Verhalten, d. h. die dynamische Viskosität η sinkt mit zunehmender Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}$. Die dynamische Viskosität der Agfa Orgacon EL-P 3040 beträgt 1,08 Pa s bei einer Schergeschwindigkeit von 100 s^{-1} . Der Wert der Orgacon EL-P 3042 liegt mit 453 mPa s bei 100 s^{-1} deutlich darunter. Die dynamische Viskosität der Formulierung F1/4 basierend auf H.C. Starck CleviosTMP beträgt 483 mPa s bei 100 s^{-1} . Diese Werte liegen im oberen Bereich der für das Flexodruckverfahren geeigneten Farben und im unteren Viskositätsbereich von Siebdruckfarben.

5.2.2 Oberflächenspannung

Die Oberflächenspannung der verwendeten Druckstoffe γ_{lv} wurde mit der Methode des „hängenden Tropfens“ bestimmt (vgl. Abschnitt 4.3). In Tabelle 5.4 sind die gemessenen Werte gegenübergestellt. Die Oberflächenspannungen der Druckstoffe liegen unterhalb der der Substratfolien – es ist somit eine gute Benetzung zu erwarten.

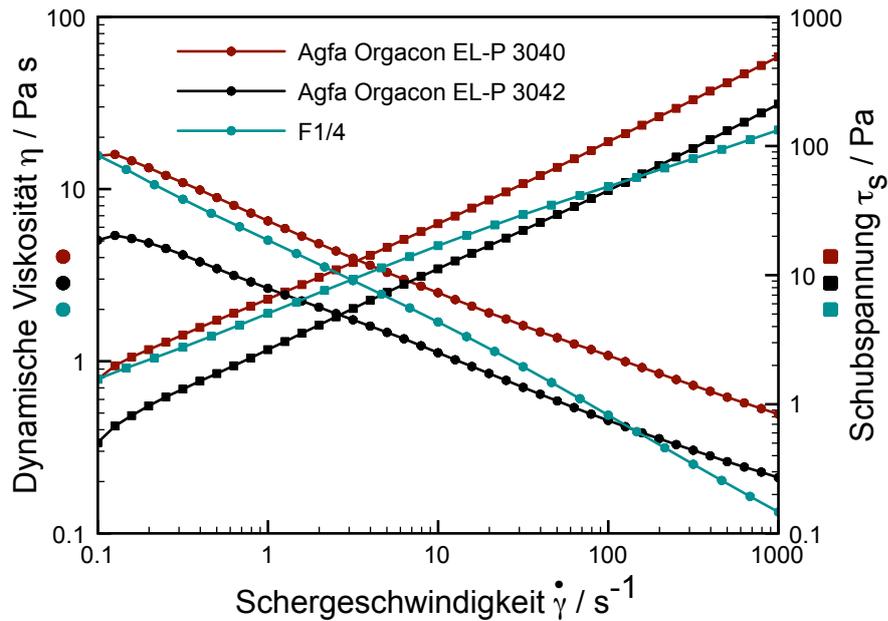


Abbildung 5.3: Fließkurven ausgewählter Druckstoffe

Tabelle 5.4: Oberflächenspannung von ausgewählten Druckstoffen

Druckstoff	γ_{lv} / mN/m
Agfa Orgacon EL-P 3040	24,5
Agfa Orgacon EL-P 3042	37,3
H.C. Starck Clevios TM P Formulierung F1/4	32,4

5.3 Elektrische Eigenschaften vor und nach dem Hinterspritzen

5.3.1 Elektrischer Widerstand

Für die Untersuchung der Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes von gedruckten PEDOT:PSS-Schichten wurden mit dem Material Agfa Orgacon EL-P 5020 Linienstrukturen mittels Siebdruck auf Glas gedruckt. Die Proben wurden auf einer Heizplatte auf die jeweilige Temperatur erhitzt und der elektrische Schichtwiderstand R_S in definierten Zeitabständen mittels Zweipunktmessung bestimmt.

Abbildung 5.4 zeigt die Ergebnisse dieser Untersuchungen. Es ist deutlich zu erkennen, dass Temperaturen ≤ 250 °C nur zu einer geringfügigen Erhöhung des elektrischen Widerstandes führen. Bei einer Temperatur von 275 °C steigt der Schichtwiderstand nach ca. 3 min stärker an. Temperaturen im Bereich von 300 °C führen umgehend zu einer Erhöhung des elektrischen Widerstandes.

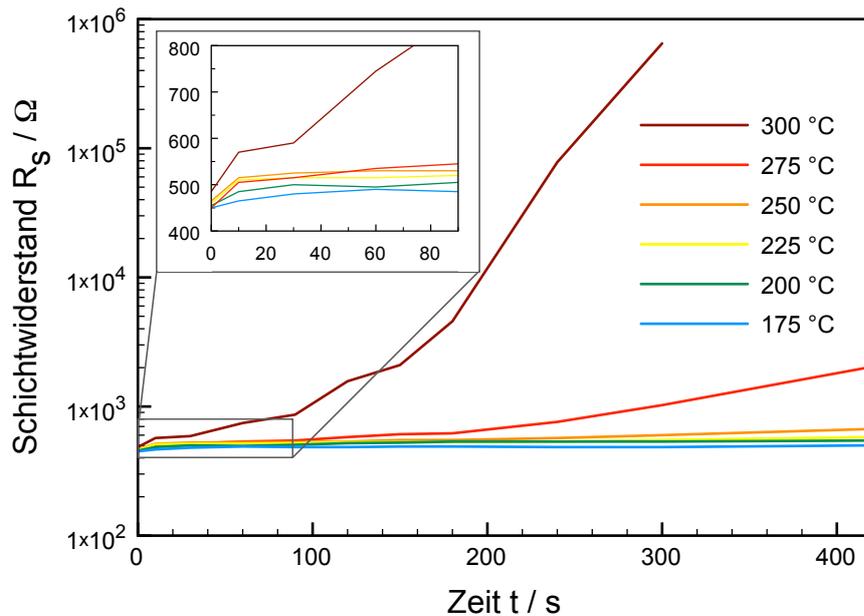


Abbildung 5.4: Schichtwiderstand gedruckter PEDOT:PSS-Strukturen in Abhängigkeit der Temperaturbelastung an Luft^[141]

In Simulationen des Temperaturverlaufes nach dem Füllvorgang beim Folienhinterspritzen wurde gezeigt, dass sich bei hinterspritzten Formteilen aufgrund des geringen Wärmedurchgangskoeffizienten durch die Dekorfolie ein höheres Temperaturniveau gegenüber nicht hinterspritzter Bauteile einstellt. Wielpütz^[110] zeigte, dass bei einer Massetemperatur von 240 °C und einer Werkzeugtemperatur von 45 °C die Temperaturen im Formteil zum Zeitpunkt der volumetrischen Füllung zwischen 200 °C und 240 °C liegen, wobei die Maximaltemperatur nur im Bereich des Angusses auftritt. Bei einer Massetemperatur von 280 °C und einer Werkzeugtemperatur von 80 °C, wie in vorliegender Arbeit genutzt, und der angussfernen Positionierung der Hinterspritzfolie kann davon ausgegangen werden, dass die Temperaturen im Bereich der Hinterspritzfolie 260 °C nicht überschreiten. Diese kurzfristige Temperaturbelastung sollte somit nur einen geringfügigen Einfluss auf die elektrische Leitfähigkeit der hinterspritzten Leiterbahnen haben.

Der Schichtwiderstand wird durch weitere Faktoren beeinflusst. In Abbildung 5.5 links ist beispielhaft der Einfluss der Druckgeschwindigkeit sowie der Einfluss einer Folienvorbehandlung dargestellt. In beiden Abbildungen ist zu erkennen, dass der Schichtwiderstand in Druckrichtung tendenziell geringer ist als quer zur Druckrichtung.

Mit zunehmender Druckgeschwindigkeit nehmen die Schichtwiderstände ab. Deutlich zu erkennen ist auch die Verringerung der Abweichungen zwischen verschiedenen Messungen, d. h. höhere Druckgeschwindigkeiten führen im Allgemeinen zu geringeren Schichtwiderständen, die zudem geringeren Schwankungen unterworfen sind.

Im rechten Teil der Abbildung 5.5 ist der Einfluss einer Coronavorbehandlung des Bedruckstoffes dargestellt. Auf vorbehandelten Polycarbonatfolien sind mit den wasserbasierten Druckstoffen, wie sie im Rahmen dieser Arbeit verwendet wurden, wesentlich geringere

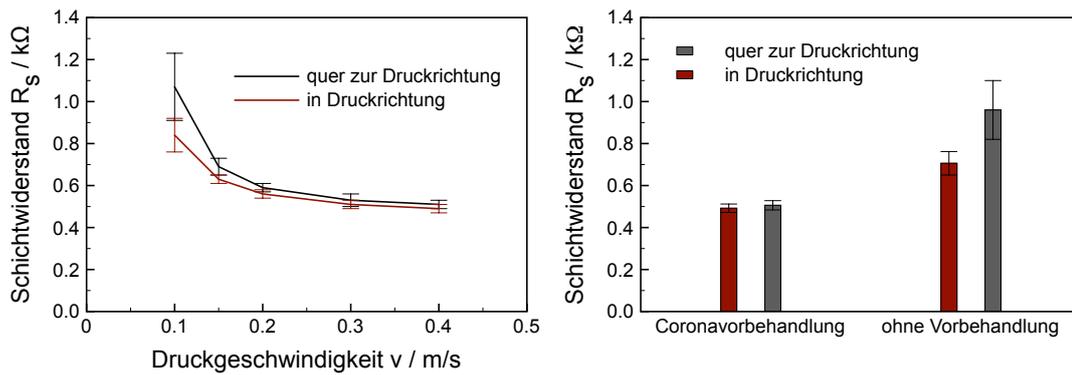


Abbildung 5.5: Schichtwiderstand beim Flexodruck in Abhängigkeit der Druckgeschwindigkeit (links) und der Vorbehandlung bei einer Druckgeschwindigkeit von $0,4 m/s$ (rechts)

Schichtwiderstände erzielbar. Zudem ist auch hier gut zu erkennen, dass die Schwankungen der Messwerte auf nicht vorbehandelten Substraten deutlich höher sind als auf vorbehandelten Folien. Dies ist auf eine gleichmäßigere Benetzung zurückzuführen.

Bestätigt werden die in Abbildung 5.5 dargestellten Messergebnisse auch durch Mikroskopaufnahmen der gedruckten Strukturen. Die für den Flexodruck typischen Quetschränder werden mit zunehmender Druckgeschwindigkeit breiter (Abbildung 5.6). Vermutlich tragen diese Materialanhäufungen bei den „fischgrätenartigen“ Strukturen zu einer signifikanten Verringerung des Schichtwiderstandes bei. Weitere Ausführungen zur Ausbildung dieser charakteristischen Strukturen (viscous fingering) wurden von Reuter et al. veröffentlicht^[76] und sind nicht Gegenstand dieser Arbeit.

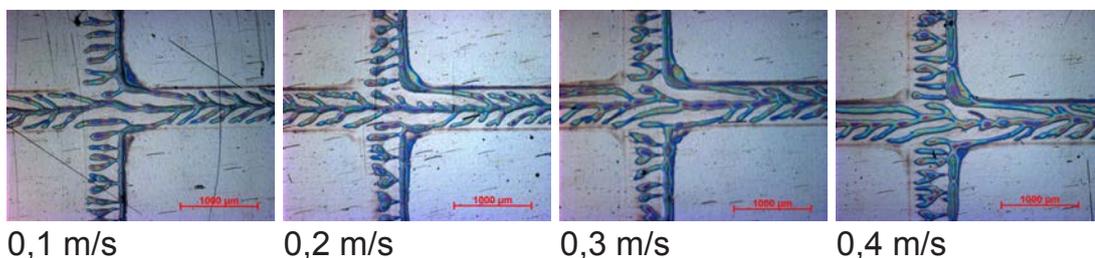


Abbildung 5.6: Mikroskopaufnahmen von im Flexodruck hergestellten Leitbahnen bei verschiedenen Druckgeschwindigkeiten

Abbildung 5.7 stellt die Mikroskopaufnahmen einer Leitbahn auf coronabehandelter Folie und unbehandelte Folie gegenüber. Die Benetzung auf der vorbehandelten Folie ist deutlich besser und gleichmäßiger.

In weiteren Versuchen wurde die Beeinflussung des elektrischen Schichtwiderstandes von gedruckten Leitbahnen durch den eigentlichen Hinterspritzvorgang untersucht. Dafür wurden zunächst Leitbahnen verschiedener Breite im Flexodruck mit Hilfe verschiedener Rasterwalzen hergestellt. Es kam zum einen die RW 2 mit einem Schöpfvolumen von $25,36 cm^3/m^2$

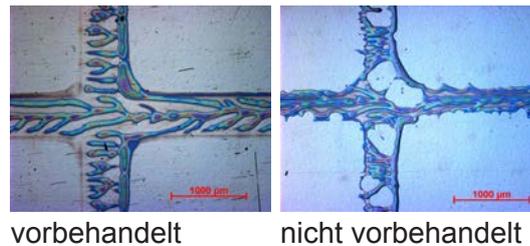


Abbildung 5.7: Mikroskopaufnahmen von im Flexodruck hergestellten Leitbahnen mit und ohne Coronavorbehandlung des Bedruckstoffes bei einer Druckgeschwindigkeit von 0,4 m/s

und zum anderen die RW 4 mit einem Schöpfvolumen von $10,2 \text{ cm}^3/\text{m}^2$ zum Einsatz. Es handelt sich bei beiden Rasterwalzen um Chromwalzen (vgl. auch 3.2). Als Druckstoff wurde für diesen Versuch das Material Agfa Orgacon EL-P 3042 verwendet.

Zur möglichst genauen Bestimmung der elektrischen Widerstände wurden die Leitbahnen mit kleinen Kontaktpads und Zuleitungen aus Silberleitlack versehen. Die effektive Leitbahnlänge des leitfähigen Polymers betrug 45 mm. Die Zuleitungen ermöglichten die Widerstandsmessung vor und nach dem Hinterspritzen, da sie beim Folienhinterspritzen seitlich herausgeführt wurden, d. h. die bedruckte Folie steht im fertiggestellten Kunststoffteil etwas über. Die Beeinflussung des gemessenen Widerstandes durch die Zuleitung ist vernachlässigbar klein, da der elektrische Widerstand des leitfähigen Polymers ca. um den Faktor 1000 größer als der Widerstand des Silberleitlacks ist.

Abbildung 5.8 zeigt die gemessenen Schichtwiderstände der gedruckten Leitbahnen vor und nach dem Hinterspritzen. Aus dem Diagramm geht hervor, dass ein hohes Schöpfvolumen der Rasterwalze aufgrund der übertragenen Materialmenge zu einem geringeren Schichtwiderstand führt. Außerdem sind die Abweichungen zwischen den einzelnen Proben, die mit der Rasterwalze 2 hergestellt wurden, geringer. Darüber hinaus kann festgestellt werden, dass der Einfluss der nominellen Linienbreite auf den Schichtwiderstand bei Verwendung der Rasterwalze mit höherem Schöpfvolumen geringer ist als bei Verwendung der Rasterwalze mit geringerem Schöpfvolumen. Dies deutet darauf hin, dass sehr schmale Linien mit der feinen Rasterwalze nicht vollständig gedruckt werden.

Der Hinterspritzvorgang führt zu einer leichten Erhöhung des Schichtwiderstandes. Bei den Strukturen, die mit der Rasterwalze mit einem Schöpfvolumen von $10,2 \text{ cm}^3/\text{m}^2$ hergestellt wurden, beträgt die durchschnittliche Erhöhung 6,7%. Sind die Schichtwiderstände vor dem Hinterspritzen bereits geringer, ist auch die Erhöhung durch den Hinterspritzvorgang nicht so stark. Der Schichtwiderstand der Strukturen, die mit der Rasterwalze 2 (Schöpfvolumen $25,36 \text{ cm}^3/\text{m}^2$) hergestellt wurden, hat sich durchschnittlich um 1,7% erhöht. Für die in dieser Arbeit anvisierten Anwendungen haben die geringen Erhöhungen des Schichtwiderstandes keinen signifikanten Einfluss auf die Funktionalität.

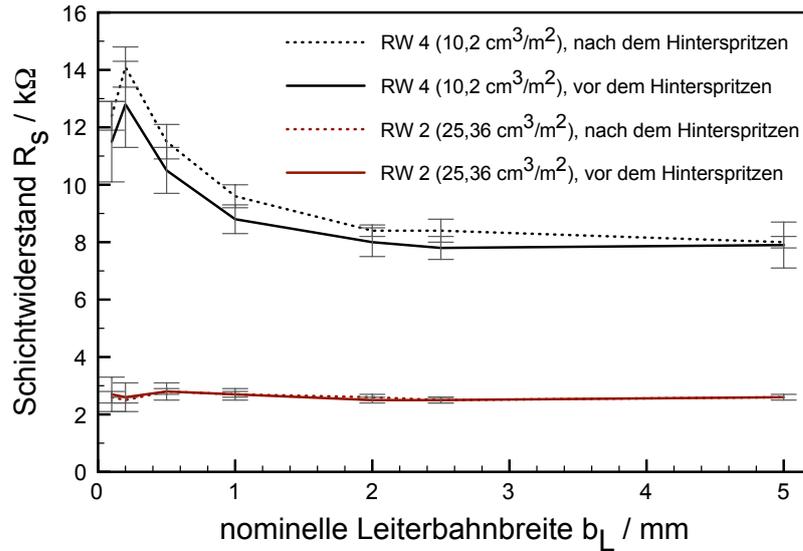


Abbildung 5.8: Schichtwiderstand von im Flexodruck mit unterschiedlichen Rasterwalzen (RW) hergestellten Leitbahnen vor und nach dem Hinterspritzen

5.3.2 Kapazitätsmessungen

Flexodruckversuche

Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Kapazitätsmessungen dienen vor allem dazu, die Funktionalität der gedruckten Speicherstrukturen nachzuweisen. In Abschnitt 4.5 ist die Durchführung der Messung beschrieben.

Abbildung 5.9 zeigt die gemessenen Kapazitäten bei verschiedenen Messfrequenzen für Speicherstrukturen auf Bedruckstoffen mit Coronavorbehandlung sowie unbehandelten Substraten. Die Abbildung verdeutlicht die Auswirkungen der schlechten Benetzung auf die gemessenen Kapazitäten. Die Kapazitäten der Proben auf nicht vorbehandeltem Bedruckstoff sind deutlich geringer als der auf vorbehandelter Folie bei gleicher nomineller Koppelfläche. Zudem schwanken die Ergebnisse auf nicht vorbehandelten Folien stärker. Die deutlich verringerte Kapazität ist auf die verringerte effektive Koppelfläche A_K durch die schlechte Benetzung zurückzuführen. Nach Gleichung 4.10 führt dies zu einer geringeren Einzelkapazität C_e . Zudem ist aufgrund des höheren elektrischen Widerstandes der nicht vorbehandelten Strukturen eine Verringerung der Grenzfrequenz zu erkennen (vgl. Gleichung 4.13).

Berechnet man die effektive Koppelfläche A_K ausgehend von der gemessenen Gesamtkapazität C_{ges} mit den Größen

- Foliendicke $d_F = 100 \mu\text{m}$,
- elektrische Feldkonstante $\epsilon_0 = 8,854 \text{ As}/(\text{Vm})$ und
- relative Permittivität von Makrofol® DE $\epsilon_r = 3$ ^[124],

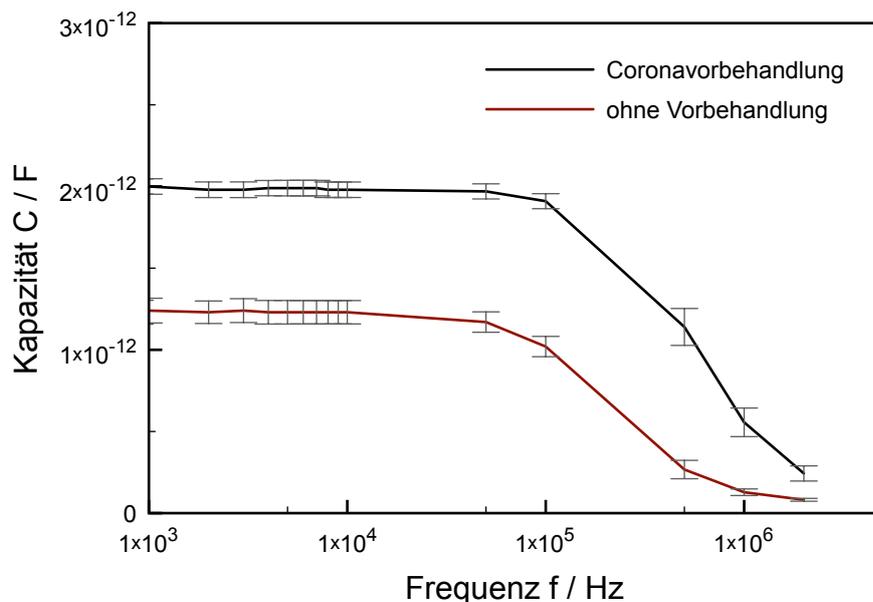


Abbildung 5.9: Kapazität von Speicherstrukturen auf vorbehandelten und unvorbehandelten Substraten (gedruckt an LaborMAN 1 im Flexodruck mit der Formulierung F1/4)

beträgt diese $14,9 \text{ mm}^2$ für Speicherstrukturen auf coronavorbehandelter Folie und $9,3 \text{ mm}^2$ für Strukturen auf unvorbehandelter Folie. Die nominelle Koppelfläche beträgt für die hier verwendeten Speicherstrukturen 16 mm^2 . Somit ergeben sich für die berechnete relative Flächendeckung FD $93,1\%$ auf vorbehandelter Folie und $58,1\%$ auf nicht vorbehandelter Folie. Diese Daten werden durch Mikroskopaufnahmen gestützt. Abbildung 5.7 zeigt deutlich die verringerte relative Flächendeckung gedruckter Strukturen auf nicht vorbehandeltem Substrat.

Neben der Flächendeckung der gedruckten Strukturen können weitere Faktoren die gemessene Kapazität beeinflussen. Eine Fehlerquelle bei der statischen Kapazitätsmessung ist z. B. die Positionierung der Ausleseelektroden auf die hintspritzten Speicherstrukturen mittels Siebdruck. Wird keine vollständige Überlappung der Koppelflächen erreicht, verringert sich die gemessene Kapazität entsprechend. Der Einfluss dieser Fehlerquelle wurde durch eine möglichst exakte Positionierung unter Zuhilfenahme des optischen Positioniersystems am Siebdrucker weitestgehend minimiert.

In Abbildung 5.10 sind die Kapazitäten, bezogen auf die nominelle Koppelfläche, (flächenbezogene Kapazitäten) der Speicherstrukturen auf unterschiedlich dicken Substratfolien dargestellt. Wie erwartet beeinflusst die Dicke der Folie, d. h. des Dielektrikums, die Kapazität indirekt proportional. Bei einer Messfrequenz von 10 kHz beträgt die flächenbezogene Kapazität der $100 \mu\text{m}$ dicken Folie $14,8 \pm 0,2 \text{ pF/cm}^2$ und die der $200 \mu\text{m}$ dicken Folie $7,3 \pm 0,1 \text{ pF/cm}^2$. Diese Werte liegen etwas über den theoretischen flächenbezogenen Kapazitäten von $13,3 \text{ pF/cm}^2$ bzw. $6,6 \text{ pF/cm}^2$. Gründe dafür können z. B. geringfügig größer gedruckte Flächen sein.

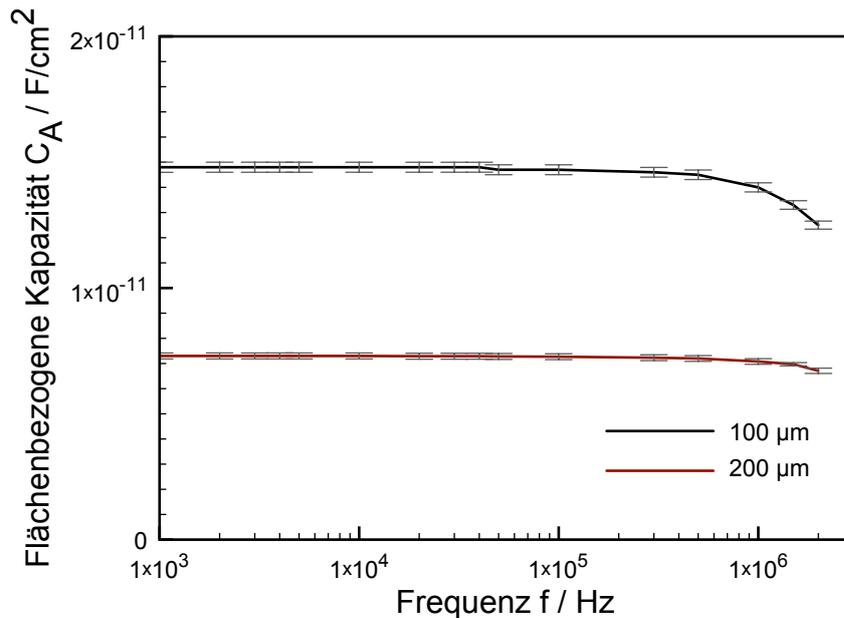


Abbildung 5.10: Vergleich der flächenbezogenen Kapazität von Speicherstrukturen auf unterschiedlich dicken Substratfolien (gedruckt an LaborMAN 1 im Flexodruck mit der Formulierung F1/4)

In Abbildung 5.11 ist der Einfluss des Hinterspritzvorgangs auf die Kapazität am Beispiel des Materials Agfa Orgacon EL-P3040 dargestellt. Es zeigt sich, dass die Kapazität nach dem Hinterspritzen etwas höher als vor dem Hinterspritzen ist, jedoch noch innerhalb der Standardabweichung liegt. Dies konnte in weiteren Versuchen bestätigt werden. Ursachen dafür könnten z. B. in einer geringfügigen Verringerung der Foliendicke durch die Temperatur- und Druckeinwirkung beim Hinterspritzen liegen. Insgesamt hat der Hinterspritzvorgang jedoch keine nachteiligen Auswirkungen auf die Funktionalität der Speicherstrukturen.

Abbildung 5.12 zeigt die gemessenen Kapazitäten von hinterspritzten Speicherstrukturen mit unterschiedlich großen Koppelflächen in Abhängigkeit der Messfrequenz. Die Kurven zeigen bis zu einer Frequenz von ca. 100 kHz einen annähernd konstanten Verlauf und fallen danach deutlich ab. Die Grenzfrequenz ist dabei unabhängig von der Koppelfläche. In Abbildung 5.12 rechts wird der lineare Zusammenhang zwischen gemessener Kapazität und der Koppelfläche deutlich.

Der Einfluss verschiedener Druckstoffe zur Herstellung der Speicherstrukturen ist in Abbildung 5.13 dargestellt. Bis zu Messfrequenzen von ca. 50 kHz hat der Druckstoff und damit die elektrische Leitfähigkeit keinen Einfluss auf die gemessenen Kapazitäten. Erst bei höheren Frequenzen kann mit zunehmendem elektrischen Widerstand ein Abfall der gemessenen Kapazität beobachtet werden.

Die theoretische Betrachtung der Grenzfrequenz einer RC-Reihenschaltung bestätigt diese Ergebnisse. In Tabelle 5.5 sind die Mittelwerte der elektrischen Widerstände der gedruckten Speicherstrukturen und die nach Formel 4.13 berechneten Grenzfrequenzen angegeben.

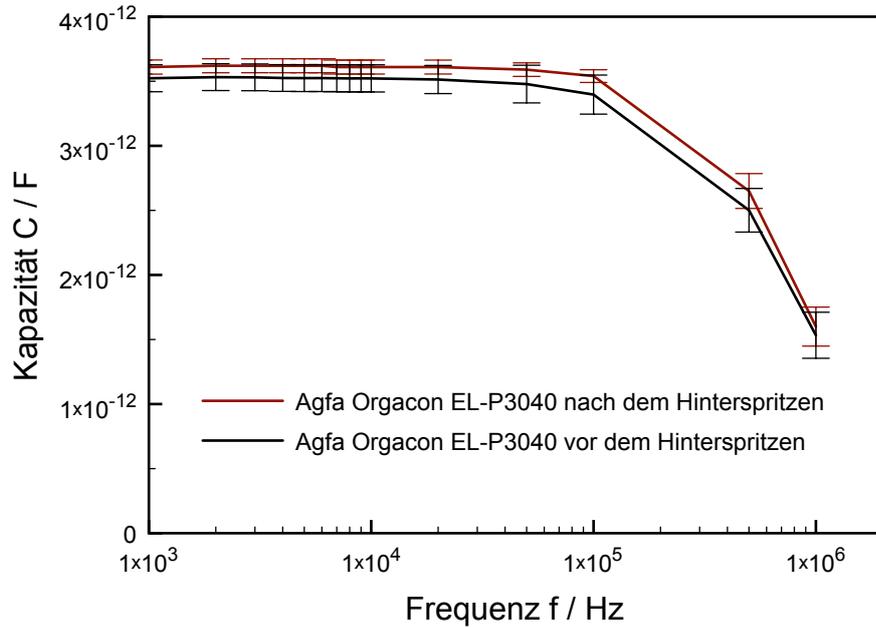


Abbildung 5.11: Vergleich der Kapazität von Speicherstrukturen vor und nach dem Hinterspritzen (gedruckt am Flexoprobendruckgerät mit Agfa Orgacon EL-P3040)

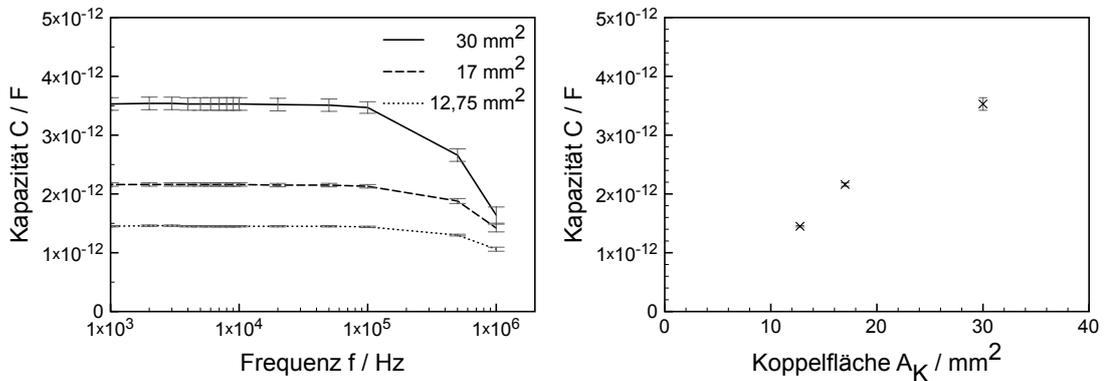


Abbildung 5.12: Kapazität von hinterspritzten Speicherstrukturen (gedruckt am Flexoprobendruckgerät mit Agfa Orgacon EL-P3040); links: Kapazität in Abhängigkeit von der Frequenz; rechts: Kapazität bei 10 kHz in Abhängigkeit von der Kopplfläche

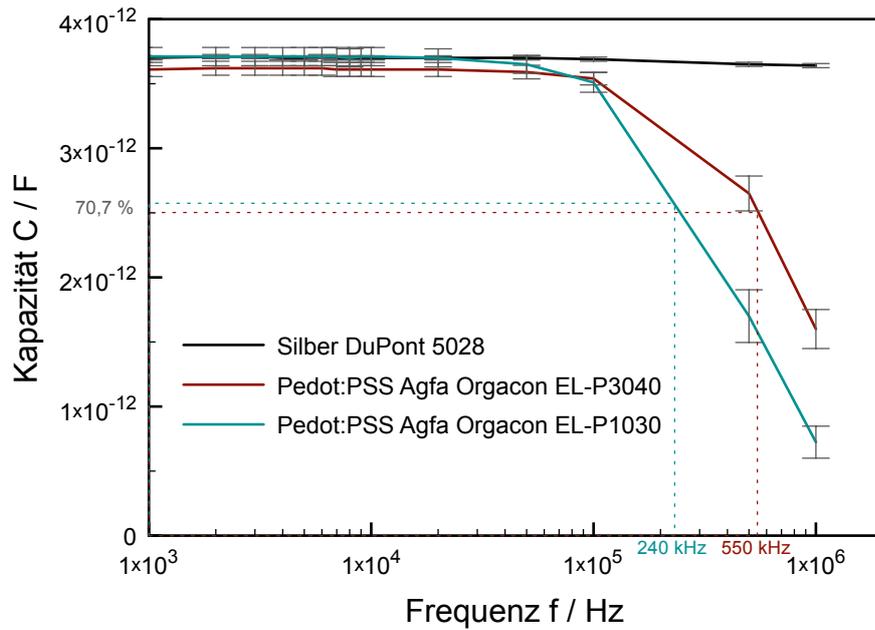


Abbildung 5.13: Kapazität von hinterspritzten Speicherstrukturen mit einer Koppelfläche von 30 mm^2 (gedruckt am Flexoprobedruckgerät); grafische Bestimmung der Grenzfrequenz

Die im Diagramm in Abbildung 5.13 grafisch ermittelten Werte weichen etwas von den berechneten Werten ab. Die Hauptursache dafür ist, dass im entsprechenden Wertebereich zu wenige Messdaten aufgenommen wurden. Die Abschätzung der Grenzfrequenz der Speicherstrukturen aus den beiden polymeren Druckstoffen ergibt jedoch eine gute Übereinstimmung mit den theoretischen Werten.

Tabelle 5.5: Elektrischer Widerstand und berechnete Grenzfrequenz der RC-Reihenschaltung für verschiedene Materialien bei einer nominellen Koppelfläche von 30 mm^2

Bezeichnung	R	f_g
DuPont 5028	$13,2 \Omega$	$3,1 \text{ GHz}$
Agfa Orgacon EL-P3040	$67,9 \text{ k}\Omega$	588 kHz
Agfa Orgacon EL-P1030	$132,8 \text{ k}\Omega$	301 kHz

Dieser Zusammenhang wird auch in Abbildung 5.14 verdeutlicht. Hier wurde die flächenbezogene Kapazität (C_A) ermittelt. Im Diagramm ist jeweils die Differenz der flächenbezogenen Kapazität zur Referenzkapazität bei einer Messfrequenz von 1 kHz dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Kapazität der Silberstrukturen bei hohen Messfrequenzen nur geringfügig abfällt. Dagegen ist diese Verringerung bei den Speicherstrukturen aus dem leitfähigen Polymer PEDOT:PSS deutlich ausgeprägt.

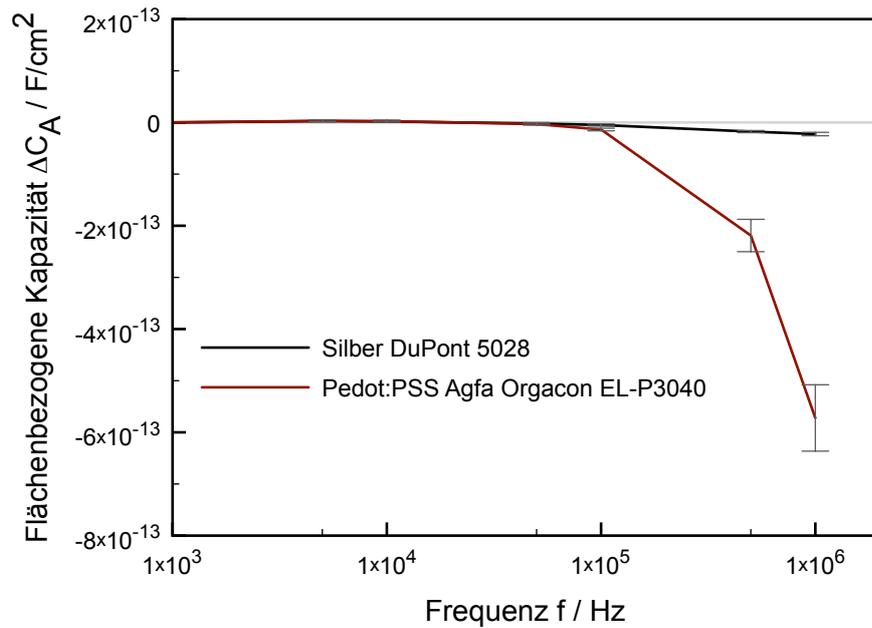


Abbildung 5.14: Abnahme der flächenbezogenen Kapazität bei hohen Messfrequenzen; dargestellt ist die Differenz zur Kapazität bei einer Messfrequenz von 1 kHz

Tiefdruckversuche

Vor dem Hinterspritzen wurden die Tiefdruckproben charakterisiert. Dazu wurden u. a. die Schichtwiderstände einer kompletten Rolle (120 Abschnitte entsprechen einer Länge von ca. 83 m) bestimmt. Die einseitige Lagerung aller Druckzylinder und Walzen an der Labor-MAN II kann zu Abweichungen in der Druckqualität über die Substratbreite führen. Aus diesem Grund wurden die Messungen sowohl an Strukturen nahe der Maschinenseite als auch an Strukturen nahe der Bedienerseite durchgeführt. Für die Maschinenseite wurde ein R_S von $0,73 \pm 0,05 \text{ k}\Omega$ und für die Bedienerseite ein R_S von $0,80 \pm 0,09 \text{ k}\Omega$ ermittelt. Die Leitfähigkeit der Strukturen ist somit an der Maschinenseite etwas höher als an der Bedienerseite. Außerdem sind die Schwankungen zwischen den einzelnen Abschnitten geringer. Für alle weiteren Untersuchungen und Kapazitätsmessungen wurden die Strukturen der Maschinenseite verwendet.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Kapazitätsmessungen der Tiefdruckstrukturen näher betrachtet. Abbildung 5.15 zeigt die gemessene Kapazität der Speicherstrukturen in Abhängigkeit von der Koppelfläche. Auch hier zeigt sich wie erwartet der lineare Zusammenhang. Zudem unterliegen die Messwerte nur sehr geringen Schwankungen.

Für einen weiteren Versuch wurden bei einem Teil der Speicherstrukturen die Verbindungsleitbahnen mittels Skalpell getrennt, d. h. der Serienwiderstand zwischen den beiden Einzelkapazitäten ist unendlich hoch (vgl. Abbildung 4.5). Die Kapazitäten dieser Strukturen wurden ebenso gemessen. Abbildung 5.16 zeigt die Ergebnisse.

Die Kapazitäten der verbundenen Speicherstrukturen (logische Eins) sind deutlich von den Kapazitäten der getrennten Speicherstrukturen (logische Null) zu unterscheiden. Außer-

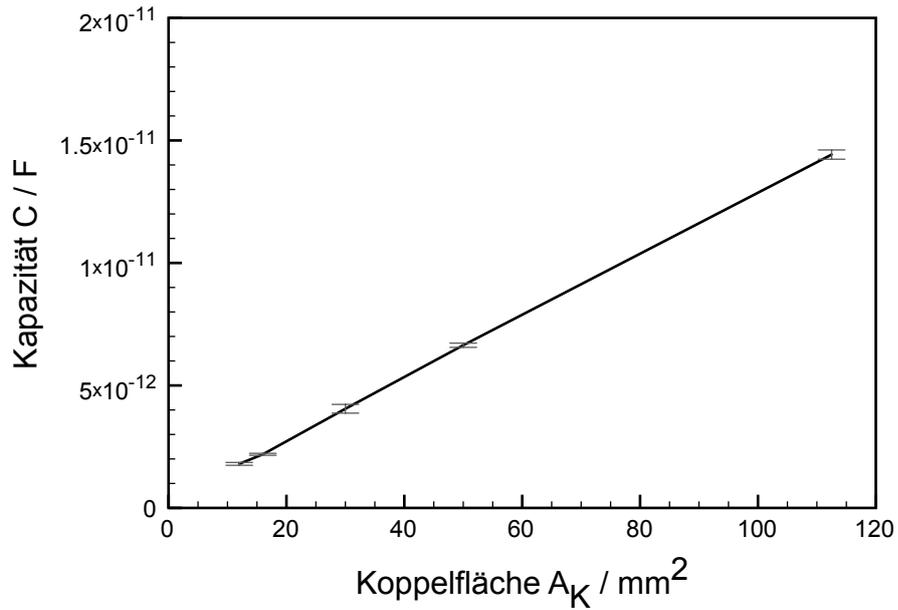


Abbildung 5.15: Kapazität von hinterspritzten Speicherstrukturen bei 10 kHz in Abhängigkeit der Kopplfläche (gedruckt an LaborMAN 2 im Tiefdruck mit T3-5)

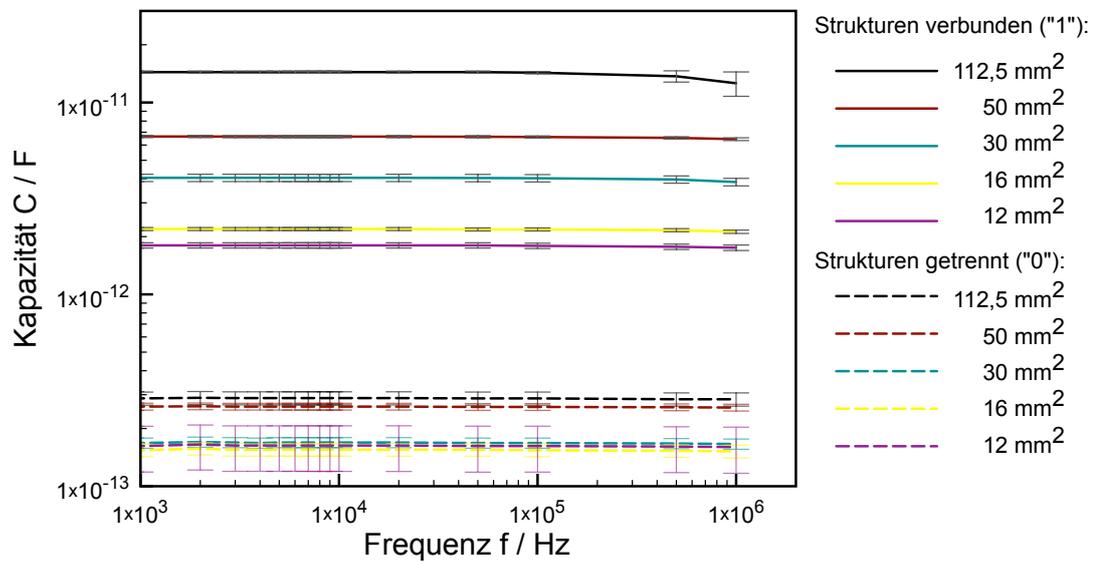


Abbildung 5.16: Kapazitäten von hinterspritzten Speicherstrukturen mit unterschiedlich großen Kopplflächen; Vergleich von verbundenen (logische Eins) und nicht verbundenen (logische Null) Strukturen (gedruckt an LaborMAN 2 im Tiefdruck mit T3-5)

dem ist gut zu erkennen, dass die Schwankungen bei den verbundenen Speicherstrukturen so gering sind, dass eine klare Zuordnung zu den jeweiligen Koppelflächen möglich ist. Es kann somit die Größe der Koppelflächen als zusätzliches Unterscheidungsmerkmal genutzt werden.

Vergleich der Flexodruck- und Tiefdruckproben

Die Kapazität der im Flexodruck und im Tiefdruck hergestellten Speicherstrukturen bei einer Messfrequenz von 10 kHz sind in Abbildung 5.17 gegenübergestellt. Die Messdaten ergeben, dass die gemessenen Kapazitäten der Tiefdruckstrukturen bei gleicher nomineller Koppelfläche A_K höher liegen als die Kapazitäten der Flexodruckstrukturen.

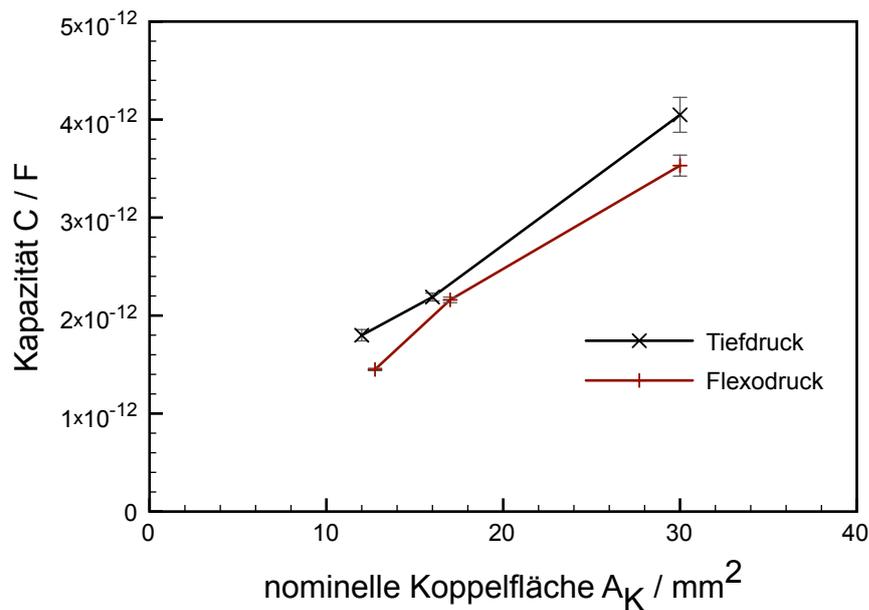


Abbildung 5.17: Vergleich der Kapazität von hinterspritzten Flexodruck- und Tiefdruck-Speicherstrukturen bei 10 kHz in Abhängigkeit der Koppelfläche (Materialien: vgl. Abbildung 5.12 und 5.15)

In Tabelle 5.6 sind die gemessenen Kapazitäten bei einer Messfrequenz von 10 kHz und einer nominellen Koppelfläche von 30 mm² sowie die theoretisch berechnete Kapazität angegeben. Die gemessene Kapazität der Flexodruckstrukturen liegt bei ca. 11 % unter der theoretischen Kapazität. Diese Beobachtung kann durch die geringere relative Flächendeckung der Flexodruckstrukturen erklärt werden. Die Kapazität der Tiefdruckstrukturen liegt leicht über der theoretischen Kapazität. Dies ist auf die leichte Verbreiterung (ca. 8 % der Strukturen im Druck zurückzuführen (Abbildung 5.18). Ursache dafür kann z. B. ein Fehler bei der Druckformherstellung oder die starke Benetzung der Farbe auf dem Substrat sein. Zur Verdeutlichung sind in Abbildung 5.18 Mikroskopaufnahmen der gedruckten Strukturen gegenübergestellt. Die Flächendeckung der Tiefdruckstrukturen ist höher als die der Flexodruckstrukturen.

Tabelle 5.6: Kapazitäten bei 10 kHz und einer nominellen Koppelfläche von 30 mm²

Druckverfahren	Kapazität C in 10 ⁻¹² F
Flexodruck	3,53 ± 0,11
Tiefdruck	4,05 ± 0,18
berechnete Kapazität	3,98 ± 0,00

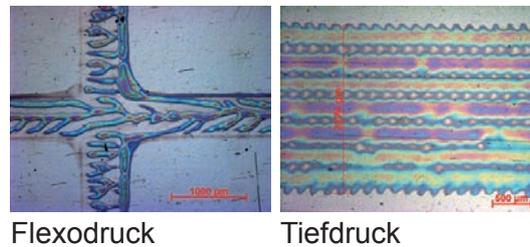


Abbildung 5.18: Mikroskopaufnahmen von im Flexodruck und im Tiefdruck hergestellten Leitbahnen

Serielle Kapazitätsmessung

Mit dem speziell entwickelten Messplatz zur seriellen Kapazitätsmessung wurden Messungen an bewegten Speicherstrukturen durchgeführt. Im Hinblick auf mögliche Anwendungsszenarien der Technologie stellt dieses Ausleseverfahren eine weitere wichtige Auslesemöglichkeit dar.

Die Auslesbarkeit wird insbesondere von geometrischen Faktoren beeinflusst. Das Layout der Speicherstrukturen mit der Breite b_K und Länge l_K der Koppelfläche, der Breite b_V und Länge l_V der Verbindungsleitbahn sowie des Abstandes a zwischen zwei Koppelflächen (vgl. Abbildung 4.5) bestimmt die Anordnung und Größe der Messelektroden. Im Idealfall ist $b_K < a$ – damit kann garantiert werden, dass gleichzeitig immer nur ein Koppelflächenpaar im Eingriff ist. Jedoch ist auch im Fall $b_K > a$ eine Messung möglich. Abbildung 5.19 zeigt beispielhafte Messdaten des erstgenannten Falls.

Im abgebildeten Beispiel sind jeweils alle Koppelflächenpaare durch eine Verbindungsleitbahn verbunden. Jede einzelne Speicherstruktur ist deutlich zu erkennen. Um echte Speicherstrukturen auszulesen, deren Koppelflächenpaare nur teilweise verbunden sind, ist eine konstante Bewegungsgeschwindigkeit während der Messung erforderlich. Die Zuordnung der einzelnen Speicherstrukturen erfolgt dann anhand der jeweiligen Position bzw. der Messzeit. Ab einem Verfahrensweg von ca. 75 mm ist ein leichter Abfall der maximalen Kapazitätswerte zu erkennen – dies deutet darauf hin, dass die Probe leicht verzerrt war bzw. die serielle Messung nicht exakt parallel zum Verlauf der Speicherstrukturen ausgeführt wurde.

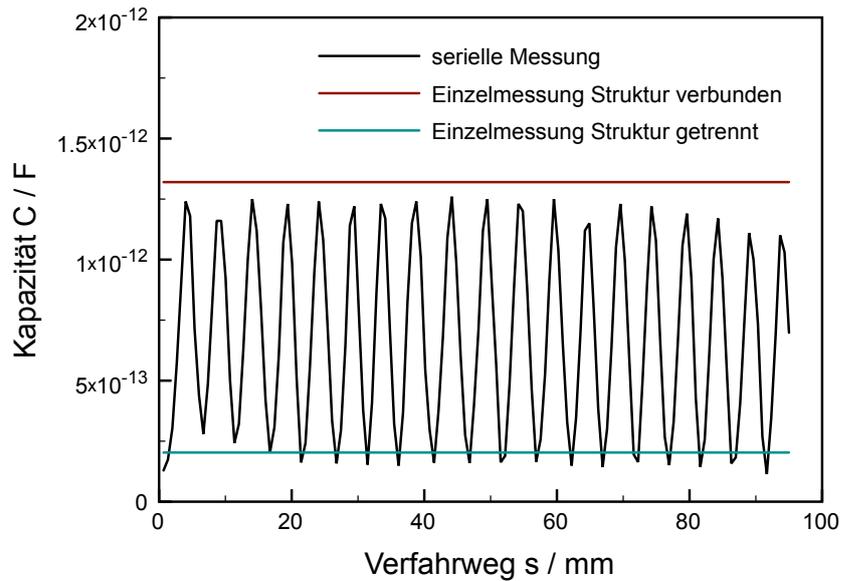


Abbildung 5.19: Serielle Kapazitätsmessung: Kapazität einer Serie von verbundenen Speicherstrukturen mit $b_K = 2$ mm, $l_K = 8$ mm, $l_V = 3$ mm und $a = 3$ mm in Abhängigkeit des Verfahrensweges (Messdaten übernommen von Illing^[138])

5.4 Ergebnisse der Klimatests

Zur Einschätzung der Gebrauchstauglichkeit der hinterspritzten Speicherstrukturen wurden die Auswirkungen klimatischer Einflüsse auf die gemessene Kapazität untersucht. Die Messbedingungen können Tabelle 4.2 entnommen werden.

5.4.1 Einfluss der relativen Luftfeuchte

Zunächst wurde der Einfluss der relativen Luftfeuchte RH untersucht. Dafür wurden die Kapazitäten hinterspritzter Speicherstrukturen mit einer Koppelfläche von 450 mm^2 im Klimaschrank gemessen. Die relative Luftfeuchte wurde bei einer konstanten Temperatur von $20 \text{ }^\circ\text{C}$ in 10% -Schritten in einem Zyklus von 25% bis 95% und wieder zurück geregelt. Beim Erreichen der jeweiligen Luftfeuchte wurde die entsprechende Kapazität der Probe gemessen. Die Messung über 20 Zyklen entspricht einer Messzeit von $137,6 \text{ h}$, d. h. ein Zyklus dauert ca. 7 h .

In Abbildung 5.20 sind zur besseren Übersichtlichkeit nur die Daten ausgewählter Zyklen aufgetragen. Bis zu einer relativen Luftfeuchte von 55% ist nur ein geringer Anstieg der Kapazität zu beobachten. Bei relativen Luftfeuchten über 55% steigen die gemessenen Kapazitäten deutlich an.

Die Gründe dafür liegen im Wasseraufnahmeverhalten der Polycarbonatfolie. Laut Datenblatt liegt der Sättigungswert der Wasseraufnahme W_S , d. h. die maximale Wasseraufnahme, bei einer Temperatur von $23 \text{ }^\circ\text{C}$ bei $0,35 \%$ ^[124]. Das Wasseraufnahmevermögen und damit auch W_S hängen von der Temperatur und der relativen Luftfeuchte ab. Höhere

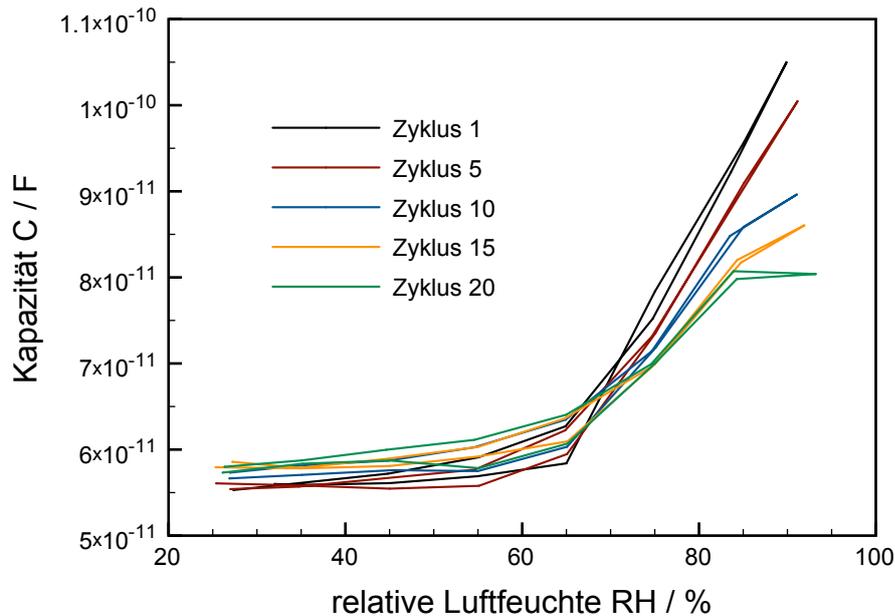


Abbildung 5.20: Kapazitäten hinterspritzter Speicherstrukturen in Abhängigkeit der relativen Luftfeuchte bei einer Messfrequenz von 1 kHz

Temperaturen und höhere Luftfeuchtwerte resultieren in höheren Sättigungswerten der Wasseraufnahme. W_S ist proportional zu RH ^[142]. Die Wasseraufnahme von Polymeren basiert auf Diffusionsprozessen und ist somit zeitabhängig. Der Diffusionskoeffizient D von Polycarbonat liegt bei $6,5 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$ bei 23 °C ^[143], für höhere Temperaturen gelten höhere Diffusionskoeffizienten.

Abbildung 5.21 zeigt einen ausgewählten Zyklusverlauf. Bei allen Messergebnissen liegen die Kapazitäten bei Verringerung der relativen Luftfeuchte (abwärts) über den Werten, die bei Erhöhung der relativen Luftfeuchte (aufwärts) gemessen wurden. Daraus kann geschlossen werden, dass die Wasseraufnahme tendenziell schneller verläuft als die Wasserabgabe. Darüber hinaus wurden die Kapazitätsmessungen im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht bei Sättigung der Wasseraufnahme durchgeführt, sondern sobald im Klimaschrank die jeweils vorgegebene relative Luftfeuchte erreicht wurde. Durch eine Anpassung des Messprogrammes kann dieser zeitabhängige Faktor weitestgehend ausgeschlossen werden – dies führt jedoch zu wesentlich längeren Messzeiten.

Abbildung 5.22 stellt die Entwicklung der Kapazitätswerte bei verschiedenen relativen Luftfeuchten über 20 Zyklen dar. Es sind jeweils die Messwerte bei ansteigender relativer Luftfeuchte (aufwärts) dargestellt. Zur besseren Übersichtlichkeit wurde auf die Darstellung der Kurven bei den relativen Luftfeuchten von 35 % und 45 % verzichtet. Die Verläufe der Kurven zwischen 25 % und 55 % sind annähernd gleich. Über die 20 Zyklen steigen die gemessenen Kapazitäten bis zu einer relativen Luftfeuchte von 65 % leicht an. Bei höheren relativen Luftfeuchten sinken die gemessenen Kapazitäten mit zunehmender Zykluszahl. Das lässt darauf schließen, dass das Material mit zunehmender Zykluszahl weniger Wasser aufnimmt. Somit ist diese Anordnung nicht für den Einsatz als Feuchtesensor geeignet.

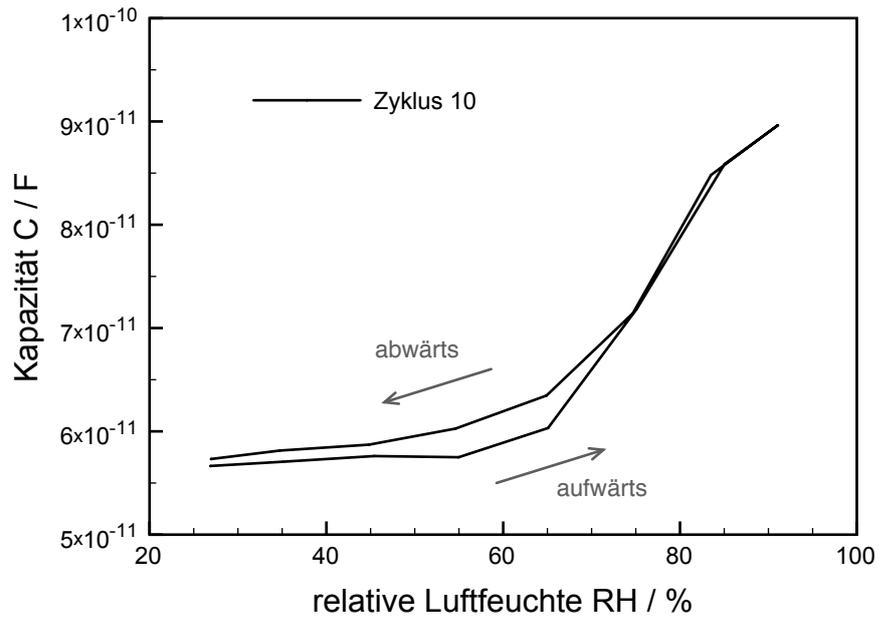


Abbildung 5.21: Kapazität in Abhängigkeit der relativen Luftfeuchte eines ausgewählten Zyklus bei einer Messfrequenz von 1 kHz

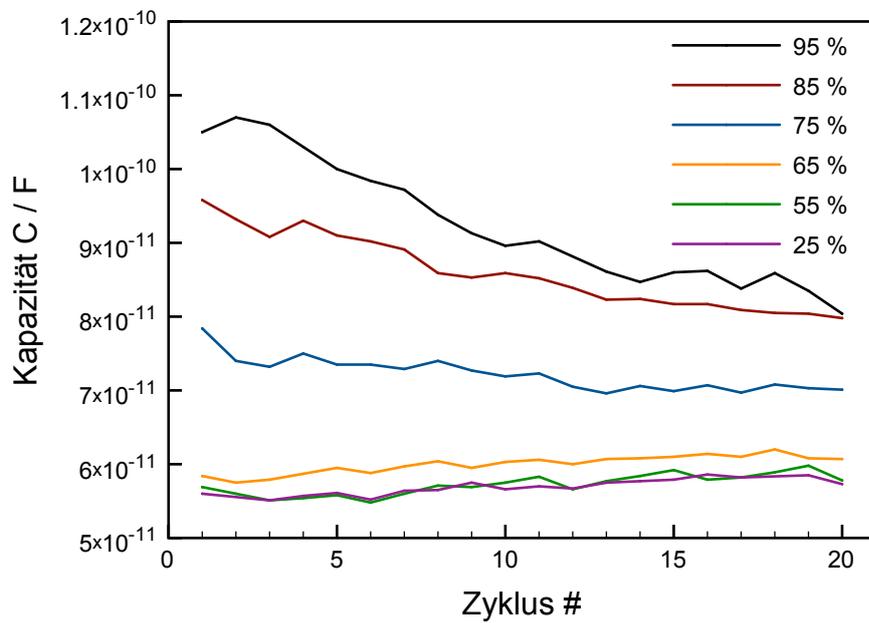


Abbildung 5.22: Entwicklung der Kapazitäten (Messfrequenz 1 kHz) über 20 Messzyklen bei unterschiedlichen relativen Luftfeuchtwerten

5.4.2 Einfluss der Temperatur

Die Abhängigkeit der Kapazität von der Temperatur ist in Abbildung 5.23 dargestellt. Das Diagramm zeigt die bei einer Frequenz von 1 kHz gemessenen Kapazitäten einer Speicherstruktur mit einer Koppelfläche von 450 mm^2 in ausgewählten Zyklen. Die Temperaturen wurden im Bereich zwischen $10 \text{ }^\circ\text{C}$ und $40 \text{ }^\circ\text{C}$ geregelt. Die relative Luftfeuchte in diesem Versuch betrug konstant 50% . Die Messung über 15 Zyklen entspricht einer Messzeit von $84,2 \text{ h}$, d. h. ein Zyklus dauert ca. $5,6 \text{ h}$. Bei allen Zyklen ist eine geringe Abhängigkeit der Kapazität von der Temperatur zu beobachten. Im untersuchten Temperaturbereich steigen die Kapazitäten mit zunehmender Temperatur geringfügig und annähernd linear an. Dies ist ebenfalls auf die höheren Sättigungswerte der Wasseraufnahme bei höheren Temperaturen zurückzuführen. Zudem zeigen spätere Zyklen tendenziell höhere Kapazitätswerte, d. h. ein Temperaturzyklus weist eine gewisse Hysterese auf.

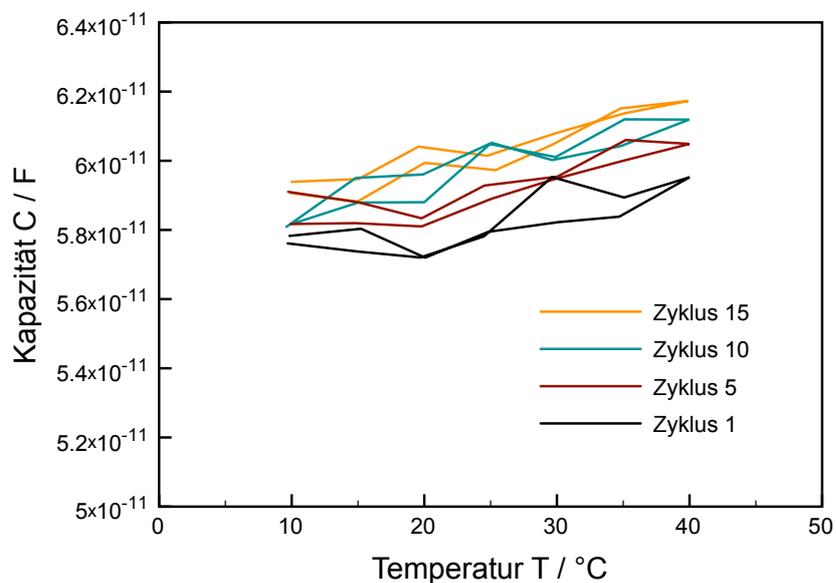


Abbildung 5.23: Kapazitäten hinterspritzter Speicherstrukturen in Abhängigkeit der Temperatur bei einer Messfrequenz von 1 kHz

5.4.3 Beeinflussung durch feuchte Wärme

Abbildung 5.24 zeigt den Verlauf der Mittelwerte der Kapazitäten über der Zeit von Proben, die 26 h bei einer Temperatur von $85 \text{ }^\circ\text{C}$ und einer relativen Luftfeuchte von 85% gelagert wurden. Die Koppelfläche dieser Proben beträgt 200 mm^2 . Diese Beanspruchung wird als „feuchte Wärme“ bezeichnet und auch als beschleunigter Lebensdauertest für Bauelemente eingesetzt (vgl. DIN EN 60008 Teil 2^[144]). Die dargestellten Mittelwerte wurden immer aus drei Messwerten, die direkt nacheinander aufgenommen wurden, gebildet. Die Werte der Standardabweichung werden somit durch Schwankungen im Messprozess hervorgerufen und nicht durch die Lagerdauer verursacht. Über die Zeit ist keine eindeutige Tendenz der Entwicklung der elektrischen Messwerte zu erkennen. Im untersuchten

Zeitraumen konnten keine Einflüsse der Lagerung in feuchter Wärme auf die gemessenen Kapazitäten festgestellt werden.

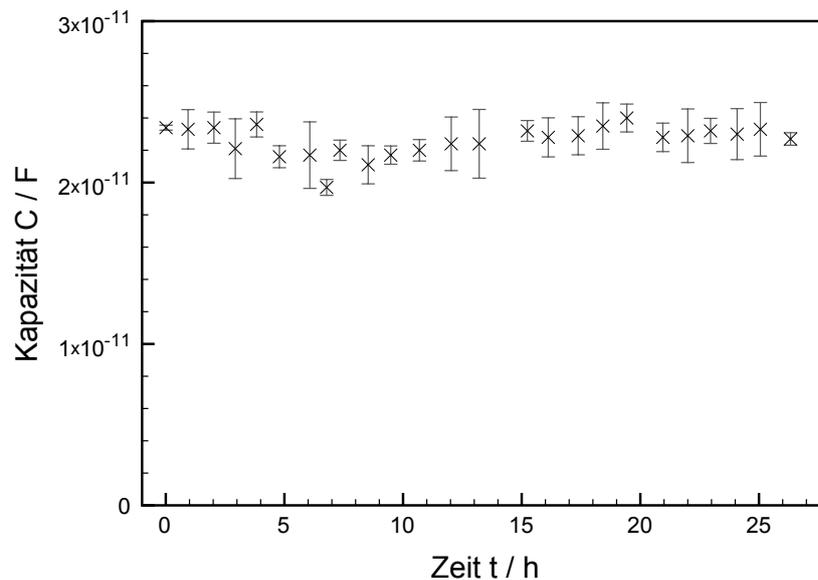


Abbildung 5.24: Entwicklung der Kapazität bei Lagerung bei einer Temperatur von 85 °C und einer relativen Luftfeuchte von 85 % (Messfrequenz 1 kHz)

Es kann zusammengefasst werden, dass keine der getesteten Proben eine sichtbare Veränderung durch die Tests im Klimaschrank zeigte. Es traten keine Ablösungen der hinterspritzten Folien o. ä. ein. Die Kapazitäten hinterspritzter Speicherstrukturen zeigen insbesondere eine deutliche Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchtigkeit. Diese Abhängigkeit ist nicht linear und verändert sich mit der Zeit, so dass diese Strukturen nicht für sensorische Anwendungen geeignet sind. Die Temperatur hat nur geringen Einfluss auf die gemessenen Kapazitäten. Die Lagerung der Proben bei einer Temperatur von 85 °C und einer relativen Luftfeuchte von 85 % über einen längeren Zeitraum zeigte keinen signifikanten Einfluss auf die gemessenen Kapazitäten.

5.5 Haftfestigkeit der hinterspritzten Folien

Wie in Abschnitt 4.4 beschrieben, wurden die hinterspritzten Proben hinsichtlich der Schälfestigkeit untersucht. In Abbildung 5.25 sind typische Kurvenverläufe der im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Proben mit variiertem Flächendeckung dargestellt. Bis auf die vollflächig bedruckte Probe weisen alle Kurven ein ausgeprägtes Maximum der Kraft auf. Diese Maximalkraft wird auch als Anreißkraft bezeichnet. Anschließend fallen die Kurven entgegen den aus der Literatur bekannten Kurvenverläufen annähernd linear ab (vgl. Abbildung 4.4). Die Ursache dafür ist die sich verringernde Folienbreite. Nahezu alle vermessenen Proben weisen an den Kanten des hinterspritzten Folienstreifens so hohe Haftkräfte auf, dass die Folien dreieckförmig abgerissen sind (siehe Abbildung 5.26). Dies muss bei der Berechnung der mittleren Schälfestigkeit σ' berücksichtigt werden.

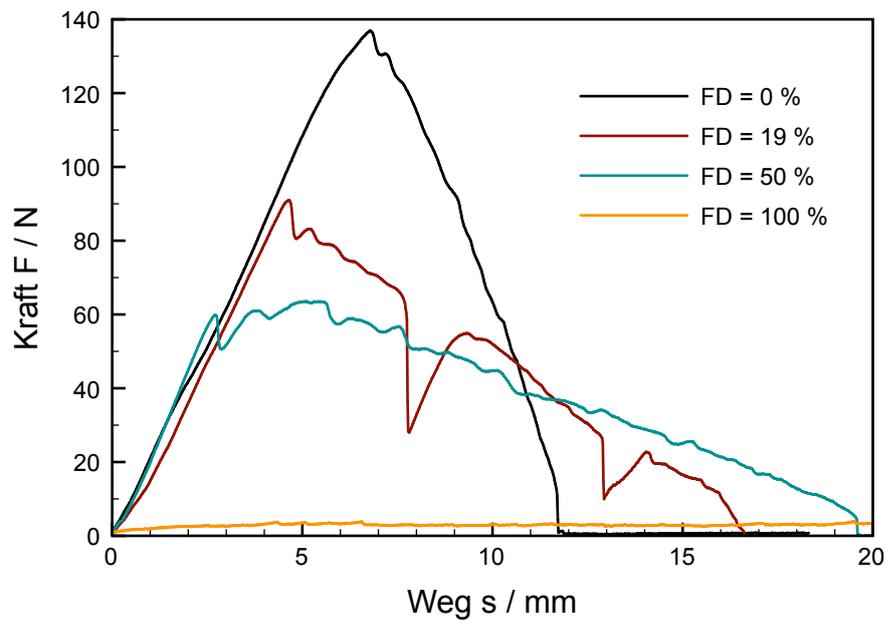


Abbildung 5.25: Schälkraftkurven bei unterschiedlichen Flächendeckungen

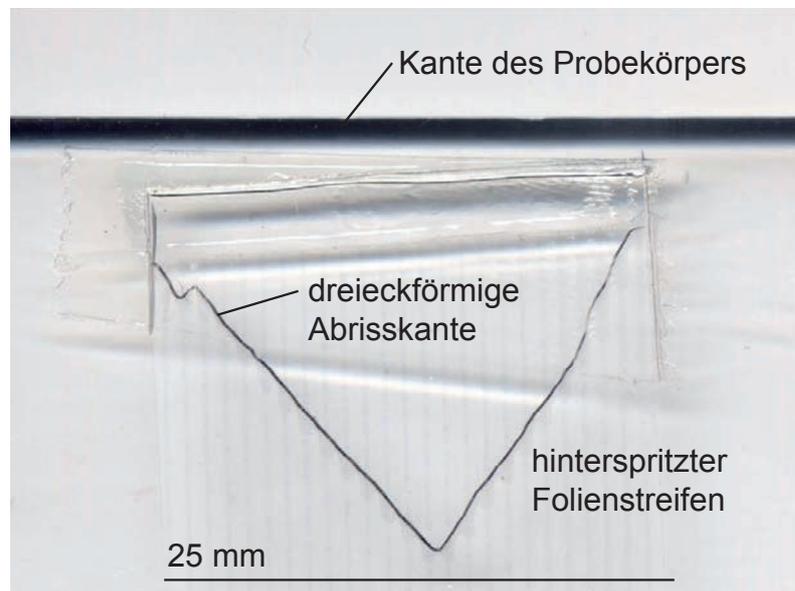


Abbildung 5.26: Dreieckförmiger Abriss der hinterspritzten Folie bei Schälfestigkeitsuntersuchungen^[136]

Die Probe mit einer Flächendeckung von 19% zeigt einen auffälligen Kurvenverlauf. Jeweils beim Erreichen einer gedruckten Linie der Gitterstruktur fällt die gemessene Kraft deutlich auf ca. die Hälfte des Ausgangswertes ab und steigt anschließend wieder an. Insgesamt kann diesen Kurven entnommen werden, dass die Kraft, die zum Abschälen der Folie nötig ist, mit zunehmender Flächendeckung abnimmt und dass die Haftung an den bedruckten Stellen deutlich reduziert ist. Vollflächig bedruckte Proben zeigen kein Maximum im Kraftverlauf. Diese Folien lassen sich sehr leicht vom Kunststoffteil ablösen.

Die Anreißkraft F_A entspricht dem Maximum im Kraftverlauf und beeinflusst die absolute Schälfestigkeit der hinterspritzten Proben. Sie ist in Abbildung 5.27 dargestellt. Auf den ersten Blick wird deutlich, dass mit den 200 μm dicken Folien eine deutlich höhere Anreißkraft erreicht wird als mit den 100 μm dicken Folien. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass der stoff- und formschlüssige Verbund zwischen Folie und Kunststoff an den Folienkanten erheblich die absolute Schälfestigkeit beeinflusst.

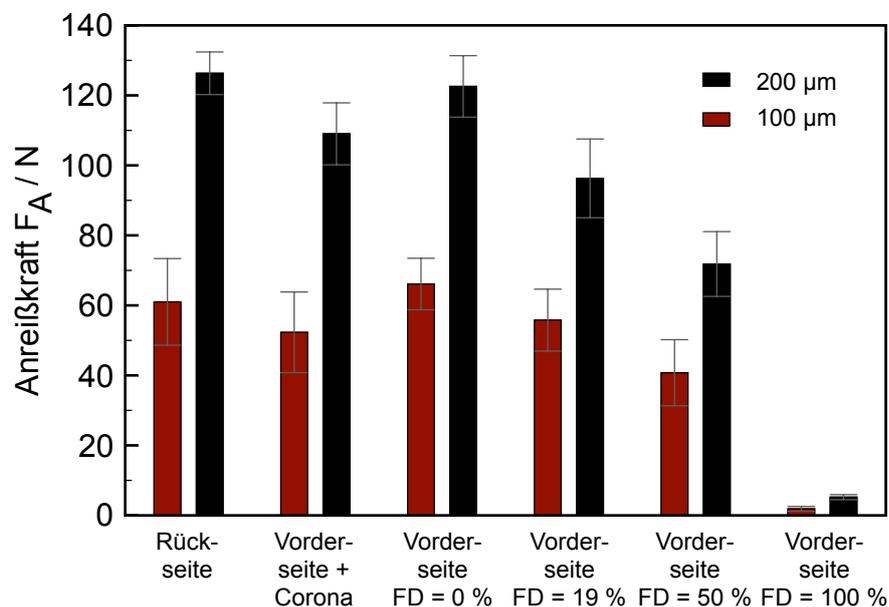


Abbildung 5.27: Anreißkraft hinterspritzter Folien mit variierter Foliendicke, Folienseite, Vorbehandlung und Flächendeckung des Druckbildes

Die Anreißkraft der Proben, die auf der Rückseite hinterspritzt wurden, d. h. die feinnattierte Seite liegt innen, ist ähnlich wie die der Proben, die auf der Vorderseite (hochglänzend) hinterspritzt wurden. Durch eine Coronabehandlung verringert sich die Anreißkraft geringfügig. Deutlichen Einfluss auf die Anreißkraft hat das Bedrucken der Folien vor dem Hinterspritzen. Je höher die relative Flächendeckung FD , desto geringer ist die Anreißkraft F_A . Für vollflächig bedruckte Proben ist $F_A < 5 \text{ N}$.

Durch den bereits erwähnten dreieckförmigen Abriss der Proben konnte die Schälfestigkeit nicht einfach aus dem Mittelwert der Schälkraft berechnet werden. Bei der Ermittlung der Schälfestigkeit wurde zunächst der Gesamtschälweg s_{ges} zwischen F_A und $F = 0 \text{ N}$ ermit-

telt. Anschließend wurde die Breite $b(s)$ des als gleichschenkelig angenommenen Dreieckes nach

$$b(s) = 2 \frac{s_{ges} - s}{\tan \alpha} \quad (5.1)$$

und

$$\tan \alpha = \frac{s_{ges}}{\frac{b_0}{2}} \quad (5.2)$$

ermittelt. Dabei ist α der Basiswinkel des gleichschenkligen Dreieckes und b_0 die nominelle Probenbreite. Diese beträgt 25 mm. Nach Vereinfachung berechnet sich die Breite $b(s)$ wie folgt:

$$b(s) = 25mm \left(1 - \frac{s}{s_{ges}}\right) \quad (5.3)$$

Anschließend wurde die Schälffestigkeit $\sigma'(s)$ nach

$$\sigma'(s) = \frac{F(s)}{b(s)} \quad (5.4)$$

zwischen F_A und $F = 0$ N ermittelt und der Mittelwert aus diesen Einzelwerten gebildet. In Abbildung 5.28 sind die Schälffestigkeiten unbedruckter hinterspritzter Proben dargestellt. Die höchsten Schälffestigkeiten werden durch das Hinterspritzen der unbedruckten Vorderseite erreicht. Die hinterspritzte Rückseite weist geringere Schälffestigkeiten auf. Eine Coronabehandlung führt ebenfalls zu verringerter Schälffestigkeit. Dafür konnte in dieser Arbeit keine Erklärung gefunden werden.

Abbildung 5.29 zeigt die Schälffestigkeit bedruckter Proben in Abhängigkeit der relativen Flächendeckung. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Schälffestigkeit mit zunehmender relativer Flächendeckung abnimmt und bei vollflächig bedruckten Proben fast auf 0 absinkt. Der Zusammenhang zwischen Schälffestigkeit und relativer Flächendeckung ist annähernd linear. Die gedruckte PEDOT:PSS-Schicht wirkt als eine Art Grenzschicht und geht keine intermolekularen Wechselwirkungen oder Verschlaufungen mit dem eingespritzten PC ein (vgl. Abschnitt 2.4). Das Material trägt somit nicht zur Verbundhaftung bei.

Im Vergleich zu Werten aus der Literatur sind die erzielten Schälffestigkeiten als gut bis sehr gut einzuschätzen. Wielpütz ermittelte für die Materialkombination Makrofol[®] DE 1-1 hinterspritzt mit Bayblend[®] T65 Schälffestigkeiten von ca. 1 N/mm^[110]. In den Anforderungen an MID-Baugruppen ist für die Metallisierung eine Abschälffestigkeit $\geq 1,1$ N/mm gefordert^[54]. Für heißgeprägte Kupferfolien auf Polyamid (PA) wurden Schälffestigkeiten von 1,8 N/mm to 2,3 N/mm und auf Polybutylenterephthalat (PBT) von 0,8 N/mm to 1,2 N/mm erreicht^[55]. Die Schälffestigkeiten von hinterspritzten Metallfolien liegen je nach Materialkombination und verwendetem Haftvermittler bei 0,5 N/mm to 8 N/mm^[145].

Ein Großteil der im Rahmen dieser Arbeit getesteten Proben weisen Schälffestigkeiten in der gleichen Größenordnung auf. Problematisch ist die sehr geringe Haftfestigkeit bei

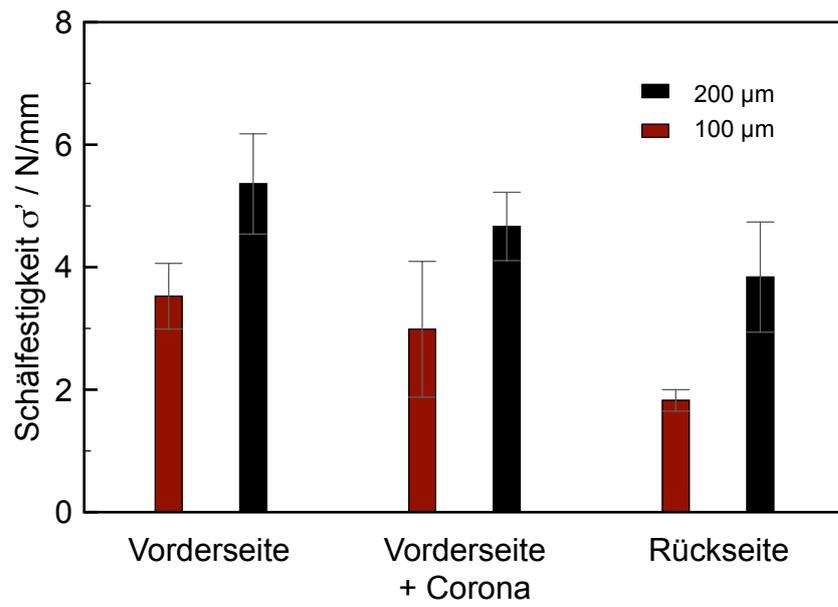


Abbildung 5.28: Schälfestigkeit von unbedruckten Proben

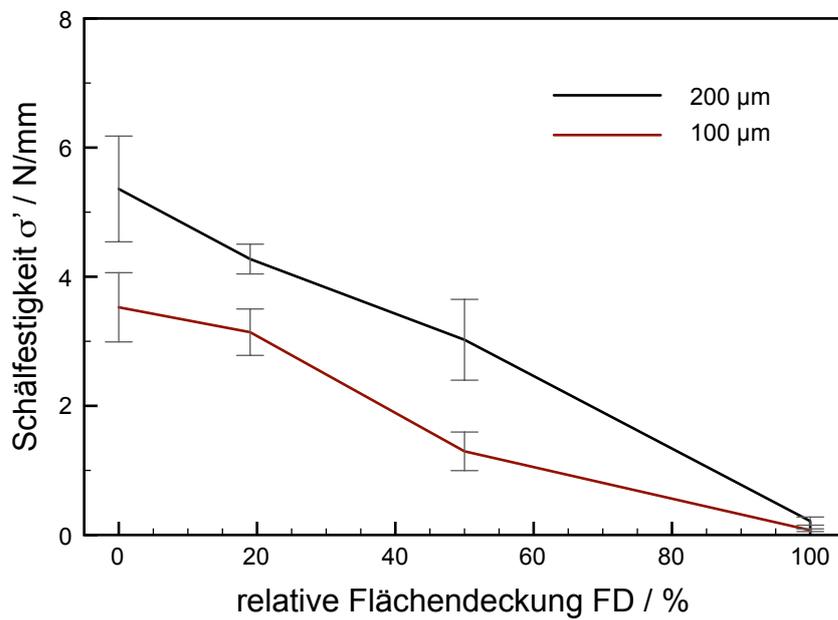


Abbildung 5.29: Schälfestigkeit von bedruckten Proben in Abhängigkeit der relativen Flächendeckung bei unterschiedlichen Foliendicken

vollflächiger Bedruckung. Bei der Herstellung von kapazitiv auslesbaren Speicherstrukturen tritt dieser Fall nicht ein und ist somit auch nicht relevant. Für andere Bauelemente kann eine vollflächige Bedruckung aber durchaus von Interesse sein, z. B. bei EL-Leuchten. Abhilfe kann hier das Überdrucken mit einem Haftvermittler oder einer Siebdruckfarbe schaffen. Geeignet sind u. a. die Noriphan[®]-Farbserie sowie der Haftvermittler NoriPress der Firma Pröll, die speziell für die Folienhinterspritztechnik entwickelt wurden. In ersten Versuchen konnte eine gute Verträglichkeit zwischen dem elektrisch leitfähigem Polymer PEDOT:PSS und diesen Farben festgestellt werden.

5.6 Eigenschaften der EL-Leuchten

Gegenstand dieser Arbeit ist neben dem Hinterspritzen einlagiger Speicherstrukturen auch die Integration mehrlagiger Bauelemente in Kunststoffbauteile. Als Beispiel wurden gedruckte Elektrolumineszenz-Leuchten ausgewählt. Die eigentliche Herstellung dieser EL-Leuchten erfolgt im Siebdruck und ist bekannt. Es existieren komplette Materialsysteme von verschiedenen Herstellern. Abbildung 3.3 zeigt den typischen Aufbau einer solchen EL-Leuchte.

Als Weiterentwicklung wurden im Rahmen dieser Arbeit EL-Leuchten entwickelt, die in beide Richtungen strahlen. Im folgenden werden diese Leuchten als bidirektionale Leuchten bezeichnet. Die bereits bekannten Leuchten, die in eine Richtung strahlen, werden als unidirektionale Leuchten bezeichnet.

5.6.1 Einfluss von Ansteuerfrequenz und Ansteuerspannung

Zunächst wurden mit Hilfe des Materialsets der Firma DuPont unidirektionale Leuchten hergestellt. Die genaue Vorgehensweise ist in Abschnitt 3.3.2 beschrieben. Die Ansteuerung dieser Leuchten mit dem EL-Inverter Folnet 3 ermöglicht die Variation von Ansteuerfrequenz und Ansteuerspannung. Um den Einfluss dieser Größen zu untersuchen, wurde das Spektrum der Leuchten aufgenommen.

Abbildung 5.30 zeigt das Spektrum einer unidirektionalen Leuchte bei konstanter Frequenz und verschiedenen Ansteuerspannungen. Die Intensität und somit die vom menschlichen Auge wahrgenommene Helligkeit steigt mit zunehmender Ansteuerspannung. Der Verlauf des Spektrums und die Lage des Maximums verändert sich nicht, d. h. es kann keine Farbverschiebung wahrgenommen werden.

In Abbildung 5.31 ist das Spektrum der gleichen Leuchte bei konstanter Spannung und variierter Frequenz dargestellt. Mit höheren Ansteuerfrequenzen steigt die Intensität. Darüber hinaus verschiebt sich das Maximum des Spektrums in Richtung kleinerer Wellenlängen. Das menschliche Auge hat den Eindruck, die Leuchte verfärbt sich mit zunehmender Ansteuerfrequenz von grün zu blau.

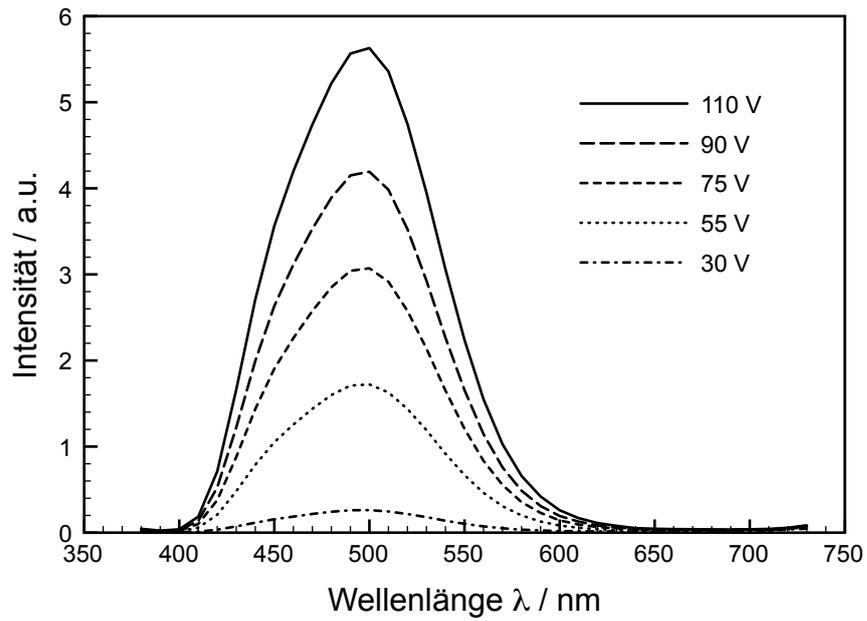


Abbildung 5.30: Spektrum einer unidirektionalen EL-Leuchte bei variiertem Ansteuerspannung und konstanter Frequenz ($f = 670 \text{ Hz}$)

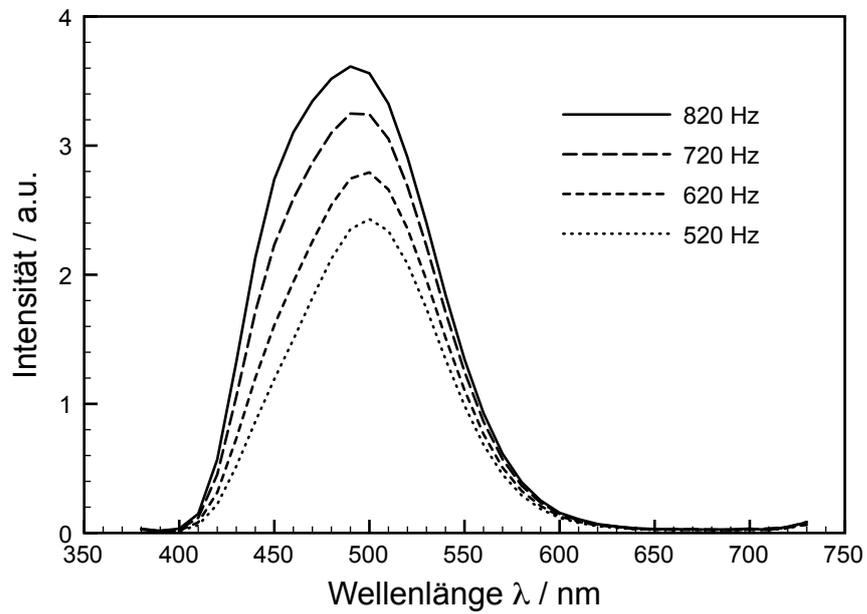


Abbildung 5.31: Spektrum einer unidirektionalen EL-Leuchte bei variiertem Ansteuerfrequenz und konstanter Spannung ($U = 75 \text{ V}$)

5.6.2 Bidirektionale EL-Leuchten

Aufbau

Für einige Anwendungen hinterspritzter EL-Leuchten sind bidirektionale Leuchten, die in beide Richtungen strahlen, wünschenswert. Großflächige EL-Leuchten werden z. B. zur Hinterleuchtung von Werbetafeln und Schildern eingesetzt. Für freistehende Elemente ist eine beidseitige Lichtaussendung vorteilhaft. Auch beleuchtete Regalböden oder Raumteiler stellen eine mögliche Anwendung dar.

Der Schichtaufbau und die Herstellungsschritte sind in Abschnitt 3.2.2 beschrieben. In Vorversuchen wurde festgestellt, dass das Material PEDOT:PSS sehr gut als Grund- und Deckelektrode für EL-Leuchten geeignet ist. Damit konnten teure sowie kratzempfindliche ITO-beschichtete Folien sowie Silberleitpasten zur Herstellung der Deckelektrode ersetzt werden. Als transparentes Dielektrikum eignet sich das Verkapselungsmaterial DuPont 5036, da es die Anforderungen hinsichtlich hoher Transparenz, hoher elektrischer Durchschlagsfestigkeit sowie möglichst hoher relativen Permittivität und guter Schichtbildungseigenschaften erfüllt.^[125]

In ersten Vergleichstests wurden verschiedene Leuchtstoffe der Firmen DuPont und Gwent mit verschiedenen Dielektrika kombiniert. Tabelle 5.7 gibt einen Überblick über die verwendeten Materialien. Abbildung 5.32 zeigt Fotografien der verschiedenen Varianten. Es ist lediglich die bidirektionale Leuchte mit DuPont-Materialien dargestellt. Die bidirektionale Leuchte auf Basis von Gwent-Materialien unterscheidet sich äußerlich nicht von dieser.

Tabelle 5.7: Versuchsreihe EL1: verwendete Materialien zur Herstellung uni- und bidirektionaler EL-Leuchten

Bezeichnung	Leuchtstoff	Dielektrikum
DuPont unidirektional	DuPont Luxprint® 8152	DuPont Luxprint® 8153 (weiß)
DuPont bidirektional	DuPont Luxprint® 8152	DuPont 5036
Gwent unidirektional	Gwent C2061027D13 (blau-grün)	Gwent D2090130D5 (pink)
Gwent bidirektional	Gwent C2061027D13 (blau-grün)	DuPont 5036

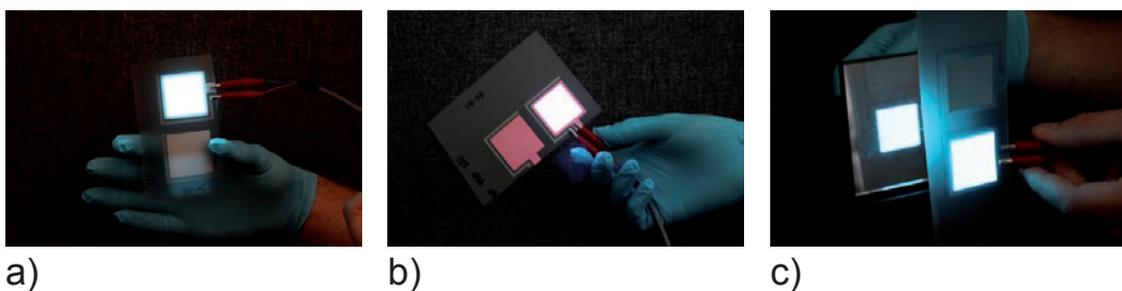


Abbildung 5.32: Fotografien der hergestellten EL-Leuchten: a) DuPont unidirektional b) Gwent unidirektional c) DuPont bidirektional^[125]

Optische Charakterisierung

Abbildung 5.33 zeigt die Emissionsspektren der Leuchten. Auf den ersten Blick wird die hohe Intensität der unidirektionalen DuPont-Leuchte deutlich. Beide DuPont-Leuchten und die bidirektionale Gwent-Leuchte haben ihr Emissionsmaximum bei einer Wellenlänge von ca. 490 nm. Die unidirektionale Gwent-Leuchte hat ihr Maximum bei ca. 470 nm und einen weiteren Hochpunkt bei ca. 600 nm. Die Ursache dafür liegt im verwendeten pinkfarbenen Dielektrikum. Dem menschlichen Auge erscheint das Licht dieser Leuchte nahezu weiß (vgl. auch Abbildung 5.32). Vergleicht man die Kurven der beiden bidirektionalen Leuchten, die sich nur durch den verwendeten Leuchtstoff unterscheiden, können kaum Unterschiede festgestellt werden. Aus diesem Grund kann davon ausgegangen werden, dass die beiden Leuchtstoffe sehr ähnlich sind.^[125]

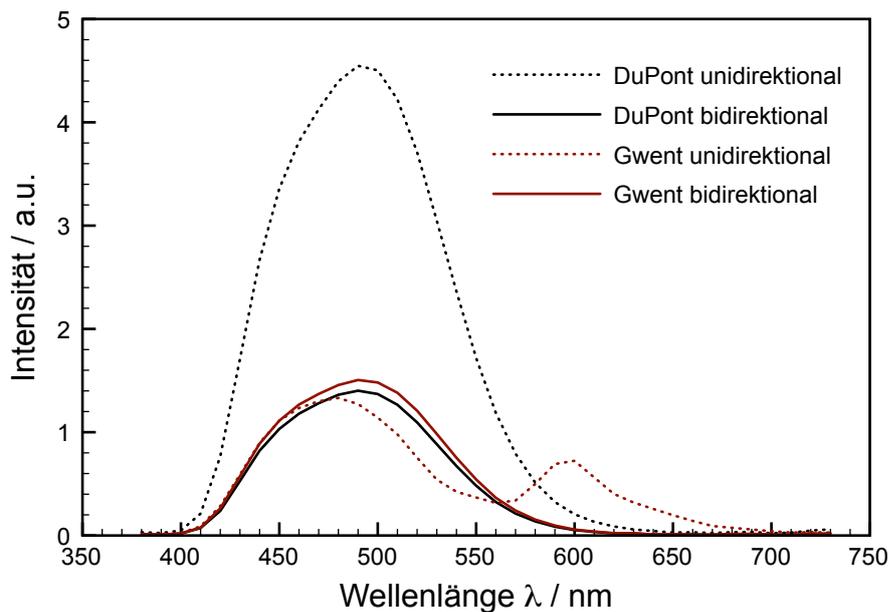


Abbildung 5.33: Emissionsspektren uni- und bidirektionaler EL-Leuchten ($U = 140$ V, $f = 830$ Hz)^[125]

Um den Einfluss des verwendeten Dielektrikums auf die Intensitätsverteilung näher zu untersuchen, wurden die Kapazitäten der EL-Leuchten im Bereich von 200 Hz to 1000 Hz ermittelt (Abbildung 5.34). Die Kapazität wurde zwischen Grund- und Deckelektrode gemessen und setzt sich somit aus zwei in Reihe geschalteten Einzelkapazitäten (Leuchtstoffschicht und Dielektrikum) zusammen. Dicke und relative Permittivität der beiden Leuchtstoffmaterialien sind vergleichbar. Die Kapazität wird also hauptsächlich durch das Dielektrikum bestimmt. Die relative Permittivität von DuPont Luxprint[®] 8153 beträgt ca. 60 und für DuPont 5036 gilt $\epsilon_r=5$. Eine höhere Kapazität resultiert in einem höheren elektrischen Feld, daraus erklärt sich die höhere Leuchtdichte der Probe DuPont unidirektional.

Abbildung 5.35 zeigt die Emissionsspektren der beiden bidirektionalen Leuchten in beide Emissionsrichtungen. Mit Vorderseite bezeichnet ist der Strahlengang durch die Substrat-

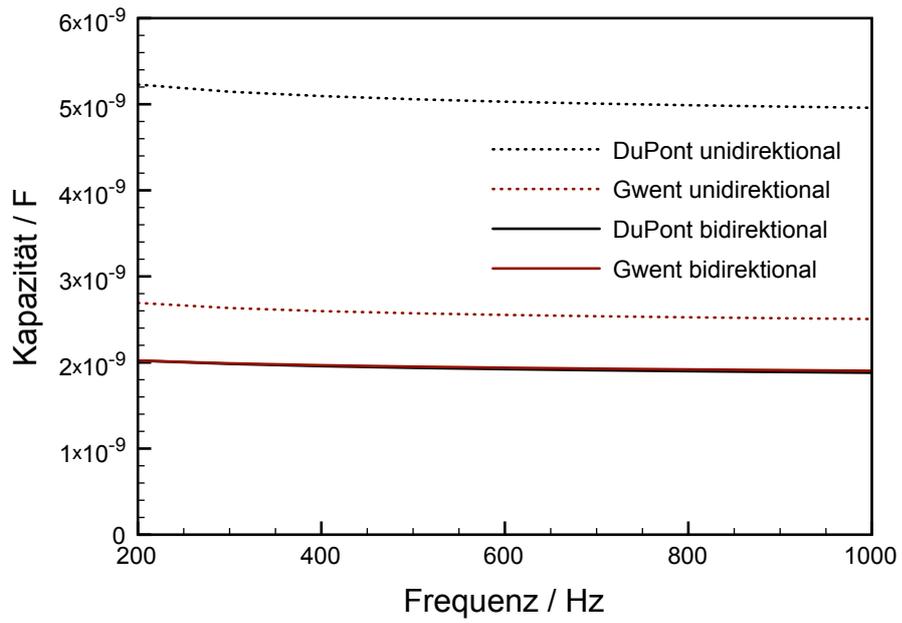


Abbildung 5.34: Kapazitäten uni- und bidirektionaler EL-Leuchten

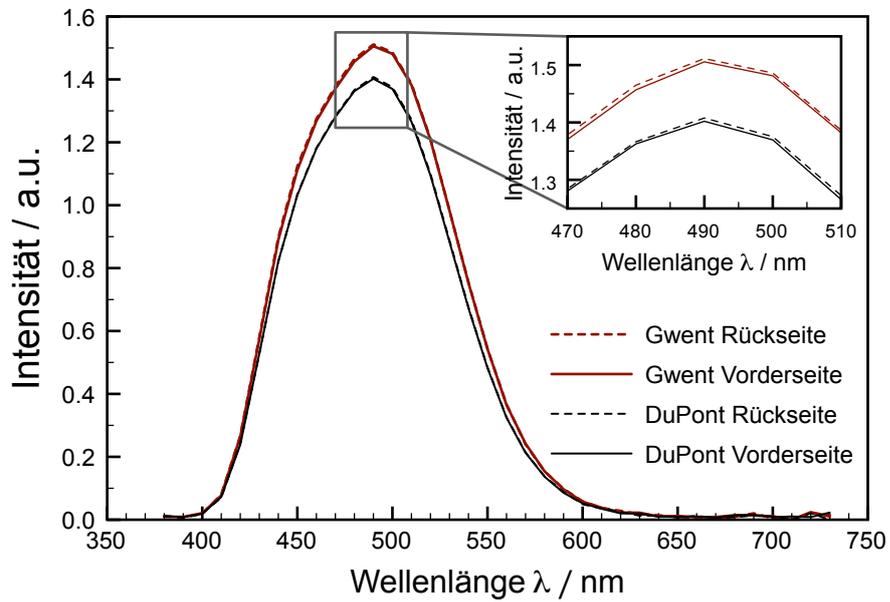


Abbildung 5.35: Emissionsspektren bidirektionaler EL-Leuchten ($U = 140 \text{ V}$, $f = 830 \text{ Hz}$) in beide Richtungen^[125]

folie hindurch, die Strahlung nach hinten durch das Dielektrikum wird mit Rückseite bezeichnet (vgl. auch Abbildung 3.5). Es ist deutlich zu erkennen, dass die Strahlung in beide Richtungen annähernd gleich ist. Die Intensität ist auf der Rückseite minimal höher als auf der Vorderseite. Das deutet darauf hin, dass die Substratfolie in diesem Wellenlängenbereich einen etwas geringeren Transmissionsgrad als das transparente Dielektrikum hat. Für praktische Anwendungen kann die Intensität in beide Richtungen als annähernd gleich angenommen werden.

In Abbildung 5.36 ist die Leuchtdichte der uni- und bidirektionalen Leuchten gegenübergestellt. Die Werte liegen im Bereich von 15 cd/m^2 to 80 cd/m^2 . Ein typischer TFT-Monitor erreicht bei vollflächig weißer Darstellung Leuchtdichten von 200 cd/m^2 to 300 cd/m^2 . Die Leuchtdichte der gedruckten Leuchten ist also vergleichsweise schwach, kann aber durch weitere Optimierung der Materialsysteme sowie durch eine Anpassung der Ansteuerung noch verbessert werden. Für die vorliegende Arbeit ist vor allem der relative Vergleich der Leuchtdichten sowie die Beeinflussung durch Verformen und Hinterspritzen interessant.

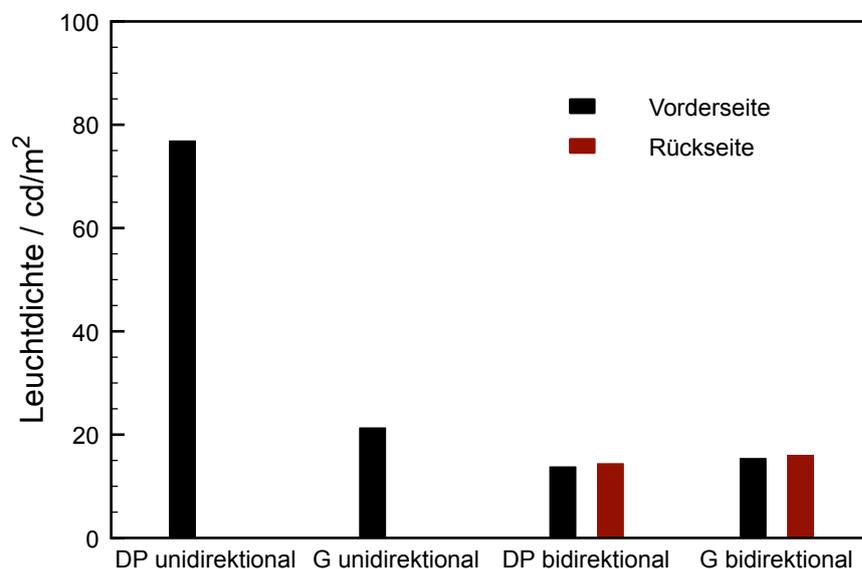


Abbildung 5.36: Leuchtdichte uni- und bidirektionaler EL-Leuchten bei $U = 140 \text{ V}$ und $f = 830 \text{ Hz}$ (angepasst übernommen von^[125])

Mechanische Charakterisierung

Für die mechanische Charakterisierung der EL-Leuchten und die Hinterspritzversuche wurde eine neue Probenreihe hergestellt. Diese unterscheidet sich von den verwendeten Materialien nur wenig von der Versuchsreihe EL1 (Tabelle 5.7). In der Versuchsreihe EL2 wurden nur noch zwei verschiedene Dielektrika verwendet. Die verwendeten Materialkombinationen sind in Tabelle 5.8 aufgelistet.

Tabelle 5.8: Versuchsreihe EL2: verwendete Materialien zur Herstellung uni- und bidirektionaler EL-Leuchten für Hinterspritz- und Verformungsversuche

Bezeichnung	Leuchtstoff	Dielektrikum
DuPont unidirektional	DuPont Luxprint [®] 8152	DuPont Luxprint [®] 8153 (weiß)
DuPont bidirektional	DuPont Luxprint [®] 8152	DuPont 5036
Gwent unidirektional	Gwent C2061027D13 (blau-grün)	DuPont Luxprint [®] 8153 (weiß)
Gwent bidirektional	Gwent C2061027D13 (blau-grün)	DuPont 5036

In Vorbereitung auf die Hinterspritzversuche wurde das Spannungs-Dehnungs-Verhalten der Leuchten im Zugversuch untersucht, um Erkenntnisse über die Verformbarkeit der Leuchten zu gewinnen. Im Spannungs-Dehnungs-Diagramm unterscheiden sich die Leuchten in ihrem Verhalten kaum von der unbedruckten Folie (Abbildung 5.37).

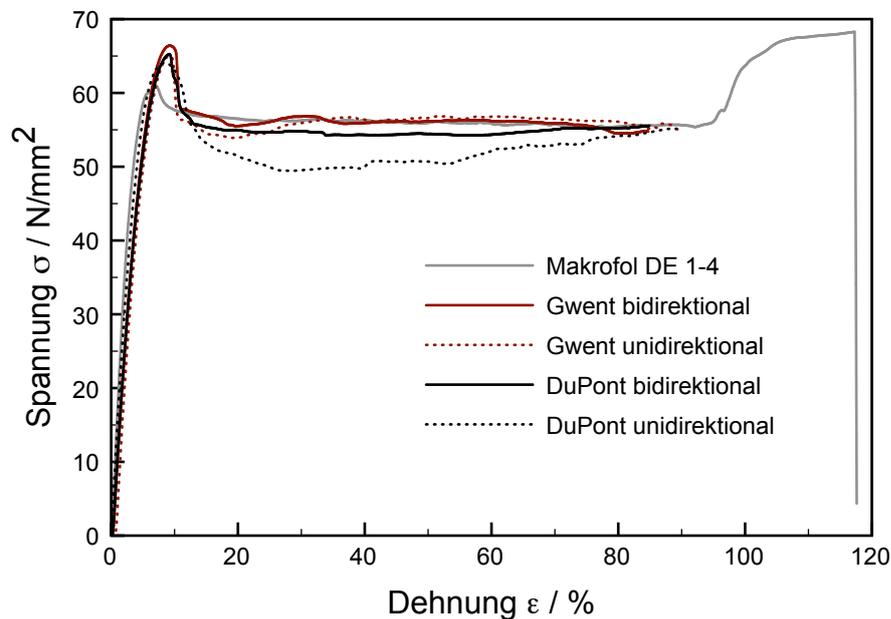


Abbildung 5.37: Spannungs-Dehnungs-Diagramm verschiedener EL-Leuchten auf Makrofol[®] DE 1-4 200 µm

Aussagekräftiger und für die weiteren Versuche interessanter sind die Schadensbilder der EL-Proben nach dem Zugversuch (Abbildung 5.38). Beide DuPont-Proben und die unidirektionale Gwent-Leuchte zeigen deutliche Delaminationen. Bei der unidirektionalen DuPont-Leuchte bricht der Schichtaufbau aus Leuchtstoff, Dielektrikum und Silberelektrode und löst sich in kleinen Stücken von der Grundelektrode. Bei der unidirektionalen Gwent-Leuchte und der bidirektionalen DuPont-Leuchte löst sich der Schichtaufbau aus den drei genannten Materialien im ganzen von der Grundelektrode. Einzig die bidirektionale Gwent-Leuchte bleibt nahezu unbeschädigt. Lediglich das transparente Dielektrikum wird durch die Zugbelastung etwas opaker. Diese Ergebnisse wurden in mehreren Versuchen bestätigt. Das weiße Dielektrikum DuPont Luxprint[®] 8153 scheint deutlich spröder

zu sein als das DuPont 5036, ebenso wie Leuchtstoff DuPont Luxprint[®] 8152 im Vergleich zum Leuchtstoff Gwent C2061027D13 (blau-grün).

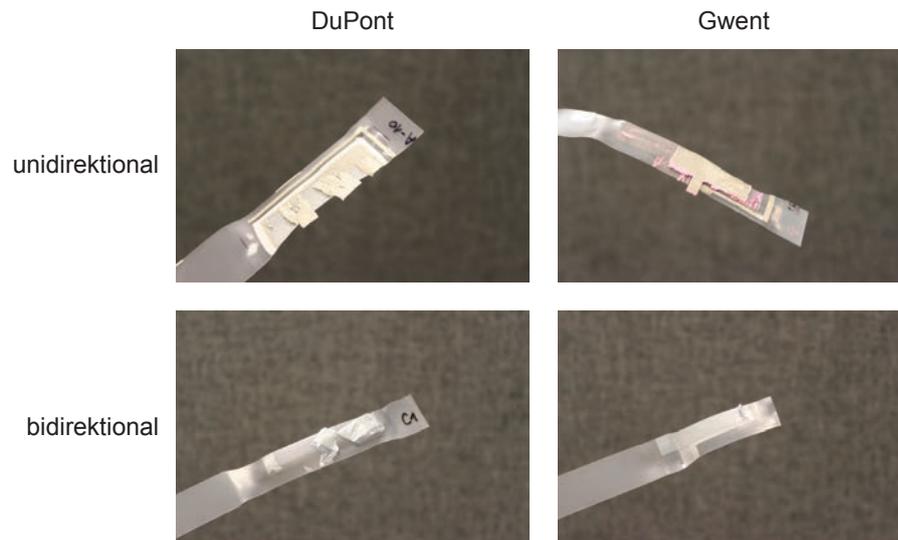


Abbildung 5.38: Schadensbild der im Zugversuch getesteten EL-Proben

Für ein Verformen und anschließendes Hinterspritzen scheint somit die bidirektionale Gwent-Leuchte besonders gut geeignet zu sein. Zur Bestätigung dieser Ergebnisse wurde eine eingeschaltete Leuchte in der Zugmaschine zerrissen und die Auswirkungen per Video dokumentiert. Abbildung 5.39 zeigt in einer Bildabfolge ausgewählte Standbilder der Videosequenz.

Die Bilder 1 und 2 zeigen die Leuchte im ausgeschalteten und eingeschalteten Zustand vor dem Start des Zugversuches. Nach Beginn der Zugbelastung (Bild 3) ist die beginnende Einschnürung der Probe zu erkennen (Bild 4). Auch auf diesen Standbildern wird die Veränderung der Transparenzeigenschaften des Dielektrikums hin zu höherer Opazität deutlich (Bilder 5 bis 7). Das führt u. a. dazu, dass die Leuchte dann heller erscheint, weil ein Teil des Lichtes nach vorn reflektiert wird. Bild 8 zeigt die Probe im maximal gedehnten Zustand (ca. 117%) kurz vor dem Bruch und Bild 9 die Leuchte nach dem Bruch. Das dazugehörige Spannungs-Dehnungs-Diagramm ist in Abbildung 5.40 dargestellt.

5.6.3 Hinterspritzen von EL-Leuchten

Die EL-Leuchten scheinen nach einer ersten Betrachtung mit dem bloßen Auge durch den Hinterspritzvorgang nicht beschädigt worden zu sein. Die Leuchten waren in ca. 90 % der Fälle auch nach dem Hinterspritzen funktionsfähig. Die Fehlerursache bei den nicht funktionsfähigen Leuchten lag in Unterbrechungen der Elektroden – diese Leuchten konnten nicht kontaktiert und somit auch nicht geprüft werden. Abbildung 5.41 zeigt eine bidirektionale Leuchte auf Basis des Leuchtstoffes von Gwent.

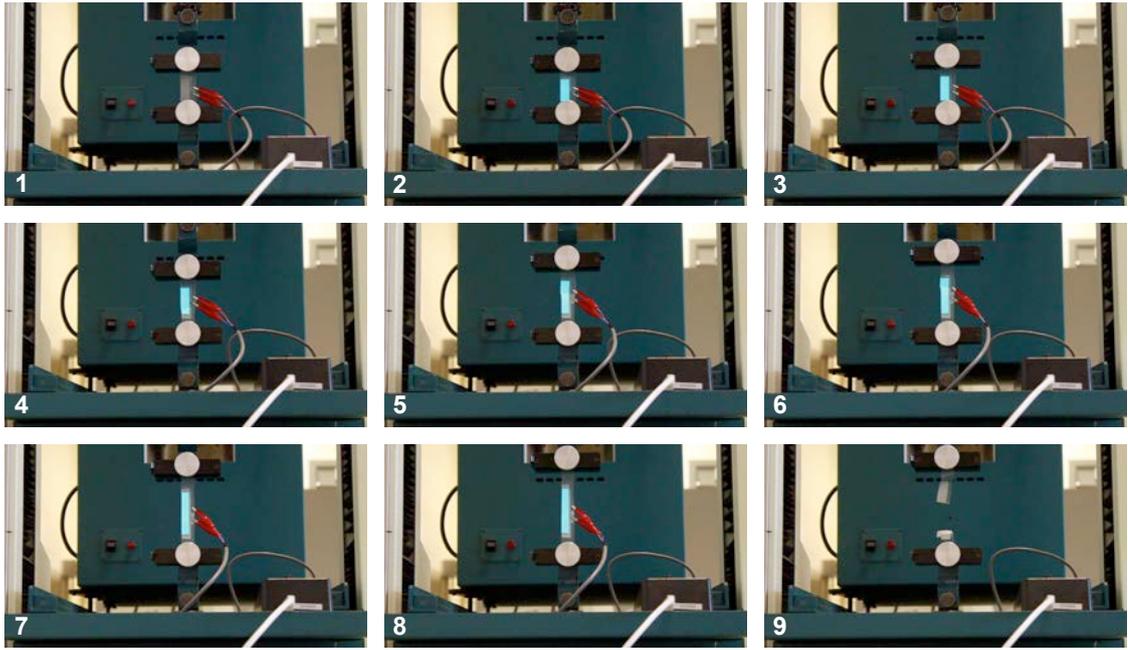


Abbildung 5.39: Bildabfolge eines Zugversuches an einer eingeschalteten bidirektionale Gwent-Leuchte auf Makrofol[®] DE 1-4 200 µm

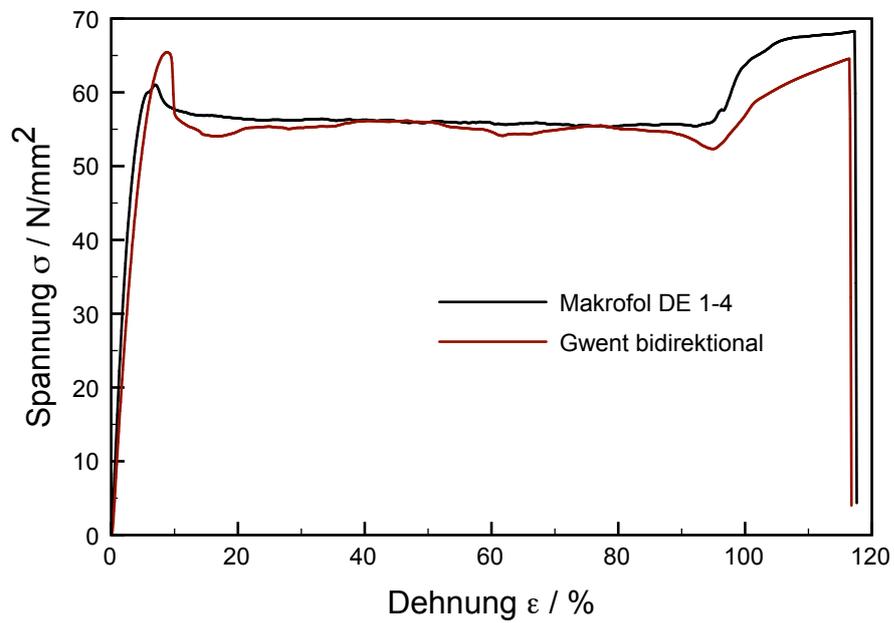


Abbildung 5.40: Spannungs-Dehnungs-Diagramm einer eingeschalteten bidirektionale Gwent-Leuchte auf Makrofol[®] DE 1-4 200 µm



Abbildung 5.41: Hinterspritzte bidirektionale Gwent-Leuchte; links: Rückseite liegt oben, rechts: Vorderseite liegt oben

Abbildung 5.42 zeigt den Vergleich der Emissionsspektren der Leuchten. Die unidirektionalen Leuchten und bidirektionalen Leuchten sind in diesem Fall jeweils sehr ähnlich, da jeweils das gleiche Dielektrikum verwendet wurde.

Abbildung 5.43 zeigt die Leuchtdichte in Abhängigkeit der Ansteuerspannung bei konstanter Frequenz. Die unidirektionalen Leuchten erreichen Leuchtdichten bis zu 160 cd/m^2 , die bidirektionalen Leuchten bis zu 30 cd/m^2 . Alle Leuchten wurden auf der Vorderseite gemessen.

Im Anschluss an diese Vorbetrachtungen wurden verschiedene EL-Leuchten hinterspritzt. In Abbildung 5.44 sind die Emissionsspektren verschiedener Leuchten, die mit einer Spannung von 80 V und einer Frequenz von 400 Hz angesteuert wurden, vor und nach dem Hinterspritzen dargestellt. Deutlich wird vor allem der starke Rückgang der Intensität bei den unidirektionalen Leuchten durch den Hinterspritzvorgang. Die maximale Intensität sinkt auf ca. 30 % des Ausgangswertes. Die Veränderungen in der Intensität der bidirektionalen Leuchten ist wesentlich geringer, sie sinkt um ca. 30 %.

In einer großen Versuchsreihe wurde die Leuchtdichte von jeweils mehreren Leuchten einer Art vor und nach dem Hinterspritzen gemessen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5.45 dargestellt. Auch hier ist die starke Beeinflussung der unidirektionalen Leuchten durch den Hinterspritzvorgang deutlich zu erkennen. Die Leuchtdichte sinkt auf ca. 30 % to 50 % des Ausgangswertes. Die Leuchtdichte der bidirektionalen Leuchten wird hingegen im Durchschnitt kaum beeinflusst. Sie schwanken lediglich nach dem Hinterspritzvorgang stärker (erhöhte Standardabweichung).

Um die Ursache des deutlichen Rückgangs der Leuchtdichte bei den unidirektionalen Leuchten zu untersuchen, wurden die Kapazitäten der Leuchten vor und nach dem Hinterspritzen gemessen. In Abbildung 5.46 ist der Zusammenhang grafisch dargestellt. Prinzipiell ist zu erkennen, dass eine hohe Kapazität zu einer hohen Leuchtdichte führt. Es wird deutlich, dass die Kapazität der unidirektionalen Leuchten mit dem Dielektrikum DuPont Luxprint® 8153 durch den Hinterspritzvorgang deutlich abnimmt. Dagegen bleibt die Kapazität der bidirektionalen Leuchten (Dielektrikum DuPont 5036) nahezu gleich. Die Verringerung kann theoretisch mehrere Ursachen haben:

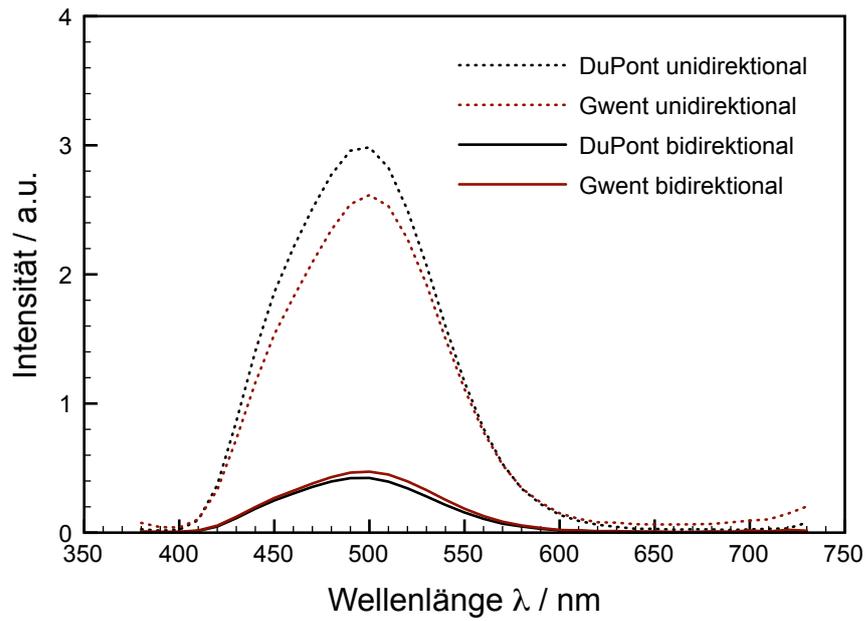


Abbildung 5.42: Emissionsspektren uni- und bidirektionaler EL-Leuchten bei $U = 75 \text{ V}$ und $f = 670 \text{ Hz}$

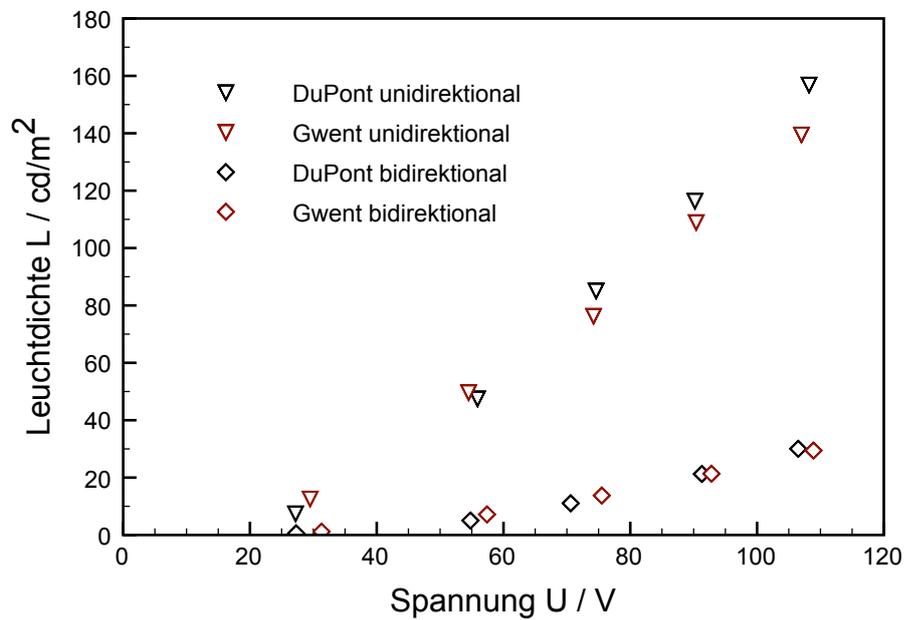


Abbildung 5.43: Leuchtdichte in Abhängigkeit der Ansteuerspannung bei einer konstanten Frequenz von 670 Hz

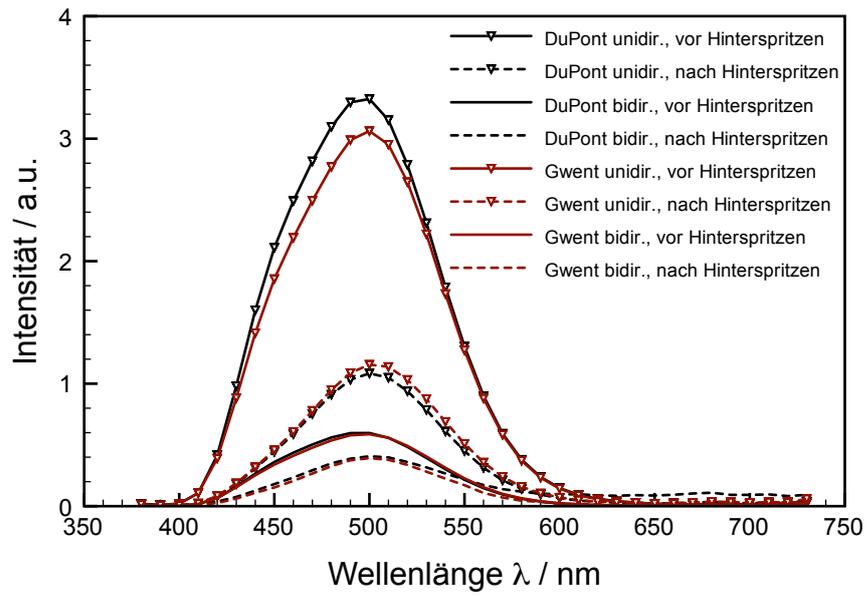


Abbildung 5.44: Emissionsspektren verschiedener Leuchten vor und nach dem Hinterspritzen bei $U = 80 \text{ V}$ und $f = 400 \text{ Hz}$

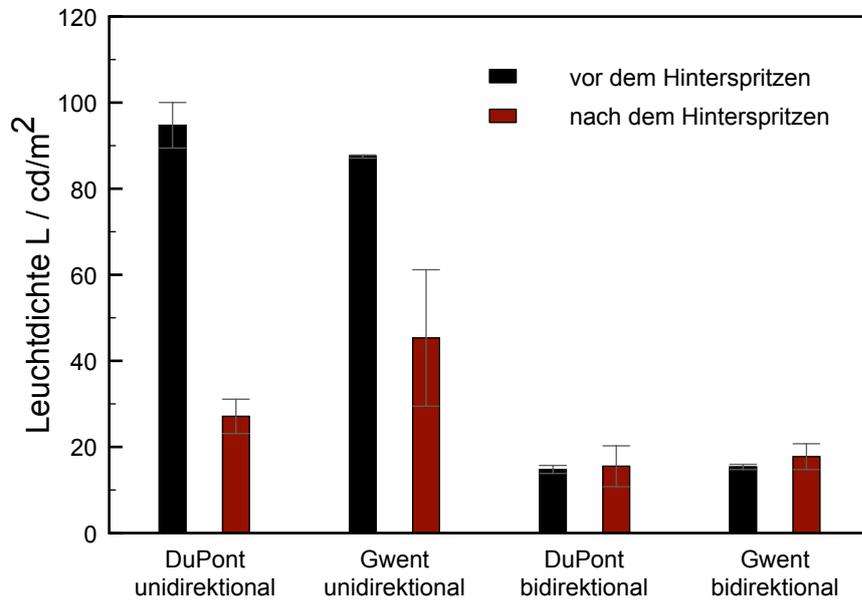


Abbildung 5.45: Leuchtdichte verschiedener Leuchten vor und nach dem Hinterspritzen

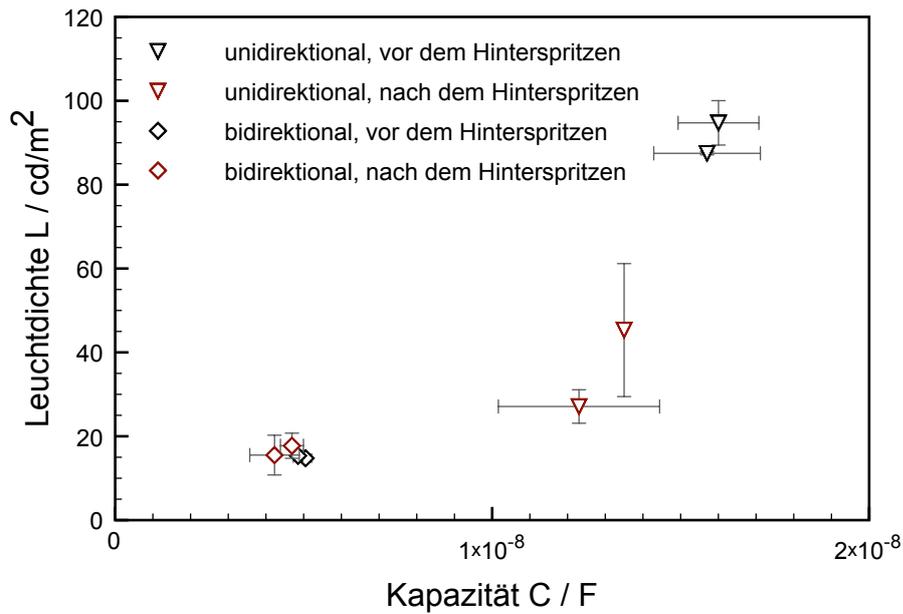


Abbildung 5.46: Leuchtdichte verschiedener Leuchtentypen in Abhängigkeit von der Kapazität

- Verringerung der relativen Permittivität,
- Verringerung der Fläche und
- Erhöhung der Dicke des Dielektrikums.

Die Leuchten wurden durch den Hinterspritzvorgang nicht offensichtlich verändert oder verzerrt. Eine Verringerung der Fläche kann somit nicht die Ursache für die verringerte Kapazität sein. Die Erhöhung der Dicke des Dielektrikums ist sehr unwahrscheinlich, da das Hinterspritzen unter hohem Druck erfolgt und die Leuchte gegen das Werkzeug gedrückt wird. Vermutlich verringert sich die relative Permittivität des Dielektrikums durch die Temperatur- und Druckbelastung.

Das Dielektrikum DuPont Luxprint[®] 8153 enthält das Material Bariumtitanat (BaTiO_3). Dieses Material weist eine perowskite Kristallstruktur auf und kann in fünf verschiedenen Phasen vorliegen (Tabelle 5.9)^[146].

Tabelle 5.9: Phasen und Kristallsysteme von BaTiO_3 ^[146]

Temperaturbereich	Phase
$< -80\text{ °C}$	rhomboedrisch
$-80\text{ °C bis }5\text{ °C}$	orthorhombisch
$5\text{ °C bis }120\text{ °C}$	tetragonal
$120\text{ °C bis }1460\text{ °C}$	kubisch
$1460\text{ °C bis }1620\text{ °C}$	hexagonal

Die Übergangstemperatur von der tetragonalen (ferroelektrischen) in die kubische (paraelektrische) Phase wird als Curie-Temperatur T_C bezeichnet. Die Gitterstruktur in der tetragonalen Phase ist nicht zentrosymmetrisch, d. h. im Material bilden sich Dipole. Unterhalb von T_C zeigt (BaTiO₃) spontane Polarisation und ist piezoelektrisch. Ist der Kristall einer mechanischen Spannung unterworfen, ändert sich die elektrische Polarisation (induzierte piezoelektrische Polarisation).^[147]

Es ist denkbar, dass durch den hohen mechanischen Druck beim Hinterspritzen die Kristallstruktur verformt wurde und die Polarisation des Materials verändert wurde. Eine solche Veränderung kann die Ursache für die Verringerung der Kapazität sein.

5.6.4 Verformen von EL-Leuchten

Für die Verformversuche im HPF-Verfahren wurden neue Proben in größerem Format hergestellt um das vorhandene Verformwerkzeug nutzen zu können (vgl. Abbildung 3.6). Der Schichtaufbau und die verwendeten Materialien der Leuchten entsprechen den Angaben in Tabelle 5.8. Da die Versuche extern durchgeführt wurden, war die Anzahl der Proben begrenzt. Es wurden von jeder Variante zwei bis drei Proben verformt. Prinzipiell sind die Leuchten auch nach dem Verformen noch funktionsfähig. Abbildung 5.47 zeigt Fotos der vier Varianten.

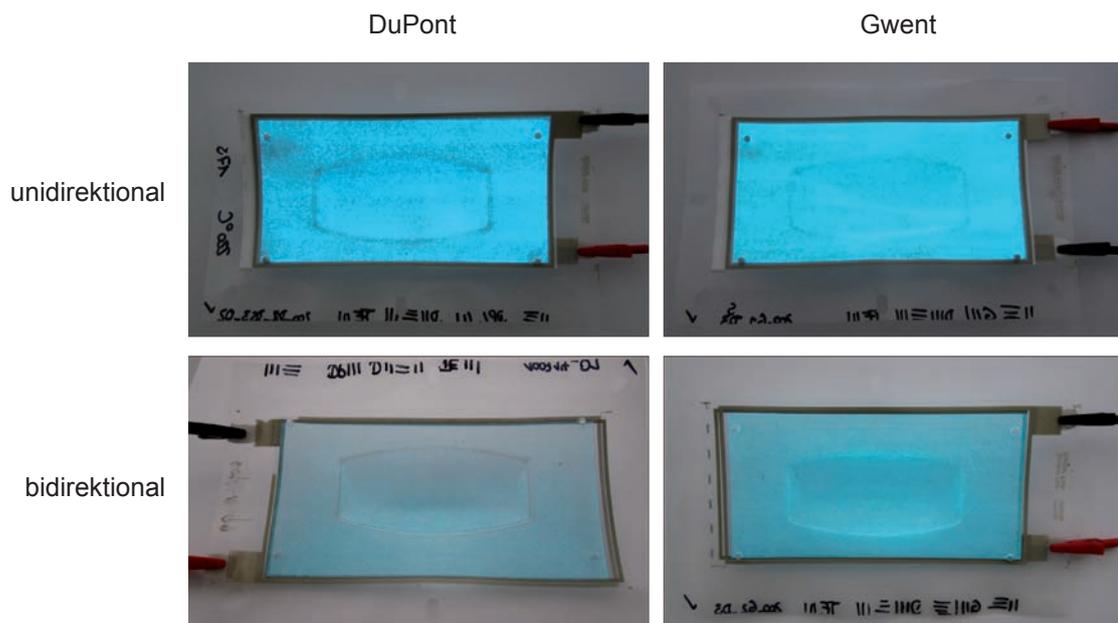


Abbildung 5.47: Fotos verformter EL-Leuchten (Vorderseite)

Die größte Dehnung erfährt das Material in den Randbereichen des fassförmigen Körpers. In diesen Bereichen ist in jeder der Leuchtentypen eine Veränderung der Leuchtdichte erkennbar. Die beiden unidirektionalen Leuchten sowie die bidirektionale DuPont-Leuchte zeigen eine Verringerung der Leuchtdichte, d. h. der Rand erscheint dunkler. Besonders die

beiden DuPont-Leuchten zeigen deutliche Unterbrechungen und leuchten nicht gleichmäßig. Interessant ist der Effekt, der bei der bidirektionalen Gwent-Leuchte zu beobachten ist. Im Randbereich erscheint die Leuchte heller als in der nicht verformten Fläche bzw. heller als vor dem Verformen. Dieser Effekt konnte bereits in den Zugversuchen beobachtet werden. Unter Dehnung wird das transparente Dielektrikum DuPont 5036 zunehmend opak. Dadurch wird ein Teil des Lichtes reflektiert und die Leuchte erscheint heller.

In Abbildung 5.48 sind die Emissionsspektren der vier abgebildeten Leuchten vor und nach dem Verformen dargestellt. Gemessen wurde jeweils in der Mitte der Leuchte. Es ist zu erkennen, dass die Intensität der unidirektionalen Leuchten durch den Verformvorgang deutlich abnimmt. Auch die bidirektionale DuPont-Leuchte zeigt eine deutliche Verringerung der Intensität. Bei der bidirektionalen Gwent-Leuchte ist keine Veränderung im Emissionsspektrum feststellbar.

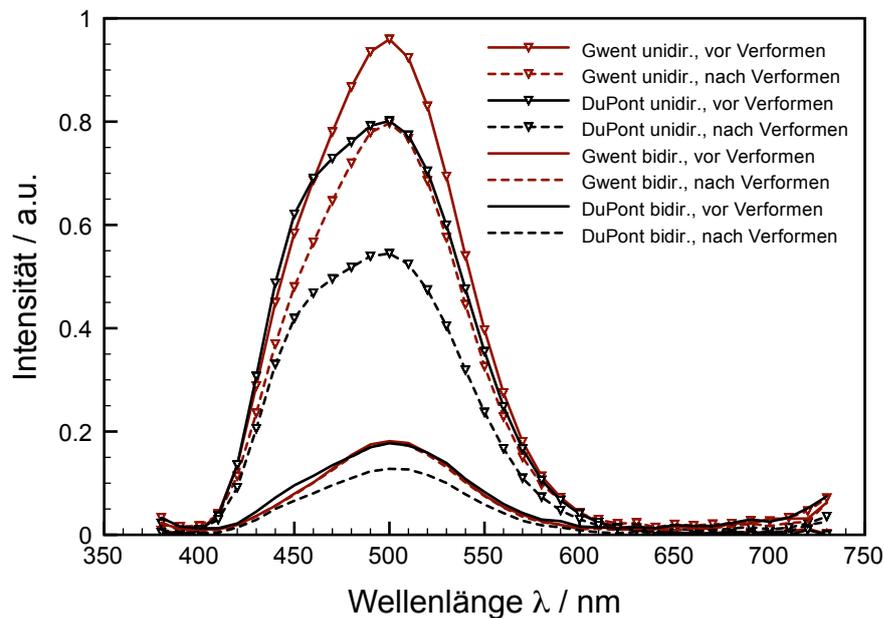


Abbildung 5.48: Emissionsspektren uni- und bidirektionaler EL-Leuchten vor und nach dem Verformen bei $U = 75 \text{ V}$ und $f = 670 \text{ Hz}$

Ähnliche Ergebnisse zeigt der Vergleich der Leuchtdichten vor und nach dem Verformen (vgl. Tabelle 5.10). Besonders stark verringert sich die Leuchtdichte bei den beiden DuPont-Leuchten. Nach dem Verformen beträgt diese lediglich noch 68 % der ursprünglichen Leuchtdichte bei der unidirektionalen Leuchte und 70 % bei der bidirektionalen Leuchte. Dagegen verringert sich die Leuchtdichte der bidirektionalen Gwent-Leuchte kaum.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die entwickelten bidirektionalen Leuchten zwar insgesamt eine geringere Leuchtdichte aufweisen, aber besser den thermischen und mechanischen Beanspruchungen beim Hinterspritzen und Verformen widerstehen. Im Vergleich der beiden Materialsysteme haben die Gwent-Leuchten einige Vorteile gegenüber den DuPont-Leuchten. Obwohl beide Typen vor der Beanspruchung ähnliche Leistungsdaten aufweisen, werden die Gwent-Leuchten durch die thermische und mechanische Belastung

Tabelle 5.10: Leuchtdichte von uni- und bidirektionaler EL-Leuchten vor (vV) und nach (nV) dem Verformen

Leuchtentyp	L_v (vV) / cd/m ²	L_v (nV) / cd/m ²	L_v (nV) / %
DuPont unidir.	23,8	16,1	67,7
DuPont bidir.	5,6	3,9	69,6
Gwent unidir.	27,2	22,7	83,5
Gwent bidir.	5,4	5,2	96,3

beim Hinterspritzen und Verformen kaum beeinflusst, wohingegen sich die Kenndaten der DuPont-Leuchten etwas verschlechtern. Die Auswertung der Leuchtdichte und des Emissionsspektrums vor und nach der Beanspruchung bestätigt die im Zugversuch ermittelten Ergebnisse. Die Ursachen für diese Unterschiede zwischen den Leuchten liegen zum einen in der unterschiedlichen Sprödigkeit der verwendeten Materialien und zum anderen in den genannten elektrischen Eigenschaften des Materials Bariumtitanat unter Temperatur- und Druckeinwirkung.

Im Anschluss an die wissenschaftlichen Untersuchungen wurden verschiedene praktische Prozess- und Fertigungsabläufe näher betrachtet. Diese Ergebnisse sind im Anhang der Arbeit dargestellt.

5.7 Ausblick

Die vorliegende Arbeit leistet einen ersten Beitrag zum besseren Verständnis der Einflussmechanismen beim Hinterspritzen von gedruckten elektronischen Komponenten. Im Folgenden soll kurz auf Lösungsansätze einiger Detailprobleme der vorliegenden Arbeit sowie auf drei große Themenfelder für weiterführende Untersuchungen eingegangen werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden als elektrisch leitfähiges Material zum Drucken der kapazitiv auslesbaren Speicherstrukturen Formulierungen des Polymers PEDOT:PSS verwendet. Daneben existieren weitere elektrisch leitfähige Polymere, z. B. PANI, verschiedene Druckfarben auf Kohlenstoffbasis, CNT-Formulierungen sowie metallpartikelbasierte Druckfarben. Die Eignung dieser Materialien ist separat zu untersuchen.

Zur Verbesserung der Haftfestigkeit von großflächig oder vollflächig bedruckten Substratfolien sollte, wie schon in Absatz 5.5 angedeutet, der Einsatz von Haftvermittlern geprüft werden. Diese werden vollflächig über das Motiv gedruckt und ermöglichen eine gute Verbundhaftung zwischen bedruckter Folie und eingespritztem Kunststoff.

Darüber hinaus ist eine Weiterentwicklung der bidirektionalen Leuchten sinnvoll. Durch Anpassungen am Leuchtstoff sowie Optimierung des Aufbaus der Leuchten (z. B. Verringerung der Schichtdicken) sollte eine Erhöhung der Leuchtdichte möglich sein. Darüber hinaus sind eine Verbesserung der Lebensdauer, d. h. einer geringeren Abnahme der Leuchtdichte über die Zeit, sowie weitere Farben, z. B. weißes Licht, für verschiedene Anwendungen anstrebenswert.

Neben den genannten Detailproblemen existieren drei größere Themenfelder für weiterführende Untersuchungen:

- Kunststoffverarbeitungsverfahren,
- Bauelemente sowie
- Aufbau- und Verbindungstechnik.

Kunststoffverarbeitungsverfahren Spritzgießen ist heute das bedeutendste Urformverfahren in der Kunststoffverarbeitung. Es können komplexe Formteile in verschiedenen Größen hergestellt werden^[7]. Weitere Fertigungsverfahren sind Pressformen, Extrudieren, Kalandrieren und Blasformen sowie verschiedene Umform- und Fügeverfahren. Zur Verarbeitung faserverstärkter Kunststoffe kommen weitere Verfahren, z. B. Laminieren und Pressen, zum Einsatz^[148]. Die Eignung dieser Verfahren zur Einbettung von gedruckter Elektronik in Kunststoffbauteile ist im Einzelfall zu prüfen. Bewertungskriterien sind z. B. die prinzipielle Möglichkeit zur (automatisierten) Zuführung und Positionierung bedruckter Folien sowie auftretende Prozesstemperaturen und -drücke.

Bauelemente In der vorliegenden Arbeit wurden zum einen kapazitiv auslesbare Speicherstrukturen und zum anderen gedruckte EL-Leuchten mittels Folienhinterspritzen in Kunststoffbauteile eingebettet. Das Gebiet der gedruckten Elektronik hat sich in den vergangenen Jahren rasch entwickelt. Verschiedene Bauelemente und Schaltungen wurden realisiert (vgl. Abschnitt 2.3.3). Zur Herstellung aktiver Bauelemente, z. B. Feldeffekttransistoren oder organischer Leuchtdioden, werden polymere Halbleiter verwendet, die aus der Lösung heraus verdrückt werden können. Die Forschungsarbeiten zur effizienten Prozessierung sowie zur Erhöhung der Zuverlässigkeit dieser Bauelemente dauern an. Die verwendeten Materialien sind empfindlich gegenüber äußeren Einflüssen, wie z. B. hohen Temperaturen, und verlangen eine exakte Prozesskontrolle. Es ist im Einzelfall zu prüfen, ob diese Materialien und Bauelemente unter Verwendung ähnlicher Prozessparameter hinterspritzt werden können oder ob zusätzliche Maßnahmen, wie Verkapselung o. ä., nötig sind.

Aufbau- und Verbindungstechnik Ein sehr wichtiger Aspekt für die Weiterentwicklung der Technologie ist die Aufbau- und Verbindungstechnik, speziell die Kontaktierung der hinterspritzten, gedruckten Elektronik. Dieser Aspekt spielte bei den kapazitiv auslesbaren Speicherstrukturen keine Rolle, da diese prinzipbedingt nicht kontaktiert werden müssen. Bei der Ansteuerung der EL-Leuchten und vielen anderen möglichen Bauelementen und Schaltungen ist eine Kontaktierung der gedruckten Leitbahnen jedoch unumgänglich. Es existieren bisher kaum Untersuchungen, welche Verfahren eine mechanisch stabile und gleichzeitig elektronisch zuverlässige Kontaktierung ermöglichen. Prinzipiell sind verschiedene Ansätze denkbar, z. B. das Herausführen von Kontaktfahnen oder die Durchkontaktierung der bedruckten Folie. Diese Ansätze müssen jedoch noch umfassend untersucht und in Fertigungsprozesse überführt werden.

6 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurden verschiedene Aspekte zur Integration von gedruckten, elektronischen Komponenten in Kunststoffbauteile betrachtet. Die Motivation für die Arbeiten liegt in der zunehmenden Durchsetzung unserer Welt mit elektronischen Komponenten. Neben klassischen Elektronikprodukten werden mehr und mehr auch Alltagsgegenstände mit elektronischen Funktionen ausgerüstet, die bisher keine entsprechenden Komponenten enthalten. Im Forschungsgebiet „Internet der Dinge“ entwickeln Wissenschaftler Visionen von der zunehmenden Vernetzung von Gegenständen. Parallel dazu entwickeln sich Technologien, die zur Realisierung dieser Visionen beitragen, weiter. Ein wichtiger, bisher wenig betrachteter Aspekt in diesem Zusammenhang sind Fertigungstechnologien, die eine effiziente Produktion sogenannter Smart Objects ermöglichen. Dieser Punkt wird in vorliegender Arbeit aufgegriffen und bearbeitet.

Ziel dieser Arbeit ist die Untersuchung von Möglichkeiten zur Integration von einfachen, elektronischen Komponenten in Alltagsgegenstände. Es wurden dabei die Vorteile der gedruckten Elektronik zur effizienten und kostengünstigen Herstellung von elektronischen Komponenten genutzt. In Kombination mit dem Kunststoffverarbeitungsverfahren des Folienhinterspritzens ergeben sich attraktive Verfahrensvarianten zur Herstellung von Kunststoffbauteilen mit integrierten, elektronischen Komponenten.

Konkret wurden zwei verschiedene Arten elektronischer Bauelemente betrachtet. Zum einen lag der Fokus auf einfachen, gedruckten, kapazitiv auslesbaren Speicherstrukturen zur Kennzeichnung von Produkten. Bei diesen Strukturen handelt es sich um strukturierte, elektrisch leitfähige Schichten. Zum anderen wurden als Beispiel für mehrschichtige Bauelemente gedruckte Elektrolumineszenzleuchten untersucht.

Die genannten Speicherstrukturen sind mittels hochproduktiver Massendruckverfahren, z. B. Tiefdruck oder Flexodruck, herstellbar. In der vorliegenden Arbeit wurden die genannten Strukturen unter Verwendung des Druckstoffes PEDOT:PSS auf Polycarbonatfolie gedruckt. Anschließend wurden sie analog zum In-Mould-Labeling Verfahren in der Spritzgießmaschine mit Polycarbonat hinterspritzt und somit in Kunststoffformteile integriert.

Die Speicherstrukturen wurden anschließend hinsichtlich ihrer Auslesbarkeit untersucht. Dies wurde vor allem durch die Messung elektrischer Leitfähigkeiten und Kapazitäten realisiert. Die Ergebnisse zeigen, dass der Hinterspritzvorgang unter erheblicher Temperatur- und Druckbelastung keine nachteiligen Auswirkungen auf die Funktionsfähigkeit und Auslesbarkeit der gedruckten Speicherstrukturen hat.

Der Einfluss klimatischer Schwankungen auf die hinterspritzten Speicherstrukturen wurde untersucht. Die gemessenen Kapazitäten werden vor allem durch die relative Luftfeuchte beeinflusst. Aufgrund der Wasseraufnahmeeigenschaften der Polycarbonatfolie führen

hohe relative Luftfeuchten zu höheren Kapazitäten. Die Beeinflussung durch Temperaturschwankungen ist nahezu vernachlässigbar.

Untersuchungen zur Haftfestigkeit der hinterspritzten Folien in Abhängigkeit der Folienstärke, der Vorbehandlung sowie der Flächendeckung des Druckbildes haben ergeben, dass insbesondere eine hohe Flächendeckung die Haftfestigkeit negativ beeinflusst.

Die im Rahmen der Arbeit hergestellten Elektrolumineszenzleuchten bestehen aus vier bis sieben Schichten, die zum größten Teil im Siebdruckverfahren hergestellt werden. Während den Untersuchungen zum Hinterspritzen von Elektrolumineszenzleuchten wurden parallel zu den bereits bekannten unidirektionalen Leuchten sogenannte bidirektionale Leuchten entwickelt, die bis dato noch nicht zum Stand der Technik gehören. Durch die Verwendung transparenter Elektroden und eines transparenten Dielektrikums konnten Leuchten realisiert werden, die in beide Richtungen Licht aussenden.

Die verschiedenen Leuchtentypen wurden nach dem Druck optisch hinsichtlich Leuchtdichte und Emissionsspektrum charakterisiert sowie die mechanischen Eigenschaften der Leuchten untersucht. Anschließend wurden die Leuchten analog zu den Speicherstrukturen hinterspritzt. Leuchtdichte und Emissionsspektrum wurden erneut ermittelt und mit den Daten vor dem Hinterspritzen verglichen. Insbesondere die bidirektionalen Leuchten werden durch den Hinterspritzvorgang nur wenig beeinflusst und sind besonders gut dafür geeignet.

Darüber hinaus wurden die gedruckten Leuchten mit Hilfe des sogenannten HPF-Verfahrens (high pressure forming) verformt. Auch hier wird insbesondere das Emissionsspektrum der bidirektionalen Leuchten nur wenig durch den Verformvorgang beeinflusst. Insgesamt widerstehen die bidirektionalen Leuchten im Vergleich zu den unidirektionalen Leuchten besser den thermischen und mechanischen Beanspruchungen beim Hinterspritzen und Verformen.

Die vorliegende Arbeit betrachtet erstmalig die Einflussfaktoren beim Hinterspritzen von gedruckten, elektronischen Komponenten und zeigt Grenzen der genutzten Verfahrenskombinationen auf. Während der Arbeiten wurden verschiedene Detailprobleme identifiziert, die einer weiteren Bearbeitung bedürfen. Darüber hinaus sind insbesondere im Bereich weiterer Kunststoffverarbeitungsverfahren, verschiedener elektronischer Bauelemente sowie im Bereich der Aufbau- und Verbindungstechnik noch umfassende Untersuchungen nötig, um die Integration komplexerer elektronischer Komponenten zur Produktionsreife zu führen.

Das Fazit dieser Arbeit ist, dass das Hinterspritzen von gedruckten, elektronischen Komponenten großes Potential zur Herstellung von sogenannten Smart Objects hat. Das Hinterspritzen gedruckter Speicherstrukturen kann ohne größeren Entwicklungsaufwand in Produktionsprozesse überführt werden. Dies gilt insbesondere für Produkte, die bereits heute mittels In-Mould-Labeling hergestellt werden. Darüber hinaus konnte durch die Entwicklung bidirektionaler Leuchten ein bedeutender Beitrag zur Integration von Elektrolumineszenzleuchten in Kunststoffbauteile erarbeitet werden.

Literaturverzeichnis

- [1] WEISER, M.: The Computer for the 21st Century. In: *Scientific American* 265 (1991), Nr. 3, S. 66–75
- [2] MATTERN, F.: Die technische Basis für das Internet der Dinge. In: FLEISCH, E. (Hrsg.); MATTERN, F. (Hrsg.): *Das Internet der Dinge*. Springer, 2005, S. 39–66
- [3] FLEISCH, E.; MATTERN, F. ; BILLINGER, S.: Betriebswirtschaftliche Applikationen des Ubiquitous Computing - Beispiele, Bausteine und Nutzenpotentiale. In: SAUERBURGER, H. (Hrsg.): *Ubiquitous Computing*. Heidelberg: dpunkt.verlag, 2003 (HMD - Praxis der Wirtschaftsinformatik 229), S. 5–15
- [4] GERSHENFELD, N.: *When things start to think*. New York: Henry Holt, 2000
- [5] *The Nobel Prize in Chemistry 2000 for the discovery and development of conductive polymers*. http://nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/2000/index.html. Version: 2000
- [6] KOHLHEPP, K.G.: Wie sich der Welt-Kunststoffmarkt verändert. In: *Kunststoffe* (2009), S. 21–25
- [7] SCHWARZ, O. (Hrsg.); EBELING, F.-W. (Hrsg.): *Kunststoffverarbeitung*. 11., überarbeitete Auflage. Würzburg: Vogel Buchverlag, 2009
- [8] ALAJOKI, T.; KOPONEN, M.; JUNTUNEN, E. ; PETAJA, J.: In-mould integration of electronics into mechanics and reliability of overmoulded electronic and Optoelectronic Components. In: *Microelectronics and Packaging Conference (EMPC)*, 2009, S. 1–6
- [9] ALAJOKI, T.; TUOMIKOSKI, M.; KOPONEN, M.; HEIKKINEN, M.; VEHMAS, J.; RÖNKÄ, K. ; MAANINEN, A.: Embedding Flexible OLEDs into Polymer Products by Injection Overmoulding Process. In: *Plastic Electronics Conference & Exhibition 2010*. Dresden, 19.-21. Oktober 2010
- [10] PFLAUM, A.: Technologie als Enabler für selbststeuernde Prozessketten: Evolution oder Revolution - vom „Smart Label“ zum autonomen „Smart Object“. In: ENGELHARDT-NOWITZKI, C. (Hrsg.); LACKNER, E. (Hrsg.): *Chargenverfolgung. Möglichkeiten, Grenzen und Anwendungsgebiete*. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag, 2006, S. 23–38
- [11] FERSCHA, A.: Pervasive Computing: connected > aware > smart. In: MATTERN, F. (Hrsg.): *Die Informatisierung des Alltags. Leben in smarten Umgebungen*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2007, S. 3–10

- [12] PHILIPP, O.; SCHALLER, A. ; PONGRATZ, S.: Das X-Internet – Verbindung zwischen physischer und Cyber-Welt. In: BULLINGER, H.-J. (Hrsg.); HOMPEL, M. ten (Hrsg.): *Das Internet der Dinge*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2007, S. 316–330
- [13] Norm DIN 6763. Dezember 1985. *Nummerung – Grundbegriffe*
- [14] FINKENZELLER, K.: *RFID-Handbuch*. 4. Auflage. München: Hanser, 2006
- [15] TEN HOMPEL, M.; BUECHTER, H. ; FRANZKE, U.: *Identifikationssysteme und Automatisierung*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008
- [16] WICKER, S. B.; BHARGAVA, V. K.: *Reed-Solomon Codes and Their Applications*. John Wiley & Sons, 1999
- [17] BARTNECK, N. (Hrsg.); KLAAS, V. (Hrsg.) ; SCHÖNHERR, H. (Hrsg.): *Prozesse optimieren mit RFID und Auto-ID*. Erlangen: Publicis Corporate Publishing, 2008
- [18] Schutzrecht US2005/0285761A1 (29. Dezember 2005). JANCKE, G. (Erfinder); Microsoft Corporation (Anmelder).
- [19] LENK, B.: *Auto-ID Lexikon. Begriffe & Kurzbezeichnungen der automatischen Identifikation*. Kirchheim: Monika Lenk Fachbuchverlag, 2008
- [20] MICROSOFT: *High Capacity Color Barcode (HCCB) Technology*. <http://www.microsoft.com/tag/content/overview/>
- [21] LANGKLOTZ, T.; BIMBER, O.: Unsynchronized 4D Barcodes. (2007). <http://e-pub.uni-weimar.de/volltexte/2007/913/>
- [22] MICROGLYPH TECHNOLOGY GMBH: *microglyph Technologie*. <http://www.microglyphs.com/deutsch/>
- [23] SPYDERLYNK: *A SnapTag is Your Logo.... but Interactive*. <http://www.spyderlynk.com/how-snaptags-work>
- [24] Schutzrecht US 3,719,804 (15. Juni 1971). ILLING, D. A. (Erfinder); International Computers Limited (Anmelder).
- [25] Schutzrecht EP 0 422 481 A2 (7. April 1989). BARTELS, H. (Erfinder); KG CATTS Gesellschaft für Erkennungs- und Sicherheitstechnologie mbH & Co. (Anmelder).
- [26] Schutzrecht EP 0 422 482 A2 (7. Oktober 1989). BARTELS, H. (Erfinder); KG CATTS Gesellschaft für Erkennungs- und Sicherheitstechnologie mbH & Co. (Anmelder).
- [27] WEIGELT, K.; HUEBLER, A. C.: Printed Near Field Communication System. In: HEGERING, H.-G. (Hrsg.); LEHMANN, A. (Hrsg.); OHLBACH, H. J. (Hrsg.) ; SCHEIDLER, C. (Hrsg.): *Informatik 2008. Beherrschbare Systeme dank Informatik. Beiträge der 38. Jahrestagung der Gesellschaft für Informatik (GI), 8.-13.9.2008* Bd. 1. München, 2008, S. 301–306
- [28] KERN, C.: *Anwendung von RFID-Systemen*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2006

- [29] RANKL, W.; EFFING, W.: *Handbuch der Chipkarten. Aufbau, Funktionsweise, Einsatz von Smart Cards*. 5. Auflage. München: Hanser, 2008
- [30] RFID JOURNAL: *How much does an RFID tag cost today?* <http://www.rfidjournal.com/faq/20/85>
- [31] IDENTMARKET: *Chipkarten*. <http://www.identmarket.de>
- [32] MAXICARD ONLINE-SHOP: *Plastikkarten online bestellen*. <http://www.maxicard.de>
- [33] MACKENSEN, E.: Drahtlose Datenkommunikation für intelligente, autarke Mikrosysteme. In: *2. GMM-Workshop Energieautarke Sensorik*. Dresden, 2002
- [34] JUNG, E.: Overview of Component Level Devices. In: DELANEY, K. (Hrsg.): *Ambient Intelligence with Microsystems. Augmented Materials and Smart Objects*. New York: Springer, 2008
- [35] SCHWONDA, G.: RFID und Sensorik. In: BARTNECK, N. (Hrsg.); KLAAS, V. (Hrsg.); SCHÖNHERR, H. (Hrsg.): *Prozesse optimieren mit RFID und Auto-ID*. Erlangen: Publicis Corporate Publishing, 2008
- [36] LAKE, M.: *Oberflächentechnik in der Kunststoffverarbeitung. Vorbehandeln, Beschichten, Funktionalisieren und Kennzeichnen von Kunststoffoberflächen*. München: Hanser, 2009
- [37] FAISST, B.: Kunststoffe mit dem Laser beschriften. In: *Laser Technik Journal* 5 (2008), Nr. 4, S. 40–43
- [38] BRINKHEINRICH, M.: Produktkennzeichnung: Laserbeschriftung auf dem Vormarsch. In: *Photonik* (2005), Nr. 3, S. 68–70
- [39] FAIRLEY, M. (Hrsg.): *RFID Smart Labels – A 'How to' guide to manufacturing and performance for the label coverter*. London: Tarsus Publishing Ltd., 2005
- [40] SCHIEBEL, G.: Low-Cost-Flip-Chip-Fertigung in einem Rolle-zu-Rolle-Prozess. In: REICHL, H. (Hrsg.): *Systemintegration in der Mikroelektronik. Flexible Leiterplatten - Innovationsfaktor mit Mehrwert für die Baugruppe*. Berlin: VDE Verlag, 2005, S. 73–86
- [41] JUNG, Minhun; KIM, Jaeyoung; NOH, Jinsoo; LIM, Namsoo; LIM, Chaemin; LEE, Gwangyong; KIM, Junseok; KANG, Hwiwon; JUNG, Kyunghwan; LEONARD, A; TOUR, J ; CHO, Gyoujin: All-Printed and Roll-to-Roll-Printable 13.56-MHz-Operated 1-bit RF Tag on Plastic Foils. In: *IEEE Transactions on Electron Devices* 57 (2010), Nr. 3, S. 571–580
- [42] PUDAS, M.; HALONEN, N.; GRANAT, P. ; VAEHAEKANGAS, J.: Gravure printing of conductive particulate polymer inks on flexible substrates. In: *Progress in Organic Coatings* 54 (2005), S. 310–316
- [43] SANGOI, R.; SMITH, C.G.; SEYMOUR, M.D.; VENKATARAMAN, J.N.; CLARK, D.M.; KLEPER, M.L. ; KAHN, B.E.: Printing radio frequency identification (RFID) tag antennas using inks containing silver dispersions. In: *Journal of Dispersion Science and Technology* 25 (2004), Nr. 4, S. 513–521

- [44] PERELAER, J.; DE GANS, B.-J. ; SCHUBERT, U.S.: Ink-jet Printing and Microwave Sintering of Conductive Silver Tracks. In: *Advanced Materials* 18 (2006), S. 2101–2104
- [45] SUBRAMANIAN, V.; CHANG, J.; MATTIS, B.; MOLESA, S.; REDINGER, D.; DE LA FUENTE VORNBROCK, A. ; VOLKMAN, S.K.: All-Printed Electronics: Materials, Devices, and Circuit Implications. In: *Proc. of Digital Fabrication 2006*. Denver, September 2006, S. 21–24
- [46] REDINGER, D.; MOLESA, S.; YIN, S.; FARSCHI, R. ; SUBRAMANIAN, V.: An ink-jet-deposited passive component process for RFID. In: *IEEE Transactions on Electron Devices* 51 (2004), Nr. 12, S. 1978–1983
- [47] LILJA, K.E.; BÄCKLUND, T.G.; LUPO, D.; HASSINEN, T. ; JOUTSENOJA, T.: Gravure printed organic rectifying diodes operating at high frequencies. In: *Organic Electronics* 10 (2009), Nr. 5, S. 1011–1014
- [48] HUEBLER, A.C.; DOETZ, F.; KEMPA, H.; KATZ, H.E.; BARTZSCH, M.; BRANDT, N.; HENNIG, I.; FUEGMANN, U.; VAIDYANATHAN, S.; GRANSTROM, J.; LIU, S.; SYDORENKO, A.; ZILLGER, T.; SCHMIDT, G.; PREISSLER, K.; REICHMANIS, E.; ECKERLE, P.; RICHTER, F.; FISCHER, T. ; HAHN, U.: Ring Oscillator Fabricated Completely by Means of Mass Printing Technologies. In: *Organic Electronics* 8 (2007), S. 480–486
- [49] JUNG, M.; LEE, K.; LIM, C.-M.; CHO, G.; JUNG, K.-H.; LIM, S.-Y.; YEYN, D.; HAN, J.; CHA, H.J.; KIM, J.; LEONARD, A. ; TOUR, J.: Digital Logic Gates Using All Printed SWCNT-TFTs Using Roll-to-Roll Gravure on PET Foils. In: *Proc. of the Large-area, Organic & Printed Electronics Convention (LOPE-C)*. Frankfurt/Main, 23.-25. Juni 2009, S. 2.6
- [50] MYNY, K.; STEUDEL, S.; VICCA, P.; BEENHAKKERS, M. J.; AERLE, N. A. J. M.; GELINCK, G. H.; GENOE, J.; DEHAENE, W. ; HEREMANS, P.: Plastic circuits and tags for 13.56MHz radio-frequency communication. In: *Solid State Electronics* 53 (2009), Nr. 12, S. 1220–1226
- [51] SEKITANI, T.; ZAITSU, K.; NOGUCHI, Y.; ISHIBE, K.; TAKAMIYA, M.; SAKURAI, T. ; SOMEYA, T.: Printed Nonvolatile Memory for a Sheet-Type Communication System. In: *IEEE Transactions on Electron Devices* 56 (2009), Nr. 5, S. 1027 – 1035
- [52] BAEG, K.-J.; NOH, Y.-Y.; GHIM, J.; KANG, S.-J.; LEE, H. ; KIM, D.-Y.: Organic Non-Volatile Memory Based on Pentacene Field-Effect Transistors Using a Polymeric Gate Electret. In: *Advanced Materials* 18 (2006), S. 3179–3183
- [53] REUTER, K.; KEMPA, H.; DESHMUKH, K.D.; KATZ, H.E. ; HUEBLER, A.C.: Full-swing organic inverters using a charged perfluorinated electret fabricated by means of mass-printing technologies. In: *Organic Electronics* 11 (2010), Nr. 1, S. 95–99
- [54] FORSCHUNGSVEREINIGUNG RÄUMLICHE ELEKTRONISCHE BAUGRUPPEN 3-D MID E.V. (Hrsg.): *3D-MID Technologie. Räumliche elektronische Baugruppen*. München: Carl Hanser Verlag, 2004
- [55] EHRENSTEIN, G.W. (Hrsg.): *Handbuch Kunststoff-Verbindungstechnik*. München: Hanser, 2004

- [56] FORSCHUNGSVEREINIGUNG RÄUMLICHE ELEKTRONISCHE BAUGRUPPEN 3-D MID E.V. (Hrsg.): *Herstellungsverfahren für MID*. <http://www.3d-mid.de>
- [57] KUHMANN, K.; DÖRFLER, R. ; EHRENSTEIN, G.W.: Chance und Herausforderung. 3D-MID: Technologien und Trends. In: *Kunststoffe* 91 (2001), Nr. 10, S. 73–84
- [58] ARIAS, A.C.; MACKENZIE, J.D.; MCCULLOCH, I.; RIVNAY, J. ; SALLES, A.: Materials and Applications for Large Area Electronics: Solution-Based Approaches. In: *Chemical Reviews* 110 (2010), Nr. 1, S. 3–24
- [59] MATHEWS, N.; LAM, Y.M.; MHAISALKAR, S.G. ; GRIMSDALE, A.C.: Printing materials for electronic devices. In: *International Journal of Materials Research* 101 (2010), Nr. 2, S. 236–250
- [60] KIRCHMEYER, S.; REUTER, K.: Scientific importance, properties and growing applications of poly (3, 4-ethylenedioxythiophene). In: *Journal of Materials Chemistry* 15 (2005), Nr. 21, S. 2077–2088
- [61] LI, J.; FAN, L. ; WONG, C. P.: Influence of Thermal Treatment on the Conductivity of PEDT Films. In: *Proc. of the 9th International Symposium on Advanced Packaging Materials: Processes, Properties and Interfaces*. Atlanta, 24–26 März 2004, S. 204–207
- [62] HUANG, J.; MILLER, P.F.; DE MELLO, J.C.; DE MELLO, A.J. ; BRADLEY, D.D.C.: Influence of thermal treatment on the conductivity and morphology of PEDOT/PSS films. In: *Synthetic Metals* 139 (2003), S. 569–572
- [63] GROENENDAAL, L.; JONAS, F.; FREITAG, D.; PIELARTZIK, H. ; REYNOLDS, J.R.: Poly(3,4-ethylenedioxythiophene) and Its Derivatives: Past, Present, and Future. In: *Advanced Materials* 12 (2000), Nr. 7, S. 481–494
- [64] KOIDIS, C; LOGOTHETIDIS, S; KAPNOPOULOS, C; KARAGIANNIDIS, P G.; LASKARAKIS, A ; HASTAS, N A.: Substrate treatment and drying conditions effect on the properties of roll-to-roll gravure printed PEDOT:PSS thin films. In: *Materials Science & Engineering B* 176 (2011), Nr. 19, S. 1556–1561
- [65] KIEBOOMS, R.; ALESHIN, A.; HUTCHSON, K. ; WUDL, F.: Thermal and Electromagnetic Behavior of Pedot Films. In: *Journal of Physical Chemistry B* 101 (1997), S. 11037–11039
- [66] KOLESOV, I.S.; MUENSTEDT, H.: Stabilität antielektrostatischer Beschichtungen auf der Basis von Polyethylenedioxythiophenen. In: *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* 34 (2003), S. 542–548
- [67] LANG, U.; NAUJOKS, N. ; DUAL, J.: Mechanical characterization of PEDOT: PSS thin films. In: *Synthetic Metals* 159 (2009), S. 473–479
- [68] ONO, Y.A.: *Series on Information Display*. Bd. 1: *Electroluminescent displays*. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 1995
- [69] YANG, H.; HOLLOWAY, P.H. ; RATNA, B.B.: Photoluminescent and electroluminescent properties of Mn-doped ZnS nanocrystals. In: *Journal of Applied Physics* 93 (2003), Nr. 1, S. 586–592

- [70] SCHRAGE, C.; KASKEL, S.: Flexible and Transparent SWCNT Electrodes for Alternating Current Electroluminescence Devices. In: *ACS Applied Materials & Interfaces* 1 (2009), Nr. 8, S. 1640–1644
- [71] KIM, M.J.; SHIN, D.W.; KIM, J.-Y.; PARK, S.H.; HAN, I.t. ; YOO, J.B.: The production of a flexible electroluminescent device on polyethylene terephthalate films using transparent conducting carbon nanotube electrode. In: *Carbon* 47 (2009), Nr. 15, S. 3461–3465
- [72] CHADHA, S.S.: Powder Electroluminescence. In: KITAI, A. (Hrsg.): *Solid State Luminescence. Theory, materials and devices*. London: Chapman & Hall, 1993
- [73] VOIGT, M.M.; GUTE, A.; CHUNG, D.-Y.; KHAN, R.U.A.; CAMPBELL, A.J.; BRADLEY, D.D.C.; MENG, F.; STEINKE, J.H.G.; TIERNEY, S.; MCCULLOCH, I.; PENXTEN, H.; LUTSEN, L.; DOUHERET, O.; MANCA, J.; BROKMANN, U.; SÖNNICHSEN, K.; HÜLSENBERG, D.; BOCK, W.; BARRON, C.; BLANCKAERT, N.; SPRINGER, S.; GRUPP, J. ; MOSLEY, A.: Polymer Field-Effect Transistors Fabricated by the Sequential Gravure Printing of Polythiophene, Two Insulator Layers, and a Metal Ink Gate. In: *Advanced Functional Materials* 20 (2010), Nr. 2, S. 239–246
- [74] HAMBSCH, M.; REUTER, K.; STANEL, M.; SCHMIDT, G.; KEMPA, H.; FUEGMANN, U.; HAHN, U. ; HUEBLER, A.C.: Uniformity of fully gravure printed organic field-effect transistors. In: *Materials Science & Engineering B* 170 (2010), S. 93–98
- [75] HARREY, P.M.; RAMSEY, B.J.; EVANS, P.S.A ; HARRISON, D.J.: Capacitive-type humidity sensors fabricated using the offset lithographic printing process. In: *Sensors and Actuators B* 87 (2002), S. 226–232
- [76] REUTER, K.; KEMPA, H.; BRANDT, N.; BARTZSCH, M. ; HUEBLER, A.C.: Influence of process parameters on the electrical properties of offset printed conductive polymer layers. In: *Progress in Organic Coatings* 58 (2007), S. 312–315
- [77] DEGANELLO, D; CHERRY, J.A; GETHIN, D.T ; CLAYPOLE, T.C: Patterning of micro-scale conductive networks using reel-to-reel Flexographic Printing. In: *Thin Solid Films* 518 (2010), Nr. 21, S. 6113–6116
- [78] MÄKELÄ, T.; JUSSILA, S.; KOSONEN, H.; BÄCKLUND, T.G.; SANDBERG, H.G.O. ; STUBB, H.: Utilizing roll-to-roll techniques for manufacturing source-drain electrodes for all-polymer transistors. In: *Synthetic Metals* 153 (2005), S. 285–288
- [79] SCHMIDT, G.; HAHN, U.; HUEBLER, A.C. ; FUEGMANN, U.: Realization of electronic structures by means of flexographic printing. In: *Proc. of the 1st international IARIGAI student conference on print and media technology (Printing Future Days)*. Chemnitz, Germany: Verlag für Wissenschaft und Forschung Berlin, 14.-17. November 2005, S. 100–103
- [80] SIRRINGHAUS, H.; KAWASE, T.; FRIEND, R.H.; SHIMODA, T.; INBASEKARAN, M.; WU, W. ; WOO, E.P.: High-Resolution Inkjet Printing of All-Polymer Transistor Circuits. In: *Science* 290 (2000), S. 2123–2126

- [81] DE GANS, B.-J.; DUINEVELD, P.C. ; SCHUBERT, U.S.: Inkjet Printing of Polymers: State of the Art and Future Developments. In: *Advanced Materials* 16 (2004), Nr. 3, S. 203–213
- [82] KREBS, F.C.: Fabrication and processing of polymer solar cells: a review of printing and coating techniques. In: *Solar Energy Materials and Solar Cells* 93 (2009), Nr. 4, S. 394–412
- [83] NUMAKURA, D.; TURUNEN, R. ; NAKAYAMA, M.: Screen Printing for High-Density Flexible Electronics. In: *Printed Circuit Design & Manufacture* 24 (2007), Nr. 10, S. 44–49
- [84] KIPPHAN, H. (Hrsg.): *Handbuch der Printmedien*. Heidelberg, Berlin: Springer, 2000
- [85] FISCHER, T.; HAHN, U.; DINTER, M.; BARTZSCH, M.; SCHMIDT, G.; KEMPA, H. ; HUEBLER, A.C.: Novel in-line method for patterned deposition of conductive structures. In: *Organic Electronics* 10 (2009), Nr. 3, S. 547–550
- [86] SHIN, D.-Y.; LEE, Y. ; KIM, C.H.: Performance characterization of screen printed radio frequency identification antennas with silver nanopaste. In: *Thin Solid Films* 517 (2009), Nr. 21, S. 6112–6118
- [87] HARREY, P.M.; EVANS, P.S.A.; RAMSEY, B.J. ; HARRISON, D.J.: Interdigitated Capacitors by Offset Lithography. In: *Journal of Electronics Manufacturing* 10 (2000), Nr. 1, S. 69–77
- [88] CHURCH, K.; MACDONALD, E.; CLARK, P.; TAYLOR, R.; PAUL, D.; STONE, K.; WILHELM, M.; MEDINA, F.; LYKE, J. ; WICKER, R.: Printed electronic processes for flexible hybrid circuits and antennas. In: *Flexible Electronics & Displays Conference and Exhibition*, 2009, S. 1–7
- [89] ZIELKE, D.; HUEBLER, A.C.; HAHN, U.; BRANDT, N.; BARTZSCH, M.; FUEGMANN, U.; FISCHER, T.; VERES, J. ; OGIER, S.: Polymer-based organic field-effect transistor using offset printed source-drain structures. In: *Applied Physics Letters* 87 (2005), S. 123508
- [90] SIRRINGHAUS, H.; ANDO, M.: Materials Challenges and Applications of Solution-Processed Organic Field-Effect Transistors. In: *MRS Bulletin* 33 (2008), S. 676–682
- [91] HUEBLER, A; TRNOVEC, B; ZILLGER, T; ALI, M; WETZOLD, N; MINGEBACH, M; WAGENPFAHL, A; DEIBEL, C ; DYAKONOV, V: Printed Paper Photovoltaic Cells. In: *Advanced Energy Materials* 1 (2011), Nr. 6, S. 1018–1022
- [92] KOPOLA, P; TUOMIKOSKI, M; SUHONEN, R ; MAANINEN, A: Gravure printed organic light emitting diodes for lighting applications. In: *Thin Solid Films* 517 (2009), S. 5757–5762
- [93] PARK, J.H.; LEE, S.H.; KIM, J.S.; KWON, A.K.; PARK, H.L. ; HAN, S.D.: White-electroluminescent device with ZnS: Mn, Cu, Cl phosphor. In: *Journal of Luminescence* 126 (2007), Nr. 2, S. 566–570

- [94] CHANG, J.B.; LIU, V.; SUBRAMANIAN, V.; SIVULA, K.; LUSCOMBE, C.; MURPHY, A.; LIU, J. ; FRECHET, J.M.J.: Printable polythiophene gas sensor array for low-cost electronic noses. In: *Journal of Applied Physics* 100 (2006), Nr. 1, S. 014506
- [95] ANDERS, S.; LITTEK, W. ; SCHNEIDER, W.: Hinterspritzen von Dekormaterialien durch Niederdruck-Spritzgießen. In: *Kunststoffe* 80 (1990), Nr. 9, S. 997–1002
- [96] JOHANNABER, F.; MICHAELI, W.: *Handbuch Spritzgießen*. München, Wien: Hanser, 2001
- [97] EHRITT, J.; SCHRÖDER, K.: *Gasinnendruck- und Zweikomponenten-Spritzgießverfahren*. Heidelberg: Hüthig, 2003
- [98] KIM, S.; LEE, J.; KIM, J. ; YOUN, J.R.: Effects of film and substrate dimensions on warpage of film insert molded parts. In: *Polymer Engineering and Science* 50 (2010), Nr. 6, S. 1205–1213
- [99] LEONG, Y.W.; YAMAGUCHI, S.; MIZOGUCHI, M.; HAMADA, H.; ISHIKU, U.S. ; TSUJII, T.: The Effect of Molding Conditions on Mechanical and Morphological Properties at the Interface of Film Insert Injection Molded Polypropylene-Film/Polypropylene Matrix. In: *Polymer Engineering and Science* 44 (2004), Nr. 12, S. 2327–2334
- [100] LEONHARD KURZ STIFTUNG & CO. KG (Hrsg.): *Inmould Decoration*. <http://www.kurz.de/de/>
- [101] AUER, H.; HAGENLOCHER, B.A.; PICKEL, H. ; VOLLAND, W.: Inmould-Labeling: Dekorationsverfahren der Zukunft. In: *Plastverarbeiter* 45 (1994), Nr. 11, S. 109–111
- [102] TEN TIJE, H.: Im Formnest fixiert. In: *Plastverarbeiter* 48 (1997), Nr. 3, S. 43–44
- [103] GREFFENSTEIN, A.; KAYMAK, K.: Karosserie-Außenteile. Folie statt Lackierung? In: *Kunststoffe* (2003), Nr. 6, S. 84–87
- [104] ENEWOLDSEN, P.; BRAUN, H.: Folienhinterspritzen. Dekorieren in der Spritzgießmaschine. In: *Kunststoffe* 89 (1999), Nr. 9, S. 102–104
- [105] STEINBICHLER, G.; GIESSAUF, J.: Thermoformen im Spritzgießwerkzeug. In: *Kunststoffe* 87 (1997), Nr. 10, S. 1262–1270
- [106] BOURGIN, P.; CORMEAU, I. ; SAINT-MATIN, T.: A first step towards the modelling of the thermoforming of plastic sheets. In: *Journal of Materials Processing Technology* 54 (1995), S. 1–11
- [107] WARBY, M.K.; WHITEMAN, J.R.; JIANG, W.-G.; WARWICK, P. ; WRIGHT, T.: Finite element simulation of thermoforming processes for polymer sheets. In: *Mathematics and Computers in Simulation* 61 (2003), S. 209–218
- [108] FERTSCHEJ, A.; LANGECKER, G.R.: Schwindung und Verzug folienhinterspritzter Formteile. In: *Kunststoffe* 95 (2005), Nr. 3, S. 43–45
- [109] PHILLIPS, C.O.; BOULD, D.C.; CLAYPOLE, T.C. ; GETHIN, D.T.: Finite element modelling of low temperature forming of polymer films with application in in-mould decoration. In: *Materials and Design* 30 (2009), S. 537–550

- [110] WIELPUETZ, M.: *IKV - Berichte aus der Kunststoffverarbeitung*. Bd. 147: *Analyse der Hinterspritztechnik kompakter Dekormaterialien*. Aachen: Verlagsgruppe Mainz, 2004
- [111] MITZLER, J.; JANSSON, H. ; KAUFMANN, G.: Preforming and In-mould Lamination in one Operation. In: *Kunststoffe plast europe* (2004), Nr. 3, S. 1–4
- [112] WANK, J.: Spritzgießteile mit Oberflächen-Dekor: Vergleich der Verfahren. In: *Plastverarbeiter* 44 (1993), Nr. 7, S. 70–76
- [113] STEINBICHLER, G.; GIESSAUF, J.: Das Maß ist das Ziel. In: *Kunststoffe* 88 (1998), Nr. 9, S. 1357–1366
- [114] MICHAELI, W; BROCKMANN, C: Dem Verzug auf der Spur. In: *Plastverarbeiter* 47 (1996), Nr. 9, S. 44–49
- [115] CHEN, S; LI, H; HUANG, S ; WANG, Y: Effect of decoration film on mold surface temperature during in-mold decoration injection molding process. In: *International Communications in Heat and Mass Transfer* 37 (2010), Nr. 5, S. 501–505
- [116] LEE, J.; JANG, E.; SHIN, S.; PARK, S. ; CHUNG, H.: Prediction of Residual Stress Caused by IML Process and Deformation Due to Thermal Impact. In: *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A* 34 (2010), Nr. 3, S. 375–382
- [117] WILLEMANN, R: Auf die Füllung kommt es an. In: *Plastverarbeiter* (2007), Nr. 2, S. 50–51
- [118] KRUPA, S; WITTWER, D; MARTISKAINEN, M; ELLIOTT, M; LEE, D; HAREL, S; SHALGI, Y ; QUANTZ, S: Advanced antenna manufacturing technologies. In: *IEEE International Conference on Microwaves, Communications, Antennas and Electronics Systems (COMCAS)*, 2009, S. 1–4
- [119] HAEFFNER, H.; SCHMIDT, J.: Datenschutz durch Hinterspritzen. In: *Kunststoffe* (2007), Nr. 10, S. 201–203
- [120] Beschädigungssichere Integration von RFID-Etiketten in Spritzgussteile. In: *Kunststoffe* (2007), Nr. 10, S. 204
- [121] REINECKE, M.: Ein Zukunftsszenario: Automobilanwendungen von übermorgen. In: *Kunststoffe* (2003), Nr. 8, S. 64–66
- [122] Schutzrecht CH 695 623 A5 (2. November 2001). ENZ, E. (Erfinder); Lumitec AG (Anmelder).
- [123] KOPONEN, M.; ALAJOKI, T.; KOSONEN, T.; PETÄJÄ, J.; HEIKKINEN, M.; VUORINEN, T. ; MÄKINEN, J.-T.: Adhesion of Flexible Printed Circuit Substrate to Overmoulded Polymer and Characterization of Overmoulded Electronic Components. In: *IMAPS Nordic Annual Conference*. Helsingör, Denmark, 2008, S. 207–212
- [124] Makrofol DE / Bayer AG. 1999. – ATI 7014 de (Anwendungstechnische Information)
- [125] WEIGELT, K.; JEWELL, E. H.; PHILLIPS, C. O.; CLAYPOLE, T. C. ; HUEBLER, A. C.: Bidirectional flexible mouldable electroluminescent lamps fabricated by screen printing. In: *Journal of Print and Media Technology Research* 1 (2012), Nr. 2, S. 97–102

- [126] SCHMIDT, G.: *Erzeugung elektronischer Strukturen mittels Flexodruck*. Chemnitz, TU Chemnitz, Diplomarbeit, Mai 2005
- [127] GRUNDKE, K.: Characterization of Polymer Surfaces by Wetting and Electrokinetic Measurements – Contact Angle, Interfacial Tension, Zeta Potential. In: STAMM, M. (Hrsg.): *Polymer Surfaces and Interfaces. Characterization, Modification and Applications*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008, Kapitel 6, S. 103–138
- [128] HABENICHT, G.: *Kleben. Grundlagen, Technologien, Anwendungen*. 6., aktualisierte Auflage. Berlin: Springer, 2009
- [129] HERMANIES, E.: Ein Beitrag zu den wissenschaftlichen Grundlagen des Flachdrucks I - Die Funktionsweise von Flachdruckformen und ihre allgemeinen grenzflächenenergetischen Ursachen. In: *Papier und Druck* 32 (1983), Nr. 1, S. 4–8
- [130] OWENS, D. K.; WENDT, R. C.: Estimation of the Surface Free Energy of Polymers. In: *Journal of Applied Polymer Science* 13 (1969), S. 1741–1747
- [131] RABEL, W.: Einige Aspekte der Benetzungstheorie und ihre Anwendung auf die Untersuchung und Veränderung der Oberflächeneigenschaften von Polymeren. In: *Farbe und Lack* 77 (1971), Nr. 10, S. 997–1005
- [132] BAUR, E.; BRINKMANN, S.; OSSWALD, T. ; SCHMACHTENBERG, E.: *Saechtling Kunststoff Taschenbuch*. 30. Auflage. München: Hanser, 2007
- [133] ERHARD, G.: *Konstruieren mit Kunststoffen*. 4. Auflage. München: Hanser, 2008
- [134] Norm DIN EN 28510 Teil 1. Mai 1993. *Klebstoffe. Schälprüfung für flexibel/starr geklebte Proben. Teil 1: 90°-Schälversuch*
- [135] AUMUELLER, W.: Schälprüfung an 2-Komponenten-Bauteilen. In: *Kunststoffe* 91 (2001), Nr. 2, S. 46–50
- [136] MICHEL, M.: *Schälfestigkeit von gedruckter, hinterspritzter Elektronik*. Chemnitz, TU Chemnitz, Diplomarbeit, 2010
- [137] MUHS, D.; WITTEL, H.; JANNASCH, D. ; VOSSIEK, J.: *Roloff/Matek Maschinenelemente. Normung, Berechnung, Gestaltung*. 18., vollst. überarb. Auflage. Wiesbaden: Vieweg, 2007
- [138] ILLING, M.: *Entwicklung und Aufbau eines Versuchsstandes zur seriellen Kapazitätsmessung an hinterspritzten Speicherstrukturen*. Chemnitz, TU Chemnitz, Projektarbeit, November 2009
- [139] DOMININGHAUS, H. (Hrsg.); ELSNER, P. (Hrsg.); EYERER, P. (Hrsg.) ; HIRTH, T. (Hrsg.): *Kunststoffe. Eigenschaften und Anwendungen*. 7. Auflage. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2008
- [140] DATA PHYSICS INSTRUMENTS GMBH (Hrsg.): *Solid surface energy data (SFE) for common polymers*. <http://www.surface-tension.de/solid-surface-energy.htm>
- [141] WEIGELT, K.; DINTER, M.; KEMPA, H.; FUEGMANN, U.; HAHN, U.; GEHDE, M.; BAUMANN, R. ; HUEBLER, A.C.: Requirements for electronic devices due to new

- concepts for smart object fabrication. In: GESSNER, T. (Hrsg.): *Smart Systems Integration 2007*. Berlin: VDE Verlag, 2007, S. 641–643
- [142] GOLOVOY, A.; ZINBO, M.: Water sorption and hydrolytic stability of polycarbonates. In: *Polymer Engineering and Science* 29 (1989), Nr. 24, S. 1733–1737
- [143] ROBESON, L.M.; CRISAFULLI, S.T.: Microcavity formation in engineering polymers exposed to hot water. In: *Journal of Applied Polymer Science* 28 (1983), Nr. 9, S. 2925–2936
- [144] Norm DIN EN 60068 Teil 2. Juli 1995. *Umweltprüfungen – Teil 2: Prüfungen*
- [145] EHRIG, F.; STUDER, M.; HOLZINGER, M. ; WEY, H.-R.: Dekorative Bauteile durch das Hinterspritzen von Metallfolien. In: VDI WISSENSFORUM IWB GMBH UND VDI-GESELLSCHAFT KUNSTSTOFFTECHNIK (Hrsg.): *Spritzgießen 2007*. Düsseldorf: VDI Verlag, 2007 (VDI-Tagungsband B 4283)
- [146] ALSFASSER, R.; RIEDEL, E.; JANIAC, C. ; MEYER, H. J.: *Moderne anorganische Chemie*. 3. Auflage. de Gruyter, 2007
- [147] KITTEL, C.: *Einführung in die Festkörperphysik*. 14. Auflage. Oldenbourg, 2005
- [148] BONNET, M.: *Kunststoffe in der Ingenieur Anwendung verstehen und zuverlässig auswählen*. Wiesbaden: Springer, 2009
- [149] SCHMIDT, G.C.; BELLMANN, M.; MEIER, B.; HAMBSCH, M.; REUTER, K.; KEMPA, H. ; HUEBLER, A.C.: Modified mass printing technique for the realization of source/drain electrodes with high resolution. In: *Organic Electronics* 11 (2010), Nr. 10, S. 1683–1687
- [150] KIM, D.; PARK, J.; JEONG, S. ; MOON, J.: Ink-Jet Printing of Silver Conductive Patterns for Flexible Electronics. In: *Proc. of Digital Fabrication 2005*. Baltimore, September 2005, S. 93–95
- [151] PETSCH, T.; HAENEL, J.; KEIPER, B. ; BLEUL, K.: Laser machining of thin films on top of flexible substrate carriers. In: GESSNER, T. (Hrsg.): *SMART SYSTEMS INTEGRATION 2008, 2nd European Conference & Exhibition on Integration Issues of Miniaturized Systems – MEMS, MOEMS, ICs and Electronic Components, Barcelona, Spain, April 9-10*. Berlin, Offenbach: VDE Verlag, 2008, S. 259–264
- [152] WEIGELT, K.; HAMBSCH, M.; KARACS, G.; ZILLGER, T. ; HUEBLER, A.C.: Labeling the World: Tagging Mass Products with Printing Processes. In: *IEEE Pervasive Computing* 9 (2010), Nr. 2, S. 59 – 63

Anhang

Konzepte zur Integration gedruckter Elektronik in Kunststoffbauteile

Im Anschluss an die wissenschaftlichen Untersuchungen wurden verschiedene praktische Prozess- und Fertigungsabläufe näher betrachtet, die im Folgenden vorgestellt werden.

Klassifizierung

Die Möglichkeiten der gedruckten Elektronik sind inzwischen sehr vielfältig. Um potenzielle Fertigungsabläufe und geeignete Maschinenkonfigurationen aufzuzeigen, ist zunächst eine Klassifizierung bzw. Einordnung der herzustellenden Produkte vorzunehmen. Dies kann anhand verschiedener Kriterien erfolgen, z. B.:

Die Anzahl der gedruckten Schichten beeinflusst die Anzahl erforderlicher Druckwerke bzw. die Anzahl der notwendigen Maschinendurchläufe zur Herstellung des Bauelementes:

- einschichtig oder
- mehrschichtig.

Verschiedene Druckstoffe mit ihren individuellen Eigenschaften, z. B. Viskosität, Tack, Oberflächenspannung usw., erfordern jeweils ein geeignetes Druckverfahren und stellen unterschiedliche Anforderungen an die zu erreichenden Eigenschaften der Schicht (Schichtdicke, Homogenität, Auflösung, Kantenschärfe, Anordnung bzw. Ausrichtung der Teilchen innerhalb der Schicht usw.):

- leitfähige Druckstoffe,
- isolierende Druckstoffe,
- halbleitende Druckstoffe,
- sonstige funktionale Druckstoffe oder
- konventionelle Druckfarben.

Die Trocknungsbedingungen sind abhängig vom verwendeten Druckstoff, limitieren häufig die Druckgeschwindigkeit und beeinflussen die Trocknerkonfiguration der Maschine:

- Warmluft,

- Infrarotstrahlung,
- Ultraviolettstrahlung oder
- sonstige Trocknungsarten (z. B. Mikrowelle oder Licht).

Der Individualisierungsgrad bestimmt die Individualisierungstechnologie und die Anordnung entsprechender Module im Fertigungsablauf:

- nicht individualisiert,
- teilweise individualisiert (Gruppen) oder
- vollständig individualisiert (eindeutiger Identifikator).

Betrachtung einzelner Prozesse

Druckprozess

Je nach angestrebtem Bauelement sind verschiedene Schichtabfolgen zu realisieren. Für alle Schichten wird angestrebt, dass sich diese möglichst homogen und ohne Fehlstellen ausbilden.

Elektrisch leitfähige Schichten erfordern je nach Anwendung eine gewissen Mindestleitfähigkeit. Außerdem ist die Herstellung kleiner Strukturen, z. B. Source-Drain-Strukturen von OFETs, von Bedeutung. Neben Offsetdruck^[75,76,89], Tiefdruck^[42,74] und Inkjetdruck^[80,81] wurden für die Realisierung elektrisch leitfähiger Strukturen auch speziell angepasste Verfahren^[85,149] entwickelt, die bereits für das Drucken einer Schicht eine spezielle Maschinenkonfiguration erfordern.

Isolierende Schichten müssen eine gewisse elektrische Durchschlagsfestigkeit aufweisen. Je nach verwendetem Material sind somit Mindestschichtdicken zu realisieren. Um dieses Ziel zu erreichen, werden z. B. das Flexodruckverfahren^[48] und das Siebdruckverfahren^[83] zum Druck von Dielektrika eingesetzt, da diese Verfahren höhere Schichtdicken ermöglichen.

In diesem Sinne muss ausgehend von den Anforderungen an die jeweilige Schicht und dem verfügbaren Material ein jeweils passender Druckprozess ausgewählt und ggf. adaptiert werden.

Individualisierung

Individualisierung ist vorrangig für die Herstellung von Speicherstrukturen von Bedeutung. Prinzipiell sind zwei Varianten zur Individualisierung denkbar: additive und subtraktive Verfahren. Im ersten Fall werden die Koppelflächen vollständig gedruckt und anschließend nach Bedarf mittels Inkjet-Druck verbunden. Mittels Inkjet gedruckte Leiterbahnen wurden bereits von vielen Forschergruppen realisiert^[81,150]. Zum nachträglichen, selektiven Bedrucken sind jedoch keine Vorarbeiten bekannt. Bei der subtraktiven Individualisierung werden die Speicherstrukturen inkl. Verbindungsleitbahn gedruckt und anschließend selektiv mittels Laser getrennt. Vorarbeiten existieren u. a. von der Firma 3D Micromac^[151].

Prinzipiell sind beide Verfahren inline-fähig, d. h. entsprechende Module können direkt in die Druckmaschine integriert werden^[152].

In Abhängigkeit der Auflage des Druckproduktes sowie des angestrebten Individualisierungsgrades sind unterschiedliche Kombinationen aus eingesetzter Drucktechnologie und Individualisierungstechnologie sinnvoll. In Abbildung A.1 sind die Bereiche qualitativ grafisch dargestellt. Die genauen Zahlenwerte hängen von der im jeweiligen Fall eingesetzten bzw. vorhandenen Maschinenteknik sowie von den genauen Auftragsdaten ab.

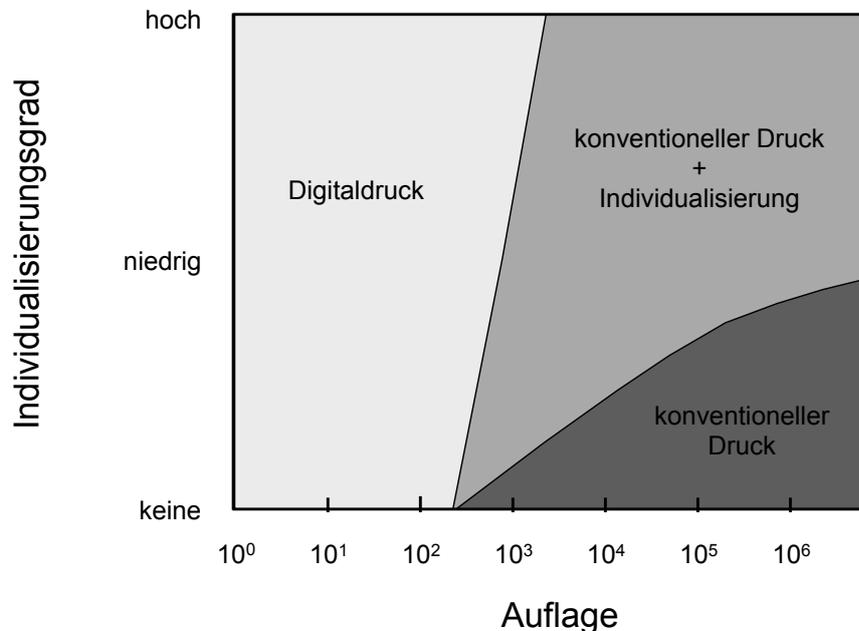


Abbildung A.1: Verfahrensvarianten in Abhängigkeit von Auflagenhöhe und Individualisierungsgrad; Erläuterungen: siehe Text

Für geringe Auflagen ist generell der Digitaldruck die wirtschaftlichere Variante. Ab einer bestimmten Auflagenhöhe lohnen sich konventionelle Druckverfahren mit fester Druckform. In der vorliegenden Grafik basieren die Überlegungen auf dem Offsetdruckverfahren. Aufträge mit mittlerer bis hoher Auflage ohne Individualisierung oder mit einem geringen Individualisierungsgrad (wenige IDs werden häufig benötigt) können ohne nachträgliche Individualisierung in einem konventionellen Druckverfahren hergestellt werden. Verschiedene Varianten bzw. IDs werden auf einer Sammelform angeordnet und in einem Auftrag gedruckt. Für hohe Auflagen mit einem hohen Individualisierungsgrad eignet sich die Herstellung der Datenträger mittels konventionellem Druckverfahren und anschließender Individualisierung.

Vereinzeln und Hinterspritzen

Unabhängig davon, ob es sich um das Hinterspritzen von gedruckter Elektronik oder um dekorative Anwendungen handelt, müssen im Anschluss an den Druck die Bogen oder die

Rolle in einzelne Labels geschnitten werden. Da es sich hierbei um bekannte Prozesse handelt, soll nicht näher darauf eingegangen werden. Je nach Druckverfahren und gewünschter Geometrie werden die Labels geschnitten oder gestanzt. Anschließend werden diese mit Hilfe einer automatischen Zuführung in das Spritzgießwerkzeug eingelegt und durch Vakuum oder elektrostatisch gehalten. Die Fixierung mittels Vakuum ist weit verbreitet, jedoch auch mit einigen Nachteilen verbunden. Im Werkzeug müssen entsprechende Löcher vorgesehen werden, die sich auf dem hinterspritzten Produkt abbilden und auch verstopfen können. Mit Hilfe der elektrostatischen Methode kann eine flächige Haftung des Labels realisiert werden^[102].

Moderne Spritzgießmaschinen ermöglichen eine effiziente Fertigung von hinterspritzten Kunststoffteilen durch die Verwendung von sogenannten Mehr-Positions-Drehtischen. Während an einer Station eine Folie hinterspritzt wird, legt ein Roboter parallel dazu die Folie für das nachfolgende Teil in eine zweite Station ein. Solche Konfigurationen ermöglichen eine minimierte Zykluszeit und tragen zur effizienten Fertigung bei.

Beispielhafte Fertigungsabläufe

Das Ziel dieser Arbeit ist neben dem Kenntniserwerb beim Folienhinterspritzen gedruckter Elektronik auch die Einschätzung der Realisierbarkeit solcher Prozesse im industriellen Umfeld. Aus diesem Grund werden im Folgenden zwei beispielhafte Fertigungsabläufe näher betrachtet. Im Fokus stehen dabei die im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Anwendungen der gedruckten Speicherstrukturen sowie hinterspritzte EL-Leuchten.

Beispiel 1: Teilweise individualisierte Kennzeichnung von Mehrweg-Kunststoffverpackungen

Während der Bearbeitung der Fragestellungen dieser Arbeit wurde mit einem Hersteller von Mehrweg-Kunststoffverpackungen die Kennzeichnung von Getränkeboxen diskutiert und entsprechende Vorversuche durchgeführt. Laut dessen Aussage ist eine unsichtbare, robuste und preisgünstige Kennzeichnung der Behälter für die automatisierte Sortierung in automatischen Waschanlagen wünschenswert. Die Randbedingungen und Anforderungen an eine solche Kennzeichnung mittels kapazitiv auslesbaren Speicherstrukturen sind:

- sichere Haftung des Labels bei mechanischer Belastung (Abrieb), Waschvorgängen (wasser- und laugebeständig, z. B. einprozentige Natronlauge), Hochdruckreinigung, erhöhter Temperaturbelastung bei der Reinigung (70 °C) und Sonneneinstrahlung,
- Lesbarkeit der Kennzeichnung nach Verschmutzung und/oder unsichtbare Kennzeichnung,
- gruppenweise Individualisierung (Sortenkennzeichnung) und
- serielle Auslesung der Speicherstrukturen bei einer Geschwindigkeit von 1 m/s.

Eine häufig eingesetzte Variante bei der Beschriftung von Getränkeboxen ist die Verwendung von In-Mould-Labels, da diese eine dauerhafte, haltbare Kennzeichnung ermöglichen und den genannten Waschvorgängen widerstehen. Zum Einsatz kommen dabei Labels auf

der Basis von PE und PP in einer Stärke von 200 µm. Diese werden im Flexodruckverfahren auf der Außenseite des Labels bedruckt.

Da lediglich eine sortenweise Individualisierung angestrebt wird, variiert die Datenstruktur innerhalb eines Druckauftrages in der Regel nicht. Insgesamt sind je nach Anzahl der zu kennzeichnenden Sorten wenige hundert verschiedene Speicherstrukturen ausreichend. Im Hinblick auf eine evtl. gewünschte spätere Erweiterbarkeit sollten 8 bit bis 16 bit vorgesehen werden. Für eine einfache serielle Auslesung sollten die Labels an der Seite der Getränkebox angebracht werden, die parallel zur Gebindewaschanlage verläuft.

Der gesamte Fertigungsablauf ist in Abbildung A.2 grafisch dargestellt. Der zusätzliche Prozessschritt des Druckens der Speicherstrukturen ist dunkler gekennzeichnet.

Aufgrund der aufgeführten Randbedingungen ist es sinnvoll die elektrisch leitfähige Speicherstruktur ebenfalls im Flexodruckverfahren auf die Rückseite (spätere Innenseite des In-Mould-Labels) der opaken Kunststoffolie zu drucken. Da klassische Schmalbahn-Etikettendruckmaschinen nicht mit Wendeeinrichtungen ausgerüstet sind, ist in den meisten Fällen ein zweiter Maschinendurchlauf erforderlich. Im Rahmen dessen kann eine zusätzliche Schutzlackierung vorgesehen werden. Eine nachträgliche Individualisierung ist nicht erforderlich, da lediglich sortenrein gekennzeichnet werden soll.

Im vorliegenden Fall entsprechen alle weiteren Fertigungsschritte dem bereits eingesetzten Fertigungsablauf beim In-Mould-Etikettieren. Die Labels werden gestanzt, mittels Roboter in das Spritzgießwerkzeug eingelegt und hintspritzt. Der einzige zusätzliche Arbeitsschritt zur Herstellung der Speicherstrukturen ist durch eine dunklere Schattierung hervorgehoben. Ggf. können die Arbeitsschritte „Druck und Veredelung des Labels“ und „Flexodruck Datenstruktur und Lack auf der Rückseite“ auch getauscht werden.

Im betrachteten Anwendungsfall ist der zusätzliche Aufwand für die Kennzeichnung mittels kapazitiv auslesbarer Speicherstrukturen gering. Die Kosten pro Label erhöhen sich durch den zusätzlichen Maschinendurchlauf sowie die Kosten der elektrisch leitfähigen Druckfarbe.

Beispiel 2: Beleuchtetes Rettungsschild

Als zweites Beispiel soll der Fertigungsablauf der Herstellung eines beleuchteten Rettungsschildes näher betrachtet werden. Insbesondere für die Beschilderung von Gängen ist der Einsatz bidirektional leuchtender Schilder sinnvoll. Die Integration einer EL-Leuchte ermöglicht eine energieeffiziente Beleuchtung des Schildes. Die Spezifikationen werden wie folgt definiert:

- Abmaße ca. 15 cm x 30 cm,
- Stärke 4 mm und
- Beleuchtung in beide Richtungen.

Für die Herstellung von flachen Kunststoffteilen, die in beide Richtungen leuchten, bietet sich das Material Polycarbonat an, da es eine hohe Transparenz besitzt. Zu Beginn des

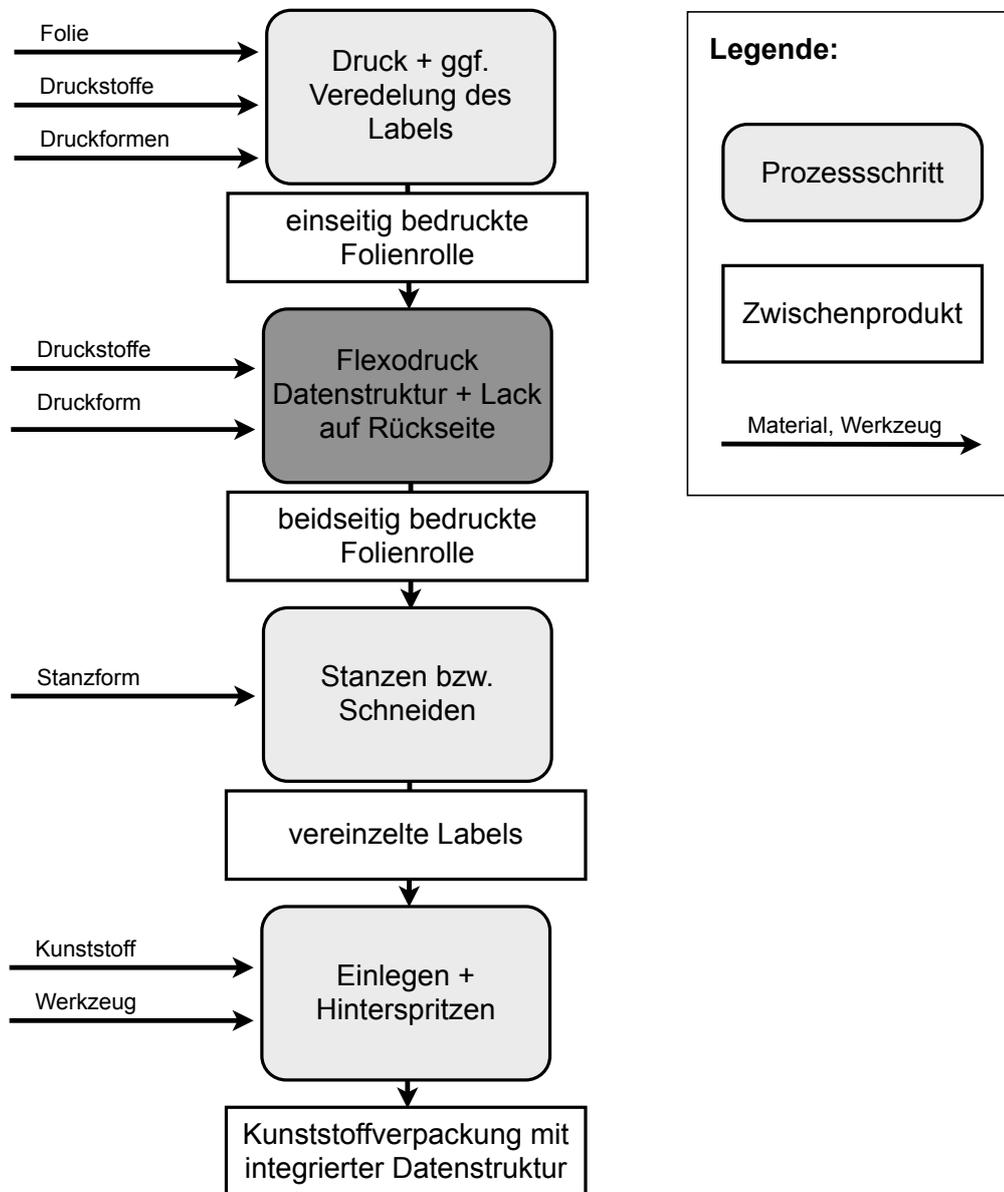


Abbildung A.2: Prozessablauf bei der Kennzeichnung von Mehrweg-Kunststoffverpackungen

Fertigungsablaufes ist zunächst das Piktogramm auf eine transparente PC-Folie zu drucken. Anschließend kann direkt darauf die EL-Leuchte gedruckt werden. Als letzte Schicht ist erneut das Piktogramm mit Hilfe einer gut deckenden Farbe zu drucken. Aufgrund der erforderlichen Schichtdicken kommt das Siebdruckverfahren zur Anwendung. Da die Auflagen im vorliegenden Beispiel voraussichtlich unter denen der Getränkekettenlabels liegen und die Einzelschichten unterschiedliche Anforderungen an den Trocknungsprozess haben, erscheint ein rotativer Prozess nicht sinnvoll. Alle Schichten dieser Anwendung sollten somit im Flachbettsiebdruck hergestellt und jeweils anschließend getrocknet werden:

1. Piktogramm,
2. Grundelektrode,
3. Leuchtstoff,
4. zwei bis drei Schichten des transparenten Dielektrikums,
5. Deckelektrode,
6. ggf. umlaufende Leiterbahn,
7. Piktogramm,
8. Schutzlack bzw. Verkapselung.

Anschließend werden diese Labels zugeschnitten und in das Spritzgießwerkzeug zum Hinterspritzen eingelegt. Es ist darauf zu achten, dass die Anschlüsse der Leuchte nach außen geführt werden. Die Kontaktierung und der Anschluss des sog. EL-Inverters ist vorzusehen. Der Fertigungsablauf ist in Abbildung A.3 grafisch dargestellt. Im Gegensatz zu Beispiel 1 unterscheidet sich dieser Fertigungsablauf deutlich vom etablierten Produktionsprozess. Moderne Notbeleuchtungen werden mittels LEDs betrieben. Bei der Fertigung kommen lediglich bei der Herstellung des Piktogramms Druckverfahren zum Einsatz. Das Leuchtmittel sowie die entsprechenden Piktogramme werden innerhalb eines Kunststoff- oder Glasgehäuses befestigt.

Die Ausführung von Sicherheitszeichen und Sicherheitsbeleuchtungsanlagen sind durch Normen geregelt, z. B. die DIN 4844-1 Graphische Symbole - Sicherheitsfarben und Sicherheitszeichen, die DIN EN 50172 (VDE 0108-100) Sicherheitsbeleuchtungsanlagen und weitere. Die Übereinstimmung des Rettungsschildes mit diesen Regelungen ist im Einzelfall zu prüfen.

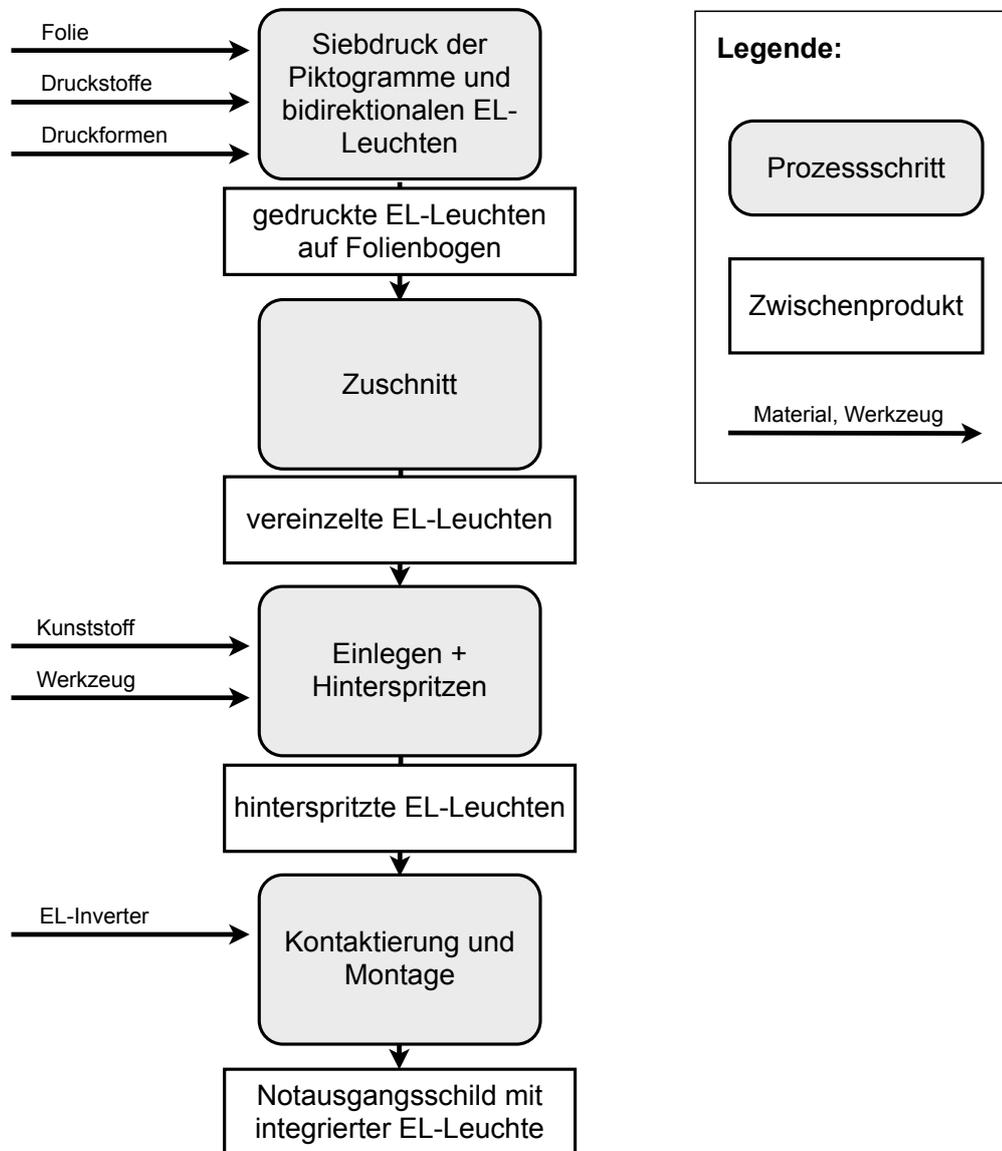


Abbildung A.3: Prozessablauf bei der Fertigung eines Notausgangsschildes mit integrierter EL-Leuchte

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name Karin Weigelt, geb. Preißler
Geburtsdatum 6. Januar 1981
Geburtsort Marienberg
Familienstand verheiratet, ein Kind

Schulausbildung

09/1987–08/1992 Polytechnische Oberschule Seiffen
09/1992–07/1999 Gymnasium Olbernhau, Abschluss: Allgemeine Hochschulreife

Studium

10/1999–03/2005 TU Chemnitz, Studiengang Mikrotechnik/Mechatronik, Studienrichtung Print- und Medientechnik, Abschluss: Diplomingenieur
08/2004–02/2005 Diplomarbeit bei KSW Microtec AG in Dresden: Herstellung und Charakterisierung von flexiblen Displays auf Basis elektroaktiver Materialien

Berufliche Tätigkeit

05/2005–09/2010 wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Print- und Medientechnik der TU Chemnitz
01/2007–12/2009 Stipendiatin der Stiftung Industrieforschung
10/2009–12/2009 Forschungsaufenthalt am Welsh Centre for Printing and Coating in Swansea, Vereinigtes Königreich
seit 10/2010 Abteilungsleiter Entwicklung Drucktechnik bei der Printtechnologies GmbH in Chemnitz