

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

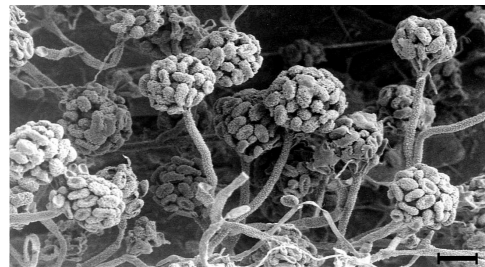
3

Schimmelpilzschäden



4

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

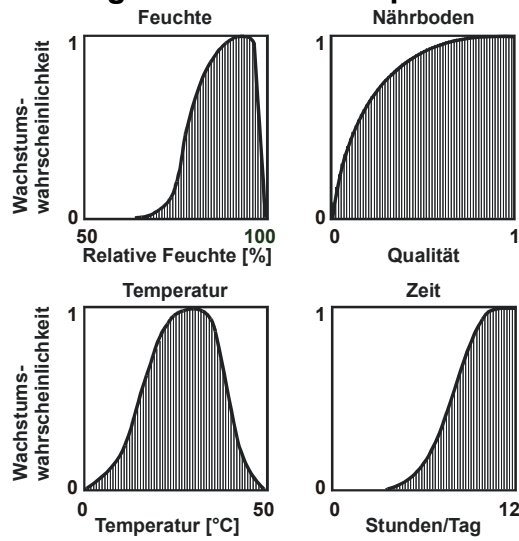
intern

6

Fraunhofer
IBP

6

Wachstumsvoraussetzungen von Schimmelpilzen



7
© Fraunhofer

intern

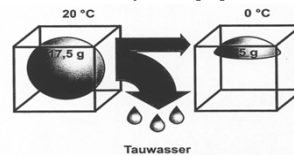
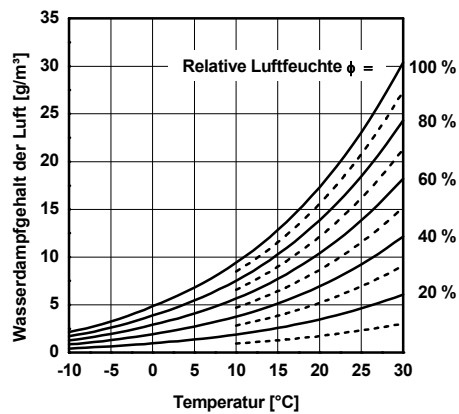
7

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

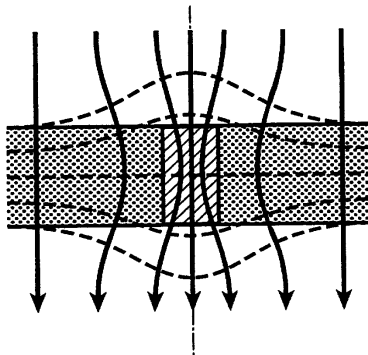
Fraunhofer
IBP

9

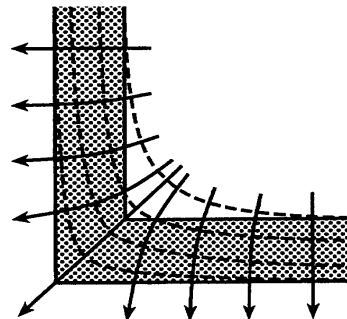
Thermisches Verhalten von Außenbauteilen: Wärmebrücken

Unterscheidung:

materialbezogene Wärmebrücke



geometrische Wärmebrücke



10
© Fraunhofer IBP

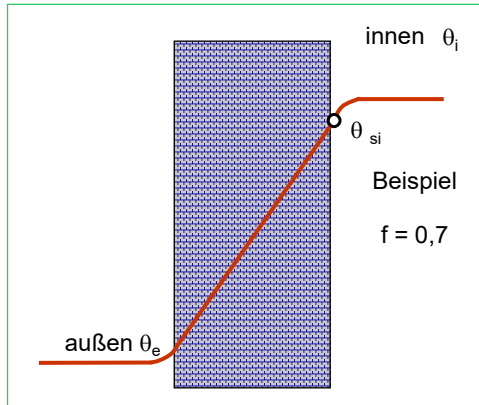
intern

Fraunhofer
IBP

10

Thermisches Verhalten von Außenbauteilen

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



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

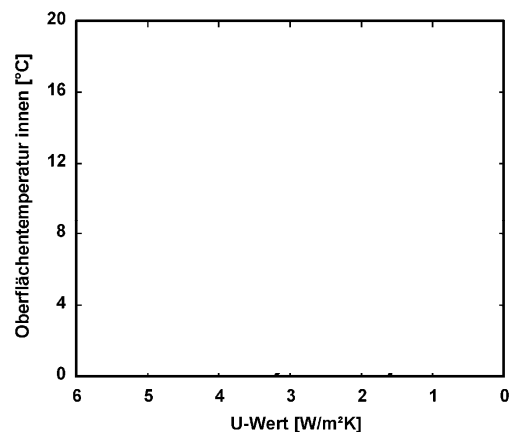
* Oberflächenfeuchte bei
50% Raumlufffeuchte

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**



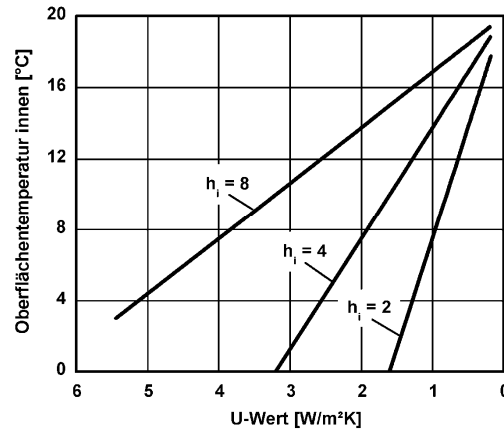
12

Oberflächentemperaturen an den Außenwänden

Außen: -10 °C, Innen: 20 °C

Übergangskoeffizient h [W/m²K]:

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

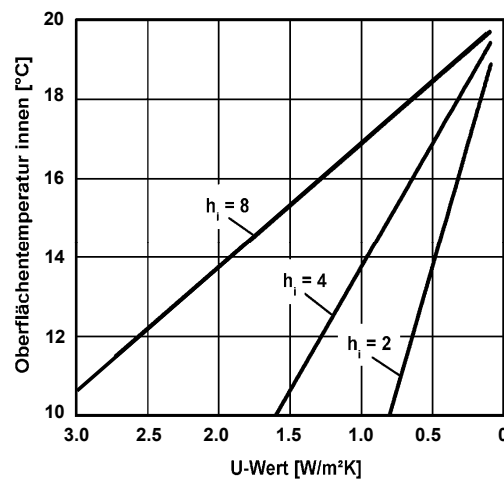


Oberflächentemperaturen an den Außenwänden

Außen: -10 °C, Innen: 20 °C

Übergangskoeffizient h [W/m²K]:

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



Schimmelpilzbildungen



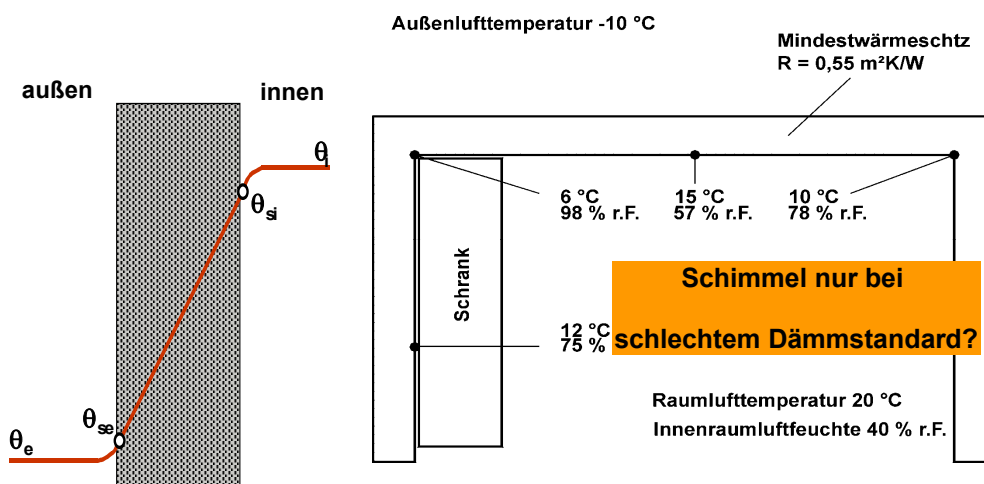
15
© Fraunhofer

intern

15
Fraunhofer
IBP

15

Oberflächentemperaturen der Außenwände



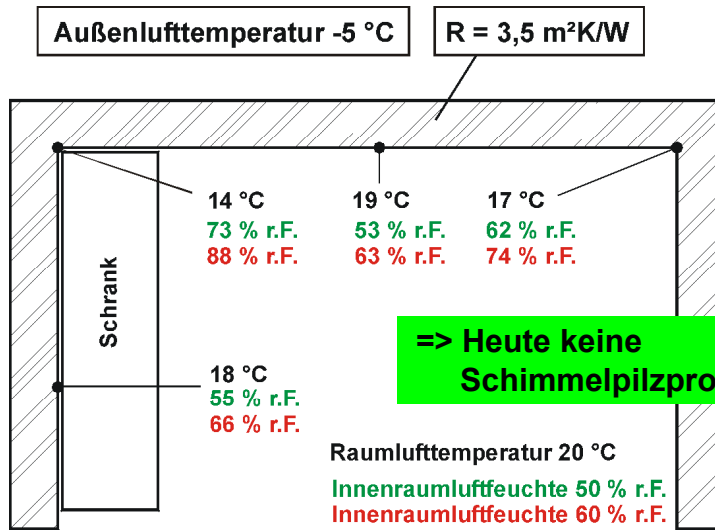
16
© Fraunhofer

intern

16
Fraunhofer
IBP

16

Oberflächentemperaturen an den Außenwänden



17 © Fraunhofer

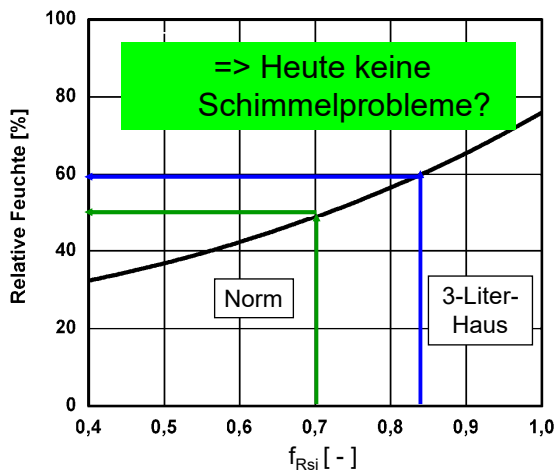
intern

17

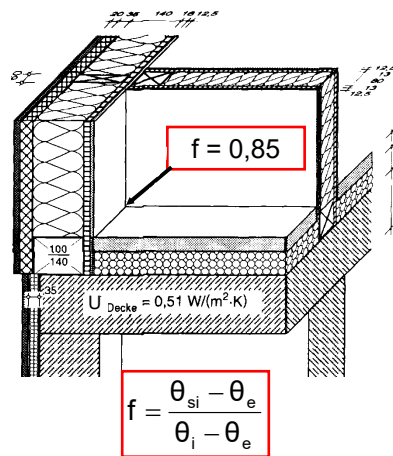
Fraunhofer IBP

17

Maximale Raumluftfeuchte ohne Schimmelpilze



Beispiel: Außenwand-Ecke



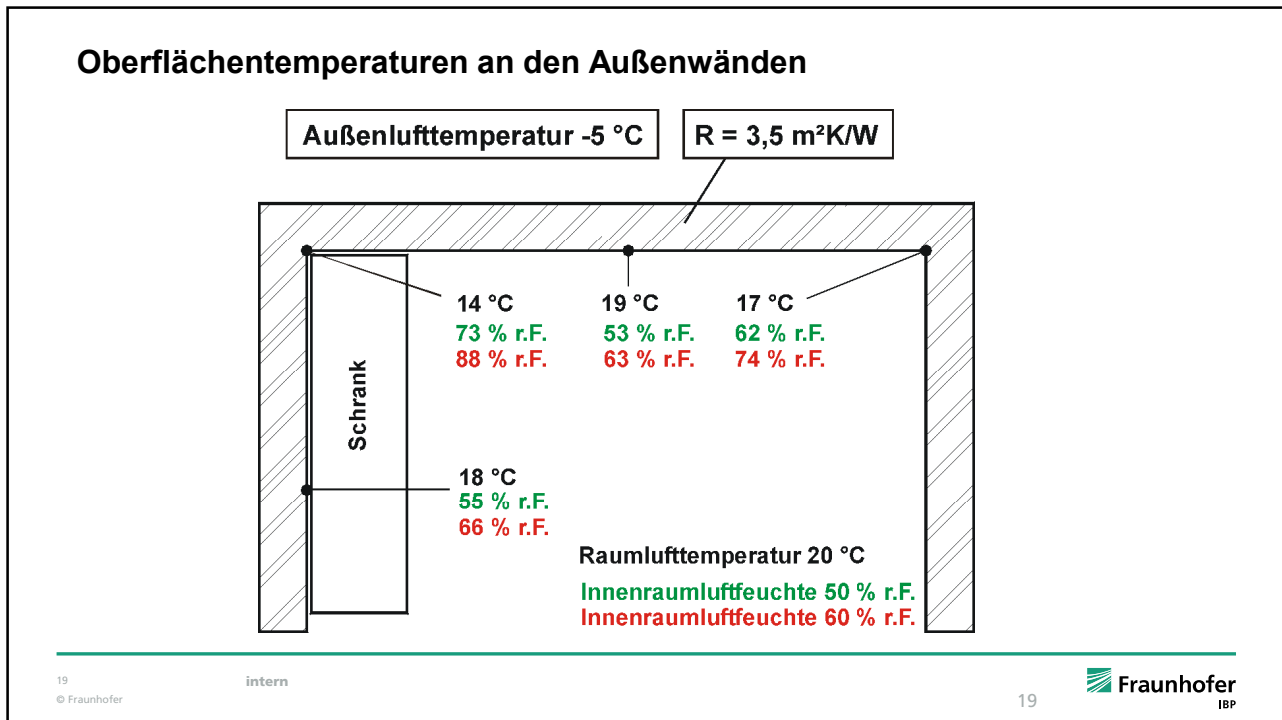
18 © Fraunhofer

intern

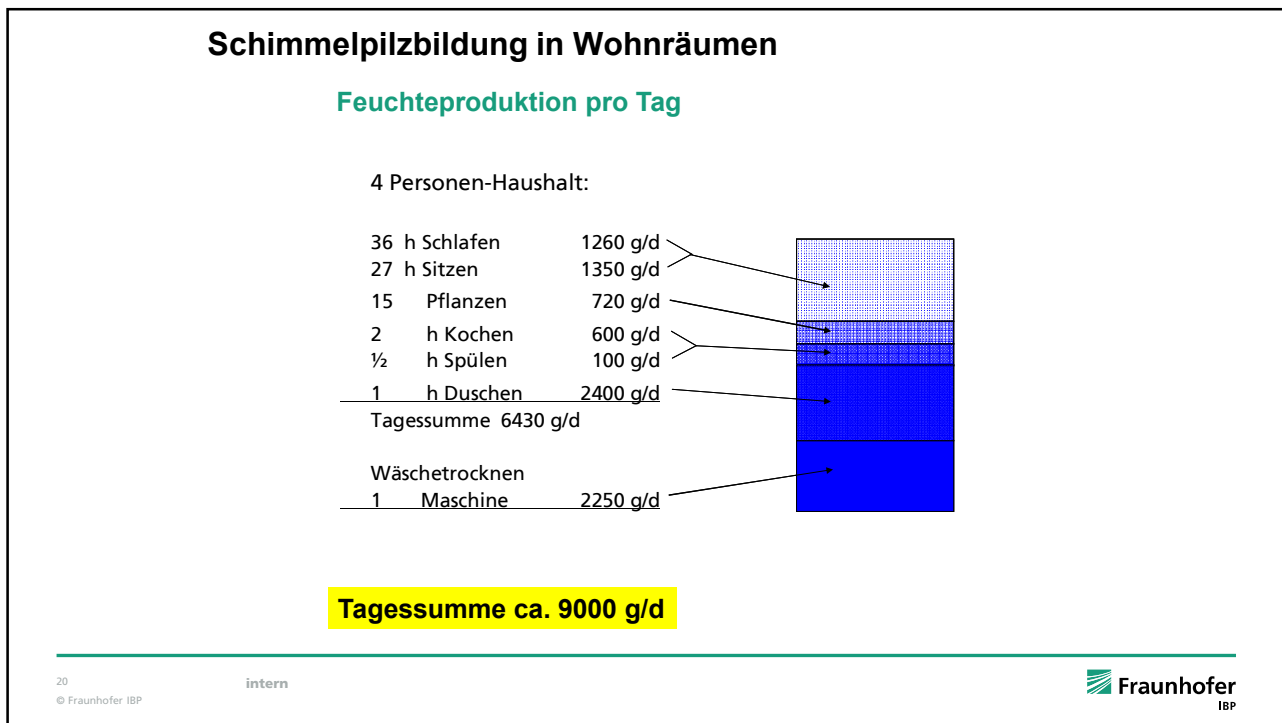
18

Fraunhofer IBP

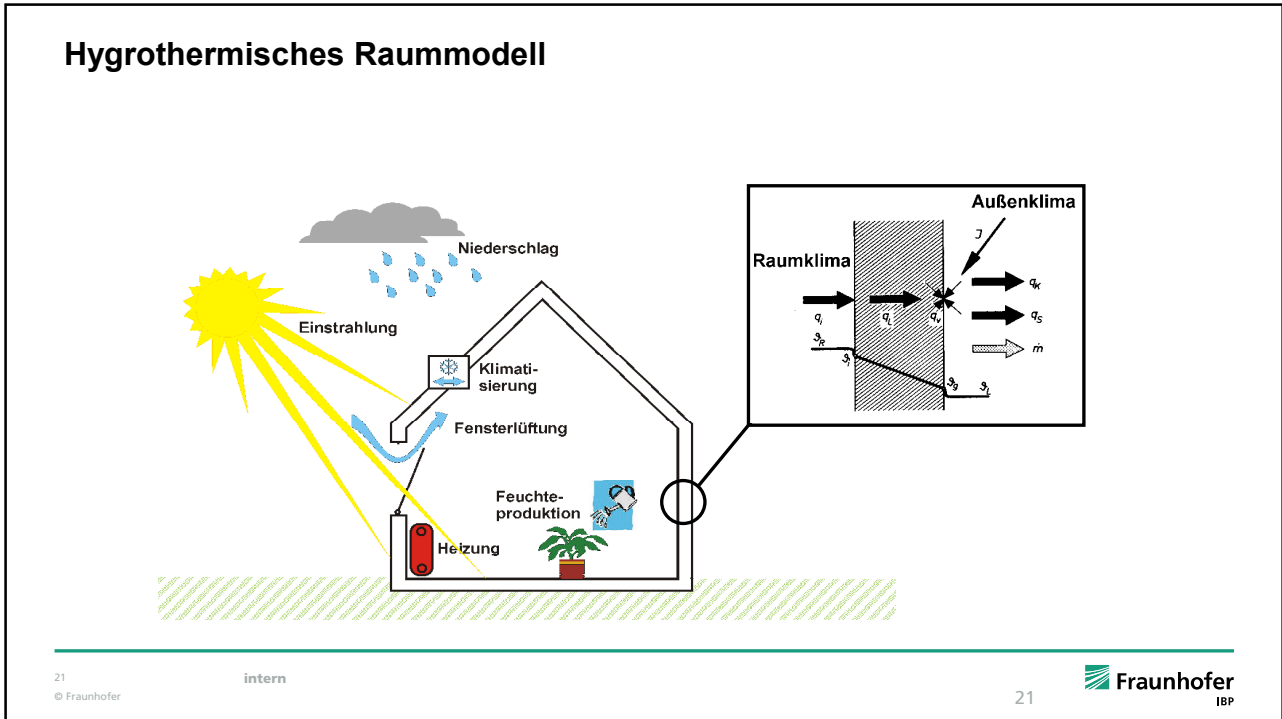
18



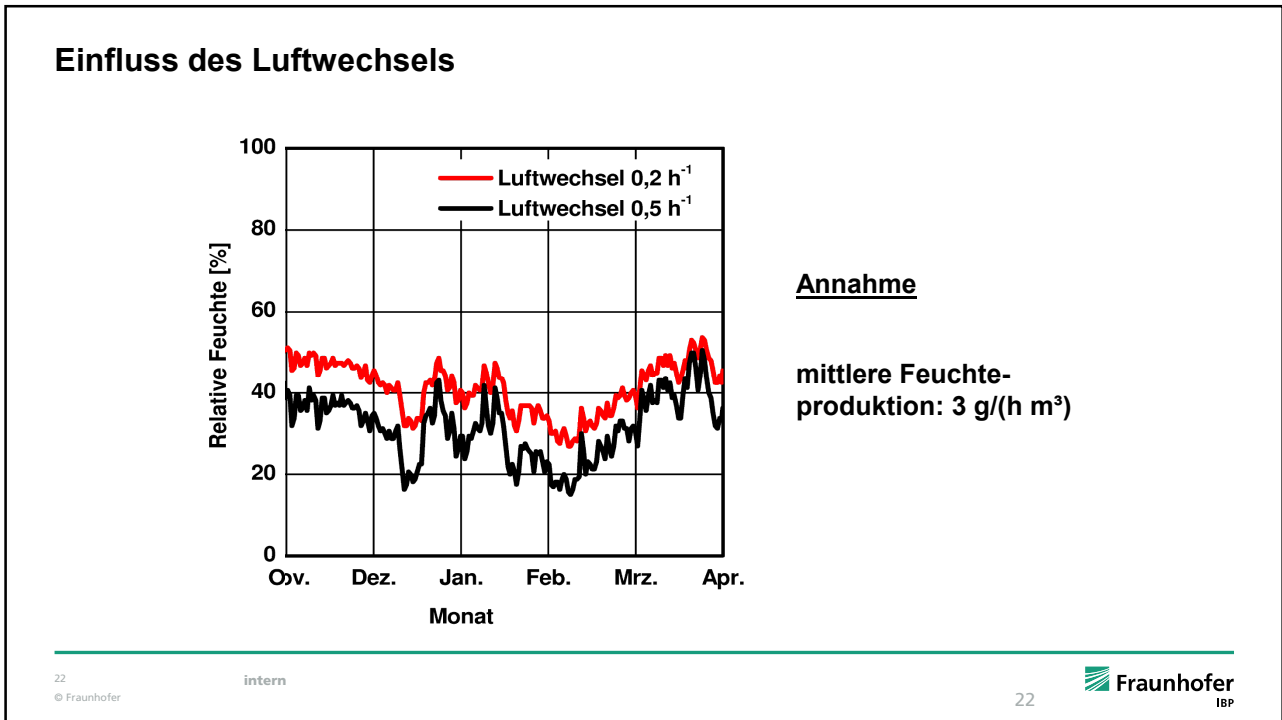
19



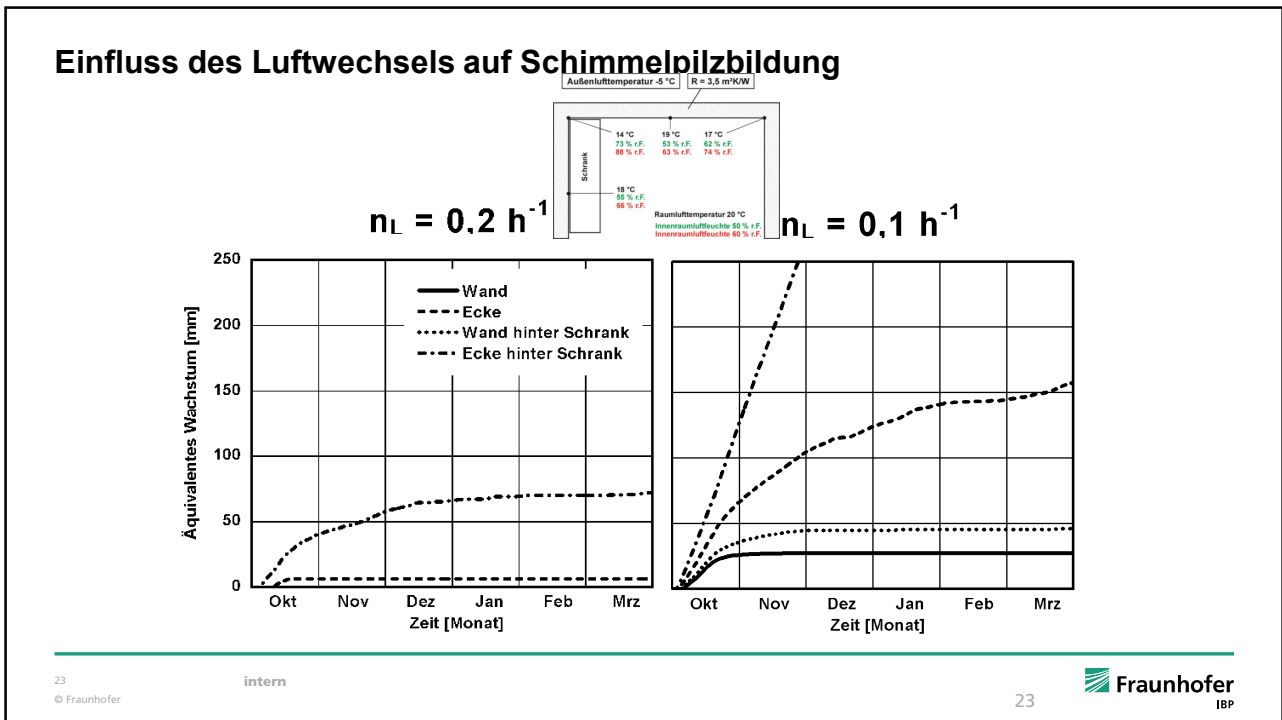
20



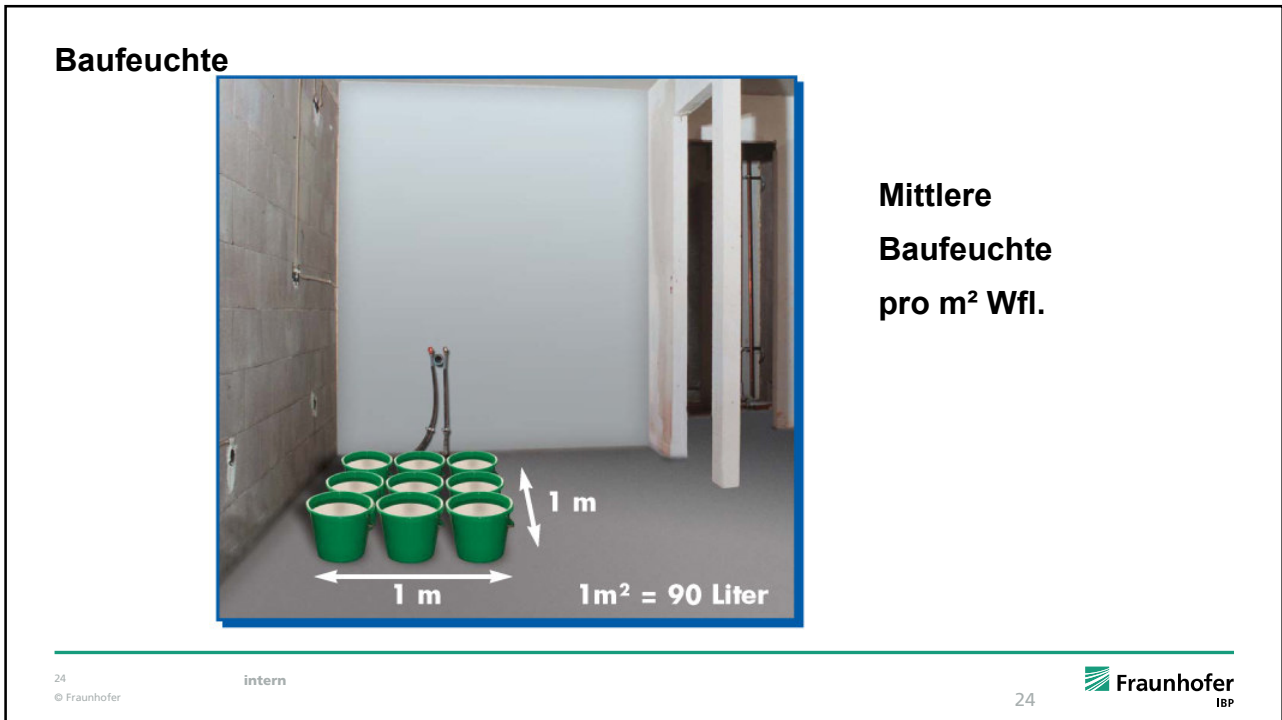
21



22

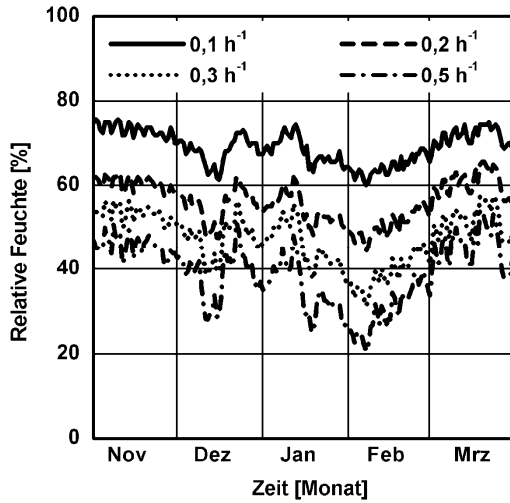


23



24

Einfluss des Luftwechsels



Annahme

mittlere Feuchte-
produktion und
Baufeuchte

Häufigkeit von Schimmelpilzschäden

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

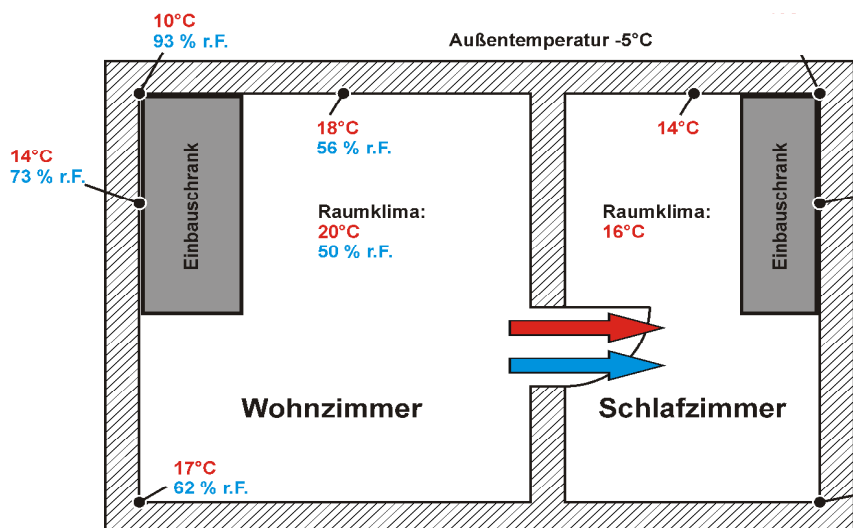
Häufigkeit von Schimmelpilzschäden

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

Einbauschranksituation hier nicht berücksichtigt!

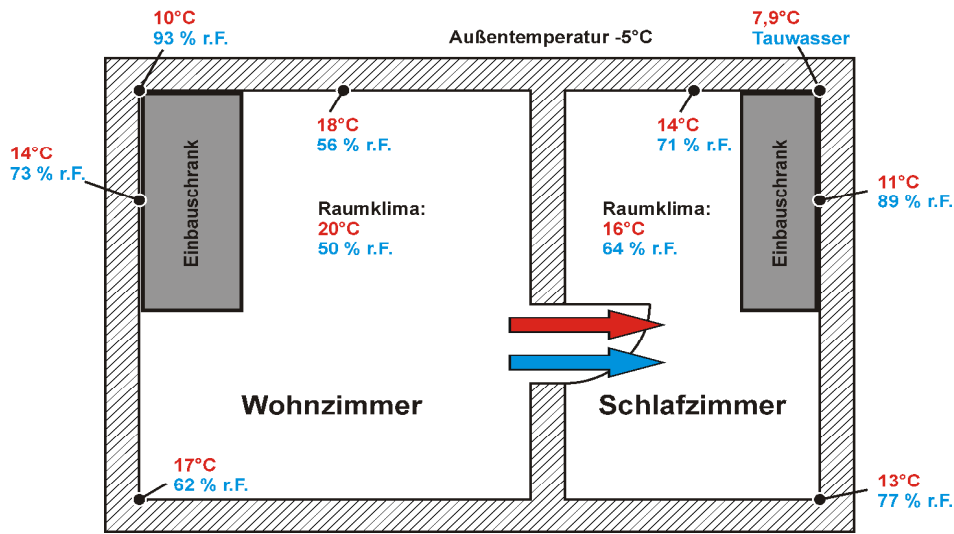
27

Feuchteverhältnisse in Wohn- und Schlafräumen



28

Feuchteverhältnisse in Wohn- und Schlafräumen



29
© Fraunhofer

intern

29
Fraunhofer
IBP

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!**

30
© Fraunhofer

intern

30
Fraunhofer
IBP

30

Vorhersage von Schimmelpilzbildung

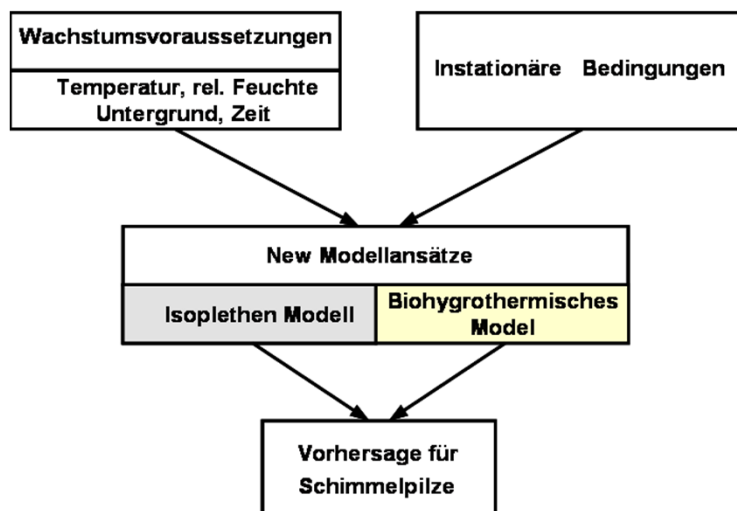
Problem

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

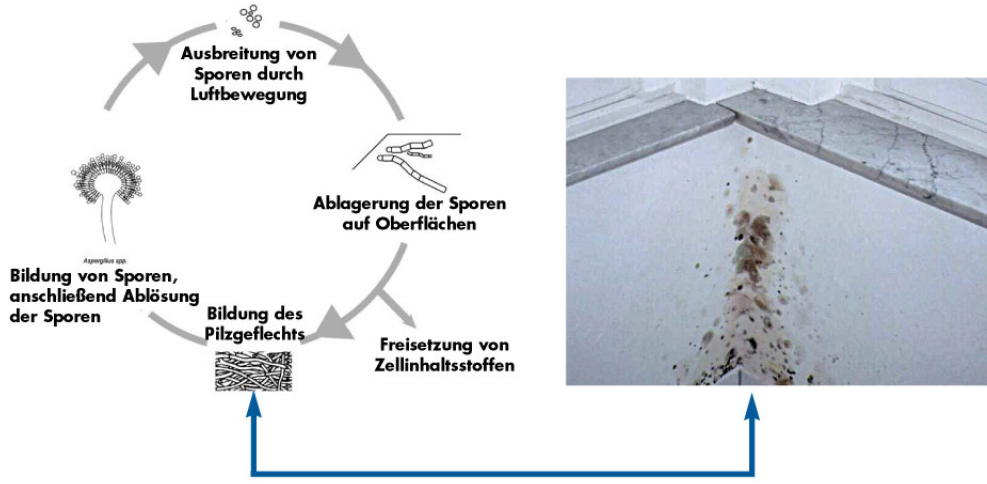
Zielsetzung

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

rechnerische Beurteilungsmöglichkeiten



Wachstum von Schimmelpilzen



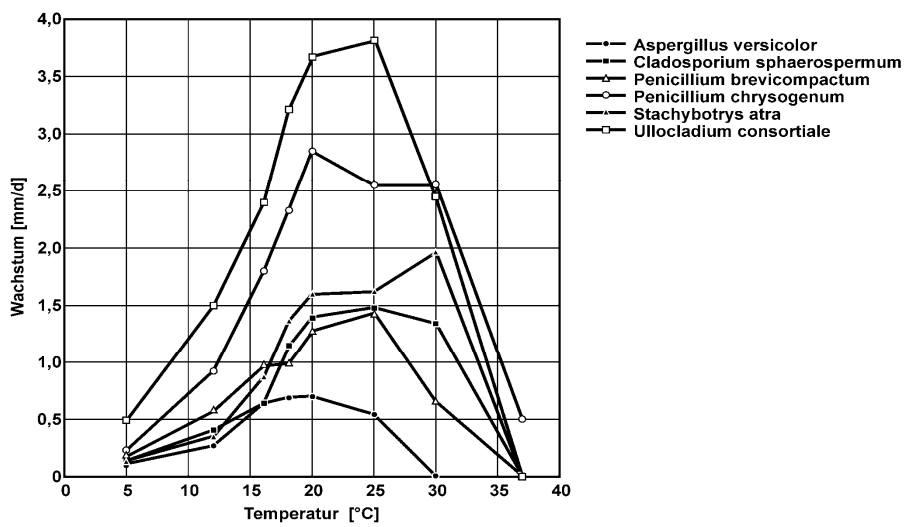
33 © Fraunhofer IBP

intern



33

Wachstum von Schimmelpilzen



34 © Fraunhofer

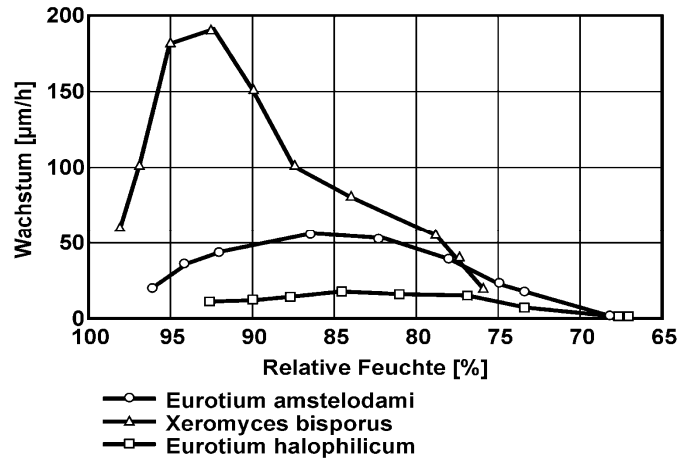
intern

34



34

Wachstum von Schimmelpilzen



35

Biologische Untersuchungen: Wasseraktivität

Wasseraktivität = Verfügbarkeit des Wassers

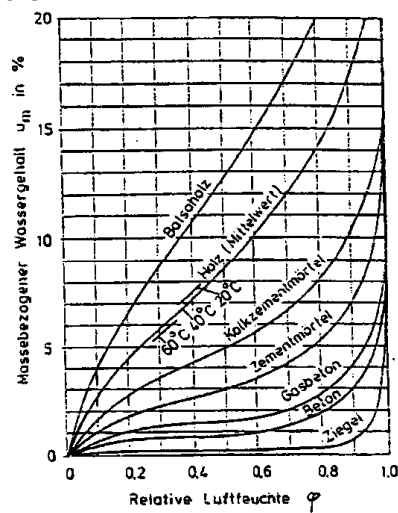
Abhängig von der Bindung des Wassers ans Material

$$a_w = \varphi / 100$$

mit:

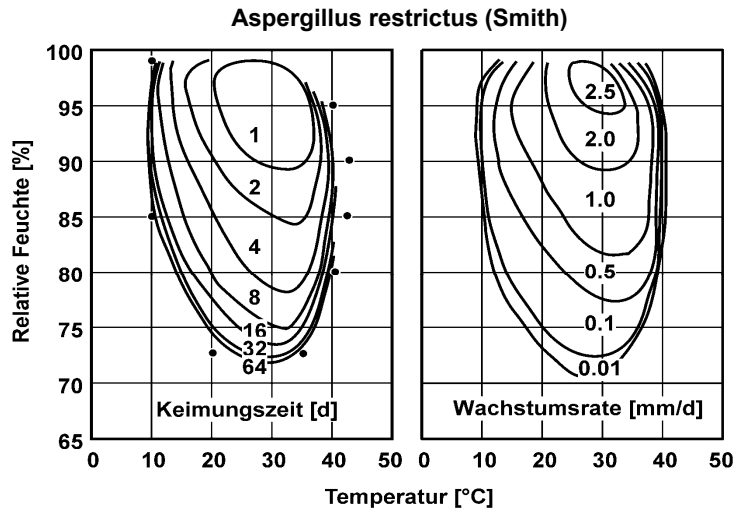
a_w [-] Wasseraktivität
 φ [%] relative Luftfeuchte

II
 V
 gleiche Verfügbarkeit bei unterschiedlichen Wassergehalten



36

Isoplethensysteme



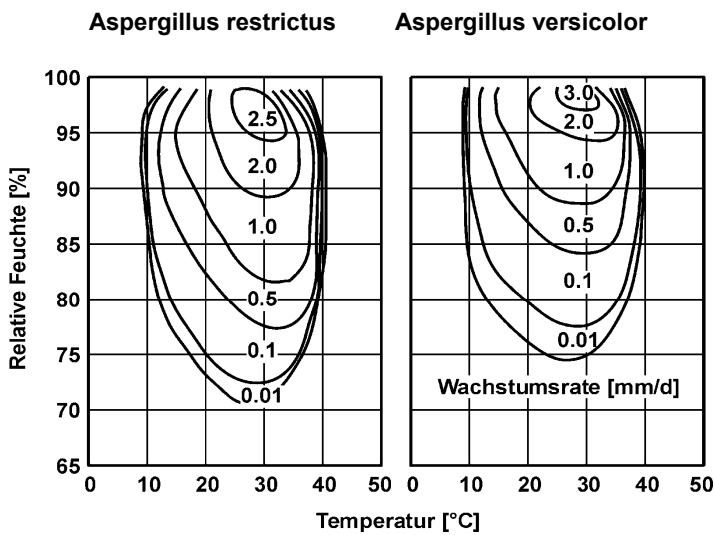
37
© Fraunhofer

intern

37 Fraunhofer
IBP

37

Isoplethensysteme



Ca. 200 Spezies
im Innenraum
gefunden

38
© Fraunhofer IBP

intern

Fraunhofer
IBP

38

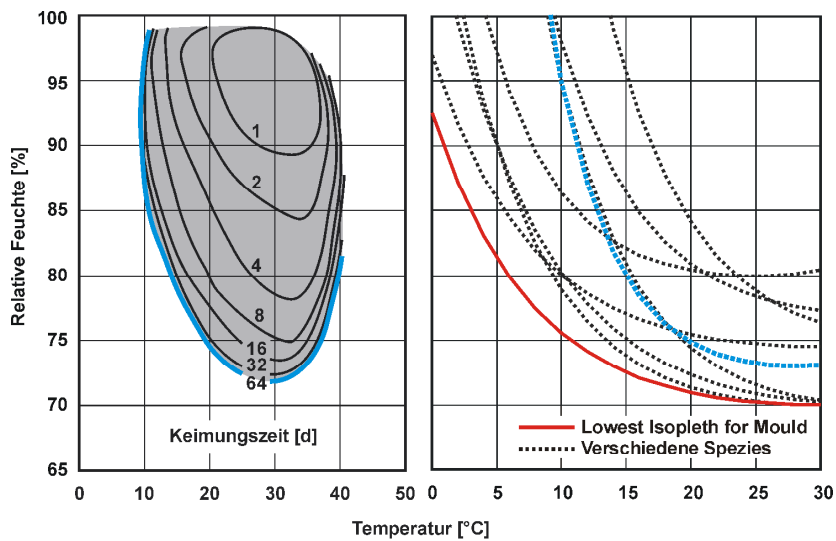
Typische Schimmelpilze in Räumen?

Auszug aus der Literaturlauswertung

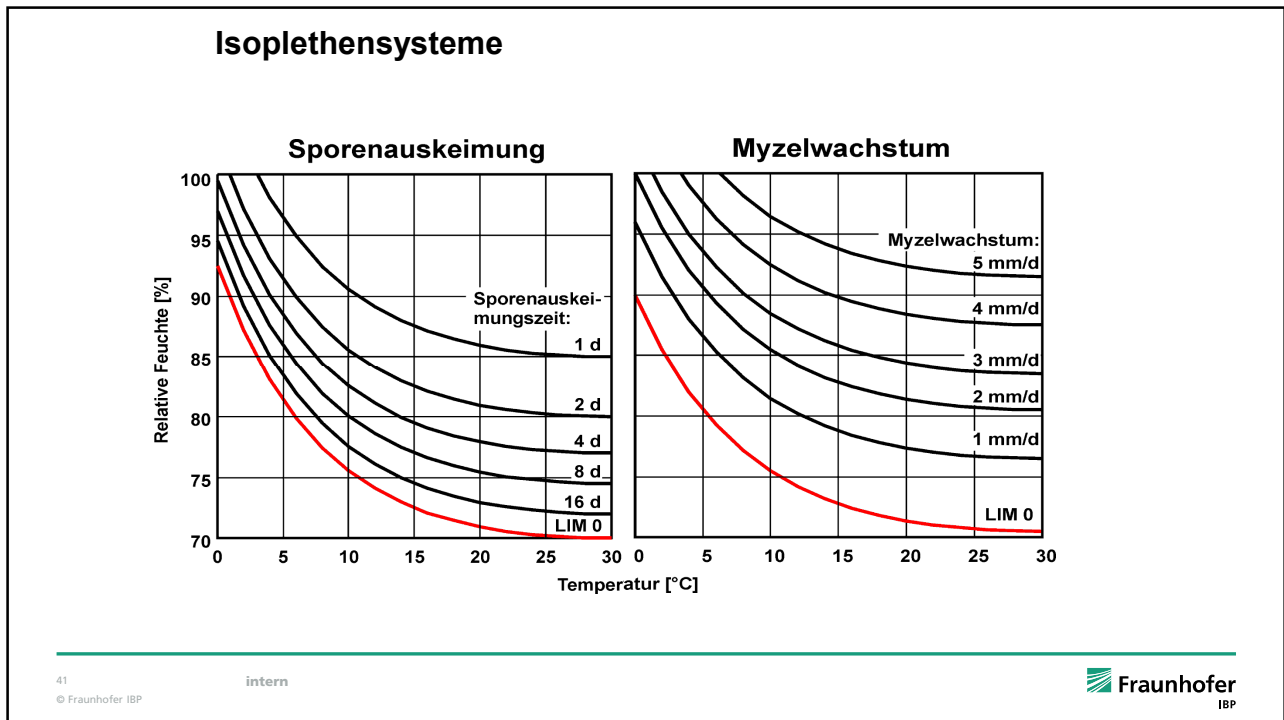
Pilzspezies	repräsentativ in Gebäuden							Gesundheitsgefahrung	Daten vorhanden	
	[35]	[87]	[50]	[12]	[37]	[95]	[21]		Sporenkeimung	Myzelwachstum
<i>Asp. nidulans</i>										
<i>Asp. niger</i>										
<i>Asp. ochraceus</i>										
<i>Asp. parasiticus</i>										
<i>Asp. penicilloides</i>										
<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

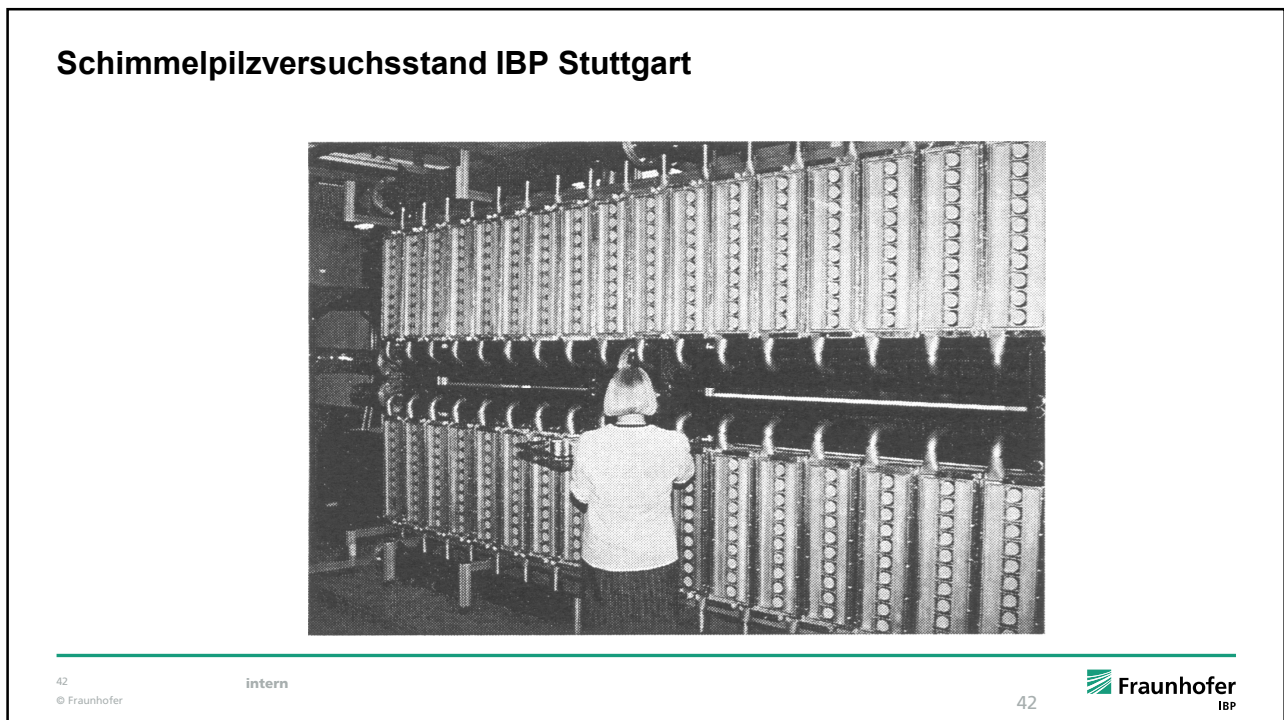
Isoplethen zur Bewertung von Schimmelpilzbildung



40

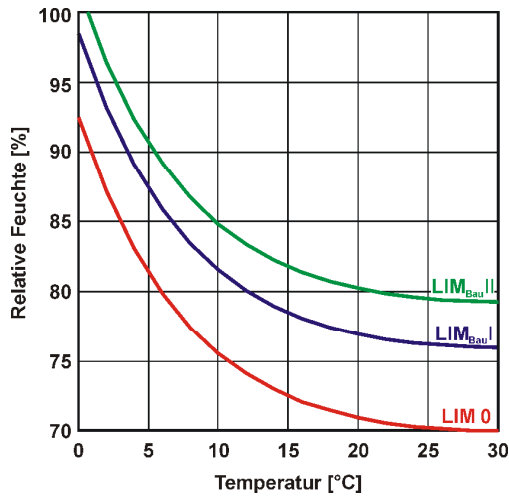


41



42

Einfluss des Materials auf die Lage des LIM

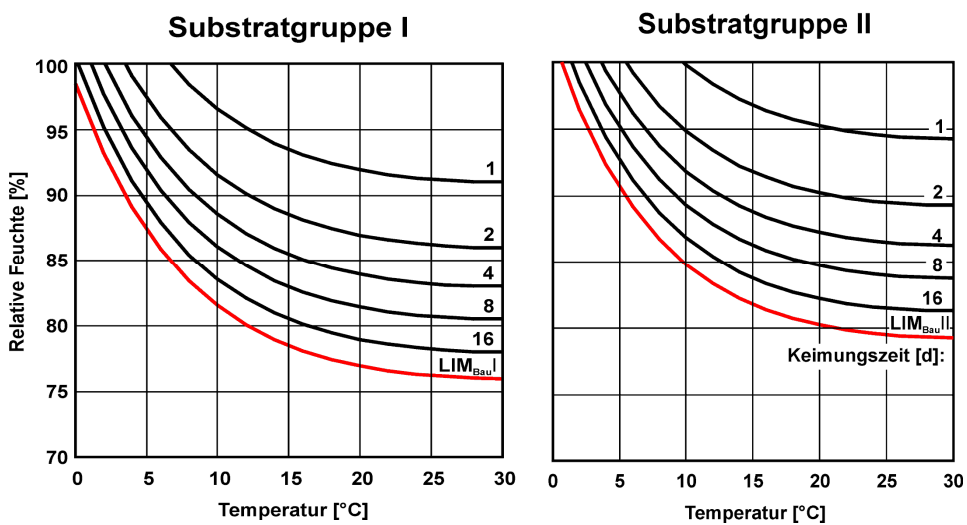


Substratgruppen

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

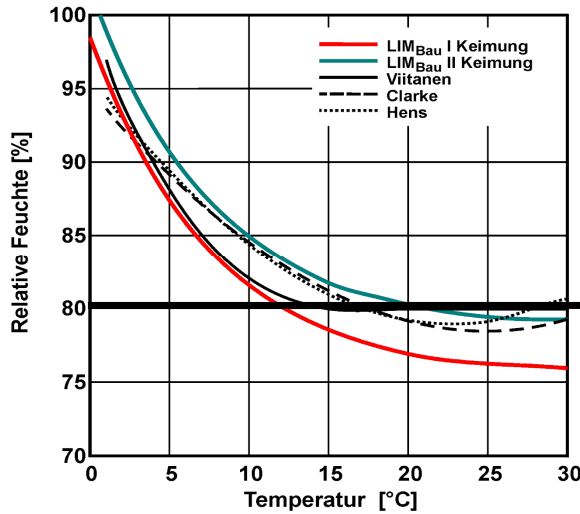
43

Isoplethensysteme für Baustoffe

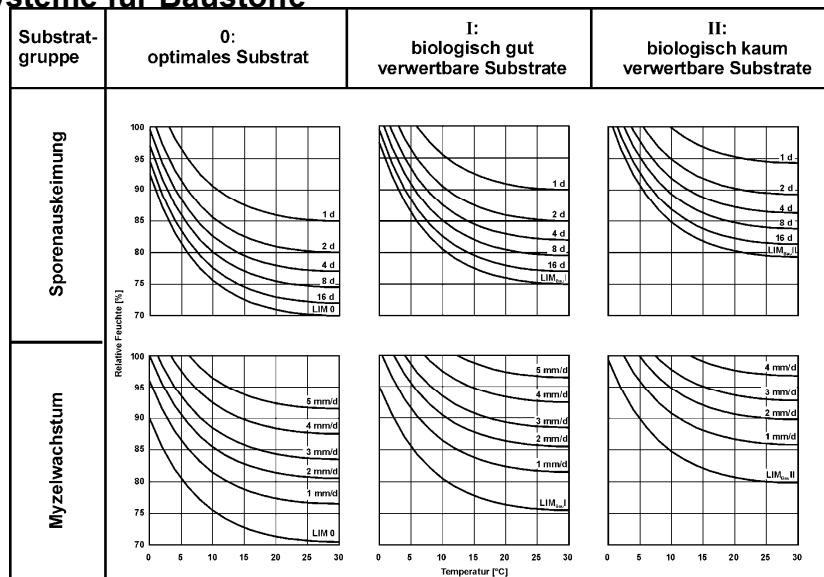


44

Vergleich der Angaben von Wachstumsvoraussetzungen



Isoplethensysteme für Baustoffe



Gesundheitsgefährdung durch Schimmelpilze

Bewertung einzelner Schimmelpilze:

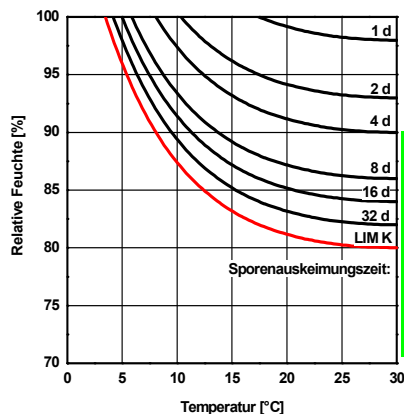
- kein eindeutiger Ursachen-Wirkungs-Zusammenhang
- Abhängigkeit von der Größe des Befalls
- Personen unterschiedlich betroffen

Besonders kritische Schimmelpilzspezies:

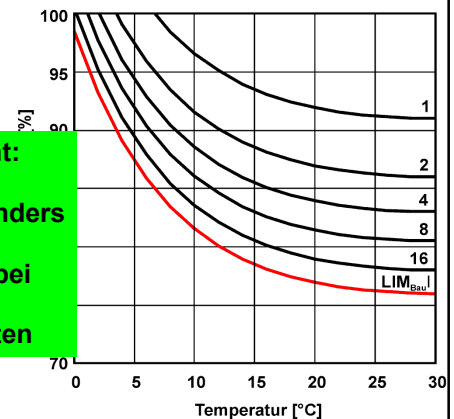
- *Aspergillus fumigatus*
- *Aspergillus flavus*
- *Stachybotrys chartarum*

Isoplethensysteme kritische Pilze (optimaler Nährboden)

Asp. flavus u. Asp. fumigatus; Stachybotrys



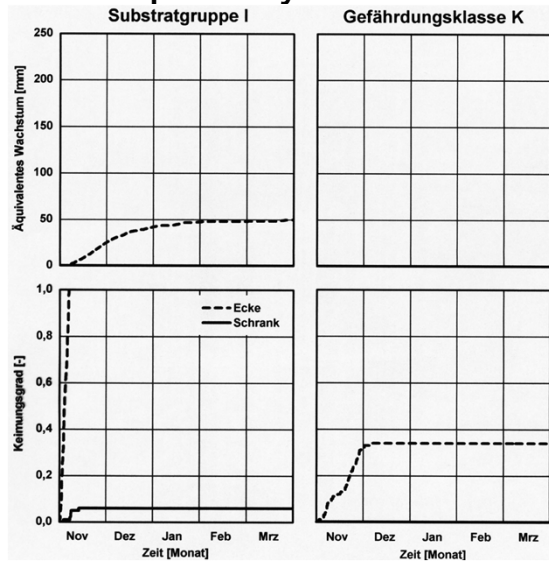
Substratgruppe I



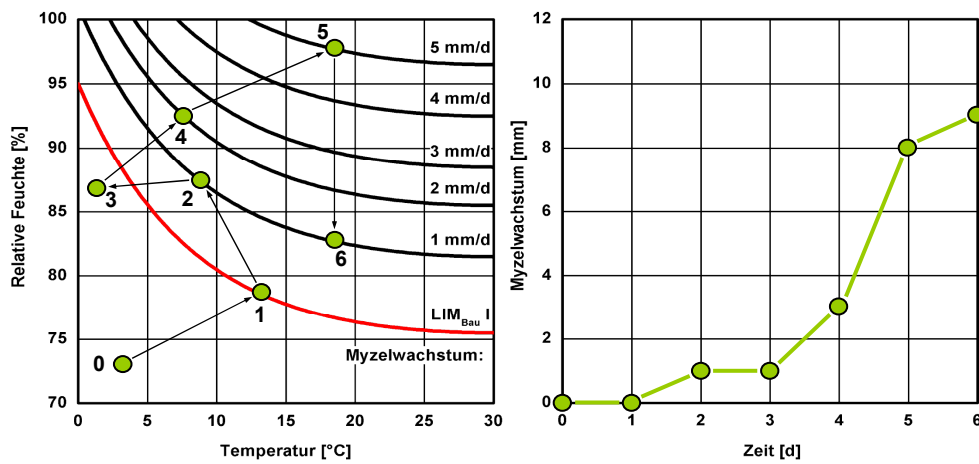
**Die gute Nachricht:
Gesundheitlich besonders
kritische Pilze nur bei
sehr hohen Feuchten**

Daten nur für optimales Substrat !

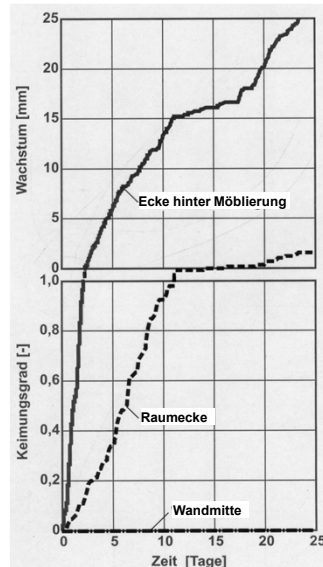
Vorhersage mit Hilfe der Isolethensysteme



Anwendung der Isolethensysteme



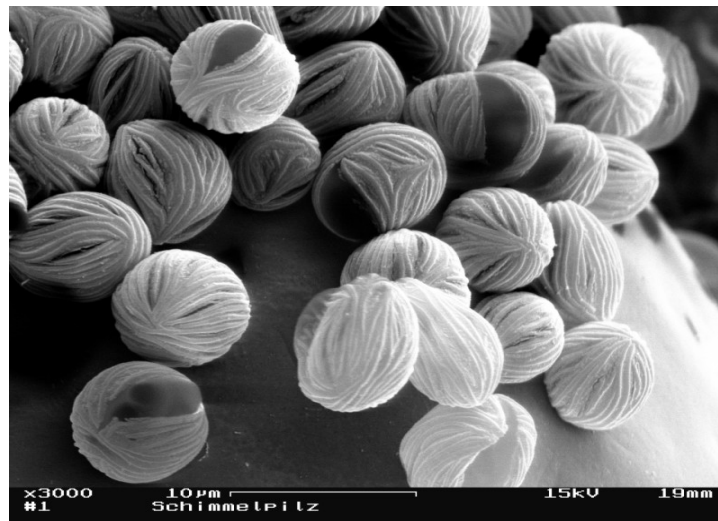
Vorhersage mit Hilfe der Isolethensysteme



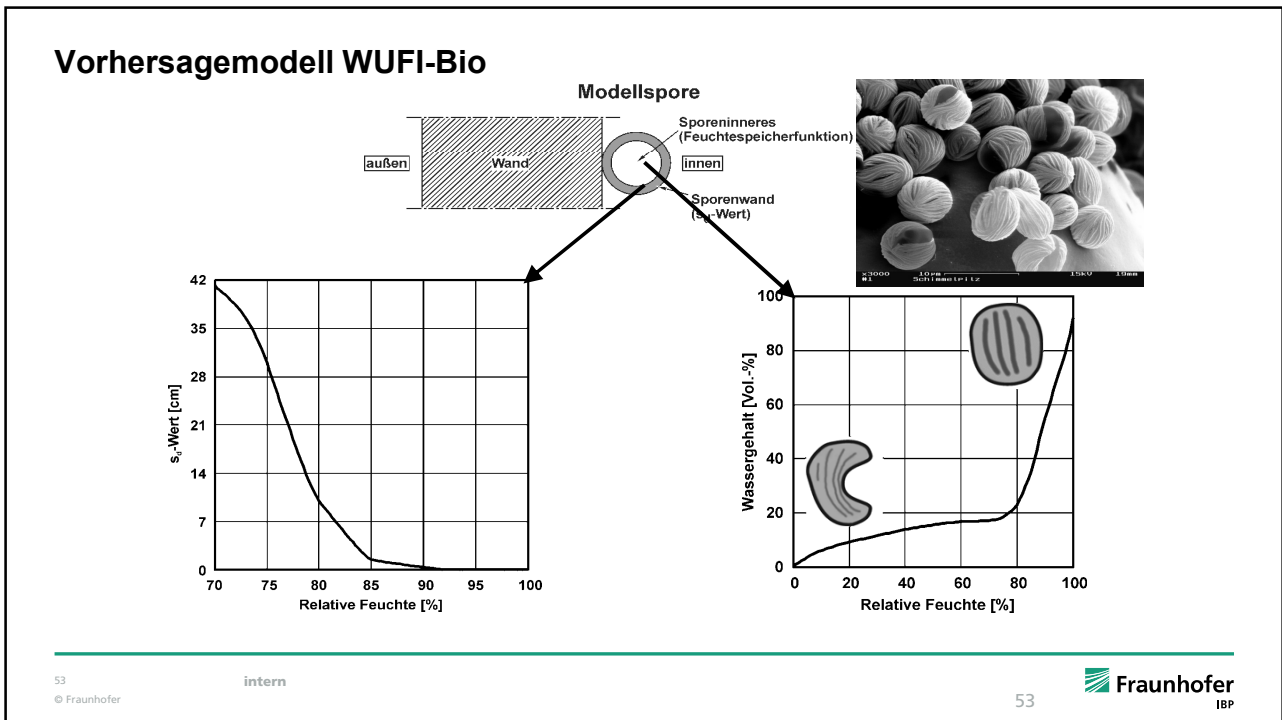
Problem:
Rein additives Verfahren

51

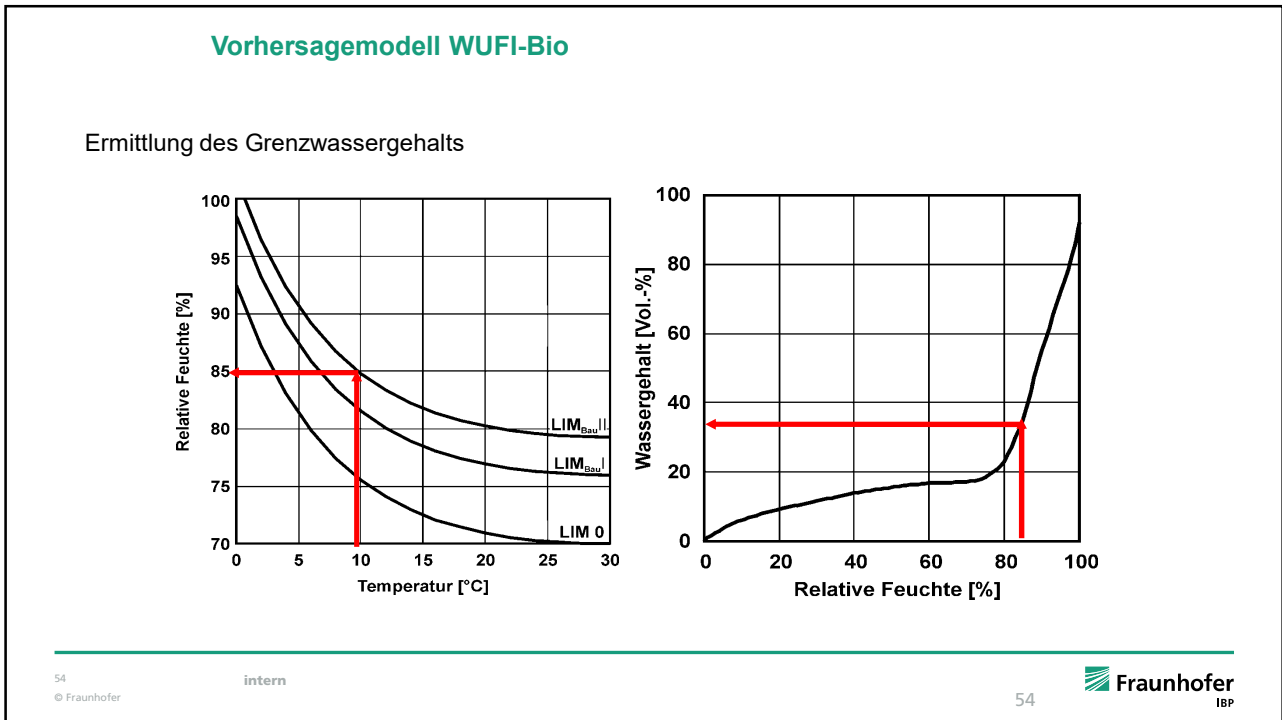
REM-Aufnahmen Schimmelpilzsporen



52

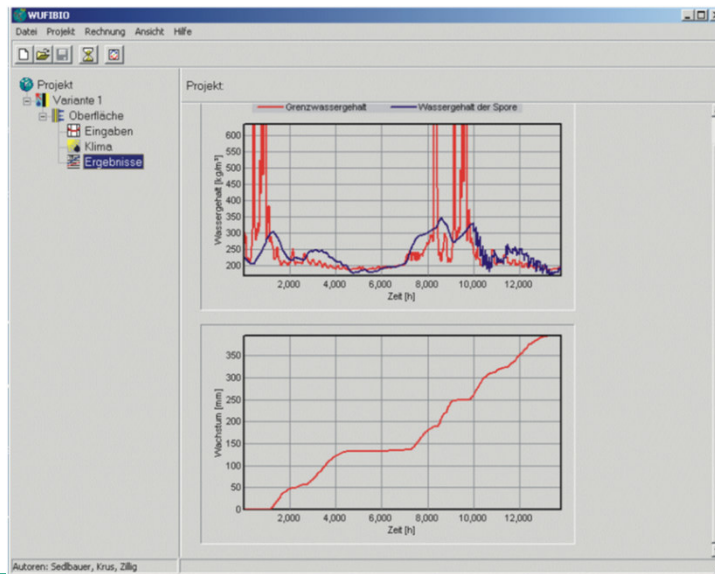


53



54

Vorhersagemodell WUFI-Bio



55
© Fraunhofer

intern

55
Fraunhofer
IBP

55

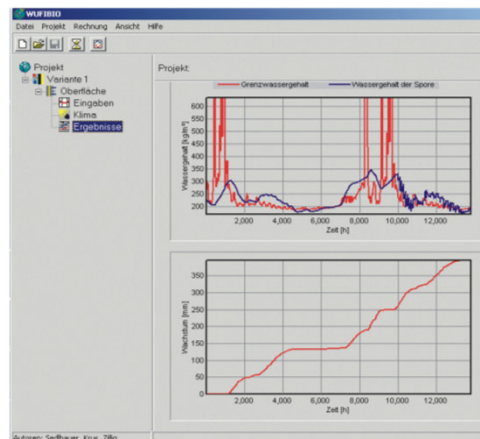
NEUE BEWERTUNG DER BERECHNUNGSERGEBNISSE DES BIOHYGROTHERMISCHEN MODELLS MIT DEM MOULD-INDEX

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

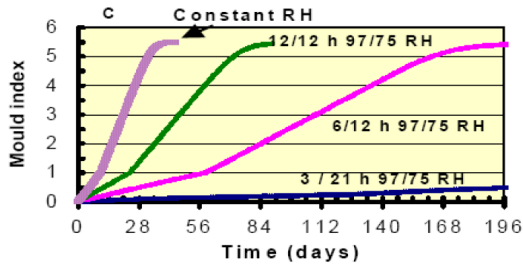
56
© Fraunhofer

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



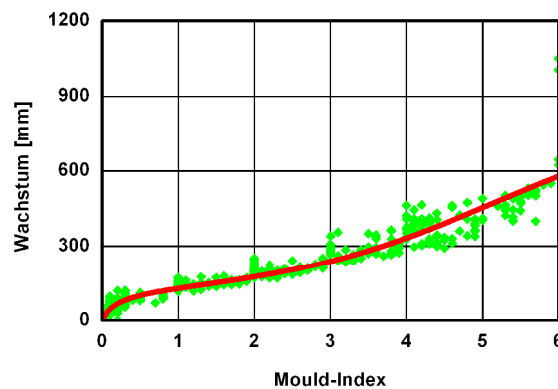
57

Übertragungsfunktion

Durch umfangreiche Berechnungen Vergleichbarkeit beider Modelle belegt

Ermittlung einer kontinuierlichen plausiblen Umrechnungsfunktion

Sehr gute Korrelation zwischen mm Wachstum und Mould-Index



58 © Fraunhofer

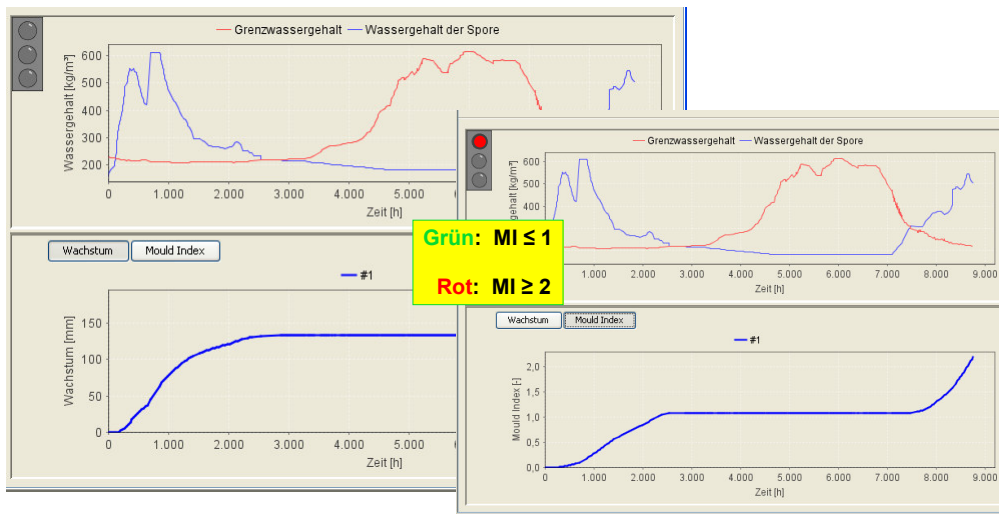
intern

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



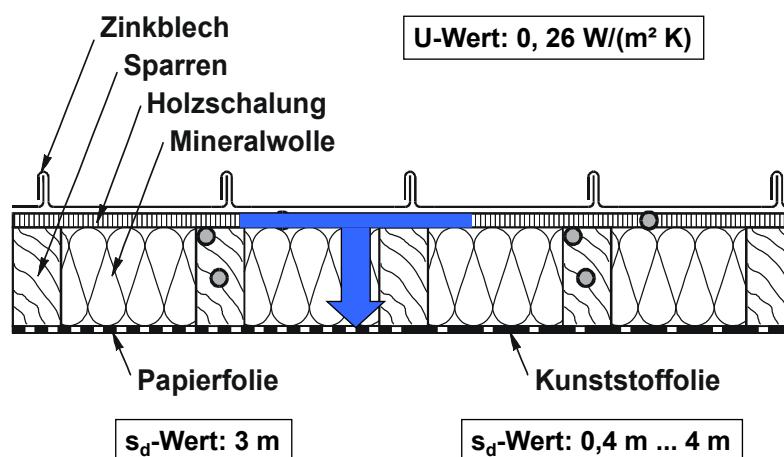
61
© Fraunhofer

intern

61 Fraunhofer IBP

61

Validierungs-Beispiel: Blechdach



62
© Fraunhofer

intern

62 Fraunhofer IBP

62

Validierungs-Beispiel: Blechdach

Fotografische Innenansicht



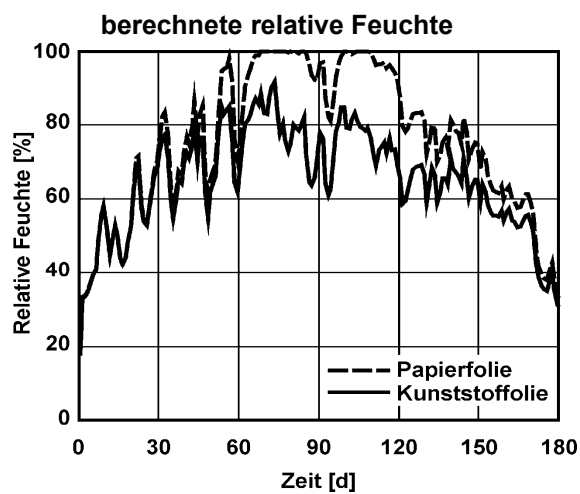
63
© Fraunhofer

intern

63
Fraunhofer
IBP

63

Validierungs-Beispiel: Blechdach



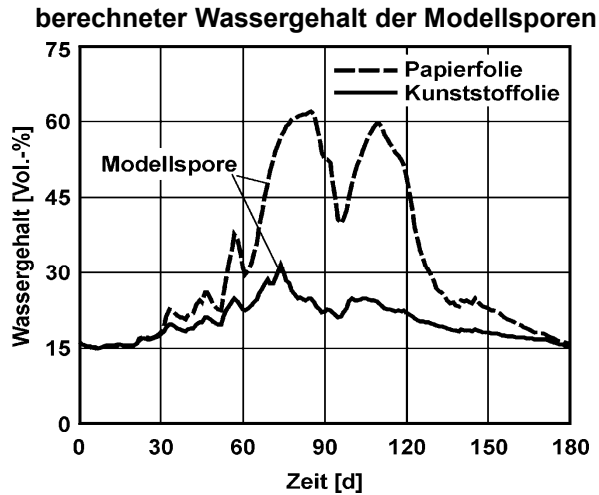
64
© Fraunhofer

intern

64
Fraunhofer
IBP

64

Validierungs-Beispiel: Blechdach



65
© Fraunhofer

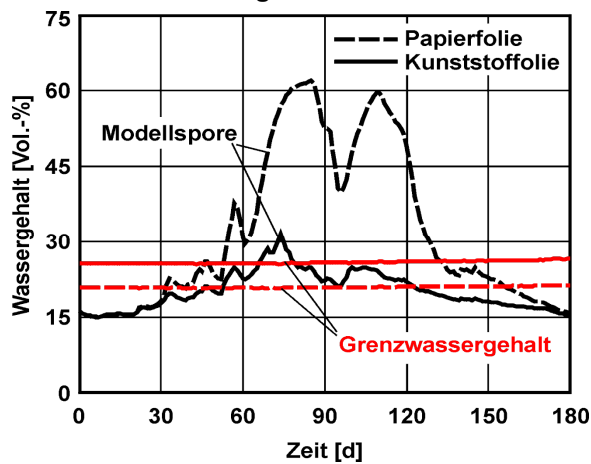
intern

65 Fraunhofer IBP

65

Validierungs-Beispiel: Blechdach

Vergleich des berechneten Wassergehaltes mit dem Grenzwassergehalt



66
© Fraunhofer

intern

66 Fraunhofer IBP

66

Zwischen-Zusammenfassung

Modell zur Beurteilung der Schimmelpilzbildung

- Isoplethenmodell
- Biohygrothermische Modell

Neuheiten

- Gefährdungsklassen
- Substratgruppen
- instationäre Implementierung

Validierung

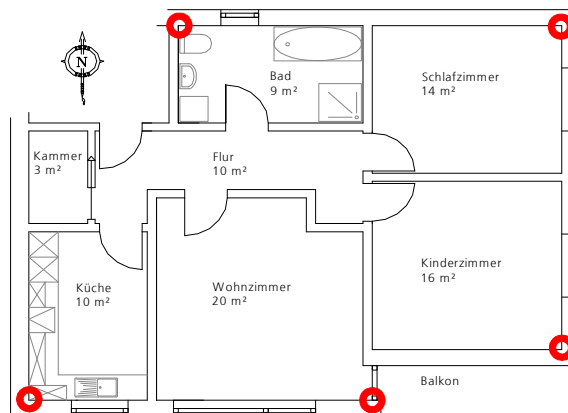
gute Übereinstimmung

- 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 Feuchteaustausch 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 %
-------------------------------------	--------------------	----------------------	--------------	------------	----------------------

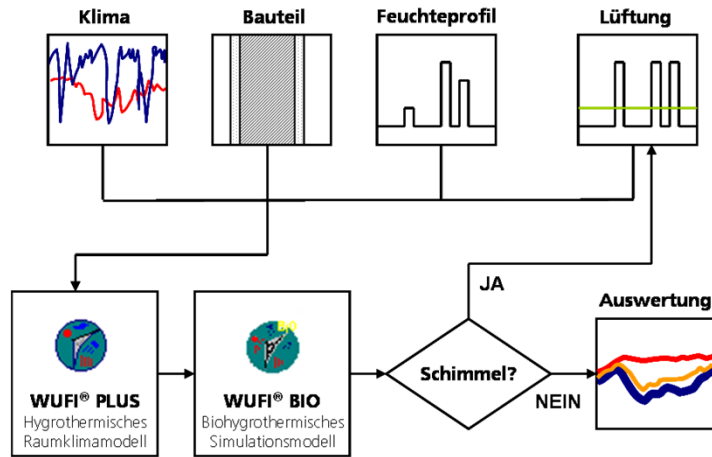
Uhrzeit	Schlafzimmer Feuchte in g/h	Kinderzimmer Feuchte in g/h	Wohnzimmer Feuchte in g/h	Bad Feuchte in g/h	Küche Feuchte in g/h
0 ⁰⁰ – 6 ⁰⁰	2Ps,2T 80 (100)	2Ps,2T 80 (105)	10T 35 (65)	HT 20 (35)	2 T 10 (25)
6 ⁰⁰ – 7 ⁰⁰	2T 10 (30)	2T 10 (35)	4Pt,10T 235 (265)	2D 500 (515)	K 100 (115)
7 ⁰⁰ – 13 ⁰⁰	2T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

70 © Fraunhofer intern
70 Fraunhofer IBP

70

Vorgehensweise

Iterative Ermittlung des erforderlichen Lüftungsprofil
zur Schimmelpilzvermeidung



71
© Fraunhofer

intern

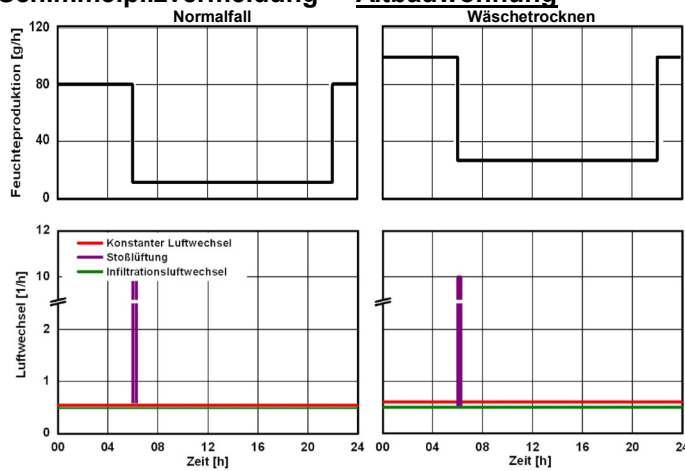
71

Fraunhofer
IBP

71

Ergebnisse

Iterative Ermittlung des erforderlichen Lüftungsprofil
zur Schimmelpilzvermeidung - Altbauwohnung



72
© Fraunhofer

intern

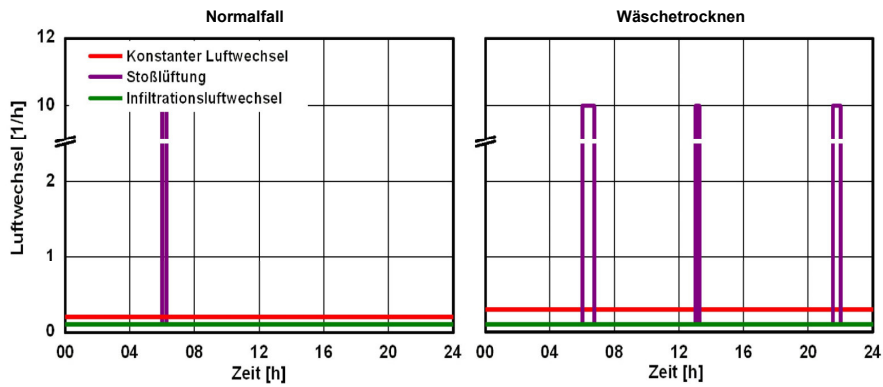
72

Fraunhofer
IBP

72

Ergebnisse

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



73
© Fraunhofer

intern

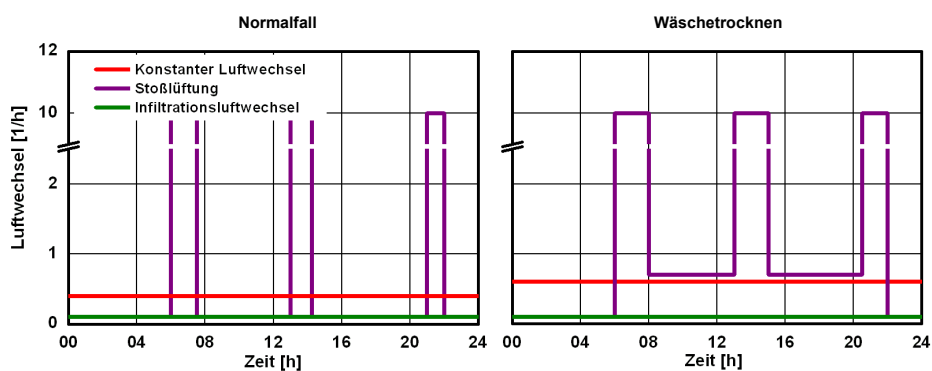
73

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).