

## BAUPHYSIKALISCHE URSACHEN FÜR SCHIMMEL IN INNENRÄUMEN UND RECHNERISCHE BEURTEILUNG



M. Krus

1 intern  
© Fraunhofer IBP

1

### Mikroorganismen auf Bauteiloberflächen

**Bewuchs/Aufwuchs auf Bauteiloberflächen ist  
ist ein absolut natürlicher Umstand.**

**Nahezu keine Oberfläche ist frei  
von Mikroorganismen!**

**Einschränkung:**

- optische inakzeptabel
- gesundheitlich (Innenraum)
- materialtechnisch negativ

„Befall“

2 intern  
© Fraunhofer

2 Fraunhofer  
IBP

2

## Schimmelpilze in Zahlen

### Summerer (3500 v. Chr):

Ernteaufälle durch Pilzkrankheiten

### Großbritannien (1988):

2,5 Millionen Mieter und Eigentümer betroffen

### Ökotest (1994):

9000 bis 40000 Pilztote im Jahr?

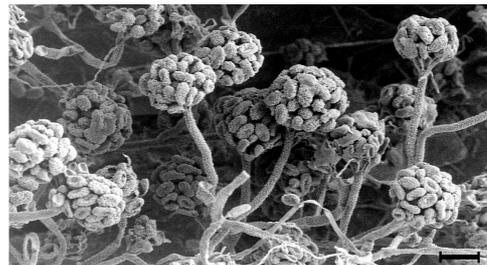
### Bauschäden in Deutschland:

200 Millionen Euro pro Jahr

## Schimmelpilzschäden



## Schimmelpilzschäden



5  
© Fraunhofer

intern

5  
Fraunhofer  
IBP

5

## Erkrankungen des Menschen

Begriff	Beschreibung	Arten
Mykosen	Pilzwachstum am oder im menschlichen Wirt	Epidermale Mykosen
		Endo- und Systemmykosen
Mykotoxikosen	Vergiftungen durch Mykotoxine	Aflatoxikosen
		Penicillium-Mykotoxikosen
		Fusarium-Mykotoxikosen
		Alternaria-Mykotoxikosen
		Stachybotryotoxikose
Mykogene Allergien	Kontakt von Pilzelementen mit feuchten Schleimhäuten	Asthma bronchiale
		allergische Alveolitis

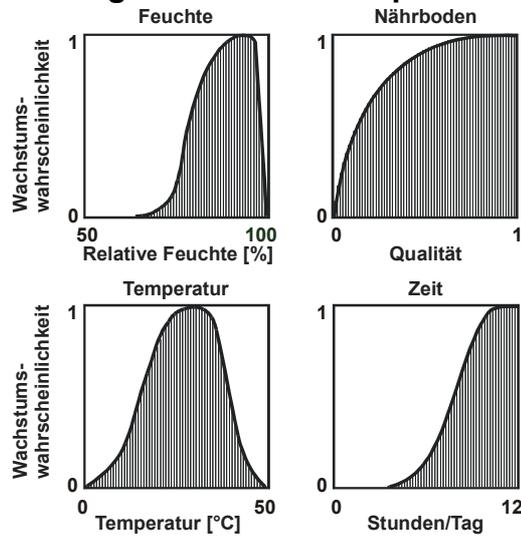
6  
© Fraunhofer

intern

6  
Fraunhofer  
IBP

6

## Wachstumsvoraussetzungen von Schimmelpilzen



7  
© Fraunhofer

intern

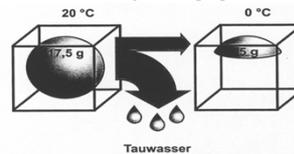
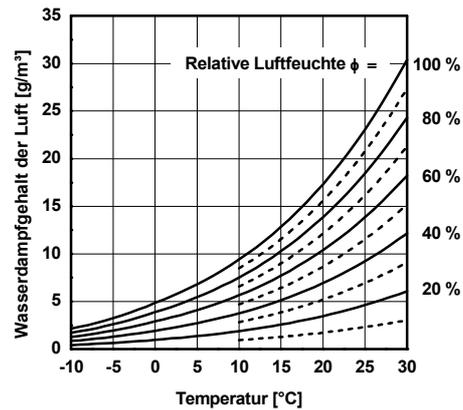
7

Fraunhofer  
IBP

7

## Relative Luftfeuchte

- Abkühlen: die relative Feuchte erhöht sich bis maximal 100 % r.F.
- bei weiterem Abkühlen wird Wasserdampf als Nebel oder an Oberflächen als Tauwasser ausgeschieden



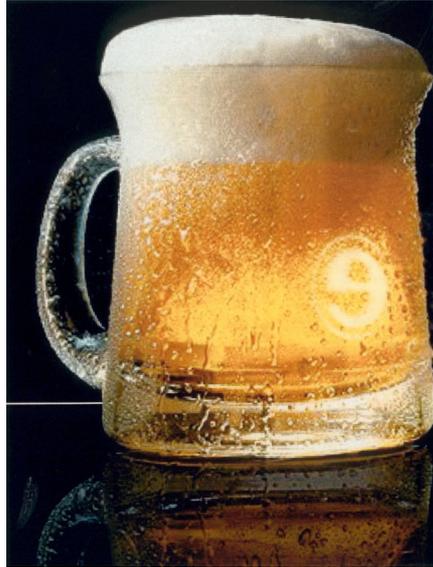
8  
© Fraunhofer IBP

intern

Fraunhofer  
IBP

8

### Taupunktunterschreitung



9  
© Fraunhofer IBP

intern

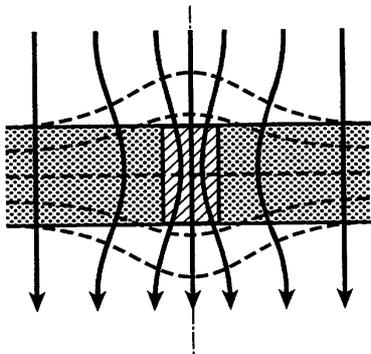
Fraunhofer  
IBP

9

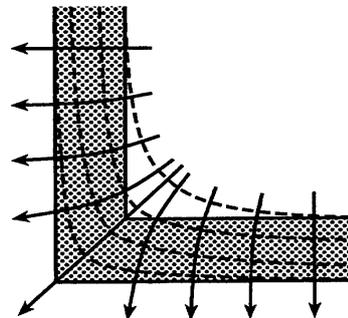
### Thermisches Verhalten von Außenbauteilen: Wärmebrücken

#### Unterscheidung:

materialbezogene Wärmebrücke



geometrische Wärmebrücke



10  
© Fraunhofer IBP

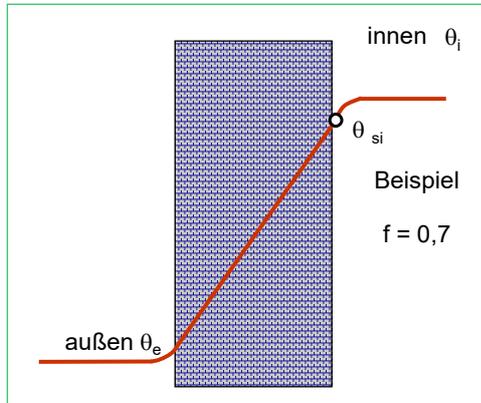
intern

Fraunhofer  
IBP

10

### Thermisches Verhalten von Außenbauteilen

Berechnung der Oberflächentemperaturen  $\theta_{s,i}$



$\theta_{s,i}$ [°C]	$\theta_i$ [°C]	$\theta_e$ [°C]	r.F.* [%]
15.5	20	+ 5	69
12.5	20	- 5	80
11.0	20	- 10	91
9.3	20	- 15	100

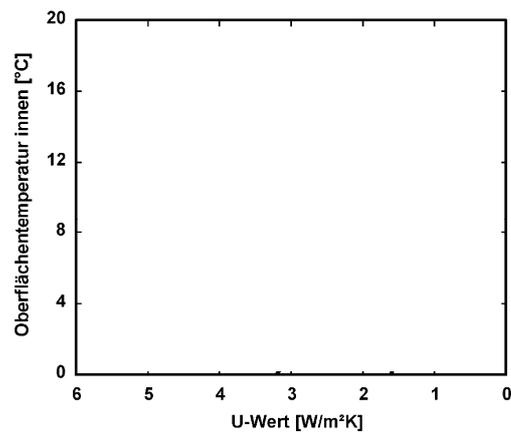
\* Oberflächenfeuchte bei  
50% Raumlufffeuchte

11

### Oberflächentemperaturen an den Außenwänden

Übergangskoeffizient h [W/m²K]:

- h = 8:** Regelquerschnitt
- h = 4:** Ecke
- h = 2:** hinter einem Schrank
- h = 1:** Ecke hinter Schrank



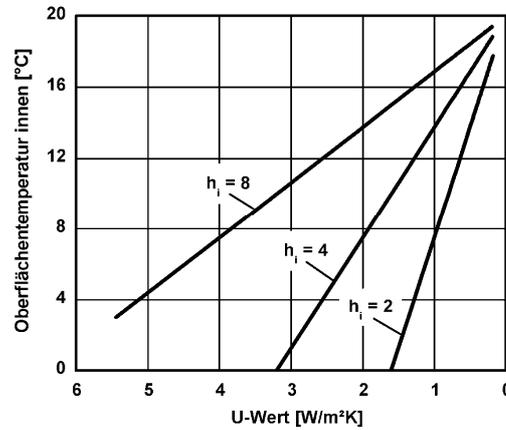
12

### Oberflächentemperaturen an den Außenwänden

Außen: -10 °C, Innen: 20 °C

#### Übergangskoeffizient $h$ [W/m<sup>2</sup>K]:

- $h = 8$ :** Regelquerschnitt
- $h = 4$ :** Ecke
- $h = 2$ :** hinter einem Schrank
- $h = 1$ :** Ecke hinter Schrank

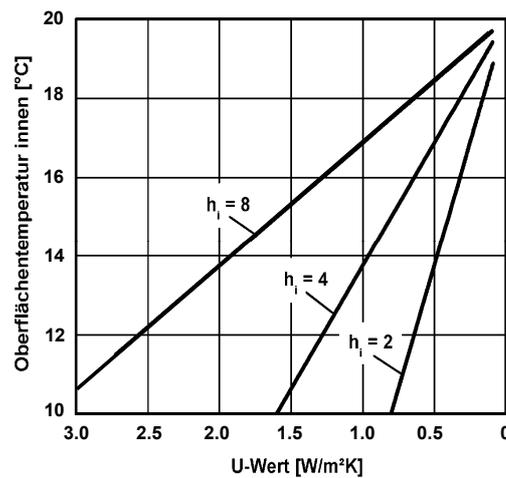


### Oberflächentemperaturen an den Außenwänden

Außen: -10 °C, Innen: 20 °C

#### Übergangskoeffizient $h$ [W/m<sup>2</sup>K]:

- $h = 8$ :** Regelquerschnitt
- $h = 4$ :** Ecke
- $h = 2$ :** hinter einem Schrank
- $h = 1$ :** Ecke hinter Schrank



### Schimmelpilzbildungen



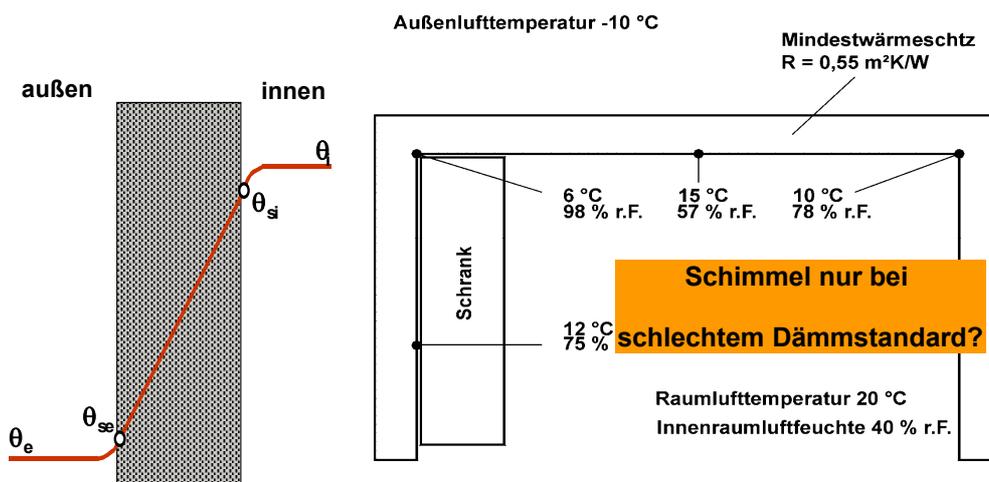
15  
© Fraunhofer

intern

15  
Fraunhofer  
IBP

15

### Oberflächentemperaturen der Außenwände



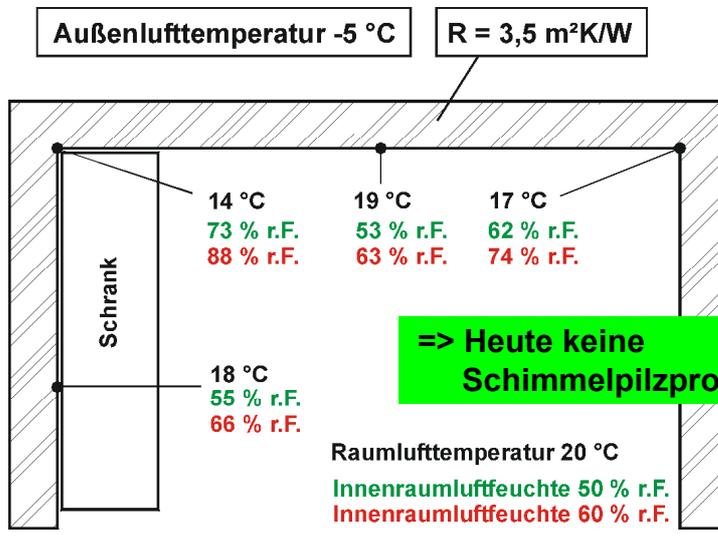
16  
© Fraunhofer

intern

16  
Fraunhofer  
IBP

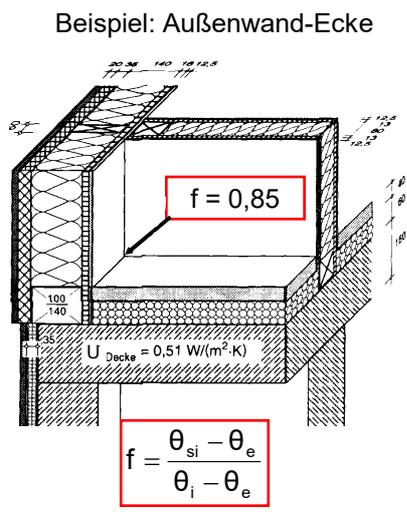
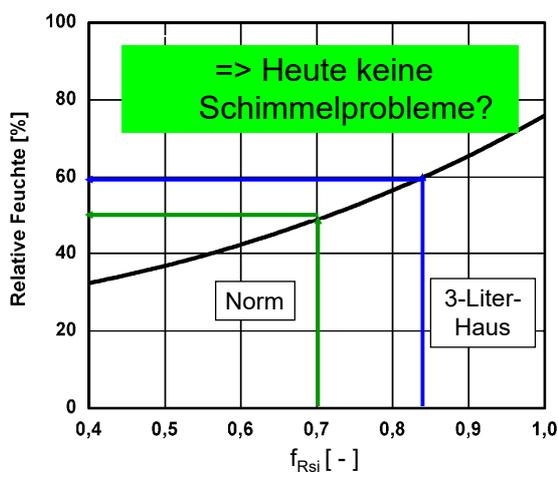
16

### Oberflächentemperaturen an den Außenwänden

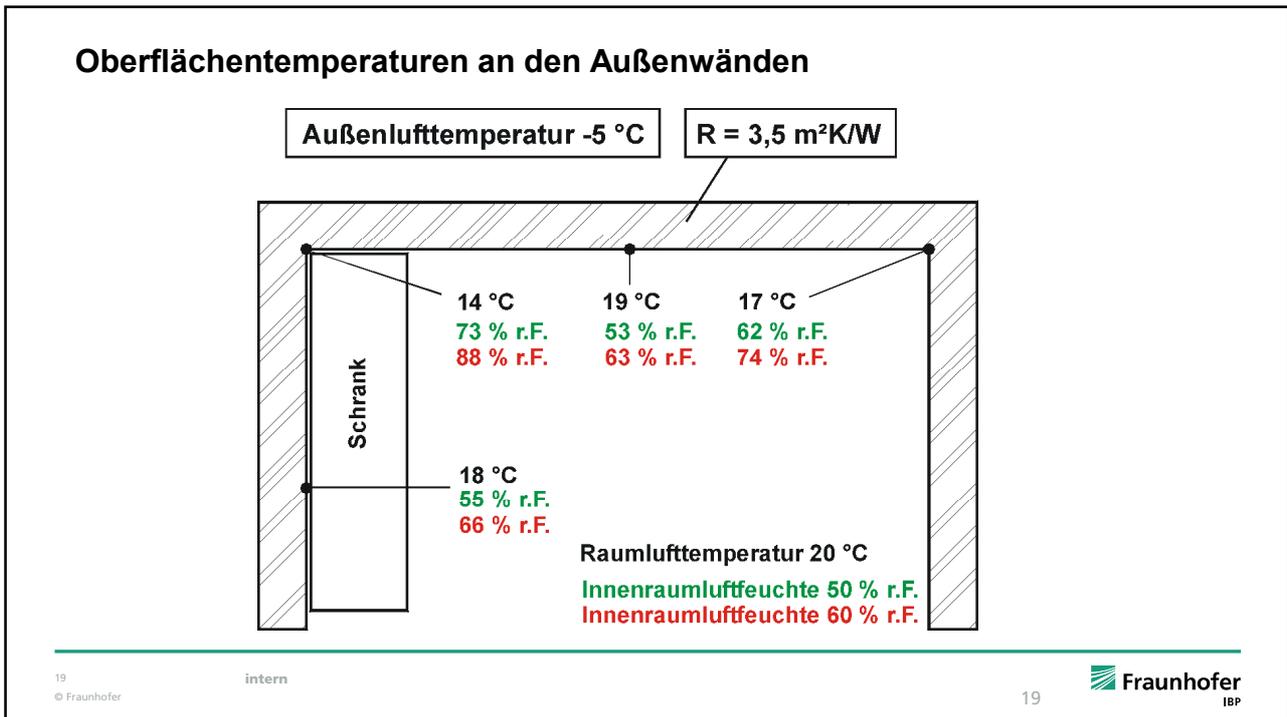


17

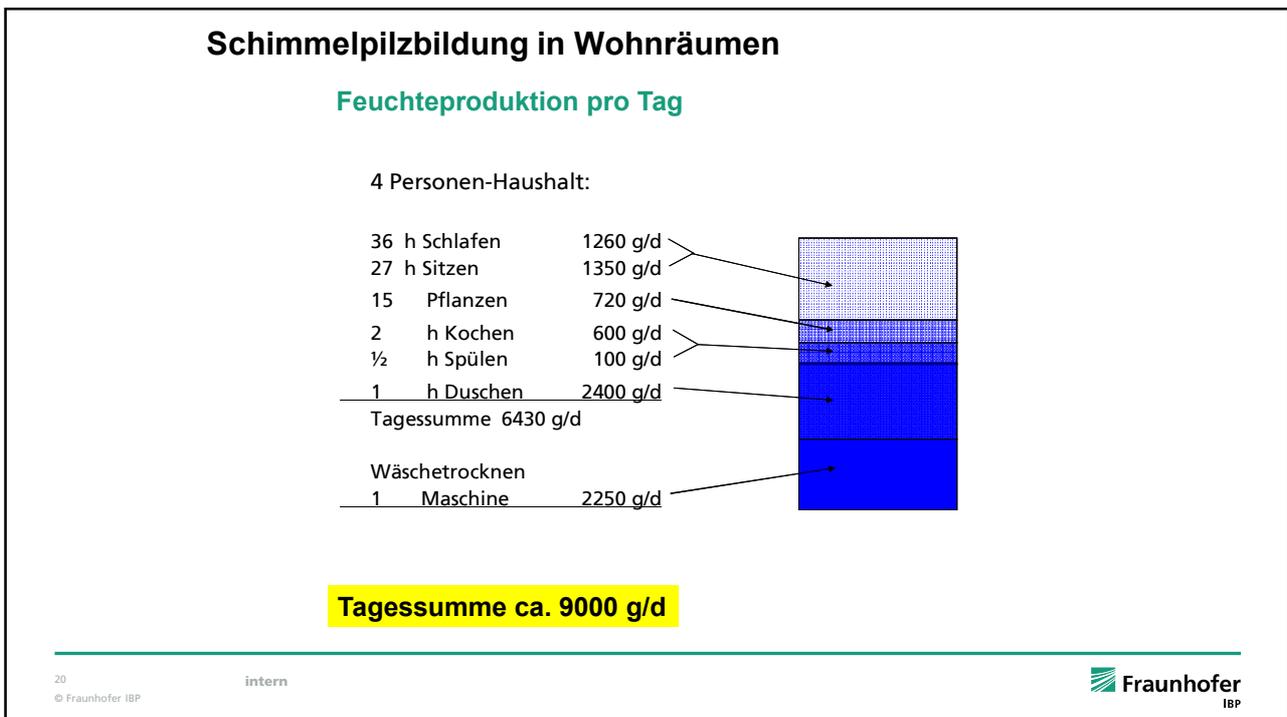
### Maximale Raumluftfeuchte ohne Schimmelpilze



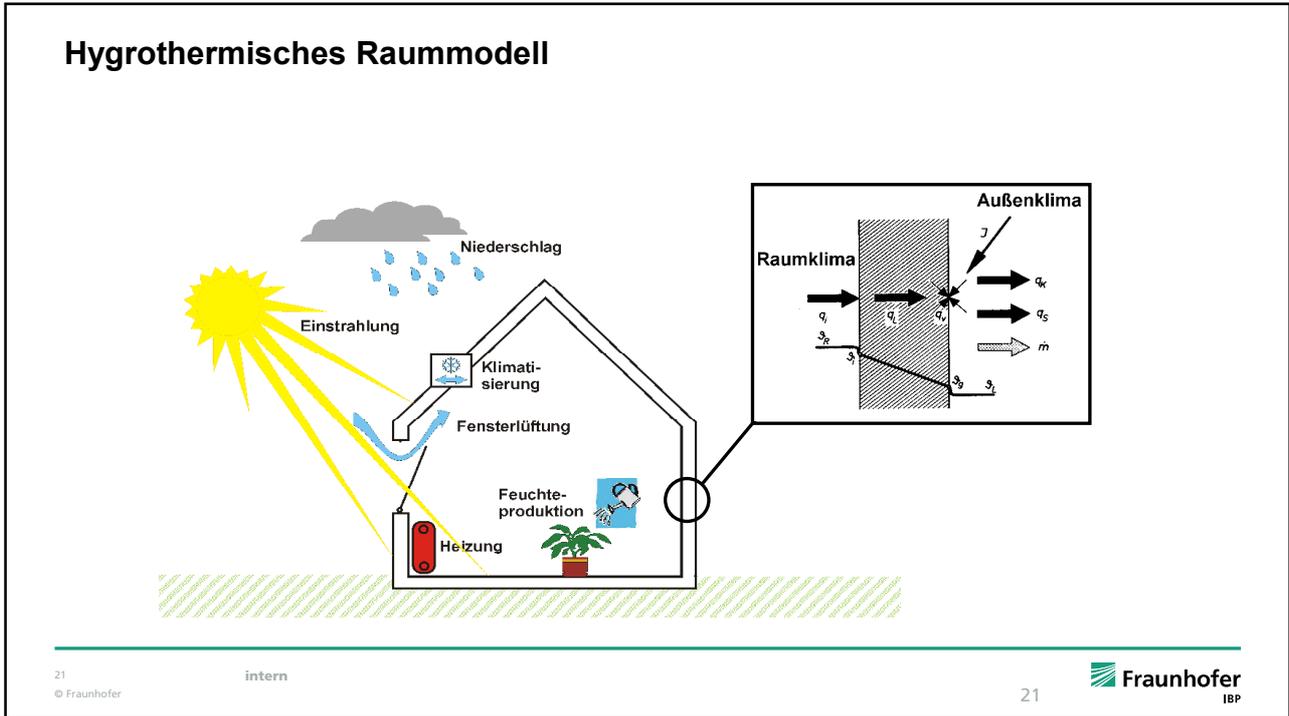
18



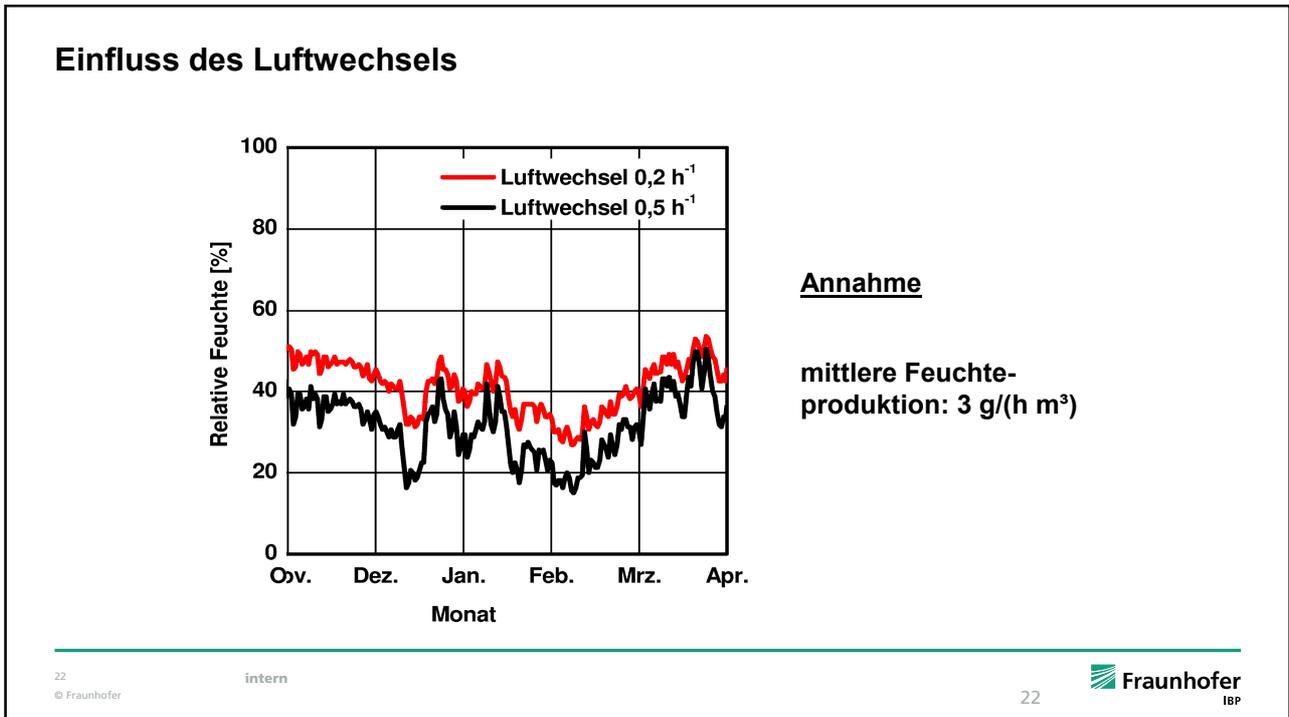
19



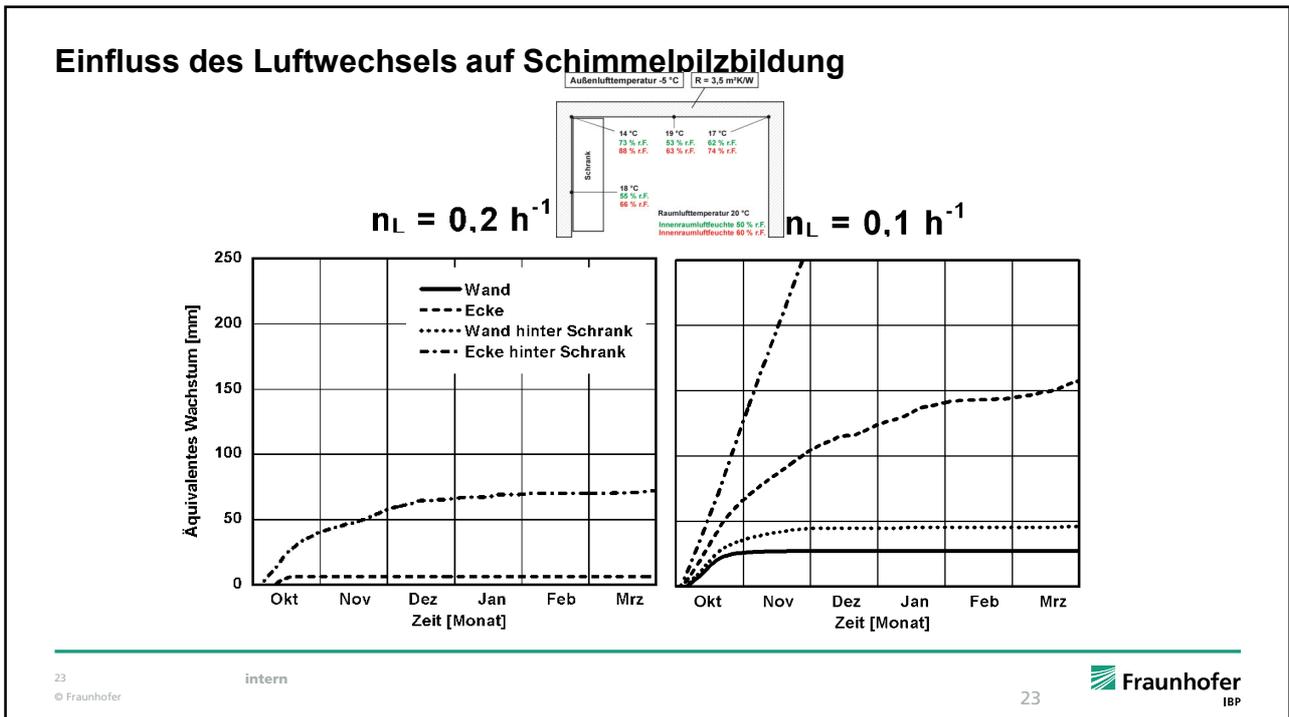
20



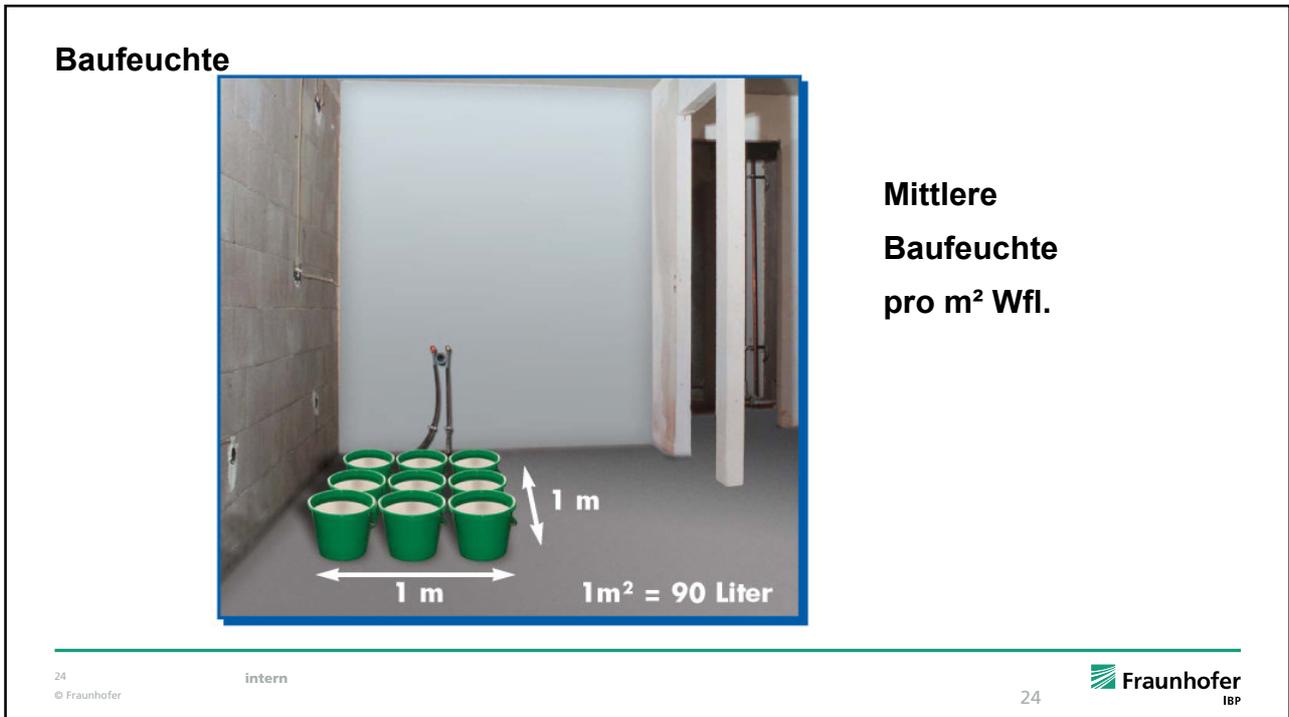
21



22

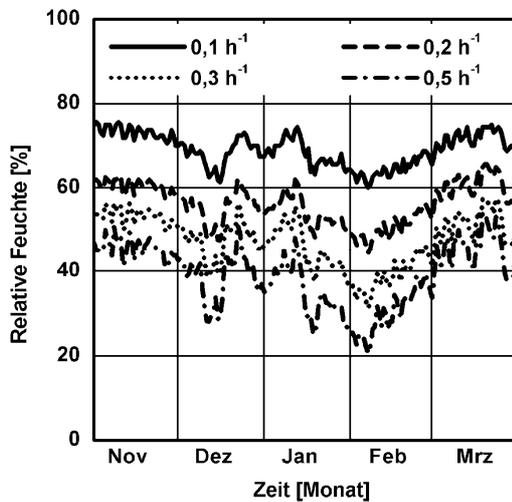


23



24

### Einfluss des Luftwechsels



Annahme

mittlere Feuchte-  
produktion und  
Baufeuchte

### Häufigkeit von Schimmelpilzschäden

Raum	Beobachtung
Schlafzimmer	
Kinderzimmer	
Wohnzimmer	
Bad	
Küche	
sonstige (z. B.) Flur	

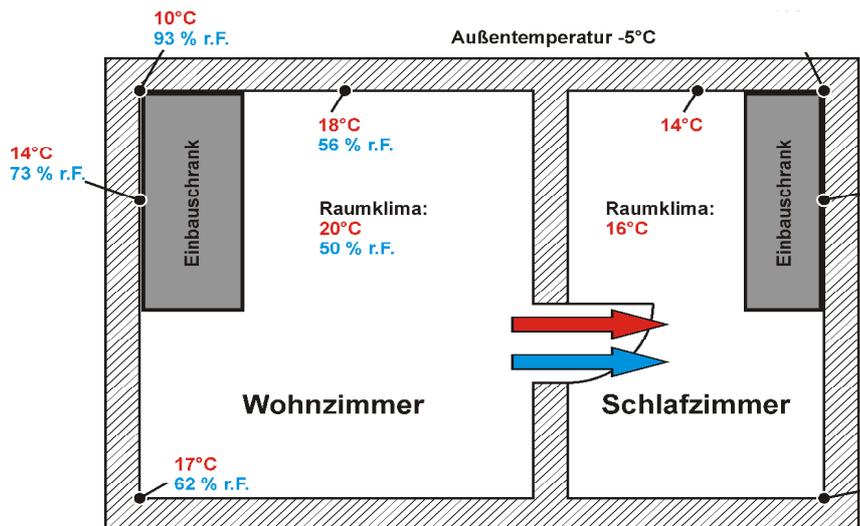
### Häufigkeit von Schimmelpilzschäden

Raum	Beobachtung
Schlafzimmer	41
Kinderzimmer	26
Wohnzimmer	16
Bad	8
Küche	8
sonstige (z. B.) Flur	2

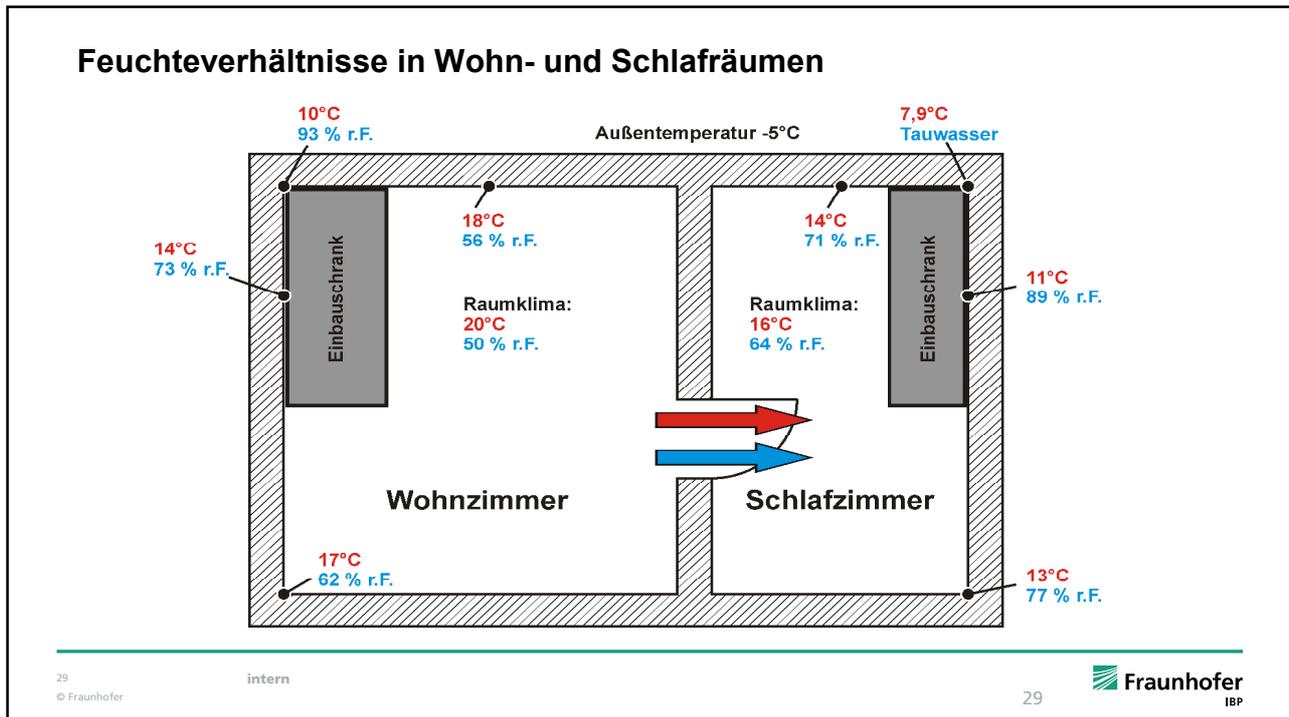
Einbauschranksituation hier nicht berücksichtigt!

27

### Feuchteverhältnisse in Wohn- und Schlafräumen



28



29

### Zwischen-Zusammenfassung

**Bauphysikalische Ursachen für Schimmelpilzbildung:**

- ungenügendes Wärmedämmniveau bzw. Wärmebrücken,
- erhöhte Wärmeübergangswiderstände,
- unzureichende Beheizung,
- erhöhte Feuchteproduktion in Innenräumen,
- mangelhaftes Lüftungsverhalten der Bewohner
- Baufeuchte in Konstruktionen

**Nur Beseitigung der Ursachen für Schimmelpilzbildung bringt langfristigen Erfolg**

**Bei jeder Energiesparmaßnahme muss die Feuchtesituation des Bauwerks berücksichtigt werden!**

© Fraunhofer intern 30 Fraunhofer IBP

30

## Vorhersage von Schimmelpilzbildung

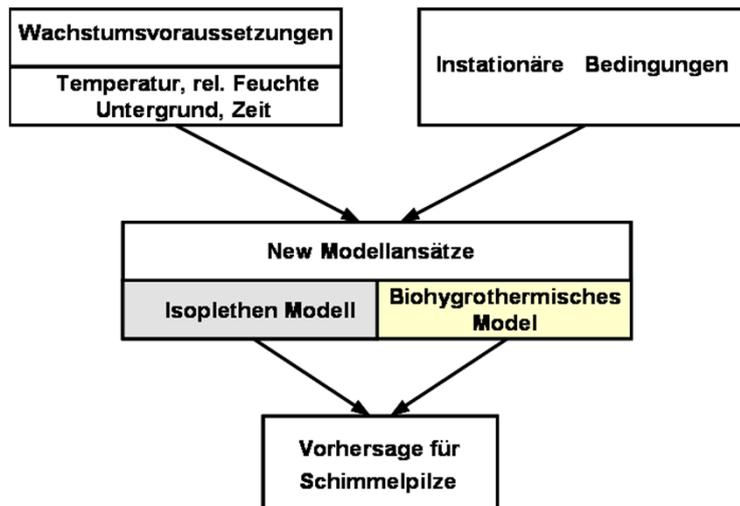
### Problem

- Gesundheitliche Gefährdung
- Sanierungskosten durch Schimmelpilze
- Biozide sind keine Lösung

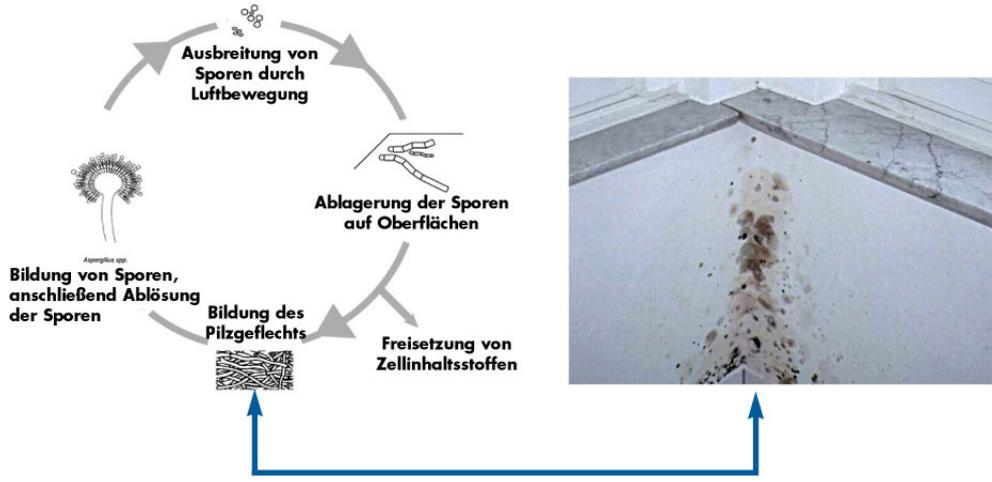
### Zielsetzung

- Planungsinstrument für Praktiker
- Berücksichtigung instationärer Verhältnisse
- Ausschluss jeglicher Pilzbildung

## rechnerische Beurteilungsmöglichkeiten



### Wachstum von Schimmelpilzen



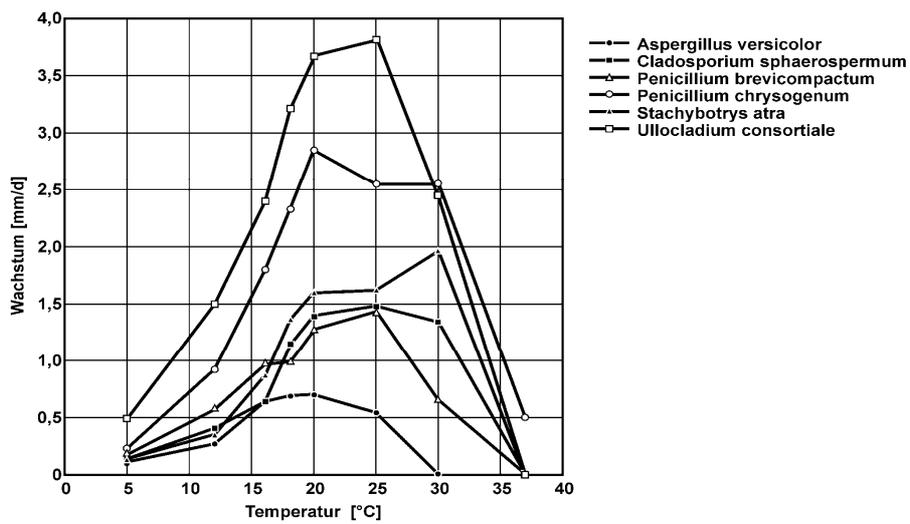
33 © Fraunhofer IBP

intern



33

### Wachstum von Schimmelpilzen



34 © Fraunhofer

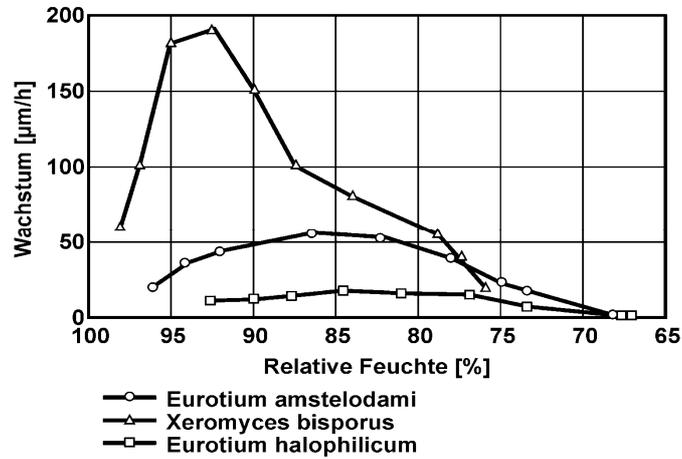
intern

34



34

### Wachstum von Schimmelpilzen



35

### Biologische Untersuchungen: Wasseraktivität

Wasseraktivität = Verfügbarkeit des Wassers

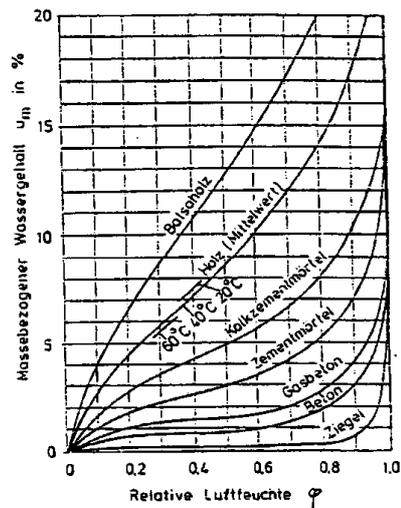
Abhängig von der Bindung des Wassers ans Material

$$a_w = \varphi / 100$$

mit:

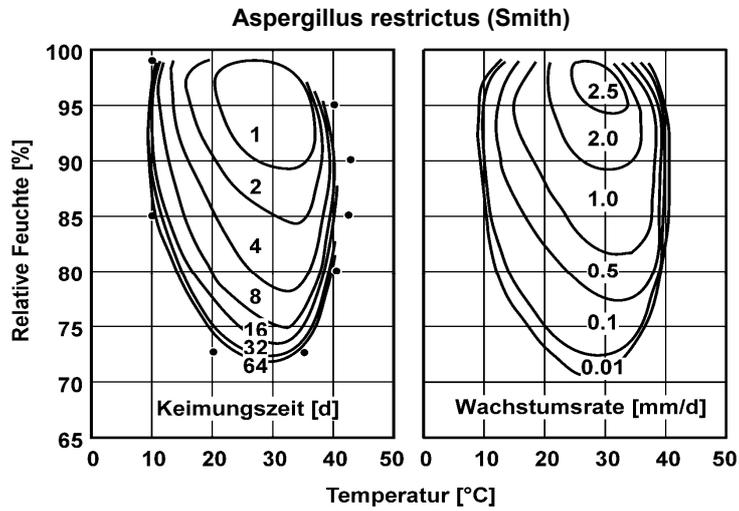
$a_w$  [-] Wasseraktivität  
 $\varphi$  [%] relative Luftfeuchte

II  
 V  
 gleiche Verfügbarkeit bei unterschiedlichen Wassergehalten



36

### Isoplethensysteme



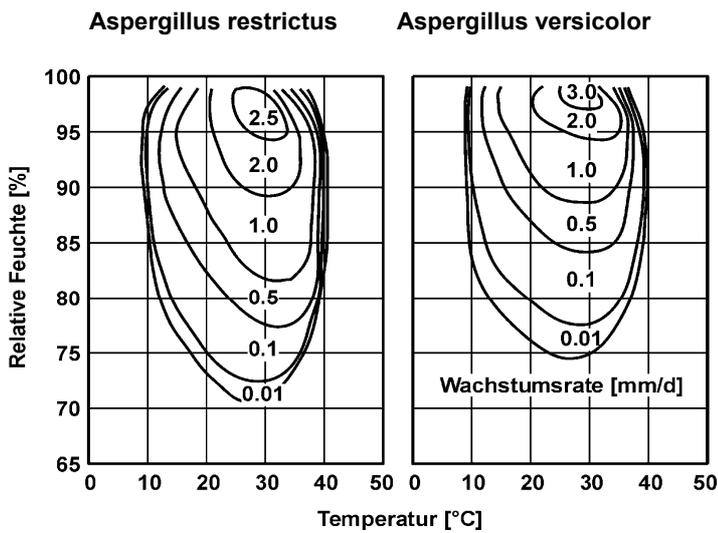
37  
© Fraunhofer

intern

37 Fraunhofer  
IBP

37

### Isoplethensysteme



Ca. 200 Spezies  
im Innenraum  
gefunden

38  
© Fraunhofer IBP

intern

Fraunhofer  
IBP

38

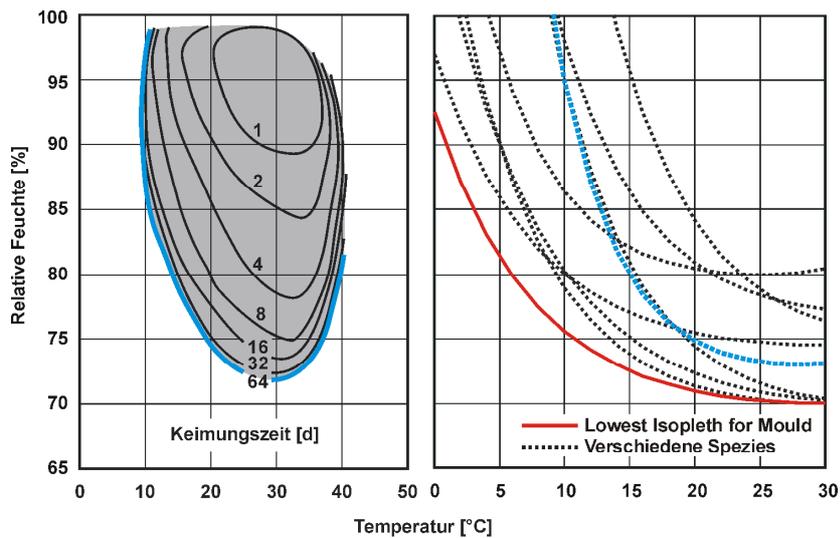
### Typische Schimmelpilze in Räumen?

Auszug aus der Literaturlauswertung

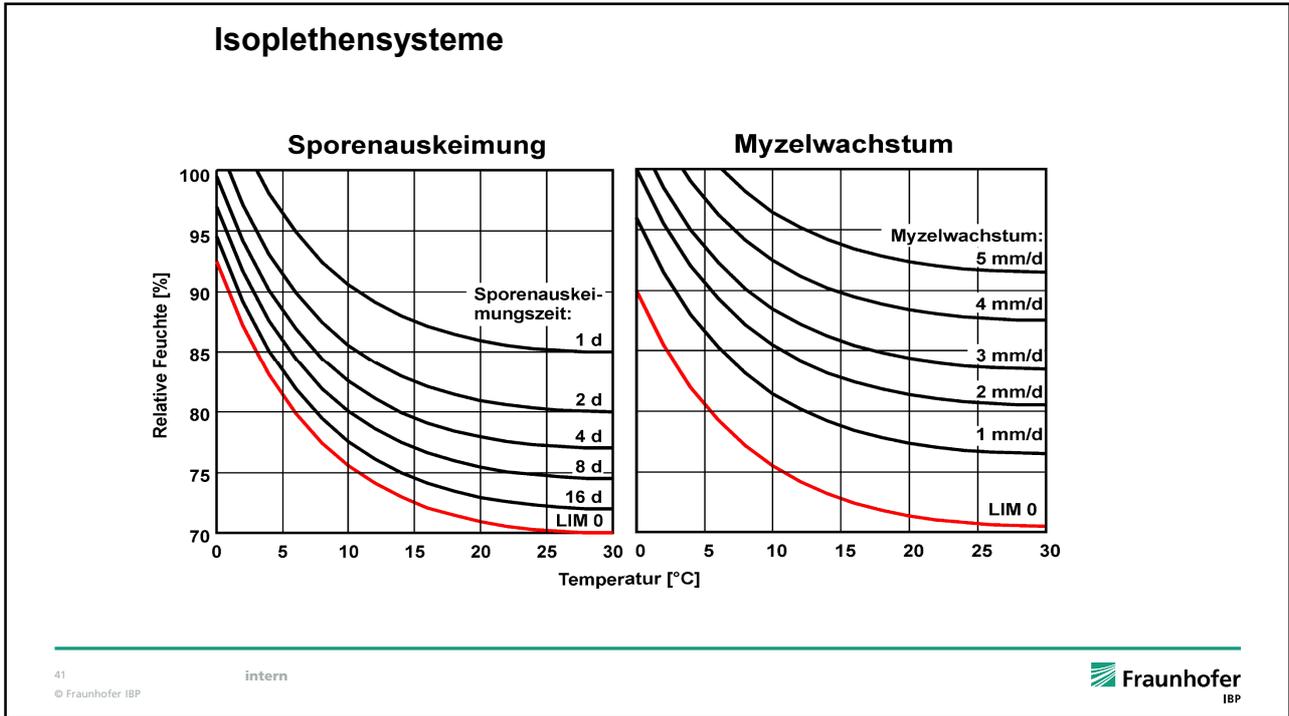
Pilzspezies	repräsentativ in Gebäuden							Gesundheitsgefahrung	Daten vorhanden	
	[35]	[87]	[50]	[12]	[37]	[95]	[21]		Sporenkeimung	Myzelwachstum
<i>Asp. nidulans</i>										
<i>Asp. niger</i>										
<i>Asp. ochraceus</i>										
<i>Asp. parasiticus</i>										
<i>Asp. penicilloides</i>										
<i>Asp. repens</i>										
<i>Asp. ruber</i>										
<i>Asp. sydowii</i>										
<i>Asp. terreus</i>										
<i>Asp. ustus</i>										
<i>Asp. versicolor</i>										
<i>Asp. wentii</i>										
<i>Aur. pullulans</i>										
<i>Botrytis sp.</i>										
<i>Botrytis cinera</i>										
<i>Canadia albicans</i>										
<i>Chaetomium sp.</i>										
<i>Cha. globosum</i>										
<i>Cladosporium sp.</i>										
<i>Cla. herbariorum</i>										
<i>Cla. herbarum</i>										

39

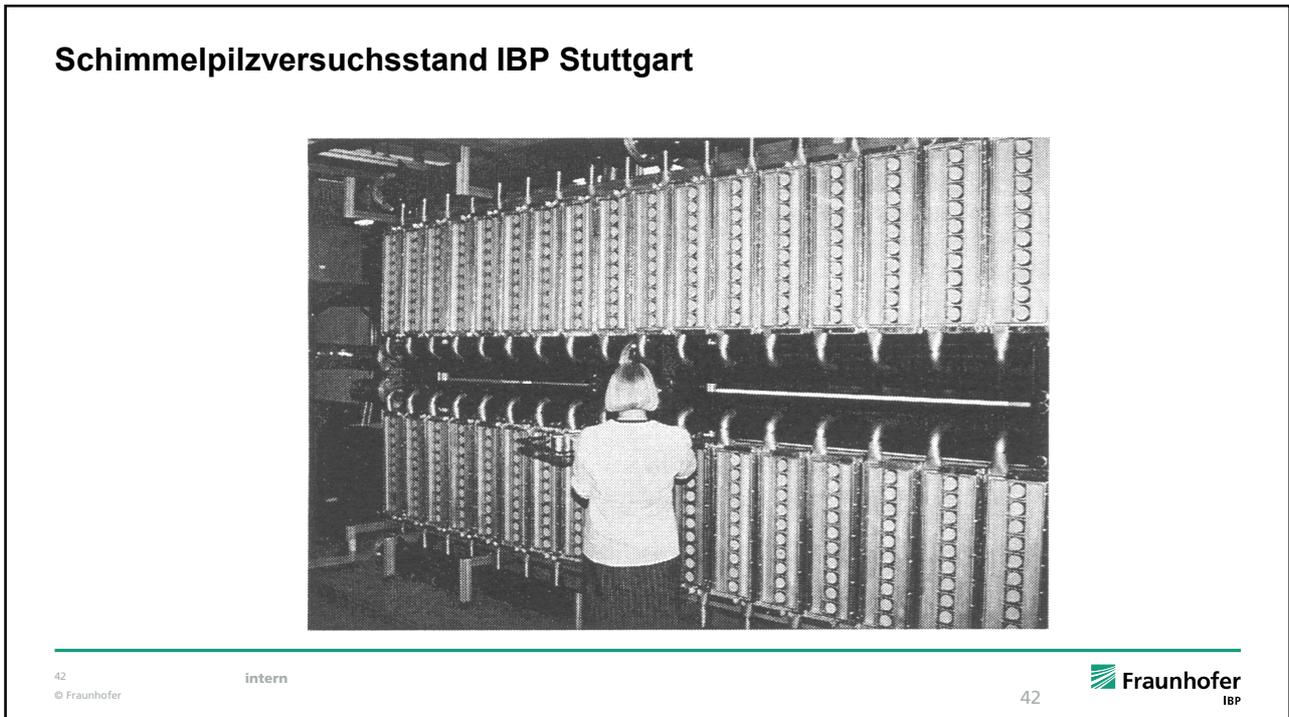
### Isoplethen zur Bewertung von Schimmelpilzbildung



40

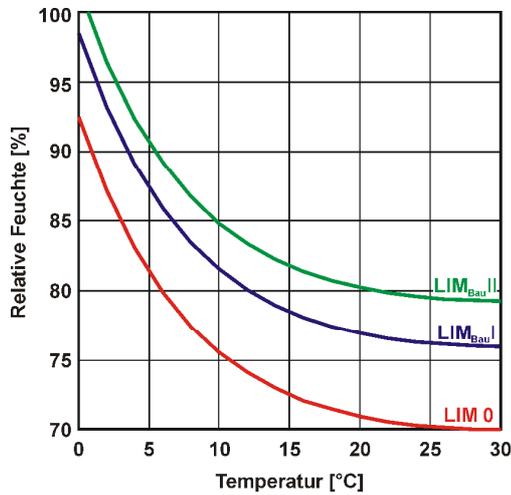


41



42

### Einfluss des Materials auf die Lage des LIM

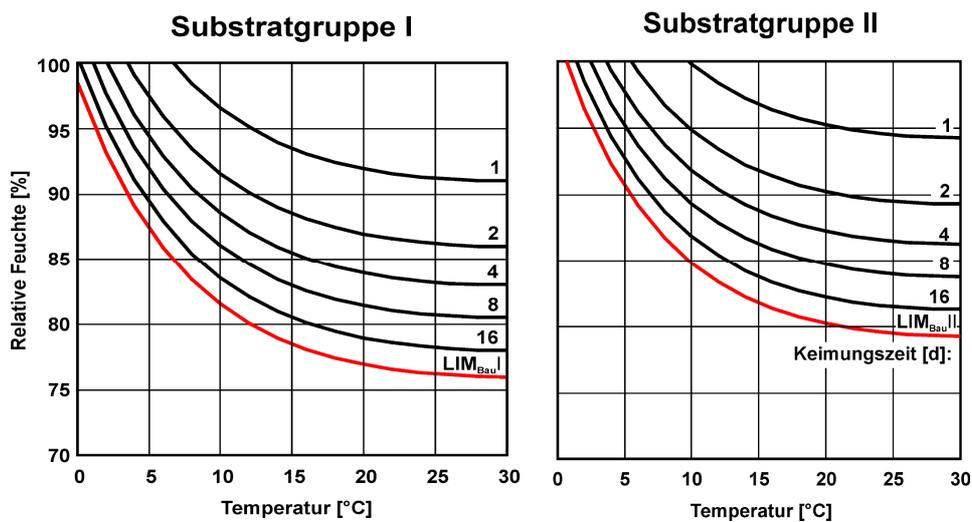


#### Substratgruppen

- 0** optimales Substrat (biologische Vollmedien)
- I** biologisch gut verwertbare Substrate (z.B. Tapeten, Verschmutzung)
- II** biologisch kaum verwertbare Substrate (z.B. mineralische Baustoffe)

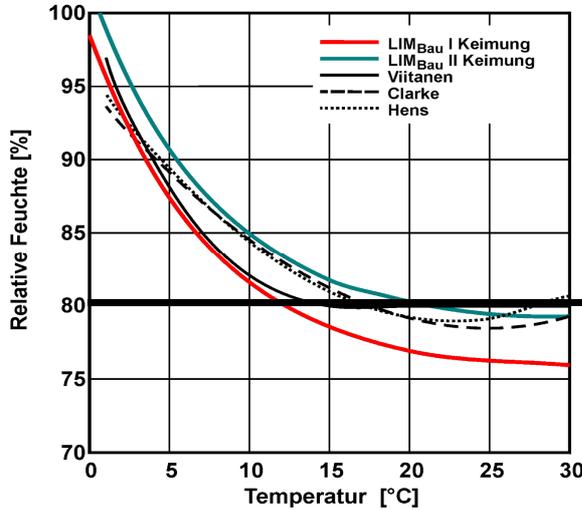
43

### Isoplethensysteme für Baustoffe



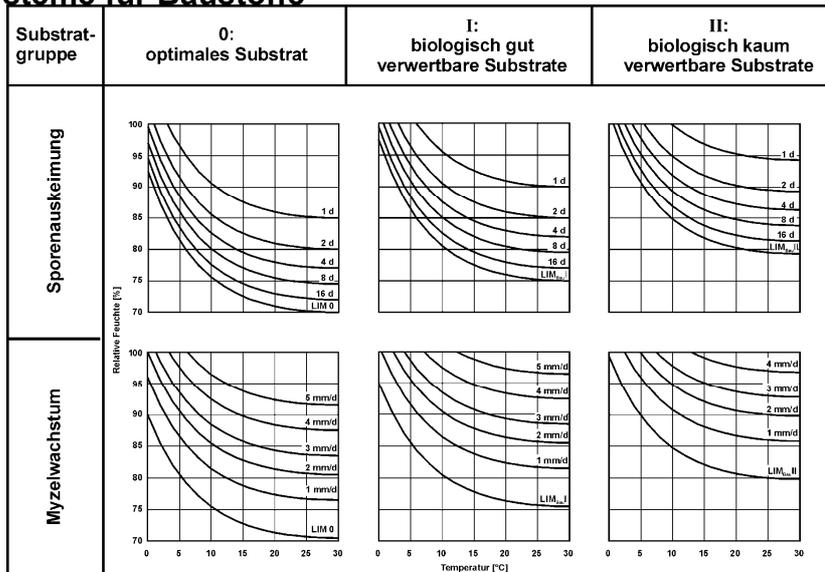
44

### Vergleich der Angaben von Wachstumsvoraussetzungen



45

### Isoplethensysteme für Baustoffe



46

## Gesundheitsgefährdung durch Schimmelpilze

### Bewertung einzelner Schimmelpilze:

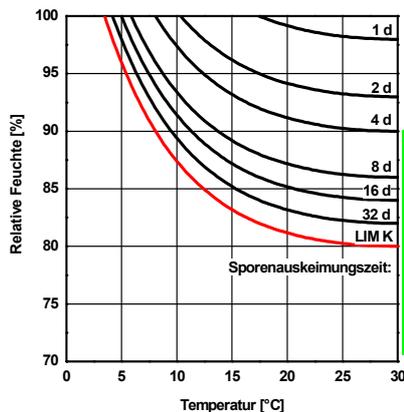
- kein eindeutiger Ursachen-Wirkungs-Zusammenhang
- Abhängigkeit von der Größe des Befalls
- Personen unterschiedlich betroffen

### Besonders kritische Schimmelpilzspezies:

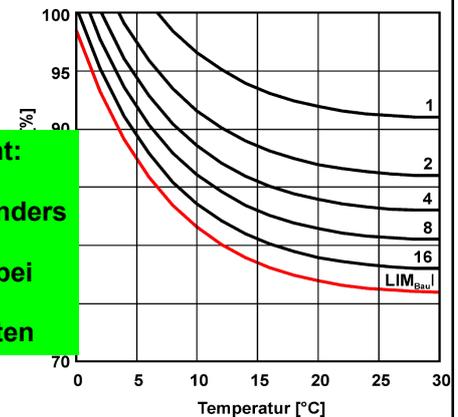
- *Aspergillus fumigatus*
- *Aspergillus flavus*
- *Stachybotrys chartarum*

## Isoplethensysteme kritische Pilze (optimaler Nährboden)

*Asp. flavus u. Asp. fumigatus; Stachybotrys*



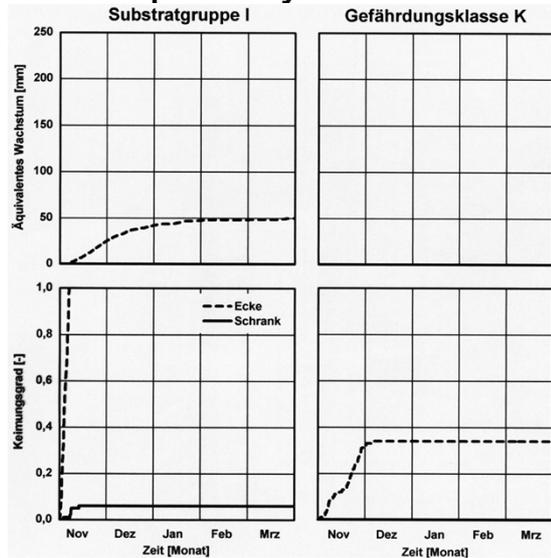
Substratgruppe I



**Die gute Nachricht:  
Gesundheitlich besonders  
kritische Pilze nur bei  
sehr hohen Feuchten**

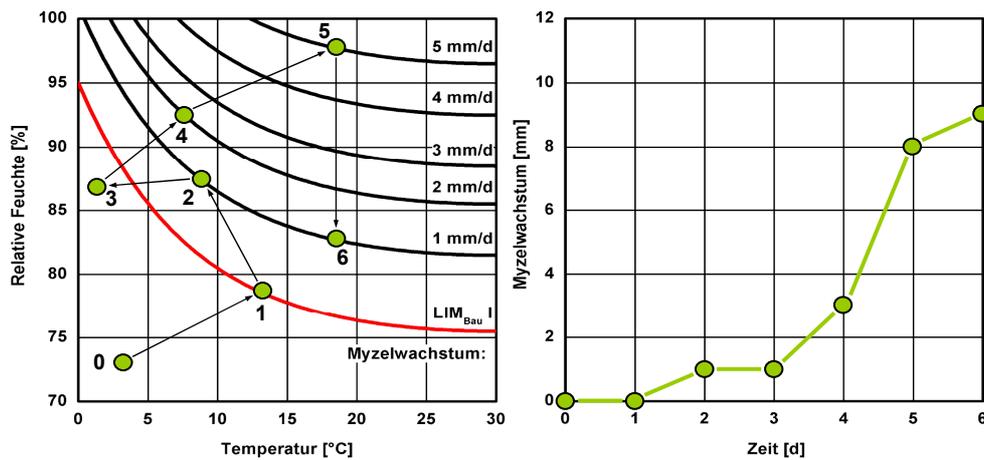
**Daten nur für optimales Substrat !**

### Vorhersage mit Hilfe der Isolethensysteme



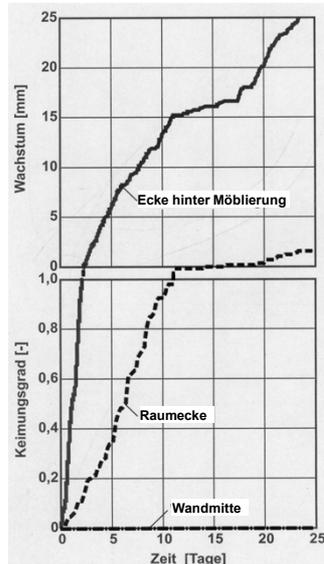
49

### Anwendung der Isolethensysteme



50

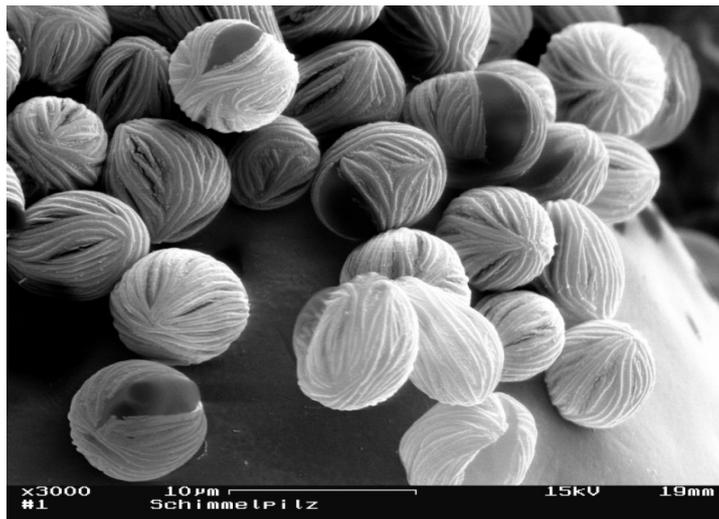
### Vorhersage mit Hilfe der Isolethensysteme



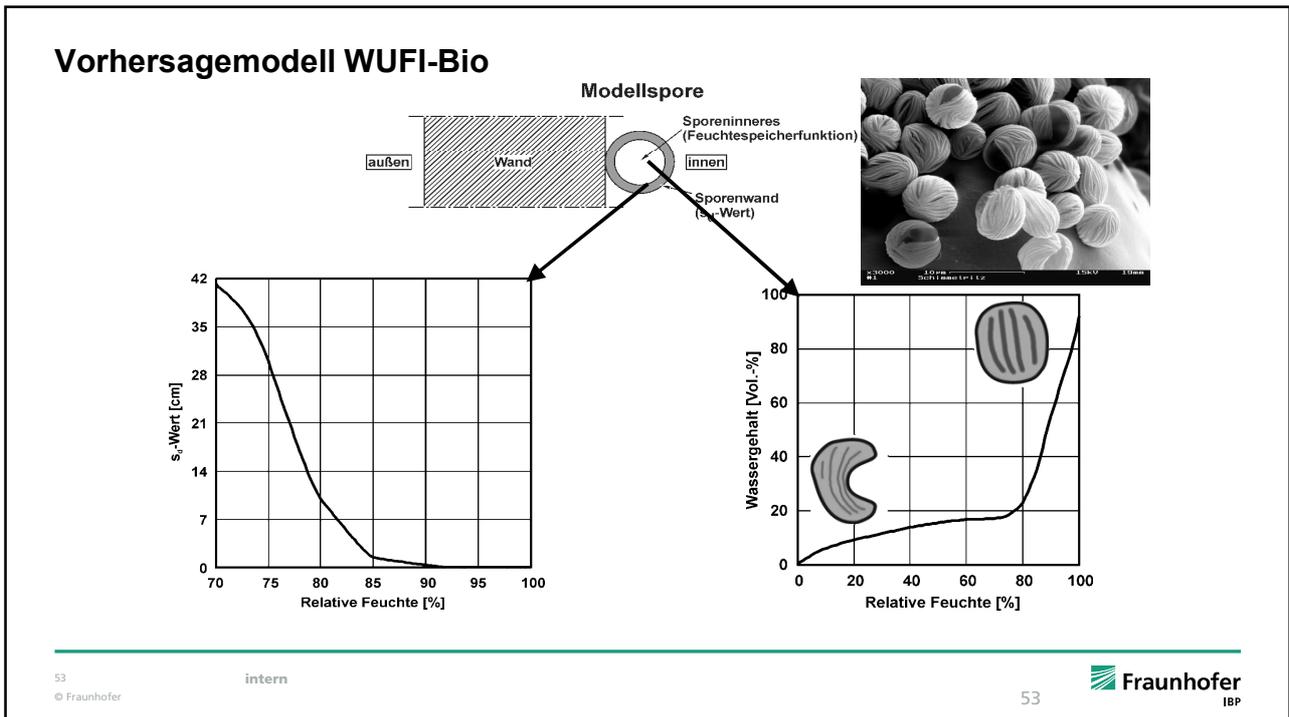
**Problem:**  
**Rein additives Verfahren**

51

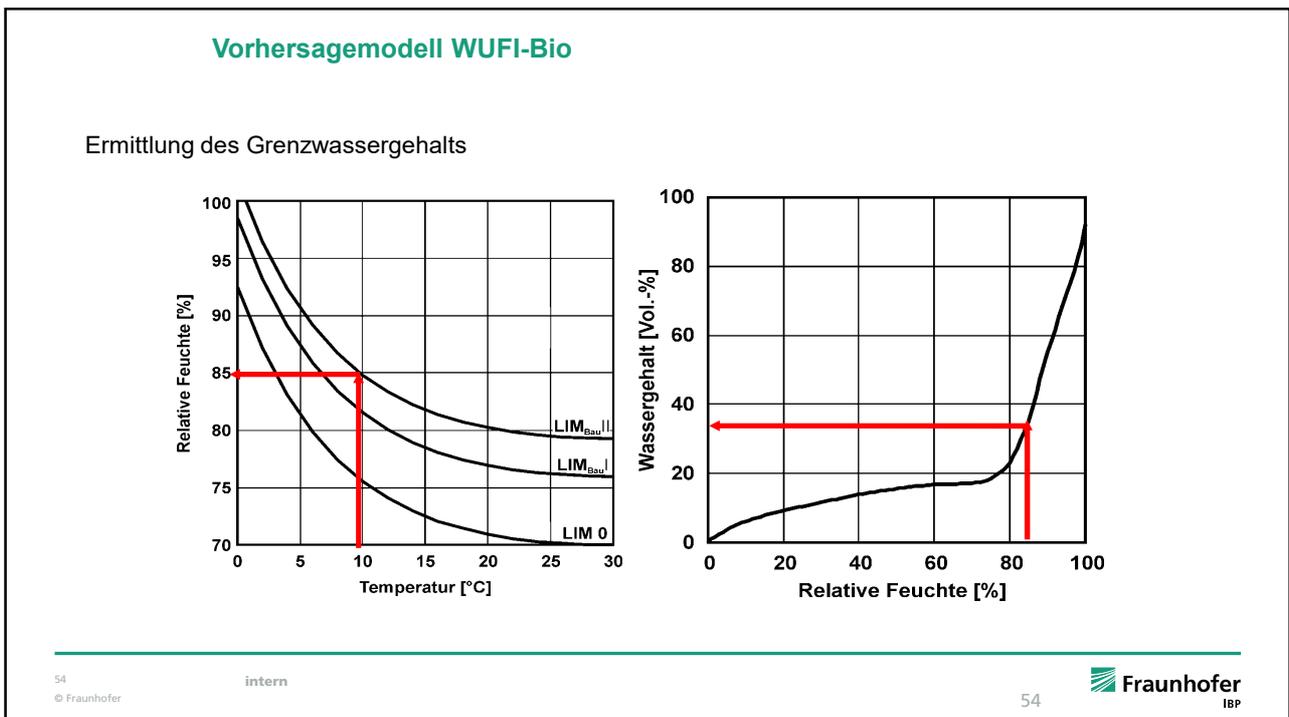
### REM-Aufnahmen Schimmelpilzsporen



52

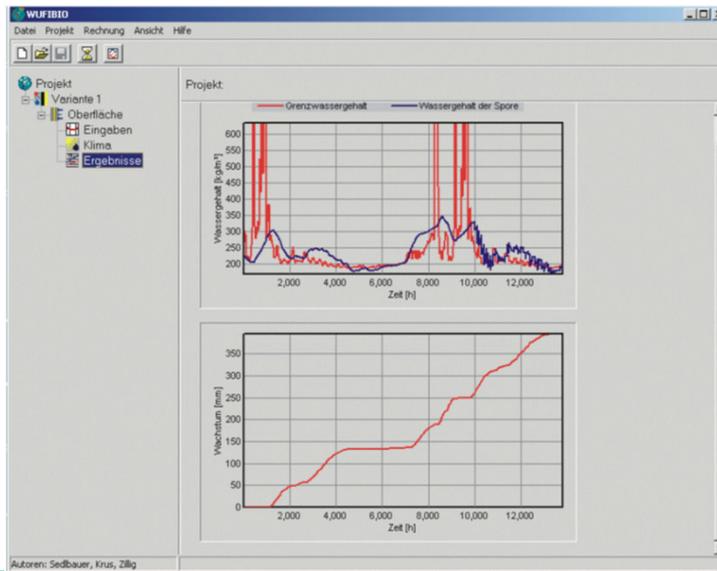


53



54

## Vorhersagemodell WUFI-Bio



55  
© Fraunhofer

intern

55  
Fraunhofer  
IBP

55

## NEUE BEWERTUNG DER BERECHNUNGSERGEBNISSE DES BIOHYGROTHERMISCHEN MODELLS MIT DEM MOULD-INDEX

Zwei ganz unterschiedliche Berechnungsmodelle verbreitet:

**Biohygrothermisches Modell (Sedlbauer)**

**Empirisches Modell (Viitanen)**

- Physikalisch begründetes Modell:  
Berechnung des instationären Wasserhaushaltes einer Modellspore
- Einfluss realer instationärer Randbedingungen
- Berücksichtigung des Substrats



**Aber: Wenig anschauliche Ergebnisausgabe in mm Wachstum**

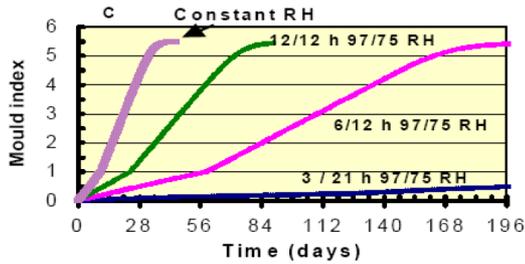
56  
© Fraunhofer

intern

56  
Fraunhofer  
IBP

56

**Viittanen-Modell mit Mould-Index**



**Mould-Index**

- 0 = kein Wachstum
- 1 = ein wenig Wachstum (mikroskopisch)
- 2 = mäßiges Wachstum (mikroskopisch) Bedeckung > 10%
- 3 = ein wenig sichtbares Wachstum
- 4 = sichtbares Wachstum > 10%
- 5 = Bedeckung > 50%
- 6 = dichte Bedeckung 100%

57 © Fraunhofer

intern

57



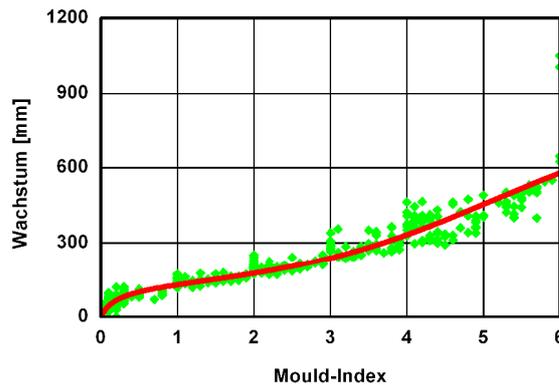
57

**Übertragungsfunktion**

Durch umfangreiche Berechnungen Vergleichbarkeit beider Modelle belegt

Ermittlung einer kontinuierlichen plausiblen Umrechnungsfunktion

Sehr gute Korrelation zwischen mm Wachstum und Mould-Index



58 © Fraunhofer

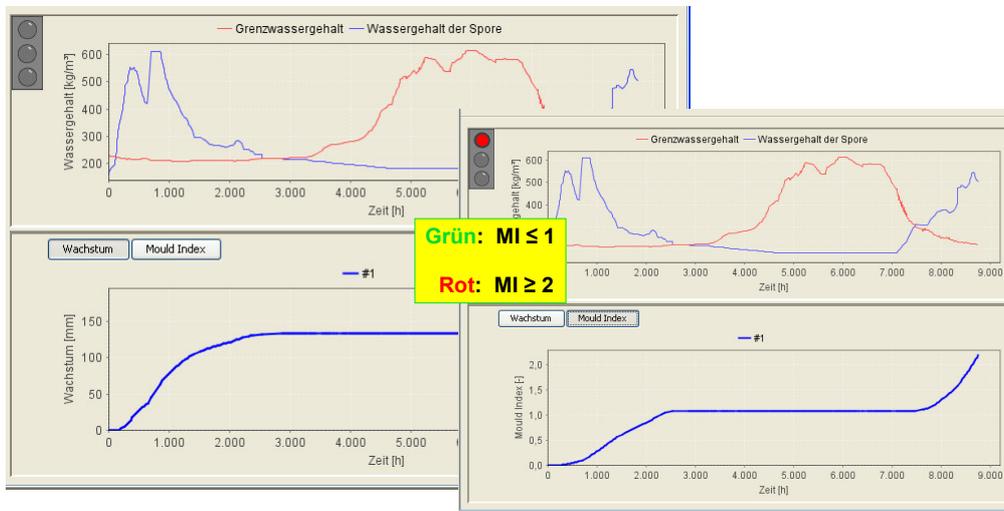
intern

58



58

### Übertragungsfunktion



### Bewertung Schimmelpilzwachstum

	Innenoberfläche oder Position mit Raumlufkontakt	Oberflächen im Bauteilinneren ohne Raumlufkontakt	Kein Kontakt zum Nutzer
☐	Bewertungszeitraum kürzer als ein Jahr ⇒ Keine Bewertung möglich bzw. sinnvoll		
☐	MI < 1 : kein oder gerade startender Bewuchs auch in Wohnräumen normal und akzeptabel (z.B. Pflanzen)	MI < 2 : kein oder nicht sichtbarer, nur mikroskopisch erkennbarer Bewuchs	MI ≤ 3 : beginnender, mit bloßem Auge gerade erkennbarer Bewuchs
☐	1 ≤ MI < 2 : Nicht sichtbarer, nur mikroskopisch erkennbarer Bewuchs	2 ≤ MI < 3 : beginnender, mit bloßem Auge gerade erkennbarer Bewuchs	MI > 3 : mit bloßem Auge erkennbarer Bewuchs
☐	MI ≥ 2 : beginnender, mit bloßem Auge gerade erkennbarer Bewuchs	MI ≥ 3 : Mit bloßem Auge erkennbarer Bewuchs mit geringer Ausbreitung	Beurteilung im Einzelfall – aktuell nicht definiert

### Validierungs-Beispiel: Blechdach



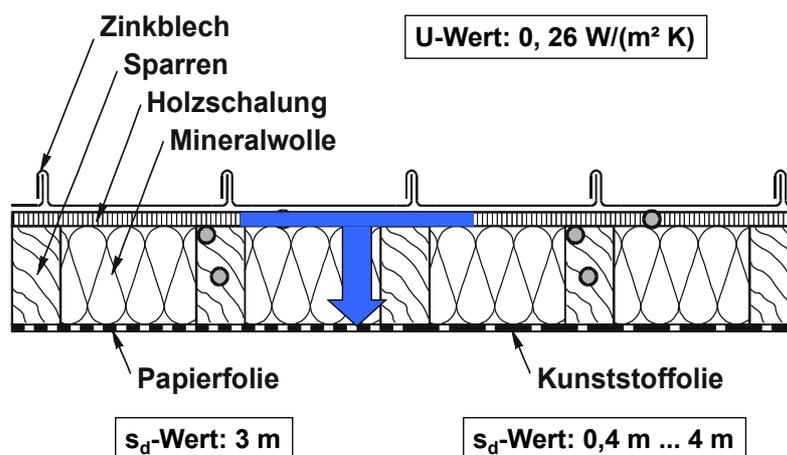
61  
© Fraunhofer

intern

61  
Fraunhofer  
IBP

61

### Validierungs-Beispiel: Blechdach



62  
© Fraunhofer

intern

62  
Fraunhofer  
IBP

62

## Validierungs-Beispiel: Blechdach

### Fotografische Innenansicht



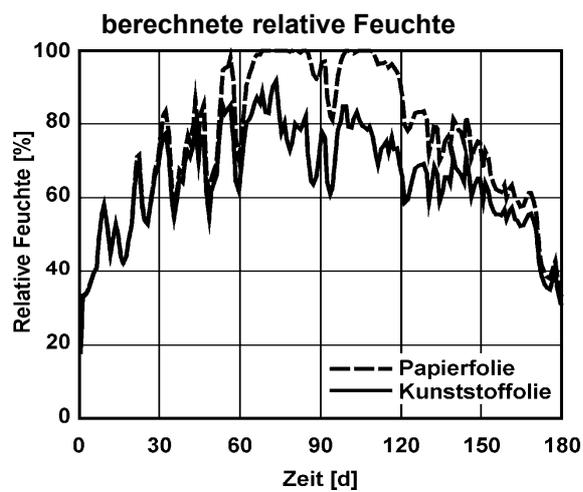
63  
© Fraunhofer

intern

63  
Fraunhofer  
IBP

63

## Validierungs-Beispiel: Blechdach



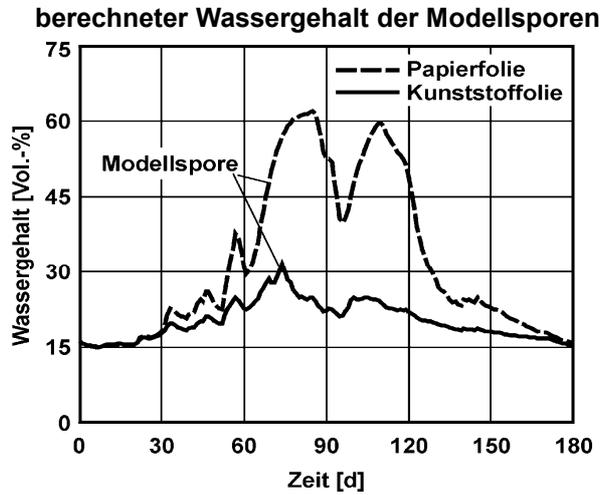
64  
© Fraunhofer

intern

64  
Fraunhofer  
IBP

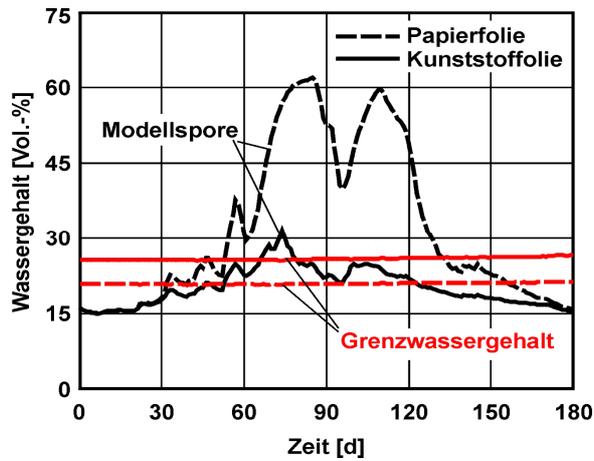
64

### Validierungs-Beispiel: Blechdach



### Validierungs-Beispiel: Blechdach

Vergleich des berechneten Wassergehaltes mit dem Grenzwassergehalt



## Zwischen-Zusammenfassung

### Modell zur Beurteilung der Schimmelpilzbildung

- Isoplethenmodell
- Biohygrothermische Modell

### Neuheiten

- Gefährdungsklassen
- Substratgruppen
- instationäre Implementierung

### Validierung

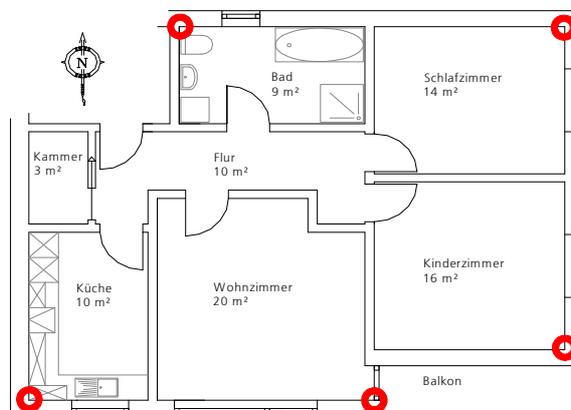
gute Übereinstimmung

- mit Erfahrungswerten
- mit Laboruntersuchungen
- mit Ergebnissen im Freiland

## Berechnung der erforderlichen Lüftung

### 3-Zimmerwohnung mit Außenwandinnenecken

- unterschiedlicher Dämmstandard
- für jeden Raum eigene Feuchteproduktionsrate entspr. Nutzung
- kein Feuchtaustausch zwischen den Räumen



### Hygrothermisches Raumklimamodell WUFI-Plus

**Bisher:**  
reine Bauteilberechnung

**Jetzt:**  
Berechnung der hygroth. Verhältnisse im Raum  
Kopplung zwischen Wärme und Feuchte

69 © Fraunhofer
intern
69 Fraunhofer IBP

69

### Anwendungsbeispiel

**3-Zimmerwohnung mit Außenwandinnenecken**

- unterschiedlicher Dämmstandard
- für jeden Raum eigene Feuchteproduktionsrate entspr. Nutzung

Häufigkeit von Schimmelpilzwachstum	Wohnzimmer 16 %	Schlafzimmer 41 %	Küche 8 %	Bad 8 %	Kinderzimmer 26 %
-------------------------------------	--------------------	----------------------	--------------	------------	----------------------

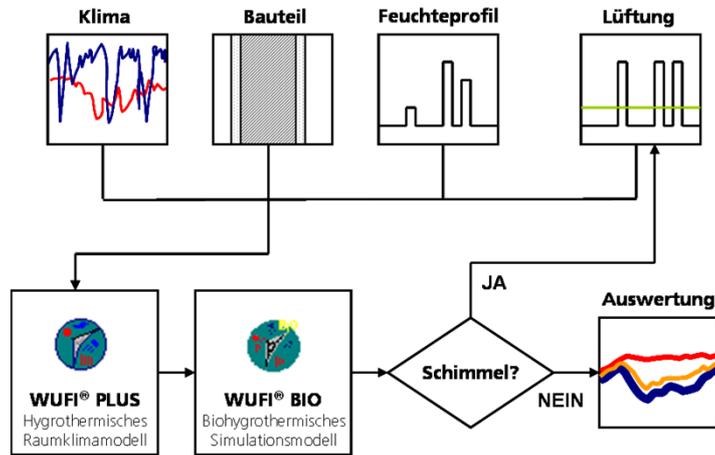
Uhrzeit	Schlafzimmer Feuchte in g/h	Kinderzimmer Feuchte in g/h	Wohnzimmer Feuchte in g/h	Bad Feuchte in g/h	Küche Feuchte in g/h
0 <sup>00</sup> – 6 <sup>00</sup>	2Ps,2T 80 (100)	2Ps,2T 80 (105)	10T 35 (65)	HT 20 (35)	2 T 10 (25)
6 <sup>00</sup> – 7 <sup>00</sup>	2T 10 (30)	2T 10 (35)	4Pt,10T 235 (265)	2D 500 (515)	K 100 (115)
7 <sup>00</sup> – 13 <sup>00</sup>	2T 10 (30)	2T 10 (35)	10T 35 (65)	HT 20 (35)	2 T 10 (25)
13 <sup>00</sup> – 14 <sup>00</sup>	2T 10 (30)	2T 10 (35)	3Pt,10T 185 (215)	HT 20 (35)	M 250 (265)
14 <sup>00</sup> – 17 <sup>00</sup>	2T 10 (30)	2Pt,2T 115 (140)	1Pt,10T 85 (115)	HT 20 (35)	2 T 10 (25)
17 <sup>00</sup> – 18 <sup>00</sup>	2T 10 (30)	2Pt,2T 115 (140)	1Pt,10T 85 (115)	HT 20 (35)	A 450 (465)
18 <sup>00</sup> – 19 <sup>00</sup>	2T 10 (30)	2T 10 (35)	4Pt,10T 235 (255)	HT 20 (35)	G 250 (265)
19 <sup>00</sup> – 20 <sup>00</sup>	2T 10 (30)	2T 10 (35)	2Pt,10T 135 (155)	2D 500 (515)	2 T 10 (25)
20 <sup>00</sup> – 22 <sup>00</sup>	2T 10 (30)	2Ps,2T 80 (105)	2Pt,10T 135 (155)	HT 20 (35)	2 T 10 (25)
22 <sup>00</sup> – 24 <sup>00</sup>	2Ps,2T 80 (100)	2Ps,2T 80 (105)	10T 35 (65)	HT 20 (35)	2 T 10 (25)
<b>Summe</b>	<b>800 (1280) g</b>	<b>1360 (1940) g</b>	<b>1890 (2610) g</b>	<b>1440 (1875) g</b>	<b>1250 (1610) g</b>
<b>Gesamtfeuchtesumme</b>					<b>6740 (9315) g</b>
<b>Gesamtvolumen</b>					<b>172,5 m³</b>
<b>Volumen bezogene Feuchte</b>					<b>1,63 (2,25)g/(h·m³)</b>

70 © Fraunhofer
intern
70 Fraunhofer IBP

70

## Vorgehensweise

Iterative Ermittlung des erforderlichen Lüftungsprofil  
zur Schimmelpilzvermeidung



71  
© Fraunhofer

intern

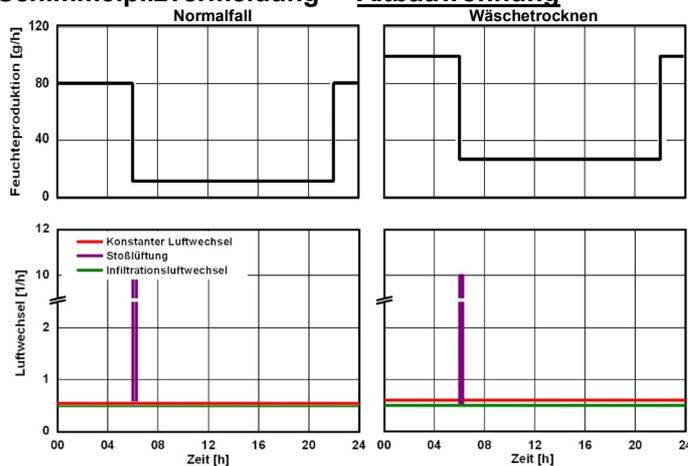
71

Fraunhofer  
IBP

71

## Ergebnisse

Iterative Ermittlung des erforderlichen Lüftungsprofil  
zur Schimmelpilzvermeidung - Altbauwohnung



72  
© Fraunhofer

intern

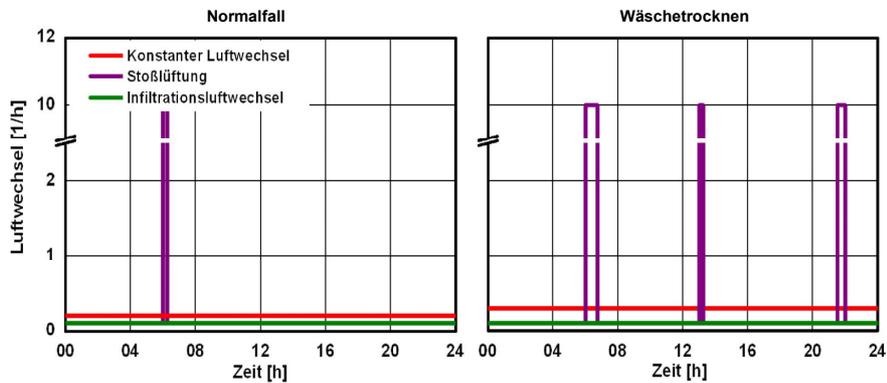
72

Fraunhofer  
IBP

72

## Ergebnisse

Iterative Ermittlung des erforderlichen Lüftungsprofil  
zur Schimmelpilzvermeidung - gut gedämmte moderne Wohnung (WDVS)



73  
© Fraunhofer

intern

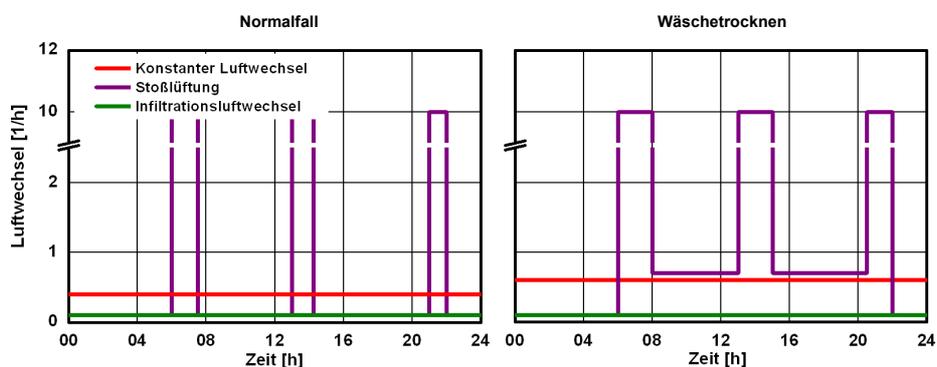
73

Fraunhofer  
IBP

73

## Ergebnisse

Iterative Ermittlung des erforderlichen Lüftungsprofil  
zur Schimmelpilzvermeidung - Altbauwohnung mit dichten Fenstern



74  
© Fraunhofer

intern

74

Fraunhofer  
IBP

74

## Zwischen-Zusammenfassung

- Lüftungsbedarf für unterschiedliches Bewohnerverhalten einbezogen (Tag-/Nachtlüfter; Dauerlüfter, Stoßlüfter..)
- Schimmelpilzvermeidende Lüftung hängt in komplexer Weise von Klima, Baukonstruktion und Feuchtelasten ab
- Wäschetrocknen bedeutet höheren Lüftungswärmeverlust als der Energieverbrauch eines Kondenstrockners
- Neben Stoßlüftung stets eine ausreichende Grundlüftung nötig
- Dichtere Fenster nur in Verbindung mit Dämm-/Lüftungsmaßnahme
- Lüftungserfordernisse sehr komplex da kein Gefühl für Luftfeuchte

## Aufklärung über das Lüften

„Erfordert der Einbau neuer Isolierfenster ein geändertes Lüftungsverhalten, muss der Vermieter präzise über die Lüftungsmaßnahmen **informieren**, die nach dem Fenstereinbau auf Grund des veränderten Raumklimas notwendig werden.“

Geschieht das nicht und kommt es zu Schimmelbildung, ist der Vermieter verantwortlich und nicht der Mieter“

(Urteil des Landgerichts Gießen; Az. 1 S 63/00).