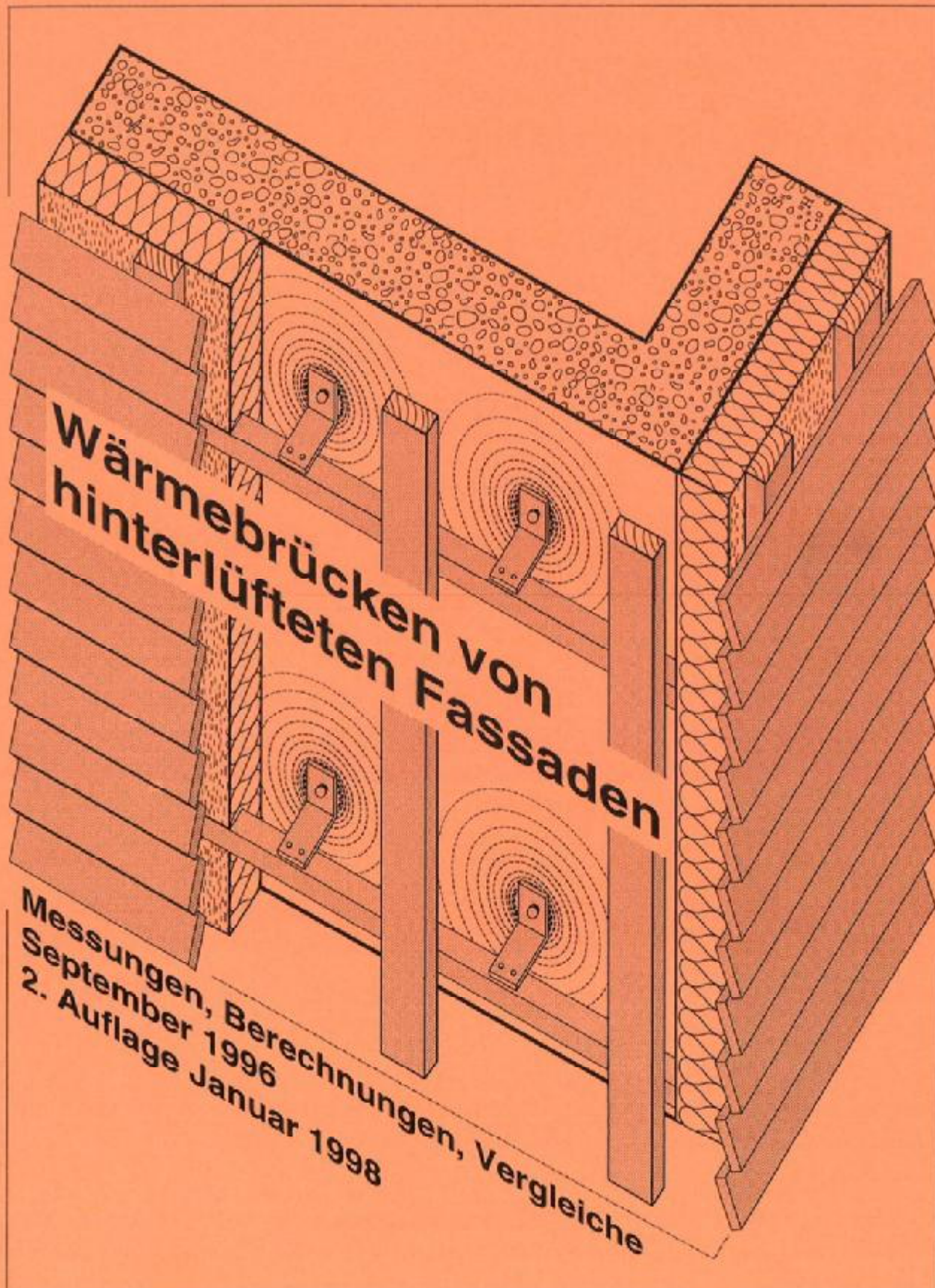


Abteilung Bauphysik

Projekt Trägerschaft:

Schlussbericht Nr. 158 740

BEW, EMPA, FVHF, SFHF, SSV, SVDW, SWISSISOL, SZFF





Prüfbericht Nr. 158 740

Wärmebrücken von hinterlüfteten Fassaden

Teil 1

Wärmedurchgangsmessungen an Unterkonstruktionen in hinterlüfteten Fassaden (Ermittlung der Wärmebrückenwirkung)

Seite 5 - 45

Teil 2

Numerische Berechnungen der Wärmebrückenwirkung an Unterkonstruktionen in hinterlüfteten Fassaden

Seite 47 - 85

Teil 3

Ergebnisse im Vergleich und Illustrationen

Seite 87 - 94

Trägerschaft:

BEW	Bundesamt für Energiewirtschaft
EMPA	Eidg. Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, Abt. Bauphysik
FVHF	Fachverband Baustoffe und Bauteile für vorgehängte hinterlüftete Fassaden e.V.
SFHF	Schweiz. Fachverband für hinterlüftete Fassaden
SSIV	Schweiz. Spenglermeister- und Installateur- Verband
SVDW	Schweiz. Verband Dach und Wand
SWISSISOL	Vereinigung Schweiz. Hersteller von Isolier- Mineralfasern
SZFF	Schweiz. Zentralstelle für Fenster- und Fassadenbau

EMPA Prüfbericht Nr 158 740

Autoren: Teil 1 Christoph Tanner, dipl. Arch HTL, EMPA, CH-8600 Dübendorf
Teil 2 Karim Ghazi Wakili, Dr. sc. nat. ETH, EMPA, CH-8600 Dübendorf
Henk L. Schellen, Bau- Ing. und Dozent für Bauphysik, Technische Universität Eindhoven, Niederlande
Teil 3 Christoph Tanner und Karim Ghazi Wakili

Druck: 2. Auflage: EMPA

Vertrieb: Sekretariat Schweiz. Verband Dach und Wand, SVDW
Lindenstrasse 4, CH-9240 Uzwil, Tel. 071 / 951 72 44

1. Auflage: 9/1996 : 300 / d

2. Auflage: 1/1998 : 150 / d

Verkaufspreis: CHF 80.- / Stk.

Copyright: © by EMPA Dübendorf (176)

Vorwort

Hinterlüftete Fassaden gelten als bauphysikalisch sichere Bauweise, da die vorgesezte Bekleidung bei richtiger Materialwahl und entsprechenden konstruktiven Details die an sie gestellten Anforderungen bezüglich Wetterschutz und Ästhetik mit langer Lebensdauer erfüllen kann (Zitat aus EMPA Schlussbericht F+E Nr. 127 378, Aug. 93 / ct 176).

Auch bezüglich Wärmeschutz lassen sich mit dem System der Aussenwärmedämmung und der hinterlüfteten Fassade gute Lösungen realisieren. Allerdings entstehen dabei unumgängliche Wärmebrücken, da die vorgehängte Bekleidung *durch* die Wärmedämmung hindurch im Tragwerk verankert werden muss. Verschiedene SIA-Normen fordern, dass diese (meist) punktuellen Wärmebrücken im k-Wert zu berücksichtigen sind. Bis heute liegen aber praktisch keine sicheren Werte über diese Wärmeverluste vor, da Berechnungen von komplizierten Konstruktionen, ohne Messwerte als Basis, unzuverlässig sind.

Das vorliegende Projekt soll an einigen ausgewählten Beispielen von unterschiedlichen Grundkonstruktionen, Auskunft über diese Wärmeverluste geben.

Es gilt zu bedenken, dass der vorliegende Bericht als Beispiel für die wärmetechnische Deklaration eines Systems angesehen werden kann. Er stellt aber auf keinen Fall eine Gesamtbeurteilung von hinterlüfteten Fassaden dar, da wesentliche Faktoren wie Gebrauchstauglichkeit, Sicherheit, Oekologie, Preis / Leistungsverhältnis u.v.a. nicht angesprochen werden. Selbst für eine rein bauphysikalische Beurteilung sind neben dem Wärmeschutz auch Schall- und Brandschutz sowie Wärmespeicherung, Diffusionsverhalten etc. einzubeziehen.

Für das Projekt Wärmebrücken von hinterlüfteten Fassaden haben sich verschiedene interessierte Verbände zusammengeschlossen. Auf Grund der Angebote vom 02.03.1995 und 19.06.1995 (ct/176) wurde der EMPA der Auftrag für die Durchführung entsprechender Prüfungen und Berechnungen erteilt. Mit zusätzlicher Beteiligung der EMPA und des BEW konnte am 12.07.1995 die erste Projektphase gestartet werden (Trägerschaft: vgl. Titelseite). Die EMPA Untersuchungen wurden dabei von einer Projekt- und einer Arbeitsgruppe begleitet, bestehend aus verschiedenen Vertretern der Trägerschaft.

EMPA Dübendorf, Abteilung Bauphysik, 2. September 1996

Der Projektleiter:



Ch. Tanner

Der Abteilungsleiter:



Th. Frank

Ziele des Projekts

Die Untersuchungen können als Beispiel einer wärmetechnischen Deklaration eines Unterkonstruktions (UK) - Systems angesehen werden. Dies ist für UK von hinterlüfteten Fassaden sinnvoll, denn nur so :

- kann der Architekt die verschiedenen Systeme miteinander vergleichen,
- hat der Planer präzise Werte für das wärmetechnische Konzept,
- kann der Hersteller durch Kenntnis der Schwachstellen gezielte Verbesserungen lancieren.

Hauptziel ist es jedoch, den messtechnischen Nachweis der quantitativen Wärmebrückenwirkung von verschiedenen UK zu erbringen und an einigen Beispielen die Wärmeverluste mittels Infrarot-Bildern auch qualitativ zu dokumentieren. Parallel zu den Messungen wird die Wärmeleitfähigkeit verschiedener Konstruktionsmaterialien ermittelt.

Mit diesen Kennwerten und den Randbedingungen aus den Messungen als Grundlage, können anschliessend Wärmedurchgangsberechnungen mit einem 3-dimensionalen Programm ausgeführt werden, die einerseits die Messwerte der verschiedenen Grundkonstruktionen nachvollziehen und andererseits Ausgangsbasis für rechnerische Variationen sind.

In einer weiteren Projektphase wurden Untersuchungen von marktüblichen Systemen durchgeführt und im Frühjahr 1998 wird eine Richtlinie zur Berücksichtigung der Wärmeverluste von Unterkonstruktionen erscheinen.

Im Rahmen des Projektes "Wärmebrücken von hinterlüfteten Fassaden" werden in diesem Bericht folgende Untersuchungen beschrieben:

- Teil 1
 - Wärmedurchgangsmessungen (k- Wert)
 - Wärmeleitfähigkeitsmessungen (λ - Wert, Kapitel 3.9)
 - Anhang: Prüfverfahren und Messprotokolle
Fotos zum Prüfungsablauf
- Teil 2
 - Numerische Berechnungen der Wärmebrückenwirkung
 - Berechnungsvarianten durch Veränderung der Eingaben
- Teil 3
 - Vergleich der Mess- und Rechenergebnisse
 - Illustration der Ergebnisse, Diagramme, Erfahrungswerte

In der Berichterstattung sind alle wesentlichen Daten wiedergegeben, welche für Transparenz- und Nachvollziehbarkeit notwendig sind.

In den Akten der EMPA befinden sich jedoch noch viele Einzeldaten (Mess- und Rechenergebnisse), die auf speziellen Wunsch eingesehen werden können.

Begriffsdefinitionen im Bericht: vgl. *Richtlinien für hinterlüftete Fassaden, SFHF 1992*



Prüfbericht Nr. 158 740

Teil 1

Wärmedurchgangsmessungen an Unterkonstruktionen in hinterlüfteten Fassaden (Ermittlung der Wärmebrückenwirkung)

Christoph Tanner

Inhalt Teil 1	Seite
1. Vorgehen für die Messungen	6
2. Durchgeführte Arbeiten (Prüfungsablauf)	7
3. Erstellen der Prüfwände	8-15
4. Bedingungen und Messanordnungen	16+17
5. Datenauswertung und Ergebnisse	18-24
6. Zusätzliche Prüfungsergebnisse	25-30
7. Zusammenfassung der Messergebnisse	31
Anhang: 1 - 7: Prüfverfahren und Messprotokolle	32-38
Anhang: 8 : Fotos zum Prüfungsablauf	39-45

Prüfobjekt: Betonwand (L x H x D = 150 x 200 x 18 cm)
mit 100 mm Aussenwärmedämmung
und verschiedenen Unterkonstruktionen

Auftrag vom: 12.07.1995

Eingang der Prüfmaterialien: Sommer 1995

Ausführung der Untersuchungen: bis Februar 1996

Seiten Teil 1: 5 - 45

1. Vorgehen für die Messungen

Für den messtechnischen Nachweis der Wärmebrückenwirkung von verschiedenen Unterkonstruktionen (UK) wurde folgendes Vorgehen gewählt:

- 1) Erstellen einer "normalen" Prüfwand (Fläche 3 m²), bestehend aus 18 cm Beton und 100 mm Mineralwolle-Aussenwärmedämmung. Es ist keine Unterkonstruktion- und keine Bekleidung montiert.
- 2) Erste Messung des Wärmedurchgangs in der kalibrierten k-Wert Kammer der EMPA (Heizkasten-Prinzip).
- 3) Montage der Unterkonstruktion mit allen notwendigen Verankerungen und Verbindungen, aber ohne die vorgehängte Bekleidung.
(Diese wird bei den Prüfungen nicht berücksichtigt! Begründung: Kap 5.6.2)
- 4) Zweite Messung analog Punkt 2 (mit unveränderten Einstellungen).
- 5) Die Differenz der ersten und der zweiten Messung, dividiert durch die Anzahl Verankerungen pro m² ergibt den Wärmeverlust, der durch einen Verankerungspunkt verursacht wird. (Voraussetzung: Randbedingungen so wählen, dass keine gegenseitige thermische Beeinflussung an den Verankerungspunkten stattfinden kann! vgl. Kap. 3.6)
- 6) An einigen ausgewählten Beispielen werden die Wärmebrückeneffekte durch Infrarotaufnahmen visualisiert.

In der Praxis wird nicht die selbe Anzahl Konsolen/m² wie auf der Prüfwand vorhanden sein. Darum werden die ermittelten Zusatzverluste pro Konsole angegeben (in W/K), womit eine Umrechnung für den praktischen Fall gemacht werden kann.

2. Durchgeführte Arbeiten (Prüfungsablauf)

Datum	Prüfung Nr.	Was	Wer
03.03.94		Erstellen von armierten Betonwänden in der EMPA Bauhalle, anschliessend Austrocknung im Klima 20°C/50 % r.F. und periodisches Wägen	W. Mel. EMPA/176/ct
26.06.95		Lieferung Wärmedämmstoffplatten (Isover PBF, d = 100 mm und 50 mm)	Isover
Juli 95		Lieferung diverser Unterkonstruktions-Teile	Alusuisse Hilti, Wagner
Aug./Sept.95		Wärmeleitfähigkeitsmess. an Glaswolle + Holz	EMPA/176/RBI
03.08.95		Hilti Dübel setzen in der Betonwand	EMPA/176/Kr,ct
04.-11.08.95	1	1. Nullmessung	EMPA/176/ct
14.-21.08.95	2	Holzplatten einlagig (Abstand 60 cm)	EMPA/176/ct
22.-29.08.95	3	Holzplatten gekreuzt (Abstand je 60 cm)	EMPA/176/ct
01.-08.09.95	4	Stahlkonsolen ($v_{\text{Luft kaltseitig}} = 1.0 \text{ m/s}$)	EMPA/176/ct
08.-14.09.95	4a	Stahlkonsolen ($v_{\text{Lk}} 2.4 \text{ m/s}$)	EMPA/176/ct
15.-20.09.95	4b	Stahlkonsolen mit thermischem Trennelement	EMPA/176/ct
20.-26.09.95	5	Alukonsolen ($v_{\text{Lk}} 0.5 \text{ m/s}$)	EMPA/176/ct
26.-29.09.95	5a	Alukonsolen ($v_{\text{Lk}} 0.9 \text{ m/s}$)	EMPA/176/ct
29.-02.10.95	5b	Alukonsolen ($v_{\text{Lk}} 1.5 \text{ m/s}$)	EMPA/176/ct
02.-05.10.95	5c	Alukonsolen ($v_{\text{Lk}} 2.0 \text{ m/s}$)	EMPA/176/ct
05.10.95	5c	Infrarotaufnahmen der warmseitigen (inneren) Betonoberfläche	EMPA/176/ct
06.-10.10.95	5d	Alukonsolen ($v_{\text{Lk}} 2.4 \text{ m/s}$) mit Inverstemperat.	EMPA/176/ct
10.10.95	5d	Infrarotaufnahmen der Unterkonstruktion (invers)	EMPA/176/ct
11.-18.10.95	5e	Alukonsolen mit therm.Trennelement warmseitig	EMPA/176/ct
19.-23.10.95	5f	Alukonsolen mit therm.Trennelement kaltseitig	EMPA/176/ct
23.10.95	5f	Infrarotaufnahmen analog Prüfung 5c	EMPA/176/ct
23.-27.10.95	6	2. Nullmessung	EMPA/176/ct
Dez. 95		Datenauswertungen	EMPA/176/ct
Dez. 95 bis Feb. 96		Berechnungen mit 3D Programm "Trisco"	EMPA/176/Gh
Jan. 96 bis Feb. 96		weitere Datenauswertungen und Prüfbericht Teil 1 erstellen	EMPA/176/ct
April bis Aug. 96		weitere Berechnungen / Variationen und Prüfbericht Teil 2 und Teil 3 erstellen.	EMPA/176/Gh,ct

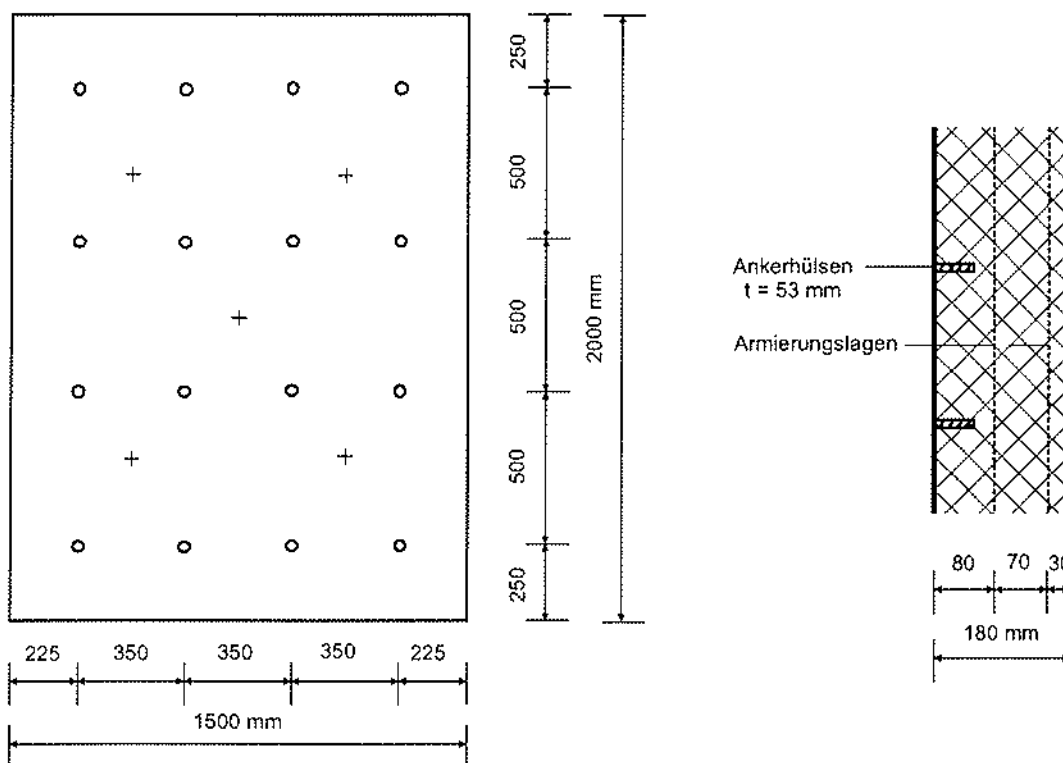
3. Erstellen der Prüfwände

3.1 Betonwand (Tragwerk)

Die am 03.03.94 erstellte Betonwand war im Sommer 95 genügend gut ausgetrocknet und diente als Tragwerk für *alle* Prüfungen. Die 18 cm dicke Wand aus Beton P 300 mit Korndurchmesser bis 16 mm (ohne Zusätze) enthält zwei Armierungslagen, wobei auf der Kaltseite min. 8 cm Abstand zur Oberfläche eingehalten wurden. Für die Wärmedurchgangsmessungen ist damit ein Kontakt zwischen den Ankerhülsen und dem Armierungsstahl ausgeschlossen und es entsteht kein zufälliger Fehler. (vgl. Grafik 1, unten).

3.2 Ankerhülsen

Die Betonwand wurde am 03.08.95 mit 16 Ankerhülsen ($5 \frac{1}{3}$ Stk/m²) mit Innengewinde M8 (Typ Hilti, HSA-IR, A4-Stahl, L = 53 mm) bestückt. Diese Hülsen blieben bei jeder Prüfung eingesetzt (auch bei den Nullmessungen) und stellen unseres Erachtens keinen zusätzlich messbaren Wärmeverlust dar.



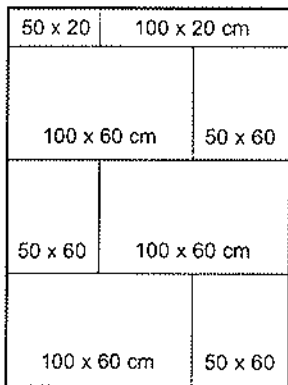
- Ankerhülsen für alle Prüfungen
- + zusätzliche Hülsen ab Prüfung 4

"Kaltseitige" Ansicht der Betonoberfläche 1:25

Schnitt 1:10

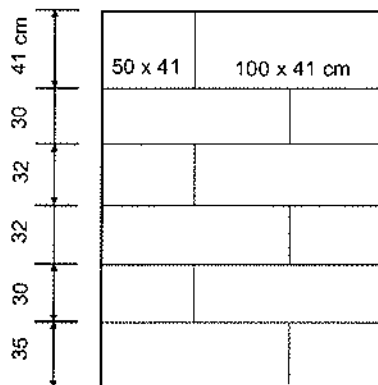
3.3 Prüfung 1 und Prüfung 6: Nullmessungen

Die Nullmessungen - ohne Störung der Dämmschicht - wurden mit folgenden Dämmstoffplatten-Einteilungen durchgeführt:



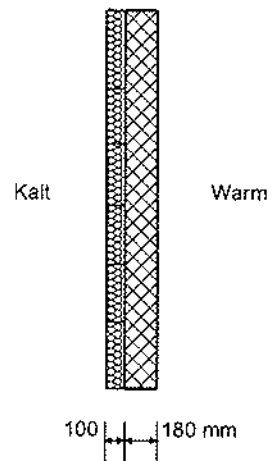
Originalplattenformat : 100 x 60 cm

Ansicht Kaltseite Prüfung 1



(gleiche Einteilung: Prüfungen 4 + 5)

Ansicht Kaltseite Prüfung 6



Schnitt Prüfung 6

Grafik 2

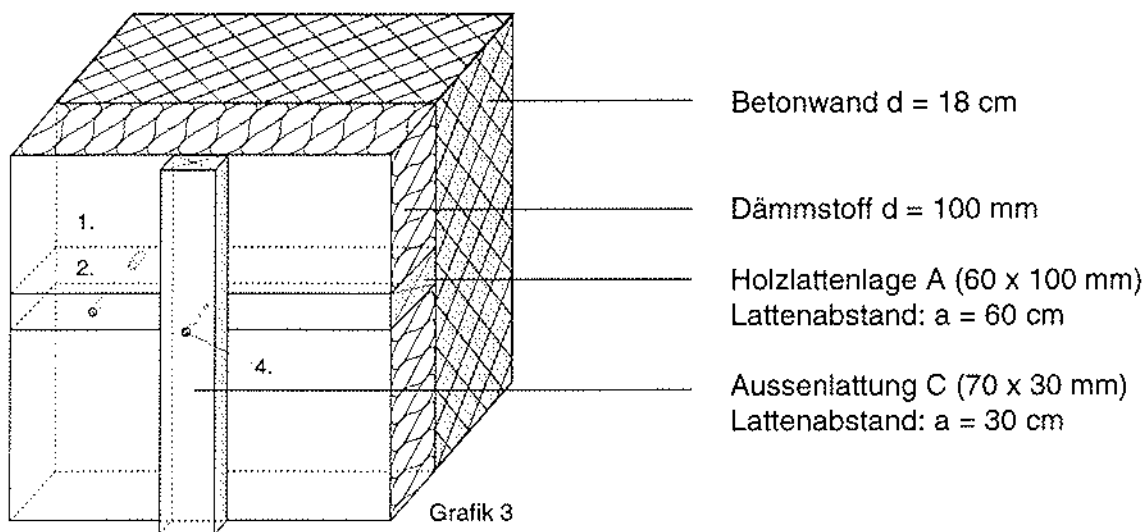
Die Dämmstoffplatten für die Prüfung 6 waren die gleichen, wie bei den Prüfungen 4 und 5. Die Plattenstösse des Dämmstoffes wurden bei *allen* Prüfungen satt und sauber ausgeführt. Da die Prüfwand vollständig vom Rahmen der k-Wert Kammer umschlossen war, konnte für die Nullmessungen durch reine Klemmwirkung ein voller Kontakt zwischen Betonoberfläche und Dämmstoff erreicht werden, so dass weder ein Kleber noch eine Verdübelung notwendig war.

Materialdaten Prüfung 1 und 6	Nullmessungen (Nur Beton und Dämmstoff)
Betonwand	siehe Kap.3.1
Dämmstoff Glaswolle	Isover, PBF, d = 100 mm, ρ = ca. 35 kg/m ³ Original- Plattenformat: 60 x 100 cm, Kontaktfläche zu Beton: 10'000 cm ² /m ² , = 100 %
Unterkonstruktion	keine
Verankerungs- und Verbindungsmitel Ankerhülsen im Beton	1. Hilti Ankerhülsen (im Beton) siehe Kap 3.2 (Die nur im Beton liegenden Ankerhülsen haben keinen relevanten Einfluss auf den Wärmedurchgang)

3.4 Prüfung 2: Holzlatten einlagig

In der Praxis werden viele Fassaden mit der Unterkonstruktion "einlagige Holzlattung" ausgeführt. Dabei entstehen linienförmige Wärmeverluste. Als Messergebnis wird für diesen Fall ein Zusatzverlust in $W/m^2 K$ definiert, wobei die Randbedingungen "Abstand" und "Dimension" der Holzlattung von Bedeutung sind.

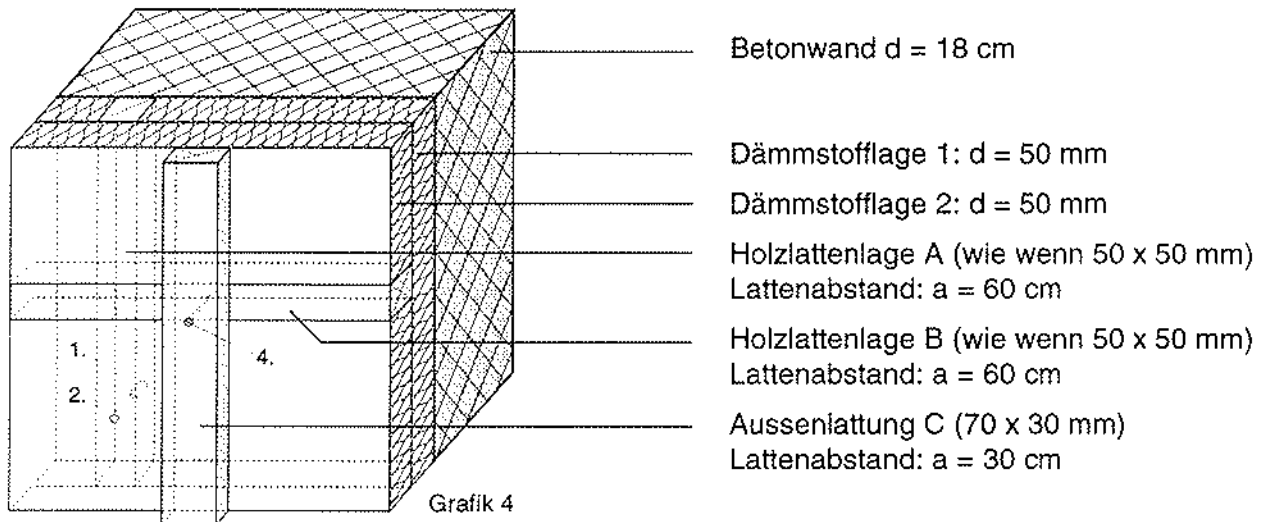
Wenig relevant hingegen sind die Abstände und die Abmessungen der Holz-Aussenlattung C (im Hinterlüftungsraum), auf welche die Bekleidung montiert wird.



Materialdaten Prüfung 2	Holzlatten einlagig (Lattenabstand 60 cm)
Betonwand	siehe Kap.3.1
Dämmstoff Glaswolle	Isover, PBF, d = 100 mm, $\rho = \text{ca. } 35 \text{ kg/m}^3$ Grösse: verschiedene Zuschnitte aus Plattenformat 60 x 100 cm Kontaktfläche zu Beton: $9100 \text{ cm}^2/\text{m}^2 = 91 \%$ (Sollmass: $9090 \text{ cm}^2/\text{m}^2$, \rightarrow aus Lattenabstand 60 cm, resp. Rastermass 66 cm)
Unterkonstruktion alles in Tannenholz, sägeroh, unbehandelt	Lage A: 60/100 mm (b x d, horizontal verlegt) Kontaktfläche zu Beton: $900 \text{ cm}^2/\text{m}^2 = 9 \%$ (Sollmass: $910 \text{ cm}^2/\text{m}^2$, \rightarrow aus Lattenabstand a = 60 cm resp. Rastermass 66 cm) Aussenlage C (im Hinterlüftungsraum, auf dem Dämmstoff): 70/30 mm (b x d, vertikal verlegt), Lattenabstand: a = 30 cm, Rastermass: 37 cm, Gesamtfläche: $1866 \text{ cm}^2/\text{m}^2 = 18.7 \%$
Verankerungs- und Verbindungsmittel Metall, verschiedene Materialien	1. Hilti Ankerhülsen (im Beton) siehe Kap 3.2 2. Schrauben zu Ankerhülsen (für Verankerung der Holzlatten A) M8, A4- Stahl, Imbus, L = 60 mm, Anzahl: 2 Stk/ m^2 4. Holzschrauben (für die Verbindung der Aussenlattung C mit A) 4.5 x 70, verzinkter Stahl, Anzahl: 4 Stk/ m^2

3.5 Prüfung 3: gekreuzte Holzlatten

Mit der gekreuzten Holzlattung werden die Wärmeverluste gegenüber der Prüfung 2 reduziert. Eine Hand-Berechnung wie sie in der Norm SIA 180 für inhomogene Konstruktionen angegeben wird, ist für dieses 3- dimensionale Problem im Prinzip bereits nicht mehr geeignet.



Materialdaten Prüfung 3	gekreuzte Holzlattung (Lage A und B: Abstand 60 cm)
Betonwand	siehe Kap.3.1
Dämmstoff Glaswolle	Isover, PBF, d = 100 mm, $\rho = \text{ca. } 35 \text{ kg/m}^3$ Grösse: verschiedene Zuschnitte aus Plattenformat 60 x 100 cm Kontaktfläche zu Beton: $9231 \text{ cm}^2/\text{m}^2 = 92.3 \%$ (entspricht genau dem Sollmass aus Lattenabstand 60 cm, resp. Rastermass 65 cm)
Holzkonstruktion alles in Tannenholz, sägeroh, unbehandelt	Lage A: wie wenn Lattung 50/50 mm (b x d, vertikal verlegt) Kontaktfläche zu Beton: $769 \text{ cm}^2/\text{m}^2 = 7.7 \%$ (entspricht genau dem Sollmass aus Lattenabstand 60 cm, resp. Rastermass 65 cm) Lage B: wie wenn Lattung 50/50 mm (b x d, horizontal verlegt) Kontaktfläche zu Dämmstoff $710 \text{ cm}^2/\text{m}^2 = 7.1 \%$ Kontaktfläche zu Lattung A: $59 \text{ cm}^2/\text{m}^2 = 0.6 \%$ (entspricht genau dem Sollmass aus Lattenabstand 60 cm, resp. Rastermass 65 cm) Wärmebrückenwirkung von Lattung A und B: "Mischfläche" ($\frac{1}{2}$ Holz, $\frac{1}{2}$ Dämmstoff): $1420 \text{ cm}^2/\text{m}^2 = 14.2 \%$ durchgehende Holzwirkung: $59 \text{ cm}^2/\text{m}^2 = 0.6 \%$ durchgehende Wärmedämmung: $8521 \text{ cm}^2/\text{m}^2 = 85.2 \%$ Aussenlattung C siehe Prüfung 2
Verankerungs- und Verbindungsmittel Metall, verschiedene Materialien	1. Hilti Ankerhülsen (im Beton) siehe Kap 3.2 2. Schrauben (für Holzlatten A) zu Ankerhülsen siehe Prüfung 2 3. Holzschrauben (für Verbindung der Holzlatten B auf A), 6.0 x 90, verzinkter Stahl, Anzahl: 2 Stk/m ² 4. Holzschrauben (für Holzlatten C) siehe Prüfung 2

3.6 Anzahl Konsolen für die Wärmedurchgangsprüfungen

Ursprünglich waren für die Prüfungen 4 und 5 je 16 Konsolen vorgesehen, damit eine starke Wärmebrückenwirkung- und damit ein gut messbares Resultat entsteht.

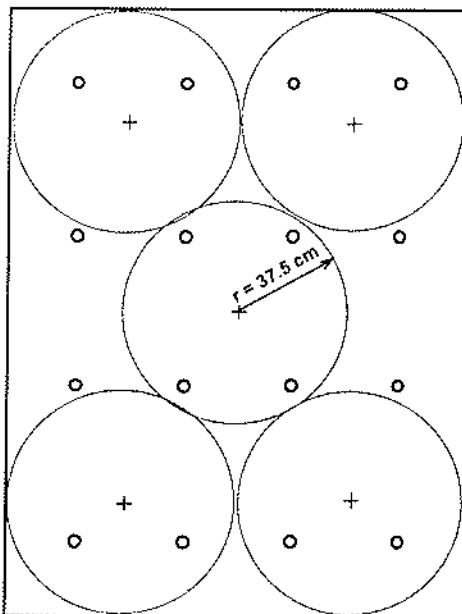
Die Anordnung der Konsolen wurde geplant gemäss Kap. 3.2 / Grafik 1. (pro Hülse 1 Konsole)

Vor dem Aufbau der Prüfwand 4 wurde dann allerdings mit einem Wärmebrückenprogramm ein Probelauf gestartet. Dabei zeigte sich, dass mit der geplanten Temperaturdifferenz von über 30 K (für den "stärksten Fall", d.h. Alu-Konsolen ohne thermisches Trennelement *) eine so grosse Wärmebrückenwirkung entstehen würde, dass eine gegenseitige Beeinflussung der einzelnen Wärmebrücken zu erwarten gewesen wäre.

In der Folge wurde mittels mehreren Rechendurchgängen der minimale gegenseitige Abstand der Konsolenpunkte bestimmt, welcher mit der vorgegebenen Temperaturdifferenz keine thermische Beeinflussung ergibt.

Die Temperaturentwicklung wurde vor allem für folgende zwei Orte vorausberechnet:

- 1) Grenzschicht Dämmstoff / Beton, ab Konsolen- Auflage
- 2) auf der Oberfläche der aussenliegenden Metall- Winkelprofile (= Kaltseite)



Ansicht Beton- Prüfwand 1: 25

Gemäss den Berechnungen ist der Wärmeverlust der ausserhalb eines Radius von 37.5 cm wirkt, kleiner als 5 % des gesamten Verlustes einer Konsole.

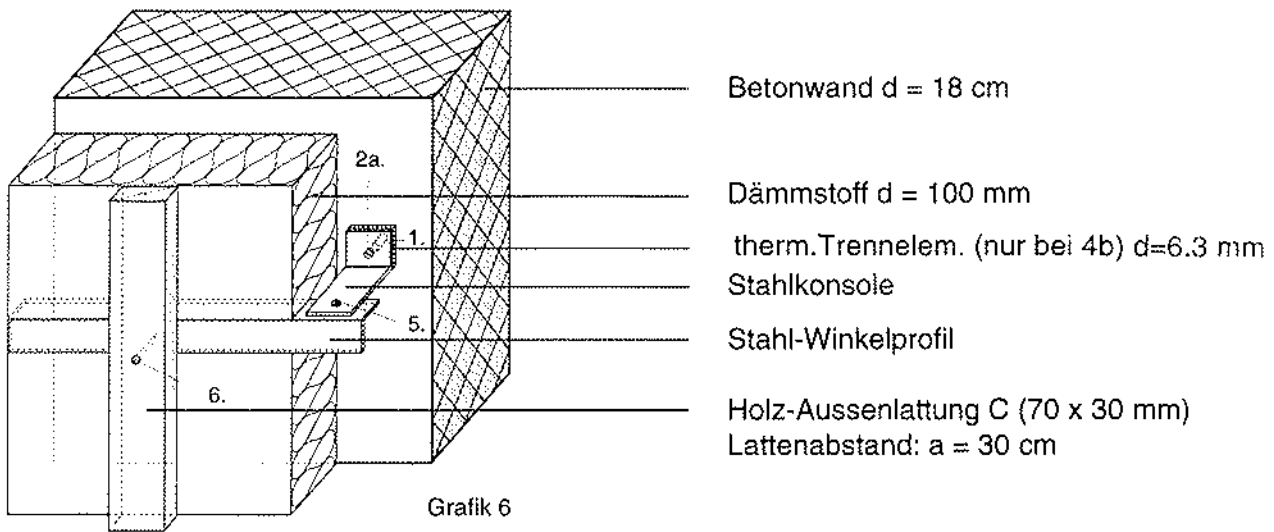
Dies gilt jedoch nur beim "stärksten Fall" d.h. bei Alu-konsolen ohne therm.Trennelement * mit hoher Luft-geschwindigkeit (Prüfung 5c).

In der Folge wurden alle Prüfungen 4 und 5 mit dieser geometrischen Anordnung durchgeführt.

Grafik 5

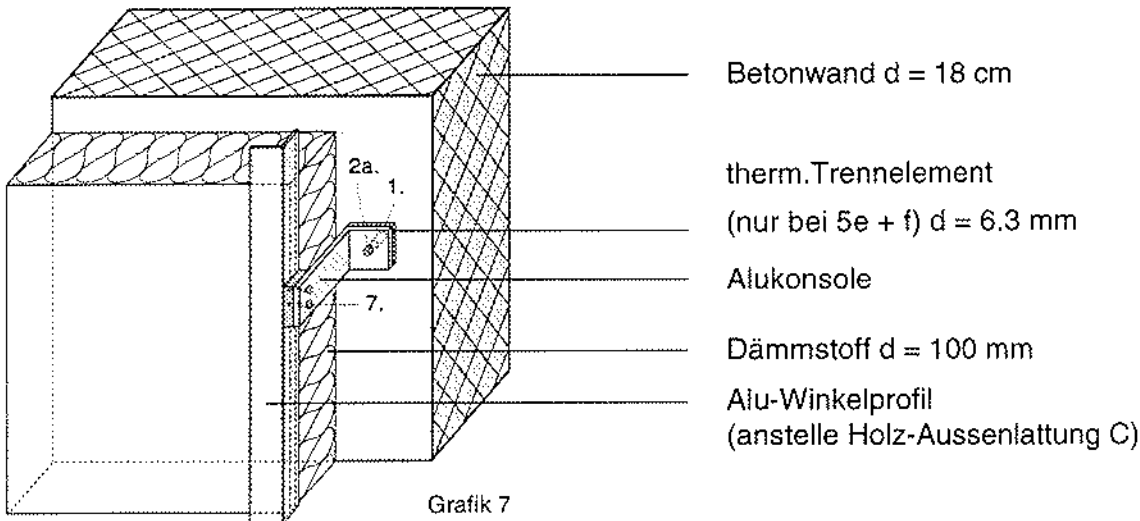
* thermisches Trennschicht: = Kunststoffplatte zwischen Konsole und Tragwerk (In diesem Projekt immer bestehend aus geschlossenzelligem PVC Hartschaum vgl. Erklärung Teil 3, Kap. 4.3).

3.7 Prüfung 4 / 4a / 4b: Stahl- Unterkonstruktion



Materialdaten Prüfung 4 / 4a / 4b	Stahl- Unterkonstruktion verzinkt (mit äusserer Holzlattung C)
Betonwand	siehe Kap.3.1
Dämmstoff Glaswolle	Isover, PBF, d = 100 mm, $\rho = \text{ca. } 35 \text{ kg/m}^3$ Grösse: verschiedene Zuschnitte aus Plattenformat 60 x 100 cm Kontaktfläche zu Beton: praktisch 10'000 cm ² /m ² , = 100 %
Unterkonstruktion Stahl, mit Aluzinc Beschichtung	Stahlkonsolen: Querschnitt 2x60 mm, Schenkellängen 50/90 mm mit Aluzinc AZ 150 beschichtet, Anzahl: 1 2/3 Stk/m ² Kontaktfläche zu Beton: ca. 45 x 60 = 2700 mm ² /Stk (minus Loch) Querschnittsfläche durch Wärmedämmung: 2.0 x 60 = 120 mm ² Stahl-Winkelprofile horizontal (in Dämmstoff-Oberfläche liegend): 45 x 45 x 1500 mm, d = 1.5 mm, mit Aluzinc AZ 150 beschichtet, Länge: 0.75 m/Konsole, Querschnittsfläche durch 45 mm WD: 3750 x 1.5 = 5625 mm ² / 3m ² (ganze Prüf wand)
therm.Trennelement warmseitig nur für Prüfung 4b	Kunststoffunterlagen (zwischen Konsolen und Betonwand) aus PVC - GHS (geschlossen zelliger Hartschaum), 50 x 60 mm, d = 6.3 mm, Anzahl: 1 2/3 Stk/m ² Kontaktfläche zu Beton: 50 x 60 = 3000 mm ² /Stk
Holzkonstruktion	Aussenlattung C (vert. auf Winkelprofile geschraubt) analog Prüf. 2
Verankerungs- und Verbindungsmittel Metall, verschiedene Materialien	1. Hilti Ankerhülsen (im Beton) siehe Kap 3.2 2a. Schrauben zu Ankerhülsen (für Verankerung der Konsolen) M8, A4- Stahl, Imbus, L = 25 mm, Anzahl: 1 2/3 Stk/m ² 5. Blechschrauben (für die Verbindung Winkelprofile - Konsolen) 4.5 x 20, verzinkter Stahl, Anzahl: 1 2/3 Stk/m ² 6. Holzblechschrauben mit Bohrkopf (für die Verbindung Aussenlattung C - Winkelprofile), 4.5 x 50, verzinkter Stahl, Anzahl: 1 2/3 Stk/m ²

3.8 Prüfung 5 - 5f: Alu- Unterkonstruktion



Materialdaten Prüfung 5 - 5f	Aluminium- Unterkonstruktion (ohne Holz)
Betonwand	siehe Kap.3.1
Dämmstoff Glaswolle	Isover, PBF, d = 100 mm, $\rho = \text{ca. } 35 \text{ kg/m}^3$ Grösse: verschiedene Zuschnitte aus Plattenformat 60 x 100 cm Kontaktfläche zu Beton: praktisch $10'000 \text{ cm}^2/\text{m}^2$, = 100 %
Unterkonstruktion Aluminium - Legierung	Alukonsolen: Querschnitt 4x60 mm, Schenkeillängen 50/130 mm Al Mg Si 0.5 F22-F25, Anzahl: $1 \frac{2}{3} \text{ Stk/m}^2$, von 5 Konsolen auf der Prüfwand: 2 mit Gleit-, 3 mit Fixpunkten, Kontaktfläche zu Beton: ca. $45 \times 60 = 2700 \text{ mm}^2/\text{Stk}$ (minus Loch) Querschnittsfläche durch Wärmedämmung: $4 \times 60 = 240 \text{ mm}^2$ Alu-Winkelprofile vertikal (ausssen, Anstelle Holz-Aussenlattung C): $45 \times 45 \times 2000 \text{ mm}$, d = 2.0 mm, Al Mg Si 0.5 F22-F25, Länge: ca.1.0 m/Konsole
therm. Trennelement für Prüfung 5e: kaltseitig für Prüfung 5f: warmseitig	Kunststoffunterlagen aus PVC - GHS, analog Prüfung 4b Prüfung 5e: kaltseitig (zwischen Winkelprofilen und Konsolen) Prüfung 5f : warmseitig (zwischen Konsolen und Betonwand)
Holzkonstruktion	Aussenlattung C entfällt, die Alu-Winkelprofile sind im Hinterlüftungsraum.
Verankerungs- und Verbindungsmittel Metall, verschiedene Materialien	1. Hilti Ankerhülsen (im Beton) siehe Kap 3.2 2a. Schrauben zu Ankerhülsen siehe Prüfung 4 7. Nieten (für die Verbindung des Winkelprofils mit der Konsole) Kopfdurchmesser : 4.8 mm, Chromstahl Anzahl: bei 3 Fix- Konsolen: 2 Stk/Konsole Anzahl: bei 2 Gleit- Konsolen: 1 Stk/Konsole

3.9 Zusammenstellung physikalischer Kennwerte der eingesetzten Materialien

Material	λ -Wert ⁴⁾ [W/m K]	ρ -Dichte [kg/m ³]	Bemerkungen
Stahlbeton	$\lambda_r = 1.8$ ²⁾	2400 ²⁾	
Glaswolle Dämmstoff Isover PBF	$\lambda_6 = 0.0300$ ¹⁾	40 ^{1) 3)}	praktisch trocken ¹⁾
Holzlatten (aus Prüf. 4, Lage A)	$\lambda_7 = 0.107$ ¹⁾	444 ¹⁾	F = 9.3 Masse-% ¹⁾ (= trocken)
Stahl verzinkt	$\lambda_r = 60$ ²⁾		
A4 - Edelstahl	$\lambda_r = 15$ ²⁾		
Aluminium - Legierung (Al Mg Si 0.5 F22-F25)	$\lambda_r = 170$ ²⁾		
thermisches Trennelement (PVC - GHS)	$\lambda_{10} = 0.09$ ¹⁾	720 ¹⁾	

- 1) Messwerte aus EMPA- Labor
(Kurzbeschreibung einer Wärmeleitfähigkeitsprüfung siehe Anhang 7)
- 2) Werte aus Literatur
- 3) Differenzen über gesamte Lieferung (50 und 100 mm Platten): 35 - 42 kg/m³
- 4) zu den λ - Werten: Index $r =$ Rechenwert (Produktionsstreuung und praktischer Feuchtegehalt berücksichtigt)
(siehe auch SIA Merkblatt 2013, Ausgabe 1985)
 Index $_{Zahl} =$ Mitteltemperatur bei der Messung [°C]
(Der λ -Wert ist temperaturabhängig!)

4. Bedingungen und Messanordnungen

(Kurzbeschreibung einer k-Wert Prüfung und Schema der k-Wert Kammer siehe Anhang 1 + 2)

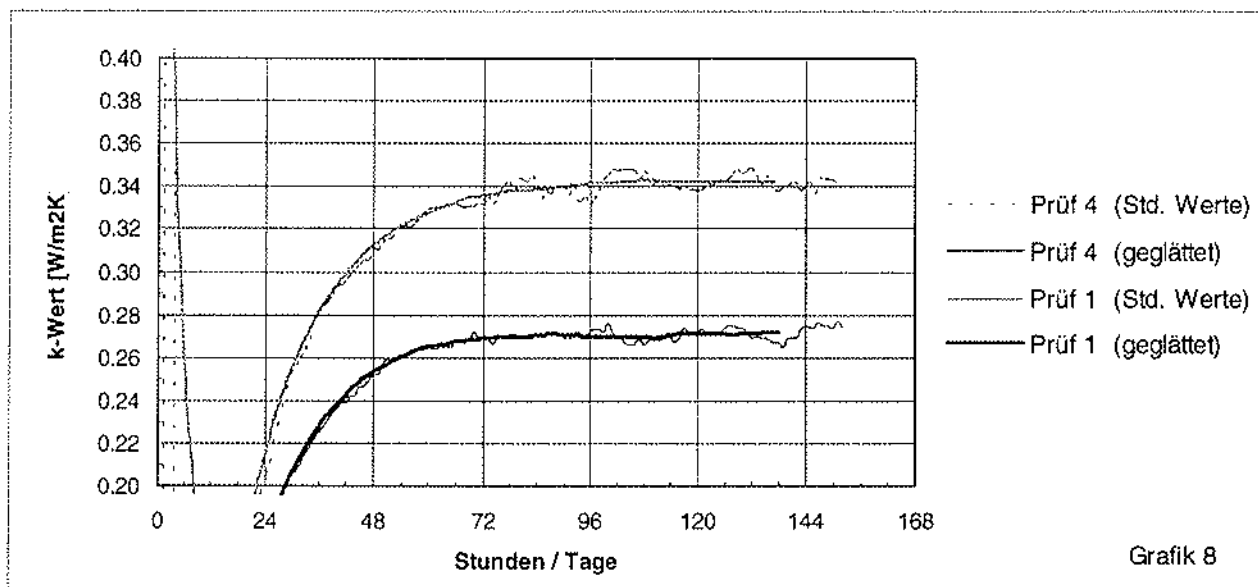
4.1 Prüfdauer / Einlauf bis zum stationären Zustand

Die Bestimmung des k-Wertes erfolgt im *stationären Zustand*. Da die Heizregelung der warmen Prüfkammer pulsierend- und damit kleinen Schwankungen unterworfen ist, werden die Messdaten so gemittelt, dass sich eine möglichst "glatte" Einlaufkurve ergibt. Für die definitiven Ergebnisse werden in der Regel Daten über einen Zeitraum von 24 Stunden gemittelt. (vgl. Anhang 4 + 5)

Folgende Werte wurden stündlich gemessen:

- Temperaturen [°C]
- totale Heizenergie [W]
- Luftfeuchtigkeit in den beiden Prüfkammern [%]
- Luftgeschwindigkeit an den Prüfwand Oberflächen [m/s]
- Lufttemperatur im Prüfraum [°C]

Je nach Einschaltzeitpunkt der Heizregelung und der Kältezufuhr nach dem Start der Prüfung, ergibt sich eine Einlaufkurve von "unten" oder von "oben". (vgl. auch Grafik 9)



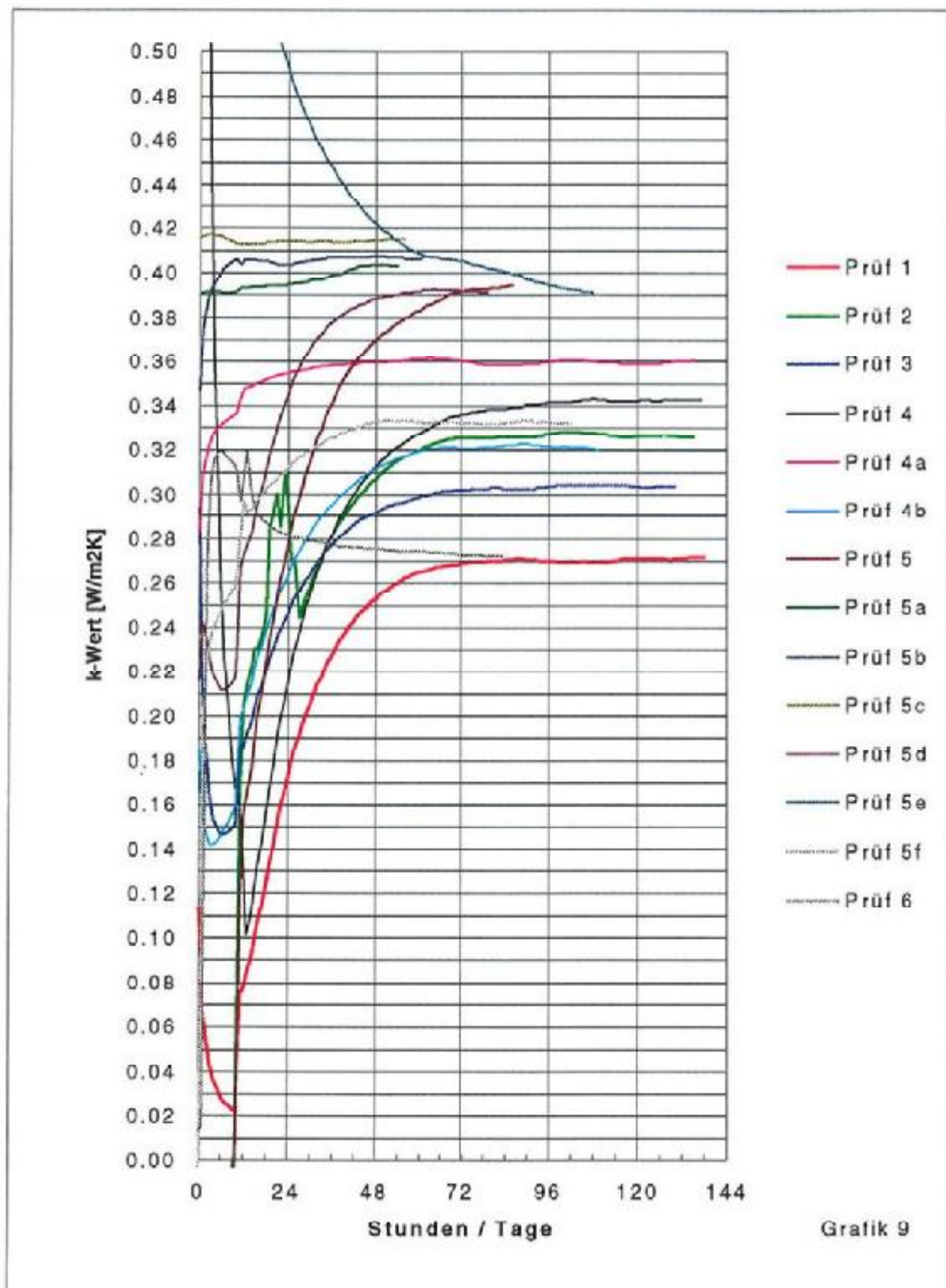
Grafik 8

Grafik 8 zeigt am Beispiel der Prüfungen 1 und 4 die "Stundenwerte" (= Mittelwerte von 6 Einzelmessungen) und die "geglätteten Werte" (= Mittelwerte von 24 Stundenwerten).

4.2 "Geglättete" Werte

Grafik 9 zeigt die "geglätteten" Einlaufkurven aller 14 Prüfungen (vgl. Kap. 4.1).

Da die Prüfungen 5, 5a, 5e und 6 eher zu knappe Einlaufzeiten hatten, wurde der stationäre Endwert rechnerisch ermittelt. (Durch die Anpassung einer Konstanten, unter Berücksichtigung einer überlagerten exponentiell gedämpften Störung).



Grafik 9

5. Datenauswertung und Ergebnisse (Beispiel eines Messprotokolls siehe Anhang 4+5)

	1	2	3	4	4a	4b	5	5a	5b	5c	5d	5e	5f	6
5.1 Energieverbrauch (Prüfung mit $\Delta\theta = \text{ca. } 33 \text{ K}$)	Prüfung Nr.:													
Totale gemessene Heizleistung	31.45	36.98	34.98	38.88	40.65	36.83	44.38	45.73	46.29	46.39	-	43.55	38.97	32.87
Prüfstandverlust (1.6 W/K)	0.25	0.31	-0.04	-0.47	-0.43	-0.22	-1.03	-1.17	-1.55	-0.90	-	-0.18	-1.39	-1.20
Rahmenverlust ($k_R \cdot (\vartheta_{Rw} - \vartheta_{Rk}) \cdot A$)	-4.99	-5.00	-4.99	-4.96	-4.94	-4.99	-4.96	-4.98	-4.94	-4.94	-	-4.98	-4.98	-4.97
Wärmedurchgang effektiv	26.71	32.29	29.95	33.45	35.28	31.62	38.39	39.58	39.80	40.55	38.10	38.39	32.60	26.70
Prüflfläche (mit Randabdichtung)	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
Wärmestromdichte (Q / A)	8.903	10.763	9.983	11.150	11.759	10.542	12.795	13.193	13.266	13.516	-	12.796	10.865	8.899
5.2 Daten warme Kammer (Temp. - Mittelwerte)														
Raumtemperatur Warmseite	21.65	21.57	21.60	21.57	21.55	21.56	21.56	21.54	21.52	21.50	21.50	21.49	21.54	21.57
Oberflächentemp. Warmseite	20.55	20.28	20.41	20.27	21.18	20.34	20.06	20.00	19.98	19.93	-	20.03	20.25	20.50
Luftgeschwindigkeit Warmseite	0.31	0.31	0.31	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	*)	*)	*)	*)	0.29	0.27
Luftfeuchtigkeit Warmseite	44	45	44	43	49	44	44	43	48	50	43	45	44	44
5.3 Daten kalte Kammer (Temp. - Mittelwerte)														
Raumtemperatur Kaltseite	-11.26	-11.41	-11.32	-11.16	-11.11	-11.34	-10.99	-11.24	-11.12	-11.10	-11.02	-11.29	-11.24	-11.23
Oberflächentemp. Kaltseite	-10.26	-10.15	-10.18	-10.04	-10.29	-10.39	-9.95	-10.36	-10.29	-10.31	-	10.40	-10.19	-10.20
Luftgeschwindigkeit Kaltseite	0.93	1.01	0.93	1.01	2.4	1.01	0.47	0.93	1.48	2.03	1.56	0.91	0.93	0.93
Luftfeuchtigkeit Kaltseite	48	48	48	48	45	47	47	46	45	45	12	69	61	53
5.4 Temperaturgefälle														
Raum Warmseite - Kaltseite ($\vartheta_{Rw} - \vartheta_{Rk}$)	32.91	32.98	32.92	32.73	32.67	32.90	32.55	32.79	32.63	32.60	32.52	32.78	32.78	32.80
Warmseite Raum - Oberfläche ($\vartheta_{Rw} - \vartheta_{Ow}$)	1.10	1.28	1.19	1.30	1.37	1.23	1.50	1.54	1.54	1.56	-	1.46	1.29	1.06
Oberflächen Warmseite - Kaltseite ($\vartheta_{Ow} - \vartheta_{Ok}$)	30.80	30.44	30.59	29.58	30.47	30.73	30.01	30.36	30.28	30.24	-	30.43	30.44	30.71
Kaltseite Oberfläche - Raum ($\vartheta_{Ok} - \vartheta_{Rk}$)	1.01	1.26	1.14	1.12	0.83	0.95	1.05	0.88	0.82	0.79	-	0.89	1.05	1.03
5.5 Wandkennwerte (bei Messung)														
Wärmedurchgangskoeffizient ($k = q / (\vartheta_{Rw} - \vartheta_{Rk})$)	0.271	0.326	0.303	0.341	0.360	0.320	0.393	0.402	0.406	0.415	-	0.390	0.331	0.271
Wärmeübergangskoeff. warm ($\alpha_1 = q / (\vartheta_{Rw} - \vartheta_{Ow})$)	8.1	8.4	8.4	8.6	8.6	8.6	8.6	8.5	8.6	8.7	-	8.8	8.4	8.4
Wärmedurchlasskoeffizient ($\Lambda = q / (\vartheta_{Ow} - \vartheta_{Ok})$)	0.289	0.354	0.326	0.377	0.386	0.343	0.426	0.435	0.438	0.447	-	0.420	0.357	0.290
Wärmeübergangskoeff. kalt ($\alpha_g = q / (\vartheta_{Ok} - \vartheta_{Rk})$)	8.9	8.6	8.7	9.9	14.2	11.1	12.2	15.0	16.1	17.1	-	14.4	10.3	8.7

*) gleiche Einstellung wie zuvor,

aber keine Messwerte

5.6 Umrechnungen auf normierte Wärmeübergangskoeffizienten

In der SIA-Norm 180 (Ausgabe 1988, Kap. 3.3) werden für die Wärmeübergangsbedingungen folgende normierte Werte festgesetzt:

$$\begin{aligned}\alpha_i \text{ (innen, warmseitig)} &= 8 \text{ W/m}^2 \text{ K} \\ \alpha_a \text{ (ausssen, kaltseitig)} &= 20 \text{ W/m}^2 \text{ K}\end{aligned}$$

Für "normale" k-Wert Prüfungen werden die bei der Messung entstehenden Uebergangswerte umgerechnet, so dass ein k_{norm} -Wert entsteht.

Dies ist jedoch nur sinnvoll, wenn die Prüfwand eine homogene Oberfläche aufweist, d.h. wenn:

1. keine Materialunterschiede (Oberflächenstruktur) und
2. keine stark unterschiedlichen Oberflächentemperaturen (Wärmebrücken) vorhanden sind.

Bei den vorliegenden Prüfungen ist aber beides der Fall, so dass für einen einheitlichen Wärmeübergang besser die 3. entscheidende Komponente für den α -Wert - die Luftgeschwindigkeit v an der Oberfläche - als Norm- resp. Einheitswert festgesetzt wird.

5.6.1 Wärmeübergang warmseitig

Gemäss Kap. 5.6 lassen sich für die Prüfungen 1 und 6 die α_{warm} -Werte bei gegebener Luftgeschwindigkeit klar bestimmen, da keine Wärmebrücken vorhanden sind.

Die Messresultate (vgl. Kap. 5.3 und 5.5) decken sich denn auch mit den Erfahrungswerten, welche besagen, dass auf der Warmseite bei glatter Oberfläche

ein α_i -Wert von ca. 8 W/m² K entsteht, wenn die Luftgeschwindigkeit ca. 0.3 m/s beträgt.

Da in allen Prüfungen nur sehr geringe Abweichungen von diesem warmseitigen Luftgeschwindigkeitswert erzielt wurden, wird auf eine Umrechnung der Messwerte in diesem Bereich verzichtet.

5.6.2 Wärmeübergang kaltseitig

Für alle Prüfungen wurde die vorgehängte Bekleidung weggelassen, da sie wärmetechnisch nicht relevant ist (vgl. Norm SIA 180 Kap. 3.3.3, mögliche Ausnahmen: Metallfassaden). Für die k- Wert Berechnung wird in der Norm beim Hinterlüftungsspalt ein Widerstand R_L von $0.08 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ eingesetzt, der zusammen mit dem Uebergangswiderstand R_a von $0.05 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ nahezu gleich gross ist, wie der innere Uebergangswiderstand.

→ Durch den Schutz der Bekleidung entstehen für die kaltseitige (aussen) Dämmstoffoberfläche etwa die gleichen Uebergangsbedingungen wie warmseitig (innen):

$$\frac{1}{R_a + R_L} \cong \alpha_i \quad (8 \text{ W/m}^2 \text{ K})$$

Für die Prüfungen bedeutet dies, dass ein kaltseitiger Uebergangs- Sollwert von ca. $8 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ am ehesten der Norm entspricht, resp. dass analog wie in Kap. 5.6.1 auf der kaltseitigen Oberfläche (= im Hinterlüftungsspalt) eine mittlere Luftgeschwindigkeit von ca. 0.3 m/s erreicht werden sollte. (Mit rauher Oberfläche (Dämmstoff) eher 0.4 m/s)

Ein quantitativer Vergleich von verschiedenen Prüfergebnissen ist nur sinnvoll, wenn diese Randbedingung berücksichtigt wird.

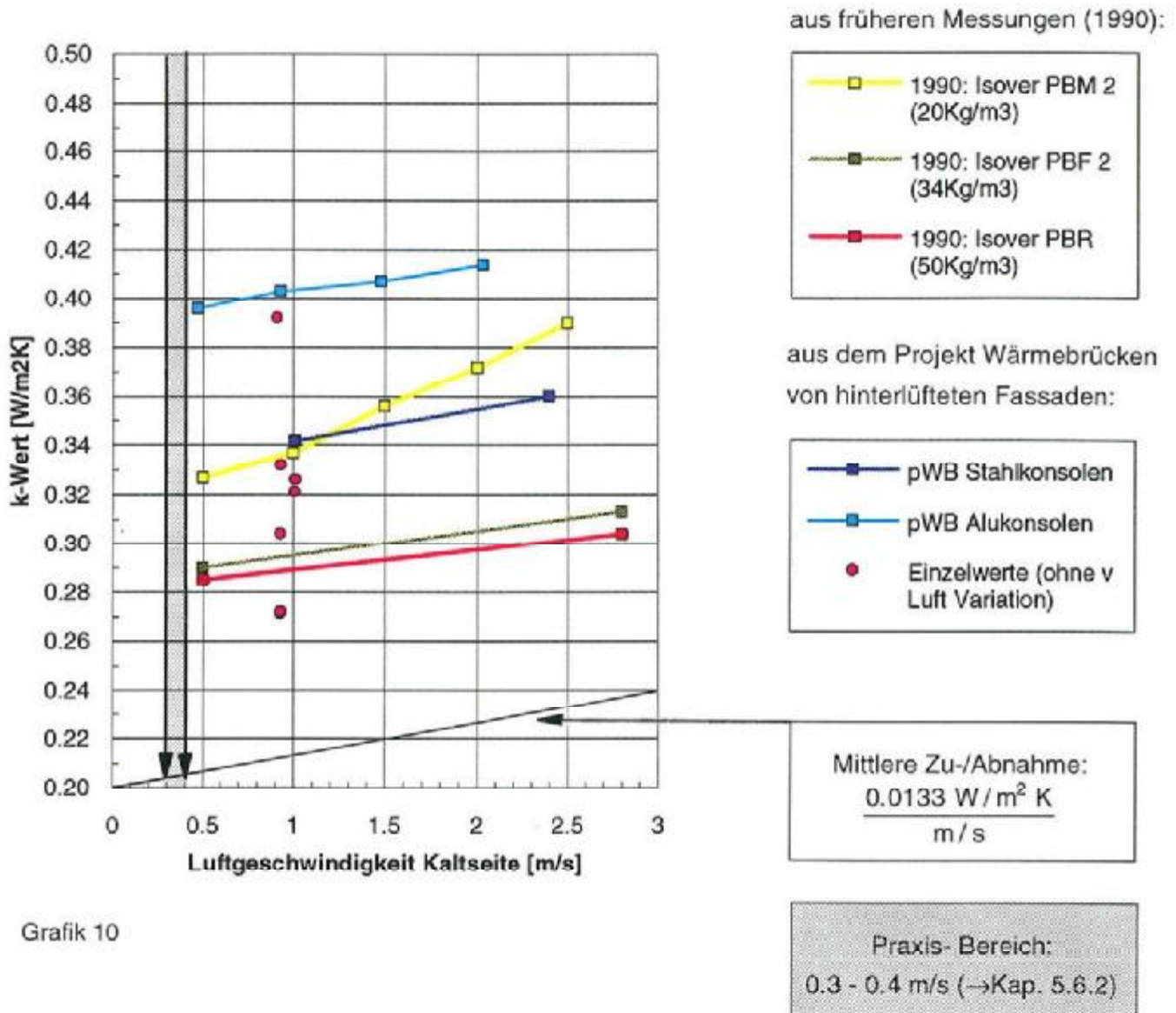
Dieser Luftgeschwindigkeitswert entspricht natürlich auch den effektiven Luftgeschwindigkeiten, wie sie im Jahresmittel in hinterlüfteten Fassaden auftreten.

(vgl. EMPA- Schlussbericht F+E Nr. 127 378).

Da der kaltseitige Ventilator der EMPA- Prüfkammer nicht für so kleine Luftgeschwindigkeiten ausgelegt ist, (vgl. Anhang 1) wurde bei allen Prüfungen als kaltseitige Grundluftgeschwindigkeit ca. 1 m/s eingestellt.

Wie gross nun die k-Wert Verminderung zwischen der Messung (mit $v_{\text{Luft kalt}} = \text{ca. } 1 \text{ m/s}$) und dem gesuchten Sollwert (mit $v_{\text{Luft kalt}} 0.35 \text{ m/s}$) ist, lässt sich aus der folgenden Grafik 10 ableiten:

5.6.3 Einfluss der kaltseitigen Luftgeschwindigkeit



Grafik 10

Korrekturwert für die Einzelmesswerte:

Sollwert $v_k = 0.35 \text{ m/s}$
 Einzelmessung (Bsp. Nr. 5a) $v_k = 0.93 \text{ m/s}$

Differenz: $- 0.58 \text{ m/s}$

Korrekturfaktor: $0.0133 \cdot (-0.58) = - 0.0077 \text{ W/m}^2 \text{ K}$

Messung 5a umgerechnet auf 0.35 m/s $0.403 - 0.0077 = 0.395 \text{ W/m}^2 \text{ K}$

Für die **Messergebnisse im Vergleich** (Kap. 5.7) werden alle Einzelwerte nach diesem Verfahren umgerechnet.

5.7 Umgerechnete Messergebnisse im Vergleich

Sämtliche Werte beziehen sich auf die Prüfwand mit 18 cm Beton und 100 mm Glaswolle als Wärmedämmung!		k-Wert Messung (aus Kap. 5.5)	k-Wert *)	k-Wert **)	Zusatzverlust für eine Wärmebrücke resp. Konsole **)	Zusatzverlust Konstr. gerecht (Anzahl Konsolen)	v _{Luft} kaltsseitig
Prüf. Nr.		[W/m ² K]	[W/m ² K]	[W/m ² K]	[W/m ² K] / [W/K]	[%]	[m/s]
1	1. Nullmessung	0.271	0.271	0.263	0 (Basiswert)	0	0.9
2	Holzlaten einlagig (a = 60 cm)	0.326	0.327	0.318	0.055 [W/m ² K]	21	1.0
3	Holzlaten gekreuzt (a = 60 cm)	0.303	0.304	0.296	0.033 [W/m ² K]	13	0.9
4	Stahikonsolen (v _{Luft kaltsseitig} = 1.0 m/s)	0.341	0.342	0.333	0.042 [W/K]	24 1)	1.0
4a	Stahikonsolen (v _{Lk} 2.4 m/s)	0.360	0.359	-	(0.058) [W/K] 4)	-	2.4
4b	Stahik. mit therm. Trennelement warms.	0.320	0.322	0.313	0.030 [W/K]	17 1)	1.0
5	Alukonsolen (v _{Lk} 0.5 m/s)	0.393	0.396	-	(0.075) [W/K] 4)	-	0.5
5a	Alukonsolen (v _{Lk} 0.9 m/s)	0.402	0.403	0.395	0.079 [W/K]	60 2)	0.9
5b	Alukonsolen (v _{Lk} 1.5 m/s)	0.406	0.407	-	(0.082) [W/K] 4)	-	1.5
5c	Alukonsolen (v _{Lk} 2.0 m/s), mit IR	0.415	0.414	-	(0.086) [W/K] 4)	-	2.0
5d	Alukonsolen invers, mit IR	-	-	-	-	-	1.6
5e	Aluk. mit therm. Trennelement kalts.	0.390	0.392	0.385	0.073 [W/K]	56 2)	0.9
5f	Aluk. mit therm. Trennel. warms, mit IR	0.331	0.332	0.324	0.037 [W/K]	28 2)	0.9
6	2. Nullmessung	0.271	(0.272)	(0.264)	0	0	0.9
Vergleich mit früheren Messungen: aus EMPA - Bericht 127 358 "Hinterlüftete Fassaden" 1993							
	Konsol Anker, A4-Stahl, perfekt in 10 cm WD versetzt	0.480	-	0.465 3)	0.026	31 3)	1.5

*) 1. Korrektur: "geglätteter" resp. extrapoliert Wert gemäss Kap. 4.2

**) Werte umgerechnet auf v_{Luft kaltsseitig} = 0.35 m/s gemäss Kap. 5.6.3

1) Konstruktion mit 1.5 Konsolen/m² (= mittlerer Erfahrungswert)

2) Konstruktion mit 2.0 Konsolen/m² (= mittlerer Erfahrungswert)

3) Nullmessung = 0.291; Konstruktion mit 3 1/2 Anker/m²

4) Diese Werte sind nur bedingt vergleichbar, da v_{Lk} nicht umgerechnet ist (vgl. Kap. 5.6.3).

Messunsicherheiten: siehe Kap. 5.8

Beispiel für die Berechnung des Zusatzverlustes von Prüfung 5a:

$$Z \text{ für 1 Konsole} = \frac{(0.395 - 0.263) \text{ W/m}^2\text{K}}{\frac{1.2}{3} \text{ Konsolen/m}^2} = 0.079$$

5.8 Messunsicherheiten

Die Messunsicherheit der k-Wert-Messungen wurde nach dem Gauss'schen Fehlerfortpflanzungsgesetz ermittelt. Die Bestimmung der k-Wert Zunahme infolge punktueller Wärmebrücken wird jeweils über die Differenz zum k-Wert der Nullmessung (ohne WB) ermittelt. Bei der Differenzmessung fällt die Messunsicherheit des Flankenverlustes weg.

Tabelle: Messunsicherheiten

Prüfung Nr.	W/m ² K	relativ %
1	±0.020	-
2	±0.005	5
3	±0.005	9
4	±0.005	4
4a	±0.005	4
4b	±0.005	6
5	±0.005	3
5a	±0.005	2
5b	±0.005	2
5c	±0.005	2
5e	±0.005	3
5f	±0.005	5
6	±0.020	-

5.9 Umsetzung der Laborwerte in die Baupraxis

Bei der Interpretation der Messwerte, resp. bei der Umsetzung der Werte für den praktischen Fall ist zu berücksichtigen, dass die Bedingungen im Labor stets ideal sind. Das bedeutet, dass gegenüber der baustellengerechten Situation im Labor eine viel höhere Verarbeitungsqualität bei der Herstellung der Prüfwände erreicht wird, was sich in den Messresultaten je nach Konstruktionsart mehr oder weniger stark widerspiegelt.

(vgl. Bericht "hinterlüftete Fassaden" EMPA F+E Nr 127 378, Kap. 3.4, mit "baustellengerechten" Messwerten)

Der Vorteil einer Messung mit "perfekter" Verarbeitungsqualität, gegenüber einer Messung mit "Baustellenqualität" liegt darin, dass sie dank der klaren Randbedingungen stets nachvollziehbar ist, und auch rechnerisch besser erfasst werden kann.

Folgende Faktoren können Unterschiede zwischen Labormessungen und Praxiswerten ergeben:

Tabelle: Wärmedurchgang (k-Wert) wird: tiefer (besser) = ☺ höher (schlechter) = ☹

Ursache	Labormessung	Praxiswert
Verlegequalität des Dämmstoffes	☺	☹
Dämmstoff-Löcher stopfen (um die Konsolen)	geprüfte Systeme: ☺	z.B. bei Einzelankern: ☹
... so schlecht, dass lufthinterspült	nicht überprüft	☹☹☹
Dämmstoffkontakt mit Untergrund (ohne Hinterspül - Effekt)	☹ Vollkontakt	☺ teilweise Luftschicht (... mm Kleber)
Konsolenkontakt auf Untergrund	☹ Vollkontakt	☺ ungenau (Brauen und Luftschichten)
Verbindungen zu Profilschienen	☹ Vollkontakt	☺ wie oben
Vorgehängte Bekleidung aus Metall oder ähnlich: = zusätzliche Kühlrippenwirkung (in den Prüfungen nicht vorhanden)	☺	☹
Vorgehängte Bekleidung Schutz vor Abstrahlung	siehe Kap 5.6.2	☺
Dämmstoff: trocken Holz- Feuchtigkeit: 9.3 Masse-%	☺	☹
Geometrische Wärmebrücken am Bau (Ecken, Anschlüsse etc.)	☺	☹ bis ☹☹
Temperaturwechsel Tag - Nacht	Labormessung ist stationär	Praxis ist instationär ? *)

*) Die instationären Auswirkungen (neben dem Wärme- auch im Feuchteverhalten) wurden im Rahmen dieses Projekts nicht weiter untersucht.

6. Zusätzliche Prüfungsergebnisse

6.1 Wärmebrückennachweis mit der Infrarotkamera (IR)

(Weitere Informationen zu den Infrarotbildern: siehe Anhang 6)

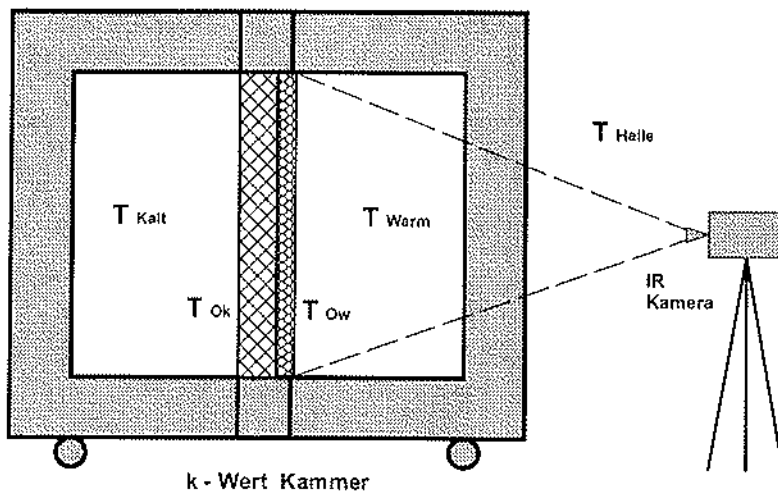
Die durch die Konsolen entstehenden punktuellen Wärmeverluste bei den Prüfungen 4 + 5 zeichnen sich hauptsächlich auf der kalten Oberfläche ab (ausser). Beim Einsatz von gut leitenden Metall- Unterkonstruktionen sind sie jedoch so stark, dass ihre Wirkung sogar auf der warmseitigen Oberfläche der Prüfwand (innen) visualisiert werden kann. (erhöhter Wärmeabfluss)

Es wurden bei folgenden Prüfungen Infrarotbilder aufgenommen:

- Kap 6.2: Prüf. 5c Alukonsolen (v_{Lk} 2.0 m/s), IR Aufnahmen der warmen Betonoberfläche.
- Kap 6.3: Prüf. 5d Alukonsolen (v_{Lk} 1.6 m/s), IR Aufnahmen invers: kaltseitige Oberfläche.
- Kap 6.4: Prüf. 5f Alukonsolen mit therm. Trennelement warmseitig, (v_{Lkt} 0.9 m/s):
IR Aufnahmen der warmseitigen Betonoberfläche (als Vergleich zu Prüf. 5c)

Zu den IR invers Aufnahmen (in Prüfung 5d):

Da die kaltseitige Oberfläche mit der Infrarotkamera (im stationären Zustand, bei tiefer Umgebungstemperatur) nicht beobachtet werden kann, kehrt man die ganze Prüfwand um, so dass die Aussenwärmedämmung auf der Warmseite liegt.



Grafik 11

Wenn jetzt das ganze System wieder mit den gleichen Temperaturdifferenzen, wie bei Prüfung 5c, in den stationären Zustand gebracht wird, so kann die warme Kammer entfernt werden, ohne dass sich die Oberflächentemperatur (ϑ_{Ow}) sofort verändert ($\vartheta_{Warm} \equiv \vartheta_{Halle}$).

Mit der Infrarotkamera ist so die Wärmebrückenwirkung der Konsolen mit den richtigen Differenzen klar visualisierbar, einzig das Temperaturniveau liegt auf der "falschen" Seite.

6.2 IR Aufnahmen Prüfung 5c

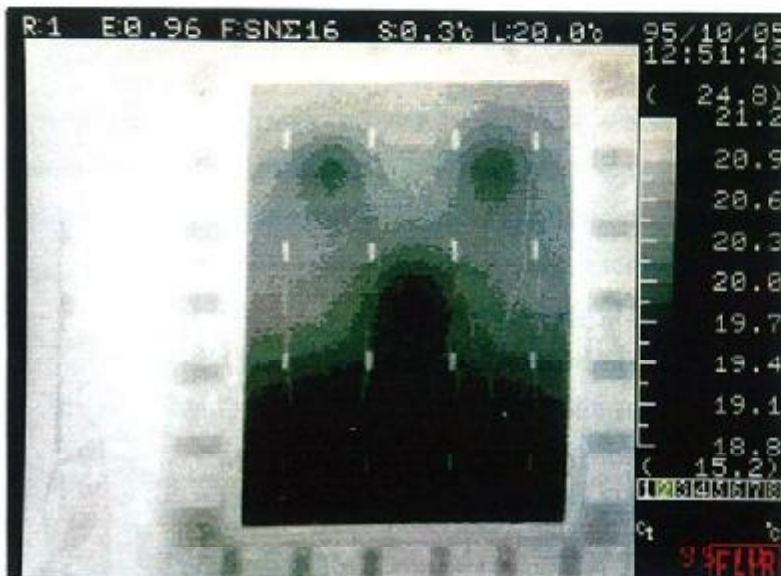


Foto Nr. 1

Prüfung 5c: Alukonsolen mit v_{Lk} 2.0 m/s

Das IR Bild zeigt die *warmseitige* Betonoberfläche der Prüfwand.

$\Delta\vartheta$ warm - kalt: ca. 33 K

Die dunklen Flecken zeigen eine deutliche Wärmebrückenwirkung der 5 Alukonsolen.

Die weissen Punkte sind Klebstreifen zur Befestigung der Oberflächen-Thermoelemente.

Das generelle Temperaturgefälle vom oberen zum unteren Teil der Prüfwandoberfläche ist versuchsbedingt (vgl. Anhang 1) und liegt innerhalb der vorgeschriebenen Werte (ISO 8990-1994-09-01).

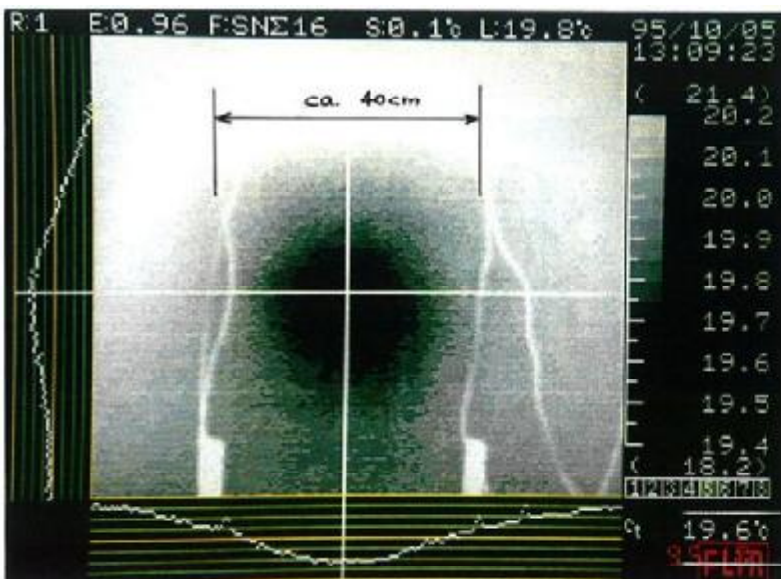


Foto Nr. 2

Prüfung 5c (wie oben)

Detailbild aus gleicher Situation wie oben, mit einem Längs- und Querprofil der Temperaturen entlang den Cursorlinien.

Wärmebrücken- Wirkungsradius auf der warmseitigen Betonoberfläche: ca. 20 - 30 cm.



Die Oberflächentemperatur sinkt infolge der Wärmebrückenwirkung um ca. 0.5 K (punktueller WB-Verlust: 0.086 W/K).

6.3 IR Aufnahmen Prüfung 5d

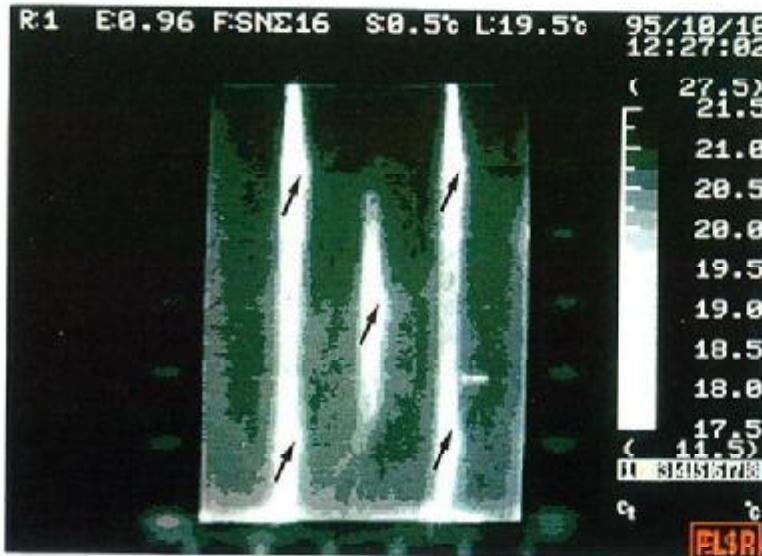


Foto Nr. 3

Prüfung 5d: Alukonsolen mit v_{LK} 1.6 m/s

Das IR Bild zeigt die "kaltseitige Oberfläche" auf der warmen Seite der Prüfkammer. (Inverstemperaturen siehe Kap. 6.1) $\Delta\vartheta$ warm - kalt: ca. 33 K

→ effektive Durchstosspunkte der Alukonsolen durch die Wärmedämmung.

Deutlich sichtbar wird die Kühlrippenwirkung der Aussenprofile, die mit zunehmender Entfernung von der Konsole klar abnimmt. (siehe auch Bild unten)

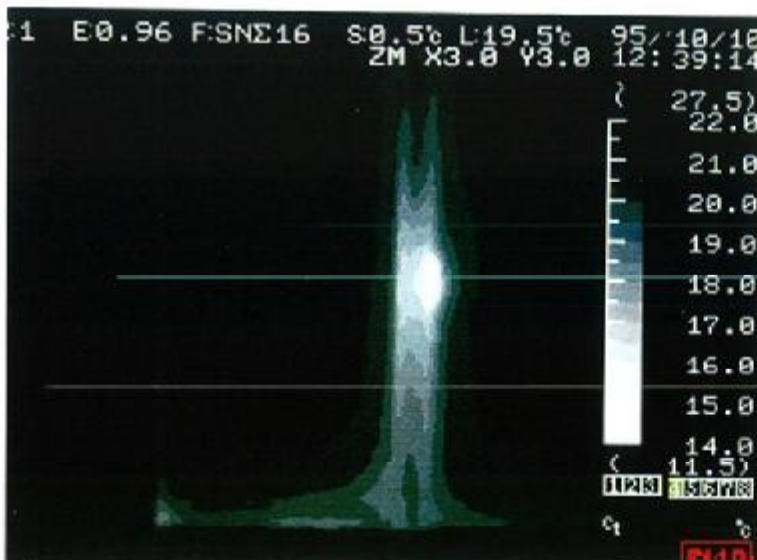


Foto Nr. 4

Prüfung 5d (wie oben)

Detailbild aus gleicher Situation wie oben.

Temperaturen:

Dämmstoffoberfläche: ca. 20.7°C

Konsole aussen: ca. 14 °C

Winkelprofil ab Konsolenpunkt:

Temperaturabnahme durchschnittlich ca. 1.7 K/10 cm

(Gilt nur für die geübten Randbedingungen!)

(vgl. mit Foto Nr. 18 - 20, Anhang 8)

6.4 IR Aufnahmen Prüfung 5f

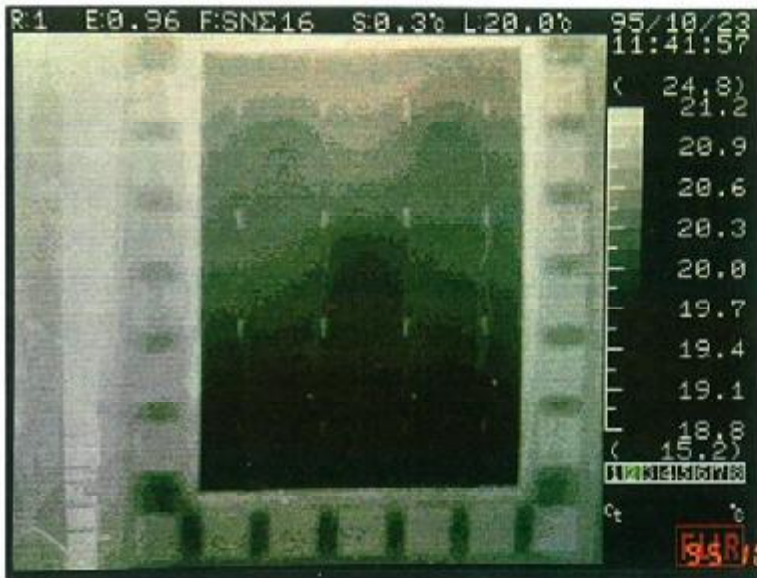


Foto Nr. 5
 Prüfung 5f Alukonsolen mit therm.Trennelement hinten und v_{Lk} 0.9 m/s
 Das IR Bild zeigt die warmseitige Betonoberfläche der Prüfwand $\Delta\vartheta$ warm - kalt ca. 33 K
 Vergleichsbild zu IR Aufnahmen in Kap. 6.2, ohne therm.Trennelement

Die 5 Wärmebrücken der Alukonsolen treten deutlich schwächer in Erscheinung als bei den Aufnahmen in Kap. 6.2.

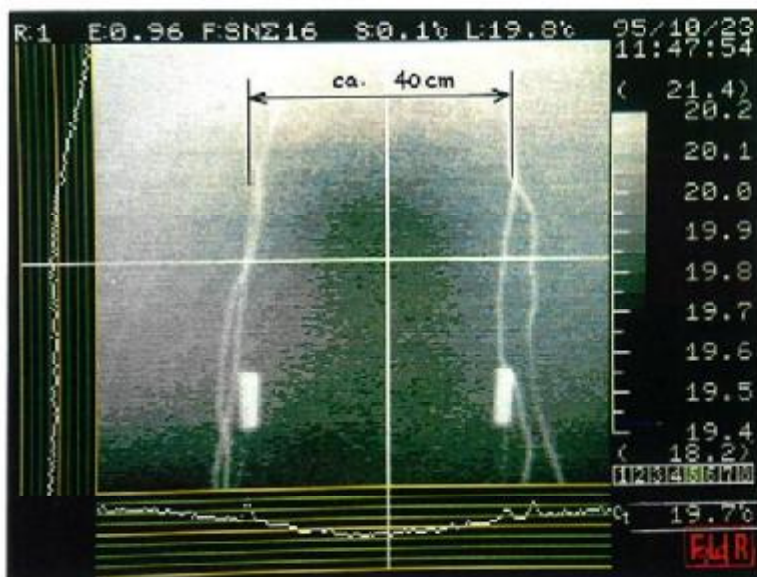


Foto Nr. 6
 Prüfung 5f (wie oben)
 Detailbild aus gleicher Situation wie oben, mit einem Längs- und Querprofil der Temperaturen entlang den Cursorlinien.

Da die Auflösungsgrenze der IR-Kamera bei 0.1 K liegt, ist es schwierig eine genauere Quantifizierung anzugeben. Es zeigt sich aber ungefähr folgendes Verhältnis:

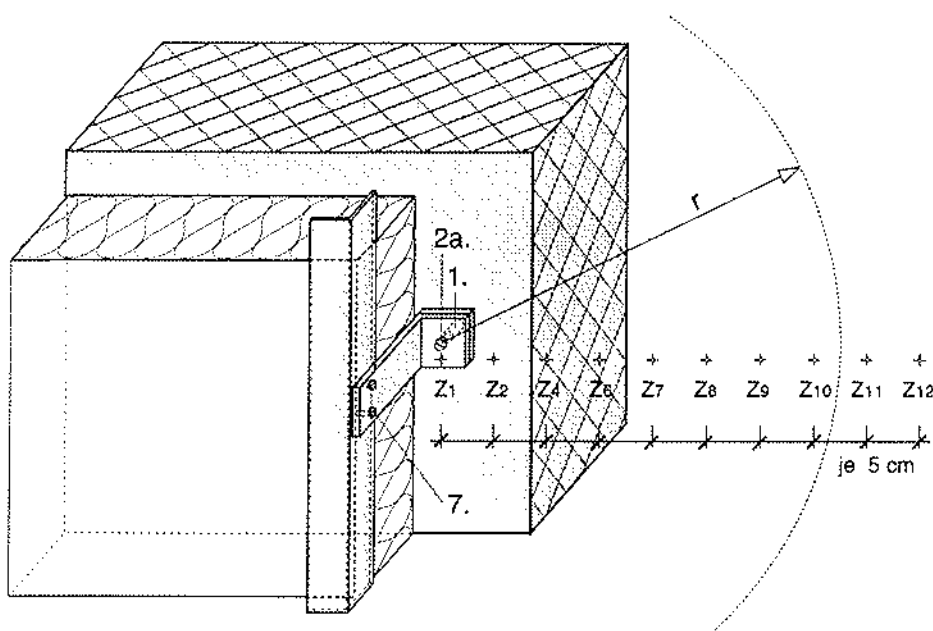
	WB- Wirkung auf warmseitiger Oberfläche (Temp. aus IR- Bildern)	WB- Verlust pro Konsole aus Messung
Prüfung 5c <i>ohne</i> therm.Trennelement:	0.5 K	0.086 *) W/K
Prüfung 5f <i>mit</i> therm.Trenn. (warmseitig):	0.25 K	0.037 W/K

*) ohne Umrechnung v Luft

6.5 Zusätzliche Temperaturmessstellen

Neben den üblichen Temperaturmessstellen (Luft, Wandoberflächen etc.) wurden bei den Wärmebrücken zusätzlich einige Temperaturen bei den Schichtgrenzen gemessen. Damit lassen sich vor allem die Ergebnisse der Berechnungen (Bericht Teil 2) verifizieren.

Im folgenden einige Werte aus den Prüfungen 4 und 5 mit den Metallkonsolen:



Grafik 12

Zusatz Temperaturmessstellen Z 1 bis Z 12: Abstand: je 5 cm, Lage: auf Betonoberfläche, unter der Wärmedämmung

Z 1 : Bei Prüfung Nr. 4b + 5f zwischen Konsole und therm. Trennelement (nicht auf Beton)!

r : Berechneter 95 % - Wirkungskreis gemäss Kap. 3.6

Tabelle: Zusätzliche Temperaturmessstellen

Prüf. Nr.	$\Delta\theta$ warm- kalt : überall ca. 33 K (-11°C bis +22°C)	Z 1 °C	Z 2 °C	Z 4 °C	Z 6 °C	Z 7 °C	Z 8 °C	Z 9 °C	Z 10 °C	Z 11 °C	Z 12 °C
4	Stahlkonsolen ($v_{Luft\ kaltseitig} = 1.0\ m/s$)	10.3	18.0	18.7	19.0	19.1	19.0	19.1	19.2	19.0	19.2
4a	Stahlkonsolen ($v_{Lk} 2.4\ m/s$)	9.6	17.9	18.7	18.9	19.0	19.0	19.1	19.2	18.9	19.1
4b	Stahlk. mit therm. Trennelement warms.	2.6	18.4	19.0	19.1	19.2	19.3	19.4	19.5	19.5	19.5
5	Alukonsolen ($v_{Lk} 0.5\ m/s$)	5.8	16.9	18.1	18.6	18.8	19.0	19.2	19.2	19.3	19.3
5a	Alukonsolen ($v_{Lk} 0.9\ m/s$)	5.1	16.7	18.0	18.5	18.8	18.9	19.1	19.2	19.3	19.3
5b	Alukonsolen ($v_{Lk} 1.5\ m/s$)	4.8	16.6	18.0	18.5	18.7	18.9	19.2	19.2	19.2	19.3
5c	Alukonsolen ($v_{Lk} 2.0\ m/s$), mit IR	4.4	16.5	17.9	18.5	18.7	18.9	19.1	19.2	19.2	19.3
5e	Aluk. mit therm. Trennelement kaltseitig	5.9	16.8	18.1	18.5	18.8	19.0	19.1	19.2	19.2	19.3
5f	Aluk. mit therm. Trennel. warms. mit IR	-2.8	18.0	18.8	19.0	19.2	19.3	19.4	19.5	19.4	19.5

Weitere Zusatztemperaturen, z.B. auf den Winkelprofilen, siehe EMPA-Akten.

6.6 Feuchtekrollen

Vor- und nach einigen Prüfungen wurden bei den eingesetzten Holzlatten und den Dämmstoffen Gewichtskrollen durchgeführt. Damit liess sich eine Zu- oder Abnahme der Feuchtigkeit in Masse- % bestimmen.

Tabelle: Feuchtigkeitsveränderungen während den Prüfungen

Prüf. Nr.	$\Delta\theta$ warm- kalt: überall ca. 33 K resp. -11°C bis +22°C	Holzlatten			Dämmstoff (Σ total)			
		Masse vor- (g)	Masse nach- (g)	Δ Feuchte m - %	Masse vor- (g)	Masse nach- (g)	Δ Feuchte Masse- %	
1	1. Nullmessung						?	
2	Holzlatten einlagig, Lage A Holzlatten einlagig, Aussenlage C	12894	12815	-0.6				
		7626	7682	+0.7				
3	Holzlatten gekreuzt, Lage A Holzlatten gekreuzt, Lage B Holzlatten gekreuzt, Aussenlage C	5715	5632	-1.5	nur Lage B	5700	5701	± 0.0
		4312	4320	+0.2				
		7682	7707	+0.3				
4	Stahlkonsolen ($v_{Luft\ kaltseitig}=1.0\ m/s$)	7588	↓		11927	↓		
4a	Stahlkonsolen ($v_{Lk}\ 2.4\ m/s$)	↑	7654	+0.8	↑	11946	+ 0.2	
4b	Stahlk. mit therm. Trennelement warm	7654	7657	± 0.0	11946	11924	- 0.2	
5	Alukonsolen ($v_{Lk}\ 0.5\ m/s$)				11920	↓		
5a	Alukonsolen ($v_{Lk}\ 0.9\ m/s$)				↑	↓		
5b	Alukonsolen ($v_{Lk}\ 1.5\ m/s$)				↑	↓		
5c	Alukonsolen ($v_{Lk}\ 2.0\ m/s$), mit IR				↑	↓		
5d	Alukonsolen invers, mit IR				↑	↓		
5e	Aluk. mit therm. Trennelement kaltseitig				↑	11960	+ 0.3	
5f	Aluk. mit therm. Trennel. warm., mit IR				11940	↓		
6	2. Nullmessung				↑	11954	+ 0.1	

Weitere Messungen aus dem Labor:

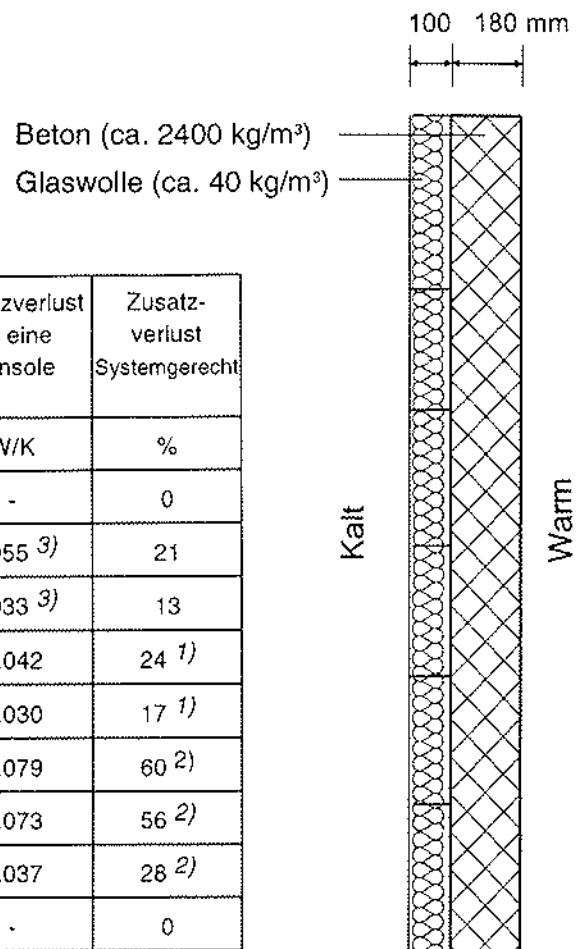
(→ vgl. Werte in Kap 3.9)

Holzplatten Lage A + B nach der Prüfung 3: Feuchtigkeit: 9.3 Masse-%
 Raumgewicht: 444 kg/m³

7. Zusammenfassung der Messergebnisse

Im Sommer 1995 wurden in der k-Wert Kammer der EMPA Wärmedurchgangsprüfungen (k-Werte) an verschiedenen hinterlüfteten Fassadenkonstruktionen durchgeführt. Mittels Differenzbildung der Resultate wurde der Wärmebrückenverlust spezieller Unterkonstruktionen ermittelt:

Querschnitt der Prüfwand
 (B x H = 2.0 x 1.5 m)



Prüf		k-Wert Messung 4)	Zusatzverlust für eine Konsole	Zusatz- verlust Systemgerecht
		W/m ² K	W/K	%
1	1. Nullmessung	0.263	-	0
2	Holzplatten einlagig (a = 60 cm)	0.318	0.055 ³⁾	21
3	Holzplatten gekreuzt (a = 60 cm)	0.296	0.033 ³⁾	13
4	Stahlkonsolen	0.333	0.042	24 ¹⁾
4b	Stahlk. mit therm. Trennelement warmse.	0.313	0.030	17 ¹⁾
5a	Alukonsolen	0.395	0.079	60 ²⁾
5e	Aluk. mit therm. Trennelement kaltseitig	0.385	0.073	56 ²⁾
5f	Aluk. mit therm. Trennelement warmseit	0.324	0.037	28 ²⁾
6	2. Nullmessung	0.264	-	0

1) 1.5 Konsolen/m²
 2) 2.0 Konsolen/m²
 3) in W/m² K für Holzkonstruktionen
 4) umgerechnet (v Luft = 0.35 m/s)

Grafik 13

Zusätzlich wurden:

- einzelne Wärmebrücken mit Infrarotbildern visualisiert
- Wärmeleitfähigkeiten (λ -Werte) und Feuchtegehalte verschiedener Materialien bestimmt
- weitere Versuche mit Variationen der kaltseitigen Luftgeschwindigkeit durchgeführt
- Berechnungen mit einem 3-D Programm durchgeführt, um einerseits die Messwerte nachzuvollziehen und andererseits eine Basis für rechnerische Variationen zu haben.

Anhang 1

Kurzbeschreibung der Prüfung auf Wärmedurchgang (Stand 1/96)

Die Abteilung Bauphysik der EMPA besitzt eine kalibrierte k-Wert-Kammer. Diese besteht aus einer fest fixierten, kalten Kammer, einem fahrbaren Rahmen mit einer Oeffnung von 150 x 200 cm für den Einbau des Prüflings und einer ebenfalls fahrbaren, warmen Kammer. Für die Prüfung werden diese drei Teile praktisch luft- und dampfdicht zusammenschraubt.

Die **warme Kammer** enthält eine elektrische Widerstands-Heizanlage, die über Mess- und Regelgeräte eine bestimmte Temperatur der warmseitigen Luft aufrecht erhalten kann. Eine Batterie von 5 Ventilatoren erzeugt entlang der Prüfwandoberfläche von oben nach unten eine Luftströmung. Mit geregelter Spannung kann die Geschwindigkeit dieser Luftströmung von ca. 0.1 bis 0.5 m/s variiert werden. Die in die warme Kammer eingeführte totale Energie (Heizung + Ventilator) wird durch einen Präzisions-kWh-Zähler gemessen.

In der **kalten Kammer** erfolgt die Abkühlung der Luft durch einen Lamellenkühler, der über ein Mischventil mit einem Kältespeicher verbunden ist. Die Feinregulierung erfolgt durch einen Heizstab. Die Lufttemperatur in der kalten Kammer kann bis auf ca. -15°C eingestellt werden. Die Luftgeschwindigkeit wird durch einen Walzenventilator erzeugt und ist mit Drosselklappen zwischen ca. 0.5 und 2.5 m/s regulierbar. Die Luftströmung verläuft hier jedoch von unten nach oben, so dass für den ganzen Prüfkörper (im Querschnitt) eine möglichst gleichmässige Temperaturdifferenz zwischen Warm- und Kaltseite entsteht.

Für die **Messung** werden überall CuKo-Thermoelemente verwendet. Fühler und Regler liegen im Genauigkeitsbereich von ± 0.1 K.

Messstellen und Anzahl:	kalt- und warmseitig je
	9 Stk. (Leit)Blechteperaturen (BK/BW)
	9 Stk. Lufttemperaturen (LK/LW)
	16 Stk. Oberflächentemperaturen (OK/OW)
	2 Stk. Regelfühler (Kaskadenschaltung)
	1 Stk. Feuchtigkeitsmessfühler

Aufgrund der gemessenen Luft- und Leitblechteperaturen wird eine sog. Raumtemperatur rechnerisch ermittelt.

$$\vartheta_R = \frac{\alpha_c \cdot \vartheta_{Luft} + \alpha_r \cdot \vartheta_{Str}}{\alpha_c + \alpha_r}$$

α_c : Wärmeübergangskoeffizient Konvektion

α_r : Wärmeübergangskoeffizient Strahlung

Die beiden Kammern und der Prüfraumen besitzen eine 380 mm dicke Wärmedämmung gegen die Labor- Halle, wo während der Prüfdauer eine Lufttemperatur von ca. 21°C herrscht. Der Wärmeverlust durch die Wand zwischen der warmen Kammer und der Labor- Halle beträgt 1.6 Watt pro Kelvin Temperaturdifferenz. Der Wärmeverlust durch die Wärmebrückenwirkung am Prüfwandrand (Rahmenverlust) wird in Abhängigkeit der Prüfwand- Dicke bestimmt (Kalibrier- messungen und Berechnungen):

Das **Messergebnis** (bei Mauerwerken) ist im Normalfall der Wärmedurchlasskoeffizient Λ der Prüfwand [in $W/m^2 K$]. Er ergibt sich aus der im stationären Zustand gemessenen Heizenergie, abzüglich der Rahmen- und Kammerverluste [in Watt] dividiert durch die Prüfwandfläche [in der Regel $3.0 m^2$] dividiert durch die Temperaturdifferenz warme - kalte Prüfwandoberfläche [in Kelvin]. Mit den Raumtemperaturen erhält man auch die Wärmeübergangskoeffizienten α_a und α_i [in $W/m^2 K$] und damit den Wärmedurchgangskoeffizient k [in $W/m^2 K$]. Dieser wird für den **normierten k-Wert** umgerechnet indem man gemäss SIA-Norm 180 (1988) für $\alpha_a = 20$, und für $\alpha_i = 8 W/m^2 K$ einsetzt.

Anhang 2

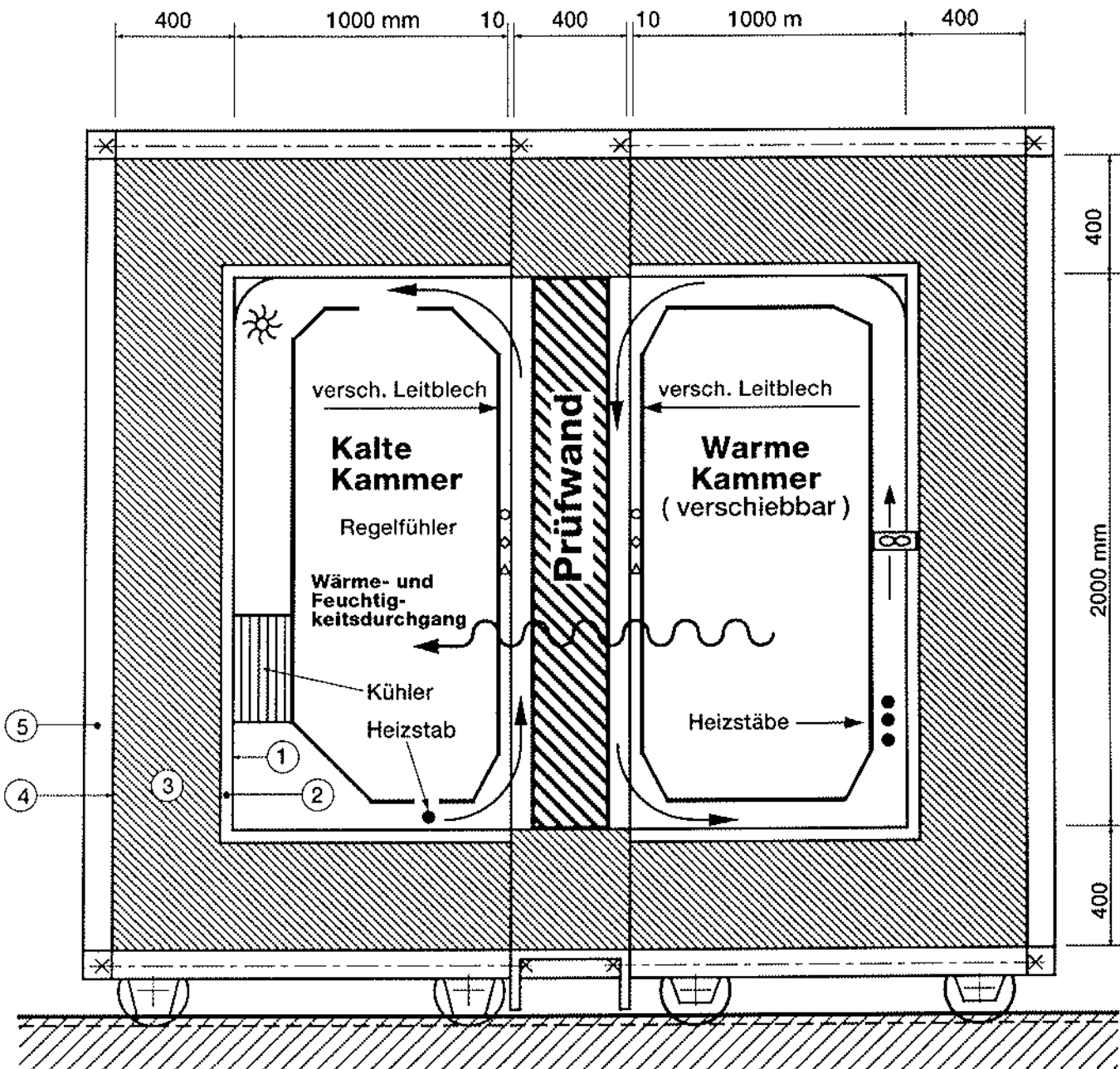
Schematischer Querschnitt durch die k- Wert Kammer

Konstruktion Prüfkammern

- ① = 1 mm Kupferblech gelötet
- ② = 20 mm Asbestzementplatte
- ③ = 378 mm extrudierter Polystyrol
- ④ = 1.5 mm Alumanblech
- ⑤ = Stahlrahmen

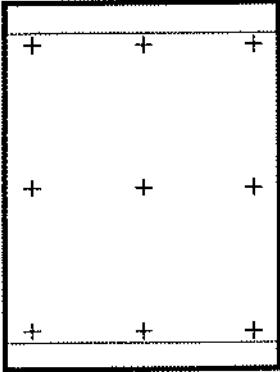
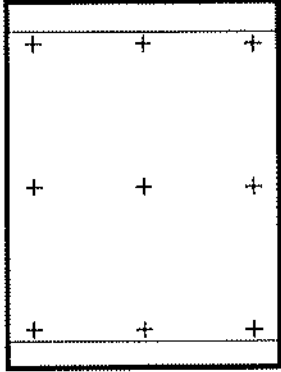
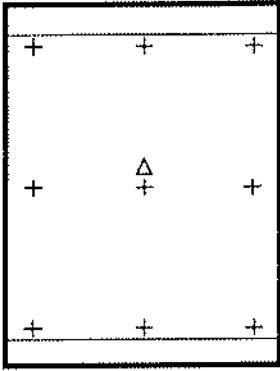
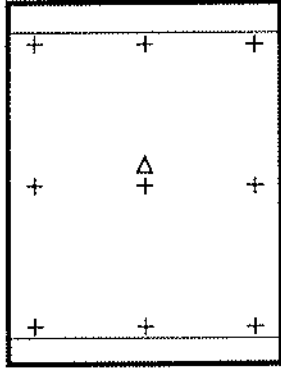
Messfühler

- Temperatur
- ◇ Feuchtigkeit
- △ Luftgeschwindigkeit



Anordnung und Bezeichnung der Temperaturfühler

Anhang 3

Warmseite		Kaltseite
	(Leit)Blechfühler $B_{\text{Warm}} \quad 1 - 9$ $B_{\text{Kalt}} \quad 1 - 9$	
	Luftfühler $L_{\text{Warm}} \quad 1 - 9$ $L_{\text{Kalt}} \quad 1 - 9$ (Δ Luftgeschwindigkeit)	
Lagen: siehe Kap. 6.2 Foto Nr. 1	Oberflächenfühler $O_{\text{Warm}} \quad 1 - 16$ $O_{\text{Kalt}} \quad 1 - 16$	Lagen: siehe Anhang 8 Fotos Nr. 8, 11, 16, 19
Beton ohne Fugen (vgl. Kap.3.1)	Fugenstruktur der unverputzten Prüfwand Prüfwandgrösse: $B \times H = 1.5 \times 2.0 \text{ m}$	Beton ohne Fugen (vgl. Kap.3.1)

- Ansichten immer mit Blickrichtung von warm gegen kalt
- Aufgrund der gemessenen Luft- und (Leit)Blechtemperaturen wird eine sogenannte Raumtemperatur rechnerisch ermittelt. (vgl. Beilage 1)

Messprotokoll der Temperaturen im stationären Zustand

Anhang 4

(Die letzten 24 Stundenwerte der Prüfung werden für die Auswertung verwendet)

KWERT EMPA Duebendorf 10 Aug 1995,14:00:28

Table with columns: 10 Aug 1995, KALTSEITE (Blech, Luft, Raum, Oberfl.), WARMSEITE (Oberfl., Raum, Luft, Blech), q, H.leist., Halle, Kwert. Includes a vertical label 'Prüfung 1 (1 Nullmessung)' on the right side.

Summary table for the first test: Pruefstandverlust (1.6W/K), Rahmenverlust (.15W/K), Waermedurchgang effektiv, Zaehlerstand, Wandflaeche, and various thermal parameters like Rw-Rk, K, Lambda, alpha_k, alpha_w, Fk, Fw, Vk, Vw, NZ.

KWERT EMPA Duebendorf 7 Sep 1995,13:00:32

Table with columns: 7 Sep 1995, KALTSEITE (Blech, Luft, Raum, Oberfl.), WARMSEITE (Oberfl., Raum, Luft, Blech), q, H.leist., Halle, Kwert. Includes a vertical label 'Prüfung 4 (Stahkonsole)' on the right side.

Summary table for the second test: Pruefstandverlust (1.6W/K), Rahmenverlust (.15W/K), Waermedurchgang effektiv, Zaehlerstand, Wandflaeche, and various thermal parameters like Rw-Rk, K, Lambda, alpha_k, alpha_w, Fk, Fw, Vk, Vw, NZ.

Messprotokoll der Temperaturen im stationären Zustand

Anhang 5

(Die Einzelwerte am Ende der Auswertungsphase)

KWERT EMPA Duebendorf 8 Sep 1995, 12:00:38

KWERT EMPA Duebendorf 11 Aug 1995, 12:00:34

Temperaturverteilung Kaltseite [C]:

Leitblechtemperaturen		Bk..	Mittel:	Leitblechtemperaturen		Bk..	Mittel:
Obern (1 2 3)	-10.71	-10.52	-10.07	Obern (1 2 3)	-10.52	-10.31	-11.08
Mitte (4 5 6)	-10.67	-10.85	-10.55	Mitte (4 5 6)	-10.89	-10.76	-10.41
Unten (7 8 9)	-11.45	-11.23	-11.69	Unten (7 8 9)	-11.37	-11.50	-11.48
Lufttemperaturen		Lk..	Mittel:	Lufttemperaturen		Lk..	Mittel:
Obern (1 2 3)	11.37	11.03	11.03	Obern (1 2 3)	-11.13	-11.18	-11.02
Mitte (4 5 6)	-11.48	-11.27	-11.27	Mitte (4 5 6)	-11.37	-11.37	-11.29
Unten (7 8 9)	-11.59	-11.59	-11.59	Unten (7 8 9)	-11.53	-11.45	-11.45
Oberflächentemperaturen		Ok..	Mittel:	Oberflächentemperaturen		Ok..	Mittel:
Obern (1 2 3 4)	-9.56	-9.99	-9.99	Obern (1 2 3 4)	-9.59	-9.51	-9.20
Mitte (5 6 7 8)	-10.44	-10.36	-10.36	Mitte (5 6 7 8)	-9.91	-9.79	-9.88
Mitt (9 10 11 12)	-10.07	-10.23	-10.23	Mitt (9 10 11 12)	1.00	-11.02	-10.41
Unten (13 14 15 16)	-10.65	-9.91	-9.91	Unten (13 14 15 16)	-10.73	-10.71	-10.73

Temperaturverteilung Warmseitig [C]:

Oberflächentemperaturen <th>Ow..</th> <th>Mittel:</th> <th colspan="2">Oberflächentemperaturen <th>Ow..</th> <th>Mittel:</th> </th>		Ow..	Mittel:	Oberflächentemperaturen <th>Ow..</th> <th>Mittel:</th>		Ow..	Mittel:
Obern (1 2 3 4)	21.14	21.14	21.14	Obern (1 2 3 4)	20.79	20.87	20.84
Mitte (5 6 7 8)	20.67	20.49	20.49	Mitte (5 6 7 8)	20.50	20.42	20.40
Mitt (9 10 11 12)	20.48	20.48	20.48	Mitt (9 10 11 12)	20.15	20.10	20.10
Unten (13 14 15 16)	20.10	20.07	20.07	Unten (13 14 15 16)	19.73	19.75	19.70
Lufttemperaturen		Lw..	Mittel:	Lufttemperaturen		Lw..	Mittel:
Obern (1 2 3)	21.96	22.03	22.03	Obern (1 2 3)	21.98	21.83	22.03
Mitte (4 5 6)	21.95	21.16	21.16	Mitte (4 5 6)	21.88	21.91	21.76
Unten (7 8 9)	21.70	21.61	21.61	Unten (7 8 9)	21.71	21.86	21.51
Leitblechtemperaturen		Bw..	Mittel:	Leitblechtemperaturen		Bw..	Mittel:
Obern (1 2 3)	21.66	21.66	21.66	Obern (1 2 3)	21.61	21.50	21.53
Mitte (4 5 6)	21.43	21.43	21.43	Mitte (4 5 6)	21.34	21.29	21.29
Unten (7 8 9)	21.28	21.24	21.24	Unten (7 8 9)	21.11	21.11	21.06

Prüfung 1 (1 Nullmessung)

sonstige Ergebnisse:

Relativfeuchte	17.3	21.95	21.95
Lufttemperatur	17.3	21.88	21.88
Luftgeschwindigkeit	0.75	47.74	45.45
Relative Feuchtigkeit	10 min	31.20	31.50
Wärmerestwert	1 h	31.50	31.50
Wärmerestwert	1 h	33.47	33.47

Prüfung 4 (Stahikonsolen)

sonstige Ergebnisse:

Relativfeuchte	17.3	21.36	21.41
Lufttemperatur	17.3	20.77	21.55
Luftgeschwindigkeit	0.75	30.40	30.40
Relative Feuchtigkeit	10 min	31.20	31.50
Wärmerestwert	1 h	31.50	31.50
Wärmerestwert	1 h	33.47	33.47

Anhang 6**Infrarot-Aufnahmen** (Stand 1/96)

(allgemeine Beschreibung für den Einsatz bei Wärmedurchgangsprüfungen)

Die thermografischen Bilder werden normalerweise im stationären Zustand, unmittelbar nach der k-Wert Prüfung aufgenommen. Dazu wird die warme Kammer mit einem Kran entfernt, so dass die warmseitige Prüfwandoberfläche im Rahmen - der nach wie vor verbunden ist mit der kalten Kammer - aus einiger Distanz mit der Infrarotkamera betrachtet werden kann. Damit lassen sich allfällige Wärmebrücken in der Konstruktion visualisieren.

Beim Thermografie-Aufnahme-Verfahren werden unterschiedliche Wärmeabstrahlungen eines Objektes sichtbar gemacht. Durch das Einstellen der Empfindlichkeit und einer bestimmten Basistemperatur erreicht man, dass in einem (Farb) Bild grössere oder kleinere Temperaturdifferenzen aufgezeigt werden (max. Empfindlichkeit bei der EMPA Kamera: 0.1 K).

Das Aufnahmegerät kann somit von der gleichen Konstruktion Bilder mit verschiedener optischer Wirkung wiedergeben.

Die Thermografiebilder zeigen unterschiedliche Temperaturbereiche mit verschiedenen Farben an. Normalerweise sind die Blau-Grün-Töne (bei schwarz/weiss Aufnahmen dunkle Zonen) eher kalt, die Rot-Gelb-Töne (bei s/w: helle Zonen) eher warm. Es sind aber auch andere Farben- oder spezielle Effekte mit Isothermen, Punkttemperaturen, Box- Werten etc. möglich. Man beachte in jedem Fall die eingestellte Temperatur- Farbskala!

Damit lassen sich Wärmebrücken im Mauerwerk, meist entstehend durch Stoss- und Lagerfugen oder Unregelmässigkeiten innerhalb der Baustoffe und deren Anschlussbereiche, sichtbar machen. Sie zeichnen sich im Bild meist als unregelmässige verschwommene Linien, Flecken oder Schlieren ab.

Je grösser der Temperaturunterschied zwischen "guten" und "schlechten" Stellen ist, desto grösser wird die Wirkung der entsprechenden Wärmebrücke sein. der Unterschied ist aber auch stark abhängig von der Temperaturdifferenz über die ganzen Wandkonstruktion ($\Delta\theta$). Es ist meistens schwierig, aus IR - Bildern quantitative Abschätzungen zu machen.

Interpretationen von Infrarotbildern müssen vom Fachmann gemacht werden, da verschiedene Materialien (Oberflächen) verschiedene Emissions-, Absorptions- und Reflexionswerte (Umgebung) aufweisen können.

Kamera der EMPA Abt. Bauphysik:
Thermoflir Typ 6200

Anschaffungsjahr: 1990
Spektralbereich: 8 - 14 μm
Bildpunkte: 300 x 207
Detector: Hg C Te
Kühlung: Stickstoff
Temp. Bereiche: -50 bis 200 / 100 bis 600 / 400 bis 2000 $^{\circ}\text{C}$
Auflösung: max. 0.1 K

Anhang 7

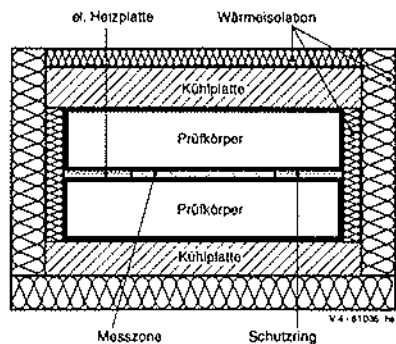
Kurzbeschreibung der Wärmeleitfähigkeitsprüfung

Prüfverfahren:

Es wird das sog. Zweiplattenverfahren eingesetzt. Dabei wird die mittlere Wärmeleitfähigkeit von zwei plattenförmigen Proben ermittelt, die symmetrisch zu beiden Seiten einer beheizten quadratischen Platte (Heizplatte) angeordnet sind. An der gegenüberliegenden äusseren Probenfläche wird die Wärme durch eine Kühlplatte homogener Temperatur abgeführt. Zur Erhöhung der Messgenauigkeit erfolgt die Messung des Wärmestroms nur in einer zentralen Messzone (25 x 25 cm), welche von einem umgebenden Heizring thermisch abgetrennt ist.

Prüfapparatur

In der nebenstehenden Skizze ist der Aufbau der Prüfapparatur ersichtlich, eingebettet in eine dicke Wärmedämmstoff-Hülle liegen die 2 Proben horizontal, je zwischen Heiz- und Kühlplatte.



Der eigentliche Messbetrieb erfolgt automatisch mittels eines Mikroprozessors und einer Datenerfassungsanlage.

Einerseits kann eine "Einpunktmessung" bei einer bestimmten, in Grenzen frei wählbaren Proben-Mitteltemperatur erfolgen, andererseits erfolgt die Messung in der Regel bei drei "Normtemperaturen" (vgl. unten):

Die Betriebssteuerung ist so ausgeführt, dass scharfe Grenzwerte betreffend der Einhaltung eines stabilen Betriebs bei der eigentlichen Messung, betreffend einer maximalen Abweichung zwischen Ring- und Zentrumstemperatur und schliesslich betreffend maximaler Abweichung zwischen den Temperaturen innerhalb der Kühlplatte resp. der Heizplatte beachtet werden.

Übliche Messbedingungen - Begriffe

- Mittlere Oberflächentemperatur der Zentrums-Heizfläche (Mittelwert aus 5 Messstellen): ϑ_w, m
- Mittlere Oberflächentemperatur an der Kühlfäche: ϑ_k, m
- Mittlere Temperaturdifferenz zwischen Heiz- und Kühlfäche: $\vartheta_w, m - \vartheta_k, m$
- Mitteltemperatur der Probe: ϑ_m

Üblicherweise findet eine Messung statt bei mittleren Probentemperaturen von 9°C, 17°C und 25°C, bei einer mittleren Temperaturdifferenz zwischen Warm- und Kaltseite von 10 K:

Bei diesen Bedingungen wird je während 10 Minuten der stationäre Wärmefluss sowie die Temperaturdifferenz gemessen und anschliessend der Auswertung zugeführt.

Auswertung

Aus den gemessenen mittleren Oberflächentemperatur- Differenzen und dem Wärmefluss erfolgt die Ermittlung

- der Wärmeleitfähigkeit λ bei homogenen Proben,
- resp. des Wärmedurchlasswiderstandes bei geschichteten Proben.

Im Detail wird hierzu aus den 3 Einzelmessresultaten bei verschiedenen Temperaturen die Regressionsgerade (Zusammenhang Wärmeleitfähigkeit resp. Wärmedurchlasswiderstand und Mitteltemperatur der Probe) ermittelt. Anschliessend wird rechnerisch als **Schlussresultat**:

- die Wärmeleitfähigkeit bei 10°C Mitteltemperatur und trockener Probe,
- resp. der Wärmedurchlasswiderstand bei 10°C und trockener Probe bestimmt.

Fehler der Messresultate:

Die Reproduzierbarkeit der Messung liegt in der Regel günstiger als $\pm 2 \%$, der absolute Fehler bei maximal 5 %.

Anforderungen an die Prüfkörper

Dimensionen: 50 x 50 cm, Dicke maximal 8 cm (6 cm für Wärmedämmstoffe mit niedriger Wärmeleitfähigkeit).

Thermischer Widerstand (d/λ) zwischen 0.5 und 3 m² K/W. Die Proben müssen ausreichend eben und planparallel sein; die Dicke und die Rohdichte der zwei Proben dürfen nicht mehr als 5 % vom arithmetischen Mittel entfernt liegen.

Einbau der Proben

Die Proben werden in jener Dicke geprüft, wie sie bei der Prüfung nach Norm StA 279 resultiert hat. Hierzu werden die Heiz- und Kühlplatten bei weichen Proben abgestützt. Bei losem Material wird zusätzlich eine Randbegrenzung eingebracht. Eine Schichtung von dünnen Proben ist zulässig, wenn die Bildung von Luftzwischenräumen vermeidbar ist.

Anhang 8
S. 39 - 45

Fotoanhang zu den Wärmedurchgangsmessungen

(Fotos Nr. 1 bis 6: Infrarotaufnahmen, siehe Bericht Teil 1, Kap. 6.2 - 6.4)



Foto Nr. 7

Erstellen und Verdichten der
armierten Betonwand
(03.03.1994)



Foto Nr. 8

Prüfung 1: erste Nullmessung

Blick auf die kaltseitige Oberfläche der
Prüfwand, die im Rahmen der k-Wert-
Kammer eingebaut ist.

Die 16 Thermoelemente für die Oberflä-
chentemperaturen sind bereits montiert.

Anhang 8

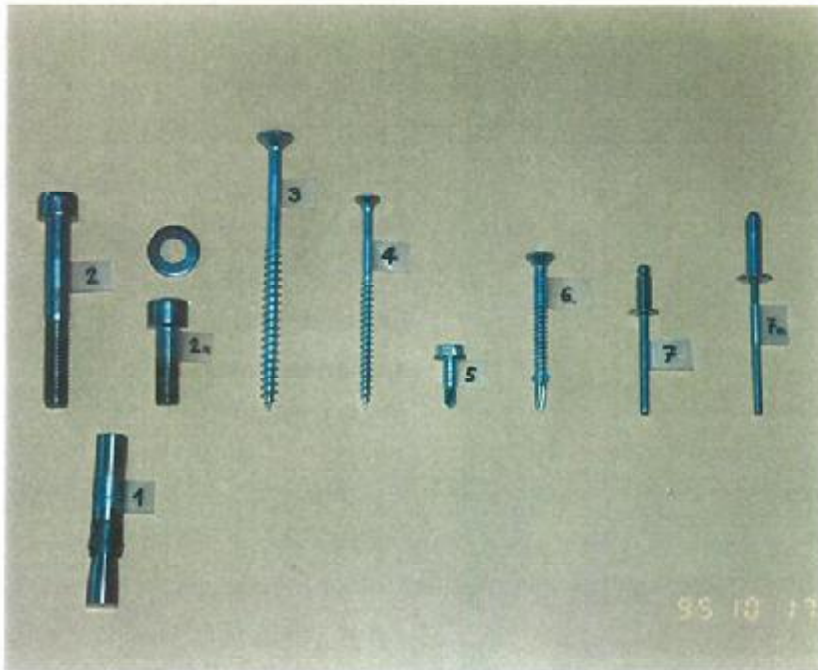


Foto Nr. 9

Verschiedene **Verankerungs- und Verbindungsmittel**, welche bei den Prüfungen zum Einsatz kamen (vgl. Bericht Kap. 3).

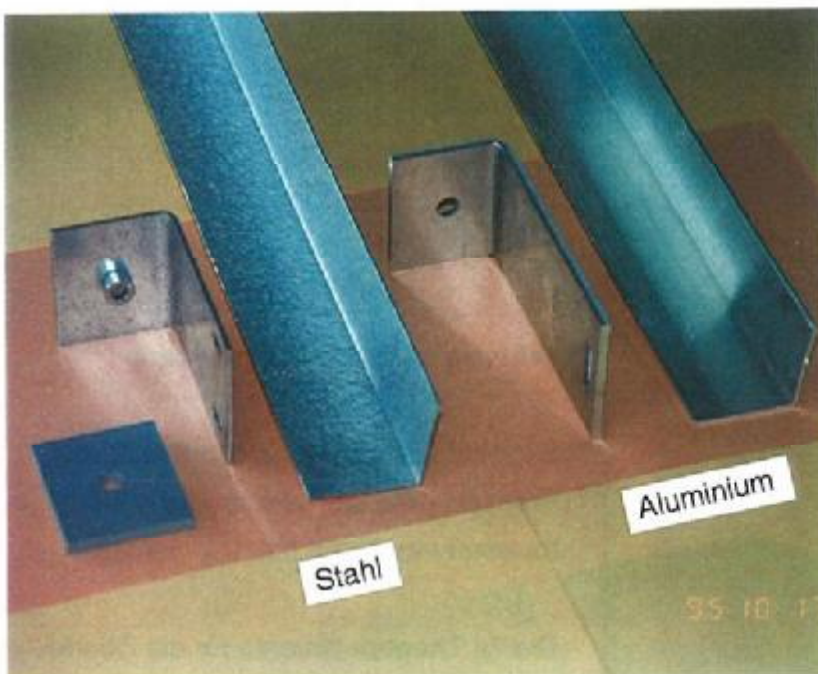


Foto Nr. 10

Prüfungen 4 und 5

Metallunterkonstruktionen
Prüfungen 4 / 4a / 4b: Stahl
mit Aluzinc- Beschichtung

Prüfungen 5 - 5f:
Aluminium Legierung

Anhang 8



Foto Nr. 11

Prüfung 2: Holzlatten einlagig

kaltseitige Oberfläche, fertig eingebaut

horizontal: Holzlattenlage A, 60/100 mm
(vollständig im Dämmstoff)

vertikal: Aussenlattung C, 70/30 mm
Lattenabstand $a = 30$ cm
(im Hinterlüftungsraum)

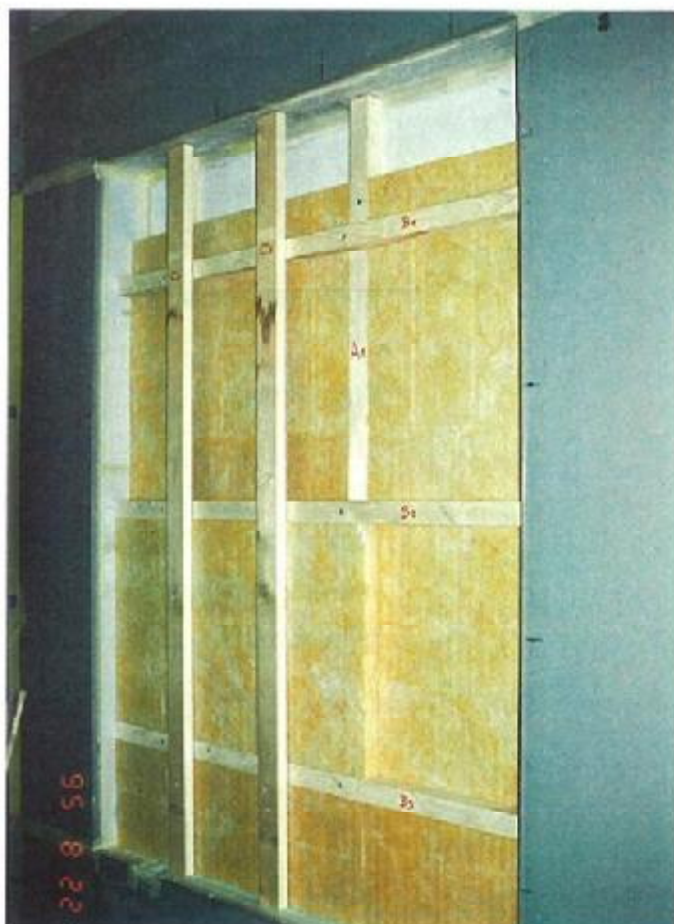


Foto Nr. 12

Prüfung 3: Holzlatten gekreuzt

Kaltseitige Oberfläche

Darstellung des Aufbaus mit
Holzlattenlage A, B und C und
Dämmstofflage A und B (je 50 mm dick)

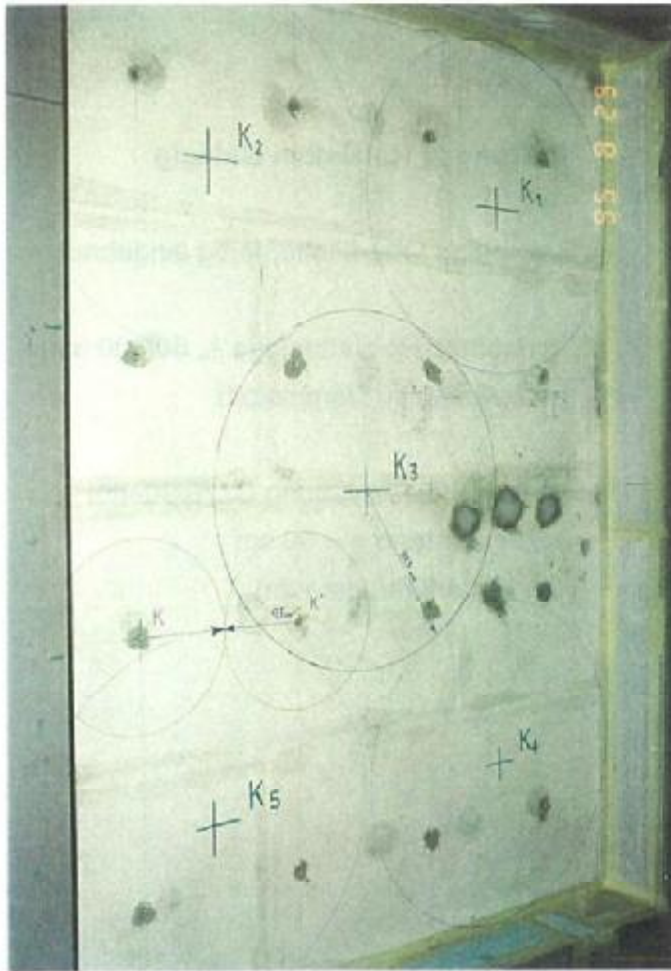


Foto Nr. 13

Anhang 8

Vor den Prüfungen 4 und 5

Betonoberfläche Kaltseite,
mit den vorausberechneten
Wirkungszonen der Wärmebrücken

optimale Verteilung der Konsolen:
(vgl. Bericht Kap. 3.6).

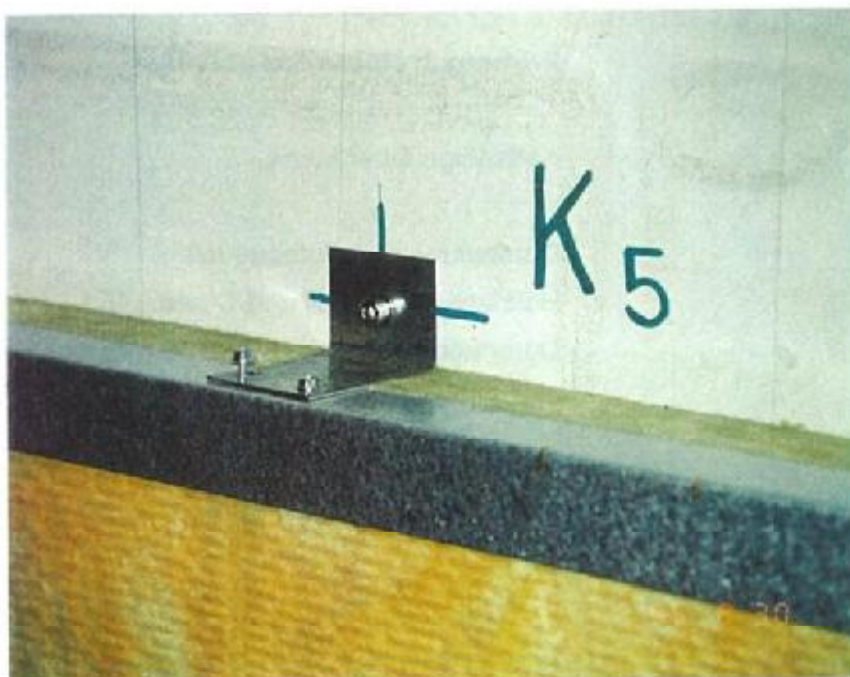


Foto Nr. 14

Prüfungen 4 und 4a

Stahlkonsolen

Konsole Nr. 5:
(ohne therm. Trennelement)
mit dem horizontalen
Winkelprofil

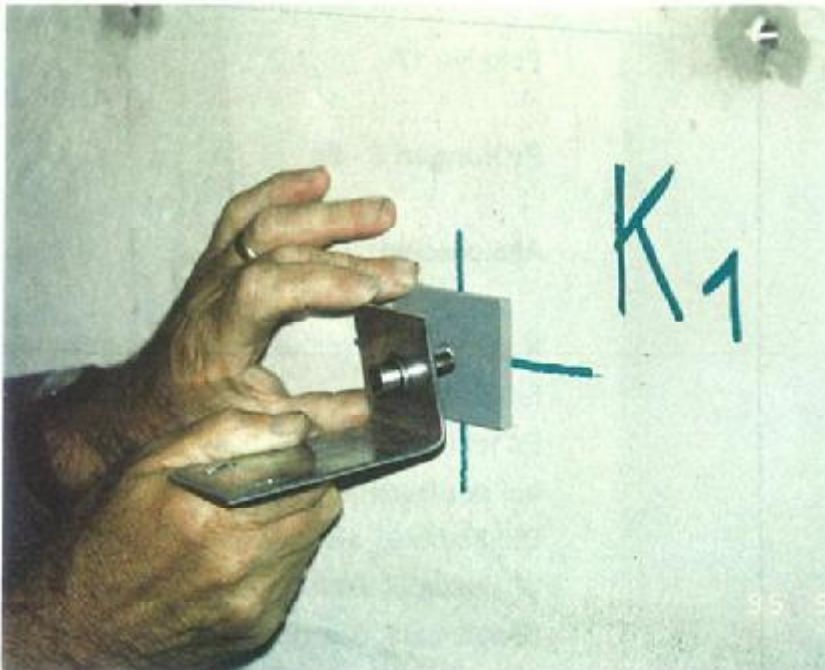


Foto Nr. 15

Anhang 8

Prüfung 4b

Stahlkonsolen

Die therm. Trennelemente (Unterlagen) werden montiert.
Kunststoff aus geschlossenzelligem PVC Hartschaum, $d = 6.3 \text{ mm}$



Foto Nr. 16

Prüfungen 4 / 4a / 4b

Stahlkonsolen

Kaltseitige Oberfläche, fertig eingebaut
Die 16 Oberflächenfühler sind montiert und entsprechend den Materialflächen-Anteilen aufgeteilt.

Anhang 8

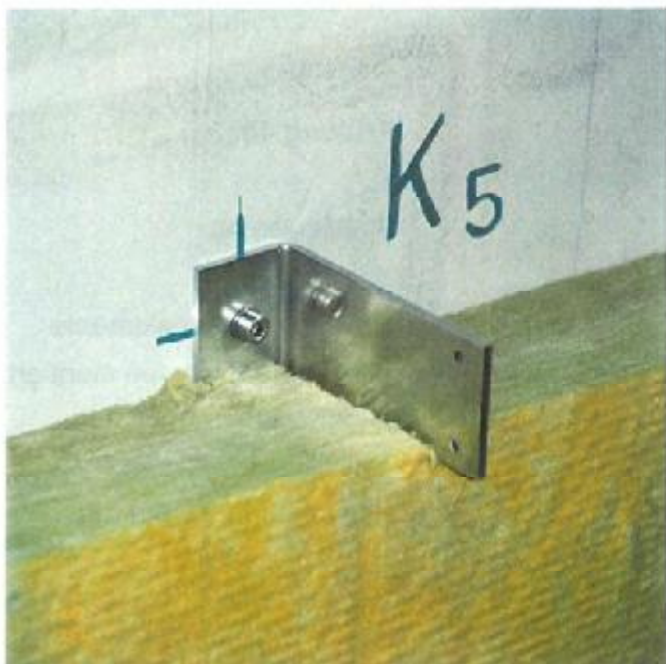


Foto Nr. 17

Prüfungen 5 - 5c

Alukonsolen

Konsole Nr. 5 (ohne therm. Trennelement) ist montiert.

Es fehlt noch das Winkelprofil aussen auf der Dämmstoffoberfläche.

Die Fixpunkt-Konsole hat bei der Winkelprofil-Befestigung 2 Niete.

(Gegensatz: Gleitpunkt mit 1 Schlitzloch)



Foto Nr. 18

Prüfung 5 - 5c

Alukonsolen

Kaltseitige Oberfläche der eingebauten Prüfwand. Es fehlen noch die Oberflächenfühler.

Die vertikalen Aluprofile zur Aufnahme der vorgehängten Bekleidung sind montiert.
(→ Funktion der Aussenlattung C bei Prüfung 4)

Anhang 8



Foto Nr. 19 (Prüf. 5 - 5c)
Prüfwand Ansicht: Normalbild

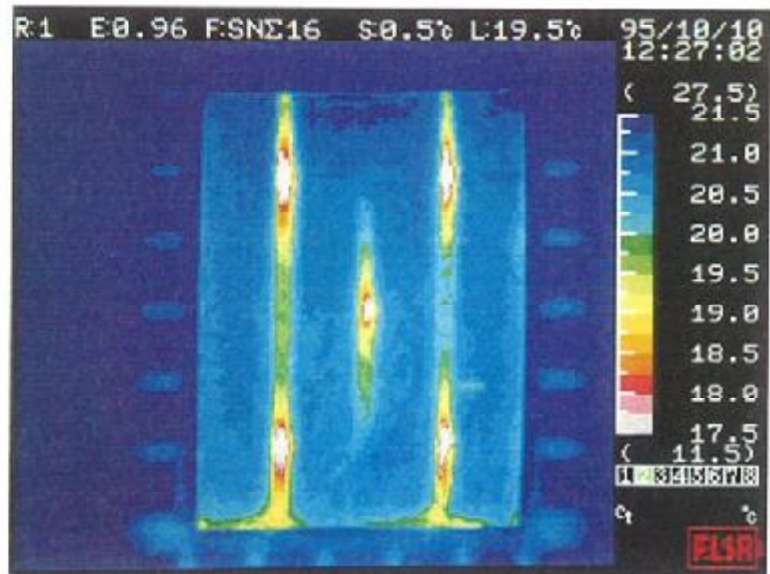


Foto Nr. 20
Infrarotaufnahme

Prüfung 5d: Alukonsolen mit Inverstemperaturen (vgl. Prüfbericht Kap. 6.3)

Vor den Infrarotaufnahmen wurden die blanken Aluprofile zuerst übermalt (Emissionswert!).



Foto Nr. 21

Kalibrierte k-Wert Kammer der EMPA, Abteilung Bauphysik

links: das Steuerpult, in der Prüfkammermitte: Der Rahmen (gelb) mit der Prüfwand.



Address: Den Dolech 2
P.O. Box 513
5600 MB Eindhoven
The Netherlands
Telephone: +31 40 479111
Telex -31 40 51163

Technische Universiteit  Eindhoven

Prüfbericht Nr. 158 740

Teil 2

Numerische Berechnungen der Wärmebrückenwirkung von Unterkonstruktionen in hinterlüfteten Fassaden

Karim Ghazi Wakili
Henk L. Schellen

Inhalt Teil 2	Seite
1. Wärmeübertragung in hinterlüfteten Fassaden	49-53
2. Berechnung der Wärmeübertragung in hinterlüfteten Fassaden	54-59
3. 3-D Wärmebrücken Berechnungen	60
4. Modellierung von verschiedenen Konstruktionen	61-64
5. Rechenergebnisse	65-79
6. Zusätzliche Berechnungen	80
Anhang: 1 - 3	81-85

Prüfobjekt: Betonwand (L x H x D = 150 x 200 x 18 cm)
mit 100 mm Aussenwärmedämmung
und verschiedenen Unterkonstruktionen

Auftrag vom: 12.07.1995

Eingang der Prüfmaterialien: Sommer 1995

Ausführung der Untersuchungen: bis August 1996

Seiten Teil 2: 47 - 85

Symbolverzeichnis

a	Temperaturleitfähigkeit	m^2/s
c	Spezifische Wärmekapazität	$J/(kgK)$
D	Spaltbreite	m
g	Fallbeschleunigung	9.81 m/s^2
H	Spalthöhe	m
L	Länge	m
M	Thermische Strahlungsleistung	W/m^2
Nu	Nusselt-Zahl	
p	Druck	N/m^2
Q	Wärmestrom	W
q	Wärmestromdichte	W/m^2
Ra	Rayleigh-Zahl	-
Re	Reynolds-Zahl	-
T	Absolute Temperatur	K
v	Geschwindigkeit	m/s
$\vec{v} = (u,v,w)$	Geschwindigkeitsvektor	m/s
x,y,z	Rechtwinklige Koordinaten	
α	Wärmeübergangskoeffizient	$W/(m^2K)$
	Index : i / w = innen / warmseitig	
	a / k = aussen / kaltseitig	
β	Thermische Ausdehnung (Volumen)	K^{-1}
ϵ	Emissionsgrad	
ϑ	Temperatur	$^{\circ}C$
λ	Wärmeleitfähigkeit	$W/(mK)$
ν	Kinematische Viskosität	m^2/s
ρ	Dichte	kg/m^3
σ	Strahlungskonstante	$5.67 \times 10^{-8} \text{ W/(m}^2K^4)$

1. Wärmeübertragung in hinterlüfteten Fassaden

In Aussenwandkonstruktionen mit hinterlüfteten Fassaden gibt es neben der Wärmeleitung im festen Material (Wand, Dämmstoff, Dübel, Konsole, etc.), drei verschiedene Wärmetransport Mechanismen im Luftspalt:

- Wärmeleitung
- Wärmestrahlung
- Wärmeübertragung durch Konvektion

1.1 Wärmeleitung

In festen Stoffen erfolgt die Wärmeübertragung durch Wärmeleitung. Darunter versteht man einen an die Materie gebundenen Energietransport, wobei der Wärmeaustausch zwischen unmittelbar benachbarten Molekülen durch Schwingungen stattfindet.

Bei homogenen und isotropen Stoffen besteht zwischen der Wärmestromdichte q und der Temperaturverteilung $\vartheta(x,y,z)$ im Körper die Beziehung:

$$q = -\lambda \operatorname{grad} \vartheta$$

In einer Wandkonstruktion ohne Wärmebrücken und ohne Luftspalt, ist die Wärmeleitung 1-dimensional: der Wärmestrom fliesst senkrecht zur Oberfläche der Wand (entlang des Temperaturgradienten).

Die 1-D Wärmeleitungsgleichung zur Bestimmung der Temperaturverteilung $\vartheta(x)$ lautet dann:

$$\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} = \frac{\rho c}{\lambda} \frac{\partial \vartheta}{\partial \tau}$$

In einem Luftspalt in der Wandkonstruktion, wo die Luft von oben nach unten oder von unten nach oben strömt, entsteht ein weiterer Temperaturgradient. Dies führt zu einem 2-dimensionalen Wärmeleitungsproblem. Sind ausserdem noch Wärmebrücken vorhanden (Dübel, Konsolen, Profile, etc.), so wird das Problem 3-dimensional.

Die 3-D Wärmeleitungsgleichung zur Bestimmung der Temperaturverteilung $\vartheta(x,y,z)$ lautet dann:

$$\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial z^2} = \frac{\rho c}{\lambda} \frac{\partial \vartheta}{\partial \tau}$$

Im stationären Fall entfällt die Abhängigkeit von der Zeit, womit die rechte Seite der Gleichung verschwindet. Die Lösung dieser Art Gleichungen ist im allgemeinen nur numerisch, durch Diskretisierung nach den Ortskoordinaten möglich (z.B. mit dem PC-Programm TRISCO).

1.2 Wärmestrahlung

Die von einem Körper ausgestrahlte Energie in Form von elektromagnetischer Strahlung wird durch die absolute Temperatur T [K] und die Strahlungseigenschaften der Oberfläche bestimmt. Die thermische Strahlungsleistung M eines Körpers in den Halbraum ist definiert durch:

$$M = \varepsilon \sigma T^4$$

In einem Spalt tauschen die zwei Oberflächen Energie in Form von Strahlung aus. Neben den Temperaturen und den Emissionsgraden der Oberflächen bestimmt die Geometrie den Wärmeaustausch:

$$q = \frac{\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}$$

Diese Formel wird oft umgeformt:

$$q = \alpha_r (T_1 - T_2)$$

mit

$$\alpha_r = \frac{\sigma(T_1^2 + T_2^2)(T_1 + T_2)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}$$

1.3 Wärmeübertragung durch Konvektion

In Gasen und Flüssigkeiten erfolgt der Wärmetransport zusätzlich zur Wärmeleitung durch die Fortbewegung der Moleküle innerhalb des zur Verfügung stehenden Raumes, wobei diese ihren Energieinhalt mit sich führen. Die Strömung in einem Spalt kann entweder natürlich durch örtliche Temperatur- bzw. Dichteunterschiede der Luft entstehen oder durch dynamische Druckunterschiede erzwungen werden (z.B. durch Wind).

Die mathematischen Ansätze zur Behandlung der Wärmeübertragung durch Konvektion müssen neben den Gesetzen der Wärmeleitung auch diejenigen der Hydrodynamik erfassen. Die Gleichungen lassen sich in der Regel nur für bestimmte, vereinfachte Rand- und Anfangsbedingungen bezüglich Temperatur und Luftgeschwindigkeit lösen.

Für die praktische Anwendung wird ein Wärmeübergangskoeffizient α_c durch Konvektion nach folgender Gleichung definiert:

$$q = \alpha_c (\vartheta_1 - \vartheta_2)$$

Der Wärmeübergangskoeffizient α_c ist kein Stoffwert, denn er hängt von mehreren Bedingungen ab, darunter die Temperatur, die Strömungsgeschwindigkeit, die Oberflächenbeschaffenheit und die geometrischen Verhältnisse.

Da die Strömungsgeschwindigkeit eine entscheidene Einflussgrösse ist, unterscheidet man zwischen dem Wärmeübergang bei freier oder bei erzwungener Konvektion.

Die empirischen oder semi-empirischen Lösungen für die konvektive Wärmeübertragung werden meistens durch eine dimensionslose Zahl, die sogenannte Nusselt-Zahl dargestellt:

$$Nu_L = \frac{\alpha_c L}{\lambda}$$

Die Nusselt-Zahl gibt eine Beschreibung der Wärmeübertragung zwischen der Luft und einer festen Oberfläche und stellt das Verhältnis der Wärmeübertragung durch Leitung zur Wärmeübertragung durch Konvektion dar. Die Nusselt-Zahl kann sowohl eine lokale als auch eine gemittelte Grösse sein.

Bei erzwungener Konvektion ist die dimensionslose Reynolds-Zahl ein Mass für die Druck- und Reibungskräfte im Fluidum.

$$Re_L = \frac{vL}{\nu}$$

Der Wert der Reynolds-Zahl zeigt, ob die Strömung laminar oder turbulent ist. Für den Spalt gilt :

$$Re < 2300 \text{ laminar} \qquad Re > 2300 \text{ turbulent}$$

In den folgenden zwei Abschnitten werden für einige gut definierte Spaltströmungen semi-empirische Formeln zur Bestimmung der Nusselt-Zahl angegeben.

1 3.1 Laminare, erzwungene Konvektion im Spalt

Für eine thermisch und hydraulisch völlig entwickelte laminare, erzwungene Strömung im Spalt mit konstanten Temperaturen an den Oberflächen, wird die lokale Wärmeübertragung zwischen der strömenden Luft und den Oberflächen des Spaltes gegeben durch [1]:

$$Nu_D = 3.771$$

Wenn die Wärmestromdichte durch den Spalt konstant bleibt, dann gilt [1]:

$$Nu_D = 4.118$$

1.3.2 Laminare, natürliche Konvektion im vertikalen Spalt

Für laminare, natürliche Konvektion in einem vertikalen Spalt mit parallelen, isothermen Oberflächen gilt folgende mittlere Nusselt-Zahl:

Für $Ra_D, D/H > 1000$ gilt [1]:

$$Nu_D = 0.69 \left(Ra_D \frac{D}{H} \right)^{\frac{1}{4}}$$

Die Rayleigh-Zahl ist hier definiert worden durch:

$$Ra_D = \frac{g\beta(\vartheta_w - \vartheta_1)D^3}{\nu a} \quad \text{mit } a = \lambda / \rho c$$

Für die Wandtemperatur ϑ_w nimmt man die mittlere Temperatur zwischen ϑ_1 und ϑ_2 :

$$\vartheta_w = (\vartheta_1 + \vartheta_2) / 2$$

1.3.3 Laminare, erzwungene und natürliche Konvektion im vertikalen Spalt

Treten in einem vertikalen Spalt erzwungene und natürliche Konvektion zusammen auf, so ergeben sich zwei Möglichkeiten:

1. Gleiche Strömungsrichtung = Verstärkung = grössere Nusselt-Zahl
2. Entgegengesetzte Strömungsrichtung = Abschwächung = kleinere Nusselt-Zahl

Eine Näherung für die resultierende Nusselt-Zahl wird gegeben durch:

$$Nu = \left[(Nu_{nat})^n + (Nu_{erzw})^n \right]^{\frac{1}{n}}$$

Für den Fall, dass beide Mechanismen einander verstärken, gibt es eine gute Übereinstimmung mit experimentellen Resultaten, wenn man $n = 4$ setzt.

1.4 Wärmeübertragung an Oberflächen

Die Wärmeübertragung durch Konvektion und Wärmestrahlung an äusseren und inneren Oberflächen wird gegeben durch:

$$q = \alpha (\vartheta_{umg} - \vartheta_w)$$

$$q = \alpha (\vartheta_{\text{umg}} - \vartheta_w)$$

Als Rechenwerte werden für die Wärmeübergangskoeffizienten meist die Werte nach Norm SIA 180 angenommen:

$$\text{Aussen (Kaltseite): } \alpha_a = 20 \quad \text{W/m}^2\text{K}$$

$$\text{Innen (Warmseite): } \alpha_i = 8 \quad \text{W/m}^2\text{K}$$

1.4.1 Wärmeübertragung an äusseren Oberflächen

Die erzwungene Konvektion infolge Windeinwirkung an Aussenoberflächen wird gegeben durch [2]:

$$\alpha_a = 8.1 v^{0.6} \quad (\text{windzugewandte Seiten, } v > 2 \text{ m/s})$$

$$\alpha_a = 3.5 + 1.4v \quad (\text{windabgewandte Seiten, } v \text{ in m/s})$$

1.4.2 Wärmeübertragung an inneren Oberflächen

Für die freie Konvektion mit turbulenter Strömung an vertikalen Innenoberflächen gilt nach [2]:

$$\alpha_i = 1.31 \sqrt[3]{\Delta\vartheta}$$

Für erzwungene Konvektion mit turbulenter Strömung an Innenoberflächen gilt:

$$\alpha_i = 5.62 + 3.91v \quad \text{für } v < 5 \text{ m/s}$$

2. Berechnung der Wärmeübertragung in hinterlüfteten Fassaden

2.1 Ohne Wärmebrücken

Bei Fassaden ohne Wärmebrücken wird der stationäre Wärmedurchgangskoeffizient k durch einen einfachen Ausdruck bestimmt:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \sum \frac{d}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_a}}$$

Für den Luftspalt wird im allgemeinen ein äquivalenter Wärmedurchlasswiderstand $R_{\text{äq}}$ oder eine äquivalente Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{\text{äq}}$ eingesetzt:

$$R_{\text{äq}} = \frac{d_{\text{Spalt}}}{\lambda_{\text{äq}}}$$

$R_{\text{äq}}$ ist abhängig von der Luftgeschwindigkeit und der Art der Strömung (laminar oder turbulent) und wird aus Messungen [3] oder aus Normen [z.B. Norm SIA 180] bestimmt.

In der Norm SIA 180 wird für $R_{\text{äq}}$ in hinterlüfteten Fassaden $R_{\text{äq}} = 0.08 \text{ m}^2\text{K/W}$ festgesetzt.

Aus Messungen an bestimmten hinterlüfteten Fassaden wurde bei der EMPA ein Wert von $\lambda_{\text{äq}} = 1.38 \text{ W/(mK)}$ bestimmt.

Für den stationären Wärmeverlust gilt:

$$Q = k \cdot A \cdot \Delta\vartheta$$

2.2 Mit Wärmebrücken

Treten in der Fassade Wärmebrücken auf, verändert sich die Wärmeübertragung von einem (quasi) 1-dimensionalen zu einem 2- oder 3-dimensionalen Problem. Dies kann meistens nur mit einem numerischen Verfahren, d.h. mit einem Wärmebrückenprogramm (z.B. Trisco oder Waebru) gelöst werden.

Diese Art Programme sind aber nur für Wärmeleitungsprobleme einsetzbar. Sie berücksichtigen die Konvektion und die Strahlung an den Oberflächen nur durch einen Wärmeübergangskoeffizienten als Randbedingung.

Um die Wärmeübertragung durch den Luftspalt in die Berechnung einzubeziehen gibt es also zwei Möglichkeiten: entweder rechnet man mit einer äquivalenten Materialschicht (mit einer äquivalenten Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{\text{äq}}$) oder man ersetzt den Spalt und die vorgehängte Bekleidung durch einen modifizierten Wärmeübergangskoeffizienten (α_{mod}).

2.3 Berechnung mit einer äquivalenten Wärmeleitfähigkeit im Spalt

In diesem Fall wird der Luftspalt, in dem Strahlung, Konvektion und Wärmeleitung stattfinden, durch eine äquivalente Materialschicht ersetzt, in der nur noch Wärmeleitung als einziger Übertragungsmechanismus vorkommt. Die äquivalente Wärmeleitfähigkeit wird aus (quasi) 1-D Berechnungen oder Messungen bestimmt, wobei der Wärmedurchgang senkrecht zur Oberfläche der Wand vorausgesetzt wird. Die daraus bestimmte äquivalente Wärmeleitfähigkeit für den Spalt wird isotrop betrachtet und vernachlässigt damit die vertikale Komponente des Wärmestroms, die beim konvektiven Wärmeübergang vorhanden ist. Diese Rechenmethode ist also nur eine Annäherung.

2.4 Berechnung mit einem modifizierten Wärmeübergangskoeffizient

Der äquivalente Wärmeübergangskoeffizient ersetzt in diesem Fall die Wärmeübertragungsvorgänge im Spalt und in der vorgehängten Bekleidung. Dem Wärmeübergangswiderstand auf der Aussenseite der Wand wird ein äquivalenter Wärmewiderstand hinzugefügt:

$$\frac{1}{\alpha_{\text{mod}}} = \frac{1}{\alpha_a} + R_{\text{äq}}$$

2.5 Berechnung mit Computational Fluid Dynamics (CFD)

Um die Genauigkeit der beiden oben beschriebenen Methoden abzuschätzen wurden an einer bestimmten Wand CFD-Berechnungen mit dem kommerziellen Programm FLUENT durchgeführt. Dieses Programm berücksichtigt im Spalt alle drei Wärmeübertragungsvorgänge d.h. Strahlung, Konvektion und Wärmeleitung (Siehe Anhang 1).

2.6 Die untersuchte Wand

Die mit CFD untersuchte Wand ist in [3, Kapitel 3.4] beschrieben und in Bild 2.1 (unten) schematisch dargestellt. Die folgenden Rechenwerte wurden als Eingabegrößen verwendet:

Wärmeübergangskoeffizient aussen	$\alpha_a = 15$	$\text{W/m}^2\text{K}$	
Temperatur aussen	$\vartheta_a = -10$	$^{\circ}\text{C}$	
Wärmeübergangskoeffizient innen	$\alpha_i = 8$	$\text{W/m}^2\text{K}$	
Temperatur innen	$\vartheta_i = 20$	$^{\circ}\text{C}$	
Beton	$\lambda_b = 1.8$	W/m K	$d = 0.18$ m
Aluminium	$\lambda_a = 200$	W/m K	
Wärmedämmstoff	$\lambda_D = 0.030$	W/m K	$d = 0.10$ m
Bekleidung	$\lambda_f = 1.8$	W/m K	$d = 0.06$ m
Spalt	$\lambda_{\text{aq}} = 1.38$	W/m K	$d = 0.05$ m

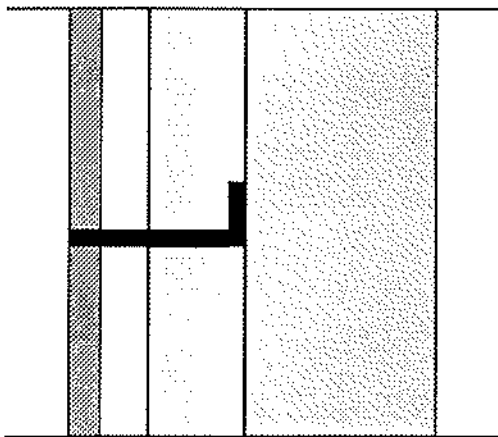


Bild 2.1

Vereinfachtes Modell der Wandkonstruktion mit Konsole und vorgehängter Bekleidung für die CFD- Berechnungen

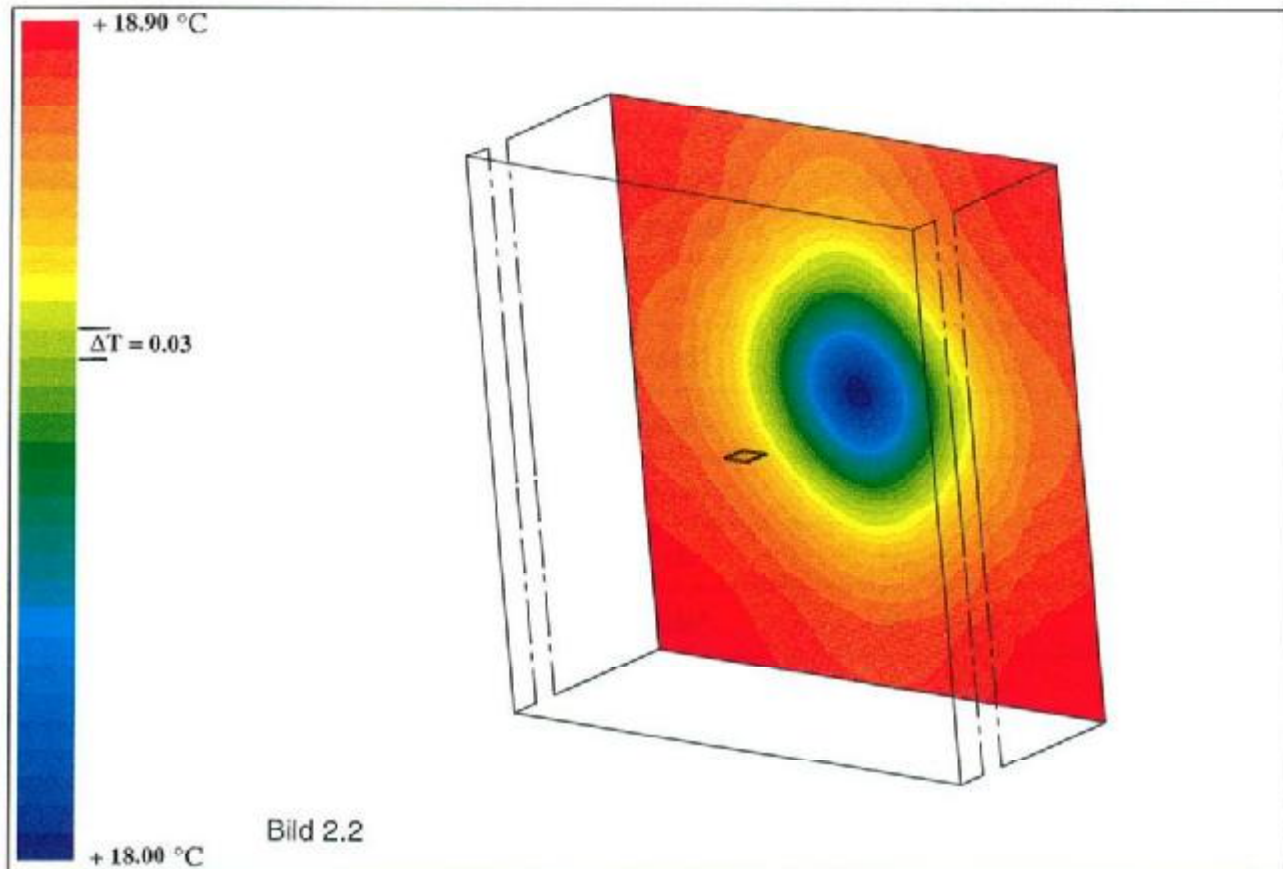
Folgende Varianten wurden gerechnet :

Variante	Anker	Strömung laminar	Strömung turbulent	Luftgeschwindigkeit [m/s]
Ohne_Lam	Nein	Ja	Nein	0.50
Ohne_025_Tur	Nein	Nein	Ja	0.25
Ohne_050_Tur	Nein	Nein	Ja	0.50
Ohne_100_Tur	Nein	Nein	Ja	1.00
Mit_Lam	Ja	Ja	Nein	0.50
Mit_025_Tur	Ja	Nein	Ja	0.25
Mit_050_Tur	Ja	Nein	Ja	0.50
Mit_100_Tur	Ja	Nein	Ja	1.00

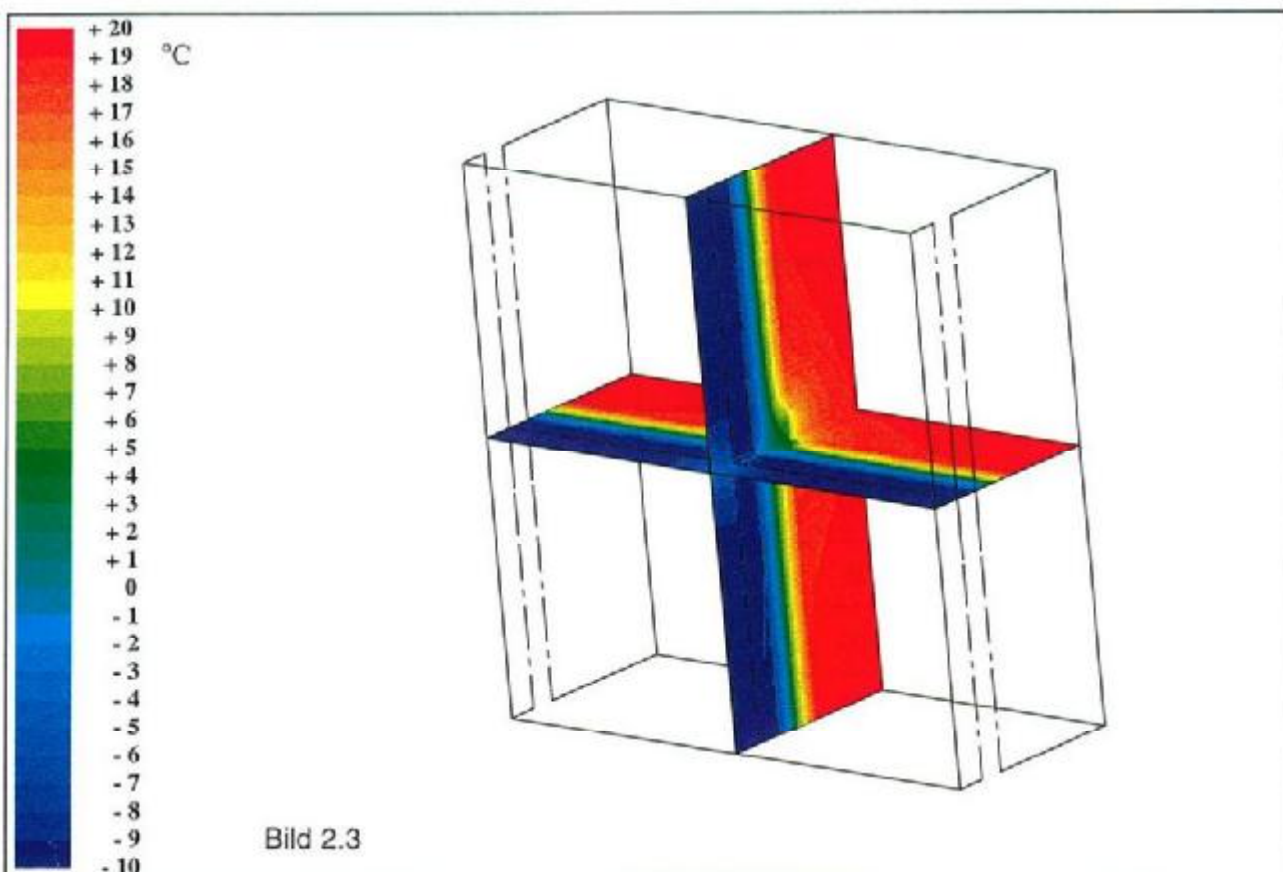
Gerechnet wurde mit einer Aluminium Konsole 50 mm x 60 mm x 130 mm, d = 4.0 mm in einer 1 m² grossen Wandfläche.

2.7 Ergebnisse aus den CFD-Berechnungen

Variante	Wärmeverlust durch		
	Oberfläche Innen [W/m ²]	Oberfläche Aussen [W/m ²]	Konvektion [W/m ²]
Ohne_Lam	8.11	2.47	5.64
Ohne_025_Tur	8.07	2.56	5.51
Ohne_050_Tur	8.15	1.86	6.29
Ohne_100_Tur	8.19	1.45	6.74
Mit_Lam	10.20	3.73	6.47
Mit_025_Tur	10.18	3.97	6.21
Mit_050_Tur	10.27	3.10	7.17
Mit_100_Tur	10.34	2.50	7.84



Temperaturverteilung auf der Innenseite der Wand. (Farb)Skalenschritte: 0.03 °C.



Temp. Verteilung in horizontalem und vertikalem Querschnitt. (Farb)Skalenschritte 1.0 °C.

2.8 Ergebnisse aus den TRISCO-Berechnungen

Mit TRISCO wurden 4 Varianten gerechnet:

Eine Wand einmal ohne und einmal mit Anker. Die äquivalente Wärmeleitfähigkeit für den Luftspalt wurde aus den Messungen des EMPA Berichtes [3] entnommen und betrug:

$$\lambda_{\text{äq}} = 1.38 \text{ W/(mK)}$$

Der modifizierte Wärmeübergangskoeffizient wurde berechnet aus:

$$\frac{1}{\alpha_{\text{mod}}} = \frac{1}{\alpha_{\text{a}}} + R_{\text{äq}}$$

daraus ergibt sich: $\alpha_{\text{mod}} = 6.8 \text{ W/m}^2\text{K}$

Variante	Anker	q	
		Innenoberfläche [W/m ²]	Aussenoberfläche [W/m ²]
Ohne_lambda_eq	Nein	8.1	8.1
Ohne_alpha_eq	Nein	8.1	8.1
Mit_lambda_eq	Ja	11.8	11.8
Mit_alpha_eq	Ja	9.9	9.9

2.9 Schlussfolgerungen aus den CFD- und TRISCO-Vergleichsberechnungen

Für die Wand **ohne Anker** ergeben beide Berechnungen übereinstimmende Resultate. Die Wärmeverluste liegen bei allen Varianten zwischen 8.1 und 8.2 W/m².

Für die Wand **mit Anker** ergeben die Resultate der TRISCO Berechnungen unter Berücksichtigung einer **äquivalenten Wärmeleitfähigkeit** $\lambda_{\text{äq}}$ einen Wärmeverlust der ca. 12 % grösser ist als die entsprechenden Resultate der CFD-Berechnungen.

Für die Wand **mit Anker** ergeben die TRISCO Berechnungen mit einem **modifizierten Wärmeübergangskoeffizient** α_{mod} Resultate die um weniger als 3 % von denjenigen der CFD-Berechnungen abweichen.

Literatur

- [1] J. Lecompte, De invloed van natuurlijke convectie op de thermische kwaliteit van geïsoleerde spouwconstructie, PhD-thesis, Katholieke Universiteit Leuven, 1989.
- [2] Element 29, Wärmeschutz und Energie im Hochbau, Schweiz. Ziegelindustrie 1990.
- [3] Hinterlüftete Fassaden, EMPA, Schlussbericht F+E Nr. 127 378, 2. Auflage 1993.

3. 3-D Wärmebrücken Berechnungen

Die numerischen Berechnungen für diesen Bericht wurden mit Hilfe des PC-Programms TRISCO durchgeführt (Ein Kurzbeschreibung des Programms befindet sich in Anhang 2).

Wie bereits in Kap. 2.9 erwähnt, stimmen die Resultate der TRISCO Berechnungen (mit α_{mod}) mit denjenigen der CFD-Berechnungen gut überein. Für alle weiteren Berechnungen werden deshalb die Vorteile des TRISCO Programmes genutzt (PC-gängig, schnell, flexibel in der Bearbeitung von Eingaben).

Bei den vorliegenden numerischen Untersuchungen wurde folgenden zwei Problemen besondere Beachtung geschenkt:

1. Stark unterschiedliche Wärmeleitfähigkeiten von aneinander grenzenden Materialien (Dämmstoff / Metall) bedingen eine hohe Rechengenauigkeit. Dies wird erreicht, indem eine möglichst feine Rasterung in den Grenzbereichen der Materialschichten gelegt wird.
2. Die Kontaktflächen zwischen den Konsolen und dem Untergrund (Tragwerk) sind wegen der Oberflächenbeschaffenheit des Untergrundes (Betonüberzähne, Kiesnester etc.) nicht ideal. Aus diesem Grund wurde der Kontakt zwischen Konsole und Wand durch eine 0.2 mm dicke Luftschicht ($\lambda = 0.025 \text{ W/mK}$) approximiert.

Da das Lösungsverfahren des Rechenprogramms iterativ ist, werden so viele Iterationen durchgeführt, bis die Änderung der Knotentemperaturen, des totalen Wärmeflusses und des Wärmeflusses an jedem einzelnen Knoten beim nächsten Iterationsschritt einen vorgegebenen Wert unterschreitet (siehe auch Anhang 2). Die Genauigkeit der Berechnungen und die Anzahl der Knoten wird im Kapitel 5 für jede einzelne Berechnung ausgewiesen.

Es ist weiter zu beachten, dass die oben erwähnte Genauigkeit sich nur auf das Rechenverfahren bezieht und Ungenauigkeiten der Dimensionen, der Raumtemperaturen, der Übergangskoeffizienten und der Wärmeleitfähigkeiten nicht berücksichtigt.

Die Berechnungen erfolgten auf einem PC mit 16MB RAM, 60 MHz Taktfrequenz und einem Pentium Prozessor. Für ein Detail mit 60'000 Knoten betrug die Rechenzeit ca. 5.5 Stunden. Die Rechenzeit ist auch von der geometrischen Komplexität und von den unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten der Materialien abhängig.

4. Modellierung von verschiedenen Konstruktionen

Die numerischen Berechnungen wurden primär mit den gleichen Konstruktionen wie die Messungen durchgeführt. Danach konnten mit geringem Aufwand auch Variationen berechnet werden.

Die Numerierung der Berechnungen entspricht den Prüfungen in Teil 1 des Berichtes.

Nr.	Prüfung	v_{Luft} kaltseitig [m/s]	thermisches Trennelement ¹⁾	Dämmdicke [mm]	Untergrund	Detail siehe Kap.
4	Stahlkonsolen	1.01	nein	100	Beton	5.1
4b	Stahlkonsolen	1.01	ja	100	Beton	5.2
4vd	Stahlkonsolen	1.01	nein	200	Beton	5.3
4vu	Stahlkonsolen	1.01	nein	100	Backstein	5.4
5	Alukonsolen	0.47	nein	100	Beton	5.5
5a	Alukonsolen	0.93	nein	100	Beton	5.6
5b	Alukonsolen	1.48	nein	100	Beton	5.7
5c	Alukonsolen	2.03	nein	100	Beton	5.8
5f	Alukonsolen	0.93	ja	100	Beton	5.9
5avd	Alukonsolen	0.93	nein	150	Beton	5.10
5avd1	Alukonsolen	0.93	nein	200	Beton	5.11
5avu	Alukonsolen	0.93	nein	100	Backstein	5.12
5fvu	Alukonsolen	0.93	ja	100	Backstein	5.13

Eine Zusammenfassung von Berechnungen mit weiteren Variationen, deren Resultate in Teil 3 dieses Berichtes grafisch dargestellt sind, ist in Kapitel 6 enthalten.

- 1) Das thermische Trennelement ist warmseitig des Dämmstoffes, d.h. zwischen Betonwand und Konsole angebracht.



Rechenvariationen (keine Messresultate zum Vergleich vorhanden).

4.1 Geometrie

Für jede der vorher aufgeführten Konstruktionen wurde ein repräsentativer Ausschnitt modelliert. Bild 4.1 zeigt eine schematische Darstellung eines solchen repräsentativen Ausschnitts (*nicht proportionale Darstellung*). Es ist ersichtlich, dass der repräsentative Ausschnitt die Hälfte einer Unterkonstruktion (Anker + Konsole + Profil) und den dazugehörigen Flächenanteil A (Bild 4.1 schraffiert) beinhaltet. Somit entspricht der berechnete Wärmeverlust einer Dichte von $1/2A$ Konsolen (Wärmebrücken) pro m^2 .

Für sämtliche Berechnungen, die im Folgenden dargestellt und diskutiert werden, ist für jede Unterkonstruktion ein Wirkungsbereich von $0.75\text{ m} \times 0.75\text{ m} = 0.5625\text{ m}^2$ zugeordnet. Dies entspricht dem Wirkungskreis im Abschnitt 3.6 in Teil 1 dieses Berichtes.

Somit gilt :

$$2A = 0.5625\text{ m}^2 \quad \text{oder} \quad 1.7778 \text{ Konsolen (Wärmebrücken) pro m}^2$$

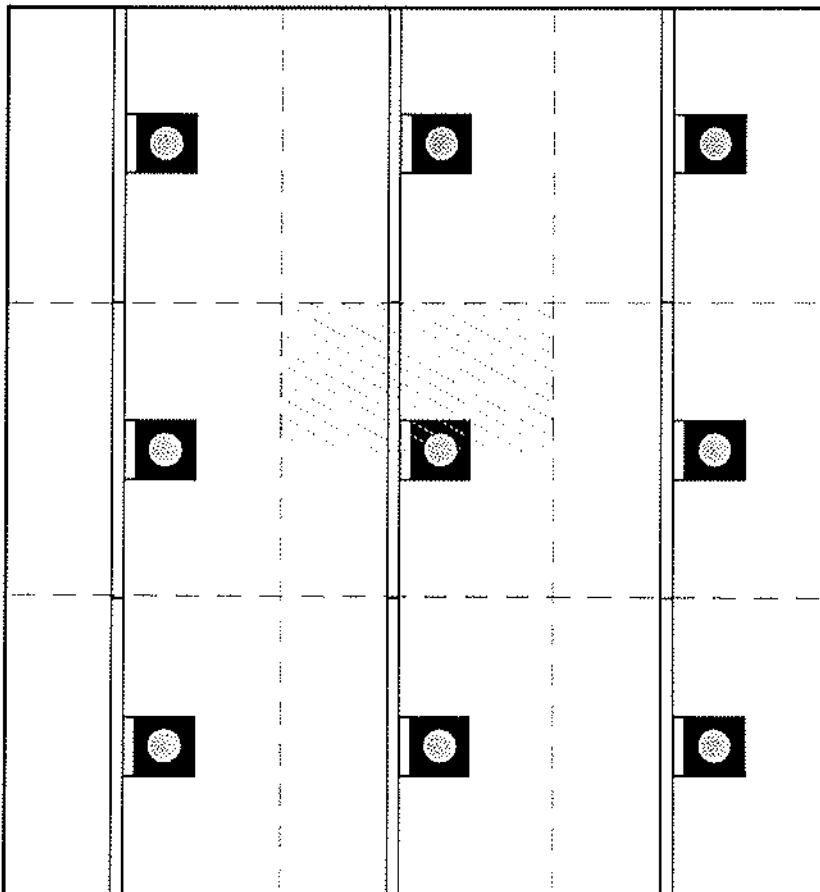


Bild 4.1 Schematische, *nicht masstäbliche* Darstellung einer Wand mit Konsolen für eine hinterlüftete Fassade. Der schraffierte Bereich stellt den repräsentativen Ausschnitt dar.

Eine topologische (nicht masstäbliche) Darstellung des Rechenmodells für eine der Berechnungen ist aus den Bildern 4.2 (Querschnitt, Lage) und 4.3 (Querschnitt, Reihe) ersichtlich. Die Massangaben entsprechen dem minimalen Raster. Für die Berechnungen wurden diese Masse mehrfach unterteilt.

Da der Eingaberaster rechtwinklig ist, wurden alle runden Objekte (Schraube, Ankerhülse) durch flächengleiche Rechtecke approximiert. Auf diese Weise bleibt der Querschnitt des jeweiligen Materials unverändert.

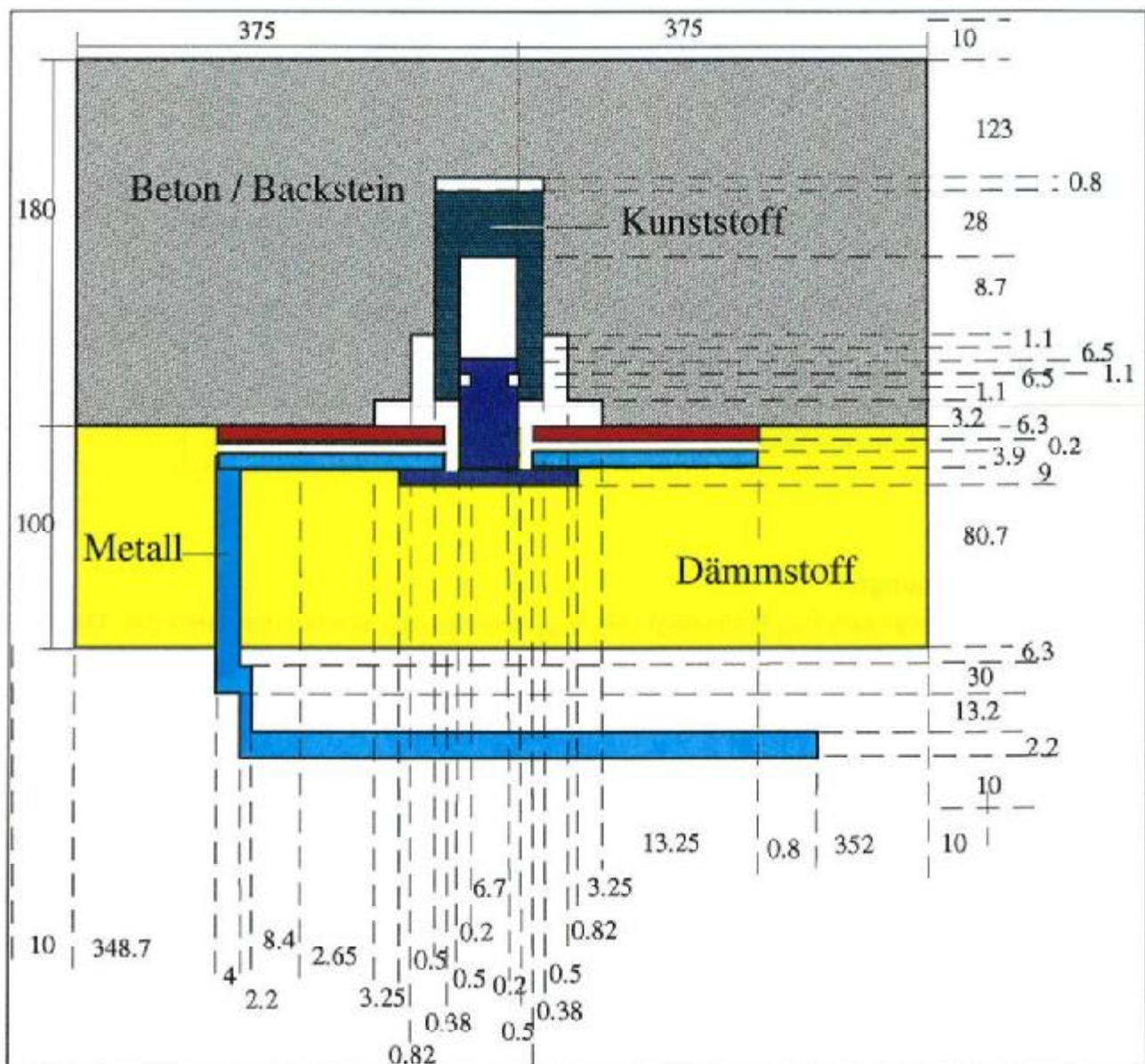


Bild 4.2 Schematischer, *nicht masstäblicher* Querschnitt (Lage) der Berechnung 5f. Alukonsole, Alu-Winkelprofil, thermisches Trennelement und Edelstahl-Dübel. Sämtliche Massangaben in mm.

4.2 Materialeigenschaften

Bei den Berechnungen sind Materialien mit folgenden Wärmeleitfähigkeiten eingesetzt worden (siehe auch Teil1, Kapitel 3.9) :

Material	λ -Wert [W/m K]	ρ -Dichte [kg/m ³]
Stahlbeton	1.8	2400
Glaswolle	0.0300	40
Stahl verzinkt	60	
A4 - Edelstahl	15	
Aluminium - Legierung (Al Mg Si 0.5 F22-F25)	170	
thermisches Trennelement (PVC - GHS)	0.09	720
Luftschichten :		
zwischen Konsole und Wand	0.025	
zwischen Ankerhülse und Schraube	0.050	
zwischen Ankerhülse und Wand	0.028	

4.3 Randbedingungen

Für die Raumtemperaturen ϑ_{RK} (kaltseitig) und ϑ_{RW} (warmseitig) wurden die durch die Messung ermittelten Werte eingesetzt (Teil 1, Kapitel 5). Für Berechnungen an Variationen, wurden die Raumtemperaturen der "entsprechenden" Messungen eingesetzt.

Die Übergangskoeffizienten α_a (kaltseitig) und α_i (warmseitig) wurden durch Messung der Raum- und Oberflächentemperatur an mehreren Stellen der Prüfwand bestimmt (Teil1 Kapitel 5.5).

Für die Oberflächen der Metallprofile, die an die Raumluft grenzten, wurde der Strahlungsbeitrag reduziert, da blanke Metalloberflächen ein kleines Emissionsvermögen haben.

$$\alpha_{Str} = 4\sigma \cdot T_m^3 \cdot (1/\epsilon_1 + 1/\epsilon_2 - 1)^{-1}$$

5. Rechenergebnisse

5.1 Berechnung der Prüfung 4

Wand	180 mm Beton
Dämmstoff	100 mm Glaswolle
Unterkonstruktion	Stahl mit Aluzinc Beschichtung
Verankerung	A4 Edelstahl
therm. Trennelement	nein

Warmseitig	$\vartheta_{RW} = 21.57 \text{ °C}$	$\alpha_w = 8.6 \text{ W/(m}^2\text{K)}$
Kaltseitig, Dämmstoff	$\vartheta_{RK} = -11.16 \text{ °C}$	$\alpha_k = 9.9 \text{ W/(m}^2\text{K)}$
Kaltseitig, Stahlprofil	$\vartheta_{RK} = -11.16 \text{ °C}$	$\alpha_k = 8.9 \text{ W/(m}^2\text{K)}$

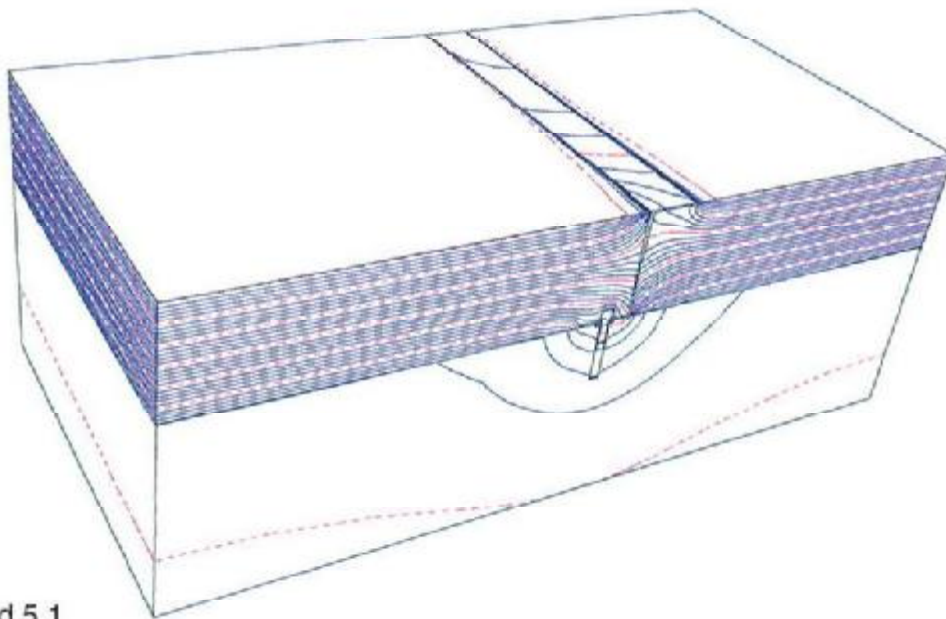


Bild 5.1

Das 3-dimensionale Isothermenbild in der Perspektive für die Prüfung 4.

Vereinfachung : Berechnung ohne Holzlattung

Isothermenabstand 1 K. Jede fünfte Isotherme ist gestrichelt dargestellt.

Prüfung	Knotenzahl	max. $d\vartheta$ [K]	Knoten- divergenz [%]	k-Wert ohne WB [W/(m ² K)]	k-Wert mit WB [W/(m ² K)]	Δk pro WB [W/K]
4	59'778	3.9×10^{-5}	0.70	0.2739	0.3413	0.038

WB = Wärmebrücke

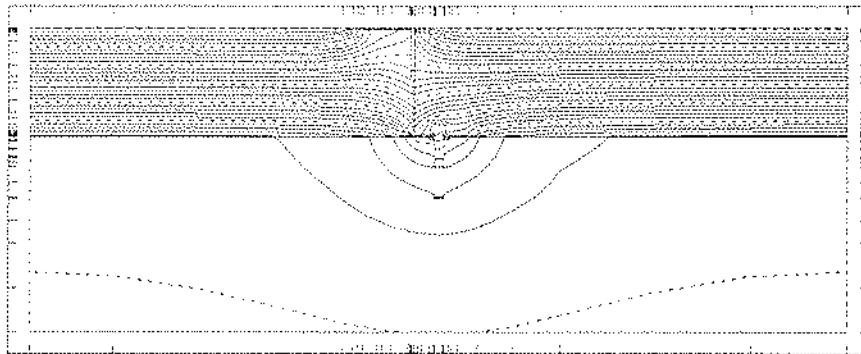


Bild 5.1a Isothermenbild im Querschnitt (Lage) für die Prüfung 4.
Die Aufteilung des Rasters ist auf dem Rahmen ersichtlich.

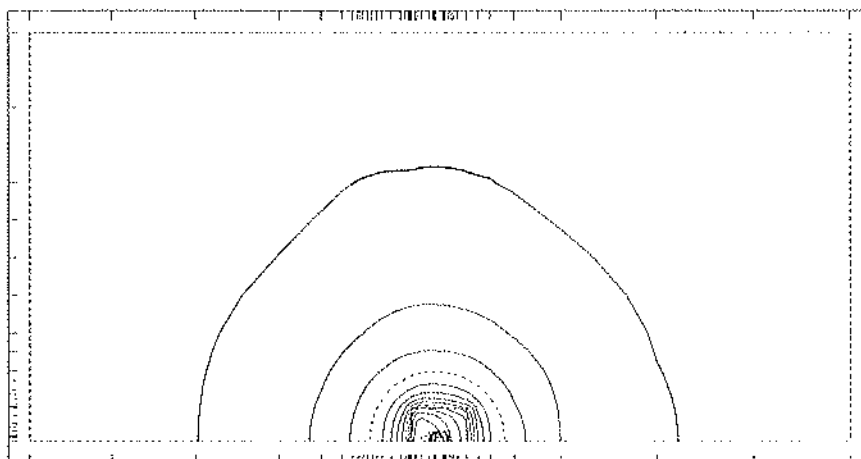


Bild 5.1b Isothermenbild im Querschnitt (Spalte) für die Prüfung 4.

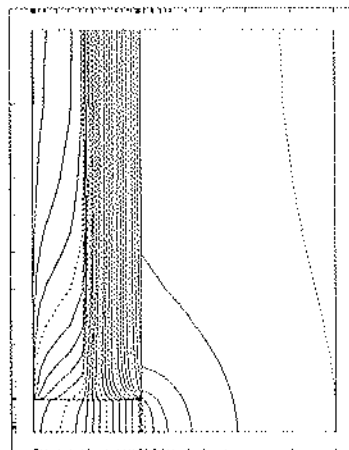


Bild 5.1c Isothermenbild im Querschnitt (Reihe) für die Prüfung 4.

5.2 Berechnung der Prüfung 4b

Wand	180 mm Beton
Dämmstoff	100 mm Glaswolle
Unterkonstruktion	Stahl mit Aluzinc Beschichtung
Verankerung	A4 Edelstahl
therm. Trennelement	ja (zwischen der Wand und der Konsole)

Warmseitig	$\vartheta_{Rw} = 21.56 \text{ °C}$	$\alpha_w = 8.6 \text{ W/(m}^2\text{K)}$
Kaltseitig, Dämmstoff	$\vartheta_{Rk} = -11.34 \text{ °C}$	$\alpha_k = 11.1 \text{ W/(m}^2\text{K)}$
Kaltseitig, Stahlprofil	$\vartheta_{Rk} = -11.34 \text{ °C}$	$\alpha_k = 10.1 \text{ W/(m}^2\text{K)}$

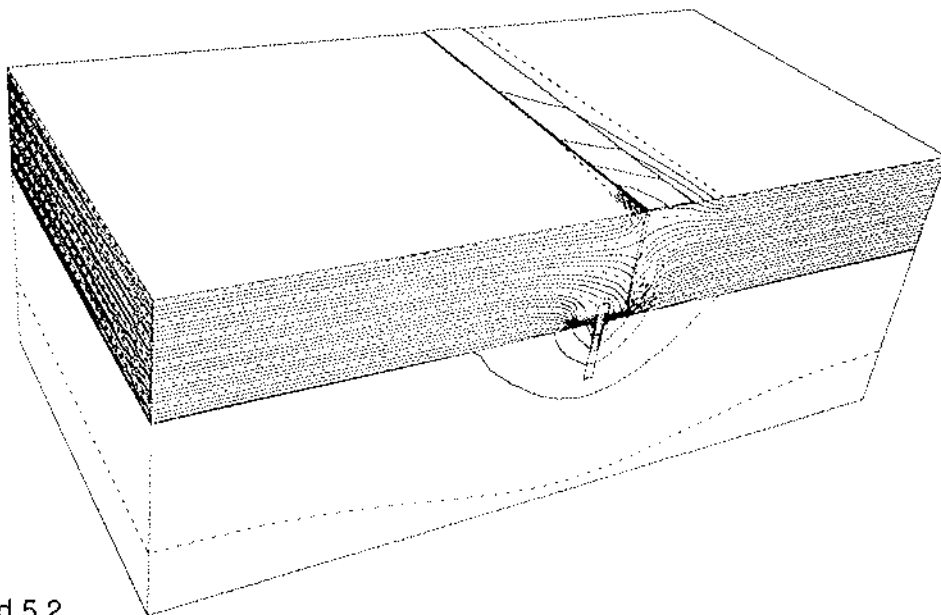


Bild 5.2

Das 3-dimensionale Isothermenbild in der Perspektive für die Prüfung 4b.

Vereinfachung : Berechnung ohne Holzlattung

Isothermenabstand 1 K. Jede fünfte Isotherme ist gestrichelt dargestellt.

Prüfung	Knotenzahl	max. $d\vartheta$ [K]	Knoten- divergenz [%]	k-Wert ohne WB [W/(m ² K)]	k-Wert mit WB [W/(m ² K)]	Δk pro WB [W/K]
4b	63'000	5.1×10^{-5}	0.88	0.2747	0.3277	0.030

WB = Wärmebrücke

5.3 Variante zur Prüfung 4

Wand	180 mm Beton
Dämmstoff	200 mm Glaswolle
Unterkonstruktion	Stahl mit Aluzinc Beschichtung
Verankerung	A4 Edelstahl
therm. Trennelement	nein

Warmseitig	$\vartheta_{Rw} = 21.57 \text{ °C}$	$\alpha_w = 8.6 \text{ W/(m}^2\text{K)}$
Kaltseitig, Dämmstoff	$\vartheta_{Rk} = -11.16 \text{ °C}$	$\alpha_k = 9.9 \text{ W/(m}^2\text{K)}$
Kaltseitig, Stahlprofil	$\vartheta_{Rk} = -11.16 \text{ °C}$	$\alpha_k = 8.9 \text{ W/(m}^2\text{K)}$

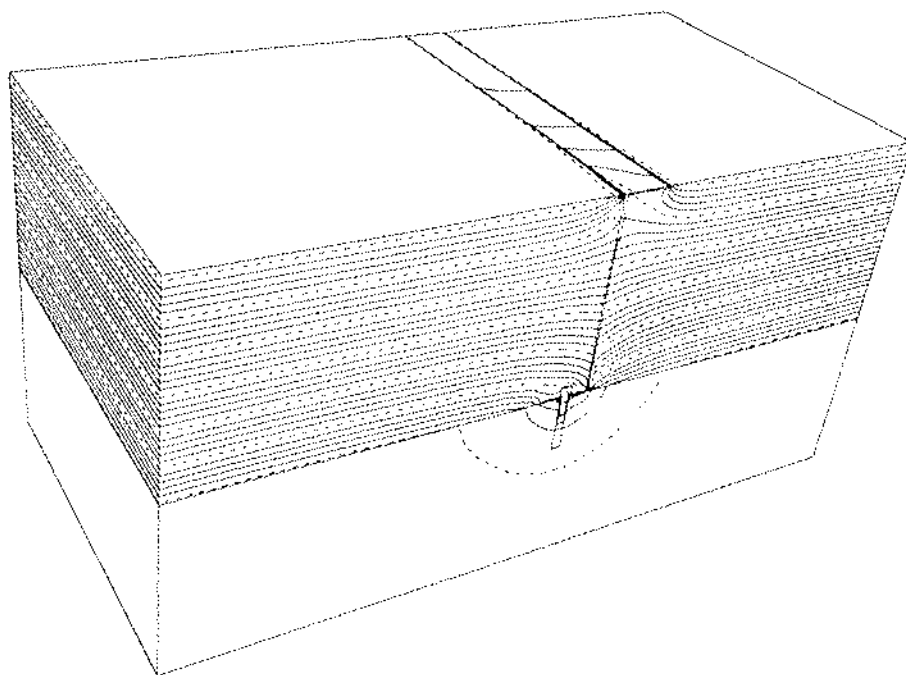


Bild 5.3

Das 3-dimensionale Isothermenbild in der Perspektive für die Variante 4vd.

Vereinfachung : Berechnung ohne Holzlattung

Isothermenabstand 1 K. Jede fünfte Isotherme ist gestrichelt dargestellt.

Variante	Knotenzahl	max. $d\vartheta$ [K]	Knoten- divergenz [%]	k-Wert ohne WB [W/(m ² K)]	k-Wert mit WB [W/(m ² K)]	Δk pro WB [W/K]
4vd	65'610	3.9×10^{-5}	0.73	0.1432	0.1873	0.025

WB = Wärmebrücke

5.4 Variante zur Prüfung 4

Wand	180 mm Backstein			
Dämmstoff	100 mm Glaswolle			
Unterkonstruktion	Stahl mit Aluzinc Beschichtung			
Verankerung	A4 Edelstahl			
therm. Trennelement	nein			
Warmseitig	$\vartheta_{Rw} = 21.57 \text{ °C}$	$\alpha_w = 8.6 \text{ W/(m}^2\text{K)}$		
Kaltseitig, Dämmstoff	$\vartheta_{Rk} = -11.16 \text{ °C}$	$\alpha_k = 9.9 \text{ W/(m}^2\text{K)}$		
Kaltseitig, Stahlprofil	$\vartheta_{Rk} = -11.16 \text{ °C}$	$\alpha_k = 8.9 \text{ W/(m}^2\text{K)}$		

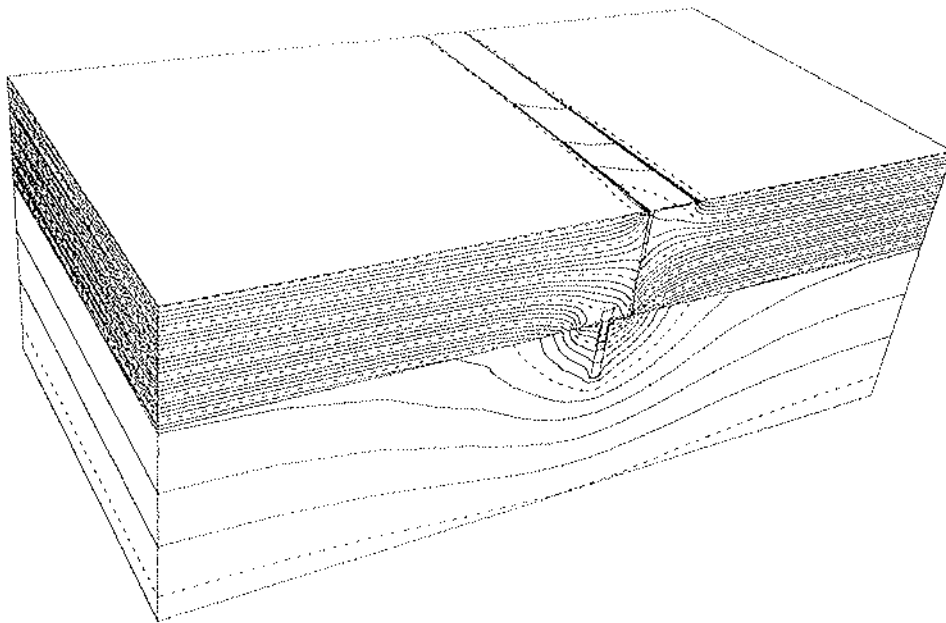


Bild 5.4

Das 3-dimensionale Isothermenbild in der Perspektive für die Variante 4vu.

Vereinfachung : Berechnung ohne Holzlattung

Isothermenabstand 1 K . Jede fünfte Isotherme ist gestrichelt dargestellt.

Variante	Knotenzahl	max. $d\vartheta$ [K]	Knoten- divergenz [%]	k-Wert ohne WB [W/(m ² K)]	k-Wert mit WB [W/(m ² K)]	Δk pro WB [W/K]
4vu	59'778	6.4×10^{-5}	0.83	0.2525	0.2964	0.025

WB = Wärmebrücke

5.5 Berechnung der Prüfung 5

Wand	180 mm Beton
Dämmstoff	100 mm Glaswolle
Unterkonstruktion	Aluminium
Verankerung	A4 Edelstahl
therm.Trennelement	nein

Warmseitig	$\vartheta_{Rw} = 21.56 \text{ °C}$	$\alpha_w = 8.6 \text{ W/(m}^2\text{K)}$
Kaltseitig, Dämmstoff	$\vartheta_{Rk} = -10.99 \text{ °C}$	$\alpha_k = 12.2 \text{ W/(m}^2\text{K)}$
Kaltseitig, Aluprofil	$\vartheta_{Rk} = -10.99 \text{ °C}$	$\alpha_k = 8.8 \text{ W/(m}^2\text{K)}$

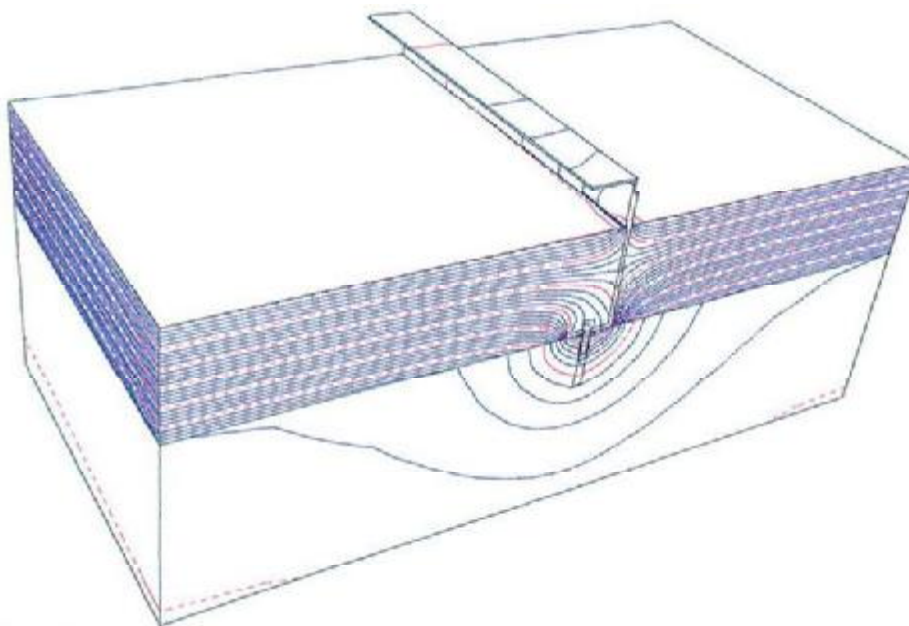


Bild 5.5

Das 3-dimensionale Isothermenbild in der Perspektive für die Prüfung 5. Isothermenabstand 1 K. Jede fünfte Isotherme ist gestrichelt dargestellt.

Prüfung	Knotenzahl	max. $d\vartheta$ [K]	Knoten- divergenz [%]	k-Wert ohne WB [W/(m ² K)]	k-Wert mit WB [W/(m ² K)]	Δk pro WB [W/K]
5	82'998	5.5×10^{-5}	0.78	0.2754	0.4137	0.078

WB = Wärmebrücke

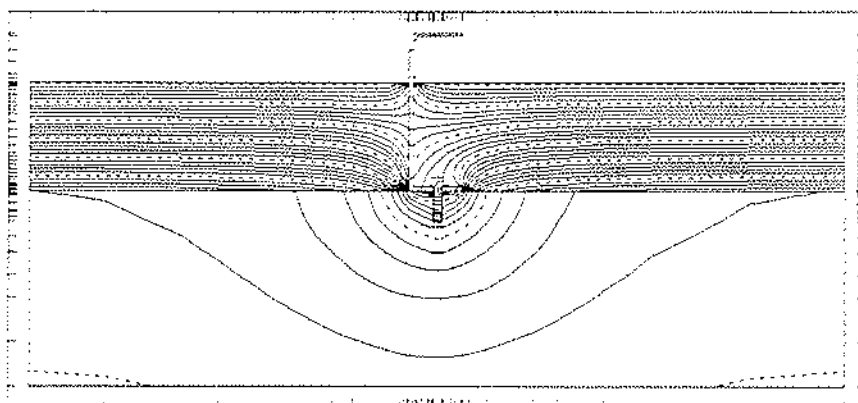


Bild 5.5a Isothermenbild im Querschnitt (Lage) für die Prüfung 5.
Die Aufteilung des Rasters ist auf dem Rahmen angedeutet.

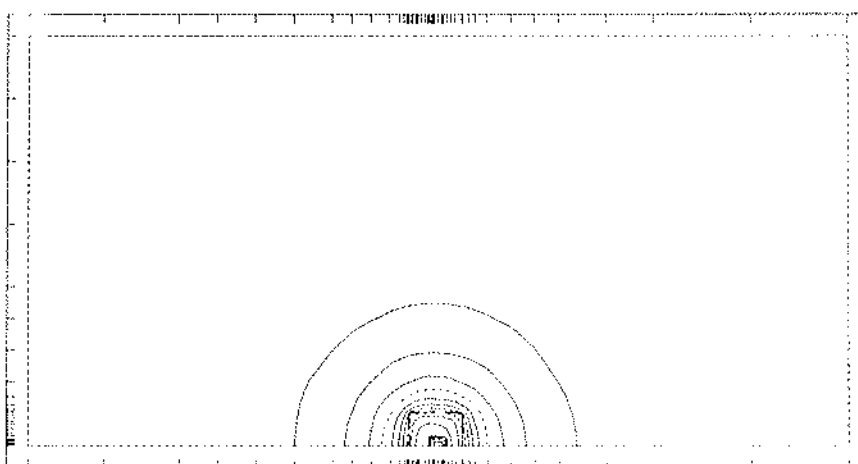


Bild 5.5b Isothermenbild im Querschnitt (Spalte) für die Prüfung 5.

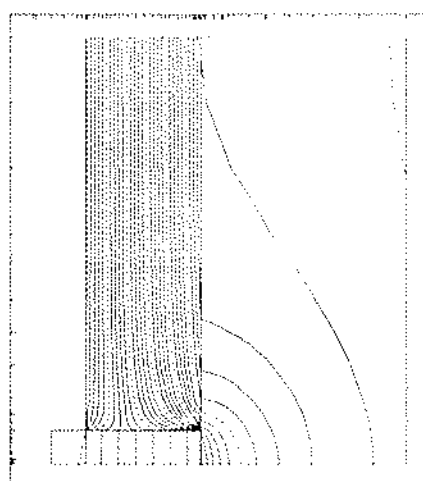


Bild 5.5c Isothermenbild im Querschnitt (Reihe) für die Prüfung 5.

5.6 Berechnung der Prüfung 5a

Wand	180 mm Beton
Dämmstoff	100 mm Glaswolle
Unterkonstruktion	Aluminium
Verankerung	A4 Edelstahl
therm. Trennelement	nein

Warmseitig	$\vartheta_{RW} = 21.54 \text{ °C}$	$\alpha_w = 8.6 \text{ W/(m}^2\text{K)}$
Kaltseitig, Dämmstoff	$\vartheta_{RK} = -11.24 \text{ °C}$	$\alpha_k = 15.0 \text{ W/(m}^2\text{K)}$
Kaltseitig, Aluprofil	$\vartheta_{RK} = -11.24 \text{ °C}$	$\alpha_k = 11.6 \text{ W/(m}^2\text{K)}$

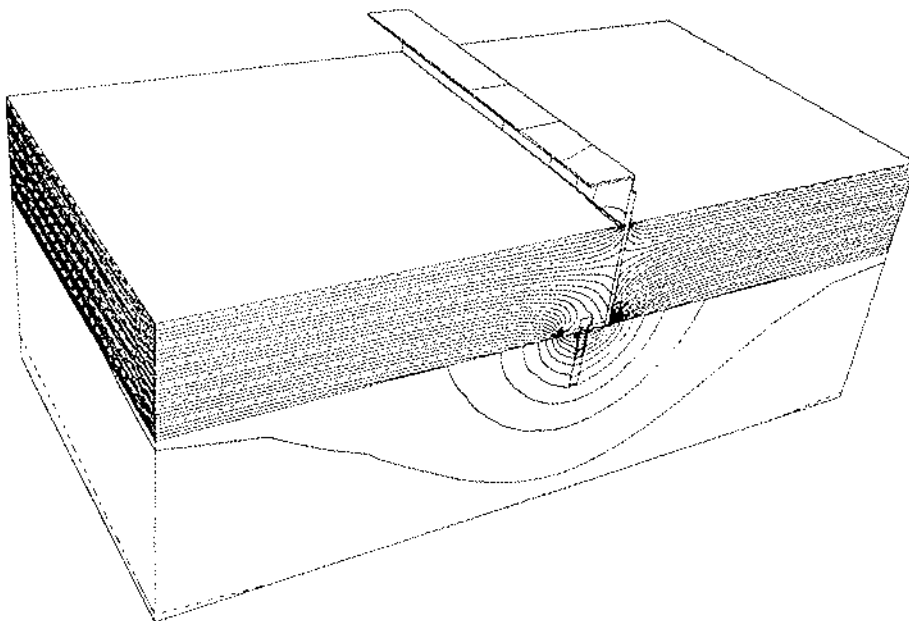


Bild 5.6

Das 3-dimensionale Isothermenbild in der Perspektive für die Prüfung 5a. Isothermenabstand 1 K. Jede fünfte Isotherme ist gestrichelt dargestellt.

Prüfung	Knotenzahl	max. $d\vartheta$ [K]	Knoten- divergenz [%]	k-Wert ohne WB [W/(m ² K)]	k-Wert mit WB [W/(m ² K)]	Δk pro WB [W/K]
5a	82'998	8.6×10^{-5}	0.73	0.2754	0.4182	0.080

WB = Wärmebrücke

5.7 Berechnung der Prüfung 5b

Wand	180 mm Beton				
Dämmstoff	100 mm Glaswolle				
Unterkonstruktion	Aluminium				
Verankerung	A4 Edelstahl				
therm. Trennelement	nein				
Warmseitig	$\vartheta_{RW} = 21.52 \text{ °C}$	$\alpha_w = 8.6$	$= 8.6$	$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$	
Kaltseitig, Dämmstoff	$\vartheta_{RK} = -11.12 \text{ °C}$	$\alpha_k = 16.1$	$= 16.1$	$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$	
Kaltseitig, Aluprofil	$\vartheta_{RK} = -11.12 \text{ °C}$	$\alpha_k = 12.7$	$= 12.7$	$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$	

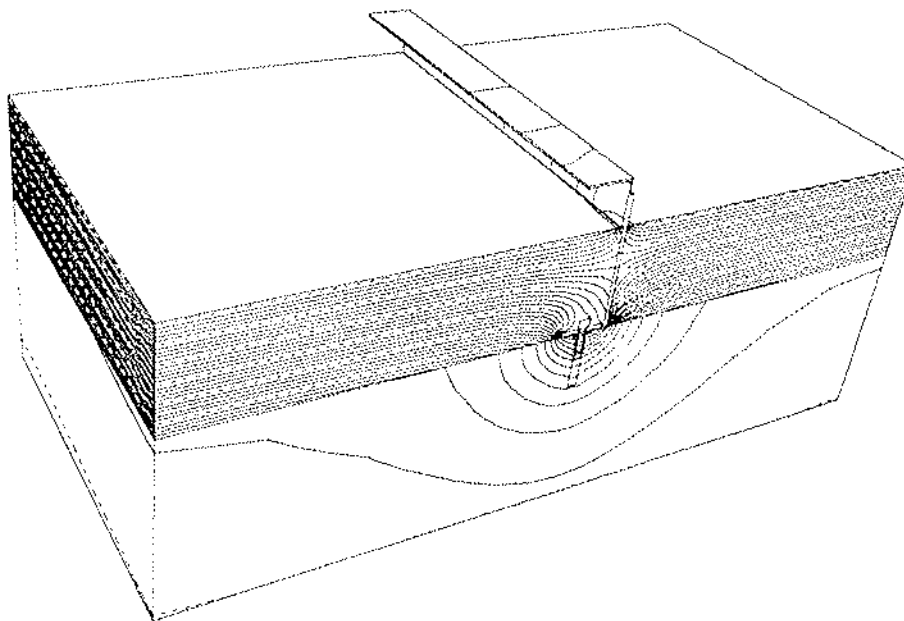


Bild 5.7

Das 3-dimensionale Isothermenbild in der Perspektive für die Prüfung 5b. Isothermenabstand 1 K. Jede fünfte Isotherme ist gestrichelt dargestellt.

Prüfung	Knotenzahl	max. $d\vartheta$ [K]	Knoten- divergenz [%]	k-Wert ohne WB [W/(m ² K)]	k-Wert mit WB [W/(m ² K)]	Δk pro WB [W/K]
5b	82'998	5.6×10^{-5}	0.81	0.2754	0.4196	0.081

WB = Wärmebrücke

5.8 Prüfung : Prüfung 5c

Wand	180 mm Beton		
Dämmstoff	100 mm Glaswolle		
Unterkonstruktion	Aluminium		
Verankerung	A4 Edeistahl		
therm. Trennelement	nein		
Warmseitig	$\vartheta_{Rw} = 21.54 \text{ °C}$	$\alpha_w = 8.6$	W/(m ² K)
Kaltseitig, Dämmstoff	$\vartheta_{Rk} = -11.24 \text{ °C}$	$\alpha_k = 17.1$	W/(m ² K)
Kaltseitig, Aluprofil	$\vartheta_{Rk} = -11.16 \text{ °C}$	$\alpha_k = 13.7$	W/(m ² K)

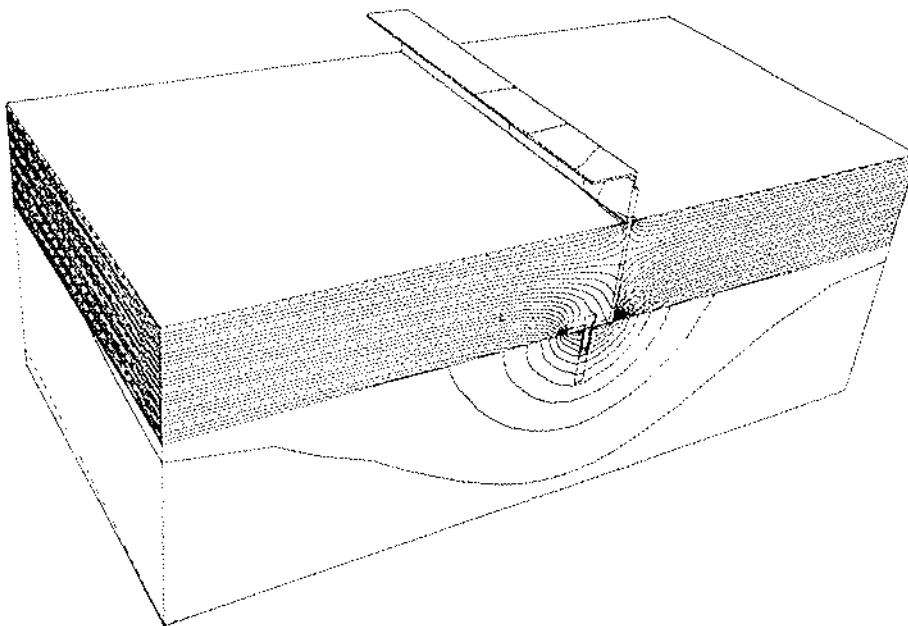


Bild 5.8

Das 3-dimensionale Isothermenbild in der Perspektive für die Prüfung 5c. Isothermenabstand 1 K. Jede fünfte Isotherme ist gestrichelt dargestellt.

Prüfung	Knotenzahl	max. $d\vartheta$ [K]	Knoten- divergenz [%]	k-Wert ohne WB [W/(m ² K)]	k-Wert mit WB [W/(m ² K)]	Δk pro WB [W/K]
5c	82'998	6.6×10^{-5}	0.81	0.2754	0.4207	0.082

WB = Wärmebrücke

5.9 Berechnung der Prüfung 5f

Wand	180 mm Beton		
Dämmstoff	100 mm Glaswolle		
Unterkonstruktion	Aluminium		
Verankerung	A4 Edelstahl		
therm. Trennelement	ja (zwischen der Wand und der Konsole)		
Warmseitig	$\vartheta_{Rw} = 21.54 \text{ °C}$	$\alpha_w = 8.6$	$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$
Kaltseitig, Dämmstoff	$\vartheta_{Rk} = -11.24 \text{ °C}$	$\alpha_k = 10.3$	$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$
Kaltseitig, Profil	$\vartheta_{Rk} = -11.24 \text{ °C}$	$\alpha_k = 6.9$	$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$

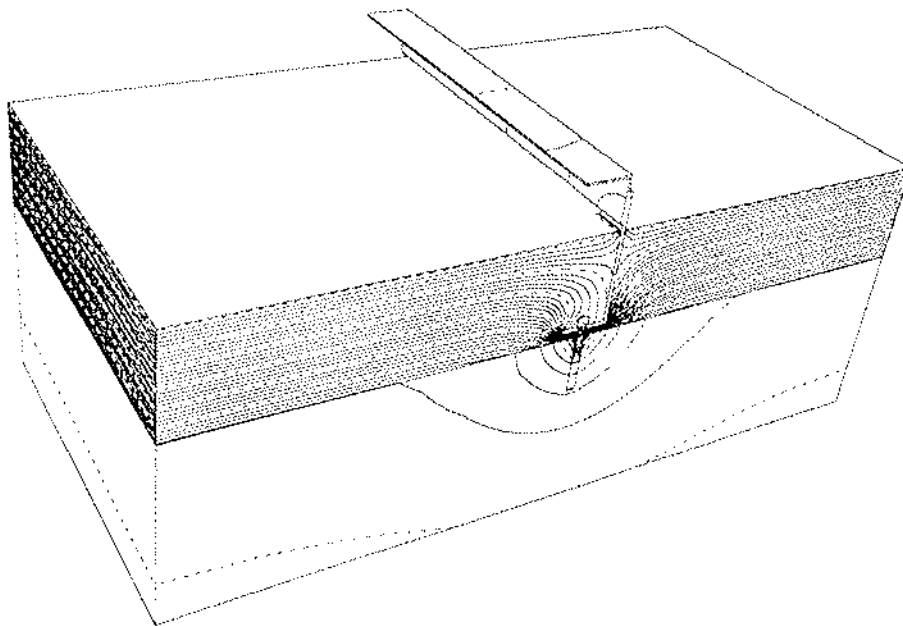


Bild 5.9

Das 3-dimensionale Isothermenbild in der Perspektive für die Prüfung 5f. Isothermenabstand 1 K. Jede fünfte Isotherme ist gestrichelt dargestellt.

Prüfung	Knotenzahl	max. $d\vartheta$ [K]	Knoten- divergenz [%]	k-Wert ohne WB [W/(m ² K)]	k-Wert mit WB [W/(m ² K)]	Δk pro WB [W/K]
5f	78'652	1.8×10^{-5}	0.92	0.2754	0.3429	0.038

WB = Wärmebrücke

5.10 Variante zur Prüfung 5a

Wand	180 mm Beton
Dämmstoff	150 mm Glaswolle
Unterkonstruktion	Aluminium
Verankerung	A4 Edelstahl
therm. Trennelement	nein

Warmseitig	$\vartheta_{Rw} = 21.54 \text{ °C}$	$\alpha_w = 8.6 \text{ W/(m}^2\text{K)}$
Kaltseitig, Dämmstoff	$\vartheta_{Rk} = -11.24 \text{ °C}$	$\alpha_k = 15.0 \text{ W/(m}^2\text{K)}$
Kaltseitig, Aluprofil	$\vartheta_{Rk} = -11.24 \text{ °C}$	$\alpha_k = 11.6 \text{ W/(m}^2\text{K)}$

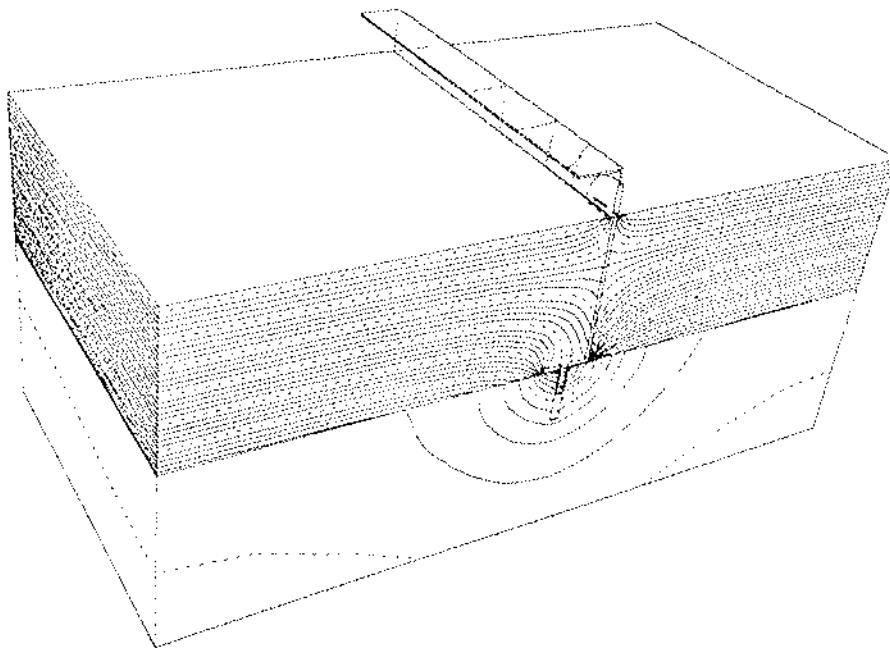


Bild 5.10

Das 3-dimensionale Isothermenbild in der Perspektive für die Variante 5avd. Isothermenabstand 1 K. Jede fünfte Isotherme ist gestrichelt dargestellt.

Variante	Knotenzahl	max. $d\vartheta$ [K]	Knoten- divergenz [%]	k-Wert ohne WB [W/(m ² K)]	k-Wert mit WB [W/(m ² K)]	Δk pro WB [W/K]
5avd	81'461	5.9×10^{-5}	0.66	0.1887	0.3227	0.075

WB = Wärmebrücke

5.11 Variante zur Prüfung 5a

Wand	180 mm Beton
Dämmstoff	200 mm Glaswolle
Unterkonstruktion	Aluminium
Verankerung	A4 Edelstahl
therm. Trennelement	nein

Warmseitig	$\vartheta_{Rw} = 21.54 \text{ °C}$	$\alpha_w = 8.6 \text{ W/(m}^2\text{K)}$
Kaltseitig, Dämmstoff	$\vartheta_{Rk} = -11.24 \text{ °C}$	$\alpha_k = 15.0 \text{ W/(m}^2\text{K)}$
Kaltseitig, Aluprofil	$\vartheta_{Rk} = -11.24 \text{ °C}$	$\alpha_k = 11.6 \text{ W/(m}^2\text{K)}$

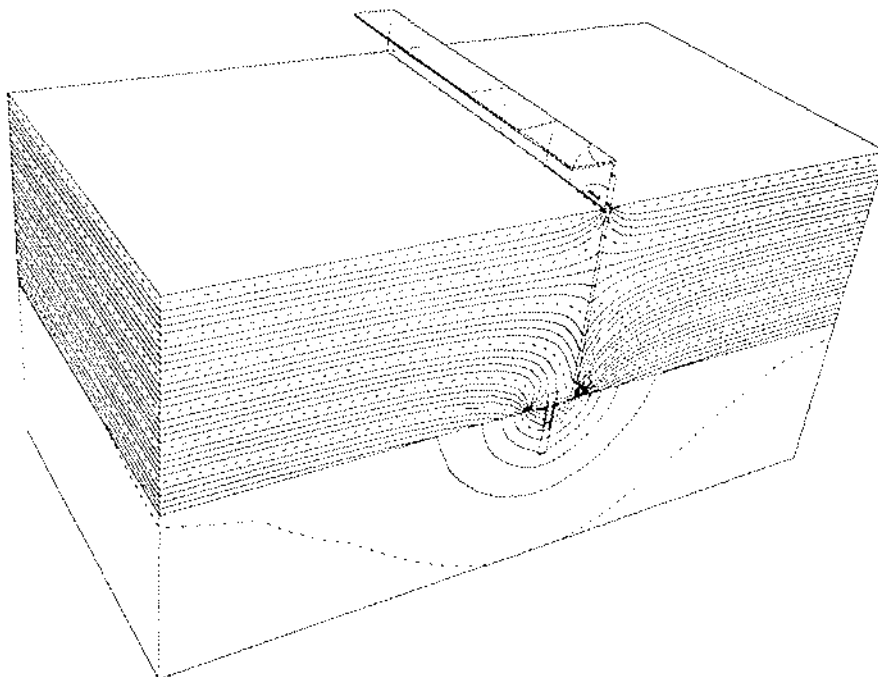


Bild 5.11

Das 3-dimensionale Isothermenbild in der Perspektive für die Prüfung 5avd1. Isothermenabstand 1 K. Jede fünfte Isotherme ist gestrichelt dargestellt.

Prüfung	Knotenzahl	max. $d\vartheta$ [K]	Knoten- divergenz [%]	k-Wert ohne WB [W/(m ² K)]	k-Wert mit WB [W/(m ² K)]	Δk pro WB [W/K]
5avd1	81'461	5.7×10^{-5}	0.78	0.1436	0.2681	0.070

WB = Wärmebrücke

5.12 Variante zur Prüfung 5a

Wand	180 mm Backstein
Dämmstoff	100 mm Glaswolle
Unterkonstruktion	Aluminium
Verankerung	A4 Edelstahl
therm. Trennelement	nein

Warmseitig	$\vartheta_{Rw} = 21.54 \text{ °C}$	$\alpha_w = 8.6 \text{ W/(m}^2\text{K)}$
Kaltseitig, Dämmstoff	$\vartheta_{Rk} = -11.24 \text{ °C}$	$\alpha_k = 15.0 \text{ W/(m}^2\text{K)}$
Kaltseitig, Aluprofil	$\vartheta_{Rk} = -11.24 \text{ °C}$	$\alpha_k = 11.6 \text{ W/(m}^2\text{K)}$

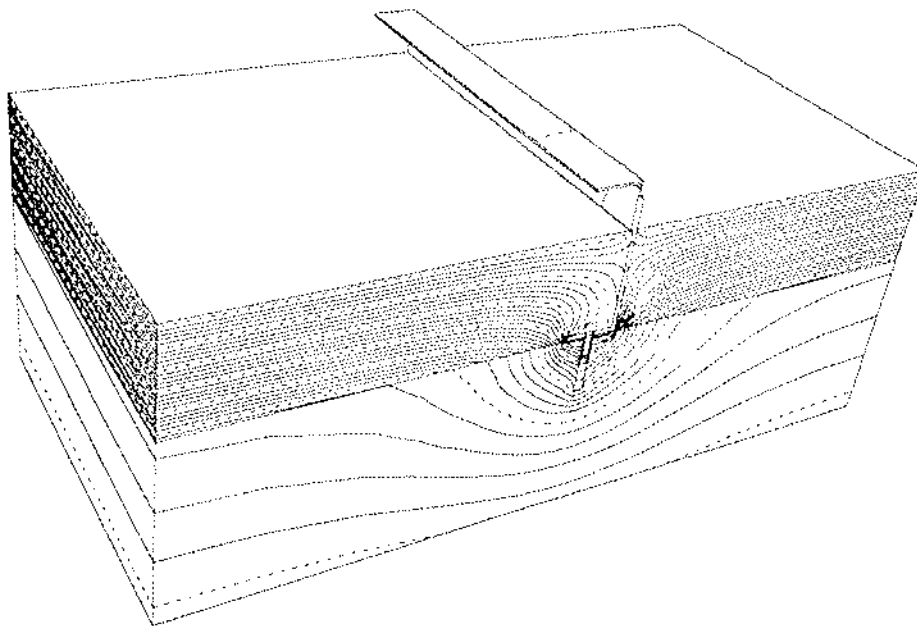


Bild 5.12

Das 3-dimensionale Isothermenbild in der Perspektive für die Variante 5avu. Isothermenabstand 1 K. Jede fünfte Isotherme ist gestrichelt dargestellt.

Variante	Knotenzahl	max. $d\vartheta$ [K]	Knoten- divergenz [%]	k-Wert ohne WB [W/(m ² K)]	k-Wert mit WB [W/(m ² K)]	Δk pro WB [W/K]
5avu	82'998	7.3×10^{-5}	0.80	0.2548	0.3202	0.037

WB = Wärmebrücke

5.13 Variante zur Prüfung 5f

Wand	180 mm Backstein
Dämmstoff	100 mm Glaswolle
Unterkonstruktion	Aluminium
Verankerung	A4 Edelstahl
therm. Trennelement	ja (zwischen der Wand und der Konsole)

Warmseitig	$\vartheta_{RW} = 21.54 \text{ °C}$	$\alpha_w = 8.6 \text{ W/(m}^2\text{K)}$
Kaltseitig, Dämmstoff	$\vartheta_{Rk} = -11.24 \text{ °C}$	$\alpha_k = 10.3 \text{ W/(m}^2\text{K)}$
Kaltseitig, Aluprofil	$\vartheta_{Rk} = -11.24 \text{ °C}$	$\alpha_k = 6.9 \text{ W/(m}^2\text{K)}$

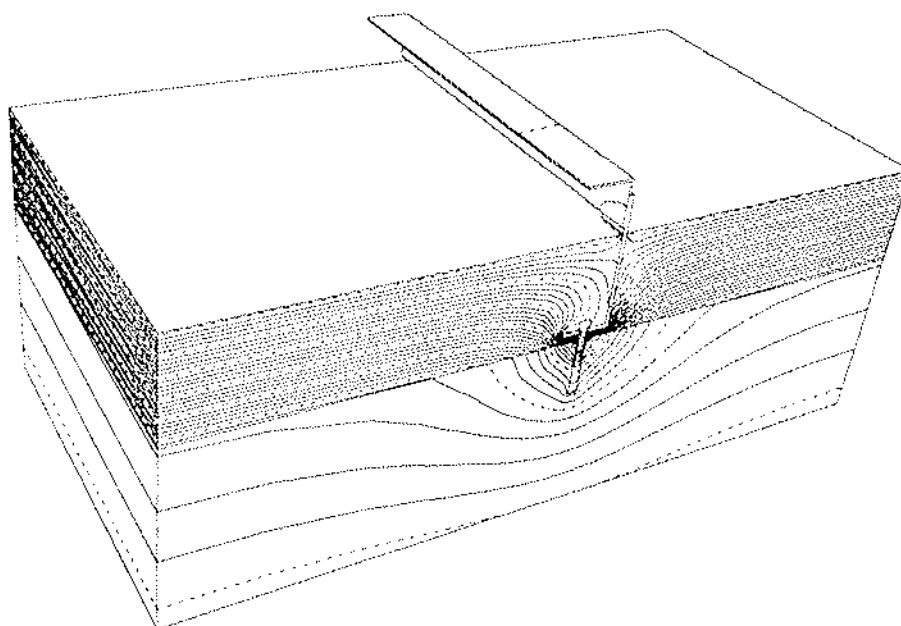


Bild 5.13

Das 3-dimensionale Isothermenbild in der Perspektive für die Variante 5fvu. Isothermenabstand 1 K. Jede fünfte Isotherme ist gestrichelt dargestellt.

Variante	Knotenzahl	max. $d\vartheta$ [K]	Knoten- divergenz [%]	k-Wert ohne WB [W/(m ² K)]	k-Wert mit WB [W/(m ² K)]	Δk pro WB [W/K]
5fvu	81'136	4.9×10^{-5}	0.81	0.2528	0.2955	0.024

WB = Wärmebrücke

6. Zusätzliche Berechnungen

Für die Illustrationen in Teil 3 des Berichtes waren Berechnungen weiterer Variationen notwendig. Diese sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst:

Variation	λ_{Wand} [W/(mK)]	$d_{\text{Dämm.}}$ [mm]	WB	therm. Trennelement	$k_{\text{ohne WB}}$ [W/(m ² K)]	$k^*_{\text{mit WB}}$ [W/(m ² K)]	Δk pro WB [W/K]
4vu1	1.2	100	Stahl	nein	0.2702	0.3322	0.035
4vu2	0.8	100	Stahl	nein	0.2649	0.3202	0.031
4vu3	0.3	100	Stahl	nein	0.2409	0.2769	0.020
4vu4	0.2	100	Stahl	nein	0.2247	0.2524	0.016
5avu1	1.4	100	Alu	nein	0.2732	0.4025	0.073
5avu2	1.0	100	Alu	nein	0.2696	0.3797	0.062
5avu3	0.8	100	Alu	nein	0.2662	0.3641	0.055
5avu4	0.6	100	Alu	nein	0.2610	0.3431	0.046
5avu5	0.35	100	Alu	nein	0.2472	0.3029	0.031
5avu6	0.20	100	Alu	nein	0.2257	0.2598	0.019
5avu7	0.15	100	Alu	nein	0.2113	0.2370	0.014
5avu8	0.10	100	Alu	nein	0.1876	0.2039	0.009
5avd5	1.8	40	Alu	nein	0.6187	0.7559	0.077
5avd2	1.8	50	Alu	nein	0.5129	0.6543	0.080
5avd4	1.8	70	Alu	nein	0.3822	0.5262	0.081
5avd3	1.8	250	Alu	nein	0.1161	0.2316	0.065
4alu	1.8	100	Alu	nein	0.2739	0.3801	0.060
5asta	1.8	100	Stahl	nein	0.2765	0.3659	0.050
5 4AT	Diese Berechnung zeigt, dass die Alu-Konstruktion auch bei einem $\Delta\vartheta$ von nur 10 K die gleichen Wärmeverluste pro K erzeugt, wie bei $\Delta\vartheta = 32.5$ K. (Gegensatz: vgl. Teil 3, Kap. 2.3, Pt. 1)						

* Für alle Berechnungen gilt eine Dichte von 1.7778 Wärmebrücken pro m²

WB = Wärmebrücke

Anhang 1

Theoretischer Hintergrund des CFD-Verfahrens

Die natürliche Konvektion im Spalt kann man mit Hilfe der Grundgleichungen der Kontinuumsmechanik für Newtonsche Fluide beschreiben. Für inkompressible Gase lauten diese folgendermassen :

Die Kontinuitätsgleichung für ein Fluid mit konstanter Dichte:

$$\operatorname{div} \vec{v} = 0 \quad \text{mit} \quad \vec{v} = (u, v, w,) \quad \text{als Geschwindigkeitsvektor}$$

Die Bewegungsgleichung (Navier-Stokes):

$$\rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \rho \vec{v} \operatorname{grad} \vec{v} = - \operatorname{grad} p + \mu \nabla^2 \vec{v} - \rho \beta (\vartheta - \vartheta_m) \vec{g}$$

Die Energieerhaltungsgleichung:

$$\rho c_p \frac{\partial \vartheta}{\partial t} + \rho c_p \vec{v} \operatorname{grad} \vartheta = \lambda \nabla^2 \vartheta$$

Für den stationären 2-dimensionalen Zustand werden diese Gleichungen reduziert zu:

Die Kontinuitätsgleichung:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

Die Bewegungsgleichung:

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right)$$

$$u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + \beta (\vartheta - \vartheta_m) g$$

Die Energieerhaltungsgleichung:

$$u \frac{\partial \vartheta}{\partial x} + w \frac{\partial \vartheta}{\partial z} = a \left(\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial z^2} \right)$$

Turbulente Strömung wird bei der Modellierung als Superposition einer mittleren- und einer schnellen Bewegungen angenommen:

Anhang 1

$$\vec{v} = \bar{\vec{v}} + \vec{v}'$$

Substitution in der Kontinuitätsgleichung und Integration nach der Zeit ergibt:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = 0$$

Die Impulserhaltung in der x-Richtung ergibt :

$$\bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2} \right) - \frac{\partial u'^2}{\partial x} - \frac{\partial (u' w')}{\partial y}$$

Die additiven Ausdrücke werden modelliert um die Turbulenz-Effekte in die Rechnung einzubeziehen. Im Fluent Programm ist dies die k-ε -Modellierung oder RNG-Modellierung.

Anhang 2

Kurzbeschreibung des Rechenprogramms TRISCO

TRISCO ist ein Programm zur Berechnung der 3-dimensionalen stationären Wärmeströmung und Temperaturverteilung mittels einer Energiebilanzmethode. Es wurde von der Firma Physibel in Maldegem Belgien entwickelt. Die jüngste Ausgabe, welche der EMPA zur Verfügung steht, ist die Version 5.0 .

Die Eingabeobjekte müssen mit einem 3-dimensionalen rechtwinkligen Raster diskretisiert werden. Um die Anzahl der zu berechnenden Knoten möglichst klein zu halten, können alle Symmetrien des Objekts ausgenutzt werden, so dass nur ein repräsentativer Ausschnitt des Ganzen berechnet werden muss.

Auf einem PC mit 16 MB RAM, können Systeme mit bis zu 128'000 Knoten, mit 25 MB bis zu 250'000 Knoten berechnet werden.

Die Berechnungen werden mit Hilfe eines iterativen Verfahrens ausgeführt. Bei jedem Iterationsschritt werden für alle Knoten die neuen Temperaturen berechnet.

Die Iteration bricht ab, wenn :

- eine maximale Zahl von Iterationen durchgeführt sind, **oder**
- die Änderung der Temperatur an jedem Knoten für zwei aufeinanderfolgende Iterationsschritte, die Objektdivergenz **und** die Knotendivergenz kleiner sind als die vorgegebenen Toleranzwerte.

Folgende Toleranzwerte sind bei den Berechnungen vorgegeben:

Maximale Zahl der Iterationen	10'000
Änderung der Temperatur an jedem Knoten für zwei aufeinanderfolgende Iterationsschritte	0.0001 K
Maximale Objektdivergenz Ein Mass für die Wärmestrombilanz über das ganze Objekt	0.001% *
Maximale Knotendivergenz Ein Mass für die Wärmestrombilanz an jedem Knoten	1%

* In der europäischen Vornorm prEN 32573-1 wird eine Objektdivergenz von 0.1% gefordert.

Anhang 3**Beispiel eines Satzes von Eingabedaten****(Fall 5, Alukonsole mit therm. Trennelement)**

Programm	TRISCO Version 5.3 (C) Physibel, Belgium - 1996
Benutzeridentifikation	EMPA DUEBENDORF
Eingabedaten	R54F
PROJEKTTITEL	
Projekt	Punktuelle Wärmebrücken Dossier 158 740
Datum	28.Jun.1996
Bearbeiter	K. Ghazi Wakili
Bemerkungen	Simulation der Prüfung Nr. 5 mit therm. Trennelement R52F.DAT Durchgehende Luftschicht 0.2 mm zw. Wand und Konsole

RASTERDATEN

Referenzmaschenbreite [m]	0.0010					
Nummer letzte Reihe	111					
Reihemaschenbreite	20.000	69.740	69.740	34.870	34.870	34.870
	34.870	17.435	17.435	17.435	8.717	4.359
	2.179	1.090	0.545	0.545	2.000	2.000
	2.200	0.691	0.691	1.381	2.763	2.763
	2.763	1.625	1.625	0.820	0.500	0.380
	0.500	0.200	3.350	3.350	0.200	0.500
	0.380	0.500	0.820	3.250	3.312	3.312
	6.625	0.800	5.500	5.500	11.000	22.000
	22.000	22.000	44.000	44.000	88.000	88.000
	20.000					
Total	790.000					
Total minus Ränder	750.000					
Nummer letzte Spalte	113					
Spaltemaschenbreite	20.000	41.000	41.000	20.500	20.500	0.800
	14.000	14.000	4.350	4.350	3.800	3.800
	1.100	6.500	1.100	1.600	1.600	2.100
	2.100	2.100	0.050	0.050	0.325	0.325
	0.650	1.300	1.300	0.750	0.750	1.500
	3.000	3.000	3.365	3.365	3.365	3.365
	6.729	6.729	6.729	6.729	6.729	6.729
	6.729	6.729	6.729	3.365	1.682	0.841
	0.841	6.300	7.500	7.500	15.000	13.200
	2.200	20.000				
Total	371.750					
Total minus Ränder	331.750					

Anhang 3

Nummer letzte Lage	61						
Lagemaschenbreite	20.000	57.500	57.500	57.500	57.500	28.750	
	28.750	28.750	14.375	7.188	3.594	1.797	
	1.797	2.650	2.650	2.650	2.650	2.600	
	2.600	2.600	2.600	3.250	0.820	0.500	
	0.380	0.500	0.200	1.675	1.675	20.000	
Total	415.000						
Total minus Ränder	375.000						

MATERIALGEOMETRIE

Materialname	Muster Nr.	Lambda [W/mK]	Raster-Koordinaten					
			R1	S1	L1	R2	S2	L2
1 Beton	8	1.800	3	3	3	109	35	59
2 Dämmstoff	15	0.030	3	35	3	109	99	59
3 therm. Trennelement	46	0.090	37	35	27	87	41	59
4 Aluwinkel	4	170.000	37	101	3	39	111	59
5 Aluwinkel	4	170.000	37	109	3	89	111	59
6 Alukonsole	12	170.000	33	45	27	37	107	59
7 Alukonsole	12	170.000	37	41	27	87	55	59
8 Luft Kons-Wand	16	0.025	37	41	27	87	45	59
9 Luft Kons-Wand	16	0.025	33	41	27	37	45	59
10 Luft 3	16	0.051	57	21	47	77	31	59
11 Stahldübel	5	14.500	59	13	49	75	31	59
12 Luft im Dübel	16	0.050	63	17	53	71	25	59
13 Luft Dübel-Wand	16	0.028	59	11	49	75	13	59
14 Schraubenkopf	3	15.000	55	55	45	79	65	59
15 Luft Gewinde	16	0.039	63	27	53	71	29	59
16 Schraube	3	15.000	65	25	55	69	29	59
17 Schraube	3	15.000	63	25	53	71	27	59
18 Luft 3	16	0.051	61	35	51	73	55	59
19 Luft 3	16	0.051	51	31	43	81	35	59
20 Schraube	3	15.000	63	29	53	71	55	59

OBERFLÄCHERANDBEDINGUNGEN

Randbedingung	Temp [°C]	α [W/m ² K]	Wärmefluss [W/m ²]	Rasterkoordinaten					
				R1	S1	L1	R2	S2	L2
1 Warmseite	+21.54	8.4	0	3	1	3	109	3	59
2 Kaltseite	-11.24	10.3	0	3	99	3	109	101	59
3 Kaltseite 2	-11.24	6.9	0	3	101	3	109	113	59



Prüfbericht Nr. 158 740

Teil 3

Ergebnisse im Vergleich und Illustrationen

Christoph Tanner
Karim Ghazi Wakili

Inhalt Teil 3	Seite
1. Vergleich Messungen - Berechnungen	88+89
2. Faktoren der Wärmebrückenwirkung	89+90
3. Illustrationen der Untersuchungsergebnisse	91+92
4. Erfahrungswerte für weitere Untersuchungen	93+94

Auftrag vom: 12.07.1995
Ausführung der Untersuchungen: bis August 1996
Seiten Teil 3: 87 - 94

1. Vergleich Messungen - Berechnungen

Detaillierte Daten sind im Bericht Teil 1 (Messungen) und Teil 2 (Berechnungen) zu finden.

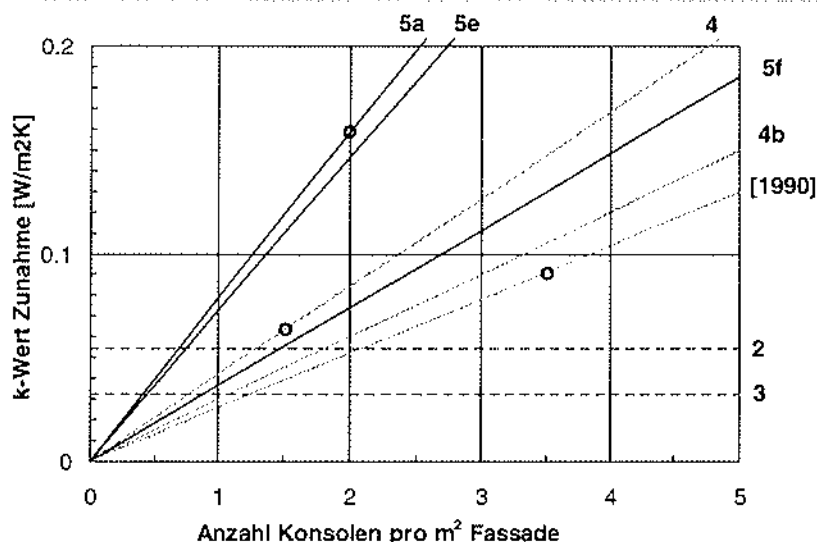
1.1 Wärmebrückenwirkung: Vergleich der untersuchten Systeme

Prüf. Nr.	Sämtliche Werte beziehen sich auf die Prüfwand mit 18 cm Beton und 100 mm Glaswolle als Wärmedämmung !	Messungen Zusatzverlust	Berechnungen Zusatzverlust
1	1. Nullmessung	0	0
2	Holzplatten einlagig (Lattenabst. a = 60 cm)	0.055 [W/m ² K]	keine Berechnung
3	Holzplatten gekreuzt (a = 60 cm)	0.033 [W/m ² K]	keine Berechnung
4	Stahlkonsolen	0.042 [W/K]	0.038 [W/K]
4b	Stahlkons. mit therm. Trennelement warms	0.030 [W/K]	0.030 [W/K]
5a	Alukonsolen	0.079 [W/K]	0.080 [W/K]
5e	Alukons. mit therm. Trennelement kalts.	0.073 [W/K]	keine Berechnung
5f	Alukons. mit therm. Trennelement warms.	0.037 [W/K]	0.038 [W/K]
[1990]	A4- Stahlanker für Natursteinfassade	0.026 [W/K]	-

Bei den Messresultaten ist eine Umrechnung auf eine kaltseitige Luftgeschwindigkeit von 0.35 m/s berücksichtigt (vgl. Bericht Teil 1, Kap. 5.6.3).

Die Berechnungen basieren auf den Original-Randbedingungen der Messung. Anstelle der Luftgeschwindigkeiten (v_{LK} bei den Messungen = ca. 0.9 m/s) wird jedoch der α -Wert festgesetzt.

1.2 Grafische Darstellung der Messergebnisse



Diese Kennlinien gelten nur für die geprüften Systeme !

Sie sind linear, weil sich die Wärmebrücken dieser Konstruktionen im praktischen Bereich nicht gegenseitig beeinflussen.

(Konstr. 4 ist nur bedingt linear, da sie aus einer linearen- und einer punktuellen Komponente besteht).

● = Konstruktionsgerechte Werte mit entspr. Anzahl Konsolen/m²

Grafik 1

1.3 Vergleich der unterschiedlichen Luftgeschwindigkeiten am Alu System (Fall 5)

Prüf. Nr.	Sämtliche Werte beziehen sich auf die Prüfwand mit 18 cm Beton und 100 mm Glaswolle als Wärmedämmung !	Messungen Zusatzverlust	Berechnungen Zusatzverlust
5	Alukonsolen (v_{LK} 0.5 m/s)	0.075 [W/K]	0.078 [W/K]
5a	Alukonsolen (v_{LK} 0.9 m/s)	0.079 [W/K]	0.080 [W/K]
5b	Alukonsolen (v_{LK} 1.5 m/s)	0.082 [W/K]	0.081 [W/K]
5c	Alukonsolen (v_{LK} 2.0 m/s), mit IR	0.086 [W/K]	0.082 [W/K]

Die in den Berechnungen angenommenen Randbedingungen (α - Werte) simulieren die bei der Prüfung vorgegebenen Luftgeschwindigkeiten noch zu wenig präzise.

Grafik zu diesen Messwerten siehe Bericht Teil 1, Kap. 5.6.3

2. Faktoren der Wärmebrückenwirkung

2.1 Massgebende Faktoren für die geprüften Metallsysteme

Verschiedene Faktoren beeinflussen die Wärmebrückenwirkung mehr oder weniger stark. Die folgende Zusammenstellung zeigt, welche Auswirkung erwartet werden kann, wenn einer dieser Faktoren verändert wird. Die Tabelle gilt jedoch nur für die Konstruktionen der Prüfungen 4 und 5. Sie basiert auf den gemachten Untersuchungen und ist subjektiv gewichtet. Eine allgemeingültige prozentuale Angabe ist nicht möglich, da jedes System eine eigene Geometrie und eine spezielle Kombination von Materialien aufweist, die stark unterschiedliche Auswirkungen auf das Wärmedurchgangsverhalten der einzelnen Faktoren erzeugen können!

Hinweise zur Auswirkung der Verarbeitungsqualität siehe Bericht Teil 1 Kap. 5.9

Bauteil	Veränderung	Auswirkung auf die WB *)
Untergrund / Tragwerk	λ - Wert, Dicke	mässig bis gross
Verankerung (Dübel, Schrauben)	Art, Dimension	klein
Konsole Material Querschnitt	Art, λ - Wert Fläche / Umfang	mässig bis gross klein bis mässig
ohne therm. Trennelement	therm. Trennelement kaltseit. therm. Trennelement warm.	klein mässig bis gross
Wärmedämmung	λ - Wert, Dicke	klein
Metalprofil im Wärmedämmstoff im Hinterlüftungsspalt	das Profil wird weggelassen das Profil wird weggelassen	gross gross
Bekleidung	Art, Dicke, Fugen etc. Metall- Bekleidung	sehr klein ? (nicht untersucht)

*) Die Auswirkung der Wärmebrücke ist relativ (im Bezug zur Situation ohne Veränderung) zu sehen.

2.2 Grundsätzliche Erkenntnisse zu punktuellen Wärmebrücken

Der Wärmefluss in Unterkonstruktionen von hinterlüfteten Fassaden ist sehr komplex. In diesem Projekt konnte die EMPA zum ersten Mal in grösserem Umfang 3-dimensionale Wärmebrückenprobleme analysieren. Aus dem Vergleich von Messungen und Berechnungen ergaben sich für uns immer wieder neue, interessante Erkenntnisse über das Verhalten des Wärmestroms bei speziellen Bedingungen. Neben den im Bericht aufgezeigten Werten berechneten wir viele weitere Fälle, bei denen die Resultate von dem abwichen, was wir aufgrund der bisherigen Erkenntnisse erwartet hätten. Es kann deshalb davon ausgegangen werden, dass bei der Wärmebrückenwirkung auch weitere, uns bisher (noch) nicht bekannte Einflüsse eine Rolle spielen können. Mit jeder Messung oder Berechnung erhalten wir jedoch zusätzliche Erfahrungswerte, die für eine exakte Beurteilung von komplizierten Wärmebrücken von Vorteil sind.

2.3 Wärmebrücken- Grundsätze (abgeleitet aus den Untersuchungen)

1. Je mehr sich bei einer Konstruktion die Wärmebrücken (WB) gegenseitig beeinflussen (d. h. je näher die einzelnen Konsolen beisammen sind), desto stärker sinkt der absolute Wärmeverlust jeder einzelnen WB.
2. Die *Wärmestromdichte* (W/mm^2) in einer WB (z.B. im Querschnitt einer Konsole), nimmt bei gleichbleibenden Randbedingungen mit zunehmender Querschnittsfläche ab. Die Stärke der Abnahme hängt von der Geometrie des Querschnittes (Fläche und Umfang) und vom λ - Wert des Materials ab.

Beispiel: Konstruktion mit 18 cm Beton, 100 mm Wärmedämmung und einer Alukonsole

Querschnitt der Alukonsole	Wärmestromdichte	Wärmeverlust der Konsole	Querschnitt der Alukonsole	Wärmestromdichte	Wärmeverlust der Konsole
4 x 4 mm	100 %	100 % (0.0022 W/K)	16 x 1 mm	100 %	100 % (0.0027 W/K)
5.6 x 5.7 mm	65 %	130 %	16 x 2 mm	60 %	120 %
8 x 8 mm	43 %	171 %	16 x 4 mm	35 %	140 %

3. Wird der λ - Wert eines WB- Materials reduziert (z.B. mit Stahl statt Aluminium), so verkleinert sich auch der absolute Wärmeverlust der WB. Eine solche Änderung ist jedoch nicht rein proportional, sondern Geometrieabhängig.

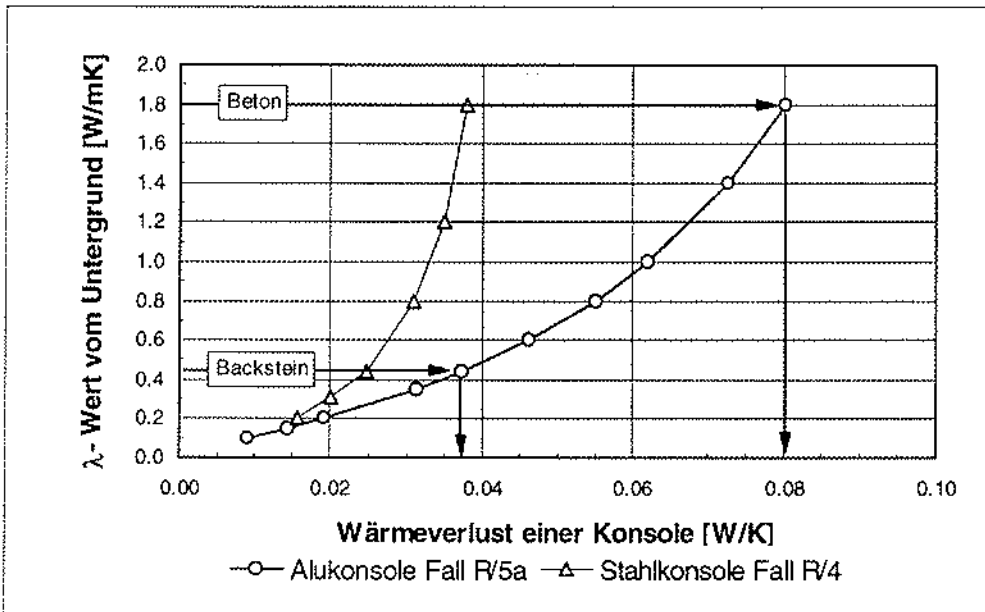
Beispiel: siehe Kap. 3.3, Grafik 5: Die Zu- resp. Abnahme verläuft nicht parallel.

4. Der λ - Wert des Tragwerks kann die Wärmebrückenwirkung stark beeinflussen (vgl. Kap. 3.1, Grafik 2). Wird die Konstruktion des Tragwerks verändert und zwar so, dass der gleiche Widerstand erhalten bleibt (z.B. Beton und Dämmschicht statt Backstein) so verändert sich die Wärmebrückenwirkung trotzdem.

3. Illustrationen der Untersuchungsergebnisse

Die Kennlinien in den folgenden grafischen Darstellungen beziehen sich jeweils *nur auf das angegebene System*. Andere Systeme oder nur schon zusätzliche kleine Änderungen bei den Eingabeparametern (Geometrie, Materialwerte) ergeben bereits andere Kennlinien!

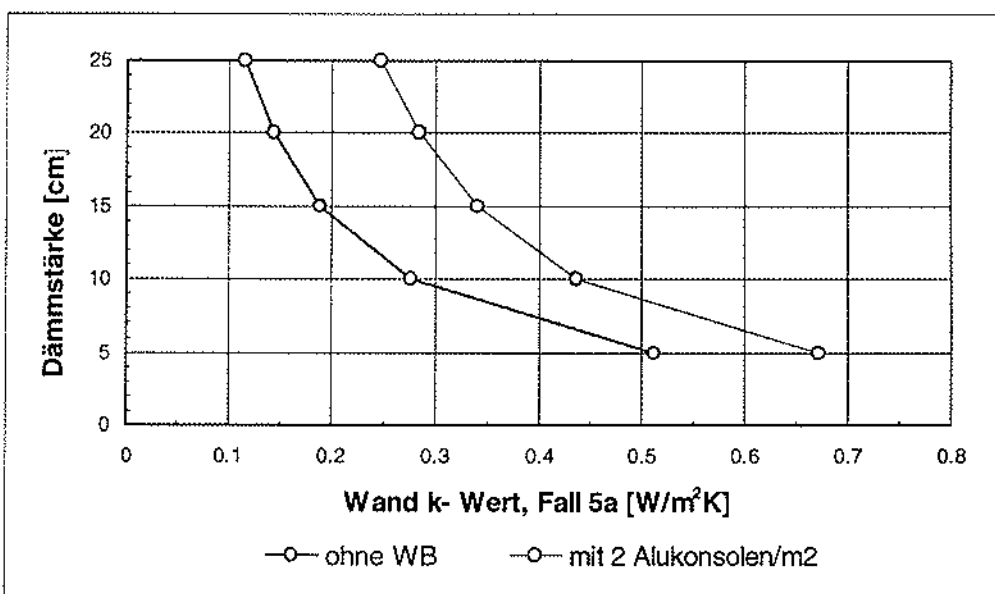
3.1 Wärmebrückenwirkung in Abhängigkeit vom Untergrund (Tragwerk)



Grafik 2

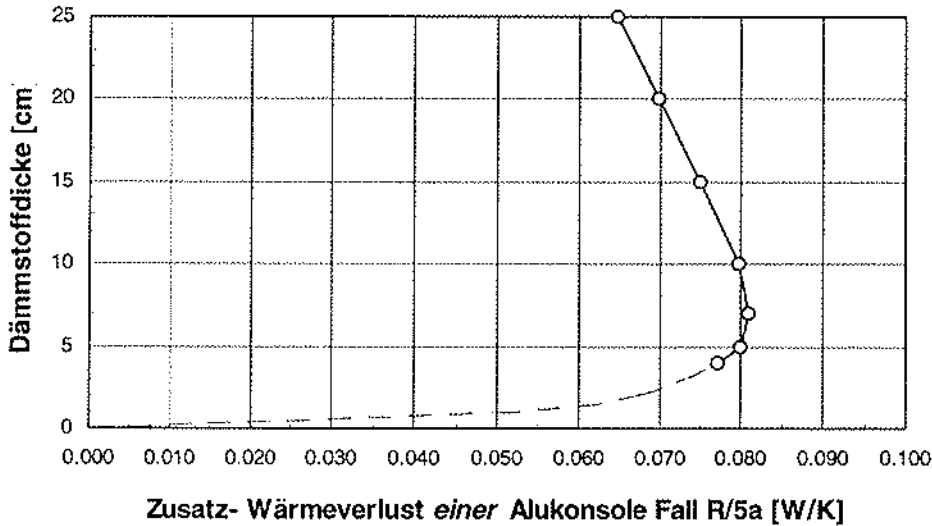
3.2 Wärmebrückenwirkung in Abhängigkeit von der Dämmstoffdicke

Die Konsolen werden der Dämmstoffdicke entsprechend verkürzt oder verlängert. Mit zunehmender Dämmdicke steigt der prozentuale Anteil der Wärmebrücke am Gesamtverlust.



Grafik 3

Die Konsolen werden der Dämmstoffdicke entsprechend verkürzt oder verlängert.
 Mit zunehmender Dämmdicke sinkt der absolute Verlust der Wärmebrücke nur wenig.



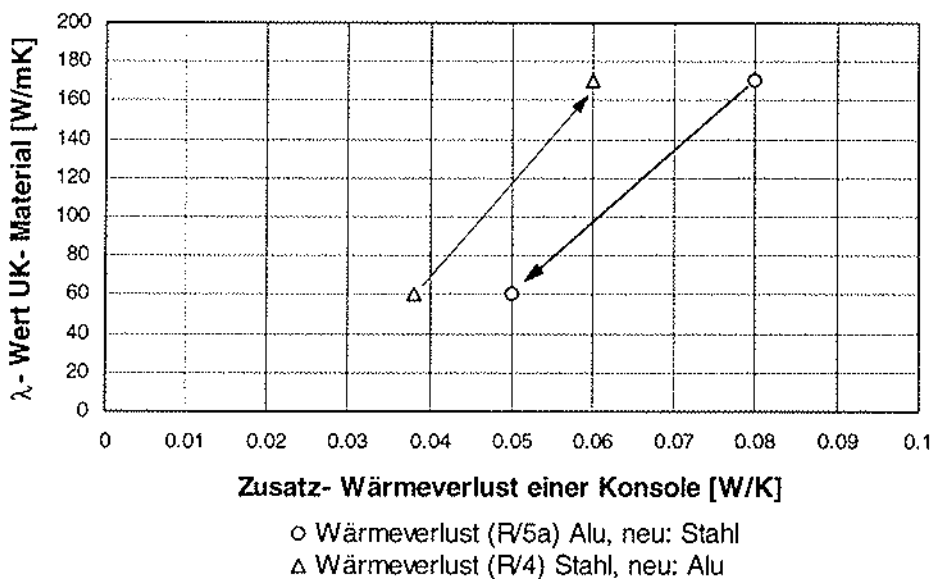
Eine Grafik mit Dickenabhängigkeit ist nur bedingt sinnvoll, da in der Praxis mit zunehmender Auskragung aus statischen Gründen der Querschnitt angepasst werden müsste.

Grafik 4

3.3 Wärmebrückenwirkung von verschiedenen Unterkonstruktionsmaterialien

Grafik 5 zeigt die unterschiedliche Wärmebrückenwirkung, wenn im Fall 4 - ohne Veränderung der Dimensionen - Aluminium statt Stahl eingesetzt wird.

Die "umgekehrte" Berechnung zeigt den Fall 5, wo Stahl statt Aluminium eingesetzt wird.



Grafik 5

4. Erfahrungswerte für weitere Untersuchungen

4.1 Einige Erfahrungswerte aus den Messungen

- Für Wärmebrücken- Messungen ist eine *kallibrierte* k- Wert Kammer speziell gut geeignet, da ein grosser Prüfkörper (bei der EMPA 3 m²) mit mehreren WB gemessen werden kann.
- Eine exakte Nullmessung und genügend lange, stationäre Zustände für die Messung sind notwendig, da die Resultate z.T. aus sehr kleinen Differenzen gebildet werden.
- Eine Messung erfordert eine sehr gute Verarbeitungsqualität des Prüfkörpers. Nur so sind klare, nachvollziehbare Resultate erhältlich. (Ausschluss von zufälligen Fehlern)
- Vor jeder Messung ist abzuklären, ob mit den vorgesehenen Randbedingungen ($\Delta\vartheta$) keine gegenseitige Beeinflussung der Wärmebrücken stattfinden kann. (Es wäre jedoch für spezielle Systeme auch denkbar, bewusst solche Beeinflussungen mit einzubeziehen.)

4.2 Einige Erfahrungswerte aus den Berechnungen

- Die heikelsten Stellen für die Berechnungen sind da, wo Materialien mit extrem unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten aufeinanderstossen (Dämmstoff / Metall). Sie benötigen eine möglichst feine Auflösung (grosse Knotenzahl), was aber eine lange Rechenzeit ergibt.
- Bei der Wahl der Eingabedetails sollten die Symmetrien der Konstruktion beachtet werden, damit die grösst mögliche Zahl von Unterteilungen, an einem möglichst kleinen Detail konzentriert werden können.
- Der Flächenausschnitt muss so gross gewählt werden, dass die WB- Auswirkungen nicht bis an den Rand gelangen. Damit sind, ausser bei den Symmetrieachsen, adiabatische Randbedingungen gerechtfertigt.
- Rechen- bzw. Messresultate von Konstruktionen bei denen sich die Wärmebrücken gegenseitig beeinflussen (grosse Anzahl WB oder grosses $\Delta\vartheta$), dürfen weder auf andere Geometrien noch auf andere $\Delta\vartheta$ linear extrapoliert werden (vgl. Kap. 2.3, Pt.1).
- Im Untergrund (Tragwerk) verankerte Schrauben- und Dübelteile können, sofern sie nicht Hauptverursacher des Wärmeverlustes sind, vereinfacht eingegeben werden.

4.3 Thermische Trennelemente

Die in den Untersuchungen verwendeten thermischen Trennelemente dienen ausschliesslich der thermischen Trennung von Konsolen und Tragwerk. Beim Einsatz in den beiden Unterkonstruktionssystemen aus Metall (Prüf. 4b + 5f) reduzierten sie den Wärmefluss beträchtlich und sind daher bauphysikalisch sinnvoll.

Solche Elemente (z.B. aus Kunststoff oder Holzwerkstoffen bestehend) sind vor allem dann wirksam, wenn sie einen möglichst grossen thermischen Widerstand ($\frac{d}{\lambda}$) aufweisen.

Wie weit solche Elemente die statische Sicherheit und die Gebrauchstauglichkeit für die geplante Nutzungsdauer einer Fassade erfüllen, war nicht Gegenstand dieser Untersuchungen und sollte für den Einsatz in der Praxis abgeklärt werden.