



Fraunhofer Institut für Organische Elektronik, Elektronenstrahl- und Plasmatechnik FEP

■ Mitarbeitende:	174
■ Gesamtbudget:	26,8 M€
■ Industrieerträge:	11,5 M€
■ Öffentliche Erträge:	7,82 M€
■ Investitionen:	1,6 M€

(March 2019)



Manuela Junghänel, 23. Mai 2019

© Fraunhofer FEP

Fraunhofer
FEP

Kernkompetenzen



**ELEKTRONENSTRAHL-
TECHNOLOGIEN**



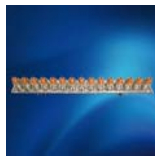
**PLASMAGESTÜTZTE
GROSSFLÄCHEN- UND
PRÄZISIONSBESCHICHTUNG**



ORGANISCHE ELEKTRONIK



**ROLLE-ZU-ROLLE-
TECHNOLOGIE**



**TECHNOLOGISCHE
SCHLÜSSELKOMPONENTEN**



IC-DESIGN

Manuela Junghänel, 23. Mai 2019

© Fraunhofer FEP

Fraunhofer
FEP

3

Inhalt

- I. Einführung zum Thema
- II. Anwendungsfelder für flexibles Glas
- III. Eigenschaften flexibles Glas
- IV. Prozessierung und Handling
- V. Abscheidung von funktionalen Schichten und Schichtsystemen durch Magnetron-Sputtern
- VI. Zusammenfassung

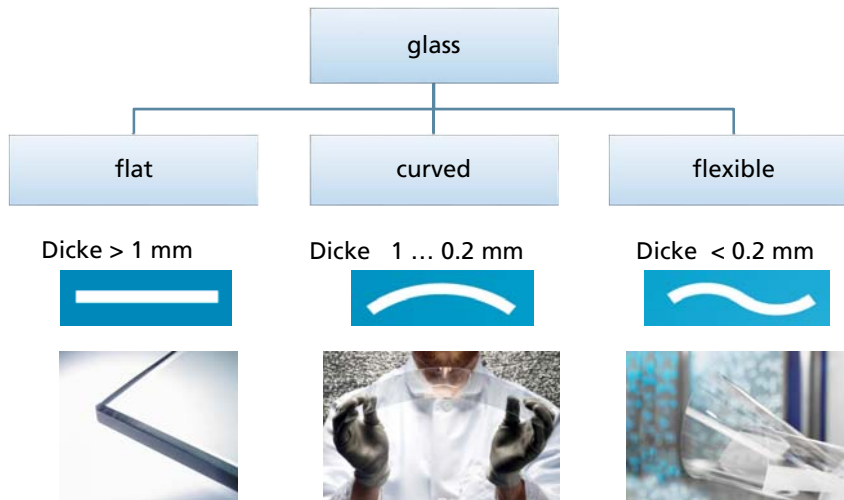
Manuela Junghänel, 23. Mai 2019

© Fraunhofer FEP

Fraunhofer
FEP

4

Einführung



Manuela Junghänel, 23. Mai 2019

© Fraunhofer FEP

Fraunhofer
FEP

Vielfalt an flexiblem Glas in FLEX-Anwendungen



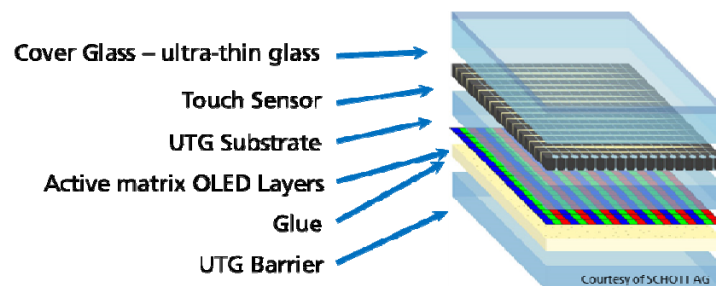
Manuela Junghänel, 23. Mai 2019

© Fraunhofer FEP

Fraunhofer
FEP

Anwendungsbeispiel: Display und Abdeckung

- Glas wird in neuen Formfaktorgeräten aufgrund seiner überlegenen Anwendungsleistung Verwendung finden.
- Glas zeigt eine hervorragende Haptik mit hoher Kratzfestigkeit.
- UTG ermöglicht höchste optische Qualität, längere Lebensdauer und zuverlässige OLED-Displays aufgrund der hohen Temperaturbeständigkeit während der Verarbeitung und der unübertroffenen Barriereigenschaften.



page 7
Manuela Junghänel, 3rd mini-ICCG, 4-5 April 2019, Aoyama-Gakuin University, Shibuya, Tokyo, Japan
© Fraunhofer FEP



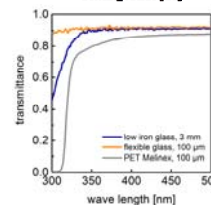
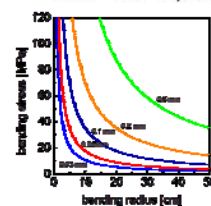
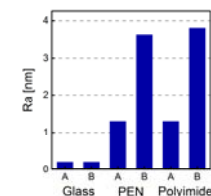
Eigenschaften

Glas Dicke < 200 µm → flexibles Glas

- Ultra-dünn
- Hohe Transparenz
- Hervorragende Oberflächenqualität
- Perfekte Wasserdampf- und Sauerstoff-Hermetizität
- Hochtemperaturverarbeitung
- Geringe Oberflächenrauigkeit - Ästhetik

- Dichte von Glas: 2500 kg/m³ (Kalk-Natron-Glas)

	Masse von 1 m ²
3mm dickes Glas	7.5 kg
100 µm dickes Glas	0.25 kg



Manuela Junghänel, 23. Mai 2019

© Fraunhofer FEP



Eigenschaften

Wichtigste Hersteller

- Nippon Electric Glass Co., Ltd.: G-Leaf™
- Asahi Glass Co., Ltd.: SPOOL™
- Corning Inc.: Corning® Willow® Glass
- Schott AG: AF 32 eco , D 263 eco, AS 87 eco

Manuela Junghänel, 23. Mai 2019

© Fraunhofer FEP

9

Eigenschaften

	Corning® Willow® Glass	NEG G-Leaf™	AGC Spool™	Schott AF 32® eco	Schott D 263® T eco	Schott AS 87® eco
Dichte [g/cm³]	2.3 - 2.5	2.46	2.51	2.43	2.51	2.46
CTE [K ⁻¹]	3 - 5 x 10 ⁻⁶	3.8 x 10 ⁻⁶	3.8 x 10 ⁻⁶	3.2 x 10 ⁻⁶	7.2 x 10 ⁻⁶	8.7 x 10 ⁻⁶
Tg [°C]				717	557	621
Thicknesses [µm]	200; 100; (50)	100; 70; 50; 30	200; 100; 50	100; 70; 50; 25	100; 70; 50; 25	100, 145, 175, 210, 250, 330, 350, 400
Glass width of rolls	max. 1.3 m	0.6 m (1 m)		max. 0.5 m	max. 0.5 m	rectangular: 5~580 round: Ø 50~410

- Die wichtigsten Daten stammen aus Datenblättern

Manuela Junghänel, 23. Mai 2019

© Fraunhofer FEP

10

Eigenschaften

	Corning® Willow® Glass	NEG G-Leaf™	AGC Spool™	Schott AF 32® eco	Schott D 263® T eco	Schott AS 87® eco
n @ 587.6 nm	1.52	1.52 /	1.52	1.5255	1.5231	1.5040
k @ 587.6 nm	2.43×10^{-7}	2.16×10^{-7}		2.4×10^{-7}	7.11×10^{-8}	
T @ 587.6 nm für 100 µm Glas	92.2	92.1		92.4	91.7	92.1

- Die wichtigsten Daten stammen aus Datenblättern der Hersteller.
- Messung für T mit Lambda 950 (Perkin Elmer)
- Berechnung von n und k durch CODE-Software

Manuela Junghänel, 23. Mai 2019

© Fraunhofer FEP

 **Fraunhofer**
FEP

11

Eigenschaften

	Corning® Willow® Glass	NEG G-Leaf™	AGC Spool™	Schott AF 32® eco	Schott D 263® T eco	Schott AS 87® eco
E-Modul [GPa]	70 - 80	73	77	66	72,9	73.3
Ober- flächen- rauheit RMS	$R_a < 0.5 \text{ nm}$		$R_a < 0.2 \text{ nm}$	$< 1 \text{ nm}$	$< 1 \text{ nm}$	< 0.5
Dicken- toleranz		$\pm 10 \text{ µm}$		$\pm 10 \text{ µm}$	$\pm 10 \text{ µm}$	$\pm 10 \text{ µm}$

- Die wichtigsten Daten stammen aus Datenblättern

Manuela Junghänel, 23. Mai 2019

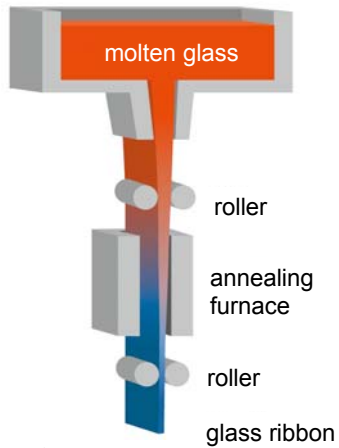
© Fraunhofer FEP

 **Fraunhofer**
FEP

12

Herstellungsmethoden

Down-Draw Prozess

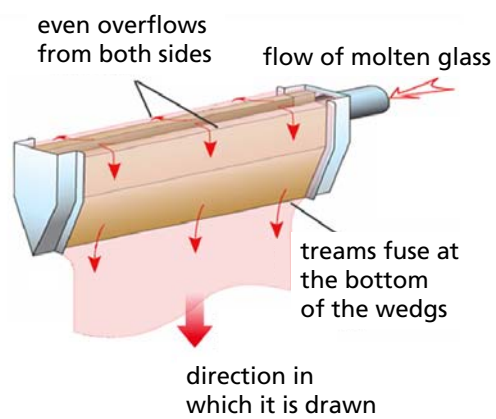


www.schott.com

Manuela Junghänel, 23. Mai 2019

© Fraunhofer FEP

Overflow Prozess



www.neg.co.jp

13

Fraunhofer
FEP

Die Zerbrechlichkeit von Glas



Courtesy of Lucas Junghänel, 2018

Manuela Junghänel, 23. Mai 2019

© Fraunhofer FEP

Fraunhofer
FEP

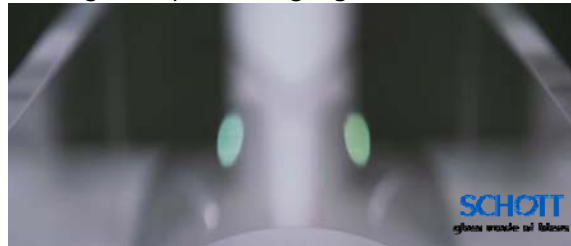
14

Herausforderungen in Verarbeitung von flexiblem Glas

Main challenges:

- Verbesserung der Zuverlässigkeit
 - Reduzierung des Biegeradius
- Schlüssel ist die Dickenreduzierung
- Belastung des Glases
 - Stress-Control: Zug, Druck, Druck
- Prozessablauf: Substrathandling, Transport, Reinigung, Schneiden, Beschichtungen

Biegen, Kombination von Spannungen



Manuela Junghänel, 23. Mai 2019

© Fraunhofer FEP

Fraunhofer
FEP

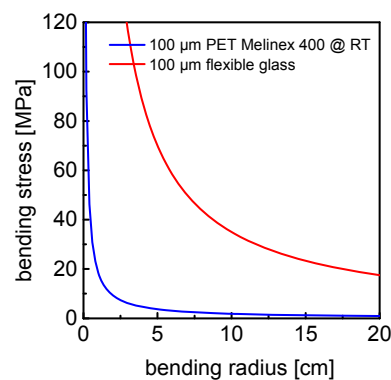
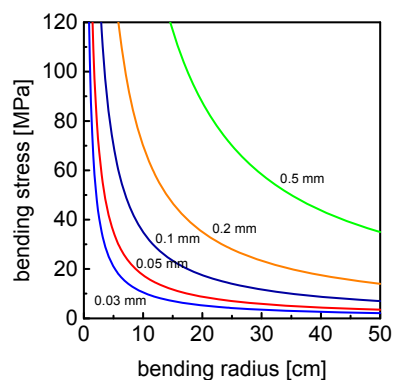
15

Eigenschaften von flexiblem Glas - Biegen von Glas

Berechnung der Biegespannung

$$\sigma = \frac{\left(E \cdot \frac{d}{2}\right)}{r}$$

σ ... Biegespannung
E ... Elastizitätsmodul
d ... Substratdicke
r ... Biegeradius



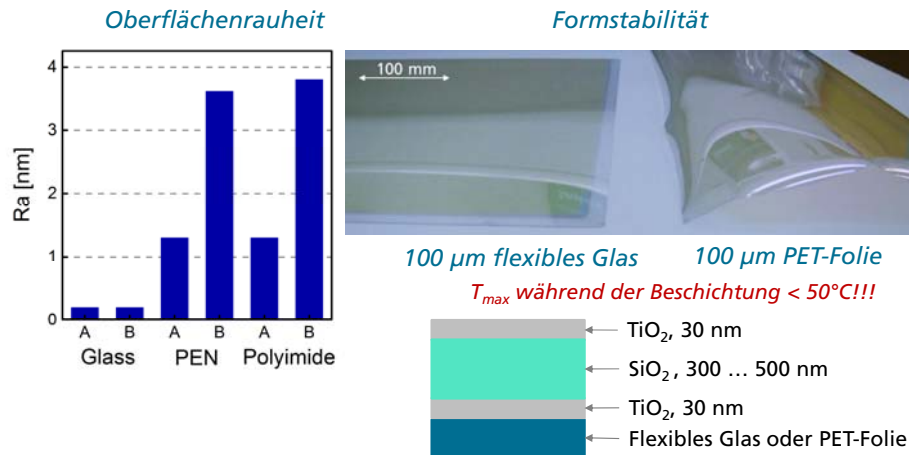
Manuela Junghänel, 23. Mai 2019

© Fraunhofer FEP

Fraunhofer
FEP

16

Eigenschaften von flexiblem Glas

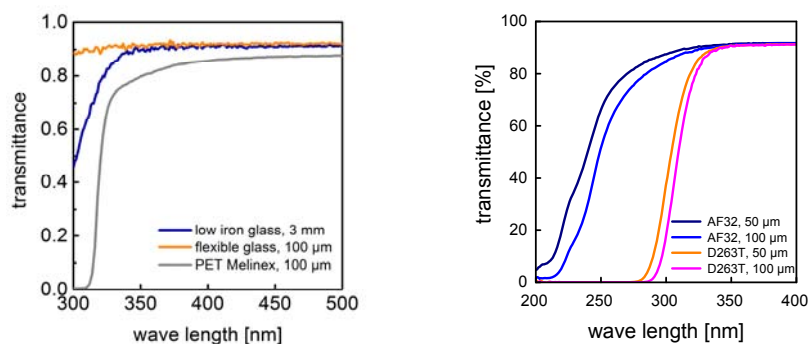


Manuela Junghänel, 23. Mai 2019

© Fraunhofer FEP

17

Eigenschaften von flexiblem Glas - Transmissionsgrad



Schott Produkt	AF32eco	D263Teco
CTE (20 - 300 °C) x10 ⁻⁶ /°K	3.2	7.2
Tg [°C]	715	557
Alkali-Gehalt	no	yes

Manuela Junghänel, 23. Mai 2019

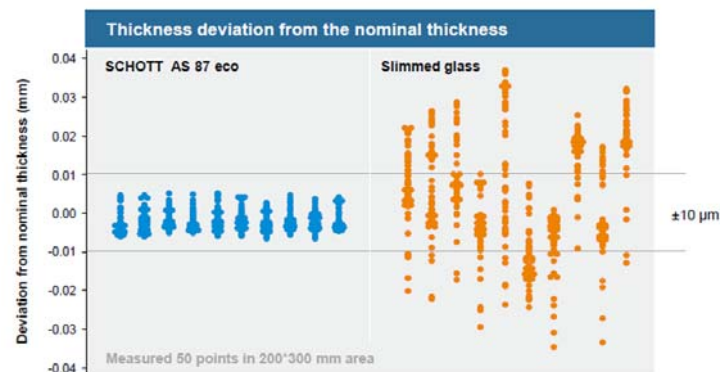
© Fraunhofer FEP

18

Eigenschaften von flexiblem Glas - Oberfläche

SCHOTT
glass made of ideas

- Es ist kein Nachbearbeiten oder Polieren erforderlich.
- Stand der Technik: Dünnglas hat eine Dickentoleranz von $\pm > 25 \mu\text{m}$.



M. Jotz et al., VISION | Flexible Glass, Proceedings, 2017

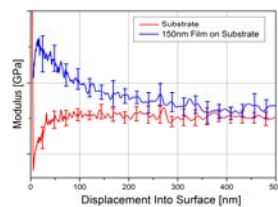
Manuela Junghänel, 23. Mai 2019

© Fraunhofer FEP

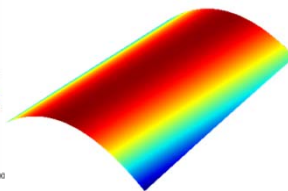
Fraunhofer
FEP

Mechanische Charakterisierung von flexiblem Glas Charakterisierung von Substraten - Ausgangszustand

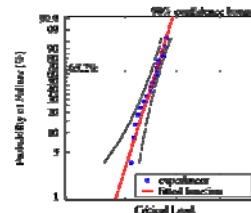
- Analyse zur Definition des Ausgangszustandes vor der PVD-Beschichtung
- Messung von:
 - Oberflächenhärte und E-Modul - Nano-Indentation
 - Oberflächentopologie - Weißlichtinterferometrie
 - Bruchfestigkeit der Probenoberfläche - beide Glasseiten



Indentation



Stress-Messungen



Festigkeitsprüfung

Manuela Junghänel, 23. Mai 2019

© Fraunhofer FEP

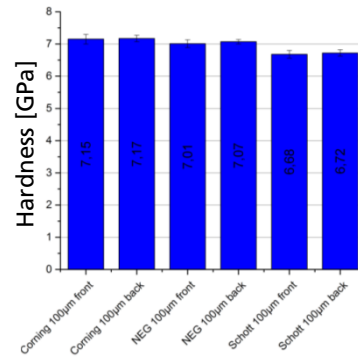
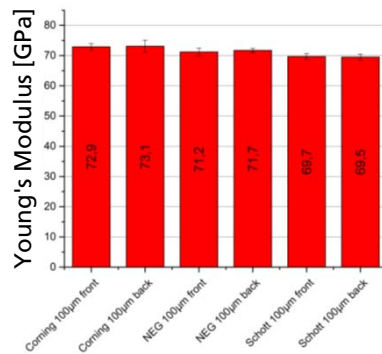
Fraunhofer
IMWS

Fraunhofer
FEP

Eigenschaften von flexiblem Glas

E-Modul und Härte

- E-Modul im Bereich von (70 ... 73) GPa
- Härte im Bereich von (6.7 ... 7.2) GPa



Manuela Junghänel, 23. Mai 2019

© Fraunhofer FEP

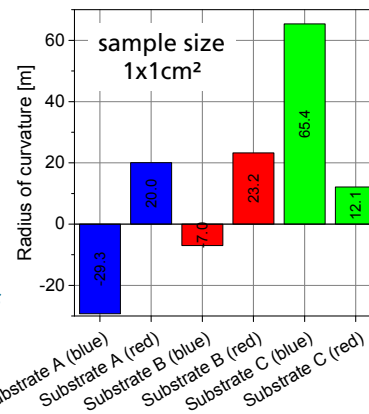
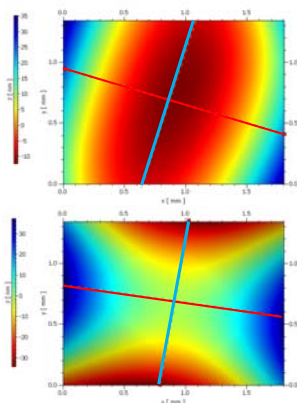
Fraunhofer
CAM

Fraunhofer
FEP

21

Mechanische Charakterisierung von flexiblem Glas: Oberflächentopologie (Substratkrümmung)

- WLI-Messung der Oberfläche (Referenz zur Spannungsschätzung):



- Eine signifikante Verformung aller Proben typen kann gemessen werden.

Manuela Junghänel, 23. Mai 2019

© Fraunhofer FEP

Fraunhofer
IMWS

Fraunhofer
FEP

22

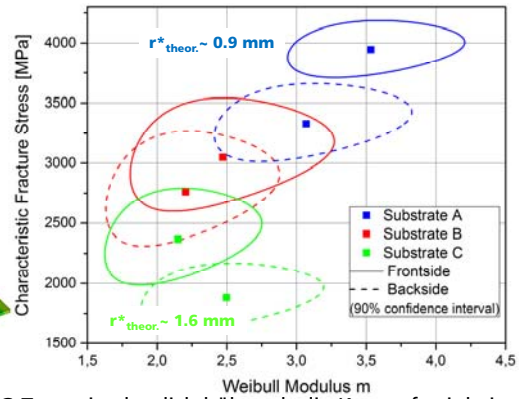
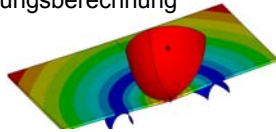
Mechanische Charakterisierung von flexiblem Glas:

Oberflächenbruchfestigkeiten

Kugel-Ring-Test:



Spannungsberechnung



- Die Oberflächenfestigkeit aller UTG-Typen ist deutlich höher als die Kantenfestigkeit.
- Unterschiede der Oberflächenfestigkeit zwischen den Probentypen von ca. 65%.
- Es kann von einem theor. max. Biegeradius von 0,9-1,6 mm der Oberfläche ausgegangen werden.

Manuela Junghänel, 23. Mai 2019

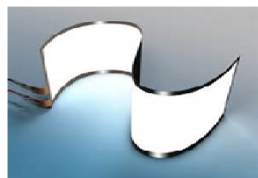
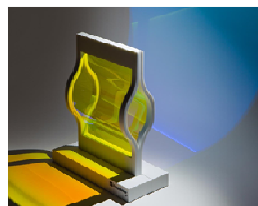
© Fraunhofer FEP

Fraunhofer
IMWS

Fraunhofer
FEP

F&E-Plattform für flexibles Glas @ Fraunhofer FEP

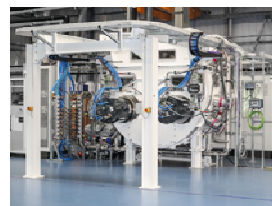
Inorganic thin-films
Organic devices



sheet-to-sheet processes



roll-to-roll processes



Manuela Junghänel, 23. Mai 2019

© Fraunhofer FEP

Fraunhofer
FEP

S2S Inline-Beschichtung von flexiblem Glas



© 2010 Fraunhofer FEP

- PVD und PECVD
- Ursprünglich für starre Substrate (Glas, Kunststoff, Metalle)
- Geeignet für flexibles Glas max. 600 x 600 mm²,
- Dicke ≤ 200 µm
- Kathodenlänge 750 mm und 900 mm
- DC- und PMS-Sputtern (Standardmethoden)
- Deposition @ RT,
- heizen
- Nachbehandlung durch die FLA

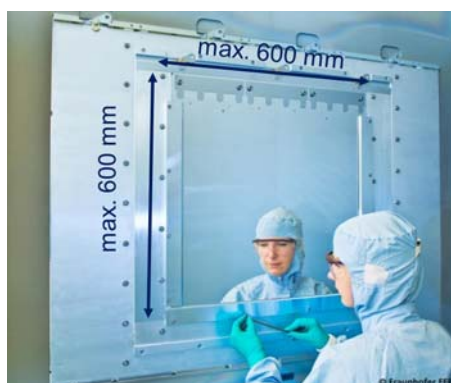
Manuela Junghänel, 23. Mai 2019

© Fraunhofer FEP

Fraunhofer
FEP

25

S2S Inline-Beschichtung von flexiblem Glas



600 x 600 mm² Substrat auf S2S-Träger
mit ≤ 200 µm Corning® Willow® Glas



ITO-beschichtetes 600 x 600 mm²
Substrat ≤ 200 µm Corning® Willow®
Glas, nach der Beschichtung

Manuela Junghänel, 23. Mai 2019

© Fraunhofer FEP

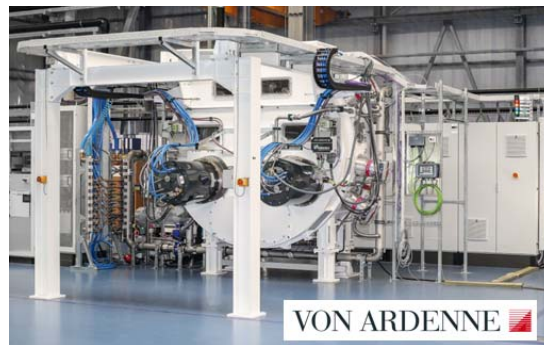
Fraunhofer
FEP

26

R2R Vakuumbeschichtung von flexiblem Glas

- Rolle-zu-Rolle Vakuum-beschichtungsanlage
- Spezielles Wickelsystem für UTG-Handling
- Substratbreite: 330 mm
- Substratdicke: 50-100 µm
- Beschichtungstemperatur: max. 350 °C
- Rollen berühren das Glas nur auf der Rückseite
- *Anwendungsbeispiele*
- ITO für OLED, für Touchscreen
- IMI, AR

VON ARDENNE FOSA LabX



Manuela Junghänel, 23. Mai 2019

© Fraunhofer FEP

VON ARDENNE

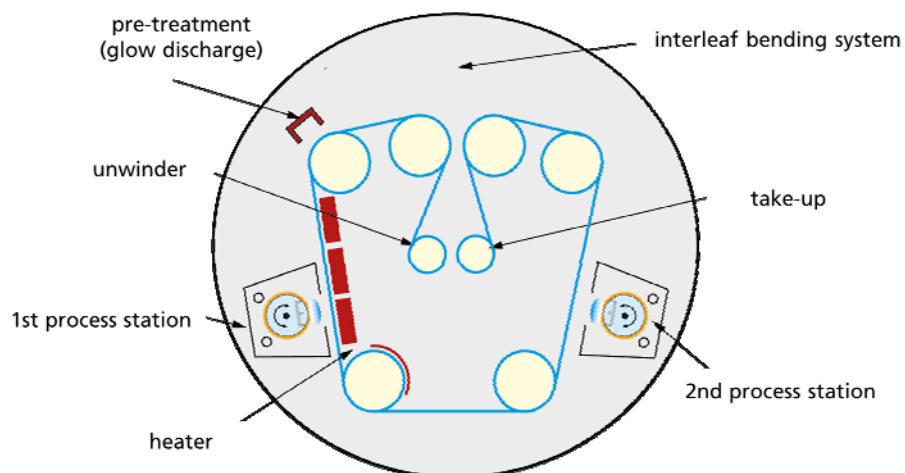


KONFEKT (FKZ 13N13818)

Fraunhofer FEP

27

R2R-Verarbeitung anorganischer Schichten auf UTG FOSA LabX 330 Glass - Maschinenschema



Manuela Junghänel, 23. Mai 2019

© Fraunhofer FEP

VON ARDENNE



KONFEKT (FKZ 13N13818)

Fraunhofer FEP

28

R2R-Verarbeitung anorganischer Schichten auf UTG



Manuela Junghänel, 23. Mai 2019

© Fraunhofer FEP





 BMBF – KONFEKT (FKZ 13N13818)

29

Beispiele für Funktionalisierung mit PVD-Schichten

- Magnetron-Sputtern
- ITO-Schichten
- AR-Schichten
- Kantenfilter

Manuela Junghänel, 23. Mai 2019

© Fraunhofer FEP

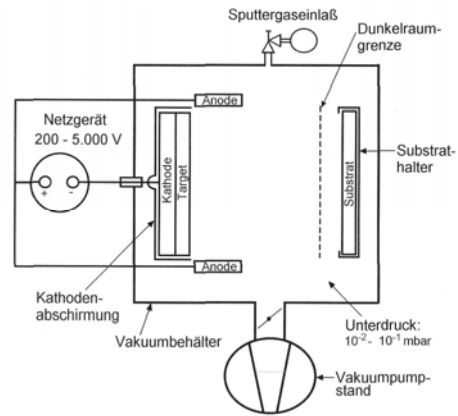
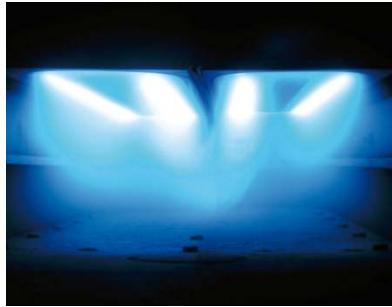


30

Magnetronsputtern

Sputtern

- Sputtern = Überführung in den vierten Aggregatzustand (fest $\Rightarrow$ dampfförmig + plasma) durch Energieeintrag



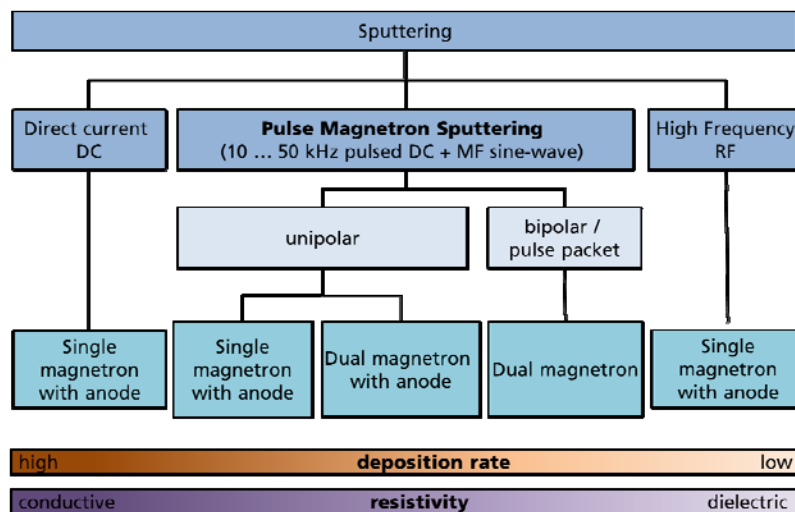
Quelle: H.J. Gläser Dünnschichttechnologie auf Flachglas

Manuela Junghänel, 23. Mai 2019

© Fraunhofer FEP

Fraunhofer
FEP

Übersicht - verschiedene Sputterverfahren

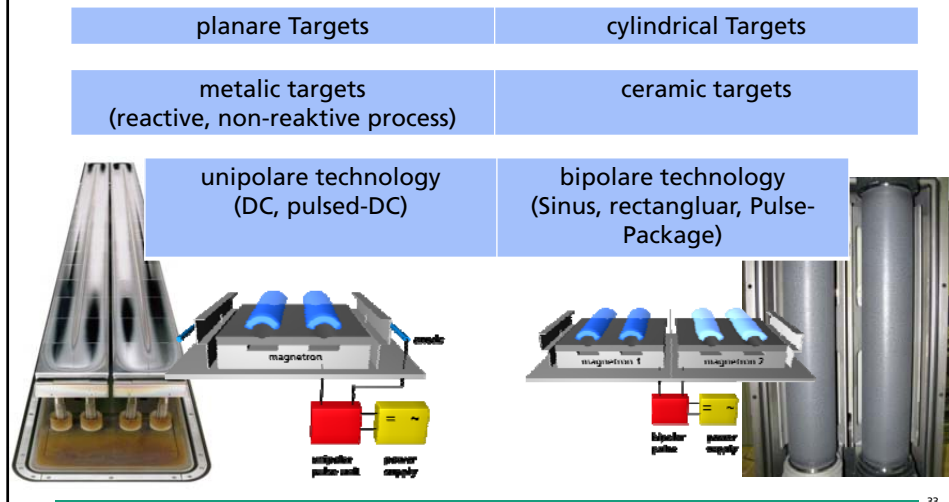


Manuela Junghänel, 23. Mai 2019

© Fraunhofer FEP

Fraunhofer
FEP

Magnetron-Sputtern



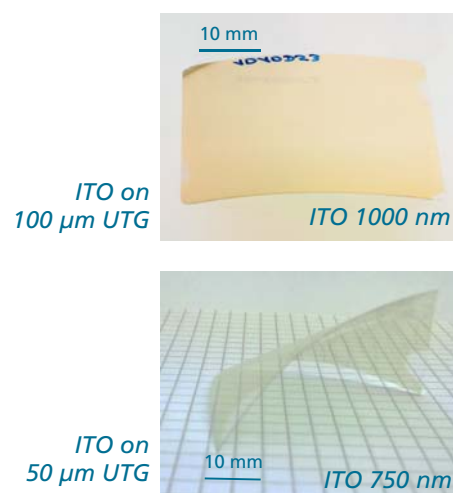
Manuela Junghänel, 23. Mai 2019

© Fraunhofer FEP

ITO on flexible glass – stress management

Main factors:

- Process pressure
- Kind of powering
- Reactive working point
- Layer Thickness
- Process temperature
- ...



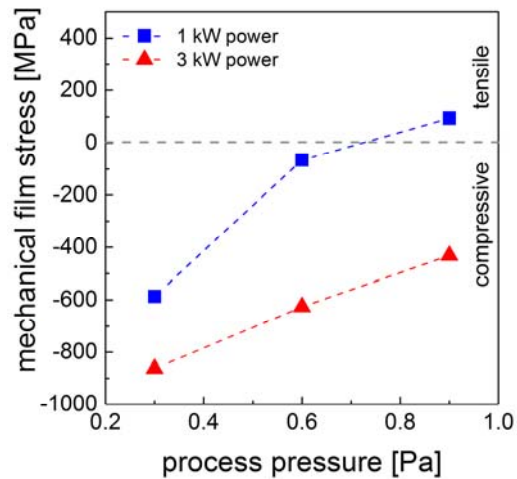
Manuela Junghänel, 23. Mai 2019

© Fraunhofer FEP

ITO on ultra-thin flexible glass – stress management

ITO thin-films:

- $d \sim 1000 \text{ nm}$
- $\rho \sim 2 \dots 5 \cdot 10^{-3} \Omega \text{cm}$



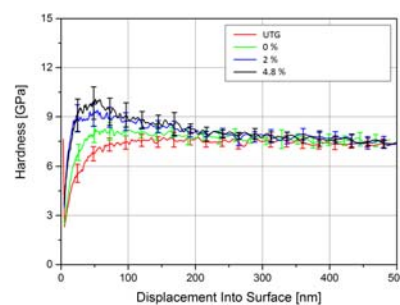
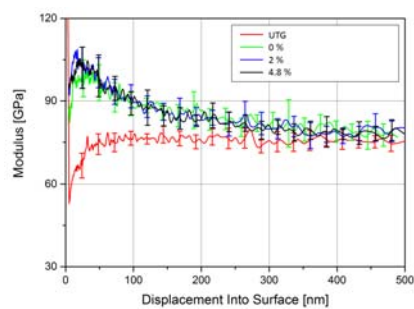
Manuela Junghänel, 23. Mai 2019

© Fraunhofer FEP

Fraunhofer
FEP

ITO on flexible glass – mechanical properties

Young's modulus and hardness of UTG and ITO coatings



- Thickness UTG 100 μm
- Thickness ITO $\sim 150 \text{ nm}$
- Oxygen gas content in sputtering gas 0...4.8%

Manuela Junghänel, 23. Mai 2019

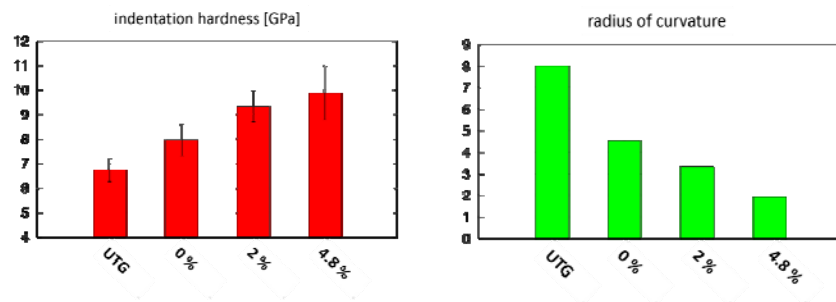
© Fraunhofer FEP

Fraunhofer
CAM

Fraunhofer
FEP

ITO on ultra-thin flexible glass – mechanical properties

Influence of the oxygen content in the sputtering gas on the hardness and radius of curvature.



- Thickness ultra-thin flexible glass 100 μm
- Thickness ITO ~ 150 nm
- Variation of oxygen gas content in sputtering gas 0...4.8%

Manuela Junghänel, 23. Mai 2019

© Fraunhofer FEP

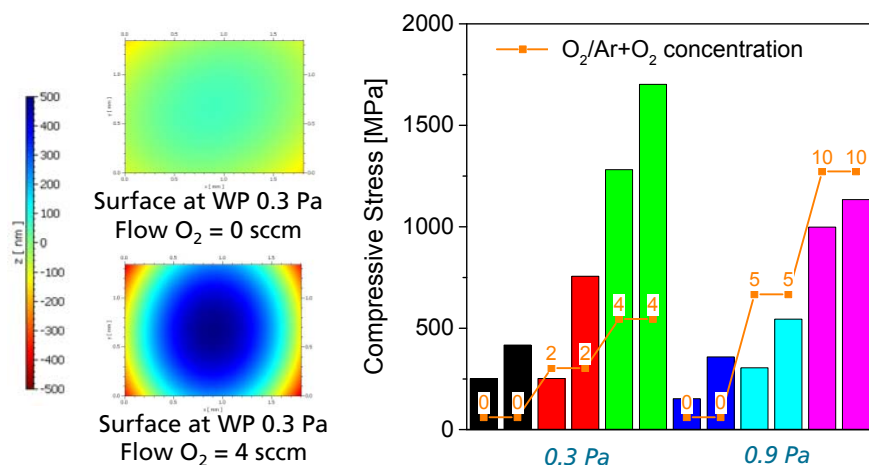
Fraunhofer
CAM

Fraunhofer
FEP

37

ITO on ultra-thin flexible glass – mechanical properties

- Curvature measurement (WLI) and stress after ITO deposition



Manuela Junghänel, 23. Mai 2019

© Fraunhofer FEP

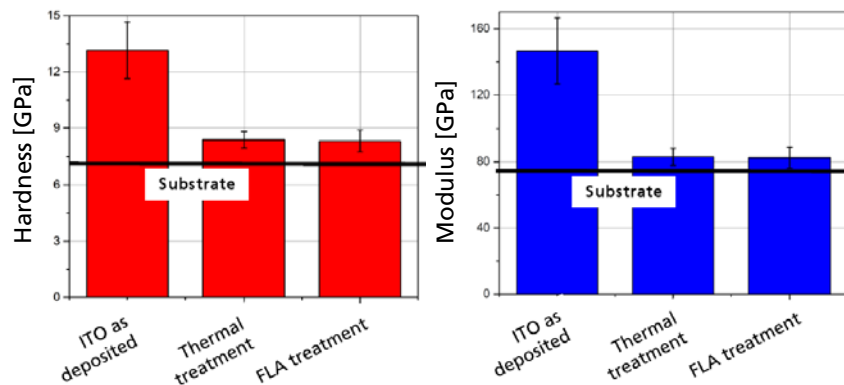
Fraunhofer
IMWS

Fraunhofer
FEP

38

ITO on ultra-thin flexible glass – mechanical properties

Influence of thermal annealing



- Using nano-indentation, a strong reduction of the ITO-hardness and the Youngs modulus is measured. The resulting parameter are in a comparable range to the initial substrate.

Manuela Junghänel, 23. Mai 2019

© Fraunhofer FEP

Fraunhofer
IMWS

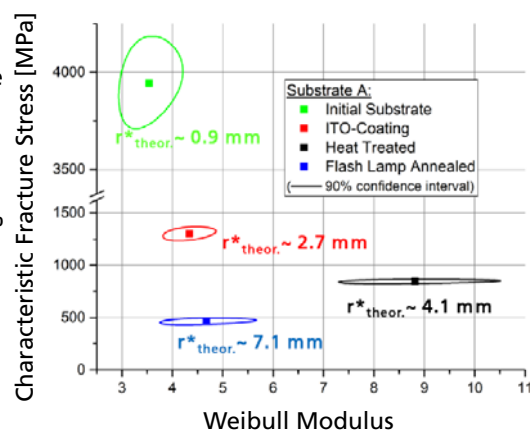
Fraunhofer
FEP

39

ITO on ultra-thin flexible glass – mechanical properties

Influence of thermal annealing

- Estimated influence of the post-annealing to the fracture strength
- A further reduction (~55% of the fracture strength



*) theoretical bending radius of the surface strength neglecting edge flaws (@100 μ m glass thickness)

Manuela Junghänel, 23. Mai 2019

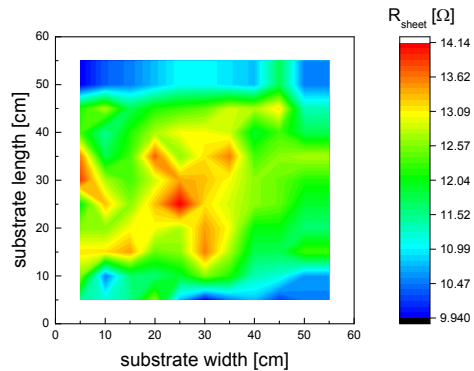
© Fraunhofer FEP

Fraunhofer
IMWS

Fraunhofer
FEP

40

“hot” ITO films on ultra-thin flexible glass



- 150 nm ITO on 200 μm Corning® Willow® Glass
- Substrate size: 600 x 600 mm²
- Thermal annealing in Vacuum @ 400°C after coating
- ITO properties: $R_{\text{sq.}} \sim 12 \Omega$ | $T_{\text{vis}} \sim 87.3\%$ | $\rho \sim 1.7 \cdot 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$

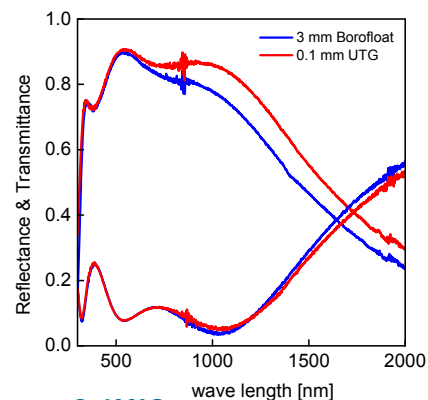
Manuela Junghänel, 23. Mai 2019

© Fraunhofer FEP

Fraunhofer
FEP

“hot” ITO films on ultra-thin flexible glass

	T_{vis} [%]	$R_{\text{sq.}}$ [Ω]
3 mm Borofloat	88.6	14.3
100 μm UTG on carrier glass	89.7	12.5



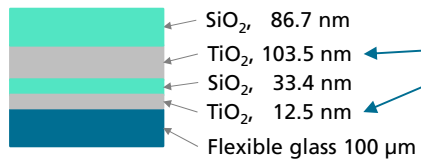
- Substrate size 360 x 400 mm² (Gen 2)
- 150 nm ITO film thickness
- Thermal annealing after coating in vacuum @ 400°C
- UTG on carrier glass – adhesive free technology by SCHOTT AG

Manuela Junghänel, 23. Mai 2019

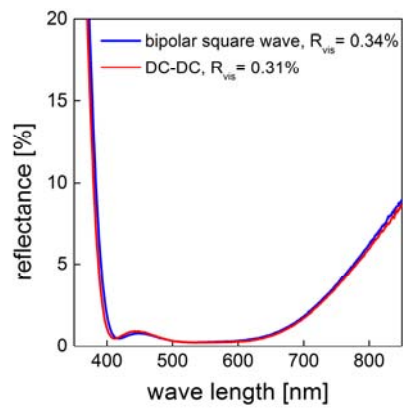
© Fraunhofer FEP

Fraunhofer
FEP

Anti-reflecting layer stack



*Bipolar square wave mode
and DC-DC mode*



Mechanical film stress

Process	Stress [MPa]
SiO ₂	-305
TiO ₂ , DC-DC mode	+155
TiO ₂ , square wave mode	-93
AR, with TiO ₂ in DC-DC	-75
AR, with TiO ₂ in square wave mode	-175

M. Junghänel et al., SVC 2014, Proceedings, Ref.-Id.: L-15

Manuela Junghänel, 23. Mai 2019

© Fraunhofer FEP

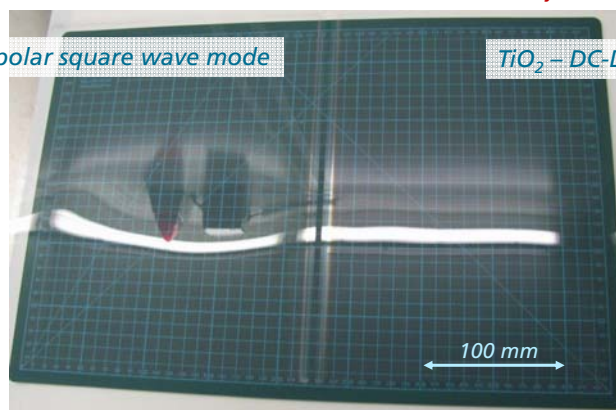
Fraunhofer
FEP

Example – AR Coatings on Corning® Willow® Glass

Only one side is coated!!!

TiO₂ – bipolar square wave mode

TiO₂ – DC-DC mode



film stress layer stack: -175 MPa

-75 MPa

M. Junghänel et al., SVC 2014, Proceedings, Ref.-Id.: L-15

Manuela Junghänel, 23. Mai 2019

© Fraunhofer FEP

V. Examples

Fraunhofer
FEP

Example – AR Coatings on ultra-thin flexible Glass

Anti-reflective coating on 50 μm flexible glass



Manuela Junghänel, 23. Mai 2019

© Fraunhofer FEP

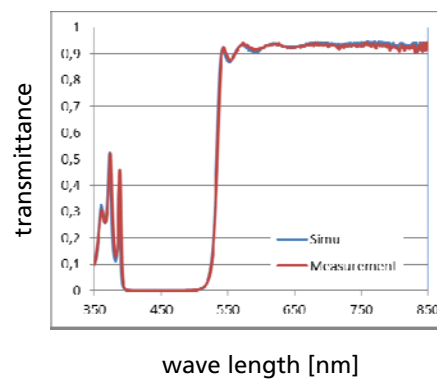
Fraunhofer
FEP

Example: Edge Filter on ultra-thin glass

Glass thickness 100 μm

Layer stack design

# layer no	Material	thickness [nm]
1	TiO ₂	35,4
2	SiO ₂	51,1
3	TiO ₂	53,6
4	SiO ₂	68,9
5	TiO ₂	45,1
6	SiO ₂	64,7
7	TiO ₂	51,3
8	SiO ₂	69,9
9	TiO ₂	47,1
10	SiO ₂	66,2
11	TiO ₂	50,1
12	SiO ₂	70,5
13	TiO ₂	47,5
14	SiO ₂	65,6
15	TiO ₂	49,5
16	SiO ₂	69,9
17	TiO ₂	47,7
18	SiO ₂	57,3
19	TiO ₂	45,8
20	SiO ₂	149,8



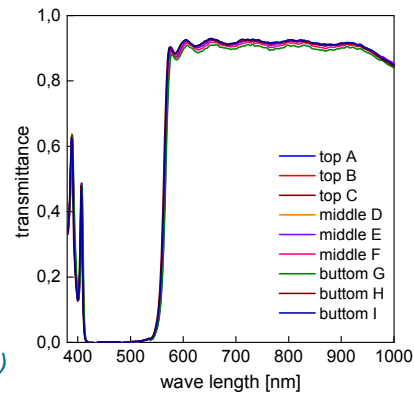
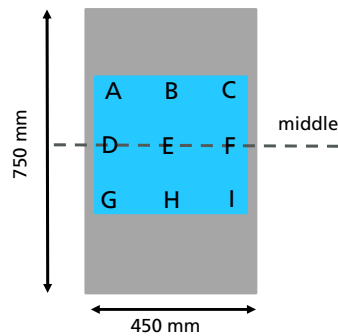
Manuela Junghänel, 23. Mai 2019

© Fraunhofer FEP

Fraunhofer
FEP

Example: Edge Filter on ultra-thin glass

Scheme carrier with UTG substrate (yellow) layer thickness homogeneity over UTG-substrate area



- Substrate size 360 x 400 mm² (Gen 2)
- thickness 50 μm
- UTG on carrier glass – adhesive free technology by SCHOTT AG

Manuela Junghänel, 23. Mai 2019

© Fraunhofer FEP

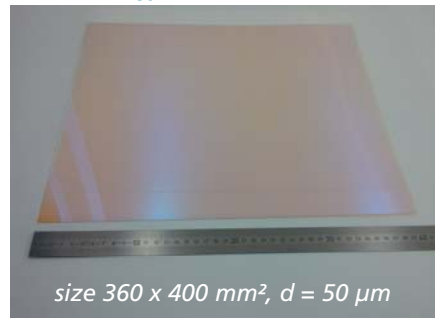
Fraunhofer
FEP

Example: Edge Filter on ultra-thin glass

Substrate 250 x 300 mm², d ~ 100 μm after coating



UTG on carrier glass – adhesive free technology of SCHOTT AG



size 360 x 400 mm², d = 50 μm

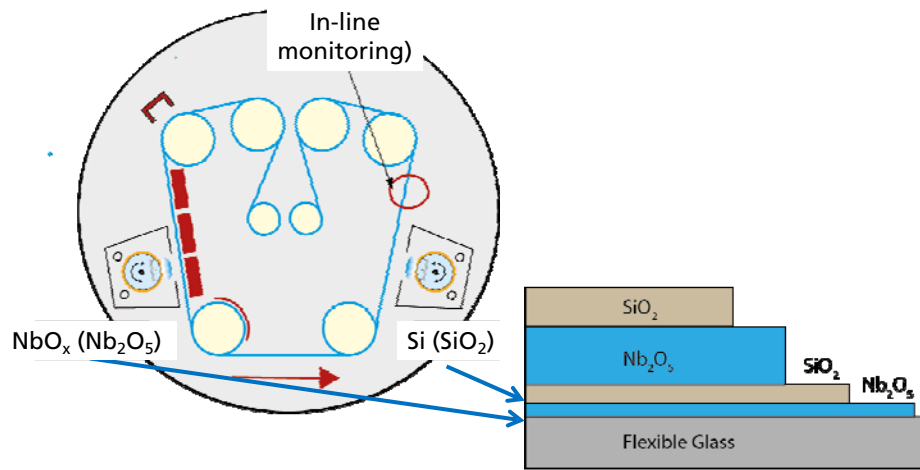
T_{max} during processing | coating ~ 82 °C

Manuela Junghänel, 23. Mai 2019

© Fraunhofer FEP

Fraunhofer
FEP

FOSA LabX 330 Glass – Example AR coating



Manuela Junghänel, 23. Mai 2019

© Fraunhofer FEP

VON ARDENNE

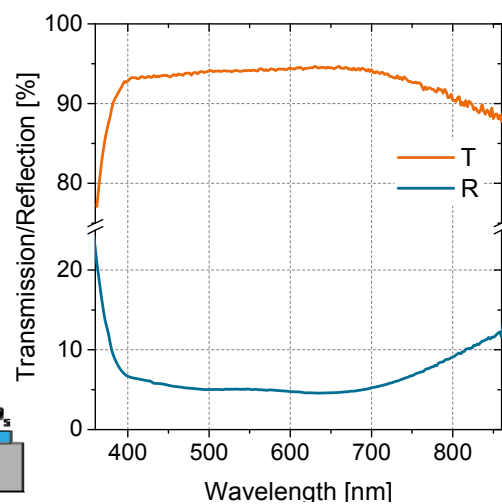
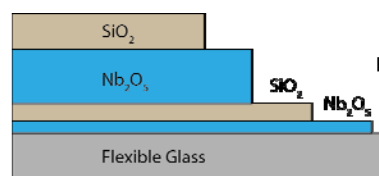
Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

Fraunhofer FEP

BMBF – KONFEKT (FKZ 13N13818)

FOSA LabX 330 Glass – Example AR coating

- 100 µm Schott glass
- Single side coated



Manuela Junghänel, 23. Mai 2019

© Fraunhofer FEP

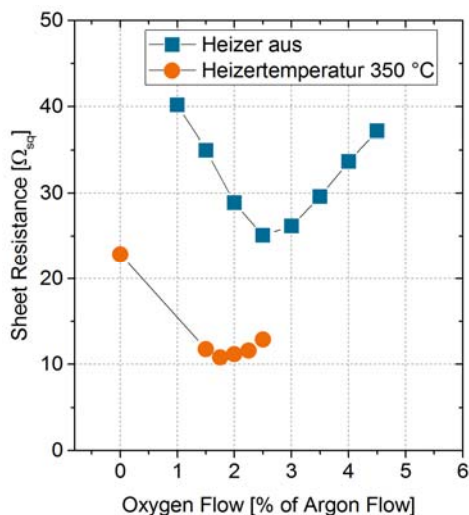
VON ARDENNE

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

Fraunhofer FEP

BMBF – KONFEKT (FKZ 13N13818)

FOSA LabX 330 Glass – Example “hot” ITO coating



Manuela Junghänel, 23. Mai 2019

© Fraunhofer FEP

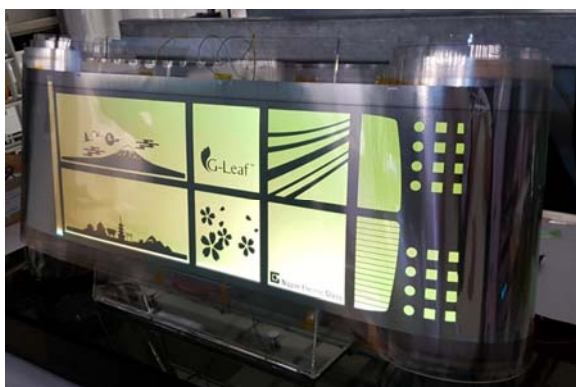
VON ARDENNE

Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Fraunhofer
FEP

BMBF – KONFEKT (FKZ 13N13818)

R2R OLED auf UTG vergossen mit flexiblem Glas



G-Leaf

R2R Vacuumprozess

- Eine erfolgreiche Demonstration von 25 x 10 cm² OLED-Bauelementen ohne „dark spots“, in Zusammenarbeit mit Nippon Electric Glass Co. Ltd.

Manuela Junghänel, 23. Mai 2019

© Fraunhofer FEP

Fraunhofer
FEP

Zusammenfassung

- Die flexible Glasverarbeitung bringt viele Herausforderungen, aber auch viele Chancen mit sich.
- Entwicklung neuer Anwendungen
- Hochskalierung von Prozessen ist möglich
- PVD-Prozesse S2S und R2R sind verfügbar.

Scheiben aus gebogenem, ultradünnem Glas mit einer Dicke von 50 µm



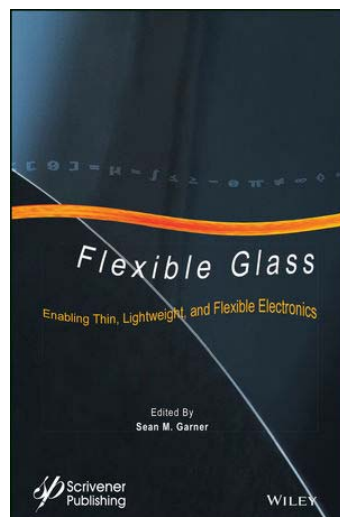
- Hauptaugenmerk: Dünnschicht-Stressmanagement

Manuela Junghänel, 23. Mai 2019

© Fraunhofer FEP

Fraunhofer
FEP

53



**Flexible Glass:
Enabling Thin, Lightweight,
and Flexible Electronics**

Edited by Sean Garner

ISBN-13: 978-1118946367
Publisher: Wiley-Scrivener;
1 edition (August 21, 2017)

Manuela Junghänel, 23. Mai 2019

© Fraunhofer FEP

Fraunhofer
FEP

54

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Kontakt

Fraunhofer FEP
Dr. Manuela Junghänel
Koordinator flexibles Glas

Manuela.Junghaehnel@fep.fraunhofer.de

Winterbergstr. 28 | 01277 Dresden

Tel.: +49 351 2586-128

