



Forum Energie Zürich (FEZ)

Vakuumglas – Isolierverglasung der Zukunft ?

24. Januar 2012, Pfarreizentrum Liebfrauen, Zürich

Dr. Matthias Koebel, Empa Building Technologies

Matthias.Koebel@empa.ch



- **Warum Vakuumglas**
 - **Vorteile**
 - **Nachteile**

- **Realisierung / industrielle Fertigung**
 - **Historisches**
 - **2. Generation VG: Systemvorteile**

- **Empa Vakuumglas**
 - **BFE Projekt**
 - **EKZ Folgeprojekt**
 - **Ausblick**

- **Zusammenfassung**



1) Fenster

- Verglasungsart / Füllung
- Rahmen
- Transluzente Fenster
- Beschichtungen "Smart windows"
- Integrierte Photovoltaik

2) Façade

- Dämmstoff / Dämmstärke
- Modullösungen / Konzepte
- Beschichtungen





3-fach Façadenelement (U ~ 0.67)

Manufacturer	Product	Illustration 1	Illustration 2	U_f (W/m ² K)	Reference
Endl-Wagner GmbH	ON TOP PLUS			0.65	www.passiv.de
RAICO Bautechnik GmbH	RAICO THERM +76H-I Isobloc P			0.69	www.passiv.de

Aerogelgefüllte Doppelverglasung (U = 0.3 ... 0.6)



Doppelverglasung mit Folien (U = 0.3 ... 0.6)

Manufacturer	Product	Configuration	U_g (W/m ² K)	T_{vis}	SF	Reference
Serious Materials	1125 Picture Window (SeriousGlass™ 20)	Dual pane, 3 low SHG films; Xenon fill	0.28	0.23	0.17	www.vereco.ca/green_document/SeriousWindows_1125_Dsheet1271084115.pdf "SeriousWindows 1125 Saves more energy than any other window. Period." www.SeriousWindows.com
Visionwall Solutions Inc.	Series 204 4-Element Glazing System	6;26/4/20/4/26/6 Air 100%+film	0.62	0.50	0.303	Visionwall Solutions Inc.—Performance Values for Series 104 and 204 4-element Glazing Systems (from Goran Jakovljević, jakovljevic@visionwall.com)

B. P. Jelle et. al, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2012, 96, 1-28

Das Thermos-Haus der Zukunft Sicht 1938



Aus Angst vor immer kälteren Wintern:



Potential zur Heizenergieeinsparung: 89% !





■ Vakuumbasierte Dämmsysteme

Durch die Evakuierung wird die Anzahl Gasmoleküle reduziert, und damit die Energieübertragung der Gasmoleküle zusätzlich vermindert.



Vakuumisolationspaneele
(VIP)

Kommerziell erhältlich



Vakuumisolierverglasung
(VIG)

Nur Produkte mit ungenügender
Dämmleistung erhältlich

warm

kalt

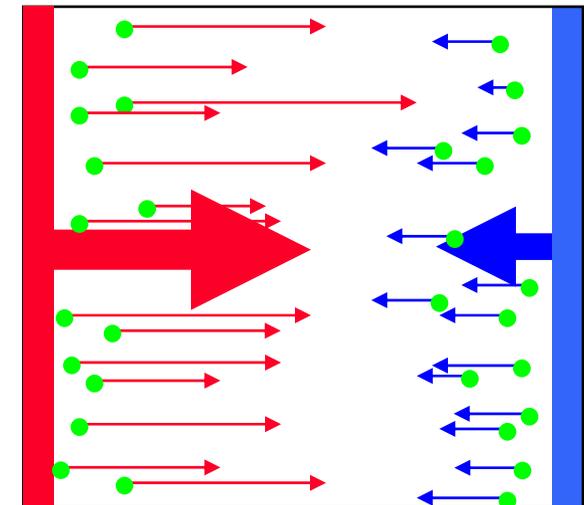
■ Nanoporöse Dämmstoffe (Aerogele)

Ab einer Porengrösse von < 60 nm wird die Wärmeleitfähigkeit reduziert, weil die Energieübertragung der Gasmoleküle durch „Einschränkung“ reduziert wird.



Aerogeldämmstoffe

Kommerziell erhältlich



Das ideale Fenster

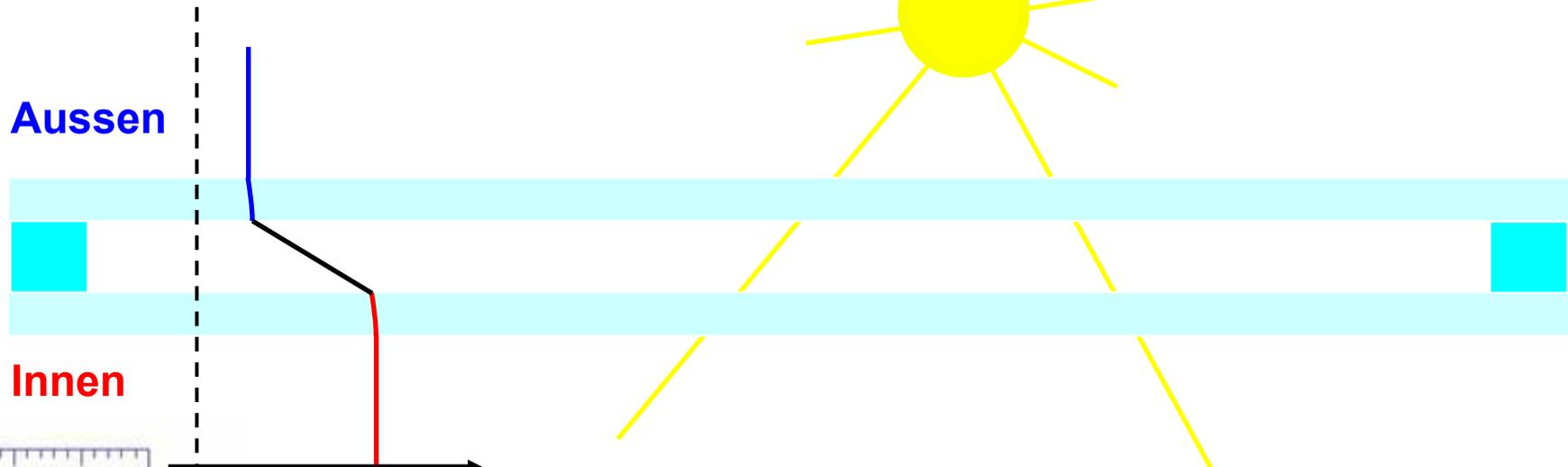


Anforderungen:

- Hoher g-Wert
- Niedriger U-Wert

Aussen

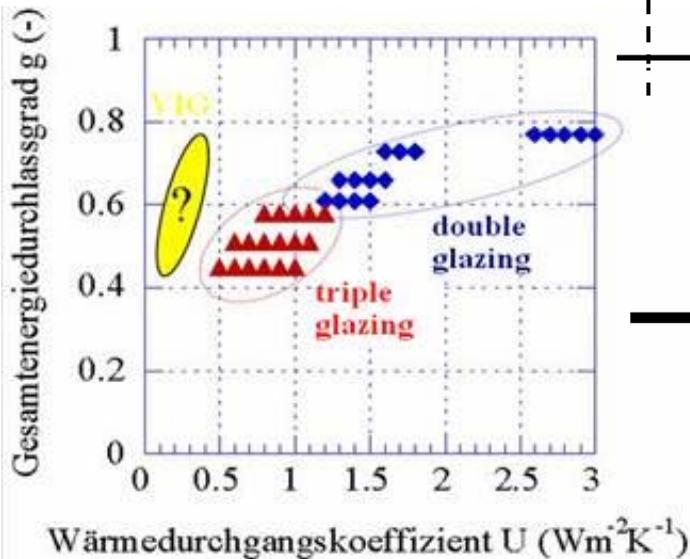
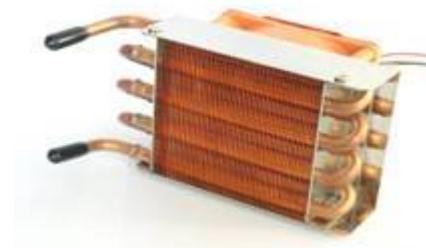
Innen



Wärmetransportmechanismen

Leitung & Konvektion

Strahlung



Temperatur

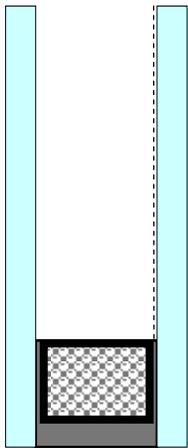
Wie vermeidet man Wärmeverluste ?

H. Manz, 2006

Warum Vakuumglas ?

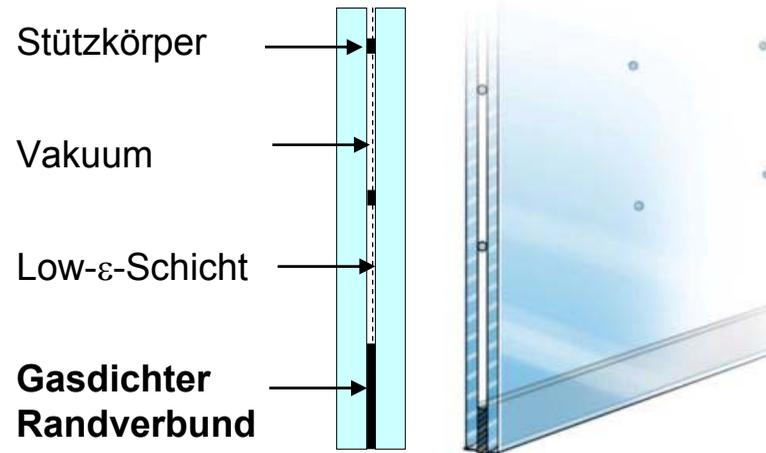


Wärmeschutzglas
4/10/4, Krypton, ε 2 %



$$U = 1.0 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

Vakuumglas
4/0.2/4, Hochvakuum, ε 2 %



$$U = 0.3-0.5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

Vakuumverglasung kann vor allem bei vollverglasten Gebäuden, Sanierungen und für Kollektoren wesentliche Verbesserungen bezüglich Energieeffizienz bringen

Thermische Vorteile Vakuumglas

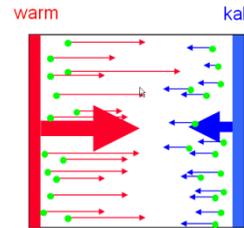


Strahlungsanteil:

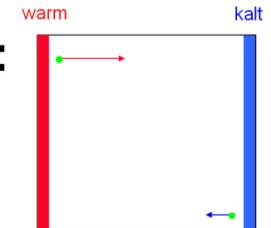


- Ohne low - ε
- Beide Scheiben low - ε

Standard:



Vakuumglas:



	$\sim 1.5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$	
	$\sim 0.1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$	

Gasleitung / Konvektion:



- Luftfüllung
- Kryptonfüllung
- Hochvakuum ($p \sim 10^{-2} \text{ Pa}$)

$\sim 1.6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$	-	
$\sim 0.8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$	-	
-		$< 0.01 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$

Weitere Verluste

- Stützkörper / Randverbund
- (Rahmen

- $0.1 \dots 0.5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
Hängt stark von Geometrie und Typ ab)

Geamt U-Wert:

$\sim 0.9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$

$0.2 \dots 0.5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$



Stand der Technik

- Gängiges Fertigungsverfahren ungeeignet
- **Randverbund ist der Knackpunkt für industrielle Umsetzung**
- 1. Generation: Performance / Lebensdauer ungenügend
- 2. Generation VG benötigt vakuumtaugliche Technologien



Anforderungen

- Leckrate $< 10^{-12} \text{ mbar} \cdot \text{l} \cdot \text{s}^{-1}$
- Herstellung im Vakuum
- Prozesstemperatur
- Mechanische Festigkeit
- 30 Jahre Lebensdauer
- Wechselbelastungen / Ermüdung





- **Warum Vakuumglas**
 - **Vorteile**
 - **Nachteile**

- **Realisierung / industrielle Fertigung**
 - **Historisches**
 - **2. Generation VG: Systemvorteile**

- **Empa Vakuumglas**
 - **BFE Projekt**
 - **EKZ Folgeprojekt**
 - **Ausblick**

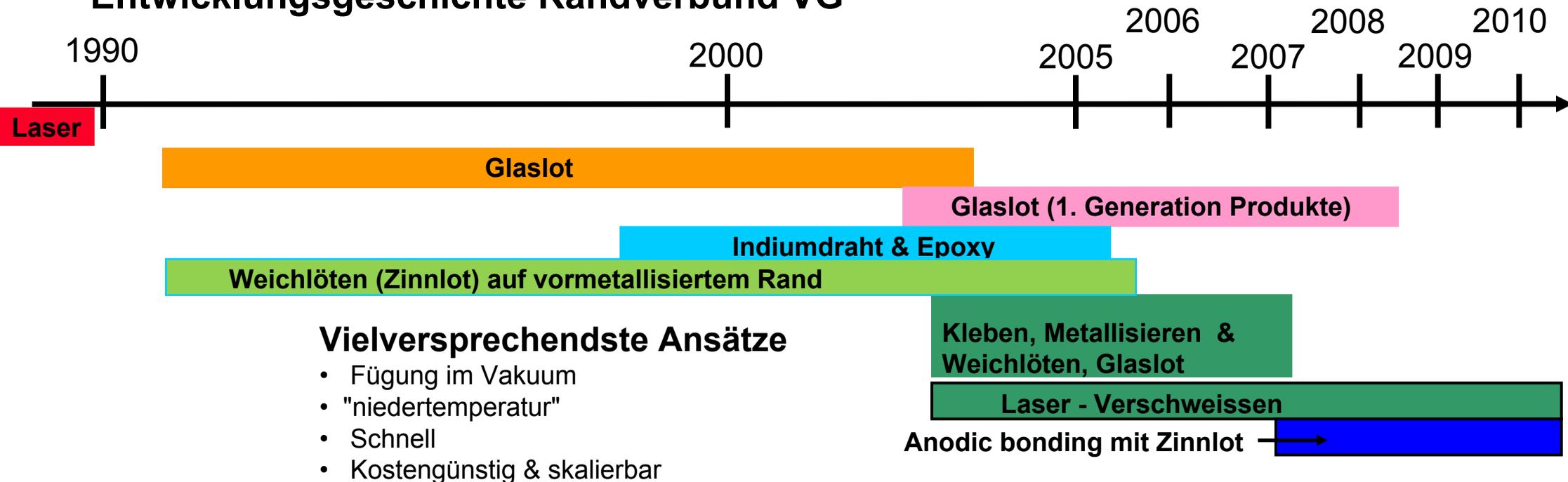
- **Zusammenfassung**



- **Randverbund ist der Knackpunkt für industrielle Umsetzung**
- **Diverse Fügeverfahren weltweit untersucht**
- **Viele Methoden nicht Vakuum-kompatibel**
- **Empa VG: neue Randverbund – Fügetechnologie entwickelt**

-  Benson (US)
-  Collins (AUS)
-  Japan & China
-  Eames (Ireland)
-  Bächli (CH)
-  Weinländer (DE)
-  Empa (CH)

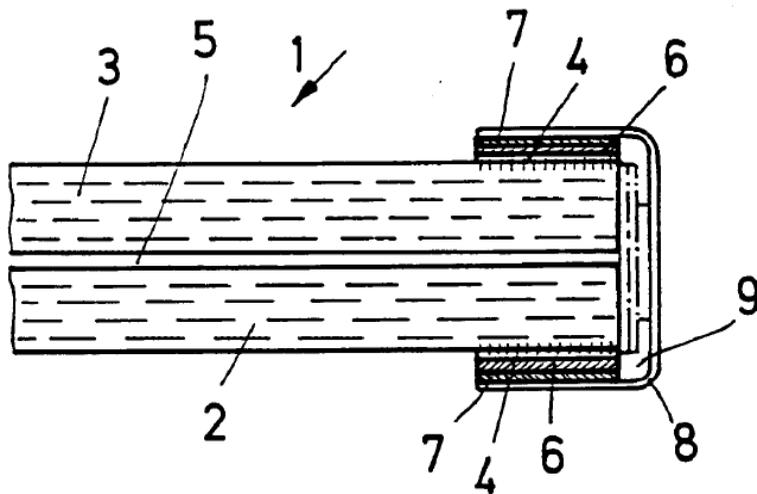
Entwicklungsgeschichte Randverbund VG



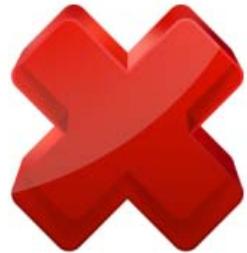
Emil Bächli - ein Aargauer VG Pionier



- Diverse Patente VG
- Zinnlot als Randverbund
- "Flexibler Randverbund"

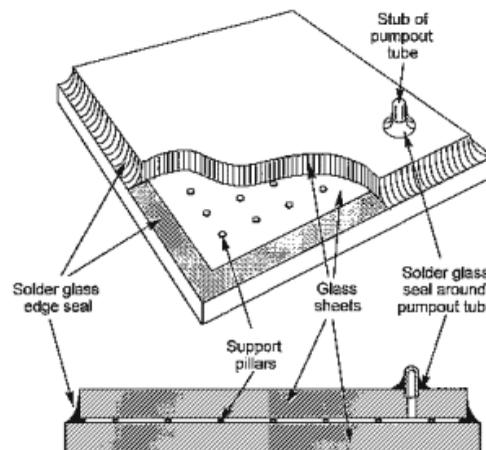


1. Generation : Glaslot mit Pumpstutzen



Glaslotmethode:

- Niedrigschmelzendes Glaspulver
- Hohe Prozesstemperatur (450°C) !!
- **Beschädigt low-e Schichten**



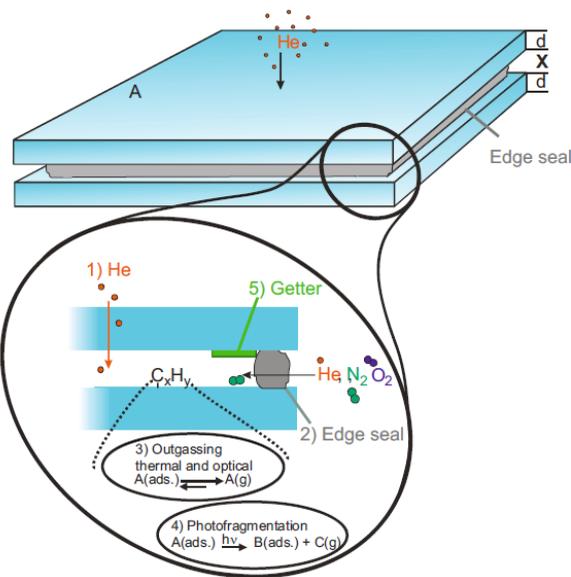
Pumpstutzen / nachträgliches Evakuieren

- Pumpleistung gering bei niederen Drücken !
- Auspumpen von ausgasenden, kleinen Molekülen ist langsam, zeitlimitierend, **unvollständig**

2. Generation VG: Fügen im Vakuum



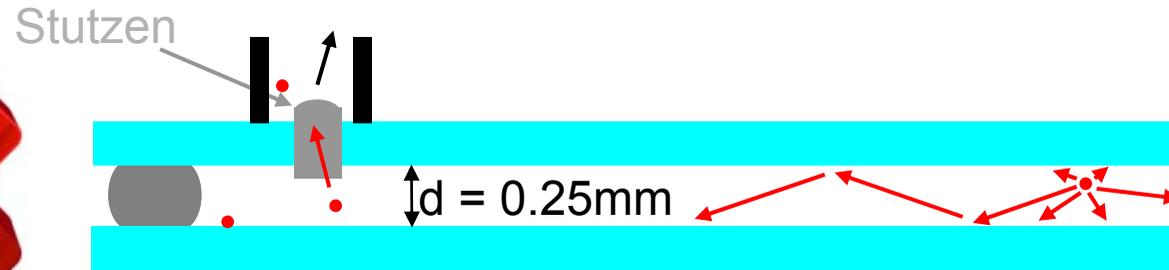
1. Gas (He) Permeation



2. Leckage Randverbund



Glaslotmethode:

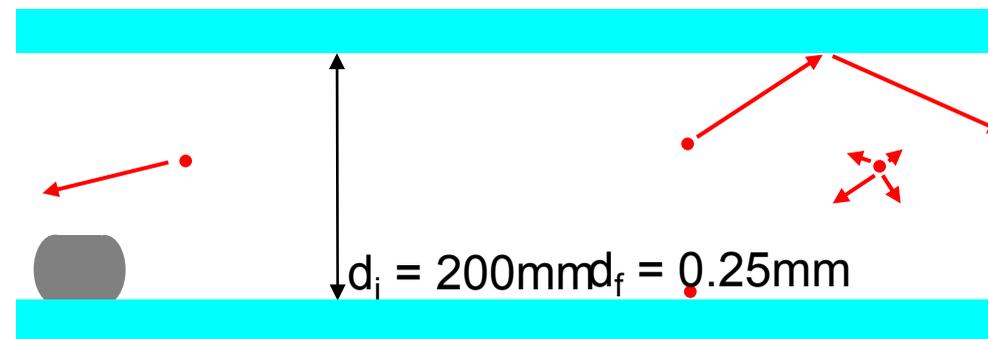


- Pumpleistung gering bei niederen Drücken !
- Auspumpen von ausgasenden, kleinen Molekülen ist langsam, zeitlimitierend, **unvollständig**

3. Oberflächenadsorbate



Fügung *im Vakuum*:



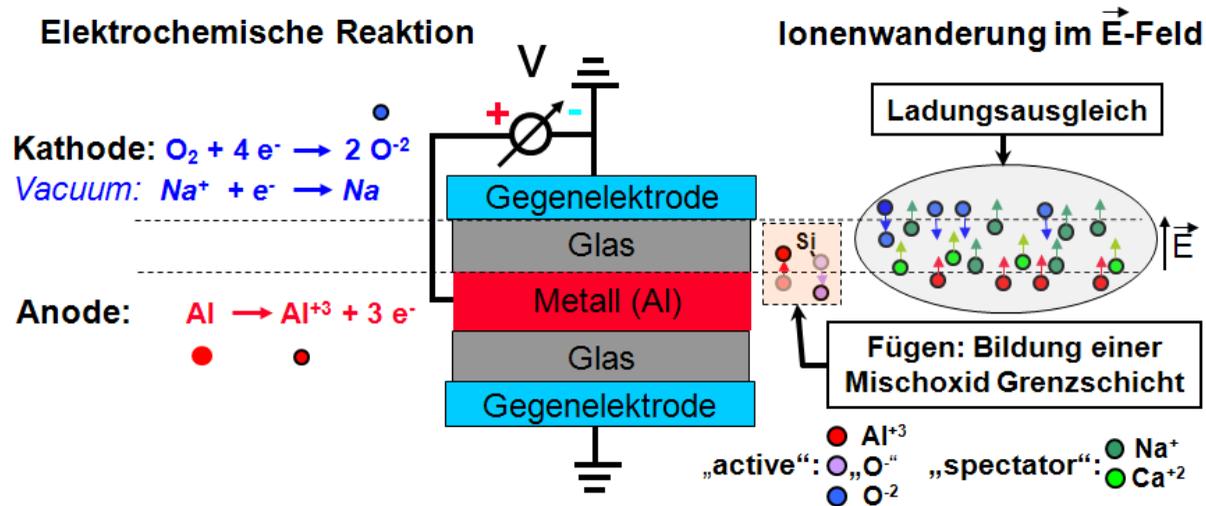
- Pumpleistung auch bei niederem Druck 100%
- Einstellung des therm. Desorptions-GGW rasch



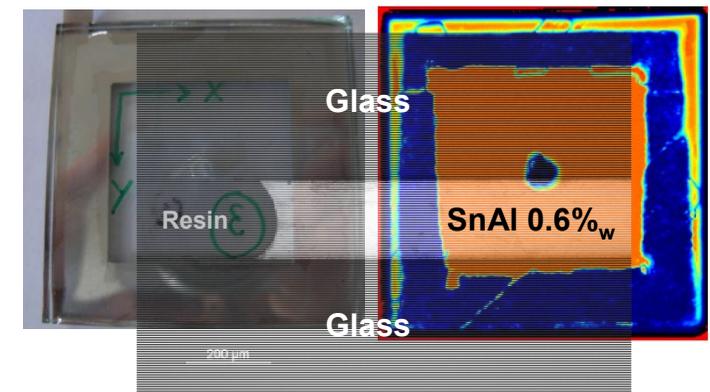
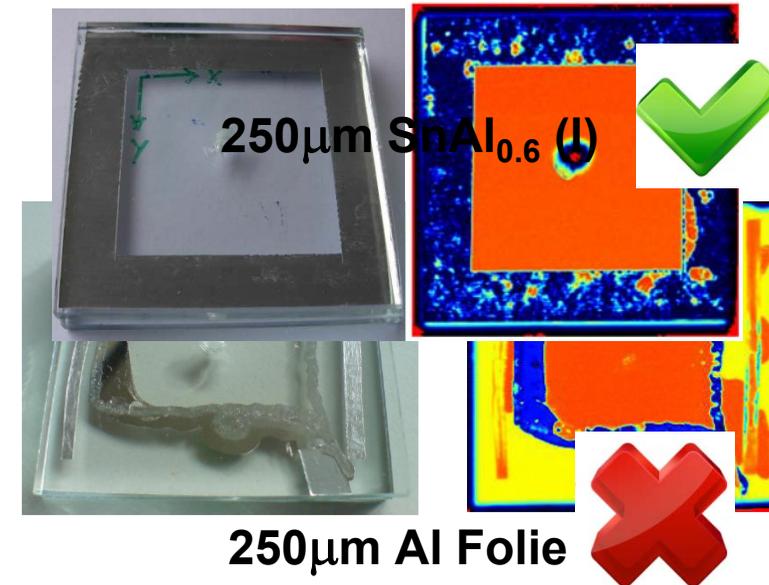
- **Warum Vakuumglas**
 - **Vorteile**
 - **Nachteile**
- **Realisierung / industrielle Fertigung**
 - **Historisches**
 - **2. Generation VG: Systemvorteile**
- **Empa Vakuumglas**
 - **BFE Projekt**
 - **EKZ Folgeprojekt**
 - **Ausblick**
- **Zusammenfassung**



- **Umdenken Fügung Randverbund**
- **Flüssigmetall: perfekte Anpassung**
- **Anodische Verbindung: kein Vormetallisieren**
- **Art der Eintragung ?**

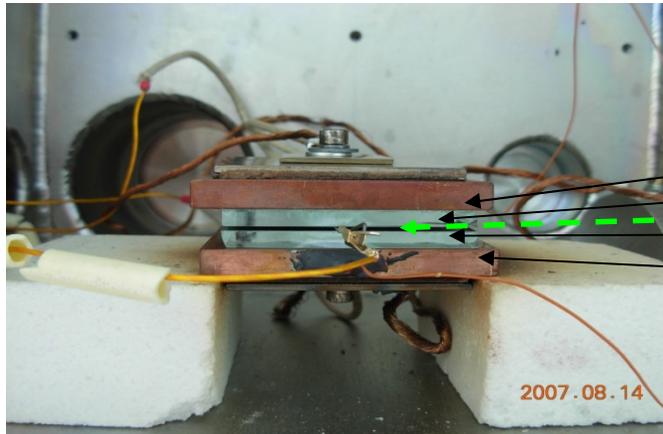


Empa Lösung: Flüssiglot
 "anodic bonding"
 30 μ m Al Folie





■ Kleine Testkammer



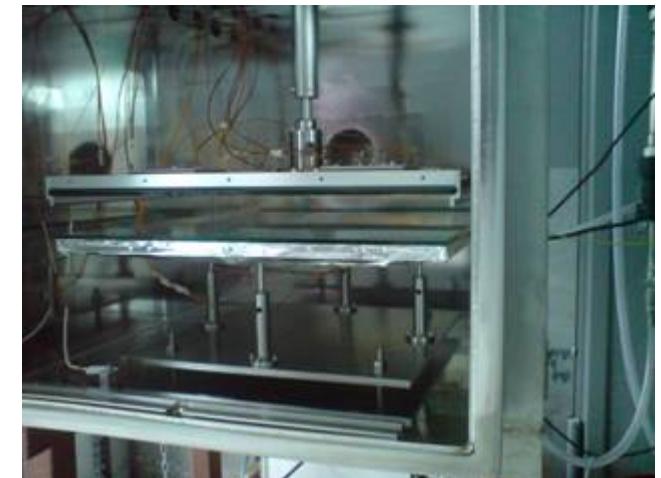
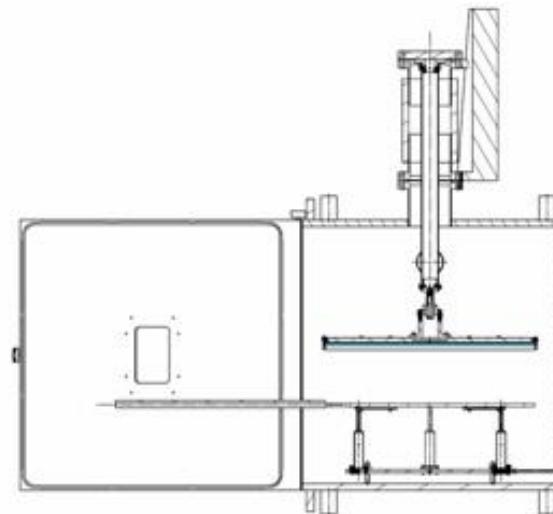
Anodic Bonding setup



$p \sim 10^{-4}$ Torr, $T = 250 - 350^\circ\text{C}$



■ Grosse Testanlage: 0.5m x 0.5m Scheiben



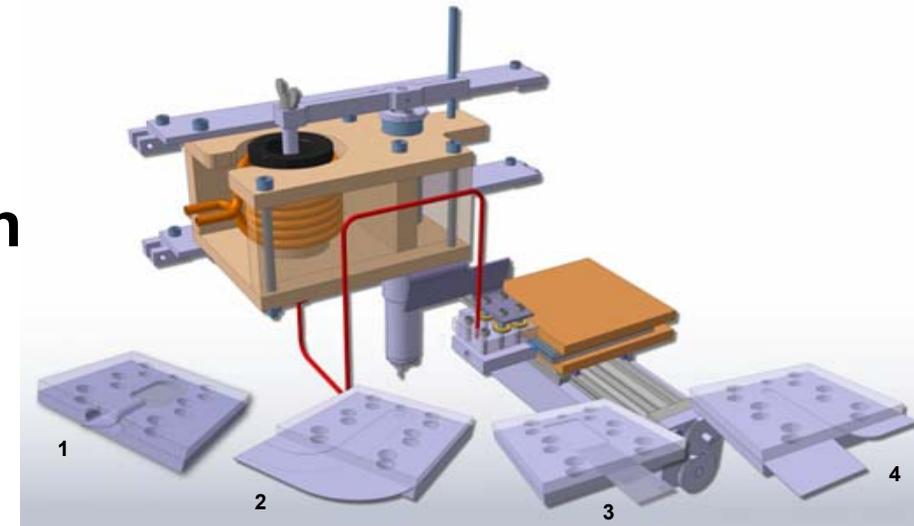
EKZ Innovationsfonds: Entwicklung Flüssigloteinspritzung



■ Flüssige Metalleinspritzung im HV



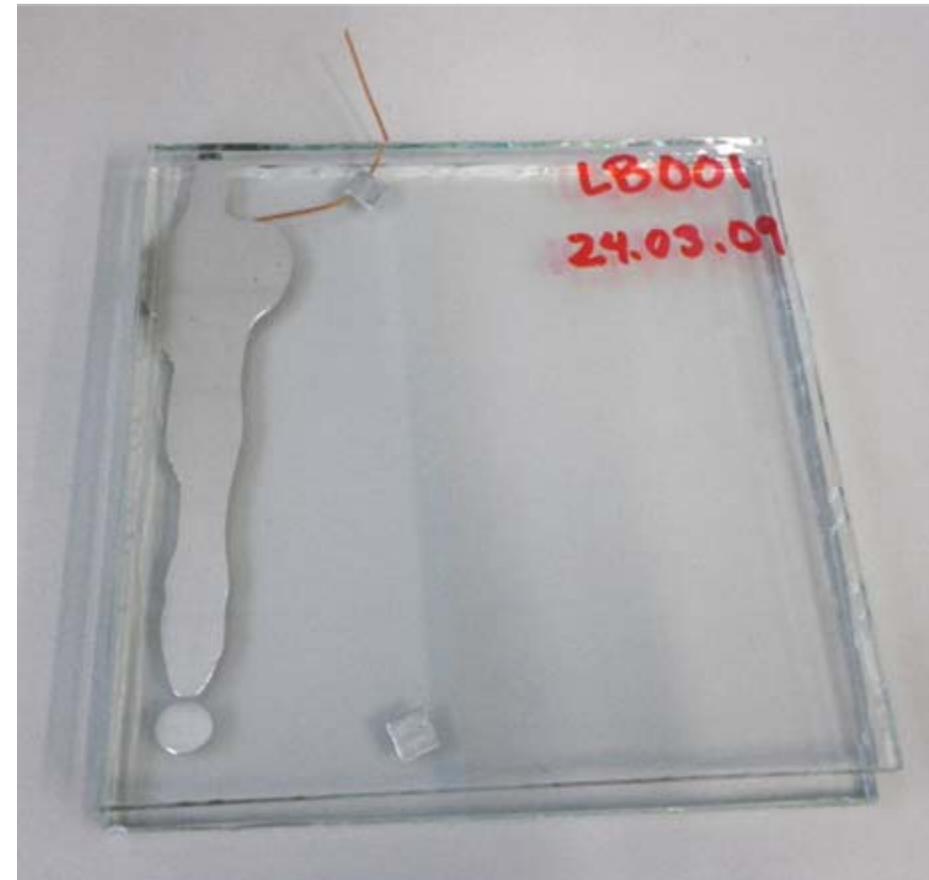
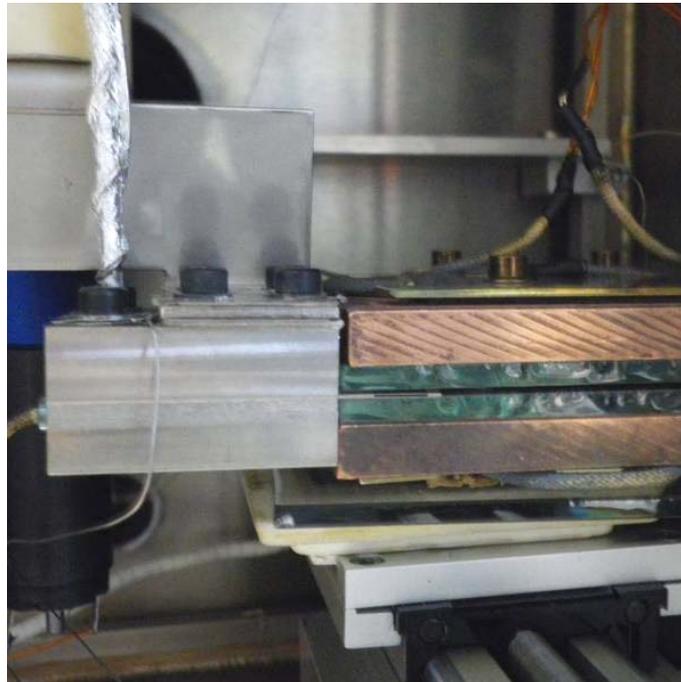
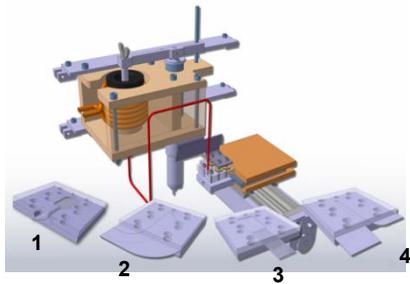
■ Testanlage für 10cm x 10cm Proben



Versuche Einspritzung Flüssiglot



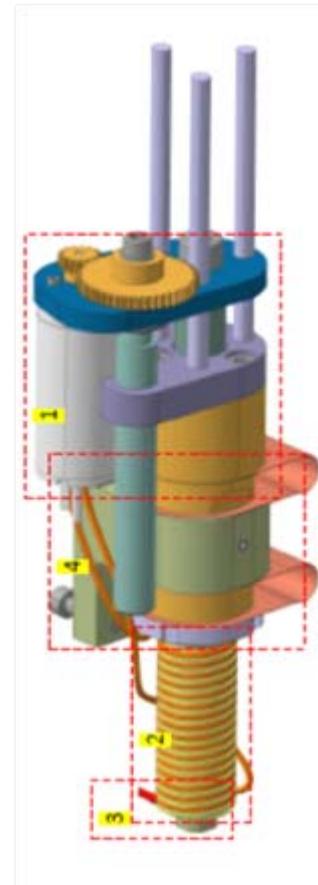
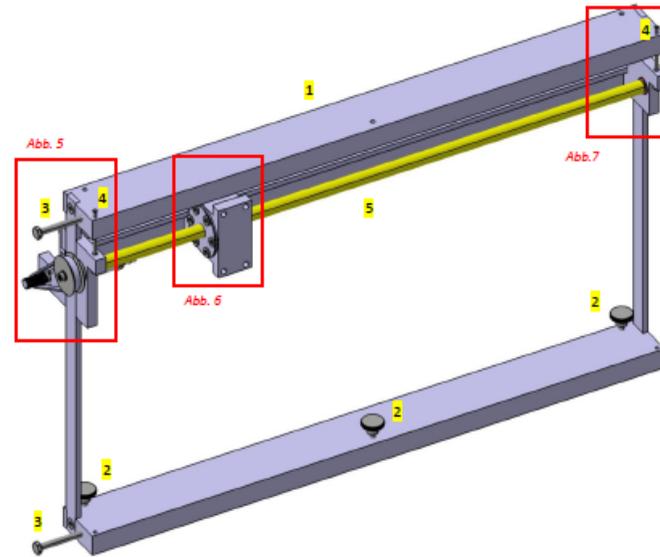
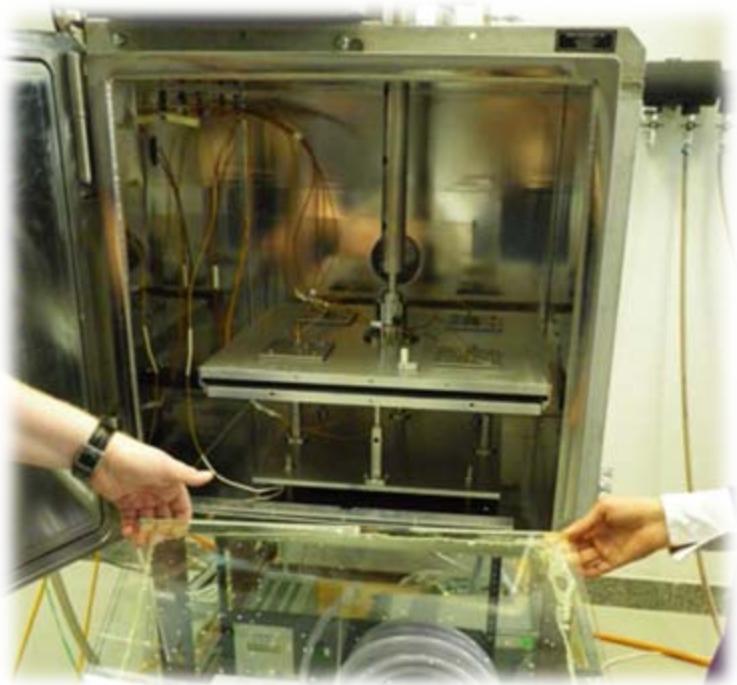
- Konzept erfolgreich getestet
- Nächster Schritt: 0.5m x 0.5m Prototypenanlage



Flüssigeinspritzung grosse Kammer



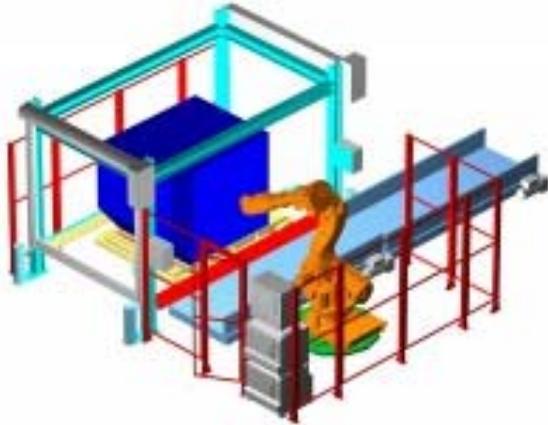
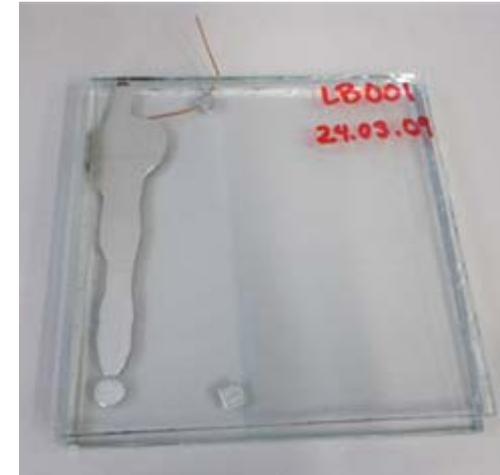
■ Flüssigeintragung 0.5m x 0.5m Prototypenanlage





- **Verifizierung Skalierbarkeit**
- **Mechanische Belastungstests**
- **Pilotanlage (mit Industrie)**
- **Versuchsanlage**
- **Produktion**

↑
? 1m ?
↓





EU-FP7 WinSmart



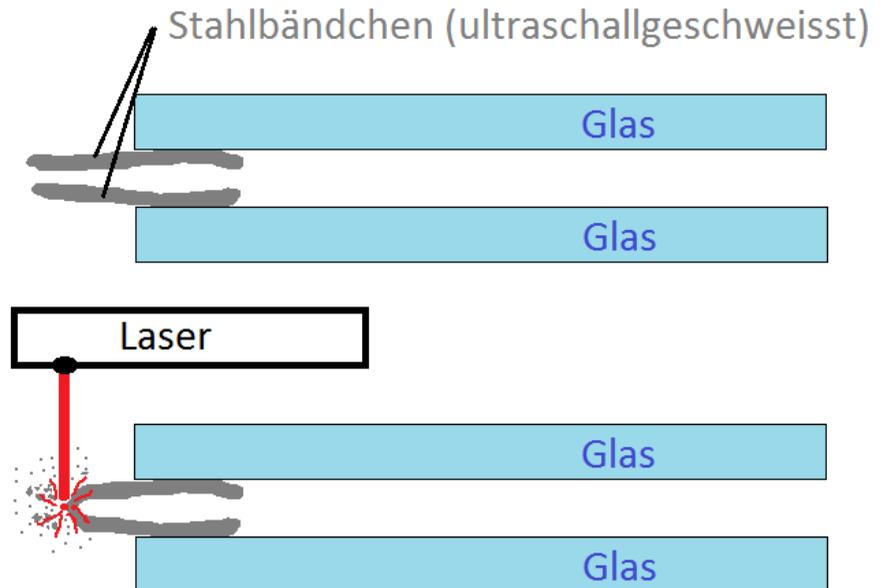
- **VIG mit anodischem Randverbund / Metallbändchen**
- **Entwicklung schaltbare Schichten**

■ EuFP7, 8 Partner

Anodisches Bonding
(Empa)



Stahlbändchen
(Fraunhofer, VIG-Pro)





- **Warum Vakuumglas**
 - **Vorteile**
 - **Nachteile**

- **Realisierung / industrielle Fertigung**
 - **Historisches**
 - **2. Generation VG: Systemvorteile**

- **Empa Vakuumglas**
 - **BFE Projekt**
 - **EKZ Folgeprojekt**
 - **Ausblick**

- **Zusammenfassung**

Zusammenfassung



- **Vakuumglas hat Potential**
- **Komplexes Zusammenspiel → System**
- **Produktion (Randverbund) = Knackpunkt**
- **2. Generation VG: Fügen im Vakuum**
- **Empa Randverbund: Zinnlot / "anodic Bonding"**
- **Flüssigmetalleintragung für festen Randverbund**
- **EU-Projektantrag: Empa/Fraunhofer Ansatz**
- **Erste 1m x 1m Prototypen bis 2014**

- **Heutige Produkte (1. Generation): $U = 1.3 - 1.5$**
- **Ziel: $U < 0.5$ VIG bis 2020 Jahren kommerziell**



... für Ihre Aufmerksamkeit!