

BAUPHYSIKALISCHE URSACHEN FÜR SCHIMMEL IN INNENRÄUMEN UND RECHNERISCHE BEURTEILUNG



M. Krus



1
© 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
© Fraunhofer

2



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?

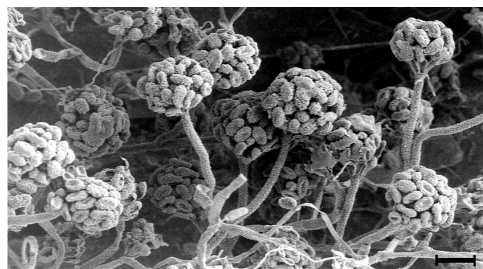
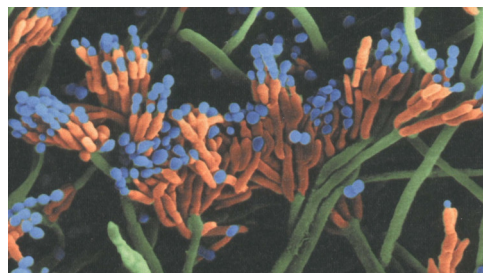
Bauschäden in Deutschland:

200 Millionen Euro pro Jahr

Schimmelpilzschäden



Schimmelpilzschäden



5
© Fraunhofer

5
Fraunhofer
IBP

5

Erkrankungen des Menschen

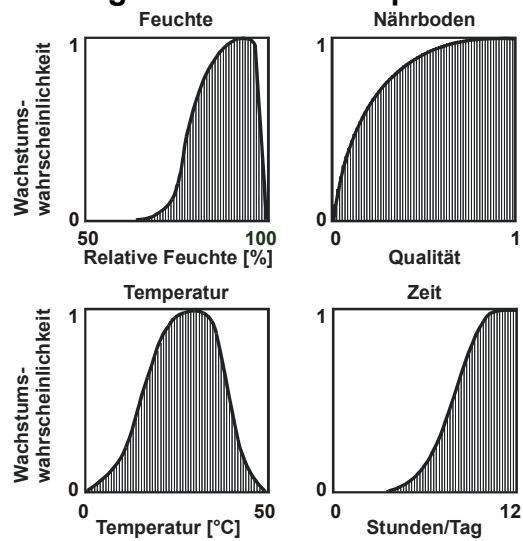
Begriff	Beschreibung	Arten
Mykosen	Pilzwachstum am oder im menschlichen Wirt	Epidermale Mykosen
		Endo- und Systemmykosen
Mykotoxikosen	Vergiftungen durch Mykotoxine	Aflatoxikosen
		Penicillium-Mykotoxikosen
		Fusarium-Mykotoxikosen
		Alternaria-Mykotoxikosen
		Stachybotryotoxikose
Mykogene Allergien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

6
© Fraunhofer

6
Fraunhofer
IBP

6

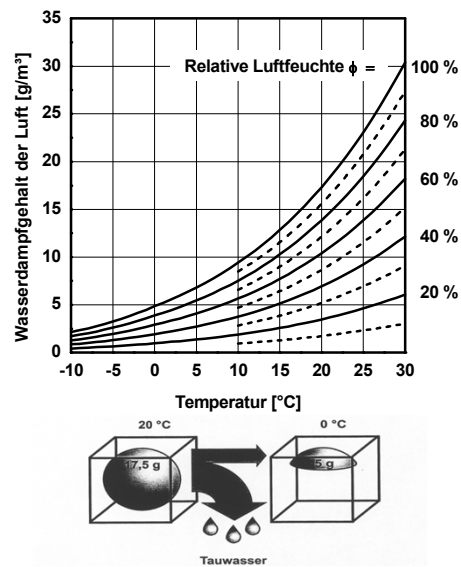
Wachstumsvoraussetzungen von Schimmelpilzen



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

Taupunktunterschreitung



9
© Fraunhofer IBP

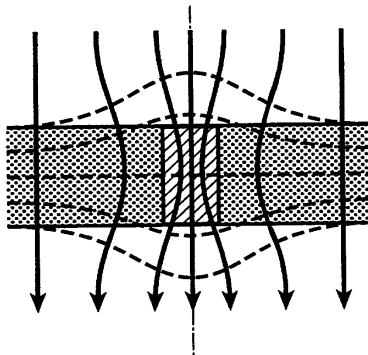
Fraunhofer
IBP

9

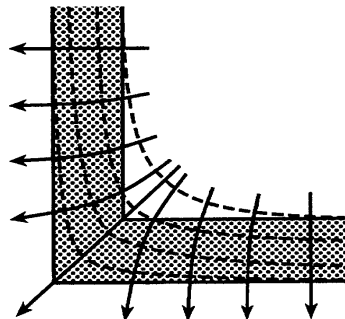
Thermisches Verhalten von Außenbauteilen: Wärmebrücken

Unterscheidung:

materialbezogene Wärmebrücke



geometrische Wärmebrücke



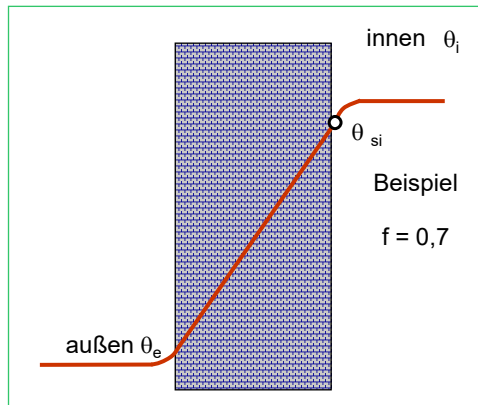
10
© Fraunhofer IBP

Fraunhofer
IBP

10

Thermisches Verhalten von Außenbauteilen

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



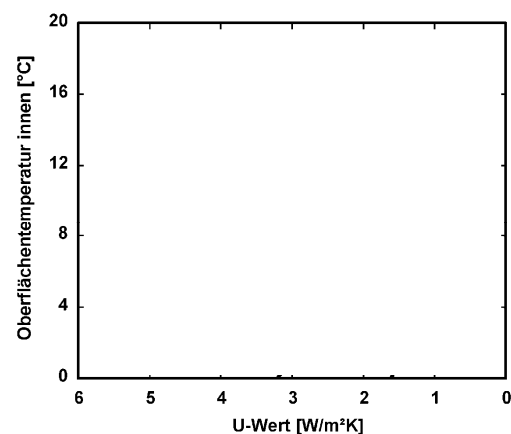
$\theta_{s,i}$ [°C]	θ_i [°C]	θ_e [°C]	r.F.* [%]
15.5	20	+ 5	69
12.5	20	- 5	80
11.0	20	- 10	91
9.3	20	-15	100

* Oberflächenfeuchte bei
50% Raumlufffeuchte

Oberflächentemperaturen an den Außenwänden

Übergangskoeffizient h [W/m²K]:

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

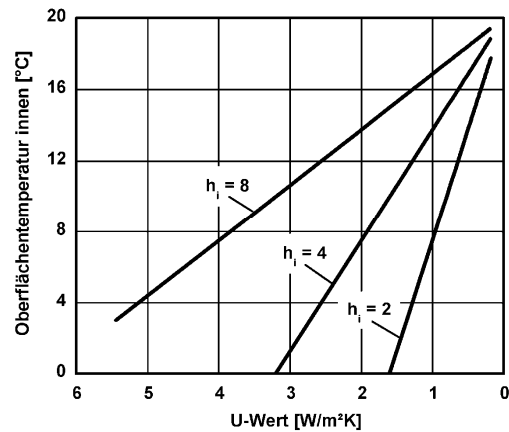


Oberflächentemperaturen an den Außenwänden

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



13
© Fraunhofer

13
Fraunhofer
IBP

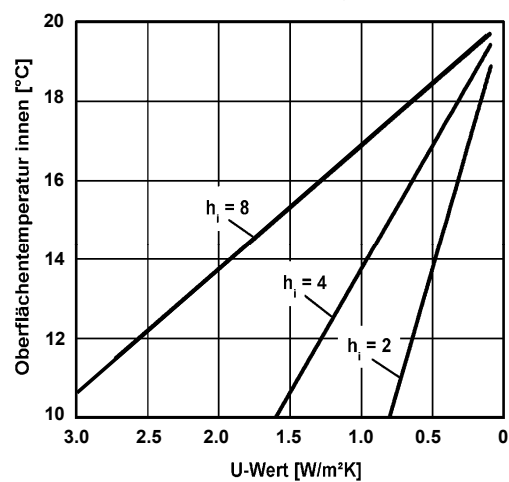
13

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



14
© Fraunhofer

14
Fraunhofer
IBP

14

Schimmelpilzbildungen

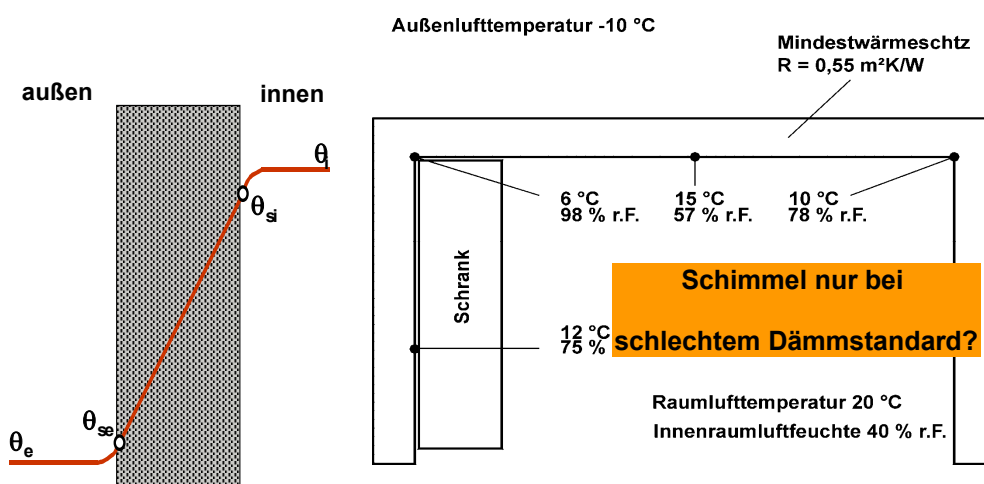


15
© Fraunhofer

15
Fraunhofer
IBP

15

Oberflächentemperaturen der Außenwände

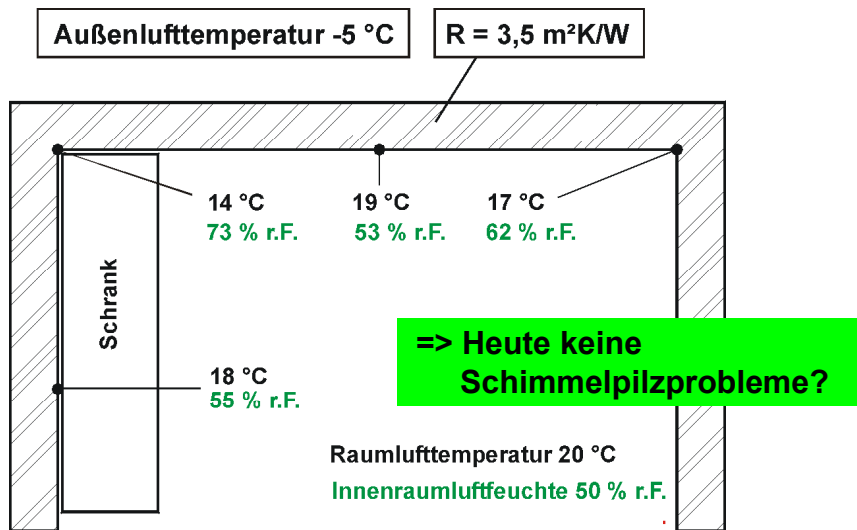


16
© Fraunhofer

16
Fraunhofer
IBP

16

Oberflächentemperaturen an den Außenwänden



17
© Fraunhofer

17
Fraunhofer
IBP

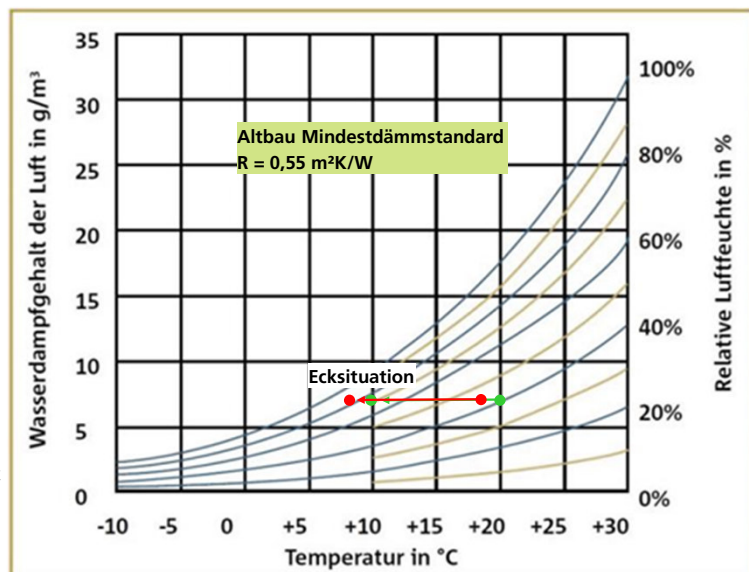
17

Raumtemperaturabsenkung zur Heizenergieeinsparung

Zitat Passive Haus Institut:

In bestehenden Gebäuden spart man
8 bis 9 % Heizwärme, wenn die Temperatur
um durchschnittlich 1 °C abgesenkt wird.
In Neubauten sogar mehr: 10 bis 12 %.

Carrier Diagramm
(Wasserdampfgehalt
der Luft als Funktion
der Temperatur und
der rel. Luftfeuchte),
[Schöck 2019]

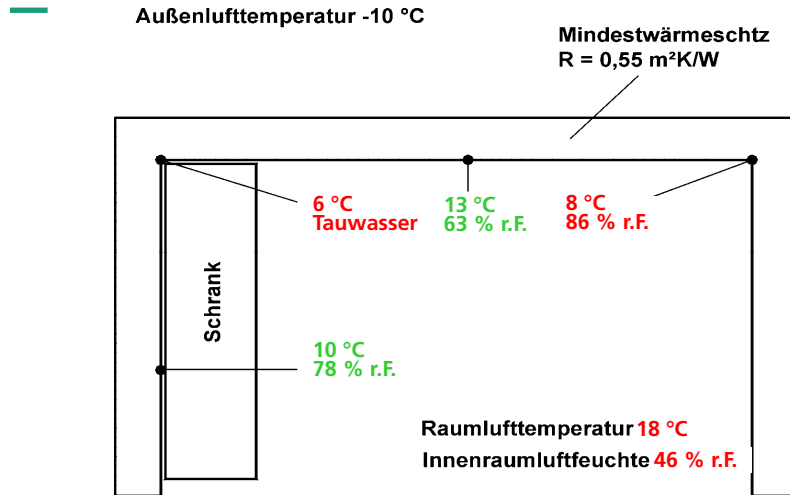


Seite 18

- extern -

18

Raumtemperaturabsenkung zur Heizenergieeinsparung



Seite 19

- extern -

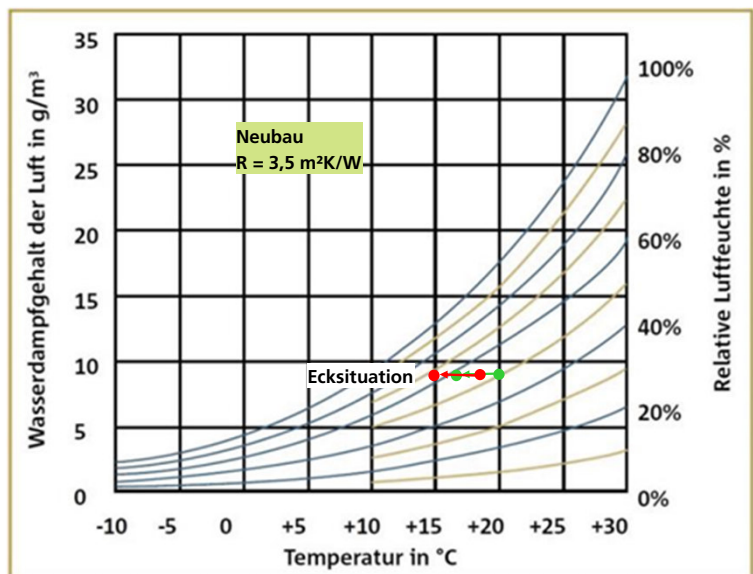
19

Raumtemperaturabsenkung zur Heizenergieeinsparung

Zitat Passive Haus Institut:

In bestehenden Gebäuden spart man
8 bis 9 % Heizwärme, wenn die Temperatur
um durchschnittlich 1 °C abgesenkt wird.
In Neubauten sogar mehr: 10 bis 12 %.

Carrier Diagramm
(Wasserdampfgehalt
der Luft als Funktion
der Temperatur und
der rel. Luftfeuchte),
[Schöck 2019]



Seite 20

- extern -

20



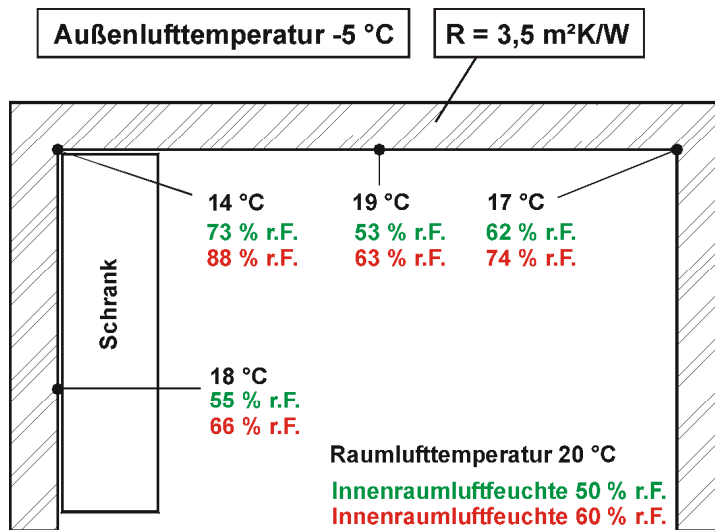
- extern -

Maximale Raumluftfeuchte ohne Schimmelpilze



22

Einfluss dichte Bauweise



23
© Fraunhofer

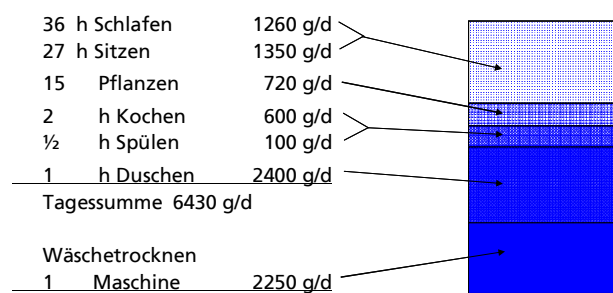
23
Fraunhofer
IBP

23

Schimmelpilzbildung in Wohnräumen

Feuchteproduktion pro Tag

4 Personen-Haushalt:



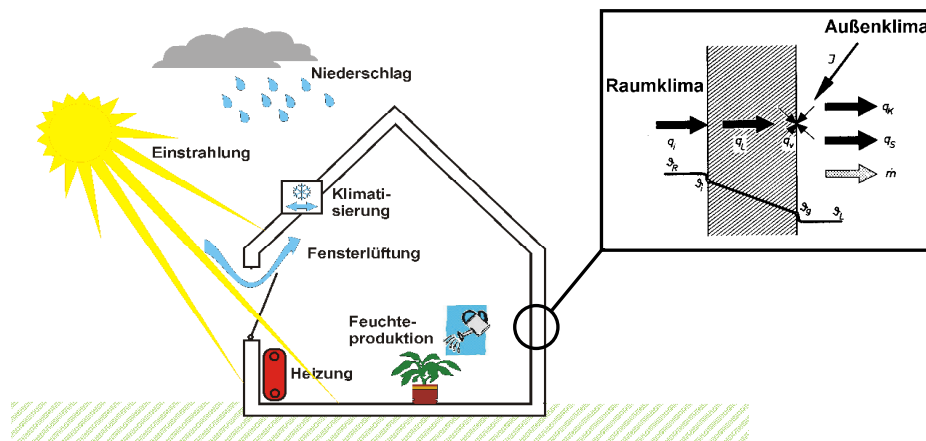
Tagessumme ca. 9000 g/d

24
© Fraunhofer IBP

Fraunhofer
IBP

24

Hygrothermisches Raummodell

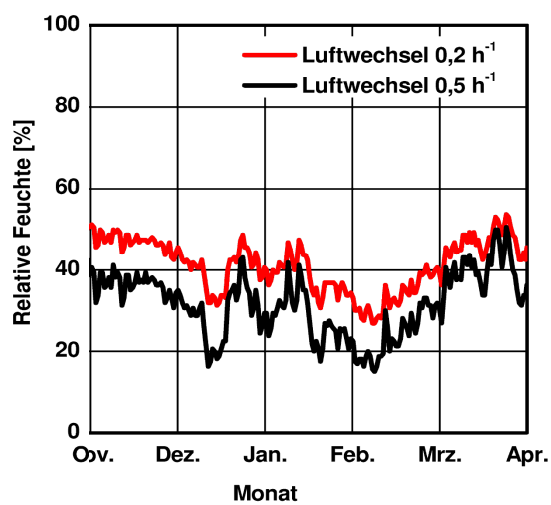


25
© Fraunhofer

25
Fraunhofer
IBP

25

Einfluss des Luftwechsels



Annahme

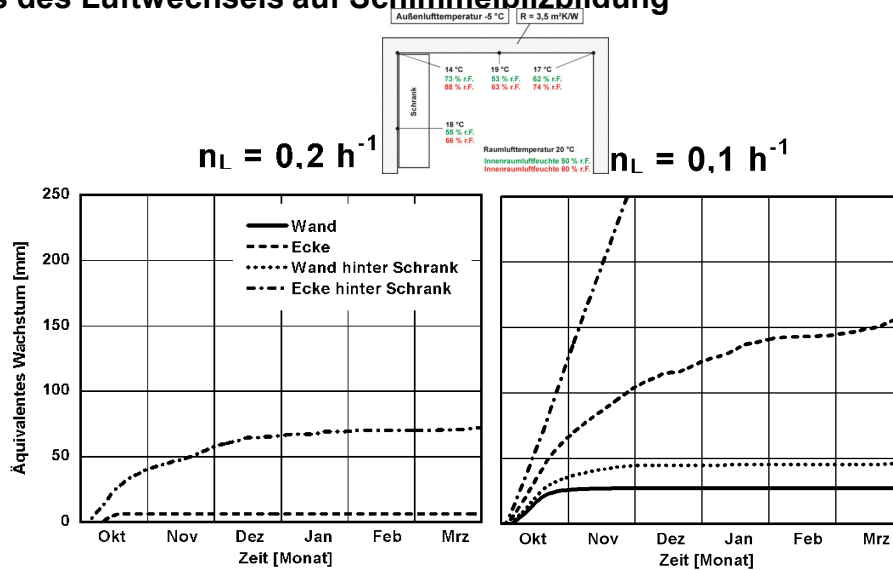
mittlere Feuchte-
produktion: 3 g/(h m³)

26
© Fraunhofer

26
Fraunhofer
IBP

26

Einfluss des Luftwechsels auf Schimmelpilzbildung



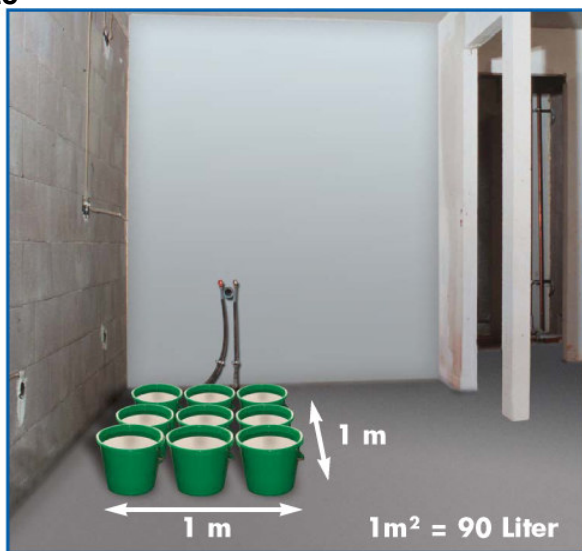
27
© Fraunhofer

27

Fraunhofer
IBP

27

Baufeuchte



Mittlere
Baufeuchte
pro m² Wfl.

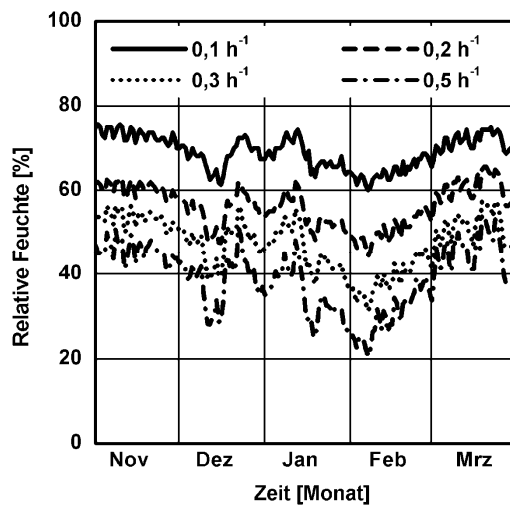
28
© Fraunhofer

28

Fraunhofer
IBP

28

Einfluss des Luftwechsels



Annahme

mittlere Feuchte-
produktion und
Baufeuchte

Häufigkeit von Schimmelpilzschäden

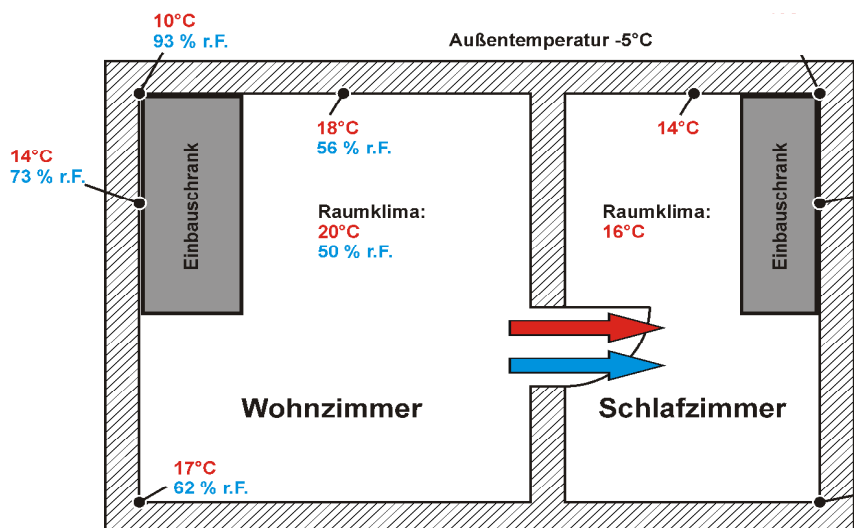
Raum	Beobachtung
Schlafzimmer	
Kinderzimmer	
Wohnzimmer	
Bad	
Küche	
sonstige (z. B.) Flur	

Häufigkeit von Schimmelpilzschäden

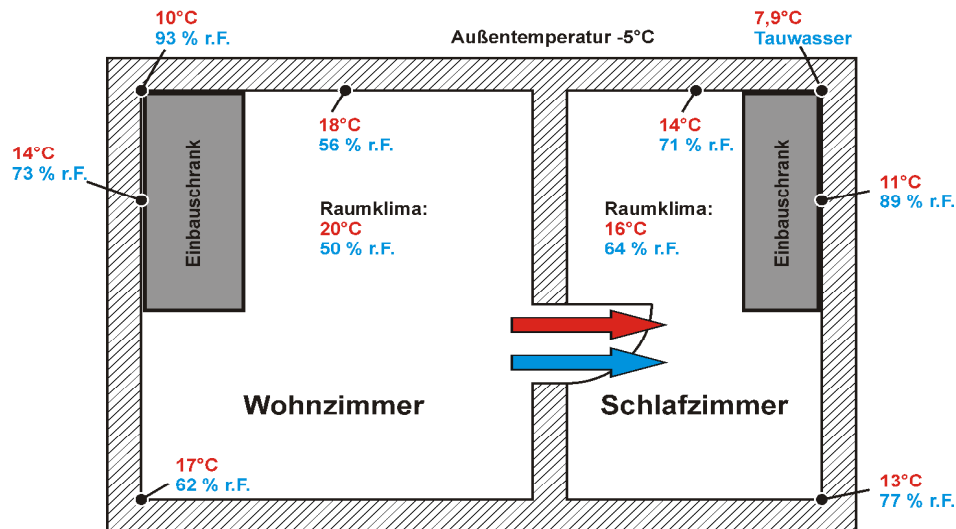
Raum	Beobachtung
Schlafzimmer	41
Kinderzimmer	26
Wohnzimmer	16
Bad	8
Küche	8
sonstige (z. B.) Flur	2

Einbauschranksituation
hier nicht berücksichtigt!

Feuchteverhältnisse in Wohn- und Schlafräumen



Feuchteverhältnisse in Wohn- und Schlafräumen



33
© Fraunhofer

33
Fraunhofer
IBP

33

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!**

34
© Fraunhofer

34
Fraunhofer
IBP

34

Vorhersage von Schimmelpilzbildung

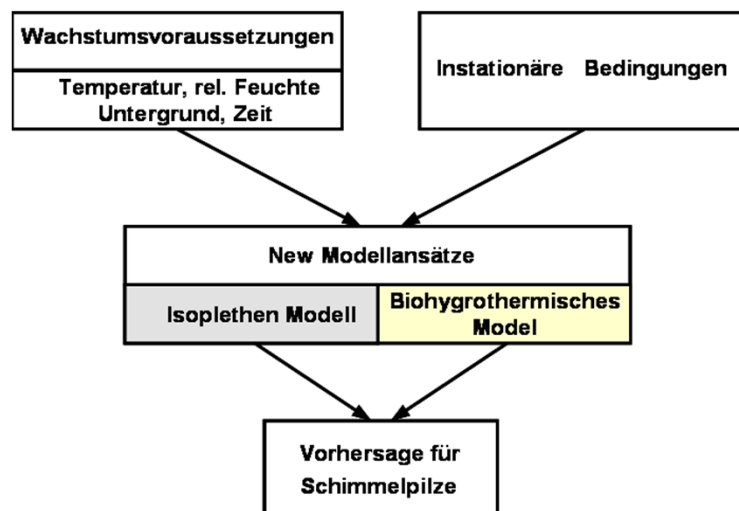
Problem

Gesundheitliche Gefährdung
Sanierungskosten durch Schimmelpilze
Biozide sind keine Lösung

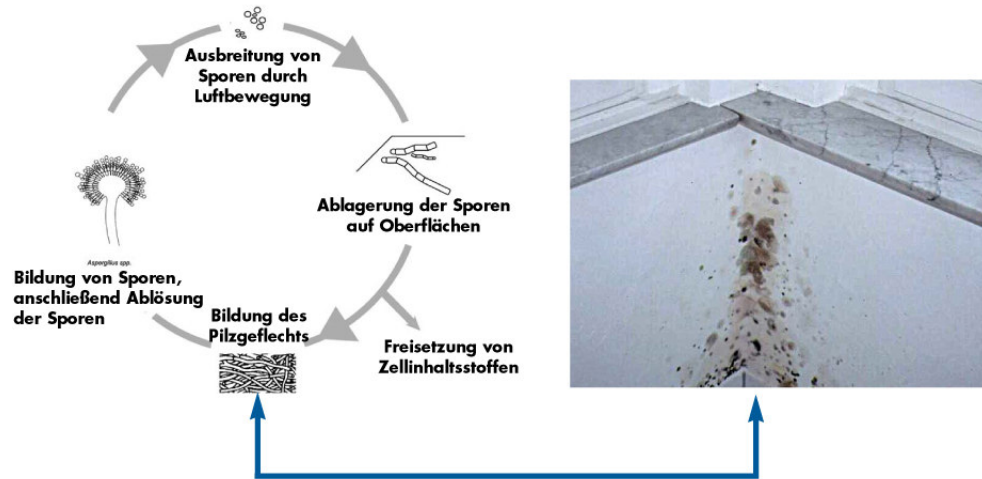
Zielsetzung

Planungsinstrument für Praktiker
Berücksichtigung instationärer Verhältnisse
Ausschluss jeglicher Pilzbildung

rechnerische Beurteilungsmöglichkeiten



Wachstum von Schimmelpilzen

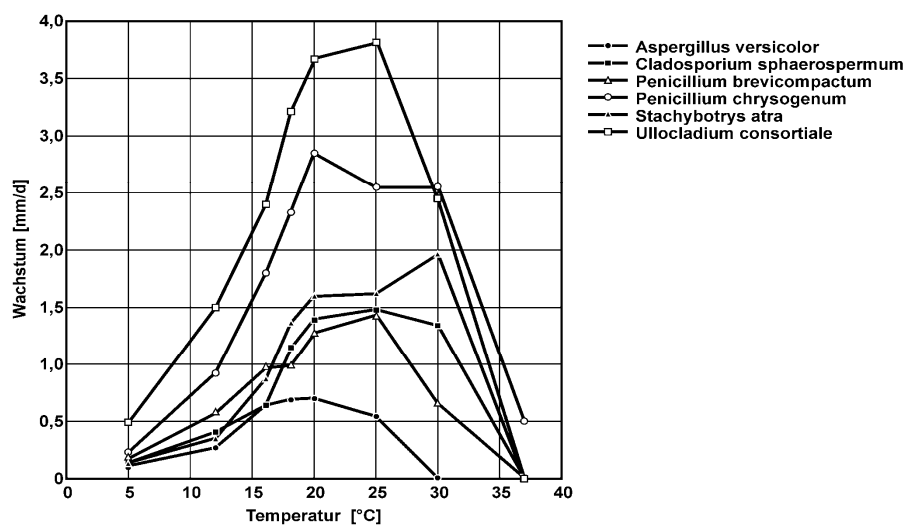


37
© Fraunhofer IBP

Fraunhofer
IBP

37

Wachstum von Schimmelpilzen



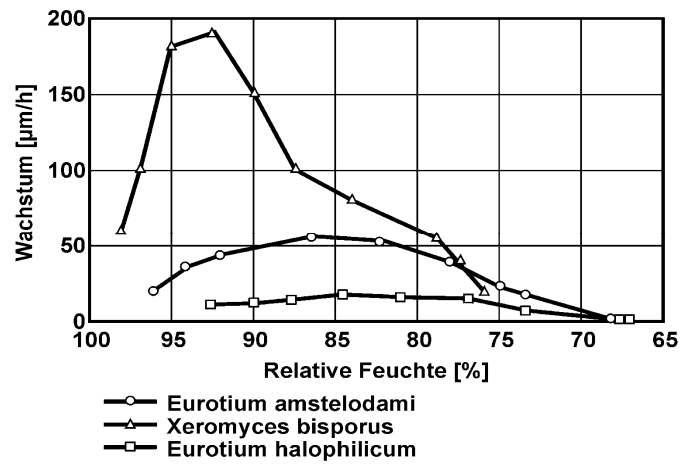
38
© Fraunhofer

38

Fraunhofer
IBP

38

Wachstum von Schimmelpilzen



Biologische Untersuchungen: Wasseraktivität

Wasseraktivität = Verfügbarkeit des Wassers

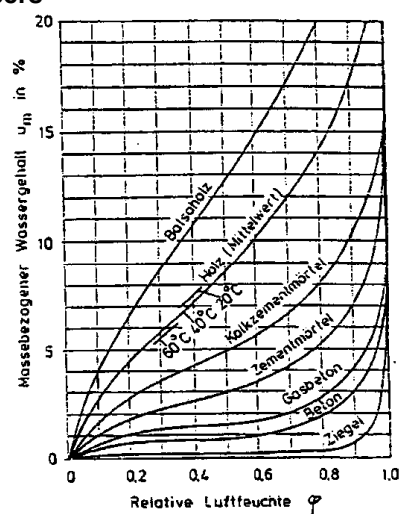
Abhängig von der Bindung
des Wassers ans Material

$$a_w = \varphi / 100$$

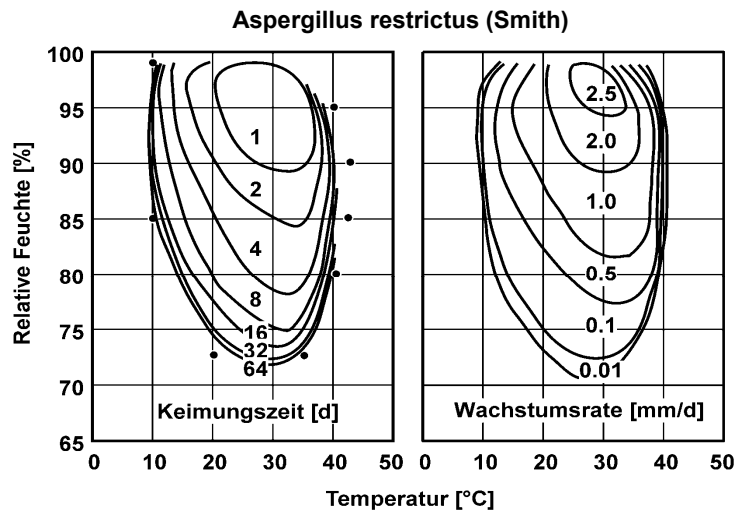
mit:

a_w [-] Wasseraktivität
 φ [%] relative Luftfeuchte

II
V
gleiche Verfügbarkeit bei
unterschiedlichen Wassergehalten



Isoplethensysteme

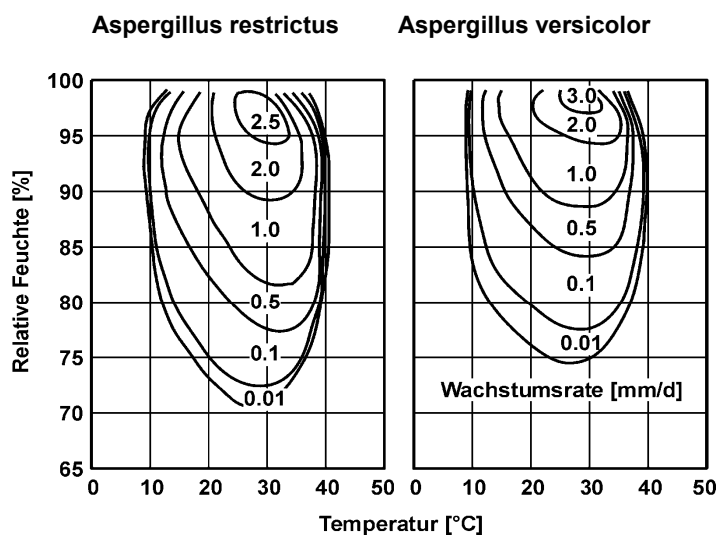


41
© Fraunhofer

41
Fraunhofer
IBP

41

Isoplethensysteme



Ca. 200 Spezies
im Innenraum
gefunden

42
© Fraunhofer IBP

Fraunhofer
IBP

42

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. penicillioides</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>										

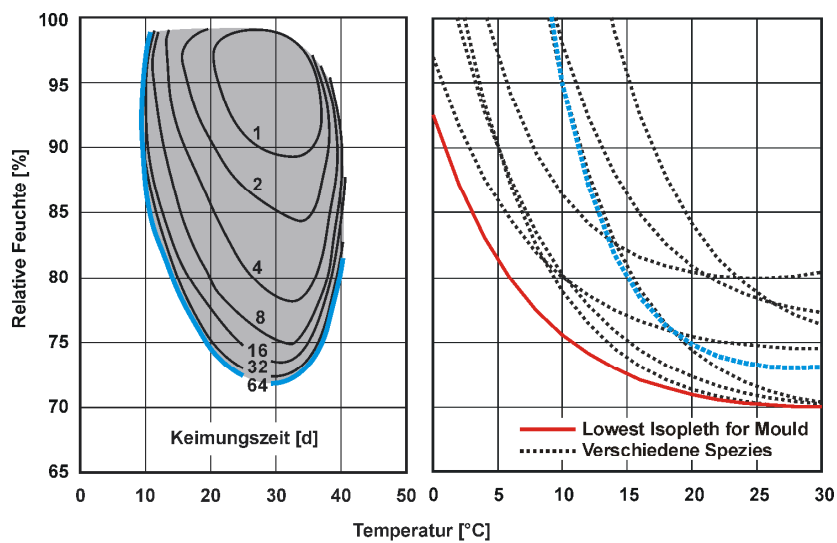
43
© Fraunhofer

43

Fraunhofer
IBP

43

Isoplethen zur Bewertung von Schimmelpilzbildung



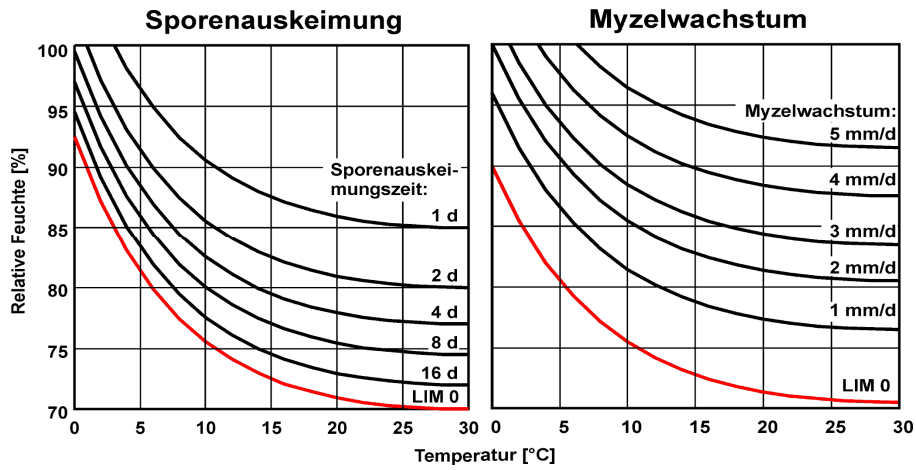
44
© Fraunhofer

44

Fraunhofer
IBP

44

Isoplethensysteme

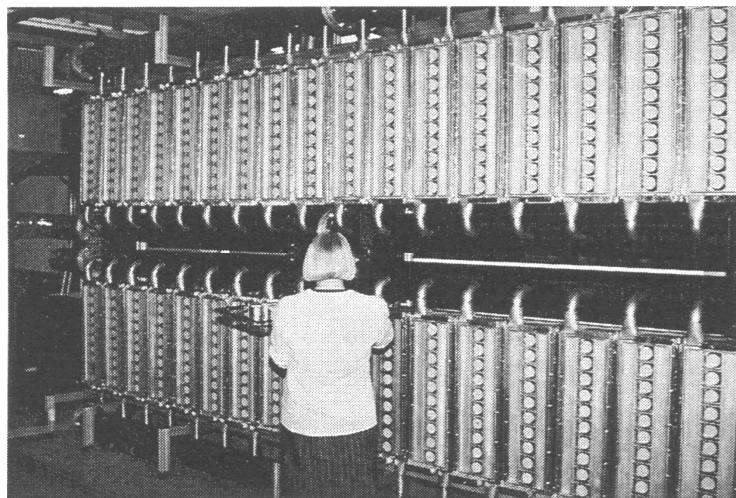


45
© Fraunhofer IBP

Fraunhofer
IBP

45

Schimmelpilzversuchsstand IBP Stuttgart



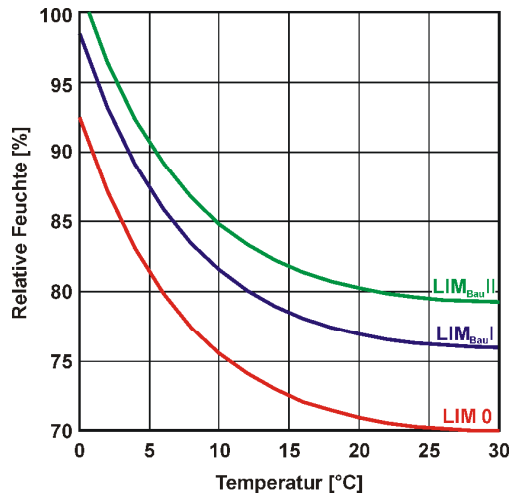
46
© Fraunhofer

46

Fraunhofer
IBP

46

Einfluss des Materials auf die Lage des LIM



Substratgruppen

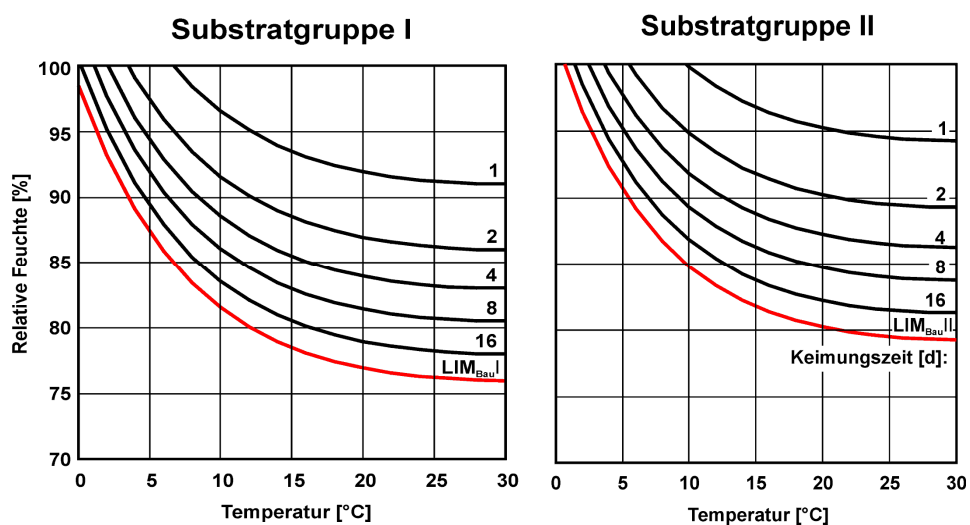
- 0** optimales Substrat
(biologische Vollmedien)
- I** biologisch gut verwertbare
Substrate
(z.B. Tapeten, Verschmutzung)
- II** biologisch kaum verwertbare
Substrate
(z.B. mineralische Baustoffe)

47
© Fraunhofer

47
Fraunhofer
IBP

47

Isoplethensysteme für Baustoffe

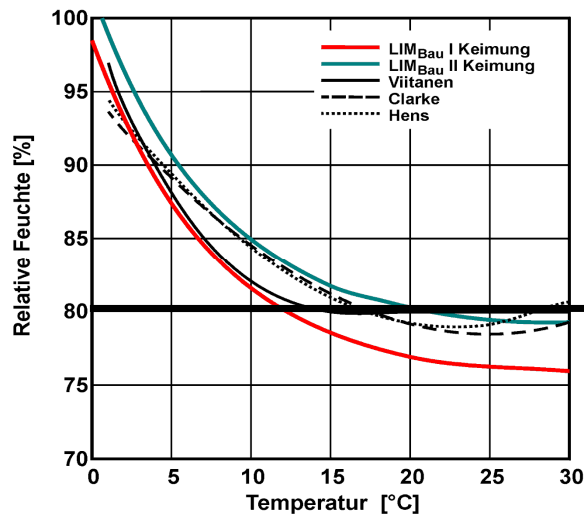


48
© Fraunhofer IBP

Fraunhofer
IBP

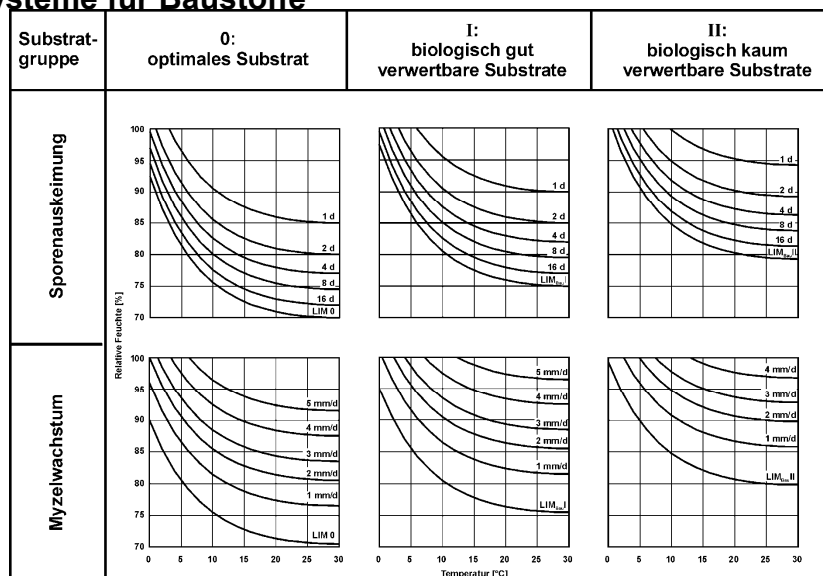
48

Vergleich der Angaben von Wachstumsvoraussetzungen



In Deutschland:
DIN 4108: 80 %

Isoplethensysteme für Baustoffe



Gesundheitsgefährdung durch Schimmelpilze

Bewertung einzelner Schimmelpilze:

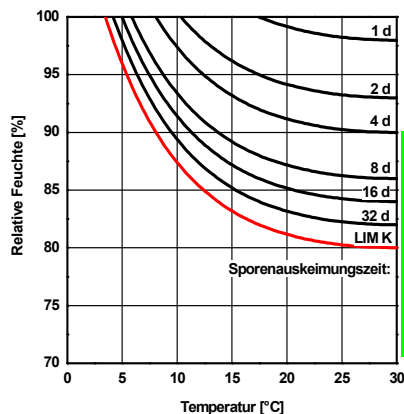
- kein eindeutiger Ursachen-Wirkungs-Zusammenhang
- Abhängigkeit von der Größe des Befalls
- Personen unterschiedlich betroffen

Besonders kritische Schimmelpilzspezies:

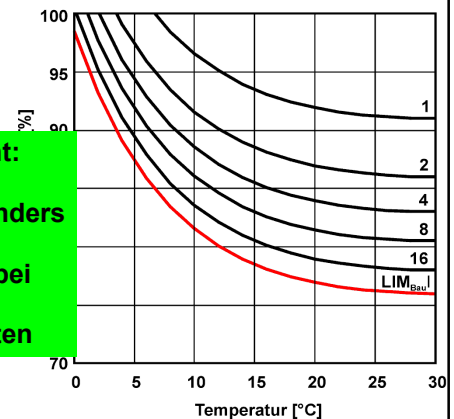
- *Aspergillus fumigatus*
- *Aspergillus flavus*
- *Stachybotrys chartarum*

Isoplethensysteme kritische Pilze (optimaler Nährboden)

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



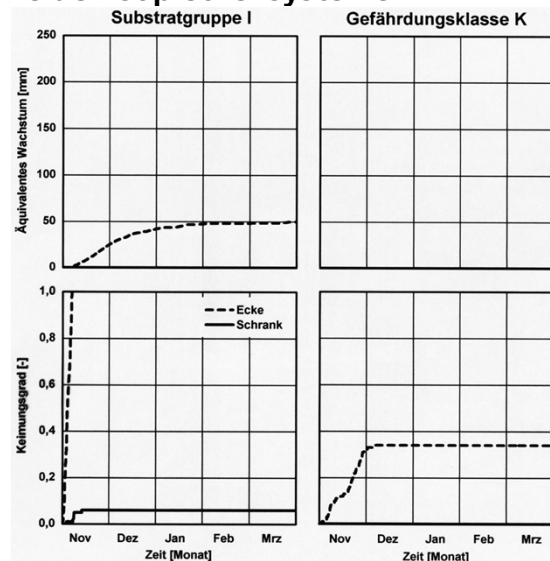
Substratgruppe I



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

Daten nur für optimales Substrat !

Vorhersage mit Hilfe der Isolethensysteme



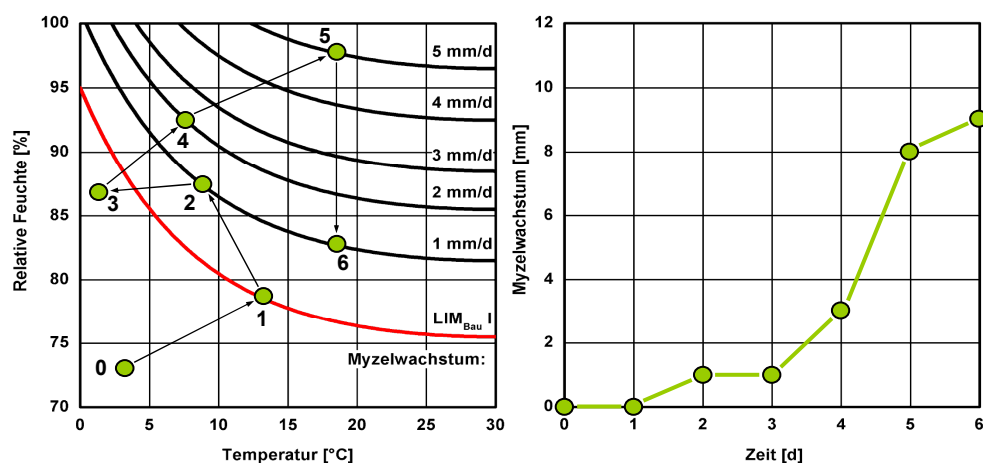
53
© Fraunhofer

53

Fraunhofer
IBP

53

Anwendung der Isolethensysteme



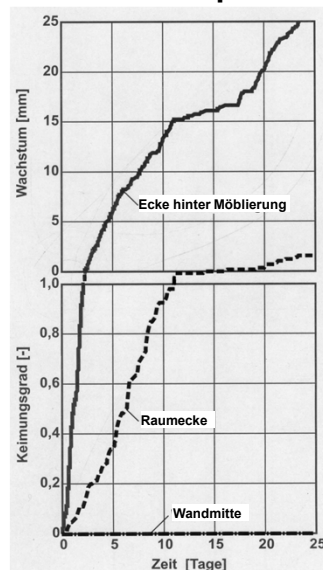
54
© Fraunhofer

54

Fraunhofer
IBP

54

Vorhersage mit Hilfe der Isoplethensysteme



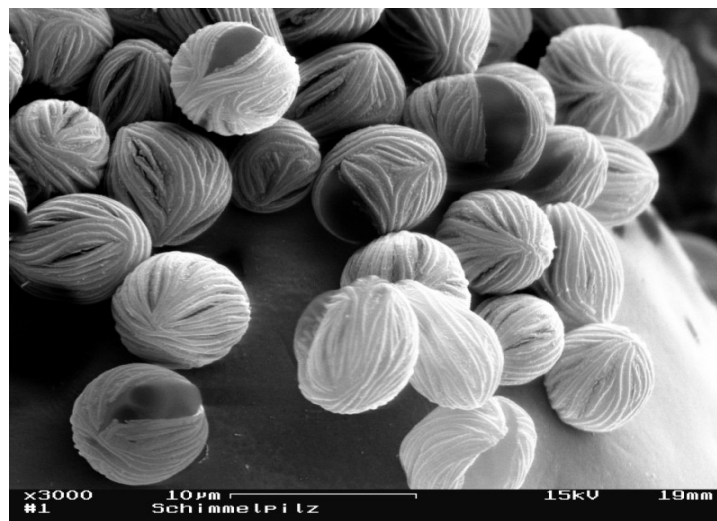
Problem:
Rein additives Verfahren

55
© Fraunhofer IBP

Fraunhofer
IBP

55

REM-Aufnahmen Schimmelpilzsporen



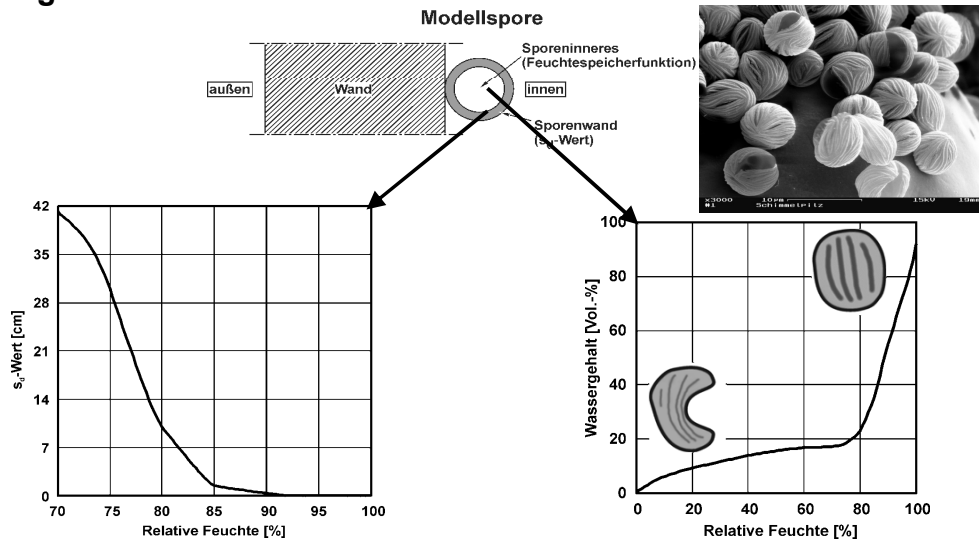
56
© Fraunhofer

56

Fraunhofer
IBP

56

Vorhersagemodell WUFI-Bio



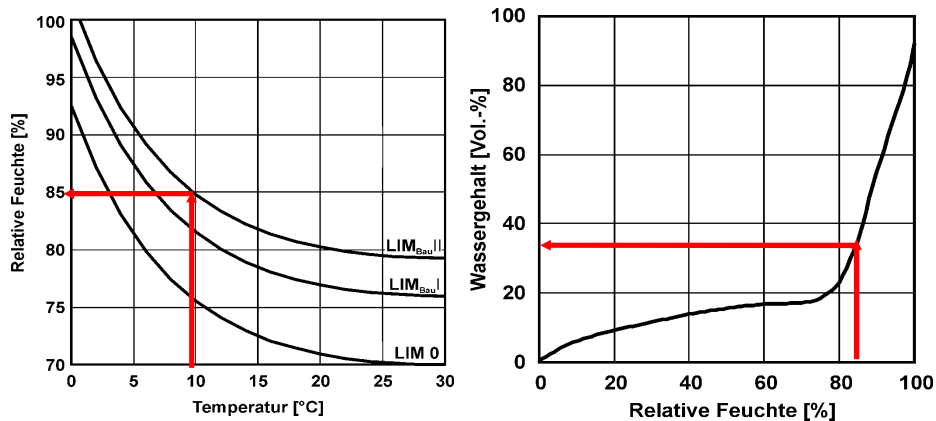
57
© Fraunhofer

57
Fraunhofer
IBP

57

Vorhersagemodell WUFI-Bio

Ermittlung des Grenzwassergehalts

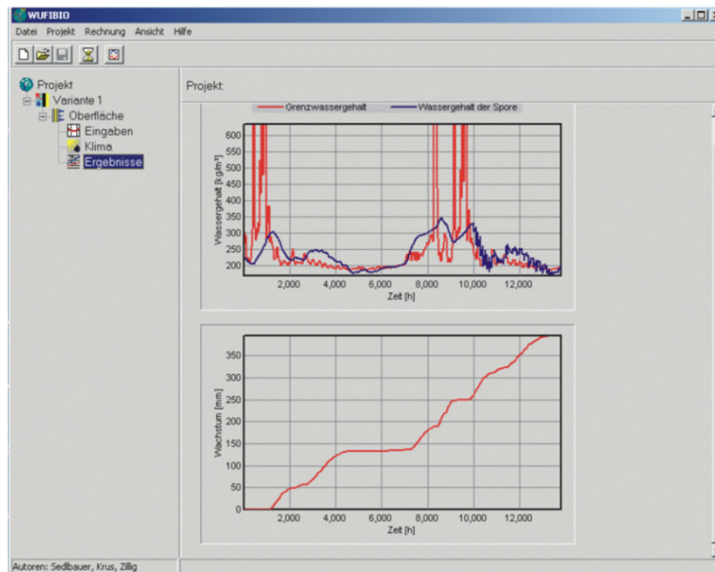


58
© Fraunhofer

58
Fraunhofer
IBP

58

Vorhersagemodell WUFI-Bio



59
© Fraunhofer

59

Fraunhofer
IBP

59

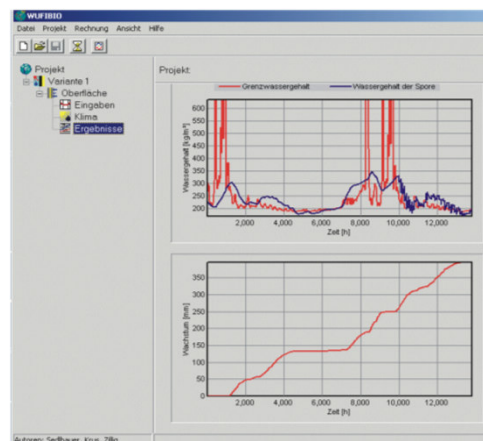
NEUE BEWERTUNG DER BERECHNUNGSERGEBNISSE DES BIOHYGROTHERMISCHEN MODELLS MIT DEM MOULD-INDEX

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

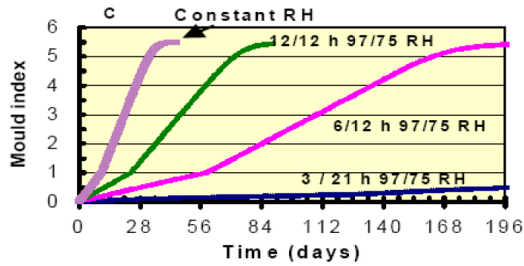
60
© Fraunhofer

60

Fraunhofer
IBP

60

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%

61
© Fraunhofer

61
Fraunhofer
IBP

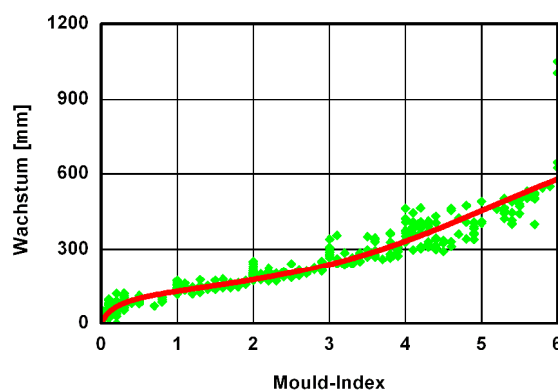
61

Übertragungsfunktion

Durch umfangreiche Berechnungen
Vergleichbarkeit beider Modelle
belegt

Ermittlung einer kontinuierlichen
plausiblen Umrechnungsfunktion

Sehr gute Korrelation zwischen mm
Wachstum und Mould-Index

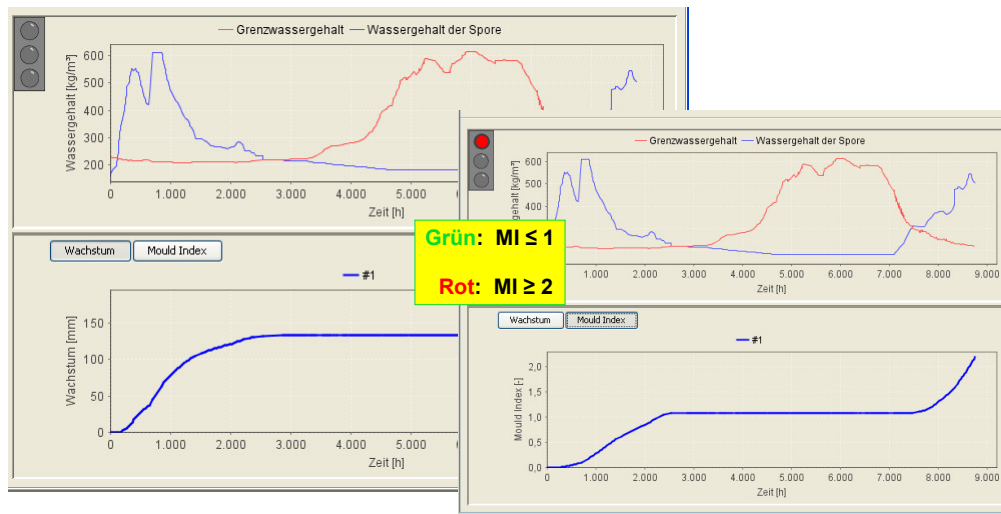


62
© Fraunhofer

62
Fraunhofer
IBP

62

Übertragungsfunktion



63
© Fraunhofer

63
Fraunhofer
IBP

63

Bewertung Schimmelpilzwachstum

	Innenoberfläche oder Position mit Raumlufthkontakt	Oberflächen im Bauteilinneren ohne Raumlufthkontakt	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	$MI \leq 3$: beginnender, mit bloßem Auge gerade erkennbarer Bewuchs
●	$1 \leq MI < 2$: Nicht sichtbarer, nur mikroskopisch erkennbarer Bewuchs	$2 \leq MI < 3$: beginnender, mit bloßem Auge gerade erkennbarer Bewuchs	$MI > 3$: mit bloßem Auge erkennbarer Bewuchs
●	$MI \geq 2$: beginnender, mit bloßem Auge gerade erkennbarer Bewuchs	$MI \geq 3$: Mit bloßem Auge erkennbarer Bewuchs mit geringer Ausbreitung	Beurteilung im Einzelfall – aktuell nicht definiert

64
© Fraunhofer IBP

Fraunhofer
IBP

64

Validierungs-Beispiel: Blechdach

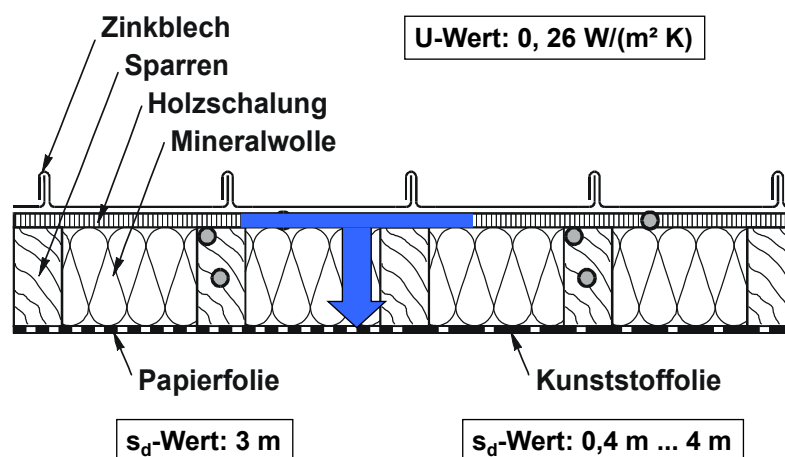


65
© Fraunhofer

65
Fraunhofer
IBP

65

Validierungs-Beispiel: Blechdach



66
© Fraunhofer

66
Fraunhofer
IBP

66

Validierungs-Beispiel: Blechdach

Fotografische Innenansicht

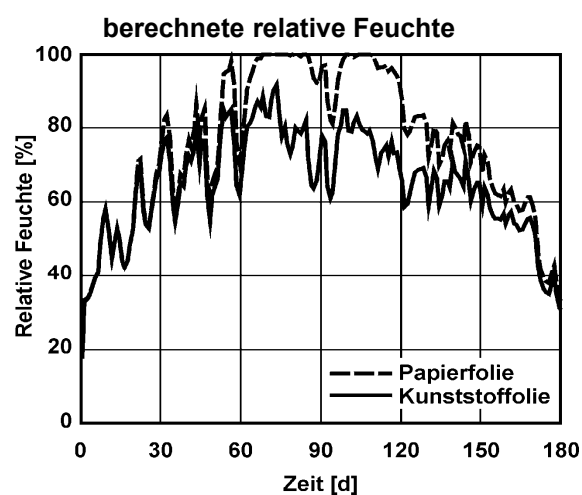


67
© Fraunhofer

67
Fraunhofer
IBP

67

Validierungs-Beispiel: Blechdach

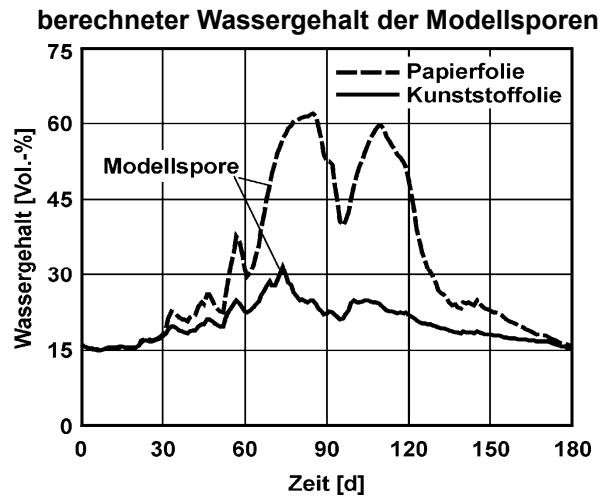


68
© Fraunhofer

68
Fraunhofer
IBP

68

Validierungs-Beispiel: Blechdach



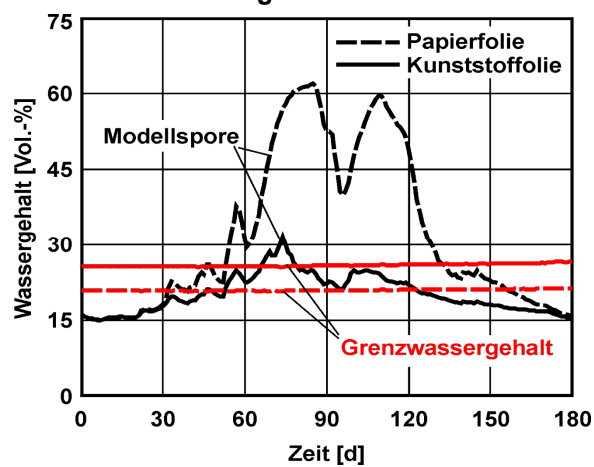
69
© Fraunhofer

69
Fraunhofer
IBP

69

Validierungs-Beispiel: Blechdach

Vergleich des berechneten Wassergehaltes mit dem Grenzwassergehalt



70
© Fraunhofer

70
Fraunhofer
IBP

70

Zwischen-Zusammenfassung

Modell zur Beurteilung der Schimmelpilzbildung

- Isoplethenmodell
- Biohygrothermische Modell

Neuheiten

- Gefährdungsklassen
- Substratgruppen
- instationäre Implementierung

Validierung

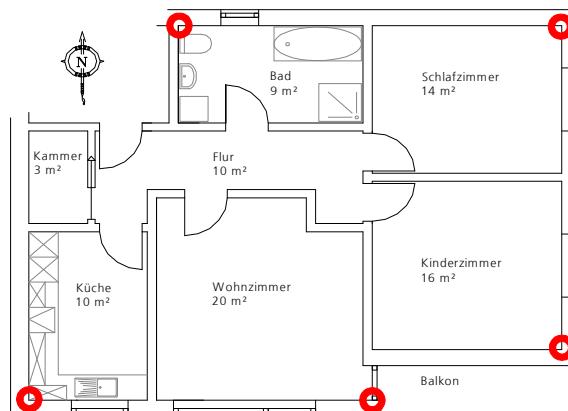
gute Übereinstimmung

- mit Erfahrungswerten
- mit Laboruntersuchungen
- mit Ergebnissen im Freiland

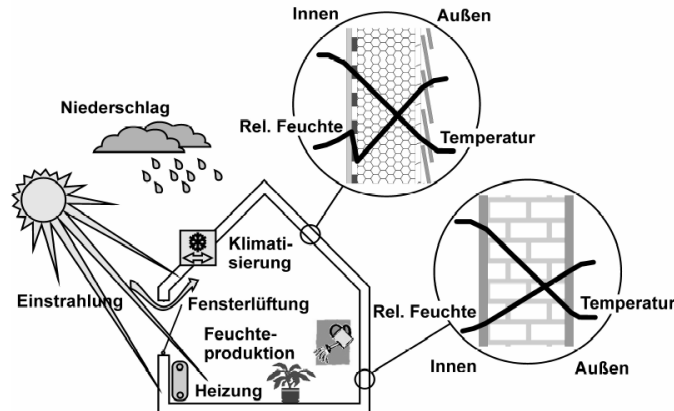
Berechnung der erforderlichen Lüftung

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

73

Anwendungsbeispiel

3-Zimmerwohnung mit Außenwandinnenecken

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

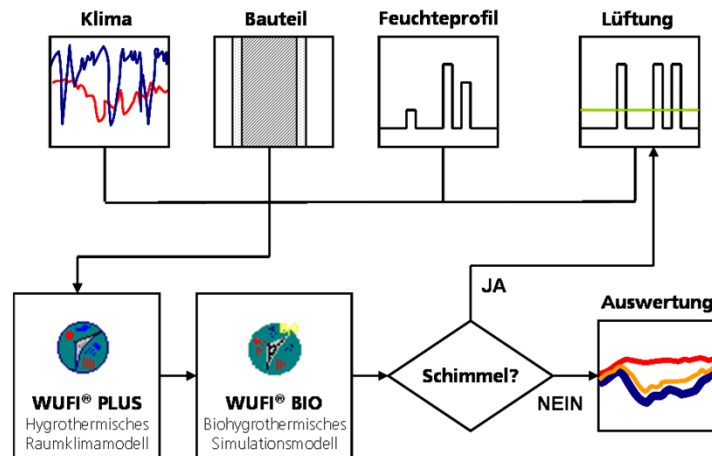
Häufigkeit von Schimmelpilzwachstum	Wohnzimmer 16 %	Schlafzimmer 41 %	Küche 8 %	Bad 8 %	Kinderzimmer 26 %
-------------------------------------	--------------------	----------------------	--------------	------------	----------------------

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)				

74

Vorgehensweise

Iterative Ermittlung des erforderlichen Lüftungsprofil zur Schimmelpilzvermeidung



75
© Fraunhofer

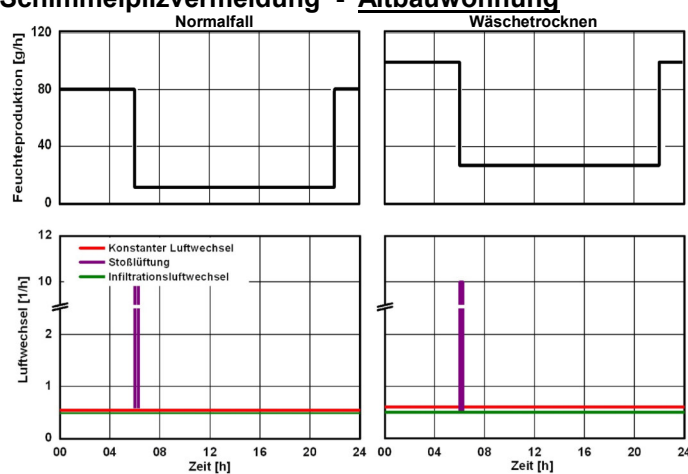
75

Fraunhofer
IBP

75

Ergebnisse

Iterative Ermittlung des erforderlichen Lüftungsprofil zur Schimmelpilzvermeidung - Altbauwohnung



76
© Fraunhofer

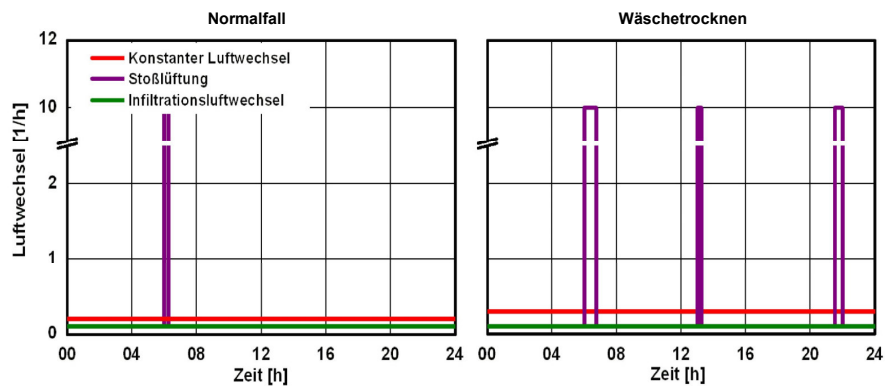
76

Fraunhofer
IBP

76

Ergebnisse

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



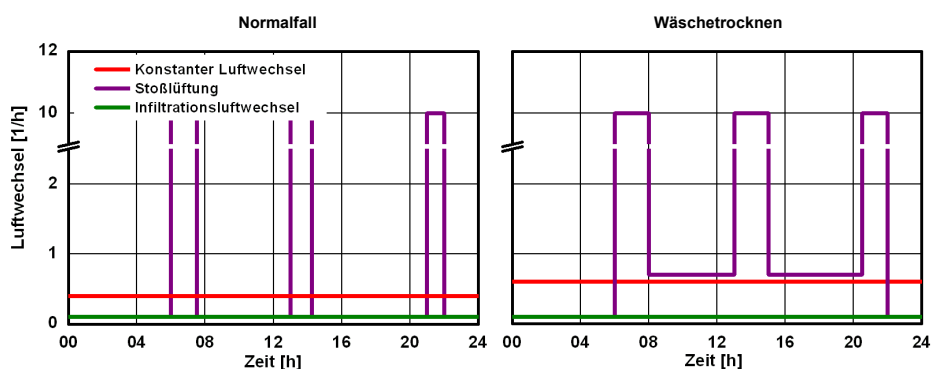
77
© Fraunhofer

77
Fraunhofer
IBP

77

Ergebnisse

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



78
© Fraunhofer

78
Fraunhofer
IBP

78

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).