

Georg Lautenschläger

Laminationsverfahren in der OLED-Fertigung

eingereicht als

DIPLOMARBEIT

an der

HOCHSCHULE MITTWEIDA (FH)

UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Informationstechnik & Elektrotechnik

Mittweida, 2009

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Michael Hösel

Zweitprüfer: Dipl.-Ing. Lars Ahlrichs

Bibliographische Beschreibung:

Lautenschläger, Georg

Laminationsverfahren in der OLED-Fertigung. – 2009. – 119 S.

Mittweida, Hochschule Mittweida (FH)

Fachbereich Informationstechnik & Elektrotechnik

Diplomarbeit, 2009

Referat:

Im Rahmen der Diplomarbeit soll ein Laminationsverfahren für das Fraunhofer IPMS Dresden entwickelt werden, um Folien auf den bestehenden OLEDs auftragen zu können. Ferner sollen die Möglichkeiten der Nutzung des Laminationsverfahrens zur Herstellung flexibler OLEDs zum Beispiel durch das Auflaminieren einer flexiblen Folienverkapselung betrachtet werden. Aus den Ergebnissen der Arbeit sollen die Anschaffung einer entsprechenden Fertigungsvorrichtung empfohlen und deren Aufbau und Einrichtung, sofern möglich, begleitet werden.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	VII
Abkürzungsverzeichnis	VIII
1 Einleitung	1
2 Grundlagen	3
2.1 Organische Leuchtdioden	3
2.1.1 Materialien	3
2.1.2 Aufbau und Funktionsweise	4
2.1.2.1 Aufbau	4
2.1.2.2 Funktionsweise	5
2.1.3 OLED Arten	6
2.2 Verkapselung	8
2.2.1 Notwendigkeit	8
2.2.2 Konventionelle Verkapselung	9
2.2.3 Verkapselung mit Folien	10
2.3 Klebstoffe	10
2.3.1 Vorbetrachtung	10
2.3.2 Einteilung der Klebstoffe	10
2.3.3 Bindungsmechanismen von Klebstoffen	12
2.3.3.1 Vorbetrachtung	12
2.3.3.2 Adhäsion	13
2.3.3.3 Kohäsion	13
2.3.3.4 Grundlegende Bindungsarten	14
2.3.3.4.1 Übersicht	14
2.3.3.4.2 Chemische Bindungen	15
2.3.3.4.3 Zwischenmolekulare Bindungen	15
2.3.3.5 Benetzung und Oberflächenvorbehandlung	17
2.3.4 Ausgewählte Klebstoffe für die Verkapselung und Lamination	19
2.3.4.1 Haftklebstoffe	19
2.3.4.1.1 Überblick	19
2.3.4.1.2 Aufbau und Eigenschaften	19
2.3.4.2 Flüssigklebstoffe	21
2.3.4.2.1 Überblick	21
2.3.4.2.2 Epoxidharz-Klebstoffe	21

2.4	Folien.....	23
2.4.1	Bedarf am Fraunhofer IPMS Dresden	23
2.4.2	Wichtige Grundmaterialien	23
2.4.2.1	Vorbetrachtung.....	23
2.4.2.2	Polyethylenterephthalat.....	23
2.4.2.3	Polyethylennaphthalat.....	24
2.4.2.4	Polyurethan	25
2.4.2.5	Polycarbonat	26
2.4.3	Folienvorbereitung.....	27
3	Lamination	29
3.1	Einführung	29
3.2	Vakuumlamination.....	29
3.2.1	Aufbau eines Vakuumlaminators	29
3.2.2	Funktionsweise eines Vakuumlaminators	30
3.2.3	Anwendungsgebiete	31
3.3	Rollenlamination.....	32
3.3.1	Aufbau und Funktionsweise	32
3.3.2	Auswahlkriterien des Laminators.....	33
3.3.2.1	Reinraumtauglichkeit.....	33
3.3.2.2	Einstellungsmöglichkeiten und Kenndaten	34
3.3.3	Anwendungsgebiete	39
4	Material und Methoden	40
4.1	Einführung	40
4.2	Vakuumlamination in der OLED-Herstellung.....	41
4.3	Versuche zur Rollenlamination.....	45
4.3.1	Maschinelle Lamination von Haftklebefolien auf Glas	45
4.3.2	Lamination von Glas auf Glas mittels einer beidseitigen Klebefolie	51
4.3.3	Machbarkeitstest der Handlamination in der Glovebox	57
4.3.4	Herstellung verschiedener Folienverbunde zur Erprobung deren Rollbarkeit	60
4.3.5	Folienverkapselung auf Glassubstraten	65
4.3.6	„Folie auf Folie“ - Lamination	72
4.3.7	Lamination auf Organischen Solarzellen (OSC).....	77
4.4	Betrachtungen zur mechanischen Stabilität konventionell verkapselter OLEDs	82
4.4.1	Vorbetrachtung zu Belastungen der OLEDs bei mechanischer Krafteinwirkung.....	82
4.4.2	Druckbelastung bei dem Rollenlaminationsprozess	84
5	Diskussion	90

6 Zusammenfassung und Ausblick	97
Literaturverzeichnis.....	i
Anhang	v

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: OLED-Beleuchtung.....	2
Abbildung 2-1: Darstellung verschiedener kleiner Moleküle [B1]	3
Abbildung 2-2: Darstellung verschiedener Polymere [B1]	3
Abbildung 2-3: Üblicher Schichtaufbau einer nichtinvertierten, bottomemittierenden OLED... 4	
Abbildung 2-4: Energieniveaus im organischen Halbleiter im spannungsfreien Zustand [B1] 6	
Abbildung 2-5: OLED-Varianten a) nicht invertiert, bottomemittierend b) nicht invertiert, topemittierend c) volltransparent d) invertiert, bottomemittierend.....	7
Abbildung 2-6: Horizontale Anordnung einer nichtinvertierten, bottomemittierenden OLED... 8	
Abbildung 2-7: Klebstoffauftrag; Aufsetzen des Deckglases; Aushärten mittels UV-Licht (v.l.n.r.) [B4]	9
Abbildung 2-8: Klassifizierung der Klebstoffe nach der chemischen Basis [K6].....	11
Abbildung 2-9: Klassifizierung der Klebstoffe nach dem Abbindeungsmechanismus [K6].....	12
Abbildung 2-10: Schematische Darstellung der Bindungskräfte innerhalb einer Klebschicht. Nach [K6].....	12
Abbildung 2-11: Übersicht der Bindungsarten in Klebschichten. Nach [K6].....	14
Abbildung 2-12: Van-der-Waals-Kräfte durch Dipol-Dipol-Wechselwirkungen.....	16
Abbildung 2-13: Benetzungswinkel: Fall a: $< 90^\circ$; Fall b: $=90^\circ$; Fall c: $> 90^\circ$ [B2. S113].....	18
Abbildung 2-14: Oberflächenspannungen bei der Benetzung. Nach [K7 S.26].....	18
Abbildung 2-15: Darstellung der Epoxidgruppe (o.l.) und deren kationischer Polymerisation; Nach [K1].....	22
Abbildung 2-16: Strukturformel Polyethylenterephthalat [B3].....	23
Abbildung 2-17: Strukturformel des Polyethylennaphthalat [B3]	24
Abbildung 2-18: Transmissionsspektrum barrierebeschichteter PEN- und PET-Folien	25
Abbildung 2-19: Strukturformel der Urethan-Gruppe [B3]	25
Abbildung 2-20: Strukturformel von Polycarbonat [B3].....	26
Abbildung 3-1: Vakuumlaminatoren mit Klapp- und Einschuböffnung.....	29
Abbildung 3-2: Innenansicht der Vakuumprozesskammer vor der Lamination [B2]	30
Abbildung 3-3: Innenansicht der Vakuumprozesskammer während der Vakuumerzeugung [B2]	31
Abbildung 3-4: Innenansicht der Vakuumprozesskammer während der Andrückphase der Lamination [B2].....	31
Abbildung 3-5: Innenansicht der Vakuumprozesskammer nach der Andrückphase der Lamination [B2].....	31
Abbildung 3-6: Seitenansicht einer möglichen Rollenanordnung	32
Abbildung 3-7: Kraftübertragung auf die Laminierwalze.....	35
Abbildung 3-8: Tischeinlaufsystem (Modell HRL350 der Firma „Stork Vertrieb KG“).....	37

Abbildung 3-9: Rolleneinlaufsystem (Modell UVL der Firma „Fetzel Maschinenbau GmbH“)	38
Abbildung 3-10: Kugeleinlaufsystem (Modell MLC1200 der Firma „Korn GmbH“)	38
Abbildung 4-1: Transferklebefolie auf Glas, laminiert über Standardvakuumlamination; Abmessungen unteres Glassubstrat: 200 x 200 mm	42
Abbildung 4-2: Vakuumlamination einer Transferklebefolie mit hoher Haftkraft und einer darüber laminierten Lichtauskoppelfolie	43
Abbildung 4-3: Rauigkeitsunterschied einer „Makrofol BL 6-2“-Folie in 10-facher Vergrößerung	43
Abbildung 4-4: Lufteinschlüsse bei 11-facher Vergrößerung, rauigkeitsbedingt	44
Abbildung 4-5: Laminationsergebnis einer erfolgreichen Rollenlamination (Transfer- & PEN- Folie); Abmessungen sichtbares, unteres Glassubstrat: 200 x 200 mm	49
Abbildung 4-6: Partikeleinschluss in einer Transferklebefolie	49
Abbildung 4-7: Partikeleinschluss mit Auswirkung auf die Deckfolie „Makrofol BL 6-2“	50
Abbildung 4-8: Veränderung der Klebschichtstruktur durch zu schnelles Abziehen des Releaseliners	50
Abbildung 4-9: „Glas auf Glas“-Lamination mit einer doppelseitigen Klebefolie	53
Abbildung 4-10: Beschichteter Verbund mit Ausgaserscheinungen (schwarze Bereiche); Länge des Glassubstrates: 470 mm	55
Abbildung 4-11: links: Rückstandsfreie Oberfläche; rechts: Rückstände nach Ablösen der Folie	56
Abbildung 4-12: Versuchsaufbau mit Markierungslinien	59
Abbildung 4-13: Handlamination der Transferklebefolie	62
Abbildung 4-14: Auswirkung eines Winkelfehlers (seitlicher Versatz der Folie)	64
Abbildung 4-15: Lufteinschlüsse bei ganzflächigem Flüssigkleberauftrag mit einem Dispenser	65
Abbildung 4-16: Aufbau des dünnschichtverkapselten Stacks	69
Abbildung 4-17: Degradation eines rein dünnschichtverkapselten Stacks	70
Abbildung 4-18: Degradation eines transferklebefolienverkapselten Stacks (Vollflächenverkapselung)	71
Abbildung 4-19: Degradation eines flüssigverkapselten Stacks (Randverkapselung)	72
Abbildung 4-20: Darstellung der Schichtanordnung	73
Abbildung 4-21: links: Bläschenbildung nach Siebdruck; rechts: Bläschen weitestgehend ausgeheizt; Durchmesser der beklebten Fläche: 6“ (152,4 mm)	75
Abbildung 4-22: Oben: Lamination mit Transferklebefolie; Unten: Flüssigkleberverkapselung	76
Abbildung 4-23: Benetzung des Flüssigklebstoffes auf der 3M TYP B-Barrierefolie	77
Abbildung 4-24: Delamination der Aluminiumkathode	80

Abbildung 4-25: Hellkennlinien der OSCs	81
Abbildung 4-26: Durchbiegung von Kavitäten bei punktförmiger Last [V1]	83
Abbildung 4-27: Prozessablauf und Kontaktierung.....	85
Abbildung 4-28: Darstellung des Aufbaus der Versuchs-OLED	85
Abbildung 4-29: Substrat- und Deckglashalterung aus Stahlblech (links: zu bedampfende Seite)	86
Abbildung 4-30: Substrat- und Deckglas, abgeklebt und bedampft (v.l.n.r.)	87
Abbildung 4-31: Beleuchtete Kante des Deckglases.....	87
Abbildung 4-32: links: Separat gezogene Klebenaut zur hermetischen Abdichtung der Kavität; rechts: Fertige, verdrahtete Drucktest-OLED.....	88
Abbildung 4-33: Auswirkungen der Härte auf die Durchbiegung des Messobjektes (Fall A: Stahlwalze; Fall B: Silikonwalze)	89

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Darstellung einzelner Schichten des OLED-Stacks.....	5
Tabelle 4-1: Eigenschaften der Transferklebefolie „8212“ der Firma „3M“	42
Tabelle 4-2: Soll- und Ist-Werte der Laminationsgenauigkeit.....	59
Tabelle 4-3: Materialkombinationen der Lamination.....	61
Tabelle 4-4: Substratbezeichnungen und –beschichtungen (Folienverkapselung auf Glassubstraten)	67
Tabelle 4-5: Substratbezeichnungen und –beschichtungen (Lamination auf organischen Solarzellen).....	79
Tabelle 4-6: Ergebnisse der Messung unter dem Sonnensimulator „SolSim 210“	82
Tabelle 5-1: Gegenüberstellung der Laminationssysteme	95

Abkürzungsverzeichnis

Alq3	(Tris-(8-hydroxychinolinato)-aluminium).
BCP	Löcherblockierschichtsubstanz der Firma Novaled AG
BTF	Barriere-transferfolie
C	Kohlenstoffatom
C3	Reibungs- und geräuscharmes Wälzlager
CBP	Emissionsschicht-Grundsubstanz der Firma Novaled AG
DSV	Dünnschichtverkapselung
EBL	engl.: Elektron Blockade Layer; dt.: Elektronenblockadeschicht
EDX	Energiedispersive Röntgenspektroskopie
EML	engl.: Emission Layer; dt.: Emissionsschicht
ETL	engl.: Elektron Transport Layer; dt.: Elektronentransportschicht
EVA	Ethylen-Vinylacetat
Gen2	Generation2
H	Wasserstoffatom
H ₂ O	Wassermolekül
HBL	engl.: Hole Blockade Layer; dt.: Löcherblockadeschicht
HF ₄	Tetrafluorborsäure
HOMO	engl.: Highest Occupied Molecule Orbital; dt.: Höchstes besetztes Molekülorbital
HRL	engl.: Hot-Roll-Laminator; dt.: Rollenlaminator
HUD	engl.: Head-Up-display
HTL	engl.: Hole Transport Layer; dt.: Löchertransportschicht
IMTEK	Institut für Mikrosystemtechnik in Freiburg
IPMS	Institut für Photonische Mikrosysteme
ITO	engl.: Indium-Thin-Oxid; dt.: Indium-Zinn-Oxid
LCAO	engl.: Linear combination of atomic orbitals; dt.: Linearkombination von Atomorbitalen
LCD	engl.: Liquid crystal display; dt.: Flüssigkeitskristallanzeige
LED	engl.: Light Emitting Diode; dt.: Licht emittierende Diode
LUMO	engl.: Lowest unoccupied Molecule Orbital; dt.: Niedrigstes unbesetztes Molekülorbital
NPB	Elektronenblockierschichtsubstanz der Firma Novaled AG

Abkürzungsverzeichnis

O ₂	Sauerstoffmolekül
OATPU	engl.: Optical Aliphatic Thermoplastic Polyurethane; dt.: Optisch klares aliphatisches thermoplastisches Polyurethan
OHF	engl.: Overhead-Folie
OCA	engl.: Optical Clear Adhesive; dt.: Optisch klarer Klebstoff
OLED	engl.: Organic Light Emitting Diode; dt.: organische Licht emittierende Diode
ORM	Ormocer: anorganisch - organisches Hybridpolymer
OSC	engl.: Organic Solarcell; dt.: Organische Solarzelle
PC	Polycarbonat
PEN	Polyethylnaphthalat
PET	Polyethylenterephthalat
PU (PUR)	Polyurethan
PPVs	Poly(para-phenylen-vinylene)
PSA	engl.: Pressure Sensitive Adhesive; dt.: Druckempfindlicher Klebstoff
PVD	engl.: Physical Vapour Deposition; dt.: physikalische Dampfphasenabscheidung
RGB	RGB-Farbraum – Farbraum, der mit den Farben rot, grün und blau alle wahrnehmbaren Farben beschreibt
Si _x N _y	Siliziumnitrit
TFT	engl.: Thin Film Transistor; dt.: Dünnschichttransistor
TNATA	Löchertransportschichtsubstanz der Firma Novaled AG
UV	Ultraviolett
UVL	engl.: Universal Laminator; dt.: Universallaminator

1 Einleitung

Flächendeckende Beleuchtungen, hauchdünne und aufrollbare Vollfarbdisplays, leuchtende Folien auf allen denkbaren Untergründen, dass alles ist möglich durch die sich immer weiterentwickelnden Varianten organischer Leuchtdioden, kurz OLEDs¹. Diese Technologie ist eine neue Generation sehr flacher, leichter und energiesparender Flachbildschirme und Beleuchtungen. Die Entwicklungssprünge der letzten Jahre sind beachtlich. In Handys und anderen elektronischen Kleingeräten mit digitaler Anzeige werden OLEDs bereits erfolgreich verwendet. Gegenwärtiges Ziel ist es, großflächige, flexible und effizientere Beleuchtungen und Displays herzustellen. Die LCD²- und TFT³- Technologien der vergangenen Jahre sind mittlerweile Standard, stoßen jedoch an ihre technischen Grenzen.

Die Vorteile organischer Technologien sind dagegen vielversprechend. Sie können theoretisch auf fast jedes Material aufgebracht werden, wobei flexible Substrate dabei eine entscheidende Rolle spielen. Durch die fluoreszierenden Eigenschaften der Organik wird auf die Hintergrundbeleuchtung, wie sie bei Flüssigkristall-Displays verwendet wird, verzichtet. Dadurch kann ein Display viel flacher gestaltet werden, der Energieverbrauch wird dadurch erheblich geringer. Der Kontrast organischer Leuchtmittel ist deutlich höher als bei den bisherigen Display-Arten. Des Weiteren ist ein höherer Blickwinkelbereich bei gleichbleibender Bildqualität, im Vergleich zu den herkömmlichen Technologien, möglich. Gleichzeitig sind organische Displays etwa um den Faktor 2000 schneller als LCDs, deren Schalt-, beziehungsweise Reaktionsgeschwindigkeit maximal 2 ms beträgt. Zu erwähnen ist auch der ökonomische Vorteil: die Verfahren der Beschichtung organischer LEDs sind deutlich günstiger als die ihrer anorganischen Verwandten.

Dass der große Aufschwung der OLED bisher ausgeblieben ist, hängt unter Anderem mit der Lebensdauer der einzelnen Schichten zusammen. Beispielsweise lassen die Anfangshelligkeit blauer und die Farbechtheit weißer organischer Schichten schnell nach. Ein weiteres Problem ist die starke Anfälligkeit gegen Partikel, Wasser und Sauerstoff. An die Verkapselung⁴ wird daher ein hoher Anspruch gestellt. Bisher wird diese mit anorganischen, starren Materialien (Glas) realisiert, es wird jedoch eine flexible Verkapselung mit einer hohen hermetischen Abdichtung angestrebt.

Das Fraunhofer Institut für Photonische Mikrosysteme (IPMS) in Dresden befasst sich mit den oben genannten Problemen und der Verbesserung der bisher entwickelten OLEDs. Die Lamination verschiedener Folien wird eine große Rolle in der Entwicklung organischer

¹ Organic Light Emitting Diode – Organische Licht Emittierende Diode.

² Liquid Crystal Display – Flüssigkristall-Display.

³ Thin Film Transistor – Dünnschicht-Transistoren.

⁴ Verkapselung: Hermetische Abdichtung des empfindlichen Materials.

1. Einleitung

Leuchtdioden spielen, um zukünftig eine flexible Verkapselung zu ermöglichen. Bei starren Glassubstraten kann durch Lamination eine Verbesserung der Lichtauskopplung und ein zusätzlicher Schutz vor äußeren Einflüssen erreicht werden. Ziel dieser Arbeit ist es die Optimierungsmöglichkeit der Fertigung organischer Leuchtdioden über den Prozess der Lamination zu untersuchen und ein geeignetes System zu empfehlen.



Abbildung 1-1: OLED-Beleuchtung

2 Grundlagen

2.1 Organische Leuchtdioden

2.1.1 Materialien

Die organischen Grundmaterialien von OLEDs werden in Polymere und sogenannte kleine Moleküle⁵ unterschieden. Jedoch sind die für die Funktion grundlegenden Effekte und Erscheinungen die Gleichen.

Sowohl Polymere als auch kleine Moleküle bestehen aus Kohlenstoffverbindungen. Kleine Moleküle sind Derivate der zyklischen Kohlenwasserstoffe. Vertreter sind die linearen Polyazene, welche aus linear verknüpften Benzolringen aufgebaut sind. Beispiele dafür sind die in Abbildung 2-1 zu sehenden Verbindungen Benzen, Naphthalen und Anthrazen. Einen komplexeren Aufbau hat die häufig verwendete Elektronentransportschicht Alq3 (Tris-(8-hydroxychinolinato)-aluminium). Der strukturelle Aufbau ist ebenfalls in Abbildung 2-1 dargestellt.

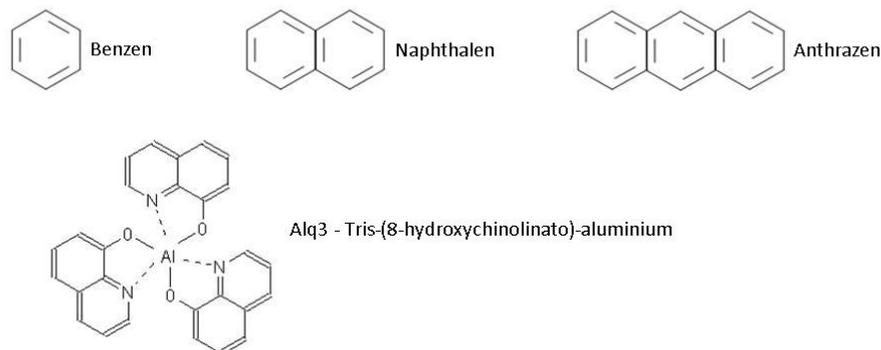


Abbildung 2-1: Darstellung verschiedener kleiner Moleküle [B1]

Klassische Vertreter polymerer Schichten sind trans-Polyacetylene. Eine neuere Variante, organische Schichten aus Polymeren herzustellen, ist die Synthese löslicher PPVs⁶. Abbildung 2-2 zeigt die Strukturen beider Stoffe.

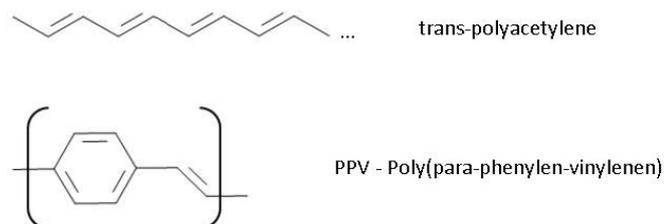


Abbildung 2-2: Darstellung verschiedener Polymere [B1]

⁵ Kleine Moleküle: Werden oft als small molecules (engl.) bezeichnet.

⁶ PPV: Poly(para-phenylen-vinylene).

2. Grundlagen

Organische Halbleiter können eine kristalline oder eine amorphe Struktur aufweisen. Kristalline Materialien, wie sie beispielsweise im Bereich der organischen TFTs benutzt werden, sind Pentcene und Perylene. Diese wachsen in polykristallinen Inseln auf. Im Gegensatz dazu werden in organischen Leuchtdioden amorphe Schichten benötigt. Beispiel hierfür ist das bereits erwähnte PPV [G3, G10, G9, G8].

Die im Fraunhofer IPMS Dresden verwendeten organischen Schichten bestehen ausschließlich aus kleinen Molekülen. Diese weisen eine höhere Effizienz und Lebensdauer als die aus Polymeren hergestellten Schichten auf [G7]. Jedoch sind die Schichterzeugungsmechanismen von Polymeren, wie das Aufschleudern, oder auch Spin-Coating, und das Aufdrucken über verschiedene Druckverfahren, deutlich kostengünstiger als das für kleine Moleküle verwendete thermische Verdampfen.

Die chemisch-physikalischen Hintergründe der Ladungsträgerbewegung und des Ladungsträgertransports stützen sich auf die Grundlagen der Molekülorbitaltheorie, welche von Friedrich Hund und Robert S. Mullikan aufgestellt wurden. Diese Theorie ist für die Aufgabenstellung der vorliegenden Arbeit nicht relevant. Als diesbezüglich weiterführende Literatur wird [G6] *Schwoerer, Wolf: Organische Molekulare Festkörper-Einführung in die Physik von π -Systemen* empfohlen.

2.1.2 Aufbau und Funktionsweise

2.1.2.1 Aufbau

Der am häufigsten in aktuellen Publikationen beschriebene Schichtaufbau organischer Leuchtdioden besteht aus insgesamt acht Schichten. Eine Glasschicht als Substrat, zwei Elektroden und fünf organische Schichten. Abbildung 2-3 verdeutlicht diesen Aufbau. Tabelle 2-1 stellt die Schichten mit deren Bezeichnung und einer Beispielsubstanz dar.

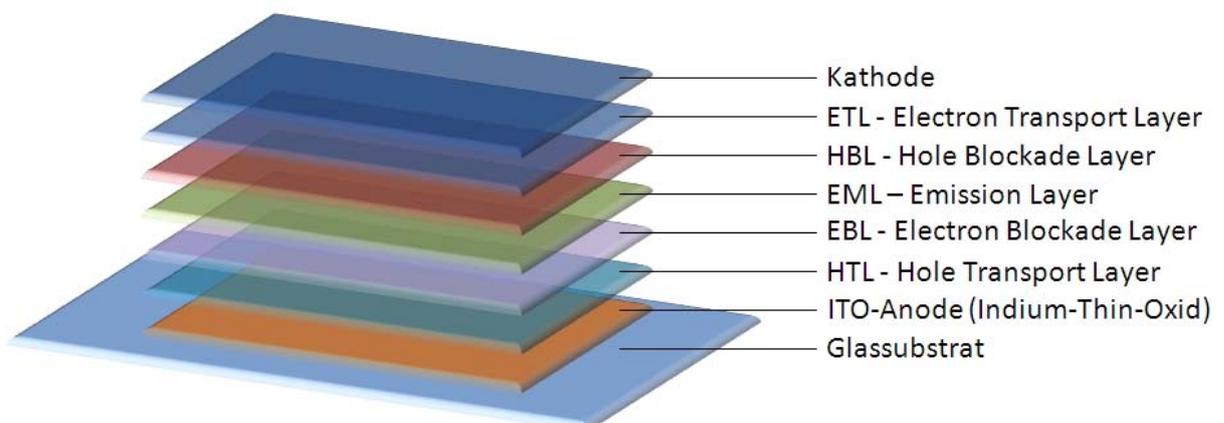


Abbildung 2-3: Üblicher Schichtaufbau einer nichtinvertierten, bottomemittierenden OLED

2. Grundlagen

Name	Bezeichnung engl.	Bezeichnung dt.	Vertreter
Kathode	Cathode	Kathode	Aluminium Kalzium
ETL	Electron Transport Layer	Elektronentransportschicht	Alq3
HBL	Hole Blockade Layer	Löcherblockierschicht	BCP
EML	Emission Layer	Emissionsschicht	CBP
EBL	Electron Blockade Layer	Elektronenblockierschicht	NPB
HTL	Hole Transport Layer	Löchertransportschicht	TNATA
ITO-Anode	Indium-Thin-Oxid	Indium-Zinn-Oxid	ITO

Tabelle 2-1: Darstellung einzelner Schichten des OLED-Stacks

2.1.2.2 Funktionsweise

Bei Anlegen einer Spannung in Durchlassrichtung der LED werden Ladungsträger injiziert. Diese bewegen sich zur Gegenelektrode und rekombinieren währenddessen mit den anderen Ladungsträgern. Dabei wird Energie in Form von sichtbarem Licht frei.

Ladungsträgerinjektion → Ladungsträgertransport → Emission von Licht

Die **Ladungsträgerinjektion** erfolgt über die Elektroden. Die Elektronen werden über die Kathode in das LUMO⁷-Niveau injiziert. Dieses Niveau ist vergleichbar mit dem Leitungsband im anorganischen Halbleiter. Über die Anode werden die Defektelektronen, die auch als Löcher bezeichnet werden, in das HOMO⁸-Niveau eingebracht. Dies entspricht dem Valenzband des anorganischen Halbleiters. Um die Injektion zu optimieren, wird das Elektrodenmaterial an die Organik angepasst. Die Energiebarriere zwischen der Austrittsarbeit (W_A , W_K) der Elektroden und dem HOMO- und LUMO-Niveau der Organik sollte dabei möglichst gering sein.

Anschließend werden die Ladungsträger über organische Transportschichten in Richtung Gegenelektrode transportiert. Dieser Prozess ist deutlich langsamer als im anorganischen Halbleiter, da die Ladungsträger aufgrund der fehlenden Periodizität amorpher Schichten eine geringere Mobilität aufweisen. Der **Transport der Ladungsträger** innerhalb organischer Schichten ist auf die Molekülorbitaltheorie (Kapitel 2.1.1) zurückzuführen. Das Überwinden der Energiebarrieren zwischen den einzelnen Schichten hingegen beruht auf

⁷ LUMO – Lowest Unoccupied Molecule Orbital (engl.) - am niedrigsten unbesetztes Molekülorbital.

⁸ HOMO – Highest Occupied Molecule Orbital (engl.) - am höchsten besetztes Molekülorbital.

2. Grundlagen

dem Tunneleffekt⁹. Die Beweglichkeit der Ladungsträger verbessert sich allgemein mit steigender Temperatur.

Die zentrale Schicht besteht aus verschiedenen, mit Emittermolekülen¹⁰ dotierten, Emissionsschichten. Dort rekombinieren die beiden Ladungsträgerarten. Es bilden sich sogenannte Exzitonen¹¹ in Singulett- und Triplettvariante. Je nach emittierter Farbe [A1] werden die Schichten mit Singulett- oder Triplett-emittern dotiert, durch welche die Exzitonen in einem Fluoreszenz- bzw. Phosphoreszenzprozess zerfallen. Die **Emission** wird durch die beidseitig angrenzenden Ladungsträgerblockierschichten optimiert. Dies ist notwendig, da sonst die Ladungsträger durch das Schichtsystem die jeweilige Gegenelektrode erreichen würden. Exzitonen können jedoch auch aus der Emissionsschicht heraus diffundieren und strahlungslos zerfallen. Durch die HBL- und EBL-Schicht werden die Ladungsträger aber in der Emissionsschicht gehalten, da die Potentialbarriere der Blockadeschicht für sie nicht überwindbar ist. Abbildung 2-4 zeigt diesen Sachverhalt [G3 S.40ff, G6].

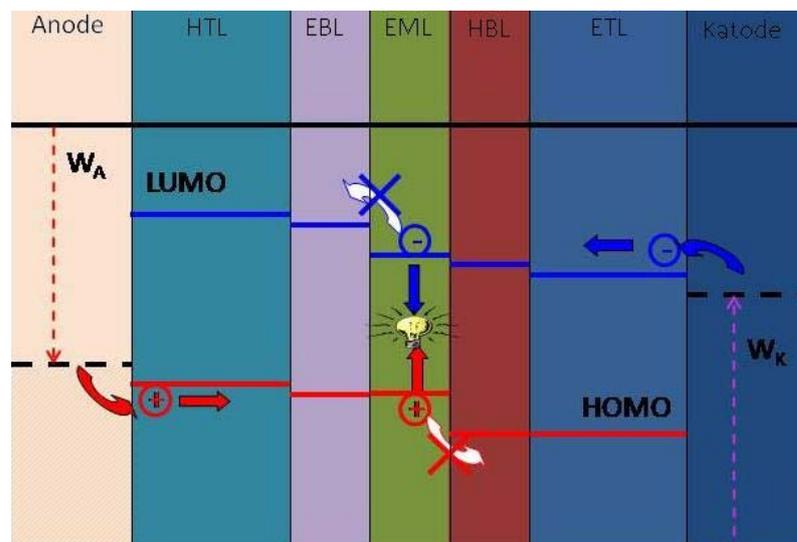


Abbildung 2-4: Energieniveaus im organischen Halbleiter im spannungsfreien Zustand [B1]

2.1.3 OLED Arten

OLEDs lassen sich auf unterschiedliche Arten klassifizieren. Beispielsweise nach der Richtung der Lichtauskopplung und nach der Anordnung des Schichtstapels (Stack).

Anhand der Lichtauskopplung lassen sich drei Varianten unterscheiden. Top- sowie bottomemittierende und volltransparente OLEDs. Die bottomemittierende OLED (Abbildung 2-5 a) ist die im Fraunhofer IPMS Dresden am häufigsten hergestellte Variante. Die Lichtemission verläuft dabei durch das Glas. Bei der topemittierenden OLED (Abbildung 2-5

⁹ Tunneleffekt: Von der Schrödingergleichung abgeleiteter Effekt, bei dem Ladungsträger eine scheinbar unüberwindbare Potentialbarriere mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit tunneln können.

¹⁰ Emittermoleküle: Moleküle die zur Emission spezieller Farben dienen. Siehe Anhang [A1].

¹¹ Exziton: Gebundener Zustand von Elektron und Loch in einem Halbleiter oder Isolator. [G6 S.13ff]

2. Grundlagen

b) hingegen befindet sich zwischen dem Schichtstapel und der DeckglasverkapSELUNG ein stickstoffgefüllter Hohlraum. Dadurch wird das Licht zusätzlich an der Grenzfläche zum Stickstoff gebrochen und die Lichtauskopplung wiederum verschlechtert. Eine zusätzliche Reflektionsschicht unter der ITO-Anode verstärkt die Lichtauskopplung wieder. Die volltransparente OLED (Abbildung 2-5 c) ist im betriebslosen Zustand durchsichtig. Legt man eine Spannung an, wird Licht in beide Richtungen emittiert. Ein Anwendungsbereich für diesen OLED-Typ ist das in Flug- und Fahrzeugen verwendete Head-Up-Display (HUD), durch welches dem Piloten wichtige Informationen direkt in das Sichtfeld projiziert werden.

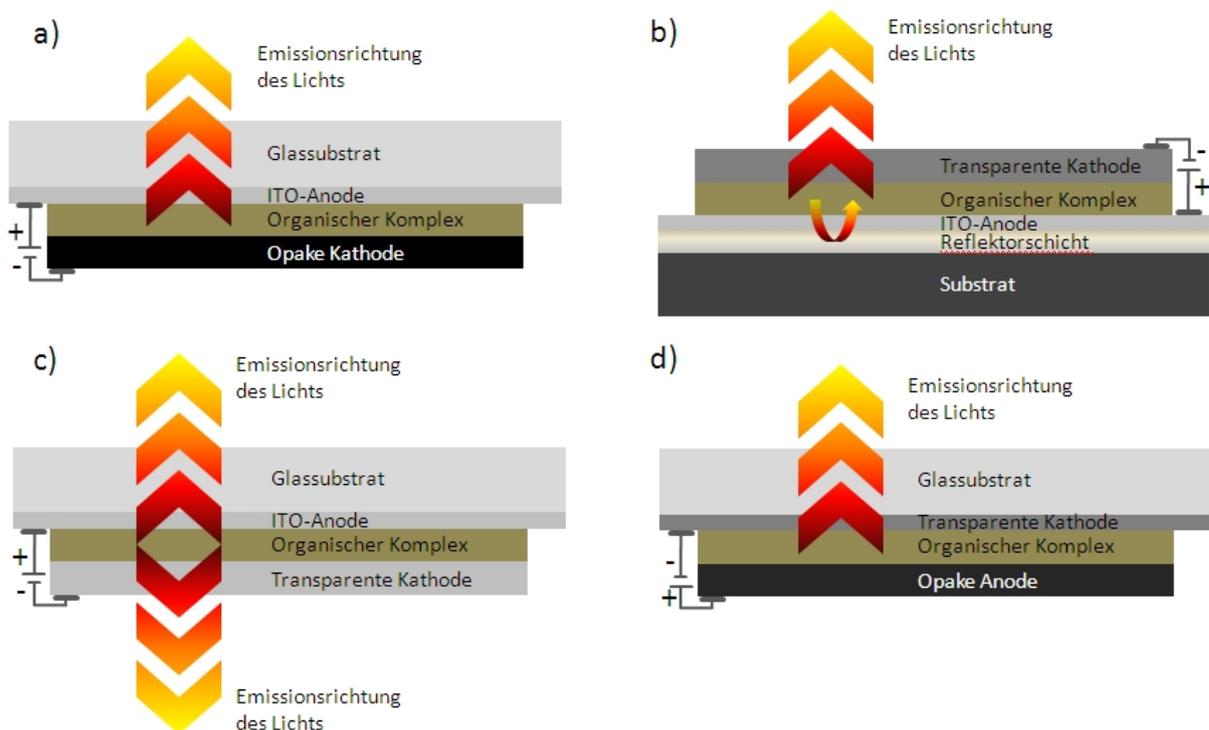


Abbildung 2-5: OLED-Varianten a) nicht invertiert, bottomemittierend b) nicht invertiert, topemittierend c) volltransparent d) invertiert, bottomemittierend

Eine andere Klassifikation unterteilt die OLEDs in Dioden mit einem invertierten und Dioden mit einem nicht invertierten Schichtaufbau. Bei der nichtinvertierenden OLED-Variante befindet sich die Anode zwischen organischer Schicht und Glassubstrat (Abbildung 2-5 a und b). Sie wird auf Grund der unkomplizierteren Fertigung häufiger verwendet. Bei dem invertierten Aufbau dagegen liegt die Kathode zwischen der organischen Schicht und dem Glassubstrat. Das Problem liegt in der Beschichtung der ITO-Anode. Diese wird aufgrund besserer Schichteigenschaften üblicherweise aufgesputtert. Die Anode kann aber bei der invertierten Variante nicht ohne weiteres auf die Organik gesputtert werden, da es diese beschädigen würde. Der schädigende Ioneneinfall auf die Organik kann allerdings durch transparente Magnesium/Silber-Schutzschichten verhindert werden. Invertierte OLEDs werden bei Anwendungen verlangt, die substratseitig eine geringe Austrittsarbeit erfordern.

2. Grundlagen

Kathodenmaterialien haben meist eine geringere Austrittsarbeit als die Anodenmaterialien. Der invertierte Aufbau hat sich als Standardaufbau einer OLED aber nicht etabliert.

Für Beleuchtungsanwendungen sind ganzflächig aufgetragene Schichten ausreichend. Displayanwendungen hingegen erfordern einzelne Bildpunkte. Deshalb werden einzelne OLEDs mit verschiedenen dotierten Farbemittern horizontal angeordnet. Die Leuchtpunkte der Pixelmatrix sind separat ansteuerbar. Abbildung 2-6 zeigt dies als nichtinvertierte, bottomemittierende Variante, bei der die Farben Rot, Grün und Blau (RGB) separat erzeugt werden [G1 S.12, G5 S.17].

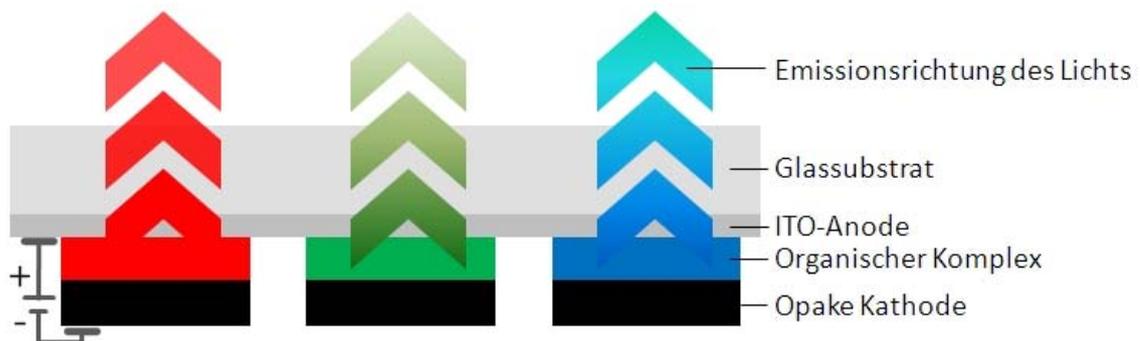


Abbildung 2-6: Horizontale Anordnung einer nichtinvertierten, bottomemittierenden OLED

2.2 Verkapselung

2.2.1 Notwendigkeit

Grundsätzlich werden organische Leuchtdioden des Fraunhofer IPMS Dresden mit einer Glasverkapselung hermetisch verschlossen. Dies ist notwendig, um Einflüsse, welche die Lebensdauer der OLED verkürzen, zu minimieren. Dabei handelt es sich um die Einwirkung von:

- Partikeln
- Wasser
- Sauerstoff.

Partikel können durch ihre Größe und Form zu Brightspots, Darkspots oder Kurzschlüssen führen: Befindet sich ein Partikel auf der Anode, kommt es zu einer inhomogenen Beschichtung. Dadurch erhöht sich lokal die Feldstärke aufgrund von Inhomogenitäten in Schichtdicke und Morphologie der organischen Schicht. Der Stromfluss ist dann an dieser Stelle höher, wodurch ein so genannter Brightspot, ein heller leuchtender Punkt, entsteht. Ein Darkspot, ein dunkler Punkt in der OLED, entsteht durch eine partikelbedingte Delamination der Kathode vom Schichtstapel. An dieser Stelle kann deshalb kein Strom mehr fließen.

2. Grundlagen

Darkspots können jedoch auch andere Ursachen haben. Existieren in der Kathode Pinholes¹², können durch diese Sauerstoff und Wasser in den Stack eindringen und die Kathode von innen oxidieren. Zusätzlich reagieren Wasser und Sauerstoff mit der Organik so stark, dass diese ihre Funktion verliert und lokal kein Licht mehr emittiert wird [G4 S.42ff].

2.2.2 Konventionelle Verkapselung

Für die konventionelle Verkapselung (Abbildung 2-7) wird Glas als Substrat und Deckglas genutzt. Das Deckglas wird in der sogenannten Glovebox¹³ bei reiner Stickstoff-Atmosphäre auf das bereits fertig beschichtete Substratglas geklebt. Dies geschieht mit einem UV-härtenden Kleber auf Epoxidharz-Basis, welcher bei Bestrahlung mit einer Wellenlänge von 365 nm innerhalb weniger Minuten aushärtet. Wichtig ist bei diesem Schritt der Schutz der eigentlichen organischen Schicht vor der einfallenden UV-Strahlung.

Der Vorteil der konventionellen Verkapselung ist die gute Barriereeigenschaft von Glas gegenüber äußeren Medien, speziell Wasser. Dadurch kann eine längere Lebensdauer ermöglicht werden.

Diese Verkapselungsvariante besitzt jedoch auch einige Nachteile. Durch die Materialeigenschaften ist Glas sehr anfällig gegenüber mechanischen Belastungen. So können hohe Temperaturgradienten aufgrund des schlechten Wärmeleitkoeffizienten zu Schäden führen. Außerdem ist die Größe der durchgehend beleuchteten Fläche begrenzt. Die Höhe der Kavität¹⁴ zwischen Substratglas und Deckglas ist sehr gering. Ab einer bestimmten Substratfläche wäre eine Berührung beider Gläser durch das Eigengewicht und die Schwankungen des Umgebungsdruckes unausweichlich.



Abbildung 2-7: Klebstoffauftrag; Aufsetzen des Deckglases; Aushärten mittels UV-Licht (v.l.n.r.) [B4]

¹² Pinholes: Sehr kleine Löcher in einer Schicht.

¹³ Glovebox: Mit Stickstoff geflutete Kammer, in der die Substrate verarbeitet werden. Dazu sind mehrere Öffnungen vorgesehen, die über eine flexible Gumm wand in Handschuhform in die Box hineinragen.

¹⁴ Kavität – Hohlraum: ist vorgesehen um Trockenpads aus Kalziumoxid, sog. Getter, in die Verkapselung zu integrieren. Diese binden vorhandene Restfeuchte.

2.2.3 Verkapselung mit Folien

Um das Anwendungsspektrum der OLEDs zu erweitern, wird nach alternativen Verkapselungsmöglichkeiten gesucht. Beispielsweise können Leuchtdioden über Folienverkapselung flexibilisiert werden.

Denkbar wäre eine Kombination aus zwei Verkapselungen: Eine Dünnschichtvorverkapselung soll dabei als Schutz gegen Klebstoff und erste Fremdpartikel dienen. Später erfolgt die Nachverkapselung über Folienlamination. Dadurch kann die Flexibilisierung bei gleichzeitiger Minimierung der Objektstärke ermöglicht werden.

Die erforderlichen, gewünschten Permeationswerte der Folien liegen für Wasser bei $\left[10^{-6} \frac{\text{g}}{\text{d} \cdot \text{cm}^2}\right]$ und für Sauerstoff bei $\left[10^{-5} \frac{\text{cm}^3}{\text{d} \cdot \text{cm}^2}\right] \left\{ \frac{\text{Sauerstoffvolumen}}{\text{Folienfläche}} \right\}$. Diese Werte geben an, wie viel Wasser bzw. Sauerstoff pro Tag durch 1 m² große und 1 mm starke Folie hindurchdringt. Handelsübliche Folien erreichen diese Werte nicht. Lediglich speziell bearbeitete Folien oder Folienverbunde könnten dieser Anforderung gerecht werden [G1 S.17, G2. S.44].

2.3 Klebstoffe

2.3.1 Vorbetrachtung

Laut DIN EN 923 wird ein Klebstoff als ein nichtmetallischer Stoff definiert, der Fügebauteile durch Flächenhaftung und innere Festigkeit verbinden kann. Die wirkenden Kräfte werden Adhäsions- und Kohäsionskräfte genannt. Im Gegensatz zu anderen Fügeverfahren, wie dem Schweißen und Löten, können durch diese stoffschlüssige Verbindung große Flächen miteinander verbunden und mechanische Spannungen gut kompensiert werden.

Klebstoffe können transparent sein, besitzen verschiedene chemische Grundstoffe und können mit einer Vielzahl von Applikationen aufgebracht werden. Die hohe Anzahl an unterschiedlichen Verbindungsmechanismen macht das Kleben zu einer sehr sinnvollen Alternative für andere Fügeverfahren. Für das Laminieren kommt lediglich das Kleben in Frage, da die Forderungen nach Transparenz und eventuellem rückstandsfreiem Entfernen nicht anders erfüllt werden [K6 S.3-4, K7 S.172-173].

2.3.2 Einteilung der Klebstoffe

Es existieren verschiedene Möglichkeiten Klebstoffe zu klassifizieren. Dazu gehören:

- Erscheinungsform
- Anwendungszweck
- Anwendungsform

2. Grundlagen

- Chemische Basis
- Abbindungsmechanismus.

Bei der Erscheinungsform unterscheidet man grundsätzlich zwischen flüssigen, festen und plastischen Klebstoffen. Vertreter der flüssigen Klebstoffe sind Leime oder Kleblacke in Form von Suspensionen oder Lösungen. In der zweiten Gruppe, den festen Klebstoffen, sind Klebstoffpulver, Schmelzklebstoffe und Klebfolien einzuordnen. Zu den plastischen Klebstoffen gehören Klebkitte.

Anwendungszweck und Anwendungsform sind zwei weitere Unterteilungsmöglichkeiten. Die Klassifikation anhand des Anwendungszwecks bezieht sich auf die Art der Fügepartner, beispielsweise Metall-, Holz- oder Kunststoffklebstoffe. Die Differenzierung aufgrund der Anwendungsform beruht auf dem Klebmechanismus. Dabei werden, Reaktions-, Haft- und Kontaktklebstoffe sowie Kleblacke unterschieden.

Des Weiteren ist eine Unterscheidung nach der chemischen Basis möglich. Dabei sind anorganische und organische Klebstoffe die beiden Hauptgruppen. Silikone stellen eine Mischung aus beiden dar. Abbildung 2-8 verdeutlicht die Klassifizierung genauer.

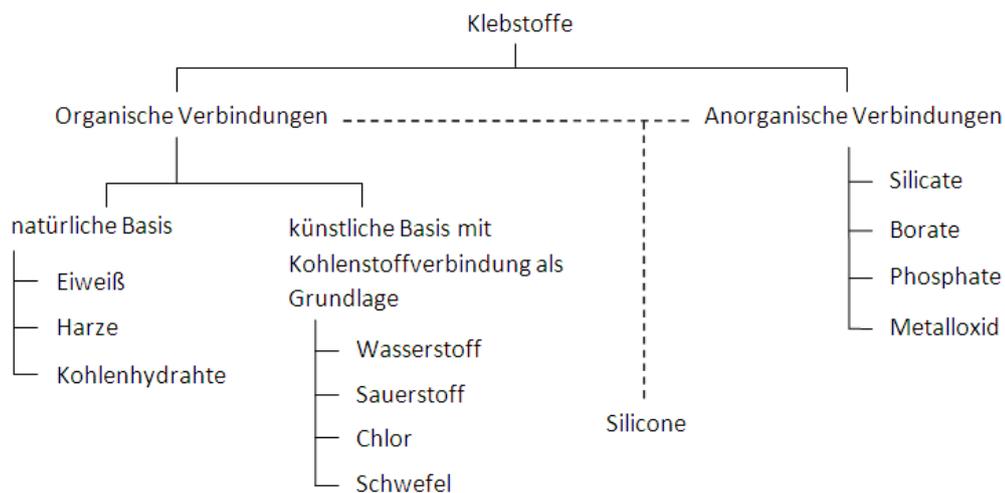


Abbildung 2-8: Klassifizierung der Klebstoffe nach der chemischen Basis [K6]

Die wahrscheinlich gebräuchlichste Einteilung der Klebstoffe wird nach dem Abbindungsmechanismus vorgenommen. Grundsätzlich unterscheidet man dabei die auf physikalischem Wege abbindenden von den durch chemische Reaktionen härtenden Klebstoffen. Reaktive Schmelzklebstoffe sind dabei das Bindeglied dieser Klebstoffarten. Abbildung 2-9 zeigt eine Übersicht der jeweiligen Untergruppen [K6 S.4-7, K7 S. 173-174].

2. Grundlagen

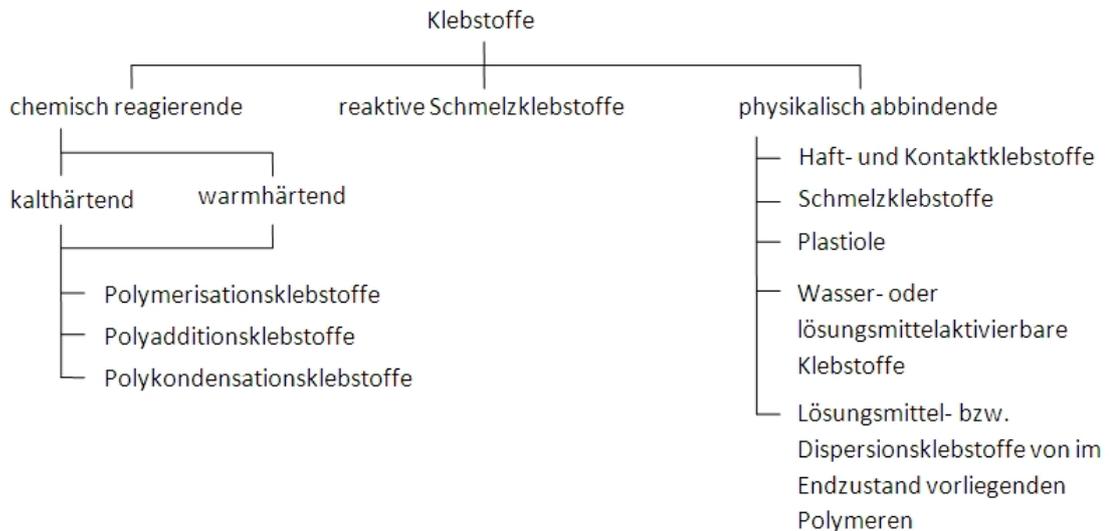


Abbildung 2-9: Klassifizierung der Klebstoffe nach dem Abbindungsmechanismus [K6]

2.3.3 Bindungsmechanismen von Klebstoffen

2.3.3.1 Vorbetrachtung

Die Festigkeit der Klebverbindung wird durch Adhäsion und Kohäsion bestimmt. Klebstoffe werden daher mitunter auch als Adhäsive bezeichnet.

Die Kohäsion beschreibt die Eigenfestigkeit eines Stoffes, und ist somit von der chemischen Zusammensetzung abhängig. Mit dem Begriff der Adhäsion wird dagegen die physikalisch-chemische Wechselwirkung eines Systems bezeichnet. Gemeint ist damit die Wirkung atomarer und molekularer Anziehungskräfte innerhalb der Grenzschicht zwischen Fügepartner und Klebschicht. Abbildung 2-10 zeigt schematisch die Wirkungsbereiche von Adhäsion und Kohäsion innerhalb einer Klebverbindung. Um die Qualität einer Klebung klassifizieren zu können, ist neben der Stärke von Adhäsions- und Kohäsionskraft die Klebstoffbenetzung ein entscheidender Aspekt.

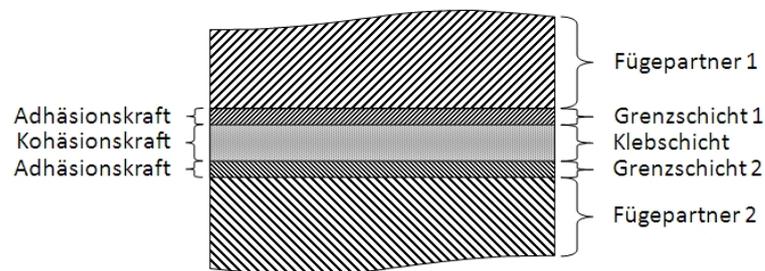


Abbildung 2-10: Schematische Darstellung der Bindungskräfte innerhalb einer Klebschicht. Nach [K6].

An dieser Stelle soll erwähnt werden, dass immer ein Gleichgewicht zwischen Kohäsions- und Adhäsionskraft existiert. Eine hohe Adhäsionskraft zwischen Fügepartner und Klebstoff ist wertlos, wenn die innere Festigkeit des Klebgefüges nur schwach ist. Gleiches gilt umgekehrt. Daher muss ein gutes Verhältnis zwischen Adhäsions- und Kohäsionsvermögen

durch die korrekte Formulierung des Klebstoffes und die richtige Oberflächenvorbereitung- und vorbehandlung der Fügepartner getroffen werden.

2.3.3.2 Adhäsion

Die Adhäsion, auch Haftkraft genannt, wird in mechanische und spezifische Adhäsion unterteilt:

Mechanische Adhäsion wirkt beispielsweise in porösen Oberflächen, in denen sich der Klebstoff festsetzen kann. Ein Aufrauen der Oberfläche kann die mechanische Haftwirkung erhöhen. Bei Stoffen mit glatter Oberfläche, wie es häufig bei Glas oder Kunststoff der Fall ist, spielt sie deshalb eine untergeordnete Rolle. Die spezifische Adhäsion dagegen ist unabhängig von der Oberfläche der Fügeteile und beschreibt die Haftfähigkeit aufgrund von chemischen Grenzflächenreaktionen. Der Wirkungsbereich beschränkt sich auf ca. 0,2 – 1 nm.

Die chemischen Grundlagen der Adhäsionskraft werden in Kapitel 2.3.3.4 näher erläutert. Die der spezifische Adhäsion zu Grunde liegenden Mechanismen sind noch nicht restlos geklärt. Hierfür können eine Vielzahl an Theorien und Vorgängen in Betracht gezogen werden. Auf diese Ansätze soll aufgrund der Komplexität der Thematik nicht weiter eingegangen werden. Als weiterführende Literatur dazu wird [K6] *Gerd Habenicht: Kleben - Grundlagen, Technologien, Anwendungen; 5.Auflage; 2006; S.326-332* empfohlen [K6 S.324-325, K8 S.55ff].

Eine Messung der Adhäsionskraft ist bisher nicht möglich.

2.3.3.3 Kohäsion

Die Kohäsion stellt die innere Festigkeit eines Stoffes dar. Sie bestimmt die Viskosität und das Fließverhalten eines Klebstoffes. Außerdem ist sie für die Festigkeit des ausgehärteten Klebstoffes wichtig. Der Wirkungsbereich der Kohäsion befindet sich nicht im Grenzgebiet zwischen Klebschicht und Fügepart, sondern im Klebstoff selbst. Besonders für die Beurteilung des Kriech- und Fließverhaltens unter mechanischer Beanspruchung sowie der Scher- oder Zugbelastung der Fügeteile ist die Kohäsionsfestigkeit entscheidend.

Der Kohäsion liegen verschiedene Wechselwirkungen zu Grunde. Hierzu gehören die Ionen-, Metall- und Atombindung (kovalent und polar). Außerdem wirken zwischenmolekulare Kräfte (Kapitel 2.3.3.4). Zusätzlich spielt die mechanische Verknäuelung von fadenförmigen Makromolekülen eine Rolle. Außerdem hat das Polymermolekulargewicht einen starken Einfluss auf die Kohäsionskraft, da sich zu kleine Moleküle nur ungenügend verankern können, so dass die Festigkeit stark abnimmt. Auch der Polymerisationsgrad spielt hierbei eine große Rolle.

2. Grundlagen

Die Kohäsionskraft eines Stoffes lässt sich, im Vergleich zur Adhäsionskraft eines Verbundes, besser bestimmen. Materialparameter wie Härte, Haftfestigkeit und Elastizitätsmodul können, beispielsweise mittels Nanoindentation, bestimmt werden. Anhand von Zugfestigkeit oder Dehnungsvermögen können beispielsweise Aussagen über die Kohäsionsfestigkeit gemacht werden.

Anzumerken ist, dass das Temperaturverhalten einer Klebschicht nicht vernachlässigt werden darf. Bei Temperaturanstieg ist dabei ein Kohäsionskraftabfall zu verzeichnen, da die Beweglichkeit der Moleküle zunimmt und dadurch geringerer Molekülzusammenhalt besteht. Im folgenden Absatz wird der Prozess des Abbindens näher erläutert, da dieser Vorgang eng mit der Kohäsion verknüpft ist. Durch das Abbinden verstärkt sich die Kohäsionsfestigkeit eines Klebstoffs in Folge einer Veränderung der chemischen und physikalischen Gefügeeigenschaften [K6 S.333-335, K2 S.22, K8 S.55ff].

Zu den chemischen Abbindevorgängen zählen unter anderem Polymerisation, Oxidation- und Vernetzung. Chemische Abbindungssysteme sind meist zeit- und temperaturabhängig, da die Polymerisation beispielsweise durch eine erhöhte Temperatur schneller abläuft.

Physikalische Vorgänge sind zum Beispiel Hydratation oder Verdunsten. Bei dem physikalischen Abbindeprozess liegen die Klebstoffmoleküle bei dem Auftrag bereits in deren Endzustand vor. Dies ist etwa bei Dispersionen der Fall, bei denen während des Abbindevorgangs die löslichen Bestandteile aus dem Gefüge entweichen [K6 S.578-580].

2.3.3.4 Grundlegende Bindungsarten

2.3.3.4.1 Übersicht

Als einführende Übersicht soll Abbildung 2-11 dienen.

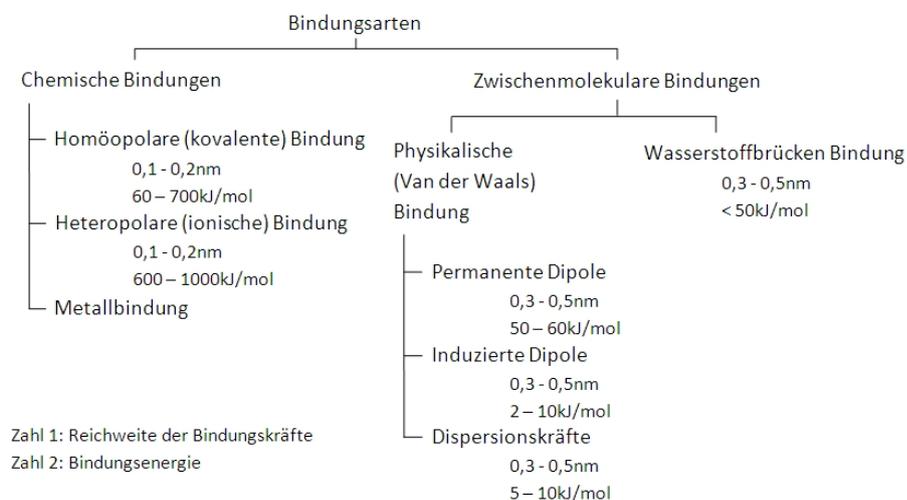


Abbildung 2-11: Übersicht der Bindungsarten in Klebschichten. Nach [K6].

2. Grundlagen

Die chemische Bindungsenergie gibt die Bindungsstärke einer chemischen Bindung an. Sie beschreibt die bei der Bindungsbildung frei werdende Energie. Diese muss mindestens aufgebracht werden, um die Bindung wieder zu trennen. Sie stellt die Energiedifferenz zwischen der Summe der Einzelenergien der beteiligten Bindungspartner und der Energie, die nach der Bindung noch vorliegt, dar.

Wie in Abbildung 2-11 zu sehen ist, bilden die chemischen Bindungen, auch Hauptvalenzbindungen genannt, die stärksten Bindungskräfte aus. Die Bindungsenergie ist um den Faktor 100 - 1000 höher, als die der zwischenmolekularen- oder Nebervalenzbindungen. Die in der Abbildung 2-11 angegebenen Werte für die Bindungskräfte der Nebervalenzbindungen sind dabei nur Orientierungswerte, da sie in der Literatur unterschiedlich angegeben wird. Die Reichweite der Bindungsenergie stellt den Aktionsbereich dar, in dem diese Bindungsart wirkt [K6 S.316/317, K3 S.26/27, K1 S.12/13].

2.3.3.4.2 Chemische Bindungen

Die Hauptvalenzbindungsarten können in homöopolare (kovalente), heteropolare (ionische) und metallische Bindungen unterteilt werden. Für diese Arbeit sind ausschließlich Klebverbindungen zwischen Nichtmetallen von Bedeutung. Deshalb spielt hier nur die kovalente Bindung eine Rolle. Heteropolare Bindungen bilden sich bei Verbindungen zwischen Nichtmetallen und Metallen aus, während metallische Bindungen folglich bei einer reinen Metall-Metall-Verbindung auftreten [K6 S.317].

2.3.3.4.3 Zwischenmolekulare Bindungen

Zwischen den Molekülen kommt es durch Anziehungs- und Abstoßungseffekte zu Kräften, die aber im Vergleich zu den wirkenden Kräften in den Hauptvalenzbindungen verhältnismäßig gering sind.

a) Dipolkräfte

Besitzen die Atome in einem Molekül unterschiedliche Elektronegativitäten, bildet sich im Molekül ein permanentes elektrisches Dipolmoment aus. Durch dieses Moment werden Moleküle untereinander entweder angezogen oder abgestoßen. Es wirkt die sogenannte Dipolkraft (Orientierungskraft). Soll idealerweise ein polarer Klebstoff zwei polare Fügeiteile miteinander verbinden, so entsteht eine Anziehung zwischen den Dipolen des Klebstoffes und denen des Fügepartners. Abbildung 2-12 verdeutlicht diesen Sachverhalt [K6 S.318/319, K7 S.175/176, K3 S.27-36].

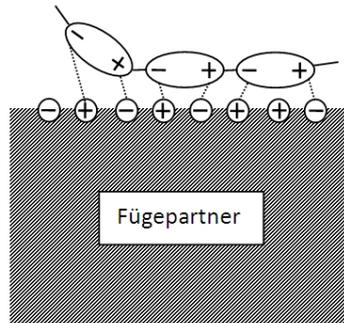


Abbildung 2-12: Van-der-Waals-Kräfte durch Dipol-Dipol-Wechselwirkungen

b) Induzierte Dipolkräfte (Induktionskräfte)

Polare Moleküle können allein durch ihre Anwesenheit in einem anderen, ursprünglich neutralen Molekül, einen Dipol induzieren, insofern dieses eine Affinität dazu hat. Zu den leicht zu polarisierenden Substanzen gehören unter anderem Metalle, aber auch organische Moleküle wie Benzen.

Induktionskräfte sind schwächer als die in Kapitel a) beschriebenen, permanenten Dipolkräfte [K6 S.320, K3 S.38].

c) Dispersionskräfte (Energien)

Diese vergleichsweise schwache Bindungsart beruht auf innerer Elektronenbewegung. Durch diese Bewegung erzeugen die Elektronen eine zeitlich begrenzte Ladungsverschiebung im Molekül beziehungsweise Atom. In Folge dessen wird im benachbarten Molekül ein schwacher Dipol induziert, wodurch Anziehungskräfte entstehen. Die Wirkung der fluktuierenden Dipole ist stark abhängig von der Entfernung der Moleküle.

Die Dispersionskräfte wirken in polaren und unpolaren Substanzen. Besondere Bedeutung haben sie bei Substanzen, die weder freie Ladungen haben, noch polar oder polarisierbar sind, da sie die einzig wirkende Wechselwirkungsenergie darstellen. Bei polaren Molekülen jedoch wirken sie sich auch stark aus [K6 S.320, K7 S.176/177, K3 S.38].

d) Wasserstoffbrückenbindungen

Bildet ein Element mit stärkerer Elektronegativität eine kovalente Bindung zu einem Wasserstoffatom aus, werden die Elektronen der Bindung stark zu dem elektronegativen Element hingezogen. Am Wasserstoffatom entsteht eine positive, an dem mit diesem verbundenen Atom eine negative Partialladung. Die Wasserstoffatome werden nun von negativ partialgeladenen Bereichen benachbarter Moleküle angezogen. Dadurch bilden sich Molekülverbände. Wirkungsvolle Wasserstoffbrückenbindungen bilden sich nur dann aus, wenn die mit Wasserstoff verbundenen Atome sehr hohe Elektronegativitätswerte aufweisen (wie bei Fluor, Sauerstoff und Stickstoff der Fall).

2. Grundlagen

Bekanntestes und zugleich bedeutendstes Beispiel sind die Anziehungsverhältnisse bei Wassermolekülen.

Polyurethane und Polyamide verdanken ihre Kohäsionsfestigkeit vor allem dieser Wasserstoffbrückenbindung. Diese Bindungsart kann ebenfalls für die Adhäsion wichtig werden, wenn beispielsweise die Oberfläche des Fügeteils oxidiert ist, oder über durch Adsorption aufgenommene Wassermoleküle verfügt [K6 S.320/321, K7 S.175, K3 S.38].

2.3.3.5 Benetzung und Oberflächenvorbehandlung

Um die erwünschte Ausbildung von Haupt- und Nebervalenzkräften zwischen Klebstoff und Füge teiloberfläche zu ermöglichen, müssen die entsprechenden Moleküle auf wenige 100 pm angenähert werden. Dies ist nur möglich, wenn der Klebstoff die Füge teiloberfläche gut benetzt.

Um auf die Benetzung näher eingehen zu können, soll zunächst der Begriff der Oberflächenenergie geklärt werden. Flüssigkeiten haben das Bestreben, eine möglichst kleine Oberfläche im Bezug auf ihr Volumen anzunehmen. Wird eine Flüssigkeit auf einen Festkörper aufgebracht, versucht sie deshalb, die Form einer Kugel anzunehmen. Je nach der vom Festkörper bereitgestellten Oberflächenenergie wird die Flüssigkeit gezwungen, ihre Oberfläche zu vergrößern. Durch die verfügbare Energie der Festkörperoberfläche werden die inneren Flüssigkeitsmoleküle auf das energetisch höhere Niveau der Moleküle an der Flüssigkeitsoberfläche angehoben. In Folge dessen kann sich die Oberfläche der Flüssigkeit vergrößern. Der minimalen Benetzungswinkel strebt dann idealerweise gegen 0°. Der Eintritt dieses Falles ist eine sehr gute Voraussetzung für eine erfolgreiche Klebung.

Die Vergrößerung der Oberflächenenergie kann durch eine materialabhängige Oberflächenvorbehandlung erreicht werden. Die Verfahren lassen sich in mechanische, nasschemische, physikalisch-chemische und thermische Behandlung unterteilen.

Auf die einzelnen Verfahren soll an dieser Stelle nicht näher eingegangen werden. Nähere Informationen dazu werden in [K2] *DELO - Bond it* gegeben.

Die oben angesprochene Benetzung des Klebstoffes auf der Oberfläche des Füge teils ist für eine erfolgreiche Klebung entscheidend. Der sogenannte Benetzungswinkel θ^{15} , der auch als Kontaktwinkel bezeichnet wird, beschreibt die Qualität der Benetzung. Diese hängt von dem Zustand der Oberfläche, der Art der zu benetzenden Flüssigkeit und den Umgebungsparametern ab. θ kann Werte zwischen 0° und 180° annehmen. Bei $\theta = 180^\circ$ liegt keine, und bei $\theta = 0^\circ$ eine vollständige Benetzung (Spreitung) vor. Für die technische

¹⁵ Benetzungswinkel θ (griech. Theta), oft auch mit α (griech. Alpha) bezeichnet.

2. Grundlagen

Nutzung ist ein Winkel kleiner 90° notwendig. Abbildung 2-13 stellt den Benetzungswinkel dar.

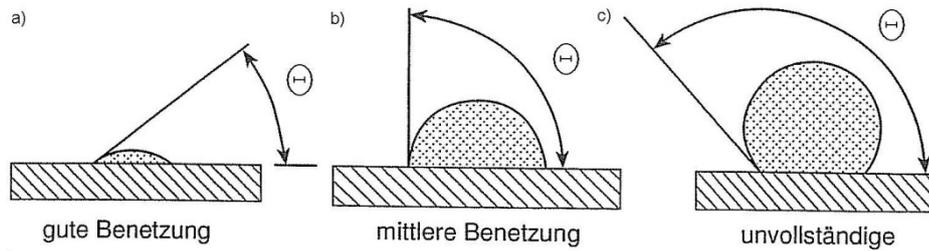


Abbildung 2-13: Benetzungswinkel: Fall a: $< 90^\circ$; Fall b: $=90^\circ$; Fall c: $> 90^\circ$ [B2 S.113]

Nach TH.YOUNG und A.DUPRÈ gilt folgende Gleichung zur Berechnung des Benetzungswinkels (Abbildung 2-14 zeigt die Oberflächenspannungsbereiche):

$$\theta = \cos^{-1} \left(\frac{\gamma_{SV} - \gamma_{SL}}{\gamma_{LV}} \right) \quad (1)$$

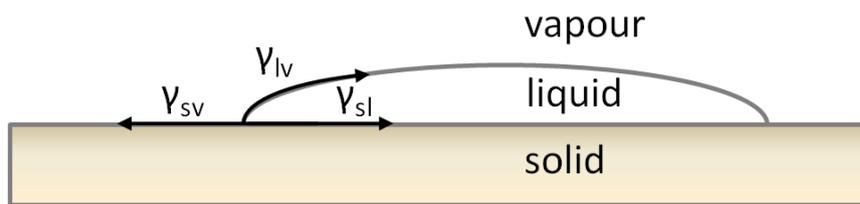


Abbildung 2-14: Oberflächenspannungen bei der Benetzung. Nach [K7 S.26]

mit θ ...Benetzungswinkel zwischen festem Stoff und Flüssigkeit

γ_{sv} ...Oberflächenspannung der Solidus-Phase des festen Stoffes

γ_{sl} ...Grenzflächenspannung zwischen festem und flüssigem Medium

γ_{lv} ...Oberflächenspannung der Liquidus-Phase der flüssigen Phase

[K7 S.26]

Für eine minimal grenzwertige Klebung, das heißt bei einer mittleren Benetzung ($\theta=90^\circ$), muss der der Term in der Klammer des \cos^{-1} null betragen. Dieser Fall tritt genau dann ein, wenn alle Oberflächen- und Grenzflächenspannungen gleich sind. ($\gamma_S=\gamma_{SL}=\gamma_L$). Je kleiner der Benetzungswinkel ist, desto besser haftet der Klebstoff. Dies setzt wiederum voraus, dass die Oberflächenspannung des festen Stoffes größer als die Oberflächenspannung des Klebstoffes ist. Entspricht der Term hinter dem \cos^{-1} eins, spricht man von einer maximalen Benetzung ($\theta=0^\circ$). Die Oberflächenspannung des Feststoffes ist dabei gleich der Summe von Grenzflächenspannung und Oberflächenspannung des Klebstoffes. Es ist im Allgemeinen immer ratsam, Klebstoffe mit geringen Oberflächenspannungen anzuwenden. Doch gibt es hier auch Grenzen, da mit geringer werdender Oberflächenspannung auch die Kohäsionsfähigkeit eines Stoffes sinkt, und es zu Blasenbildung innerhalb der Grenzfläche kommen kann [K6 S.335-344, K3 S.43-47, K1 S.13ff, K5 S.5-6, K4 24-25].

2.3.4 Ausgewählte Klebstoffe für die Verkapselung und Lamination

2.3.4.1 Haftklebstoffe

2.3.4.1.1 Überblick

Haftklebstoffe sind organische Stoffe mit der Eigenschaft, bei Raumtemperatur permanent klebrig zu sein. Sie müssen weder physikalisch abbinden noch chemisch reagieren, um Haftkraft aufzubauen. Durch den gleichbleibenden chemischen Zustand können sie in Form von Klebebändern mehrmals verwendet werden. Diese Klebstoffe sind auf unterschiedlich strukturierten Oberflächen applizierbar, da es sich um hochviskose Polymere handelt, die teilweise Eigenschaften einer Flüssigkeit besitzen. Eine Aktivierung über Temperatur, Wasser, UV-Strahlung oder andere Katalysatoren ist nicht vonnöten. Allerdings ermöglicht eine leicht erhöhte Temperatur (40 - 50°C) ein besseres Fließverhalten.

Als Basispolymere werden hauptsächlich Kautschuke, Acrylate oder Silikone verwendet. Modifizierte Formulierungen dieser Grundstoffe ermöglichen vielseitige Anwendungen. Haftklebstoffe werden vorwiegend als einseitige, doppelseitige, oder Transferklebefolien¹⁶ in Rollen -oder Blattform angeboten. Weiterhin werden Haftklebstoffe in Folienform als Stanzteile gefertigt. Haftklebefolien werden oft auch unter der Bezeichnung PSA¹⁷ (Pressure Sensitive Adhesive) geführt.

2.3.4.1.2 Aufbau und Eigenschaften

Haftklebstoffe sind grundsätzlich aus kohäsionsbestimmenden Basispolymeren, adhäsionsbestimmenden Weichmachern und klebrigen Harzen zusammengesetzt. Um die Eigenschaften den vielseitigen Einsatzmöglichkeiten anzupassen, können dem Grundstoff Substanzen mit bestimmten funktionellen Gruppen hinzugefügt werden.

Die Glasübergangstemperatur¹⁸ von Haftklebstoffen liegt zwischen -70 und -20 °C. Dadurch sind sie bei Raumtemperatur hochviskos. Dieser Zustand wird auch als pseudoliquid bezeichnet. Haftklebstoffe verhalten sich viskoelastisch¹⁹, wodurch im Zusammenhang mit einem hohen Dehnvermögen sehr hohe Schälwiderstände erreicht werden. Dies bedeutet, dass durch mechanische Belastungen entstehende Spannungen gut kompensiert werden

¹⁶ Transferklebefolie: Folie aus reiner Klebmasse, die von zwei Trägerfolien (Releaselinern) bedeckt ist. Diese Art Folie wird oft auch nur als Transferfolie bezeichnet.

¹⁷ PSA - Pressure Sensitive Adhesive (engl.): Druck empfindlicher Klebstoff.

¹⁸ Glasübergangstemperatur: Temperatur, bei der ein Glas die größte Änderung der Verformungsfähigkeit aufweist. Der Glasübergang stellt dabei den Übergang vom spröden in den gummielastischen Bereich dar. Glas: Amorpher, nichtkristalliner Feststoff.

¹⁹ Viskoelastizität: Zeit-, temperatur- und frequenzabhängige Änderung der Elastizität von polymeren Schmelzen und Festkörpern. Es findet teilweise viskoses und teilweise elastisches Verhalten statt.

2. Grundlagen

können. Die für die Rückbildung einer Verformung benötigte Zeit wird als Relaxationszeit²⁰ bezeichnet. Um die für ein Ablösen des Klebstoffes notwendige Kraft festzustellen, wird über einen Schältest bei definierter Abschälgeschwindigkeit und definiertem Abschälwinkel die Haftfestigkeit in N/cm ermittelt.

Haftklebstoffe besitzen eine geringe Oberflächenspannung, um den Fügepartner optimal zu benetzen. Eine weitere wichtige Eigenschaft ist die Klebrigkeit, auch Tack genannt. Sie beschreibt die Fähigkeit des Klebstoffes, bei dem Kontakt zum Fügepartner einen Verbund zu diesem aufzubauen. Ein Haftklebstoff mit einem guten Tack verhält sich während des Verbindungsaufbaus wie eine Flüssigkeit. Er ist gut verformbar und kann sich entsprechend an die Oberfläche des Fügepartners anpassen. Beim Wiederablösen des Klebstoffes wird hingegen ein hoher Widerstand erreicht. Für Haftklebefolien mit Releasefunktion²¹ werden Mikroglaskugeln eingesetzt, durch welche sich die Benetzungseigenschaften herabsetzen. Wirkt auf solch eine Folie eine Schälkraft, löst sie sich besser vom Fügepartner ab.

In der Vergangenheit wurde Kautschuk als Hauptbestandteil für Haftklebstoffe verwendet. Aufgrund der mangelnden Beständigkeit (Vergilbung und Versprödung) sowie der Ressourcenknappheit mussten Alternativen gefunden werden. Der Naturstoff wurde zunehmend durch Acrylate und Silikone ersetzt, da sie deutlich witterungsbeständiger sind und stärkere Haftkräfte aufbauen. Sie können durch entsprechende Modifikationen der Klebstoffformulierung an unterschiedlichste Anforderungen angepasst werden.

Silikone sind äußerst hautverträglich, und werden daher im medizinischen Bereich verwendet. Acrylate haben dagegen den Vorteil, transparent, geruchlos und günstig in der Herstellung zu sein. Sie werden vorzugsweise für Haftklebefolien verwendet. Acrylaten müssen keine klebrigen Harze zugesetzt werden, da sie von Natur aus eine hohe Klebrigkeit aufweisen. Für Spezialanwendungen, wie der Benetzung von Fügepartnern mit niedriger Oberflächenenergie, werden sie jedoch trotzdem mit Harzen versetzt, um die Haftung zu erhöhen.

Ein weiterer bedeutender Haftklebstoff ist das Ethylen-Vinylacetat (kurz EVA). Durch die statistisch in die Ethylenkette eingebauten Vinylacetatmoleküle besitzt der Haftklebstoff im Verhältnis zu reinem Polyvinylacetat eine höhere Beständigkeit gegen Temperatureinwirkungen und Oxidation. Je nach Anteil der Vinylacetatmoleküle ändern sich die Eigenschaften des Klebstoffes, wodurch er ein weites Anwendungsspektrum findet.

²⁰ Relaxation: Vorgang, bei dem eine durch dynamische Belastungen entstandene mechanische Spannung durch den inneren Aufbau des Klebstoffes wieder abgebaut werden kann, ohne ein Ablösen der Klebschicht hervorzurufen.

²¹ Releasefunktion (engl.): Diese Funktion ermöglicht einer Folie das Wiederablösen vom Fügepartner.

2. Grundlagen

Aufgrund der vielseitigen Anwendbarkeit und der kostengünstigen Herstellung werden die meisten Haftklebeanwendungen für Folien mit EVA, Reinacrylaten oder Acrylaten modifizierter Formulierung realisiert [K6 S.193- 200, K1 S. 35/ 36/ 41- 48].

2.3.4.2 Flüssigklebstoffe

2.3.4.2.1 Überblick

Flüssigklebstoffe stellen die am weitesten verbreitete Klebstoffart dar. Sie können chemisch reagierend und physikalisch abbindend sein. Im Folgenden wird, aufgrund der Fülle an interessanten Informationen, ausschließlich auf die für die OLED-Verkapselung interessanten Klebstoffe Bezug genommen.

Bei der OLED-Verkapselung muss der Klebvorgang sauber und definiert ablaufen. Vor einigen Jahren noch wurden hauptsächlich 2-Komponenten-Epoxidharze verwendet. Diese wurden mit einem Dispenser²² mit Doppelkammerkartusche aufgetragen. So können die Komponenten unmittelbar vor der punktgenauen Applikation miteinander in Kontakt gebracht werden. Die vollständige Aushärtung dauerte bis zu 24 Stunden. Um diese Wartezeit zu verkürzen, wurden zunehmend temperaturaktivierbare 1-Komponenten Epoxidharze verwendet. Ein Großteil dieser Klebstoffe polymerisiert bei Temperaturen über 120 °C, einige jedoch auch bereits bei 80 – 90 °C. Die Temperaturanfälligkeit organischer Schichten erlaubt jedoch lediglich die Nutzung von Klebstoffen, welche bis 80 °C temperaturaktivierbar sind. Erheblicher Nachteil ist jedoch die erforderliche Lagerungstemperatur von ca. - 30 °C und die damit verbundene Notwendigkeit einer sehr zügigen Verarbeitung.

Heute haben sich UV-härtende Klebsysteme für die Verkapselung durchgesetzt. Ihre Vorteile liegen in der Lagerung und der schnellen Aushärtezeit. Der genaue Ablauf des Klebens wird in Kapitel 2.2 erläutert.

2.3.4.2.2 Epoxidharz-Klebstoffe

Für eine UV-härtende Klebstoffaktivierung kommen prinzipiell nicht nur Epoxidharze in Frage. Verschiedene Acrylate wie beispielsweise Epoxi- oder Silikon-Acrylate härten ebenfalls unter Einwirkung kurzweiliger UV-Strahlung aus.

Jedoch werden als Flüssigklebstoffe für die OLED-Verkapselung ausschließlich strahlungshärtenden Epoxidklebstoffe verwendet. Der entscheidende Vorteil liegt in ihrer Formbeständigkeit. Während der Härtung werden bei Acrylaten mehr Spannungen aufgebaut, wodurch sie stärker schrumpfen. Dass dies bei Epoxidharzen nicht der Fall ist, liegt zum einen an der längeren Aushärtungszeit und zum anderen an den geringeren Molekülabständen der Epoxidgruppe.

²² Dispenser (engl.): Klebstoffdosier- und applikationsvorrichtung.

2. Grundlagen

Die Grundlage für strahlungshärtende Klebstoffe bilden reaktive Monomere oder Präpolymere²³, die in den meisten Fällen C=C-Doppelbindungen beinhalten. Diese werden durch die hohe Energiedichte der kurzwelligigen Strahlung aufgebrochen, wodurch eine Polymerisationsreaktion gestartet wird. Weitere Bestandteile der Klebstoffe sind Stabilisatoren, Harze, Photoinitiatoren und andere, auf spezifische Eigenschaften zugeschnittene, Inhaltsstoffe.

Die Epoxidgruppe beinhaltet jedoch statt einer reaktiven C=C-Doppelbindung einen Oxiranring. Dieser ist in Abbildung 2-15 zu sehen.

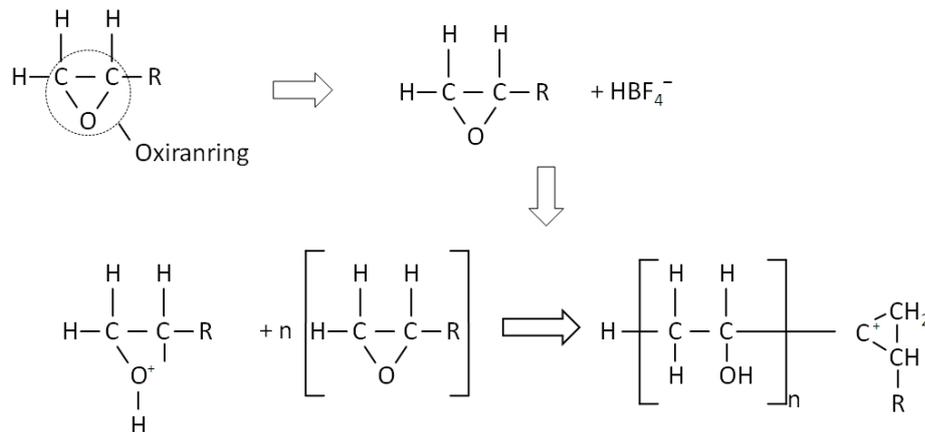


Abbildung 2-15: Darstellung der Epoxidgruppe (o.I.) und deren kationischer Polymerisation; Nach [K1].

Die UV-Strahlung startet die Reaktion. Unter Bestrahlung entstehen in einer photochemischen Reaktion freie Radikale. Diese bilden wiederum eine Säure (HBF_4^-), die die kationische Polymerisation einleitet. Der Oxiranring wird dadurch geöffnet und ist als radikales Monomer in der Lage eine Reaktion mit anderen Epoxidgruppen einzugehen (Abbildung 2-15). So entsteht eine Kettenreaktion, welche eine schnelle Aushärtung des Epoxidharzes ermöglicht.

Die Absorption findet prinzipiell in einem Wellenlängenbereich von 300 – 400 nm statt, wobei der Bereich je nach genauer Zusammensetzung einzuschränken ist. Die Aushärtungszeit beträgt ca. 5 min. Der ausgehärtete Klebstoff ist meist farblos, weshalb er für die Verklebung transparenter Materialien geeignet ist.

Es gibt auch die Möglichkeit, Epoxidharzklebstoffe durch sichtbares Licht auszuhärten. Die Aushärtungszeit ist meist kürzer und die Tiefenhärtung besser. Nachteil ist, dass gelbliche Klebstoffe während der Aushärtung einen bräunlichen Farbton bekommen, wodurch teilweise keine optisch klaren Klebungen erzielt werden können [K6 S. 31-48, K1 S.59-63, K9].

²³ Präpolymer: Verbindung, die als Vor- oder Zwischenprodukt bei der Bildung hochmolekularer Substanzen auftritt.

2.4 Folien

2.4.1 Bedarf am Fraunhofer IPMS Dresden

Eine Optimierung organischer Leuchtdioden kann durch die Lamination von Folien verschiedener Eigenschaften erreicht werden. Beispielsweise kann die Empfindlichkeit bei mechanischer Beanspruchung durch die Verwendung von Kratz- oder Splitterschutzfolien verringert werden. Manche Folien besitzen die Eigenschaft, Glas eine höhere Flexibilität zu verleihen, indem sie die durch Temperatur oder mechanische Belastung entstehenden Spannungen kompensieren. Eine Veränderung der Lichtauskopplung kann durch die Lamination speziell strukturierter oder mit Mikrolinsen besetzte Auskoppelfolie erreicht werden. Des Weiteren ist die Flexibilisierung organischer Leuchtdioden durch das Ersetzen der konventionellen Glasverkapselung durch einen Verbund verschiedener Folien erwünscht.

2.4.2 Wichtige Grundmaterialien

2.4.2.1 Vorbetrachtung

Die Auswahl an Kunststoffen, die für die in Kapitel 2.4.1 geforderten Folienanwendungen in Frage kommen, ist reichlich. Folgend werden vier Kunststoffe vorgestellt, die Anwendung in der Fertigung von OLEDs finden könnten.

Zu erwähnen ist hierbei, dass die Eigenschaften der beschriebenen Kunststoffe für die technische Anwendung noch verändert werden können. Dies kann beispielsweise durch Coextrusion²⁴ oder Stoffbeimengung geschehen. Außerdem kann die Oberfläche durch chemische und physikalische Prozesse verändert werden.

2.4.2.2 Polyethylenterephthalat

Polyethylenterephthalat, kurz PET, wird seit 1947 hergestellt und seit dem vielseitig verwendet.

Die Strukturformel dieses Thermoplasts ist in Abbildung 2-16 zu sehen.

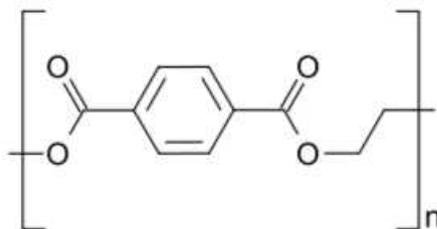


Abbildung 2-16: Strukturformel Polyethylenterephthalat [B3]

²⁴ Coextrusion: Artgleiche oder fremdartige Kunststoffe werden durch den Aufschmelzvorgang im Extruder zusammengeführt, und anschließend gemeinsam durch die Profildüse ausgebracht.

2. Grundlagen

Polyethylenterephthalat wird durch Polykondensation gebildet. Im industriellen Herstellungsprozess geschieht dies hauptsächlich über die Umesterung von Terephthalsäuredimethylester mit Ethylenglykol. Dabei wird Methanol als Nebenprodukt gebildet.

PET wird in der Literatur als überwiegend gut chemikalienbeständig beschrieben, ist jedoch unter anderem unbeständig gegen heißes Wasser oder Wasserdampf sowie Säuren, Laugen, Aceton und anderen polaren Lösungsmitteln. Verschiedene Modifikationen machen es zu einem stark transparenten Kunststoff mit hohem Glanz. Je nach Struktur kann PET verschiedene weitere Eigenschaften aufweisen:

Dank seiner kristallinen Struktur besitzt es eine gute Festigkeit, ist hart, steif, zäh und meist von milchig-weißer Erscheinung. Die bekannteste Anwendung sind PET-Flaschen, die heutzutage aus dem Alltag nicht mehr wegzudenken sind.

Im amorphen Zustand ist es weniger hart, weist aber eine bessere Schlagzähigkeit auf. Es ist im Wellenlängenbereich der UV-Strahlung und des sichtbaren Lichts hoch durchlässig. Die Permeation ist wesentlich geringer als bei den meisten anderen Kunststoffarten. Die Sperreigenschaften von Glas werden aber nicht erreicht. Amorphes PET eignet sich sehr gut für die Herstellung optisch klarer und farbloser Folien sowie als Trägermaterial für Klebebänder und Barrierefolien [F2 S.684/685, F1 S.154-158, F11, F8, F10, F5].

2.4.2.3 Polyethylenaphthalat

Polyethylenaphthalat, kurz PEN genannt, gehört wie PET zu den Polyestern. Es kann durch Polykondensation aus Diethylenglykolphthalat hergestellt werden. Die Strukturformel des thermoplastischen Polymers zeigt Abbildung 2-17.

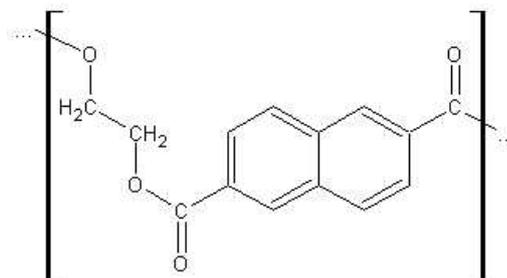


Abbildung 2-17: Strukturformel des Polyethylenaphthalat [B3]

Polyethylenaphthalat hat große chemische Ähnlichkeit zum Polyethylenterephthalat, ist im Vergleich jedoch etwas wärmerestabiler. Eine wichtige Eigenschaft ist die niedrige Transmission im UV-Bereich. Abbildung 2-18 zeigt das Transmissionspektrum einer barrierebeschichteten PET- und PEN-Folie der Firma 3M. Beide Folien sind 125 µm dick und besitzen dieselbe Barrierebeschichtung. Es ist deutlich die Transmissionsdifferenz im

2. Grundlagen

Bereich zwischen 300 und 400 nm (UV-Strahlung) zu erkennen. Während PET weitestgehend UV durchlässig ist, blockiert PEN einen Großteil der einfallenden Strahlung.

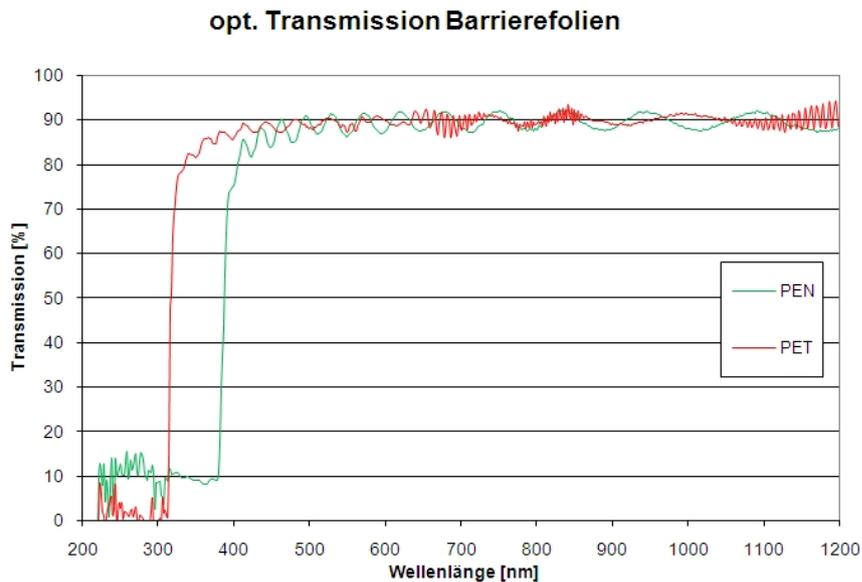


Abbildung 2-18: Transmissionsspektrum barrierebeschichteter PEN- und PET-Folien

PEN besitzt im Vergleich zu PET bessere Barriereigenschaften gegenüber Wasser und Sauerstoff, wodurch es für die Entwicklung der flexiblen OLED als Trägerfolie interessant wird. Eine komplett flexible Verkapselung aus PEN-Folien ist derzeit nur über eine Lamination von Haftklebstoffen möglich, da flüssigverkapselte Systeme mit UV-Strahlung ausgehärtet werden, die aber von der PEN-Folie blockiert wird.

Durch die höheren Herstellungskosten für PEN werden viele mögliche Anwendungsbereiche weiterhin durch Produkte aus PET abgedeckt. In der Elektrotechnik und Elektronik hat sich PEN aber bereits etabliert [F9, F7].

2.4.2.4 Polyurethan

Polyurethan, auch kurz als PU oder PUR bezeichnet, gehört zu den thermoplastischen Elastomeren. Das bedeutet, dass sich dieser Kunststoff bei Raumtemperatur wie ein Elastomer, nach Erwärmung wie ein Thermoplast verhält. Das Polyurethanpolymer enthält als charakteristische funktionelle Gruppe die Urethan-Gruppe, wie in Abbildung 2-19 dargestellt.

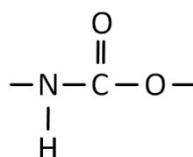


Abbildung 2-19: Strukturformel der Urethan-Gruppe [B3]

2. Grundlagen

Polyurethan wird durch Polyaddition von Di- oder Polyolen mit Di- oder Polyisocyanaten gebildet. Dabei entsteht kein Nebenprodukt, wie es etwa bei der Polykondensation der Fall ist.

Je nach Ausgangsstoff können lineare oder vernetzte Polyurethane gebildet werden. Dieser Umstand eröffnet dieser Kunststoffart vielfältige Einsatzgebiete.

Als Beispiel soll die Folie „Optical Aliphatic Thermoplastic Polyurethane“ (OATPU), eine Entwicklung der Firma „epurex films GmbH“, genannt werden. Das optisch klare, aliphatische²⁵, thermoplastische Polyurethan besitzt die Eigenschaft, spröde Materialien zu flexibilisieren und als Interlayer²⁶ eine mechanische Entkopplung zweier starrer Schichten zu ermöglichen. Wirkt thermischer oder mechanischer Stress auf solche Schichten ein, kann dieser über das Polyurethan abgebaut werden. OATPU kann in Verbindung mit kratzfesten Folien einen optimalen Schutz für im Außenbereich angewendete starre, organische Leuchtdioden oder Solarzellen bieten [F2 S.702-706, F1 S.169-170, F4].

2.4.2.5 Polycarbonat

Bei Polycarbonat, kurz PC, handelt es sich um ein lineares Polyester der Kohlensäure. Es wird meist durch Polykondensation (Umesterung) von Kohlensäureestern mit Bisphenol A [2,2-Bis-(p-hydroxyphenyl)propan] hergestellt. Dabei fällt Phenol als Nebenprodukt an. Abbildung 2-20 zeigt die Strukturformel von PC.

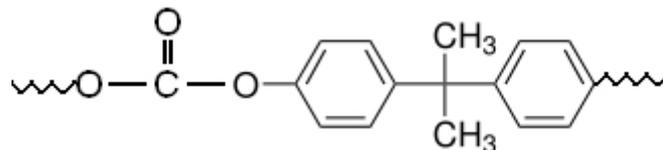


Abbildung 2-20: Strukturformel von Polycarbonat [B3]

Polycarbonat ist ein amorpher Thermoplast. Zu seinen Eigenschaften zählen hohe Festigkeit und Härte, gute Alterungs- und Witterungsbeständigkeit sowie eine nur mäßige chemische Beständigkeit. PC ist stark permeabel für Sauerstoff sowie mäßig durchlässig für Wasserdampf. Optisch wird es durch eine klare bis leicht gelbliche Eigenfärbung charakterisiert. Es ist dabei fast genauso lichtdurchlässig wie Glas. Verwendet wird Polycarbonat hauptsächlich im technischen Sektor in Form von Spritzguss aber auch als Folie.

Trotz der schlechten Sperreigenschaften bezüglich Wasser und Sauerstoff finden auch Folien aus Polycarbonat Verwendung in der OLED-Herstellung. Beispiel ist das Produkt

²⁵ Aliphatische Kohlenwasserstoffe: Kettenförmige Kohlenwasserstoffe

²⁶ Interlayer (engl.): Zwischenschicht

2. Grundlagen

„Makrofol BL“ der Firma „Bayer MaterialScience“, bei dem durch Zugabe von Streulichtpigmenten eine veränderte Lichtauskopplung erreicht wird. Punktförmige Lichtquellen erscheinen dadurch als flächige Beleuchtung. Des Weiteren ist die Folie kratzfest und durch ihre Oberflächenstrukturierung blendfrei. Für Flächenbeleuchtung eingesetzte OLEDs könnten mit dieser Folie dahingehend optimiert werden [F2 S.686-689, F3].

2.4.3 Folienvorbereitung

Zur Verbesserung der Benetzungsfähigkeit von Folien, können deren Oberflächen vorbereitet und vorbehandelt, werden.

Grundsätzlich sollten Folien vor der Verarbeitung im Zuge der Oberflächenvorbereitung entstaubt und entfettet werden. Fettrückstände können mit einem Lösungsmittel beseitigt werden. Hierfür eignet sich Isopropanol relativ gut, da es im Gegensatz zu Aceton die Folienstruktur deutlich weniger beschädigt. Barrierebeschichtete Folien sollten nur auf der unbeschichteten Seite gereinigt werden, da Lösungsmittel die Beschichtung beschädigen können. Geeignete Reinigungsverfahren sollten beim Folienhersteller erfragt werden. Aufliegende Staubpartikel können mittels eines Stickstoff- Druckgebläses entfernt werden.

Die Folien können danach mit verschiedenen Verfahren vorbehandelt werden. Dafür eignen sich physikalisch-chemischen Methoden, wie die Corona-Entladung oder das Nieder- und Atmosphärendruckplasmaverfahren. Hierbei werden Radikale gebildet, die in der Lage sind Brüche in organischen Verbindungen zu erzeugen, wodurch sich die Oberflächenenergie der Folie erhöht.

Nachdem die Folien mit den genannten Methoden entsprechend vorbereitet wurden, können sie für die Lamination verwendet werden. Für die Verkapselung von OLEDs sind jedoch noch besondere Ansprüche zu beachten.

Barrierefolien und Barrieretransferklebefolien müssen zum Zeitpunkt der Lamination idealerweise vollständig frei von Sauerstoff- und Wassermolekülen sein. Durch die Lagerung der Folien im Servicebereich des Reinraumes kommen sie jedoch mit Sauerstoff in Kontakt.

Für ein langfristig besseres Verkapselungsergebnis sollten die Folien zum Ausgasen im Vakuumofen ausgeheizt werden. Dabei gasen sie bei einer definierten Temperatur beschleunigt aus. Je höher die Temperatur ist, desto schneller entweichen die vorher aus der Umgebung aufgenommenen Gasmoleküle. Es ist allerdings sehr wichtig, die herstellerbezogenen Angaben über kritische Temperaturen der Kunststoffmaterialien zu beachten. Neben dem Vakuumofen gibt es die Möglichkeit, die Folien auf der Hot-Plate“

2. Grundlagen

auszuheizen. Dabei werden sie auf eine in Stickstoffatmosphäre befindliche Heizplatte gelegt, über ein Vakuum angesaugt und dabei erhitzt.

Danach werden die Folien in der Glovebox in reiner Stickstoffatmosphäre gelagert. Es ist auch möglich, die Folien nur durch Aufbewahrung in der anaeroben Glovebox zu entgasen, jedoch verspricht zusätzliches vorheriges Ausheizen bessere Ergebnisse.

Wenn vorhanden, empfiehlt sich die Verwendung einer Antistatikeinrichtung. Die Folien sind ohne eine statische Entladung nur erschwert zu handhaben. Bei einer Antistatikeinrichtung wird die Ionenspannung durch die Potentialdifferenz zwischen Sensor und der Ladungsmenge am Werkstück gemessen, und anschließend eine bestimmte Menge an entgegengesetzten Ionen ausgesandt. So wirkt man der statischen Aufladung entgegen und der Umgang mit den Folien wird deutlich einfacher [K6 S.542-555, K3 S.141/142, K1 S.109-114; K4 S.42/43/46 K7 S.179-191].

3 Lamination

3.1 Einführung

Die Lamination lässt sich in Vakuum- und Rollenlamination unterteilen. Im Folgenden sollen nun beide Verfahren kurz vorgestellt werden. Dies umfasst die Beschreibung von Aufbau und Funktionsweise sowie die Bewertung der Eignung für die OLED-Fertigung. Die Bewertung basiert u.a. auf den Ergebnissen der Versuche „*Vakuumlamination in der OLED-Herstellung*“ (Kapitel 4.2) und „*Maschinelle Lamination von Haftklebefolien auf Glas*“ (Kapitel 4.3.1).

Das Fraunhofer IPMS Dresden plant den Einsatz von zwei Laminatoren. Es soll eine Anlage als „Stand-alone“-Gerät²⁷ angeschafft werden, die für Testzwecke und kleinere Serienproduktionen verwendet wird. Später soll ein weiterer Laminator in den neuen Anlagenkomplex der Firmen „*Sunic Systems*“, „*Aixtron*“ und „*Vitec*“ integriert werden. Ein Ziel dieser Arbeit ist es, eine Empfehlung hinsichtlich eines geeigneten Gerätetyps für das „Stand-alone“-Gerät zu geben.

3.2 Vakuumlamination

3.2.1 Aufbau eines Vakuumlaminators

Vakuumlaminatoren verschiedener Anbieter sind unterschiedlich aufgebaut. Die Funktionsweise ist jedoch grundsätzlich gleich. Abbildung 3-1 zeigt zwei gebräuchliche Erscheinungsformen.



Abbildung 3-1: Vakuumlaminatoren mit Klapp- und Einschuböffnung

²⁷ „Stand-alone“-Gerät: Elektronikgerät, welches eigenständig seine Funktion erfüllen kann.

3. Lamination

In der Vakuumkammer befinden sich eine beheizbare Bodenplatte und eine flexible, indirekt beheizbare Membran. Dazwischen werden Substrat und Laminat platziert.

Es ist möglich, die Lamination über die Voreinstellung von Temperatur, Druck, Evakuierungszeit und Druckhaltezeit zu beeinflussen. Diese Parameter werden auf einem Panel mit digitalen oder analogen Anzeigen angezeigt.

3.2.2 Funktionsweise eines Vakuumlaminators

Der folgende Ablauf beschreibt die Lamination mit dem Gerät „DPL-24“ der Firma „Operation Technology Inc.“.

Zwei Controller sorgen für ein unabhängiges Erwärmen der oberen- und unteren Heizplatte auf die jeweilige, vorher eingestellte, Solltemperatur. Das Gerät ist somit nach einer kurzen Aufwärmphase startbereit.

Das gestapelte Material wird auf dem Einschub positioniert und anschließend in das Innere des Laminators geschoben. Über einen Dichtungsring wird die Kammer hermetisch verschlossen. Es ist möglich, für bestimmte Folienarten Zusatztechniken bzw. modifizierte Werkzeuge in den Laminator zu integrieren.

Abbildung 3-2 zeigt, dass bei geöffnetem Einschub im betriebsbereiten Laminator oberhalb der Membran ein Vakuum erzeugt wird und unterhalb atmosphärischer Normaldruck herrscht. Die Membran befindet sich oberhalb des Laminats. Der Einschub ist abgefedert, so dass ein Kontakt des zu bearbeitenden Materials zur Heizplatte verhindert wird.

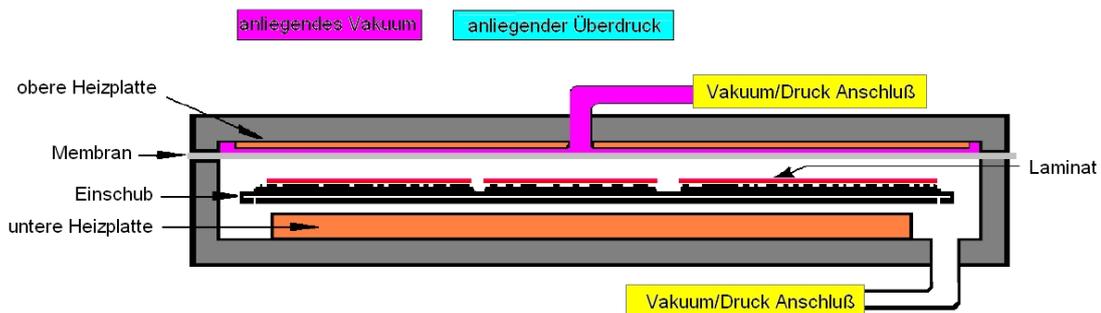


Abbildung 3-2: Innenansicht der Vakuumprozesskammer vor der Lamination [B2]

Zu Beginn des Prozesses wird auch der Bereich unterhalb der Membran evakuiert, wie es in Abbildung 3-3 zu sehen ist. Es wird dabei ein Vakuum von etwa 2-3 mbar erzeugt, was an einem Panel digital angezeigt wird. Über einen Timer kann die Vakuumhaltezeit eingestellt werden. Bei der Evakuierung wird die Luft aus dem Laminierschichtstapel entfernt. So können Lufteinschlüsse vermieden werden. Durch das räumlich homogene Vakuum in der Kammer wird die Membran nicht bewegt und kann das Laminat somit nicht berühren.

3. Lamination

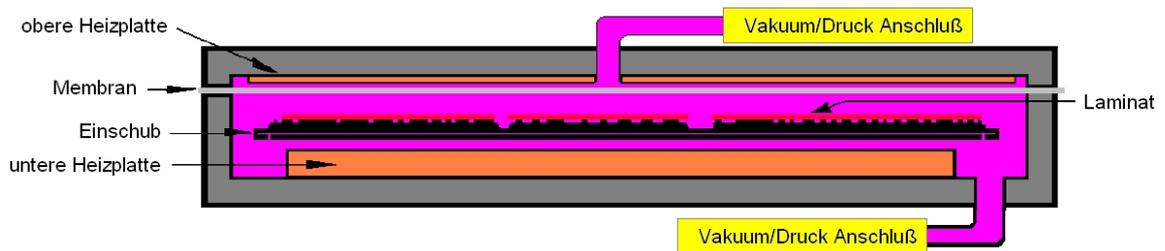


Abbildung 3-3: Innenansicht der Vakuumprozesskammer während der Vakuumerzeugung [B2]

Nach der Vakuumhaltezeit von üblicherweise 30 Sekunden wird der Bereich oberhalb der Membran geflutet, wie es Abbildung 3-4 zeigt. Der dabei eingestellte Druck kann variiert und damit für druckempfindliche Laminat angepasst werden. Die vorgeheizte Membran sinkt auf das Laminat, wodurch der abgefederte Einschub auf die untere Heizplatte gedrückt wird. Die Membran fügt sich der Laminatoberfläche an, erwärmt diese und übt einen flächig homogenen Druck aus. Die Haltezeit des Druckes ist vorher einzustellen, und kann bei temperatursensiblen Substraten erhöht werden. Üblicherweise beträgt sie 20 Sekunden.

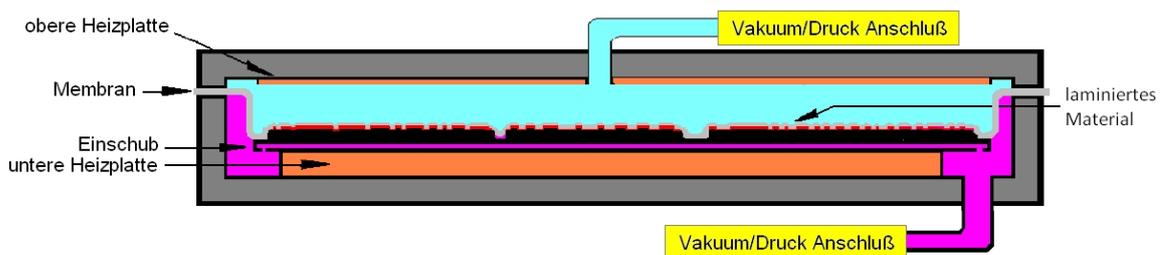


Abbildung 3-4: Innenansicht der Vakuumprozesskammer während der Andrückphase der Lamination [B2]

Nach diesem Prozessabschnitt wird der Bereich oberhalb der Membran wieder evakuiert und der Bereich unterhalb geflutet, sodass die Membran vom Laminat entfernt wird. Der Einschub wird von der Heizplatte weg bewegt und ist zum Öffnen bereit. Das Laminat ist nun, wie in Abbildung 3-5 zu erkennen, auf das darunter liegende Substrat laminiert [L1].

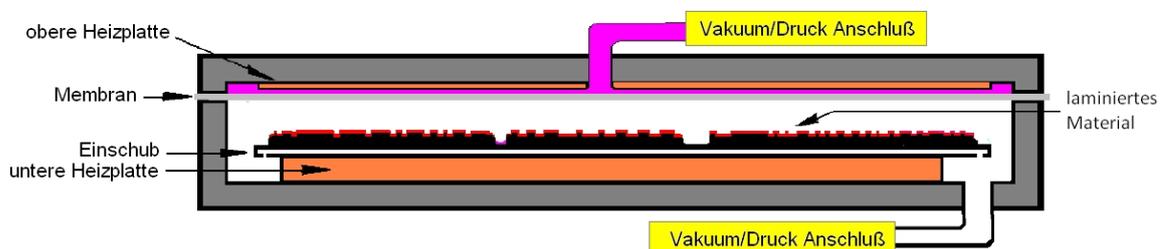


Abbildung 3-5: Innenansicht der Vakuumprozesskammer nach der Andrückphase der Lamination [B2]

3.2.3 Anwendungsgebiete

Die Vakuumlamination mit Standardgeräten eignet sich grundsätzlich für die Anwendung thermisch aktivierbarer Klebstoffe ohne drucksensible Anfangshaftkraft. Haftet der Klebstoff bereits ohne Erwärmung am Substrat, ist die Bildung von Lufteinschlüssen sehr

3. Lamination

wahrscheinlich. Dabei gilt: je stärker die Anfangshaftkraft, desto schlechter das Laminationsergebnis. Diese, bereits in persönlichen Gesprächen mit entsprechenden Geräteanbietern erwähnte Problematik, spiegelt sich auch in den Ergebnissen des Versuches „*Vakuumlamination in der OLED-Herstellung*“ (Kapitel 4.2) wieder.

Aufgrund der relativ langen Prozesszeit von Vakuumherzeugung und Membranandruck sowie der Zeit, die für die Handhabung veranschlagt wird, liegt die Taktzeit bei ca. 80 - 90 Sekunden [L1].

Die Anschaffungskosten eines solchen Gerätes in Standardausführung liegen momentan zwischen 70.000 und 90.000 Euro.

3.3 Rollenlamination

3.3.1 Aufbau und Funktionsweise

In Abbildung 3-6 ist schematisch der Ablauf einer Rollenlamination nachvollzogen. Die Anordnung der Auf- und Abwickelrollen variiert von Gerät zu Gerät. Der hier aufgeführte Aufbau stellt die für das Fraunhofer IPMS Dresden wahrscheinlichste Anordnung dar.

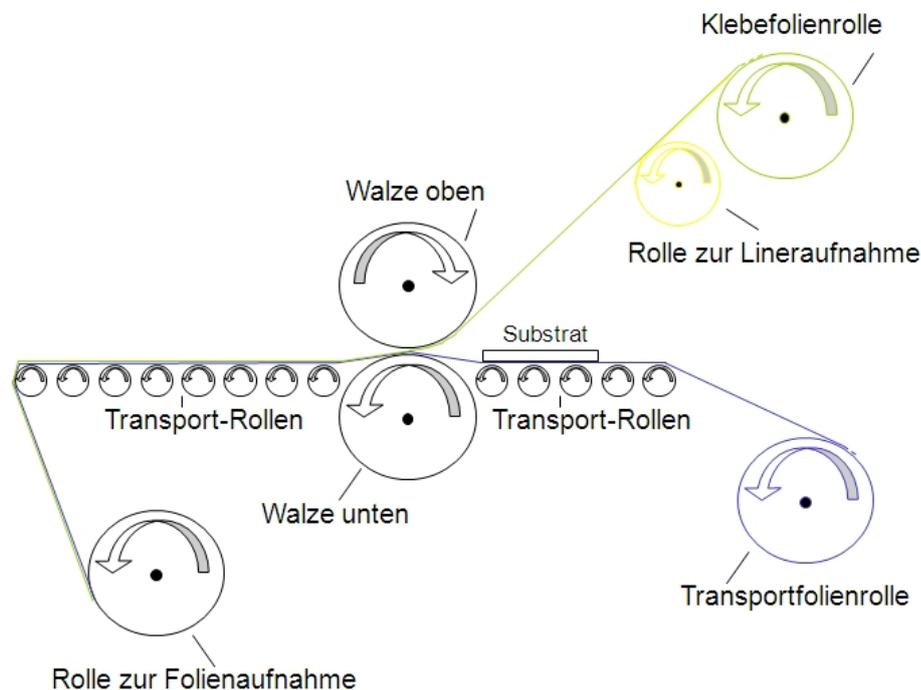


Abbildung 3-6: Seitenansicht einer möglichen Rollenlamination

Der Rollenein- und -auslauf (Transportrollen) sowie die darüber geführte Transportfolie sind zu erkennen. Auf dieser wird das Substrat über die Transportrollen befördert. Dies verhindert ein Zerkratzen des Substrates bei Bewegung über beschädigte Rollen. Außerdem können

3. Lamination

Klebreste von Klebfolien aufgenommen werden, ohne dass sie das Rollensystem verschmutzen. Anhang A4 zeigt ein Ein- und Auslaufsystem, bestehend aus Transportrollen.

Die Transportrolle muss nicht zwingend vorhanden sein, denn für den nötigen Vorschub sorgen die Laminierwalzen. Jedoch muss dann darauf geachtet werden, dass das Substrat nicht in die Zwischenräume der einzelnen Transportrollen gelangt. Unterhalb der Klebefolienrolle ist eine Rolle zur Linerentfernung²⁸ und –abführung angebracht.

Das Substrat wird zusammen mit der Klebefolie zwischen die obere und die untere Walze geführt. Dabei bekommt die Klebefolie, je nach Spaltbreite, bereits Kontakt zur Transportfolie, bevor sie mit dem Substrat in Berührung kommt. Nach erfolgter Lamination muss das Substrat vom Band freigeschnitten werden. Die restliche Transportfolie wird auf die Folienaufnahmerolle gewickelt. Es ist auch möglich, dass der Freiraum zwischen den beiden Hauptwalzen so groß bemessen ist, dass Klebe- und Transportfolie nicht direkt in Kontakt kommen, sondern die Klebefolie nur auf das Substrat aufgebracht wird. In Anhang A5 ist der Spalt zwischen der unteren, mit Silikon ummantelten, Walze und der oberen Walze aus Edelstahl zu erkennen.

Die Darstellung dient nur zur Veranschaulichung des Prinzips. Die Realisierung kann, wie bereits angedeutet, auch in abgewandelter Form erfolgen. Zusätzlich ist eine anwendungsspezifische Änderung des Aufbaus vor Ort möglich, indem die Rollen entfernt und an anderen Stellen angebracht werden.

3.3.2 Auswahlkriterien des Laminators

3.3.2.1 Reinraumtauglichkeit

Für das „Stand-alone“-Gerät ist eine Reinraumklasse der Stufe ISO 4 gefordert, es dürfen somit rund 10.000 Partikel bis zu einer Größe von maximal 0,1 µm pro m³ gefilterter Luft enthalten sein.

Die verschiedenen Anbieter der Laminatoren konnten bisher keine näheren Angaben über die Reinraumtauglichkeit ihres Gerätes machen. Die Eignung beruht lediglich auf Erfahrungswerten bereits verkaufter Geräte. Laut dieser Aussagen werden alle Geräte in Reinräumen der Klasse ISO 4, manche sogar bei ISO 3 verwendet.

Es gibt verschiedene Faktoren, die das Entstehen von Partikeln stark beeinflussen. Die Bremsen der Folienabwickelrollen, die Schleifkontakte der Heizwalzen und die Lagerung der Achsen spielen hierbei die Hauptrolle. Der Abrieb in den Lagern ist durch die geringe Umdrehungsgeschwindigkeit der Walzen bei der Lamination sehr gering. Jedoch kann dieser

²⁸ Liner (engl.) (kurz für: Releaseliner (engl.)): Schutzfolie der Klebmasse, welche erst kurz vor der Applikation entfernt wird.

3. Lamination

Vorgang durch die Verwendung reibungsarmer C3-Lager²⁹ noch weiter minimiert werden. Die Schleifkontakte der Heizwalzen werden in Kapitel 3.3.2.2 näher erläutert. Nach Herstellerangaben erzeugt jedoch auch dieses Geräteteil nur eine geringe Partikelfreisetzung. Die Bremseinrichtung der Folienabwicklung in der Seitenverkleidung des Gerätes ist, laut Hersteller, durch die räumliche Lage im Gerät, den harten Bremsbelag und der geringen Abwickelgeschwindigkeit ebenfalls wenig partikelproduzierend.

3.3.2.2 Einstellungsmöglichkeiten und Kenndaten

Ein weiteres Kriterium für die Auswahl eines Laminators ist die Verfügbarkeit veränderbarer Bearbeitungsparameter. Zur Beurteilung kann hier die Gerätespezifikation zu Rate gezogen werden, in der die geforderten Eigenschaften für ein Gerät festgehalten sind. Diese umfasst unter anderem folgende Kriterien:

- Bearbeitungsbreite
- Temperatur- und Druckeinstellung
- Einstellung des Spaltes (Spindelhub, Kurvenscheibe, Schrittmotor)
- Durchlaufgeschwindigkeit
- Anzeigevarianten für alle Einstellungen
- Heizungsart der Walzen
- Substrateinlauf.

Die Bearbeitungsbreite wurde nach der zukünftig im integrierten Gerät zu verwendenden Substratgröße gewählt. Diese ist abhängig von der neuen OLED-Fertigungslinie und beträgt 370 x 470 mm. Dabei wurde die Arbeitsbreite des Laminators mit 500 mm an die breitere Seite des Substrates angepasst.

An Druck- und Temperatureinstellung werden keine speziellen Anforderungen gestellt. Es werden lediglich separat beheizbare Walzen im Bereich von Raumtemperatur bis ca. 140 °C mit einer Toleranz von +/- 2 °C gefordert. Der Laminierdruck soll in einem Bereich von 0 - 6 bar regelbar sein. Die wahrscheinlich benötigten Temperatur- und Druckwerte liegen deutlich unter den in der Spezifikation geforderten Werten. Jedoch ist der Anwendungsumfang des Gerätes noch nicht völlig geklärt, so dass die Option, auch mit höheren Werten zu arbeiten, bestehen bleiben soll.

Bei der Einstellung des Anpressdruckes ist zu beachten, dass der am Panel angezeigte Druck nur ein indirektes Maß für die tatsächlich wirkende Kraft darstellt. Deshalb sollte er nicht als Vergleichsparameter verschiedener Maschinen herangezogen werden. Begründet

²⁹ C3-Lager: Reibungsarmes Wälzlager.

3. Lamination

ist dies durch den inneren Aufbau des Gerätes. Vereinfacht ergibt sich folgende Darstellung (Abbildung 3-7):

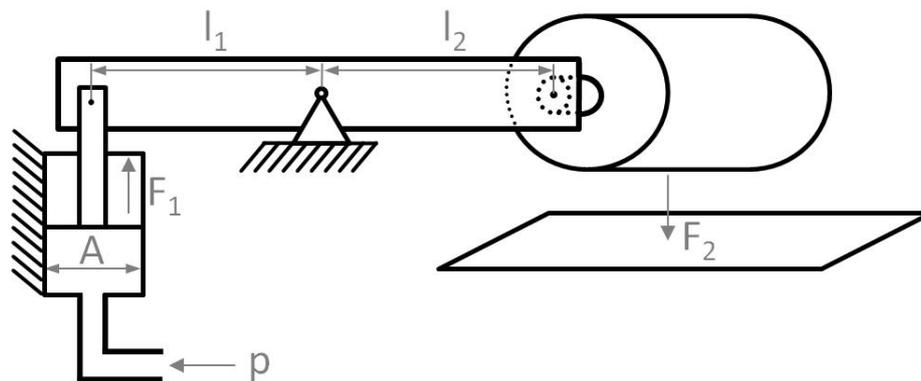


Abbildung 3-7: Kraftübertragung auf die Laminierwalze

Der an den verschiedenen Maschinen eingestellte Druck p ist betragsmäßig nicht gleich dem direkt auf das Substrat wirkenden Druck. Es handelt sich hierbei stattdessen um den Druck, der auf einen Zylinder wirkt, welcher über ein bestimmtes Hebelverhältnis die Kraft auf die Laminierwalze überträgt. Werden die Reibung in den drei Lagern des Hebels und die entstehenden Kraftverluste im Zylinder vernachlässigt, ergibt sich folgende triviale Beziehung für das Kräfteverhältnis im System:

$$p = \frac{F_1}{A} \quad (2)$$

$$F_1 l_1 = F_2 l_2 \quad (3)$$

$$F_2 = \frac{F_1 l_1}{l_2} \quad (4)$$

$$F_2 = \frac{p A l_1}{l_2} \quad (5)$$

Das Verhältnis $\frac{A l_1}{l_2}$ aus Gleichung (5) kann als Maschinenkonstante k bezeichnet werden und variiert von Gerät zu Gerät. Somit kann die Beziehung zu $F_2 = p k$ vereinfacht werden. Geht man nun von Abbildung 3-7 aus, bei dem die Hebellängen l_1 und l_2 als gleichlang angenommen werden und jegliche Reibung vernachlässigbar ist, ergibt sich $F_2 = F_1 = p A$. Außerdem ist für die Kraftübertragung die Härte der verwendeten Walze ausschlaggebend. Beispielsweise überträgt eine Edelstahlwalze die wirkende Kraft sofort auf das Substrat. Silikonummantelte Walzen hingegen verformen sich, in Abhängigkeit der Härte des Substrates, bis sie die maximale Kraft übertragen. Die Annahme $F_2 = F_1$ stimmt nur für den

3. Lamination

Fall einer beidseitig befestigten Walze. Anhang A6 zeigt den inneren Aufbau, ähnlich wie er in Abbildung 3-7 beschrieben ist.

Die Spaltbreiteneinstellung muss mindestens 1,8 mm betragen. Dieser Wert setzt sich aus der Dicke einer Standard-OLED zusammen, deren Substrat 0,7 mm, und deren Deckglas 1,1 mm stark ist. Die Spaltbreite beschreibt die voreingestellte Höhe zwischen der unteren und oberen Laminierwalze. Dieser Abstand muss für eine erfolgreiche Lamination immer kleiner sein als die Stärke des zu laminierenden Verbunds. Nur so kann auf diesen ein Anpressdruck ausgeübt werden. Die Spaltbreite kann über ein Spindelhubgetriebe oder eine Kurvenscheibe geregelt werden, wobei beide Varianten etwa dieselbe Genauigkeit aufweisen.

Die Durchlaufgeschwindigkeit des Substrates durch die Walzen ist in der Gerätespezifikation mit 1 m/min festgelegt. Jedoch können auch problemlos höhere Geschwindigkeiten eingestellt werden.

Druck- und Temperatureinstellung werden auf einem Panel am Laminator angezeigt. Standardmäßig erfolgt die Darstellung der Temperatur digital und die des Drucks analog, wobei eine digitale Anzeige für alle Parameter wünschenswert wäre, um Reproduzierbarkeit zu gewährleisten.

Verschiedene Typen von Walzenheizungen kommen zum Einsatz. Am häufigsten verwendet wird eine in der Walze mitdrehende Heizung, deren Stromzufuhr über Schleifkontakte realisiert wird. Die Kontakte bestehen für Geräte ohne Reinraumanforderung aus relativ kostengünstigen Kohleoberflächen. Diese werden jedoch aufgrund des Abriebs durch silberbeschichtete Schleifkontakte ersetzt. Eine andere Variante ist eine stehende, von außen wärmeabstrahlende Standheizung. Diese produziert praktisch keine Partikel, kann die Walzen aber nur auf ca. 120 °C aufheizen. Die letzte zu erwähnende Walzenheizung wird durch ein in der Walze stehendes Heizelement realisiert, über welches der darum rotierende Metallmantel gleichmäßig durch die abgegebene Wärmestrahlung erwärmt wird. Die Partikelbelastung dieser Variante ist ebenfalls sehr gering.

Bezüglich des Ein- und Auslaufes der Substrate sind folgende Möglichkeiten gegeben:

a) planer Tisch (Abbildung 3-8):

Vorteil: Es können sehr kleine Substrate bearbeitet werden.

Nachteil: Es gibt keine Möglichkeit, die Lage des Substrates zu korrigieren, ohne das Substrat eventuell zu zerkratzen.

3. Lamination

Dieses Problem kann jedoch behoben werden, indem zwischen Substrat und Tisch eine Zwischenplatte angeordnet wird, auf der das Substrat nicht verrutscht. Diese kann anschließend auf dem Tisch zur Lagekorrektur verschoben werden.



Abbildung 3-8: Tischeinlaufsystem (Modell HRL350 der Firma „Stork Vertrieb KG“)

b) Transportrollen (Abbildung 3-9):

Vorteil: Dieses System wird bei den meisten Anbietern als Standardausführung angeboten und verursacht somit keine zusätzlichen Kosten. Außerdem lagern sich auf den Rollen weniger Partikel ab als bei einem Tischeinlaufsystem, welche das Substrat beschädigen können.

Nachteil: Kleine Substrate sind nicht transportierbar. Dies würde kleine Durchmesser der Transportrollen erfordern, wodurch diese schneller abnutzen. Außerdem sind meist große Rollen vorinstalliert.

Dieser Nachteil kann behoben werden, indem die Substrate auf einer Transportfolie über das Rollensystem bewegt werden. Die Vorteile dieser Variante wurden bereits kurz in Kapitel 3.3.1 erwähnt.



Abbildung 3-9: Rolleneinlaufsystem (Modell UVL der Firma „Fetzel Maschinenbau GmbH“)

c) Transportkugeln (Abbildung 3-10):

Vorteil: Lagekorrekturen können beschädigungsfrei durchgeführt werden, da die Kugeln in alle Richtungen frei drehbar sind.

Nachteil: Kleine Substrate sind aufgrund des erforderlichen Minimalabstandes der Kugeln nicht transportierbar.

Dieses Problem kann durch die Benutzung eines Trays³⁰ gelöst werden. Der Rahmen sollte mit einem klebstoffabweisenden Mittel beschichtet werden, damit Haftklebefolien nach dem Entfernen keine Reste hinterlassen.



Abbildung 3-10: Kugeleinlaufsystem (Modell MLC1200 der Firma „Korn GmbH“)

³⁰Tray (engl.): Ein Tray ist eine Art Tablett mit Vertiefungen, in welche kleine Substrate passgenau hineingelegt werden können. So können mehrere Substrate gleichzeitig in einem Prozess bearbeitet werden.

3.3.3 Anwendungsgebiete

Rollenlaminatoren sind für die Applikation von Haftklebefolien gut geeignet. Durch die homogene Beschichtung können verfahrensbedingte Fehlererscheinungen bei fachgerechter Anwendung ausgeschlossen werden.

Thermisch aktivierbare Klebefolien sind ebenso gut applizierbar. Je nach Heizungs- und Walzenart können Klebstoffe mit Aktivierungstemperaturen von etwa 100 - 200 °C verwendet werden.

Abhängig von Durchlaufgeschwindigkeit und Substratgröße können Taktzeiten zwischen ca. 13 und 70 Sekunden³¹ erreicht werden.

Die Anschaffungskosten eines Standardgerätes belaufen sich momentan auf 9.000 – 15.000 Euro.

³¹ Die Taktzeit (t_T) von 13 Sekunden berechnet sich aus einem Nutzen von 16 Substraten je 50 x 35 mm auf einem Tray der Größe 200 x 200 mm. Die Durchlaufgeschwindigkeit wird mit 1 m/min, das Einlegen eines Substrates (Einlegezeit t_E) mit vier Sekunden und das Freischneiden eines Substrates (Freischneidezeit t_F) mit acht Sekunden angenommen. Formel: $t_T = t_E + t_L + t_F$; bei einer Laminationszeit von $t_L = 12 \text{ s} / 16 \text{ Stk.} \approx 1 \text{ s/Stk.}$

4 Material und Methoden

4.1 Einführung

Aufgrund der langen Lieferzeit des Laminators und der Berücksichtigung sonstiger Umstände ist es nicht möglich, innerhalb der Diplomzeit Versuche direkt am Laminator durchzuführen. Deshalb wird im Folgenden der Fokus auf grundlegende Problemstellungen und mögliche Aufgabenbereiche der Rollenlamination gesetzt (Kapitel 4.3 und 4.4). Die Problematik der Lamination von Haftklebefolien mit einem Vakuumlaminator wird in Kapitel 4.2 erörtert.

Übersicht Versuche:

4.2 Vakuumlamination in der OLED-Herstellung

4.3 Versuche zur Rollenlamination

4.3.1 Maschinelle Lamination von Haftklebefolien auf Glas

4.3.2 Lamination von Glas auf Glas mittels einer beidseitigen Klebefolie

4.3.3 Machbarkeitstest der Handlamination in der Glovebox

4.3.4 Herstellung verschiedener Folienverbunde zur Erprobung deren Rollbarkeit

4.3.5 Folienverkapselung auf Glassubstraten

4.3.6 „Folie auf Folie“ - Lamination

4.3.7 Lamination auf Organischen Solarzellen (OSC)

4.4 Betrachtungen zur mechanischen Stabilität konventionell verkapselter OLEDs

4.4.1 Vorbetrachtung zu Belastungen der OLEDs bei mechanischer Krafteinwirkung

4.4.2 Druckbelastung bei dem Rollenlaminationsprozess

4.2 Vakuumlamination in der OLED-Herstellung

Ziel des Versuches:

Dieser Versuch beschäftigt sich mit der Problemstellung, selbstklebende Folien mit dem Verfahren der Vakuumlamination durch einen Standardlaminator auf ein Glassubstrat ohne Deckschicht zu laminieren.

Vorbetrachtung:

Die Lamination gewinnt in der OLED-Herstellung zunehmend an Bedeutung. Neben der Optimierung starrer OLEDs steht die Realisierung flexibler OLEDs im Mittelpunkt der Forschung. In Kapitel 3 dieser Arbeit werden Vor- und Nachteile der in Betracht gezogenen Verfahren, untersucht.

Durchgeführt wurde der Versuch von der Firma „SAT Electronic GmbH“ in Kooperation mit deren amerikanischer Partnerfirma „Operation Technology Inc.“. Die Materialien für diesen Versuch wurden vom Fraunhofer IPMS Dresden bereitgestellt.

Durchführung:

Materialien und Geräte:

- a) Glassubstrat: Fläche 200x200mm: Stärke 0,7mm
- b) Transferklebefolie „8212“ (Firma „3M“): Stärke 0,05mm
- c) Lichtauskoppelfolie „Makrofol BL 6-2“ (Firma „Bayer MaterialScience“): Stärke 0,4mm

Für die Applikation wurde der Vakuumlaminator „Optek DPL-24“ der Firma „Operation Technology Inc.“ genutzt.

Ablauf:

Die Transferklebefolie wird einseitig von dem Releaseliner befreit und auf dem Glassubstrat platziert. Substrat und Laminat werden daraufhin in den Laminator geschoben. Die Lamination beginnt mit dem Evakuieren der Kammer. Dieser Prozess dauert ca. 30 Sekunden. Anschließend wird in dieser Kammer ein atmosphärischer Druck von bis zu 6 bar aufgebaut, welcher für 10-20 Sekunden wirkt. Nach diesem Schritt ist die Lamination der Transferklebefolie beendet.

Die Lichtauskoppelfolie „Makrofol BL 6-2“ wird daraufhin auf die gleiche Weise laminiert.

4. Material und Methoden

Ergebnis:

Die Ergebnisse des ersten Bearbeitungsschrittes, der Lamination der Transferklebefolie auf das Glassubstrat, sind äußerst unbefriedigend. Durch die starke Anfangshaftkraft wird beim Auflegen dieser Folie auf das Glassubstrat bereits Luft eingeschlossen. Diese kann selbst durch den hohen Druck von 6 bar nicht mehr entfernt werden. Tabelle 4-1 zeigt die Eigenschaften der Transferklebefolie, auf der die hohe Anfangshaftkraft von 7,1 N/cm zu sehen ist.

Kleber-Dicke	Liner-Dicke	Klebkraft [N/cm]		T _{max}	weitere Eigenschaften
50 µm	50 µm	20 min.	72 std.	kurzzeitig:	Trübung 0.6%
		Glas 7,1	Glas 7,8	-40°C – +177°C	Transparenz >99%
		PC 5,8	PC 6,7	langzeitig:	Brechung n=1,475
		Acryl 5,0	Acryl 5,9	-40°C – +85°C	

Tabelle 4-1: Eigenschaften der Transferklebefolie „8212“ der Firma „3M“

Das Laminationsergebnis ist in Abbildung 4-1 zu erkennen. Die Lufteinschlüsse sind deutlich zu sehen. Ausgenommen ist hierbei die untere linke Ecke, da hier die Folie abgezogen wurde. Weitere vier Versuche zeigten ein ähnliches Ergebnis.



Abbildung 4-1: Transferklebefolie auf Glas, laminiert über Standardvakuumlamination; Abmessungen unteres Glassubstrat: 200 x 200 mm

Unter anderem wurde über die Transferklebefolie die oben genannte Lichtauskoppelfolie „Makrofol BL 6-2“ der Firma „Bayer MaterialScience“ laminiert (Abbildung 4-2). Dazu muss der obere Liner der Transferklebefolie entfernt und die 400 µm dicke Lichtauskoppelfolie darübergelegt werden. An den Stellen, an der die Transferfolie fehlerhaft laminiert ist, übertrug sich der Einschluss der Luft immer auf die Auskoppelfolie,

4. Material und Methoden

was in den hellen Bereichen in Abbildung 4-2 zu erkennen ist. Durch die Stärke und Steifigkeit der Auskoppelfolie wird die Faltenbildung während des Laminierens verhindert. So können auskoppelfolienbedingte verhältnismäßig große Lufteinschlüsse ($>0,5 \text{ mm}^2$) ausgeschlossen werden.

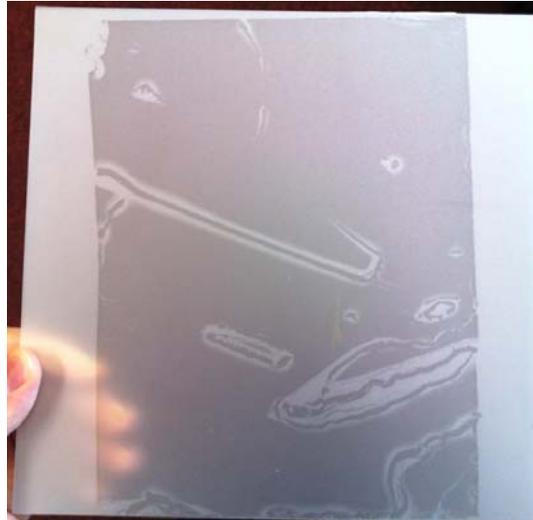


Abbildung 4-2: Vakuumlamination einer Transferklebefolie mit hoher Haftkraft und einer darüber laminierten Lichtauskoppelfolie

Neben diesen großen Lufteinschlüssen können sich auch mikroskopisch kleine Lufteinschlüsse (Shivering) bilden. Um einerseits die Totalreflexion des einfallenden Lichts zu verringern und andererseits Schutz vor mechanischer Belastung zu gewährleisten, ist das Produkt „Makrofol BL“ beidseitig angeraut. Je nach Rauigkeitsgrad kann der Einfluss auf Lufteinschlüsse beobachtet werden. Die Folie „Makrofol BL 6-2“ besitzt zwei verschieden strukturierte Flächen. Laut Herstellerangaben definiert die Ziffer 6 eine leicht strukturierte ($15 \mu\text{m}$) und Ziffer 2 eine sehr leicht mattierte ($< 9 \mu\text{m}$) Oberfläche. Abbildung 4-3 verdeutlicht dies bei 10-facher Vergrößerung.

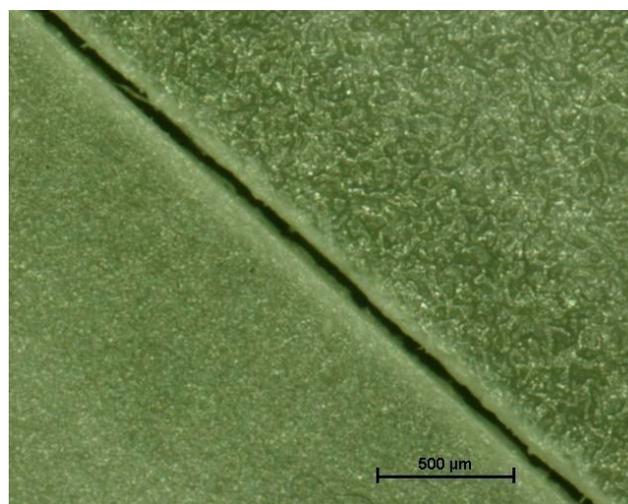


Abbildung 4-3: Rauigkeitsunterschied einer „Makrofol BL 6-2“-Folie in 10-facher Vergrößerung

4. Material und Methoden

Auf der linken, unteren Seite in Abbildung 4-3 wird die sehr leicht mattierte Fläche gezeigt, während sich im oberen, rechten Bereich die leicht strukturierte Oberfläche befindet. Die Rauigkeit der sehr leicht mattierten Seite führt bei der Lamination zu keinerlei sichtbaren Lufteinschlüssen. Hingegen generiert die leicht strukturierte Seite mikroskopische Lufteinschlüsse, die mit bloßem Auge bei Durchlicht als kleine aufliegende Partikel wahrgenommen werden. Unter 11-facher Vergrößerung kann man den Einschluss der Luft deutlich erkennen. Dies ist in Abbildung 4-4 zu sehen.

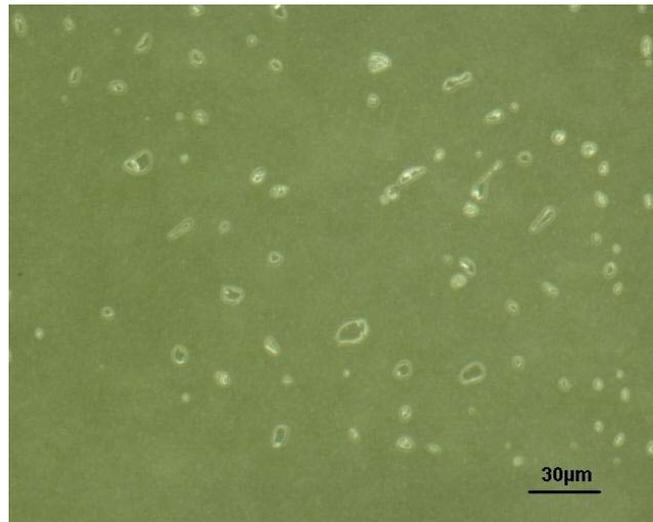


Abbildung 4-4: Lufteinschlüsse bei 11-facher Vergrößerung, rauigkeitsbedingt

Zusammenfassung:

Die vorliegenden Ergebnisse des Versuches lassen den Schluss zu, dass eine Lamination von selbsthaftenden Transferklebefolien auf Glassubstraten über die Vakuumlamination nur unter der Verwendung anlagenspezifischer Zusatzgeräte möglich ist, um einen blasenfreien Auftrag zu erhalten. Die Rauigkeit der zu laminierenden Folien spielt eine entscheidende Rolle für die Bildung kleiner Lufteinschlüsse, unabhängig vom Laminationsverfahren.

4.3 Versuche zur Rollenlamination

4.3.1 Maschinelle Lamination von Haftklebefolien auf Glas

Ziel des Versuches:

In diesem Versuch ist die Machbarkeit der Lamination von Haftklebefolien mit einem Rollenlaminator zu untersuchen.

Vorbetrachtung:

Die Lamination wurde bei unterschiedlichen Herstellern durchgeführt, um die Ergebnisse für den Kauf eines Laminators berücksichtigen zu können. Die Geräte folgender Anbieter wurden dazu verwendet.

- a. Firma: Fetzl Maschinenbau GmbH
Laminator: UVL – Universal Laminator
- b. Firma: Stork Vertrieb KG
Laminator: HRL 350
- c. Firma: Western Magnum Corporation
Vertrieb: Technologie Center Gerhard
Laminator: XRL-240

Da die Versuche zu unterschiedlichen Zeitpunkten durchgeführt wurden, konnten für diese nicht exakt dieselben Materialien verwendet werden. Es wurde allerdings darauf geachtet, dass diese ein möglichst ähnliches Verhalten hinsichtlich der mechanischen Beanspruchung aufweisen.

Durchführung:

Laminator „UVL“ der Firma „Fetzl Maschinenbau GmbH“

Verwendete Materialien:

Substratglas: Displayglas der Größe 200 x 200 x 0,7 mm

Transferklebefolien: a. Folie „tesa OCA“ der Firma „tesa ag“
 b. Folie „CS9621T“ der Firma „Nitto Denko“

Deckfolie: Folie „PENstick flex“ der Firma „Molco GmbH“

Laminationseinstellungen: Temperatur T=50 °C
 Anpressdruck p=1 bar
 Spaltbreite: b=0,6 mm

4. Material und Methoden

Durchlaufgeschwindigkeit: $v = 0,5$ m/min

Ein-und Auslauf: Transportrollen

Walzenpaarung: Silikon-Silikon (Härte: Shore-A=70)

Laminator „HRL350“ der Firma „Stork Vertrieb KG“

Verwendete Materialien:

Substratglas: Displayglas der Größe 200 x 200 x 0,7 mm

Transferklebefolien: a. Folie „tesa OCA“ der Firma „tesa ag“
b. Folie „CS9621T“ der Firma „Nitto Denko“

Deckfolie: Folie „PENstick flex“ der Firma „Molco GmbH“

Laminationseinstellungen: Temperatur $T = 30 - 40$ °C

Anpressdruck $p = 1$ bar

Spaltbreite: $b = 5,6$ mm

Durchlaufgeschwindigkeit: $v = 1$ m/min

Ein-und Auslauf: planer Tisch

Walzenpaarung: Edelstahl-Silikon Härte: Shore-A=60 (Silikon)

Laminator „XRL-240“ der Firma „Western Magnum Corporation“

Verwendete Materialien:

Substratglas: Displayglas der Größe 200 x 200 x 0,7 mm

Transferklebefolien: a. Folie „8212“ der Firma „3M“
b. Folie „CS9621T“ der Firma „Nitto Denko“

Deckfolie: a. Folie „PENstick flex“ der Firma „Molco GmbH“
b. Folie „Makrofol BL 6-2“ der Firma „Bayer MaterialScience“

Laminationseinstellungen: Temperatur $T = \text{ca. } 25$ °C

Anpressdruck $p = 1$ bar

Spaltbreite: $b = 3,6$ mm

Durchlaufgeschwindigkeit: $v = 1$ m/min

Ein-und Auslauf: Transportrollen

Walzenpaarung: Silikon-Silikon Härte: unbekannt

Laminationsdurchführung:

Die Lamination wurde bei allen Versuchen im selben Ablauf durchgeführt. Die verwendeten Folien wurden für bessere Vergleichbarkeit alle in derselben Größe (A4-Format) zur Verfügung gestellt. Für die fehlerfreie Lamination einzelner A4-Bögen werden zwei Personen benötigt. Während Person 1 das, den Laminierwalzen abgewandte, Ende der Folie in einem beliebigen Winkel nach oben hält, steuert Person 2 die Ausrichtung des Substrates.

Im ersten Schritt wird die Transferfolie komplett vom Releaseliner befreit. Eine Seite der Folie auf das Substrat aufgesetzt. Dabei muss besonders darauf geachtet werden, sogenannte Winkelfehler zu vermeiden. Diese werden durch ein seitliches Versetzen der zu laminierenden Folie verursacht.

Ist die Folie fehlerfrei an einer Seite appliziert, muss das Substrat über das Einlaufsystem zwischen die Laminierwalzen geschoben werden. Anbieter Fetzl benutzte ein Rolleneinlauf mit Transportfolie. Die anderen Anbieter verwendeten jeweils unterschiedlich starke Transportsubstrate, auf einem Rollen- beziehungsweise Tischeinlaufsystem.

Der prinzipielle Aufbau eines Rollenlaminators wird in „Aufbau und Funktionsweise“ (Kapitel 3.3.1) dargestellt.

Der Vorschub der Walzen, der auch über die Durchlaufgeschwindigkeit beschrieben wird, wurde von den Anbietern zwischen 0,5 und 1 m/min gewählt. Die Walzenpaarungen waren ebenfalls verschieden. Während zwei von drei Anbietern eine reine Silikonpaarung unterschiedlicher Härten bevorzugten, verwendete der dritte Anbieter eine Silikon-Edelstahl-Kombination. Substrat und Laminat werden aufgrund der Spaltbreiteneinstellung von 0,6 mm bei Heranführen zwischen die Walzen gezogen. Die Spaltbreite muss für eine erfolgreiche Lamination immer etwas geringer als die Gesamtstärke des Verbunds bemessen werden. Dadurch wird ein definierter Andruck der Walzen an das Substrat erreicht. Dieser wird durch den voreingestellten Anpressdruck verstärkt.

Die Laminationstemperatur wurde von allen Anbietern unterschiedlich gewählt. Sie variierte von Raumtemperatur (25 °C) bis 50 °C.

Nach erfolgter Lamination der Transferklebefolie wurde von dieser der zweite Releaseliner entfernt und die Deckfolie in derselben Abfolge appliziert.

Auswertung:

Auswertung des Ergebnisses:

Die Laminationsergebnisse waren zufriedenstellend bis sehr gut. Die Unterschiede in der Qualität des Ergebnisses können durch verschiedene Ansätze erklärt werden.

Bei höheren Temperaturen verbesserte sich die Fließfähigkeit des Klebstoffes. Durch die Wärmezufuhr wird die innere Energie des Systems erhöht. Die Atome und Moleküle bewegen sich stärker und schneller, wodurch die Bindungskraft der vorhandenen intermolekularen Bindungen geringer wird und der Klebstoff an Viskosität verliert. Partikel können somit besser im Klebstoff eingeschlossen werden und es entstehen weniger Lufteinschlüsse.

Die Annahme, die geringere Durchlaufgeschwindigkeit sei für das bessere Ergebnis verantwortlich, liegt nah. Dies wurde aber vom Anbieter selbst widerlegt, da auch bei höheren Geschwindigkeiten sehr gute Ergebnisse zu erzielen sind.

Einen besonderen Einfluss auf das Ergebnis besitzt der Zustand der Substratoberfläche. Auf Substraten, die sich längere Zeit ungeschützt an der Luft befinden, oder vor der Lamination anderen Verunreinigungen wie beispielsweise Fingerabdrücken ausgesetzt werden, können Klebstoffe schlechter benetzen.

Die Walzenpaarung kann das Ergebnis ebenfalls beeinflussen. Aufgrund der deutlich geringeren Härte von Silikon gegenüber Edelstahl kann sich eine Walze dieser Beschichtung besser an die Folie anpassen. Aufliegende Partikel können die Oberfläche der Folie beschädigen.

Die Ablösegeschwindigkeit des Releaseliners ist entscheidend für die Homogenität der Klebschicht. Wird ein Liner zu schnell vom Klebstoff entfernt, kann sich dieser kurz vom Substrat lösen und Blasen verursachen (Abbildung 4-8).

Eine weitere Einflussmöglichkeit ist die Spaltbreiteneinstellung. Bei Systemen, deren Seiten separat voneinander eingestellt werden, kann sich eine Spaltbreitendifferenz beider Seiten auf den Andruck auswirken. Dadurch kann die Folie schräg eingezogen werden, so dass ein Winkelfehler entsteht. Bei geringeren Differenzen bilden sich Lufteinschlüsse aufgrund des fehlenden Druckes auf die Folie. Dies ist bei einem Versuchsobjekt aufgetreten. Dieses Problem kann auch durch einseitig einstellbare Spalte entstehen, wenn an den Walzen eine zu hohe Lagetoleranz vorliegt.

Die wenigen entstandenen Lufteinschlüsse sind zum Einen durch einen falsch eingestellten Spalt der Laminierwalzen und zum Anderen auf eine erhöhte

4. Material und Methoden

Partikelbelastung der Umgebung begründet. Dies sind im Gegensatz zur Vakuumlamination gut lösbare Probleme.

Abbildung 4-5 zeigt die erfolgreiche Lamination der PEN-Folie „PENstick Flex“ auf die Transferklebefolie „CS9621T“.

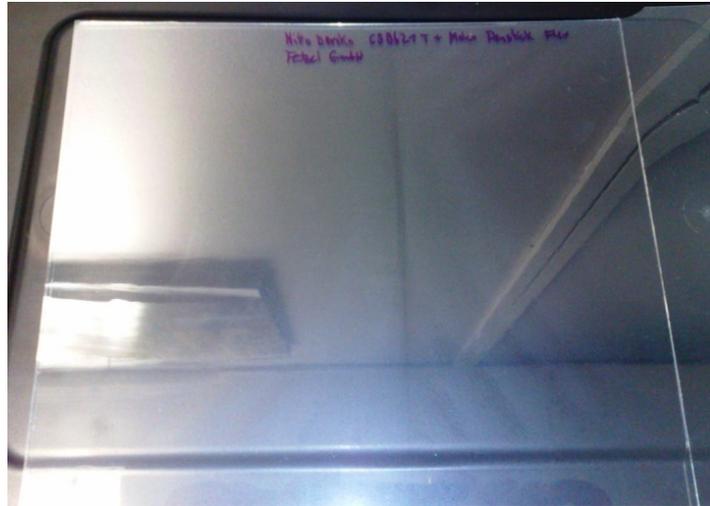


Abbildung 4-5: Laminationsergebnis einer erfolgreichen Rollenlamination (Transfer- & PEN-Folie); Abmessungen sichtbares, unteres Glassubstrat: 200 x 200 mm

Abbildung 4-6 zeigt einen partikelbedingten Lufteinschluss unter 10-facher Vergrößerung. Die Transferfolie konnte das Partikel nicht vollständig eibnen, sodass Luft ringförmig darum eingeschlossen wurde.



Abbildung 4-6: Partikeleinschluss in einer Transferklebefolie

Abbildung 4-7 zeigt ebenso ein Partikel und die Auswirkung auf die darüber liegenden Folien. Wie bei der Vakuumlamination wurde der Lufteinschluss, aufgrund der Steifigkeit der Auskoppelfolie großflächig auf diese übertragen.

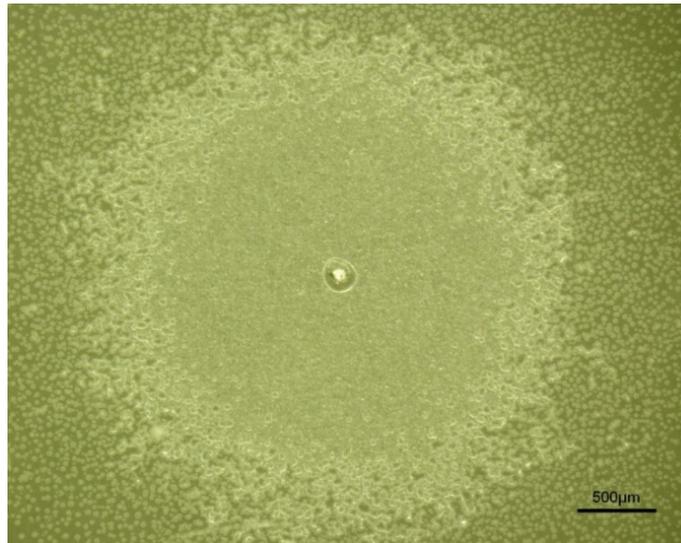


Abbildung 4-7: Partikeleinschluss mit Auswirkung auf die Deckfolie „Makrofol BL 6-2“

Abbildung 4-8 stellt, wie bereits erwähnt, die Blasenbildung in der Klebschicht aufgrund der zu hohen Ablösegeschwindigkeit dar.

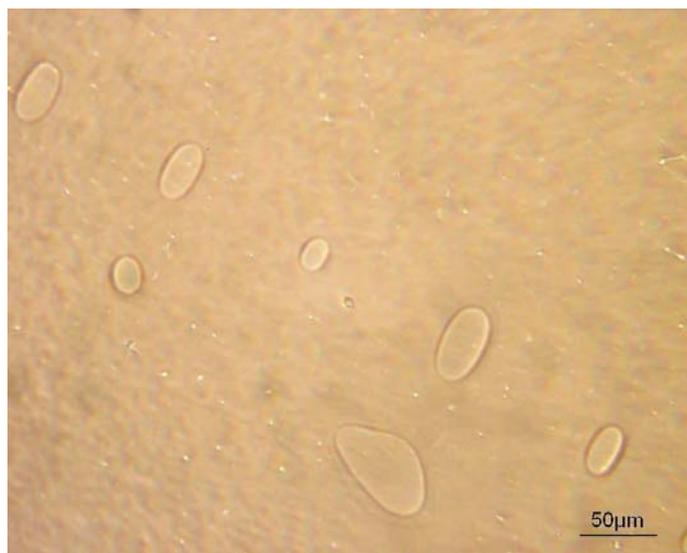


Abbildung 4-8: Veränderung der Klebschichtstruktur durch zu schnelles Abziehen des Releaseliners

4.3.2 Lamination von Glas auf Glas mittels einer beidseitigen Klebefolie

Ziel des Versuches:

Ziel des Versuches ist die Herstellung eines Glas-Glas-Verbunds, der mit Aluminium beschichtet wird. Anschließend sollen die beiden Glassubstrate unbeschädigt voneinander getrennt werden.

Vorbetrachtung:

In der neu angeschafften Cluster-Beschichtungsanlage „Sunicel 400 plus (CE)“ sollen zukünftig Substrate verschiedener Größen bearbeitet werden. Vorwiegend ist die Beschichtung von Substraten der Größe 470 x 370 x 0,7 mm (Gen2-Substrate) vorgesehen. Die Fertigung innerhalb der Cluster-Beschichtungsanlage ist auf diese Größe beschränkt. Eine Beschichtung kleinerer Substrate ist aufgrund dessen ohne weiteres nicht möglich. Im bisher einzigen Ansatz zur Lösung des Problems dient ein Gen2-Substrat als Träger für kleinere Substrate. Die meist genutzten kleineren Substrate sind ITO-beschichtete Displaygläser mit den Abmessungen 300 x 400 x 0,7 mm. Aufgrund der teuren Beschichtung sind sie für diesen Versuch ungeeignet. Ein unbeschichtetes Standardglassubstrat gleicher Größe kann stattdessen verwendet werden. Zum besseren Verständnis werden diese Glassubstrate im Folgenden als Displaygläser bezeichnet.

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, einen Glasverbund mittels einer Folie herzustellen. Haftklebstoffe mit Wiederablösefunktion bieten sich gut für diese Anwendung an. Die zwei von unterschiedlichen Unternehmen angebotenen und für das Fraunhofer IPMS Dresden in Frage kommenden Folien unterscheiden sich in ihrer Release- bzw. Wiederablösefunktion.

Die japanische Firma „*Nitto Denko*“ führt mit ihrem Produkt „Revalpha 3195“ eine zweiseitige Haftklebefolie, deren Releasefunktion durch einen thermisch deaktivierbaren Klebstoff realisiert wird. Diese Folie kann aufgrund ausgasenden Kohlenwasserstoffs vorerst nicht verwendet werden, da Reaktionen mit der Organik noch nicht untersucht wurden. Außerdem wird der Release-Effekt erst bei einer Temperatureinwirkung von 90 °C für die Dauer von mindestens einer Minute erzielt. Dadurch jedoch kann eine OLED irreparable Schäden davontragen.

Eine Alternative zu diesem Produkt bietet die doppelseitige Klebefolie „G-4107 ER/WS“ [A3] der Firma „*ATP-adhesive Systems*“. Diese ausschließlich druckempfindliche (PSA) Haftklebefolie besitzt unterschiedlich stark haftende Klebeflächen auf Acrylat-Basis. Die mit „ER“ bezeichnete Klebeseite ist laut Hersteller sehr gut rückstandsfrei wiederablösbar,

4. Material und Methoden

während die „WS“-Seite mit 3,2 N/cm nur teilweise Wiederablöseigenschaften zeigt [K6. S192]. Diese Folie ist aufgrund der besseren Eignung für diesen Versuch vorgesehen.

Durchführung:

Herstellung des Displayglases:

Das Displayglas kann mühelos aus einem Gen2-Substrat gefertigt werden. Für diesen Prozess wird ein sogenannter „Scriber“³² des Typs „LCD-450CNC“ der Firma „A.P.L. Industrial Co.,Ltd.“ verwendet. Mit dieser Anlage ist es möglich, das Gen2-Substrat an den entscheidenden Stellen anzuritzen und anschließend zu brechen. Das so entstehende Glas entspricht einem Displayglas mit den Abmessungen 300 x 400 x 0,7 mm. Gen2-Substrat und Displayglas müssen vor der Lamination mit einem Lösungsmittel gereinigt und mit Stickstoff abgeblasen werden.

Herstellung des Verbunds:

Die Lamination der Folie soll ganzflächig erfolgen. Für eine saubere Verbindung beider Glassubstrate muss die vorgesehene doppelseitige Klebefolie „G-4107 ER/WS“ zurechtgeschnitten werden, da sie für diesen Versuch mit der Hand auflaminiert wird. Das Handlaminationsgerät (Andrückroller aus Silikon) beschränkt mit einer Verarbeitungsbreite von 140 mm die Folienbreite. Um ein gleichmäßiges Bild zu erzeugen, werden vier ca. 100 x 300 mm breite Folienstreifen vorbereitet. Diese werden anschließend möglichst eng, aber nicht überlappend, mit dem Andrückroller auf das Gen2-Substrat laminiert. Die für die Displayglas vorgesehene Folienseite ist die weniger klebfähige ER-Seite mit einer Haftkraft von <0,4 N/cm [A3]. Dadurch kann das Displayglas im Nachhinein besser entfernt werden. Nach der Lamination der Klebestreifen wird das gereinigte Displayglas zentral (35 mm Kantenabstand) auf das Gen2-Substrat laminiert. Um die Bruchgefahr durch einen hohen Anpressdruck beim laminieren zu minimieren, wird das Displayglas sehr flach über dem Gen2-Substrat gehalten. Das Ergebnis der Lamination ist in Abbildung 4-9 zu sehen.

Der Glasverbund wird nach der Lamination erst im Vakuum und anschließend bei einer Beschichtung unter Vakuum und Temperatureinwirkung auf die Haltbarkeit erprobt. Nach erfolgter Bearbeitung kann das Displayglas vom Verbund getrennt werden. Dazu muss es an zwei Kanten vorsichtig, senkrecht nach oben gezogen werden. Anschließend erfolgt das Abziehen der Klebeschicht, optimalerweise rückstandsfrei, vom Gen2 Substrat.

³² Scriber: Ritz- oder Anreißgerät zum definierten trennen von Glassubstraten



Abbildung 4-9: „Glas auf Glas“-Lamination mit einer doppelseitigen Klebefolie

Untersuchung von Lufteinschlüssen im Vakuum :

Bei der Lamination der Glassubstrate aufeinander können Lufteinschlüsse entstehen, die zur Delamination der Substratgläser voneinander führen können. In einem Probeversuch werden vorerst verschiedene Transfer- und doppelseitige Klebefolien einseitig auf ein Gen2-Substrat laminiert. Der Schutzliner der anderen Klebeseite wird dazu nicht entfernt. Für den Versuch werden fünf Folien verschiedener Stärken (25 / 50 μm) und Haftkräften (2,8 - 8,4 N/cm) verwendet. Es werden bewusst Lufteinschlüsse durch eine erhöhte Partikelbelastung generiert, um deren Verhalten im Vakuum zu beobachten.

Auswertung:

Verhalten von Lufteinschlüssen Im Vakuum:

Die vorhandenen Lufteinschlüsse wurden nicht vergrößert. In der Kammer wurde ein atmosphärischer Druck von 5×10^{-7} hPa (0,5 nbar) erreicht, was in etwa dem Betriebsdruck während einer Beschichtung entspricht.

Ergebnisse der Beschichtungsversuche:

Der ganzflächig verklebte Glasverbund wurde zweimal evakuiert. Während des ersten Versuches kam es zu keinerlei Veränderung am Testobjekt. In der Wiederholung des Versuches zersplitterte das oben liegende Gen2-Substrat stark an den Rändern. Der atmosphärische Druck war in beiden Versuchen derselbe. Da der genaue Zeitpunkt der Zerstörung nicht festgestellt werden konnte, kann daraus keine logische Erklärung gezogen werden.

Aufgrund dessen wurde zunächst ein Verbund laminiert, bei dem die Klebefolie nicht ganzflächig, sondern in drei Streifen über die komplette Länge mit je 4 cm Breite aufgebracht wurde. Hintergrund dieser Klebestreifenanordnung war die somit vereinfachte Trennen beider Gläser voneinander. Das Displayglas delaminierte im Vakuum komplett. Dies ist auf die geringere Fläche der Klebefolie und damit verbundenen Haftkraft zurückzuführen. Die Summe der vom Vakuum ausgeübten Zugkraft und der Erdanziehungskraft auf das nach unten hängende Glassubstrat haben vermutlich die Haftkraft der Folie überschritten.

Die dritte Verklebung wurde erneut ganzflächig realisiert, um das Ergebnis des ersten Versuches zu überprüfen. Bei der Evakuierung auf 1×10^{-7} hPa (0,1 nbar) zeigte sich keinerlei Veränderung am Verbund. Folglich wurde das Substrat ganzflächig mit voreingestellten 1200 Å (120 nm) Aluminium bedampft. Die höchste Temperaturbelastung in der OLED-Herstellung tritt beim Beschichten von Metallen auf. Aus diesem Grund wurde Aluminium aufgebracht, um das Verhalten bei maximaler Temperaturbelastung zu untersuchen. Es können laut Anlagenhersteller Temperaturen bis max. 70 °C auf der Substratoberfläche (Displayglas) erreicht werden. Regulär herrschen an dieser Stelle ca. 30 - 40 °C. Im Versuch platze nach der Beschichtung das komplette Displayglas vom Gen2-Substrat ab. Anhang 2 [A2] belegt die erfolgreiche Beschichtung mit einer Schichtdicke von 124 nm. Ursache und genauer Zeitpunkt des Absplitters können nachhaltig nicht mehr festgestellt werden.

Ein letzter Versuch sollte Klarheit über die vorherrschende Temperatur am Substrat und dem eventuellen Zeitpunkt einer Beschädigung des Substrates bringen. Dazu wurden zwei Glas-Glas-Verbunde mit ganzflächiger Verklebung vorbereitet. Auf diese wurden jeweils drei Thermolabels³³ an verschiedene Stellen aufgebracht, die den Temperaturmessbereich von 37 bis 65 °C abdecken. Die Beschichtung wurde durchgehend beobachtet. Es traten keinerlei Komplikationen an beiden Substraten auf, wodurch die Ergebnisse der ersten Versuche nicht bestätigt werden konnten. Die Temperatur auf der Substratoberfläche lag unterhalb 37 °C, wie es auf allen sechs Thermolabels zu erkennen ist. Bei allen Beschichtungsversuchen konnte ein Ausgasen der Folie festgestellt werden.

³³ Thermolabel: selbstklebender Temperaturmessstreifen, bei dem die vorherrschende Temperatur über eine in verschiedene Abschnitte chemisch reagierende Fläche festgestellt werden kann. Im Falle kritischer Temperaturen färbt sich die entsprechende Stelle schwarz. Dieser Prozess ist irreversibel.

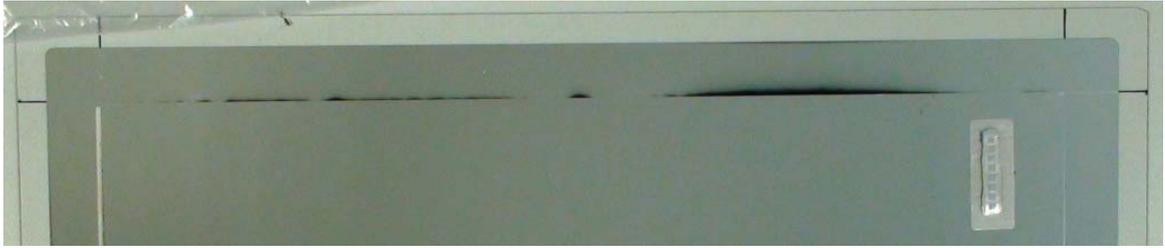


Abbildung 4-10: Beschichteter Verbund mit Ausgaserscheinungen (schwarze Bereiche); Länge des Glassubstrates: 470 mm

Der schwarze Bereich in Abbildung 4-10 zeigt die Auswirkung des Vakuums auf die Folie. Üblicherweise werden Folien nicht im Vakuum gelagert, in Folge dessen sie Gasmoleküle aus der Umgebung aufnehmen. Diese werden der Folie beim Evakuieren wieder entzogen. Die Folie ist von zwei gasundurchdringlichen Glassubstraten eingeschlossen, wodurch die Gase nur am Rand entweichen können. Die homogene Abscheidung des Aluminiums kann an diesen Stellen gestört werden, womit sich die schwarzen Bereiche an den Rändern erklären lassen.

Durch die geringe Anzahl an Beschichtungsversuchen können Gründe für die Delamination nur vermutet werden. Mögliche Einflüsse sind Haftungsverluste durch eine erhöhte Temperatur in Zusammenhang mit dem vorherrschenden Vakuum, Probleme bei der Handhabung des Verbunds oder ein zu starkes Ausgasen im Vakuum. Infolge der Nutzung eines Andrückrollers wurden vier Folienstreifen möglichst passgenau aneinander laminiert, um eine ganzflächige Lamination nachzubilden. Bei den ersten Versuchen gelang dies sehr gut, wie es in Abbildung 4-9 zu erkennen ist. Bei diesen Versuchen zerbrach der Verbund nach unbestimmter Zeit im Vakuum. Es wurde im Nachhinein festgestellt, dass bei den erfolgreich beschichteten Verbunden, ein kleiner Spalt (0,5 - 1 mm) zwischen den einzelnen Klebestreifen frei gelassen wurde. Es kann angenommen werden, dass die austretenden Gase, durch diese zusätzlichen Spalte besser aus dem Verbund entweichen konnten. Im Verbund wurde dadurch weniger Spannung erzeugt und somit womöglich die Delamination verhindert. Dies wirkt sich allerdings negativ auf die Automatisierung des Laminationsprozesses aus. Eventuelle Probleme beim Transport innerhalb der Anlage können nachhaltig nicht mehr festgestellt werden. Es waren zu diesem Zeitpunkt interne Transportprobleme der Anlage bekannt. Die Ursache des Bruchs beim ersten Verbund kann damit in Zusammenhang gebracht werden. Aus Kapazitätsgründen konnte die Wärmeeinwirkung unter Vakuum bisher noch nicht erprobt werden.

4. Material und Methoden

Ablösen des Substratglases:

Aufgrund der großflächigen Verklebung ist trotz der geringen Haftkraft der wiederablösbaren Klebseite erhöhte Vorsicht geboten. Das Ablösen sollte langsam geschehen, um das Zerschneiden einer der beiden Gläser zu vermeiden. Laut Hersteller kann die wiederablösbare Seite (ER) der Folie „G-4107 ER/WS“ rückstandsfrei entfernt werden. Im eigenen Versuch hingegen war immer ein leichter Schimmer auf dem Substratglas festzustellen. Dieser kann jedoch mit einem Lösemittel gut entfernt werden. Durch den 12 µm starken PET-Liner zwischen den Klebschichten besitzt die beidseitige Klebefolie eine höhere Stabilität als vergleichsweise dicke Transferklebefolien. Die stärker haftende Klebseite (WS) kann somit vom Trägerglas abgeschält werden. Abbildung 4-11 zeigt die Klebstoffrückstände in Form eines fettigen Schimmers (rechts). Die linke Seite dient als Referenz und ist weitestgehend sauber.

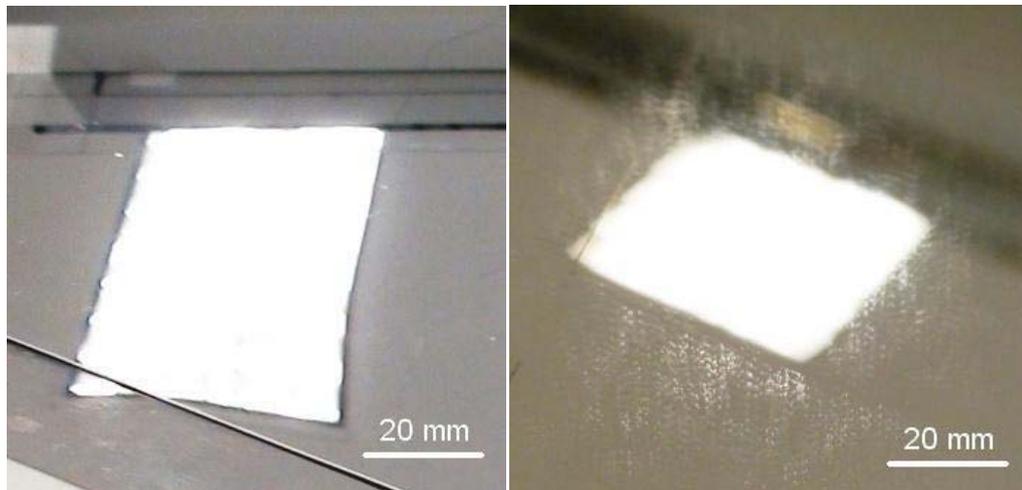


Abbildung 4-11: links: Rückstandsfreie Oberfläche; rechts: Rückstände nach Ablösen der Folie

4.3.3 Machbarkeitstest der Handlamination in der Glovebox

Zielstellung:

Ziel der Untersuchung ist es, Erkenntnisse über Durchführung und Schwierigkeiten bei der manuellen Lamination von Haftklebefolien in der Glovebox zu gewinnen.

Vorbetrachtung:

Grundlegende Untersuchungen, sowie erste projektbezogene Beschichtungen mit Folien erfordern die Lamination per Hand. Diese kann unter verschiedenen Umständen erfolgen, welche jeweils Vor- und Nachteile besitzen.

Das genaue Applizieren der Folien ist unter allen Bedingungen problematisch. Sie müssen ohne einen seitlichen Versatz aufgebracht werden. Durch nachhaltige Korrekturen können einerseits Winkelfehler entstehen. Zum anderen kann die Klebschicht während des Abziehens beschädigt werden. Dies kann bereits durch ein ruckartiges Entfernen der Schutzliner geschehen. Die Handlamination erfordert daher erhöhte Konzentration und Feinmotorik.

Im Servicebereich des Reinraums ist die Lamination relativ gut zu kontrollieren, da die Handhabung ohne Handschuhe erlaubt und die Arbeit im Team möglich ist. Nachteil des Servicebereiches ist die erhöhte Partikelbelastung. Im Weißbereich hingegen gestaltet sich die Lamination schwieriger, da durch die Handschuhpflicht die Handhabung eingeschränkt ist. Manche Aufgaben, wie die Lamination von Folien mit Barriereeigenschaften, erfordert die Bearbeitung in stickstoffhaltiger Atmosphäre. Dies ist lediglich in einer Glovebox möglich. Aufgrund der unflexiblen Armöffnungen und der mehrschichtigen Gumm wand zwischen Hand und Arbeitsmaterial wird die Handhabung der Folien noch stärker beeinträchtigt. Weiterhin erschwert die Schutzscheibe die Sicht. Es ist daher, wenn möglich, sehr zu empfehlen, einen Großteil der Arbeit außerhalb der Glovebox zu erledigen.

Tests auf verschiedenen Untergründen haben ergeben, dass die Lamination kleiner Folienstreifen bevorzugt auf gummierten- oder silikonbeschichteten Unterlagen zu bearbeiten sind. Dies verhindert ein Verrutschen während der Lamination.

Im Folgenden wird die passgenaue Lamination zweier Folien aufeinander beschrieben. Als Orientierungspunkte dienen aufgezeichnete Markierungslinien, die die Abmessungen der Deckfolien darstellen.

Durchführung:

Verwendete Materialien und Geräte:

Folien:

- a. Standard Overheadfolie
- b. Folie „tesa OCA“ der Firma „tesa ag“

Geräte:

- c. Silikonbeschichteter Andrückroller (Breite 85 mm; Radius: 27 mm)
- d. Anreißlineal und Skalpell

Lamination:

1. Es wird ein Folienverbund einer Overheadfolie (OHF) und Transferklebefolie „tesa OCA“ mit den Abmessungen 1,6 x 13,4 cm außerhalb der Glovebox laminiert. Der obere Liner der Transferklebefolie wird etwas länger geschnitten (0,5 – 1 cm), um ein leichteres Ablösen von der Klebschicht in der Glovebox zu ermöglichen.
2. Als Substratfolie dient ebenfalls eine Overheadfolie mit den Abmessungen 2 x 14 cm.
3. Auf dieses Substrat werden die Markierungslinien (Alignment) gezeichnet. Die Abstände zu den Rändern betragen idealerweise $a = b = 3$ mm und $c = d = 2$ mm (Abbildung 4-12).
4. Anschließend wird der Folienverbund aus (1) auf die Substratfolie aus (2) innerhalb der Glovebox laminiert. Dabei müssen die Markierungslinien möglichst optimal getroffen werden.
5. Nach der Lamination werden die Abweichungen der Abstände a, b, c und d unter dem Stereomikroskop ermittelt.

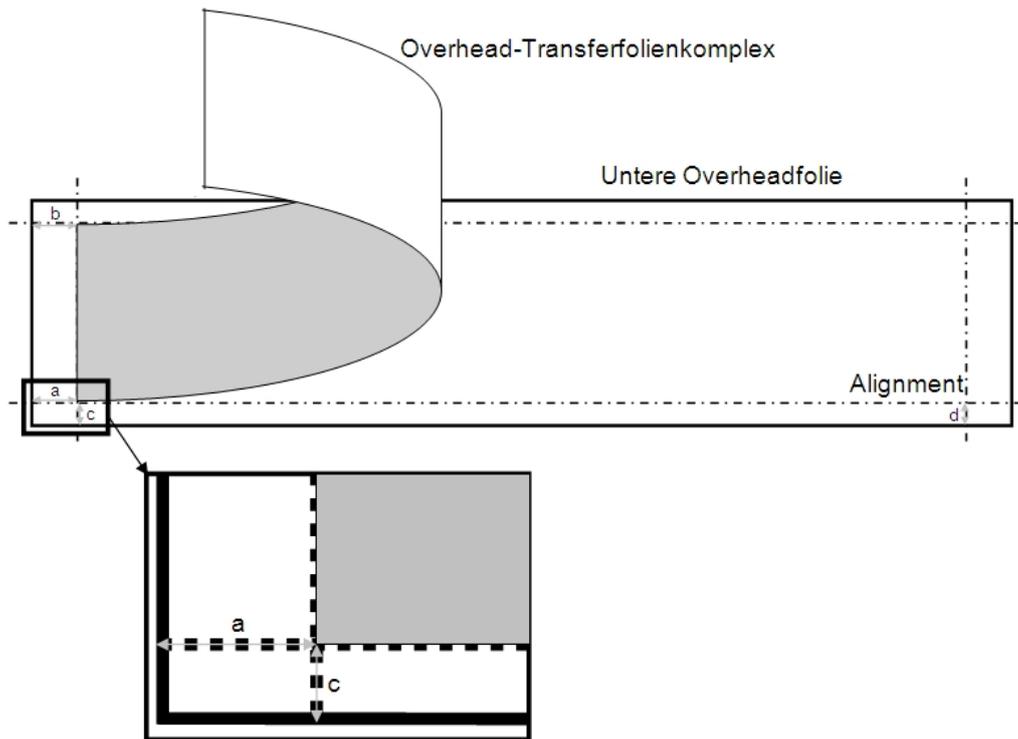


Abbildung 4-12: Versuchsaufbau mit Markierungslinien

Ergebnis:

Entgegen der Erwartungen ließ sich der Verbund relativ gut handhaben. Im Durchschnitt ließen sich die Folien auf ca. 0,30 mm genau aufsetzen, und auf ca. 1 mm genau abrollen. Dies ist bei einer Länge von 13,4 cm ein akzeptabler Wert. Tabelle 4-2 stellt Soll- und Istwerte des Versuches gegenüber.

Substratnr.	Abstand a in mm		Abstand b in mm		Abstand c in mm		Abstand d in mm	
	soll	ist	soll	ist	soll	ist	soll	ist
1	2,85	2,45	3,00	2,40	2,23	2,40	2,20	2,20
2	3,14	3,36	3,19	3,21	2,00	2,70	2,25	3,44
3	2,87	2,58	2,87	2,46	2,09	2,00	2,12	2,48
4	3,02	3,28	3,11	3,17	2,03	2,13	2,13	3,12
5	3,04	3,46	3,10	3,47	2,20	2,26	2,11	1,24
6	2,95	3,06	3,00	3,33	2,07	1,57	2,12	-0,67
Differenz	0,29		0,30		0,27		1,03	

Tabelle 4-2: Soll- und Ist-Werte der Laminationsgenauigkeit

Fehlerbetrachtung:

Beim Zuschnitt der Folien können Fehler aufgrund von Messungenauigkeiten unterlaufen. Des Weiteren war oft keine klar definierte Schnittkante der Folien unter dem Mikroskop zu erkennen. Dadurch konnten die Messlinien der optischen Messung nicht genau auf einem definierten Punkt platziert werden.

Optimierungsmöglichkeiten:

Als Untergrund für die Lamination wurde eine eigens angefertigte, gummierte Kunststoffplatte genutzt, die die Folie am wegrutschen hindern sollte. Dies gelang nur teilweise. Eine großflächigere Platte mit einer rauen Silikonbeschichtung würde das Ergebnis verbessern. Weiterhin wäre eine Laminierrolle mit möglichst kleinem Durchmesser für das Handling geeignet. Dadurch kann das Laminat länger festgehalten werden. Es ist zu empfehlen, den Versuch erneut mit automatisch zugeschnittenen Folien, die definierten Abmessungen unterliegen, zu wiederholen.

4.3.4 Herstellung verschiedener Folienverbunde zur Erprobung deren Rollbarkeit

Ziel des Versuches:

Es sollen Verbunde aus unterschiedlichen Folien und Klebstoffen in der Glovebox hergestellt werden. Nachfolgend soll die Rollbarkeit getestet werden, dies ist jedoch nicht mehr Teil der Arbeit.

Durchführung:

Für die Verklebung dienen einerseits Transferklebefolien mit und ohne Barriereigenschaften, und andererseits Flüssigklebstoff in flexibler und nicht-flexibler Form (beide mit Barrierewirkung). Als Folienmaterial dienen PET- und PEN-Folien, die allein und in Kombination verwendet werden sollen. Weiterhin wird die Machbarkeit des flüssigen Klebstoffauftrags des konventionellen Dispenserverfahrens getestet. Die fertig hergestellten Verbunde sollen von einer Fremdfirma auf deren Rollbarkeit geprüft werden.

Verwendete Materialien und Geräte:

Folien:

- a. Folie „Barrierefolie-PEN³⁴“ des „*Fraunhofer Polo-Verbunds*“
Dies ist eine 50 µm starke PEN-Folie mit Barrierebeschichtung
- b. Folie „Barrierefolie-PET³⁴“ des „*Fraunhofer Polo-Verbunds*“

³⁴ Dies ist eine fiktive Bezeichnung, da die Originalbezeichnung aus Gründen der Geheimhaltung nicht preisgegeben werden kann.

4. Material und Methoden

Diese Folie ist ebenso 50 µm stark, mit Barrierebeschichtung und aus PET.

Flüssigklebstoffe:

- a. Klebstoff „1429F“ der Firma „Addison Clear Wave“
Flexibler, UV-härtender Epoxidharzklebstoff mit Barrierewirkung.
- b. Klebstoff: „XNR5516ZLV“ der Firma „Nagase & Co. Ltd.“
Nicht-flexibler, UV-härtender Epoxidharzklebstoff mit Barrierewirkung

Haftklebefolie:

- a. Barriere-transferklebefolie³⁴ (BTF) der Firma „3M“
- b. Transferklebefolie „CS9621T“ der Firma „Nitto Denko“

Geräte:

- c. Silikonbeschichteter Andrückroller (Breite 85 mm; Radius: 27 mm)
- d. Anreißlineal und Skalpell

Materialkombinationen:

Nummer	Verbund	Verklebungsart	Anzahl
1	PET – XNR5516ZLV – PEN	Flüssigklebstoff	2
2	PET – XNR5516ZLV – PET	Flüssigklebstoff	2
3	PET – 1429F – PEN	Flüssigklebstoff	2
4	PET – 1429F – PET	Flüssigklebstoff	1
5	PET – CS9621T – PET	Transferklebefolie	2
6	PET – BTF – PET	Transferklebefolie	1
7	PEN – CS9621T – PEN	Transferklebefolie	2
8	PEN – BTF – PEN	Transferklebefolie	2
9	PET – CS9621T – PEN	Transferklebefolie	2
10	PET – BTF – PEN	Transferklebefolie	2
11	PEN (Referenz)	Ohne	2
12	PET (Referenz)	Ohne	2

Tabelle 4-3: Materialkombinationen der Lamination

Die Flüssigklebverbunde werden mit UV-Licht ausgehärtet. Die UV-Bestrahlung muss durch die PET-Folie hindurch vorgenommen werden, da PEN-Folien im Wellenlängenbereich 300 - 400 nm eine schlechte Transmission besitzen (Kapitel 2.4.2.3) Aus diesem Grund kann ein PEN-PEN-Verbund nicht mit einem UV härtenden Flüssigklebstoff verklebt werden, sondern wird lediglich in Kombination mit einer Haftklebefolie realisiert.

4. Material und Methoden

Zuschneiden:

Die Folien werden mittels Skalpell und Anreißlineal zugeschnitten. Es ist möglich, dass die Schnittkante durch den Druck der Klinge nicht mehr eben, sondern leicht in Andrückrichtung angehoben ist. Dadurch kann es zu Luftpneinschlüssen bei der Lamination kommen. Um dies zu verhindern, werden alle Folien etwas größer dimensioniert, so dass aus dem Verbund die nötige Foliengröße herausgetrennt werden kann.

Durch Präparation der Transferklebefolie werden Bereiche geschaffen, an denen der Schutzliner vom Klebstoff losgelöst ist. So soll der Liner in der Glovebox besser gefasst werden können.

Es werden folgende Foliengrößen vorbereitet:

PEN: Flüssigkleberanwendung: 20 x 140 mm; 4 Stück

Haftkleberanwendung: 30 x 160 mm; 12 Stück

PET: Flüssigkleberanwendung: 20 x 140 mm; 12 Stück

Haftkleberanwendung: 30 x 160 mm; 12 Stück

Transferklebefolie: 25 x 150 mm; 6 Stück (+ beidseitig 5mm Liner, zum Abziehen)

Transferfolienverklebung: Beispiel PET–Barrieretransferfolie–PEN (Substratnummer 10)

Die PET-Folie wird mit der unbeschichteten Seite auf den Laminieruntergrund gelegt und mit der Silikonhandwalze an diesen angedrückt. Durch den Gummiuntergrund rollt sich die Folie nicht zusammen. Im nächsten Schritt wird von der 3M-Barrieretransferklebefolie einer der beiden Schutzliner abgelöst und bis ca. 3 - 5 cm abgezogen. Nun kann die freigelegte Klebefläche an die Kante der darunter liegenden, barrierebeschichteten PET-Folie angesetzt werden. Liegen die Kanten beider Folien exakt übereinander, muss die Transferklebefolie ca. 0,5 cm angedrückt werden, um sie zu fixieren. Im Anschluss wird die Handwalze aufgesetzt und die Transferklebefolie während des gesamten Vorgangs auf Spannung gehalten, um Laminationsfehler zu vermeiden. Abbildung 4-13 verdeutlicht diesen Vorgang.

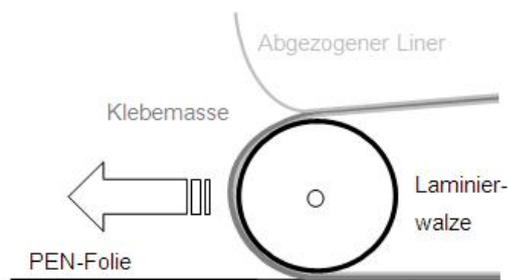


Abbildung 4-13: Handlamination der Transferklebefolie

4. Material und Methoden

Nach erfolgreichem Abrollen der Transferklebefolie wird der obere noch vorhandene Liner in einem möglichst flachen Winkel zum Substrat (120°-170°) abgezogen.

Im letzten Schritt wird die PEN-Folie mit der barrierebeschichteten Seite auf die Transferfolie laminiert. Sie wird ebenfalls erst an der Kante justiert, fixiert und unter Spannung abgerollt.

Nach erfolgreicher Lamination wird aus dem entstandenen 3 x 16 cm-Verbund ein 2 x 14 cm-Verbund herausgeschnitten, um die fehlerhaften Stellen am Aufsetzpunkt auszublenden.

Verklebung mittels Flüssigklebstoff: Beispiel PET - Nagase XNR5516ZLV –PEN (1)

Zu Beginn wird die PEN-Folie mit der unbeschichteten Seite auf ein Displayglas der Größe 200 x 200 mm gelegt. Daraufhin wird der Klebstoff „XNR5516ZLV“ mittels des Dispensers „GLT JR-2200N“ (*Gesellschaft für Löttechnik*) ganzflächig aufgebracht. Da die Applikation mit einem Dispenser grundlegend nicht geeignet ist, ein Substrat flächendeckend mit einer Flüssigkeit zu beschichten, werden zunächst nur Klebelinien frei Hand auf die PEN-Folie verteilt. Zu beachten ist, dass die PEN-Folie am Rand frei von Klebstoff bleiben sollte, da sich dieser während des applizierens der PET-Folie noch verteilt. Nach dem Auftrag des Klebstoffes wird dieser mit einer Rakel luftabschlussfrei geglättet. Ist die PEN-Folie vollständig vom Klebstoff benetzt, kann die PET-Folie mit der barrierebeschichteten Seite auf den Klebstoff appliziert werden. Dazu muss sie an der vorderen Kante des PEN-Klebstoff-Verbunds angehalten und nach Möglichkeit im Stile von Abbildung 4-13 abgerollt werden, um das Entstehen von Luftteinschlüssen zu vermeiden. Aufgrund der Viskosität des Klebstoffes verteilt sich dieser idealerweise bis zum Rand der Folien.

Anschließend wird der komplette Verbund mit einem Reinigungstuch vorsichtig von überflüssigem Klebstoff befreit. Es folgt die Aushärtung des Klebstoffes unter UV-Strahlung. Dazu wird der Verbund einer Strahlung der Wellenlänge von 365 nm für eine Dauer von 4 Minuten ausgesetzt. Danach ist der Klebstoff vollständig ausgehärtet. Zu beachten ist, dass der Verbund mit der PET-Folie der UV-Quelle zugewandt ist, um eine vollständige Aushärtung zu gewährleisten.

Auswertung:

Transferfolienverklebung:

Die Lamination innerhalb der Glovebox brachte, wie erwartet, Schwierigkeiten mit sich. Im Kapitel 4.3.3. werden diese genauer beschrieben. Die Releaseliner können nur an den

4. Material und Methoden

präparierten Stellen entfernt werden. Ein ausreichend präzises Laminieren der Folien ist mit größerer Dimensionierung (16 cm anstatt 14 cm Länge) möglich. Als problematisch zu bewerten ist dagegen die Anwesenheit größerer Partikel ($>10\ \mu\text{m}$) in der Glovebox. Die verwendeten Folien sind meist statisch aufgeladen, wodurch umher schwebende Partikel angezogen werden können. Im Verbund können Partikel im μm -Bereich Lufteinschlüsse generieren (siehe Kapitel 4.2). Dieses Problem könnte minimiert werden, indem einerseits die Querkontamination durch andere Prozesse vermieden, und andererseits eine Antistatikeinrichtung zur Entladung der Folien installiert wird.

Weitaus schwerwiegendere Defekte entstehen durch die bereits beschriebenen Winkelfehler. Abbildung 4-14 zeigt das Ergebnis eines solchen Fehlers. Bei dem Versuch, eine schief laminierte Folie wiederabzuziehen, wird die dazwischen liegende Klebstoffschicht mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit zerrissen, da deren Stärke in der Regel nur 25 – 50 μm beträgt. Ein unbeabsichtigtes Berühren der Folien ist daher zu vermeiden.

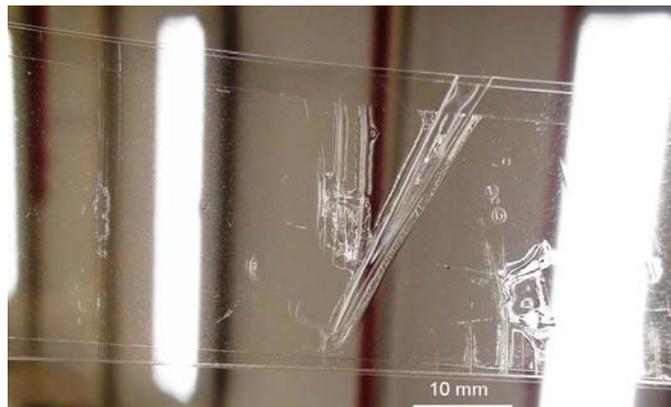


Abbildung 4-14: Auswirkung eines Winkelfehlers (seitlicher Versatz der Folie)

Verklebung mit Flüssigklebstoff:

Die ganzflächige Verklebung mit Flüssigklebstoffen ist deutlich zeitaufwändiger gegenüber der Verklebung mit Transferklebefolien. Weiterhin ist die Verarbeitung sehr viel unsauberer. Eine homogene Klebschicht ist mit diesem Verfahren, durch das Verstreichen des Klebstoffes mit einer Rakel, nicht zu realisieren.

Dennoch verspricht die Flüssigverklebung einen Vorteil. Aufliegende Partikel werden von dem Klebstoff umschlossen und führen dadurch nicht zu Lufteinschlüssen.

Die in Abbildung 4-15 zu sehenden Lufteinschlüsse sind bedingt durch die inhomogene Klebschichtdicke und die ungleichmäßige Folienapplikation per Hand. Lufteinschlüsse können so nicht vermieden werden.



Abbildung 4-15: Lufteinschlüsse bei ganzflächigem Flüssigkleberauftrag mit einem Dispenser

Eine Lösungsmöglichkeit bietet ein reproduzierbarer, automatisierter Vorgang. Mit den derzeit verfügbaren Mitteln ist ein Klebstoffauftrag über Siebdruck denkbar. Die damit verbundene Problematik liegt in der umgebenden Atmosphäre des Siebdruckers. Aufgabenstellungen, wie beispielsweise die Verkapselung, fordern eine Bearbeitung in reiner Stickstoffatmosphäre, wie sie bisher nur in einer Glovebox möglich ist. Der Siebdrucker befindet sich im Weißbereich, außerhalb einer Glovebox. Für die Verkapselung aktiver OLED-Flächen müsste eine Vorverkapselung aufgebracht werden, die Wasser und Sauerstoff bis zur Folienverkapselung mit Flüssigklebstoff vor dem Eindringen in den OLED-Stack hindern soll.

Zusammenfassung:

Die Handverklebung mittels Transferklebefolien ist sauberer, schneller und homogener, als die Verklebung über Flüssigklebstoffe. Die Auswertung des Rollbarkeitstests ist noch nicht beendet und kann daher nicht beurteilt werden.

4.3.5 Folienverkapselung auf Glassubstraten

Zielstellung:

Es ist die Degradation eines Kalziumstacks als OLED-Ersatz mit verschiedenen Verkapselungsvarianten zu untersuchen.

Vorbetrachtung:

Als Referenz wird eine konventionelle OLED-Verkapselung genutzt. Der O_2/H_2O -empfindliche Kalziumstack, der die Degradation einer OLED imitieren soll, wird vorerst mit einer Dünnschichtverkapselung (DSV) versehen. Zusätzlich soll über diese Vorverkapselung eine Folienverkapselung realisiert werden. Die dafür genutzten Barrierefolien sollen einerseits mit einer Transferklebeschicht mit Barrierewirkung und andererseits mittels Flüssigklebstoff mit Barriereeigenschaft verklebt werden. Daraufhin sollen die Ergebnisse der Degradation gegenübergestellt und miteinander verglichen werden.

4. Material und Methoden

Begriff Degradation:

Die Degradation beschreibt in diesem Fall das Voranschreiten der Oxidation des Kalziums. Diese wird durch die Ausbildung wachsender, transparenter Flächen sichtbar.

Funktion und Aufbau der Dünnschichtverkapselung:

Die Dünnschicht-Vorverkapselung ist notwendig, um den empfindlichen Stack bis zur abschließenden Folienverkapselung vor Sauerstoff- und Wassermolekülen zu schützen. Zurzeit werden die Testverkapselungen in der Glovebox in stickstoffhaltiger Atmosphäre durchgeführt. Zukünftig ist aber die Folienverkapselung am Laminator vorgesehen, der unter normaler Atmosphäre stattfinden wird. Der kurze Zeitraum zwischen dem Ausschleusen aus der Beschichtungsanlage bis zur Rollenlamination der Verkapselungsfolie kann einen negativen Einfluss auf die Schichtqualität des Kalzium-Stacks (zukünftig OLED) haben, da eine erhöhte Partikelbelastung und sauerstoffhaltige Atmosphäre vorliegt und zur Degradation des Stackes führen kann. Dies soll die Dünnschichtverkapselung verhindern.

Die Vorverkapselung wird über das abwechselnde Bedampfen einer Siliziumnitrid- (Si_xN_y) und Interlayerschicht realisiert. Die Si_xN_y -Schicht verhindert das Eindringen der O_2 - und H_2O - Ionen. Der Interlayer sorgt für eine Glättung und mechanischen Entkopplung der Si_xN_y -Schichten. Das Pinholewachstum³⁵ in der Si_xN_y -Schicht soll somit verlangsamt werden. Je nach Anwendung und Anforderung kann der Dünnschichtstack unterschiedlich dick gestaltet werden, so dass er einige 100 nm betragen kann.

Durchführung:

Varianten der Folienverkapselung:

Während die Verkapselung über Haftklebefolien ganzflächig vorgenommen werden muss, kann die Flüssigkleberverkapselung als Randverklebung realisiert werden. Dies spart Materialkosten, da die Flüssigkleber äußerst teuer sind.

Verwendete Materialien und Geräte:

Barrierefolien:

- a. Folie „Typ A³⁴“ der Firma „Vitex“
- b. Folie „Typ B³⁴“ der Firma „3M“ (50µm PET-Folie mit Beschichtung)
- c. Folie „Typ C³⁴“ der Firma „3M“ (125µm PET-Folie mit Beschichtung)

³⁵ Pinholewachstum: Dieser Begriff beschreibt die vertikale Ausbreitung eines Pinholes durch das ununterbrochene Aufdampfen einer Schicht.

4. Material und Methoden

Transferklebefolie:

Barriere-transferklebefolie³⁴ (BTF) der Firma „3M“ (25µm - Klebstoffbasis nicht bekannt)

Flüssigklebstoffe:

- a. Klebstoff „1429F“ der Firma „Addison Clear Wave“
- b. Klebstoff „XNR5516ZLV“ der Firma „Nagase & Co. Ltd.“

Geräte:

- a. Silikonbeschichteter Andrückroller (Breite 85 mm; Radius: 27 mm)
- b. Anreißlineal und Skalpell

Materialkombinationen:

Substratnummer (Bezeichnung)	Klebstoff	Folie
12	3M BTF	3M Typ C
13	3M BTF	3M Typ B
19	1429F	3M Typ C
20	XNR5516ZLV	3M Typ C
26	1429F	3M Typ B
27	XNR5516ZLV	3M Typ B
33	1429F	Typ A
34	XNR5516ZLV	Typ A
reine DSV1	Nicht vorhanden	Nicht vorhanden
reine DSV2	Nicht vorhanden	Nicht vorhanden

Tabelle 4-4: Substratbezeichnungen und -beschichtungen (Folienverkapselung auf Glassubstraten)

Vorbereitung der Folien:

Die Folien wurden auf das Maß 27 x 35 mm zurechtgeschnitten und zwei mal ca. vier Stunden bei 70 °C unter Einfluss von Vakuum ausgeheizt. Bis zur Verwendung wurden sie unter stickstoffhaltiger Atmosphäre aufbewahrt.

Verkapselung:

Die einzelnen Substrate liegen im Nutzen in Form eines 200 x 200 mm großen Substrates vor. Für die Haftklebberverkapselung wird wie gewohnt zuerst die Transferklebefolie und anschließend die jeweilige Barrierefolie aufgebracht. Die UV-härtenden Epoxidflüssigklebstoffe werden über den Dispenser „GLT JR-2200N“ aufgetragen. Die

4. Material und Methoden

Randverkapselung wird hierbei als durchgängige Klebelinie vorgenommen. Anschließend wird die Barrierefolie mit einer Vakuumpinzette fixiert, der untere Schutzliner entfernt, und letztlich auf der Klebenaht abgelegt und leicht angedrückt. Sind alle Folien platziert, kann das Substrat unter vier minütiger Einwirkung von UV-Licht (365 nm) ausgehärtet werden.

Auswertung:

Ergebnis der Verkapselung:

Die ganzflächige Lamination der Barrierefolien war weitestgehend erfolgreich. Es muss nur beachtet werden, dass die Transferklebefolie etwas größer als die zu verkapselnde Fläche (ca. 5 mm an jeder Seite) dimensioniert werden muss. Beim Abziehen des Releaseliners per Hand kann sich die darunterliegende Klebmasse leicht zusammenrollen, wodurch die nutzbare Fläche verkleinert wird.

Während der Randverkapselung traten schwerwiegendere Probleme auf. Die verwendeten Barrierefolien waren durch die mechanische Belastung des Zuschneidens und die thermische Belastung im Vakuumofen teilweise leicht gewellt. Dies hatte zur Folge, dass sich die Folie nach dem Absetzen auf das Substrat leicht von diesem abhob. Dadurch wurde die noch nicht ausgehärtete Klebelinie in ihrer Homogenität gestört. Nach dem Aushärten konnte festgestellt werden, dass in Folge dessen vier von sechs Verkapselungen undicht wurden. Die acht Substrate wurden anschließend mit dem in Kapitel 4.3.2 genannten Scriber vereinzelt.

Die Barrierefolien könnten mit einem einseitigen, transparenten und schmalen Klebeband an zwei Stellen fixiert werden, nachdem sie mit der Vakuumpinzette abgesetzt werden, um das Abheben zu vermeiden. Falls das Klebeband UV-blockend ist, muss das Substrat nach dem Aushärten und Ablösen des Klebebandes erneut bestrahlt werden.

Auswertung der Degradation:

Die Abbildung 4-18 und Abbildung 4-19 zeigen zwei von vier erfolgreichen Laminationen. Als Referenz dient eine ausschließlich dünnschichtverkapselte Variante (Abbildung 4-17). Die Aufnahmen zeigen den Stack 45 Minuten (Bild a.), 2 Tage (Bild b.), 10 Tage (Bild c.) und 18 Tage (Bild d.) nach der Verkapselung. Die unterschiedlichen Farben in der Darstellung beruhen auf verschiedenen Beleuchtungsvarianten. Während die ersten beiden Aufnahmen bei Auflicht festgehalten wurden, sind die anderen bei Durchlicht entstanden. Über das Durchlicht wird die reine Degradation sichtbar gemacht, während mit dem Auflicht auch Beschädigungen der Folie wiedergegeben werden können, weswegen diese Variante für die Charakterisierung der Degradation weniger gut geeignet

4. Material und Methoden

ist. Weiterhin werden innere Reflektionen im optischen System des Mikroskops abgebildet, die bei Durchlicht nicht auftreten.

Abbildung 4-16 zeigt den Aufbau des Stacks. Es sind zwei verschiedene Varianten zu sehen. Die reine Dünnschichtverkapselung wurde in Variante a realisiert. Die folienverkapselten Stacks in Variante b. Die rot gekennzeichnete Dünnschichtverkapselung schützt in Variante a den kompletten darunterliegenden Schichtaufbau aus Organik und Kalzium. In Variante b wird lediglich die Organik komplett abgedeckt. Die Kalziumschicht liegt teilweise frei.

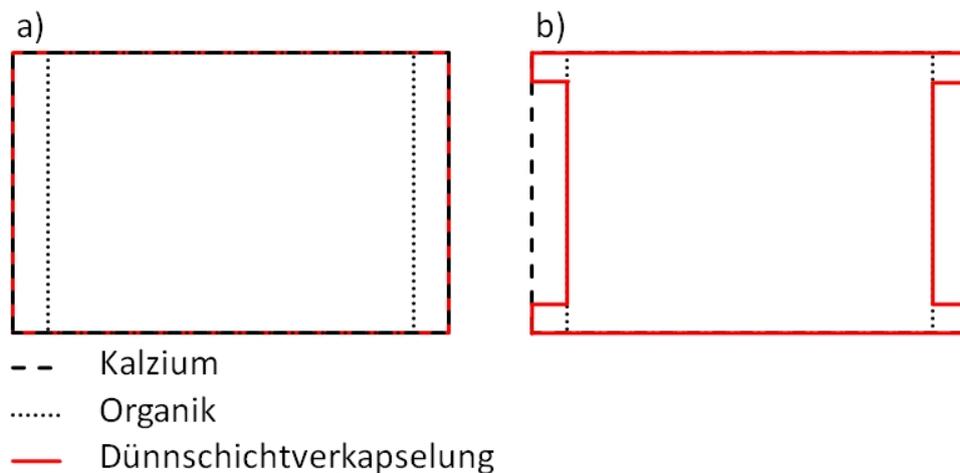


Abbildung 4-16: Aufbau des dünn- und folienverkapselten Stacks

Die Degradation in Abbildung 4-17 ist sehr gut zu erkennen. Bereits 45 Minuten nach dem Ausschleusen aus stickstoffhaltiger Atmosphäre wird diese sichtbar. Der obere, schnell degradierte, Rand ist durch einen Versatz der Dünnschichtmaske begründet. Dort war kein Schutz durch eine Dünnschichtverkapselung gegeben. Die Ränder links und rechts sind dagegen nur sehr gering degradiert. An diesen Stellen bedeckt die Dünnschichtverkapselung lediglich Kalzium, die Organik ist dort nicht vorhanden. Diese Art der Degradation ist in Vorversuchen ohne Folienverkapselung bereits beobachtet worden. Der Einfluss der Organik wird dadurch sehr gut deutlich. Sie beschleunigt die Degradation von Kalzium.

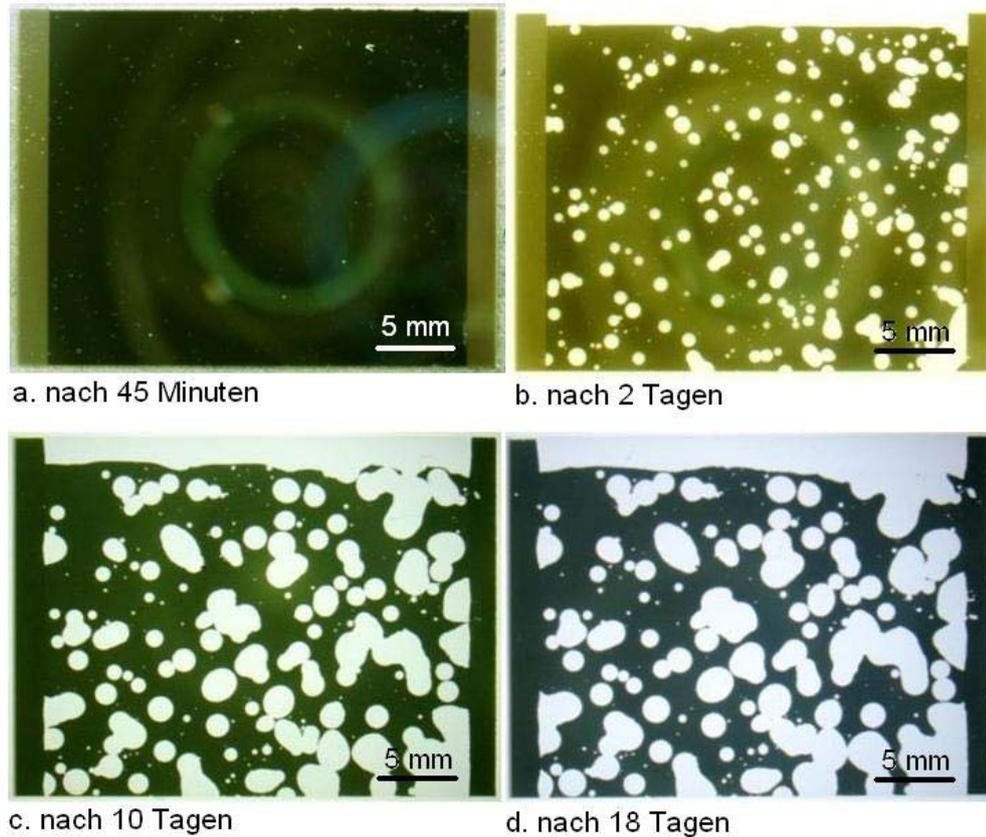


Abbildung 4-17: Degradation eines rein dünn­schicht­verkapselten Stacks

Abbildung 4-18 hingegen zeigt ein anderes Bild der Degradation. Hierfür wurde die Dünn­schicht­verkapselung der Variante b aus Abbildung 4-16 in Kombination mit einer ganz­flächigen Transfer­folien­verkapselung verwendet. Das Substrat, 18 Tage nach der Verkapselung verdeutlicht gut den Einfluss der DSV. Die Ränder des Substrates (Abbildung 4-18 a. rechts und links) weisen eine fortgeschrittene Oxidation der Kalzium­schicht auf. Diese ist nur durch die Folie geschützt. Die Dünn­schicht­verkapselung, die die restliche Fläche bedeckt, bietet noch ausreichend Schutz vor weiterer Oxidation. Bisher wurden noch keine besseren Ergebnisse einer flexiblen Verkapselung beobachtet. Dennoch ist zu erwarten, dass die Degradation der inneren Fläche schneller eintritt, als bei einer konventionellen Glas­verkapselung. Die angegebenen Permeationswerte der Folien entsprechen noch nicht denen des Glases. Sie liegen zurzeit um den Faktor 100 – 1000 darüber.

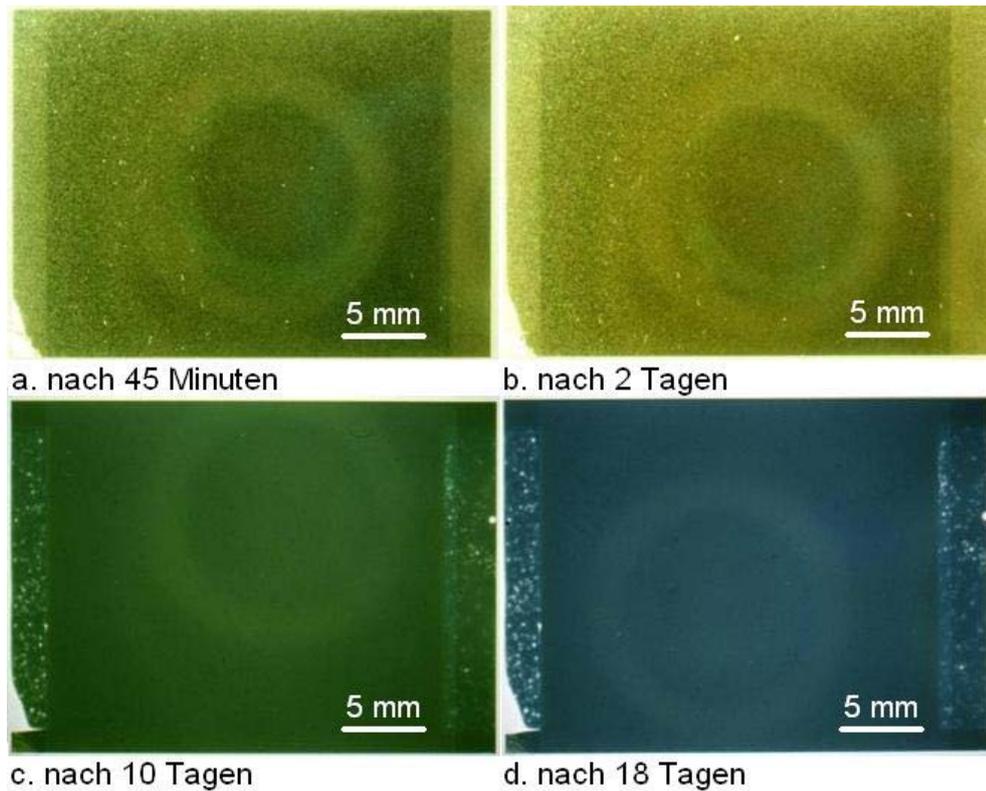


Abbildung 4-18: Degradation eines transferklebefolienverkapselten Stacks (Vollflächenverkapselung)

Das Ergebnis der randverkapselten Flüssigklebervariante wird in Abbildung 4-19 deutlich. Die vielen hellen Flecken im Substratinneren sind auf Kratzer bzw. Schichtspannungen zurückzuführen. Darauf deutet die Vorzugsrichtung der kratzerartigen hellen Flächen hin. In den unteren beiden Bildern wird der Einfluss des Klebstoffes sichtbar. Die undefiniert dick aufgetragene Klebstoffnaht wurde vor dem Aushärten auf die aktive Fläche gedrückt. Die Auswirkungen des Klebstoffes auf die Degradation sind unterschiedlich. An den Rändern rechts und links schützt dieser das Kalzium vor der Degradation. Am oberen Rand hingegen scheint die Degradation dadurch beschleunigt zu werden. Aufgrund der geringen Anzahl erfolgreich verkapselter Substrate können keine weiteren Bewertungen des Klebstoffeinflusses gemacht werden. Dieser Einfluss muss durch weitere Versuche unter definierten Bedingungen untersucht werden.

Neben der Degradation wird ein weiteres Problem deutlich: die Folien können nicht vollkommen plan auf das Substrat aufgebracht werden. Auf dem unteren linken Bild der Abbildung 4-19 sind Interferenzen des reflektierten Lichts zu erkennen. Dies lässt darauf schließen, dass die Folie gewellt auf dem Substrat aufliegt. Für Display-Anwendungen ist dieser Effekt unerwünscht.

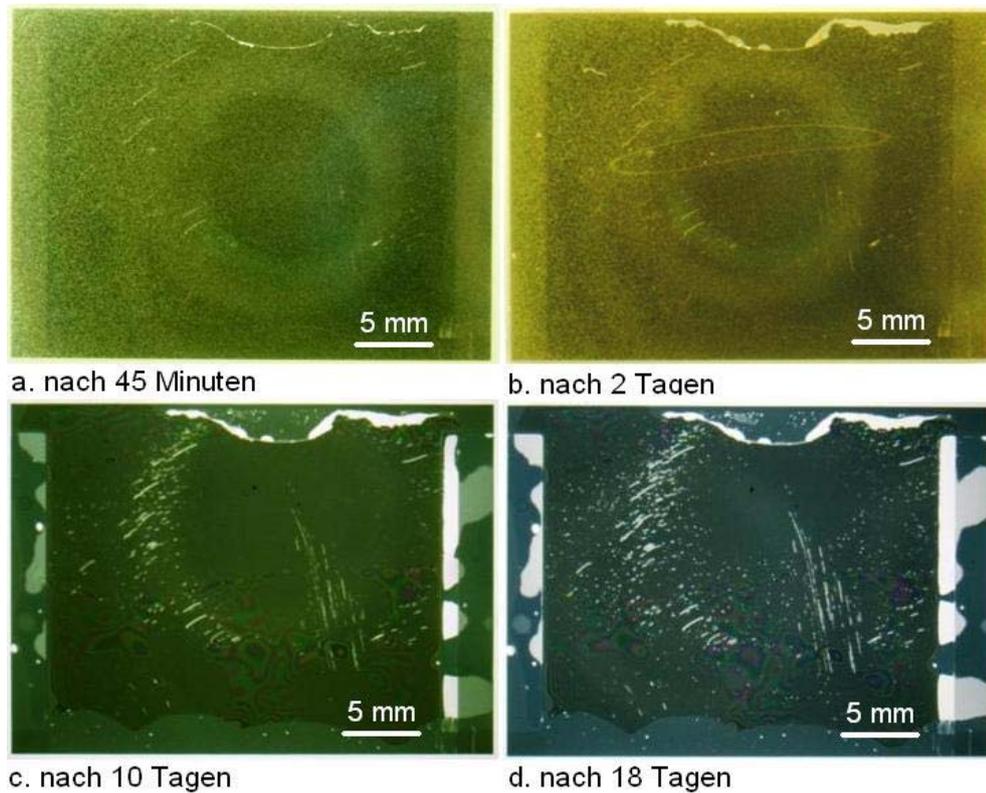


Abbildung 4-19: Degradation eines flüssigverkapselten Stacks (Randverkapselung)

Zusammenfassung:

Die Degradation aufgrund dieser Charakterisierung führt zu folgendem Ergebnis: die ganzflächige Transferfolienverkapselung bietet einen besseren Schutz vor Wasser- und Sauerstoffmolekülen als die randverkapselfte Flüssigklebervariante. Gründe dafür sind:

- ein erschwertes Aufbringen der Barrierefolie bei der Randverkapselung, wodurch der Klebstoff undefiniert dick und breit gedrückt wird, unter Umständen sogar die Klebelinie unterbrochen wird,
- der Einfluss des Flüssigklebstoffes auf die Degradation,
- die Vollflächenverkapselung bietet homogenen Schutz.

4.3.6 „Folie auf Folie“ - Lamination

Ziel der Versuches:

Die Flexibilisierung der OLEDs erfordert eine Reihe von Voruntersuchungen. Ziel dieses Versuches ist die Erprobung zweier vollflächiger Verkapselungsvarianten hinsichtlich der Machbarkeit der einzelnen Verfahren. Auf der einen Seite soll eine Transferklebefolie, auf der anderen Seite ein Flüssigklebstoff als Gegenstand der Verkapselung dienen.

Vorbetrachtung:

Gegenstand der Verkapselung ist ein Stack, der einen realen, organischen Dünnschichtaufbau imitiert. Dieser Stack wird auf eine Barrierefolie abgeschieden, die wiederum auf einem Siliziumwafer aufgebracht ist, um in der entsprechenden Anlage verarbeitet werden zu können. Über dem Stack befindet sich eine Dünnschichtverkapselung, welche wie bereits beschrieben als kurzzeitiger Schutz bis zur Vollendung der Folienverkapselung dienen soll. Diese wird anschließend mit einer Barrierefolie und den zwei verschiedenen, eben genannten, Klebsystemen realisiert.

Durchführung:

Aufbau der Anordnung:

Für das Projekt werden 6“ Standardsiliziumwafer mit einer darauf verklebten PEN-Folie vom Projektpartner bereitgestellt. Auf diesen PEN-Folien ist eine, aus zwei anorganischen Materialien abwechselnde Schicht abgeschieden, welche eine Barrierewirkung realisiert. Auf diese Schichtfolge wird ein organischer Dünnschichtaufbau aufgedampft, durch welchen ein realistischer OLED-Aufbau nachgebildet werden soll. Über dieser Anordnung wiederum wird eine Schichtfolge aus Kalzium (Degradationsnachweis), einer metallischen Kathode und einer Auskoppelschicht aufgebracht. Der gesamte Stack wird von der bereits mehrfach beschriebenen Dünnschichtverkapselung umschlossen. Abbildung 4-20 stellt den Aufbau dar, der einerseits mit einer Transferklebefolie und andererseits mit einem Flüssigklebstoff (beide mit Barriereeigenschaften) verkapselt werden soll. Abschließend wird darauf eine PET-Barrierefolie appliziert.

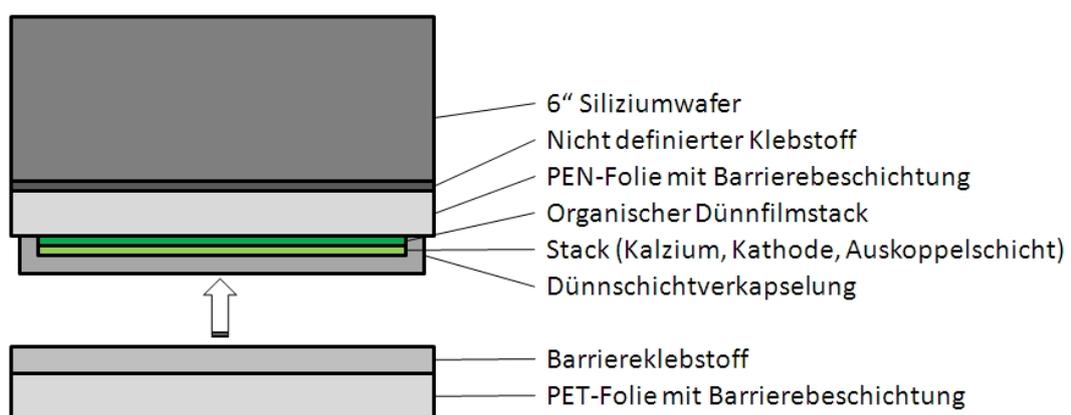


Abbildung 4-20: Darstellung der Schichtanordnung

4. Material und Methoden

Verwendete Materialien:

Substratfolie:

Vorbereiteter Wafer des Projektpartners mit der Beschichtung laut Abbildung 4-20.

Transferklebfolie:

Barriere-transferklebefolie³⁴(BTF) der Firma „3M“ (25µm - Klebstoffbasis nicht bekannt)

Flüssigklebstoff:

Klebstoff „Testepoxidklebstoff“³⁴ der Firma „Nagase & Co. Ltd.“

Barrierefolien:

- a. Folie „TYP B“³⁴ der Firma „3M“ (50µm PET-Folie mit Beschichtung)
- b. Folie „Barrierefolie-PET“³⁴ des „Fraunhofer POLO-Verbund“ (50µm PET-Folie mit Beschichtung)

Geräte:

- a. Silikonbeschichteter Andrückroller (Breite 148 mm; Radius: 46 mm)
- b. Anreißlineal und Skalpell

Vorbereitung der Folien:

Im ersten Versuch wurde die Barrierefolie „Typ B“ der Firma „3M“ verwendet. Diese wurde ca. 13 Stunden bei 80 °C im Vakuum ausgeheizt. Aufgrund von Problemen bei der Benetzung des Flüssigklebstoffes wurde, um den direkten Vergleich zwischen Transferklebfolie und Flüssigklebstoff aufrechtzuerhalten, auf eine Barrierefolie des „Fraunhofer POLO-Verbunds“ zurückgegriffen. Diese Barrierefolie konnte aus Zeitgründen nicht ausgeheizt werden.

Verkapselung:

Transferklebeverkapselung:

Der Verbund aus Barriere-transferklebefolie und Barrierefolie wurde in der Glovebox vorgefertigt, sodass bei der Verkapselung mit dem Wafer nur ein Laminationsschritt vorgenommen werden muss. Nach dem Aufbringen des Verbunds auf den Wafer wurde die überstehende Folie mit dem Skalpell abgetrennt.

Flüssigklebstoffverkapselung:

Der Flüssigklebstoff wurde aufgrund der Größe des Substrates nicht mit dem Dispenser, sondern per Siebdruck appliziert. Der Rakel wurde manuell bei einem Winkel von ca. 45 ° geführt. Der Absprung³⁶ des Siebes betrug ca. 1 mm. Aufgrund der Viskosität des

³⁶ Absprung: Mit dem Absprung des Siebes wird der Abstand zwischen Substrat und Sieb bezeichnet.

4. Material und Methoden

Klebstoffes bildeten sich nach dem Absprung sehr viele Bläschen, die vor der Verklebung beseitigt werden mussten. Dazu wurde das Substrat für 10 Minuten bei 80 °C getempert. Die Ergebnisse des Siebdrucks werden in Abbildung 4-21 gezeigt.

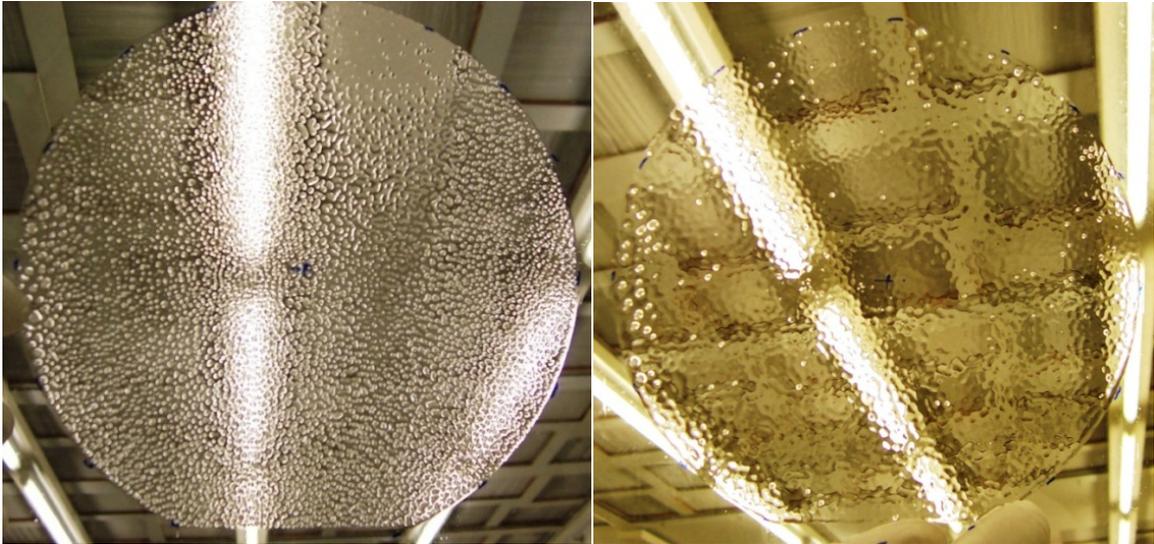


Abbildung 4-21: links: Bläschenbildung nach Siebdruck; rechts: Bläschen weitestgehend ausgeheizt; Durchmesser der beklebten Fläche: 6" (152,4 mm)

Die ausgeheizte Folie, die zur besseren Handhabung auf einen Glassubstrat befestigt wurde, wurde anschließend in der Glovebox mit einem Handroller auf den Wafer gerollt und unter UV-Strahlung (365 nm) 4 Minuten belichtet.

Ergebnis:

Die ganzflächige Verkapselung mit beiden Transferklebefolien brachte ein deutlich besseres Ergebnis: sehr wenig partikelbedingte Lufteinschlüsse und keine Laminationsfehler. Die Verkapselung mit Flüssigklebstoff war ebenfalls erfolgreich. Aufgrund inhomogener Schichtdicken des flüssigen Klebstoffes (Abbildung 4-21 rechts) konnte die Entstehung großer Lufteinschlüsse jedoch nicht verhindert werden. Abbildung 4-22 stellt die Ergebnisse gegenüber. Im oberen Bild sind die Spuren eines Waferbruchs zu erkennen. Dieser erfolgte allerdings nach der Lamination und ist mit dem Versuch nicht in Verbindung zu bringen.

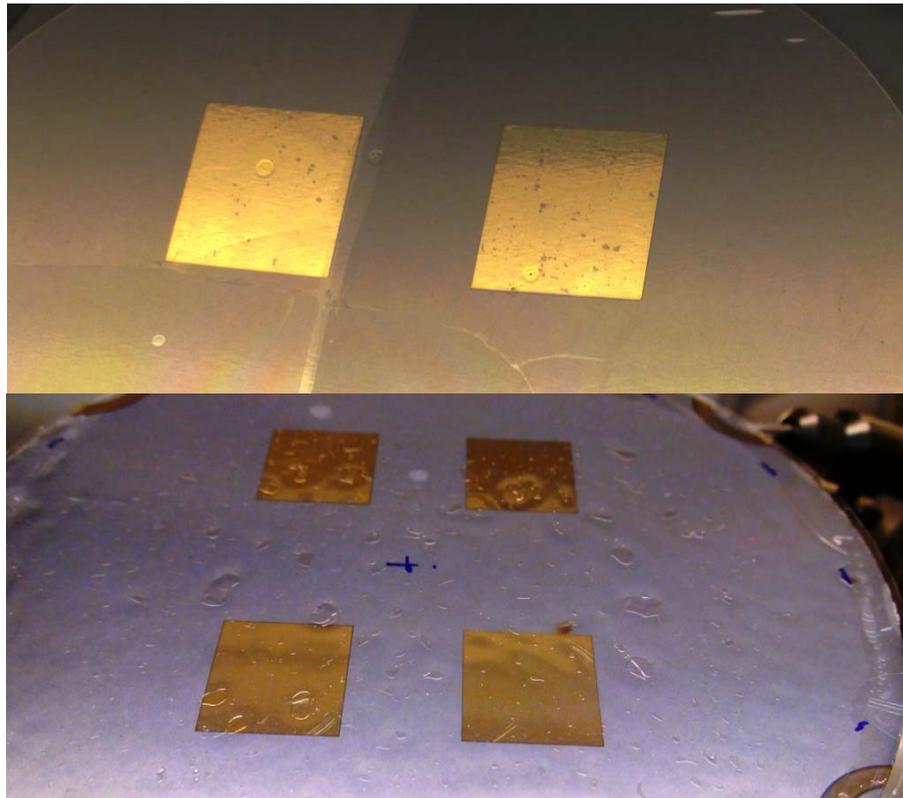


Abbildung 4-22: Oben: Lamination mit Transferklebefolie; Unten: Flüssigkleberverkapselung

Bei der Flüssigkleberbeschichtung der ersten Folie (3M TYP B) konnte eine unzureichende Benetzung beobachtet werden. Da die Zusammensetzung der Barrierebeschichtung vom Hersteller geheim gehalten wird, können bezüglich der Oberflächenbeschaffenheit nur Vermutungen angestellt werden. Die bisher bekannten Zusammensetzungen einer Barrierebeschichtung bestehen aus einem Stack verschiedener Schichten. Dabei sind die Kombinationen zweier anorganischer, oder einer anorganischer und ORMOCER³⁷-Schicht bekannt. Durch die abwechselnd aufgebraachten Schichten wird die Gasdurchlässigkeit durch Pinholes hindurch minimiert. Die Wahrscheinlichkeit zwei Pinholes übereinander liegen zu haben sinkt dadurch drastisch, wodurch wiederum die Permeabilität der Schichtfolge sinkt. Die ORMOCER- Schichten fungieren dabei als Glättungs- und Barrierschicht. Wird die Beschichtung mit einer niedrigerenergetischen Oberfläche abgeschlossen, sinkt daraufhin die Benetzungsfähigkeit eines Klebstoffes. Dies wird in Kapitel 2.3.3.5 näher erläutert. Durch eine EDX³⁸-Untersuchung der Oberfläche könnte ein Aufschluss über die Zusammensetzung erreicht werden. Demzufolge kann eine entsprechende Oberflächenvorbereitung oder

³⁷ ORMOCER: anorganisch-organisches Hybridpolymer

³⁸ EDX: Energiedispersive Röntgenspektroskopie - Messmethode, bei der die von der Probe emittierte Röntgenstrahlung detektiert wird, und somit ein Aufschluss über deren Materialzusammensetzung erhalten werden kann.

Klebstoffformulierung die Benetzung verbessern. Abbildung 4-23 zeigt das Ergebnis der Benetzung.



Abbildung 4-23: Benetzung des Flüssigklebstoffes auf der 3M TYP B-Barrierefolie

4.3.7 Lamination auf Organischen Solarzellen (OSC)

Ziel des Versuches:

An Anlehnung an den Versuch aus Kapitel 4.3.5 wurde eine Folienverkapselung an Organischen Solarzellen, sogenannten OSCs (kurz für: Organic Solar Cell (engl.)), vorgenommen. Dieser Versuch dient nicht nur der Prüfung auf die Druckempfindlichkeit der OSC durch die Laminierrolle, sondern auch der Feststellung der Lebensdauer einer OSC. Im Rahmen der Diplomarbeit kann lediglich das Ergebnis der ersten Problematik bewertet werden. Für die zweite Untersuchung ist ein längerer Zeitraum notwendig.

Vorbetrachtung:

Von elf fertig prozessierten OSCs werden als Referenz zwei Substrate auf konventionellem Weg glasverkapselt. Die anderen neun Substrate stehen der Folienverkapselung zur Verfügung. Um eine gewisse Redundanz zu erreichen, werden auf diese neun Substrate zwei Folientypen in verschiedenen Stärken verteilt. Die Folien sind dieselben, wie sie teilweise in Kapitel 4.3.5, der Folienverkapselung auf Glassubstraten, verwendet wurden.

Erläuterung OSC:

Der Aufbau einer OSC ist grundlegend identisch dem einer OLED. Die bei OLEDs existierende Emitterschicht fungiert bei einer OSC als Absorptionsschicht. Diese Schicht wird anstatt mit Emittoren mit Absorbern dotiert, die durch den Einfall von Licht ein Exziton erzeugen. Diese werden an den Grenzflächen zur anliegenden Blockadeschicht in die

4. Material und Methoden

einzelnen Ladungsträger getrennt, die daraufhin zu den Elektroden wandern und somit elektrischen Strom erzeugen.

Durchführung:

Verwendete Materialien und Geräte:

Barrierefolien:

- a. Folie „Typ B³⁴“ der Firma „3M“ (50 µm PET-Folie mit Barrierebeschichtung)
- b. Folie „Typ C³⁴“ der Firma „3M“ (125 µm PET-Folie mit Barrierebeschichtung)
- c. Folie „Typ D³⁴“ der Firma „3M“ (125 µm PEN-Folie mit Barrierebeschichtung)

Transferklebfolie:

Barriere-transferklebefolie³⁴ der Firma „3M“ (25µm - Klebstoffbasis nicht bekannt)

Geräte:

- a. Silikonbeschichteter Andrückroller (Breite 85 mm; Radius: 27 mm)
- b. Anreißlineal und Skalpell

Vorbereitung der Folien:

Die Abmessungen der einzelnen 4-Quadranten-Substrate³⁹ beträgt 50 x 35 mm. Für ein besseres Laminationsergebnis werden vier OSCs für eine Beschichtung hintereinander auf einen Tray gelegt. Aus diesem Grund werden die Transferklebefolien auf 200 x 40 mm dimensioniert. Die OSCs können nicht auf der kompletten Breite laminiert werden (40 anstatt 50 mm), da die Kontakte nicht bedeckt werden dürfen. Die Länge von 200 mm setzt sich aus den Substratlängen (4 x 35 mm) und den Substratabständen auf dem Tray (4 x 15 mm) zusammen.

Die eigentliche Barrierefolie bedeckt mit der Fläche von 36 x 27 mm den wesentlichen Teil der OSC.

Die verwendeten Folien wurden aus Kapazitätsgründen anstatt wie vom Hersteller empfohlen 8-16 Stunden, nur ca. 6 Stunden bei 80°C im Vakuumofen ausgeheizt. Anschließend wurden Sie in der Glovebox unter Stickstoffatmosphäre zwischengelagert. Die Verarbeitung erfolgte ca. zwei Wochen nach Ablage in der Glovebox.

Vorbereitung des Substrates:

Die organische Solarzelle wurde in der Sunicel Clusteranlage 200 gefertigt und bis zur Verkapselung im Vakuum zwischengelagert, um äußere Einflüsse zu minimieren.

³⁹ 4-Quadranten-Substrate: Fertigungsvariante von OLEDs und OSC's, bei der vier unterschiedlich große aktive, quadratische Flächen auf einem Substrat abgeschieden werden.

4. Material und Methoden

Verkapselung:

Die ausgeheizte Barrieretransferklebefolie wird vom ersten Liner befreit und im selben Zug über die ersten vier der neun Substrate laminiert. Daraufhin erfolgt das Ablösen des oberen Releaseliners. Der Abzugswinkel betrug dabei ca. 90° zur Substratoberfläche. Nach dem Ablösen des Schutzliners der Transferklebefolie werden die Barrierefolien einzeln auflaminiert, wobei auch von diesen ein Releaseliner zu entfernt ist. Die im Tray liegenden Substrate werden anschließend mit einem Skalpell von der Transferklebefolie getrennt und der Messung zur Verfügung gestellt.

Die Substrate tragen folgende Bezeichnung:

Substratnummer	Verkapselungsart	Folienbezeichnung
1	Folie	3M TYP B
2	Folie	3M Typ C
3	Folie	3M TYP B
4	Folie	3M Typ D
5	Folie	3M Typ C
6	Folie	3M Typ D
7	Folie	3M Typ C
8	Folie	3M TYP B
9	Folie	3M Typ D
10	Glas	Keine
11	Glas	Keine
12	ohne	Keine

Tabelle 4-5: Substratbezeichnungen und –beschichtungen (Lamination auf organischen Solarzellen)

Charakterisierung der OSCs:

Bei der Charakterisierung der organischen Solarzellen kommt der „SolSim 210“ zum Einsatz. Es handelt sich hierbei um eine kompakte „Workstation“-Messstation der Firma „AescuSoft“. Er besteht aus einem Sonnensimulator, einem Chuck, dem Messblock und einem Workstation-PC. In dem Chuck, auf dem die Zelle während des automatisierten Messvorgangs liegt, befindet sich ein Peltierelement, dass das Messobjekt mittels Wasserkühlung auf einer gewünschten (einstellbaren) Temperatur hält. Die Elektroden der Solarzelle werden mit dem Messblock verbunden, so dass dieser bei einstrahlendem Sonnenlicht, die nötigen Daten erfassen kann. Der an den Messplatz angeschlossene PC

4. Material und Methoden

verfügt über eine mit der Entwicklungsumgebung LabView programmierte Software, welche den Messblock ansteuert und die gewünschten Parameter auf dem Bildschirm ausgibt. Wesentliche Schlüsselwerte wie der Wirkungsgrad, sowie die Hell- und Dunkelkennlinien⁴⁰ können sofort ausgegeben werden.

Auswertung:

Verkapselung:

Die Druckbelastung durch die Silikonwalze zeigte keine sichtbare Auswirkung auf die darunter liegende Aluminiumkathode. Während des Ablösens des Liners vom ersten Substrat hingegen, traten sofort Delaminationserscheinungen der Kathode auf. Diese konnten durch eine erheblich verringerte Ablösegeschwindigkeit minimiert werden, wobei jedoch eine mikroskopische Delamination nicht auszuschließen bleibt. Abbildung 4-24 veranschaulicht die Beschädigung der Kathode.



Abbildung 4-24: Delamination der Aluminiumkathode

Die Ursache für die Delamination ist auf die geringe Haftkraft zwischen Organik und Aluminiumkathode zurückzuführen. „Small molecules“ sind unpolare Moleküle, die relativ reaktionsarm gegenüber den Molekülen metallischer Schichten sind und daher nur unzureichend starke Bindungen zu diesen aufbauen. Das Problem der Delamination kann durch eine Veränderung im Laminationsablauf behoben werden. In diesem Versuch wurden Transferklebstoff und Barrierefolie nacheinander laminiert. Dieser Schritt kann vorgezogen werden, so dass der ausgeheizte Transferfolien-Barrierefolien-Verbund auf die OSC laminiert wird, ohne anschließend einen stark haftenden Liner entfernen zu müssen. Der Schutzliner der Barrierefolie hat eine so geringe Haftkraft, dass dieser bedenkenlos im Nachhinein abgezogen werden kann.

⁴⁰ Hell- und Dunkelkennlinie: Hellkennlinie (bei 100 % Beleuchtungsstärke); Dunkelkennlinie (bei 0 % Beleuchtungsstärke).

Charakterisierung:

Durch diese, während der Lamination entstandenen, zum Teil schweren Schäden in der Organik der Solarzellen, konnten die aktiven Flächen keine Leistung mehr bereitstellen. Bei den OSCs mit intakter Organik wurde eine sehr gute Performance festgestellt.

Knapp eine Woche nach der Lamination sind die folienverkapselten Solarzellen mit den Glasverkapselten vergleichbar. In Abbildung 4-25 und Tabelle 4-6 wird deutlich, dass zwei Tage nach der Verkapselung der Wirkungsgrad der glasverkapselten OSC nur unwesentlich besser ist, als der der folienverkapselten Variante. Beim Füllfaktor⁴¹ hingegen war das Ergebnis genau umgekehrt.

Weitere Untersuchungen bedürfen mehr Zeit. Es ist noch kein signifikanter Trend zu beobachten, der auf einen deutlichen Leistungsabfall der folienverkapselten OSCs hindeutet.

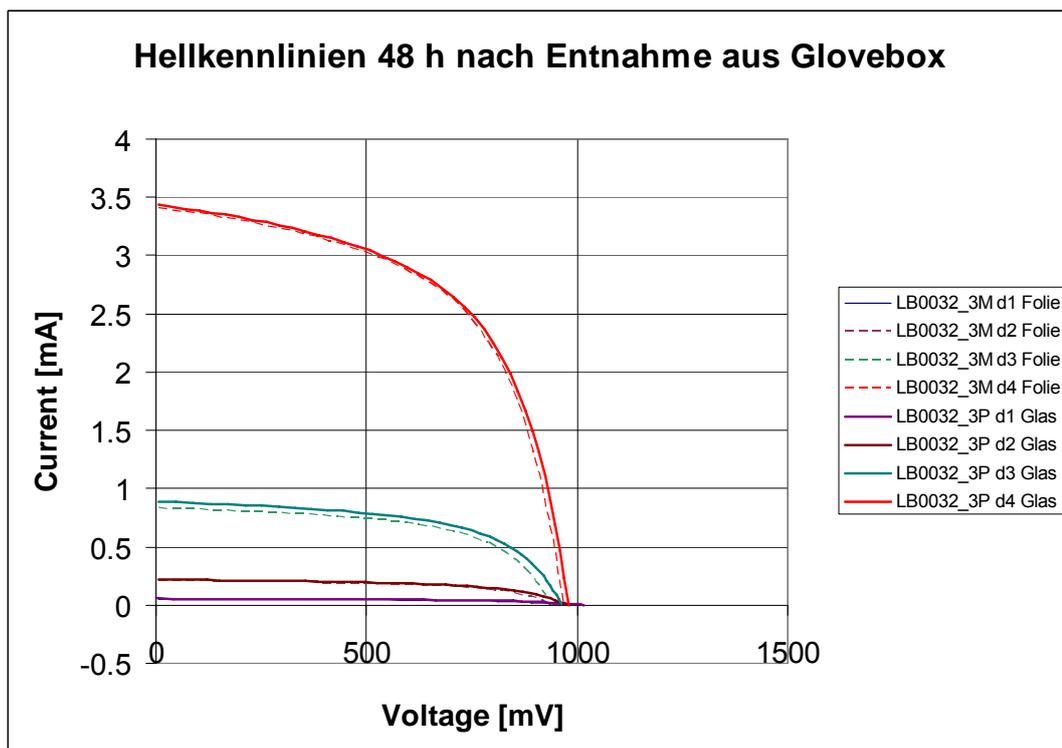


Abbildung 4-25: Hellkennlinien der OSCs

Messfehler:

Bei der Messung wurden Fehler festgestellt, welche vor allem kontaktbedingt sind. Weiterhin wurden die OSCs ohne eine Halterung auf dem Chuck platziert, wodurch

⁴¹ Füllfaktor (kurz: FF): Quotient aus der maximalen Leistung der Solarzelle und dem Produkt aus Kurzschlussstroms und Leerlaufspannung

4. Material und Methoden

teilweise kein optimaler Winkel zur Strahlenquelle erreicht werden konnte. Einige OSCs mussten erneut gemessen werden.

In Abbildung 4-25 sind die Hellkennlinien der einzelnen Quadranten von Glas- und Folienverkapselung zu sehen. Die daraus gewonnen Schlüsselwerte werden in Tabelle 4-6 festgehalten.

Substratbezeichnung	I in mA	U in mV	FF ⁴¹ in %	Eta in %	Fläche in cm ²
LB0032_3M d1 Folie	0.05	980.20	56.71	2.35	0.01
LB0032_3M d2 Folie	0.21	950.01	56.68	2.26	0.05
LB0032_3M d3 Folie	0.83	940.12	57.16	2.24	0.20
LB0032_3M d4 Folie	3.40	975.82	56.07	2.32	0.80
LB0032_3P d1 Glas	0.06	1028.96	55.52	2.52	0.01
LB0032_3P d2 Glas	0.22	982.53	56.20	2.42	0.05
LB0032_3P d3 Glas	0.89	969.16	56.32	2.43	0.20
LB0032_3P d4 Glas	3.43	993.93	55.60	2.35	0.80

Tabelle 4-6: Ergebnisse der Messung unter dem Sonnensimulator „SolSim 210“

4.4 Betrachtungen zur mechanischen Stabilität konventionell verkapselter OLEDs

4.4.1 Vorbetrachtung zu Belastungen der OLEDs bei mechanischer Krafteinwirkung

Bei der Lamination verschiedener Folien auf konventionell verkapselten OLEDs muss beachtet werden, dass die Durchbiegung des Deckglases und somit die Höhe der Kavität abhängig von mechanischen Belastungen ist. Da bisher keine genaueren Analysen dazu gemacht wurden, bedarf dies einer genaueren Betrachtung. Für eine Lamination sind zwei verschiedene Fälle zu untersuchen. Die Folie kann einerseits über einen Vakuum laminator, andererseits über einen Rollenlaminationsprozess aufgebracht werden. Folgende Betrachtung soll die Auswirkung der Belastung während einer Lamination beschreiben.

Im Jahr 2008 wurde im Fraunhofer IPMS Dresden eine theoretische Ansicht zum Thema „Durchbiegung eines Deckglases“ durchgeführt, dessen Ergebnis experimentell überprüft wurde. Diese von Dr. Michael Hoffmann, einem Mitarbeiter des Fraunhofer IPMS Dresden, geführte Betrachtung beschäftigt sich mit einer OLED mit einer Deckglasfläche von 172°x 172 mm², auf welche eine punktförmige Last zentral einwirkt.

4. Material und Methoden

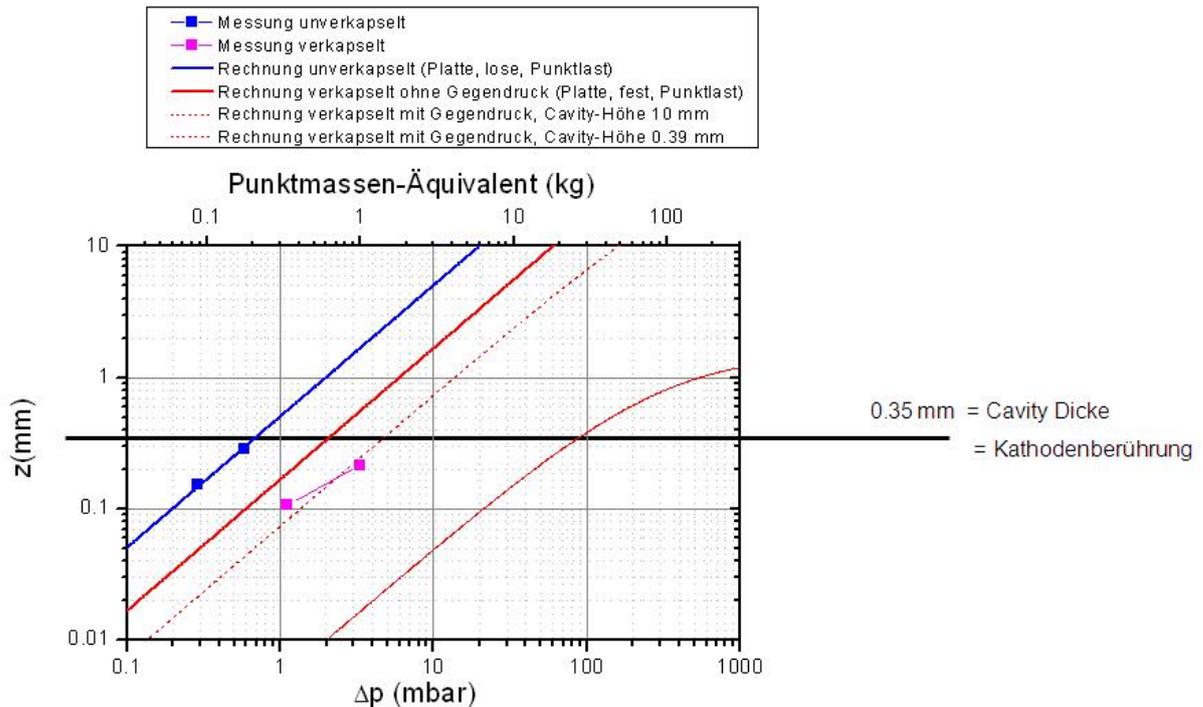


Abbildung 4-26: Durchbiegung von Kavitäten bei punktförmiger Last [V1]

Die rechte Kurve in Abbildung 6-22 zeigt die theoretische Durchbiegung des Deckglases einer konventionell verkapselten OLED mit realer Kavität bei verschiedenen Belastungen. Aus ihr lässt sich ableiten, dass ein Überdruck der Umgebung von ca. 100 mbar, der zentral als punktförmige Last einwirkt, zum Kontakt zwischen Deckglas und Substrat führen würde. Bestätigt werden konnte diese Berechnung leider nicht (vgl. Abbildung 4-26), da nur ein Messversuch durchgeführt wurde, bei dem sich die Messwerte weit ab von der eigentlichen Kurve befanden (rosafarbene Messpunkte).

Das Diagramm zeigt weiterhin, dass sich bei einem punktförmigen Druck von 100 mbar das Deckglas mit einer Kavität großen Volumens weiter durchbiegen würde als das Deckglas einer Kavität kleinen Volumens. Die Begründung liegt hier in der durch die Last ausgeübten Kraft, durch die das Volumen in der Kavität komprimiert wird. In Folge dessen entsteht ein Gegendruck, der bei kleinem Volumen höher ist als bei großem Volumen. Belastet man das Deckglas nun mit einer flächigen Krafteinwirkung (Vakuumlamination) von 100 mbar, würde sich der Innendruck der Kavität noch weiter verstärken. Die Durchbiegung des Deckglases wäre dann noch geringer als bei einer punktförmigen Kraft gleichen Wertes.

Bei einer Rollenlamination ist die Belastung weder punktförmig noch flächig. Sie entspricht einer Linienlast über die komplette Länge einer OLED. Die Durchbiegung des Deckglases ist dementsprechend abhängig von Walzenhärte und dem Anpressdruck der Walze. Während einer Lamination ist der Anpressdruck bei beiden Verfahren in der Regel deutlich höher als 100 mbar.

Neben der hohen Durchbiegung des Deckglases bei einer Vakuumlamination spielt die Anfälligkeit der OLED gegenüber der Vakuumerzeugung in der Kammer eine große Rolle. Ein Vorfall in der Schleuse der Inline-Anlage VES 400/13 verdeutlichte das Verhalten glasverkapselter OLEDs im Vakuum. Beim unbeabsichtigt eingeleiteten Evakuieren der Kammer zersplitterte das Deckglas stark aufgrund der hohen Zugbelastung an der Oberfläche. Aus diesen Gründen ist eine Vakuumlamination von OLEDs mit Kavitäten ungeeignet.

4.4.2 Druckbelastung bei dem Rollenlaminationsprozess

Ziel des Versuches:

Um die Verwendbarkeit einiger Rollenlaminatoren für konventionell verkapselte OLEDs der Größe 200 x 200 mm hinsichtlich der Deckglasdurchbiegung bewerten zu können, soll ein Testobjekt entworfen werden. Mithilfe dieses Versuchsobjektes soll der maximal einstellbare Druck, der von Laminator zu Laminator variiert, festgestellt werden.

Vorbetrachtung:

Idee:

Die Erfassung der Berührung des Deck- und Substratglases bei punktförmiger Belastung wurde über einen auf das Substratglas aufgebrauchten Öltropfen ermöglicht. (siehe [V1]). Aufgrund der Ausdehnung des Tropfens bei Druckeinwirkung auf das Deckglas konnte auf dessen Durchbiegung geschlossen werden. Dies ist für einen Test auf einem Rollenlaminator ungeeignet, da das Objekt viel transportiert werden muss, wobei der Tropfen verlaufen würde.

Als alternative Variante zu dem eingebrachten Öltropfen bietet sich als Nachweis der Berührung von Deck- und Substratglas ein elektrischer Kontakt an. Neben dem umgänglichen Transport des Objekts ist es weiterhin von Vorteil, dass es beliebig oft verwendet werden kann, da durch den elektrischen Kontakt keine Ölrückstände am Deckglas verursacht werden.

Funktionsweise:

Auf die Innenseiten von Substrat- und Deckglas soll eine elektrisch leitende Schicht aufgebracht werden, die bei Berührung den Strom leitet und somit gewissermaßen als Schalter fungiert. Die Funktionsweise wird in Abbildung 4-27 dargestellt. Es soll zur Berührung beider Elektroden kommen, wenn die Walze eines Rollenlaminators über die OLED geführt wird und dabei eine Kraft auf das Deckglas auswirkt. Da sich die am

4. Material und Methoden

höchsten beanspruchte Stelle im Zentrum der OLED befindet, wird dort die stärkste Durchbiegung erwartet.

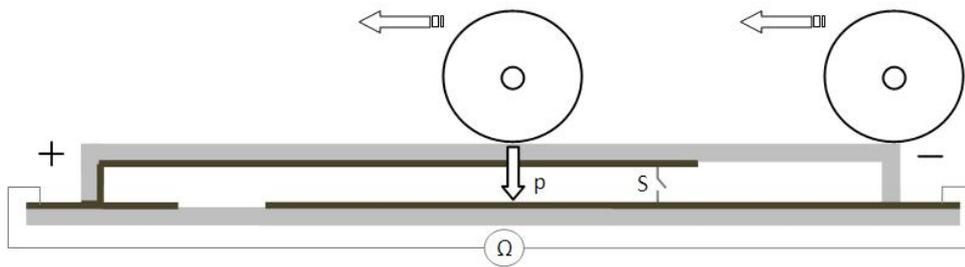


Abbildung 4-27: Prozessablauf und Kontaktierung

Aufbau:

Für die Durchbiegung ist auf dem Deckglas eine Fläche (Anode) von 80 x 140 mm vorgesehen, die über die senkrechte Kante des Deckglases hinaus auf die Rahmenfläche führt. Auf dem Substratglas hingegen befindet sich auf der einen Seite die Kathode (große Fläche) und auf der anderen eine deutlich kleinere Fläche, durch die die Anode außerhalb der Kavität geführt wird. In Abbildung 4-28 ist der Aufbau zu sehen. Das Substratglas wird dabei durch die untere graue Fläche, die mit zwei metallischen Schichten (schwarz) bedampft ist, dargestellt.



Abbildung 4-28: Darstellung des Aufbaus der Versuchs-OLED

Durchführung:

Der eigentliche Prozessschritt der Beschichtung wurde aus Kapazitätsgründen nicht im Fraunhofer IPMS Dresden, sondern in Kooperation mit der PVD-Anlage der Hochschule Mittweida durchgeführt. Die Anlage ist vom Typ „B55-Hochvakuumbedampfanlage“. In der Anlage wird das Substrat im Rotationsbetrieb geführt, um eine möglichst homogene Abscheidung zu gewährleisten. Das aufzudampfende Material wird über einen Elektronenstrahler des Typs „GF6“ bei einer Spannung von 10 kV und einem Emissionsstrom von 0,45 A, faktisch 4,5 kW, verdampft. Dabei wird die Schichtdicke über das Quarzmonitormessgerät „MSV-1842/A“ bestimmt.

4. Material und Methoden

Ziel ist es, auf beide Substrate 500 nm Aluminium abzuscheiden. Eine geringere Schichtdicke wäre für den elektrischen Kontakt zwar völlig ausreichend, jedoch sollte sie mindestens der Gesamtschichtdicke des eigentlichen OLED-Stacks entsprechen, um ein realistisches Ergebnis zu erzielen. Bei der Dampfabscheidung können zwei Fälle eintreten, die sich auf die Funktionalität nachteilig auswirken: einerseits eine zu geringe Schichtdicke, durch welche sogenannte Pinholes entstehen können. Dies ist im hier vorgestellten Versuch kein Problem, da die Leitfähigkeit trotzdem gewährleistet ist. Bei zu hohen Schichtdicken kann durch die unterschiedlichen Oberflächenspannungen eine Delamination des Aluminiums auftreten. Dies kann das Ergebnis des Versuches verfälschen, da eine sich immer weiter aufrollende Schicht einerseits ihre Höhe und damit die Empfindlichkeit ändert und andererseits durch die Trennung des Kontaktes zu einer fehlerhaften Gesamtfunktion führt.

Für die vorgesehenen Substratgrößen, die auf der Anlage der Hochschule bearbeitet werden sollen, ist kein Rahmen auf der sich drehenden Substrataufnahmescheibe vorgesehen. Dazu werden für die zu bedampfenden Flächen Aufnahmemöglichkeiten aus Stahlblech gefertigt, in welche die Substrate eingehängt werden können. Daraufhin werden diese auf die Substrataufnahmescheibe aufgeschraubt und ausgerichtet. Abbildung 4-29 zeigt die Halterungen.



Abbildung 4-29: Substrat- und Deckglashalterung aus Stahlblech (links: zu bedampfende Seite)

Vor dem Bedampfen müssen Substrat und Deckglas mit einer Folie beschichtet werden, welche die Funktion einer Maske erfüllen soll. Ein für diesen Zweck gut geeignetes Material ist die Folie „Glassguard 50550“ der Firma „tesa AG“. Diese ist kratzfest, ausreichend temperaturbeständig und rückstandsfrei wiederabziehbar. Abbildung 4-30 zeigt die beiden abgeklebten und bedampften Gläser.

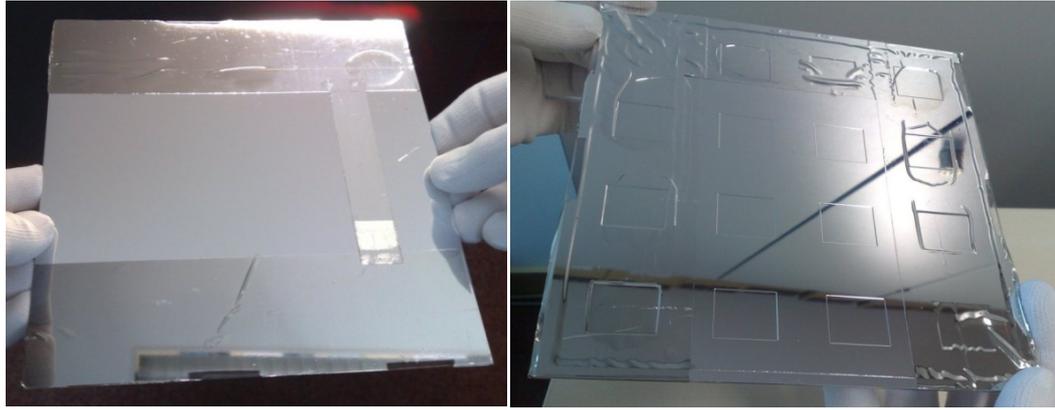


Abbildung 4-30: Substrat- und Deckglas, abgeklebt und bedampft (v.l.n.r.)

Bei der Beschichtung des Deckglases kann es, aufgrund der gerichteten Teilchenbewegung, zu undefinierten Kantenüberdeckungen kommen. Dazu kann in erster Linie ein Funktionstest mit „Go/No Go“ Entscheidung vorgenommen werden. Für diesen Test ist das digitale Multimeter des Typs „PeakTech 2010DMM“ gut geeignet. Weiterhin kann eine durchgehende Kantenüberdeckung über das Stereomikroskop „Nikon SMZ1500“ festgestellt werden. Dazu wird das Deckglas auf etwa 45° angekippt, bis das Umgebungslicht von der Kante reflektiert wird. Da Aluminium einen höheren Reflexionsgrad besitzt als reines Glas, kann eine Beschichtung mit Aluminium somit gut sichtbar gemacht werden, wie es in Abbildung 4-31 zu sehen ist.

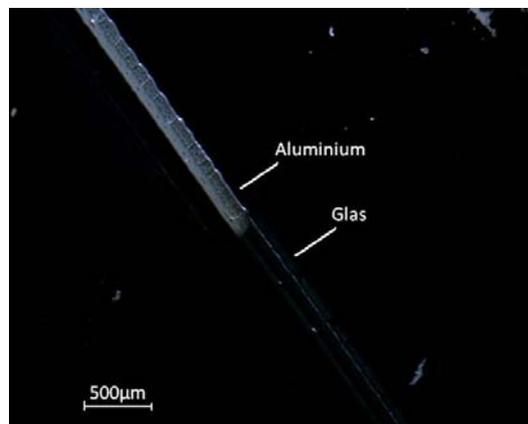


Abbildung 4-31: Beleuchtete Kante des Deckglases

Nach dem Bedampfen werden Substrat und Deckglas in der Glovebox der Inline-Anlage „VES 400/13“ des Fraunhofer IPMS Dresden verkapselt. Dazu wird der UV-härtender Klebstoff „XNR5516ZLV“ der Firma „Nagase & Co. Ltd.“ eingesetzt, der bis auf die sich kontaktierenden Aluminiumflächen komplett unter den Verkapselungsrahmen gesetzt wird. An der Stelle des späteren elektrischen Kontaktes zwischen Glassubstrat und Deckglasrahmen wird der Klebstoff von außen auf den Rahmen aufgetragen, um den Aufbau komplett abzudichten. Für den Anschluss eines Messgerätes wird an beide nach außen geführten Kontaktstellen jeweils ein 80 cm langes Kabel mittels Silberleitklebers

4. Material und Methoden

und darüber liegendem Gewebeband als Zugentlastung aufgebracht. Abbildung 4-32 zeigt den fertigen Versuchsaufbau (rechts im Bild), und die nachträglich angebrachte Klebstoffnaht (links).

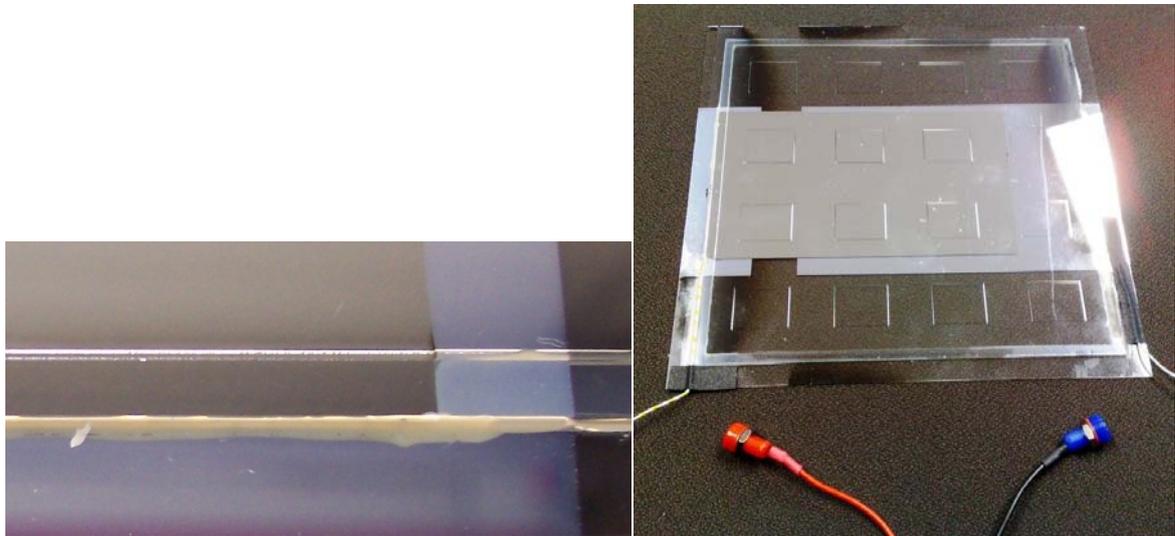


Abbildung 4-32: links: Separat gezogene Klebnaht zur hermetischen Abdichtung der Kavität; rechts: Fertige, verdrahtete Drucktest-OLED

Test und Ergebnis:

Der bisher einzige Versuch dazu fand im IMTEK – Institut für Mikrosystemtechnik in Freiburg statt. Das Gerät, an dem der Test durchgeführt wurde, war vom Typ „HRL350“ der Firma „Stork Vertrieb GmbH“. Der Test galt der Feststellung des Einflusses des verwendeten Walzentyps auf die Durchbiegung des Deckglases. Weiterführende Versuche werden aufgrund des in Kapitel 3.3.2.2 genannten internen Aufbaus der unterschiedlichen Laminatoren am eigenen Gerät, welches in Zukunft zur Verfügung stehen wird, vorgenommen.

Der Ein- und Auslauf des verwendeten Laminators bestand aus einem planen Kunststofftisch wie in Kapitel 3.3.2.2 „a) planer Tisch“ beschrieben. Die Walzenpaarung setzte sich zusammen aus einer silikonummantelten Walze (unten) und einer Edelstahlwalze (oben). Um ein Zerkratzen des Substrates bei dessen Ausrichtung zu vermeiden, wurde eine plane Aluminiumplatte zwischen Glassubstrat und Einlauftisch gelegt.

Im ersten Versuch wurde das Testobjekt, mit dem Deckglas zur Stahlwalze gerichtet, durch die Anlage geschoben. Beide Walzen waren breiter als das Messobjekt, so dass ein Großteil der anliegenden Kraft am Rahmen des Deckglases wirkte. Der eingestellte Anpressdruck betrug 1 bar. Eine Kontaktierung beider Glasflächen konnte nicht festgestellt werden. Die Anordnung wird in Fall A der Abbildung 4-33 dargestellt.

4. Material und Methoden

Im zweiten Versuch wurde die Anordnung so verändert, dass das Deckglas unter der Silikonwalze hindurch geführt wurde. Der Anpressdruck wurde aus Sicherheitsgründen auf 0,75 bar verringert. Bereits bei diesem Druck konnte eine Berührung beider Glasflächen über das digitale Multimeter „PeakTech 2010DMM“ ermittelt werden. Dies ist durch die geringere Härte der silikonbeschichteten Walze zu begründen. Fall B der Abbildung 4-33 stellt dazu das Verhalten der Rolle dar. Durch die anliegende Kraft F verformte sich die Silikonwalze aufgrund deren Härte und der Nachgiebigkeit des Deckglases. Deshalb kam es bereits bei diesem Anpressdruck zu einer Durchbiegung des Deckglases und damit zur Kontaktierung beider Glasschichten.

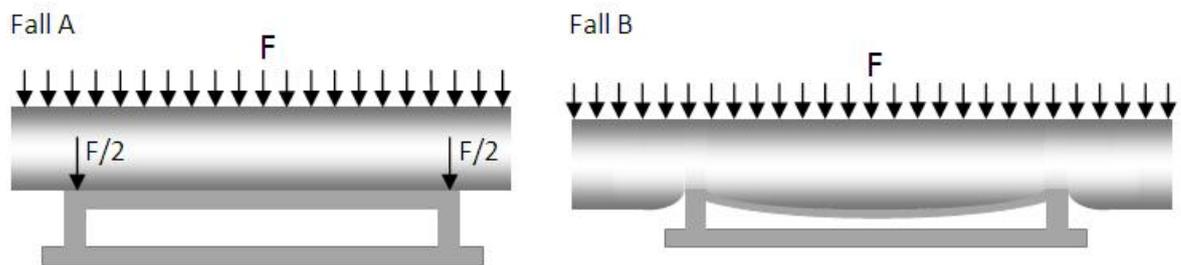


Abbildung 4-33: Auswirkungen der Härte auf die Durchbiegung des Messobjektes (Fall A: Stahlwalze; Fall B: Silikonwalze)

5 Diskussion

Aufgabe dieser Diskussion ist es, die durch die praktischen Versuche gewonnenen Erkenntnisse zusammenfassend darzustellen und sie im Bezug auf die Zielstellung zu bewerten. In Zusammenspiel mit den theoretischen Betrachtungen im Kapitel 3 (Lamination) soll eine Empfehlung für ein geeignetes Laminationsverfahren gegeben werden.

Eignung der Verfahren:

Um sich an der Reihenfolge der im Referat formulierten Schwerpunkte zu orientieren, werden zu Beginn Betrachtungen zur Lamination von Folien auf bestehenden OLEDs und starren Substraten vorgenommen.

Die in Kapitel 4.2 (*Vakuumlamination in der OLED-Herstellung*) und 4.3.1 (*Maschinelle Lamination von Haftklebefolien auf Glas*) beschriebenen Versuche dienen der Klärung einer prinzipiellen Fragestellung. Es soll die Eignung der zwei in Frage kommenden Laminationsverfahren hinsichtlich der Anforderungen für das Fraunhofer IPMS Dresden festgestellt werden.

Im Versuch „*Vakuumlamination in der OLED-Herstellung*“ (Kapitel 4.2) wurde die Probelamination von Haftklebefolien auf Glas beschrieben. Es konnte gezeigt werden, dass die Lamination mit dem verwendeten Vakuumlaminator nicht fehlerfrei durchführbar ist.

Nach den Angaben verschiedener Anbieter sollte der Vakuumlamination von druckempfindlichen Haftklebefolien immer ein Rollenlaminationsprozess vorangehen, um Lufteinschlüsse zu verhindern.

Unter Anwendung spezieller anlagenspezifischer Werkzeuge ist die Applikation von Haftklebefolien dennoch möglich. Dazu wird das Substrat auf die untere Heizplatte gelegt. Die Folie wird in einem Aufnahmerahmen fixiert, der mit Hilfe einer in der Vakuumkammer befindlichen Hubeinrichtung nach dem Evakuieren auf das Substrat abgesenkt wird. Dadurch kommen Substrat und Folie nicht frühzeitig in Kontakt. Nachteilig ist das anschließend notwendige Abtrennen der überstehenden Folienreste. In Anhang A7 ist der Aufbau eines solchen Laminators dargestellt.

Mit dem Versuch „*Maschinelle Lamination von Haftklebefolien auf Glas*“ (Kapitel 4.3.1) sollte nun eine Gegenüberstellung der Laminationsergebnisse von Vakuum- und Rollenlamination ermöglicht werden. Es wurden deshalb dieselben Klebstoffe und teilweise dieselben Kunststofffolienarten verwendet.

Für die praktische Anwendung im Fraunhofer IPMS Dresden wird empfohlen, mit einer Prozesstemperatur von etwa 40 °- 50 °C zu arbeiten. So kann durch die verringerte Viskosität des Klebstoffes ein homogenes Ergebnis erzielt werden. Außerdem sollte eine Paarung aus zwei silikonummantelten Walzen verwendet werden, deren Härte sich im Bereich von 60 – 80 Shore A bewegt. Es wird empfohlen, einen Laminator mit einer beidseitig parallel geführten Spaltbreiteneinstellung zu verwenden.

Unter Beachtung dieser Hinweise werden bei der Rollenlamination von Haftklebefolien deutlich zufriedenstellendere Ergebnisse erreicht.

Unabhängig vom Applikationsverfahren spielen der Zustand der Substratoberfläche sowie die Abzugsgeschwindigkeit des Releaseliners eine Rolle für die Qualität der Beschichtung.

Die Flexibilisierung der OLED:

Die im Folgenden angeführten Versuche beschäftigten sich mit der Lamination auf den bestehenden OLEDs und starren Substraten. Dies umfasste die Herstellung eines Glas-Glas-Verbunds und die Lamination von Folien auf starre Substrate.

Der Versuch „*Lamination von Glas auf Glas mittels einer beidseitigen Klebefolie*“ (Kapitel 4.3.2) befasst sich mit der neuen Fertigungslinie um die „Sunicel 400 plus“-Anlage. In dieser Anlage soll zukünftig ein vorhandenes, kleineres 300 x 400 mm-Substrat beschichtet werden. Das ist jedoch nur über die Herstellung eines Transport-Verbundes möglich, da das Substrat sonst wegen der zu geringen Abmessung nicht befördert werden kann. Ein Lösungsansatz lag hier in der Herstellung eines mit Haftklebefolien laminierten Glas-Glas-Verbunds des zu bearbeitenden- und einem für die Anlage passenden Trägersubstrat.

Dazu wurde ein Verbund aus zwei Glassubstraten über eine doppelseitige Klebefolie hergestellt. Dieser sollte mit Aluminium beschichtet und anschließend wieder getrennt werden.

Die ganzflächig verbundenen Glassubstrate konnten teilweise erfolgreich beschichtet und getrennt werden. Die Gründe auftretender Delaminationen hängen vermutlich mit Transportproblemen, Haftungsverlusten unter Einwirkung von Temperatur und Vakuum sowie Haftungsverlusten aufgrund des Ausgasens der Folie zusammen. Um die Ursachen sicher benennen zu können, ist eine größere Versuchsreihe unumgänglich.

Eine Alternative zur doppelseitigen Klebefolie mit unterschiedlichen Haftkräften ist die ebenso doppelseitig klebende, aber einseitig thermisch lösbare Folie „Revalpha 3195“ der Firma „*Nitto Denko*“. Es wird empfohlen, weitere Versuche mit diesem Produkt durchzuführen.

Um das Anwendungsfeld für OLEDs zu erweitern, ist deren Flexibilisierung vorgesehen. Für die Vermarktung flexibler organischer Leuchtdioden darf die Lebensdauer im Vergleich zu konventionell glasverkapselten OLEDs nicht signifikant geringer sein.

Dazu wurden an erster Stelle Lebensdaueruntersuchungen mit flexiblen Verkapselungen auf starren Substraten durchgeführt. Als Referenz dienten konventionell verkapselte OLEDs. Die Charakterisierung der Lebensdauer im Versuch „*Folienverkapselung auf Glassubstraten*“ (Kapitel 4.3.5) wurde über die Degradation eines Kalziumstacks vorgenommen.

Die Folienverkapselung über Transferklebefolien wurde ganzflächig, die Verkapselung mit Flüssigklebstoffen als Rahmenverklebung realisiert. Aufgrund der Flexibilität der Folien konnte kein reproduzierbar gutes Ergebnis durch den Flüssigklebstoff erreicht werden. Die ganzflächige Verkapselung des Kalziumstacks hingegen war unkompliziert in der Durchführung und homogen im Ergebnis.

Die Degradation des Stacks, die im Zeitraum von 18 Tagen beobachtet wurde, erbrachte eine klare Erkenntnis: Die ganzflächige Verkapselung mit Transferklebefolien ist in Kombination mit einer Dünnschichtverkapselung der Rahmenvariante mit Flüssigklebstoffen vorzuziehen. Hinzu kommt, dass die Reaktion des Klebstoffes mit dem Dünnschichtaufbau bisher unbekannt ist.

Unter Verwendung der bisher erhältlichen handelsüblichen Barrierefolien konnte ein durchaus akzeptables Ergebnis erreicht werden. Weitere Forschung zur Verringerung der Permeation der Folien, sowie ein automatisiertes Laminieren in Stickstoffatmosphäre durch die Integration eines Laminators in die Fertigungslinie um die Beschichtungsanlage „Sunicel 400 plus“ können die Lebensdauer weiter verbessern.

Neben der lebensdauerbezogenen Eignungsfeststellung der bisher im Handel verfügbaren Barrierefolien sollte deren Applikation auf den Schichtstapel hinsichtlich Beschädigungen durch das Laminationsverfahren untersucht werden. Dies wird im Versuch „*Lamination auf Organischen Solarzellen (OSC)*“ (Kapitel 4.3.7) vorgenommen.

Die Verkapselung aller Substrate wurde mit Transferklebefolien und Barrierefolien unterschiedlicher Stärke realisiert. Diese wurden mit einem Handroller aus Silikon aufgebracht. Die Charakterisierung der im Versuch verwendeten Solarzellen wurde an einem Sonnensimulator mit integrierter Messeinrichtung vorgenommen. Als Referenz für die zur Verfügung gestellte Leistung der folienverkapselten OSCs dienten konventionell verkapselte Substrate.

Trotz Schwierigkeiten bei der Lamination konnten einige der folienverkapselten OSCs eine vergleichbare Leistung wie die Referenzsubstrate zur Verfügung stellen.

Der starke Leistungsabfall der beschädigten OSCs ist auf die Zugbelastung beim Entfernen des Releaseliners zurückzuführen. Die Druckbelastung während der Lamination übt vermutlich nur einen geringen Einfluss auf die Beschädigung des Schichtstapels aus.

Neben den oben beschriebenen Betrachtungen zur Lebensdauer und der mechanischen Belastung durch die Rollenlamination unter Verwendung flexibler Verkapselungen sollten starre Glassubstrate vollständig durch eine flexible Folie ersetzt werden. In diesem Rahmen sollten Versuche zur Applikation von Folien auf Folien durchgeführt werden.

In Kapitel 4.3.3 (*„Machbarkeitstest der Handlamination in der Glovebox“*) wurden die Probleme bei der Arbeit mit einem Andrückroller erörtert. Hintergrund dieser Aufgabenstellung war die Frage, ob die Lamination zu Testzwecken innerhalb der Glovebox möglich ist. Die gewonnenen Erkenntnisse hinsichtlich der Handhabung konnten zum Teil im Versuch *„Herstellung verschiedener Folienverbunde zur Erprobung deren Rollbarkeit“* (Kapitel 4.3.4) angewandt werden.

Bei der Handlamination von Haftklebefolien unter stickstoffhaltiger Atmosphäre innerhalb einer Glovebox konnte mit erhöhter Konzentration und Feinmotorik durchaus eine Applikationsgenauigkeit von 0,5 – 1 mm erreicht werden.

Bei der Herstellung der Folienverbunde mit Haft- und Flüssigklebstoffen kann aufgrund der inhomogenen Schichtdicke, des aufgetragenen Flüssigklebstoffs und der ungleichmäßigen Folienapplikation per Hand die Verwendung von Haftklebefolien empfohlen werden. Des Weiteren ist die Applikation mit Transferklebefolien sauberer und schneller durchführbar als das Zusammenfügen über Flüssigklebstoffe. Der Rollbarkeitstest konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt werden.

Bisher wurden ausschließlich Materialverbunde ohne organische oder metallische Schichten hergestellt. Um den Einfluss der Verkapselung auf empfindliche, innenliegende Schichten zu bewerten, sollte im Versuch *„Folie auf Folie“ - Lamination* (Kapitel 4.3.6) ein Schichtaufbau verkapselt werden, welcher sich in Bezug auf die innere Haftfestigkeit ähnlich einer OLED verhält. Als Degradationsnachweis wurde Kalzium in den Stack integriert. Neben der Bewertung der Degradation, die aus zeitlichen Gründen nicht mehr innerhalb dieser Arbeit durchgeführt werden konnte, wurde durch die Verkapselung erneut das Vorgehen bei Lamination von Folien auf Folien untersucht. Es sollten, wie in Versuch *„Herstellung*

verschiedener Folienverbunde zur Erprobung deren Rollbarkeit“ (Kapitel 4.3.4), Haftklebefolien, sowie Flüssigklebstoffe verwendet werden. Da im vorangegangenen Versuch die Verarbeitung von Flüssigklebstoffen nicht zufriedenstellend verlief, sollte deren Auftrag nun per Siebdruck stattfinden.

Während die Folienlamination erneut ein nahezu fehlerfreies Ergebnis erbrachte, muss die Verkapselung mit Flüssigklebstoffen hinsichtlich deren Applikation überdacht werden. Der Klebstoffauftrag über Siebdruck verlief besser als die Beschichtung mit dem Dispenser, kann mit dem Verfahren der Lamination von Haftklebefolien aber nicht konkurrieren.

Flüssige Klebstoffe könnten alternativ über ein Walzensystem aufgebracht werden. Die Realisierungsmöglichkeiten dieses Verfahrens bleiben näher zu untersuchen.

Aus den Erkenntnissen der Versuche *„Machbarkeitstest der Handlamination in der Glovebox“* (Kapitel 4.3.3), *„Herstellung verschiedener Folienverbunde zur Erprobung deren Rollbarkeit“* (Kapitel 4.3.4), *„Folienverkapselung auf Glassubstraten“* (Kapitel 4.3.5) und *„Folie auf Folie“ - Lamination“* (Kapitel 4.3.6) kann nun zusammenfassend festgestellt werden: für eine manuell angefertigte flexible Verkapselung empfiehlt sich auf Grund der guten Handhabbarkeit die Verwendung von Haftklebefolien. Die ganzflächige Applikation ist dabei wegen der degradationsabschwächenden Wirkung und der besseren inneren Haftfestigkeit des Verbundes anzustreben.

Maschinelle Rollenlamination auf OLEDs mit Kavitäten:

Um die bestehenden OLEDs hinsichtlich mechanischem Schutz und Lichtauskopplung optimieren zu können, müssen die Auswirkungen der, durch Rollenlamination verursachten, Deckglasdurchbiegung auf den Schichtstapel charakterisiert werden. Dazu sollte im Versuch *„Druckbelastung bei dem Rollenlaminationsprozess“*(Kapitel 4.4.2) ein Testobjekt entwickelt werden, womit die Durchbiegung des Deckglases bei unterschiedlichen Anpressdrücken und Walzenpaarungen festgestellt werden kann.

Die Berührung beider Gläser wurde bei dem Testobjekt durch einen elektrischen Kontakt realisiert, indem auf die inneren Flächen von Deck- und Substratglas eine dünne Schicht Aluminium aufgebracht wurde. Diese Kontaktflächen wurden unter dem Verkapselungsrahmen außerhalb der Kavität geführt und über ein digitales Multimeter miteinander verbunden. Dadurch konnte die Berührung der Gläser unter Belastung nachgewiesen werden.

Das Testobjekt konnte an einem Rollenlaminator erfolgreich angewendet werden. Später soll es für weitere Untersuchungen am Laminator im Fraunhofer IPMS Dresden zur Verfügung stehen.

Empfehlung eines Laminationsverfahrens:

Aus den in Kapitel Lamination zusammengetragenen Informationen, persönlichen Gesprächen mit den Anbietern der verschiedenen Geräte und den gewonnenen Erkenntnissen der Versuche „*Vakuumlamination in der OLED-Herstellung*“ (Kapitel 4.2) und „*Maschinelle Lamination von Haftklebefolien auf Glas*“ (Kapitel 4.3.1) konnte die Kernfrage nach einem geeigneten Laminator entsprechend den Anforderungen des Fraunhofer IPMS Dresden geklärt werden. Folgend sollen beide Verfahren noch einmal kurz gegenübergestellt werden.

In Tabelle 5-1 werden Vorteile und Möglichkeiten, welche diese Verfahren dem Fraunhofer IPMS Dresden eröffnen, aufgelistet. Die Informationen beziehen sich auf die jeweiligen Standardgeräte.

Vakuumlamination	Rollenlamination
Lamination thermisch aktivierbarer Klebefolien	Lamination von Haftklebesystemen, sowie thermisch aktivierbaren Klebefolien
Betriebsatmosphäre ist anpassbar	OLEDs mit Kavitäten sind laminierbar
Bessere Reinraumklasse als bei der Rollenlamination	Günstiger Anschaffungspreis
	Gute Automatisierung und geringe Taktzeit

Tabelle 5-1: Gegenüberstellung der Laminationssysteme

Mit Vakuumlaminatoren in standardisierten Ausführungen können im Gegensatz zu Rollenlaminatoren lediglich thermisch aktivierbare Klebsysteme appliziert werden. Die Hauptanwendung des Laminators liegt hingegen in der Applikation von drucksensiblen Haftklebesystemen. Dazu müsste ein spezieller, deutlich preisintensiverer Vakuumlaminator verwendet werden.

Die Vorteile der Vakuumlamination liegen in der variablen Einstellung einer Betriebsatmosphäre und der besseren Reinraumklasse, aufgrund des vorherrschenden Vakuums. Diese Vorteile relativieren sich jedoch bei der eventuellen Anschaffung eines in die Fertigungslinie integrierten Rollenlaminators.

Mit der Rollenlamination können die bisher hergestellten OLEDs mit Kavitäten bearbeitet und Haftklebesysteme je nach Reinraumklasse fehlerfrei appliziert werden. Weiterhin ist dieses Verfahren durch die geringen Anschaffungskosten für die entsprechende Apparatur sowie die niedrigeren Taktzeiten des Prozesses deutlich wirtschaftlicher als die Vakuumlamination.

5. Diskussion

Aus diesen gewonnenen Erkenntnissen kann abgeleitet werden, dass die Rollenlamination das passende Verfahren für die Verkapselung und Optimierung von organischen Leuchtdioden mit Folien ist.

6 Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurden Grundlagen bezüglich der organischen Leuchtdioden, deren Verkapselung sowie dafür verwendeter Klebstoffe und Folien dargestellt. Des Weiteren wurde der Laminationsprozess mit dazugehörigen Apparaturen beschrieben. Anschließend wurde eine Reihe von Versuchen durchgeführt, um die anfangs formulierten Fragestellungen zu bearbeiten.

Es war Bestandteil der Zielstellung, ein Laminationsverfahren für das Fraunhofer IPMS Dresden zu empfehlen, mit welchem Folien auf die bestehenden OLEDs aufgebracht werden können. Durch das Studium des Aufbaus und der Funktionsweise entsprechender Gerätetypen sowie der Planung und Auswertung von Versuchen an Laminatoren verschiedener aktueller Anbieter konnte eine Entscheidungsgrundlage geschaffen werden.

Es wird für den angestrebten Verwendungszweck empfohlen, einen Rollenlaminator zu erwerben. Hierdurch sind bestmögliche Voraussetzungen geschaffen, um möglichst fehlerfreie Beschichtungen auf glasverkapselten organischen Leuchtdioden und anderen starren Substraten durchzuführen.

Die im Hinblick auf die zukünftige Entwicklung flexibler OLEDs interessantere Fragestellung beschäftigte sich mit der Nutzung desselben Laminationsverfahrens für die Entwicklung vollflexibler Verkapselungen.

Aus den selbst praktisch durchgeführten sowie den begleiteten Versuchen konnten zusätzlich zu den eben erwähnten Schwerpunkten, Hinweise zur problemfreieren Durchführung der späteren Beschichtungsaufgaben ermittelt werden. Zu diesen zählt die Oberflächenvorbereitung durch deren Säuberung, gegebenenfalls das Ausgasen der Materialien im Vakuumofen und nach Möglichkeit die Lagerung von Folien unter Stickstoffatmosphäre. Für die flexible Verkapselung haben sich Haftklebefolien etabliert. Ist die ganzflächige Anwendung von Flüssigklebstoffen zwingend nötig, sollte der Auftrag mit einem Siebdrucker vorgenommen werden.

Für die maschinelle Lamination von Haftklebefolien empfiehlt es sich, die Prozesstemperatur leicht zu erhöhen, und je nach Aufgabenbereich die Walzenpaarung bezüglich der Härte anzupassen.

Bedauerlicherweise konnte die, im Kurzreferat erwähnte, Begleitung des Aufbaus und der Einrichtung der empfohlenen Fertigungsvorrichtung nicht im Zeitrahmen der durchgeführten Arbeit realisiert werden. Trotzdem konnten die Kernzielstellungen zur Zufriedenheit bearbeitet werden.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Für die Entwicklung fehlerfreier, längerfristig schützender flexibler Verkapselungen ist mit einem Rollenlaminator die ideale Voraussetzung geschaffen.

Die bisherigen Ergebnisse, die hinsichtlich Flexibilisierung, Lebensdauer, Leuchtkraft und Energieverbrauch erreicht wurden sind sehr vielversprechend. Die Forschung und Entwicklung in diesen Gebieten sollte unbedingt voranschreiten, um den Aufschwung der OLED für Beleuchtungs- und Displayanwendungen zu ermöglichen.

Literaturverzeichnis

Kapitel 2.1 „Organische Leuchtdioden“ und 2.2 „Verkapselung“

Literatur:

- [G1] HEINTZEL, INGO: Diplomarbeit: „Defectengineering an einer OLED-Beschichtungsanlage“. Fraunhofer IPMS Dresden, Vorgelegt am 04.09.2007.
- [G2] HILD, OLAF R.: “Organic Photovoltaics with Small Molecules – Status and Outlook”. Fraunhofer IPMS Dresden, 19.09.2008.
- [G3] HOFFMANN, MICHAEL: Vorlesung „Organische Halbleiter“. Fraunhofer IPMS Dresden, 06.12.2008.
- [G4] HUGHES, THOMAS: Diplomarbeit: „Untersuchung der Degradationsmechanismen von organischen Leuchtdioden“. Fraunhofer IPMS Dresden; Vorgelegt am 28.04.2008.
- [G5] JAHNEL, MATTHIAS: Diplomarbeit: „Bestimmung charakteristischer Parameter zur Vorhersage von Frühausfällen bei großflächigen organischen Leuchtdioden (OLED)“. Fraunhofer IPMS Dresden, Vorgelegt am 20.03.2008.
- [G6] SCHWOERER, WOLF: Organische Molekulare Festkörper-Einführung in die Physik von π -Systemen. - Weinheim: WILEY-VCH, 2005.

World Wide Web:

- [G7] Elektronik-Kompendium. URL: <http://www.elektronik-kompendium.de/sites/bau/1208011.htm>. [Stand 06.01.2009]
- [G8] RWTH Aachen: Organische Schichten. URL: <http://www.physik.rwth-aachen.de/institute/institut-ia/forschung/organische-Schichten/>. [Stand 10.09.2008]
- [G9] Technische Universität Darmstadt; Ernst-Berl-Institut für Technische und Makromolekulare Chemie. URL: http://www.makromolekulare-chemie.de/index.php?page=projectview&e_projnr=12&PHPSESSID=0b35e6361536400da743b5de8715bf38. [Stand 10.09.2008]
- [G10] World Intellectual Property Organization. URL: <http://www.wipo.int/pctdb/en/wo.jsp?IA=WO2003019697&DISPLAY=DESC>. [Stand 10.09.2008]

Kapitel 2.3 „Kleben“

Literatur:

[K1] BROCKMANN, GEISS; KLINGEN; SCHRÖDER: Klebtechnik – Klebstoffe, Anwendung und Verfahren. - 5.Auflage. - Weinheim: WILEY-VCH, 2005.

[K2] DELO: Bond it - Nachschlagewerk zur Klebtechnik. - 3.Auflage. - Bobingen: 2002.

[K3] DIMTER, LOTHAR: Klebstoffe für Plaste. - 2., überarbeitete Auflage. - Leipzig: VEB-Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1969.

[K4] ENDLICH, WILHELM: Kleb- und Dichtstoffe in der modernen Technik. - Essen: W. Girardet, 1980.

[K5] ENDLICH, WILHELM: Zukunftsorientierte Klebstoffe für Metall- und Nichtmetallverbindungen. In: Haus der Technik Fachbuchreihe. - Essen: Vulkan, 1991.

[K6] HABENICHT, GERD: Kleben - Grundlagen, Technologien, Anwendungen. - 5.Auflage. - Berlin/Heidelberg: Springer, 2006.

[K7] LUDECK, WOLFGANG: Handbuch der Kleb- Gieß- und Laminieretechnik. - 2.Auflage. - Leipzig: VEB-Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1979.

[K8] WAKE W.C.: Adhesion and the Formulation of Adhesives. - 2.Auflage. - Applied Sciences Publishers, 1982.

World Wide Web:

[K9] Best Klebstoffe GmbH und Co. KG: Produktinformation BEST-KL

lichttaushärtende Epoxidharze. URL:

<http://www.bestklebstoffe.de/media/datenblaetter/INFO->

[KLallgemeinRev002.pdf?PHPSESSID=e479a5409f715333472764f9dcadf5a6](http://www.bestklebstoffe.de/media/datenblaetter/INFO-KLallgemeinRev002.pdf?PHPSESSID=e479a5409f715333472764f9dcadf5a6). Revision 002 [Stand 23.12.2004]

[K10] LENSSEN, DANIEL: Fachartikel: Klebstoffe zur Versiegelung von OLED-Displays. URL: <http://www.delo.de/cont/pdf/fachartikel/OLED.pdf>. DELO Industrieklebstoffe. [Stand 01/08]

Kapitel 2.4 „Folien“

Literatur:

[F1] NENTWIG, JOACHIM: Kunststoff-Folien Herstellung-Eigenschaften-Anwendung. - 3.Auflage. - Wien, München: Carl-Hanser, 2006.

[F2] SCHWISTER, KARL: Taschenbuch der Chemie. - 2.Auflage. - Leipzig: Fachbuchverlag Leipzig im Carl-Hanser-Verlag, 1999.

World Wide Web:

[F3] ATI - Anwendungstechnische Informationen: Datenblatt Makrofol BL. URL: <http://pc-films.com/pc-films/emea/de/produktinformationen/makrofol/datenblaetter/docId-1846/A7004.pdf>. [Stand 07.04.2009]

[F4] epurex films GmbH & Co. KG. URL: <http://www.epurex.de/anwendungen/sicherheit.html>. [Stand 05.04.2009]

[F5] Fil Protect. URL: <http://www.filprotect.de/pet-schutzfolie.html>. [Stand 04.04.2009]

[F6] Goodfellow GmbH. URL: <http://www.goodfellow.com/G/Polycarbonat.html>. [Stand 04.04.2009]

[F7] Goodfellow GmbH. URL: <http://www.goodfellow.com/G/Polyethylenphthalat.html>. [Stand 04.04.2009]

[F8] Goodfellow GmbH. URL: <http://www.goodfellow.com/G/Polyethylenterephthalat.html>. [Stand 04.04.2009]

[F9] Mecadi GmbH: Permeation&Polymere. URL: <http://www.mecadi.com/de-enzyklopedia-pen.htm>. [Stand 04.04.2009]

[F10] Mecadi GmbH: Permeation&Polymere. URL: <http://www.mecadi.com/de-enzyklopedia-PET.htm#PET>. [Stand 04.04.2009]

[F11] Verein PRS PET-Recycling Schweiz. URL: <http://www.petrecycling.ch/index.cfm?rub=267>. [Stand 04.04.2009]

Kapitel 3 “Laminatoren”

Literatur:

[L1] Operations Technology Inc.: OPTEK DPL-24 Users Guide; Blairstown USA [Stand: 06.01.2004]

Kapitel 4 „Versuche“

Literatur:

[V1] HOFFMANN, MICHAEL: „Durchbiegung von Deckgläsern“. Fraunhofer IPMS Dresden, 2007.

Bildquellen:

Literatur:

[B1] HOFFMANN, MICHAEL: Vorlesung „Organische Halbleiter“. IPMS, 27.04.2007.

[B2] Operations Technology Inc.: OPTEK DPL-24 Users Guide; S.5-7. Blairstown USA, 06.01.2004.

World Wide Web:

[B3] FH Frankfurt am Main - Fb. 2, Stg. Verfahrenstechnik: Vorlesungsskript – Polymerchemie URL: <http://chemie.fb2.fh-frankfurt.de/KKC-Vorlesung/inhalt-KKC.htm> [Stand 18.04.2009]

[B4] LENSSEN, DANIEL: Fachartikel: Klebstoffe zur Versiegelung von OLED-Displays. URL: <http://www.delo.de/cont/pdf/fachartikel/OLED.pdf>. S. 5; DELO Industrieklebstoffe [Stand 01/08]

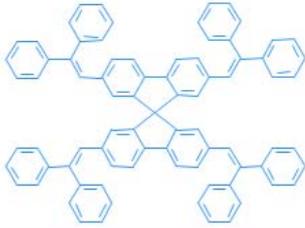
Sonstiges:

Literatur:

[S1] BILITEWSKY, BERND: Abfallwirtschaft: Handbuch für Praxis und Lehre. - 3.Auflage. - Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2000.

Anhang

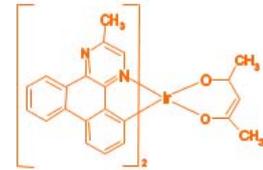
[A1] Emittiermoleküle



fluoreszent blau Spiro-DPVBi



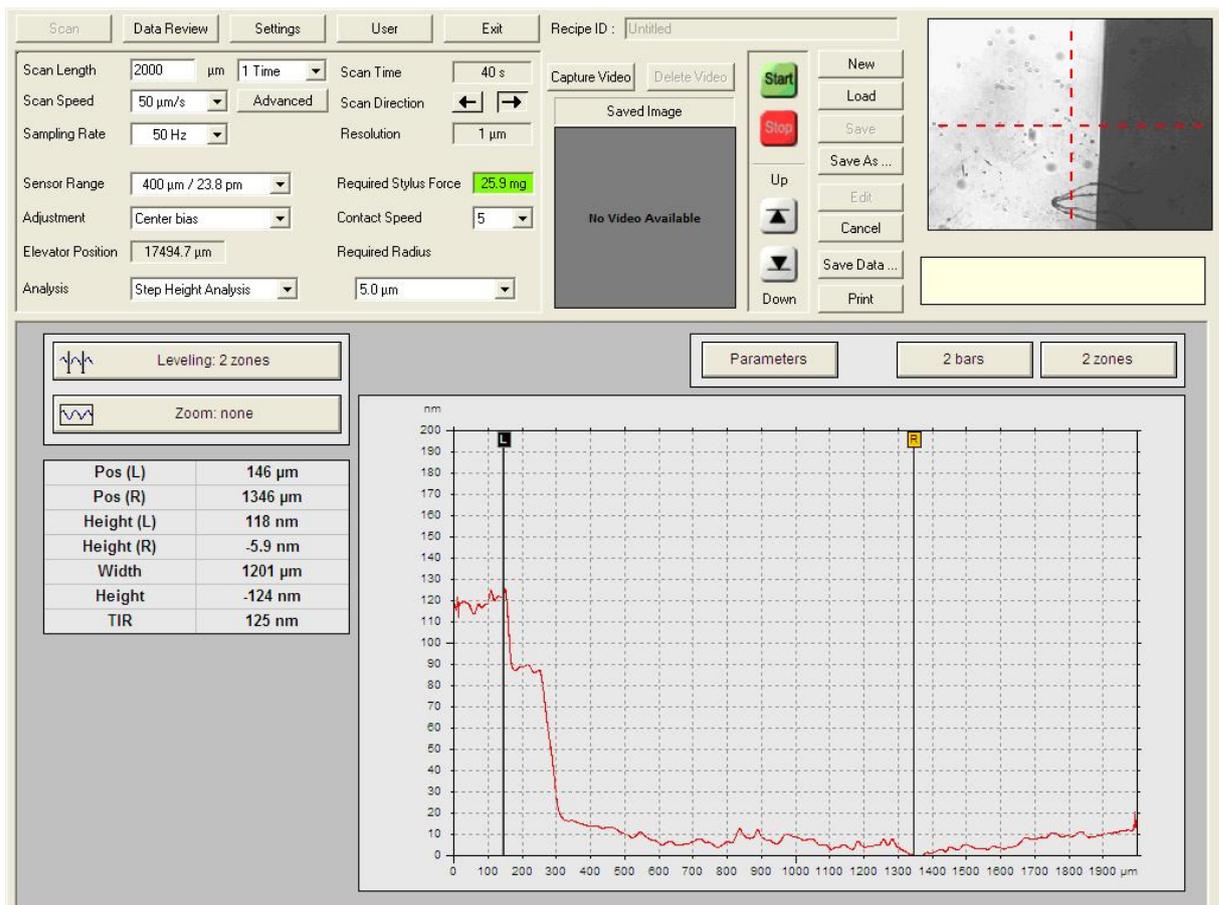
phosph. grün Ir(ppy)₃



phosph. rot Ir(MDQ)₂(acac)

Blaues Licht kann bisher nur aus dem Singulett-Zustand emittiert werden, was dem Prozess der Fluoreszenz unterliegt. Grünes und rotes Licht hingegen kann aus dem wahrscheinlicher auftretenden Triplett-Zustand eines Exziton emittiert werden. Dieser Vorgang der Emission heißt Phosphoreszenz.

[A2] Schichtdickenmessung einer bedampften Aluminiumschicht



➔ Höhendifferenz beträgt 124 nm (linke Tabelle neben dem Graphen)

Vorläufiges Technisches Datenblatt



Produktinformation: G- 4107 ER/WS

Produktbeschreibung: Kaltlaminatfolie, doppelseitig klebend
Inneneinsatz

Anwendungsbereich: Selbstklebend ausgerüstete grafische Trägermaterialien.

Klebstofftyp: **ER: Removable; modifizierter Acrylatkleber**
Der Kleber ER ist ein lösemittelfreier Acrylat-Kleber auf Basis wässriger Dispersionen. Die relativ geringe Anfangsklebkraft läßt eine Repositionierung zu und baut sich auch nach längerer Verklebungsdauer nur äußerst geringfügig auf.

WS: Permanent; Reinacrylatkleber
Der WS-Kleber ist ein lösemittelfreier, hochkohäsiver Reinacrylatkleber. Er zeichnet sich durch eine aufbauende Klebkraft aus und ist besonders für Anwendungen geeignet, bei denen eine hohe Scherfestigkeit gefordert wird. Er besitzt eine hervorragende Beständigkeit gegen Feuchte und Lösemittel und er hat ein gutes Alterungsverhalten. Mit diesem Kleber selbstklebend ausgerüstete Materialien sind bei der Verarbeitung auf vielen Oberflächen repositionierbar.

Produktaufbau:

Träger	PET-Folie, 12 µm, transparent
Interliner	Glassine Papier, weiß, 92 g/m ²
Klebergewicht	60 g/m ²
Gesamtstärke	0,07 mm

Eigenschaften:

	ER:	WS:
Schälkraft auf Stahl, 20 min. Kontaktzeit <small>(In Anlehnung an FINAT-FTM1, AFERA 5001)</small>	min.	min. 4 N / 25mm
Schälkraft auf Stahl, 24h Kontaktzeit <small>(In Anlehnung an FINAT-FTM1, AFERA 5001)</small>	< 1	min. 8 N / 25mm
Temperaturbeständigkeit	von -40 °C bis +90 °C	
Empfohlene Verklebungstemperatur	> 15 °C	

Lieferbare Breiten: 1000 mm (weitere Abmessungen auf Anfrage)

Hinweis:

Alle unsere Produkte werden einer strengen Qualitätskontrolle, im Rahmen unseres QM-Systems nach ISO/TS 16949, DIN EN ISO 9001 und DIN EN ISO 14001, unterzogen. Die Angaben basieren auf unseren derzeitigen Kenntnissen und Erfahrungen. Sie betreffen den Verarbeiter wegen der Fülle möglicher Einflüsse bei der Verarbeitung und Anwendung unserer Produkte jedoch nicht von eigenen Prüfungen und Versuchen. Etwalge Schutzrechte sowie bestehende Bestimmungen sind vom Verarbeiter unserer Produkte in eigener Verantwortung zu beachten. Unsere Anwendungstechnik steht Ihnen bei Eignungsprüfungen auf Originalmaterialien gerne beratend zur Verfügung.

Erstellung:
D.A. / 2005-11-28
Letzte Änderung:
P.S. / 2007-12-19

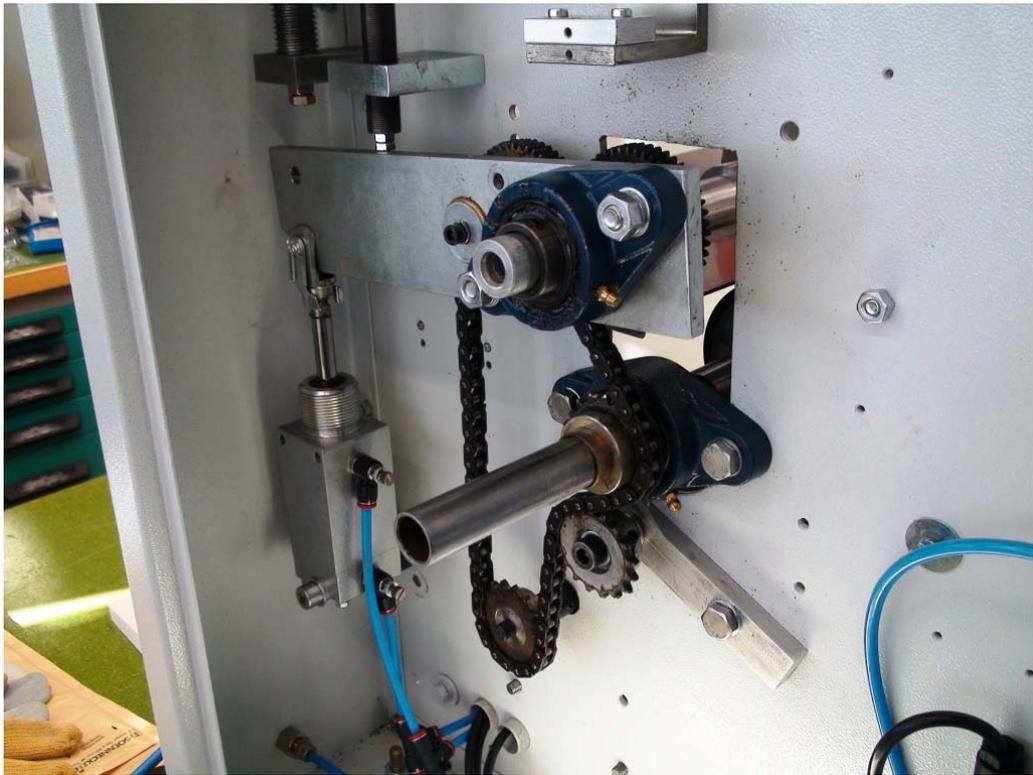
[A4] Rollenein- und auslauf eines Laminators



[A5] Spalt zwischen oberer und unterer Laminierwalze

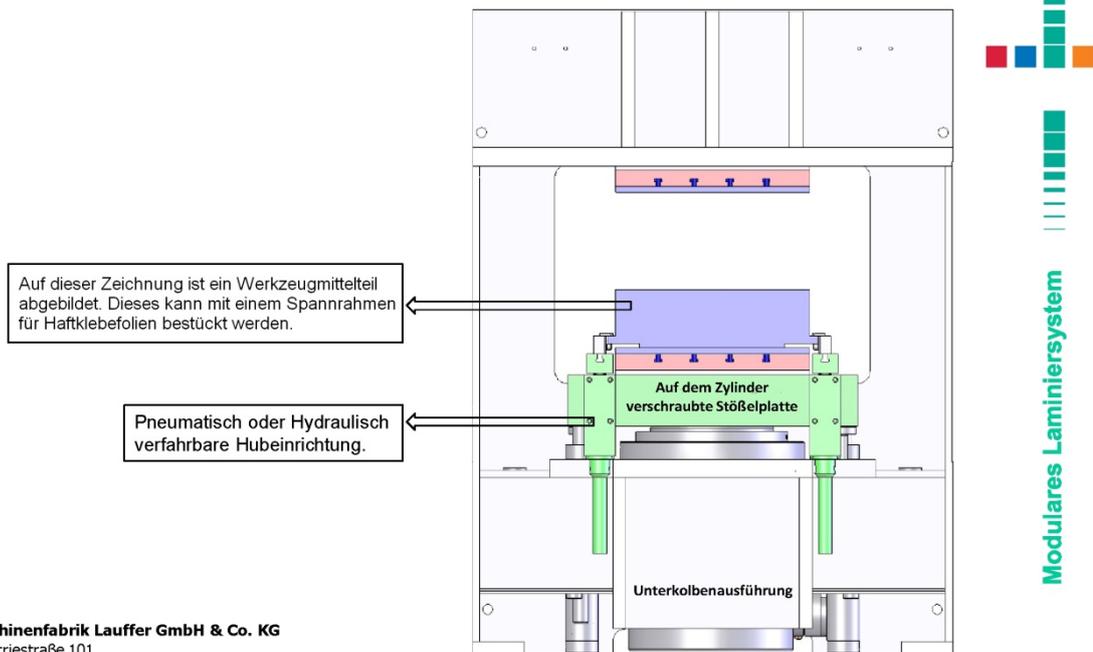


[A6] Innere Ansicht eines Laminators



[A7] Spezialvakuumlaminiator mit Werkzeugmittelteil für das Applizieren von Haftklebefolien

Hubeinrichtung in Vakuumkammer



Maschinenfabrik Lauffer GmbH & Co. KG
Industriestraße 101
72160 Horb am Neckar
Tel. +49 (0) 7451 – 902 201
Fax +49 (0) 7451 – 902 109

LAUFFER
PRESSEN

Danksagung

Ich möchte mich recht herzlich bei meinem Betreuer der FH-Mittweida, Prof. Dr.-Ing. Michael Hösel und meinem Betreuer am Institut für photonische Mikrosysteme der Fraunhofer Gesellschaft in Dresden, Dipl.-Ing. Lars Ahlrichs, für deren stets hilfreichen Rat und die Unterstützung bedanken.

Weiterhin möchte ich mich bei allen Mitarbeitern und Mitarbeiterinnen der Abteilung Organische Materialien und Systeme für das sehr kooperative und freundliche Arbeitsklima am Fraunhofer IPMS Dresden bedanken. Die vielfältigen Tätigkeiten während der Anfertigung dieser Arbeit wären ohne die unmittelbare Unterstützung folgender Personen nicht möglich gewesen: Dr. Christian May, Dr. Michael Hoffmann, Christiane Grillberger, Frank Löffler, Christiane Trepte, Matthias Jähnel, Christan Schmidt, Rolf-Werner Gerdau und dem Operator-Team. Danke.

Ganz besonders möchte ich mich bei meinen Eltern und Großeltern bedanken, welche mir das Studium der Mikrosystemtechnik ermöglichten.

Zum Schluss danke ich Katharina Reh, Thea Lautenschläger, Michael Galow, Jakob Nawroth und Felix Pluta ganz herzlich für die kompetente Unterstützung im Laufe meiner Arbeit.

Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit zum Thema

Laminationsverfahren in der OLED-Fertigung

selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Quellen und Hilfsmittel angefertigt habe.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in dieser Arbeit berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz- Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften. [S1]

Dresden, 20. April 2009

Georg Lautenschläger