

Niedrig emittierende Schichten zur

- Energieeinsparung und**
- Verringerung des Außenbeschlagrisikos**

bei Gebäudeverglasungen

Hans Joachim Gläser, Gummersbach

Vortrag 15.05.2014
FH Gummersbach

Gliederung meines Vortrags

- Physikalische Grundlagen**
- Materialkunde**
- Glasprodukte mit niedrig emittierenden Schichten**

1. Physikalische Grundlagen

Frage: Was haben diese beiden Gefäße gemeinsam?



'Dröppelmina'
einwandig Zinnkanne



Thermoskanne

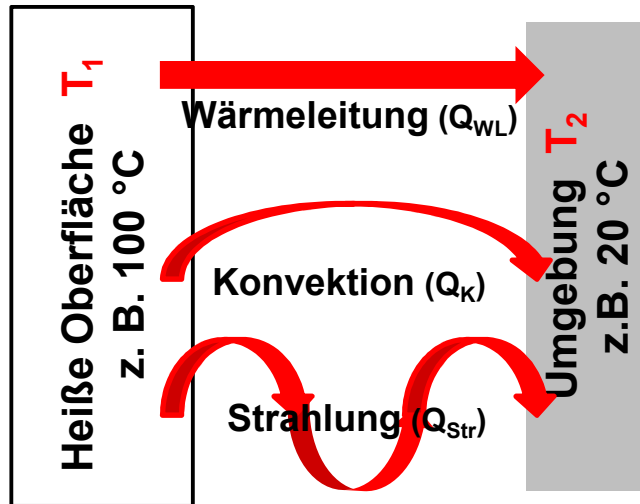


Dewar-Gefäß
doppelwandig

Mit ihnen kann man Kaffee lange Zeit warm halten!

Beide Gefäße wirken wärmeisolierend!

Wie fließt Wärme?



Abstrahlung ist Oberflächeneffekt!

$$Q_{\text{gesamt}} = Q_{\text{WL}} + Q_{\text{K}} + Q_{\text{Str}}$$

Physikalischer Formalismus:

Strahlung

$$Q_{\text{Str}} = \varepsilon^* \sigma^* (T_1^4 - T_2^4)$$

ε = thermisches Emissionsvermögen;
(materialspezifisch; Sn: $\varepsilon = 0,03$; Glas: $\varepsilon = 0,84$)

Konvektion

Wärmeleitung

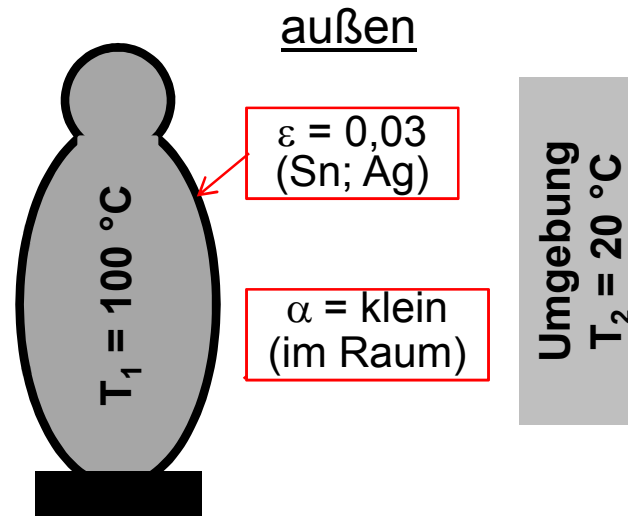
konv. W.-Übergang
(bei Gasen)

$$Q_{\text{K}} = \alpha^* (T_1 - T_2)$$

α = konvektiver Wärmeübergangskoeffizient
(z. B. von Luftbewegung abhängig)

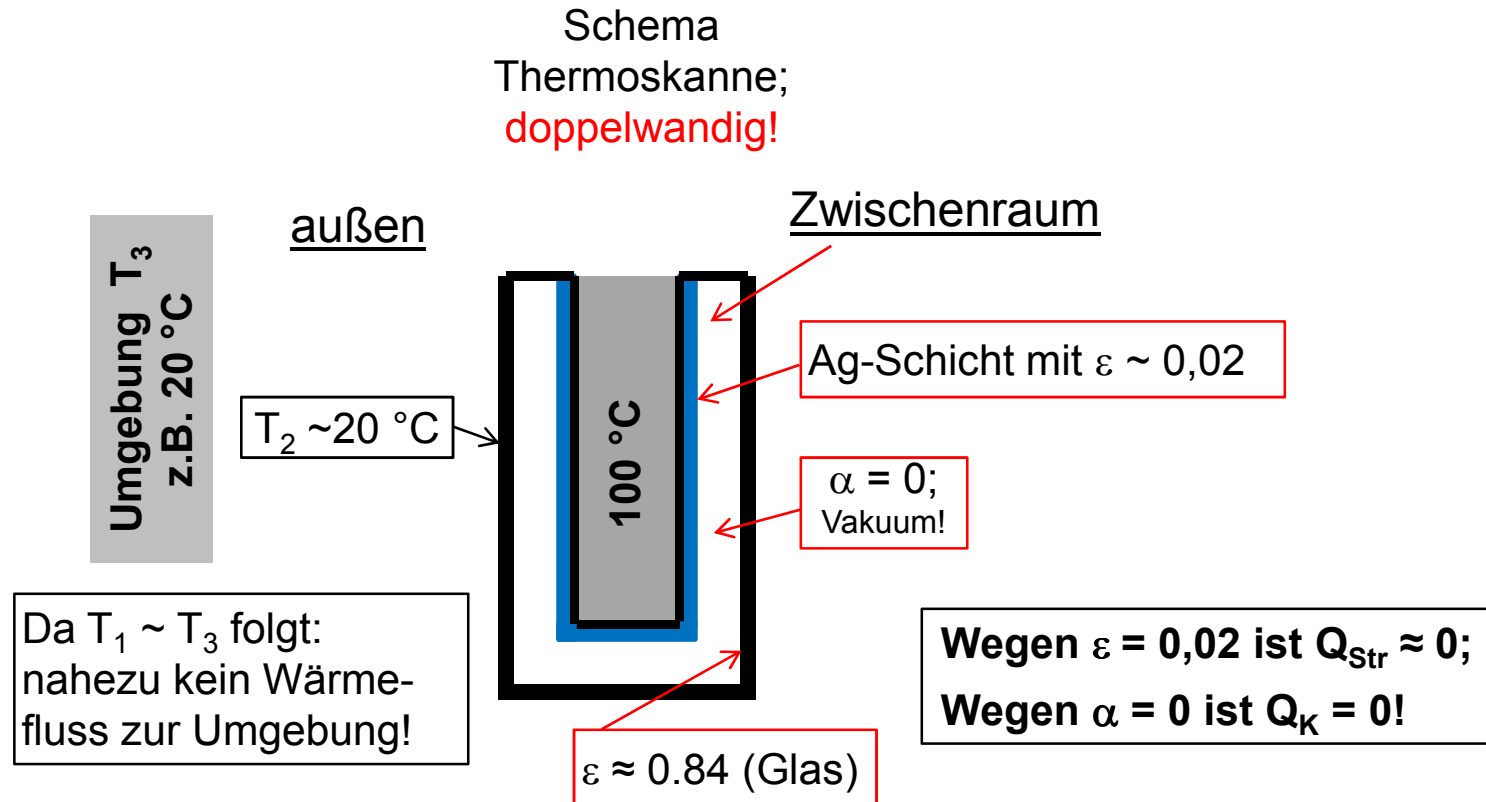
Wie isoliert die 'Dröppelmina'?

Schema
Dröppelmina;
einwandig!



Wegen $\varepsilon = 0,03$ ist $Q_{\text{str}} \approx 0$ (**Oberfläche muss blank sein!**)
Wegen $T_1 - T_2 = 80\text{ K}$ ist $Q_{\text{K}} > 0$, jedoch rel. gering!

Wie isoliert die 'Thermoskanne'?



Der Kaffee bleibt in der Thermoskanne länger warm als in der Dröpelmina, weil $Q_K = 0$ ist!



'Dröppelmina'
einwandig



Thermoskanne



Dewar-Gefäß
doppelwandig

Die 'Dröppelmina' und die 'Thermoskanne' repräsentieren die beiden typischen Anwendung von niedrig emittierenden Oberflächen (Schichten) bei wärmedämmenden Produkten.

2. Materialkunde

Welche Materialien sind in Schichtform transparent und haben niedriges Emissionsvermögen?

Materialien	Optische Eigenschaften für Sonnenstrahlen	Thermisches Emissionsvermögen ε	El. Flächenwiderstand R_{\square} (Ohm)
Ag (Au, Cu)	Filterwirkung für Schichtdicken $d = 10 - 30$ nm	0,01 - 0,05 (1 - 5%)	1 - 5
Metalloxide (TCO) z.B. In ₂ O ₃ :10%Sn (ITO), SnO ₂ :1-2%F (TFO)	Filterwirkung für $d = 200 - 300$ nm	0,1 - 0,2 (10 - 20%)	10 - 20

$$R_{\square} = r/d = 1/(\sigma*d); \quad \sigma = e*\mu*N$$

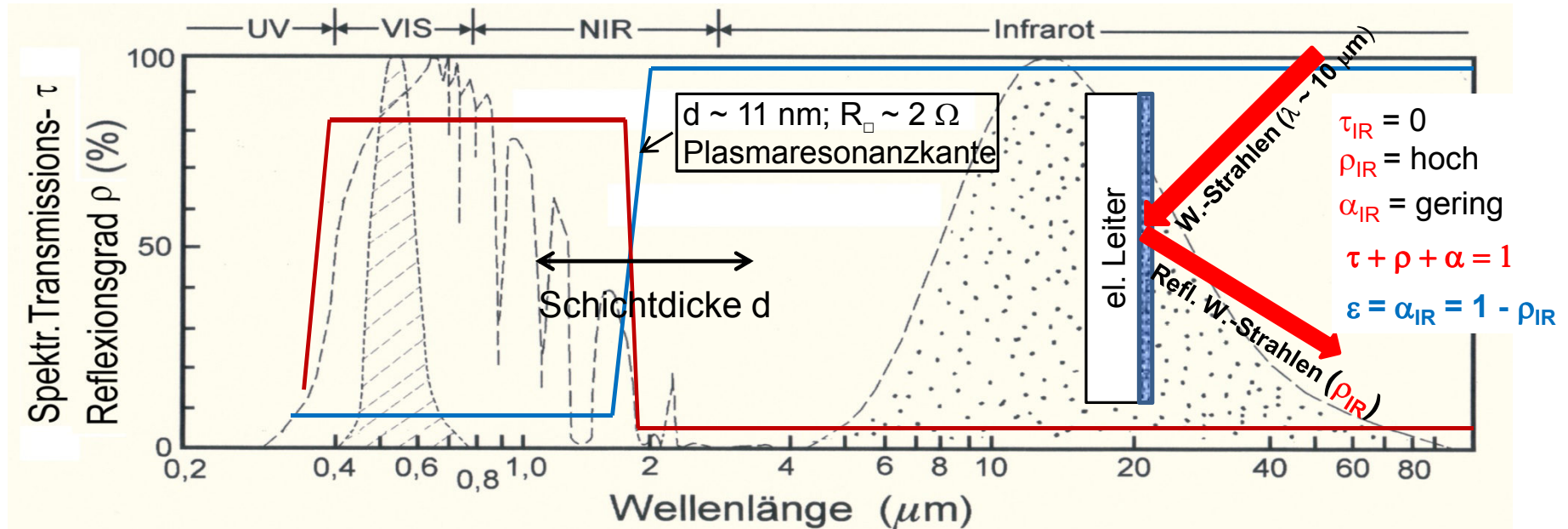
Korrelation zwischen R_{\square} (el. Leitfähigkeit, Elektronendichte) und ε .

Die Theorie ergibt: $\varepsilon = 0,0106 * R_{\square} (\Omega) = 1 - \rho_{IR}$

$\varepsilon (\%) = 1,06 * R_{\square} (\Omega) = 100 - \rho_{IR} (\%)$

Warum sind Ag, Au und Cu und in dünnen Schichten neben niedrig emittierend auch transparent?

T/R-Spektrum von **Ag-Schichten** (analog Au- u. Cu-Schicht)
(schematisch)



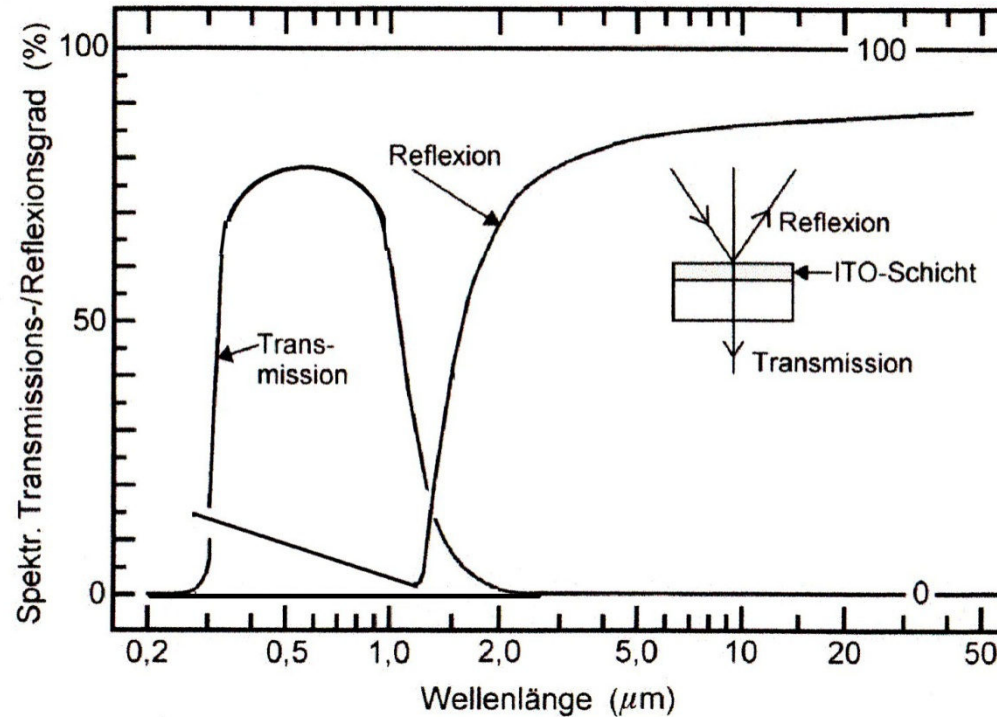
Ag- (Au- und Cu)Schichten: $\tau_{\text{sichtbar}} = \text{hoch}; \tau_{\text{IR}} \sim 0$
 $\rho_{\text{sichtbar}} = \text{niedrig}; \rho_{\text{IR}} = \text{hoch} \equiv \epsilon = \text{niedrig}$

Ag-(Au- und Cu)Schichten sind für Sonnenstrahlen selektiv!

Au und Cu haben Absorptionen in sichtbaren Bereich und sind deshalb farbig;

Ag absorbiert nur im UV und ist deshalb farneutral!

Spektren für $\text{In}_2\text{O}_3:\text{Sn}$ (ITO)-Schicht (analog $\text{SnO}_2:\text{F}$ -Schicht)



Spektren analog wie Ag-(Au-,Cu)- Schichten, jedoch

Elektronendichte ist um Faktor 100 geringer $\rightarrow \rho_{\text{IR}}$ niedriger ($\equiv \varepsilon$; R_{\square} höher).

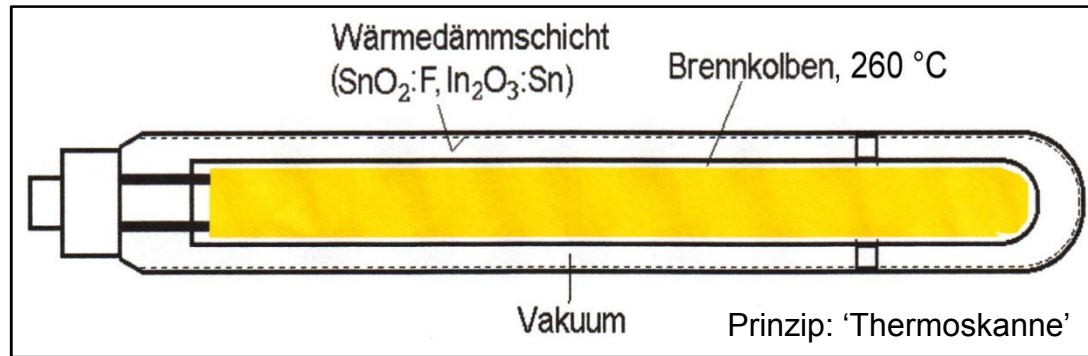
Physikalische Deutung: P. Drude, Marburg (1900)

3. Produkte mit transparenten niedrig emittierenden Schichten

- Lichtquellen**
- Gebäudeverglasungen**
- Kfz-Verglasungen**
- Solarkollektoren**

3. Glasprodukte mit niedrig emittierenden, transparenten Schichten

1. Glasprodukt Na-Niederdrucklampe (Fa. Philips, Aachen), Anfang 1060er Jahre – - Anwendung des Thermoskannen-Effektes

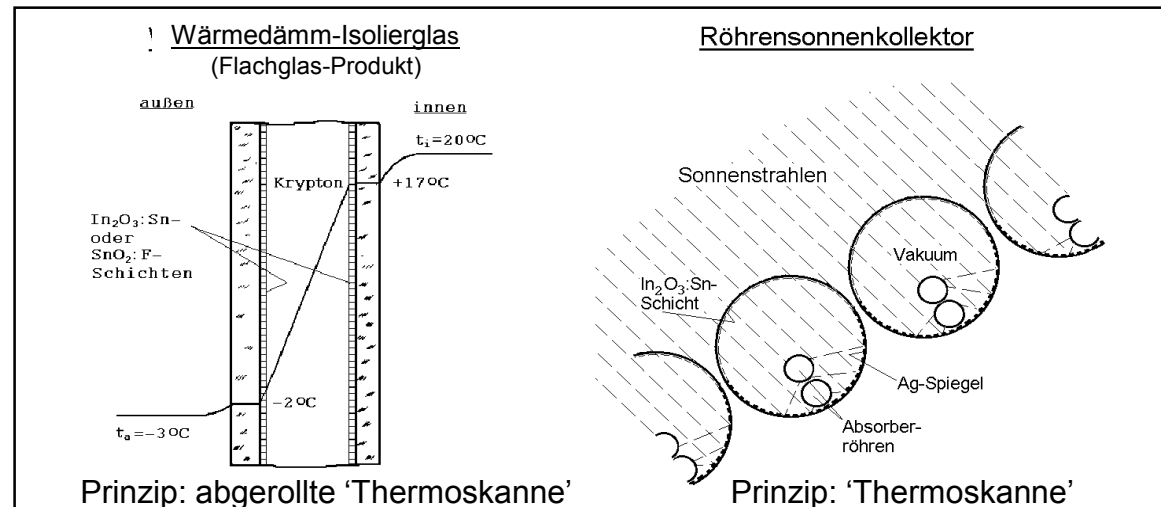


Lichtausbeute:
200 lm/W (heute noch Weltrekord);
Nachteil: gelbes Licht

Vergleich:
Glühbirne ≤ 15 lm/W
Leuchtstofflampe: ≤ 100 lm/W

Vorschläge der
Fa. Philips
in den 1960er Jahren

**Die Zeit war
damals noch
nicht reif für
diese Produkte!**

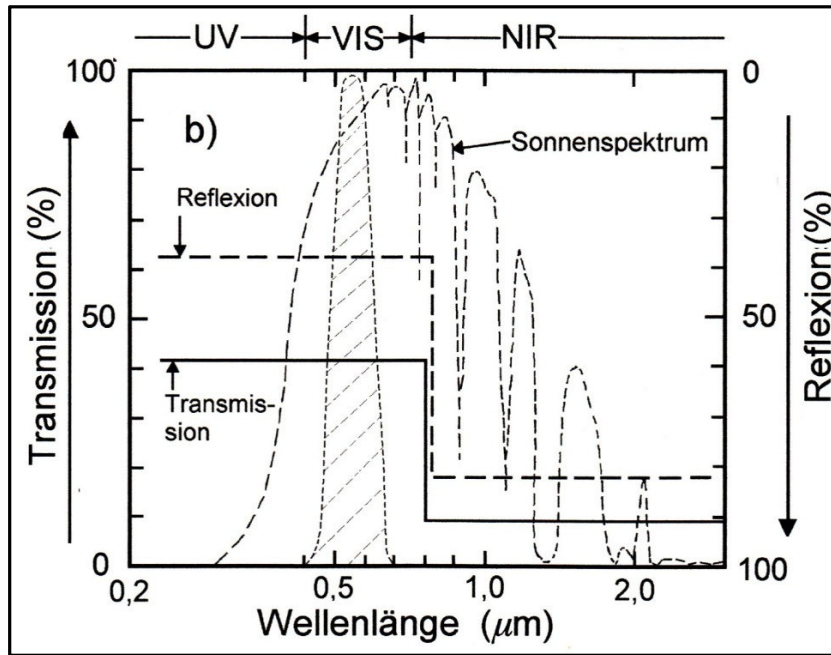


1. Energiesparhaus von Philips in Aachen Mitte 1970

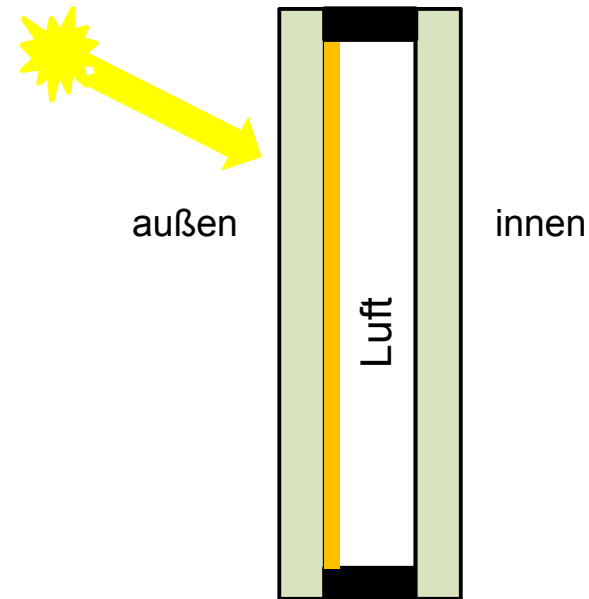
Problemstellung der Flachglasindustrie war in den 1960er Sonnenschutz

Grund: Aufkommen des Glasfassadenbaustils (Bauhaus) mit der Folge hohe Klimatisierungskosten wegen des Treibhaus-Effektes (s. Wintergärten im Sommer)

Energetische Aufwand für Kühlung ist 3- bis 4-mal so hoch wie für Heizung!



Au-Schicht-Spektrum für Sonnenschutzscheibe;
reflektierender Sonnenschutz für $d \sim 20 \text{ nm}$
(Wärmedämmwirkung interessierte damals noch nicht!)



Aufbau
Sonnenschutz-Isolierglas
mit Wärmedämmeffekt



1. Sonnenschutzscheibe auf Basis Au verglast im 'Rheingold',
Fa. Heraeus/DETAG



Eine der 1. S.-Schutz-Verglasungen in der
BRD, Kreisverwaltung GM; Gold 40/26
Lichtdurchlässigkeit (TL): 40%
Gesamtsonnenenergiedurchlass (g): 26%
Selektivitätskennzahl: TL/g



ZDF-Verwaltung, Mainz; Auresin 39/28, Fa. FLACHGLAS AG
Basis: Goldschichtsystem

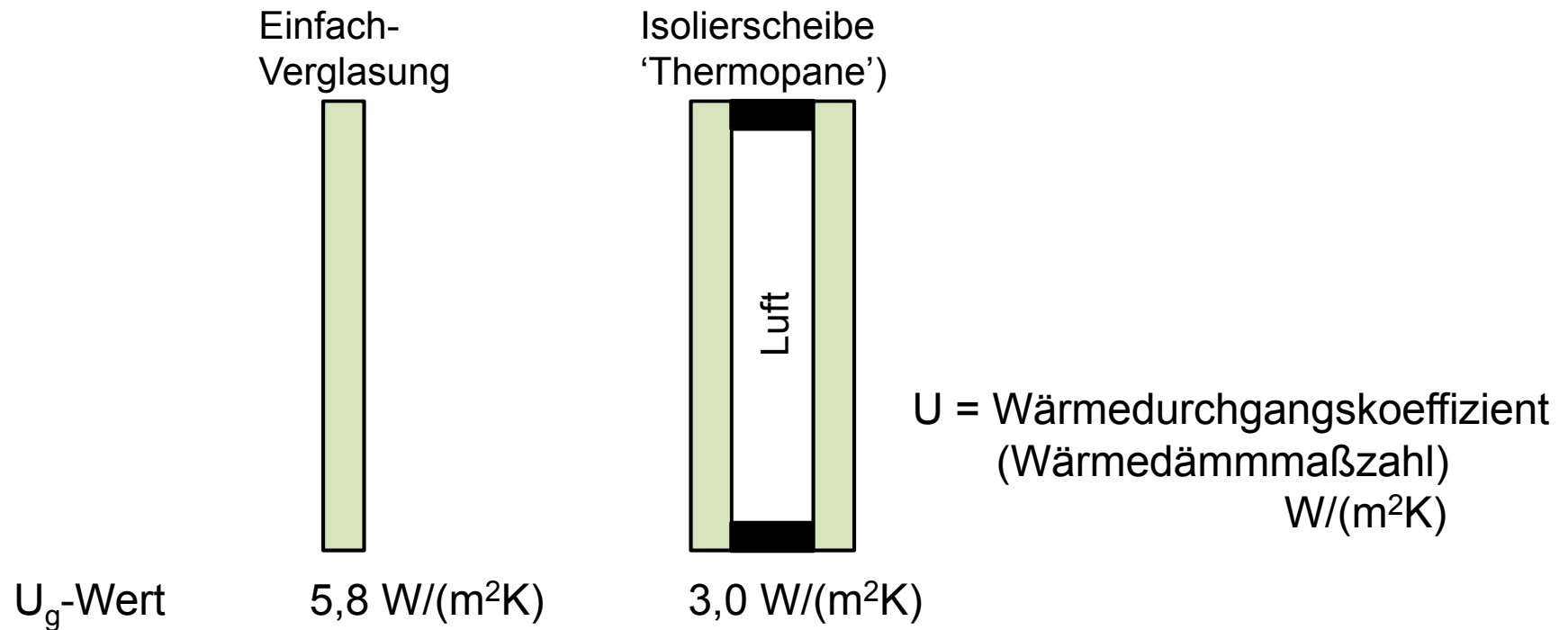


Weltstadthaus, Köln; ipasol 67/34, Fa. Interpane
Basis: Silberschichtsystem

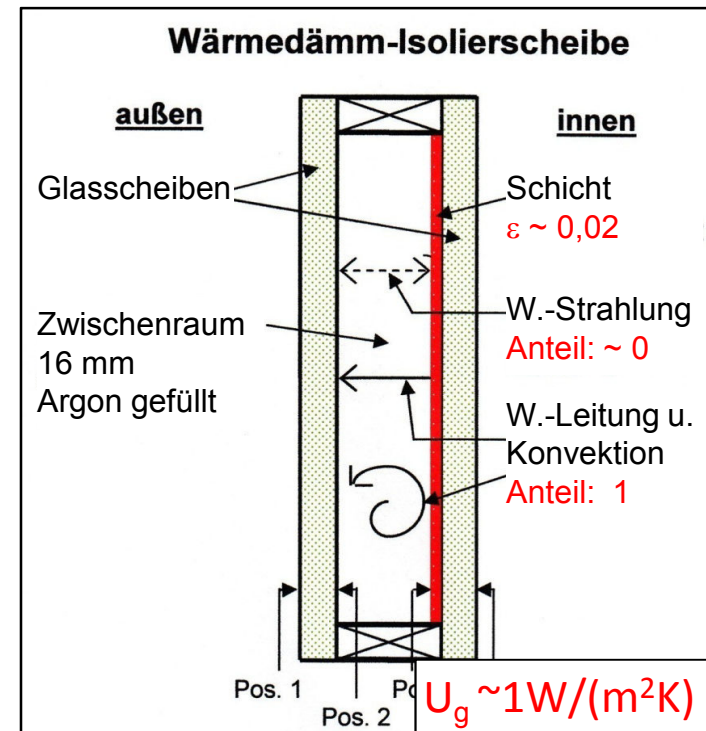
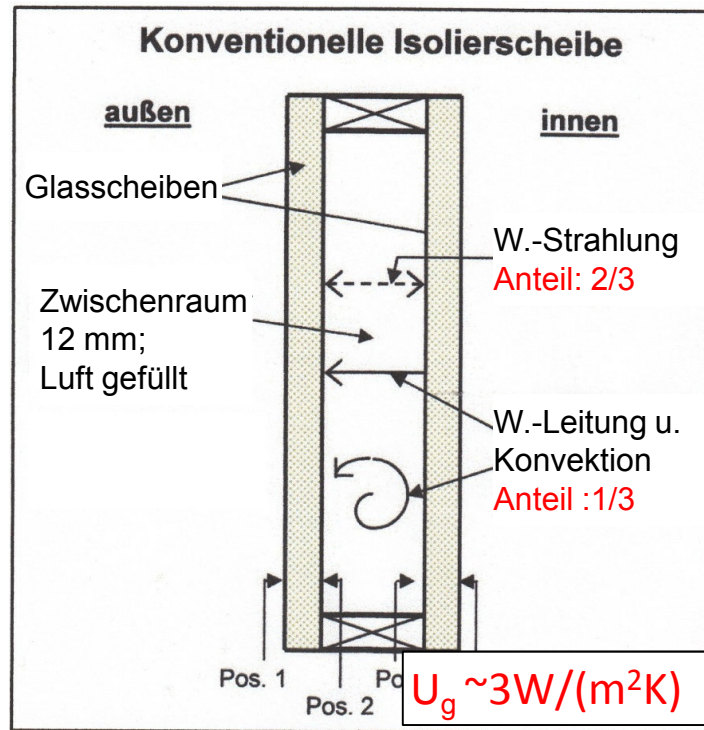
Beginn der Anwendung der Wärmedämmscheiben bei **Wohnhaus-Verglasungen** 1974 (1. Energiekrise)

Ca. 30 % der Heizenergie geht durch die Fenster verloren;
Fensterverglasung drohte auf Bullaugen-Größe zu schrumpfen!

Damaliger Stand der Technik bei Verglasungen in Wohngebäuden



Wie funktioniert der Wärmeverlust bei einer Isolierscheibe und wie kann er reduziert werden?



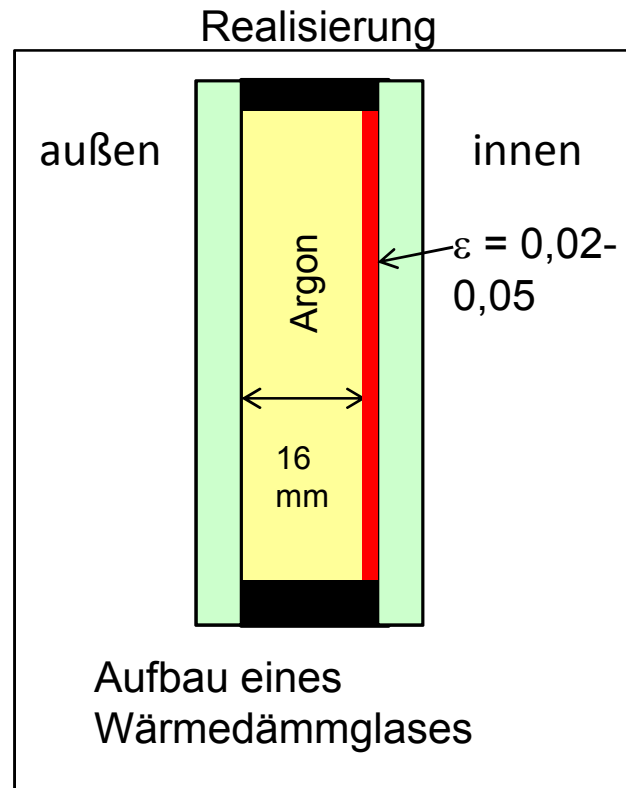
Optimierungsmöglichkeiten des U-Wertes:

ϵ einer Oberfläche reduzieren; Gasfüllung des ZR mit Argon;

Zwischenraumbreite erhöhen!

Was sind die Anforderungen an eine Wärmedämmscheibe?

- Niedriger U_g -Wert des Isolierglases
- Hohe Lichtdurchlässigkeit (TL)
- Hohe Sonnenenergie durchlässigkeit (g) (\equiv großer S.-Kollektoreffekt!!)
- Farbneutralität in Durch- und Außenansicht
- preisgünstig



1. Ausführung der Wärmedämmschichten:

- Bis Anfang der 1990er dünne Goldschicht

$$d_{Au} \sim 15 \text{ nm}$$

$$TL = 60\%; g = 57\%; U_g = 1,5 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Problem: **Farbigkeit**

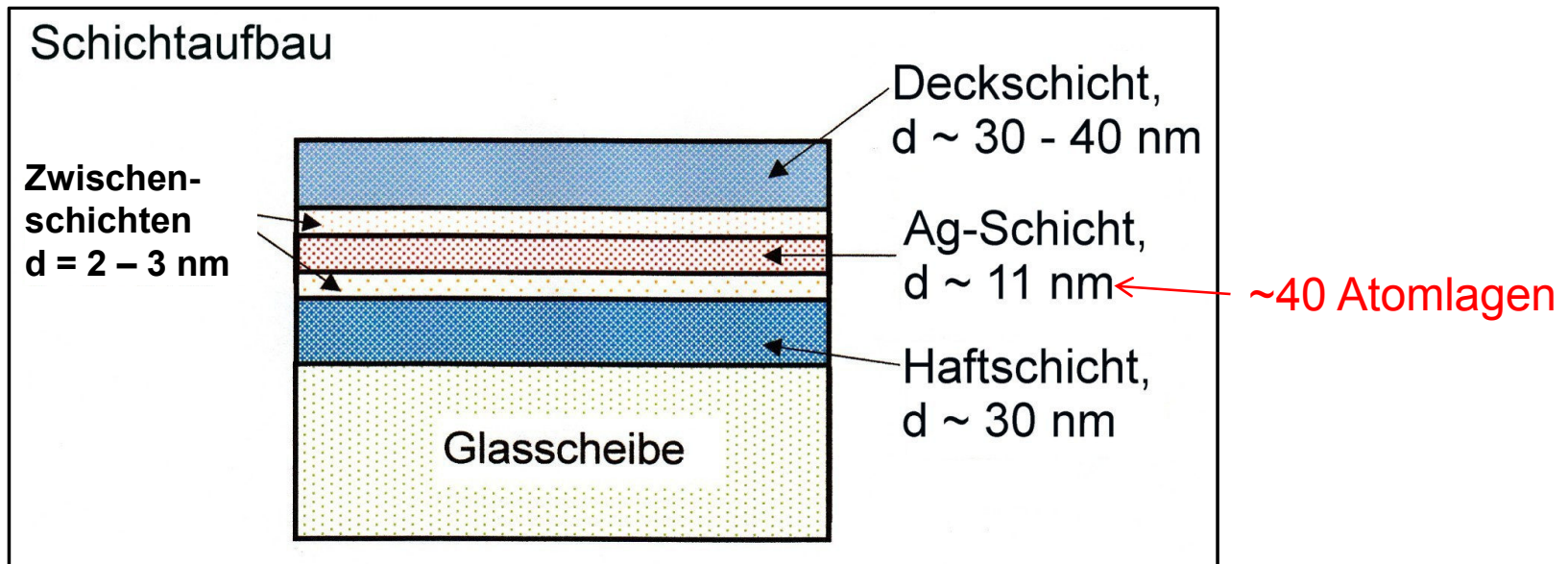
- Ab 1979 dünne Silberschichten

$$d_{Ag} \sim 11 \text{ nm}$$

$$TL = 80\%; g = 64\%; U_g = 1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Problem: **Solarisation**

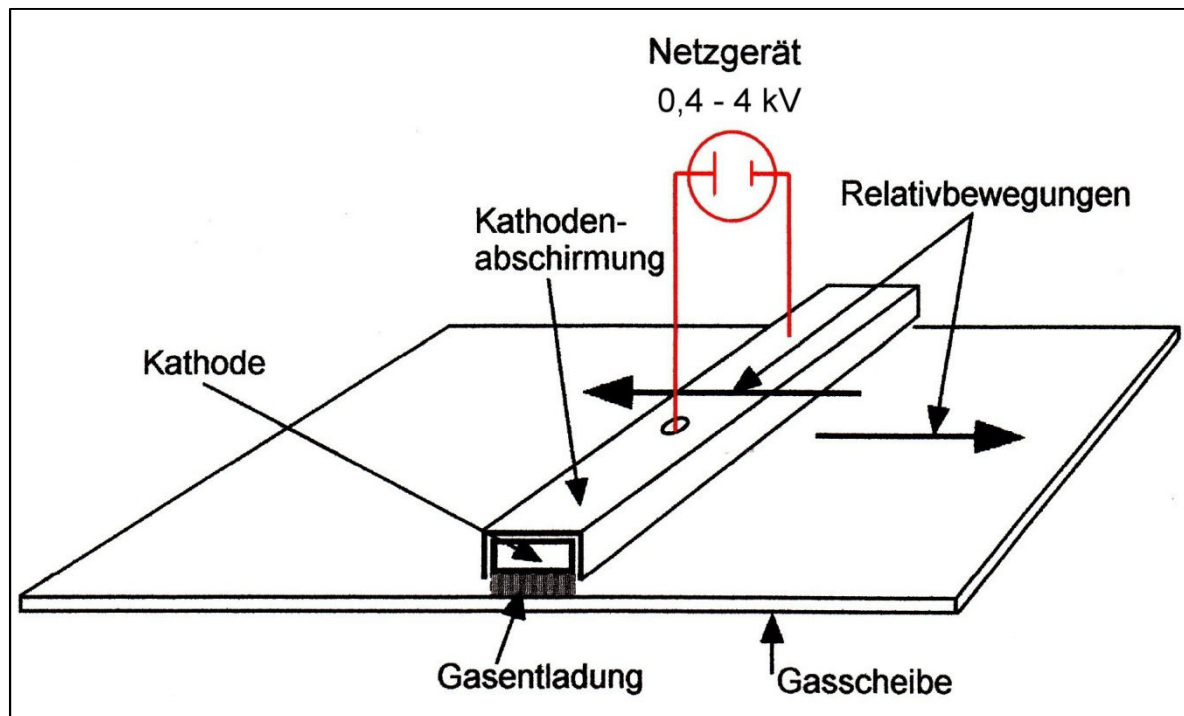
Typischer Aufbau einer Wärmedämmschicht auf der Basis eines Ag-Schichtsystems (seit Ende der 1970er Jahre (Fa. Interpane, Laurenförde))



Gründe, warum sich die Ag-Schichten durchgesetzt haben:

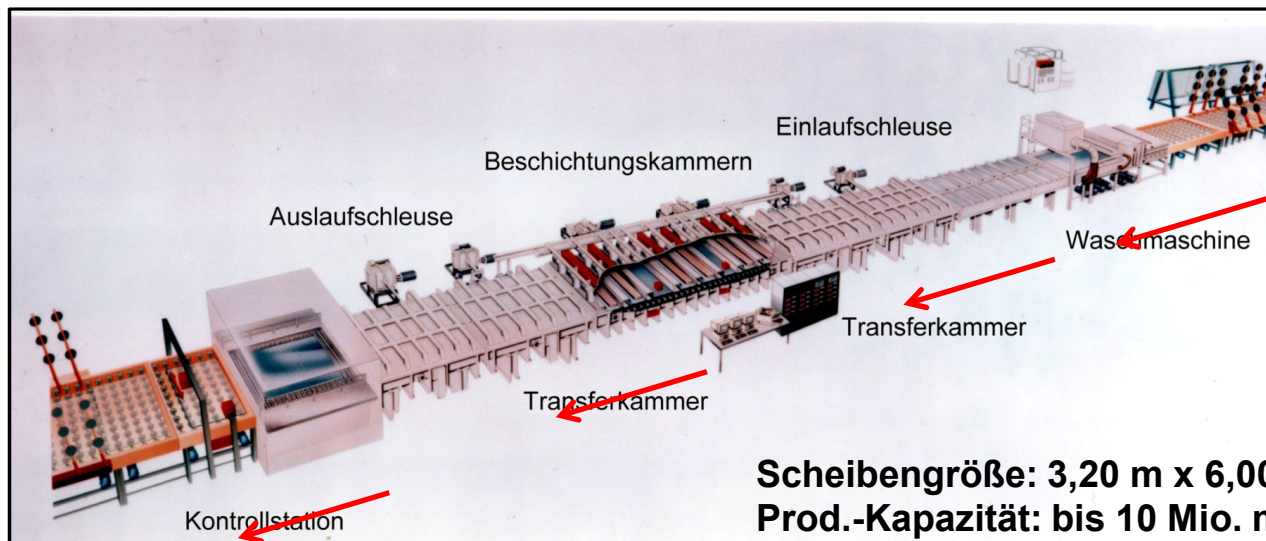
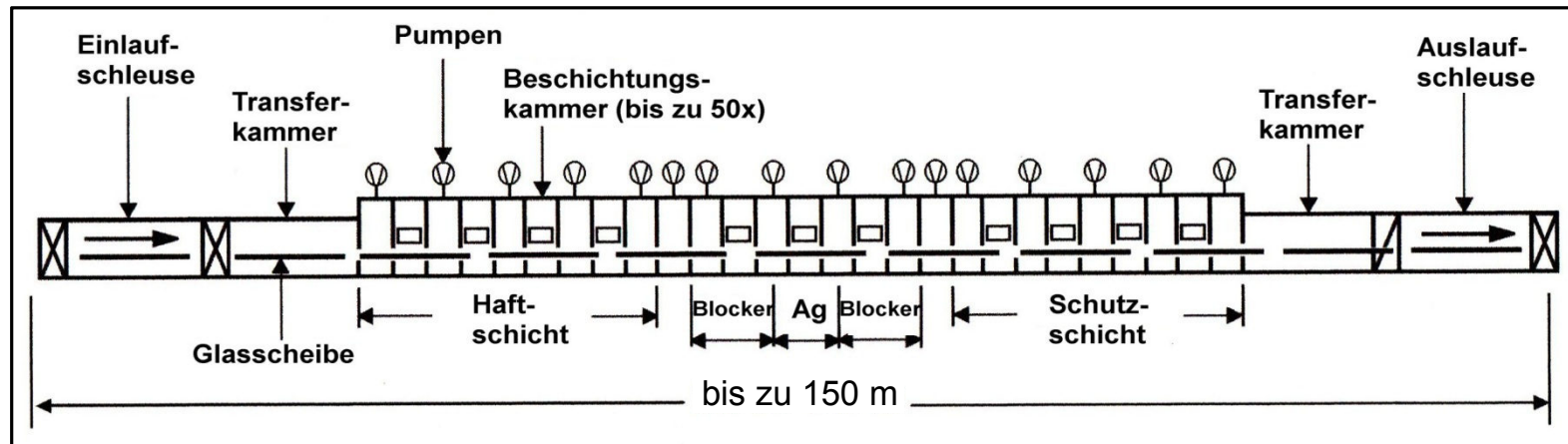
- kleinstmögliches ε ($\sim 0,02$) (Vergl. Gold-Schicht $\varepsilon \sim 0,05$)
- kleinstmögliche solare Absorption; höchstmögliche solare Transmission
- Farbneutralität in Außenansicht und Durchsicht

Prinzip des Beschichtungsverfahrens mit Sputtern (Kathodenzerstäuben)



Analogon: Effekt der Alterung der Leuchtstoffröhre

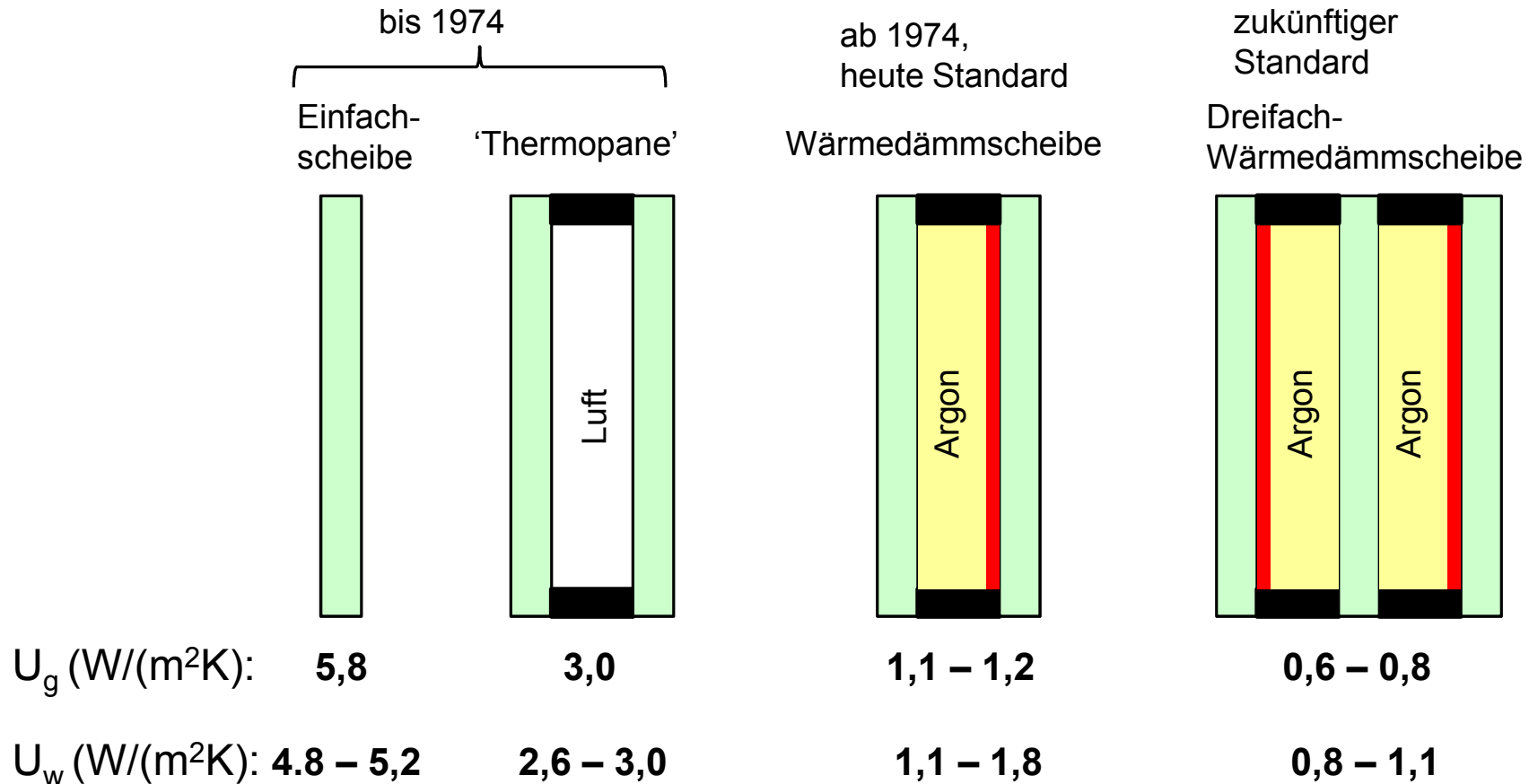
Schema der Beschichtungsanlagen (Basis Sputtern)



Scheibengröße: 3,20 m x 6,00 m
Prod.-Kapazität: bis 10 Mio. m²/a

Anlagenpreis: ~ 20 Mio €
Schichtkosten: ~ 1 €/m²

Entwicklung und Markt der Wärmedämmscheiben



Produktion von W.-Dämmschichten (2013):

BRD: ~45 Mio. m²/a; Europa: ~ 120 m²/a; weltweit: ?? Mio. m²/a

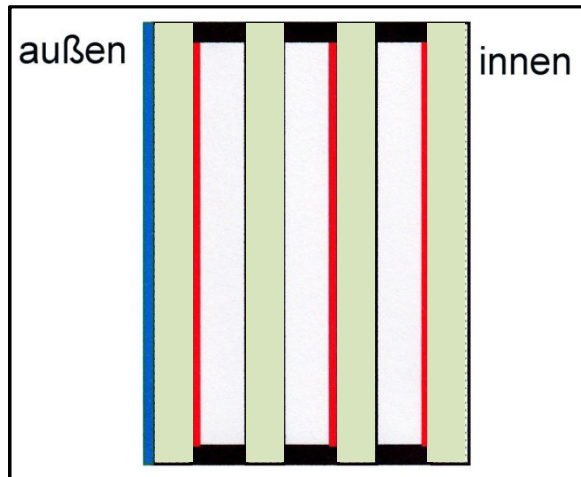
Promotor in BRD: staatl. Wärmeschutzverordnungen (ENEVs)!

Zukunftsvision: **Energieneutrale Verglasung**

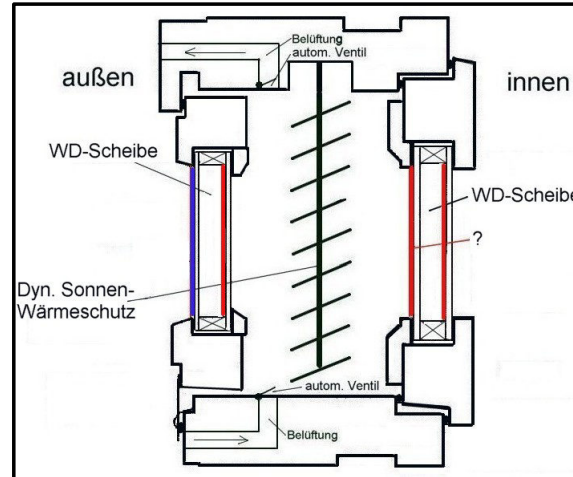
Verluste während der Nacht werden durch solare Energiegewinne bei Tag kompensiert (Anpassung an Null-Energiehaus)

Anforderung an die Verglasung: $U_g \sim 0,4 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ u. hohe solare Energietransmission

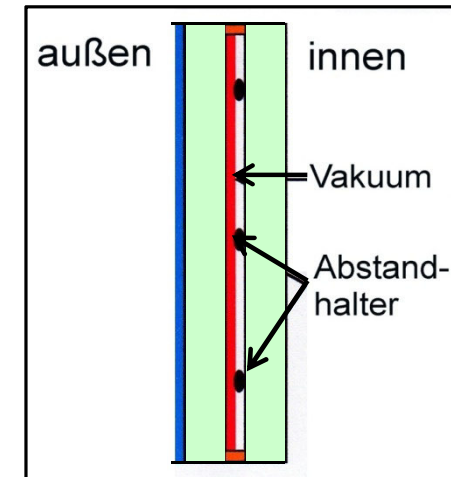
4-fach-W.-Dämmscheibe



Kastenfenster



Vakuum-Scheibe (VIG)



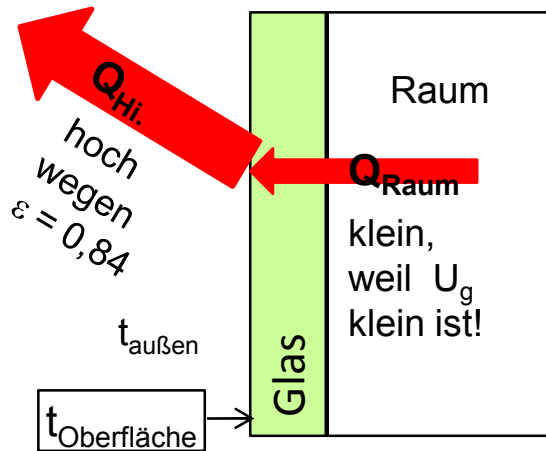
- Niedrig emittierende Schichten (**rot markiert**) werden auch bei zukünftigen Verglasungen fester Bestandteil sein.
- Problem aller energieneutralen Verglasungen: Außenbeschlag (**blau markiert**) kann bei Nacht schon bei bedecktem Himmel auftreten. **Die Vermeidung von Reifbeschlag wäre schon ein großer Fortschritt!**

Wann tritt bei Gebäudeverglasungen Außenbeschlag auf?

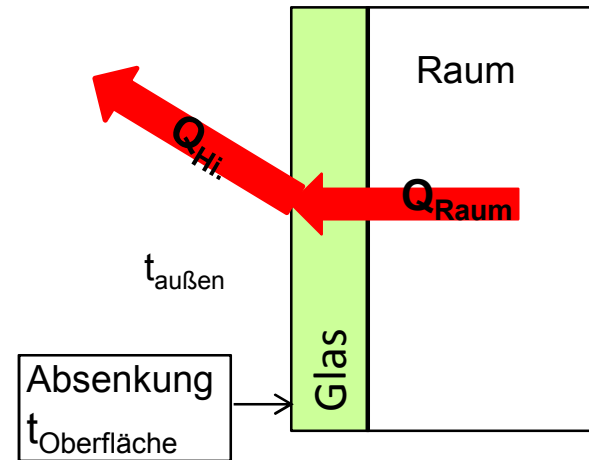
- nachts (keine Sonneneinstrahlung)
- sternklarer Himmel ($t_{Hi.} = t_a - 19 \text{ °C}$)
- möglichst Windstille
- Luftfeuchte hinreichend hoch
- Niedriger U_g -Wert (hohe W.-Isolation)

Worst-case-
Witterungsbedingungen

Was sind die
Potentiale?



Natur sucht Ausgleich
bis: $Q_{Hi.} = Q_{Raum}$

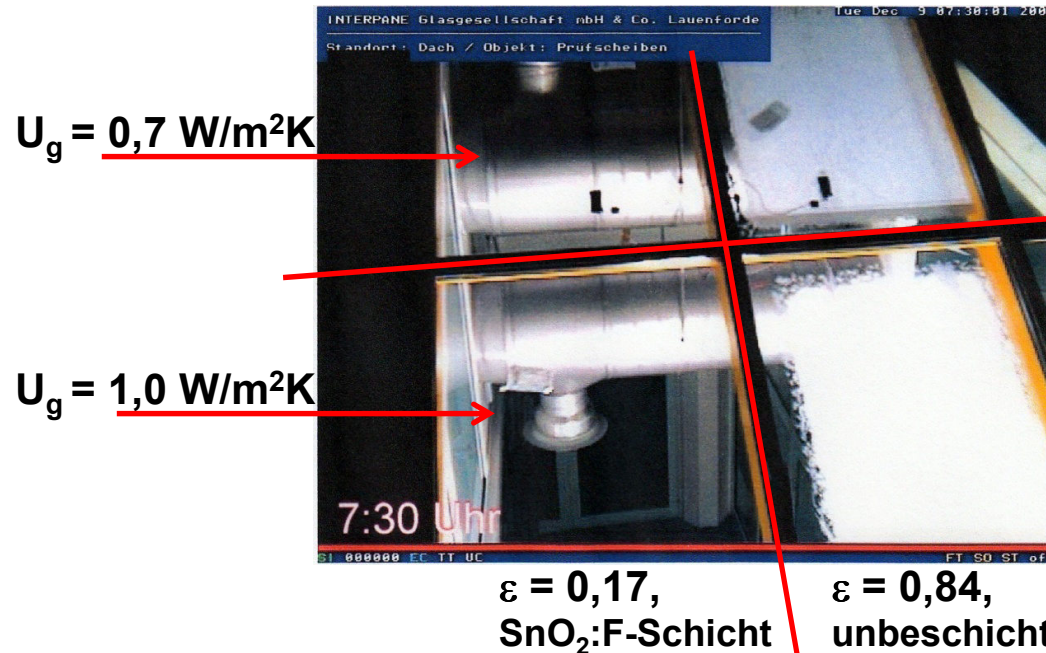


Wenn $t_{Oberfl.} \leq t_{au\beta en}$ existiert
Beschlagrisiko!

Reduktion durch niedriges ε außen!

Beschlagverhinderung durch niedrig emittierenden Schichten auf der Außenoberfläche - Anwendung des ‚Dröppelmina-Effekts‘

Dachfensterverglasung $\beta = 45^\circ$, Fa. Interpane E&B 2002/2003



Beschlaghäufigkeit/a			
$U_g = 0,7 \text{ W/(m}^2\text{K)}$		$U_g = 1,0 \text{ W/(m}^2\text{K)}$	
$\epsilon = 0,17$ (Tage)	$\epsilon = 0,84$ (Tage)	$\epsilon = 0,17$ (Tage)	$\epsilon = 0,84$ (Tage)
6	156	0	142

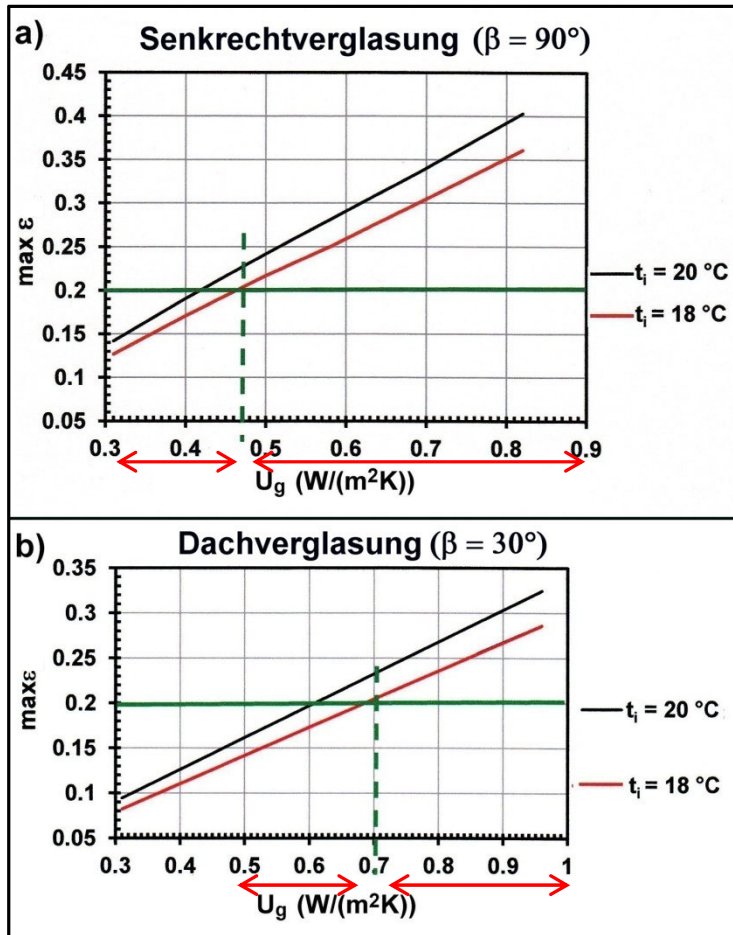
Keine Unterscheidung zwischen Tau- und Reifbeschlag!

Effekt funktioniert!

Die Außenoberflächentemperatur wird durch niedriges ϵ über den Taupunkt angehoben.

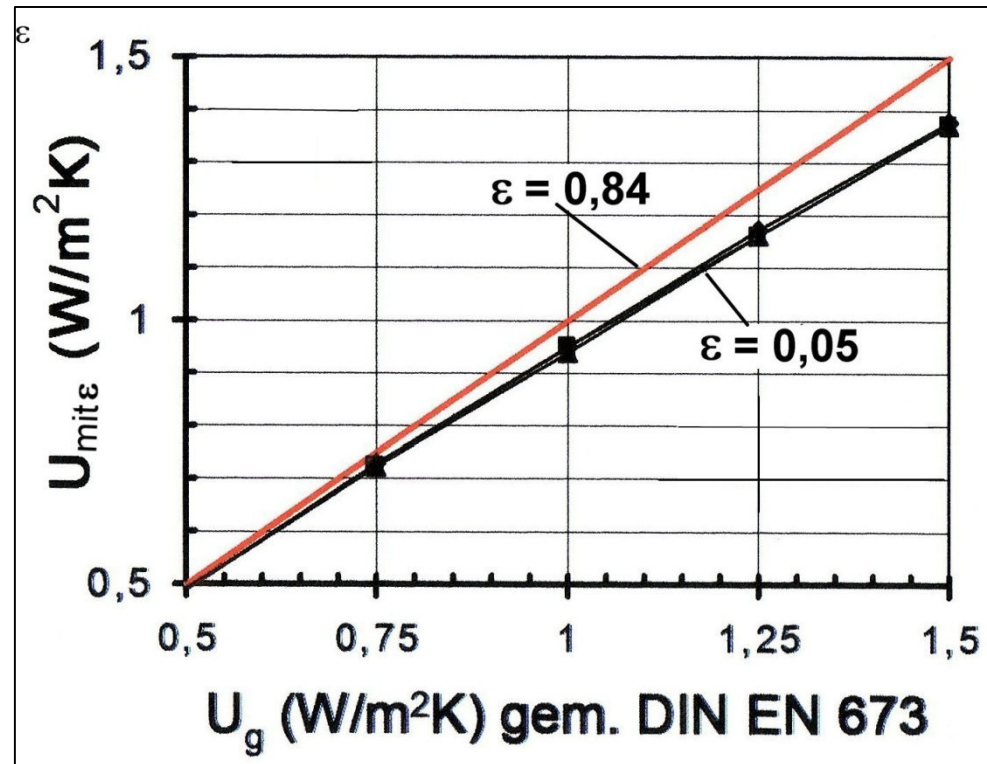
Herausforderung : **Witterungsbeständigkeit** der Schichten!!

Berechnung: Mit welchen ε -Werten ist für welche U_g -Werte Reifbeschlagfreiheit (Oberflächentemperatur $> 0\text{ °C}$) zu erreichen?

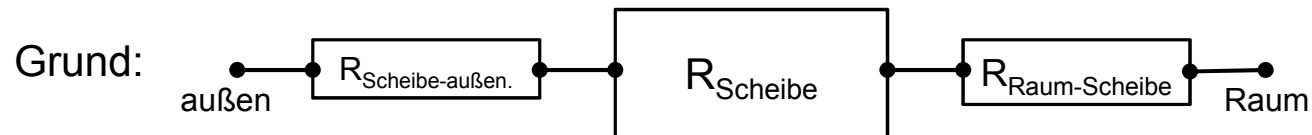


1. Für tiefere Innraumtemperaturen t_i sind kleinere ε notwendig sind.
2. Mit ε können alle derzeitig vermarkteten Fensterverglasungen reifbeschlagfrei gehalten werden.
3. Für energieneutralen Verglasungen sind witterungsbeständige Schichten mit $\varepsilon \sim 0,1$ bis $0,15$ notwendig.
Hier besteht Entwicklungsbedarf!

Berechnung: U_g -Wertverbesserung mit niedrig emittierenden Schichten auf der Außenoberfläche



Der Einfluss von ϵ auf die U_g -Wert-Verbesserung nimmt mit fallendem U_g -Wert ab!



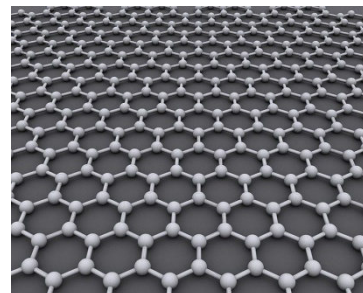
Herausforderung: **witterungsbeständige** niedrig emittierende Schichten

Schicht	Witterungs-Beständigkeit (ko-Kriterium)	Transparenz	Therm. Emissivität	Aussehn/Ästhetik	Verfügbarkeit	Kosten
Au	möglich	befriedigend	ok	farbig	vorhanden	hoch
Ag	nicht möglich	sehr gut	ok	ok	vorhanden	ok
SnO ₂ :F TFO	bewiesen	befriedigend	ok	z. Z. ?	vorhanden	ok?
In ₂ O ₃ :Sn ITO	bewiesen	sehr gut	ok	ok	sehr begrenzt	hoch

Die ITO-Schichten (In₂O₃:Sn, dereinst von Fa. Philips entwickelt) werden heute nahezu ausschließlich in China hergestellt und für nahezu alle elektr. Anzeigen eingesetzt.

Derzeitige Produktion nur für Displays ohne TV-Bildschirme: 30 Mio. m²/a

Hoffnung: **Graphen-Schichten**
(Novoselov u. Geim; Nobelpreis 2010)



Zusammenfassung

- Mit Hilfe von niedrig emittierenden Schichten konnte in den letzten 40 Jahren der U_g -Wert von Gebäudeverglasungen um einen Faktor 10 von $\sim 6 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ (Einfachverglasung) auf $0,6 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ (Dreifach-Verglasung) gesenkt werden. (**Vorbild für E-Autos?!**)
- Die staatl. ENEVs waren maßgeblicher Promoter dieser Entwicklung.
- Eingesetzt werden heute bei Gebäudeverglasungen als niedrig emittierende Schichte weltweit ausschließlich Ag-Schichten.
- Zu erwarten sind in Zukunft **energieneutrale** Verglasungen mit U_g -Werten von $\sim 0,4 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ auch auf der Basis von Ag-Schichten.
- Dem Außenbeschlagsrisiko dieser Verglasungen kann mit niedrig emittierenden Schichten auf der Außenoberfläche entgegen gewirkt werden.
- Für eine **witterungsbeständige Schicht**, die gleichzeitig kostengünstig und effizient ist, besteht noch Entwicklungsbedarf .

Ich bedanke mich für Ihre Aufmerksamkeit!

Reiffreie Windschutzscheiben Einfachdurch niedrig emittierenden Schichten auf der Außenoberfläche - interessant bei Laternengaragen im Winter

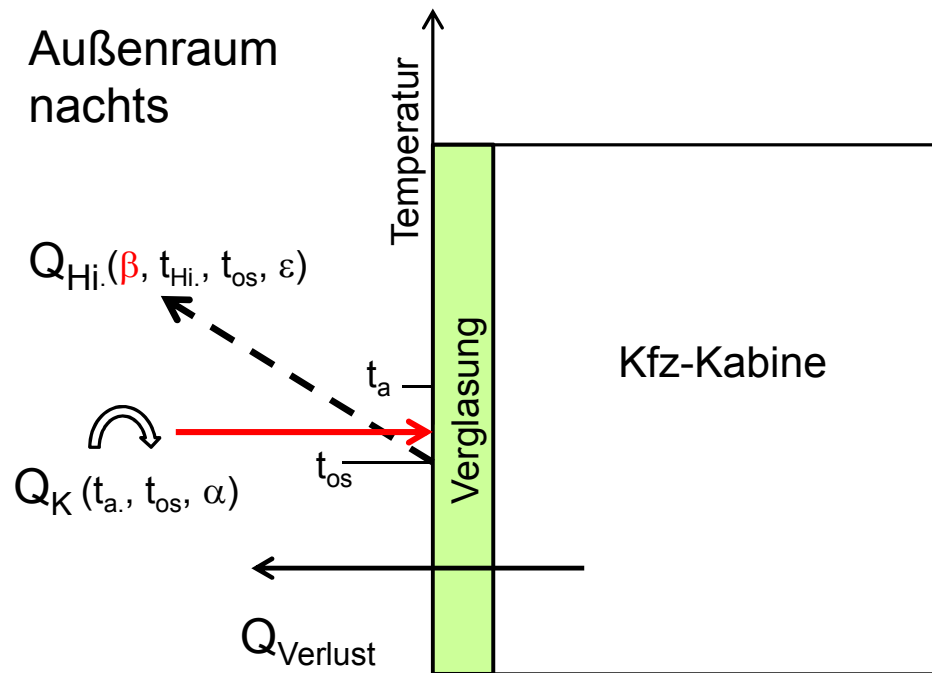


Charakteristika der Kabine : Niedrige W.-Kapazität u. Einfachverglasung

Außenbeschlag kann auftreten, wenn die Kabineninnenraumtemperatur unter die Außentemperatur sinkt.

Mit welchem ε kann Außenbeschlag vermieden bzw. reduziert werden?

Berechenbarer stationärer Fall = Endpunkt der Abkühlung



Endpunkt der Abkühlung,
wenn t_{os} so tief
abgesenkt ist, dass

$$Q_{Hi.} = Q_K,$$

dann folgt

$$Q_{Verlust} = 0,$$

d. h. $t_{os} = t_i.$

Simulationsergebnisse für maximale Kabinenabkühlung bei Nacht

Windschutzscheibe ($\beta = 45^\circ$, klarer Himmel)			Windschutzscheibe ($\beta = 45^\circ$, bedeckter Himmel)		
ε	Max. Abkühlung unter t_o (°C)	Außenbeschlagvermeidung für rLF (%)	ε	Max. Abkühlung unter t_o (°C)	Außenbeschlagvermeidung für rLF (%)
1*	- 8.4	< 43	1*	- 2,5	< 72
0,84	- 7,7	< 46	0,84	- 2,3	< 73
0,2	- 2,8	< 70	0,2	- 0,9	< 82
0,1	- 1,5	< 77	0,1	- 0,5	< 84
0	0	< 100	0	0	< 100

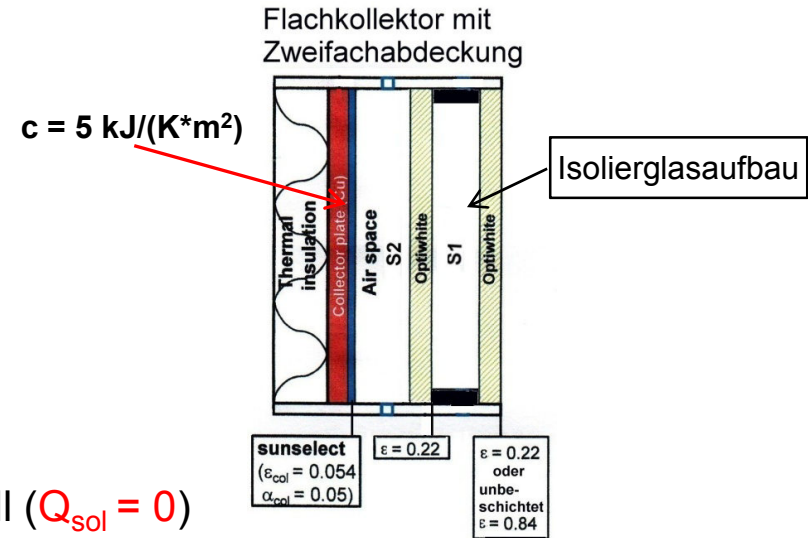
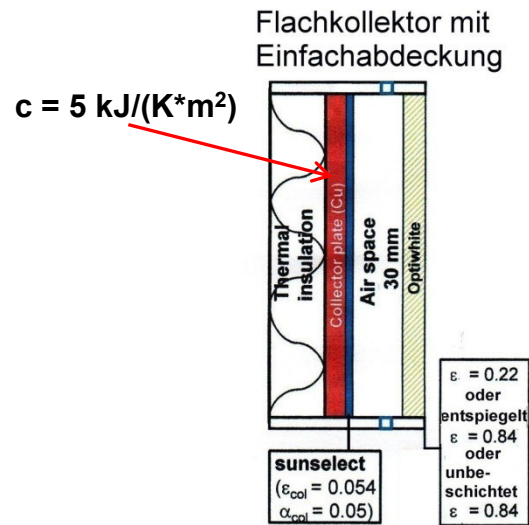
*Bei Beschlag auf der Scheibenaußenseite; t_o = Außenlufttemperatur

Die Ergebnisse können durch gleichzeitige Messung der Kabinenlufttemperatur t_i und der Außenlufttemperatur t_o überprüft werden!

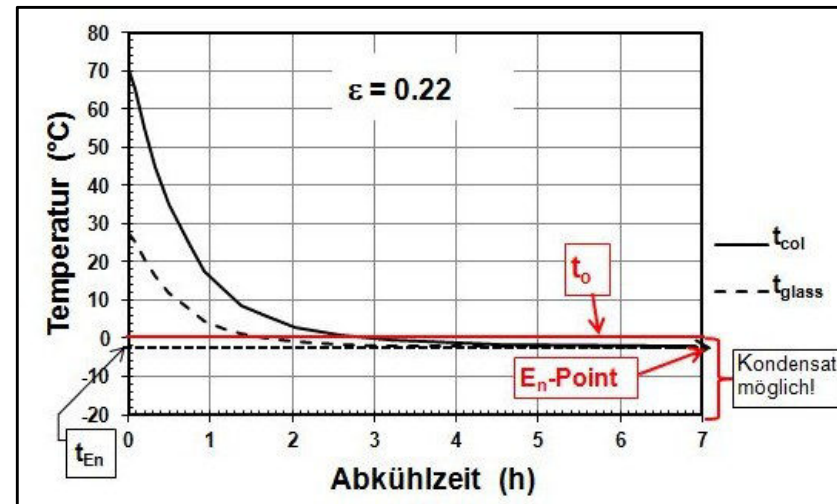
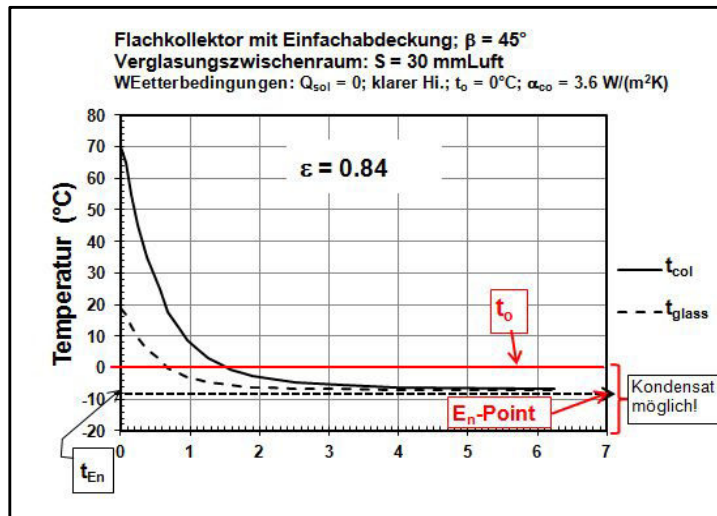
Folgerungen: Niedrig emittierende Schichten

- verringern das Außenbeschlagrisiko
Höhere Fahrsicherheit bei Reifbeschlagbedingungen!
- verringern die Kabinenaus Kühlung (Kühlschrank-Effekt) bei Nacht; geringerer Aufheizenergie morgens. **Sinnvoll bei E-Autos!**

Anwendung von niedrig emittierenden Schichten auf der Außenoberfläche von Flachkollektoren

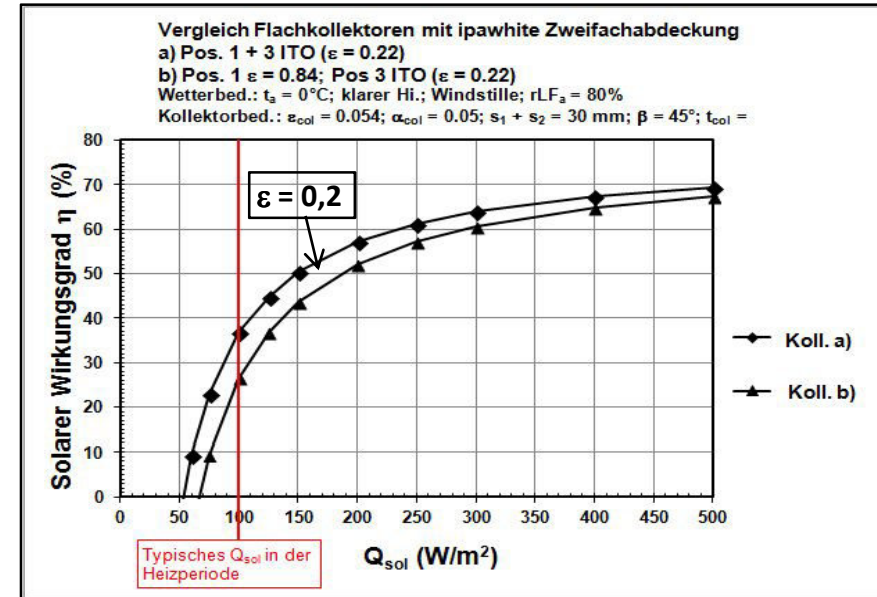
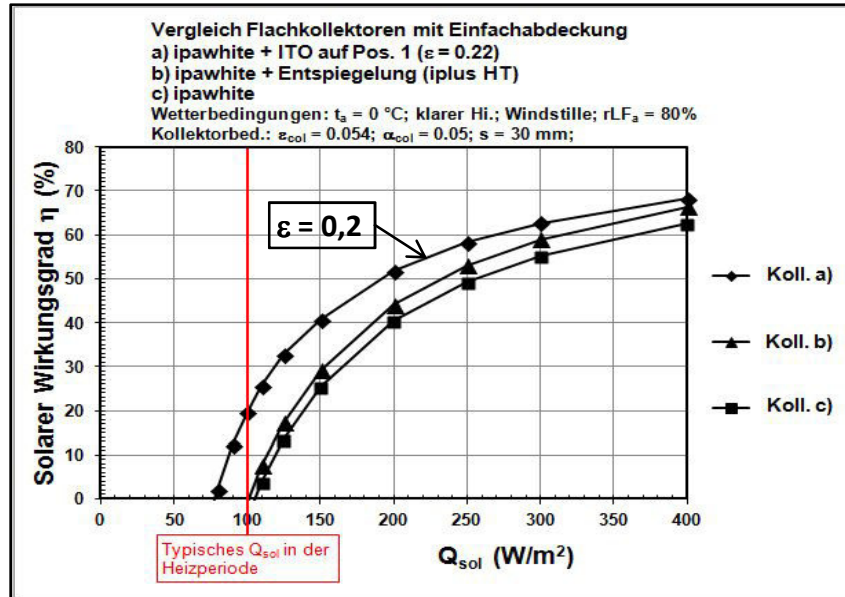


Nachtfall ($Q_{sol} = 0$)



Niedriges ϵ verlangsamt die Abkühlung bei Nacht!

Der Einfluss des thermischen Emissionsvermögens auf den solaren Wirkungsgrad von Flachkollektoren (Tagfall; $Q_{sol} > 0$)



- Niedriges ε erhöht den solaren Wirkungsgrad (\equiv S.-Kollektoreffekt)
- Sein Einfluss ist bei niedrigem Q_{sol} hoch; mit wachsendem Q_{sol} abnehmend.
Vorteilhaft für Heizperiode!

Ergebnisse sind auf Gebäude-und Kfz-Verglasungen übertragbar!

Zusammenfassung

Anwendung der transparenten, niedrig emittierenden Schichten

Thermoskannen-Effekt

Erhebliche Erhöhung der Wärmeisolation (Energieeinsparung)

Einsatz: Na-Dampf-Niederdrucklampe u. Isoliergläsern für den Hochbau

Schichten: Basis TCO und Ag (weltweit)

Dröppelmina-Effekt

- Nachteffekte

Verringerung des Außenbeschlagrisikos

Verringerung der Abkühlgeschwindigkeit

Verringerung des Abkühl niveaus

D. h.: **Kühlschrank-Effekt der Verglasung wird abgeschwächt!**

- Tageffekt

Erhöhung des solaren Gewinns bei niedrigem Q_{sol}

D. h.: **Selektive Erhöhung des S.-Kollektor-Effektes**

Heutige Anwendung des Dröppelmina-Effektes

Bei Gebäude- und Kfz-Verglasungen in Erprobungsphase (ITO-Dilemma)

Bei S.-Kollektorverglasung in Studienphase

Angewandte Schichten: Ausschließlich TCOs