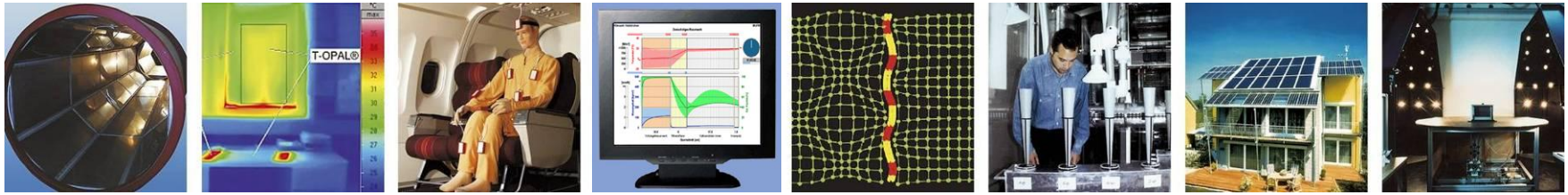


WUFI®

Leitfaden zur Auswertung und Beurteilung hygrothermischer Rechenergebnisse

Stand: Oktober 2026

Fraunhofer IBP

Inhalt

Allgemeines Vorgehen bei der Ergebnisauswertung

- Numerische Qualitätsprüfung..... Folie 3
- Auswerteprinzip von „grob nach fein“..... Folie 11

Werkzeuge zur Ergebnisauswertung

- Schnellgrafiken..... Folie 12
- WUFI® Animation..... Folie 17
- WUFI® Graph..... Folie 20
- ASCII-Export..... Folie 22
- Postprozessoren..... Folie 25

Bewertungskriterien..... Folie 30

- Feuchtebilanz anhand Gesamtwassergehalt..... Folie 31
- Feuchtegrenzwerte: Holzfeuchte..... Folie 33
- Feuchtegrenzwerte: Naturfaserdämmstoffe..... Folie 39
- Feuchtegrenzwerte: Zellulosefaserdämmung..... Folie 40
- Feuchtegrenzwerte: Wärmeleitfähigkeit..... Folie 41
- Feuchtegrenzwerte: Tauwasser-Ablaufrisiko..... Folie 42
- Feuchtegrenzwerte: Schimmelpilzwachstum..... Folie 43
- Feuchtegrenzwerte: Frostgefahr..... Folie 44
- Feuchtegrenzwerte: Korrosionsrisiko..... Folie 48
- Weitere Bewertungskriterien..... Folie 49
- Zusammenfassung..... Folie 50

Bewertung typischer Konstruktionen..... Folie 53

Literatur..... Folie 55

Allgemeines Vorgehen: Numerische Qualitätsprüfung

Dialog: Rechenlauf

Dieser Dialog zeigt eine kurze tabellarische ***Zusammenfassung der Rechenergebnisse***. Er wird während der Rechnung angezeigt und kontinuierlich aktualisiert. Nach der Berechnung sollte mit Hilfe der angezeigten Informationen die ***numerische Qualität der Simulation überprüft*** werden.

Rechenverlauf

Datum/Zeit der Rechnung	08.10.2025, 12:35
Beginn / Ende der Rechnung	01.10.2025 / 01.10.2030
Rechenzeit	0:00:47.835
Akt. Datum/Zeit	01.10.2030, 00:00

Numerische Qualitätsprüfung

Anzahl der Konvergenzfehler		**170**	
Integral der Diffusionsströme (links/rechts)	[kg/m²]	-3,529	-2,525
Integral der Kapillarströme (links/rechts)	[kg/m²]	0,000	-1,8E-8
Bilanz (Masse vs. Integral der Ströme)	**[kg/m²]**	**-0,304**	**-0,307**

Wichtig:
Nach der Simulation ist immer zuerst die numerische Qualität des Ergebnisses anhand von Konvergenzfehlern / Bilanzen zu prüfen!

Allgemeines Vorgehen: Konvergenz

Anzahl der Konvergenzfehler:

Eine ***hohe Zahl an Konvergenzfehlern*** weist auf eine schwierige Lösung der Gleichungen hin und ist meist mit ***hohen Feuchtegehalten oder großen transportierten Feuchtemengen*** verbunden.

Die Ursache dafür können ein ***hoher Feuchteeintrag*** oder eine ***schwierige Trocknung*** sein, also z.B. ein schlechter Regenschutz oder zu dampfdichte Schichten innerhalb des Aufbaus!

Empfehlung:
Oft ist es sinnvoller, den Bauteilaufbau günstiger zu gestalten, anstatt zu versuchen, die Qualität der Simulation des ungünstigen Bauteils zu verbessern!!

Allgemeines Vorgehen: Konvergenz

Beschreibung der Konvergenzfehler:

WUFI® benutzt ein ***iteratives Verfahren zur Lösung der Transport-gleichungen***. Manchmal erfolgt die Konvergenz nur sehr langsam und WUFI® erreicht die maximal erlaubte Anzahl an Iterationsschritten, ohne dass die Zwischenlösungen das Abbruchkriterium erfüllen.

In diesem Fall wird die Iteration abgebrochen und das bis dahin erreichte Ergebnis mit etwas weniger strengen Kriterien verglichen. Wenn diese erfüllt sind, akzeptiert WUFI® das Ergebnis und fährt mit dem nächsten Zeitschritt fort. Wenn die ***Kriterien nicht erfüllt*** sind, akzeptiert WUFI® das Ergebnis trotzdem und führt auch die Rechnung fort, erhöht aber den Zähler für die ***Konvergenzfehler*** um eins.

Die ***Gesamtzahl an Konvergenzfehlern*** ist ein ***erster Hinweis bezüglich der Zuverlässigkeit der Ergebnisse***. Der Umstand, dass ein Konvergenzfehler registriert wurde, sagt jedoch nichts darüber aus, wie groß der Restfehler bei Abbruch der Iteration war.

Allgemeines Vorgehen: Konvergenz

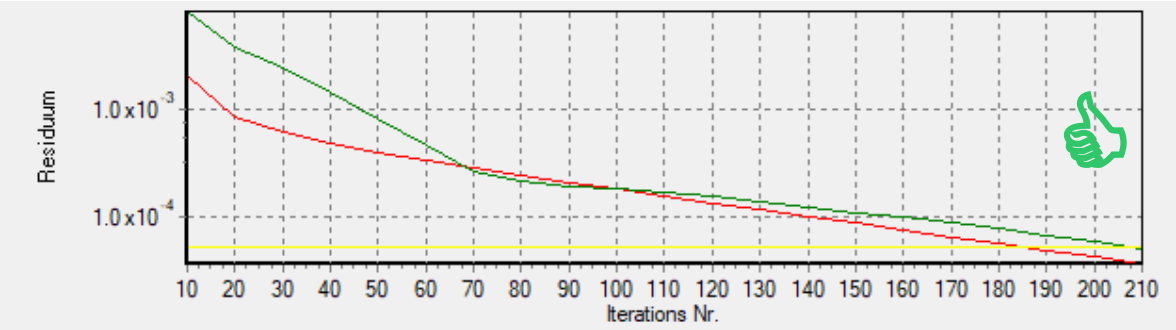
Bewertung der Konvergenzfehler:

Es ist möglich, dass die ***Abbruchkriterien*** nur ***knapp verfehlt*** wurden und der ***Konvergenzfehler*** daher ***belanglos*** ist; dies ist meistens der Fall.

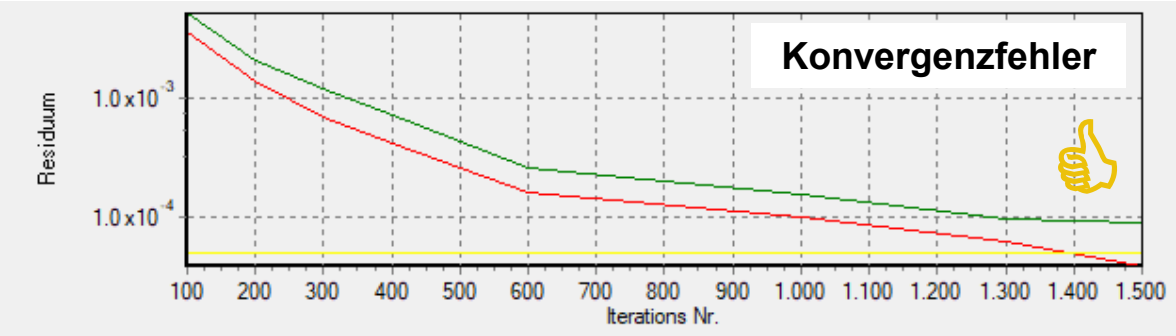
Es ist aber gelegentlich auch möglich, dass sich eine ***numerische Instabilität*** entwickelt hat und die ***Iterationsschritte*** sich immer ***weiter von der tatsächlichen Lösung entfernen***. Oft macht sich dies dadurch bemerkbar, dass mitten im Bauteil Wasser erscheint oder verschwindet, ohne dass die Randbedingungen dies veranlasst hätten. Das Ergebnis sind unmotivierte Sprünge in den Wassergehaltsverläufen und eine schlechte Wasserbilanz.

Wichtig:
Konvergenzfehler können nur zusammen mit den Bilanzen beurteilt werden!

Allgemeines Vorgehen: Konvergenz (Darstellung aus WUFI® 2D)

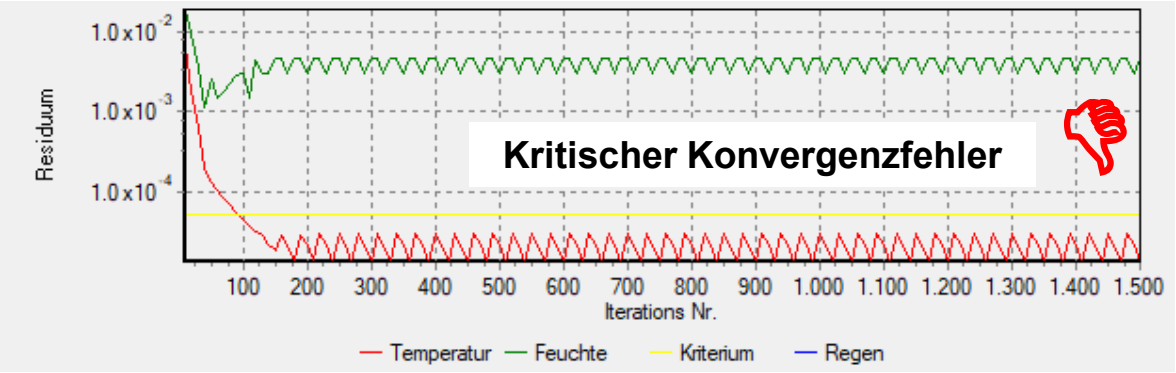


Temperatur und relative Feuchte erreichen Konvergenzkriterium



Abbruch nach maximaler Anzahl Iterationen

⇨ Geringer Bilanzunterschied, Genauigkeit fast erreicht



Feuchte divergiert, Abbruch nach maximaler Anzahl Iterationen

⇨ Deutlicher Bilanzunterschied

Allgemeines Vorgehen: Bilanzen

Bewertung der Bilanzen:

Bilanz 1 (links): ***Änderung des Gesamtwassergehalts*** in kg/m² über den gesamten Berechnungszeitraum
(negativ: Trocknung, positiv: Feuchtezunahme)

Bilanz 2 (rechts): Summe aller ***Feuchteströme über Bauteiloberflächen und Quellen***

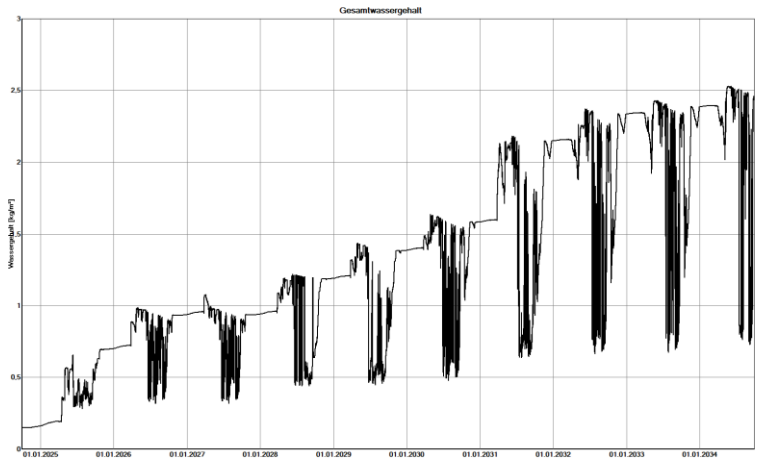
Bilanzunterschied: Durch numerische Fehler oder Ungenauigkeiten ist Feuchte im Bauteil „entstanden“ oder „verschwunden“
(i.d.R.: längerer Zeitraum → größerer Bilanzfehler)

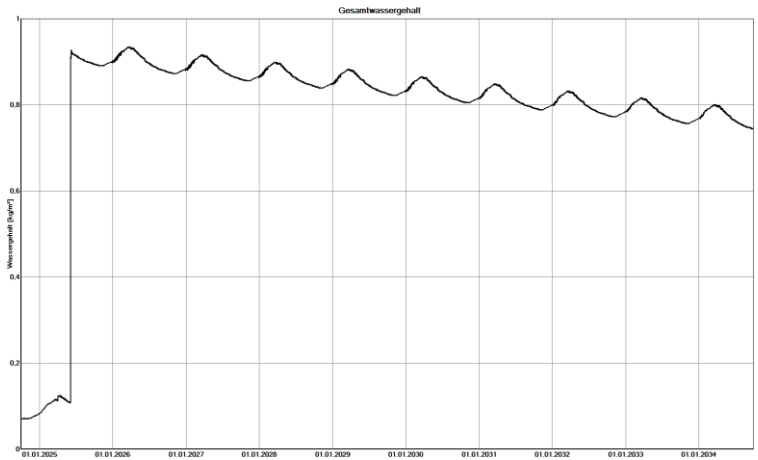
OK: geringe absolute Bilanzunterschiede oder gering im Verhältnis zur gesamten Wasseraufnahme/-abgabe
Allgemein akzeptable Rundungsgenauigkeit: etwa ± 10 - 20 g/Jahr

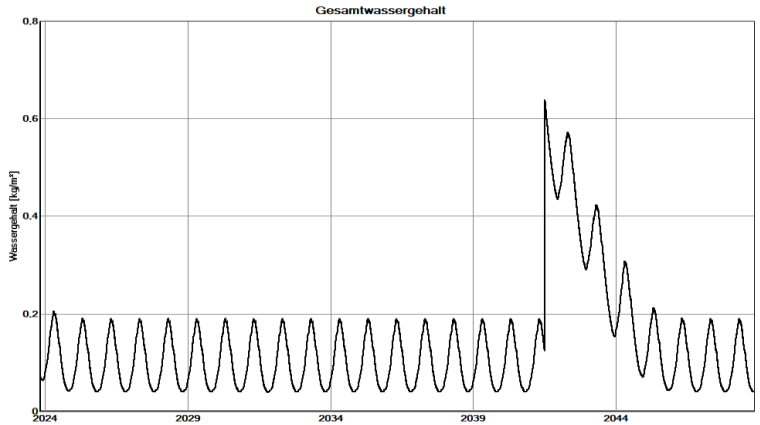
Nicht akzeptabel: deutliche relative und absolute Bilanzunterschiede

Allgemeines Vorgehen: Bilanzen

<u>Größere Bilanzunterschiede erkannt man zum Teil auch am Gesamt-wassergehaltsverlauf!</u>







Beispiele für nicht gleichmäßigen, periodischen Verlauf des Gesamtwassergehalts

⇨ Mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht sinnvoll bewertbar!

Allgemeines Vorgehen: Bilanzen

Was tun bei Bilanzunterschieden (und Konvergenzfehlern)**?**

Feineres Gitter wählen:

Im Normalfall ist die Verwendung des automatisch erzeugten Gitters ausreichend. In ***Ausnahmefällen*** kann jedoch eine ***noch feinere Gitterstruktur erforderlich*** werden.

Hierzu können Sie "Benutzerdefiniert" auswählen und die gewünschte Anzahl von Gitterelementen eingeben, die dann vom automatischen Gittergenerator über das Bauteil verteilt wird.

Adaptive Zeitschrittsteuerung einschalten:

Wenn die adaptive Zeitschrittsteuerung aktiviert ist, schaltet WUFI® automatisch auf ***kürzere Zeitschrittweiten*** um, sobald numerische Probleme festgestellt werden. Der problematische Rechenschritt wird mit feineren Zeitschritten wiederholt; bei Bedarf werden auch diese Zeitschritte weiter unterteilt. ***In vielen Fällen*** kann eine ***Rechnung***, welche zahlreiche Konvergenzfehler oder eine schlechte numerische Bilanz produziert, ***verbessert werden***.

Allgemeines Vorgehen: Auswerteprinzip von „grob nach fein“:

Gesamt-wassergehalt → einge-schwungen/ fällt → **Wassergehalt in einzelnen Schichten** + **Kritische Positionen**

Gesamt-wassergehalt ↓ steigt

1. Länger rechnen
2. Mit höherem Anfangs-wassergehalt starten
3. Bei langfristigem Anstieg: KO-Kriterium Feuchte-akkumulation

Wassergehalt in einzelnen Schichten

- Kritische Feuchtegehalte überschritten? (z.B. Holzfäule, Frost, Transmissionswärme, etc.)
- Steigt auch über viele Jahre → Akkumulation durch Umverteilung

Kritische Positionen

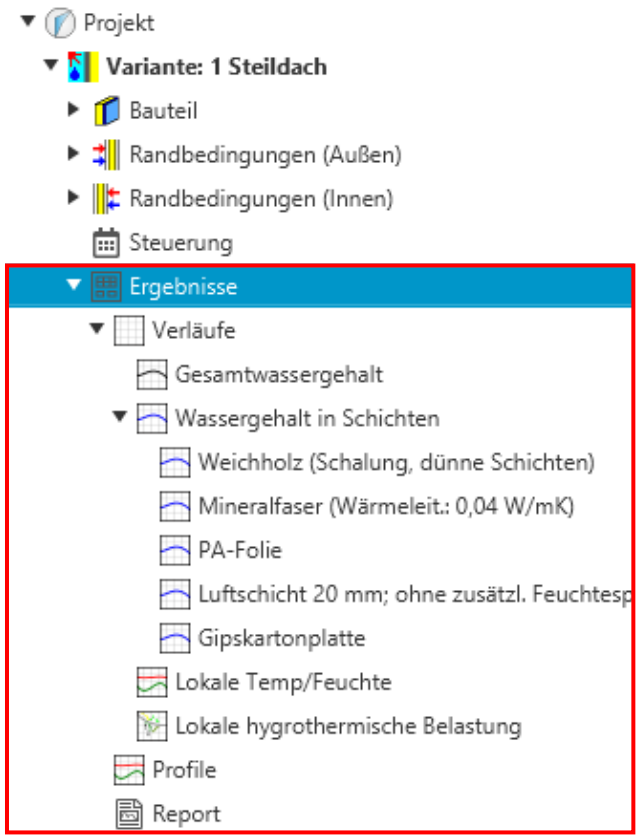
- Tauwasser (Menge?)
- Schimmelrisiko (Oberfläche, Hohlräume)
- Holzfäule
- Frostgefahr
- Korrosion
- etc.

Werkzeuge zur Ergebnisauswertung – Schnellgrafiken

Schneller Überblick über Berechnungsergebnisse:

Dargestellt in der Reihenfolge der Bewertung:

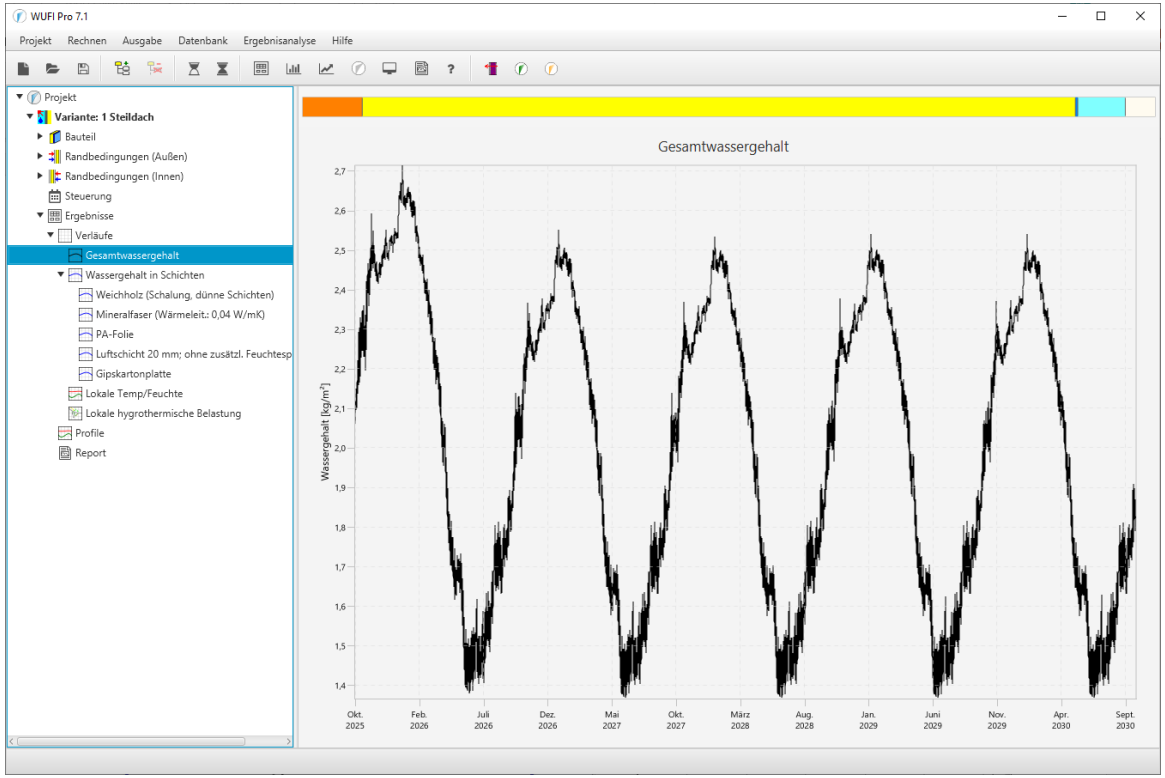
- Gesamtwassergehalt
- Wassergehalt in den einzelnen Materialschichten
- Lokale Temperatur und relative Feuchte
- Lokale hygrothermische Belastung



Werkzeuge zur Ergebnisauswertung – Schnellgrafiken

Gesamtwassergehalt in [kg/m²]

- Wassergehalt eines Bauteils pro m² Bauteilfläche (dickere Konstruktionen enthalten also tendenziell mehr Feuchte als dünne Aufbauten)



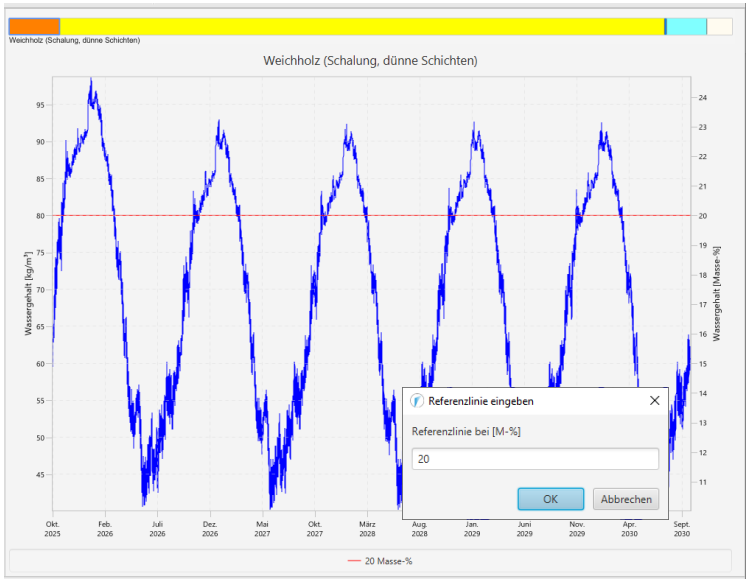
In der Regel nur qualitative Beurteilung der Feuchtebilanz!

Werkzeuge zur Ergebnisauswertung – Schnellgrafiken

Wassergehalt in Schicht in [kg/m³] oder [M.-%]

- Qualitative Bewertung der Feuchtebilanz einzelner Materialien / Schichten
- Quantitative Beurteilung des erreichten Feuchteniveaus
- Dicke Schichten ggf. an den Grenzen unterteilen

- Bewertung z.B. bezüglich:
  - Holzfäule (18 M.-% bei Holzwerkstoffen und 20 M.-% bei Vollholz)
  - Frost
  - Transmissions-wärmeverluste etc.



Nach DIN 4108-3 [1] und WTA 6-8 [2] sind nicht nur die ganzen Schichten, sondern auch die jeweils 1 cm dicken Bereiche auf der kritischen Seite auszuwerten.

Werkzeuge zur Ergebnisauswertung – Schnellgrafiken

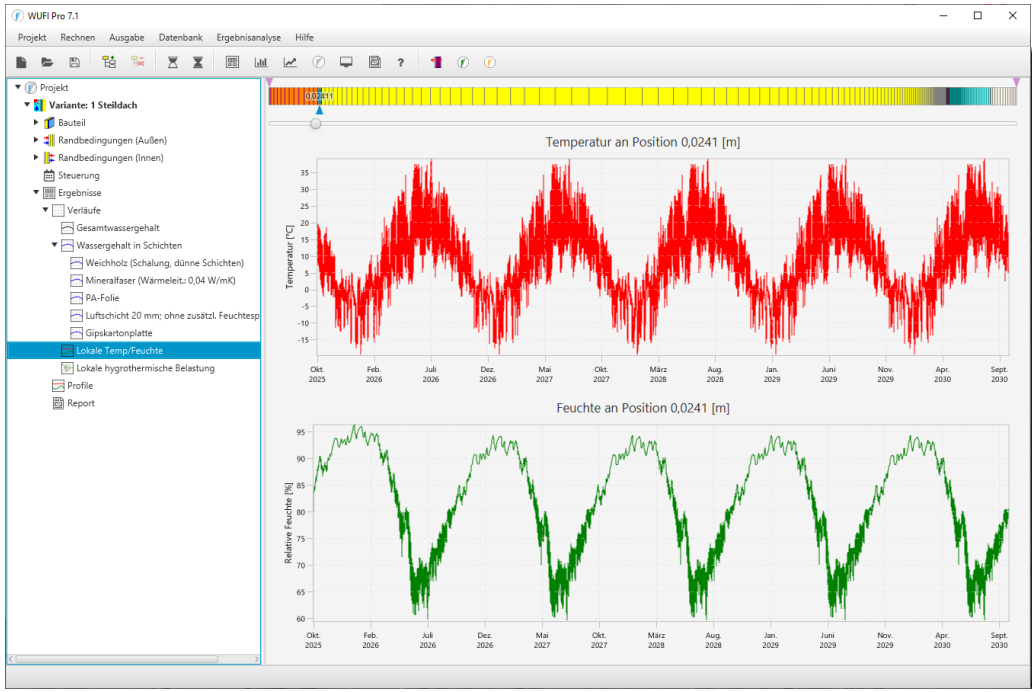
Lokale Temperatur und relative Feuchte

- Qualitative Bewertung des Feuchteverlaufs
- Quantitative Beurteilung des erreichten Feuchteniveaus

Bewertung z.B. bezüglich:

- Tauwasseranfall (100 % r.F.)
- Schimmelpilzwachstum
- Frostgefahr
- Korrosionsrisiko
- etc.

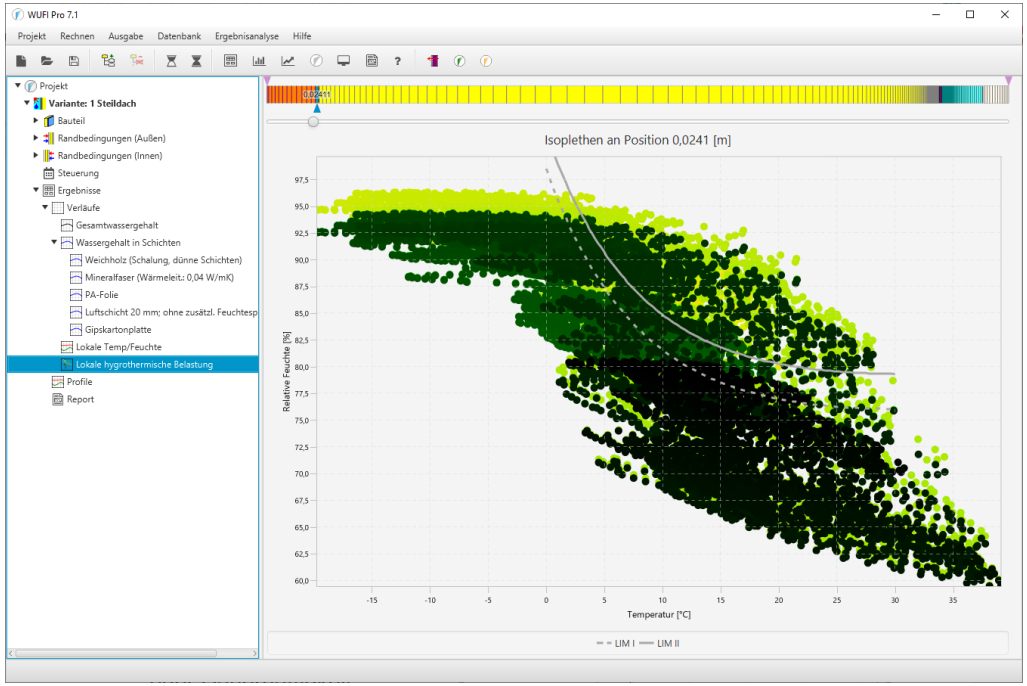
Verschiedene Positionen über den Slider oder mit linken Mausklick auswählen. Monitorpositionen mit rechtem Mausklick setzen.



Werkzeuge zur Ergebnisauswertung – Schnellgrafiken

Lokale hygrothermische Belastung

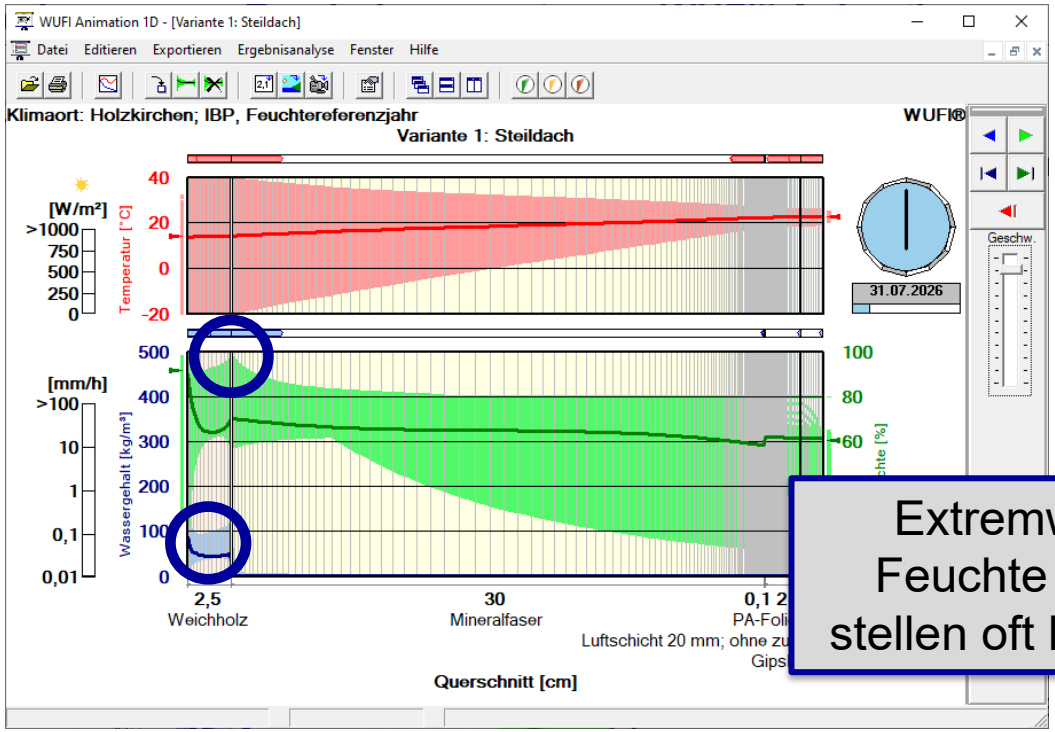
- Darstellung der auftretenden Kombinationen aus Temperatur und relativer Feuchte
- Qualitativer Farbverlauf der Punkte von gelb (Berechnungsstart) nach schwarz (Berechnungsende)
- Überschreiten der LIM-Kurven an der Innenoberfläche: Schimmelpilzwachstums-risiko möglich - Prüfung mit WUFI® Bio sinnvoll
- Ggf. kritische Grenzen bezüglich Entfestigung oder Dauerhaftigkeit



Werkzeuge zur Ergebnisauswertung – WUFI® Animation

Darstellung der berechneten Profile als Film:

- zeitliche Abfolge der stündlich berechneten Profile für Temperatur, relative Feuchte und Wassergehalt als Film
- anschauliche Darstellung der Transport- und Speichervorgänge
- schnelles Identifizieren kritischer Positionen



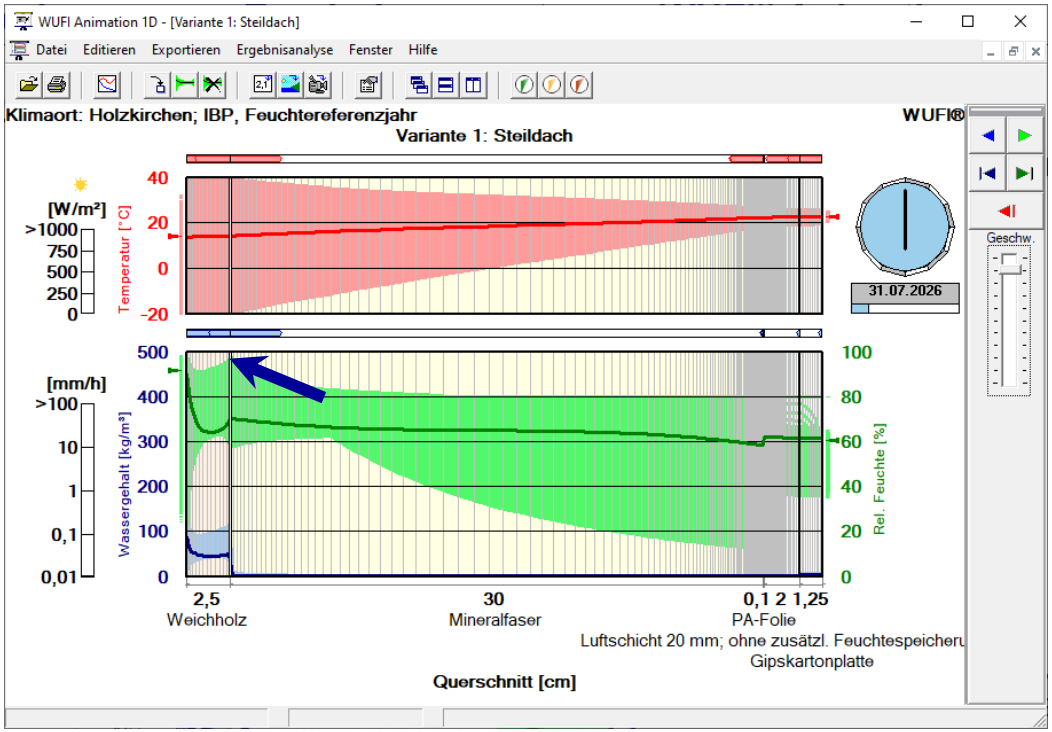
Extremwerte in der relativen Feuchte und im Wassergehalt stellen oft kritische Positionen dar.

Werkzeuge zur Ergebnisauswertung – WUFI® Animation

Nachträgliche Extraktion einer Monitorposition:

- Darstellung des Verlaufs von Temperatur, relativer Feuchte und Wassergehalt für jedes Gitterelement möglich.

- Vorgehen:
  1. Film anhalten
  2. Rechte Maustaste → „Verlauf erstellen“
  3. gewünschtes Gitter-element auswählen



Hinweis:
Funktioniert nicht am Ende des Films – ggf. einen Zeitschritt zurückspringen!

Werkzeuge zur Ergebnisauswertung – WUFI® Animation

Nachträgliche Monitorposition:

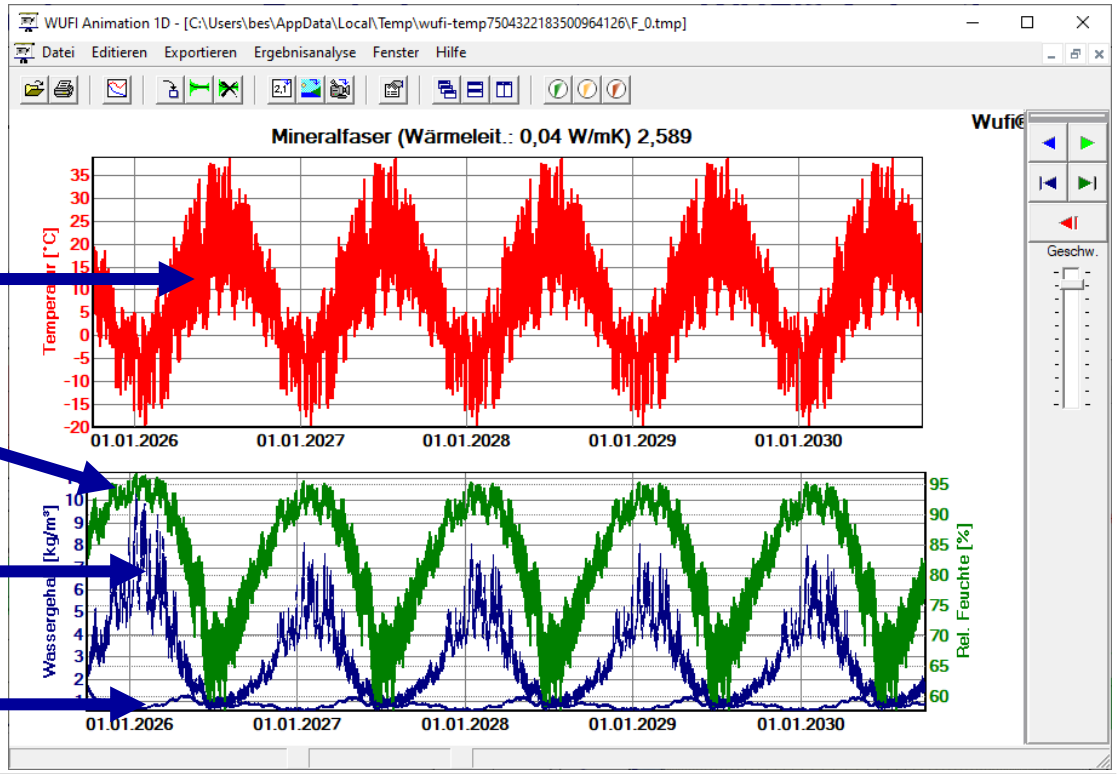
- Darstellung des Verlaufs von Temperatur, relativer Feuchte und Wassergehalt im gewählten Gitterelement

Temperatur

Relative Feuchte

Wassergehalt im Gitterelement (gestrichelt)

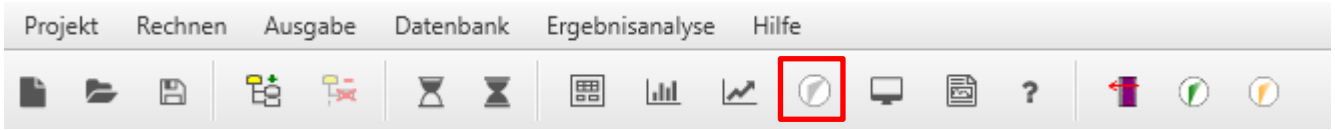
Wassergehalt in der gesamten Schicht



Werkzeuge zur Ergebnisauswertung – WUFI® Graph

Öffnen von WUFI® Graph:

- Auswertetool ab Version WUFI® Pro 6
- WUFI® Pro Projektdatei speichern
- Menü: „Ergebnisanalyse“ → „WUFI® Graph“
  oder
  WUFI® Graph - Button



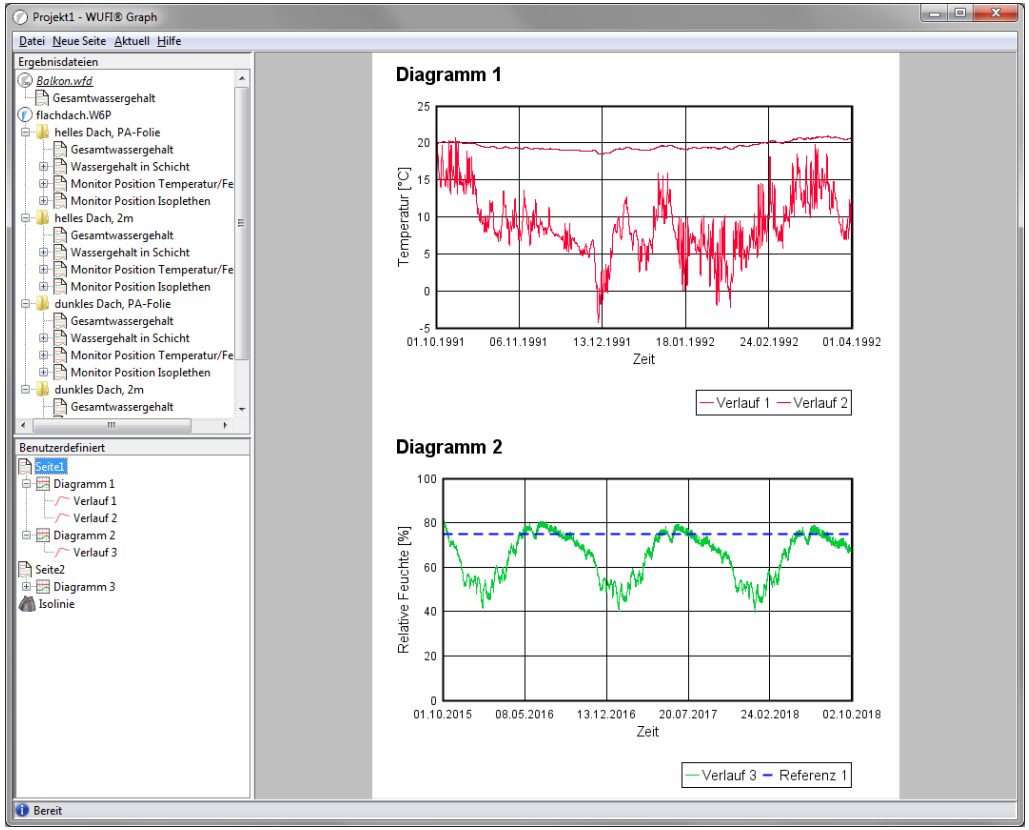
- Alle in der Projektdatei abgespeicherten und berechneten Varianten werden in WUFI® Graph geöffnet.

Werkzeuge zur Ergebnisauswertung – WUFI® Graph

Möglichkeiten der Auswertung in WUFI® Graph:

- Im Bereich „Ergebnisdateien“ werden die Schnellgrafiken aus WUFI® Pro als vordefinierte Diagramme dargestellt.

- Im Bereich „Benutzerdefiniert“ können eigene Seiten mit Ergebnisgrafiken zusammen-gestellt werden:
  - Temperatur
  - Relative Feuchte
  - Wassergehalt
  - Isoplethen
  - Mittlere Flussdichte
  - Fluss
  - WTA 6-8 (Holzfeuchteauswertung)

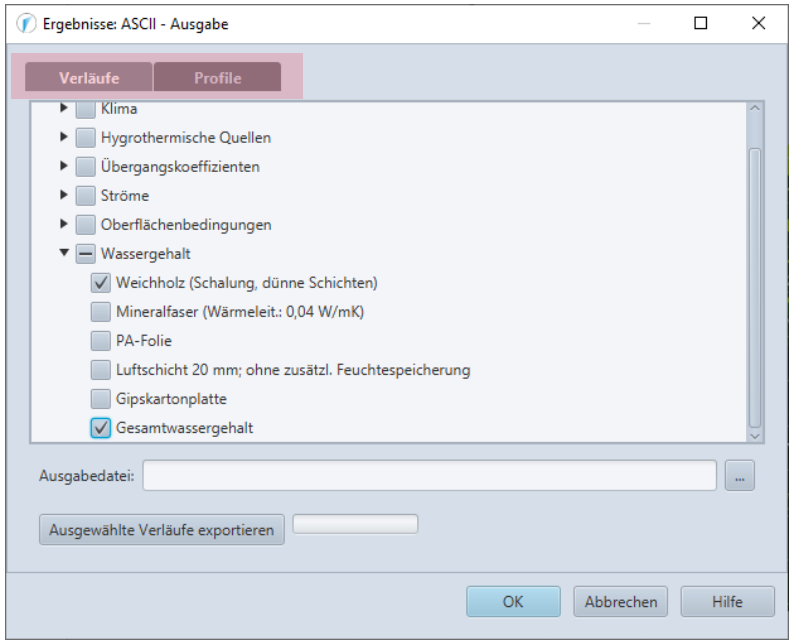


Werkzeuge zur Ergebnisauswertung – ASCII-Export

Ausgabe der Rechenergebnisse:

- Menü: „Ausgabe“ → „ASCII-Ausgabe“
- Ausgabe der Rechenergebnisse als ASCII-Datei zur weiteren Verarbeitung z.B. in Excel…

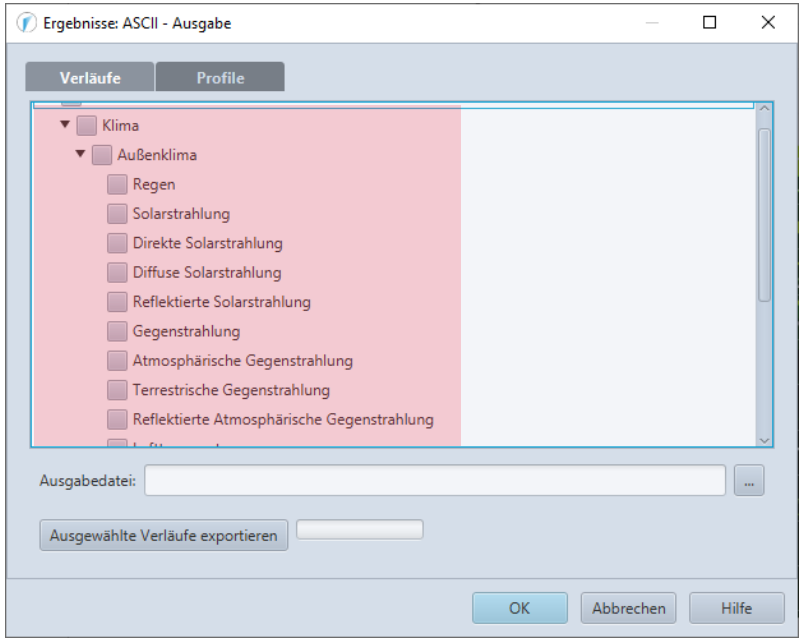
- Verläufe über der Zeit in Stunden (erste Spalte)
- Profile über dem Abstand des jeweiligen Gitterelements in Millimetern vom linken Rand der Konstruktion (erste Spalte)
- Ergebniselemente in gleicher Reihenfolge wie in der Auswahlliste



Werkzeuge zur Ergebnisauswertung – ASCII-Export

Ausgabe von Randbedingungen:

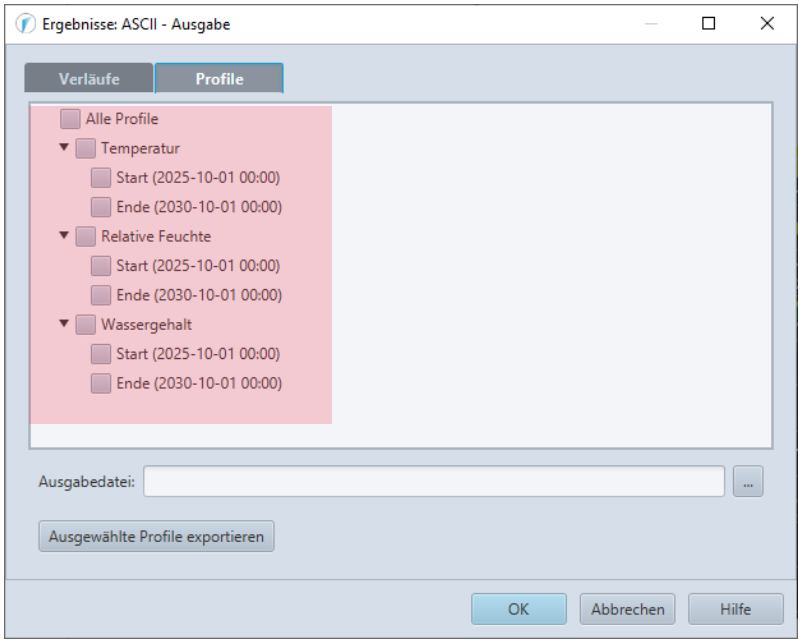
- Ausgabe von ***Randbedingungen***:
  - grundsätzlich ***möglich*** (z.B. solare Einstrahlung auf die Bauteiloberfläche, Außenlufttemperatur usw.)
  - ***blockiert*** (Elemente sind ausgegraut), wenn zur Berechnung eine Klimadatei verwendet wurde, die aus Lizenzgründen nur zur Verwendung mit WUFI® vorgesehen ist



Werkzeuge zur Ergebnisauswertung – ASCII-Export

Ausgabe von Profilen:

- ***Temperatur-*** und/oder ***Wassergehaltsprofil*** eines Rechenschritts kann als Anfangstemperatur- und/oder Anfangswassergehaltsprofil für eine weitere Berechnung verwendet werden.



Werkzeuge zur Ergebnisauswertung – Postprozessoren

Was sind Postprozess-Module?

- WUFI® berechnet die hygrothermischen Zustände im Bauteil, bewertet sie jedoch nicht.

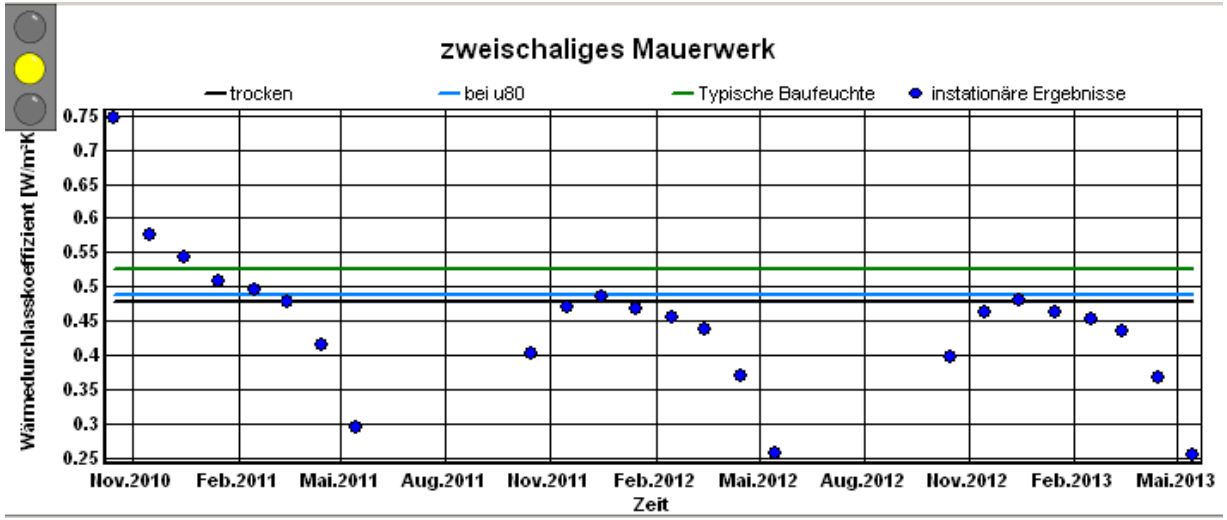
- Postprozess-Module sind Programme, an die WUFI® die Ergebnisse der hygrothermischen Berechnung zur weiteren Auswertung übergeben kann.

- Die Module werden zusätzlich installiert oder können auch von Dritten selbst programmiert und zur Verfügung gestellt werden.

- Verfügbare Postprozessoren:
  - Wärmedurchgang (U-Wert-Tool)
  - WUFI® Bio
  - WUFI® FinMould
  - WUFI® Corr

  WUFI® Zusatzprogramme | WUFI (de)

Wärmedurchgang – Auswertemöglichkeiten



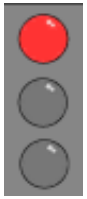
- Erlaubt die ***instationäre Beurteilung des Wärmedurchgangs*** unter Berücksichtigung der Einflüsse von Feuchte, Strahlung, Latentwärme etc.
- Bei hohen Strahlungsgewinnen kann unter Umständen der ***instationäre U-Wert*** auch ***negativ*** werden, wenn trotz niedriger Außenlufttemperatur die Außenoberfläche wärmer wird als die Raumlufttemperatur.
- Die ***Auswertung*** ist ***nur in der Heizperiode sinnvoll***.

Wärmedurchgang – Bewertung mit Ampelsystem

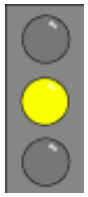
Die Ampel-Grenzwerte für U_1 und U_2 basieren auf dem aktuellen und alten hygienischen Mindestwärmeschutz geregelt in der DIN 4108-2 [3]

- $U_1 \leq 0{,}73$ W/m²K bzw. $R_1 \geq 1{,}2$ m²K/W → Schimmelfreiheit (Fassung 2003)
- $U_2 \leq 1{,}39$ W/m²K bzw. $R_2 \geq 0{,}55$ m²K/W → Tauwasserfreiheit (Fassung 1981)

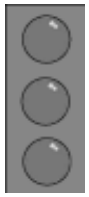
Der U-Wert aller bewerteten Monate liegt unter U_1.



Der U-Wert mindestens eines bewerteten Monats liegt über U_2.



Der U-Wert aller bewerteten Monate liegt unter U_2, aber mindestens einer über U_1.



Bewertungszeitraum ist kürzer als ein Jahr.

Werte für andere klimatische Verhältnisse nur bedingt sinnvoll!!
U-Werte können in ini-Datei angepasst werden

Werkzeuge zur Ergebnisauswertung – Postprozessoren

WUFI® Bio

- Für die Beurteilung von Schimmelpilzwachstum unter instationären hygrothermischen Randbedingungen.
- Dabei wird der Feuchtehaushalt der Schimmelpilzsporen modelliert und mit dem kritischen Wassergehalt verglichen, ab dem es zur Sporenkeimung kommt.
- Falls Auskeimung stattfindet, kann durch Vergleich mit Wachstumskurven auch die nachfolgende Stärke des Befalls abgeschätzt werden.

Detailliertere Informationen hierzu können dem
Leitfaden zur Bewertung des Schimmelpilzrisikos mit WUFI®
entnommen werden!

Werkzeuge zur Ergebnisauswertung – Postprozessoren

WUFI® Corr

- Ermöglicht die Vorhersage des Korrosionsrisikos von Bauteilen aus Metall in mineralischen Baustoffen.
- Dabei werden die Temperatur- und Feuchteverhältnisse an der Metalloberfläche sowie das chemische Milieu der Umgebungsmaterialien berücksichtigt.
- Es erlaubt die Bewertung von präventiven Restaurierungsmaßnahmen, die Sanierung von denkmalgeschützten Gebäuden sowie auch eine sichere und dauerhafte Planung von neuen Bauteilen.

Detailliertere Informationen hierzu können dem
Leitfaden zur Bewertung des Korrosionsrisikos mit WUFI®
entnommen werden!

Bewertungskriterien

Allgemein:

- Ergebnis einer hygrothermischen Simulation sind die zeitlichen Verläufe der Temperatur- und Feuchte bzw. die Wassergehalts- und Temperaturverläufe in den verschiedenen Materialschichten.
- Die Ergebnisse können einzeln ausgewertet und in Abhängigkeit von den eingesetzten Materialien beurteilt werden.
- ***Bewertungskriterien***:
  1. Feuchtebilanz anhand des Gesamtwassergehalts
  2. Feuchtegrenzwerte (Schichten, Positionen)
     - Holzfeuchte
     - Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit
     - Tauwasser in Faserdämmstoffen
     - Schimmelpilzwachstum
     - Frostgefahr
     - Korrosionsrisiko

Bewertungskriterien – Feuchtebilanz anhand Gesamtwassergehalt

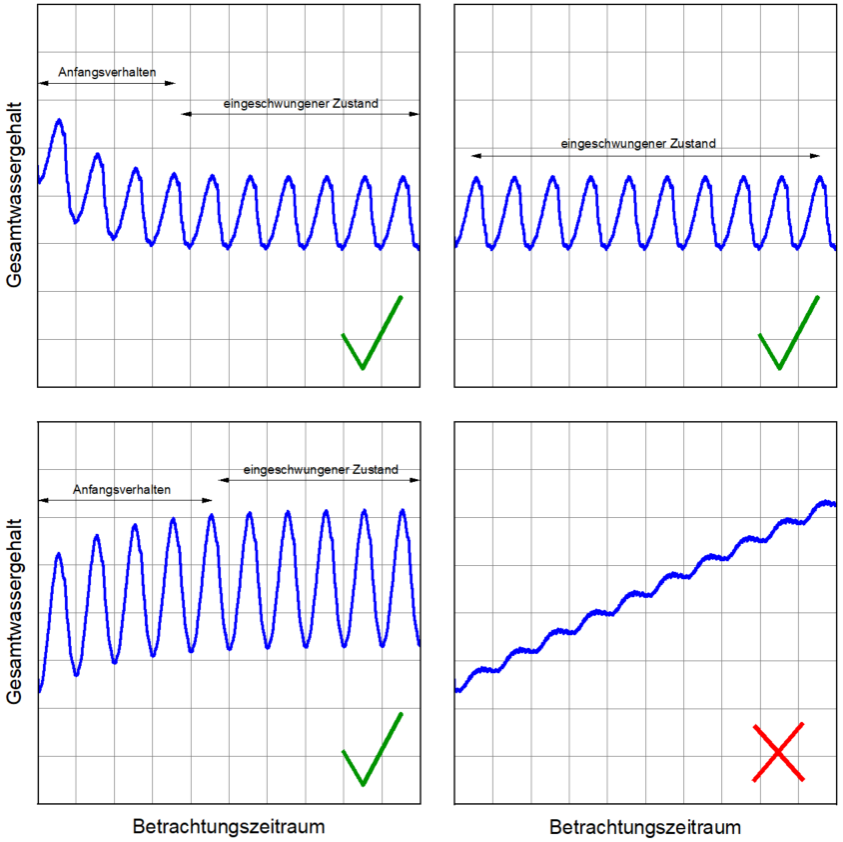
Hygrothermisches Verhalten einer Konstruktion:

- In der Konstruktion darf sich ***langfristig keine*** zu ***große Feuchtemenge anreichern***.
- Anfängliche Zu- oder Abnahme der Wassergehalte ist normal, falls der vorgegebene Anfangswassergehalt über oder unter den Wassergehalten des resultierenden eingeschwungenen Zustands liegt.
- Nach DIN 4108-3 [1] gilt der Wassergehalt als eingeschwungen, wenn die Veränderung im Gesamtwassergehalt und in den einzelnen Schichten < 1 % im Vergleich zum Vorjahr ist.
- ***Jahreszeitliche Schwankungen*** des Gesamtwassergehaltes sind in begrenztem Rahmen ebenfalls ***normal***.
- Jahreszeitliche Schwankungen der Wassergehalte in den einzelnen Schichten können durch die Schwankungen des Gesamtwassergehalts oder durch periodische Umverteilungen innerhalb des Bauteils verursacht werden.

Bewertungskriterien – Feuchtebilanz anhand Gesamtwassergehalt

Bewertung des Gesamtwassergehalts

- ***Absinken***: Bauteil trocknet aus
- ***keine Veränderung im Jahreszyklus***: eingeschwungener Zustand ist erreicht (dynamisches Gleichgewicht)
- ***kurzfristiger Anstieg***: Feuchteniveau im eingeschwungenen Zustand höher als die angenommene Anfangsfeuchte; häufig unproblematisch
- ***langfristiger Anstieg***: permanente Feuchteakkumulation in der Konstruktion (mehr Befeuchtung als Trocknung – nur bei geringen Mengen evtl. akzeptabel, wenn über Standzeit keine kritischen Feuchte-gehalte erreicht werden)



Bewertung der Feuchtebilanz nur erster Schritt, es müssen immer auch die Wassergehalte in den einzelnen Schichten überprüft werden!!!

Bewertungskriterien – Feuchtegrenzwerte: Holzfeuchte

Bekannte Grenzwerte:

- ***Grenzwerte nach DIN 68800 [4]*** zur Vermeidung von Holzfäule und Festigkeitsverlusten:
  - 20 M.-% für Holz
  - 18 M.-% für Holzwerkstoffe

  Die Grenzwerte beinhalten gewisse Sicherheiten – erst ab einer Fasersättigung oberhalb von etwa 25 bis 30 M.-% können die Pilze dem Holz so viel Feuchte entziehen, dass ein Abbau des Materials möglich wird.

- ***WTA-Merkblatt 6-8 [2] bzw. DIN 4108-3 [1]***:
  Beinhaltet eine stationäre Grenzkurve zur genaueren Beurteilung des Holzfäulerisikos in Massivholz in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte und der gleichzeitig auftretenden Temperatur.

Bewertungskriterien – Feuchtegrenzwerte: Holzfeuchte

Auswertung nach WTA-Merkblatt 6-8 [2] bzw. DIN 4108-3 [1]:

- Entsprechend dem WTA-Merkblatt 6-8 [2] erfolgt die Auswertung nach zwei Kriterien:

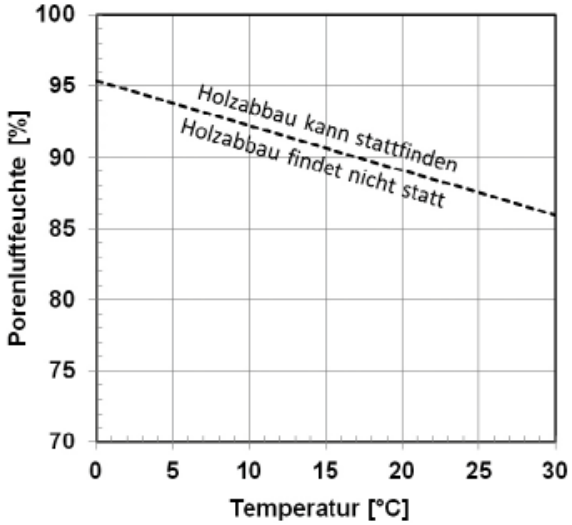
  1. Die ***Bewertung bezüglich holzzerstörender Pilze*** erfolgt bei Holz über die mittlere Porenluftfeuchte der maßgebenden kritischen 10 mm Schicht.

  2. Für die ***Beurteilung der konstruktiven Aspekte*** wird die mittlere Holzfeuchte der gesamten Materialschicht herangezogen.

Bewertungskriterien – Feuchtegrenzwerte: Holzfeuchte

Holzfäulerisiko nach WTA 6-8 [2] bzw. DIN 4108-3 [1]

- Die Bewertung des Holzfäulerisikos nach WTA 6-8 [2] gilt für Massivholzprodukte (z.B. Konstruktionsvollholz, verklebte oder verdübelte Vollholzprodukte, Vollholzschalung, Dreischichtplatten, Brettschichtholz, Massivholzplatten).
- Für Holzwerkstoffe und Holzfaserdämmungen kann auf den allgemeinen Grenzwert von 18 M.-% aus der DIN 68800 [4] zurückgegriffen werden. Alternativ kann der Hersteller gewährleisten, bis zu welchen Holzfeuchten sein Produkt eingesetzt werden darf.
- Die Porenluftfeuchte darf 95 % bei 0 °C und 86 % bei 30 °C im Tagesmittel in der kritischsten 10 mm dicken Teilschicht nicht überschreiten.

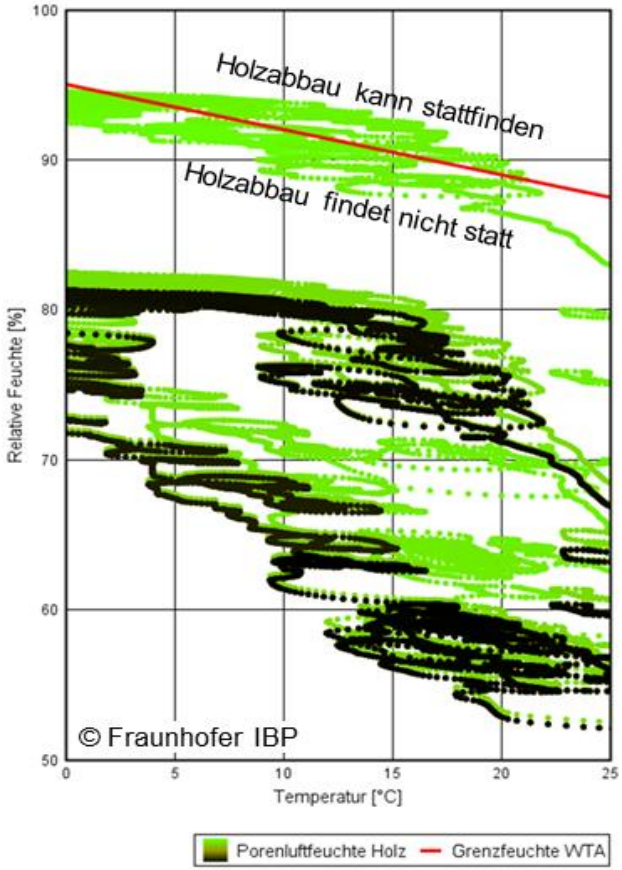


Diese Auswertung ist mit WUFI® Graph möglich.

Bewertungskriterien – Feuchtegrenzwerte: Holzfeuchte

Holzfäulerisiko nach WTA 6-8 [2] bzw. DIN 4108-3 [1]

- Direkte Auswertemöglichkeit mit WUFI® Graph



Bewertungskriterien – Feuchtegrenzwerte: Holzfeuchte

Tragfähigkeit (Festigkeit der Materialien)

- Holz und Holzwerkstoffe sind gemäß EN 1995-1-1 [5] in Nutzungsklassen eingestuft. Die Verwendbarkeit entsprechend dieser Klassen ist sicherzustellen.

- Im Allgemeinen dürfen bei tragenden Bauteilen zur Gewährleistung der deklarierten Eigenschaften folgende Grenzwerte nicht überschritten werden:

	Massivholz	Holzwerkstoff
Zulässige Feuchte (dauerhaft)	20 M.-%	18 M.-%
Zulässige Feuchte (während Austrocknung im 1. Jahr)	22 M.-%	20 M.-%

Tagesmittelwert der Holzfeuchte der ganzen Materialschicht!

Bewertungskriterien – Feuchtegrenzwerte: Holzfeuchte

Gebrauchstauglichkeit

- Verformungen der Gesamtkonstruktion z.B. durch jahreszeitlich bedingte Feuchteschwankungen oder eine ungleichmäßige Feuchteverteilung in Bauteilen.

- Die Verformungen müssen in angemessenen Grenzen bleiben. Verweis auf Grenzwerte in verschiedenen Normen wie z.B. EN 1995-1-1 [5].

Bewertungskriterien – Feuchtegrenzwerte: Naturfaserdämmstoffe

Aktueller Stand der Wissenschaft:

- Aus Forschungsprojekten der letzten Jahre [6], [7] ist bekannt, dass viele, aber nicht alle Faserdämmstoffe aus Holz und Naturfasern eine höhere Beständigkeit aufweisen als Massivholz.
- Falls dies nachgewiesen ist oder vom Hersteller bestätigt wird, können für das jeweilige Material ebenfalls die Grenzkurven nach WTA 6-8 [2] herangezogen werden.
- Ein Postprozessor zur instationären Bewertung des Fäulnisrisikos befindet sich derzeit in Erstellung und ermöglicht dann eine noch genauere Bewertung, die allerdings mit reduzierter Sicherheit und somit v.a. für Einzelfälle und weniger für die normale Planung sinnvoll ist.
- Zur Einstufung der Fäulnis-Beständigkeit konkreter Materialien ist eine Prüfung erforderlich.

Bewertungskriterien – Feuchtegrenzwerte: Zellulosedämmung

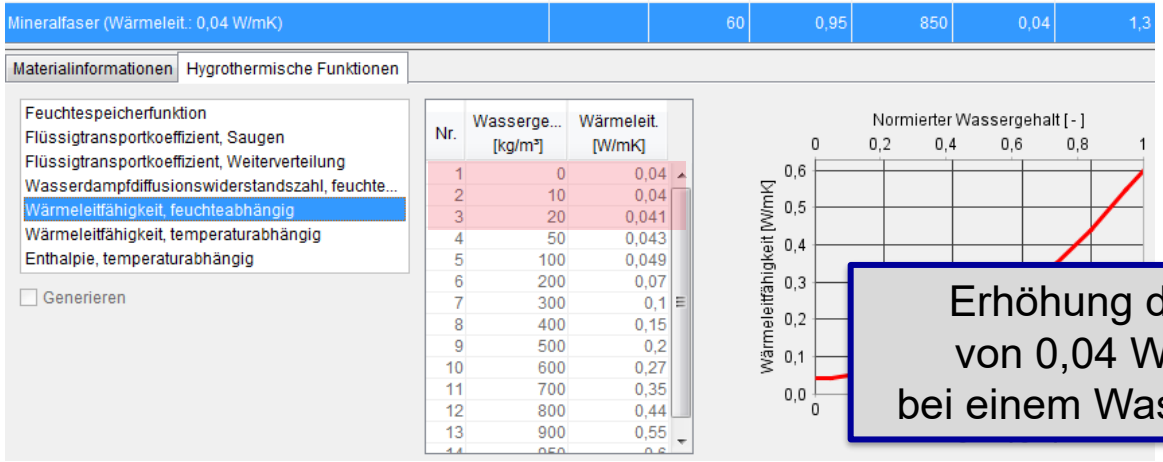
Bewertung von Zellulosedämmung:

- Die anzusetzende Einbaufeuchte hängt von der jeweiligen Fragestellung ab. Im Lieferzustand beträgt die Anfangsfeuchte von Zellulose in der Regel etwa 5 kg/m³.
  (Anfangsfeuchte ggf. in der Materialdatenbank als typische Einbaufeuchte hinterlegt)
- Die Auswertung erfolgt in Anlehnung an WTA-Merkblatt 6-8 im kritischen Zentimeter der Zellulosedämmung.
- Relative Feuchten bis 95 % r.F. können in der Regel im Winter an der Außenseite der Konstruktion allgemein toleriert werden. Alternativ kann die auf der sicheren Seite liegende Grenzkurve für Massivholz nach WTA herangezogen werden.
  Quelle: Untersuchungen zu Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen [10] zeigen, dass Zellulosedämmung relativen Luftfeuchten bis 95 % auch längerfristig ohne Schäden standhalten kann (geprüft wurde die Schimmelbeständigkeit bei 28 °C und ca. >95 % r.F. über 28 Tage – Zellulose wurde auf dieser Basis gem. IHD VA-20-24-1, DIN-EN 60068 und EN ISO 8463 als schimmelbeständig ohne Einschränkung eingestuft).
- Im Zweifelsfall sollten Sie sich die maximal zulässigen Feuchtegrenzwerte für das jeweilige Produkt vom Hersteller bestätigen lassen.

Bewertungskriterien – Feuchtegrenzwerte: Wärmeleitfähigkeit

Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit bei feuchteunempfindlichen Dämmstoffen:

- Über Diffusion aufgenommene Feuchte kann bei feuchteunempfindlichen Dämmstoffen (Hartschaumkunststoff oder Mineralfaser) zu einer Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit führen.
- Diese Abhängigkeit ist in den Materialdaten meist hinterlegt, so dass sinnvolle Maximalwerte daraus abgeleitet werden können.



Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit von 0,04 W/mK auf 0,041 W/mK bei einem Wassergehalt von 20 kg/m³.

Nicht vermeidbare Feuchteeinträge können ggf. durch größere Dämmstärken kompensiert werden, wenn die Feuchte keine sonstigen negativen Auswirkungen hat.

Bewertungskriterien – Feuchtegrenzwerte: Tauwasser-Ablaufrisiko

Bewertung des Tauwasser-Ablaufrisikos:

- Tauwasser in Bauteilen kann sich in diffusionsoffenen Materialien (Luft, Faserdämmung) an der Grenze zu wasser- und dampfdichten Materialien (z.B. Dachbahn, Dampfbremsen o.ä.) bilden.

- Werden die Mengen zu groß, kann das Tauwasser ablaufen und es kann zu Problemen in anderen Bereichen der Bauteile kommen – dies ist zu vermeiden!

Bewertung der Tauwassermenge entsprechend dem
Leitfaden zur Bewertung des Tauwasser-Ablaufrisikos!

Bewertungskriterien – Feuchtegrenzwerte: Schimmelpilzwachstum

Bewertung des Schimmelpilzrisikos:

- Schimmelpilzbildung auf der Innenoberfläche sowie in Hohlräumen an Materialgrenzen bei höheren Feuchteverhältnissen möglich.

- Bewertung der Innenoberfläche mit Hilfe der Grenzisoplethen, die die minimalen Wachstumsbedingungen darstellen.
  - Verhältnisse bleiben unterhalb der Kurvenwerte:
    Schimmelpilzwachstum ist nicht möglich
  - Verhältnisse überschreiten die Grenzkurven:
    Risiko hängt von Dauer und Grad der Überschreitung ab
    → genauere Bewertung mit WUFI® Bio möglich

Bewertung des Schimmelpilzrisikos entsprechend dem
Leitfaden zur Bewertung der Schimmelpilzrisikos mit WUFI®!

Bewertungskriterien – Feuchtegrenzwerte: Frostgefahr

Frostgefahr bei unterschiedlichen Materialien:

- ***Hohe Wassergehalte*** können wegen der Volumenausdehnung des gefrierenden Wassers ***bei einer größeren Anzahl von Frost-Tau-Wechseln*** zur Schwächung und ***Schädigung eines porösen Baumaterials*** führen.

- ***Frostbeständige Materialien*** wie Putze, Mauerwerk, Beton:
  - Wassergehalte bis zur freien Wassersättigung i.d.R. akzeptabel
  - Zu beachten: starke Durchfeuchtungen erhöhen das Risiko für Algen und Schimmel auf der Außenoberfläche

- ***Nicht frostbeständige Materialien***:
  - Diese dürfen während der Frostperiode bestimmte Grenzwassergehalte nicht überschreiten. Für die meisten Materialien sind allerdings bisher keine Grenzwerte bezüglich kritischer Kombinationen aus Wassergehalt und Temperatur bekannt.

Bewertungskriterien – Feuchtegrenzwerte: Frostgefahr

Beurteilung der Frostgefahr nach WTA 6-5 [8]:

- Kriterium nach WTA-Merkblatt 6-5 (Innendämmung) [8]:

  nicht frostbeständige Materialien sollten einen Durchfeuchtungsgrad von 30 % (d.h. 30 % des max. Wassergehalts w_{max}) nicht überschreiten. Höhere Durchfeuchtungsgrade sind zulässig, wenn die relative Feuchte der Porenluft unter 95 % bleibt.

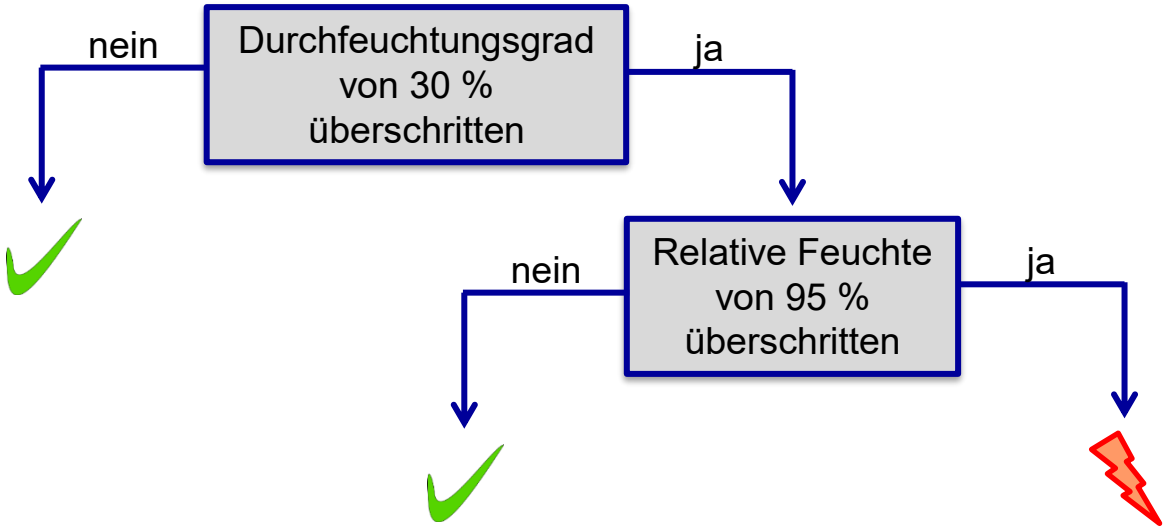
  → nach gegenwärtigem Kenntnisstand können damit auch bei frostempfindlichen Materialien Frostschäden ausgeschlossen werden.

- Bei ***Materialien mit einer hohen Porosität*** (z.B. Hochlochziegel) bezieht sich der Durchfeuchtungsgrad von 30 % auf den maximalen Wassergehalt im Ziegelscherben selbst – die Luftkammern dürfen bei der Porosität nicht berücksichtigt werden.

Bewertungskriterien – Feuchtegrenzwerte: Frostgefahr

Vorgehen bei der Beurteilung der Frostgefahr:

- Auswertung des Wassergehalts an der kritischsten Position des frostempfindlichen Materials.
- Kritische Position / Gitterelement über WUFI® Film ausfindig machen: Position mit hohem Feuchtegehalt und gleichzeitig Temperaturen unter dem Gefrierpunkt
- Im WUFI® Film: rechte Maustaste → Verlauf erstellen anschließend das kritische Gitterelement auswählen



Bewertungskriterien – Feuchtegrenzwerte: Frostgefahr

Praktische Regeln:

- In Bereichen mit hoher Feuchte und Frosteinwirkung frostbeständige Materialien einsetzen!

- Bei Innendämmungen und unbekannter Frostbeständigkeit der Bestandswand Regenschutz so weit verbessern, dass das Feuchteniveau durch zusätzliche Dämmung nicht oder nur minimal steigt.

Bewertungskriterien – Feuchtegrenzwerte: Korrosionsrisiko

Bewertung des Korrosionsrisikos:

- Korrosion von metallischen Bestandteilen, die in ein mineralisches Umgebungsmaterial eingebettet sind, bei hohen Feuchten (z.B. Bewehrungsstahl im Beton nach dessen Karbonatisierung).

- Quantifizierung des Korrosionsfortschritts in Abhängigkeit von Temperatur und relativer Luftfeuchte in verschiedenen mineralischen Baustoffen.

Bewertung des Korrosionsrisikos entsprechend dem
Leitfaden zur Bewertung des Korrosionsrisikos mit WUFI®!

Bewertungskriterien – Weitere Bewertungskriterien

Weitere mögliche Bewertungskriterien:

- Feuchtebedingte Entfestigung
- Chemisches Verhalten
- Hygrothermische Dauerhaftigkeit
- …

Da es sich um ausgeprägt materialspezifische Vorgänge handelt, ist eine Bewertung nur möglich, wenn seitens des Herstellers entsprechende Zusammenhänge oder Grenzwerte zur Verfügung gestellt werden können.

Bewertungskriterien – Zusammenfassung

Gesamtwassergehalt, Wassergehalt einzelner Materialschichten:

Eingeschwungen oder fallend,
i.d.R. nicht dauerhaft steigend (außer, wenn unproblematisch über Lebensdauer)

Schimmel an Innenoberflächen:

Stufe 1: < 80 % r.F.
Stufe 2: < materialtypabhängige LIM-Kurve
Stufe 3: instationäre Bewertung mit WUFI® Bio

Feuchtegehalt Holz, Holzwerkstoffe:

Stufe 1: < 20 M.-% (Holz massiv) bzw. 18 M.-% (Holzwerkstoffe), ganze Schicht
Stufe 2: Grenzkurve WTA-6-8 [2] (Holz massiv), kritische 10 mm
Stufe 3: instationäre Bewertung mit WUFI® Decay

Korrosion von eingebetteten metallischen Elementen:

Stufe 1: < 80 % r.F.
Stufe 2: Grenzkurve nach NaVe-Projekt [9] < 95 % r.F. bei > 0 °C bis < 80 % bei ≥ 40 °C
Stufe 3: instationäre Bewertung mit WUFI® Corr

Bewertungskriterien – Zusammenfassung

Kritische Feuchtegehalte bezüglich Wärmeleitfähigkeit:

Alle Baustoffe: U-Wert-Berechnungen beziehen sich i.d.R. auf einen Feuchtegehalt der Materialien bei 80 % r.F. Bei im Mittel höheren Werten z.B. in der Heizperiode ist ggf. eine Korrektur erforderlich – z.B. basierend auf einer Bewertung mit dem Postprozessor „Instationärer U-Wert“.

Feuchteunempfindliche Dämmstoffe: Feuchtegehalte bis etwa 2 Vol.-% bzw. 20 kg/m³ sind bei der Zulassung der Dämmstoffe in der Regel durch entspr. Zuschläge bereits berücksichtigt. Höhere Werte sind zu vermeiden oder entsprechend zu berücksichtigen.

Naturfaser- und feuchteempfindliche Dämmstoffe müssen dauerhaftigkeitsbedingt geringere Grenzwerte einhalten. Die Wärmeverluste sind hier i.d.R. nicht als Grenze maßgeblich.

Tauwasser an Innenoberflächen bzw. in hydrophoben Faserdämmstoffen:

Ohne Dämmstoff	hydrophobes, glattes Grenzschichtmaterial: < 50 g/m²
	hydrophiles oder hydrophobes fein strukturierte Grenzschichtmaterial < 100 g/m²
	grob strukturiertes Grenzschichtmaterial < 150 g/m²

Mit Faserdämmstoff an der Grenzschicht erhöhen sich die obigen Werte um jeweils um mind. 50 g/m².

Tauwasserbildung an Bauteiloberflächen:

Auf dichten Oberflächen sollten die Mengen unter etwa 50 g/m² bleiben, um ablaufendes Wasser zu verhindern. Um Algen- und Schimmelbildung zu vermeiden, müssen die mittleren Oberflächenfeuchten aber deutlich niedriger bleiben (siehe Schimmel)!

Bewertungskriterien – Zusammenfassung

Frostrisiko / Innendämmungen:

Hohe Feuchtegehalte bei Temperaturen unter dem Gefrierpunkt bergen Frostschadensrisiken. In Bereichen, in denen solche Bedingungen auftreten, sollten normalerweise frostbeständige Materialien (Außenputze, frostbeständige Sichtmauersteine etc.) eingesetzt werden.

WTA 6-5 [8] gibt für nicht frostbeständige Materialien, die nach Anbringen einer Innendämmung Frostbedingungen ausgesetzt sein können, vor, einen Durchfeuchtungsgrad von 30 % (bezogen auf den maximalen Wassergehalt) nur zu überschreiten, wenn die relative Feuchte in der Luft der Poren unter 95 % r.F. bleibt. Bei diesen Bedingungen treten auch bei nicht beständigen Materialien keine Frostschädigungen auf.

Holz oder gipshaltige Materialien sollten nicht eingesetzt werden bzw. in der Konstruktion verbleiben, wenn in diesen Bereichen Feuchten über 95 % r.F. längerfristig überschritten werden.

Feuchtegehalt Mauerwerk:

Der U-Wert basiert auf der Wärmeleitfähigkeit bei 80 % r.F. in der Porenluft der Materialien. Wird dieser Wert im Mittel längerfristig überschritten, wäre eine Korrektur der Wärmedämmeigenschaften erforderlich. Hohe Feuchtegehalte resultieren neben der Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit auch in zusätzlichen Wärmeverlusten durch Verdunstungskühlung. Ebenso steigt das Risiko des Bewuchses durch Algen und Pilze.

Auch bei frostbeständigen Materialien sollten daher längerfristig hohe Feuchtegehalte von im Mittel über 90 % r.F. in den Poren der Materialien z.B. durch eine Verbesserung des Regenschutzes so weit wie möglich vermieden werden.

Bewertung typischer Konstruktionen

Für die folgenden Konstruktionstypen stehen jeweils eigene Leitfäden zur Verfügung, welche sowohl Hinweise zu den Eingabedaten als auch zur Auswertung geben. Dies wird meist auch an einem Beispiel verdeutlicht.

- **Außenwand mit Innendämmung**
  → Handhabung typischer Konstruktionen

- **Außenwand mit Wärmedämmverbundsystem**
  → Leitfaden zur Berechnung und Auswertung eines WDVS mit Holzfaserdämmung

- **Holzständerkonstruktion**
  → Handhabung typischer Konstruktionen

- **Kellerwand im Erdreich**
  → Handhabung typischer Konstruktionen

Bewertung typischer Konstruktionen

- **Flachdach**
  → Leitfaden zur Berechnung von Flachdächern

- **Gründach**
  → Leitfaden zur Berechnung von extensiv begrünten Dächern

- **Kiesdach**
  → Leitfaden zur Berechnung von bekiesten Dächern

- **Geneigte Dächer / hinterlüftetes Steildach**
  → Leitfaden zur Berechnung von geneigten Dächern

Literatur

[1] DIN 4108-3: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz - Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung. Beuth Verlag, März 2024.

[2] WTA-Merkblatt 6-8: Feuchtetechnische Bewertung von Holzbauteilen – Vereinfachte Nachweise und Simulationen. August 2016.

[3] DIN 4108-2: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz. Beuth Verlag, Februar 2013.

[4] DIN 68800-2: Holzschutz - Teil 2: Vorbeugende bauliche Maßnahmen im Hochbau. Beuth Verlag, Februar 2022.

[5] DIN EN 1995-1-1: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten. Teil 1-1: Allgemeines - Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau. Beuth Verlag, Dezember 2010.

[6] Zirkelbach, D., Tieben, J., Tanaka, E., Pfabigan N., Andresen, N., Bachinger, J., Nusser, B.: Bauteile mit Dämmmaterial aus nachwachsenden Rohstoffen: Fokus (Hygro-)Thermik (ThermNat). Projektbericht, IGF-Forschungsvorhaben CORNET 271 EN (2023).

[7] Tanaka, E., Schwerd, R., Pfabigan, N., Tieben, J., Bachinger, J., Zirkelbach, D.: Hygrothermal limit curves and transient decay prediction for natural fibre insulation. 2nd International Conference on Moisture in Buildings. London, 2023. doi.org/10.14293/ICMB230038.

[8] WTA-Merkblatt 6-5: Innendämmung nach WTA II – Nachweis von Innendämmsystemen mittels numerischer Berechnungsverfahren. April 2014.

[9] Bludau, Ch., Künzel, H., Marra, E., Tanaka, E., Zirkelbach, D., Hirsch, H., Heyn, R., Grunewald, J., Petzold, H.: Erarbeitung wissenschaftlich begründeter Bewertungskriterien und Implementierung eines Nachweisverfahrens für die schadenfreie energetische Bestandssanierung und Neubauplanung (NaVe). Forschungsbericht EnOB: Energieoptimierte Gebäude und Quartiere - dezentrale und solare Energieversorgung Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi), Förderkennzeichen:03ET1649 A/B, 2023

[10] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR): Untersuchungen zur Optimierung und Standardisierung von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen – Gemeinsamer Abschlussbericht zum Verbundvorhaben. Fraunhofer Institut für Bauphysik; Institut für Holztechnologie Dresden gGmbH; Institut für Betriebstechnik und Bauforschung et al. Ausgabe Januar 2008.