

Abschätzung des Risikopotentials infolge konvektiven Feuchtetransports

von

Achim Geißler
Gerd Hauser

UNIVERSITÄT KASSEL
FACHGEBIET BAUPHYSIK
UNIV.-PROF. DR.-ING. GERD HAUSER

**Abschätzung des Risikopotentials
infolge konvektiven Feuchtetransports**

von

Dr.-Ing. A. Geißler
Univ.-Prof. Dr.-Ing. G. Hauser

Abschlußbericht

Juli 2002

AIF–Forschungsvorhaben Nr. 12764

UNIVERSITÄT KASSEL
FACHGEBIET BAUPHYSIK
UNIV.-PROF. DR.-ING. GERD HAUSER

FVU 79/99

**Abschätzung des Risikopotentials
infolge konvektiven Feuchtetransports**

von

A. Geißler und G. Hauser

AIF–Forschungsvorhaben Nr. 12764

Der Bericht umfaßt

67 Seiten Text
41 Abbildungen
8 Tabellen

Kassel, den 5. Juli 2002

(Dr.-Ing. A. Geißler)

(Univ.-Prof. Dr.-Ing. G. Hauser)

Inhaltsverzeichnis

1 Einführung	3
2 Grundlagen	5
2.1 Allgemeines	5
2.2 Ort einer Leckage	6
2.3 Impulsübertragung	10
2.3.1 Allgemeines	10
2.3.2 Vorberachtungen	12
2.4 Wärmeübertragung	16
2.5 Stoffübertragung	20
2.5.1 Grundlagen und Ansätze	20
2.5.2 Stoffübergang	20
2.5.3 Stofftransport im Material	22
2.5.4 Verwendete Stoffwerte	23
2.6 Beurteilung des wirksamen Feuchteintrags	25
3 Meßtechnische Untersuchungen	27
3.1 Allgemeines	27
3.2 Versuchsaufbau	27
3.3 Meßergebnisse	27
4 Simulationsrechnungen mit CFD	35
4.1 Allgemeines	35
4.2 Vergleich Messung / Rechnung	38
4.3 Berechnungsergebnisse	41
5 Diskussion und Bewertung	63
5.1 Allgemeines	63
5.2 "Direkte" Leckagen	64
5.3 Leckagen mit Umlenkung	64
5.4 Grobe Bewertung	65
6 Literatur	67
7 Index	70
A Bild- und Tabellenverzeichnis	71

Nomenklatur

Bezeichnung	Einheit	Beschreibung
A	m^2	Fläche, Querschnittsfläche
a	$\text{m}^3/(\text{h Pa}^n)$	Luftdurchlaßkoeffizient
β	m/s	Stoffübergangskoeffizient
Bi	–	Biot Zahl
Bi'	–	Biot Zahl für den Stoffübergang
B_F	$\text{kg}/(\text{m}^2 \text{ h})$	Feuchtesorptionskoeffizient
γ	–	Wandtemperaturprofilexponent
C	$\text{kg}/(\text{m s Pa}^n)$	längenbezogener Strömungskoeffizient
C_i	–	Koeffizienten für Näherungsfunktionen
C_s	$\text{kg}/(\text{s Pa}^n)$	Strömungskoeffizient
C_R	–	Wärmekapazitätenverhältnis
c	kg/m^3	Konzentration
c	$\text{J}/(\text{kg K})$	spezifische Wärme
c_F	kg/m^2	wirksame hygrische Speicherkapazität
c_p	$\text{J}/(\text{kg K})$	spezifische Wärme bei konstantem Druck
Δc	kg/m^3	Konzentrationsdifferenz
δ	m	Grenzschichtdicke
Δp	Pa	Druckdifferenz
Δp^*	–	dimensionsloser Druckabfall
D	m^2/s	Diffusionskoeffizient
d	m	Durchmesser (Rohrströmung), Schichtdicke
f	Hz	Frequenz
φ	–	relative (Luft-) Feuchtigkeit
h	$\text{W}/(\text{m}^2 \text{ K})$	Wärmeübergangskoeffizient
I	A	elektrischer Strom
j	$\text{kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$	Stoffstromdichte
k_s	m	Sandkornrauhigkeit
k_s^+	–	
κ	m^2/s	Temperaturleitfähigkeit, $\kappa = \lambda / (\rho c_p)$
L	m	charakteristische Länge, Länge des Einlaufs
l	m	Spaltbreite
λ	–	Druckverlustbeiwert
λ	$\text{W}/(\text{m K})$	Wärmeleitfähigkeit
Ma	–	Mach Zahl
\tilde{M}	g/mol	Molmasse
m	–	Exponent der bezogenen Spalttiefe
\dot{m}	kg/s	Massenstrom
ν	m^2/s	kinematische Viskosität
η	Ns/m^2	dynamische Viskosität
Nu	–	Nusselt Zahl
Pr	–	Prandtl Zahl
P	m	benetzter Umfang eines durchströmten Kanals
P	W	elektrische Leistung
q	W/m^2	Wärmestromdichte
ρ	kg/m^3	Dichte von Luft
Re	–	Reynolds Zahl
R_F	$(\text{m}^2 \text{ h})/\text{kg}$	Feuchtedurchlaßwiderstand
R	Ω	elektrischer Widerstand
Sc	–	Schmidt Zahl
Sh	–	Sherwood Zahl
St	–	Stanton Zahl
S_F	$\text{kg}/(\text{m}^2 \text{ h})$	Feuchtespeicherkoefizient
s	m	Spalthöhe
σ	–	Standardabweichung
θ	$^\circ\text{C}$	Lufttemperatur
τ	s	Periodendauer
ΔT	K	Temperaturdifferenz
t	m	Spalttiefe
$U_{F,0}$	$\text{kg}/(\text{m}^2 \text{ h})$	Schichtspeicherkoefizient für Feuchte
u	m/s	Strömungsgeschwindigkeit
u	–	Stofffeuchte (Volumenanteil)
\bar{u}	m/s	mittlere Strömungsgeschwindigkeit
V	m^3	Volumen

\dot{V}	m^3/h	Volumenstrom
v	–	Diffusionsvolumina
w	kg/m^3	Wassergehalt
ω	$1/\text{h}$	Kreisfrequenz
μ	–	Diffusionswiderstandszahl
x, y, z	–	allgemeine Koordinaten, Meßgröße
X	–	dimensionslose Spaltkoordinate
δX	–	partielle dimensionslose Länge
y^+	–	dimensionsloser Wandabstand
$y_{\text{hyg.}}$	m	hygrisch wirksame Schichtdicke
ζ	–	Einzelwiderstandsbeiwert
z_u	–	Anzahl Umlenkungen in einem Spalt

Sub- und Superskripte

Bezeichnung	Beschreibung
0	Bezugswert
a	Anlaufstrecke
D	Diffusion
e	Eintritt, außen (external)
f	fluid
i	Innen (internal), Laufindex
j	Strömungsweg, Laufindex
krit.	kritisch, Umschlagpunkt von laminar zu turbulent
L	Luft
max	Maximum
min	Minimum
n	Strömungsexponent (Superskript)
o	Austritt
r, ref	Referenz
S	Strömung
s	Spalt, solid
T	Temperatur
u	Umlenkung
W	Wand
w	water
*	angepaßte, variable Größe

Größen

Größe	Wert	Einheit	Beschreibung
g	9,81	m/s^2	Erdbeschleunigung
π	3,1415	–	Kreiskonstante

1 Einführung

Anschlußdetails werden aus bauphysikalischer Sicht in der Regel nur hinsichtlich thermischer Wärmebrücken detailliert betrachtet. Zunehmend werden auch gekoppelte Feuchte- und Wärmetransportprozesse berücksichtigt. Hierbei kann für den Flüssigkeitstransport neben der reinen Diffusion auch die laminar-konvektive Bewegung in der Gasphase offenporiger Materialien berücksichtigt werden [1]. Es ist jedoch schon lange unbestritten, daß der überwiegende Teil entstehender Feuchteschäden an Gebäuden auf den Feuchtetransport infolge einer makroskopischen Durchströmung von Bauteilen – Konvektion – von innen nach außen zurückzuführen ist. In Bild 1 ist anhand eines Beispiels der durch Konvektion und Diffusion resultierende spezifische Wasserdampfstrom gegenübergestellt [2].

Nicht zuletzt aus diesem Grund ist generell eine möglichst luftdichte Gebäudehülle anzustreben. In der Praxis bereiten dabei insbesondere Anschlußbereiche immer wieder Probleme und weisen i.d.R. auch in einem weit höheren Maße Leckagen auf, als dies bei Bauteilflächen der Fall ist. Daß die integrale Betrachtungsweise der Gebäudehülle, welche bei einer Luftdichtheitsmessung gemäß DIN EN 13829 [3] erfolgt, keine Garantie für das Fehlen konvektiven Feuchtetransports in die Konstruktion liefern kann, ist ebenfalls grundsätzlich bekannt [4].

Probleme meist im Anschlußbereich

Es ist unbestreitbar, daß die Häufigkeit konvektiver Feuchteschäden wesentlich geringer ausfällt, als Anzahl und Umfang der meist vorhandenen Leckagen vermuten ließen. Unter anderem ist dabei als mögliche Ursache denkbar, daß der zusätzliche Wärmeeintrag in die Konstruktion infolge der Durchströmung von innen nach außen die Temperaturen an den inneren Leckageoberflächen in einem Bereich hält, der das Erreichen eines für einen nennenswerten Stofftransport notwendigen Wasserdampf-Konzentrationsgefälles zwischen der strömenden Luft und der Bauteiloberfläche verhindert. Infolgedessen werden an den inneren Oberflächen wesentlich geringere Mengen an Wasser aufgenommen, als eine ausschließlich auf Grund der Wärmeleitung berechnete Temperaturverteilung in der Leckage erwarten läßt.

Es kann davon ausgegangen werden, daß die Porenwände auch eines relativ trockenen, porösen Baustoffes ständig mit einem dünnen Wasserfilm bedeckt sind [5]. Bereits bei Luftfeuchtigkeiten ab 50% r.F. findet Kapillarkondensation statt; dieses makroskopische Kondensat ist beweglich. Die größere Transportkapazität der flüssigen im Vergleich zur gasförmigen Phase führt zu einer Verminderung des Wasserdampfdiffusionswiderstandes. Bei sehr hohen Feuchten schließlich entwickelt sich eine durchgehende flüssige Phase. Beim Transport dominieren Kapillareffekte. Im überhygroskopischen Feuchtbereich erfolgt der Feuchtetransport durch kapillares Saugen. Die kapillare Saugfähigkeit ist entscheidend bei der Aufnahme von Oberflächenkondensat. Hierbei sind die Mikro- und die Mesokapillaren aufgrund ihrer kapillaren Transportkapazität maßgebend [6].

Sowohl der Diffusionswiderstand als auch die Speicherkapazität sind demnach feuchteabhängig. Oberhalb von etwa 80% r.F. zeigt sich bei den Sorptionsisothermen üblicher Baustoffe eine deutliche Zunahme der aufgenommenen Feuchte. In diesem Feuchtbereich ist auch eine signifikante Abnahme des Wasserdampf-Diffusionswiderstandes festzustellen. Ursache hierfür ist, wie oben erläutert, die zunehmende Kapillarkondensation und die damit verbundene höhere Feuchtetransportkapazität in der flüssigen Phase [6].

Im Rahmen des hier beschriebenen Projektes ist es das Ziel, die Folgen und Effekte der beschriebenen Mechanismen an Beispielen der (quasi) stationären Durchströmung von Spalten einfacher Geometrie anhand von Ergebnissen aus Computational Fluid Dynamics (CFD) - Berechnungen sowie aus Messungen darzustellen.

Durch den Abgleich zwischen Meßergebnissen und Computersimulationen mit dem CFD-Programm wird es möglich, für den betrachteten Anwendungsfall sinnvolle Vorgaben für notwendige Parameter der CFD-Berechnungen zu geben. Damit ist ein erster Schritt vollzogen, das Instrument CFD für die Schadensanalyse aber auch für die Prognose von Schadenspotentialen einzusetzen.

Hierbei soll gegenüber bislang durchgeführten Ansätzen die Überlagerung von Wärmeleitung und Wärmetransport durch Konvektion bei der Bestimmung der thermischen Randbedingungen in Leckagen berücksichtigt werden. Aus den so gewonnenen thermischen Randbedingungen erfolgt die Abschätzung des Stoffüberganges bzw. -transports.

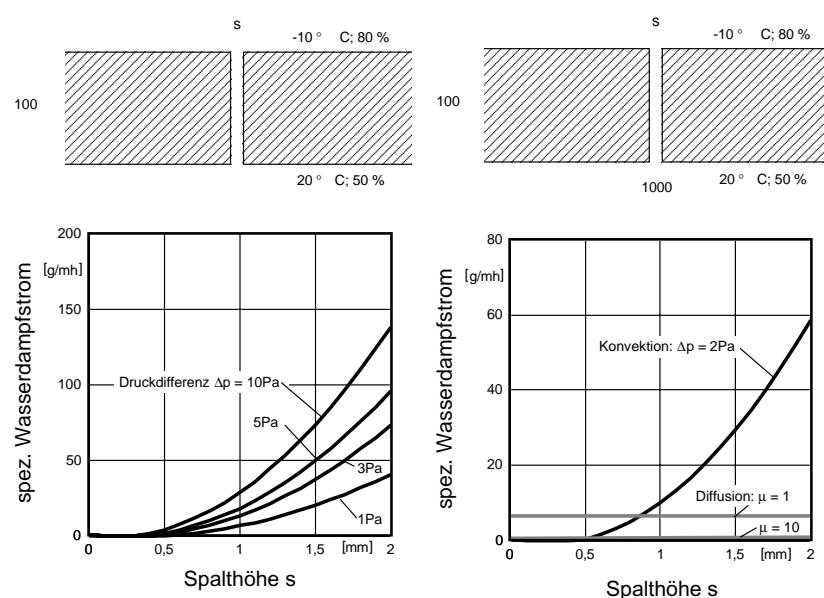


Bild 1: Gegenüberstellung des konvektiven und diffusiven Feuchte-transportes durch einen Spalt (aus [2]).

2 Grundlagen

2.1 Allgemeines

Bei der Beschreibung von Impuls- (Strömungen), Wärme- und Stoffübertragung wird stets versucht, die komplexen Vorgänge in dimensionslosen Kenngrößen zusammenzufassen. Hierdurch können Erkenntnisse zwischen sog. "ähnlichen Übertragungsvorgängen" übernommen werden. Im folgenden werden für die genannten Übertragungsvorgänge die wesentlichen Kenngrößen zusammengestellt und kurz im Kontext der vorliegenden Untersuchung erläutert.

Die bei realen Objekten vorhandenen Leckagen werden sowohl für die meßtechnische Untersuchung als auch für die rechnerische Simulation durch Spaltleckagen einfacher Geometrie nachgebildet. In Bild 2 sind die gewählten Geometrien dargestellt.

Sollte ausschließlich die *Strömung* untersucht werden, ließen sich die zu betrachtenden Spalte selbstverständlich auf wenige Grundkonfigurationen (z.B. "S I", "S V" und "S VII", siehe Bild 2) reduzieren. Da im vorliegenden Projekt jedoch die Wärmeübertragung sowie insbesondere auch die Stoffübertragung an den Spaltbegrenzungswänden eine wesentliche Rolle spielt, sind auch zwischen vielen der übrigen in Bild 2 dargestellten Varianten Unterschiede hinsichtlich der (Risiko-) Bewertung zu erwarten.

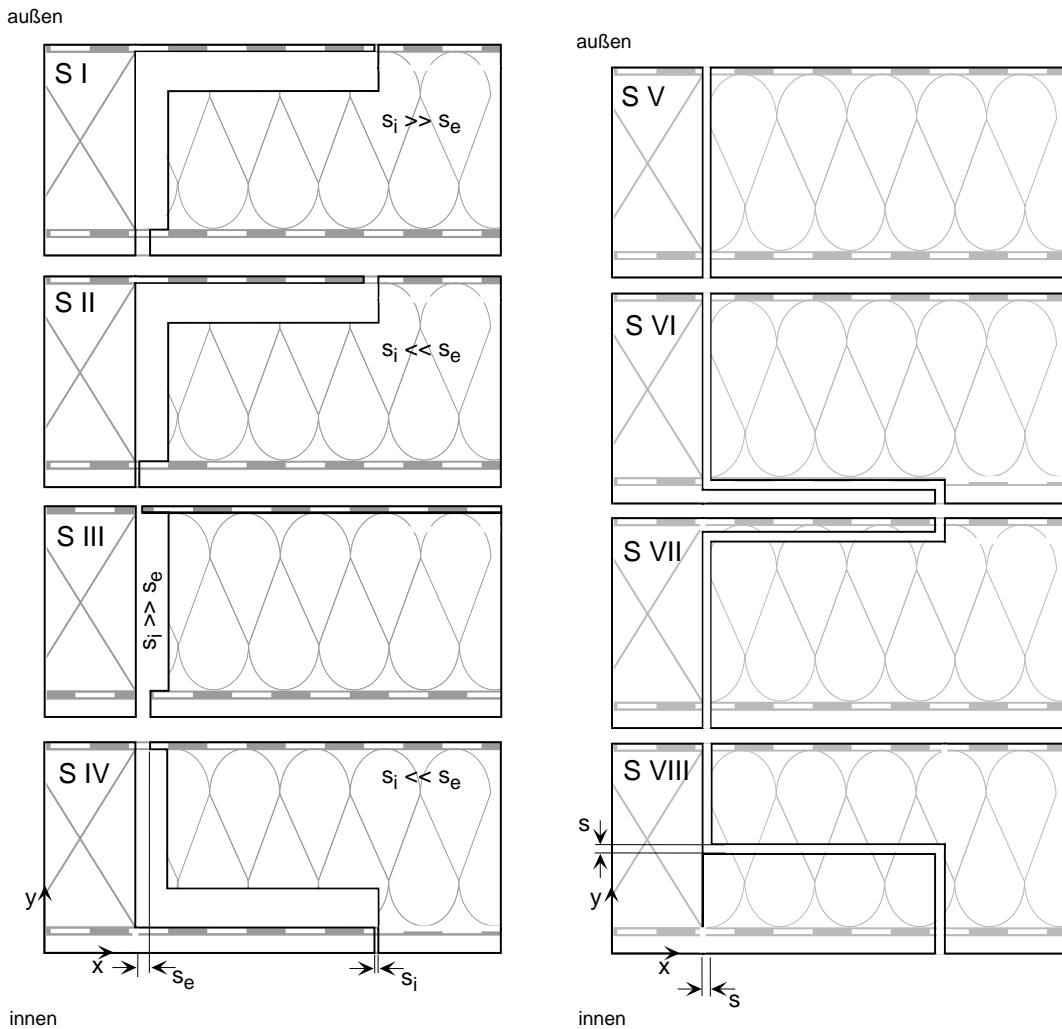


Bild 2: Prinzipskizzen der vorgesehenen Spaltkonfigurationen.

2.2 Ort einer Leckage

Wesentliche Merkmale zur Beschreibung einer Leckage und des Leckageortes sind die anliegende Druckdifferenz mit Größe und Vorzeichen (diese ist Parameter sowohl bei den Messungen als auch bei den Simulationen), die Temperatur und Feuchtebeladung der durch die Leckage strömenden Luft sowie die Größe und Ausbildung der Leckage im Sinne konstruktiver Unterschiede je nach Gebäudebereich. Die Strömungsrichtung relativ zur Schwerkraft ist bei der erzwungenen Konvektion, welche hier betrachtet wird, von untergeordneter Bedeutung.

Die Druckverteilung um ein Gebäude kann grundsätzlich – insbesondere in Folge einer Windanströmung – beliebige Formen annehmen. In Bild 3 sind typische Beispiele für die Druckverteilung infolge thermischen Auftriebs (oben) und Windanströmung (unten) gezeigt. Beide Mechanismen sind an realen Objekten zu praktisch jedem Zeitpunkt überlagert und ergeben die tatsächliche Druckverteilung. In aller Regel wird insbesondere im Kellerbereich ein Unterdruck im Gebäudeinneren vorliegen, d.h., dort vorhandene Leckagen werden von außen nach innen durchströmt und sind damit in dem hier untersuchten Kontext nicht von weiterem Interesse. Alle Leckagen, die sich über der "druckneutralen Fläche" (häufig auch als "neutrale Ebene" bezeichnet) befinden, unterliegen einem Überdruck innen und werden damit von innen nach außen durchströmt. Insbesondere die Windanströmung führt natürlich dazu, daß die Lage dieser "druckneutralen Ebene" und aller anliegenden Druckdifferenzen in Größe und Vorzeichen zeitlichen Schwankungen unterliegen. Typische Frequenzen des windinduzierten Druckspektrums liegen dabei zwischen 10^{-1} und 10^{-4} Hz (Periodendauer zwischen ca. 10 sec. und 3 h) mit dem Maximum des Druckspektrums bei ca. 10^{-2} Hz (entsprechend einer Periodendauer von ca. 2 min.) [7, 8]. Für Räume mit mehreren Öffnungen kommen die Autoren in [7, 8] zu dem Ergebnis, daß die für Luftwechselvorgänge relevanten Druckschwankungen im Frequenzbereich um 10^{-2} Hz liegen.

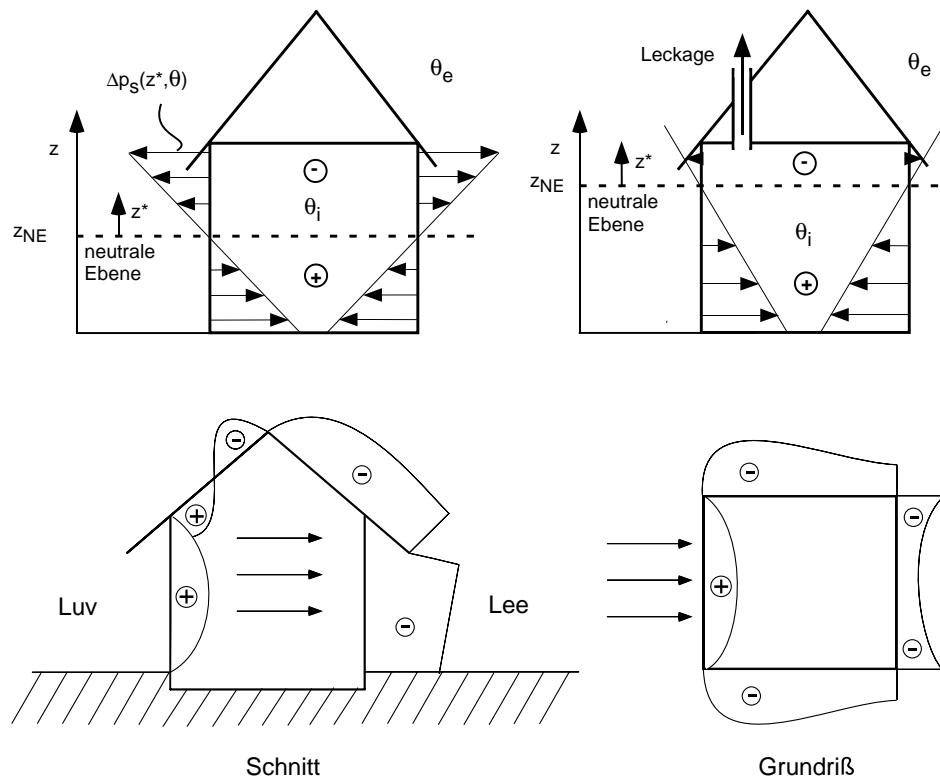


Bild 3: Druckverteilung um ein Gebäude. Exemplarische Darstellung der Ausbildung infolge thermischen Auftriebs (oben) und Windanströmung (unten).

In Bild 4 sind Beispiele gegeben, an welchen Stellen eines Gebäudes welche der in Bild 2 dargestellten abstrahierten Leckagetypen vorgefunden werden können. Über den Typ der Leckage und die für das dynamische thermische Verhalten wesentlichen Eigenschaften "spezifische Wärmekapazität", "Wärmeleitfähigkeit" und "Rohdichte" der angrenzenden Bauteile soll

aus den Ergebnissen der durchgeföhrten Untersuchungen das Risikopotential tatsächlicher Fehlstellen abgeschätzt werden.

Die in Bild 2 dargestellten Spalt-“Sorten” können beispielsweise folgenden realen Leckagen zugeordnet werden:

- “S V” z.B. der Fensterlaibung oder dem Schwellenbereich;
- “S I” z.B. Leckagen im Dachbereich allgemein, insbesondere einem Pfettenanschluß.

Weitere Zuordnungen sind selbstverständlich denkbar, hängen aber entsprechend von der jeweiligen konkreten Konstruktion ab.

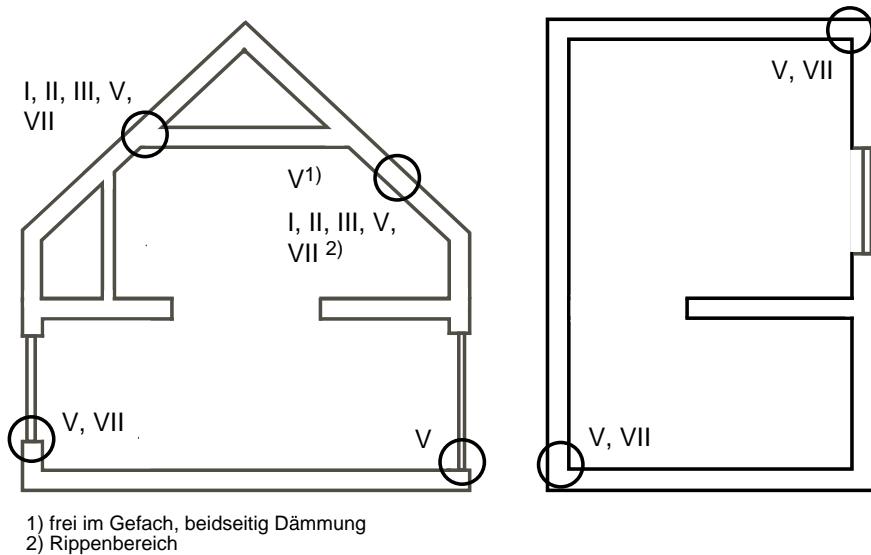


Bild 4: Leckageorte in Gebäuden mit typischen Leckagearten für einzelne Gebäudebereiche.

Sowohl Meßwerte als auch berechnete Werte werden weitestgehend anhand von dimensionslosen Kenngrößen diskutiert und verglichen. Die folgenden Größen werden festgelegt.

Die dimensionslose Oberflächentemperatur in den Spaltleckagen wird gemäß

$$f = \frac{\theta - \theta_e}{\theta_i - \theta_e} \quad (1)$$

berechnet. Hierbei gilt für Meßwerte, daß

$$\theta_e = \begin{cases} \theta_{si,min} & \text{wenn } \theta_{si,min} \leq TLA \\ TLA & \text{sonst} \end{cases} \quad (2)$$

entspricht, wobei TLA die Lufttemperatur der Kaltseite der eingesetzten Doppel-Klimakammer ist. Die Temperatur θ_i wird für die Meßwerte stets zur Lufttemperatur der Warmseite TLI gesetzt.

Die Standardabweichung der dimensionslosen Oberflächentemperatur (Messungen) errechnet sich gemäß

$$\sigma_f = \frac{\sigma_\theta}{\theta_i - \theta_e} \quad (3)$$

Die dimensionslose Spaltkoordinate wird mit

$$X = \frac{x^* + y^*}{x_{max}^* + y_{max}^*} \quad (4)$$

gebildet. Die "maximale Lauflänge" $x_{\max}^* + y_{\max}^*$ wird mit einer vereinfachten Spaltmittellinie bestimmt. In Bild 5 ist die Entdimensionalisierung der Spalttiefe skizziert. In Bild 6 sind die gewählten Referenzpunkte bzw. -mittellinien wiedergegeben. Für die Spalte vom Typ "S V" und "S VII" entsprechen die Referenzpunkte denjenigen der Temperaturmeßstellen. Der Spalt vom Typ "S I" wird entsprechend "S II", der vom Typ "S III" wie "S V" und der vom Typ "S IV" entsprechend dem Spalt vom Typ "S VI" behandelt.

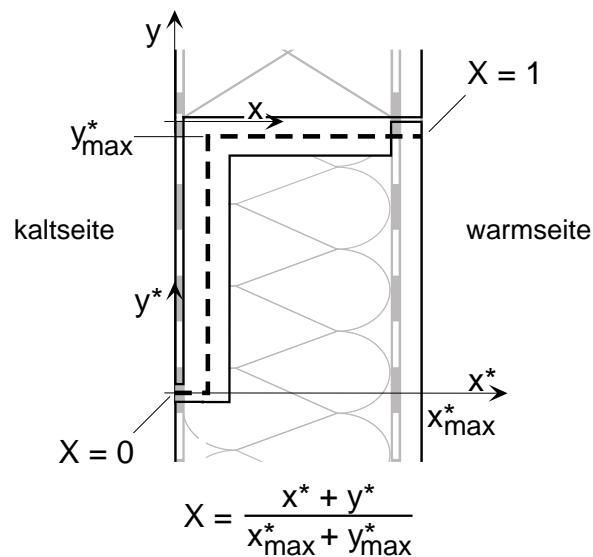


Bild 5: Skizze zur Entdimensionalisierung der Spalttiefe über die (ver-einfachte) Länge der Spaltmittellinie.

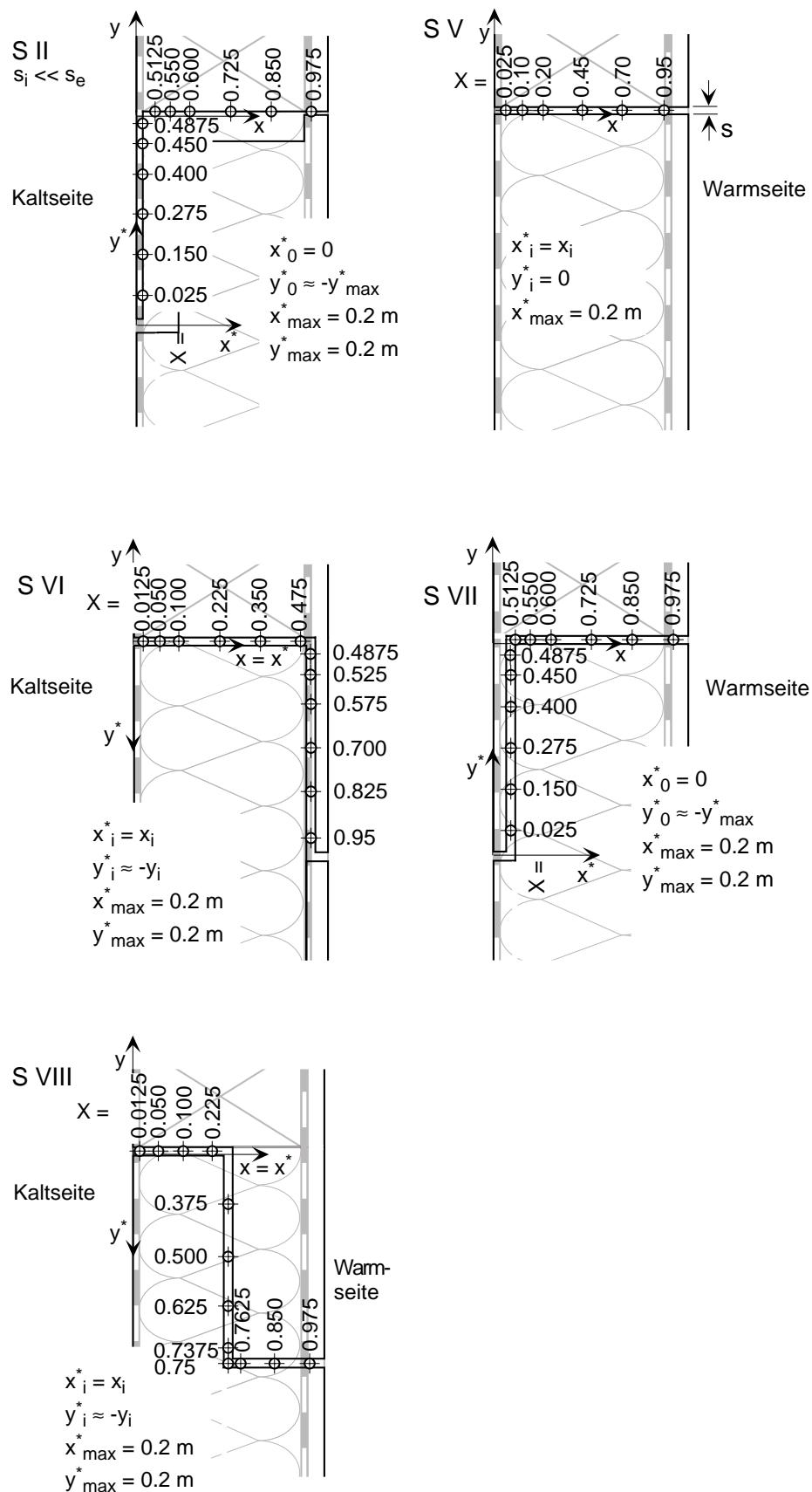


Bild 6: Skizze der Bezugspunkt-Koordinaten der Auswerteflächen bei den einzelnen Leckage-Typen. Die angegebenen Zahlenwerte sind in dimensionsloser Form, siehe Gl. 4 auf Seite 7.

2.3 Impulsübertragung

2.3.1 Allgemeines

Für Gasströmungen kann bis zu Strömungsgeschwindigkeiten von ca. 50 m/s näherungsweise von einer inkompressiblen Strömung ausgegangen werden [9, 10]. Diese Annahme wird im weiteren übernommen.

Bei Impulsaustauschvorgängen ist die allein auftretende Kennzahl die Reynolds-Zahl Re . Sie charakterisiert die viskose Strömung und kann als das Verhältnis von Trägheitskraft zu Reibungskraft interpretiert werden. Allgemein wird die Reynolds-Zahl gemäß

$$Re = \frac{u L}{\nu} \quad (5)$$

mit einer für die betrachtete Strömung charakteristischen Länge L gebildet [10].

Einlauf Der sogenannte Einlaufbereich ist dadurch gekennzeichnet, daß die Geschwindigkeitsverteilung von dem Abstand zur Wand und der Ortskoordinate x (in Strömungsrichtung) abhängt. Bei einer ausgebildeten Strömung entfällt die x -Abhängigkeit. Der Einlaufbereich einer laminaren Strömung in einem Rohr kann über

$$\frac{L_s}{d} \approx 0,05 Re \quad (6)$$

abgeschätzt werden [10].

Der wandnahe Bereich, in dem eine Strömung auf die Geschwindigkeit Null abgebremst wird, wird als Grenzschicht bezeichnet. Es gilt der Zusammenhang

$$\frac{\delta}{L} = \frac{1}{\sqrt{Re}} \quad (7)$$

Grenzschicht mit der Grenzschichtdicke δ . Im Rahmen von Grenzschichtbetrachtungen – insbesondere auch in Zusammenhang mit Wärme- und Stoffübergangsvorgängen – ist es häufig nützlich, die Reynolds-Zahl mit der Lauflänge in Strömungsrichtung x als charakteristischer Länge zu bilden [10].

Für $Re \gg 1$ gilt in der Grenzschicht, daß sich der Druck normal zur Wand nicht ändert, also

$$\frac{\partial p}{\partial y} = 0 \quad (8)$$

ist. Die Abschätzung weiter unten zeigt, daß für die hier betrachteten Spaltströmungen Reynolds-Zahlen zwischen ca. 10 ... 2500 zu erwarten sind.

Charakteristische Länge L ist 2 s Für die Abschätzung des Druckverlustes einer Strömung in einem Kanal (hier: Spalt) bzw. der Abschätzung der Strömungsgeschwindigkeit und des Volumenstroms bei Vorgabe einer Druckdifferenz über einen Spalt der Länge l wird die Reynolds-Zahl mit dem hydraulischen Durchmesser $d_h = 2 s$ als charakteristischer Länge L bestimmt ($d_h = 4 A / P$, mit der Querschnittsfläche A und dem benetzten Umfang P sowie der Annahme, daß für den Spalt $l \gg s$ gilt; siehe [11] und [12]).

$Re_{krit.} = 2320$ Anhand der Reynolds-Zahl wird ermittelt, ob eine Strömung als laminar – $Re \leq Re_{krit.}$ – oder als turbulent – $Re > Re_{krit.}$ – zu betrachten ist. In der Literatur werden dabei für Spaltströmungen unterschiedliche Werte für $Re_{krit.}$ genannt, so z.B. 5300, 3000 und der für die Rohrdurchströmung übliche Wert von 2320. Für die weitere Diskussion wird hier in Anlehnung an die Rohrströmung $Re_{krit.} = 2320$ angenommen (siehe [12]).

Die räumlich und zeitlich gemittelte Strömungsgeschwindigkeit kann pro m Spaltlänge ($l = 1$ m) näherungsweise über den Volumenstrom und den Spaltquerschnitt durch

$$\bar{u} = \frac{\dot{V}}{3600 s l} \quad (9)$$

in m/s berechnet werden.

Der Druckverlustbeiwert λ kann aus dem Ansatz für Strömungen in rauen Rohren mit kreisförmigem Querschnitt abgeschätzt werden (siehe [11, 12, 13]):

$$\begin{aligned} \lambda &= \frac{64}{Re} \quad \text{für } Re < Re_{\text{krit.}} \\ \frac{1}{\sqrt{\lambda}} &= 1,74 - 2 \log_{10} \left(\frac{2k_s}{s} + \frac{18,7}{Re\sqrt{\lambda}} \right). \end{aligned} \quad (10)$$

Zur Bildung des bei der turbulenten Strömung vorkommenden Sandkornrauhigkeitsparameters R / k_s wird der Radius R durch die halbe Spalthöhe $h / 2$ ersetzt. D.h., es wird

$$\frac{R}{k_s} = \frac{s}{2k_s} \quad (11)$$

gesetzt. Zur Abschätzung des Druckabfalls über einen rauen Spalt mit z_u Umlenkungen kann der Ansatz aus [12]

$$\Delta p = \left(\lambda \left(\frac{t}{2s} \right)^m + \zeta_e + \zeta_o + \zeta_a + z_u \zeta_u \right) \quad (12)$$

herangezogen werden. Dabei wird λ gem. Gl. 10 ermittelt und die Strömungswiderstandsbeiwerte ζ_i gem. [12] zu

ζ_e	=	0,3	$\pm 0,05$	Eintrittswiderstand
ζ_o	=	1,0		Austrittswiderstand
ζ_a	=	0,3	Widerstand im Anlauf für $Re < Re_{\text{krit.}}$	
	-0,1	sonst		
ζ_u	=	0,82	$\pm 0,1$	Umlenkungswiderstand (turbulent)

angenommen.

Es ist aus Gl. 12 mit Gl. 10 sofort ersichtlich, daß der Druckverlust bei laminarer Strömung ($Re < Re_{\text{krit.}}$) nicht von der Rauigkeit der Spaltoberflächen abhängig ist (siehe z.B. auch [11]). Wie weiter unten dargelegt wird, kann in den hier für den Baubereich interessierenden (Spalt-) Leckagen i.d.R. von einer laminaren Strömung ausgegangen werden. D.h., die stets vorhandene Rauigkeit der Oberflächen spaltbegrenzender Materialien kann in diesem Zusammenhang vernachlässigt werden.

Die ungefähre Gitterweite y für die ersten Gitterzellen im Spalt – "near wall mesh" – kann für die CFD-Modellierung vereinfacht über

$$y = y^+ \frac{\nu}{\sqrt{u^{\frac{7}{4}} \nu^{\frac{1}{4}} \left(\frac{s}{2}\right)^{-\frac{1}{4}}}} \quad (13)$$

abgeschätzt werden. Der Parameter y^+ wird dabei zu $y^+ = 30$ gesetzt (siehe Fluent Handbuch, [14]). Für den zu erwartenden Strömungsgeschwindigkeitsbereich ergeben sich für die betrachteten Spalthöhen sehr unterschiedliche (mindest-) Zellenzahlen (siehe Bild 7, links unten).

Spaltströmungen im Baubereich sind überwiegend laminar, die Oberflächenrauhigkeit kann i.d.R. vernachlässigt werden

Um für die Modellierung von Strömungen in rauen Strömungskanälen abschätzen zu können, welche Strömungsform jeweils vorliegt – hydraulisch glatt, Übergangsbereich oder rauh – kann die Behelfsgröße k_s^+ berechnet werden.

$$k_s^+ = \frac{k_s}{\nu} \sqrt{u^{\frac{7}{4}} \nu^{\frac{1}{4}} \left(\frac{s}{2}\right)^{-\frac{1}{4}}} \quad (14)$$

Dabei gilt, daß für $k_s^+ < 2,25$ die Strömung als "hydraulisch glatt", für Werte $2,25 \leq k_s^+ \leq 90$ der Übergangsbereich und für $k_s^+ > 90$ die Strömung als "rauh" angenommen wird (siehe Fluent Handbuch, [14]). Andere Quellen geben für die genannten Bereichsgrenzen auch abweichende Zahlenwerte, z.B. [10]: $k_s^+ < 5$ hydraulisch glatt, $5 \leq k_s^+ \leq 70$ Übergangsbereich und für $k_s^+ > 70$ rauh, an.

2.3.2 Vorberichtigungen

Eine Parameterstudie anhand der im vorangegangenen Abschnitt vorgestellten einfachen Ansätze sowie des in Bild 2 dargestellten abstrahierten Spaltes vom Typ S V mit der Spalttiefe $t=210$ mm ohne Umlenkungen ($z_u = 0$) soll Anhaltswerte zu den in bauüblichen Leckagen zu erwartenden Strömungen geben. In den Bildern 7 und 8 sind die Ergebnisse dieser Parameterstudie zusammengefaßt.

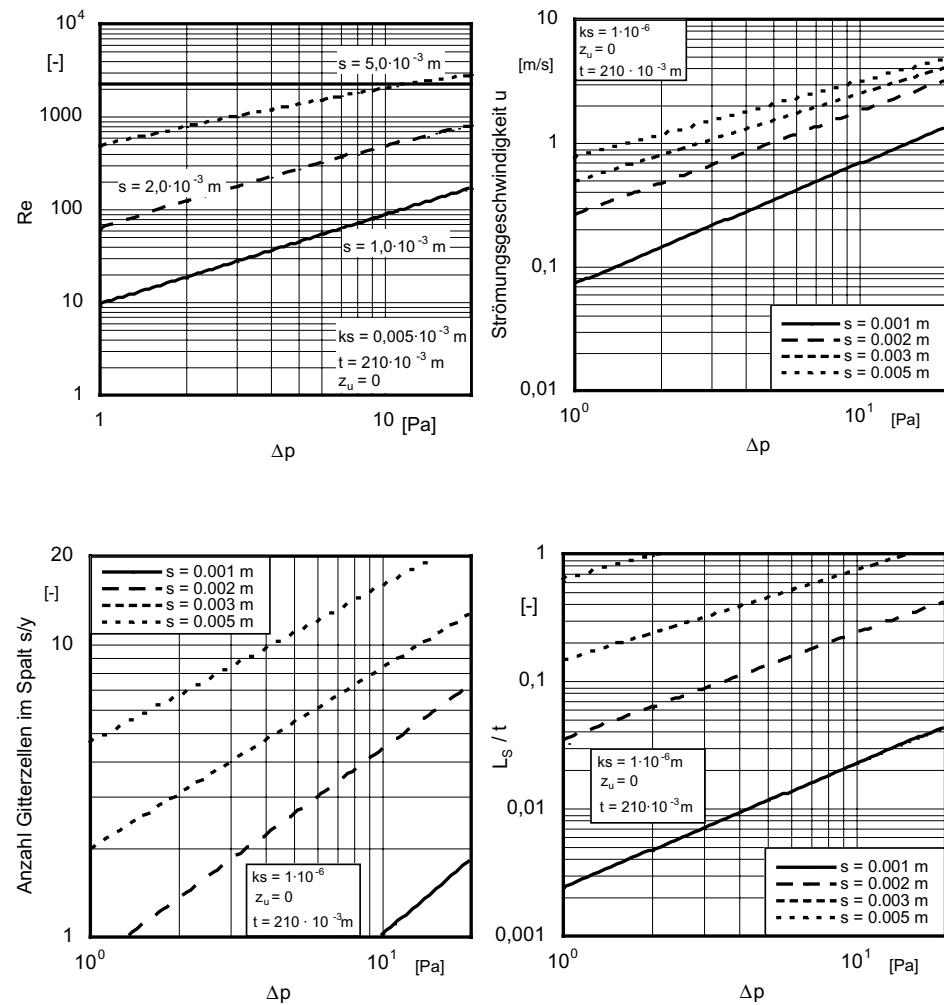


Bild 7: Parametervariationen für Spaltströmungen. Dargestellt sind $Re(\Delta p)$, $\bar{u}(\Delta p)$, die Anzahl Gitterzellen im Spalt $s/y(\Delta p)$ sowie die relative Einlauflänge L_s/t für verschiedene Spalthöhen s .

Es ist aus den Bildern 7 und 8 ersichtlich, daß – wie bereits erwähnt – Spaltströmungen im Bauwesen bei Druckdifferenzen bis ca. 20 Pa überwiegend laminare Strömungen ($Re < Re_{krit.}$) sind. Die Oberflächenrauhigkeit der Spaltwände hat somit keinen Einfluß auf den Druckabfall und damit auf den Volumenstrom bei ansonsten gleichen Randbedingungen. Erst bei signifikanten – d.h. für den bei einer gegebenen Druckdifferenz sich einstellenden Volumenstrom entscheidenden – Spalthöhen von mehr als vier Millimetern ist bei den im wesentlichen interessierenden Druckdifferenzen von bis zu max. 20 Pa mit einer turbulenten Strömung zu rechnen (vgl. Bild 8, oben links).

Vergleich
Druckverlust CFD
und einf. Ansatz

In Bild 9 ist der Vergleich zwischen dem anhand des einfachen Ansatzes nach Gleichung 12 berechneten Druckabfallen über die Spaltlänge und Ergebnissen aus 2- und 3-dimensionalen CFD-Berechnungen für verschiedene Spalthöhen und Druckdifferenzen dargestellt. Die Übereinstimmung des Druckabfalles ist für kleine Spalthöhen akzeptabel, durch die Anpassung der in Gl. 12 angesetzten Strömungswiderstandsbeiwerte ζ , kann eine gute Übereinstimmung er-

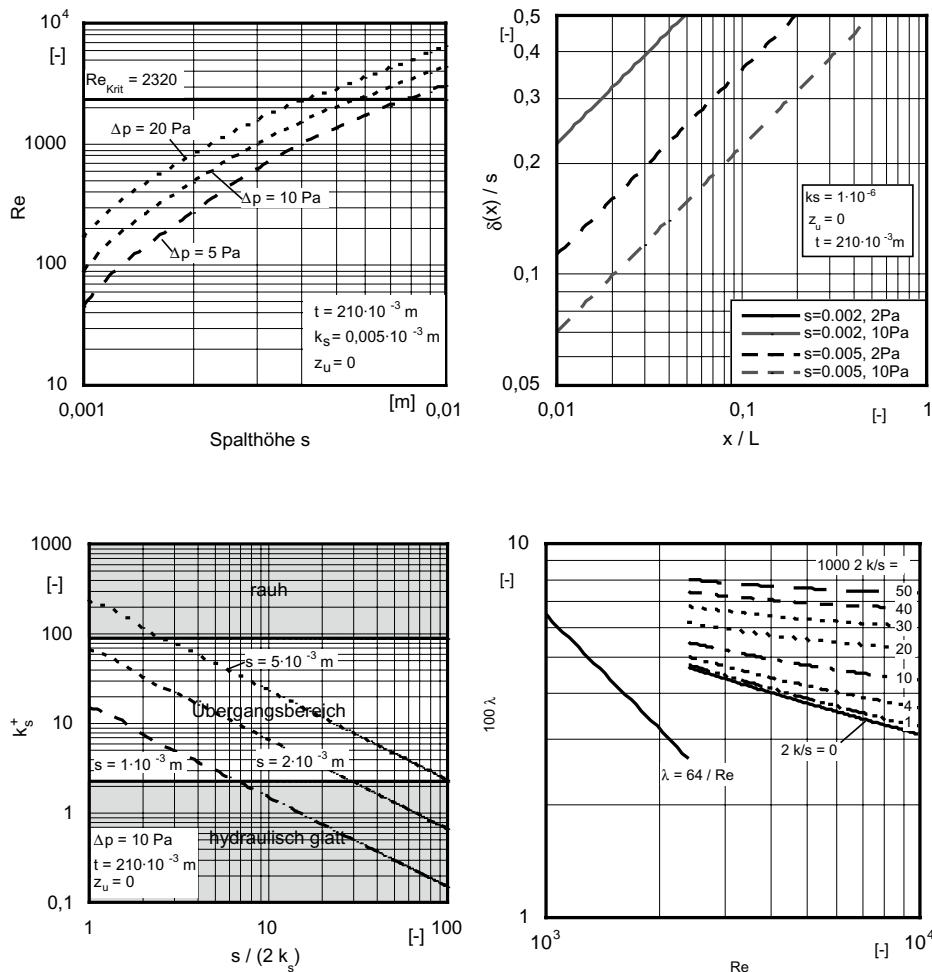


Bild 8: Parametervariationen für Spaltströmungen. Dargestellt sind $Re(h)$ für verschiedene Druckdifferenzen Δp , $\delta(x)/s(x/L)$ für verschiedene Spalthöhen s und Druckdifferenzen Δp , $k_s^+(s/(2k_s))$ für verschiedene Spalthöhen sowie $\lambda(Re)$ für verschiedene Werte von $2k/s$ (Nikuradse-Diagramm, z.B. [11]).

zielt werden. Der einfache Ansatz liegt zwischen den Ergebnissen der 2- und 3-dimensionalen Betrachtung mit CFD.

Für größere Spalthöhen weichen die berechneten Druckverläufe im Spalt deutlich voneinander ab. Sowohl die 2- als auch die 3-dimensionale Simulation mit CFD weist einen deutlich größeren Eintrittsverlust aus, als der einfache Ansatz. Der Druckverlust im Spalt selbst (Steigung der dargestellten Geraden) weicht nicht stark voneinander ab.

In Tabelle 1 sind für verschiedene Spalthöhen und Druckdifferenzen die mit dem o.a. einfachen Ansatz ermittelten mittleren Strömungsgeschwindigkeiten sowie Ergebnisse der 2- und 3-dimensionalen Simulation mit CFD wiedergegeben. Die Modellierung des Spaltes der Spalthöhe $s = 1 \text{ mm}$ führte nur im 3-dimensionalen Fall zur Konvergenz bei der Berechnung mit CFD. Auch bei der Spalthöhe $s = 2 \text{ mm}$ sind deutliche Konvergenzprobleme bei der 2-dimensionalen Modellierung vorhanden.

Mit dem beschriebenen einfachen Ansatz für die Spaltströmung lässt sich das zeitliche Verhalten der Durchströmung – findet eine Durchströmung statt oder wird die Luft nur innerhalb des Spaltes hin- und herbewegt? – grob abschätzen. In Bild 10 ist die Grenzfrequenz für verschiedene Spalte wiedergegeben. D.h., es ist die Frequenz von Druckschwankungen dargestellt, für die ein betrachtetes "Luftpaket" gerade genug Zeit hat, den Spalt vollständig zu durchströmen.

Zeitliches Verhalten,
"Grenzfrequenz" von
Druckschwankungen

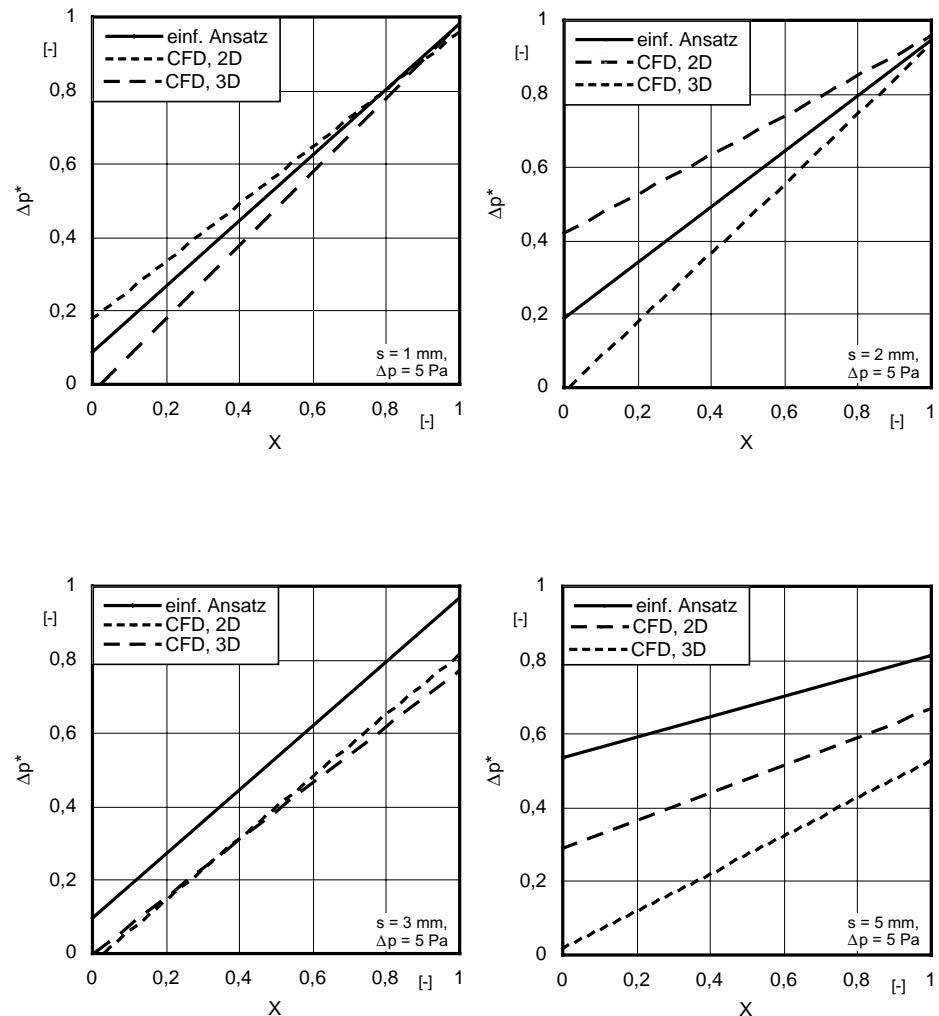


Bild 9: Druckabfall über einen Spalt, Vergleich von Ergebnissen anhand des einfachen Ansatzes gem. Gl. 12 mit CFD-Berechnungen.

Tabelle 1: Strömungsgeschwindigkeit im Spalt vom Typ S V. Ergebnisse aus einfachem Ansatz sowie von 2- und 3-dimensionalen Simulationsrechnungen mit CFD. Gegeben sind jeweils die Werte für Druckdifferenzen von 2, 5 und 20 Pa.

s [mm]	Einf. Ansatz [m/s]			CFD, 2D [m/s]			CFD, 3D [m/s]		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	0,14	0,34	1,3	--	--	--	0,08	0,18	0,72
2	0,45	1,0	3,1	0,12	0,38	1,5	0,28	0,68	2,4
3	0,78	1,6	3,9	0,7	1,4	3,3	0,50	1,3	3,8
5	1,2	2,1	4,8	0,6	1,2	2,8	--	2,2	--

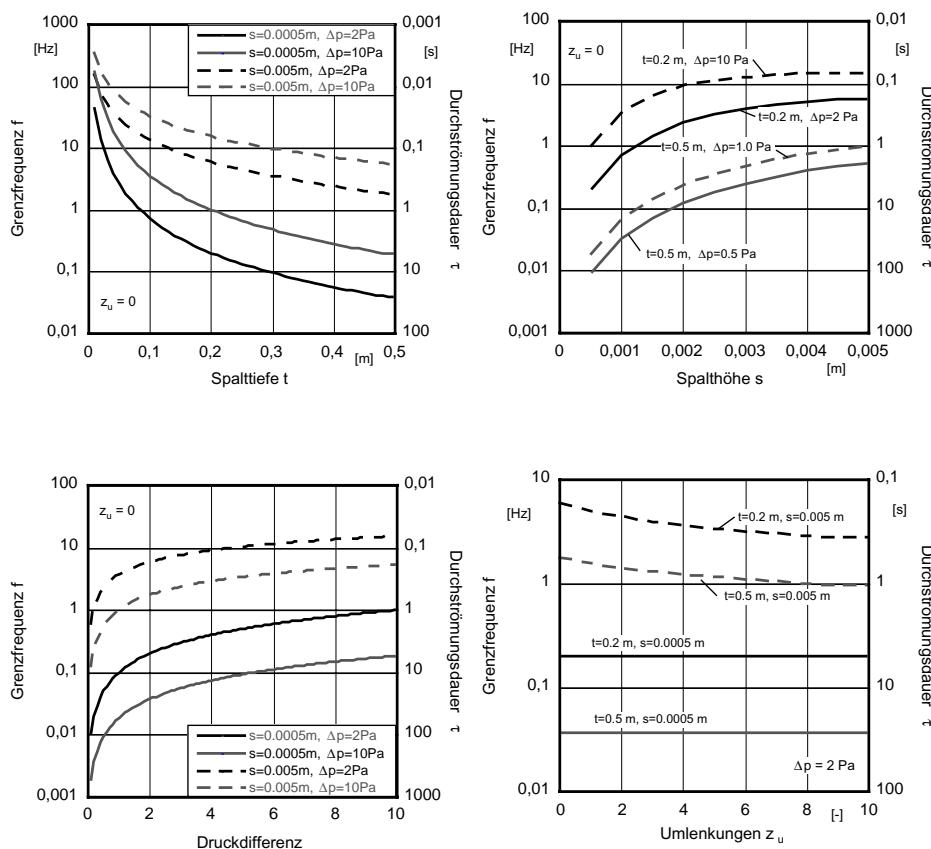


Bild 10: Parametervariationen für Spaltströmungen. Dargestellt sind die Grenzfrequenz für die Durchströmung von Spalten sowie jeweils die zugehörige Durchströmungsdauer.

2.4 Wärmeübertragung

Für die Beschreibung des Wärmestroms von einem strömenden Medium zu einer festen Be-
randung werden folgende Kenngrößen definiert. Mit

$$q_w = h \Delta T = - \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right)_w \quad (15)$$

h ist der Wärmeüber-
gangskoeffizient wird der Wärmeübergangskoeffizient h beschrieben und in der Nusselt-Zahl

$$\text{Nu} = \frac{h L}{\lambda} = \frac{q_w L}{\lambda \Delta T} \quad (16)$$

dimensionslos gemacht. Die Nusselt-Zahl kann als dimensionsloser negativer Temperaturgradient an der Wand bzw. das Verhältnis zweier Längen – der charakteristischen Länge L und der Dicke der Temperaturgrenzschicht δ_T

$$\text{Nu} = \frac{L}{\delta_T}. \quad (17)$$

betrachtet werden. Alternativ bietet sich an, den Wärmeübergang durch

$$q_w = \frac{\Delta T \rho c_p \bar{u}}{\text{St}} \quad (18)$$

mit einer geeigneten Temperaturdifferenz ΔT – beispielsweise der Differenz zwischen der Temperatur an der Wand und der Temperatur am Außenrand der (Temperatur-) Grenzschicht – darzustellen. Die Stanton-Zahl St ist dabei durch

$$\text{St} = \frac{\text{Nu}}{\text{Re Pr}} \quad (19)$$

definiert und beschreibt das Verhältnis von an der Wand übergehender Wärmestromdichte zur Enthalpiestromdichte der (Außen-) Strömung [10]. Die in dieser Gleichung vorkommende Prandtl-Zahl Pr ist das Verhältnis von kinematischer Viskosität ν und Temperaturleitfähigkeit κ

$$\text{Pr} = \frac{\nu}{\kappa} \quad \text{mit} \quad \kappa = \frac{\lambda}{\rho c_p} \quad (20)$$

und beschreibt das Verhältnis von Impuls- zu Wärmeaustausch in der Strömung. Sie ist eine reine Stoffgröße, hängt i.a. von der Temperatur T und dem Druck p , praktisch meist nur von T ab und hat für Gase und Dämpfe etwa den Wert 1,0. Feuchte Luft hat im hier interessierenden Temperaturbereich den Wert $\text{Pr} = 0,71 \dots 0,72$.

$\text{Pr} \approx 0,71$ Mit der Prandtl-Zahl kann das Verhältnis der Dicken von Temperatur- und Strömungsgrenzschicht durch

$$\frac{\delta_T}{\delta_s} \sim \frac{1}{\sqrt{\text{Pr}}} \quad (21)$$

ausgedrückt werden [10]. Mit o.a. Zahlenwerten für die Prandtl-Zahl beträgt dieses Dickenverhältnis bei Luftströmungen etwa 1,2. Mit Bild 8, rechts oben, kann entsprechend eine Abschätzung der bei konstanter Wandtemperatur zu erwartenden thermischen Einlauflänge erfolgen. Der thermische Einlaufbereich einer laminaren Strömung in einem Rohr kann über

$$\frac{L_T}{d} \approx 0,05 \text{ Re Pr} \quad (22)$$

abgeschätzt werden. Es ergeben sich mit diesem Ansatz für die im vorangegangenen Abschnitt dargestellten Strömungswerte des einfachen Spalts und der Substitution des Rohrdurchmesser d durch den hydraulischen Durchmesser des Spaltes s sehr kurze thermische Einlauflängen von ca. $7,1 \cdot 10^{-4} \text{ m}$ (entsprechend $X = 0,0355$) bei $s = 0,001$ mit $\text{Re} = 10$ bis zu Einlauflängen größer der Spalttiefe $X > 1$ bei $s = 0,005 \text{ m}$ mit $\text{Re} = 2000$ (vgl. Bild 8, rechts oben). Das heißt, bei üblichen Spalthöhen und Druckdifferenzen kann überwiegend von einer thermisch ausgebildeten Strömung ausgegangen werden. In Bild 11 ist qualitativ dargestellt, wie der Wärmeübergangskoeffizient h von der mittleren Strömungsgeschwindigkeit abhängt.

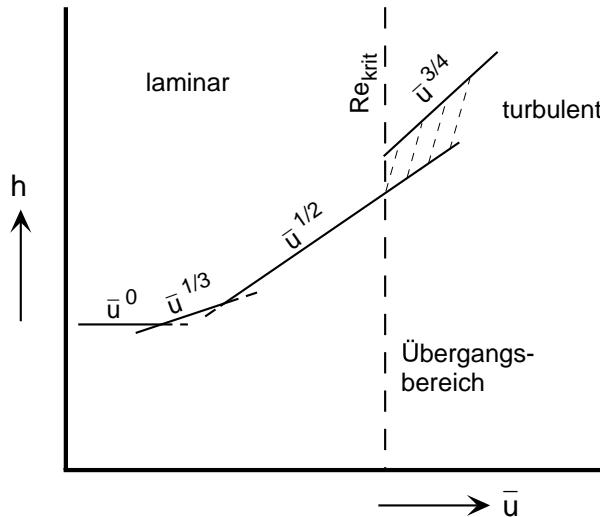


Bild 11: Qualitativer Verlauf des Wärmeübergangskoeffizienten h als Funktion von der mittleren Strömungsgeschwindigkeit \bar{u} [15].

Der Wärmeübergangskoeffizient h hängt darüber hinaus auch von der Temperaturdifferenz zwischen dem strömenden Medium und der überströmten Wandoberfläche ab (Gl. 16). Es kann also nicht ohne weiteres eine Abschätzung der Gegebenheiten erfolgen. Die Wandtemperatur der untersuchten Spalte ist weder zeitlich noch örtlich konstant. Eine grobe Abschätzung des Einflusses der örtlichen Veränderung kann mit den o.a. Zusammenhängen über den Ansatz für die Wandtemperatur

$$T_w(x) = K x^\gamma + T_\delta \quad (23)$$

erfolgen. Für die hier betrachteten langsamen Strömungen ($Ma \rightarrow 0$) gilt $T_\delta = \text{konstant} = T_\infty$. Auch bzw. gerade die Änderung der Durchströmungsbedingungen mit der Zeit führt zudem zu stark wechselnden Werten für den Wärmeübergang und der lokalen Wärmestromdichte. In Bild 12 ist für einen Drucksprung von 2 Pa der zeitliche Verlauf des Wärmeübergangskoeffizienten und der Wärmestromdichte gegeben. Die Werte sind Simulationsergebnisse der CFD-Berechnungen für einen Spalt vom Typ VII mit einer Spalthöhe von 3 mm. Es ist aus Bild 12 ersichtlich, daß das Wandmaterial – wie zu erwarten – einen deutlichen Einfluß auf das dynamische thermische Verhalten in durchströmten Spalten hat. Zur Beschreibung der interessierenden Vorgänge ist es tatsächlich also notwendig, die Betrachtung auf die thermischen Eigenschaften des Wandmaterials zu erweitern.

Um Strömungsvorgänge mit Wärmeübergang zu Wänden mit veränderlicher Temperatur im zeitlichen Verlauf zu beschreiben und Charakteristiken zu erkennen, sind weitere Kenngrößen üblich. Die Biot-Zahl Bi ist das Verhältnis von konvektiver Wärmeübertragung zwischen strömendem Medium und der Wand unter Berücksichtigung der thermischen Eigenschaften des Wandmaterials und der gesamten durch das strömende Medium in Form von Enthalpie transportierten Wärmemenge und wird mit

$$Bi = \frac{h P}{\rho c \bar{u} \sqrt{A}} \quad (24)$$

gebildet [16].

Die Biot-Zahl lässt sich auch als Verhältnis des Wärmeleitwiderstandes im Wandmaterial zum Wärmeübergangswiderstand im strömenden Medium deuten [17]

$$Bi = \frac{L_0/\lambda}{1/h} \quad (25)$$

Eine kleiner Wert für Bi bedeutet demnach, daß der Wärmeleitwiderstand im Körper wesentlich geringer ist, als der Wärmeübergangswiderstand an seiner Oberfläche (vgl. Skizze in Bild 13).

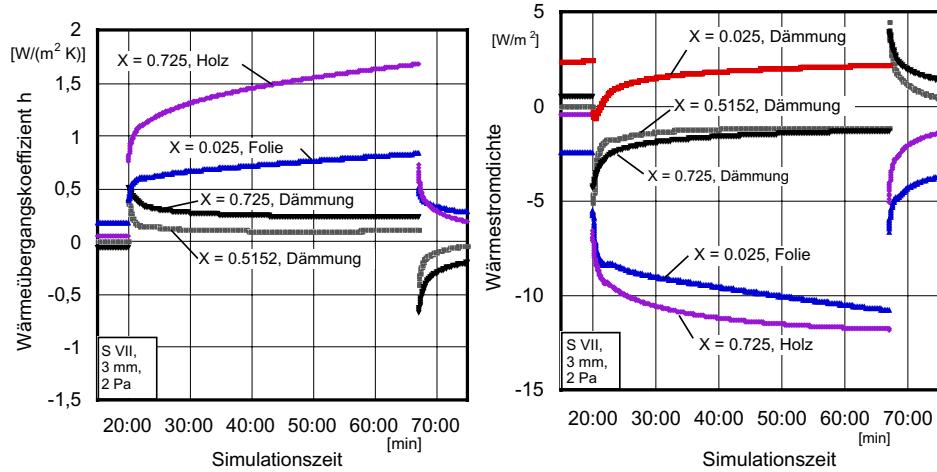


Bild 12: Wärmeübergangskoeffizient und Wärmestromdichte als Funktion von der Simulationszeit. Ergebnisse der CFD-Simulation, Spalt vom Typ VII, 3 mm Spalthöhe, Drucksprung 2 Pa. Der Drucksprung erfolgt bei der Simulationszeit 20 min, bei 60 min wird die aufgebrachte Druckdifferenz wieder zu 0 Pa.

Das Verhältnis der Wärmespeicherkapazitäten von Wandmaterial und strömendem Medium kann für Strömungen in einem Kanal über die Kennzahl C_R beschrieben und durch

$$C_R = \frac{\rho_s c_s A_s}{\rho_f c_f A_f} \quad (26)$$

definiert werden [16]. Dabei wird in [16] von einer wohldefinierten Wandstärke des durchströmten Kanals ausgegangen, anhand derer sich die Querschnittsfläche A_f berechnen lässt. In Bild 14, links, ist dieser Ansatz skizziert.

Während die Querschnittsfläche für das strömende Medium A_f auch in den hier behandelten Spalten einfacher Geometrie leicht zu bestimmen ist, muß für das Wandmaterial eine Annahme hinsichtlich einer thermisch aktiven Wandstärke getroffen werden, um konkrete Werte für C_R berechnen zu können. Man erhält

$$C_R^* = \frac{\rho_s c_s 2 d_s^*}{\rho_f c_f d_f} \quad (27)$$

mit der thermisch aktiven Wandstärke von d_s^* je Spaltwand. In Bild 14, rechts, ist dies skizziert. Darüberhinaus sind in entsprechenden Spalten im Bauwesen meist die Wandmaterialien der Spaltoben- und -unterseite unterschiedlich. Der Temperaturgradient an der Bauteiloberfläche $\partial T / \partial y$ kann z.B. für periodisch sich ändernde Temperaturrandbedingungen aus dem in [18] beschriebenen Ansatz erhalten werden.

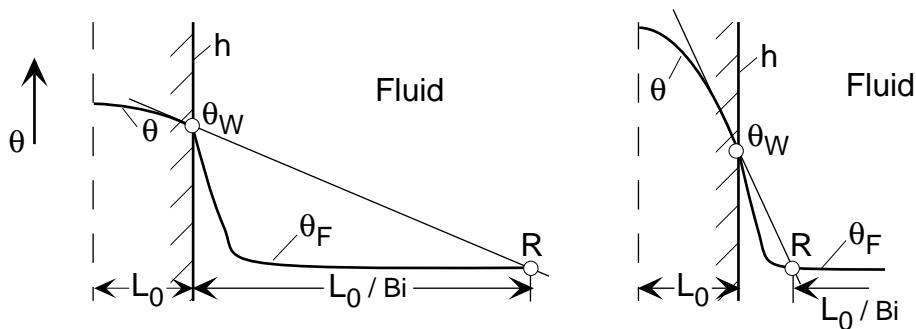


Bild 13: Bedeutung der Biot-Zahl für den Temperaturverlauf in der Nähe der Oberfläche. Kleine Biot-Zahl links, große Biot-Zahl rechts [17].

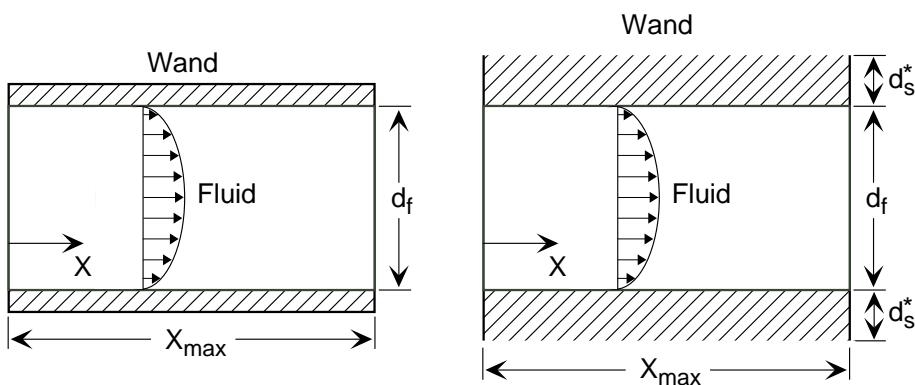


Bild 14: Prinzipskizze zur Festlegung bzw. Bestimmung der thermisch aktiven Wandstärke.

2.5 Stoffübertragung

2.5.1 Grundlagen und Ansätze

Unter der Annahme, daß die Konzentration des diffundierenden Stoffes (hier: Wasserdampf in Luft) gering ist und sowohl die Strömungsgeschwindigkeiten als auch die Temperaturunterschiede klein sind, können alle beteiligten Stoffwerte als konstant angesehen werden.

Die Sättigungskonzentration von Wasserdampf in Luft im Temperaturbereich zwischen 0 und 20°C und Gesamtdrücken zwischen 980 hPa und 1015 hPa liegen zwischen ca. 0,4 und 1,5 Masse-%. Die Strömungsgeschwindigkeiten in den betrachteten Spalten liegen zwischen ca. 0,1 und maximal ca. 5 m/s. Die Temperaturunterschiede liegen bei max. 20 K. Für die hier betrachteten Austauschvorgänge sind also alle genannten Parameter von geringer Größenordnung.

Es sind dann bei erzwungener Strömung die Strömung und der Stoffübergang unabhängig voneinander und auch unabhängig von einem etwa gleichzeitig vorhandenen Wärmeübergang. Für kleine Konzentrationsunterschiede gilt

$$\frac{(\rho - \rho_m)}{\rho_m} = \frac{(c - c_m)}{c_m} \quad \text{bzw.} \quad (28)$$

$$\frac{(\rho - \rho_m)}{\rho_m} = \alpha (T - T_m) \quad (29)$$

d.h., der thermische Ausdehnungskoeffizient α entspricht dem Kehrwert der Konzentration $1/c_m$ [9].

Aus der formalen Übereinstimmung der Grundgleichungen folgt, daß zwischen Wärme- und Stoffübertragung eine Analogie besteht. Die Analogie hat zur Folge, daß für geometrisch ähnliche Körper und bei ähnlichen Randbedingungen die aus der Wärmeübertragung gewonnenen Beziehung $Nu = f(Re, Pr)$ auch für die Stoffübertragung gilt, wenn die Kennzahlen der Wärmeübertragung durch die entsprechenden der Stoffübertragung ersetzt werden [9].

Wärmeübertragung	T	q	λ	κ	$Pr = \frac{\nu}{\kappa}$	$Nu = \frac{q_w l}{\lambda (T_m - T_w)}$
Stoffübertragung	c	j	D	D	$Sc = \frac{\nu}{D}$	$Sh = \frac{j_w l}{D (c_m - c_w)}$

Die genannten Annahmen sowie die Analogie zwischen Wärme- und Stofftransport wird bei der Betrachtung der Frage, wie "effektiv" der konvektive Feuchttetransport in eine Konstruktion tatsächlich ist bzw. wie diese "Effektivität" ermittelt werden kann, herangezogen. Es wird bei der Betrachtung des *wirksamen Feuchttetransports* durch die Konstruktion der Wärmeeintrag infolge strömender Luft berücksichtigt. Ansätze für die Beschreibung der Strömung und des Wärmetransports zwischen Strömung und (Spalt-) Wand wurden in den vorangegangenen Abschnitten beschrieben. Besonders nützlich ist dabei die o.a. Analogie zwischen Wärme- und Stoffübertragung: Anhand von CFD-Simulationsrechnungen kann das wärmetechnische Verhalten der durchströmten Spalte detailliert bestimmt werden. Mit den Analogie-Ansätzen kann eine entsprechende Abschätzung des Stoffübergangs erfolgen.

Die Stoffübertragung – der Transport von Wasserdampf in die Oberflächenmaterialien der Leckagen – kann in die Schritte

1. Stofftransport durch die Strömungsgrenzschicht zur Bauteiloberfläche hin,
2. Stoffübergang an der Bauteiloberfläche und
3. Stofftransport in das Bauteil (Material) hinein – Speicherung der Feuchtigkeit

aufgeteilt werden. Es ist üblich, die Schritte 1 und 2 in einen Stoffübergangskoeffizienten (hier: Wasserdampfübergangskoeffizient) zusammenzufassen.

2.5.2 Stoffübergang

Der Transportmechanismus in der Grenzschicht ist die Fick'sche Diffusion. Die treibende Kraft ist das Konzentrationsgefälle zwischen Grenzschichtaußenseite und überströmter Wand¹. Die zu bestimmende Größe ist der Feuchte- bzw. Wasserdampfübergangskoeffizient β . Das Verhältnis von Wärme- (h) zu Stoffübergangskoeffizient (β) bei laminarer Strömung kann mit

$\beta \approx 3,72 \cdot 10^{-3} \text{ h} [\text{m/s}]$

¹Bei idealem Gas und vernachlässigbarem Temperaturgradienten kann das Partialdruckgefälle herangezogen werden (siehe z.B. [10]). Diese Vereinfachung wird hier nicht übernommen, da $(\partial T / \partial y)$ sehr groß sein kann.

$$\frac{h}{\beta} = \rho c_p \left(\frac{\text{Sc}}{\text{Pr}} \right)^{2/3} \quad (30)$$

angegeben werden [19]. Für die Beschreibung turbulenter Strömungen kann in Gl. 30 der Exponent zu 0,58 gesetzt werden. Die Schmidt-Zahl Sc beschreibt dabei das Verhältnis von Impuls- zu Stoffaustausch und ist definiert als

$$\text{Sc} = \frac{\eta}{\rho D} = \frac{\nu}{D}. \quad (31)$$

Die Schmidt-Zahl ist eine Eigenschaft der betrachteten Stoffpaarung und beträgt bei dem "Stoffpaar" Wasserdampf/Luft etwa 0,6. In Gasgemischen sind Strömungs-, Temperatur- und Diffusionsgrenzschicht etwa gleich dick, was aus

$$\frac{\delta_D}{\delta_T} \sim \sqrt{\frac{\text{Pr}}{\text{Sc}}} \quad , \quad \frac{\delta_D}{\delta_S} \sim \sqrt{\frac{1}{\text{Sc}}} \quad (32)$$

und $\text{Pr} \approx \text{Sc} \approx 1$ folgt. Die in Bild 8 auf Seite 13 rechts oben angegebenen Grenzschichtdicken und die abzuleitende Einlauflänge können also für entsprechende Abschätzungen beim Stoffübergang in etwa übernommen werden. In Bild 15 ist für die in Bild 12 dargestellten Simulationsergebnisse der Stoffübergangskoeffizient gemäß Gleichung 30 wiedergegeben.

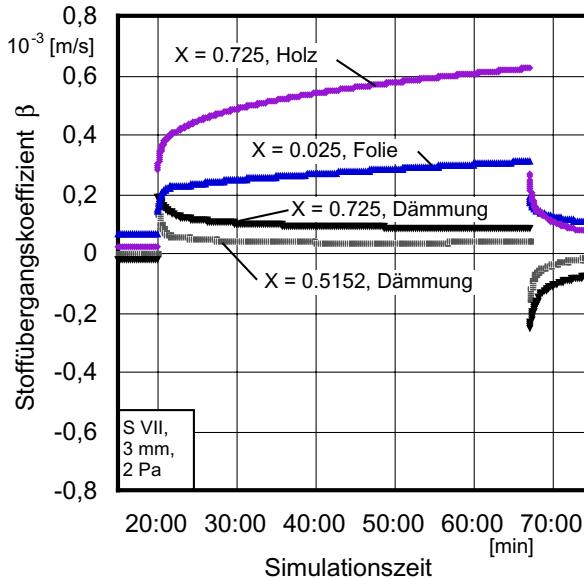


Bild 15: Stoffübergangskoeffizient als Funktion von der Simulationszeit. Die Werte sind mit den Ergebnissen der CFD-Simulation für den Wärmeübergangskoeffizienten aus Bild 12, links gem. Gl. 30 ermittelt.

In Analogie zur Nusselt-Zahl bei der Wärmeübertragung kann wie oben bereits angegeben für die Stoffübertragung die Sherwood-Zahl gemäß

$$\text{Sh} = \frac{j_w L}{\rho D \Delta c} = \frac{\beta L}{D} \quad (33)$$

gebildet werden, wobei Δc eine geeignete Konzentrationsdifferenz ist; z.B. die Konzentrationsdifferenz zwischen der Grenzschichtaußenseite und der Wand. Dabei kann in vorliegender Fragestellung angenommen werden, daß an der Wand stets bei der jeweiligen Wandtemperatur Sättigung herrscht [5]. Für die Sherwood-Zahl gibt es für spezielle Fälle empirische Ansätze. Für den Stofftransport in einem strömenden, binären Gemisch zu einer überströmten Wand, bei der die wandnormale Geschwindigkeit vernachlässigt werden kann (die wandnormale Geschwindigkeit ist im Verhältnis zur Strömungsgeschwindigkeit gering), wird z.B. in [10] folgender Ansatz gegeben:

$$\text{Sh} = 0,331 \text{Re}^{1/2} \text{Sc}^{1/3}. \quad (34)$$

Annahme:
 $c_w = c_s(\theta_w)$

Es muß $Sc \gtrsim 1$ und $f_w = 0$ gelten. Für eine voll ausgebildete Kanalströmung wird

$$Sh = \frac{Re Sc \lambda / 8}{1 + 5 \sqrt{\lambda / 8} \{ Pr - 1 + \ln [(5 Pr + 1) / 6] \}} \quad (35)$$

gegeben. Dabei sind jedoch Strömungen über Wände mit konstanter Temperatur zugrundegelegt. Diese Ansätze werden daher im weiteren nicht verwendet.

2.5.3 Stofftransport im Material

Der Stofftransport zwischen strömender Luft und Spaltbegrenzungswänden sowie der Stofftransport in die Konstruktion hinein beeinflussen sich gegenseitig. Dieser Stofftransport in ein Bauteil bzw. der Stofftransport durch poröse Baustoffe – als solche können praktisch alle hier interessierenden Baustoffe erachtet werden – ist in einer überwältigenden Vielzahl von Publikationen und Arbeiten behandelt worden (siehe z.B. [6, 20, 21, 22]). Im vorliegenden Fall ist insbesondere das dynamische Feuchtetransportvermögen von Interesse.

Entfeuchtung wird nicht betrachtet

Die wärmetechnischen Randbedingungen können sich bei einem durchströmten Spalt relativ schnell ändern. So ist es für die Massenbilanz mit entscheidend, wie schnell Feuchtigkeit aufgenommen und abgegeben werden kann. Dies hängt auch davon ab, wie schnell aufgenommene Feuchtigkeit von der Bauteiloberfläche in das innere transportiert (Befeuchtung) bzw. wie schnell die Feuchtigkeit an die Oberfläche transportiert wird (Entfeuchtung, wird im weiteren nicht betrachtet). Die Entwicklung von Modellen oder Ansätzen hierzu kann nicht Gegenstand des vorliegenden Projektes sein. Es wird daher versucht, einen für die Abschätzung der Vorgänge geeigneten, möglichst einfachen Ansatz zu finden.

Künzel [21] hat für die dynamische Berechnung von gekoppelten Wärme- und Feuchtetransportvorgängen entsprechende Ansätze vorgeschlagen. Eine Abschätzung des Feuchtetransports bzw. der Feuchtetransportgeschwindigkeit in Materialien kann auf der Basis der dort gegebenen Gleichungen

$$j_{M,v} = \frac{\delta}{\mu} \nabla p \quad (36)$$

$$j_{M,w} = \frac{\eta}{\eta_{ref}} D_w \frac{\partial w}{\partial \varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial y} \quad \text{und damit} \quad (37)$$

$$j_M = j_{M,v} + j_{M,w} \quad (38)$$

anhand von wenigen Materialkenngrößen durchgeführt werden. Wird dabei nur der eindimensionale Transport betrachtet, ist der benötigte Gradient $\partial p / \partial y$ durch

$$\frac{\partial p}{\partial y} = \frac{\partial p}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial y} \quad (39)$$

gegeben. Der Temperaturgradient $\partial T / \partial y$ kann, wie in Abschnitt 2.4 bemerkt, z.B. aus dem in [18] beschriebenen Ansatz erhalten werden. Da in vorliegendem Projekt die gekoppelte Berechnung des Temperatur- und Feuchtefeldes nicht möglich ist und eine willkürliche Festlegung des Gradienten $\partial \varphi / \partial y$ vermieden werden soll, erfolgt die Abschätzung des Stofftransports und der -speicherung über den weiter unten beschriebenen Ansatz von Otto, der beide genannten Effekte zusammen beschreibt.

Otto [22] hat für periodische Randbedingungen ein Verfahren zur Abschätzung des dynamischen Feuchtespeicherverhaltens von Flächenbauteilen entwickelt. Aus dem dort gegebenen Ansatz lässt sich die Dicke der hygrisch wirksamen Schicht y_{hyg} von Bauteilen sowie deren wirksame hygrische Speicherkapazität c_F in Abhängigkeit von der betrachteten Periodendauer τ

$$\tau = \frac{2 \pi}{\omega} \quad (40)$$

vereinfacht mit den Gleichungen

$$y_{\text{hyg.}} = \left(\sqrt{\omega} \sqrt{\frac{\mu}{D c_s} \rho_w \frac{\partial u}{\partial \varphi}} \right)^{-1} \quad (41)$$

$$c_F = \frac{1}{\omega} B_F \quad \text{worin} \quad (42)$$

$$B_F = \frac{\beta c_s U_{F,0}}{\beta c_s + U_{F,0}} \quad \text{mit} \quad (43)$$

$$U_{F,0} = \left| S_F \sqrt{i} \tanh \left(R_F S_F \sqrt{i} \right) \right| \quad \text{wobei} \quad (44)$$

$$S_F = \sqrt{\omega} \sqrt{\frac{D c_s}{\mu} \rho_w \frac{\partial u}{\partial \varphi}} \quad \text{und} \quad (45)$$

$$R_F = \frac{y_{\text{hyg.}} \mu}{D c_s} \quad \text{ist,} \quad (46)$$

abschätzen. Dabei ist $U_{F,0}$ der Schichtspeicherkoefizient für den Fall, daß der Schichtspeicherkoefizient auf der Ausgangsseite $U_0 \rightarrow 0$ geht, d.h. in der betrachteten Tiefe $y_{\text{hyg.}}$ für das gewählte ω keine Änderung der Feuchte vorliegt [18].

Es bietet sich an, auch für den Stoffübergang eine Kennzahl zu verwenden, die sowohl den Transport im Fluid als auch denjenigen im Feststoff berücksichtigt, d.h. das Verhältnis von Stoffübergang zu Stofftransport beschreibt. Mit

$$Bi' = \beta \frac{s}{D} \quad (47)$$

wird die Biot'sche Kennzahl für den Stofftransport definiert [19]. Hierin ist s eine charakteristische Schichtdicke im Feststoff. Der Stofftransport im Feststoff kann dabei durch die mit Gleichung 42 ermittelte Speicherfähigkeit

$$\frac{s}{D} = \frac{\rho_w}{c_F} \quad (48)$$

ersetzt werden.

2.5.4 Verwendete Stoffwerte

Die in den Gleichungen 41 und 42 eingehenden Sorptionseigenschaften der betrachteten Materialien werden über den Ansatz gemäß [23]

$$u = C_0 \left(C_1 \frac{\ln(\varphi)}{C_2} \right)^{(-1/C_3)} \quad (49)$$

berechnet. Dabei werden die Koeffizienten für Mineralwolle aus [23] übernommen und mit der Dichte 60 kg/m^3 entsprechend in volumenbezogene Werte umgerechnet. Die Koeffizienten für Holz und Mauerwerk werden über die in [22] gegebenen Werte ermittelt. Die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl wird mit dem Ansatz aus [22]

$$\mu = e^{C_0 + C_1 \varphi^2 + C_2 \varphi^4} \quad (50)$$

sowie den Koeffizienten für Holz und Mauerwerk aus [22] und für Dämmung aus [23] bestimmt. In Tabelle 2 sind die verwendeten Koeffizienten C_i angegeben.

Der Diffusionskoefizient von Wasserdampf in Luft wird nach dem Ansatz von Fuller [24]

$$D \approx 1,91 \cdot 10^{-9} \frac{p_0}{p} T^{1,75}$$

$$D_{1,2} = \frac{1,013 \cdot 10^{-7} T^{1,75} \left(1/\tilde{M}_1 + 1/\tilde{M}_2 \right)^{1/2}}{p \left[\left(\sum v \right)_1^{1/3} + \left(\sum v \right)_2^{1/3} \right]} \quad (51)$$

Tabelle 2: Bei den Berechnungen verwendete Koeffizienten für die Sorptionsisothermen nach Gl. 49 sowie für die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl nach Gl. 50.

	Dämmung		Holz		Mauerwerk	
	u	μ	u	μ	u	μ
C_0	0,0059	1,043	0,063	5,167	0,019	2,381
C_1	0,0360	0,094	0,025	-0,075	0,062	0
C_2	$1,22 \cdot 10^{-6}$	-1,60	0,38	-5,283	0,050	-1,699
C_3	4,65	-	2,73	-	2,37	-

berechnet. Die (massebezogene) Sättigungskonzentration von Wasserdampf in Luft wird über den Wasserdampfpartialdruck bei Sättigung nach [25]

$$p_s = 10^5 220,93 e^{\frac{647,25 b(T)}{T}} \quad \text{mit} \quad (52)$$

$$b(T) = \sum_i A_i \left(\left| 1 - \frac{T}{647,25} \right| \right)^{\frac{i+1}{2}} \quad \text{worin}$$

$$A = \begin{bmatrix} -7,8889166 \\ 2,5514255 \\ -6,716169 \\ 33,239495 \\ -105,38479 \\ 174,35319 \\ -148,39348 \\ 48,631602 \end{bmatrix} \quad \text{ist}$$

und

$$c_s = \frac{\rho_L \tilde{M}_W p_s}{\tilde{M}_L (p - p_s)} \quad (53)$$

ermittelt.

2.6 Beurteilung des wirksamen Feuchteeintrags

Es werden zur Beurteilung des wirksamen Feuchteeintrags partielle Flächen im Spalt definiert, für deren zugehöriges Bauteilvolumen mit der Schichtdicke y_{hyg} , die Änderung der Materialfeuchte bestimmt wird. Um die Stellen X_i (siehe Bild 6) werden mit der Spaltbreite $l=1 \text{ m}$ und der partiellen Tiefe δX_i

$$\delta X_i = \frac{1}{2} (X_{i+1} - X_{i-1}) \quad (54)$$

Flächen der Größe

$$A_i = \delta X_i (x_{\max}^* + y_{\max}^*) l \quad (55)$$

gebildet (siehe Bild 16). Dabei werden die Restflächen jeweils der Fläche $A_{i=N}$ zugeordnet. Bei den Spalten vom allgemeinen Typ "S VII" entsprechen infolge der gewählten vereinfachten Mittellinien die Flächen nicht unbedingt realen Flächen. Vereinfachend wird keine Korrektur hierfür vorgesehen. Für die wie beschrieben ermittelten Teilflächen wird bei der Beurteilung des wirksamen Feuchteeintrages anhand der aus CFD-Simulationsrechnungen gewonnenen thermischen Randbedingungen für den jeweils betrachteten Zeitraum angenommen, daß räumlich und zeitlich konstante thermische und hygrische Bedingungen vorliegen.

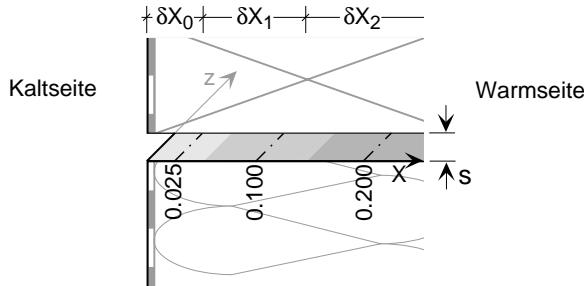


Bild 16: Skizze zur Bildung der Spalt-Mittelungsflächen.

Die durch den Spalt strömende Luft transportiert die Dampfmenge

$$j_s = \dot{V} c_s \quad (56)$$

Die wirksame hygrische Schichtdicke y_{hyg} wird mit dem Ansatz aus [22] (siehe Gleichung 41) für die Periodendauer 2 min, 20 min und 40 min mit der mittleren Schichttemperatur des Materials $\theta_{M,m}$ und der mittleren Feuchte des Materials in der wirksamen Schicht $\varphi_{M,m}$ bestimmt. Die mittleren Daten für die betrachtete Materialschicht werden – stark vereinfacht – durch

$$\theta_{M,m} = \theta_w(X) \quad \text{und} \quad (57)$$

$$\varphi_{M,m} = \varphi(\theta_w(X), \theta_s, \varphi_s) \quad (58)$$

angenommen. Gleichung 58 entspricht der Annahme, daß die relative Luftfeuchte im Material innerhalb der betrachteten Schichtdicke "y_{hyg}" der zur Temperatur θ_w und der Beladung bei θ_s und φ_s gehörigen Feuchte entspricht.

Die Speicherkapazität der wirksamen hygrischen Schicht wird mit diesen Näherungswerten gem. Gl. 42 berechnet, der Stoffübergang von der Strömung an die Wand wird über die Analogie von Wärme- und Stoffaustausch gem. Gleichung 30 anhand der Ergebnisse der Strömungssimulationen für den Wärmeübergangskoeffizienten h bestimmt.

Damit stehen für den betrachteten Vorgang zwei Transport- und eine (gekoppelte) Transport- und Speichergeschwindigkeit zur Verfügung. Auf der Basis der Grundannahme, daß zu jeder betrachteten Zeit und an jeder betrachteten Stelle jeweils die geringste dieser Geschwindigkeiten maßgeblich für den *wirksamen* Feuchteeintrag ist, erfolgt die Bewertung der betrachteten

Leckagen anhand des Vergleichs der Änderung der Materialfeuchte der oberflächennahen Schicht in der Periode der Dauer τ

$$\Delta u = \begin{cases} j_S \tau \frac{1}{V_i} & \text{wenn } \min\{j_S, j_W, c_F\} = j_S, \\ j_W \tau \frac{1}{V_i} & \text{wenn } \min\{j_S, j_W, c_F\} = j_W, \\ c_F \frac{1}{V_i} & \text{sonst, wobei} \end{cases} \quad (59)$$

$$V_i = A_i y_{\text{hyg.}} \quad \text{ist.} \quad (60)$$

D.h., es wird mit der hygrisch wirksamen Schichtdicke ein partielles Volumen berechnet und für die jeweils betrachtete Periodendauer die Feuchteänderung in diesem Volumen bestimmt. Als "kritisch" wird in der weiteren Auswertung eine prozentuale Änderung der so ermittelten Stofffeuchte in der oberflächennahen Schicht von über 4 % betrachtet. Dies entspricht dem Mittelwert der in DIN 4108-3:2001-07 [26] genannten Werte für Holz und Holzwerkstoffe.

3 Meßtechnische Untersuchungen

3.1 Allgemeines

Der erforderliche Abgleich gewählter CFD-Berechnungs-Modelle erfolgt anhand von Meßwerten. Die Meßwerte werden an Spaltaufbauten mit einfacher Geometrie gewonnen, die in einer Doppel-Klimakammer den notwendigen Temperatur- und Druckunterschieden ausgesetzt werden.

Die meßtechnischen Untersuchungen erfolgen in der Doppel-Klimakammer des Fachgebiets Bauphysik. Die Klimakammer hat die Maße $l = 3,6\text{ m}$; $b = 2,7\text{ m}$; $h = 2,1\text{ m}$. Die Umgebungs- und Randbedingungen sind für 'außen' in dem Bereich $-20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 40^\circ\text{C}$ und für 'innen' in dem Bereich $10^\circ\text{C} \leq \theta \leq 30^\circ\text{C}$ weitestgehend frei wählbar.

Die Bauteil- bzw. Spalttemperaturen werden mit Platin-Widerstandsthermometern vom Typ Pt 1000 1/3 DIN B gemessen. Die Verwendung von Platin-Widerstandsthermometern macht eine Abschätzung darüber erforderlich, ob die Eigenerwärmung des Widerstandes bei der jeweils vorgesehenen Anwendung einen signifikanten Meßfehler erzeugt. Die Verlustleistung des Widerstandsthermometers errechnet sich zu

$$P = R I^2 \quad (61)$$

wobei in vorliegendem Projekt mit einem Konstantstrom von $10\ \mu\text{A}$ gemessen wird. Die Verlustleistung entspricht damit ca. $3,2\ \text{mW}/\text{m}^2$ und kann vernachlässigt werden (die Fläche des Pt 1000-Sensors beträgt ca. $3,1 \times 10,2\ \text{mm}^2$). Die infolge des geringen Stromes kleinen Meß-Spannungen setzen jedoch eine gute Abschirmung der Meßleitungen sowie den Einsatz von Meßgeräten mit einer entsprechenden Empfindlichkeit voraus.

3.2 Versuchsaufbau

Gemessen werden Oberflächentemperaturen in den Spalten sowie – auszugsweise – der Wärmestrom in die Konstruktion im Spaltbereich. In Bild 17 ist skizziert, wie die Meßstellen verteilt werden.

Die meßtechnisch untersuchten Spalte werden aus den Materialien Holz (gehobelt) und Polystyrol-Hartschaum erstellt. Bild 18 zeigt den Einbau der Temperaturfühler (Pt 1000) bzw. der Wärmestromsensoren. Der so erstellte Meßaufbau wird für alle betrachteten Spalthöhen verwendet. Die Spalte werden jeweils in der Doppelklimakammer kalibriert, d.h. die Druckverlust-Volumenstrom-Kennlinie wird individuell für jede Spalthöhe im eingebauten Zustand ermittelt. Die Kalibrierung erfolgt bei Raumbedingungen. Anhand der so gewonnenen Daten kann im Vergleich mit Simulationsergebnissen die tatsächliche Spalthöhe abgeschätzt werden.

3.3 Meßergebnisse

Die exakten Dimensionen der meßtechnisch untersuchten Spaltleckagen sind nicht festzulegen. Der Einbau der Temperaturfühler sowie die relativ leichte Verformbarkeit des Dämmmaterials hat zu Folge, daß die inneren Oberflächen der Spalte deutliche Unebenheiten aufweisen. In den Tabellen 3 bis 5 sind die aus der Kalibrations-Messung ermittelten Volumenströme den anhand des in Abschnitt 2.3 gegebenen einfachen Ansatzes berechneten Werten sowie den Ergebnissen der CFD-Simulationsrechnungen gegenübergestellt.

Es ist Tabelle 3 zu entnehmen, daß der gemessene Spalt "S V" mit der Sollhöhe von 2 mm eine tatsächliche Spalthöhe hat, die zwischen 2 und 3 mm liegt. Der Spalt vom Typ "S V" mit einer Sollhöhe von 5 mm hat, den in Tabelle 4 wiedergegebenen Werten zufolge, eine tatsächliche Spalthöhe von etwas weniger als 5 mm. Der Spalt vom Typ "S VII" mit der Sollhöhe $s = 2\text{ mm}$ liegt tatsächlich – wie der entsprechende Spalt vom Typ S V – etwa zwischen 2 und 3 mm (siehe Tabelle 5).

In Bild 19 sind die Ergebnisse der durchgeföhrten Messungen für den Spalt vom Typ SV mit 2 mm (Soll-) Spalthöhe, in Bild 20 die Meßergebnisse für den Spalt mit der Sollhöhe 5 mm wiedergegeben. In Bild 21 ist für den Spalt vom Typ SV mit 5 mm (Soll-) Spalthöhe die in der Spaltströmung gemessene Lufttemperatur wiedergegeben. In Bild 22 sind die Meßergebnisse für den Spalt vom Typ S VII mit 2 mm (Soll-) Spalthöhe zusammengefaßt. An den Meßergebnissen sind die unterschiedlichen dynamischen thermischen Eigenschaften der Spaltwandmaterialien zu erkennen.

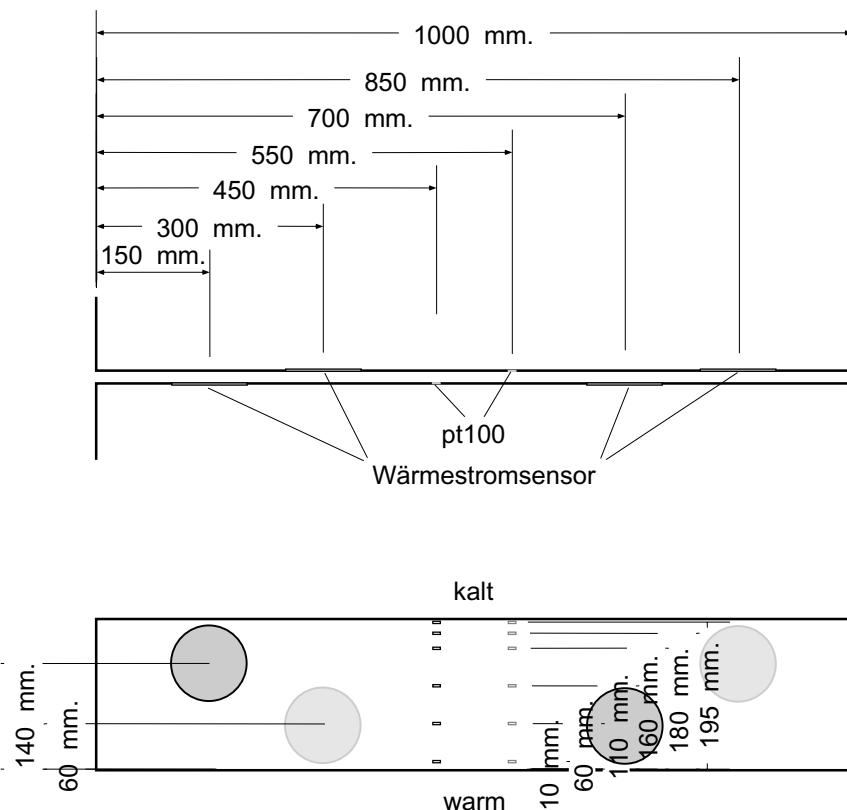


Bild 17: Skizze zur gewählten Verteilung der Meßfühler im einfachen Spalt.

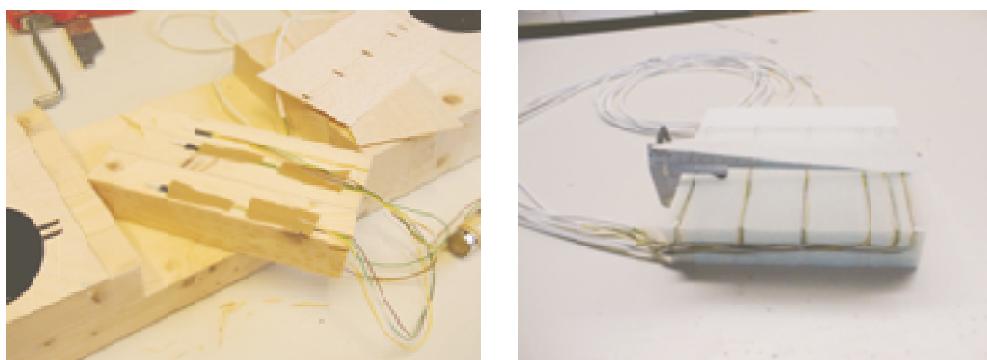


Bild 18: Einbau der Meßfühler in Holz (links) und Polystyrol-Hartschaum (rechts). In dem linken Bild sind zusätzlich zu den Temperatursensoren (Pt 1000) die Wärmestromsensoren zu erkennen.

Tabelle 3: Beim Spalt vom Typ "S V" mit $s = 2 \text{ mm}$ Soll-Spalthöhe gemessene Volumenströme. Zum Vergleich sind Simulationsergebnisse für verschiedene Ansätze gegeben.

Δp [Pa]	Volumenstrom				
	[m³/h]				
	Unterdruck	Überdruck	einf. Ansatz 2 mm	CFD, 3D	
1,0	1,4	1,5	—	—	—
2,0	2,5	2,7	3,24	2,02	4,08
5,0	5,4	6,1	7,34	4,90	9,33
10,0	9,6	11,0	—	6,35	16,4
20,0	17,0	20,0	22,03	17,30	27,0

einf. Ansatz: Anzahl Umlenkungen $z_u=0$, Spalttiefe $t=0,2 \text{ m}$, Querschnittsfläche $A = 1 \text{ m} \cdot s$
 CFD: Querschnittsfläche $A = 1 \text{ m} \cdot s$

Tabelle 4: Kalibrationsdaten zum Spalt vom Typ "S V" mit $s = 5 \text{ mm}$ Soll-Spalthöhe. Zum Vergleich sind Simulationsergebnisse für verschiedene Ansätze gegeben.

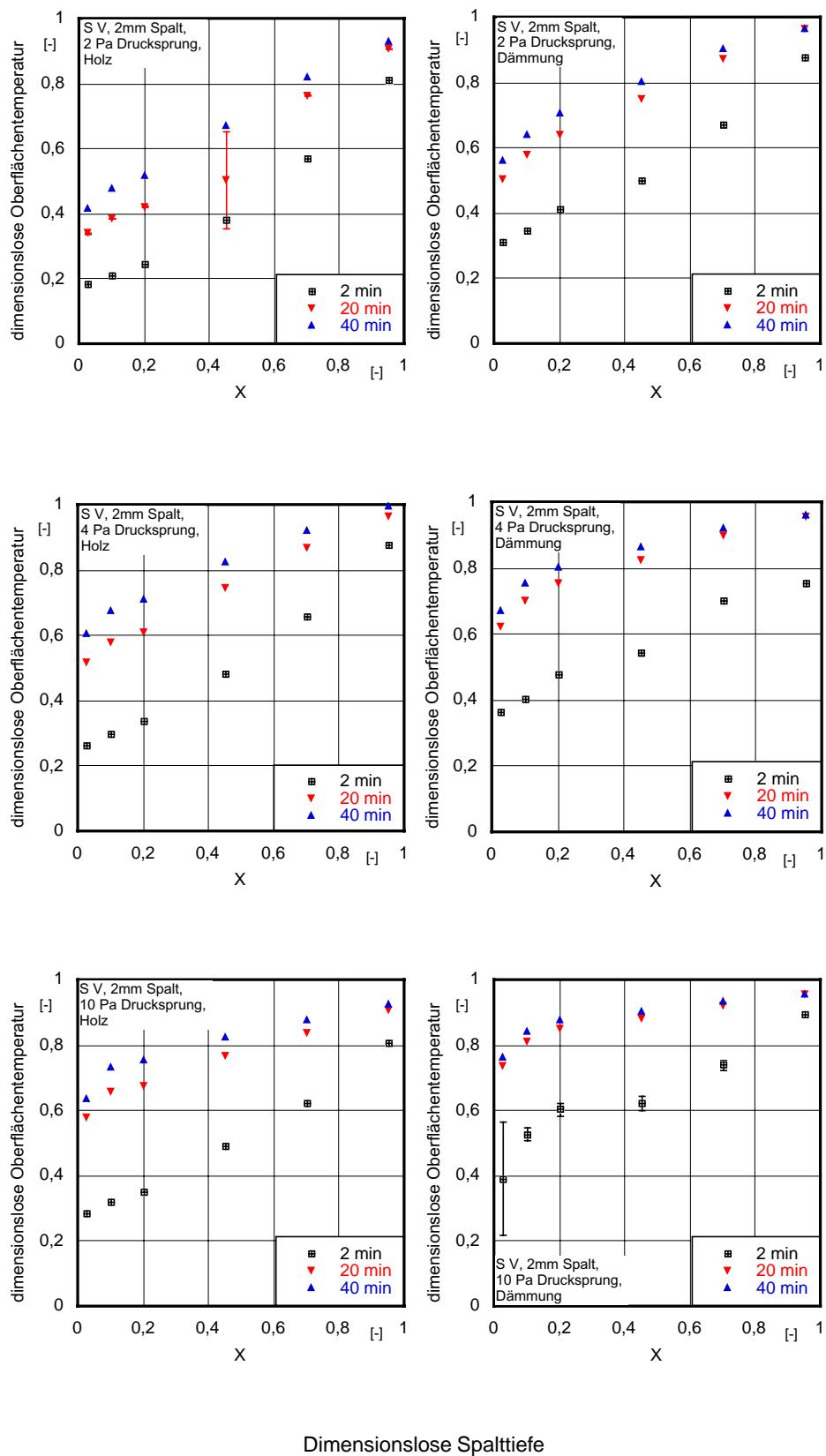
Δp [Pa]	Volumenstrom				
	[m³/h]				
	Unterdruck	Überdruck	einf. Ansatz 5 mm	CFD, 3D	
1,0	8,1	8,6	—	—	—
2,0	12,5	13,4	21,14	4,08	12,98
5,0	22,5	24,1	37,16	9,33	25,54
10,0	34,9	37,4	55,47	16,4	39,78
20,0	54,1	58,0	85,98	27,0	—

einf. Ansatz: Anzahl Umlenkungen $z_u=0$, Spalttiefe $t=0,2 \text{ m}$, Querschnittsfläche $A = 1 \text{ m} \cdot s$
 CFD: Querschnittsfläche $A = 1 \text{ m} \cdot s$

Tabelle 5: Kalibrationsdaten zum Spalt vom Typ "S VII" mit $s = 2 \text{ mm}$ Soll-Spalthöhe. Zum Vergleich sind Simulationsergebnisse für verschiedene Ansätze gegeben.

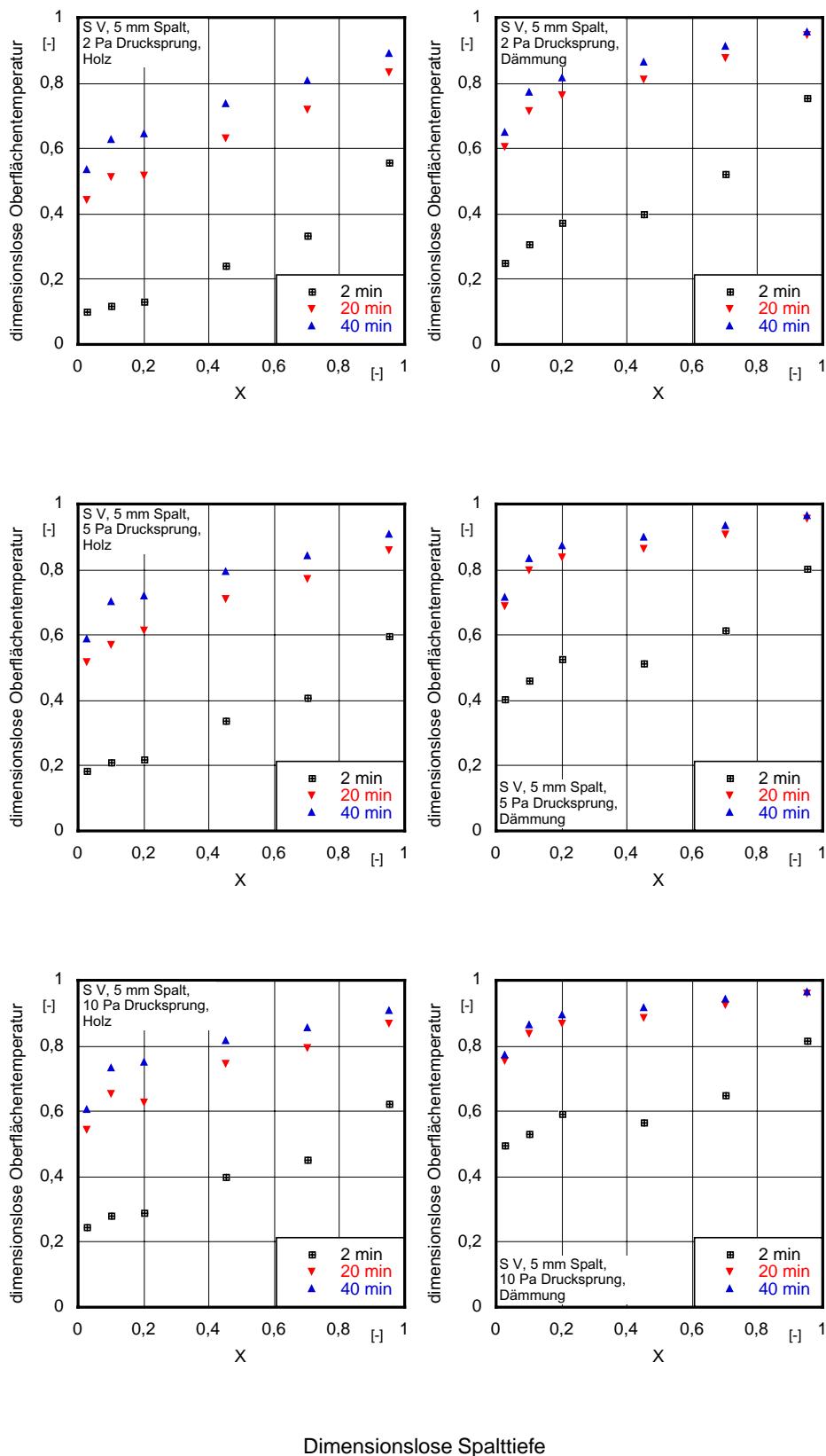
Δp [Pa]	Volumenstrom				
	[m³/h]				
	Unterdruck	Überdruck	einf. Ansatz 2 mm	CFD, 3D	
1,0	1,1	1,1	0,975	—	—
2,0	1,6	1,6	1,89	0,68	1,99
5,0	3,3	3,1	4,37	1,68	—
10,0	5,8	5,4	7,90	3,32	—
20,0	10,8	9,6	13,7	—	—

einf. Ansatz: Anzahl Umlenkungen $z_u=2$, Spalttiefe $t=0,4 \text{ m}$, Querschnittsfläche $A = 1 \text{ m} \cdot s$
 CFD: Querschnittsfläche $A = 1 \text{ m} \cdot s$



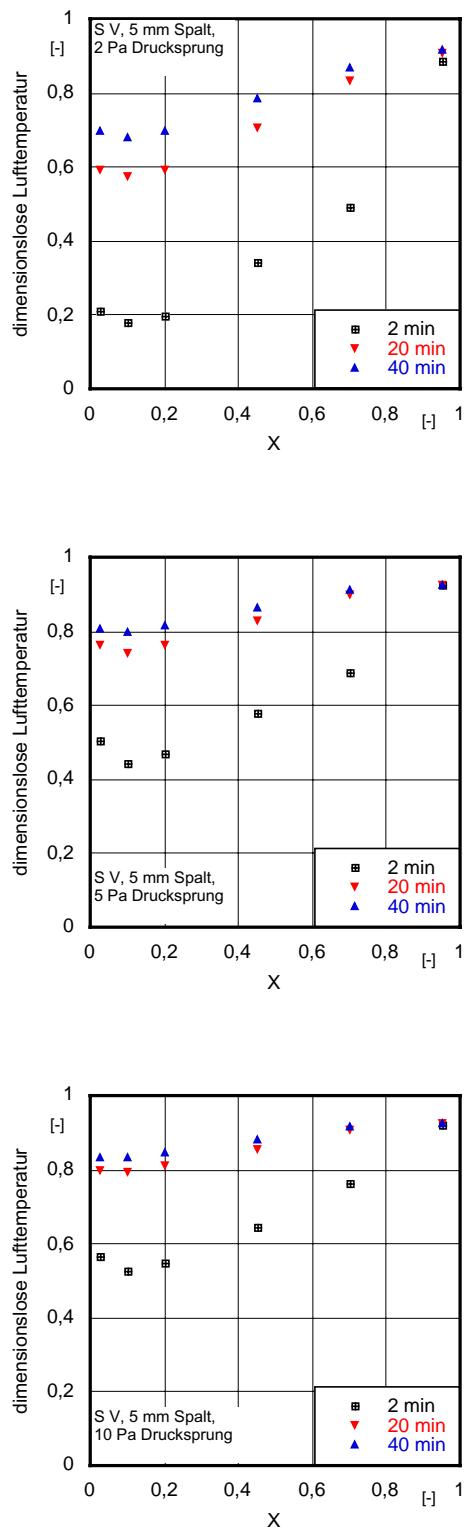
Dimensionslose Spalttiefe

Bild 19: Meßergebnisse für Spalt Modell S V, 2 mm Spalthöhe. Dimensionslose Temperaturverteilung in Holz (links) und Polystyrol-Hartschaum (rechts) über der dimensionslosen Spalttiefe aufgetragen.



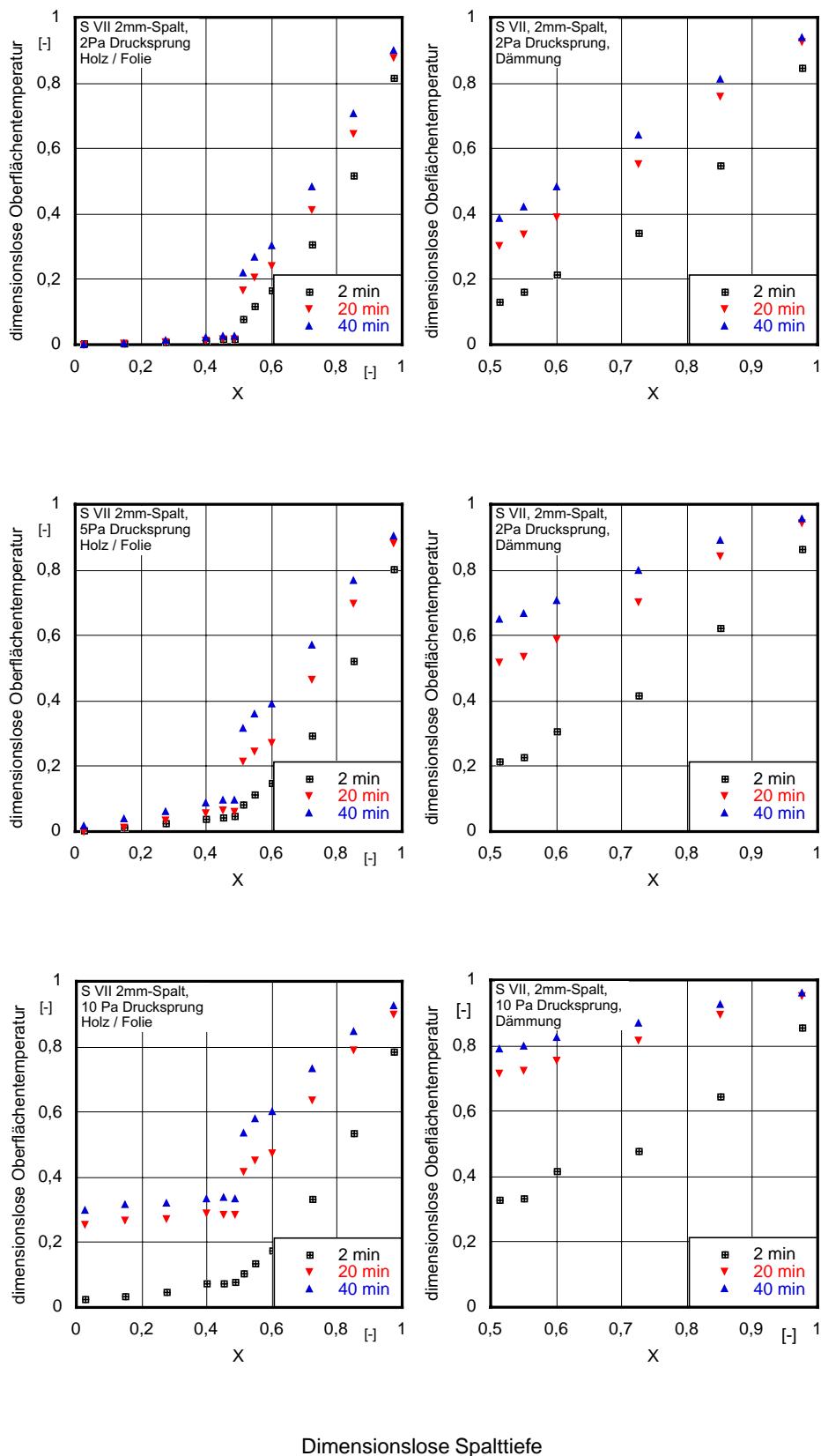
Dimensionslose Spalttiefe

Bild 20: Meßergebnisse für Spalt Modell S V, 5 mm Spalthöhe. Dimensionslose Temperaturverteilung in Holz (links) und Polystyrol-Hartschaum (rechts) über der dimensionslosen Spalttiefe aufgetragen.



Dimensionslose Spalttiefe

Bild 21: Meßergebnisse für Spalt Modell S V, 5 mm Spalthöhe. Dimensionslose Lufttemperatur in der Strömung über der dimensionslosen Spalttiefe aufgetragen.



Dimensionslose Spalttiefe

Bild 22: Meßergebnisse für Spalt Modell S VII, 2 mm Spalthöhe.
Dimensionslose Temperaturverteilung in Holz (links) und Polystyrol-Hartschaum (rechts) über der dimensionslosen Spalttiefe aufgetragen.

4 Simulationsrechnungen mit CFD

4.1 Allgemeines

Die Vielzahl möglicher Anschlußausbildungen und Leckagen machen es notwendig, die vorliegende Problemstellung durch Simulationsrechnungen bearbeiten zu können. Moderne Programme für Computational Fluid Dynamics (CFD-Programme) erlauben, sowohl strömungstechnische Vorgänge als auch thermische Effekte durch Strömungen mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung auf digitalen Rechnern abzubilden. Dazu wird das zu untersuchende Raumvolumen durch ein 2- bzw. 3-dimensionales Gitter in kleine Flächen- bzw. Raumelemente unterteilt, für die eine Reihe von Differentialgleichungen wie z.B. die Navier-Stokes-Gleichungen mit Hilfe von Finite-Volumen- bzw. Finite-Elemente-Methoden gelöst werden. Diese Gitter sind im einfachsten Fall orthogonal, bei moderneren Programmen unstrukturiert d.h. im 2-dimensionalen Fall z.B. aus Dreiecken, im 3-dimensionalen Fall z.B. aus Tetraedern aufgebaut. Damit können beliebig komplexe Geometrien sowohl 2- als auch 3-dimensional abgebildet werden [14]. Die Anwendung derartiger Programme benötigt für die hier zu behandelnde Fragestellung jedoch zunächst einen Abgleich mit Meßergebnissen. Der Abgleich der CFD-Berechnungs-Modelle mit Meßwerten führt zu den im folgenden gegebenen Parametern für die CFD-Berechnungen. Abweichungen von diesen "Standardparametern" sind an entsprechenden Stellen im Bericht direkt vermerkt. Nähere Informationen zu den einzelnen Parametern sind in z.B. in [14] gegeben.

Vorversuche zur Modellbildung zeigen, dass es bei der gewählten Modellbildung notwendig ist, turbulent zu rechnen. Grundsätzlich kann auch ein eingegrenzter Bereich (z.B. der Spalt) als "laminar" definiert werden. Da sich hierdurch in vorliegendem Fall jedoch weder Unterschiede in den Ergebnissen noch eine Verbesserung der Konvergenz ergeben, wird der gesamte Fluidraum turbulent gerechnet.

Die Spalthöhe wird mit jeweils mindestens 6 Zellen aufgelöst. Bei den dreidimensionalen Modellen wird die Spaltbreite von 100 mm mit jeweils mindestens 5 Zellen aufgelöst. In Tabelle 7 sind die bei den Simulationsrechnungen verwendeten Materialkenndaten zusammengefaßt wiedergegeben. Die Daten sind mittlere Werte aus den in [23] gegebenen Wertebereichen.

Es wird mit jedem untersuchten Spalt eine Zeitsequenz simuliert. Diese besteht aus einer "Anlaufphase", bei der keine Druckdifferenz aufgeprägt wird, die Temperaturdifferenz jedoch 20 K beträgt. Es folgt ein Drucksprung auf Δp mit Überdruck auf der Warmseite und anschließender Berechnung einer Periode von ca. 45 min Dauer.

Für einzelne Spalte wird Anschließend zusätzlich eine "Beruhigungsphase" angehängt, nach der schließlich ein Drucksprung auf $-\Delta p$ mit Überdruck auf der Kaltseite simuliert wird. In Bild 23 ist der gesamte zeitliche Ablauf skizziert. Direkt nach den Sprüngen muss zur Gewährleistung der Konvergenz die Länge der Simulationsintervalle verkürzt werden.

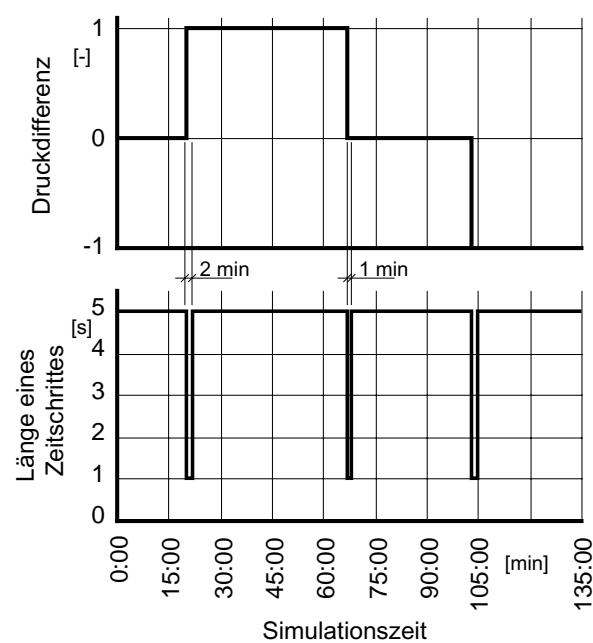


Bild 23: Skizze zur Zeitsequenz der durchgeföhrten Simulationsrechnungen. Die Druckdifferenz Δp beträgt 2, 5 und 10 Pa sowie in einigen Fällen auch 20 Pa.

Tabelle 6: Allgemeine Parameter und Randbedingungen der CFD-Berechnungen.

Parameter	Wert	Einheit
Solver		
	Segregated	–
Viscous Model		
Model	"k-epsilon (2 eqn)"	–
k-epsilon Model	"RNG"	–
RNG Options	"Differential Viscosity Model"	–
Near-Wall Treatment	"Enhanced Wall Functions"	–
Wall Prandtl Number	Pr = 0,71	–
Operating Conditions		
Gravity	off	
Pressure	101325	Pa
Boundary Conditions		
kalte Luft Eintritt 2-d	"velocity inlet" mit 0.45	m/s
3-d	"mass flow inlet" mit 0.075	kg/s
kalte Luft Austritt	"pressure outlet" mit 0	Pa
tiefer Druck	"pressure inlet" mit 0	Pa
warme Luft Eintritt 2-d	"velocity inlet" mit 0.08	m/s
3-d	"mass flow inlet" mit 0.01	kg/s
warme Luft Austritt	"pressure outlet" mit x	Pa
hoher Druck	"pressure inlet" mit x	Pa
Solution Control		
Pressure	Second Order	–
Momentum	Second Order Upwind	–
Pressure-Velocity Coupling	PISO	–
Energy	Second Order Upwind	–
Turbulence Kinetic Energy	Second Order Upwind	–
Turbulence Dissipation Rate	Second Order Upwind	–
Fluid (Luft)		
Dichte	"incompressible ideal gas"	kg/m ³
spezifische Wärmekapazität	"kinetic theory"	J/(kg K)
Wärmeleitfähigkeit	"kinetic theory"	W/(m K)
kinematische Viskosität	"kinetic theory"	m ² /s

Tabelle 7: Bei den CFD-Simulationsrechnungen verwendete thermodynamische Materialdaten.

Material	ρ [kg/m ³]	c_p [J/(kg K)]	λ [W/(m K)]	κ $[10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}]$
Dämmung	60	840	0,04	0,8
Holz	500	1880	0,17	0,18
Mauerwerk	1600	880	0,70	0,5
Bahn	930	1100	0,40	0,39

4.2 Vergleich Messung / Rechnung

In Bild 24 bis 26 sind Meßwerte und Simulationsergebnisse gegenübergestellt. In den Diagrammen entsprechen jeweils die ausgefüllten Symbole Messwerten. Die Übereinstimmung auch der zeitlichen Verläufe ist insgesamt recht gut. Die Simulationsrechnungen wurden mit den in Tabelle 7 gegebenen Materialdaten durchgeführt. Die tatsächlichen Stoffwerte der bei der Messung verwendeten Materialien liegen nicht vor.

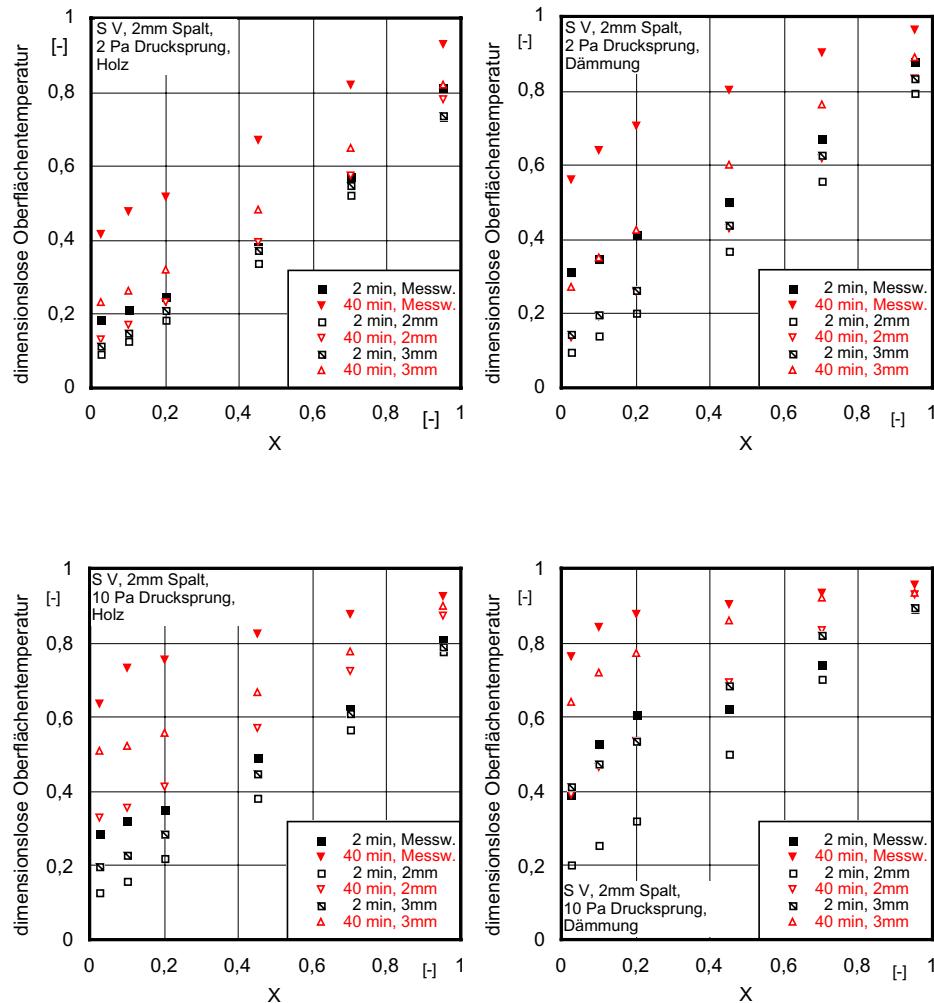


Bild 24: Meß- und Simulationsergebnisse für Spalt Modell S V, 2 mm Soll-Spalthöhe. Dimensionslose Temperaturverteilung zwei und 40 min nach dem Drucksprung in Holz (links) und Polystyrol-Hartschaum (rechts) über der dimensionslosen Spalttiefe aufgetragen. Die Simulationsergebnisse für $s = 3$ mm sind zum Vergleich wiedergegeben.

Die Ergebnisse der CFD-Berechnungen zeigen bei der kleinen Spalthöhe eine deutlich höhere Trägheit, als die Meßwerte. Die "Form" der berechneten und gemessenen Temperaturverteilungen über die Spalttiefe sowie das unterschiedliche Materialverhalten stimmt jedoch sehr gut überein.

Bei dem Spalt vom Typ S VII (Bild 26) liegen für $X < 0,5$ keine Meßwerte für die Dämmung vor.

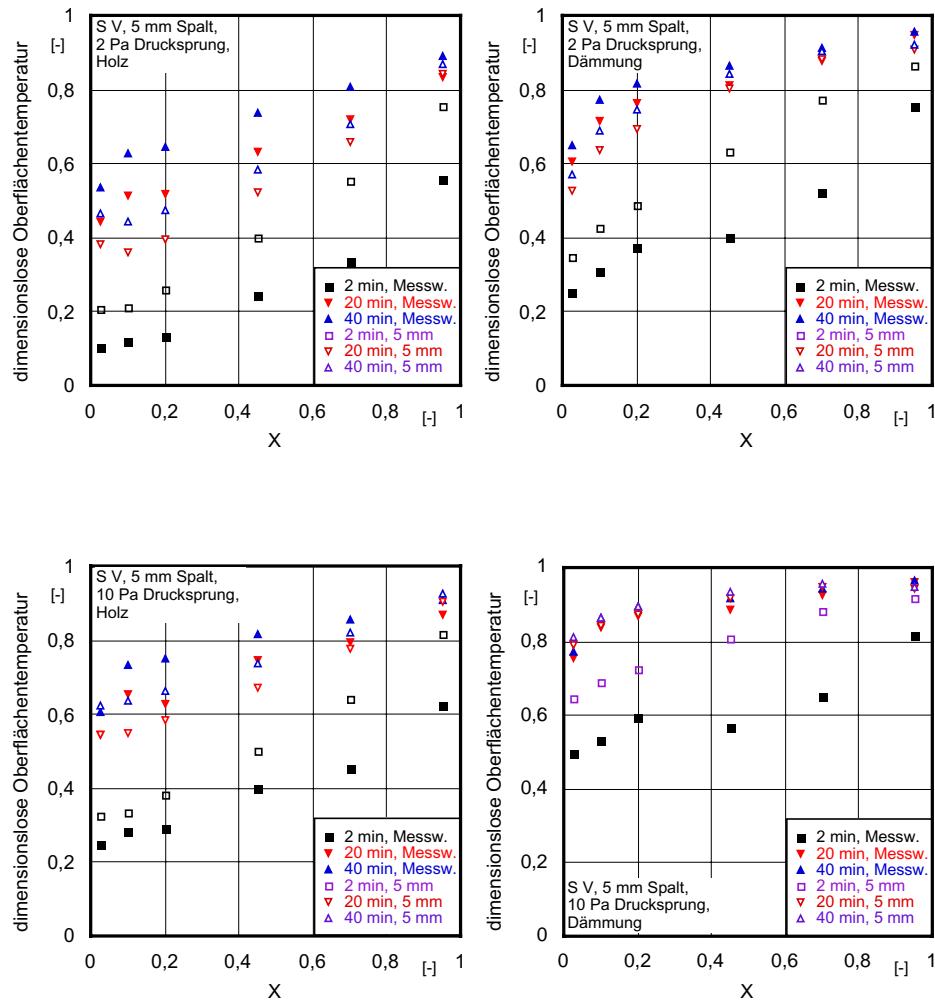


Bild 25: Meß- und Simulationsergebnisse für Spalt Modell S V, 5 mm
Soll-Spalthöhe. Dimensionslose Temperaturverteilung zwei, 20 und 40
min nach dem Drucksprung in Holz (links) und Polystyrol-Hartschaum
(rechts) über der dimensionslosen Spalttiefe aufgetragen.

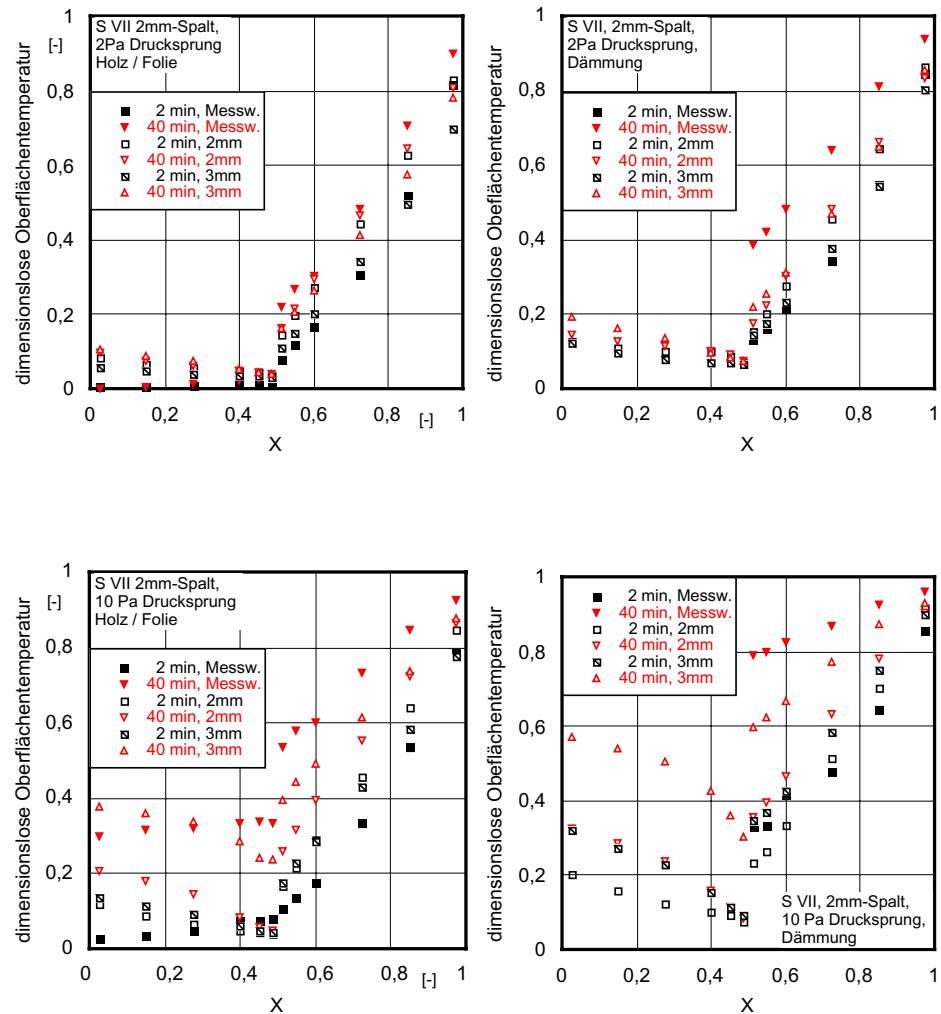


Bild 26: Meß- und Simulationsergebnisse für Spalt Modell S VII, 2 mm Soll-Spalthöhe. Dimensionslose Temperaturverteilung zwei und 40 min nach dem Drucksprung in Holz (links) und Polystyrol-Hartschaum (rechts) über der dimensionslosen Spalttiefe aufgetragen. Die Simulationsergebnisse für $s = 3 \text{ mm}$ sind zum Vergleich wiedergegeben.

4.3 Berechnungsergebnisse

Folgende wesentlichen Annahmen und Vereinfachungen sind bei den Berechnungen der Feuchteänderung getroffen.

- Die Temperatur der durch den Spalt strömenden Luft wird für die Feuchtebetrachtung als konstant betrachtet, d.h. die Änderung der mittleren Temperatur der strömenden Luft bleibt unberücksichtigt.
- Für jede betrachtete Periodendauer werden hinsichtlich der Transportvorgänge konstante Bedingungen über die gesamte Periodendauer angenommen.
- Trocknungsvorgänge sowie ein Feuchtetransport im Material in Spaltrichtung werden nicht berücksichtigt
- Eine mögliche "Ermüdung" der strömenden Luft hinsichtlich der Feuchtebeladung wird vernachlässigt
- $c_w = c_s(\theta_w)$

Auf den Seiten 42 bis 56 sind exemplarisch einige Ergebnisse wiedergegeben. Es ist jeweils die Änderung der oberflächennahen Materialfeuchte gemäß dem Ansatz nach Gleichung 59 über der dimensionslosen Spaltkoordinate X aufgetragen. Dabei ist die Strömungsrichtung von X = 1 nach X = 0.

Links sind jeweils die Ergebnisse für die Spaltobерseite (Holz bzw. Holz und Folie), rechts für die Spaltunterseite (Dämmung) wiedergegeben. Die oberen beiden Bilder enthalten dabei die Ergebnisse für die Periodendauer 2 min, die mittleren für 20 min und die unteren Bilder enthalten die Ergebnisse für die Periodendauer 40 min. Zu jedem Zeitpunkt sind die Ergebnisse für die Druckdifferenzen 2, 5 und 10 Pa angegeben. Zu jeder Spaltsorte werden relative Luftfeuchten der durch den Spalt strömenden Luft von 40, 50, 60, 70 und 80 % betrachtet. Zur Zeit t = 0 entspricht das Temperaturprofil im Bauteil demjenigen des stationären Zustandes bei einer Lufttemperatur außen von 0 °C und innen von 20 °C ohne anliegender Druckdifferenz, d.h. ohne Wärmetransport durch Strömung.

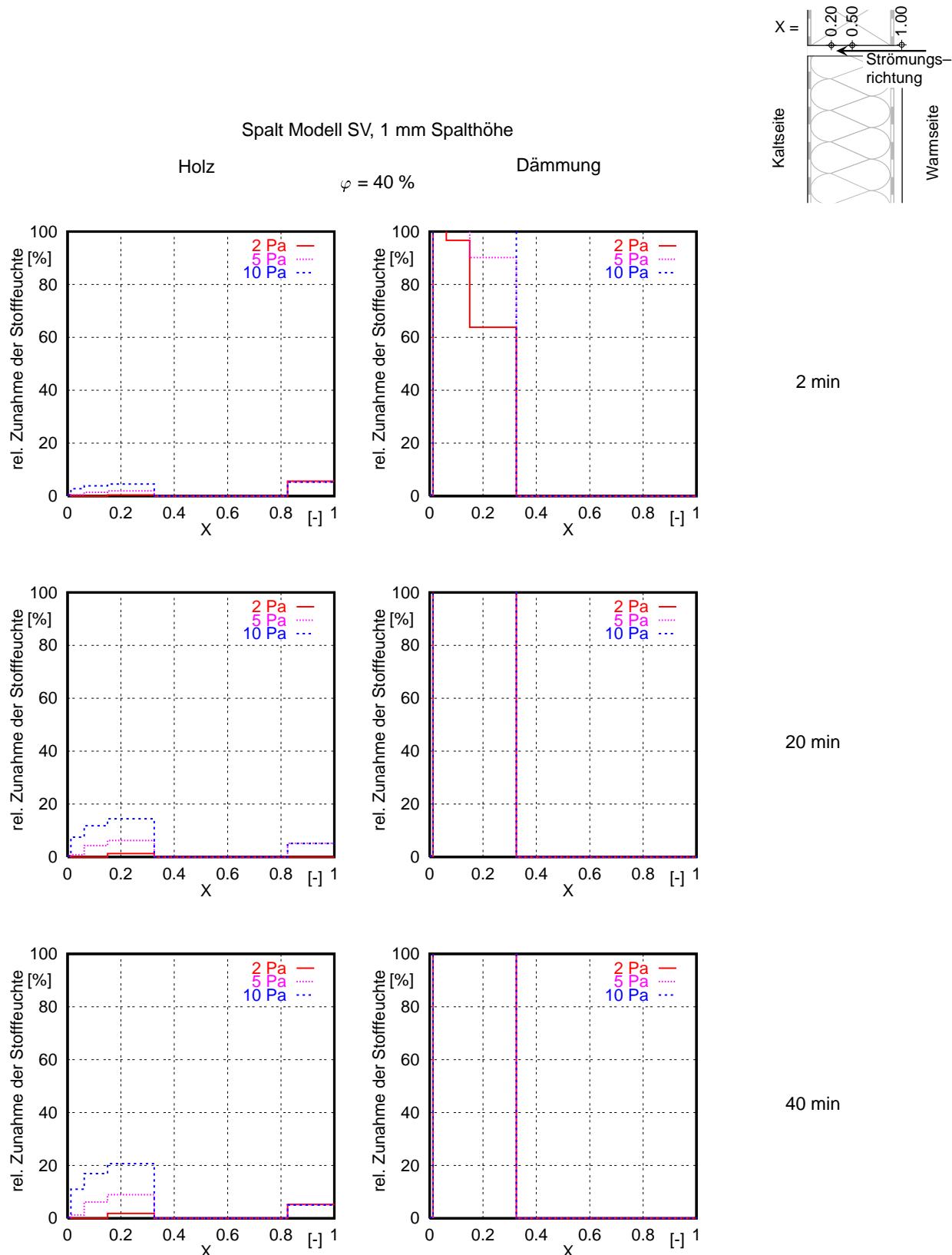


Bild 27: Ergebnisse für Spalt Modell S V, 1 mm Spalthöhe. Änderung der relativen Feuchte in Holz (links) und Mineralwolle (rechts) über der dimensionslosen Spalttiefe aufgetragen. Berechnungsergebnisse für eine Raumluftfeuchte von $\varphi=40\%$.

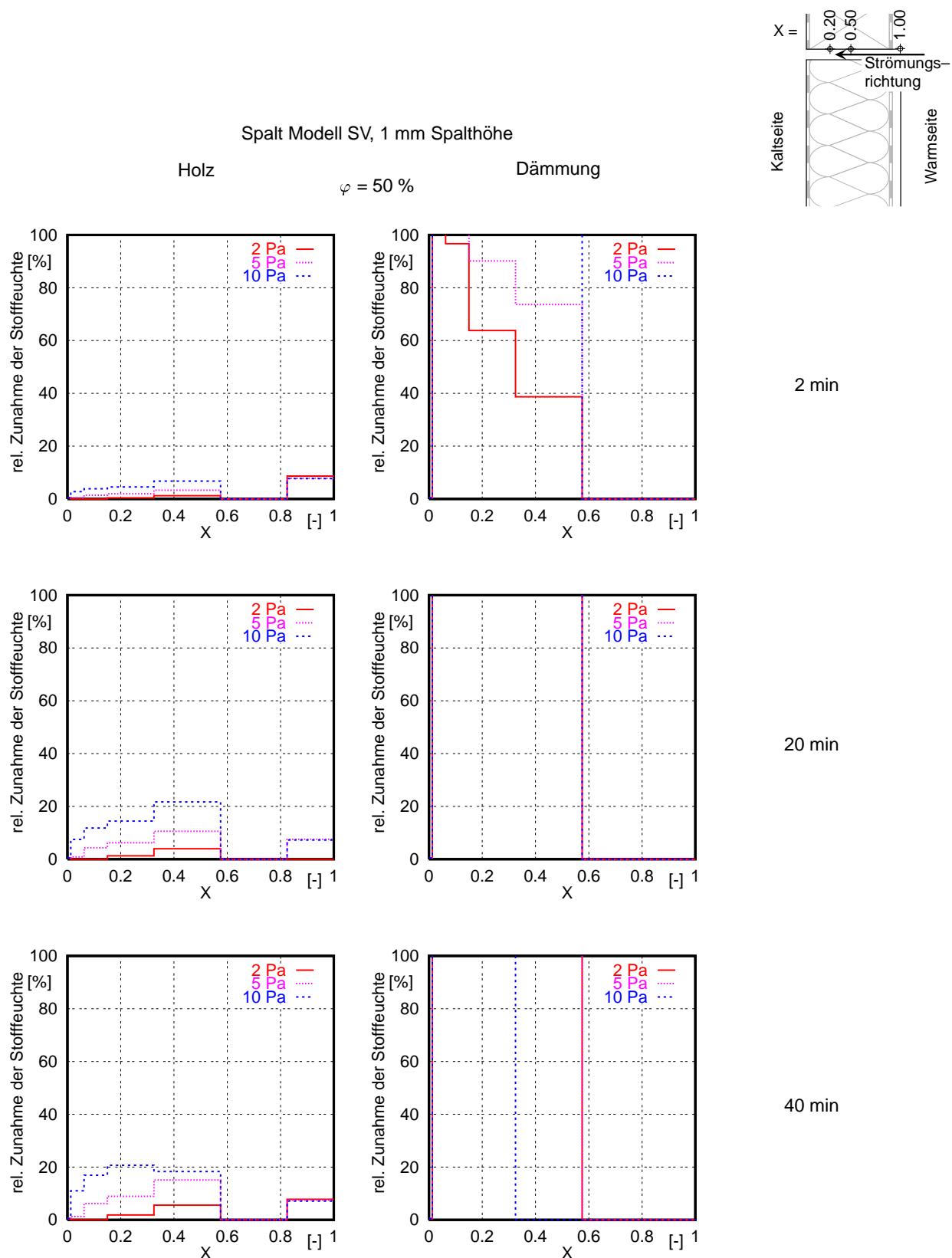


Bild 28: Ergebnisse für Spalt Modell S V, 1 mm Spalthöhe. Änderung der relativen Feuchte in Holz (links) und Mineralwolle (rechts) über der dimensionslosen Spalttiefe aufgetragen. Berechnungsergebnisse für eine Raumluftfeuchte von $\varphi=50\%$.

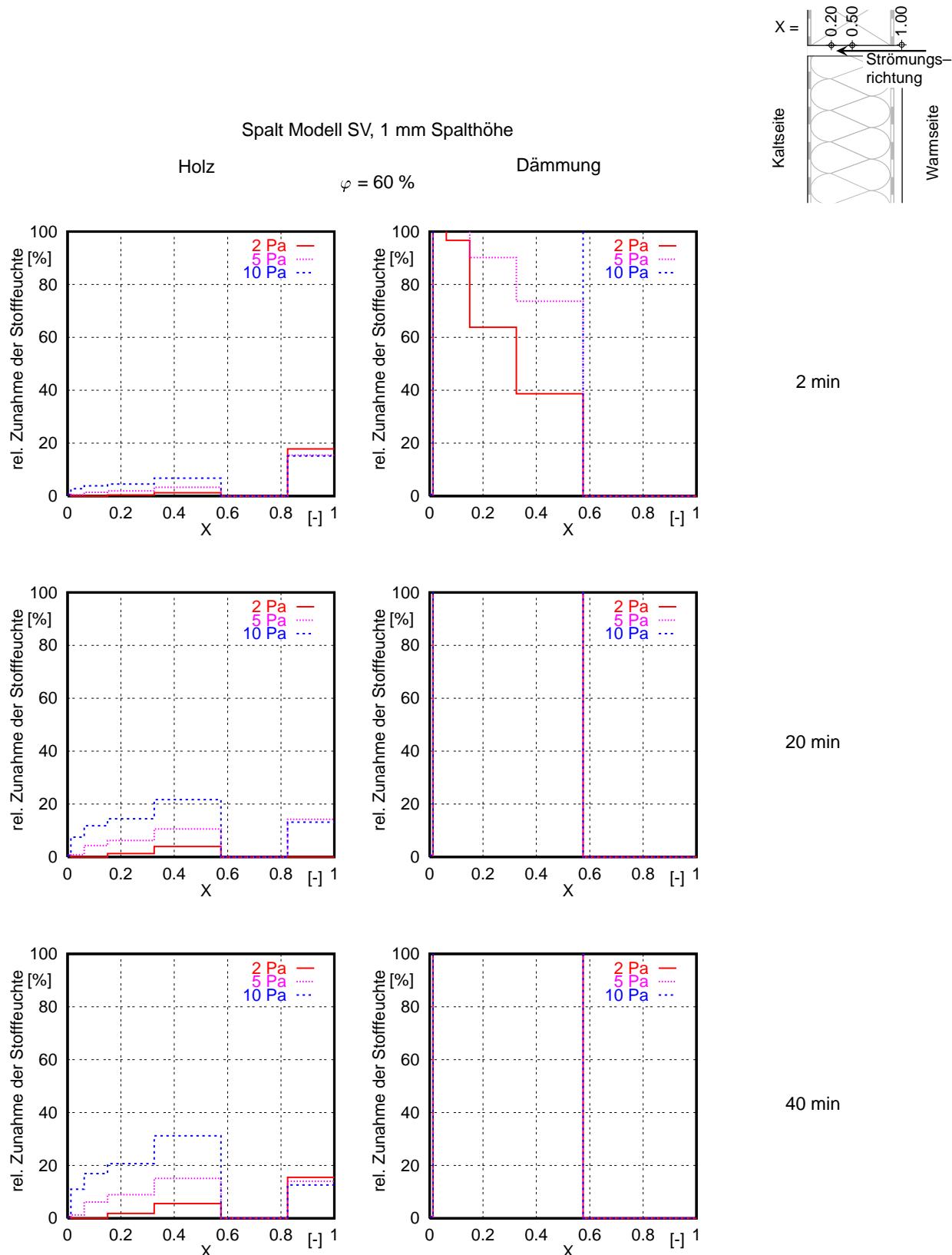


Bild 29: Ergebnisse für Spalt Modell S V, 1 mm Spalthöhe. Änderung der relativen Feuchte in Holz (links) und Mineralwolle (rechts) über der dimensionslosen Spalttiefe aufgetragen. Berechnungsergebnisse für eine Raumluftfeuchte von $\varphi=60\%$.

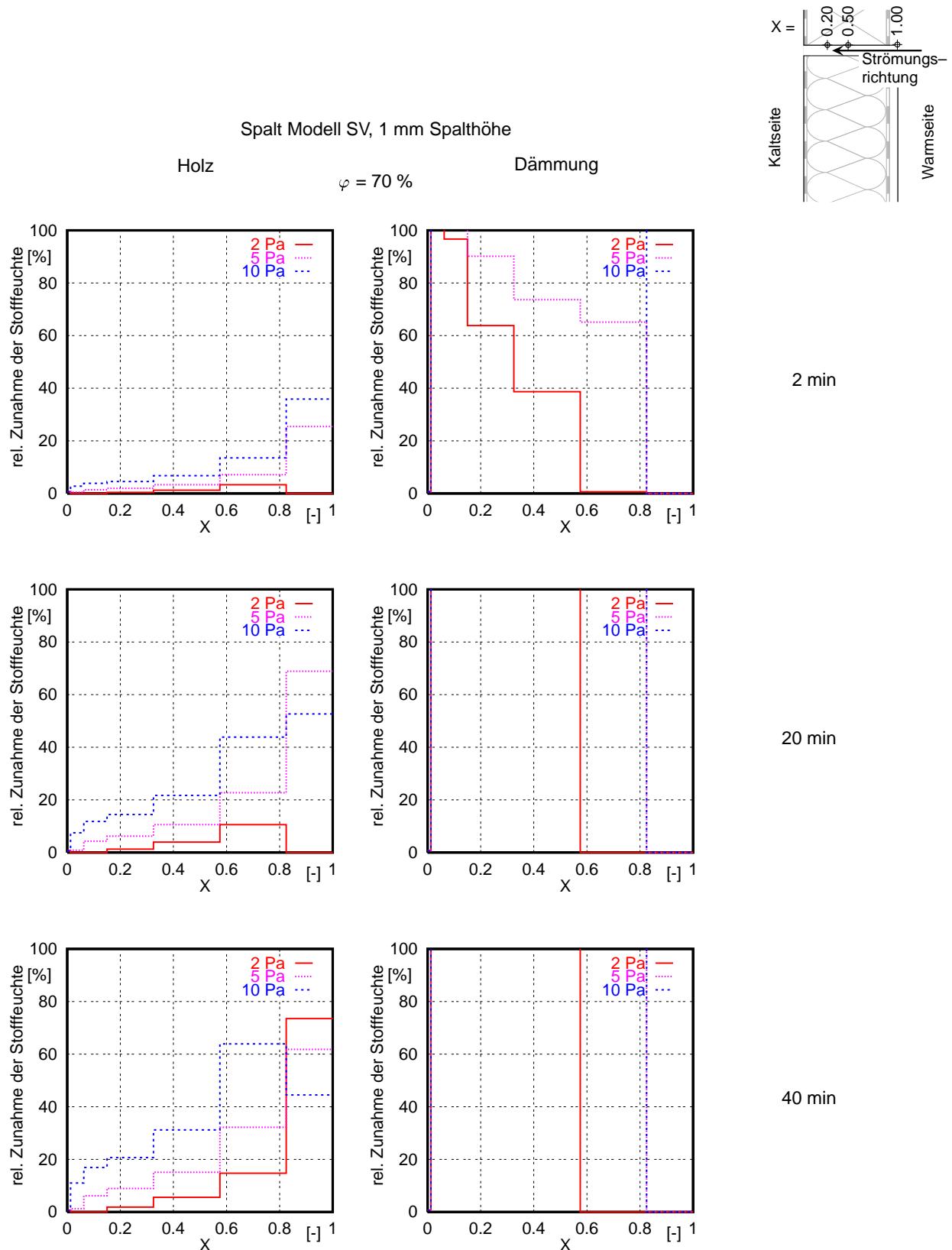


Bild 30: Ergebnisse für Spalt Modell S V, 1 mm Spalthöhe. Änderung der relativen Feuchte in Holz (links) und Mineralwolle (rechts) über der dimensionslosen Spalttiefe aufgetragen. Berechnungsergebnisse für eine Raumluftfeuchte von $\varphi=70\%$.

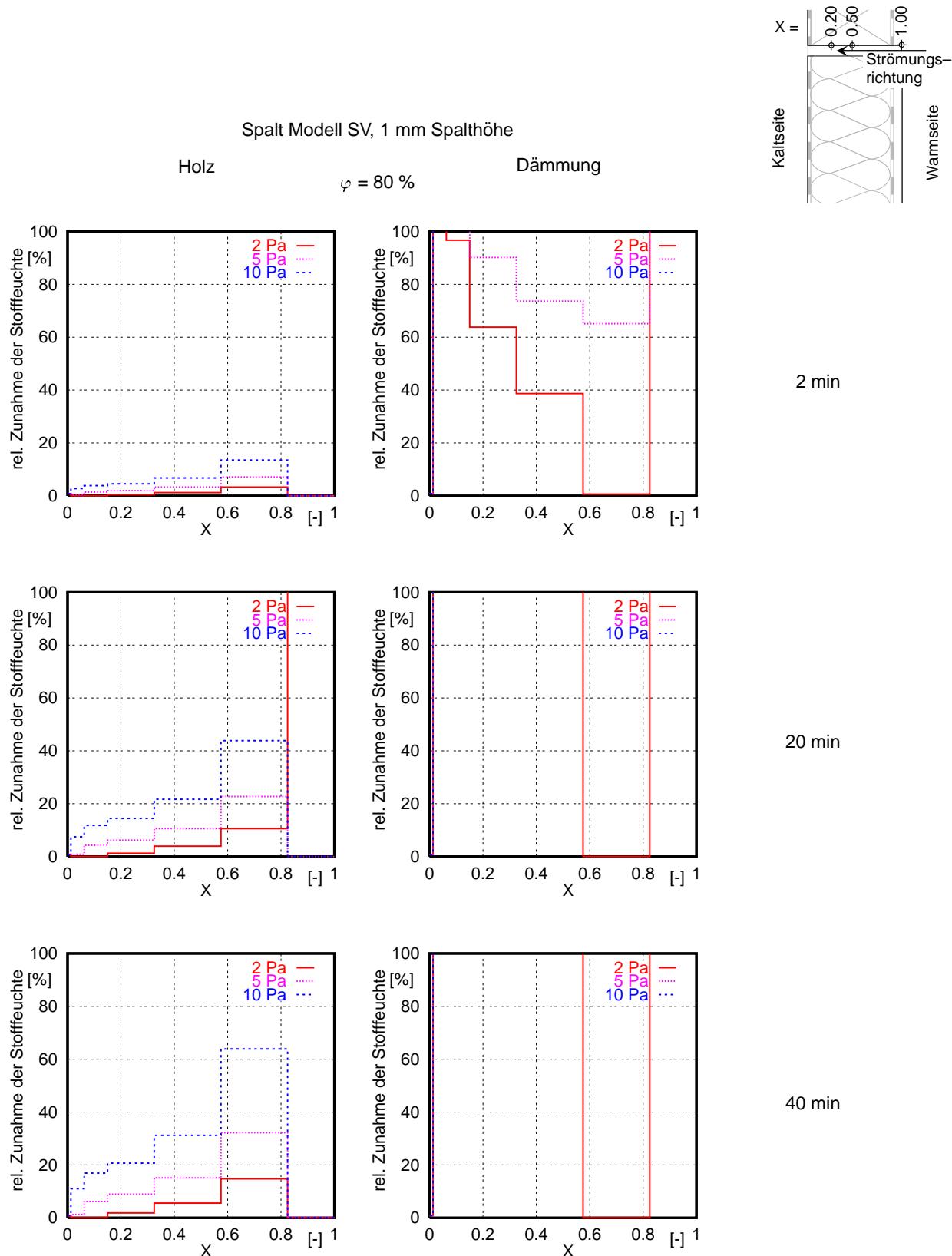


Bild 31: Ergebnisse für Spalt Modell S V, 1 mm Spalthöhe. Änderung der relativen Feuchte in Holz (links) und Mineralwolle (rechts) über der dimensionslosen Spalttiefe aufgetragen. Berechnungsergebnisse für eine Raumluftfeuchte von $\varphi=80\%$.

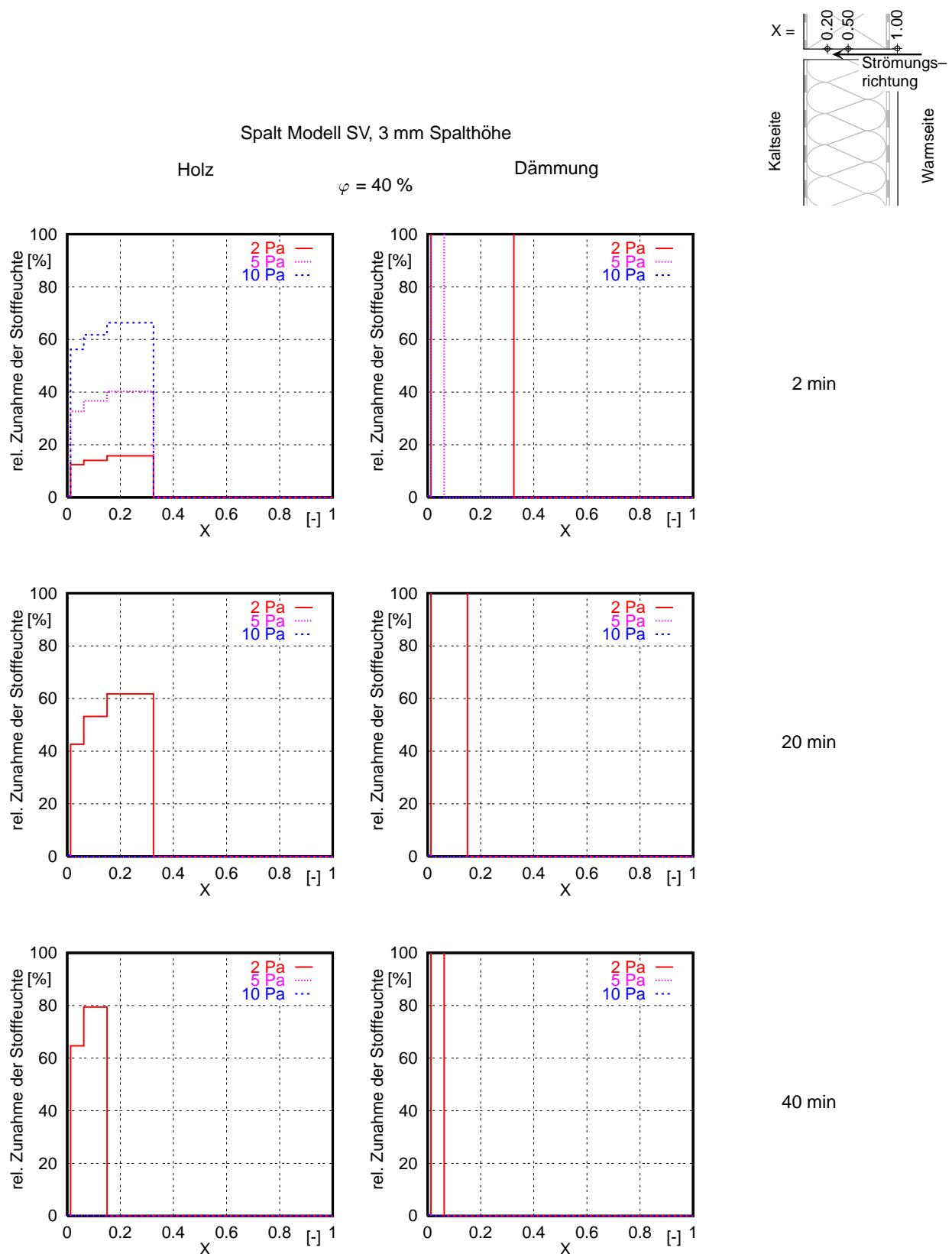


Bild 32: Ergebnisse für Spalt Modell S V, 3 mm Spalthöhe. Änderung der relativen Feuchte in Holz (links) und Mineralwolle (rechts) über der dimensionslosen Spalttiefe aufgetragen. Berechnungsergebnisse für eine Raumluftfeuchte von $\varphi=40\%$.

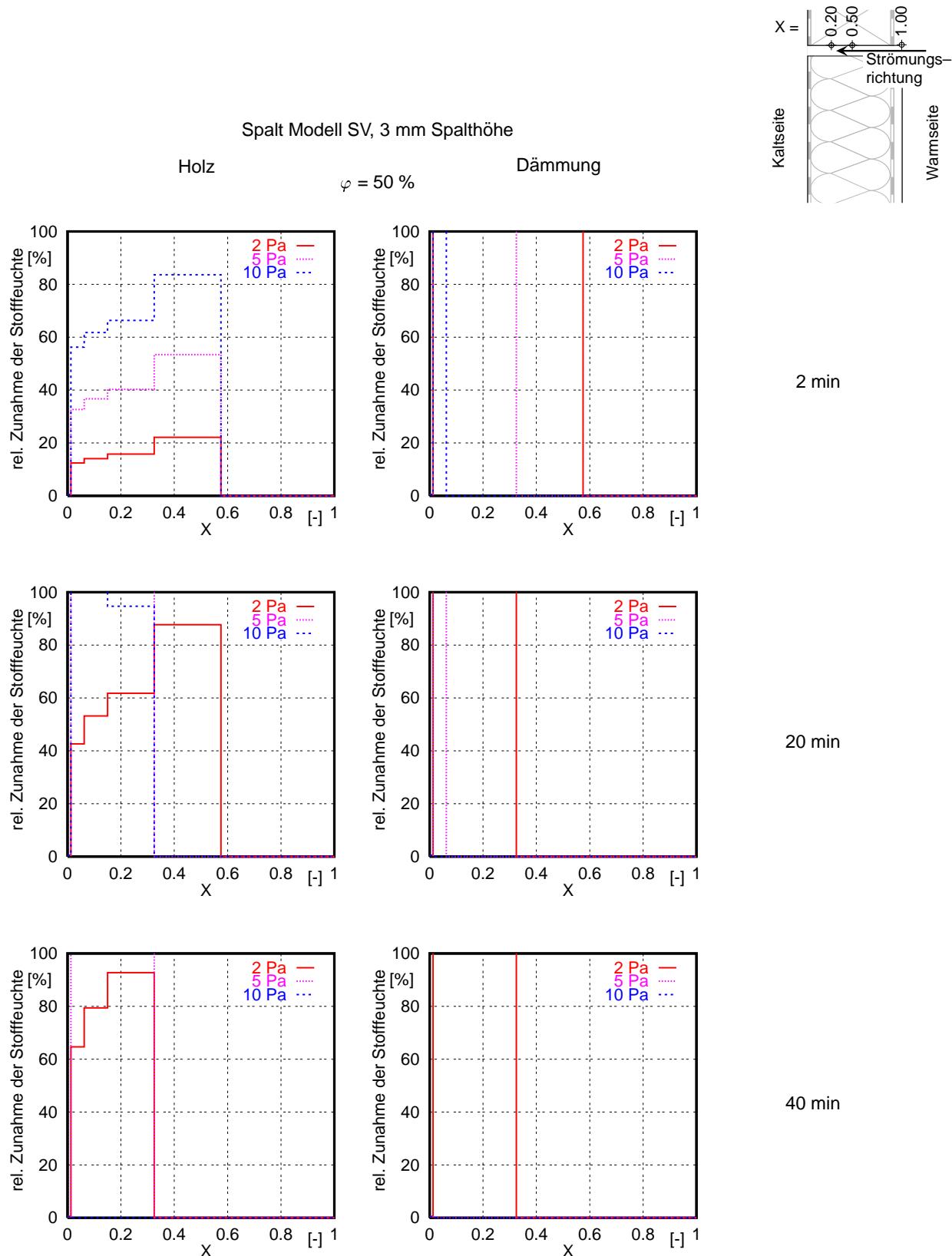


Bild 33: Ergebnisse für Spalt Modell S V, 3 mm Spalthöhe. Änderung der relativen Feuchte in Holz (links) und Mineralwolle (rechts) über der dimensionslosen Spalttiefe aufgetragen. Berechnungsergebnisse für eine Raumluftfeuchte von $\varphi=50\%$.

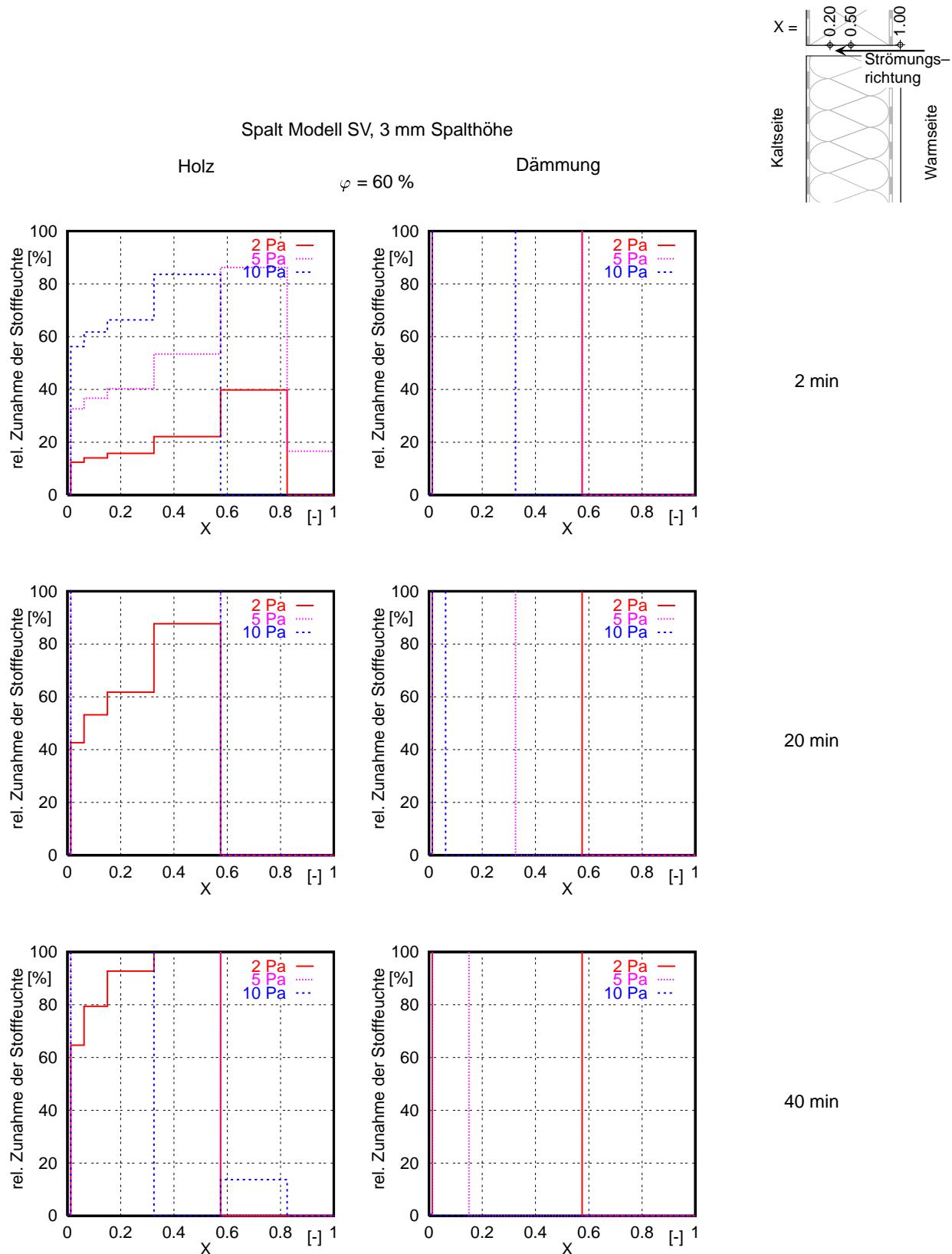


Bild 34: Ergebnisse für Spalt Modell S V, 3 mm Spalthöhe. Änderung der relativen Feuchte in Holz (links) und Mineralwolle (rechts) über der dimensionslosen Spalttiefe aufgetragen. Berechnungsergebnisse für eine Raumluftfeuchte von $\varphi=60\%$.

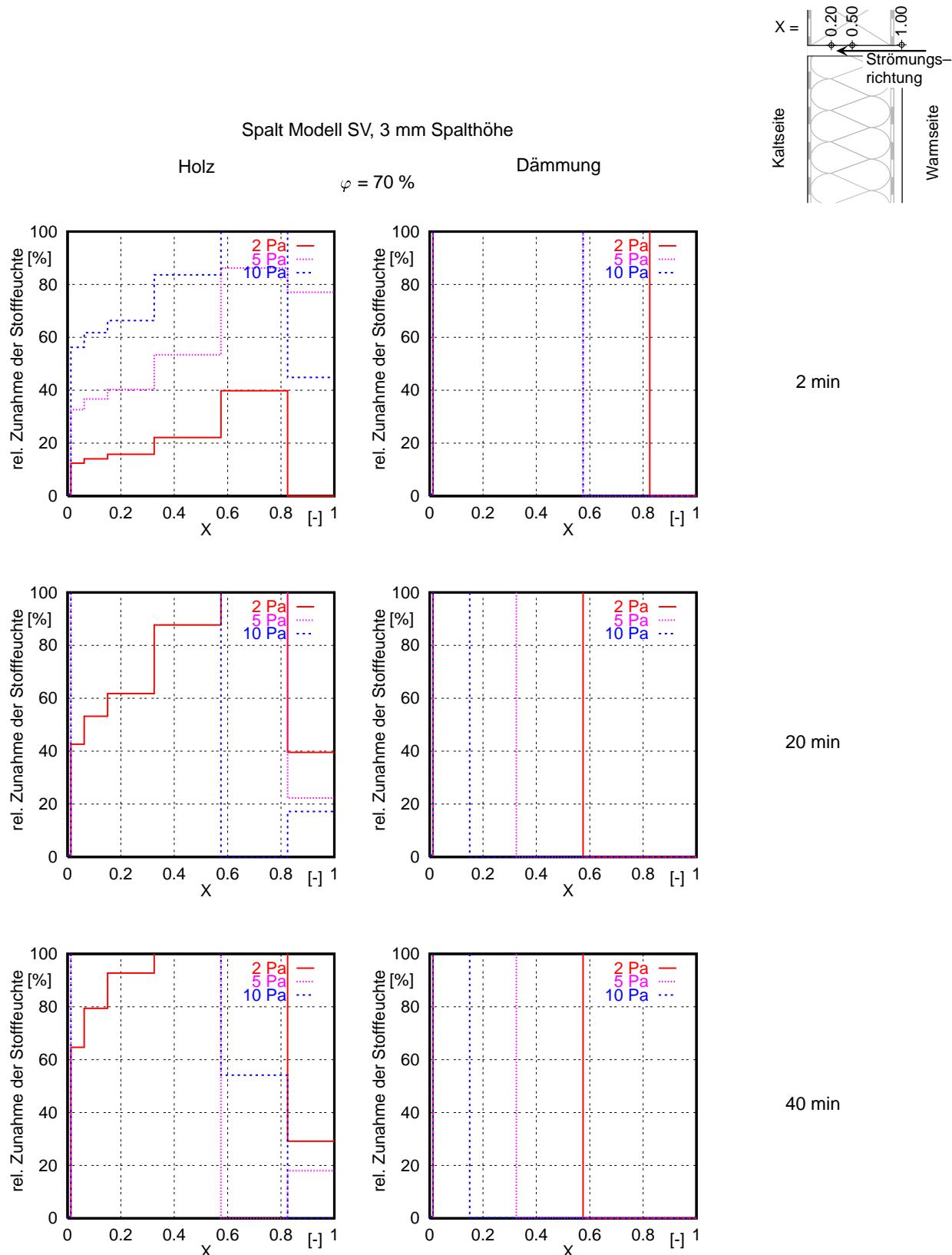


Bild 35: Ergebnisse für Spalt Modell S V, 3 mm Spalthöhe. Änderung der relativen Feuchte in Holz (links) und Mineralwolle (rechts) über der dimensionslosen Spalttiefe aufgetragen. Berechnungsergebnisse für eine Raumluftfeuchte von $\varphi=70\%$.

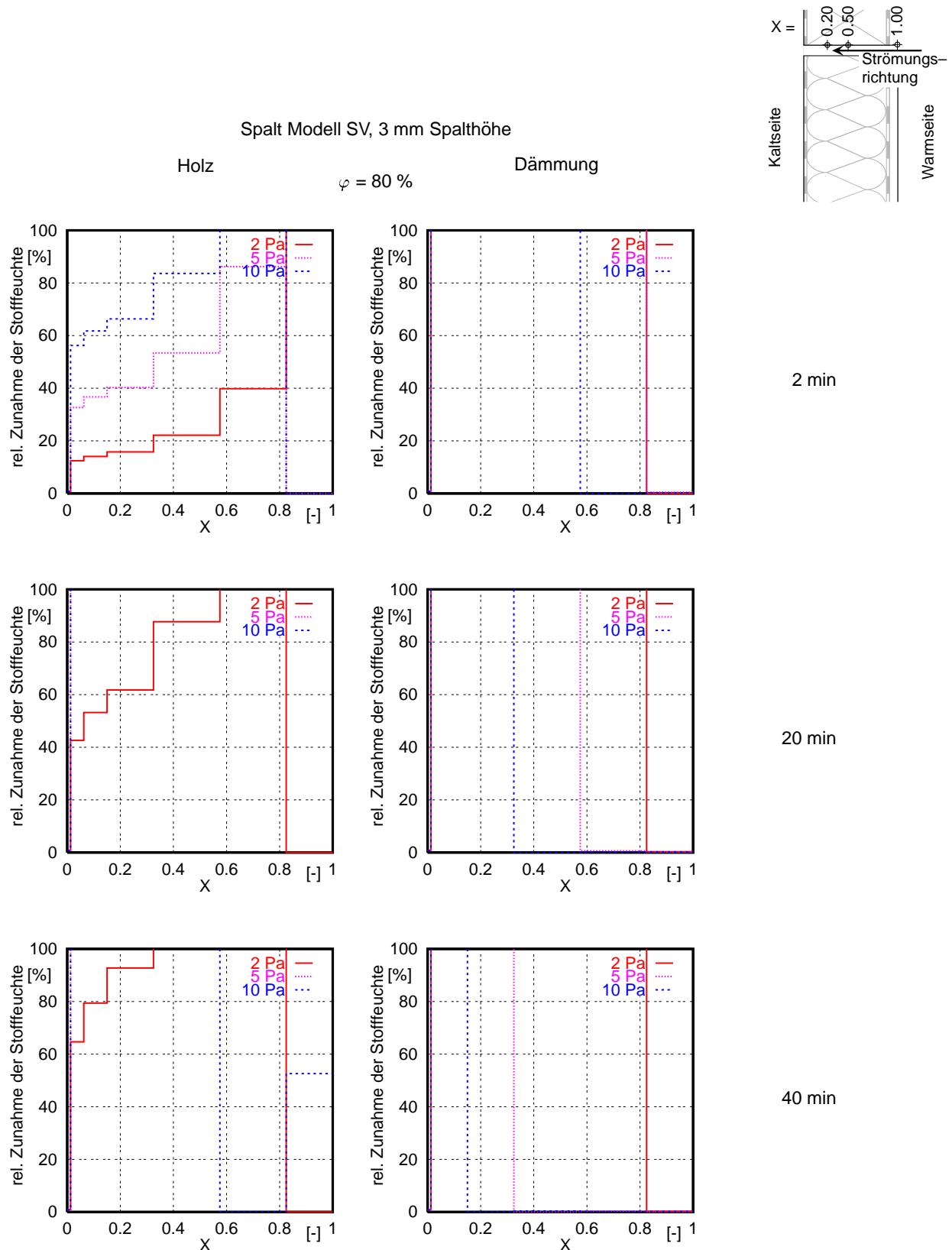


Bild 36: Ergebnisse für Spalt Modell S V, 3 mm Spalthöhe. Änderung der relativen Feuchte in Holz (links) und Mineralwolle (rechts) über der dimensionslosen Spalttiefe aufgetragen. Berechnungsergebnisse für eine Raumluftfeuchte von $\varphi=80\%$.

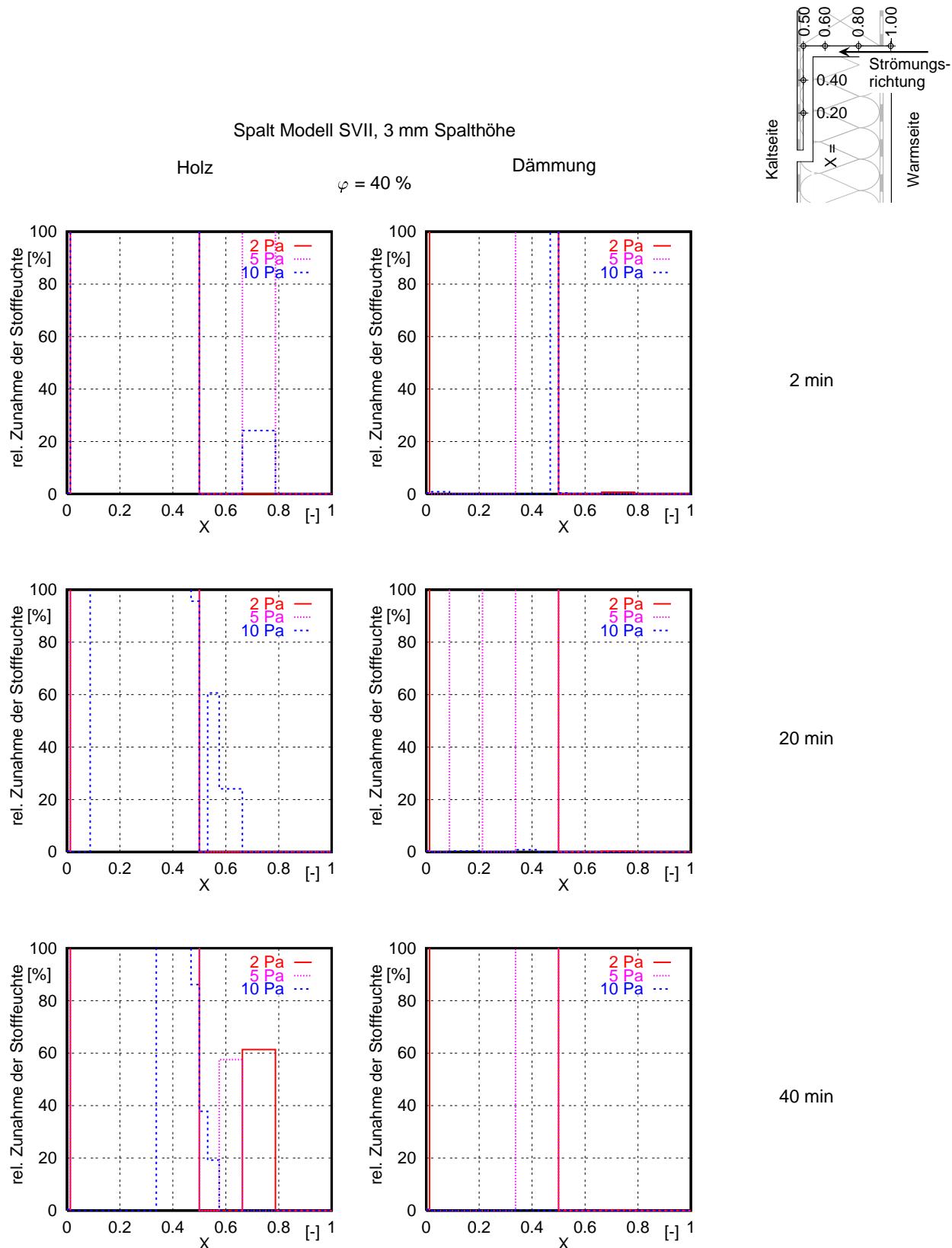


Bild 37: Ergebnisse für Spalt Modell S VII, 3 mm Spalthöhe. Änderung der relativen Feuchte in Holz (links) und Mineralwolle (rechts) über der dimensionslosen Spalttiefe aufgetragen. Berechnungsergebnisse für eine Raumluftfeuchte von $\varphi=40\%$.

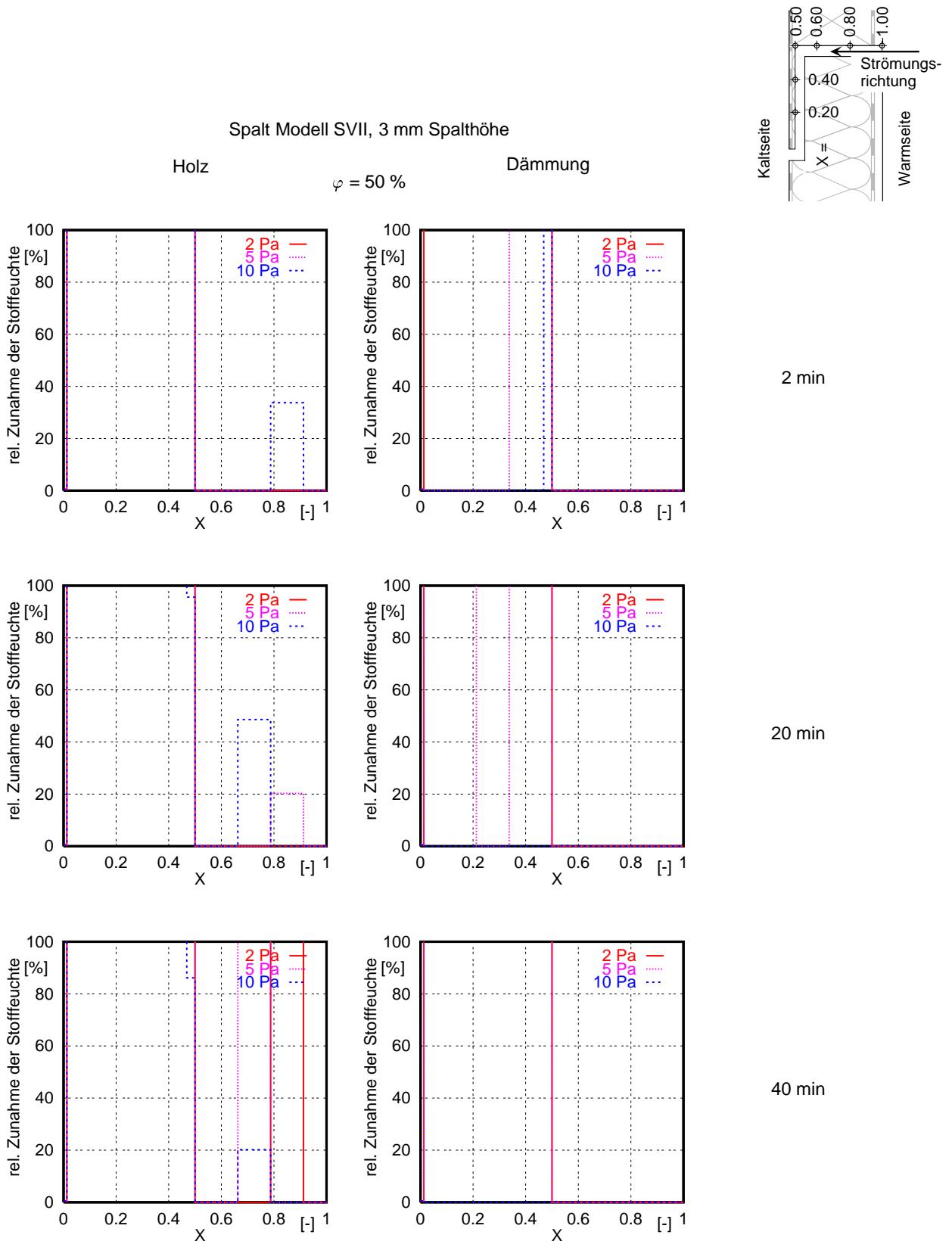


Bild 38: Ergebnisse für Spalt Modell S VII, 3 mm Spalthöhe. Änderung der relativen Feuchte in Holz (links) und Mineralwolle (rechts) über der dimensionslosen Spalttiefe aufgetragen. Berechnungsergebnisse für eine Raumluftfeuchte von $\varphi=50\%$.

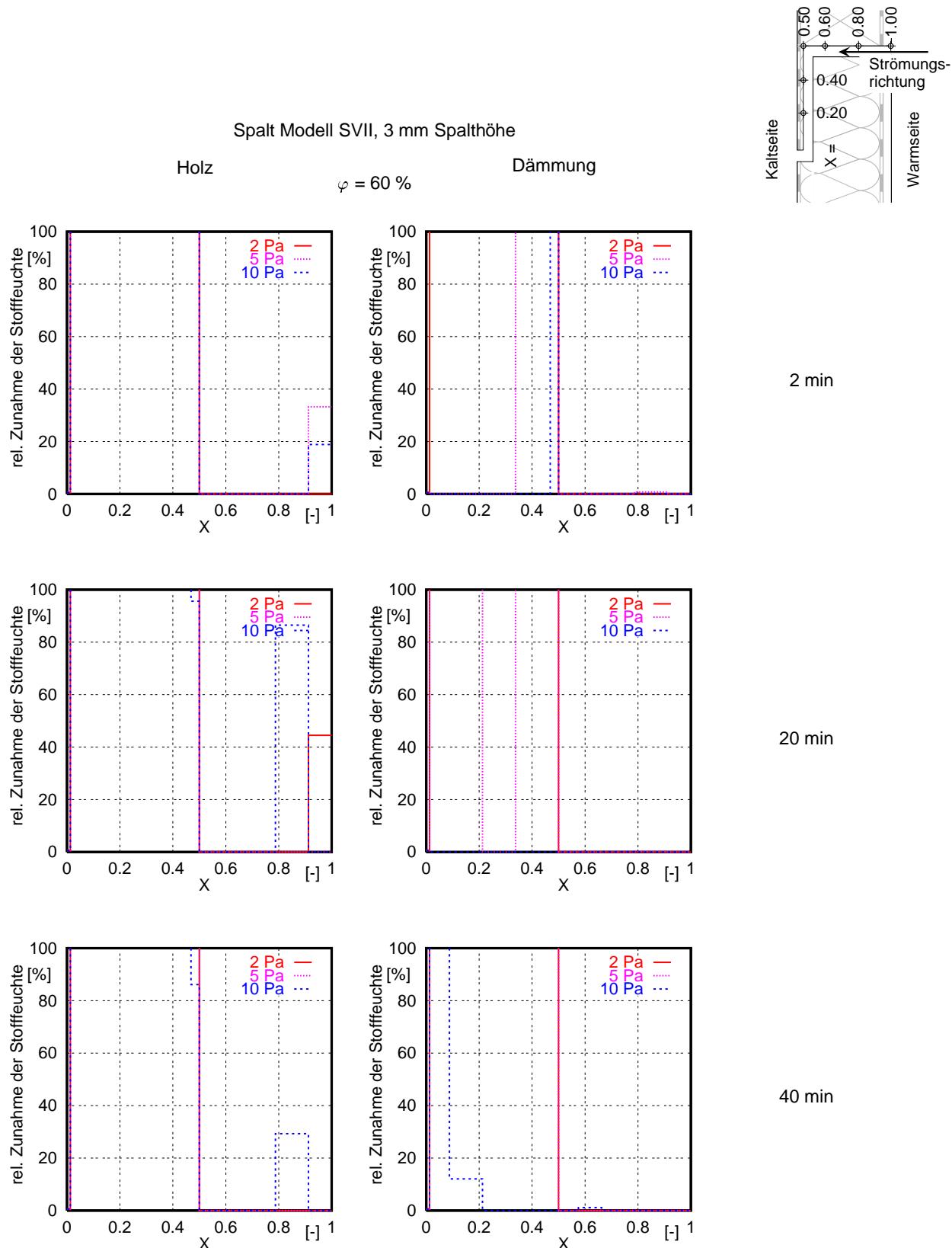


Bild 39: Ergebnisse für Spalt Modell S VII, 3 mm Spalthöhe. Änderung der relativen Feuchte in Holz (links) und Mineralwolle (rechts) über der dimensionslosen Spalttiefe aufgetragen. Berechnungsergebnisse für eine Raumluftfeuchte von $\varphi=60\%$.

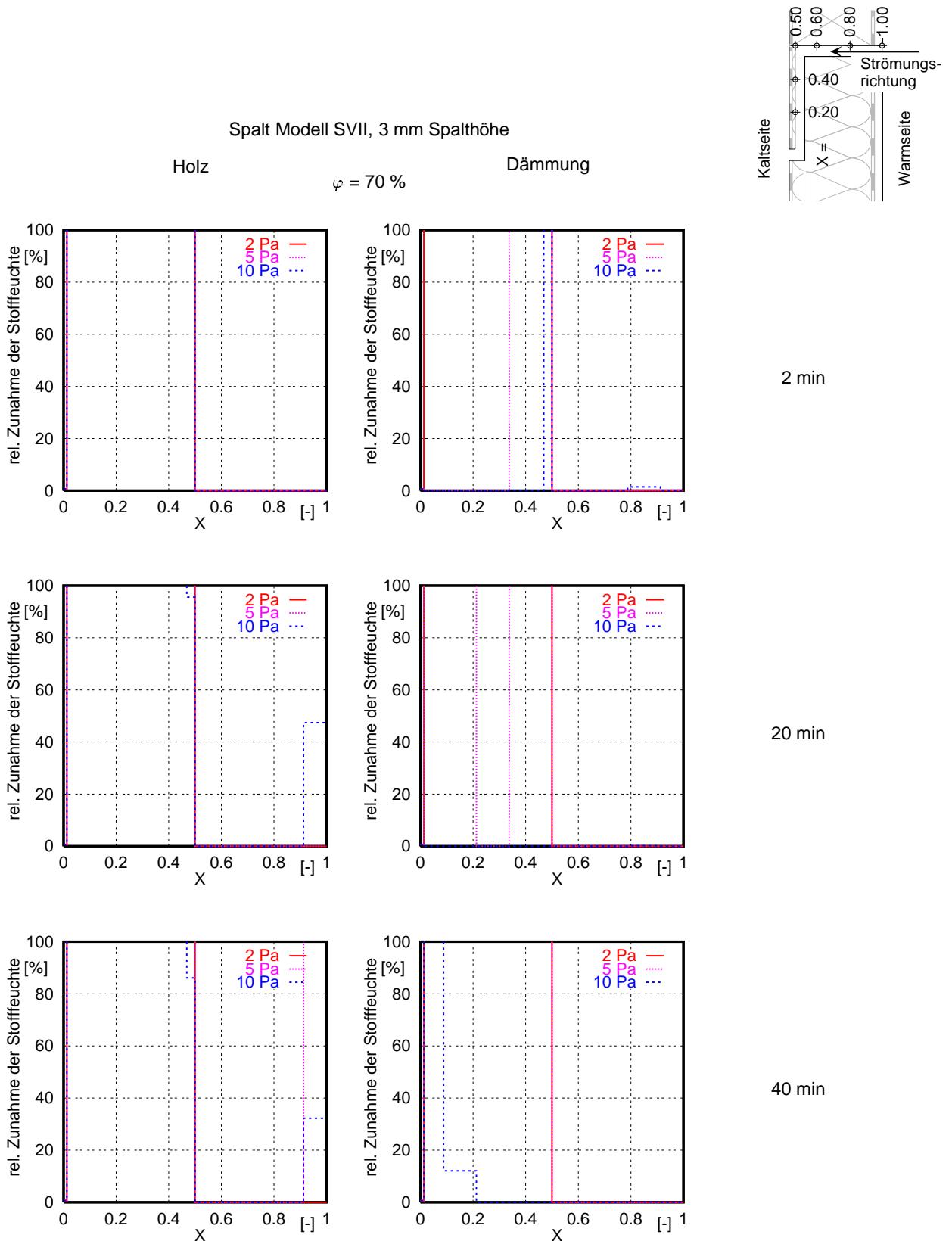


Bild 40: Ergebnisse für Spalt Modell S VII, 3 mm Spalthöhe. Änderung der relativen Feuchte in Holz (links) und Mineralwolle (rechts) über der dimensionslosen Spalttiefe aufgetragen. Berechnungsergebnisse für eine Raumluftfeuchte von $\varphi=70\%$.

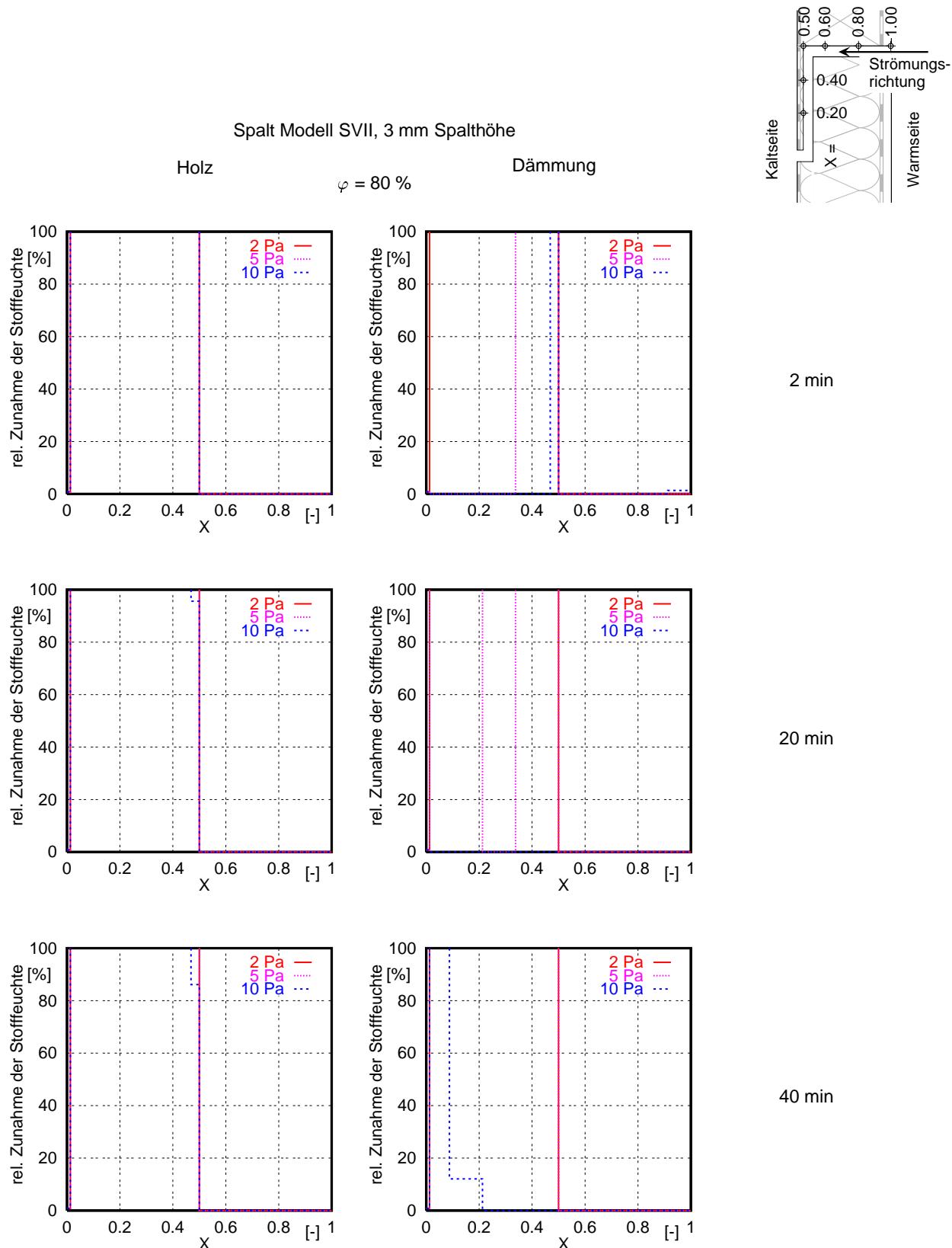


Bild 41: Ergebnisse für Spalt Modell S VII, 3 mm Spalthöhe. Änderung der relativen Feuchte in Holz (links) und Mineralwolle (rechts) über der dimensionslosen Spalttiefe aufgetragen. Berechnungsergebnisse für eine Raumluftfeuchte von $\varphi=80\%$.

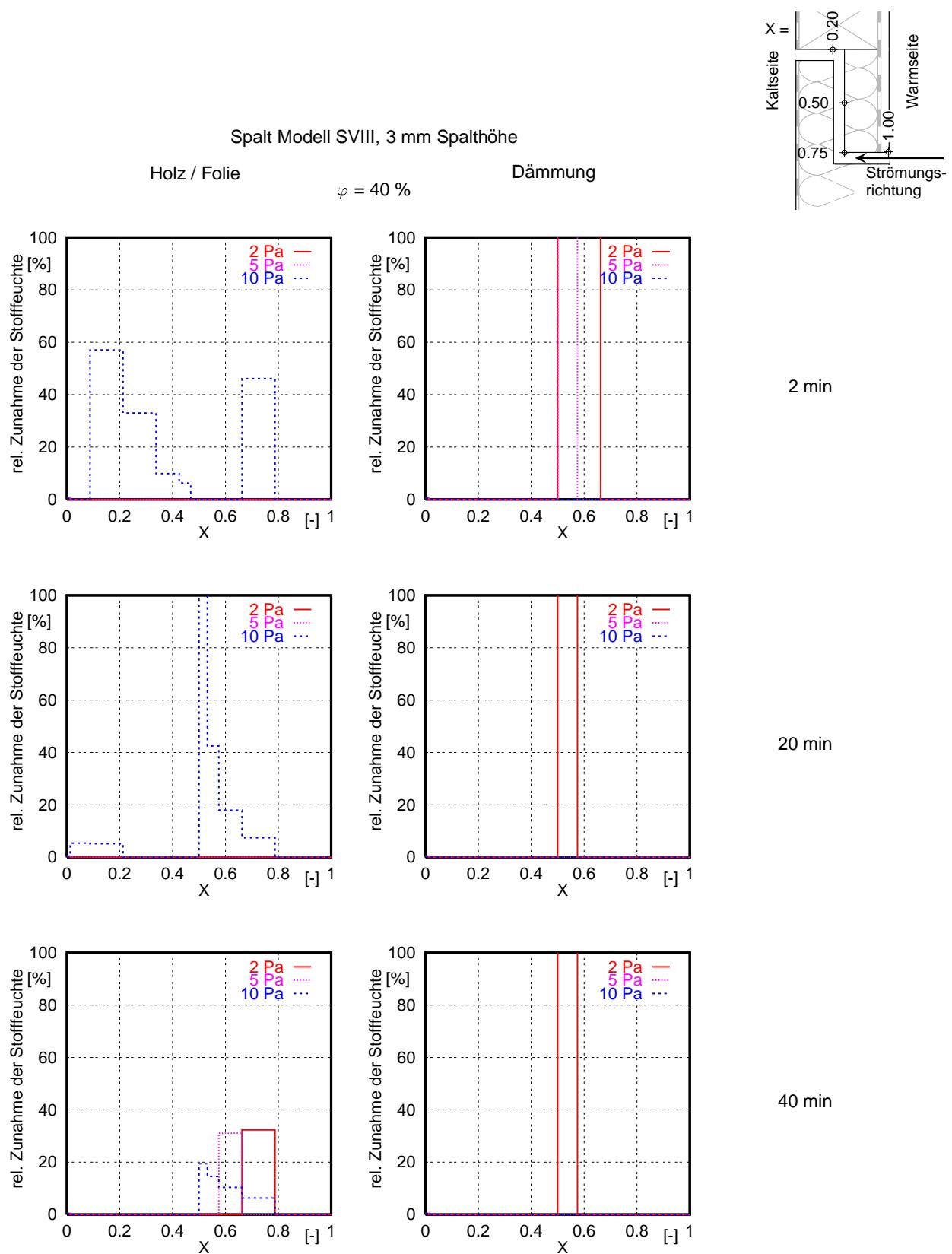


Bild 42: Ergebnisse für Spalt Modell S VIII, 3 mm Spalthöhe. Änderung der relativen Feuchte in Holz (links) und Mineralwolle (rechts) über der dimensionslosen Spalttiefe aufgetragen. Berechnungsergebnisse für eine Raumluftfeuchte von $\varphi=40\%$.

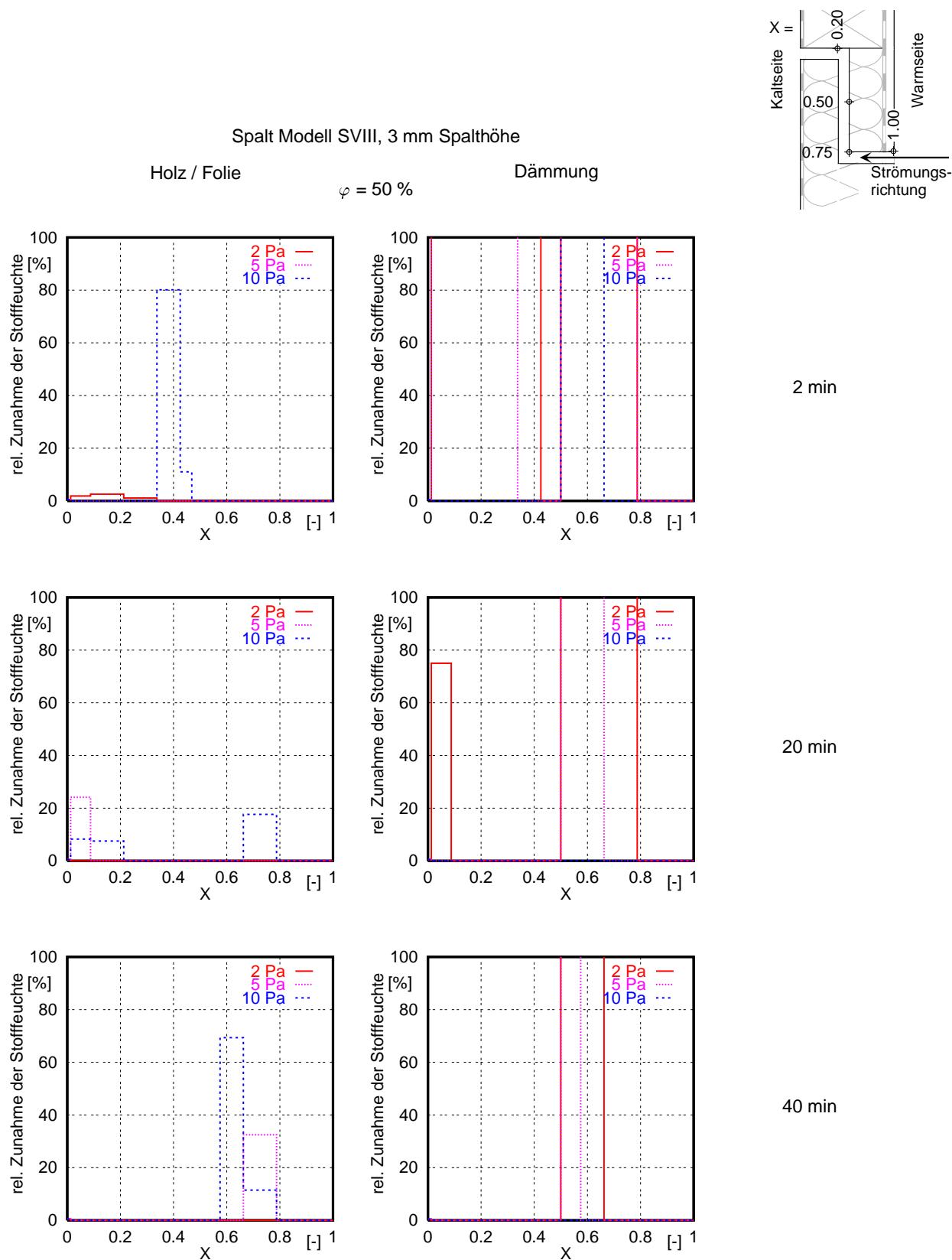


Bild 43: Ergebnisse für Spalt Modell S VIII, 3 mm Spalthöhe. Änderung der relativen Feuchte in Holz (links) und Mineralwolle (rechts) über der dimensionslosen Spalttiefe aufgetragen. Berechnungsergebnisse für eine Raumluftfeuchte von $\varphi=50\%$.

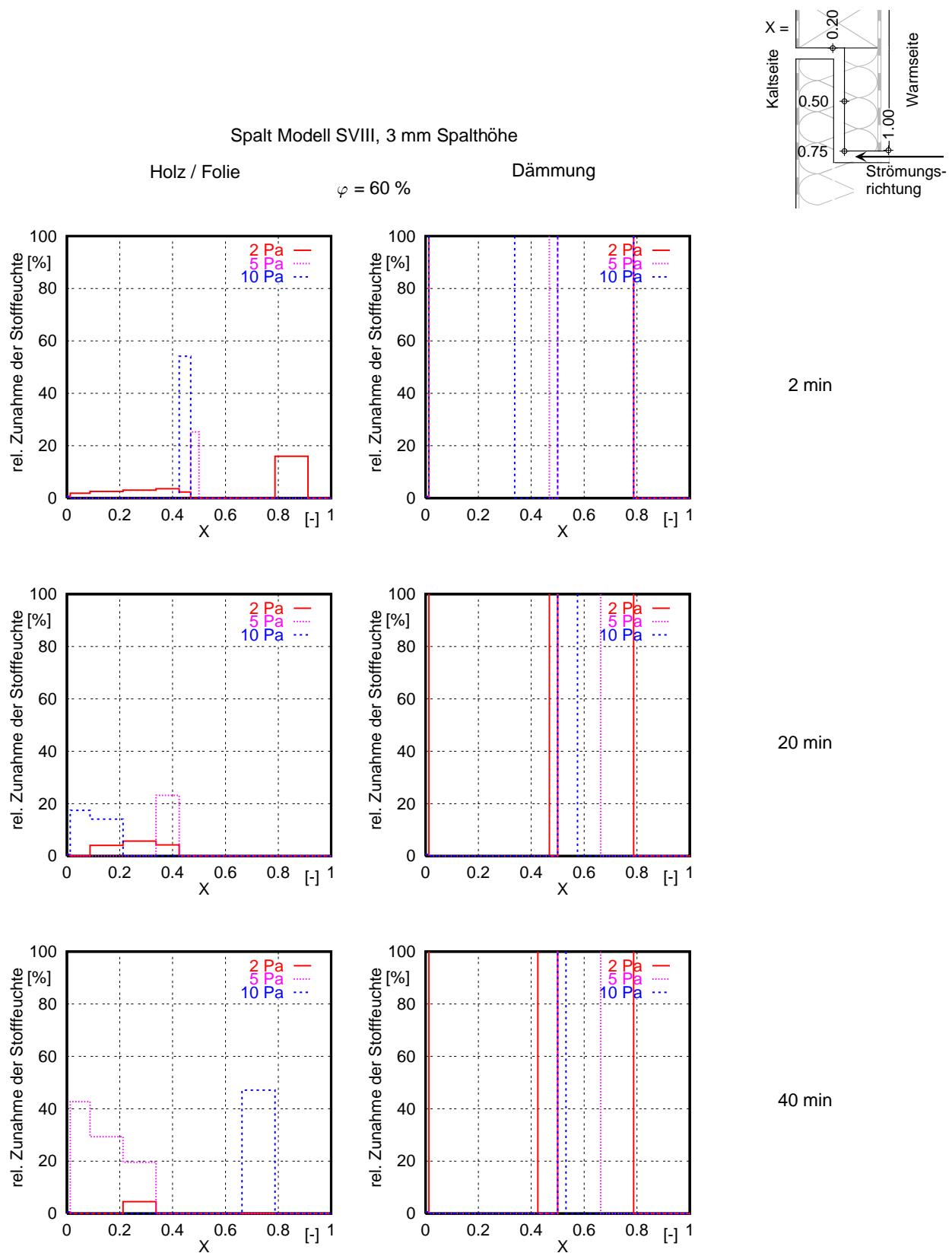


Bild 44: Ergebnisse für Spalt Modell S VIII, 3 mm Spalthöhe. Änderung der relativen Feuchte in Holz (links) und Mineralwolle (rechts) über der dimensionslosen Spalttiefe aufgetragen. Berechnungsergebnisse für eine Raumluftfeuchte von $\varphi=60\%$.

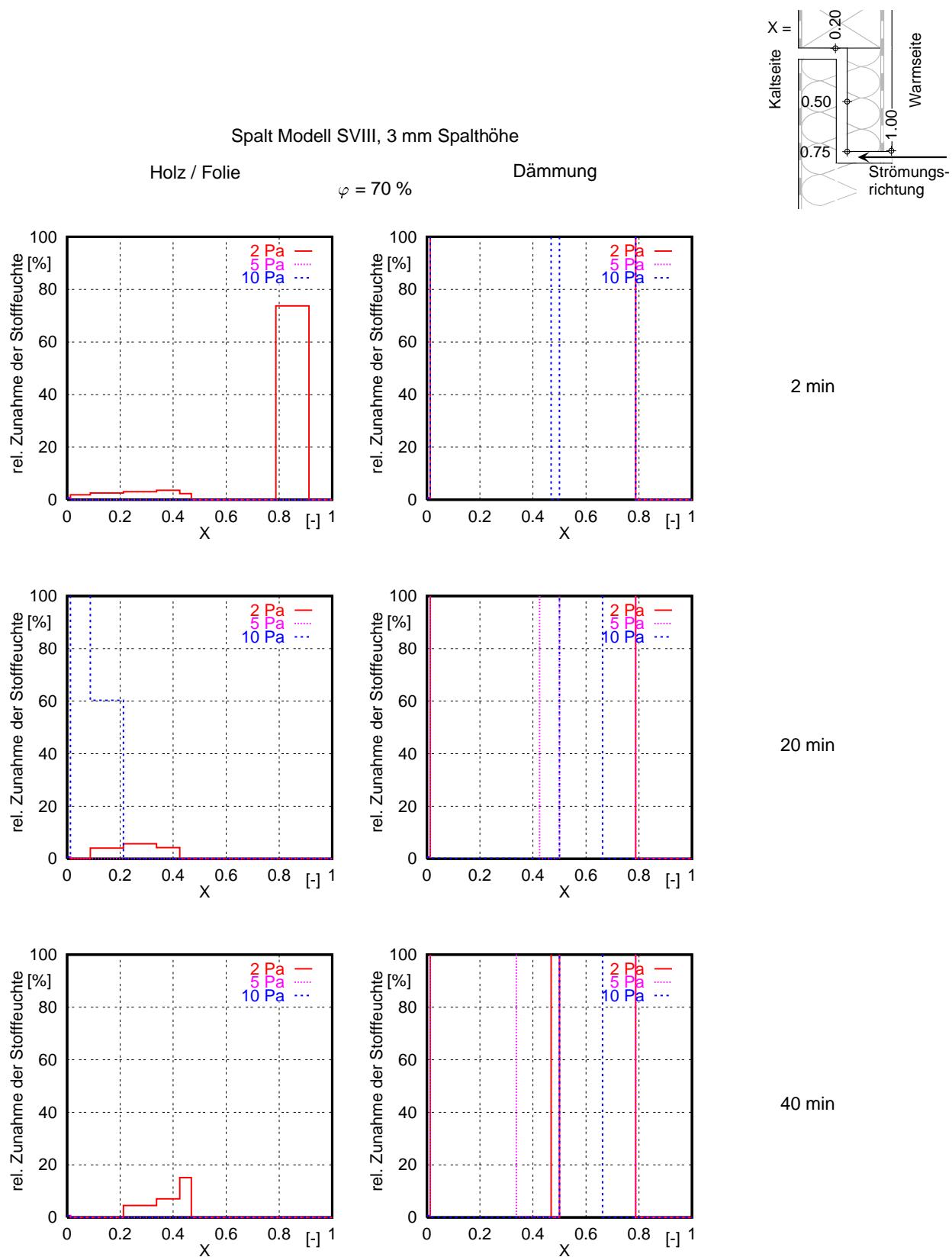


Bild 45: Ergebnisse für Spalt Modell S VIII, 3 mm Spalthöhe. Änderung der relativen Feuchte in Holz (links) und Mineralwolle (rechts) über der dimensionslosen Spalttiefe aufgetragen. Berechnungsergebnisse für eine Raumluftfeuchte von $\varphi=70\%$.

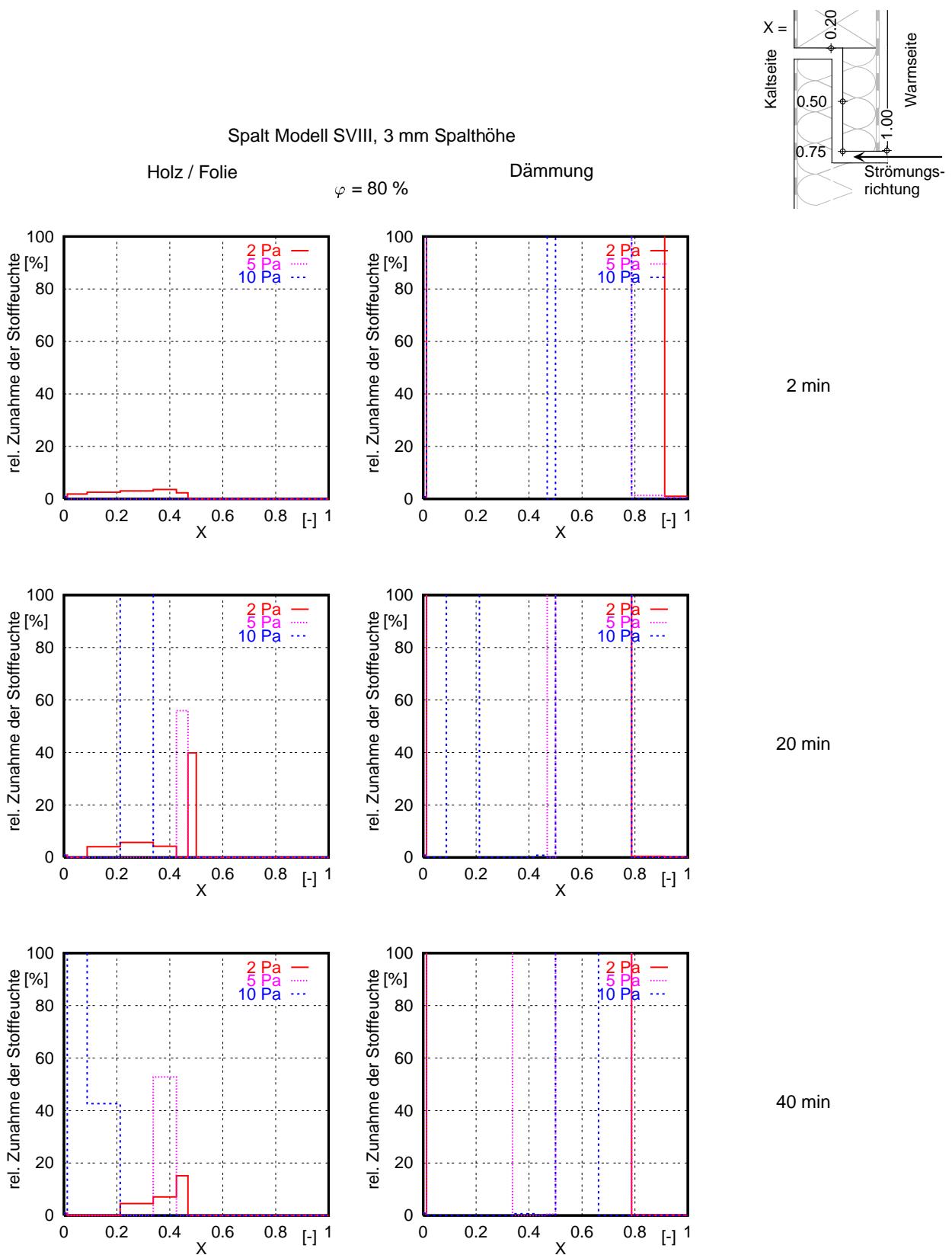


Bild 46: Ergebnisse für Spalt Modell S VIII, 3 mm Spalthöhe. Änderung der relativen Feuchte in Holz (links) und Mineralwolle (rechts) über der dimensionslosen Spalttiefe aufgetragen. Berechnungsergebnisse für eine Raumluftfeuchte von $\varphi=80\%$.

5 Diskussion und Bewertung

5.1 Allgemeines

Im Hinblick auf die Vermeidung von Bauschäden ist es dringend notwendig, fundierte Kenntnisse darüber zu erlangen, unter welchen Voraussetzungen übliche Anschlußausbildungen tatsächlich durch konvektiven Feuchteintrag gefährdet sind. Die Beurteilung des Feuchteschadenspotentials setzt die Kenntnis der Temperaturverteilung im Bauteilquerschnitt voraus. Dabei ist die Berücksichtigung der Überlagerung von Wärmebrücken infolge Wärmeleitung und Durchströmung des Bauteils bei der Ermittlung der Temperaturverteilung ein wesentliches Ergebnis der Untersuchung.

Überlagerung von
Wärmeleitung und
Wärmetransport
durch Strömung

Die Vielzahl möglicher Anschlußausbildungen und Leckagen machen es notwendig, die vorliegende Problemstellung durch Simulationsrechnungen bearbeiten zu können. Moderne Programme für Computational Fluid Dynamics (CFD-Programme) erlauben, sowohl strömungstechnische Vorgänge als auch thermische Effekte durch Strömungen mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung auf digitalen Rechnern abzubilden. Auf der Basis der meßtechnisch untersuchten Aufbauten werden Simulationsrechnungen durchgeführt, die einen Modellabgleich an den Meßwerten hinsichtlich der sich einstellenden Temperaturverteilungen im Bauteil sowie in vorhandenen Hohlräumen ermöglichen. Durch den Abgleich zwischen Meßergebnissen und Computersimulationen mit dem CFD-Programm wird es möglich, für den betrachteten Anwendungsfall sinnvolle Vorgaben für notwendige Parameter der CFD-Berechnungen zu geben. Damit ist ein erster Schritt vollzogen, das Instrument CFD für die Schadensanalyse aber auch für die Prognose von Schadenspotentialen in Zusammenhang mit Leckagen einzusetzen.

Modellabgleich
anhand von
Meßwerten

In einem zweiten Schritt werden mit den abgeglichenen Rechenmodellen Parameteruntersuchungen durchgeführt und detaillierte Prognosen für unterschiedliche Konstruktionen hinsichtlich des Feuchterisikos erstellt. Dabei wird die Größenordnung des möglichen konvektiven Feuchteintrags in Abhängigkeit von Leckagegrößen und Druckverhältnissen für verschiedene Konstruktionen bestimmt. Wesentliche Merkmale zur Beschreibung einer Leckage und des Leckageortes sind dabei die anliegende Druckdifferenz mit Größe und Vorzeichen, die Temperatur und Feuchtebeladung der durch die Leckage strömenden Luft sowie die Größe und Ausbildung der Leckage im Sinne konstruktiver Unterschiede je nach Gebäudetyp. Die Strömungsrichtung relativ zur Schwerkraft ist bei der erzwungenen Konvektion, welche hier betrachtet wird, von untergeordneter Bedeutung.

Parameteruntersu-
chungen an typischen
Leckagegeometrien

Folgende wesentlichen Annahmen und Vereinfachungen werden getroffen:

- Die Temperatur der durch den Spalt strömenden Luft wird für die Feuchtebetrachtung als konstant betrachtet, d.h. die Änderung der mittleren Temperatur der strömenden Luft bleibt unberücksichtigt.
- Für jede betrachtete Periodendauer werden hinsichtlich der Transportvorgänge konstante Bedingungen über die gesamte Periodendauer angenommen.
- Trocknungsvorgänge sowie ein Feuchtetransport im Material in Spaltrichtung werden nicht berücksichtigt
- Eine mögliche "Ermüdung" der strömenden Luft hinsichtlich der Feuchtebeladung wird vernachlässigt
- $c_w = c_s(\theta_w)$

Die Anwendung des Verfahrens nach Gleichungen 41 bis 46 zur Bestimmung der Feuchtespeicherfähigkeit beruht auf der Kenntnis entsprechender Stoffkenngrößen. Insbesondere die Sorptionsisotherme – die im Bereich der kapillaren Wasseraufnahme stetig differenzierbar sein muß – sowie die feuchteabhängige Diffusionswiderstandszahl des jeweils betrachteten Oberflächenmaterials gehen dabei in die Berechnung ein. Die Steigung ($\partial u / \partial \varphi$) der Sorptionsisothermen nach Gl. 49 ist im interessierenden Feuchtbereich für die als Dämmung eingesetzte Mineralwolle sehr groß. Hierdurch ergeben sich sehr kleine wirksame hygrische Dicken und daraus wiederum extrem große Änderungen der Feuchte der oberflächennahen Schicht. Die Ergebnisse sind sehr kritisch zu betrachten. Die weitere Diskussion erfolgt daher auf der Basis der Ergebnisse für die Materialien Holz und Ziegel. Die Folie bei den Spalttypen S I, S II und S VII wird nicht gesondert betrachtet. In der Regel kann die auf der außenseitigen Folie anfallende Feuchtigkeitsmenge der darunterliegenden Dämmung zugeschrieben werden, da entsprechende Konstruktionen / Situationen überwiegen im Dachbereich zu finden sind und die Feuchtigkeit auf die darunterliegende Dämmung abtropfen wird.

Für Spalte vom Typ S IV und S VI werden keine Berechnungen durchgeführt. Dieser Spalttyp wird erst für eine dynamische Betrachtung unter Berücksichtigung von wechselndem Vorzeichen der Druckdifferenz interessant. In einem solchen Fall kann sich die raumseitige "Lamelle" bei Überdruck außen abkühlen und bei anschließendem Überdruck innen bestehen die Gefahr,

daß sich Feuchtigkeit ansammelt. Die entsprechende Behandlung dieser Fragestellung ist nicht Gegenstand des vorliegenden Projektes.

Die stationäre Durchströmung von Leckagen von innen nach außen hat in allen betrachteten Fällen zur Folge, daß die Oberflächentemperaturen in Spalten deutlich höher liegen, als ohne Berücksichtigung des Wärmeeintrages durch die strömende Luft. Damit liegt bei der statio-nären Betrachtung auch die relative Luftfeuchtigkeit an der Spaltoberfläche deutlich tiefer, als bei einer einfachen Betrachtung ohne Berücksichtigung des Wärmetransports durch die strömende Luft.

Leckagen sind auch
bei stationärer
Betrachtung stark
gefährdet

Alle untersuchten Leckagen bzw. Spalttypen zeigen bei der erzwungenen Durchströmung mit warmer, feuchter Raumluft eine deutliche Gefährdung hinsichtlich einer nennenswerten Zunahme der Feuchtigkeit oberflächennaher Schichten innerhalb der Leckagen. Die in den gegebenen Ergebnisdarstellungen zu entnehmenden Spalttiefen, "ab denen was passiert", stimmen sehr gut mit der jeweiligen Überschreitung von ca. 80 % rel. Luftfeuchtigkeit an der Materialoberfläche überein.

Begrenzender Faktor:
Feuchtespeicherfähigkeit

Die Suche nach dem begrenzenden Faktor gem. Gleichung 59 führt zu der Aussage, daß bei den hier durchgeföhrten Untersuchungen die wirksame hygrische Speicherkapazität in nahezu allen Fällen zu allen Zeiten und an allen Stellen im Spalt die begrenzende Größe ist. D.h., sowohl das Angebot an Feuchte in der strömenden Luft als auch der Stoffübergang von der Strömung an die Bauteiloberfläche wird nicht "ausgeschöpft". Um eine bessere Beurteilung des Risikopotentials von Leckagen hinsichtlich des konvektiven Feuchteintrages zu erreichen ist es notwendig, die Berechnung der Vorgänge gekoppelt durchführen zu können. Darüberhinaus sollten Betrachtungen dynamisch erfolgen und es sollten sowohl der bauteilinterne Feuchttetransport als auch Trocknungsvorgänge mit beschrieben werden können.

5.2 "Direkte" Leckagen

Bei Spalten vom Typ S III – Leckagen, die zwar keine größeren Umlenkungen haben, die jedoch im Inneren des Bauteils einen deutlich ausgeprägten Hohlraum aufweisen – ist es zwar etwas weniger kritisch, wenn der wesentliche Druckabfall auf der Außenseite erfolgt. Der anhand der Untersuchungsergebnisse festzustellende Unterschied zu dem alternativen Fall, daß der wesentliche Druckabfall raumseitig erfolgt, ist jedoch so gering, daß keine praktische Unterscheidung zu treffen ist.

Spalte vom Typ S V, d.h. Leckagen, die ohne größere Umlenkungen durch das Bauteil führen und eine über den gesamten Bauteilquerschnitt relativ konstante Spalthöhe haben, sind bei der Durchströmung mit relativ feuchter Raumluft mit abnehmender Spalthöhe geringfügig abnehmend gefährdet, bei der Durchströmung mit relativ trockener Raumluft ($\varphi=40\%$) mit abnehmender Spalthöhe zunehmend gefährdet. Größere Spalte werden infolge der größeren Menge an Wärme, die mit der Luft in den Spalt getragen wird, innenseitig mehr erwärmt. Dies wirkt sich jedoch nur in geringem Maße aus, so daß sich bereits bei Raumluftfeuchten von $\varphi=50\%$ die Gefährdung umkehrt, d.h., größere Spalt mehr gefährdet sind. Insgesamt sind die ermittelten Tendenzen und wechselweisen Abhängigkeiten jedoch so zusammenzufassen, daß größere Leckagen ein höheres Gefährdungspotential aufweisen.

5.3 Leckagen mit Umlenkung

Bei Spalten des Typs S I bzw. S II, also Leckagen mit einer Umlenkung außenseitig sowie einem größeren Hohlraum in der Konstruktion sind kaum Unterschiede in Abhängigkeit von der Anordnung des wesentlichen Druckabfalles – innen oder außen – festzustellen. Diese Spalttypen sind für alle betrachteten Parameter besonders im Außenbereich stark gefährdet.

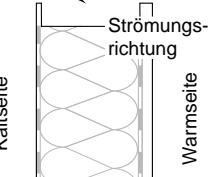
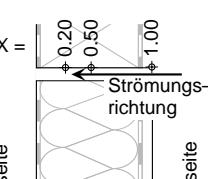
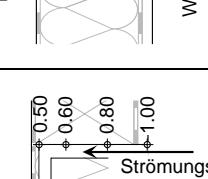
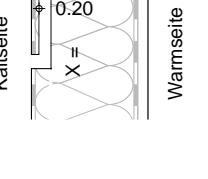
Auch bei Spalten vom Typ S VII, also Leckagen mit einer Umlenkung außenseitig und einer relativ konstanten Spalthöhe über die gesamte Spalttiefe zeigen größere Spalte bei langen Perioden und höheren Druckdifferenzen gewisse "Sicherheiten". Dies gilt jedoch wiederum nur für die Durchströmung mit relativ trockener Raumluft. Insgesamt kann auch für diesen Spalt-Typus die Aussage getroffen werden: Über den gesamten untersuchten Parameterbereich stark gefährdet. Die Untersuchung am Spalt vom Typ S VII mit Ziegel als Material im Rippenbereich (z.B. Giebelwandanschluß) zeigt, daß, wie infolge der Dichte und spezifischen Wärmekapazität sowie der Wärmeleitfähigkeit des Materials im Vergleich zu Holz zu erwarten, die potentielle Feuchtezunahme im Spaltbereich größer als bei Holz ist. Die Auswirkungen einer Feuchtezunahme auf die Konstruktion ist dabei nicht berücksichtigt.

Spalte des Typs S VIII – Leckage mit gleichmäßiger Spalthöhe über die gesamte Bauteiltiefe, eine Umlenkung in Bauteilmitte (ca. mittig zwischen innen und außen) – weisen für die untersuchten Parameter die geringste Gesamtgefährdung auf. Die Ergebnisse für diesen Spalttyp zeigen jedoch auch einige sehr interessante Abhängigkeiten der gefährdeten Bauteiltiefe von der Periodendauer und der anliegenden Druckdifferenz auf.

5.4 Grobe Bewertung

In Tabelle 8 ist eine grobe Bewertung der gewonnenen Erkenntnisse zusammengefaßt wiedergegeben. Der Bewertung liegen die Ergebnisse für eine Periodendauer von 40 min, also praktisch stationär, zugrunde. Dieser Bewertungsversuch kann nicht zu Aussagen über konkrete Konstruktionsbeispiele bzw. -situationen herangezogen werden.

Tabelle 8: Bewertung verschiedener Leckagetypen hinsichtlich der Tendenzen des Gefährdungspotentials auf der Basis des Ansatzes gem. Gl. 59 und der Periodendauer 40 min (praktisch stationär).

Spalttyp	Skizze	Beispiele	Risikotendenz
S III, "Spalt mit Hohlraum"		Sparren allgemein, Streichsparren, Rippen, Pfetten	Kein praktischer Unterschied in der Gefährdung in Abhängigkeit von der Lage (innen oder aussen) des wesentlichen Druckabfalls.
S V, "Spalt"		Sparren, Rippen, Pfetten, Fensteranschluss	Tendenziell etwas mehr gefährdet als "S III", insbesondere bei höheren Druckdifferenzen. Mit steigender Leckagegröße wächst das Gefährdungspotential deutlich an.
S VII, "Spalt mit Umlenkung außen"		Sparren, Pfetten, Dachflächenfenster	Im Bereich vor der Umlenkung tendenziell geringer gefährdet als "S V". Die innere Oberflächentemperatur des "Folienlappens" ist stets kleiner als die Taupunkttemperatur. Dieser Bereich ist daher sehr gefährdet. Von der Spalthöhe 2 mm über 3 mm hin zu 5 mm nimmt das Gefährdungspotential zunächst zu, dann wieder ab.
S VIII, Spalt mit Umlenkung mittig"		Dämmplatten mit "Nut- und Feder"	Geringste Gefährdungstendenz der hier betrachteten Varianten

Literatur

- [1] Grunewald, J. *Diffusiver und konvektiver Stoff- und Energietransport in kapillarporösen Baustoffen*. Dissertation, Technische Universität Dresden, 1997.
- [2] Hauser, G. und Maas, A. *Auswirkungen von Fugen und Fehlstellen in Dampfsperren und Wärmedämmenschichten*. Deutsche Bauzeitschrift 24 (1992), H. 1, S. 97–100.
- [3] DIN EN 13829. *Thermal performance of buildings – Determination of air permeability of buildings – Fan pressurization method*, 10 2000.
- [4] Geißler, A. und Hauser, G. *Kenngrößen zur Beschreibung der Luftdichtheit von Gebäuden*. bau-zeitung 51 (1997), H. 11, S. 55–58.
- [5] Husseini, F. *Feuchteverteilung in porösen Baustoffen aufgrund instationärer Wasserdampfdiffusion*. Dissertation, Universität Dortmund, Fakultät Bauingenieurwesen, 1982.
- [6] Hohmann, R. *Bestimmung der Feuchtepufferfunktion von Innenputzen*. Dissertation, Universität Essen, Institut für Bauphysik und Materialwissenschaft, 1996.
- [7] Haghishat, F., Rao, J. und Fazio, P. *The Influence of Turbulent Wind on Air Change Rates – A Modelling Approach*. Building and Environment 26 (1991), 2, S. 95–109. Achims.
- [8] Haghishat, F., Brohus, H. und Rao, J. *Modelling air infiltration due to wind fluctuations - a review*. Building and Environment 37 (2000), S. 377–385.
- [9] Prandtl, L., Oswatitsch, K. und Wieghardt, K. *Führer durch die Strömungslehre*, 8 Ed. Vieweg & Sohn, Braunschweig/Wiesbaden, 1984.
- [10] Jischa, M. *Konvektiver Impuls-, Wärme- und Stoffaustausch*. Braunschweig; Wiesbaden: Vieweg, 1982.
- [11] Zierep, J. *Grundzüge der Strömungslehre*, 2 Ed. G. Braun, Karlsruhe, 1982.
- [12] Esdorn, H. und Rheinländer, J. *Zur rechnerischen Ermittlung von Fugendurchlaßkoeffizienten und Druckexponenten für Bauteilfugen*. Heizung Lüftung Haustechnik 29 (März 1978), 3.
- [13] Spurk, J. *Strömungslehre - Einführung in die Theorie der Strömungen*, 3 Ed. Springer Verlag Berlin Heidelberg New York (Springer Lehrbuch), 1993.
- [14] Fluent Inc. *Fluent 5 User's Guide*. Lebanon, NH 03766, 1988.
- [15] Schlünder, E. U. *Einführung in die Wärmeübertragung*, 5 Ed. Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig/Wiesbaden, 1986.
- [16] Al-Nimr, M. A. und Abu-Hijleh, B. A. *Validation of the thermal equilibrium assumption in the transient conjugated forced convection channel flow*. Heat and Mass Transfer 37 (2001), S. 511–518.
- [17] Baehr, H. und Stephan, K. *Wärme- und Stoffübertragung*, 2 Ed. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 1996.
- [18] Petzold, K. *Wärmelast*. In Reihe Luft- und Kältetechnik, G. Heinrich, , 2 Ed. VEB Verlag Technik, Berlin, 1980.
- [19] Krischer, O. und Kast, W. *Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik*. In Trocknungstechnik, 3 Ed., Bd. 1. Springer-Verlag, Berlin; Heidelberg; New York, 1992.
- [20] Kießl, K. *Kapillarer und dampfförmiger Feuchtetransport in mehrschichtigen Bauteilen – Rechnerische Erfassung und bauphysikalische Anwendung*. Dissertation, Universität Gesamthochschule Essen, Fachbereich Bauwesen, 1983.
- [21] Künzel, H. *Verfahren zur ein. und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten*. Dissertation, Universität Stuttgart, Fakultät Bauingenieur- und Vermessungswesen, 1994.
- [22] Otto, F. *Einfluß von Sorptionsvorgängen auf die Raumluftfeuchte*. Dissertation, Universität Kassel, Fachbereich Architektur, 1995.
- [23] Kumaran, M. K. *Heat, Air and Moisture Transfer Through New and Retrofitted Insulated Envelope Parts (Hamtie)*. In IEA Energy Conservation in Buildings and Community Systems, Annex 24, F. A. Mohamed, , 1 Ed., Bd. 3. Laboratorium Bouwfysica, K.U.-Leuven, Belgium, 1996.
- [24] Reid, R., Prausnitz, J. und Sherwood, T. *The Properties of Gases and Liquids*. McGraw-Hill, New York, 1977.
- [25] Pollak, R. *Die thermodynamischen Eigenschaften von Wasser*. Dissertation, Ruhr-Universität Bochum, 1974.
- [26] DIN 4108-3:2001-07 "Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden". *Klimabedingter Feuchteschutz; Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung*.

Index

- λ , 9
- ζ , 9
- Übergangsbereich, 9
- Bauteiloberfläche, 9
- Befeuchtung, 21
- Biot Zahl, Bi, 15
- Biot-Zahl
 - Stofftransport, 22
- CFD, 35
 - Materialkennwerte, 35
 - Simulationsparameter, 35
 - Zeitsequenz, 36
- Diffusionskoeffizient, 22
- dimensionslose Kenngrößen
 - Nusselt Zahl, Nu, 14
 - Prandtl Zahl, Pr, 14
 - Reynolds Zahl, Re, 8, 14
 - Stanton Zahl, St, 14
- Druckabfall, 9
- Druckdifferenz, 6
- druckneutrale Fläche, 6
 - neutrale Ebene, 6
 - neutrale Fläche, 6
- Druckschwankung, 11
- Druckverlustbeiwert
 - λ , 9
- Druckverteilung
 - Gebäude, 6
- Durchströmung
 - zeitliches Verhalten, 11
- Entfeuchtung, 21
- Feuchteeintrag
 - wirksamer, 27
- Feuchtetransport, 5
- Frequenz, 11
- Gebäude
 - druckneutrale Fläche, 6
 - Druckverteilung, 6
- Grenzfrequenz, 11
- Grenzschicht, 8, 20
 - Grenzschichtdicke, 20
- Grenzschichtdicke
 - Strömungs- Temperatur- und Diffusionsgrenzschicht, 20
- hydraulisch glatt, 9
- hygrisch wirksame Schichtdicke, 21
- hygrische Speicherkapazität, 21
- Konvektion, 19
- Konzentrationsdifferenz, 20
- laminare Strömung, 9
 - Oberflächenrauhigkeit, 10
- Leckageort
 - Druckdifferenz, 6
- Materialkennwerte, 35
- messtechnische Untersuchung, 28
 - Ergebnisse, 29
 - Lufttemperatur im Spalt, 29
 - Oberflächentemperatur, 28
- Nusselt Zahl, Nu, 14
- Oberflächentemperatur, 28
- Platin-Widerstandsthermometer (Pt 1000), 28
 - Verlustleistung, 28
- Prandtl Zahl, Pr, 14
- rauher Kanal
 - Strömungsform, 9
- Rauhigkeit, 9
- Reynolds Zahl, Re, 8, 14
- Sandkornrauhigkeit, 9
- Schichtdicke
 - hygrisch wirksam, 21
- Schmidt-Zahl, Sc, 20
- Sherwood-Zahl, Sh, 20
- Simulation, 35
- Simulationsparameter
 - CFD, 35
 - Zeitsequenz, 36
- Sorptionsisotherme, 22
- Spaltobерfläche, 9
- Spaltströmung
 - λ , 9
 - Druckabfall, 9
 - Lufttemperatur, 29
- Speicherkapazität, 21
 - hygrische, 21
- Stanton Zahl, St, 14
- Stofftransport, 19
- Stoffübertragung, 5
- Strömung
 - laminar, 9
 - rauher Kanal, 9
 - Wärmeübertragung, 14
- Strömungsform
 - Übergangsbereich, 9
 - hydraulisch glatt, 9
 - rauh, 9
- Strömungsgrenzschicht
 - Dicke, 8
- Strömungsrichtung, 6
- Strömungswiderstand
 - Widerstandsbeiwert, 9
- Strömungswiderstandsbeiwert, 9
- Tauwasser, 5
- Temperaturmessung, 28
- Verlustleistung, 28
- Versuchsaufbau, 28
- Wasserdampf-Sättigungskonzentration, 23
- Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl, 22
- Widerstandsbeiwert
 - ζ , 9
 - Strömung, 9
- wirksamer Feuchteeintrag, 27
- wirksamer Feuchtetransport, 19
- Wärmeübertragung, 5, 14
- Wärmespeicherkapazität, 16
- Zeitsequenz, 36

A Bild- und Tabellenverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

1	Konvektiver und diffusiver Feuchtetransport	4
2	Prinzipskizzen Spalte	5
3	Druckverteilung um Gebäude	6
4	Leckageorte in Gebäuden	7
5	Spaltmittellinie für Entdimensionalisierung der Spalttiefe	8
6	Bezugspunkt-Koordinaten Auswerteflächen	9
7	Parametervariationen Spaltströmung 1	12
8	Parametervariationen Spaltströmung 2	13
9	Druckabfall über Spalt, Vergleich einf. Ansatz und CFD	14
10	Grenzfrequenz der Durchströmung	15
11	Wärmeübergangskoeffizient als Funktion von \bar{u}	17
12	Wärmeübergangskoeffizient und Wärmestromdichte, Beispiel	18
13	Bedeutung der Biot-Zahl	19
14	Skizze "thermisch aktive Wandstärke"	19
15	Stoffübergangskoeffizient, Beispiel	21
16	Spaltmittelungsflächen	25
17	Skizze der Fühlerverteilung, einfacher Spalt	28
18	Fühlereinbau	28
19	Meßergebnisse S V, 2 mm	30
20	Meßergebnisse S V, 5 mm	31
21	Meßergebnisse S V, 5 mm, Lufttemperaturen	32
22	Meßergebnisse S VII, 2 mm	33
23	Skizze des zeitlichen Ablaufs der Simulationsrechnungen	36
24	Meß- und Simulationsergebnisse S V, 2 mm	38
25	Meß- und Simulationsergebnisse S V, 5 mm	39
26	Meß- und Simulationsergebnisse S VII, 2 mm	40
27	Ergebnisse S V, 1 mm, $\varphi=40\%$	42
28	Ergebnisse S V, 1 mm, $\varphi=50\%$	43
29	Ergebnisse S V, 1 mm, $\varphi=60\%$	44
30	Ergebnisse S V, 1 mm, $\varphi=70\%$	45
31	Ergebnisse S V, 1 mm, $\varphi=80\%$	46
32	Ergebnisse S V, 3 mm, $\varphi=40\%$	47
33	Ergebnisse S V, 3 mm, $\varphi=50\%$	48
34	Ergebnisse S V, 3 mm, $\varphi=60\%$	49
35	Ergebnisse S V, 3 mm, $\varphi=70\%$	50
36	Ergebnisse S V, 3 mm, $\varphi=80\%$	51
37	Ergebnisse S VII, 3 mm, $\varphi=40\%$	52
38	Ergebnisse S VII, 3 mm, $\varphi=50\%$	53
39	Ergebnisse S VII, 3 mm, $\varphi=60\%$	54
40	Ergebnisse S VII, 3 mm, $\varphi=70\%$	55
41	Ergebnisse S VII, 3 mm, $\varphi=80\%$	56
42	Ergebnisse S VIII, 3 mm, $\varphi=40\%$	57
43	Ergebnisse S VIII, 3 mm, $\varphi=50\%$	58
44	Ergebnisse S VIII, 3 mm, $\varphi=60\%$	59
45	Ergebnisse S VIII, 3 mm, $\varphi=70\%$	60
46	Ergebnisse S VIII, 3 mm, $\varphi=80\%$	61

Tabellenverzeichnis

1	Strömungsgeschwindigkeit im Spalt	14
2	Koeffizienten für Sorptionsisothermen und Wasserdampfdiffusionswiderstands- zahl	24
3	Kalibrationsdaten Spalt S V, 2 mm Sollhöhe	29
4	Kalibrationsdaten Spalt S V, 5 mm Sollhöhe	29
5	Kalibrationsdaten Spalt S VII, 2mm Sollhöhe	29
6	Parameter für CFD-Berechnungen	37
7	Materialkennwerte für CFD-Simulationen	37
8	Bewertung	65