



Energie im Bauwesen: Bautechnik

von Marco Ragonesi, dipl. Arch. HTL, Luzern

L'énergie dans le bâtiment: technique de la construction

par Marco Ragonesi, arch. dipl. ETS, Lucerne

Kapitel 2

Energie und Ökologie

Bauen bedeutet in jedem Fall einen wesentlichen Eingriff in die Natur und damit zwangsläufig auch eine Beeinträchtigung der Umwelt. Wir können beim Bauen dazu beitragen, dass die Umwelt möglichst wenig beeinträchtigt wird, und uns ökologisch günstig verhalten, indem wir

- so bauen, dass der jährliche Energieverbrauch zum Betrieb des Gebäudes möglichst gering ist
- Heiz- bzw. Energiesysteme wählen, die einen möglichst grossen Anteil erneuerbarer Energie (Umweltwärme) nutzen
- Baukonstruktionen mit möglichst geringem, nicht erneuerbarem Primärenergieinhalt (graue Energie) wählen

Die gewählte Bauweise hat sowohl Einfluss auf den jährlich anfallenden Betriebsaufwand (Nebenkosten), mit sehr grossen Unterschieden betreffend den Heizenergieverbrauch, als auch auf den einmaligen Primärenergie-Input zur Herstellung von Baustoffen und zur Erstellung der Bauteile bzw. des ganzen Gebäudes.

Bei der Wahl bzw. wärmetechnischen Optimierung von Bauteilen ist darauf zu achten, dass ein verbesserter Wärmeschutz durch dickere Wärmedämmschichten nicht zu einem Primärenergie-Input führt, der grösser wird als die über die Nutzungszeit einzusparende Betriebsenergie durch verminderte Transmissionswärmeverluste. Bei einer Bauteiloptimierung ist auch zu berücksichtigen, dass die Umweltbeeinträchtigung, z.B. durch die den Treibhauseffekt verursachenden Gase (CO₂eq), minimiert wird; eine nächstdickere Wärmedämmschicht soll nicht zu einem Ansteigen der Umweltbelastung führen.

Chapitre 2

Energie et écologie

Construire signifie systématiquement opérer une profonde intervention dans la nature et donc obligatoirement modifier l'environnement. En construisant, nous pouvons contribuer à respecter le mieux possible cet environnement à condition d'observer les dispositions suivantes:

- Construire de telle sorte que la consommation annuelle d'énergie pour l'exploitation du bâtiment soit aussi faible que possible
- Opter pour des systèmes de chauffage et des systèmes énergétiques qui utilisent une part aussi grande que possible d'énergie renouvelable (chaleur environnementale)
- Opter pour des structures architecturales qui incluent la plus faible part possible d'énergie primaire non renouvelable (énergie grise)

La méthode de construction choisie a une influence aussi bien sur les dépenses annuelles d'exploitation (frais accessoires) avec d'importantes différences concernant la consommation d'énergie de chauffage que sur l'input unique d'énergie primaire pour la fabrication des matériaux ainsi que la réalisation des parties de construction et de l'ensemble du bâtiment.

Lors de la sélection ou de l'optimisation technique d'éléments de construction, on veillera à ce que l'amélioration de l'isolation thermique moyennant la mise en place de couches plus épaisses ne s'opère pas au détriment d'un input d'énergie primaire qui serait supérieur à l'énergie d'exploitation économisable durant la vie utile de l'ouvrage par une réduction des déperditions de chaleur par transmission. En optimisant un élément de construction, on veillera également à minimiser l'influence environnementale, à savoir par exemple une émission de gaz (CO₂eq) occasionnant un effet de serre; une couche d'isolation thermique directement plus épaisse ne doit pas se traduire par une augmentation de la charge environnementale.

2.1 Energetisch-ökologische Optimierung am Beispiel Flachdach

Am Beispiel eines Flachdaches (Warmdach über Stahlbetondecke) im Mittelland (Klimastation Zürich SMA) lassen sich aus Abbildung 1 folgende Erkenntnisse gewinnen:

- Die Summe aus Primärenergie-Input (Anteil grauer Energie je Nutzungsjahr) und Betriebsenergie (Deckung des Transmissionswärmeverlustes) wird bis zu grossen Wärmedämmschichtdicken von 34 cm immer kleiner und steigt dann wieder leicht an; aus dieser Betrachtungsweise können also 34 cm dicke Wärmedämmschichten gewählt werden, ohne dass man sich energetisch kontraproduktiv verhält.
- Betreffend Treibhauseffekt hat das Bauteil unter anderem einen Einfluss durch die CO₂-Emissionen bei der Herstellung und durch die Deckung der jährlich anfallenden Transmissionswärmeverluste. Einen bedeutenden Einfluss haben aber auch das Heizsystem und der Energieträger:
 - Holzheizung ≈ 15 g CO₂eq pro kWh Nutzwärme
 - Gasheizung ≈ 260 g CO₂eq pro kWh Nutzwärme
 - Ölheizung ≈ 310 g CO₂eq pro kWh Nutzwärme

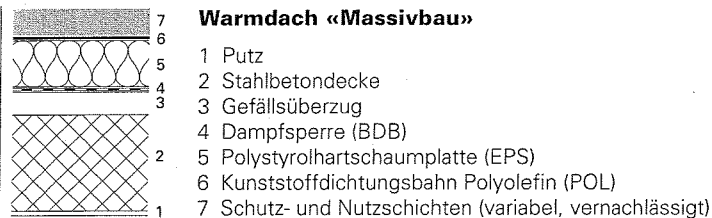
Je nach Heizung wird die minimale Umweltbeeinträchtigung durch CO₂-Emissionen bei einer 15 cm dicken Wärmedämmschicht (Holzheizung) oder einer 71 cm dicken Wärmedämmschicht (Ölheizung) erreicht.

2.1 Optimisation énergétique et écologique, exemple du toit plat

En prenant pour exemple un toit plat (toit chaud ou toit semi-ventilé sur dalle en béton armé) sur le Plateau (station météorologique de Zurich SMA), l'illustration 1 permet de prendre connaissance des points suivants:

- La somme constituée par l'input d'énergie primaire (quote-part d'énergie grise par année d'utilisation) et l'énergie d'exploitation (compensation des déperditions de chaleur par transmission) devient toujours plus petite jusqu'à une couche d'isolation thermique de 34 cm d'épaisseur, puis elle augmente légèrement; de ce fait, on peut donc opter pour des couches d'isolation thermique de 34 cm d'épaisseur sans se comporter d'une manière énergétiquement contre-productive.
- Concernant l'effet de serre, l'élément de construction à notamment une influence à travers les émissions de CO₂ lors de la production et la compensation des déperditions annuelles de chaleur par transmission. Le système de chauffage et le porteur d'énergie ont également une influence importante:
 - Chauffage au bois ≈ 15 g CO₂eq par kWh de chaleur utile
 - Chauffage au gaz ≈ 260 g CO₂eq par kWh de chaleur utile
 - Chauffage au mazout ≈ 310 g CO₂eq par kWh de chaleur utile

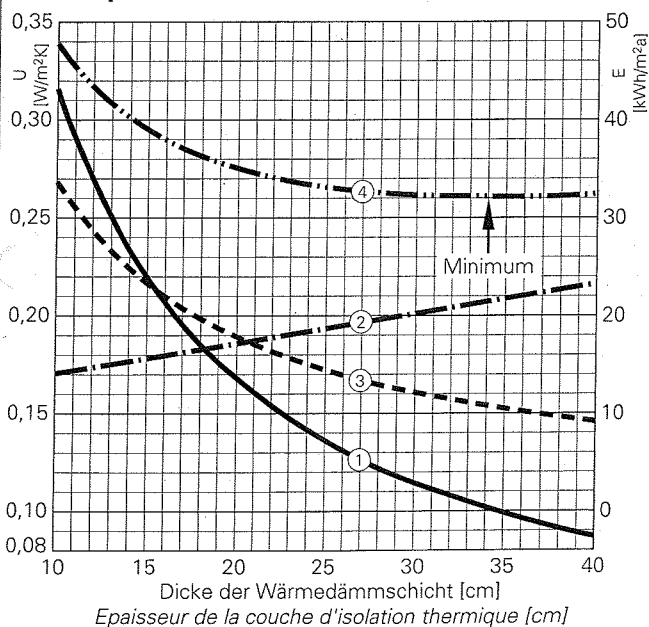
Selon le système de chauffage, l'influence environnementale minimale par les émissions de CO₂ est atteinte avec une couche d'isolation thermique de 15 cm d'épaisseur (chauffage au bois) ou une couche d'isolation thermique de 71 cm d'épaisseur (chauffage au mazout).



Toit chaud «massif»

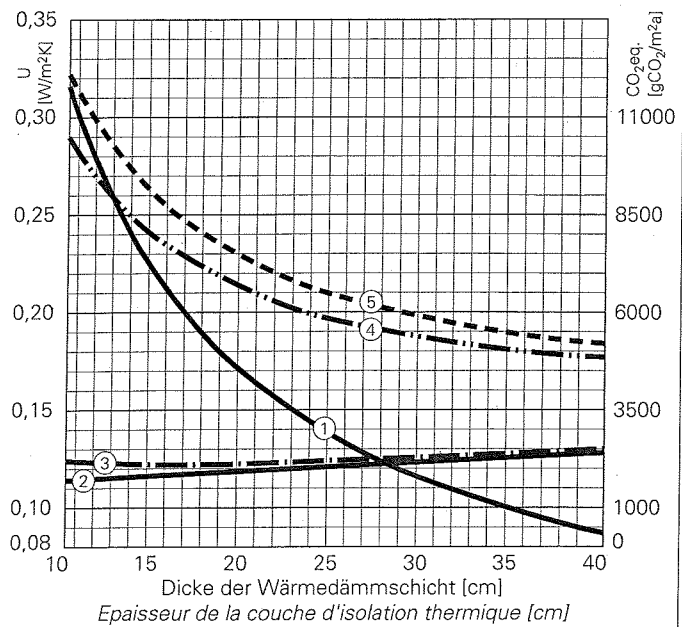
- 1 Enduit
- 2 Dalle en béton armé
- 3 Chape avec façon de pente
- 4 Pare-vapeur (lé d'étanchéité bitumineux)
- 5 Panneau en mousse dure de polyoléfine (EPS)
- 6 Lé d'étanchéité synthétique à base de polyoléfine (POL)
- 7 Couches de protection et d'usure (variable, négligé ici)

Einfluss auf Primärenergie und Betriebsenergie Influence sur l'énergie primaire et l'énergie d'exploitation



- ① U-Wert [W/m²K]
Coefficient U [W/m²K]
- ② Primärenergie Baukonstruktion (pro Jahr, bei 25 Jahren Nutzzeit) [kWh/m²a]
Energie primaire pour construction (par année, pour 25 années de vie utile) [kWh/m²a]
- ③ Betriebsenergie (Abdeckung Transmissionswärmeverlust) [kWh/m²a]
Energie d'exploitation (compensation des déperditions de chaleur par transmission) [kWh/m²a]
- ④ Primärenergie + Betriebsenergie [kWh/m²a]
Energie primaire + énergie d'exploitation [kWh/m²a]

Einfluss auf Treibhauseffekt (CO₂eq.) Influence sur l'effet de serre (CO₂eq.)



- ① U-Wert [W/m²K]
Coefficient U [W/m²K]
- ② CO₂eq. der Konstruktion [gCO₂/m²a]
CO₂eq. de la construction [gCO₂/m²a]
- ③ CO₂eq. Konstruktion + Betriebsenergie Holzheizung [gCO₂/m²a]
CO₂eq. construction + énergie d'exploitation chauffage au bois [gCO₂/m²a]
- ④ CO₂eq. Konstruktion + Betriebsenergie Gasheizung [gCO₂/m²a]
CO₂eq. construction + énergie d'exploitation chauffage au gaz [gCO₂/m²a]
- ⑤ CO₂eq. Konstruktion + Betriebsenergie Ölheizung [gCO₂/m²a]
CO₂eq. construction + énergie d'exploitation chauffage au mazout [gCO₂/m²a]

Abbildung 1:
Auswirkung der Wärmedämmschichtdicke auf das Wärmedämmvermögen, den Energieaufwand E und die Umweltbeeinträchtigung durch CO₂-Emission (Treibhauseffekt) am Beispiel eines Flachdaches

Illustration 1:
Effet de l'épaisseur de la couche d'isolation thermique sur le pouvoir isolant, la dépense d'énergie E et l'influence environnementale par les émissions de CO₂ (effet de serre) en prenant pour exemple un toit plat

2.2 Erstellungs- und Betriebsenergie sowie CO₂-Emissionen am Beispiel von opaken Bauteilen

Wie in Abbildung 1 am Beispiel eines Flachdaches aufgezeigt, wirken sich sowohl die Baukonstruktion als auch der jährliche Betrieb auf den Energieaufwand und den Treibhauseffekt aus. Im Folgenden sollen Voraussetzungen für eine Diskussion bei der Wahl der Bauweise (Konstruktionssystem) und des Baustandards (Dicke der Wärmedämmschicht) von Aussenwänden geschaffen werden. In Abbildung 2 wird hierfür der Einfluss der Bauweise und des Wärmeschutzes auf den Betriebsenergieaufwand, die Primärenergie und die CO₂-Emission für die Erstellung und den Betrieb aufgezeigt. Bei diesen Beispielen wurde folgendes berücksichtigt:

- Verschiedene Aussenwände mit Wärmedurchgangskoeffizienten U von 0,5 bis 0,10 W/m²K
- Klimatische Randbedingungen für Wohnungen im Mittelland (Heizgradtage 20/12, Zürich SMA: 3717 kd/a) zur Berechnung der Transmissionswärmeverluste
- Wirkungsgrad für die Wärmeerzeugung von $\eta = 0,85$
- Primärenergieinhalt und Nutzungszeit der Baustoffe aus SIA D 0123 «Hochbaukonstruktionen nach ökologischen Gesichtspunkten»

Aus der Zusammenstellung in Abbildung 2 können folgende Erkenntnisse gewonnen werden:

- Bei gleichen Konstruktionssystemen kann der grössere Primärenergieaufwand für die Erstellung (dickere Wärmedämmschichten) durch Reduktion der jährlich wiederkehrenden Betriebsenergie (Deckung des Transmissionswärmeverlustes) meist innerhalb weniger Jahre «zurückbezahlt» werden.
- Holzleichtbaukonstruktionen weisen gegenüber massiven Bauteilen deutlich geringere Anteile nicht erneuerbarer Energie auf und sind deshalb auch betreffend ökologische Gesichtspunkte (z.B. Treibhauseffekt durch CO₂-Emission) zu bevorzugen.
- Holz hat, als erneuerbarer, CO₂-neutraler Brennstoff, ökologische Vorteile gegenüber anderen Energieträgern wie Öl oder Gas.

2.2 Energie de production et d'exploitation ainsi qu'émissions de CO₂, exemple pour parties de construction opaques

Comme le fait ressortir l'illustration 1 pour l'exemple du toit plat, tant la construction que l'exploitation annuelle agissent sur la dépense d'énergie et l'effet de serre. Ci-après, nous allons traiter des conditions préliminaires à un débat sur le choix de la méthode de construction (système de construction) et du standard de construction (épaisseur de la couche d'isolation thermique) des murs extérieurs. L'illustration 2 présente l'influence du système de construction et de l'isolation thermique sur la dépense d'énergie d'exploitation, l'énergie primaire et les émissions de CO₂ pour la réalisation et l'exploitation. Dans ces exemples, on a tenu compte des paramètres suivants:

- Différents murs extérieurs avec coefficients de transmission thermique U de 0,5 à 0,10 W/m²K
- Conditions climatiques pour logements sur le Plateau (degrés-jours de chauffage 20/12, Zurich SMA: 3717 kd/a) pour calcul des déperditions de chaleur par transmission
- Rendement pour production de chaleur de $\eta = 0,85$
- Teneur en énergie primaire et durée d'utilisation des matériaux selon SIA D 0123 «Bâtiments considérés en fonction de paramètres écologiques»

L'illustration 2 permet de tirer les conclusions suivantes:

- Avec des systèmes de construction similaires, la plus forte dépense d'énergie primaire consentie pour la réalisation (couches d'isolation thermique plus épaisses) peut généralement se compenser en quelques années par une réduction de la dépense d'énergie d'exploitation qui se répète chaque année (compensation des déperditions de chaleur par transmission).
- Comparativement à des éléments de construction massifs, des structures légères en bois présentent des parts d'énergie non renouvelable nettement inférieures et sont donc également préférables concernant les aspects écologiques (par exemple effet de serre par les émissions de CO₂)
- Comparativement à d'autres porteurs d'énergie tels que le mazout et le gaz, le bois est un combustible renouvelable neutre CO₂ qui présente des atouts écologiques.

Aussenwände Murs extérieurs	d [m]	U [W/m ² K]	E _T [kWh/m ² a]	Primärenergie Energie primaire		CO ₂ -Emission Bau Emission CO ₂ construction [gCO ₂ eq./m ² a]	CO ₂ -Emission Bau + Betrieb Emission CO ₂ construction + exploitation		
				erneuerbar renouvelable [kWh/m ²]	nicht erneuerbar non renouvelable [kWh/m ²]		Öl-Heizung Chauf. mazout [gCO ₂ eq./m ² a]	Gas-Heizung Chauf. gaz [gCO ₂ eq./m ² a]	Holz-Heizung Chauf. bois [gCO ₂ eq./m ² a]
	0,390	0,46	48,5	1,4	317	1457	16504	14077	2185
	0,475	0,37	38,7	1,4	382	1720	13715	11781	2300
	0,10	0,33	34,1	2,6	267	1206	11779	10074	1718
	0,12	0,28	29,3	2,9	272	1215	10310	8843	1655
	0,16	0,22	22,9	3,3	281	1232	8340	7194	1576
	0,20	0,18	18,8	3,8	290	1250	7084	6143	1532
	0,25	0,15	15,3	4,4	301	1272	6020	5254	1502
	0,30	0,12	13,0	5,1	312	1294	5322	4672	1489
	0,35	0,11	11,3	5,7	324	1316	4804	4242	1485
	0,10	0,31	32,7	26,9	243	1056	11195	9560	1547
	0,12	0,27	28,1	27,1	259	1102	9813	8408	1523
	0,16	0,21	21,9	27,4	289	1194	7989	6893	1523
	0,20	0,17	18,0	27,7	319	1286	6857	5958	1556
	0,25	0,14	14,6	28,1	357	1401	5931	5200	1620
	0,30	0,12	12,4	28,6	395	1516	5356	4737	1702
	0,35	0,10	10,7	29,0	432	1634	4955	4419	1792
	0,16	0,27	28,4	409,6	104	443	9244	7824	869
	0,22	0,20	20,9	422,2	114	473	6941	5898	786
	0,25	0,18	18,4	428,5	118	488	6199	5278	764
	0,30	0,15	15,4	439,0	127	513	5292	4521	744
	0,35	0,13	13,3	449,5	135	538	4646	3984	737
	0,40	0,11	11,6	460,0	143	563	4166	3585	737
	0,45	0,10	10,3	470,5	151	588	3796	3279	743

- 1 Innenputz / Enduit intérieur
- 2 Aussenputz / Enduit extérieur
- 3 Spezialbackstein/Backstein / Briques de terre cuite/briques de terre cuite spéciales
- 4 Faserdämmstoffplatten / Panneaux isolants en fibres

- 5 Polystyrolhartschaumplatten / Panneaux en mousse dure de polystyrène
- 6 Gipskarton / Plâtre cartonné
- 7 Holzwerkstoffplatte / Panneau de particules
- 8 Holzwerk / Boisage

Abbildung 2:
Gegenüberstellung von Bauteilen betreffend Wärmedämmvermögen, Primärenergie-Aufwand und Umweltbeeinträchtigung durch CO₂-Emission (Treibhauseffekt)

Illustration 2:
Comparaison de parties de construction concernant leur pouvoir d'isolation thermique, la dépense d'énergie primaire et l'influence sur l'environnement par les émissions de CO₂ (effet de serre)

2.3 Energieverluste bei Bauteilen im Erdreich

Der Energieverlust bei Bauteilen im Erdreich, berechnet nach SIA 380/1, wurde bis anhin massiv überschätzt. Bei erdberührten Bauteilen werden die Aussenklimaerflüsse durch die Erdschichten gedämpft und sie treten zeitlich verzögert auf. Die Wärmeverluste sind entlang den Umschliessungsflächen des Gebäudes am grössten; Wärmeschutzmassnahmen sollten deshalb vor allem bei Wänden getroffen werden, evtl. auch dann, wenn die Untergeschossräume nicht beheizt werden. Dadurch lässt sich der Wärmeverlust aus dem darüber liegenden Geschoss reduzieren, und das Untergeschoss kann besser genutzt werden (höhere Raumlufttemperatur in unbeheizten «Pufferräumen»).

Bei Bodenkonstruktionen sind die orts- bzw. objektspezifischen Randbedingungen in die Beurteilung einzubeziehen:

- Tiefe unter der Erdoberfläche
- Art des Bodenmaterials und der Feuchtebedingungen (wasserführende Schichten)
- Grösse der Gebäudegrundrissfläche
- Nutzung der Räume

Das mit anderen Aussenbauteilen vergleichbare Wärmedämmvermögen der Bauteile im Erdreich (Berechnung des Wärmeverlustes zwischen Raum- und Aussenluft) wird zukünftig nach EN ISO 13370 berechnet; folgende Faktoren sind bei dieser Berechnung von Bedeutung:

- Konstruktionsaufbau von Wänden und Böden
- Tiefe des Bodens unter OK-Terrain (Faktor z)
- Fläche des Bodens (beheizte Innenfläche A_B)
- Perimeter der Kellers (Umfang, Innenabmessung P)
- Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs λ_E

2.3 Déperditions énergétiques de parties de construction enterrées

Jusqu'ici, on a massivement surestimé les déperditions énergétiques de parties de construction enterrées calculées selon SIA 380/1. Pour des parties de construction en contact avec le sol, les influences climatiques extérieures sont atténuées et temporisées. Les déperditions de chaleur les plus importantes se produisent le long des surfaces de clôture du bâtiment; les mesures d'isolation thermique doivent donc prioritairement concerner les murs, même si les locaux en sous-sol ne sont éventuellement pas chauffés. Il est ainsi possible de réduire les déperditions de chaleur au niveau directement supérieur, et le sous-sol se prête à une meilleure utilisation (température ambiante plus élevée dans les «locaux-tampons» non chauffés).

Pour la construction des sols, il convient d'intégrer à l'analyse les conditions spécifiques à l'objet ou au site:

- Profondeur sous la surface du sol
- Genre de matériau et conditions d'humidité (couches aquifères)
- Importance de la surface en plan du bâtiment
- Affectation des locaux

A l'avenir, le pouvoir d'isolation thermique de parties de construction enterrées comparables à d'autres parties de construction extérieures (calcul des déperditions de chaleur entre l'air extérieur et l'air ambiant) se calculera selon la norme EN ISO 13370; pour procéder à ce calcul, les facteurs suivants sont importants:

- Structure des murs et des sols
- Profondeur du sol au-dessous de la surface du terrain (facteur z)
- Surface du sol (surface intérieure chauffée A_B)
- Périmètre de la cave (emprise, dimension intérieure P)
- Conductivité thermique du sol λ_E

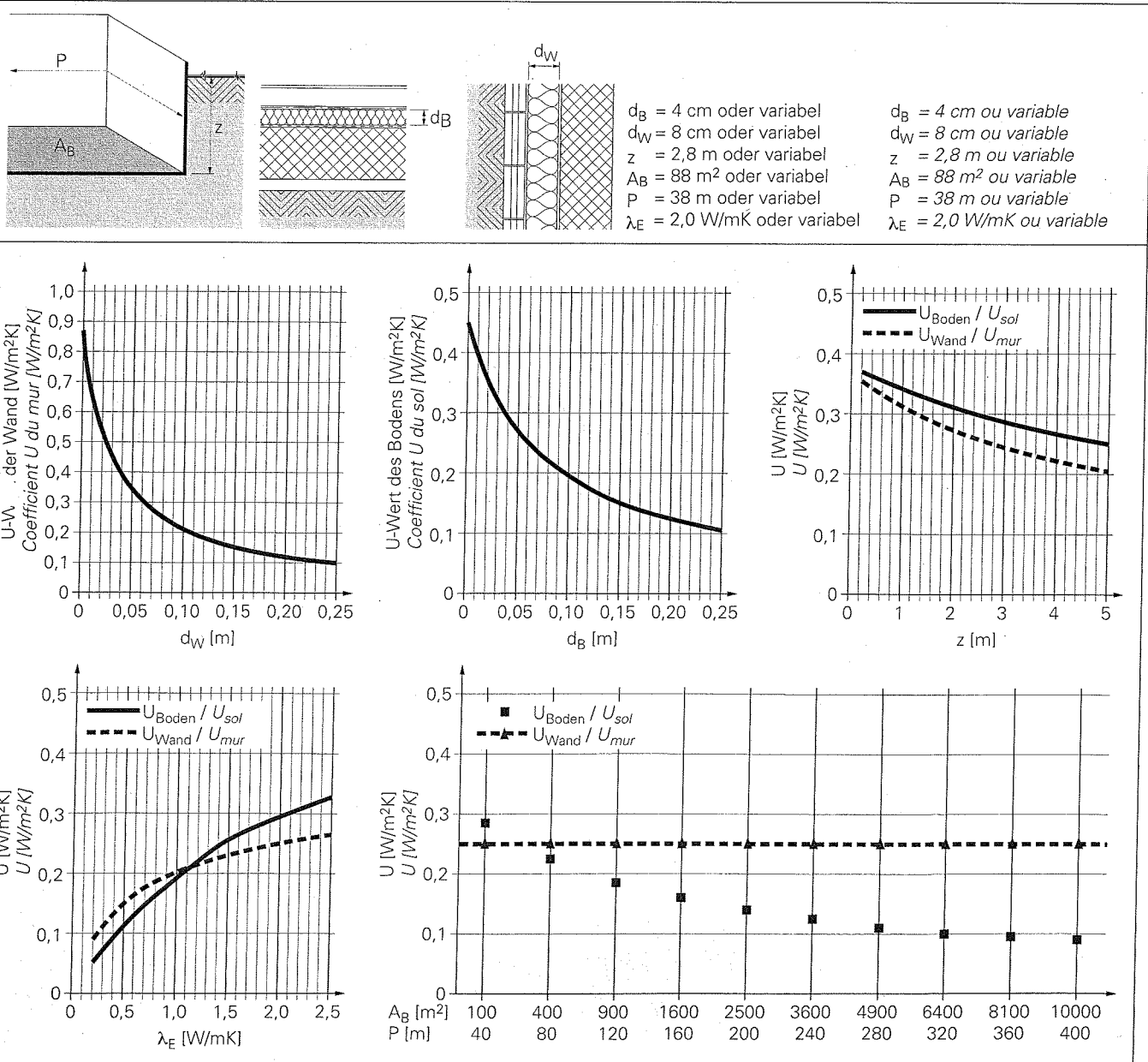


Abbildung 3: Diagramme zur Abschätzung des Wärmedämmvermögens von Bauteilen im Erdreich (Berechnung nach EN ISO 13370)

Illustration 3: Diagrammes d'estimation du pouvoir d'isolation thermique de parties de construction enterrées (calcul selon norme EN ISO 13370)

Die Diagramme in Abbildung 3 geben einen Überblick über die Abhängigkeiten des Wärmedämmvermögens von den einzelnen Faktoren. Die Diagramme sollen zudem eine erste Dimensionierung der erforderlichen Wärmedämmschichtdicke ermöglichen; Ziel ist es, auch bei den Bauteilen im Erdreich dasselbe Wärmedämmvermögen zu erreichen wie bei den Bauteilen gegen Aussenklima (z.B. $U = 0,3 \text{ W/m}^2\text{K}$ für den heute üblichen Baustandard oder $U = 0,2 \text{ W/m}^2\text{K}$ für den MINERGIE-Standard).

Les diagrammes de l'illustration 3 donnent un aperçu des interdépendances du pouvoir d'isolation thermique en fonction des différents facteurs. Ils doivent en outre permettre de procéder à un premier dimensionnement de l'épaisseur de la couche d'isolation thermique; l'objectif consiste à parvenir pour des parties de construction enterrées au même pouvoir d'isolation thermique que celui de parties de construction en contact avec des conditions climatiques extérieures (par exemple $U = 0,3 \text{ W/m}^2\text{K}$ pour le standard de construction ordinaire actuel ou $U = 0,2 \text{ W/m}^2\text{K}$ pour le standard MINERGIE).

2.4 Energieverluste bei wärmetechnischen Schwachstellen

Wärmetechnische Schwachstellen, so genannte Wärmebrücken, beeinflussen den Energieverlust massiv. Selbst bei optimierter Gebäudehülle gehen bis zu 25 % der Energie durch Bauteilübergänge verloren, mit Schwergewicht bei Tür- und Fensteranschlüssen.

Dieser Energieverlust wird beim Berechnungsverfahren nach SIA 380/1 dadurch berücksichtigt, dass die Transmissionswärmeverluste mit Brutto-Bauteilabmessungen ermittelt werden; Ecken werden dadurch doppelt gemessen.

Ein detaillierteres Berechnungsverfahren ist in den Wärmebrücken-katalogen des SIA verankert (z.B. SIA D 078 «Wärmebrücken-katalog 2, verbesserte Neubaudetails»); der Transmissionswärmeverlust wird mit Netto-Bauteilabmessungen ermittelt, und für jeden Bauteilübergang wird der effektive, lineare Wärmeverlust errechnet.

Für Wärmeschutznachweise ist die Berücksichtigung von Wärmebrücken im Merkblatt «Berücksichtigung von Wärmebrücken im Wärmedämmschicht» des Bundesamtes für Energiewirtschaft (BFE) definiert: Wenn der vorhandene Wärmeschutz oder Energiebedarf mindestens 10 % besser als die entsprechenden Anforderungswerte ist, müssen Wärmebrücken, falls solche vorhanden sind, nicht berücksichtigt werden; ansonsten sind entsprechende Punkt- und Linienzuschläge aufzuaddieren, z.B.:

Lineare Wärmebrücke	Ψ -Wert [W/mK]
– Auskragende, durchgehend betonierte Balkonplatte, Vordächer u.Ä.	0,7
– Auskragende Balkonplatte mit:	
• gedämmten Baustahlkorbeinlagen	0,5
• gedämmten Edelstahlkorbeinlagen	0,3
– Unterbrechung der Wärmedämmschicht durch Massivwandanschlüsse (z.B. Kellerdeckendämmung durch Kellerwände, Innendämmung durch Innenwände u.Ä.)	0,5
– Horizontale und vertikale Gebäudekanten mit vollständig unterbrochener Wärmedämmschicht	0,4
– Fensteranschlag (Leibung, Fensterbank, Sturz):	
• mit weniger als 2 cm Wärmedämmschicht	0,25
• mit 2 bis 4 cm Wärmedämmschicht	0,1
Punktförmige Wärmebrücke	χ -Wert [W/K]
– Säulen und Träger ohne Flankenwärmedämmschicht, die die Wärmedämmschicht durchdringen:	
• aus Aluminium	2
• aus Stahl	1
• aus Beton	0,6
– Massive metallische Einzelkonsolen, Halterungen u.Ä., die die Wärmedämmschicht durchdringen	0,1

Auswirkungen von Inhomogenitäten bei Bauteilen

Bei Bauteilen mit Inhomogenitäten innerhalb einzelner Schichten, z.B. Konstruktionsholz im Bereich der Wärmedämmschicht, ist diese Inhomogenität bei der Berechnung des U-Wertes zu berücksichtigen. Hierfür eignet sich das Verfahren nach SIA 180 (mit oberen und unteren Grenzwerten), eine Berechnung mittels Temperaturfeldberechnungsprogramm oder evtl. eine Messung in der Klimakammer.

Am häufigsten kommen solche Inhomogenitäten bei Holzleichtbaukonstruktionen vor. Falls sich solche Inhomogenitäten auf 1 bis 2 Schichten beschränken, ist das Verfahren nach SIA 180 noch anwendbar, bei mehr als 2 inhomogenen Schichten ist eine korrekte Berechnung kaum möglich.

2.4 Déperditions d'énergie de points faibles thermo-techniques

Les points faibles thermotechniques dénommés ponts thermiques influencent massivement les déperditions énergétiques. Même avec une enveloppe du bâtiment optimisée, jusqu'à 25 % de l'énergie se perd par l'intermédiaire des transitions entre parties de construction, la majeure partie des déperditions incombant en l'occurrence aux feuillures des portes et fenêtres.

Avec la méthode de calcul selon SIA 380/1, il est tenu compte de ces déperditions thermiques par le fait que l'on détermine les déperditions de chaleur par transmission moyennant des mesures brutes des parties de construction, les angles étant mesurés à double.

Une méthode de calcul plus détaillée figure dans les catalogues de ponts thermiques de la SIA (par exemple SIA D 078 «Catalogue des ponts thermiques 2, nouveaux détails de construction améliorés»); les déperditions de chaleur par transmission sont déterminées par des mesures nettes des parties de construction, et on calcule la déperdition thermique linéaire effective pour chaque transition.

Pour la justification de l'isolation thermique, on tient compte des ponts thermiques définis dans la fiche technique «Prise en compte des ponts thermiques dans la justification de l'isolation thermique» de l'Office fédéral de l'énergie (OFEN); si l'isolation thermique existante ou la demande d'énergie est d'au moins 10 % meilleure que les valeurs correspondantes requises, il ne faut pas tenir des ponts thermiques s'il en existe; autrement, il convient d'ajouter les suppléments ponctuels et linéaires correspondants, à savoir par exemple:

Pont thermique linéaire	Coefficient Ψ [W/mK]
– Dalle de balcon en porte-à-faux bétonnée en continu, avant-toits, etc.	0,7
– Dalle de balcon en porte-à-faux avec:	
• corbeille d'armature en acier de construction	0,5
• corbeille d'armature en acier inoxydable	0,3
– Interruption de la couche d'isolation thermique par des raccords de mur massif (par exemple isolation de la dalle de cave par des murs de cave, isolation intérieure par des murs intérieurs, etc.)	0,5
– Arêtes horizontales et verticales du bâtiment avec couche d'isolation thermique complètement interrompue	0,4
– Feuillure de fenêtre (embrasure, tablette, linteau):	
• avec couche d'isolation thermique de moins de 2 cm	0,25
• avec couche d'isolation thermique de 2 à 4 cm	0,1
Pont thermique ponctuel	Coefficient χ [W/K]
– Piliers et poutrelles sans couche d'isolation thermique sur flancs traversant la couche d'isolation thermique:	
• en aluminium	2
• en acier	1
• en béton	0,6
– Consoles, supports, etc. métalliques massifs traversant la couche d'isolation thermique	0,1

Effets du manque d'homogénéité de parties de construction

Pour calculer le coefficient U, il faut tenir compte des parties non homogènes de certaines couches d'une partie de construction, à savoir par exemple du bois de construction dans la zone de la couche d'isolation. Il convient en l'occurrence d'opter pour la méthode préconisée par la norme SIA 180 (avec des valeurs limites inférieures et supérieures), un calcul à l'aide d'un programme basé sur des champs de température ou éventuellement une mesure en chambre climatique. C'est avec des constructions légères en bois que l'on rencontre le plus fréquemment de pareilles structures non homogènes. Si les parties non homogènes se limitent à 1 ou 2 couches, la méthode selon norme SIA 180 est encore utilisable; avec plus de 2 couches non homogènes, il n'est guère possible de procéder à un calcul correct.

In solchen Fällen, oder generell bei Inhomogenitäten in Form von Holz und Wärmedämmstoff (was am häufigsten vorkommt), eignet sich die Berechnung des U-Wertes mit resultierenden Wärmeleitfähigkeiten λ_{res} in Abhängigkeit des Holzanteils und der Wärmeleitfähigkeit λ der Wärmedämmschicht. Das Diagramm in Abbildung 4 zeigt den Verlauf der Wärmeleitfähigkeit einer inhomogenen Schicht «Holz/Wärmedämmstoff» von der Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmschicht bei 0 % Holzanteil bis zur Wärmeleitfähigkeit $\lambda = 0,14 \text{ W/mK}$ bei 100 % Holzanteil. Mit den so ermittelten λ_{res} -Werten kann der U-Wert wie bei homogenen Konstruktionen berechnet werden. Aus dem Beispiel in Abbildung 4 geht zudem der Einfluss des Holzanteils auf den Wärmedurchlasskoeffizienten U hervor; je nach Holzanteil resultieren grosse Abweichungen zum theoretischen U-Wert im ungestörten Bereich (ohne Berücksichtigung von Holzquerschnitten).

Dans des cas pareils ou de manière générale avec une structure non homogène se présentant sous forme de bois et d'isolant thermique (cas le plus fréquent), on calcule le coefficient U avec la conductibilité thermique résultante λ_{res} en fonction de la proportion de bois et de la conductibilité thermique λ de la couche d'isolation thermique. Le diagramme de l'illustration 4 présente la courbe de conductibilité thermique d'une couche non homogène «bois/isolant thermique» à partir de la conductibilité thermique de la couche d'isolation thermique pour une proportion de bois de 0 % jusqu'à une conductibilité thermique de $\lambda = 0,14 \text{ W/mK}$ pour une proportion de bois de 100 %. Avec les coefficients λ_{res} ainsi déterminés, il est ensuite possible de calculer le coefficient U comme pour des constructions homogènes. L'exemple de l'illustration 4 fait en outre ressortir l'influence de la proportion de bois sur les coefficients de transmission thermique U; selon la proportion de bois, on peut constater d'importants écarts par rapport au coefficient U théorique en zone non perturbée (sans prise en compte des sections de bois).

Einfluss der Wärmebrücken bei hinterlüfteten Fassaden

Aussenwände mit Aussenwärmedämmung und hinterlüfteter Fassadenbekleidung gelten zu Recht als bauphysikalisch sichere Bauweise. Auch die geltenden Wärmeschutzanforderungen konnten scheinbar problemlos erfüllt werden. Neue Erkenntnisse zeigen jedoch, dass dem nicht zwangsläufig so sein muss; je nach Befestigungsart der Fassadenbekleidung entstehen zusätzliche, linien- und punktförmige Wärmeverluste, die bis anhin zu Unrecht nicht mitberücksichtigt wurden.

Influence des ponts thermiques sur des façades ventilées

Des murs extérieurs munis d'une isolation thermique extérieure et des revêtements de façade ventilés passent à juste titre pour une méthode de construction très sûre relativement à la physique du bâtiment. Il semble également qu'il est aisé de satisfaire aux exigences d'isolation thermique requises. De nouvelles connaissances font toutefois apparaître que cela n'est pas obligatoirement le cas; selon le mode de fixation du revêtement de façade, il se produit des déperditions de chaleur linéaires et ponctuelles supplémentaires dont on ne tenait à tort pas compte jusqu'ici.

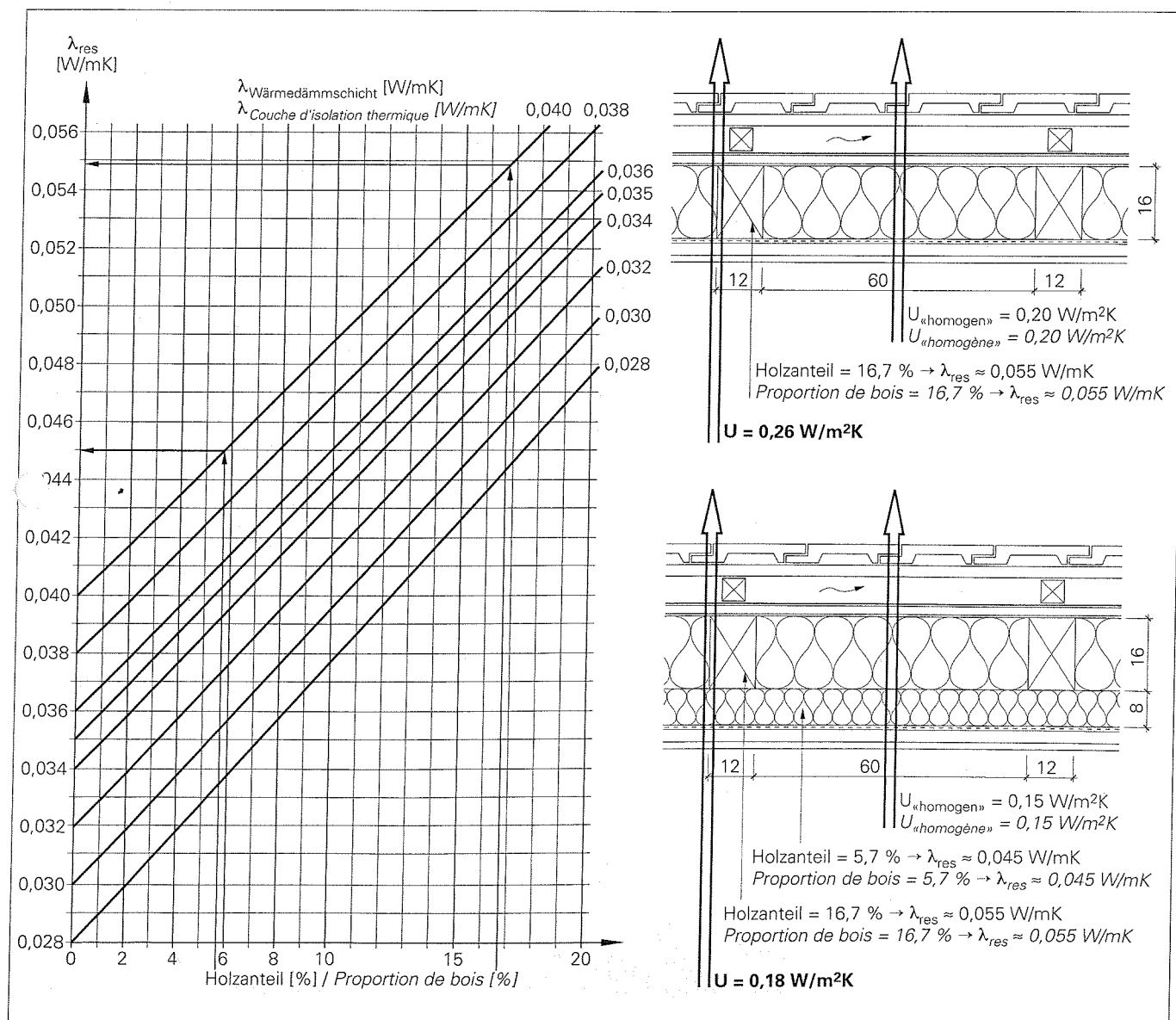


Abbildung 4: Einfluss des Holzanteils bei inhomogenen Holzleichtbaukonstruktionen; Berechnung der U-Werte mit λ_{res} -Werten in Abhängigkeit des Holzanteils und der Wärmeleitfähigkeit λ der Wärmedämmschicht

Illustration 4: Influence de la proportion de bois dans des structures légères en bois; calcul des coefficients U avec des coefficients λ_{res} en fonction de la proportion de bois et de la conductibilité thermique λ de la couche d'isolation thermique

Die Richtlinie «Bestimmung der wärmetechnischen Einflüsse von Wärmebrücken bei vorgehängten, hinterlüfteten Fassaden» (Ausgabe 1998, Bezugsquelle: SZFF Schweizerische Zentralstelle für Fenster- und Fassadenbau, Riedstrasse 14, Postfach 213, CH-8953 Dietikon) zeigt nun den wärmetechnischen Einfluss von verschiedenen Unterkonstruktionen auf und definiert ein Berechnungsverfahren zur korrekten Ermittlung der U-Werte von solchen Aussenwänden.

Das Beispiel in Abbildung 5 zeigt den Berechnungsansatz und einige exemplarische Resultate für eine Aluminium-Unterkonstruktion:

- Der punktuelle Wärmebrückenverlustkoeffizient beträgt bei einer Unterkonstruktion aus Stahlbeton 0,08 W/K (ohne thermische Trennung) bzw. 0,038 W/K (mit thermischer Trennung)
- Typisch für eine solche Unterkonstruktion sind etwa 2,2 Anker/m² Fassade
- Der Wärmeverlust durch die Anker beträgt demnach:
 - 0,176 W/m²K ohne thermische Trennung
 - 0,084 W/m²K mit thermischer Trennung
- Bei einem theoretischen U-Wert der «ungestörten» Aussenwand von 0,30 W/m²K resultieren somit effektiv U-Werte im Bereich von 0,38 bis 0,48 W/m²K (Verschlechterung durch Befestigungssystem um 27 bis 60 %), und statt eines U-Werts von 0,20 W/m²K wird ein solcher von 0,28 – 0,38 erreicht (Verschlechterung um 40 bis 90 %). Für Aussenwände bei MINERGIE- oder gar Passivhaus-Standard sind solche Konstruktionen deshalb ungeeignet, als Befestigungssystem ist dann z.B. eine kreuzweise verlegte Holzunterkonstruktion zu wählen.

La directive «Détermination des influences thermotechniques de ponts thermiques sur des façades-rideaux ventilées» (édition 1998, source: Office central suisse pour la construction de fenêtres et façades, Riedstrasse 14, case postale 213, CH-8953 Dietikon) présente l'influence thermotechnique de différentes sous-constructions et indique une méthode de calcul pour déterminer correctement les coefficients U de pareils murs extérieurs.

L'exemple de l'illustration 5 présente les paramètres de calcul et quelques résultats se rapportant à une sous-construction en aluminium:

- Pour une sous-construction en béton armé, le coefficient ponctuel de déperdition d'un pont thermique se chiffre à 0,08 W/K (sans dissociation thermique) ou 0,038 W/K (avec dissociation thermique).
- Approximativement 2,2 ancrages/m² de façade est un chiffre conforme à la norme pour une pareille sous-construction.
- La déperdition de chaleur par ancrage est donc la suivante:
 - 0,176 W/ m²K sans dissociation thermique
 - 0,084 W/ m²K avec dissociation thermique
- Avec un coefficient U théorique de 0,30 W/m²K pour un mur extérieur «non perturbé», on parvient ainsi effectivement à des coefficients U qui se situent dans une plage de 0,38 à 0,48 W/m²K (dégradation par le système de fixation de 27 à 60 %) et, au lieu d'un coefficient U de 0,20 W/m²K, à un coefficient U de 0,28 – 0,38 W/m²K (dégradation de 40 à 90 %).

De pareilles constructions ne conviennent donc pas pour des murs extérieurs au standard MINERGIE ou même au standard de maison passive; comme système de fixation, on optera donc par exemple pour une sous-construction croisée en bois.

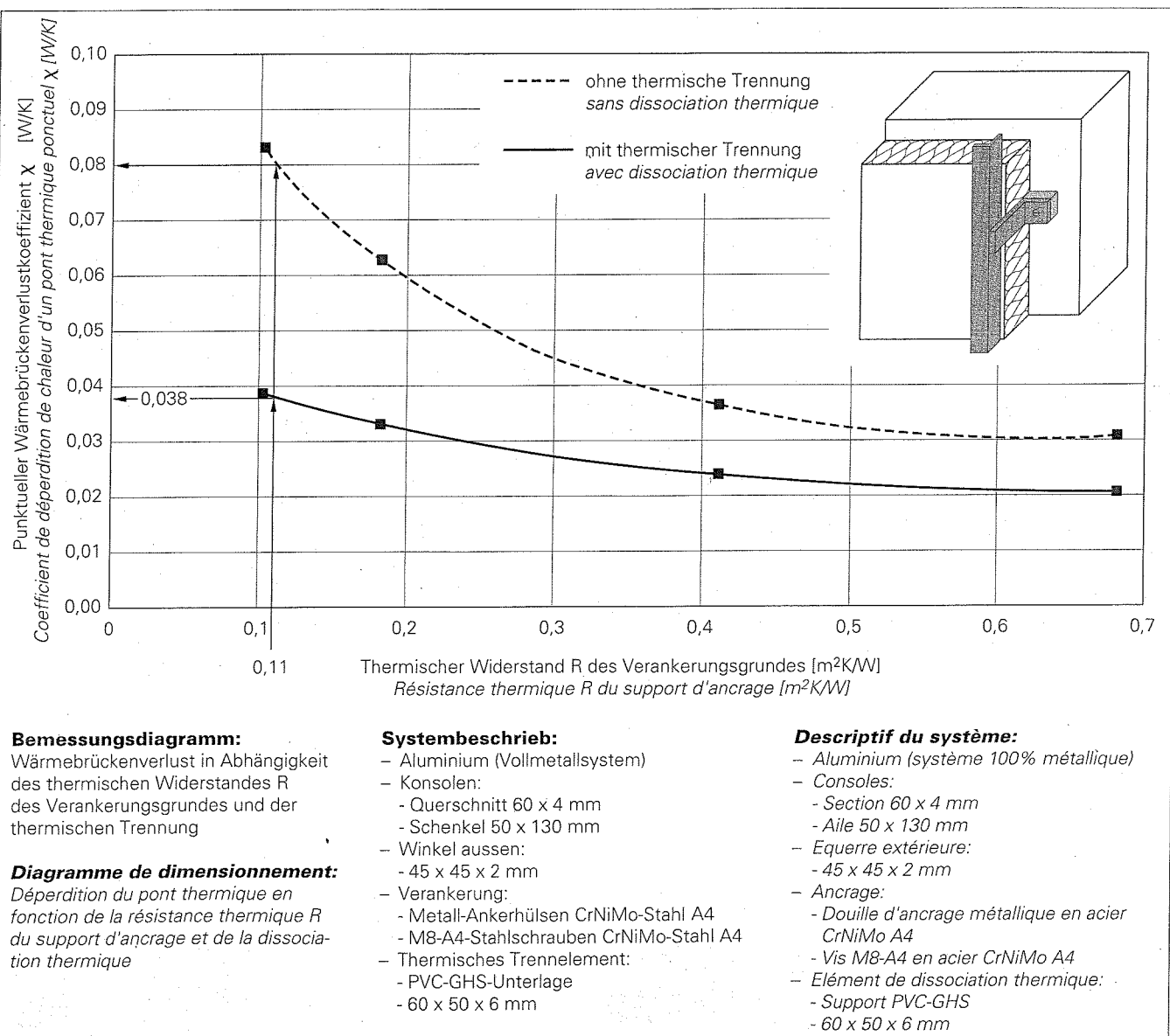


Abbildung 5:
Einfluss einer Alu-Unterkonstruktion bei Aussenwand mit hinterlüfter Fassadenbekleidung auf den Wärmedurchlasskoeffizienten U (Bemessungsdiagramm aus SZFF-Richtlinie «Bestimmung der wärmetechnischen Einflüsse von Wärmebrücken bei hinterlüfteten Fassaden»)

Illustration 5:
Influence d'une sous-construction en aluminium de mur extérieur à revêtement ventilé sur les coefficients de transmission thermique U (diagramme de dimensionnement tiré de la directive «Détermination des influences thermotechniques de ponts thermiques sur des façades-rideaux ventilées»)

Geometrische Schwachstellen bei zweidimensionalen Ecken

Bei ausspringenden Ecken resultiert aus der vorhandenen Geometrie ein nicht zu vermeidender zusätzlicher Wärmeabfluss, der mit dem linearen Wärmebrückenverlustkoeffizienten Ψ berücksichtigt wird. Dieser Linienzuschlag ist abhängig von der Bauteilabmessung und vom Wärmedämmvermögen der Bauteile (Basis-U-Werte). Dieser erhöhte Wärmeabfluss in Eckbereichen führt auch zu einer Verminderung der inneren Oberflächentemperatur, wobei dieser Einfluss in dreidimensionalen Eckbereichen noch um einige Kelvin grösser ist als bei zweidimensionalen Ecken.

Beispiel Gebäudeecke

Beim Beispiel in Abbildung 6 beträgt die Abmessung der mehrschichtig aufgebauten Aussenwandkonstruktion 32,5 cm und der Basis-U-Wert 0,19 W/m²K. Bei derselben Abmessung wird, ohne Inhomogenitäten, bei einer Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmschicht von 0,047 W/mK derselbe Basis-U-Wert erreicht, und der rein geometrisch begründete Wärmebrückenverlustkoeffizient für diese Ecke beträgt $\Psi = 0,027$ W/mK. Bei der Beurteilung von Bauteilübergängen ist somit zu berücksichtigen, dass beim Wärmebrückenverlustkoeffizienten ein gewisser Anteil geometrisch bedingt und somit unvermeidbar ist.

Bei der effektiv vorhandenen inhomogenen Konstruktion beträgt der Wärmebrückenverlustkoeffizient $\Psi = 0,033$ W/mK, wobei nur 0,006 W/mK konstruktiv bedingt sind. Bei einer Eckausbildung mit einlagig zwischen der Holzständerkonstruktion verlegter Wärmedämmschicht würde der Wärmebrückenverlustkoeffizient $\Psi = 0,052$ W/mK betragen; die Auswirkung der konstruktiv bedingten Wärmebrücke würde sich somit von 0,006 auf 0,025 W/mK vervierfachen.

Bei Betrachtung des Transmissionswärmeverlustes nach SIA 380/1 wird der Wärmebrückenverlustkoeffizient im Eckbereich durch doppeltes Messen der Ecke berücksichtigt (Brutto- statt Nettoabmessungen). Beim Beispiel in Abbildung 6 resultiert aus dieser Methode umgerechnet ein Wärmebrückenverlustkoeffizient Ψ von $0,65 \text{ m} \times 0,19 \text{ W/m}^2\text{K} = 0,124 \text{ W/mK}$, womit der Wärmedurchgang fast um einen Faktor 4 überschätzt wird.

Points faibles géométriques pour angles bidimensionnels

Avec des angles saillants, la géométrie engendre un inévitable écoulement thermique supplémentaire dont on tient compte avec le coefficient de déperdition de pont thermique linéaire Ψ . Ce supplément linéaire dépend des dimensions et du pouvoir d'isolation thermique des parties de construction (coefficients U de base). Ce flux thermique accru au droit des angles entraîne également une diminution de la température superficielle intérieure, cette influence se manifestant encore de quelques Kelvin supplémentaires sur des angles tridimensionnels comparativement à des angles bidimensionnels.

Exemple d'angle de bâtiment

Avec l'exemple de l'illustration 6, le mur extérieur de 32,5 cm d'épaisseur présente une structure en plusieurs couches et un coefficient U de base de 0,19 W/m²K. Avec de mêmes dimensions, une structure non homogène et une conductibilité thermique de la couche d'isolation thermique de 0,047 W/mK, on parvient au même coefficient U de base, et le coefficient de déperdition de pont thermique à base purement géométrique pour cet angle est de $\Psi = 0,027$ W/mK. En analysant les transitions entre parties de construction, il faut donc tenir compte du fait qu'un coefficient de déperdition de pont thermique inclut nécessairement et inévitablement une certaine quote-part d'origine géométrique.

Avec une structure non homogène, le coefficient de déperdition de pont thermique est de $\Psi = 0,033$ W/mK, une quote-part de 0,006 W/mK seulement étant d'origine constructive. Pour une façon d'angle avec couche d'isolation thermique posée en une couche entre des montants de bois, le coefficient de déperdition de pont thermique est de $\Psi = 0,052$ W/mK; l'effet du pont thermique d'origine constructive quadruplerait donc de 0,006 à 0,025 W/mK.

En considérant les déperditions de chaleur par transmission selon SIA 380/1, le coefficient de déperdition de pont thermique au droit d'un angle est donc pris en compte en mesurant l'angle au double de ses cotes effectives (mesures brutes en lieu et place de mesures nettes). Pour l'exemple de l'illustration 6, cette méthode nous fait parvenir par conversion à un coefficient de déperdition de pont thermique Ψ de $0,65 \text{ m} \times 0,19 \text{ W/m}^2\text{K} = 0,124 \text{ W/mK}$, soit une transmission thermique surestimée d'un facteur presque équivalent à 4.

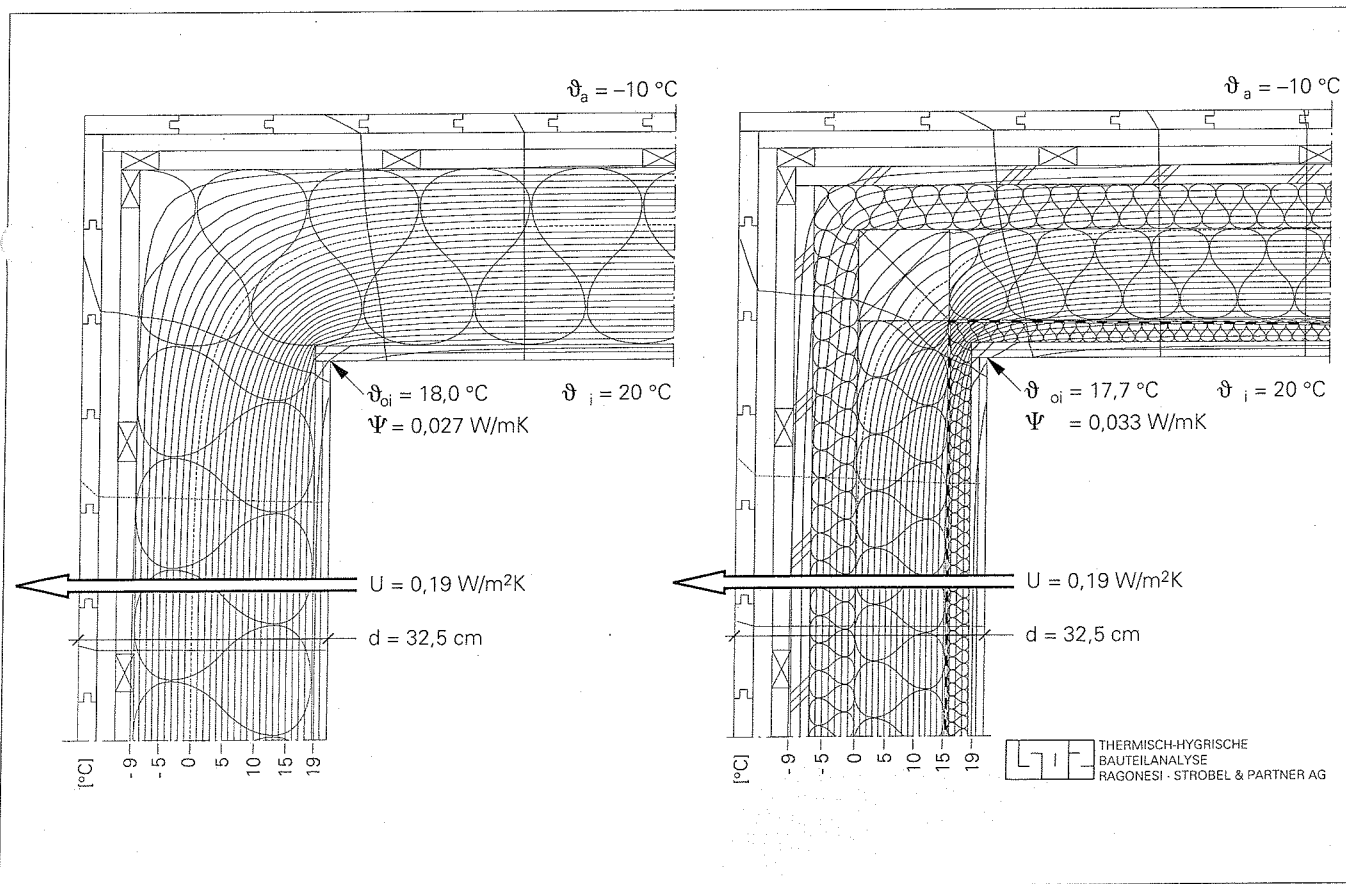


Abbildung 6: Eckausbildung ohne Inhomogenitäten (Theorie, nur geometrische Wärmebrücke) und effektiv vorhandene Eckausbildung mit geometrischer und baukonstruktiver Wärmebrücke

Illustration 6: Façon d'angle à structure non homogène (théorie, pont thermique uniquement géométrique) et façon d'angle effective avec pont thermique géométrique et constructif

Konstruktive wärmetechnische Schwachstellen

Durch baukonstruktive Einflüsse bei Bauteilübergängen verursachte Wärmebrücken, die sich meist den geometrisch bedingten Schwachstellen überlagern, können lokal sehr grosse Wärmeflüsse mit entsprechend tiefen inneren Oberflächentemperaturen entstehen. Solche Wärmebrücken lassen sich nie vollständig vermeiden, es gilt jedoch, ihren Einfluss auf den Wärmedurchgang und die Oberflächentemperaturen möglichst gering zu halten. In der Planungsphase müssen deshalb kritische Stellen der Gebäudehülle erkannt und mit geeigneten Methoden untersucht werden.

Die in Abbildung 7 zusammengestellten Beispiele aus der Baupraxis zeigen qualitativ sehr differente Lösungen. Teilweise entstehen bei Bauteilübergängen zusätzliche Verluste, die, in Relation zum Wärmeverlust durch die angrenzenden Bauteile, nicht zu unterschätzende Größenordnungen erreichen können. So entspricht z.B. beim «Sockel über Aussenluft», je nach Detailausbildung, der lineare Wärmebrückenverlustkoeffizient $\Psi = 0,832$ bzw. $0,316 \text{ W/mK}$ dem analogen Verlust wie durch die wärmetechnisch verbesserte Aussenwand von zusätzlich 2,68 bzw. 1,02 m Höhe. Bei solchen Bauteilübergängen lohnt sich eine wärmetechnisch-energetische Optimierung!

Points faibles thermotechniques d'origine constructive

Avec des ponts thermiques causés par des influences constructives au droit des transitions entre parties de construction et qui se superposent généralement à des points faibles d'origine géométrique, il peut localement se produire de très importants flux thermiques assortis de basses températures superficielles à l'intérieur. Il n'est jamais possible d'éviter complètement de pareils ponts thermiques; il faut toutefois réduire au minimum leur influence sur la transmission thermique et les températures de surface. Lors de la phase de l'étude, il convient donc d'identifier les endroits critiques de l'enveloppe du bâtiment et de les analyser avec des méthodes appropriées.

Les exemples pratiques présentés dans l'illustration 7 présentent des solutions qualitativement très différentes. Les transitions entre parties de construction engendrent parfois des déperditions supplémentaires qui, en relation avec les déperditions de chaleur des parties de construction adjacentes, peuvent atteindre un ordre de grandeur qu'il ne faut pas sous-estimer. Pour un «socle sur vide sanitaire» et en fonction de la façon du détail, le coefficient de déperdition de pont thermique linéaire de $\Psi = 0,832$ ou $0,316 \text{ W/mK}$ correspond par exemple à la déperdition analogue d'un mur extérieur thermotechniquement amélioré de 2,68 ou 1,02 m de hauteur supplémentaire. Avec de pareilles transitions entre parties de construction, il vaut la peine de rechercher une optimisation thermotechnique et énergétique!

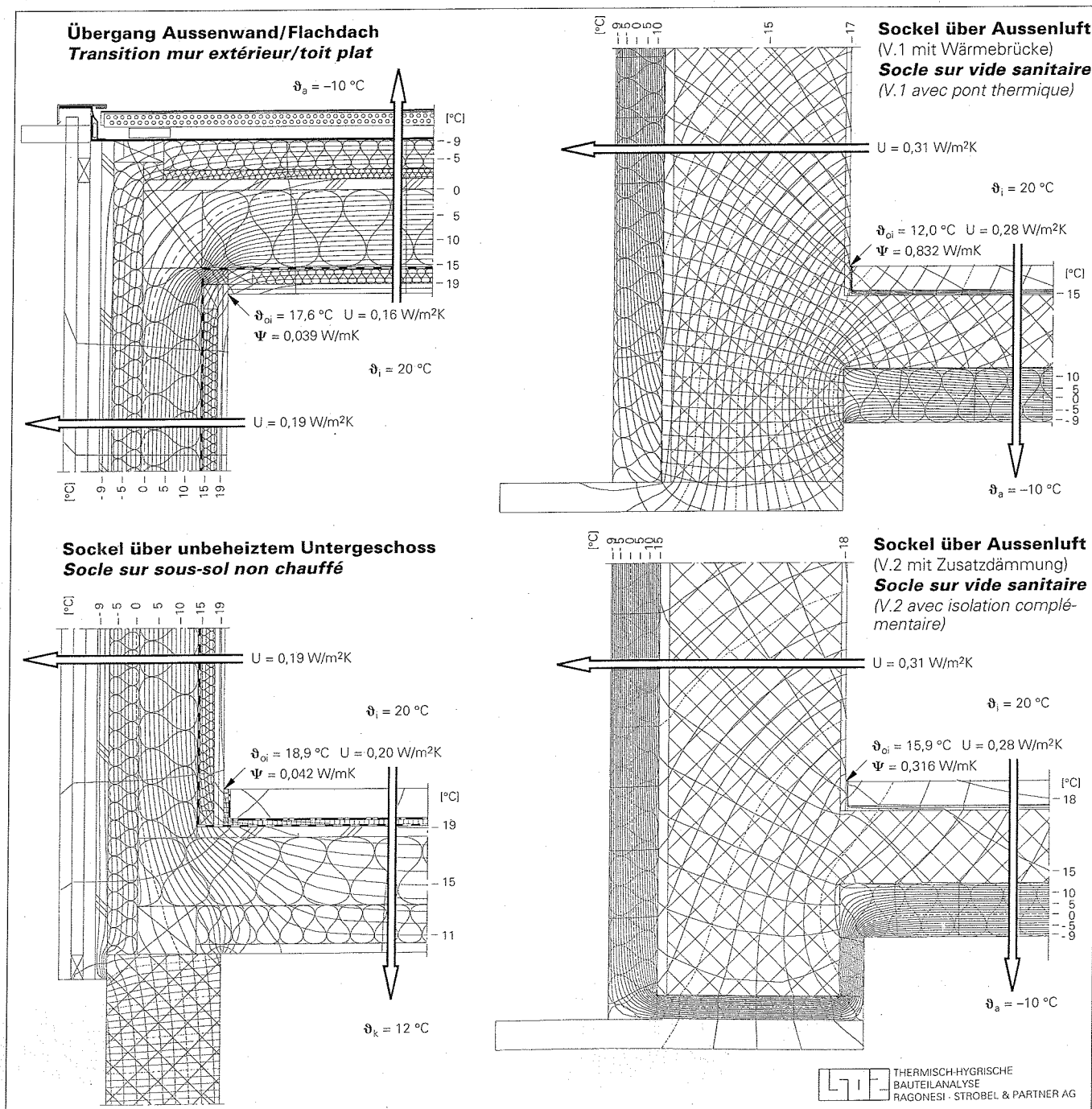


Abbildung 7:
Einige Beispiele von Detailausbildungen aus der Baupraxis

Illustration 7:
Quelques exemples pratiques concernant la façon de détails

2.5 Energiebilanz bei transparenten Bauteilen

Transparente Bauteile wie Fenster müssen widersprüchlichste Anforderungen erfüllen wie Schall- und Wärmeschutz, Luft- und Schlagregendichtheit, Belüftung und Belichtung der Räume sowie Sonnenschutz im Sommer und hoher Energiedurchlass bei Sonneneinstrahlung im Winter.

Betreffend Energiebilanz stehen sich die Faktoren Wärmeschutz (möglichst geringer Wärmeverlust durch Transmission) und Energiegewinn (möglichst hohe Direktgewinne durch Sonneneinstrahlung) gegenüber.

Kriterium des Wärmeschutzes ist der Wärmedurchgangskoeffizient U_F des Fensters; dieser wird beeinflusst durch die U-Werte und die Flächenanteile des Glases und des Rahmens sowie den Einfluss des Glas-Randverbundes.

Kriterien für den Energiegewinn durch Sonneneinstrahlung sind primär der Energiedurchlassgrad der Verglasung (g-Wert) und die vom Ort und von der Orientierung abhängige Globalstrahlung; einen Einfluss haben auch Faktoren wie Verschattung, Verschmutzung und Ausnutzungsgrad der eingestrahlenen freien Wärme. Insbesondere durch ortsfeste Verschattungsvorrichtungen (Balkone, Vordächer) und variable Sonnenschutzvorrichtungen (äussere Rollläden, Storen u.Ä.) kann die Sonneneinstrahlung erheblich reduziert werden. Dies wirkt sich während der Heizperiode ungünstig aus (Überschätzung des Energiegewinnes), schützt jedoch während der Sommerperiode vor übermässiger Überhitzung der Räume.

Weil mit zunehmendem besserem U-Wert der Verglasung der g-Wert schlechter wird, lässt sich die Diskussion über die optimale Verglasung nicht nur gestützt auf den U-Wert führen, sondern es ist hierfür eine Energiebilanz erforderlich.

Abbildung 8 zeigt für den Mittellandstandort «Zürich SMA» je nach Orientierung die Auswirkungen von unterschiedlichen Verglasungen, Rahmen und Fenstergeometrien auf das Wärmedämmvermögen U_F , Energiebilanz ($Q_T - Q_G$) und das energieäquivalente Wärmedämmvermögen $U_{F_{eq}}$ des Fensters; es wurden dabei folgende Faktoren berücksichtigt:

- Heizgradtage 20/12, Zürich SMA: 3717 kd/a
- Globalstrahlung
Süd: 475 kWh/m²a
West: 282 kWh/m²a
Ost: 268 kWh/m²a
Nord: 132 kWh/m²a
- Faktor für Verschmutzung und Verschattung: 0,8
- Ausnutzungsgrad der freien Wärme: 0,8

Die Resultate zeigen, dass sich die Geometrie des Fensters massgebend auf das Wärmedämmvermögen und die Energiebilanz auswirkt: Je kleiner der Rahmenanteil und die Abwicklung des Glas-Randverbundes, desto optimaler wird das Fenster in energetischer Hinsicht; einflügelige Fenster sind deshalb zweiflügeligen vorzuziehen. Aus energetischen Überlegungen sind je nach Fensterorientierung unterschiedliche Verglasungen optimal:

- Bei Südorientierung kann die Bilanz mit zunehmend besserem U_G -Wert des Glases wieder schlechter werden, weil sich durch den kleineren Energiedurchlassgrad g der Energiegewinn bedeutender verändert als der Energieverlust.
- Bei Nordorientierung ist die Bilanz in der Regel immer besser, je kleiner der U_G -Wert des Glases ist.
- Bei anderen Orientierungen ist die energetisch optimale Verglasung je nach Gebäudestandort zu evaluieren.
- Je grösseren Verschattungen oder wenn bei Sonneneinstrahlung zur Vermeidung von Blendeffekten und Spiegelungen jeweils der Sonnenschutz betätigt wird (z.B. Arbeitsräume), resultiert eine ähnliche Bilanz wie bei den nordorientierten Fenstern, und es gilt: Je kleiner der U_G -Wert des Glases, desto besser die Energiebilanz.

In energetischer Hinsicht ist das gegen Süden orientierte Fenster den opaken Bauteilen überlegen. Die energieäquivalenten U-Werte $U_{F_{eq}}$, die zu einem Verlust führen wie bei opaken Bauteilen, sind negativ, d.h. es resultiert über die Heizperiode ein Energiegewinn. Bei West- und Ostorientierung entsprechen die $U_{F_{eq}}$ -Werte von guten Fenstern denjenigen von hochwärmedämmten opaken Bauteilen, nur bei Nordorientierung ist das Fenster den opaken Bauteilen in energetischer Hinsicht unterlegen.

Die Wahl des Fensters bzw. der Verglasung soll jedoch nicht nur gestützt auf den Faktor «Energie» erfolgen; ein ebenso wichtiges Kriterium ist dasjenige der Behaglichkeit. Je besser das Wärmedämmvermögen des Fensters, desto höher werden die raumseitigen Oberflächentemperaturen und desto kleiner wird die Luftgeschwindigkeit der vor dem Fenster abfallenden Kaltluft, was insbesondere bei grossflächigen Verglasungen zu beachten ist (vgl. Kap. 3.1 «Behaglichkeit»).

2.5 Bilan énergétique de parties de construction transparentes

Des éléments de construction transparents tels que des fenêtres doivent répondre à des exigences très contradictoires telles qu'isolation thermique et phonique, étanchéité à l'air et à la pluie battante, ventilation et éclairage des locaux ainsi que protection contre le soleil en été et perméabilité énergétique élevée au rayonnement solaire en hiver.

Concernant le bilan énergétique, les facteurs d'isolation thermique (déperditions de chaleur par transmission aussi faibles que possible) et de gain d'énergie (gains d'énergie par rayonnement solaire aussi élevés que possible) s'opposent.

Le critère d'isolation thermique est le coefficient de transmission thermique U_F de la fenêtre; celui-ci est influencé par les coefficients U et les proportions de surface de vitrage et de cadre ainsi que l'influence de l'assemblage du vitrage sur son châssis.

Les critères de gain d'énergie par le rayonnement solaire sont en premier lieu le degré de transmission énergétique du vitrage (coefficient g) et le rayonnement global qui dépend du site et de l'orientation; des facteurs tels que les ombres portées, la saleté et le taux d'utilisation de l'énergie libre rayonnée ont également une influence. Le rayonnement solaire peut être considérablement réduit par des structures fixes (balcons, avant-toits) et des équipements mobiles de protection contre le soleil (stores roulants extérieurs, stores, etc.). Il en résulte des conséquences défavorables durant la saison de chauffage (surestimation des gains d'énergie), mais une protection contre une surchauffe excessive des locaux durant la saison estivale. Comme le coefficient g se dégrade lorsque le coefficient U du vitrage s'améliore, il ne faut pas uniquement que la question du vitrage optimal s'appuie sur le coefficient U, mais il est également indispensable d'établir un bilan énergétique.

L'illustration 8 présente, pour le site de «Zurich SMA» et selon l'orientation de l'ouvrage, les effets de différents vitrages, du cadre et de la géométrie des fenêtres sur le pouvoir d'isolation thermique U_F , le bilan énergétique ($Q_T - Q_G$) et le pouvoir d'isolation thermique énergétiquement équivalent $U_{F_{eq}}$ de la fenêtre; on tient en l'occurrence compte des facteurs suivants:

- Degrés-jours de chauffage 20/12, Zurich SMA: 3717 kd/a
- Rayonnement global
Süd: 475 kWh/m²a
Ouest: 282 kWh/m²a
Est: 268 kWh/m²a
Nord: 132 kWh/m²a
- Facteur de saleté et d'ombre: 0,8
- Coefficient d'utilisation de la chaleur libre: 0,8

Les résultats démontrent que la géométrie de la fenêtre a un effet déterminant sur le pouvoir d'isolation thermique et le bilan énergétique: plus la proportion du cadre et le développement de l'assemblage vitrage/châssis sont faibles, plus le comportement de la fenêtre est énergétiquement optimisé; on préférera par conséquent des fenêtres à un seul vantail plutôt que des fenêtres à deux vantaux. Selon l'orientation de la fenêtre, différents vitrages peuvent constituer une solution optimale en fonction de critères énergétiques:

- Avec une orientation au sud, le bilan peut à nouveau se dégrader lorsque le coefficient U_G du vitrage s'améliore, car le gain d'énergie occasionné par un plus faible degré de transmission énergétique g subit une modification supérieure à celle de la déperdition énergétique.
- Avec une orientation au nord, le bilan s'améliore en règle générale toujours parallèlement à la diminution du coefficient U_G du vitrage.
- Pour d'autres orientations, le vitrage énergétiquement optimal sera évalué en fonction du site sur lequel le bâtiment est édifié.
- Lorsque les ombres portées sont importantes ou lorsque l'on actionne les dispositifs de protection contre le soleil pour éviter des effets d'éblouissement ou de réflexion (par exemple locaux professionnels), on obtient un bilan similaire à celui de fenêtres orientées au nord et on applique la règle suivante: plus le coefficient U_G du vitrage est petit, meilleur est le bilan énergétique.

D'un point de vue énergétique, une fenêtre orientée au sud est supérieure à des parties de construction opaques. Les coefficients énergétiquement équivalents $U_{F_{eq}}$, qui occasionnent une déperdition à l'instar de parties de construction opaques sont négatifs, ce qui se traduit par un gain d'énergie pendant la saison de chauffage. Avec une orientation à l'est et à l'ouest, les coefficients $U_{F_{eq}}$ de bonnes fenêtres correspondent à ceux de parties de construction opaques à haut pouvoir d'isolation thermique; c'est uniquement pour une orientation au nord que la fenêtre est énergétiquement inférieure à des parties de construction opaques.

Le choix de la fenêtre ou du vitrage ne doit donc pas uniquement s'appuyer sur le facteur «énergie»; celui du confort est un critère tout aussi important. Meilleur est le pouvoir d'isolation thermique de la fenêtre, plus les températures de surface à l'intérieur sont élevées et plus la vitesse de l'air froid qui s'écoule devant et vers le bas de la fenêtre est faible, élément dont il faut tout particulièrement tenir compte avec des vitrages de grande surface (voir chapitre 3.1 «Confort»).

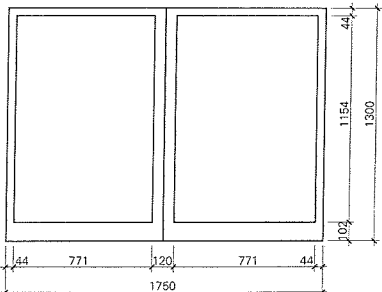
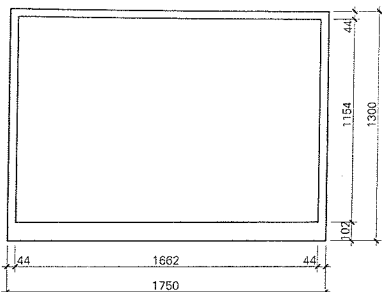
														
Rahmen Cadre	Glas Vitrage		Randverbund Assemblage périmétrique Ψ_R [W/mK]	Orientierung Orientation	U_F [W/m²K]	Q_t [kWh/a]	Q_g [kWh/a]	$Q_t - Q_g$ [kWh/a]	U_{Feq} [W/m²K]	U_F [W/m²K]	Q_t [kWh/a]	Q_g [kWh/a]	$Q_t - Q_g$ [kWh/a]	U_{Feq} [W/m²K]
2,0	1,4	65	0,07	Süd/sud	1,77	359	352	7	0,04	1,67	338	379	-41	-0,20
				West/ouest			209	150	0,74			225	113	0,56
				Ost/est			198	160	0,79			214	125	0,61
				Nord/nord			97	261	1,29			105	233	1,15
2,0	1,1	61	0,05	Süd/sud	1,47	297	330	-33	-0,16	1,37	277	356	-79	-0,39
				West/ouest			196	101	0,50			211	66	0,32
				Ost/est			186	111	0,55			201	76	0,38
				Nord/nord			91	206	1,01			99	178	0,88
1,50	1,4	65	0,07	Süd/sud	1,66	337	352	-15	-0,07	1,59	322	379	-57	-0,28
				West/ouest			209	128	0,63			225	97	0,48
				Ost/est			198	138	0,68			214	109	0,54
				Nord/nord			97	239	1,18			105	217	1,07
1,50	1,1	61	0,05	Süd/sud	1,36	275	330	-55	-0,27	1,29	261	356	-95	-0,47
				West/ouest			196	79	0,39			211	50	0,25
				Ost/est			186	89	0,44			201	60	0,30
				Nord/nord			91	184	0,91			99	163	0,80
1,50	0,7	42	0,05	Süd/sud	1,04	212	227	-15	-0,08	0,95	193	245	-52	-0,26
				West/ouest			135	77	0,38			146	47	0,23
				Ost/est			128	84	0,41			138	54	0,27
				Nord/nord			63	149	0,73			68	125	0,61
1,50	0,5	42	0,05	Süd/sud	0,89	180	227	-47	-0,23	0,78	158	245	-86	-0,43
				West/ouest			135	45	0,22			146	13	0,06
				Ost/est			128	52	0,26			138	20	0,10
				Nord/nord			63	117	0,58			68	91	0,45
 Optimum je Orientierung betreffend Energiebilanz / Optimisation du bilan énergétique en fonction de l'orientation														

Abbildung 8:
Auswirkung von Fenstergrösse, Rahmen und Glas auf die Energiebilanz des Fensters, in Abhängigkeit von der Orientierung (Klimastandort Zürich SMA)

Illustration 8:
Effet de la grandeur de la fenêtre, de son cadre et de son vitrage sur son bilan énergétique en fonction de son orientation (site climatique de Zurich SMA)