



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

Vienna University of Technology

DIPLOMARBEIT Master's Thesis

Beurteilung und Optimierung der Wärmebrücken bei begrünten hinterlüfteten Fassaden sowie Entwicklung eines Modells mit zusätzlich vorgelagerten PV-Modulen

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades
eines Diplom-Ingenieurs

unter der Leitung von

Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Azra Korjenic
E 206

Institut für Hochbau und Technologie
Forschungsbereich für Bauphysik und Schallschutz

und

Univ.Ass. Dipl.-Ing. Dr. techn. Georg Hochreiner
E 202

Institut für Mechanik und Werkstoffe der Strukturen
Forschungsbereich Werkstoff- und Struktursimulation

Eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Florian Teichmann
Matr.Nr.: 01527388
Raxstraße 32/15
1100 Wien

Wien, September 2018

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Teichmann'.

Unterschrift

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denjenigen bedanken, die mich während der Anfertigung dieser Diplomarbeit unterstützt und motiviert haben.

Zuerst gebührt mein Dank Frau Prof. Azra Korjenic, die meine Diplomarbeit betreut und begutachtet hat. Außerdem möchte ich mich bei der Projektassistentin Maria Soledad Penaranda Moren sowie Herrn Prof. Mehdi Aminbaghai und Herrn Univ.Ass. Georg Hochreiner für die technische Unterstützung bei der Erstellung dieser Arbeit recht herzlich bedanken.

Ebenfalls möchte ich mich bei der Firma AnTherm für die kostenlose Studentenlizenz ihres 3D-Wärmebrücken-Simulationsprogramms sowie die fachliche Unterstützung bei dessen Handhabung bedanken. Weiters gilt mein Dank dem Fachverband Baustoffe und Bauteile für vorgehängte hinterlüftete Fassaden e.V. (FVHF) für die gebührenfreie Zusendung einer einschlägigen Richtlinie, die mir als wichtige Quelle gedient hat.

Ein besonderer Dank gilt all jenen Firmen, die mir detaillierte Informationen zu ihren Produkten bzw. Systemen bereitgestellt haben: Dies waren insbesondere Herr Andreas Lichtblau der Firma 90deGREEN, Herr Sascha Haas von der Firma Techmetall, Herr Stefan Hascher von der Firma Fricke, Frau Vera Enzi vom Verband für Bauwerksbegrünung, Frau Susanne Höndorf und Herr Gerhard Huber vom Architekturbüro Rataplan sowie zu guter Letzt die Herrn Dario Kalcic, Klaus Mayrhofer und Bernhard Brocza von der Firma Eurofox.

Abschließend möchte ich mich bei meiner Frau Christine Teichmann bedanken, die mich stets motiviert und mit viel Geduld durch diese Arbeit begleitet hat.

Kurzfassung

Beurteilung und Optimierung der Wärmebrücken bei begrünter hinterlüfteter Fassade sowie Entwicklung eines Modells mit zusätzlich vorgelagerten PV-Modulen

Nach einer allgemeinen Betrachtung des Einflusses der Dicke sowie der Druckfestigkeit von thermischen Trennelementen bei hinterlüfteten Fassaden werden Wärmebrückensimulationen sowie Wärmestrommessungen an beispielhaften Fassadenbegrünungen in Wien durchgeführt. Dabei hat sich herausgestellt, dass der gemessene Wärmebrücken-Verlustkoeffizient stets geringer ist als der bei der Simulation erhaltene. Dies lässt darauf schließen, dass Fassadenbegrünungen zu einer Änderung des Mikroklimas an der Fassade und in weiterer Folge zu einer Reduktion der winterlichen Wärmeverluste durch die Außenwandkonstruktion führen.

Im letzten Teil dieser Arbeit wird ein numerisches Modell zur Kombination von Fassadenbegrünung und Photovoltaik entwickelt. Dabei bewirkt die Verdunstungskälte der Fassadenbegrünung eine Steigerung der Effizienz der PV-Module. Wesentliche Erkenntnis hierbei ist, dass die Verschlechterung des Wärmedurchgangskoeffizienten (ΔU -Wert) maßgeblich von der thermischen Qualität der Fassadenkonsolen abhängt. Die vertikalen Lasten zufolge Eigengewicht sollten entweder über Stützen direkt in den Untergrund eingeleitet oder, falls der Gehsteigbereich frei von Stützen bleiben soll, über massive Konsolen im Bereich der Decke über Erdgeschoß in den Verankerungsgrund übertragen werden. Der Einfluss dieser massiven Konsolen auf den ΔU -Wert der Gesamtfassade ist aufgrund deren geringen Anzahl nahezu vernachlässigbar. Bei Verwendung hochwertiger thermischer Trennelemente ist somit, selbst ohne Abstützung im Gehsteigbereich, bei Stahlbetonuntergrund ein ΔU -Wert von unter $0,01 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ erreichbar.

Abstract

Assessment and optimization of thermal bridges in green ventilated facades and development of a theoretical model with additional PV modules in the front

After a general examination of the influence of the thickness and the compressive strength of thermal separating elements in ventilated facades, thermal heat bridge simulations and heat flow measurements are performed on exemplary facade greenings in Vienna. It has been found that the measured thermal transmittance is always lower than the one obtained in the simulation. This suggests that facade greenings lead to a change in the microclimate on the facade and subsequently to a reduction in wintry heat losses through the outer wall construction.

In the last part of this work a numerical model for the combination of facade greening and photovoltaics is developed. The evaporative cooling of the facade greening causes an increase in the efficiency of the PV modules. The key finding here is that the ΔU value depends significantly on the thermal quality of the facade consoles. The vertical loads according to intrinsic weight should either be lead directly into the ground via supports or, if the pavement area is to remain free of supports, be transferred via massive consoles above ground floor into the outer walls. The influence of these massive consoles on the ΔU value of the overall facade is almost negligible due to their small number. When using high-quality thermal separating elements, in the case of reinforced concrete walls a ΔU value of less than $0.01 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ can thus be achieved even without support in the pavement area.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	1
1 Einleitung	2
2 Grundlagen	4
2.1 Vorgehängte hinterlüftete Fassaden	4
2.1.1 Ökologische Aspekte von hinterlüfteten Fassaden	4
2.1.2 Architektonische Aspekte von hinterlüfteten Fassaden.....	5
2.1.3 Statische Aspekte von hinterlüfteten Fassaden	5
2.1.4 Bauphysikalische Aspekte von hinterlüfteten Fassaden	7
2.2 Fassadenbegrünung	8
2.2.1 Nutzen von Fassadenbegrünung	8
2.2.2 Fassadenbegrünungs-Systeme	11
2.2.3 Brandschutzbestimmungen bei Fassadenbegrünungen	12
2.2.4 statische Aspekte von Fassadenbegrünungen	13
2.2.5 Befestigungen von Fassadenbegrünungen.....	14
2.2.6 Beispiele ausgewählter Systemanbieter für wandgebundene Fassadenbegrünungen	17
2.3 Doppelfassaden	20
2.3.1 Kastenfenster-Fassade	21
2.3.2 Schacht-Kasten-Fassade.....	21
2.3.3 Korridorfassade.....	22
2.3.4 Zweite-Haut-Fassade.....	22
3 Methoden	24
3.1 Wärmebrückenberechnungen mit AnTherm®.....	24
3.2 Statik-Berechnungen mit C-FIX	28
3.3 Statik-Berechnungen mit RSTAB.....	29
3.4 Näherungsverfahren für ΔU -Werte zufolge mechanischer Befestigungselemente gemäß ÖNORM EN ISO 6946	30
4 Beurteilung des Einflusses erhöhter thermischer Trennung.....	32
4.1 χ -Werte der Konsolen bei erhöhter thermischer Trennung	33
4.1.1 Aluminium-Konsole MacFox Medium.....	34
4.1.2 Aluminium-Konsole MacFox Large	37
4.1.3 Edelstahl-Konsole MFT-Fox Medium	42
4.1.4 Edelstahl-Konsole MFT-Fox Large	45
4.1.5 Prozentuelle Verringerung der χ -Werte durch thermische Trennung	50
4.2 Statische Belastbarkeit der Konsolen bei thermischer Trennung 54	
4.3 Vergleich der ΔU -Werte je nach thermischer Trennung.....	62
4.4 Übersichtstabellen für ΔU -Werte bei Stahlbeton-Untergrund.....	68
4.5 Empfehlungen und Ausblick.....	72

5	Wärmebrücken bei begrünten, hinterlüfteten Fassaden.....	74
5.1	Beispiele ausgeführter Projekte	74
5.1.1	BG und BRG Diefenbachgasse – System Optigrün®	74
5.1.2	BRG Schumeierplatz – System Techmetall	77
5.1.3	Wittmayergasse 2 – System 90 ^{DE} GREEN®.....	80
5.1.4	Amtsgebäude MA 31 – Troglösung.....	82
5.2	Wärmebrückenberechnungen und -messungen	84
5.2.1	BG und BRG Diefenbachgasse – System Optigrün®	84
5.2.2	BRG Schumeierplatz – System Techmetall	90
5.2.3	Wittmayergasse 2 – System 90 ^{DE} GREEN®.....	95
5.2.4	Amtsgebäude MA 31 – Troglösung.....	100
5.3	Vergleich der Berechnungsergebnisse	110
5.4	Empfehlungen zur Ausführung der Unterkonstruktion bei Fassadenbegrünungen	114
6	Entwicklung eines Modells für Fassadenbegrünung mit vorgelagerten Photovoltaik-Modulen	115
6.1	Geometrie	116
6.2	Baustatische Modellbildung	116
6.3	Querschnitte.....	119
6.4	Konsolen	120
6.5	Montage.....	121
6.6	Lastannahmen	123
6.6.1	Photovoltaik-Module	123
6.6.2	Fassadenbegrünung mit Paneelen	123
6.6.3	Fassadenbegrünung mit Trögen	123
6.6.4	Nutzlast zufolge Wartung	124
6.6.5	Windlasten	124
6.6.6	Schneelasten	125
6.6.7	Lasten zufolge Imperfektionen	126
6.6.8	Temperaturlasten.....	127
6.7	Ergebnisse der statischen Berechnungen mit RSTAB.....	128
6.8	Ergebnisse der Wärmebrückenberechnungen der Konsolen...	133
6.9	Schlussfolgerungen und Empfehlungen.....	138
7	Zusammenfassung.....	139
8	Anhang.....	141
8.1	Beispiel eines AnTherm®-Berechnungsprotokolls.....	141
8.2	Beispielberechnungen Firma Eurofox	149
8.2.1	MacFox-Konsolen auf Stahlbeton-Untergrund	149
8.2.2	MacFox-Konsolen auf Vollziegel-Untergrund.....	150
8.2.3	MFT-Fox-Konsolen auf Stahlbeton-Untergrund	151
8.2.4	MFT-Fox-Konsolen auf Vollziegel-Untergrund	152

8.3	Ergebnisse Statik-Berechnung.....	153
8.3.1	MacFox-Konsolen auf Stahlbeton-Untergrund	153
8.3.2	MacFox-Konsolen auf Vollziegel-Untergrund.....	154
8.4	Berechnungsergebnisse ΔU -Werte.....	155
8.4.1	Konsole MacFox	155
8.4.2	Konsole MFT-Fox	156
8.5	Ermittlung des Einflussbereiches der Befestigungselemente zur Auswertung der Messdaten der untersuchten begrünten, hinterlüfteten Fassaden	157
8.5.1	BG und BRG Diefenbachgasse	157
8.5.2	BRG Schumeierplatz	158
8.6	Bereinigte Mittelwerte der verwendeten Messdaten	159
8.7	Maßgebliche Lastkombinationen aus RSTAB.....	160
8.8	Modell des Stahlgerüsts mit zwei Ständerebenen	161
8.9	Ergebnisse der RSTAB-Berechnungen des Begrünungsmodells im Grenzzustand der Tragfähigkeit	162
8.9.1	Variante 1 – Stützen durchgehend – Knickfiguren	162
8.9.2	Variante 1 – Stützen durchgehend – Schnittgrößenverteilungen 164	
8.9.3	Variante 1 – Stützen durchgehend – 60 cm Auskragung	166
8.9.4	Variante 1 – Stützen durchgehend – 80 cm Auskragung	169
8.9.5	Variante 1 – Stützen durchgehend – 100 cm Auskragung	172
8.9.6	Variante 2 – Stützen unterfangen – Knickfiguren.....	175
8.9.7	Variante 2 – Stützen unterfangen – Schnittgrößenverteilungen 177	
8.9.8	Variante 2 – Stützen unterfangen – 60 cm Auskragung.....	179
8.9.9	Variante 2 – Stützen unterfangen – 80 cm Auskragung.....	182
8.9.10	Variante 2 – Stützen unterfangen – 100 cm Auskragung	185
8.10	Eingabe der Konsolen A bis F in AnTherm®	188
8.10.1	Konsole A	188
8.10.2	Konsole B	189
8.10.3	Konsole C	190
8.10.4	Konsole D	191
8.10.5	Konsole E	192
8.10.6	Konsole F.....	193
8.11	Abbildungsverzeichnis	194
8.12	Tabellenverzeichnis	201
9	Literatur.....	203

Abkürzungsverzeichnis

mathematische Abkürzungen		
c	Wärmespeicherkapazität	kJ/(kg.K)
L	Länge	m
R	Wärmedurchlasswiderstand	m ² .K/W
R _{si}	innerer Wärmeübergangskoeffizient	m ² .K/W
R _{se}	äußerer Wärmeübergangskoeffizient	m ² .K/W
U	Wärmedurchgangskoeffizient	W/(m ² .K)
ΔU	Veränderung des Wärmedurchgangskoeffizienten	W/(m ² .K)
λ	Wärmeleitfähigkeit	W/(m.K)
μ	Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	-
ρ	Dichte	kg/m ³
σ	Druckspannung	N/mm ²
χ	Punktuelle Wärmebrücken-Verlustkoeffizient (kleines Chi)	W/K

allgemeine Abkürzungen	
BG	Bundesgymnasium
BRG	Bundesrealgymnasium
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
dB	Dezibel
DXF	AutoCAD-Dateiformat zum Datenaustausch
EG	Erdgeschoß
EPS	Expandiertes Polystyrol
Fa.	Firma
Ges.m.b.H.	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
ggf.	gegebenenfalls
Hz	Herz
i.M.	im Mittel
MA	Magistratsabteilung
MW	Mineralwolle
OIB	Österreichisches Institut für Bautechnik
PE	Polyethylen
PP	Polypropylen
PV	Photovoltaik
Stk.	Stück
TU	Technische Universität
UK	Unterkonstruktion
vgl.	vergleiche
WDVS	Wärmedämmverbundsystem
z.B.	zum Beispiel

1 Einleitung

Vorgehängte hinterlüftete Fassaden erfreuen sich nicht nur aufgrund ihrer Langlebigkeit durch die funktionale Trennung von Wärmeschutz und Witterungsschutz, sondern auch aufgrund der ästhetischen Vielfalt immer größerer Beliebtheit.

Auch in Hinblick auf den Wärmeschutz sind mit vorgehängten hinterlüfteten Fassaden technisch einwandfreie Lösungen realisierbar. Jedoch kommt es hierbei durch die Verankerung der Fassadenbekleidung im Tragwerk systembedingt zu Durchdringungen der Wärmedämmung, die materialbedingte, meist punktuelle Wärmebrücken darstellen [BFE98].

Zur Verringerung dieser Wärmebrücken gibt es zwei grundlegende Ansätze: Einerseits kann für die Unterkonstruktion selbst ein möglichst schlecht wärmeleitendes Material verwendet werden (Kunststoff oder Edelstahl anstelle von Aluminium) und andererseits kann die (metallische) Unterkonstruktion mit möglichst druckfesten und gleichzeitig wärmedämmenden Materialien von der tragenden Wand thermisch getrennt werden.

Letzterer Ansatz ist in Österreich weit verbreitet. Dabei werden üblicherweise bis zu sechs Millimeter dicke Hartkunststoff-Einlagen verwendet, die eine Wärmeleitfähigkeit von ca. $\lambda = 0,09 \text{ W/(m.K)}$ aufweisen [SFH17]. Im ersten Teil dieser Arbeit wird untersucht, inwiefern sich eine Erhöhung der Dicke sowie Verringerung der Wärmeleitfähigkeit des Materials zur thermischen Trennung auf den punktuellen Wärmebrücken-Verlustkoeffizienten (χ) und in weiterer Folge auf den U-Wert-Zuschlag (ΔU -Wert) auswirken.

Sowohl aus ästhetischen Gründen als auch insbesondere aufgrund des positiven Einflusses auf das Mikroklima stellen Fassadenbegrünungen eine zukunftsfähige, ökologische Alternative zu herkömmlichen Fassadenbekleidungen (meist aus Aluminium oder Stahl) bzw. Wärmedämmverbundsystemen (WDVS) dar. Aufgrund des hohen Gewichtes von Fassadenbegrünungspaneelen ist hier der Unterkonstruktion besonderes Augenmerk zu schenken.

Anhand von vier ausgeführten Fassadenbegrünungen wird im zweiten Teil dieser Arbeit die Wärmebrückenwirkung zufolge deren Unterkonstruktion mit

jener von herkömmlichen hinterlüfteten Fassaden (gemäß Teil eins dieser Arbeit) verglichen. Wo vorhanden, werden Messdaten des Wärmestromes bei den untersuchten Fassadenbegrünungen zur Überprüfung der Berechnungsergebnisse herangezogen.

Eine weitere Möglichkeit innovativer Fassadengestaltung ist die Integration von PV-Modulen zur lokalen Stromerzeugung. Diese Maßnahme kann, im großen Maßstab angewendet, einen erheblichen Beitrag sowohl zur Energiewende hin zu einer dezentralen Versorgung mit Grünstrom als auch zur Erfüllung der EU-Gebäuderichtlinie leisten, welche ab 2021 an alle Neubauten die Anforderung eines „nearly zero energy buildings“ (im Allgemeinen mit „Niedrigstenergiegebäude“ übersetzt) stellt.

Um sowohl die positiven Effekte der Fassadenbegrünung als auch die Produktion von grünem Strom direkt am Gebäude miteinander zu vereinen, würde sich eine Kombination der beiden Systeme anbieten. Dabei werden die (ggf. transparenten) PV-Module vor die Fassadenbegrünung vorgesetzt. Dies bringt den positiven Nebeneffekt, dass die PV-Module von hinten durch die Verdunstungskälte der Pflanzen gekühlt werden, wodurch ein höherer Wirkungsgrad bei der Stromerzeugung erreicht wird. Gleichzeitig erzeugen die PV-Module ein Wechselspiel aus Licht und Schatten, womit eine gesteigerte Pflanzenvielfalt ermöglicht wird.

Im dritten und letzten Teil dieser Arbeit wird ein numerisches Modell einer Art Doppelfassade entwickelt und einer thermischen Simulation unterzogen. Dabei werden – wie oben beschrieben – die Systeme Fassadenbegrünung und Photovoltaik miteinander vereint, wobei zwischen den vertikalen Tragprofilen und den PV-Modulen ein Wartungssteg von 60 cm bis 100 cm Breite vorgesehen wird. Die vorgesetzten PV-Module stellen somit die zweite Fassadenhaut dar und werden von einer selbsttragenden Stahlkonstruktion gehalten, die lediglich zur Weiterleitung von Horizontalkräften in der tragenden Außenwand rückverankert werden muss.

2 Grundlagen

2.1 Vorgehängte hinterlüftete Fassaden

Der Begriff Fassade kommt vom lateinischen Wort „facies“, welches auf Deutsch so viel wie äußere Erscheinung, das Äußere bzw. Aussehen bedeutet [PON17]. Im Gegensatz zum Begriff Außenwandkonstruktion wird der Begriff Fassade daher speziell für eine zu einer Straße bzw. einem Platz hin orientierte Schauseite eines Gebäudes verwendet [GSC13].

Außenwandkonstruktionen werden grundsätzlich in einschalige und zweischalige Aufbauten untergliedert. Während einschalige Wände in der Regel aus einer äußeren Putzbekleidung (bzw. einem Wärmedämmverbundsystem), einem tragenden Wandquerschnitt sowie einer inneren Putzbekleidung (bzw. einer Innendämmung) bestehen, tritt bei zweischaligen Wandaufbauten an die Stelle der äußeren Putzbekleidung eine leichte, hinterlüftete bzw. eine schwere (ggf. auch hinterlüftete) Außenwandbekleidung [GSC13].

Wenn in dieser Arbeit von vorgehängten hinterlüfteten Fassaden die Rede ist, handelt es sich dabei folglich um zweischalige Außenwandkonstruktionen, wobei auf die innere Putzbekleidung im Allgemeinen kein Augenmerk gelegt wird. Die nachfolgenden Abschnitte seien den zahlreichen Vorteilen, technischen Möglichkeiten sowie aktuellen Entwicklungen vorgehängter hinterlüfteter Fassaden gewidmet.

2.1.1 Ökologische Aspekte von hinterlüfteten Fassaden

Gerade im alpinen Raum blickt die vorgehängte, hinterlüftete Fassade auf eine Jahrhunderte alte Tradition zurück, wobei die Zweckmäßigkeit der Außenwandkonstruktionen in der Vergangenheit stets im Vordergrund stand. Der wesentliche Vorteil von hinterlüfteten Fassaden ist die konstruktive Trennung von Bekleidung und Dämmung. Durch die Bekleidung ist die Dämmung vor Beschädigung durch mechanisches Einwirken sowie durch Witterungseinflüsse geschützt. Außerdem wird eine übermäßige Durchfeuchtung durch Flugschnee oder Schlagregen vermieden. Allfällige dennoch anfallende Feuchtigkeit (von außen oder auch durch Wasserdampfdiffusion von innen) kann bei wirksamer Hinterlüftung effizient und schnell wieder abgeführt werden [OFH17].

Ein weiterer Vorteil von hinterlüfteten Fassaden ist deren uneingeschränkte Rückbaubarkeit. Einerseits können Beschädigungen während der Nutzungsphase gezielt und selektiv repariert werden, andererseits kann die gesamte Fassade im Falle einer Generalsanierung oder eines Abrisses wieder vollständig demontiert und theoretisch an einer anderen Stelle wieder aufgebaut werden. Der Grund dafür liegt darin, dass die Wärmedämmung im Gegensatz zu Wärmedämmverbundsystemen (WDVS) nicht vollflächig an die Tragkonstruktion geklebt, sondern mittels spezieller Dübel rein mechanisch befestigt wird.

2.1.2 Architektonische Aspekte von hinterlüfteten Fassaden

In Hinblick auf die architektonischen Gestaltungsmöglichkeiten bieten hinterlüftete Fassaden gegenüber WDVS-Fassaden ebenfalls zahlreiche Vorteile. Insbesondere für fassadenintegrierte Photovoltaik-Paneele sowie Warmwasser-Flachkollektoren sind hinterlüftete Fassaden die übliche Konstruktionsart. Außerdem eignen sie sich besonders für die Integration von Fassadenbegrünungs-Paneele, da diese ohnehin eine Hinterlüftung benötigen [OFH17].

In Bezug auf die Materialvielfalt der äußeren Bekleidung bieten hinterlüftete Fassaden dem Architekten nahezu unbegrenzte Variationsmöglichkeiten. Die geeigneten Materialien reichen von Metall-Verbundplatten über Faserzement, Faserbeton, Glas, Holz und Holzelemente bis hin zu Keramik, Kunststoff, Natursteinen, Metallen und hoch verpressten Laminaten (HPL). Dabei ist auf Farbechtheit, Frostbeständigkeit sowie Dauerhaftigkeit der verwendeten Fassadenbekleidung zu achten [OFH17].

2.1.3 Statische Aspekte von hinterlüfteten Fassaden

Nach ÖNORM EN 13830 [ONO15a] wird der Begriff „hinterlüftete Fassade“ folgendermaßen definiert:

Die Vorhangfassade besteht in der Regel aus vertikalen und horizontalen, miteinander verbundenen, im Baukörper verankerten und mit Ausfachungen ausgestatteten Bauteilen, die eine leichte, raumumschließende ununterbrochene Hülle bilden, die selbstständig oder in Verbindung mit dem Baukörper alle normalen Funktionen einer Außenwand erfüllt, jedoch nicht zu den lastaufnehmenden Eigenschaften des Baukörpers beiträgt.

Eine hinterlüftete Fassade ist somit ein nichttragendes Bauelement, dessen Lasten in der Regel über eine Unterkonstruktion in den Verankerungsgrund (die

tragende Wand) eingeleitet werden. Die meist maßgeblichen Beanspruchungen von hinterlüfteten Fassaden sind neben deren Eigengewicht jene durch Windlasten, Schnee und Vereisung. Hinzu kommen, besonders bei Fassaden, die vorwiegend aus metallischen Bauteilen bestehen, Lasten aus temperaturbedingten Längenänderungen zufolge Sonneneinstrahlung sowie, bei druckbelasteten Bauteilen, Lasten aus Imperfektionen wie Anfangsschiefstellungen oder Vorverkrümmungen. Auch außergewöhnliche Lastfälle wie Erdbeben oder Fassadenbrand sind bei der statischen Bemessung zu berücksichtigen. Zusätzlich müssen hinterlüftete Fassaden gemäß ÖNORM EN 14019 [ONO00a] einen gewissen Widerstand gegenüber Stoßbeanspruchungen aufweisen. Die maximale frontale Durchbiegung der einzelnen Elemente der Unterkonstruktion darf in Summe zwischen den Verankerungspunkten nach ÖNORM EN 13116 [ONO01] $L/200$ bzw. 15 mm (der kleinere Wert ist maßgebend) nicht überschreiten.

Je nach Fassadenbekleidung kann das Eigengewicht, das in den Verankerungsgrund zu übertragen ist, stark variieren. Das Passivhaus Institut gibt dabei für die Zertifizierung von Fassadenankern folgende Lastklassen an:

Tab. 1: Lastklassen von Fassadenankern [PHI17]

Lastklasse	Fassadenbekleidung	Fassadengewicht (Bekleidung & UK)
I	Aluminiumschichtplatten mit Kunststoffkern, Aluwelle	$\leq 0,10 \text{ kN/m}^2$
II	Kunststoffe	$\leq 0,15 \text{ kN/m}^2$
III	Faserzementplatte	$\leq 0,20 \text{ kN/m}^2$
IV	Acrylglas	$\leq 0,25 \text{ kN/m}^2$
V	Keramik, Beton	$\leq 0,30 \text{ kN/m}^2$
VI	Marmor, Steinfassaden	$> 0,30 \text{ kN/m}^2$

Eine besondere statische Herausforderung stellen vorgehängte Fassadenbegrünungspaneele dar. Im wassergesättigten Zustand können deren Flächenlasten mit 80 kg/m^2 bis 120 kg/m^2 [DEG17, OPT17, TEC17] jene von regulären Fassadenbekleidungen um ein Vielfaches überschreiten.

2.1.4 Bauphysikalische Aspekte von hinterlüfteten Fassaden

In bauphysikalischer Hinsicht sind hinterlüftete Fassaden in vielen Punkten den Fassaden mit WDVS überlegen. Wie bereits erwähnt, bieten hinterlüftete Fassaden einen optimalen Feuchteschutz: Einerseits kann Bau- oder Nutzungsfeuchte über den Hinterlüftungsraum zügig abgeführt werden, andererseits bieten hinterlüftete Fassaden einen guten Schutz gegen Schlagregen (Klassifizierung der Schlagregendichtheit nach ÖNORM EN 12154 [ONO00]) – im ungünstigsten Fall eindringender Schlagregen läuft an der Rückseite der Bekleidung ab und führt nicht zu einer Durchnässung der Wärmedämmung [OFH17].

Je nach Fugenanteil und Fugenbreite bzw. längenbezogenem Strömungswiderstand der Wärmedämmung kann gemäß den Verarbeiterrichtlinien vom Österreichischen Fachverband für hinterlüftete Fassaden (ÖFHF) [OFH15] die Anordnung einer winddichten Folie erforderlich sein. Des Weiteren ist in Abhängigkeit des Luftdurchganges bei Winddruck bzw. Windsog die Zuordnung zu einer Luftdurchlässigkeitsklasse (A1, A2, A3, A4 oder AE) gemäß ÖNORM EN 12152 [ONO02] möglich.

Während der Wärmeschutz bei hinterlüfteten Fassaden aufgrund der erforderlichen Unterkonstruktion im Vergleich zu WDVS-Fassaden wärmebrückenbedingt vermindert ist, bieten hinterlüftete Fassaden einen deutlich besseren Schallschutz, da die vorgehängte Verkleidung mit der Wand ein zweischaliges Schwingssystem bildet, dessen Resonanzfrequenz bei ausreichendem Abstand der beiden Schalen unter 100 Hz liegt und somit im baupraktischen Sinne nicht mehr von Relevanz ist. Dabei ist der Schallschutz bei Verwendung von Mineralwolle grundsätzlich besser als im Falle von geschlossenzelligen Hartschaumplatten. Die Fugen sollten jedenfalls dicht ausgeführt werden, da sie ansonsten eine maßgebliche Schallbrücke darstellen können [IBP81].

In Bezug auf den Brandschutz bestehen an die konstruktive Ausführung von hinterlüfteten Fassaden grundsätzlich keine Anforderungen. Es muss lediglich sichergestellt werden, dass die nachfolgenden Schutzziele erfüllt werden:

- wirksame Einschränkung der Brandweiterleitung und
- wirksame Einschränkung des Herabfallens von Fassadenteilen.

Die übliche Methode zur wirksamen Einschränkung der Brandweiterleitung ist die Verwendung von sogenannten Brandsperren, welche die Möglichkeit der Brandausbreitung über die Hohlräume einer hinterlüfteten Fassade einschränken sollen. Dabei wird zwischen horizontalen und vertikalen Brandsperren unterschieden. Horizontale Brandsperren müssen grundsätzlich in jedem Geschöß angeordnet werden [OFH13].

Im nächsten Kapitel werden die Grundlagen der Fassadenbegrünung erläutert und die unterschiedlichen Möglichkeiten der nachträglichen Anbringung an Bestandsfassaden vorgestellt.

2.2 Fassadenbegrünung

Die Bedeutung urbaner Grünflächen hat angesichts des Klimawandels und des Urban-Heat-Island-Effekts (UHI) in den letzten Jahrzehnten immer mehr an Bedeutung gewonnen [UHI15]. Dabei spielt die Begrünung von Fassaden eine besondere Rolle, da jene zu den größten ungenutzten Restflächen im urbanen Raum zählen [LEI16].

Die Idee der Begrünung von Fassaden ist keineswegs neu: Bereits in der Antike wurde Efeu als Stilmittel an Gebäudefassaden eingesetzt [GOT26, BRO98]. Besonders bodengebundene Kletterpflanzen fanden in den letzten Jahrhunderten in zahlreichen Epochen vermehrt Anwendung [KOH93]. Aktuelle Entwicklungen im Bereich der Fassadenbegrünung gehen jedoch immer mehr in Richtung hoch technologisierter, fassadengebundener Systemlösungen, die automatisch bewässert und gedüngt werden und somit ohne direkten Kontakt zum Boden auskommen.

2.2.1 Nutzen von Fassadenbegrünung

Fassadenbegrünungen bringen gesamtheitlich betrachtet sowohl für das Gemeinwohl als auch für den Investor zahlreiche Vorteile [LEI16], wobei die Intensität der erzielbaren Effekte maßgeblich von der konkreten Ausführung, deren Größe sowie Vernetzung mit angrenzender grüner Infrastruktur abhängt:

- Regenwassermanagement:
Begrünte Flächen ermöglichen einen erhöhten Wasserrückhalt indem sie Regenwasser aufnehmen und erst verzögert abgeben. Damit

leisten sie einen Beitrag zur Pufferung von Starkregenereignissen und somit zur Entlastung der Kanalisation.

- **Mikroklima:**
Durch die Verdunstungskühlung, die Reduktion von Feinstaub sowie die Produktion von Sauerstoff (O₂) und die Bindung von Kohlendioxid (CO₂) leisten begrünte Flächen einen wesentlichen Beitrag zur Verbesserung des Stadtklimas. In gewisser Weise kann dadurch der ökologische Fußabdruck infolge der städtischen Versiegelung wieder ausgeglichen werden.
- **Städtebau:**
Durch Fassadenbegrünung lassen sich ungenutzte urbane Flächen sowohl in ästhetischer als auch in funktionaler Hinsicht aufwerten, womit eine nachhaltige Wertsteigerung der Immobilie einhergeht. Dadurch eröffnen sich dem Architekten vielfältige neue Gestaltungsmöglichkeiten. Außerdem kann Fassadenbegrünung zur Graffiti-Prävention bzw. als öffentlicher Raum für urban gardening dienen.
- **Stadtökologie (Flora & Fauna):**
Die Begrünung von Fassaden steigert die Biodiversität in der Stadt und leistet einen Beitrag zur Vergrößerung und Vernetzung von innerstädtischen Grünflächen als Lebensraum für Flora und Fauna.
- **Lebenszyklusverlängerung:**
Richtig geplante Fassadenbegrünungen schützen die Bausubstanz (vergleichbar mit vorgehängten hinterlüfteten Fassaden) vor Witterungseinflüssen und führen somit zu einer Verlängerung der möglichen Nutzungsdauer der dahinterliegenden Bauwerkskomponenten.
- **Dämmfunktion:**
Durch vorgehängte Fassadenbegrünungs-Paneele kann bei ungedämmten Bestandswänden eine Verringerung des Transmissionswärmeverlustes von bis zu 25 % erreicht werden [KOR16]. Außerdem lässt sich je nach Anwendungsfall der sommerliche Wärmeschutz verbessern, wodurch die Notwendigkeit einer aktiven Kühlung entfallen kann.

Auch die schalldämmende bzw. schallschluckende Wirkung von Fassadenbegrünung ist erwiesen: Durch Reflexion von Schallwellen an den Pflanzenblättern und deren Absorption durch das Substrat kann eine Schallpegelreduktion von bis zu zehn Dezibel (10 dB) erzielt werden [KOR08].

- **Menschliches Wohlbefinden:**
Fassadenbegrünung ermöglicht es, dass Natur insbesondere für Kinder, die in der Stadt aufwachsen, wieder erlebbar wird. Außerdem bewirkt sie im Allgemeinen eine Steigerung der Lebensqualität und in weiterer Folge der Produktivität und Denkleistung. Durch die Verminderung sommerlicher Überhitzung sowie die Verbesserung des Arbeitsumfeldes ist als Folgewirkung eine Entlastung des Gesundheitssystems zu erwarten.

Die nachfolgende Abbildung (Abb. 1) fasst die Vorteile von Fassadenbegrünung nochmals zusammen und stellt diese grafisch dar.

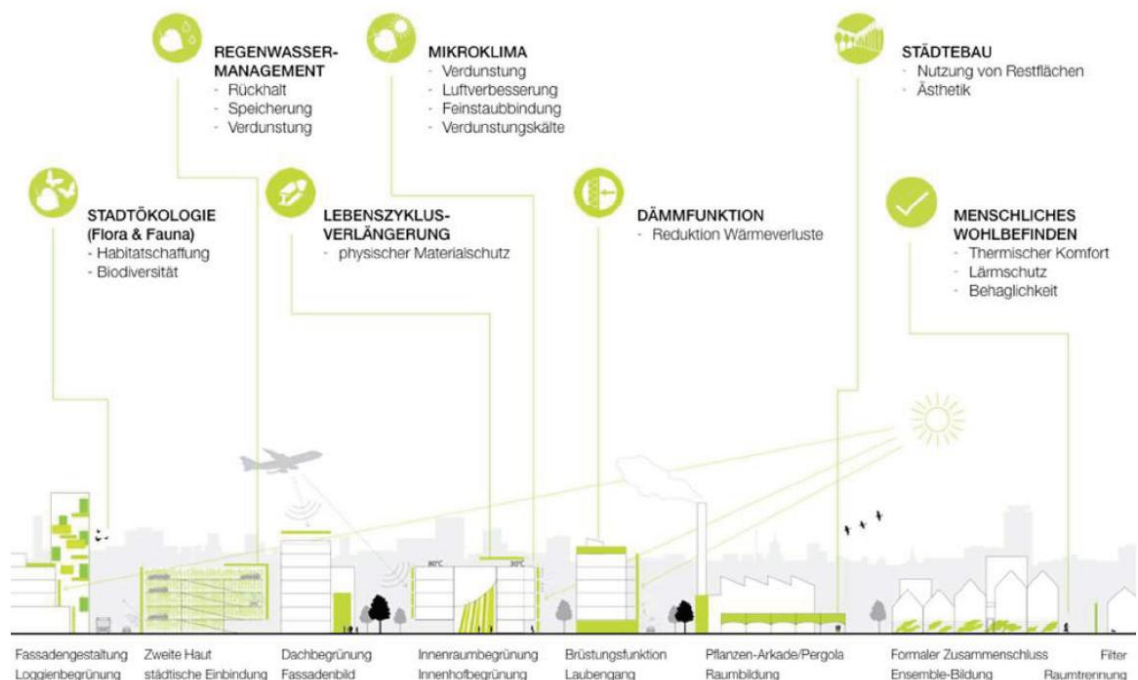


Abb. 1: Funktionen von Bauwerksbegrünung [LEI16] © PFOSER - JAKOB AG 2015, Nachbearbeitung: KRAUS, 2016

2.2.2 Fassadenbegrünungs-Systeme

Wie bereits einleitend erwähnt, lassen sich die unterschiedlichen Fassadenbegrünungssysteme in zwei Gruppen einteilen: die bodengebundenen und die wandgebundenen Systeme. Die nachfolgenden Absätze geben innerhalb dieser beiden Gruppen einen Überblick über die unterschiedlichen Ausführungsvarianten und gehen auf die jeweiligen Vor- und Nachteile ein.

2.2.2.1 Bodengebundene Systeme

Bei bodengebundenen Systemen wird die Pflanze im natürlich gewachsenen Boden eingesetzt. Dadurch ist lediglich eine Begrünung bis zur maximalen Wuchshöhe der jeweiligen Kletterpflanze möglich. Grundsätzlich wird zwischen Systemen mit und ohne Kletterhilfe unterschieden [LEI16]:

- ohne Kletterhilfe

Bodengebundene Systeme ohne Kletterhilfe stellen die einfachste und häufigste Variante von Fassadenbegrünungen dar. Voraussetzung für einen flächigen Bewuchs durch selbstkletternde Pflanzen ist eine intakte, nicht allzu glatte Fassade. Untergründe aus Glas oder Kunststoff bzw. stark sandende oder reflektierende Flächen sind nicht geeignet. Bei hinterlüfteten Fassaden ist besondere Vorsicht geboten, da Pflanzen mit einem negativen Phototropismus¹ durch ihre Tendenz, in den Hinterlüftungsspalt hineinzuwachsen, aufgrund des Dickenwachstums leicht zu Bauschäden führen können.

- mit Kletterhilfe

Bodengebundene Systeme mit Kletterhilfe sind insbesondere für solche Pflanzen geeignet, die ein Gerüst oder Ähnliches zum Festhalten benötigen. Dabei wird zwischen flächigen und linearen bzw. starren und flexiblen Kletterhilfen unterschieden. Bei flächigen Kletterhilfen ist im Sinne eines möglichst homogenen Bewuchses darauf zu achten, dass weder die Maschenweite (bei netzartigen Konstruktionen) zu eng noch der Stababstand (bei starren Konstruktionen) zu weit gewählt wird. Der Abstand der Kletterhilfe zur

¹ Negativer Phototropismus ist die Eigenschaft der Triebspitzen bzw. Haftorgane mancher Kletterpflanzen, Schatten zu suchen und somit in dunkle Ritzen und Spalte zu wachsen.

Fassade sollte grundsätzlich mindestens 10 cm bzw. bei Pflanzen mit starkem Dickenwachstum mindestens 20 cm betragen.

2.2.2.2 Wandgebundene Systeme

Wandgebundene Begrünungssysteme zeichnen sich dadurch aus, dass die Pflanzen keinen direkten Kontakt zum gewachsenen Boden besitzen. In der Regel ist dafür eine Art Unterkonstruktion zur Befestigung der Begrünungselemente an der Fassade erforderlich. Die einzige Ausnahme hiervon stellen am Boden stehende, unten geschlossene Tröge dar. Unterschieden werden grundsätzlich Systeme mit teilflächigem und vollflächigem Vegetationsträger [LEI16]:

- teilflächiger Vegetationsträger

Bei einer teilflächigen wandgebundenen Fassadenbegrünung handelt es sich meist um Systeme aus an der Fassade befestigten Blumentrögen. Hierbei wird zwischen punktuellen (einzelne Tröge) und linearen Systemen (aneinandergereihte Tröge oder Rinnen) unterschieden.

- vollflächiger Vegetationsträger

Vollflächige wandgebundene Fassadenbegrünungen bestehen aus einem flächenhaft durchgängigen Substratkörper. Dabei kann der Winkel der Pflanzenballen bezogen auf die Fassade variieren. Typische Vertreter dieser Gruppe sind die modularen Begrünungselemente der bekannten Systemanbieter (z.B. Fa. Optigrün® und Fa. 90^{DE}GREEN®).

2.2.3 Brandschutzbestimmungen bei Fassadenbegrünungen

Wie für hinterlüftete Fassaden gilt auch für Fassadenbegrünungen nach der OIB-Richtlinie 2 [OIB15] die Anforderung, dass jedenfalls sichergestellt werden muss, dass die Schutzziele „wirksame Einschränkung der Brandweiterleitung“ und „wirksame Einschränkung des Herabfallens von Fassadenteilen“ erfüllt werden. Aus diesem Grund sind ab Gebäudeklasse 4 (Fluchtniveau über sieben Meter) Rankhilfen aus nichtbrennbaren Materialien (z.B. Metall) zu verwenden. Je nach konkreter Ausführung und Pflanzenart kann, wie bei hinterlüfteten Fassaden, die Anordnung von geschoßweisen Brandsperren erforderlich sein. Fassadenbegrünungen, die auf maximal drei Geschoße

beschränkt bleiben, bzw. die Gebäudeklassen eins bis drei (Fluchtniveau nicht mehr als sieben Meter) sind von dieser Anforderung ausgenommen [OIB15]. Für Hochhäuser (Fluchtniveau > 22 m) ist in jedem Fall eine Einzelfallprüfung nach OIB-Richtlinie 2.3 [OIB15a] durchzuführen.

Bei fassadengebundenen Systemen ist, im Unterschied zu bodengebundenen Systemen mit Kletterpflanzen, jedenfalls das Brandverhalten der im System verwendeten Materialien (ohne Pflanzen) nachzuweisen. Ab Gebäudeklasse 4 ist zusätzlich entweder eine Prüfung nach ÖNORM B 3800-5 oder ein Brandschutzkonzept erforderlich [LEI16]. Auch die mit dem Pflanzengewicht aufgrund des Totholzanteils zunehmende Brandlast einer Begrünung sollte in der Planung berücksichtigt werden, da Fahrlässigkeit zum Ausschluss von Versicherungsleistungen führen kann [PFO16].

Allgemein sind Fassadenbegrünungen ordnungsgemäß zu pflegen und in einem gesunden Zustand zu erhalten. Entsprechende Pflegemaßnahmen sowie eine Regelung der Zuständigkeit sind im Bauwerkshandbuch festzuhalten. Sollten größere Pflanzenflächen absterben, sind diese umgehend zu entfernen, um ein plötzliches Herabfallen zu verhindern [LIE89].

2.2.4 statische Aspekte von Fassadenbegrünungen

Das Eigengewicht von Fassadenbegrünungspaneelelen beträgt in etwa 80 kg/m² bis 120 kg/m² [DEG17, OPT17, TEC17]. Das Holzgewicht von Kletterpflanzen variiert stark je nach Pflanze und reicht von ca. 20 kg (Waldrebe) bis über 800 kg (Blauregen) [LEI16]. Im Allgemeinen sind die in die Fassade einzuleitenden Flächenlasten bei bodengebundener Begrünung jedoch deutlich geringer als bei wandgebundener.

Aufgrund des hohen Eigengewichtes insbesondere von wandgebundener Fassadenbegrünung ist der statischen Belastbarkeit der Fassade besonderes Augenmerk zu schenken. Zusätzlich zum Eigengewicht sind veränderliche Einwirkungen wie Schnee-, Eis- und Windlasten zu berücksichtigen. Außerdem muss auf allfällige thermische Spannungen z.B. zwischen Putz und Klettergerüst geachtet werden (siehe auch Kapitel 2.1.3) [LEI16].

2.2.5 Befestigungen von Fassadenbegrünungen

Für die wandgebundene Montage von Begrünungs-Trögen sind massive Stahlkonsolen erforderlich, die jedenfalls durch einen Statiker projektspezifisch bemessen werden müssen. Aus diesem Grund erfolgt an dieser Stelle keine nähere Ausführung.

Die Befestigung von Fassadenbegrünungs-Paneelen erfolgt analog zu hinterlüfteten Fassaden mithilfe von Konsolen (Wandabstandhaltern) und einer entsprechenden vertikalen und/oder horizontalen Unterkonstruktion, in welcher die Paneele eingehängt werden können. Aufgrund des hohen Gewichtes der Paneele sollte der Abstand zwischen Verankerungsgrund (z.B. Stahlbeton) und Paneel maximal 20 cm betragen [BRO17]. Außerdem ist es ratsam, die Unterkonstruktion bis zum Boden zu führen und auf ein entsprechend dimensioniertes Fundament zu stellen, um die Momenten-Belastung der Konsolen zu reduzieren.

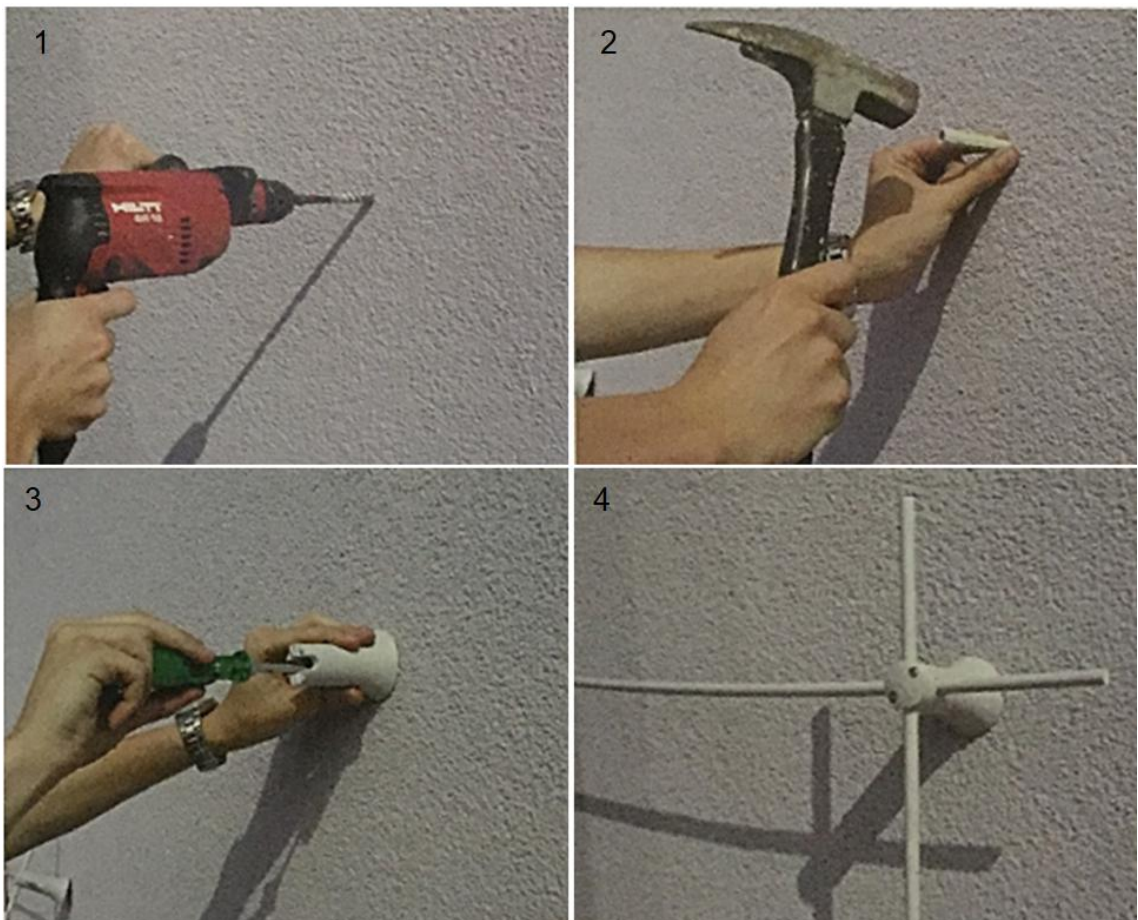


Abb. 2: Montage eines Klettergerüsts an einer ungedämmten Betonwand: 1. Loch bohren, 2. Dübel einschlagen, 3. Abstandhalter anschrauben, 4. Rankstäbe befestigen. © Brandmeier Begrünungssysteme, Inzlingen [GUN04]

Bei bodengebundenen Fassadenbegrünungen mit Kletterhilfen sind wesentlich schlanker dimensionierte Befestigungselemente möglich, da diese lediglich das Eigengewicht der Pflanze selbst (ohne Substrat etc.) aufzunehmen haben. Ein einfaches, von jedem Hobbyhandwerker umsetzbares Beispiel der Montage eines Klettergerüsts an einer ungedämmten Betonwand zeigt die obenstehende Bilderfolge (Abb. 2). Bei einer außenseitig gedämmten Wand mit WDVS muss im ersten Arbeitsschritt die Dämmung aufgeschnitten werden, bevor der Verankerungsgrund angebohrt und die Gewindestange eingeklebt werden kann (Abb. 3). Mithilfe einer Stützhülse kann nun die Distanz zwischen Verankerungsgrund und Abstandhalter überbrückt werden. Nach Einlage eines Dichtrings wird schlussendlich der Abstandhalter angeschraubt [GUN04].

Grundsätzlich sind bei der Montage von Klettergerüsten die Einbauhinweise des Systemanbieters zu beachten. Dies gilt auch für die maximal zulässige Belastung je Befestigungspunkt bzw. die erforderliche Anzahl an Befestigungspunkten je Quadratmeter. Außerdem ist die ausreichende statische Tragfähigkeit der betreffenden Außenwand vorab durch eine fachkundige Person feststellen zu lassen. Während Stahlbetonwände im Allgemeinen ausreichende Tragreserven für die Anbringung einer bodengebundenen Fassadenbegrünung mit Klettergerüst besitzen, ist z.B. bei Holzständerwänden bzw. Außenwänden aus Hochlochziegeln eine Einzelfallprüfung erforderlich.

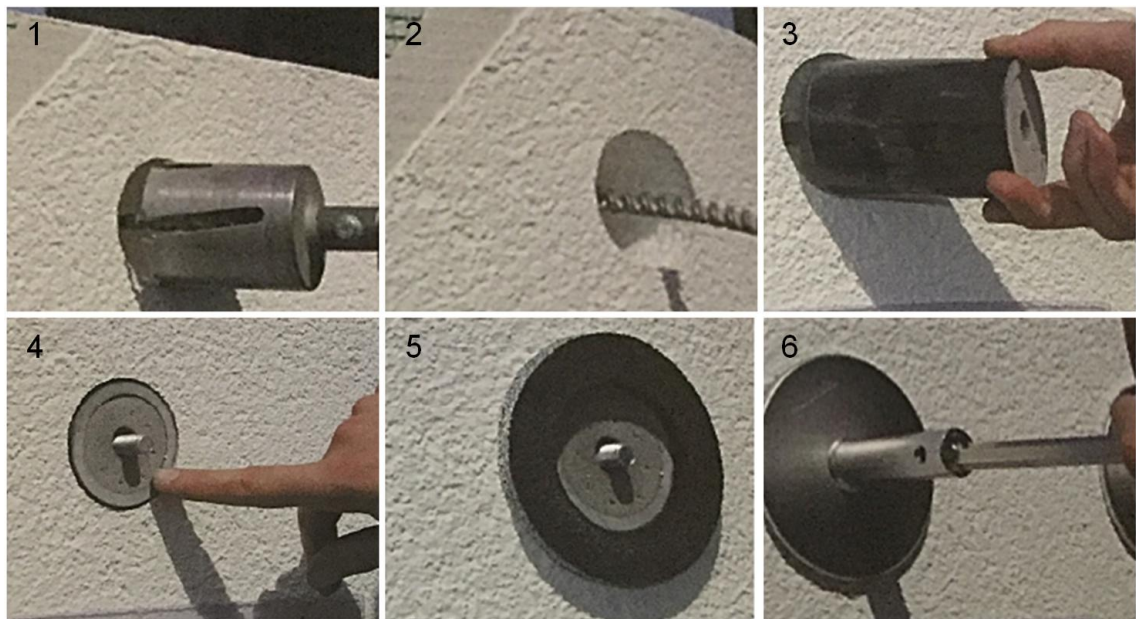


Abb. 3: Montage eines Klettergerüsts an einer Außenwand mit WDVS: 1. Dämmung aufschneiden, 2. Loch in den Verankerungsgrund bohren, 3. Stützhülse in die Dämmebene einsetzen, 4. Gewindestange einkleben, 5. Dichtring anlegen, 6. Distanzhalter aufsetzen und befestigen. © Brandmeier Begrünungssysteme, Inzlingen [GUN04]

Bei größerem Abstand der Kletterhilfe vom Verankerungsgrund (z.B. bei großen Dämmstärken bzw. bei Verwendung von starkwüchsigen Kletterpflanzen) können jedoch auch massivere Konsolen sowie eine Aufständering auf einem eigenen Fundament erforderlich sein (Abb. 4). Dabei ist bei der Dimensionierung des Klettergerüsts für starkwüchsige Pflanzen besonders auf mögliche Zwängungskräfte an Konsolen und Kletterstäben zu achten.

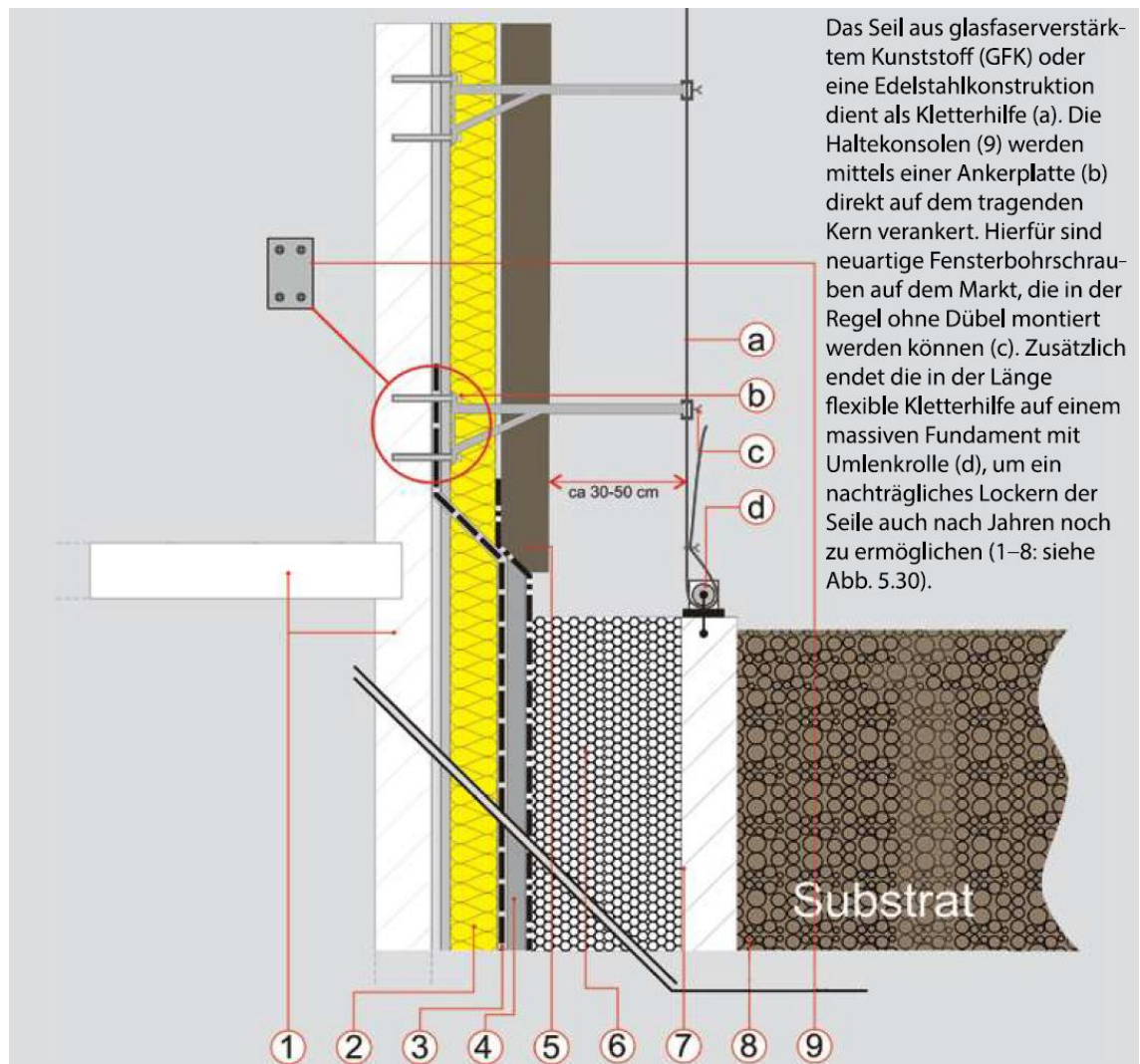


Abb. 4: Montage eines Klettergerüsts an einer gedämmten Wand mit hinterlüfteter Fassade [KOH12]

Nachfolgend werden drei ausgewählte Systeme modularer wandgebundener Fassadenbegrünungen vorgestellt. In Kapitel 5 wird bei der Berechnung der Wärmebrücken von Unterkonstruktionen von Fassadenbegrünungen wieder auf diese Systeme zurückgegriffen.

2.2.6 Beispiele ausgewählter Systemanbieter für wandgebundene Fassadenbegrünungen

2.2.6.1 Kassettensystem der Fa. Optigrün®

Die Optigrün®-Systemlösung „Fassadengarten®“ (Abb. 5) ist ein flächiges, wandgebundenes Fassadenbegrünungssystem bestehend aus substratgefüllten Aluminiumkassetten, die als vorgehängte, hinterlüftete Fassade montiert werden. Die Pflanzen werden in die vorbestimmten Ausnehmungen der Kassetten eingesetzt, sodass sie rückseitig direkt mit dem für die Verteilung des Wassers zuständigen Kapillarlvlies in Berührung kommen. Die Wasserzufuhr erfolgt dabei computergesteuert mittels Tropfbewässerung, deren Leitungen in den speziell profilierten Einhangschiene verlaufen [OPT15].

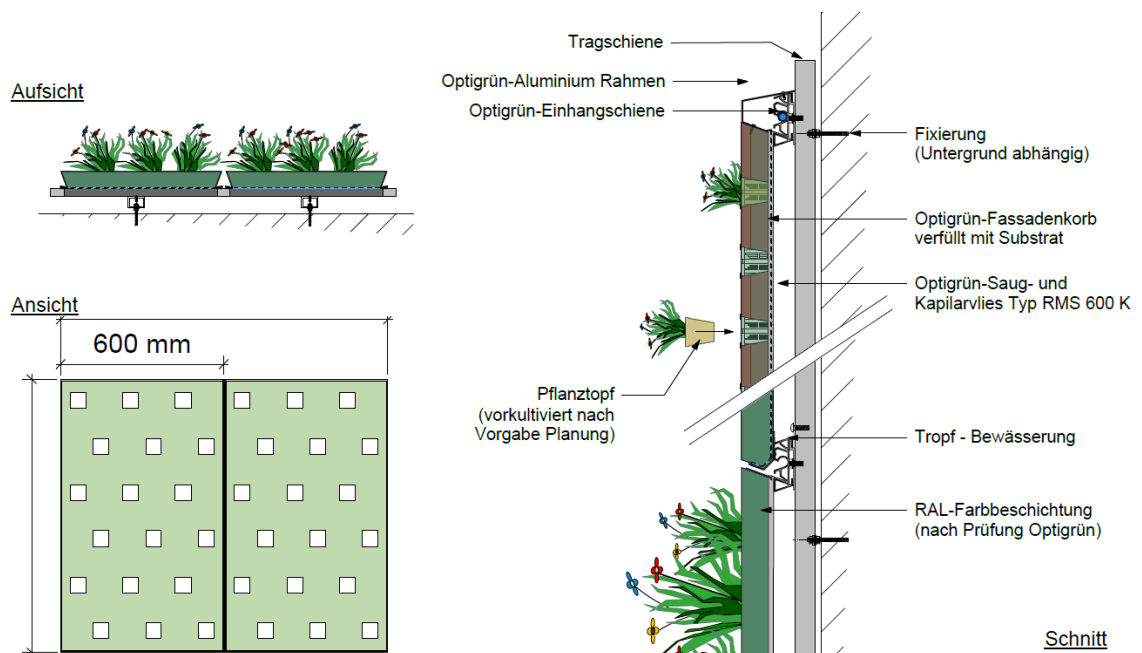


Abb. 5: Prinzipskizze der Optigrün®-Systemlösung Fassadengarten® © Optigrün international AG [OPT13]

Das Gewicht der Aluminiumkassetten alleine beträgt je nach Füllmaterial 50-83 kg/m². Zur Ermittlung der erforderlichen Tragfähigkeit der als Verankerungsgrund dienenden Außenwand müssen sowohl das Pflanzengewicht als auch die standortspezifischen Zuschläge für Wind-, Schnee- und Eislasten sowie Lasten aus thermischen Längenänderungen und Imperfektionen hinzugerechnet werden. Die Aufbaustärke des Gesamtsystems inklusive Unterkonstruktion beträgt 15 cm, bei Direktmontage ohne vertikale Unterkonstruktion 11 cm [OPT15].

2.2.6.2 Trogsystem der Fa. Techmetall

Das Grünwand-Begrünungssystem der Firma Techmetall besteht aus einer nicht brennbaren Metallkonstruktion aus Aluminium oder Edelstahl mit rinnenförmigen Pflanztrögen mit Trapez-Profil (Abb. 6). In diese Profile wird ein Speicher- und Filtervlies eingelegt, das zur Wasserspeicherung und -verteilung sowie zur Verhinderung des Auswaschens von Feinteilen dient. Die Pflanzensamen werden in ein spezielles Substrat basierend auf Recyclington aus gebrochenen Dachziegeln eingesetzt. Die Bewässerung erfolgt entweder von Hand, durch Einleitung von Regenwasser oder mithilfe einer automatischen Bewässerungsanlage. Ein spezielles Kaskadensystem sorgt für eine effektive Verteilung des Wassers [TEC17a].

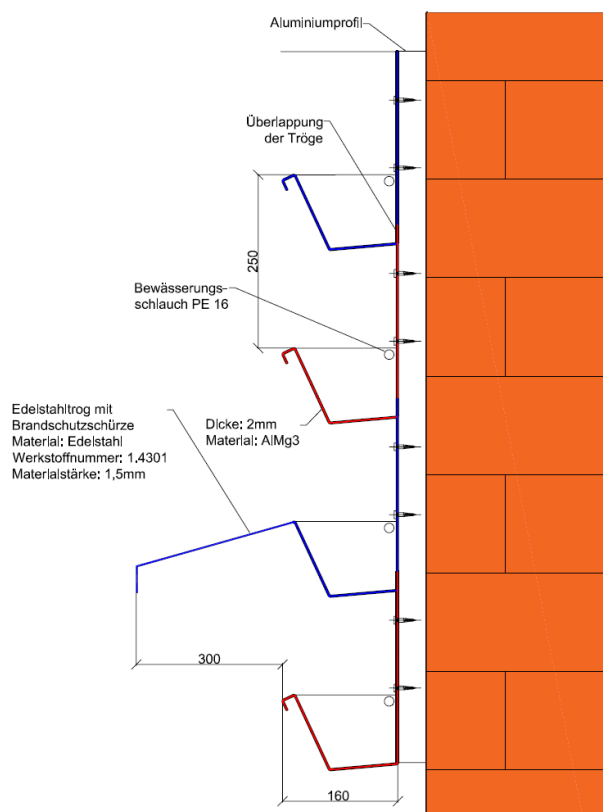


Abb. 6: Prinzipskizze des Wandbegrünungssystems der Fa. Techmetall [TEC17b]

Das Gewicht der befüllten Tröge beträgt ca. 22 kg/m. Bei einem vertikalen Trogabstand von 25 cm ergibt sich ein Gesamtgewicht von ca. 88 kg/m², welches durch den Verankerungsgrund aufzunehmen ist. Bei Verwendung größerer Pflanztröge (mit 30 bzw. 37 kg/m) steigt das Gesamtgewicht der Grünfassade entsprechend an. Die Tiefe der Tröge beträgt in der Regel 16 cm. Mit einem Wandabstand von ca. 5 cm ergibt sich eine Gesamtaufbaustärke von mindestens 21 cm [TEC17a, TEC17b].

2.2.6.3 Plattensystem der Fa. 90^{DE}GREEN®

Das Fassadenbegrünungssystem der Firma 90^{DE}GREEN® (Abb. 7) unterscheidet sich von den zuvor vorgestellten Systemen insbesondere durch das Vorhandensein einer in das System integrierten Wärmedämmung, wodurch sich dieses auch für Gegenden mit langen, kalten Winterperioden eignet. Anstelle von Substraten kommen spezielle Fasermatten zum Einsatz, wodurch die Notwendigkeit einer Vorkultivierung entfällt. Die temperatur- und feuchtigkeitsabhängig gesteuerte Bewässerung mit automatischer Düngung läuft das ganze Jahr über, wodurch das System nicht eingewintert werden muss [LIC18a].

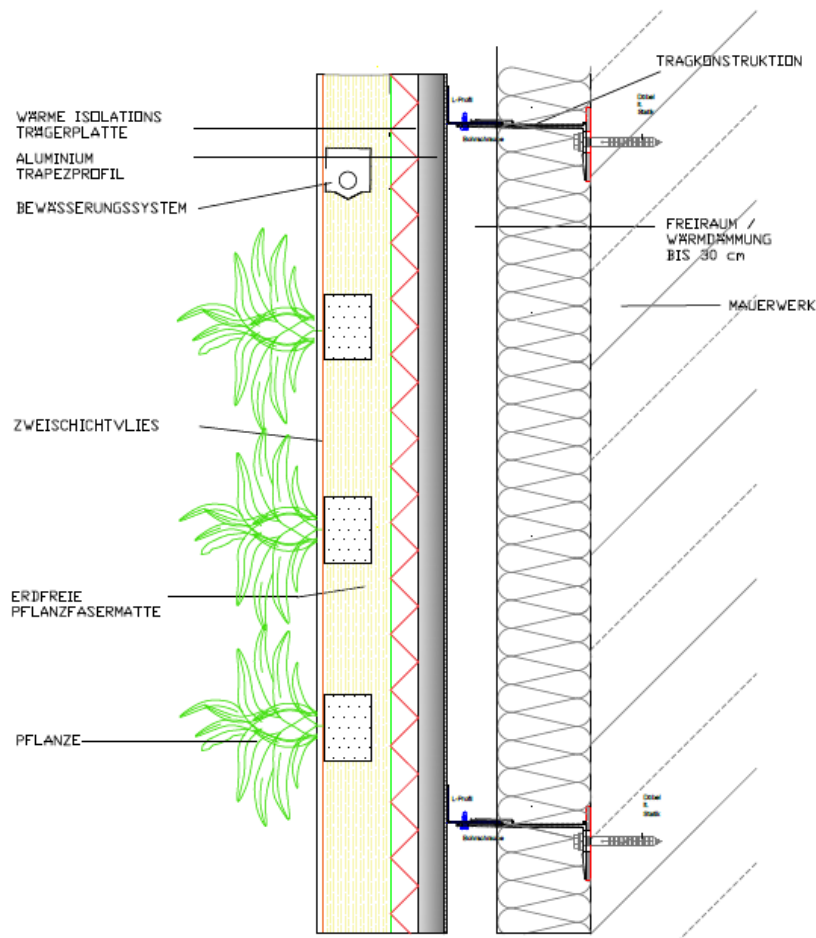


Abb. 7: Prinzipskizze des Wandbegrünungssystems der Fa. 90^{DE}GREEN® [LIC17]

Grundsätzlich ist das 90^{DE}GREEN®-System als vorgehängte, hinterlüftete Fassade konzipiert und kann an jeder Wand mit einer Traglast von mindestens 110 kg/m² montiert werden. Die Aufbaustärke des Begrünungspaneels beträgt ca. 14 cm. Der Abstand zwischen Paneel und Verankerungsgrund kann zur Anpassung an die Stärke der Wärmedämmung zwischen fünf und 30 cm eingestellt werden. Der Platzbedarf des Gesamtsystems beträgt somit als hinterlüftete Fassade mind. 19 cm [LIC18a].

Da im letzten Kapitel dieser Arbeit ein Konzept zur Kombination von Fassadenbegrünungselementen mit vorgestellten PV-Modulen erläutert wird, welches auf den Prinzipien von Doppelfassaden aufbaut, wird nachfolgend ein Überblick über die unterschiedlichen Arten von Doppelfassaden geboten.

2.3 Doppelfassaden

Bei Doppelfassaden handelt es sich um Außenwandkonstruktionen, bei denen vor oder hinter der eigentlichen Gebäudehülle eine zweite Verglasung angeordnet wird, sodass zwischen diesen beiden Ebenen eine Pufferzone entsteht [PEC02]. Somit setzen sich Doppelfassaden in konstruktiver Hinsicht aus drei Schichten zusammen: der Außenfassade, dem Fassadenzwischenraum sowie der Innenfassade. Während die Außenfassade meist aus einer Einfachverglasung besteht, wird die Innenfassade in der Regel aus Isolierglas ausgeführt. Der Fassadenzwischenraum dient als thermische Pufferzone und steht über Lüftungsöffnungen mit der Außenluft und/oder dem Innenraum in Verbindung. Durch solare Einstrahlung erzeugte Temperaturdifferenzen können somit zur natürlichen Belüftung sowohl des Innenraumes als auch des Fassadenzwischenraumes genutzt werden [KNA07].

Aufgrund der Schaffung einer vorgelagerten Pufferzone bringen Doppelfassaden, je nach konstruktiver Ausführung, weitere Vorteile in Bezug auf den Schallschutz sowie den winterlichen und sommerlichen Wärmeschutz mit sich: So besteht zum Beispiel die Möglichkeit, etwaige Sonnenschutzelemente windgeschützt im Fassadenzwischenraum unterzubringen, was insbesondere bei Hochhäusern eine wesentliche Erleichterung bedeutet.

In Abhängigkeit der Luftführung im Fassadenzwischenraum lassen sich Doppelfassaden in vier Hauptgruppen unterteilen: die Kastenfenster-Fassaden (Luftzirkulation nur innerhalb eines Fassadenelementes), die Schacht-Kasten-Fassaden (Abführung der Abluft über vertikale Schächte nach oben), die Korridorfassaden (horizontale Luftzirkulation im Fassadenzwischenraum auf Geschoßebene) sowie die Zweite-Haut-Fassaden (Luftzirkulation über die gesamte Fassadenfläche im durchgehenden Fassadenzwischenraum) [KNA07]. In den nachfolgenden Absätzen wird auf die einzelnen Typen genauer eingegangen.

2.3.1 Kastenfenster-Fassade

Als Urform der Doppelfassaden gilt das altbekannte Kastenfenster. In Analogie dazu werden bei der Kastenfenster-Fassade geschoßhohe, zweischalige Fassadenelemente nebeneinandergereiht, wobei die Außenfassade sowohl am oberen als auch am unteren Rand mit Öffnungsmöglichkeiten ausgestattet wird (Abb. 8). Um zu vermeiden, dass die Zuluftqualität oberer Geschoße durch die Abluft der darunterliegenden Geschoße beeinträchtigt wird, müssen die Ein- und Auslassöffnungen stets seitlich versetzt angeordnet werden.

In Bezug auf den Schallschutz sind nicht nur gegenüber dem Außenraum, sondern auch zu angrenzenden Mieteinheiten hin aufgrund der horizontalen und vertikalen Abschottung der einzelnen Elemente optimale Werte erreichbar [KNA07].

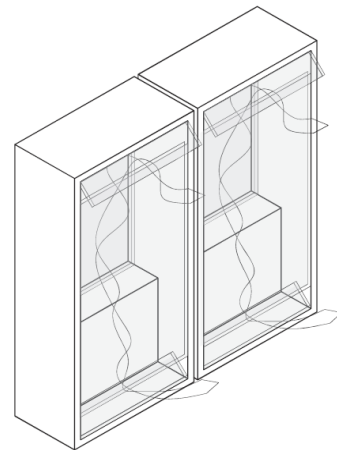


Abb. 8: Kastenfenster-Fassade [KNA07]

2.3.2 Schacht-Kasten-Fassade

Von der Kastenfensterfassade abgeleitet, ist die Schacht-Kasten-Fassade wohl die effizienteste, konstruktiv jedoch auch aufwendigste Version der Doppelfassade (Abb. 9). Dabei wird der Fassadenzwischenraum der zweischaligen Fassadenelemente in einen über mehrere Geschoße verlaufenden Fassadenschacht entlüftet. Aufgrund der Höhe des Schachtes entsteht durch die Kaminwirkung eine natürliche Luftbewegung, die eine energieintensive, mechanische Absaugung der Luft mittels Ventilatoren überflüssig macht.

Schacht-Kasten-Fassaden kommen mit einer geringen Anzahl an Öffnungen aus, wodurch der Schallschutz positiv beeinflusst wird. Jedoch sind allzu lange Schacht-Führungen zu vermeiden, da der Kamineffekt mit steigender Höhe zunimmt und es somit schnell zu unangenehmer Sogwirkung kommen kann [KNA07].

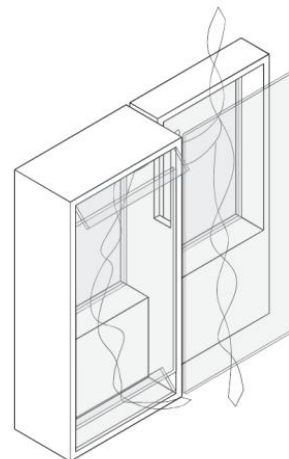


Abb. 9: Schacht-Kasten-Fassade [KNA07]

2.3.3 Korridorfassade

Korridorfassaden (Abb. 10) sind aus dem Antrieb heraus entstanden, das Problem des thermischen Lüftungskurzschlusses zu beheben.

Aus diesem Grund werden die Zu- bzw. Abluftöffnungen jeweils versetzt angeordnet, sodass horizontale Korridore aus miteinander verbundenen Fassadenzwischenräumen entstehen. Dies bringt jedoch schalltechnische Probleme mit sich, da es somit zu unerwünschten Schallübertragungen zu benachbarten Räumen kommen kann.

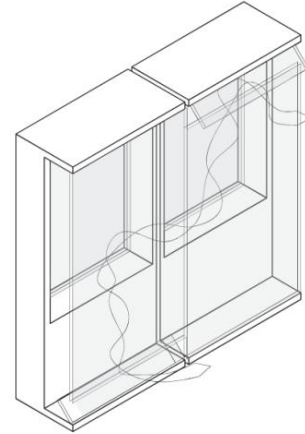


Abb. 10: Korridorfassaden [KNA07]

Aufgrund der durchgängigen vertikalen Abschottungen in Deckenebene ist der Korridor dafür bei entsprechender Dimensionierung begehbar und kann für Revisionsarbeiten an der Fassade genutzt werden [KNA07].

2.3.4 Zweite-Haut-Fassade

Zweite-Haut-Fassaden stellen die einfachste Lösung einer Doppelfassade dar. Hierbei wird lediglich eine zweite Glasfassade vor das Gebäude gestellt, die den Fassadenzwischenraum nicht gliedert, sondern eine durchgängige Luftschicht zwischen den beiden Fassadenebenen erstellt, die das gesamte Gebäude umhüllt (Abb. 11). Lüftungsöffnungen sind ausschließlich im Fuß- und im Kopfbereich der Fassade vorgesehen, wodurch im Sommer ein gewisses Überhitzungsrisiko entsteht.

Bei Einbau von mechanischen Lüftungsanlagen empfiehlt es sich, den Fassadenzwischenraum im Winter ausschließlich als Zuluftfassade und im Sommer als Abluftfassade zu verwenden, da ansonsten aufgrund der Vermischung von Zu- und Abluft die Luftqualität im Fassadenzwischenraum zu den oberen Geschoßen hin kontinuierlich abnehmen würde.

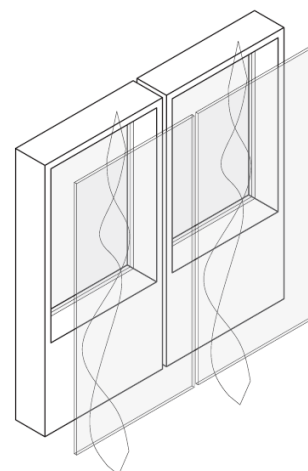


Abb. 11: Zweite-Haut-Fassaden [KNA07]

Problematisch ist auch bei diesem System der Schallschutz zwischen zwei aneinander grenzenden Räumen, da über den offenen Fassadenzwischenraum unerwünschte Schallreflexionen auftreten können. Dafür ist ein besonders guter Schallschutz gegenüber dem Außenraum gegeben, sodass sich Zweite-Haut-Systeme optimal für Gebiete mit hohem Außenlärmpegel eignen [KNA07].

Es folgt nun eine Beschreibung der verwendeten Berechnungsprogramme bzw. -verfahren sowie der jeweiligen Eingabedaten, um in weiterer Folge in den Kapiteln 4, 5 und 6 auf die Ergebnisse dieser Arbeit eingehen zu können.

3 Methoden

3.1 Wärmebrückenberechnungen mit AnTherm®

Einen zentralen Bestandteil dieser Arbeit bilden die Berechnungen der punktuellen Wärmebrücken-Verlustkoeffizienten χ der Befestigungen der vorgehängten Fassadenelemente. Die erforderlichen stationären dreidimensionalen Wärmebrückenberechnungen wurden mit der Software AnTherm® (Version 8.133.1.16375) von Tomasz P. Kornicki [ANT17] durchgeführt.

Im ersten Teil dieser Arbeit (Kapitel 4) wird der Einfluss der Dicke, der Wärmeleitfähigkeit sowie der baustatischen Beanspruchbarkeit des thermischen Trennelementes zwischen Konsole und Verankerungsgrund ermittelt. Dabei wird einerseits eine Aluminium- und andererseits eine Edelstahl-Unterkonstruktion betrachtet. Die erforderlichen technischen Daten zu den Konsolen wurden von der Firma Eurofox GmbH, einem Unternehmen der Hilti Gruppe, zur Verfügung gestellt. Die entsprechenden Produktbezeichnungen lauten „MacFox“ (Aluminium) [MAC17] bzw. „MFT-Fox“ (Edelstahl) [MFT17].

Im zweiten Teil dieser Arbeit (Kapitel 5) werden die Wärmebrücken von ausgewählten Fassadenbegrünungen berechnet sowie anhand der Erkenntnisse aus dem ersten Teil unterschiedliche Parameter (Dicke und Wärmeleitfähigkeit der thermischen Trennung sowie Material der Unterkonstruktion) variiert, um Möglichkeiten zur Verringerung der Wärmebrücken aufzuzeigen.

Im dritten und letzten Teil dieser Arbeit (Kapitel 6) wird ein numerisches Modell zur Kombination von wandgebundener Fassadenbegrünung und vorgestellten Photovoltaik-Modulen entwickelt, um die Vorteile beider Technologien gleichzeitig zu nutzen. Dafür wird ein vor die Fassade gestelltes bzw. mit massiven Konsolen an der tragenden Wand rückverankertes Stahlgerüst angenommen, welches die gesamten vertikalen (Eigengewicht, Nutzlast, Schnee und Vereisung) und horizontalen Lasten (Wind-/ Erdbebenbeanspruchung) sowie imperfektions- und temperaturbedingte Lasten auf die Konsolen verteilt bzw. nach Möglichkeit direkt in den Untergrund abführt. Dabei werden unterschiedliche Ausführungsvarianten von Schwerlastkonsolen mit der Software AnTherm® auf ihre Wärmebrückenwirkung hin untersucht und somit Aussagen über den zu erwartenden ΔU -Wert für die Außenwandkonstruktion getroffen.

Für die Berechnungen selbst wird die Auswahl eines 3D-Schichten-Modells getroffen. Hierbei wird das betrachtete Detail in mehrere Schichten aufgeteilt, die für sich als 2D-Wärmebrücken behandelt werden und erst in ihrer Gesamtheit eine 3D-Wärmebrücke bilden (eine genaue Erläuterung ist im AnTherm®-Handbuch bzw. auf deren Homepage zu finden [ANT17a]). Als Grundlage für die Wärmebrückenberechnungen dient dabei eine 2D-AutoCAD-Zeichnung eines Schnittes durch die entsprechende Konsole bzw. Fassaden-Unterkonstruktion. Diese wird mittels der DXF-Import-Funktion (Abb. 12) in das Programm AnTherm® eingefügt. Die Layer aus der AutoCAD-Zeichnung werden dabei übernommen und direkt den entsprechenden Materialien zugeordnet.

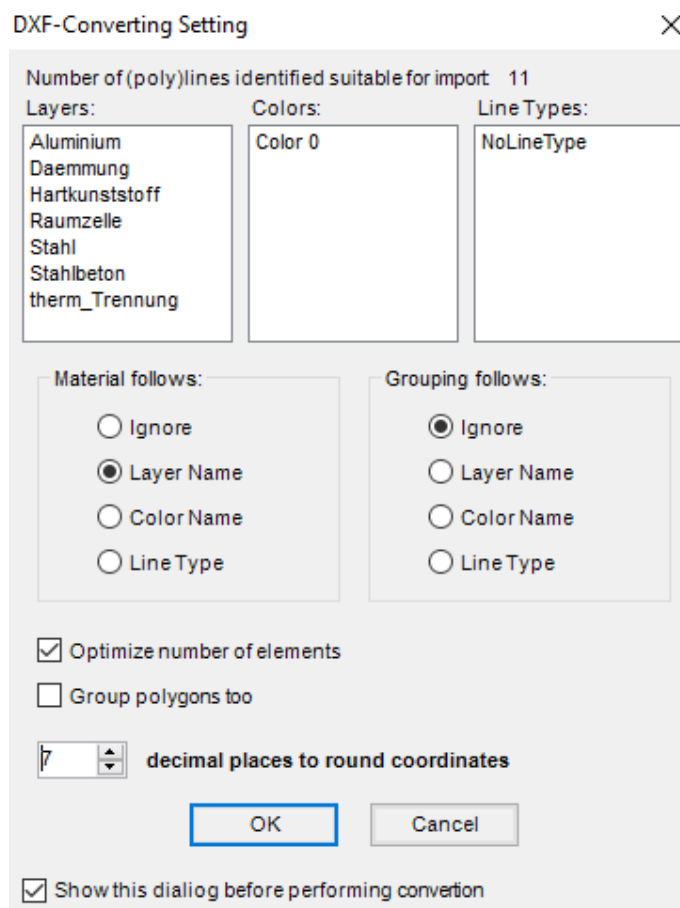


Abb. 12: Einstellungen im Programm AnTherm® für den DXF-Import

Die für die Wärmebrückenberechnungen erforderlichen bauphysikalischen Baustoff-Kennwerte sind in nachfolgender Tabelle (Tab. 2) aufgelistet. Als Quellen wurden dabei die ÖNORM B 8115-7:2013 [ONO13], die ON-V 31:2001 [ONV01] sowie das Merkblatt 821 zu rostfreiem Edelstahl [MER14] herangezogen. Die Wärmeleitfähigkeiten der Dämmung (EPS) sowie der thermischen

Trennung sind mit „variabel“ angegeben, da diese bei den Berechnungen zwischen 0,04 W/(m.K) und 0,022 W/(m.K) (Dämmung) bzw. 0,17 W/(m.K) und 0,02 W/(m.K) (thermische Trennung) variiert werden. Die Dichte und die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl der thermischen Trennung wurden einem Datenblatt eines Beispielproduktes entnommen [PUR17]. Die Kennwerte zum verwendeten Injektionsmörtel wurden vom Hersteller bereitgestellt [ENG18].

Tab. 2: bauphysikalische Baustoff-Kennwerte

Baustoff	Dichte ρ	Wärmeleitfähigkeit λ	Wärmespeicherkapazität c	Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ^*
-	kg/m ³	W/(m.K)	kJ/(kg.K)	-
Stahlbeton	2300	2,3	1	105
Vollziegel	1600	0,69	1	7,5
Vollholz	475	0,12	1,6	35
Dämmung (EPS)	15,8	variabel	1,45	60
Dämmung (MW)	105	0,036	1,03	1
Heraklith-BM	1000	0,39	1,1	8
Deckschicht / Putz	1300	0,49	1	20
Aluminium	2700	200	0,92	100.000**
Stahl	7850	60	0,48	100.000**
Edelstahl	7900	15	0,5	100.000**
Injektionsmörtel	1390	0,66	0,9	100
Hartkunststoff	1390	0,17	0,9	100.000**
thermische Trennung	550	variabel	k.A.***	8

* Bei Vorhandensein von Maximal- und Minimalwerten wurde der Mittelwert gebildet.

** Keine Angabe. Da als diffusionsdicht anzusehen, Annahme: $\mu = 100.000$

*** Keine Angabe. Da für die Berechnungen nicht von Belang, Annahme: $c = \text{null}$.

Einen maßgebenden Einfluss auf die Dauer der einzelnen Wärmebrückensimulationen und in weiterer Folge auf die Genauigkeit der Simulationsergebnisse haben die Feinraster-Parameter: Je kleiner die Anfangsschrittweite und je geringer der Vergrößerungsfaktor, desto größer ist die Anzahl der Zellen, in die das Detail zerlegt wird. Die Eingaben werden so gewählt, dass die Anzahl der Zellen ca. eine Million und die Berechnungszeit je Simulation in etwa fünf Minuten beträgt (Abb. 13).

Abb. 13: Einstellung der Feinraster-Parameter im AnTherm®

Von jeder Wärmebrückensimulation wurde ein Protokoll mit allen Eingabedaten und Ergebnissen erstellt. Für die weiteren Berechnungen wurden lediglich die χ -Werte aus den Protokollen entnommen. Ein beispielhaftes Berechnungsprotokoll von einer MacFox-Konsole (Medium) mit 5 mm thermischer Trennung ($\lambda = 0,08 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$) ist im Anhang (Kapitel 8.1) angeführt. Um die Richtigkeit der Wärmebrückenberechnungen zu überprüfen, wurden von der Firma Eurofox beispielhafte ΔU -Wert-Berechnungen zur Verfügung gestellt. Dabei hat sich gezeigt, dass die im Rahmen dieser Arbeit ermittelten χ -Werte im Mittel um ca. drei Prozent² erhöht sind. Die Berechnungen der Firma Eurofox sind ebenfalls im Anhang (Kapitel 8.2) zu finden.

² Bei der Konsole MacFox beträgt die Abweichung der Berechneten χ -Werte i.M. +19 %, bei der Konsole MFT-Fox i.M. -12 %.

Zusätzlich zum Einfluss der thermischen Trennung auf den punktuellen Wärmebrücken-Verlustkoeffizienten χ muss auch deren Einfluss auf die statische Tragfähigkeit der Konsolen überprüft werden. Die dafür erforderlichen Berechnungen wurden mit dem Programm C-FIX durchgeführt, wie im nächsten Kapitel erläutert wird.

3.2 Statik-Berechnungen mit C-FIX

Die statischen Berechnungen im ersten Teil dieser Arbeit wurden mit dem Programm C-FIX (Version 1.60.0.0) von der Firma Fischer durchgeführt [FIS18]. Primär dient dieses Programm der Ankerbemessung für Stahl- und Verbundanker in Beton. Neuerdings ist auch eine Bemessung von Ankern in Mauerwerk möglich [CFI17]. Wichtig zu beachten ist jedoch, dass sich die Berechnungen ausschließlich auf die statische Dimensionierung der Dübel beschränken. Eine ganzheitliche statische Betrachtung der Konsolen ist nicht erfolgt. In den meisten Fällen ist dies ausreichend, da die Dübel typischerweise das schwächste Glied der Unterkonstruktion darstellen. In Sonderfällen (z.B. großer Abstand zwischen den Konsolen) kann jedoch auch ein Versagen der Konsolen selbst maßgebend werden.

Für die Berechnungen wurde die Geometrie der zu untersuchenden Konsolen so genau wie möglich eingegeben, wobei softwarebedingt gewisse Anpassungen erforderlich waren. So musste z.B. auf die Bolzenanker von der Firma Fischer zurückgegriffen werden, da das Programm keine individuelle Eingabe der Anker ermöglicht. Außerdem musste die Dicke der Grundplatte erhöht werden, da ansonsten eine Fehlermeldung die Berechnung verhindert hätte. Es muss somit betont werden, dass die Ergebnisse der statischen Berechnungen der Dübel-Tragfähigkeit lediglich eine qualitative Aussage liefern können und keinesfalls für die quantitative Dimensionierung einer vorgehängten hinterlüfteten Fassade herangezogen werden können. Hierfür wäre eine Basisbemessung durch Ingenieurbüros bzw. die Konsultation von Spezialfirmen (z.B. Fa. Eurofox GmbH.) erforderlich.

Der Nutzen des Programmes C-FIX für diese Arbeit liegt somit in der Beurteilung der Veränderung der statischen Tragfähigkeit der Verankerungselemente, mit denen die Konsolen am Verankerungsgrund befestigt sind. Dabei

ist deren Tragfähigkeit einerseits von der Dicke und andererseits von der Druckfestigkeit der verwendeten thermischen Trennelemente abhängig. Eine höhere Druckfestigkeit hat jedoch meistens auch eine höhere Wärmeleitfähigkeit und somit eine geringere Wärmedämmwirkung zur Folge. Hier das richtige Verhältnis zu finden, ist ebenfalls ein Aspekt, der in dieser Arbeit untersucht werden soll. Die Angaben zur zulässigen Druckspannung wurden Produktdatenblättern von handelsüblichen thermischen Trennelementen entnommen (Tab. 3).

Tab. 3: zulässige Druckspannungen in Abhängigkeit von der Wärmeleitfähigkeit des thermischen Trennelementes

Wärmeleitfähigkeit λ	zulässige Druckspannung σ	Quelle
W/(m.K)	N/mm ²	-
0,17	25	[SEN17]
0,08	10	[THE17]
0,06	3,5	[COM17]
0,04	0,8	[COM17]
0,02	0,3	[SLE17]

3.3 Statik-Berechnungen mit RSTAB

Im letzten Teil dieser Arbeit wird ein numerisches Modell zur Kombination von Fassadenbegrünung und Photovoltaik entworfen. Zur Berechnung der Lagerreaktionen, die zur Dimensionierung der Konsolen benötigt werden, kommt die Statik-Software RSTAB der Dlubal Software GmbH in der Version 8.07.05 zur Anwendung. RSTAB eignet sich für die lineare und nichtlineare Berechnung von Schnittgrößen, Verformungen und Lagerreaktionen von 2D- oder 3D-Stabwerken aus Stahl, Beton, Holz, Aluminium und anderen Materialien [DLU18].

Eine detaillierte Beschreibung der Eingabedaten und Berechnungen ist in Kapitel 6 zu finden. Es wird daher an dieser Stelle nicht näher darauf eingegangen.

Nachfolgend wird ein Näherungsverfahren aus der ÖNORM EN ISO 6946 zur Berechnung von ΔU -Werten zufolge mechanischer Befestigungselemente innerhalb von Dämmschichten angeführt.

3.4 Näherungsverfahren für ΔU -Werte zufolge mechanischer Befestigungselemente gemäß ÖNORM EN ISO 6946

Zur groben Abschätzung bzw. als Vergleichswert zur Bestätigung von Wärmebrückensimulationen kann das Näherungsverfahren zur Ermittlung von ΔU -Werten zufolge mechanischer Befestigungselemente gemäß Anhang F der ÖNORM EN ISO 6946 [ONO15] herangezogen werden. Dabei ist der ΔU -Wert nach Gleichung (1) zu ermitteln.

$$\Delta U_f = \alpha \frac{\lambda_f A_f n_f}{d_1} \left(\frac{R_1}{R_{T,h}} \right)^2 \quad (1)$$

α	Koeffizient; mit $\alpha = 0,8 \times \frac{d_1}{d_0}$
λ_f	Wärmeleitfähigkeit des Befestigungselementes in W/(m.K)
n_f	Anzahl der Befestigungselemente je m ²
A_f	Querschnittsfläche eines Befestigungselementes in m ²
d_0	Dicke der Dämmschicht, die das Befestigungselement enthält, in m
d_1	Länge des Befestigungselementes, das die Dämmschicht durchdringt, in m
R_1	Wärmedurchlasswiderstand der von den Befestigungselementen durchdrungenen Dämmschicht in m ² .K/W
$R_{T,h}$	Wärmedurchgangswiderstand des Bauteiles ohne Berücksichtigung von Wärmebrücken in m ² .K/W

Da in dieser Gleichung thermische Trennungen der Unterkonstruktion (z.B. zwischen Grundplatte und Verankerungsgrund) nicht berücksichtigt werden, stellt das Ergebnis sozusagen den „worst case“ dar. Wie im weiteren Verlauf dieser Arbeit noch gezeigt wird, kann eine richtig dimensionierte thermische Trennung zu einer deutlichen Reduktion des ΔU -Wertes im Vergleich zu jenem aus Gleichung (1) führen.

Bei Befestigungssystemen mit Gewindestangen bzw. Schwerlastankern zur nachträglichen Montage von Fassadenbegrünungspaneele auf gedämmten Bestandswänden, bei denen die Dämmebene lediglich punktuell durch diese

metallischen Befestigungsmittel durchdrungen wird, ist eine zusätzliche thermische Trennung in der Regel nicht erforderlich. Der Querschnitt dieser Befestigungsmittel ist im Vergleich zu üblichen Konsolen für hinterlüftete Fassaden so gering, dass sich sowohl bei Berechnung nach Gleichung (1) als auch bei detaillierter Wärmebrückensimulation äußerst niedrige ΔU -Werte ergeben (im Detail siehe Kapitel 5.2).

Das nun folgende Kapitel beschäftigt sich mit der Beurteilung des Einflusses erhöhter thermischer Trennung und beinhaltet sowohl die zugehörigen bauphysikalischen Berechnungen (χ -Werte) als auch die erforderlichen statischen Berechnungen (Anzahl der Konsolen), um zum Schluss auf die zu vergleichenden ΔU -Werte zu kommen, welche Antworten auf die Frage der optimalen Dimensionierung der thermischen Trennung erlauben.

4 Beurteilung des Einflusses erhöhter thermischer Trennung

Im ersten Teil dieser Arbeit soll untersucht werden, inwiefern sich eine Veränderung der Dicke bzw. der Wärmeleitfähigkeit der thermischen Trennschicht zwischen Konsole und Verankerungsgrund auf den Wärmebrückenzuschlag ΔU der Wandkonstruktion auswirkt. Dabei wird einerseits die Dicke der thermischen Trennschicht zwischen 0 mm und 40 mm und andererseits deren Wärmeleitfähigkeit zwischen 0,17 W/(m.K) und 0,02 W/(m.K) variiert. Als Verankerungsgründe werden Stahlbeton, Vollziegel und Vollholz gewählt (siehe Tab. 4).

Tab. 4: Dicke, Wärmeleitfähigkeit und thermischer Widerstand der gewählten Verankerungsgründe

Verankerungsgrund	Dicke	Wärmeleitfähigkeit λ	thermischer Widerstand des Verankerungsgrundes R
-	cm	W/(m.K)	m ² .K/W
Stahlbeton	20	2,3	0,08
Vollziegel	30	0,69	0,43
Vollholz	16	0,12	1,33

Um die Anzahl der Berechnungen auf ein vernünftiges Maß zu beschränken, werden die Dicke und die Wärmeleitfähigkeit der Regeldämmung vorerst nicht variiert. Sämtliche Berechnungen in diesem Kapitel werden mit 16 cm EPS mit $\lambda = 0,04$ W/(m.K) durchgeführt. Auch bei den Konsolen selbst wird eine enge Auswahl getroffen. Insgesamt werden nur vier unterschiedliche Konsolen analysiert: je ein Gleit- (Ausführung „Medium“) und ein Festpunkt (Ausführung „Large“) aus Aluminium und aus Edelstahl (wie auch bereits in Kapitel 3.1 beschrieben).

Die hinterlüftete Fassadenbekleidung wird bei allen Berechnungen weggelassen, da deren Einfluss auf den Wärmedurchgangskoeffizienten insbesondere bei nichtmetallischen Materialien vernachlässigbar ist [BFE98]. Die Betrachtung beschränkt sich daher auf Verankerungsgrund, Dämmung, Konsole und Tragprofil (Abb. 14). Als Tragprofil wird ein L-Winkel mit den Abmessungen 45 mm x 45 mm x 2 mm gewählt, wobei der Winkel nicht in die Wärmedämmung hineinragt und dieser somit keine zusätzliche lineare Wärmebrücke darstellt.

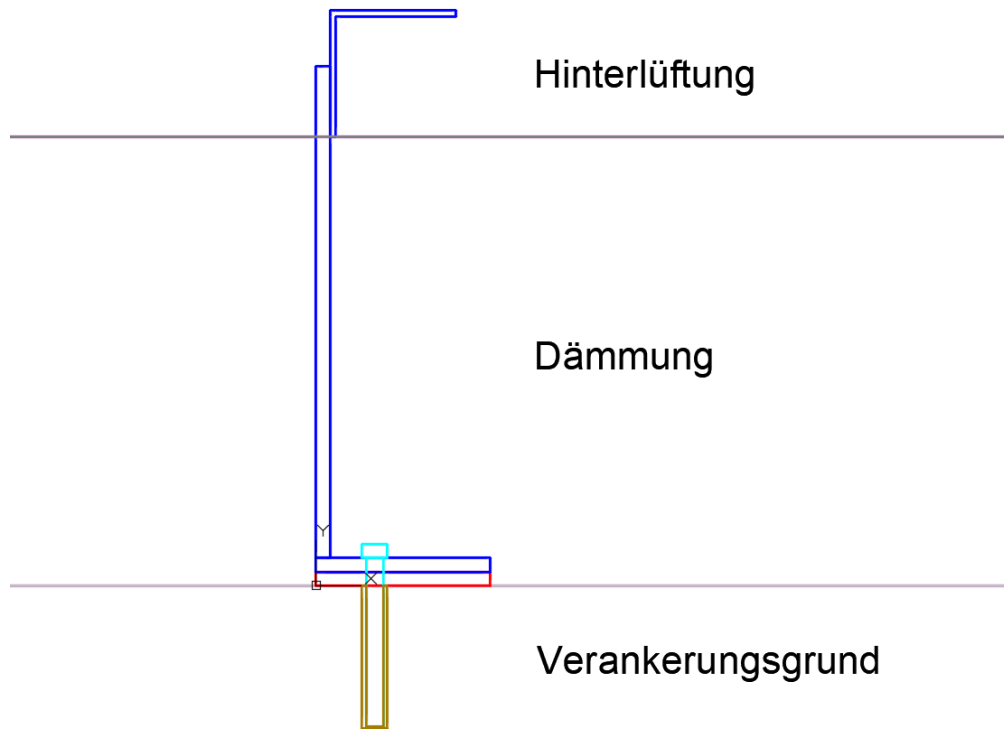


Abb. 14: AutoCAD-Zeichnung der Konsole MacFox als Grundlage für den DXF-Import in AnTherm®; rot: thermische Trennung; Abbildung um 90° gedreht

Die Wärmeübergangswiderstände werden auf beiden Seiten (innen und außen) gemäß ÖNORM EN ISO 6946 [ONO15] mit $0,13 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ angesetzt. Die Temperatur-Randbedingungen werden innen mit 22 °C und außen mit -8 °C festgelegt [BFE98], wobei diese keine Auswirkung auf das Ergebnis haben³. Des Weiteren werden die 3D-Modelle für die Wärmebrückenberechnungen von der betrachteten Konsole weg allseits nach einem Meter abgeschnitten, wobei adiabatische Schnittufer angenommen werden können.

Nachfolgend werden die Ergebnisse der 3D-Wärmebrückenberechnungen angeführt und die ermittelten χ -Werte miteinander verglichen.

4.1 χ -Werte der Konsolen bei erhöhter thermischer Trennung

In den folgenden Unterkapiteln werden die Wärmebrückenberechnungsergebnisse gegliedert nach den vier betrachteten Konsolen-Typen grafisch dargestellt. Dabei gibt es bei jeder Konsole vier Varianten der Dicke der thermischen Trennung: 5 mm, 10 mm, 20 mm und 40 mm. Die Ergebnisse werden jeweils mit der Variante ohne thermische Trennung verglichen. Stand

³ Die Einheit des χ -Wertes ist W/K – somit ist dieser unabhängig von der Temperaturdifferenz.

der Technik sind in Österreich ca. 5 mm thermische Trennung mit einer Wärmeleitfähigkeit $\lambda = 0,08 \text{ W/(m.K)}$ [EUR17] [HIL17] [MAC17a] [STO17] [STY17]. Die nachfolgenden Abbildungen sollen somit aufzeigen, wie weit sich die χ -Werte durch den Einsatz besserer bzw. dickerer thermischer Trennelemente reduzieren lassen.

4.1.1 Aluminium-Konsole MacFox Medium

Wie bereits erwähnt ist die Konsole „MacFox Medium“ eine Aluminiumkonsole der Firma Eurofox GmbH, die innerhalb des Systems als Gleitpunkt fungiert. Die Festpunkte werden durch die im nächsten Abschnitt behandelte Konsole „MacFox Large“ gebildet.

Bei der Eingabe in AnTherm® müssen unterschiedliche „Schichten“ definiert werden (Tab. 5), die aneinandergereiht in Summe das gewünschte 3D-Modell ergeben. Man kann sich diese Schichten also wie orthogonale Schnitte durch den betrachteten Wandabschnitt vorstellen. Jedem dieser zweidimensionalen Schnitte wird eine gewisse Dicke zugewiesen, anhand derer das Programm schlussendlich das 3D-Modell generiert. Da bei dieser Vorgehensweise keine Rundungen oder Kreise eingegeben werden können, muss der Kreisquerschnitt der Schrauben und Dübel auf einen flächenäquivalenten Rechteckquerschnitt umgerechnet werden.

Tab. 5: MacFox Medium - Eingabe Schichten in AnTherm®

Nr.	Schicht	Dicke in mm
1	Tragprofil	1.000,00
2	Konsole	35,55
3	Dübel	1,35
4	Schraube	6,20
5	Dübel	1,35
6	Konsole	35,55
7	Tragprofil	1.000,00
-		gesamt: 2.080,00

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die Verringerung der χ -Werte durch eine reduzierte Wärmeleitfähigkeit der thermischen Trennelemente in Abhängigkeit des thermischen Widerstandes des Verankerungsgrundes bei

5 mm (Abb. 15), 10 mm (Abb. 16), 20 mm (Abb. 17) und 40 mm (Abb. 18) Dicke der thermischen Trennung.

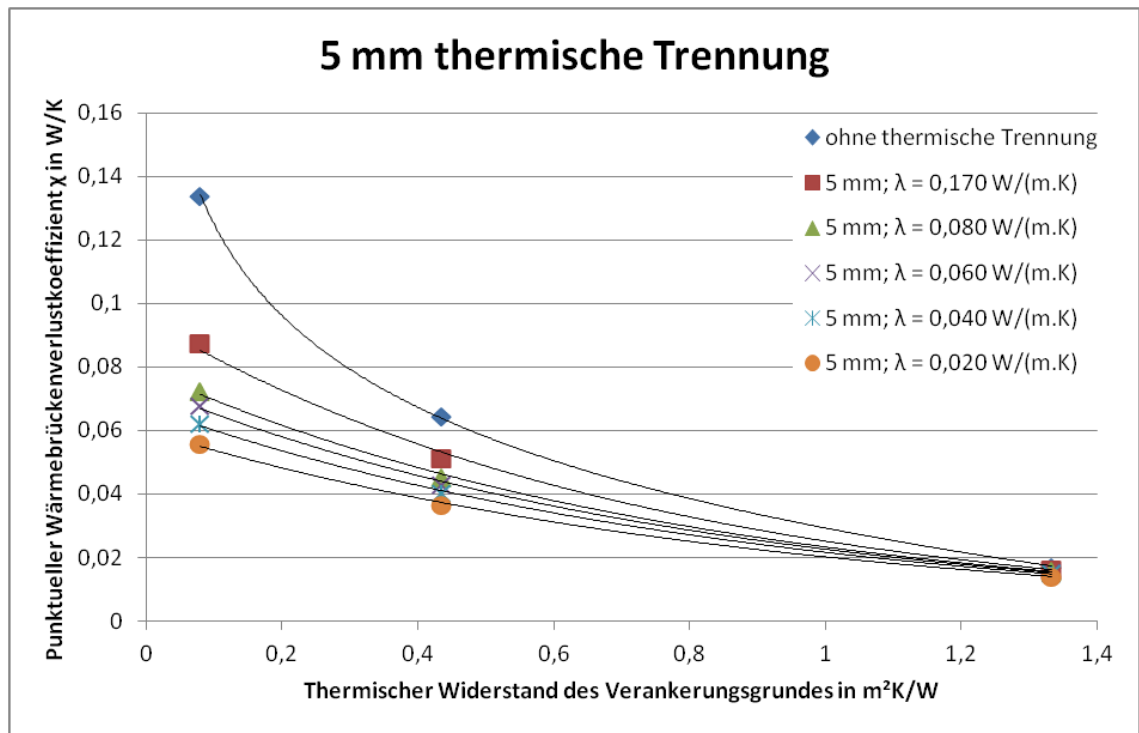


Abb. 15: χ -Werte der Aluminium-Konsole „MacFox Medium“ bei 5 mm thermischer Trennung (λ variabel) in Abhängigkeit des thermischen Widerstandes des Verankerungsgrundes

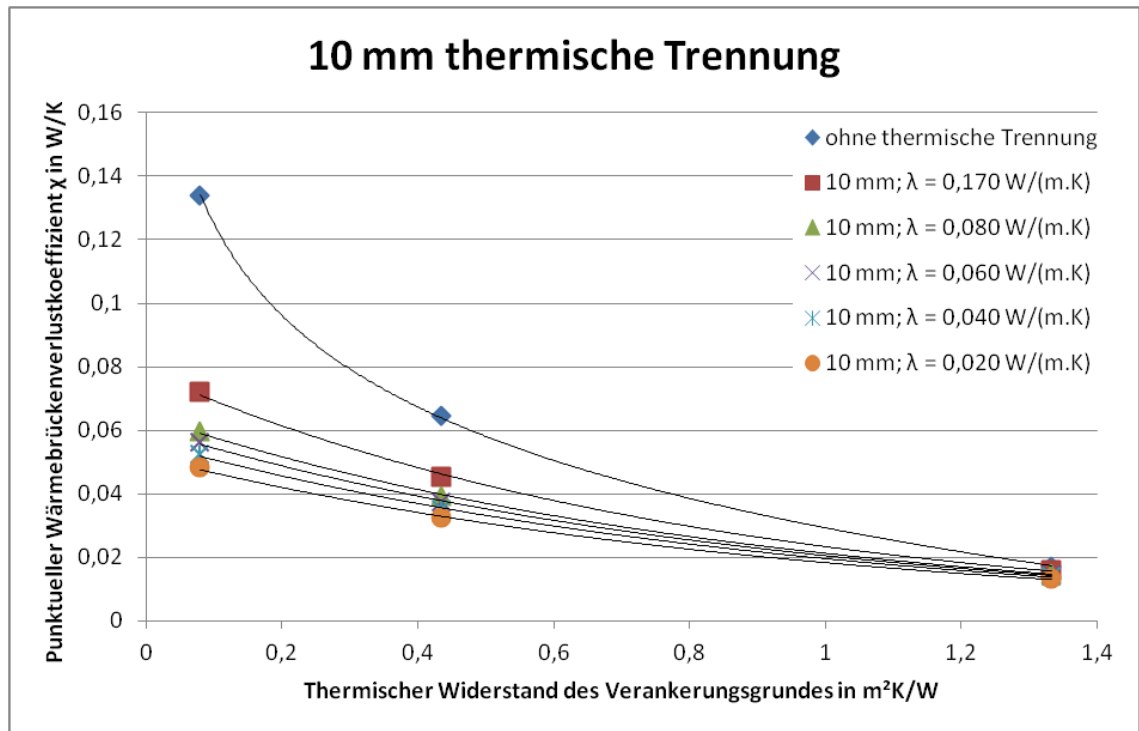


Abb. 16: χ -Werte der Aluminium-Konsole „MacFox Medium“ bei 10 mm thermischer Trennung (λ variabel) in Abhängigkeit des thermischen Widerstandes des Verankerungsgrundes

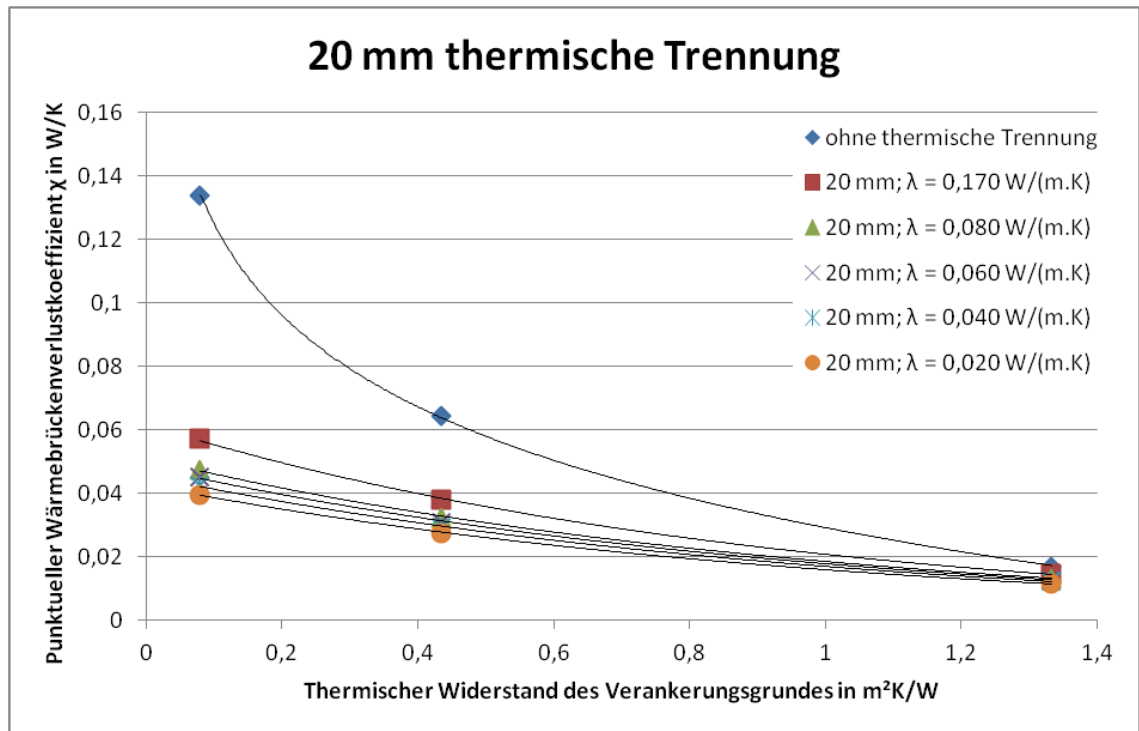


Abb. 17: χ -Werte der Aluminium-Konsole „MacFox Medium“ bei 20 mm thermischer Trennung (λ variabel) in Abhängigkeit des thermischen Widerstandes des Verankerungsgrundes

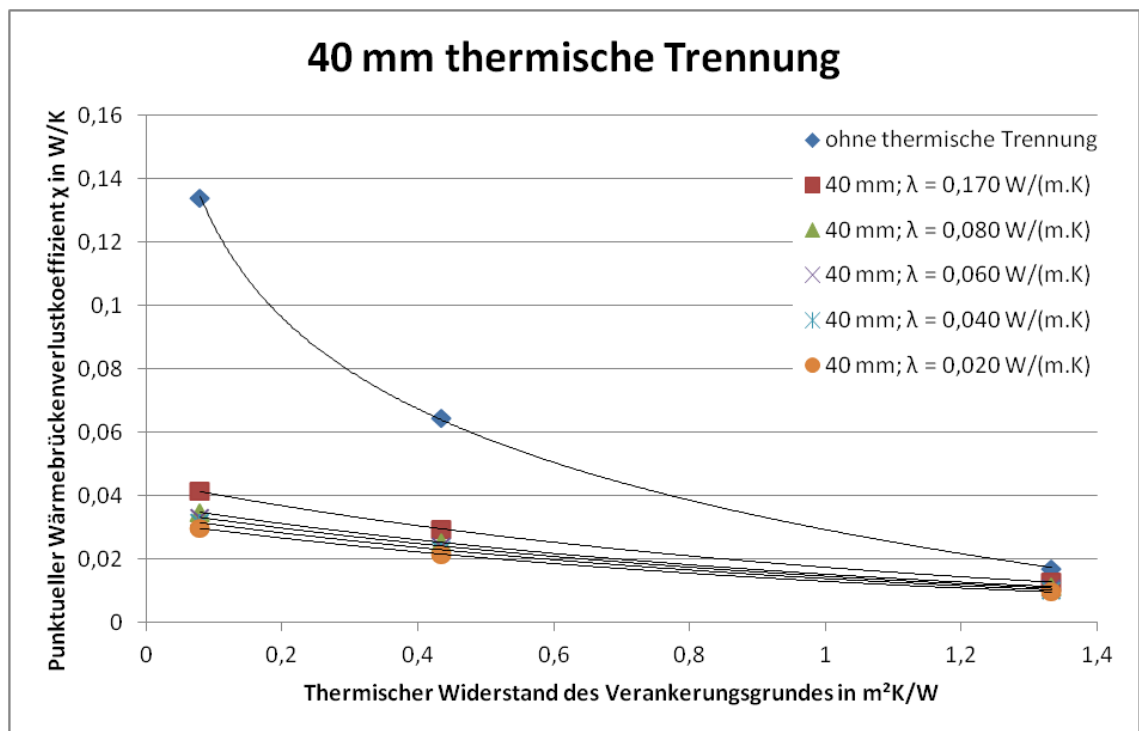


Abb. 18: χ -Werte der Aluminium-Konsole „MacFox Medium“ bei 40 mm thermischer Trennung (λ variabel) in Abhängigkeit des thermischen Widerstandes des Verankerungsgrundes

Grundsätzlich lässt sich erkennen, dass mit zunehmender Dicke der thermischen Trennung eine deutliche Verringerung der χ -Werte im Vergleich zur Variante ohne thermische Trennung möglich ist. Dabei sind die Verringerung der χ -Werte sowie die χ -Werte in absoluten Zahlen bei geringem thermischen Widerstand des Verankerungsgrundes (z.B. bei Stahlbeton) wesentlich größer als bei hohem thermischen Widerstand (z.B. Holz).

4.1.2 Aluminium-Konsole MacFox Large

Bei der Konsole „MacFox Large“ setzt sich das 3D-Modell aus wesentlich mehr Schichten zusammen, da die Konsole mit drei Schrauben im Verankerungsgrund befestigt wird (Tab. 6).

Tab. 6: MacFox Large - Eingabe Schichten in AnTherm®

Nr.	Schicht	Dicke in mm
1	Tragprofil	1.000,00
2	Konsole	25,55
3	Dübel	1,35
4	Schraube	6,20
5	Dübel	1,35
6	Konsole	41,10
7	Dübel	1,35
8	Schraube	6,20
9	Dübel	1,35
10	Konsole	41,10
11	Dübel	1,35
12	Schraube	6,20
13	Dübel	1,35
14	Konsole	25,55
15	Tragprofil	1.000,00
-		gesamt: 2.160,00

Die Ergebnisse der Wärmebrückenberechnungen sind sehr ähnlich zu den vorherigen Abbildungen der Konsole „MacFox Medium“, mit dem Unterschied, dass hier die χ -Werte im Mittel aufgrund der größeren Abmessungen der Konsole ca. doppelt so groß sind (Abb. 19, Abb. 20, Abb. 21 und Abb. 22).

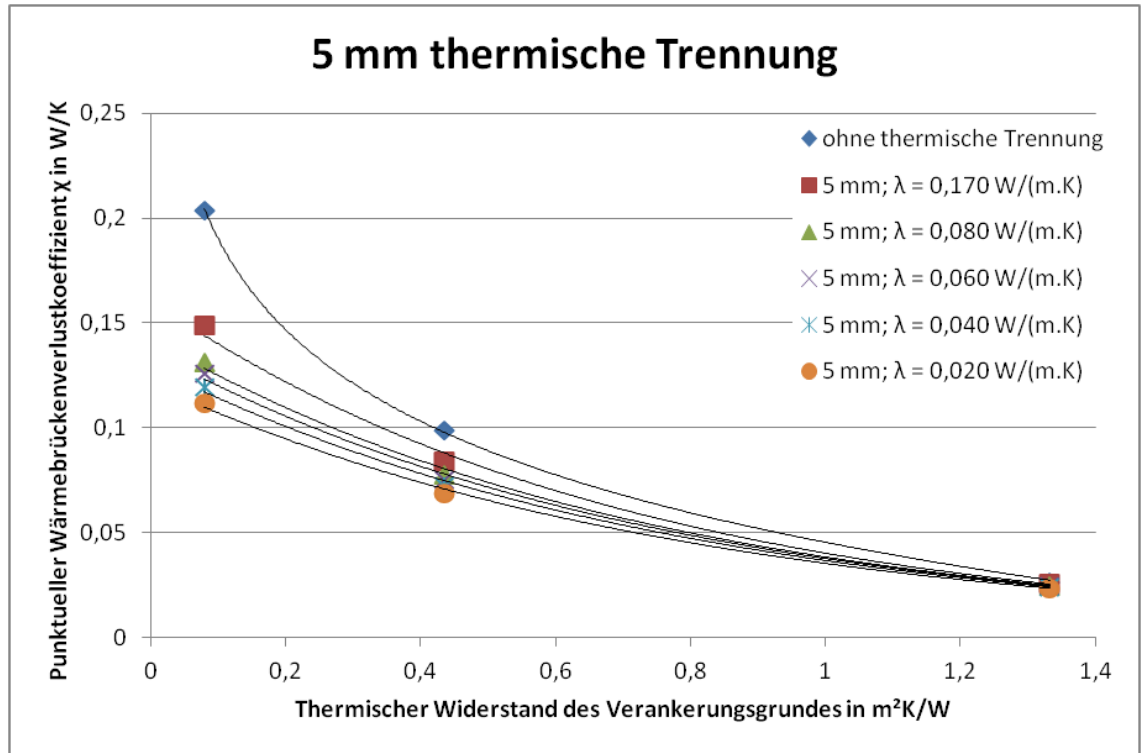


Abb. 19: χ -Werte der Aluminium-Konsole „MacFox Large“ bei 5 mm thermischer Trennung (λ variabel) in Abhängigkeit des thermischen Widerstandes des Verankerungsgrundes

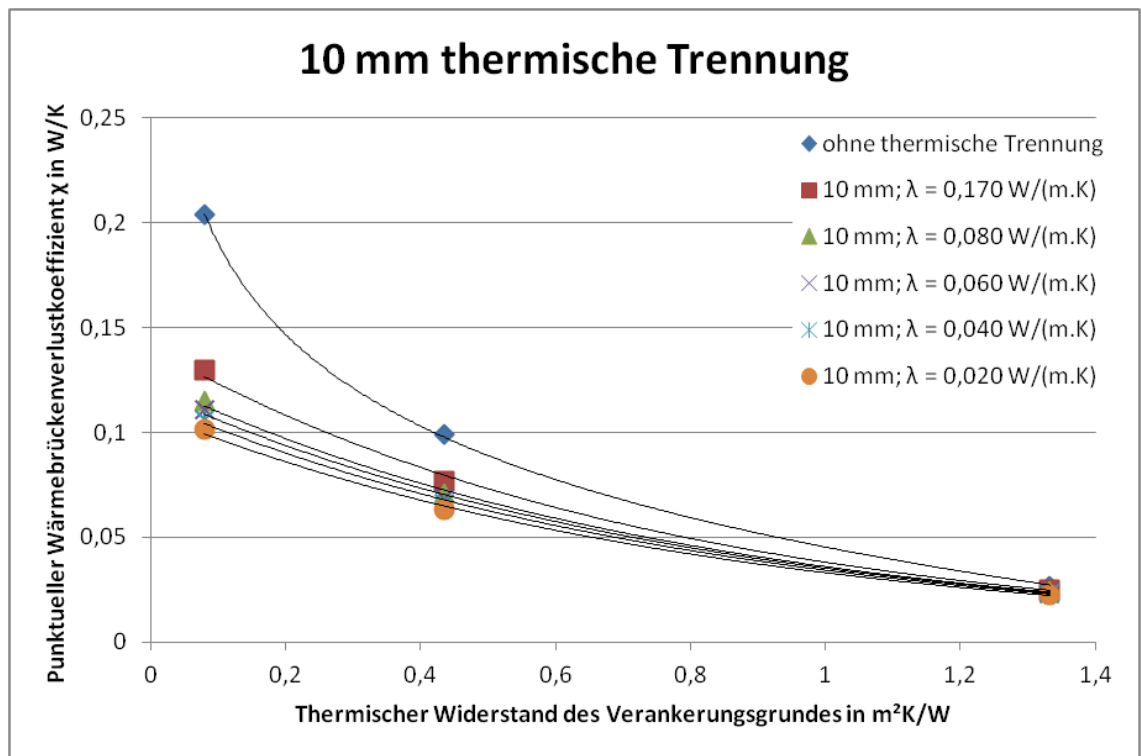


Abb. 20: χ -Werte der Aluminium-Konsole „MacFox Large“ bei 10 mm thermischer Trennung (λ variabel) in Abhängigkeit des thermischen Widerstandes des Verankerungsgrundes

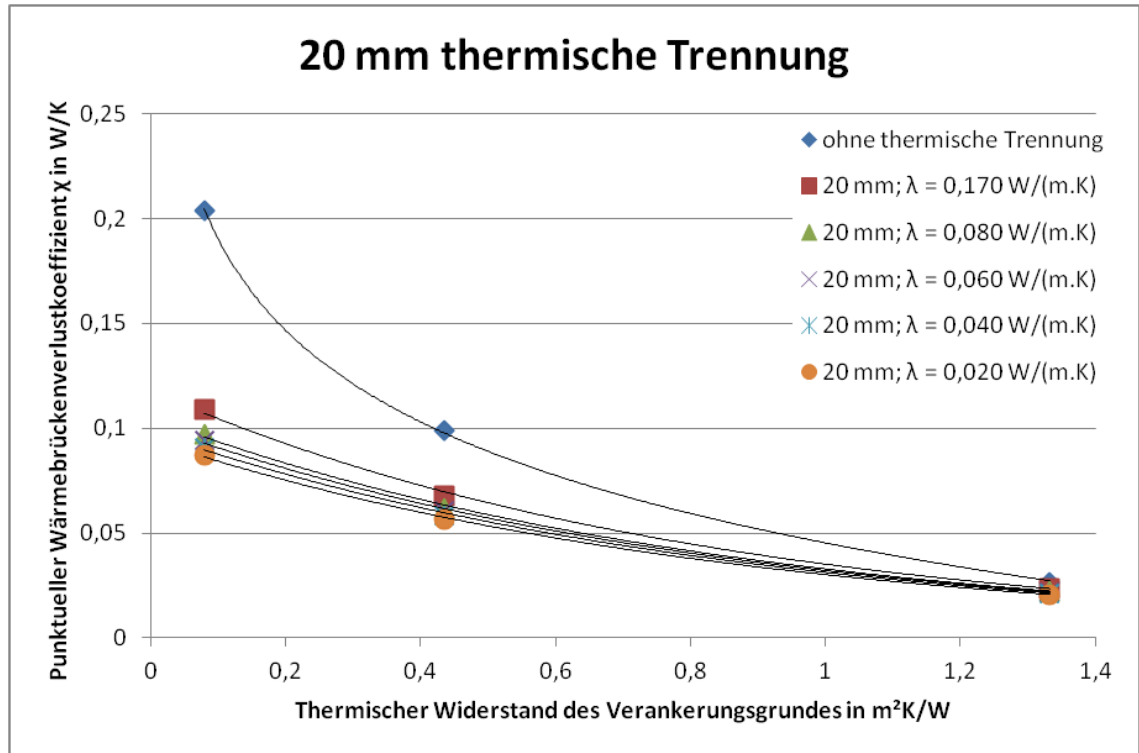


Abb. 21: χ -Werte der Aluminium-Konsole „MacFox Large“ bei 20 mm thermischer Trennung (λ variabel) in Abhängigkeit des thermischen Widerstandes des Verankerungsgrundes

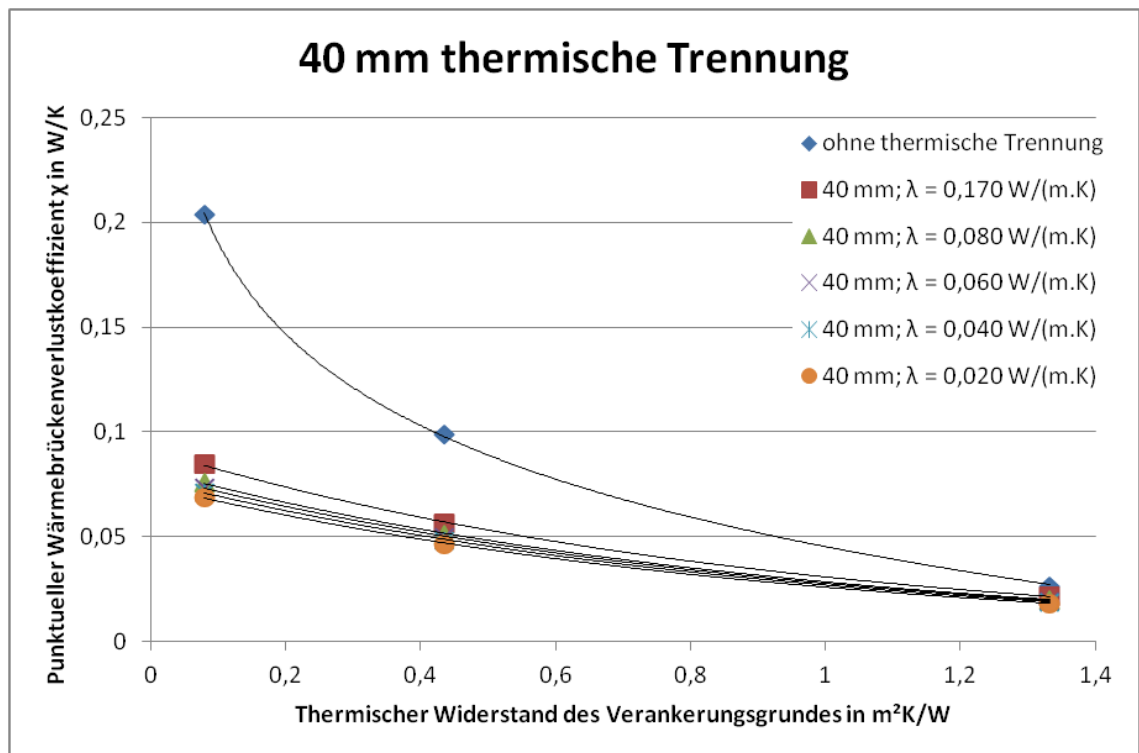


Abb. 22: χ -Werte der Aluminium-Konsole „MacFox Large“ bei 40 mm thermischer Trennung (λ variabel) in Abhängigkeit des thermischen Widerstandes des Verankerungsgrundes

In Bezug auf den Einfluss der Wärmeleitfähigkeit des thermischen Trennelementes lässt sich die klare Tendenz ablesen, dass der Unterschied zwischen hoher und geringer Wärmeleitfähigkeit mit zunehmender Dicke der thermischen Trennung bei den Verankerungsgründen Stahlbeton und Vollziegel kontinuierlich abnimmt. Bei Vollholz jedoch zeigt sich ein umgekehrter Zusammenhang, wobei hier die Unterschiede in absoluten Zahlen generell wesentlich geringer sind (Abb. 23).

Daraus lässt sich schließen, dass thermische Trennungen mit sehr geringer Wärmeleitfähigkeit bei Aluminium-Konsolen nur bei geringen Dicken und nur bei Stahlbeton- oder Vollziegeluntergrund sinnvoll sind. Bei Vollholz als Verankerungsgrund stellt sich die Sinnhaftigkeit von thermischen Trennungen generell in Frage, da diese die hier ohnehin bereits äußerst niedrigen χ -Werte nur noch in geringem Maße beeinflussen.

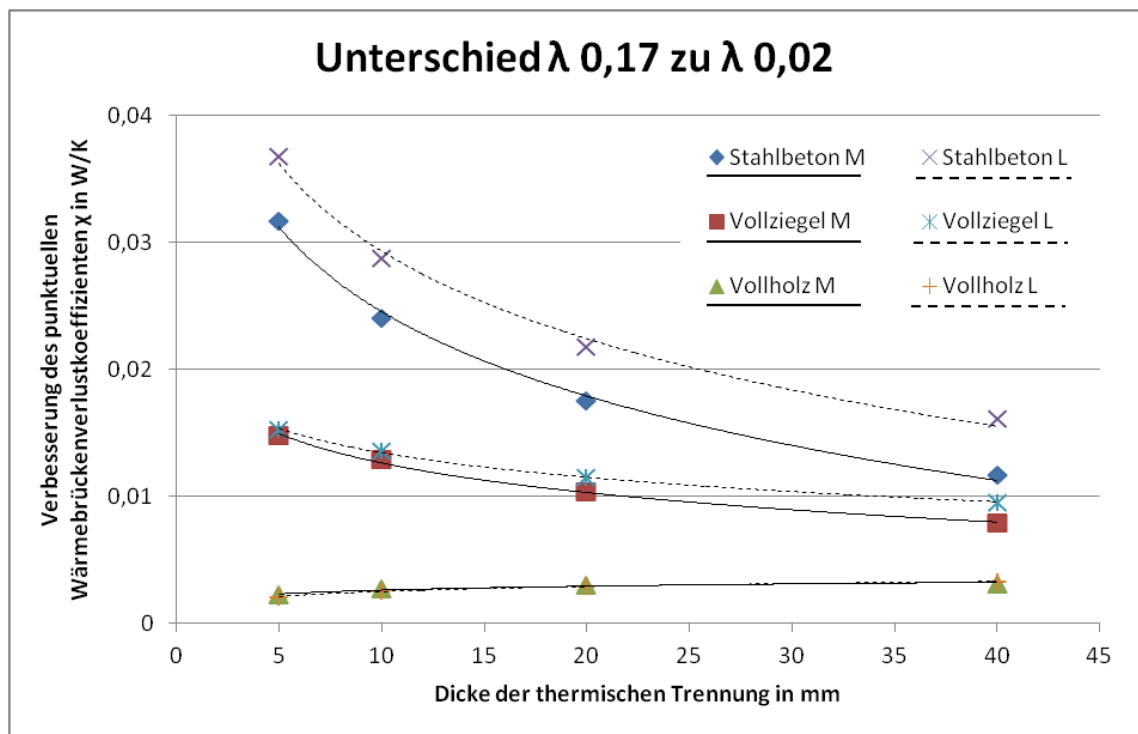


Abb. 23: Verbesserung der χ -Werte der Aluminium-Konsolen „MacFox Medium“ und „MacFox Large“ bei Verringerung der Wärmeleitfähigkeit der thermischen Trennung von $\lambda = 0,17$ W/(m.K) auf $\lambda = 0,02$ W/(m.K) in Abhängigkeit der Dicke der thermischen Trennung

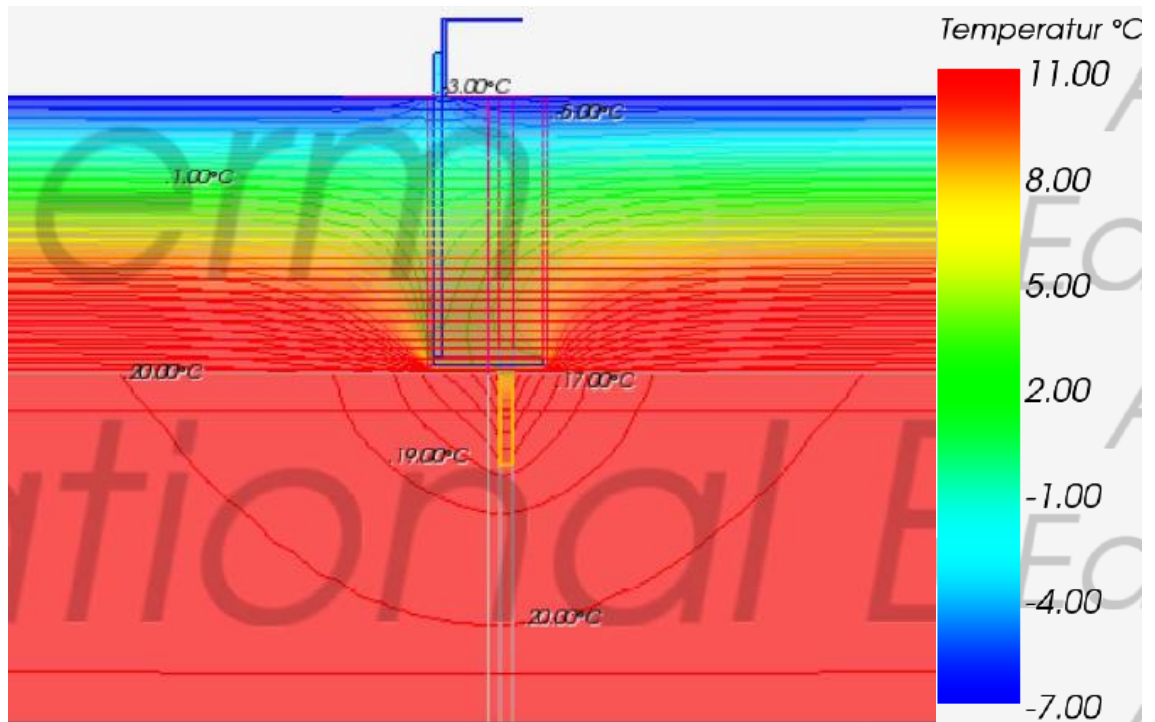


Abb. 24: Verlauf der Isothermen bei der Aluminium-Konsole „MacFox Medium“ bei 5 mm thermischer Trennung mit $\lambda = 0,08 \text{ W/(m.K)}$ auf STB-Untergrund, Abbildung um 90° gedreht

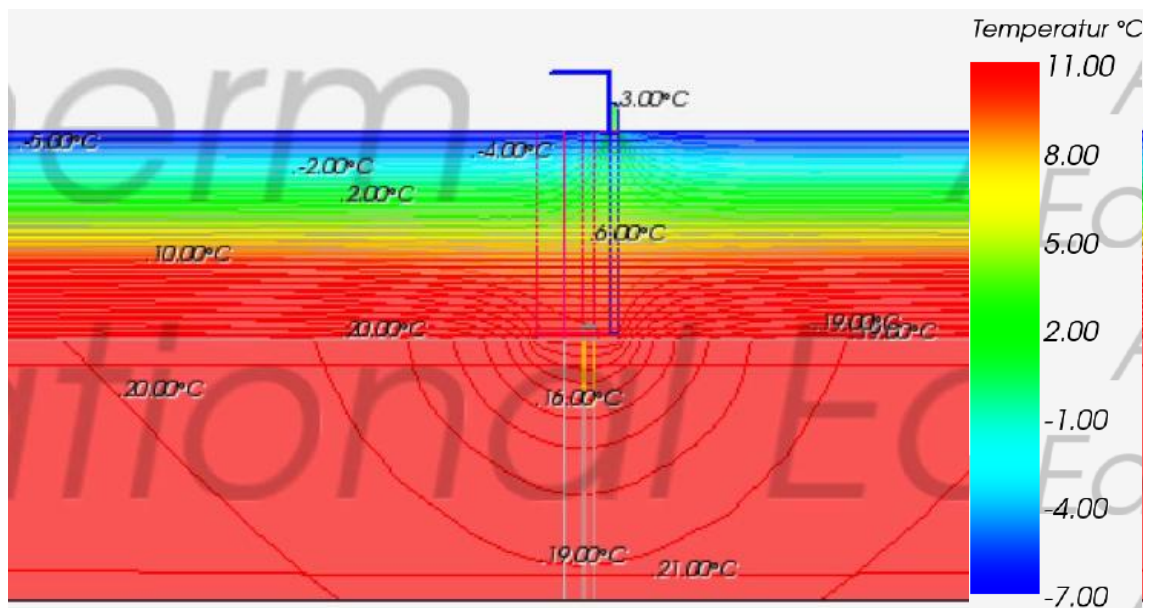


Abb. 25: Verlauf der Isothermen bei der Aluminium-Konsole „MacFox Large“ bei 5 mm thermischer Trennung mit $\lambda = 0,08 \text{ W/(m.K)}$ auf STB-Untergrund, Abbildung um 90° gedreht

Abb. 24 und Abb. 25 zeigen beispielhaft den Verlauf der Isothermen bei den Konsolen „MacFox Medium“ und „MacFox Large“ bei 5 mm thermischer Trennung mit $\lambda = 0,08 \text{ W/(m.K)}$ und Stahlbeton als Verankerungsgrund. Im Vergleich zur Konsole „MacFox Medium“ ist bei der Konsole „MacFox Large“ eine wesentlich stärkere Auskühlung des Verankerungsgrundes erkennbar.

4.1.3 Edelstahl-Konsole MFT-Fox Medium

Die Konsole „MFT-Fox“ von der Firma Eurofox GmbH ist eine Edelstahl-Konsole, wobei für die Gleitpunkte die Ausführung „Medium“ und für die Festpunkte die Ausführung „Large“ vorgesehen ist. Im Gegensatz zu einer Unterkonstruktion aus Aluminium sind bei einer Edelstahl-Unterkonstruktion die Wärmeverluste stark reduziert, was unter Anderem dem Verlauf der Isothermen ganz klar zu entnehmen ist (Abb. 36 und Abb. 37). Aufgrund des höheren Preises haben sich Edelstahl-Unterkonstruktionen in Österreich jedoch bisher noch nicht durchsetzen können.

Wie die Aluminium-Konsole „MacFox Medium“ wird die Edelstahl-Konsole „MFT-Fox Medium“ mit nur einer Schraube im Verankerungsgrund befestigt. Aufgrund der geänderten Abmessungen ergeben sich bei der Eingabe in AnTherm® andere Schichtdicken (Tab. 7).

Tab. 7: MFT-Fox Medium - Eingabe Schichten in AnTherm®

Nr.	Schicht	Dicke in mm
1	Tragprofil	1.000,00
2	Konsole	30,55
3	Dübel	1,35
4	Schraube	6,20
5	Dübel	1,35
6	Konsole	30,55
7	Tragprofil	1.000,00
-		gesamt: 2.070,00

Die nachfolgenden Abbildungen (Abb. 26, Abb. 27, Abb. 28 und Abb. 29) zeigen die Verringerung der χ -Werte der Konsole „MFT-Fox Medium“ für unterschiedliche Wärmeleitfähigkeiten sowie Dicken der thermischen Trennung in Abhängigkeit des thermischen Widerstandes des Verankerungsgrundes. Zum Vergleich wird auch hier stets die Variante ohne thermische Trennung zusätzlich angeführt.

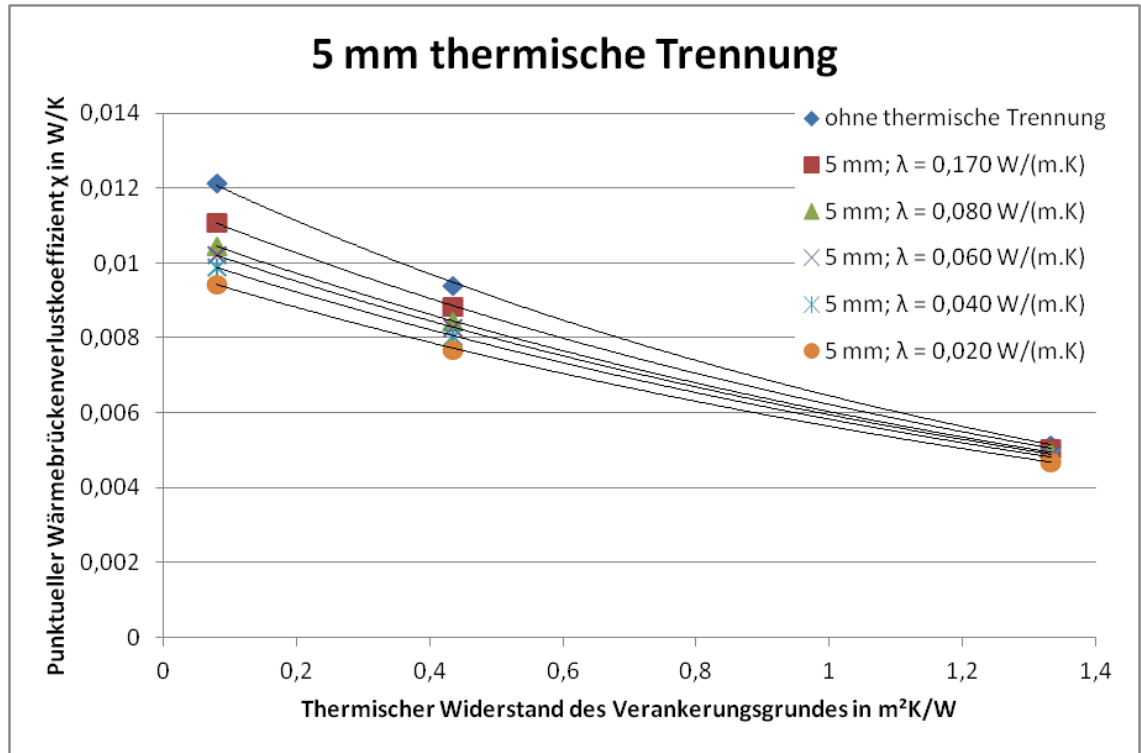


Abb. 26: χ -Werte der Edelstahl-Konsole „MFT-Fox Medium“ bei 5 mm thermischer Trennung (λ variabel) in Abhängigkeit des thermischen Widerstandes des Verankerungsgrundes

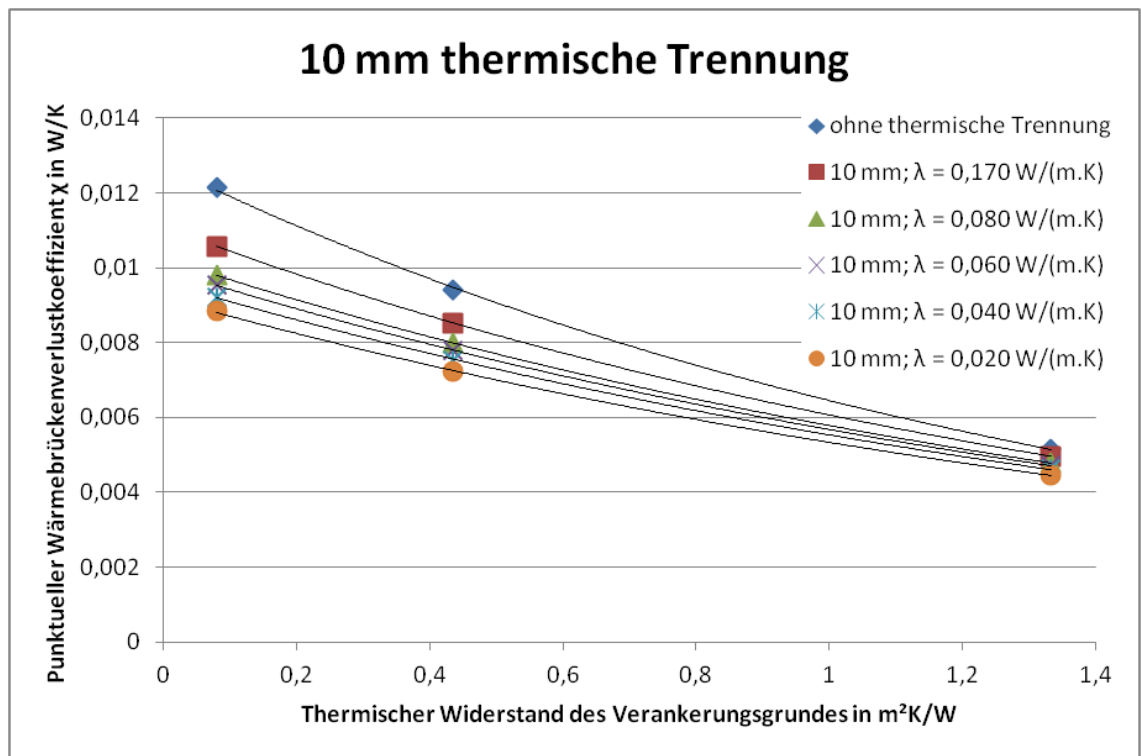


Abb. 27: χ -Werte der Edelstahl-Konsole „MFT-Fox Medium“ bei 10 mm thermischer Trennung (λ variabel) in Abhängigkeit des thermischen Widerstandes des Verankerungsgrundes

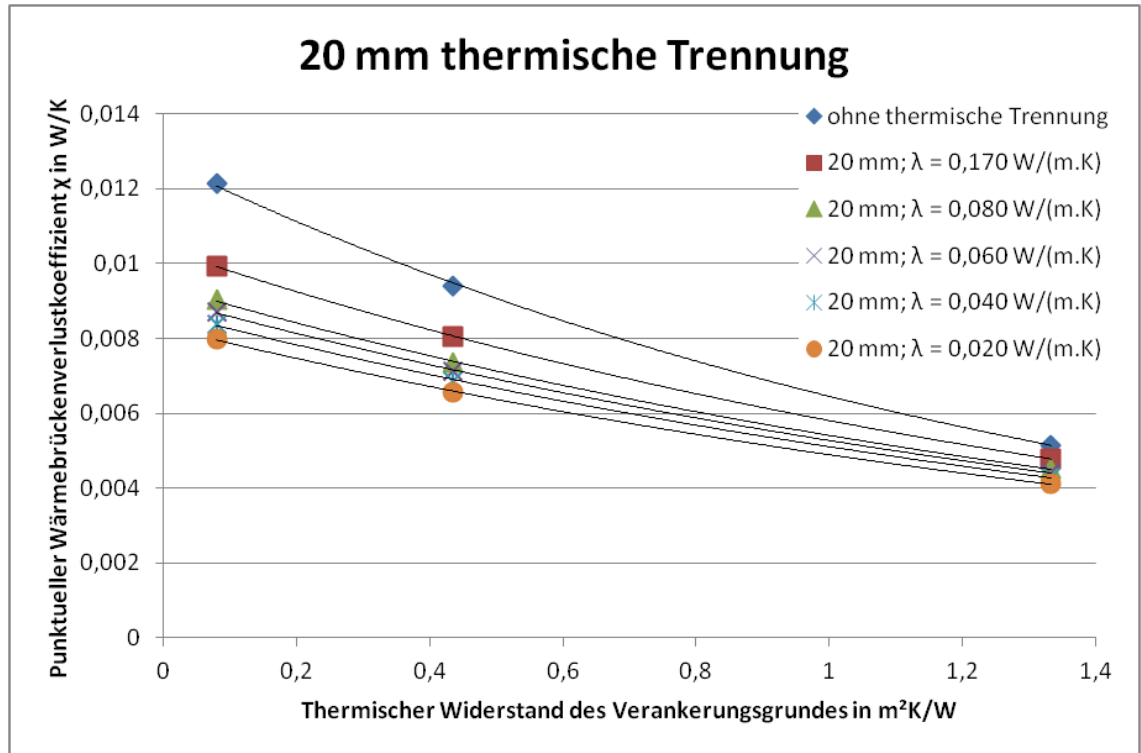


Abb. 28: χ -Werte der Edelstahl-Konsole „MFT-Fox Medium“ bei 20 mm thermischer Trennung (λ variabel) in Abhängigkeit des thermischen Widerstandes des Verankerungsgrundes

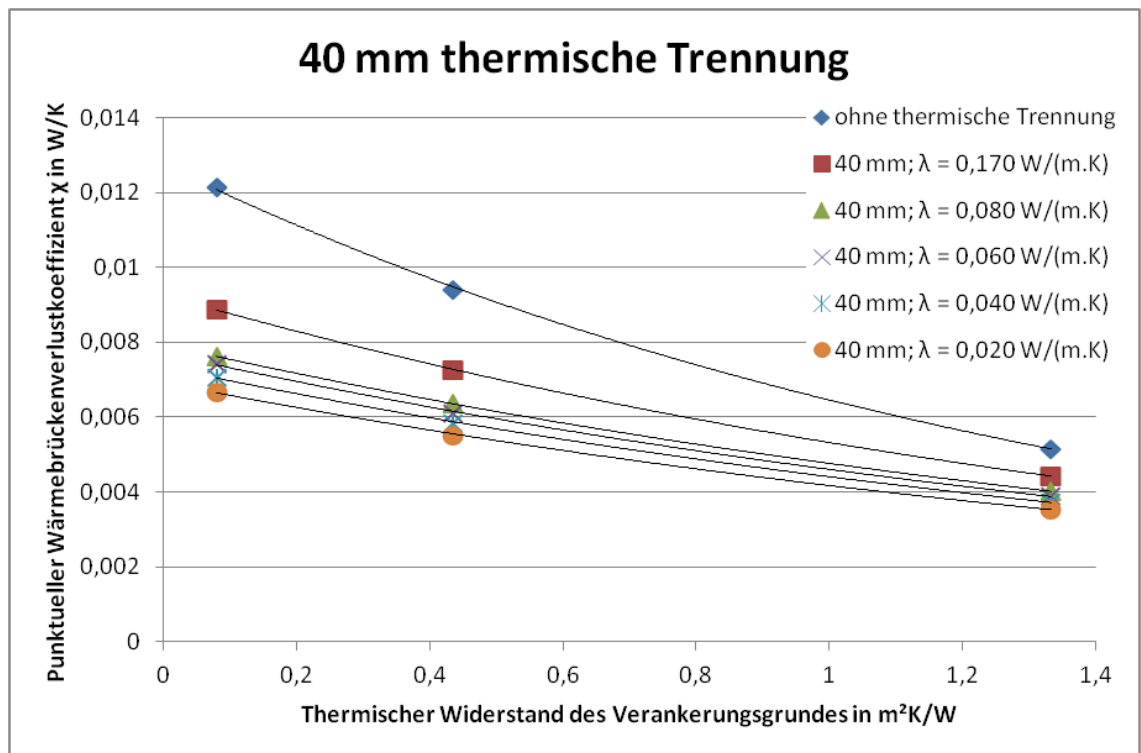


Abb. 29: χ -Werte der Edelstahl-Konsole „MFT-Fox Medium“ bei 40 mm thermischer Trennung (λ variabel) in Abhängigkeit des thermischen Widerstandes des Verankerungsgrundes

Im Vergleich zur Aluminium-Konsole „MacFox Medium“ sind die χ -Werte bei der Edelstahl-Konsole „MFT-Fox Medium“ im Mittel auf ca. 20 % reduziert. Aufgrund der geringeren Wärmeleitfähigkeit des Edelstahles liefert hier auch die Variante ohne thermische Trennung bereits vergleichsweise gute Ergebnisse. Folglich ist durch die thermische Trennung nur noch eine geringere Reduktion der χ -Werte möglich.

4.1.4 Edelstahl-Konsole MFT-Fox Large

Für die Konsole „MFT-Fox Large“ gelten dieselben Ausführungen wie für die Konsole „MFT-Fox Medium“, wobei hier aufgrund der geometrischen Abmessungen die χ -Werte im Mittel wieder ca. doppelt so groß sind. Die Eingabe der Schichten in AnTherm® erfolgt ähnlich wie bei der Aluminium-Konsole „MacFox Large“, da die Befestigung am Verankerungsgrund auch hier wieder mit drei Schrauben erfolgt (Tab. 8).

Tab. 8: MFT-Fox Large - Eingabe Schichten in AnTherm®

Nr.	Schicht	Dicke in mm
1	Tragprofil	1.000,00
2	Konsole	205,55
3	Dübel	1,35
4	Schraube	6,20
5	Dübel	1,35
6	Konsole	36,10
7	Dübel	1,35
8	Schraube	6,20
9	Dübel	1,35
10	Konsole	36,10
11	Dübel	1,35
12	Schraube	6,20
13	Dübel	1,35
14	Konsole	20,55
15	Tragprofil	1.000,00
-		gesamt: 2.140

Die nachfolgenden Abbildungen (Abb. 30, Abb. 31, Abb. 32 und Abb. 33) zeigen die Verringerung der χ -Werte der Konsole „MFT-Fox Large“ für

unterschiedliche Wärmeleitfähigkeiten sowie Dicken der thermischen Trennung in Abhängigkeit des thermischen Widerstandes des Verankerungsgundes.

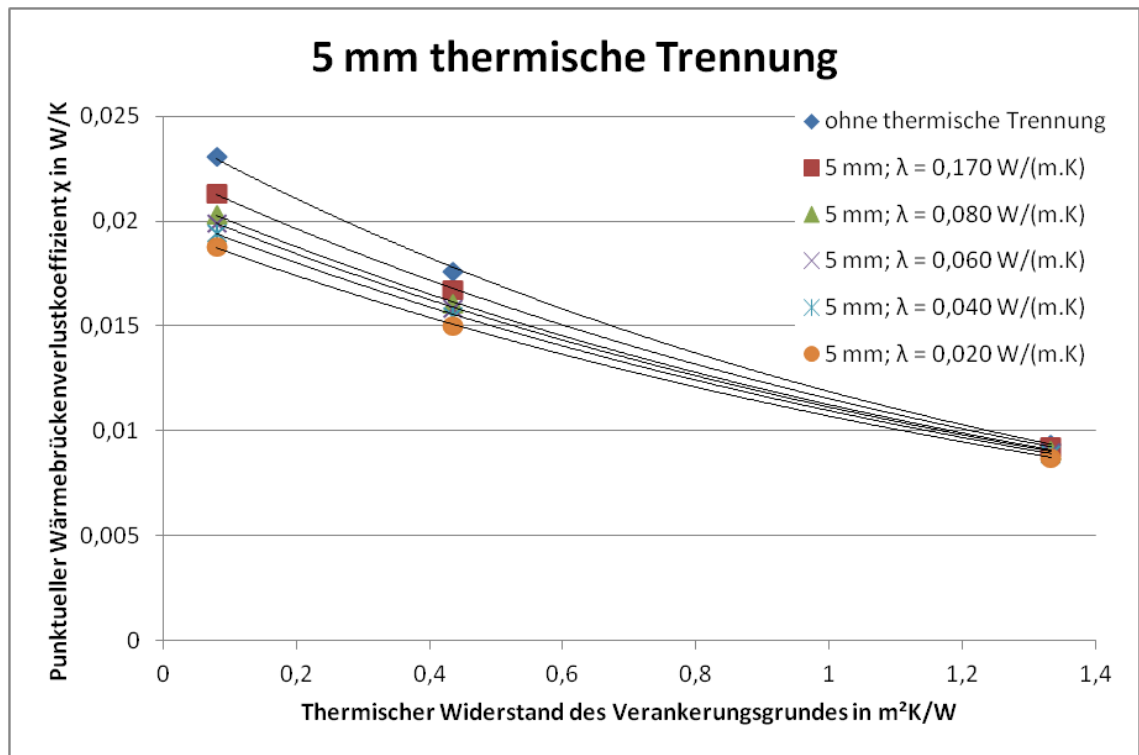


Abb. 30: χ -Werte der Edelstahl-Konsole „MFT-Fox Large“ bei 5 mm thermischer Trennung (λ variabel) in Abhängigkeit des thermischen Widerstandes des Verankerungsgundes

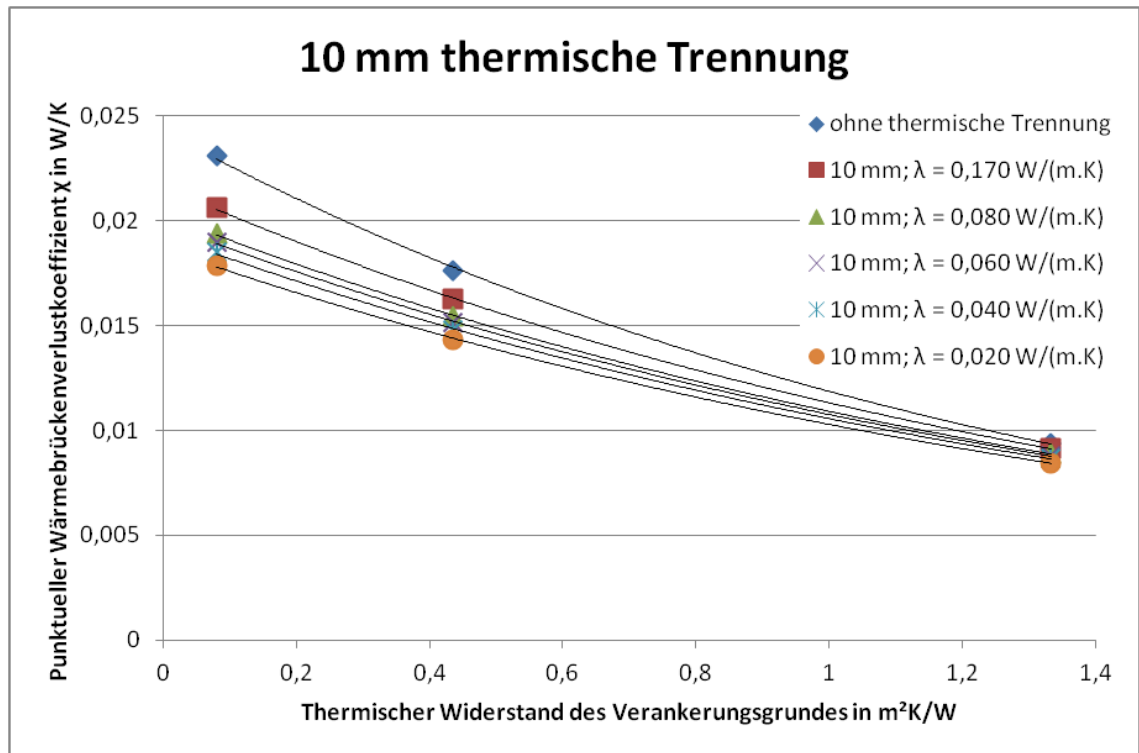


Abb. 31: χ -Werte der Edelstahl-Konsole „MFT-Fox Large“ bei 10 mm thermischer Trennung (λ variabel) in Abhängigkeit des thermischen Widerstandes des Verankerungsgundes

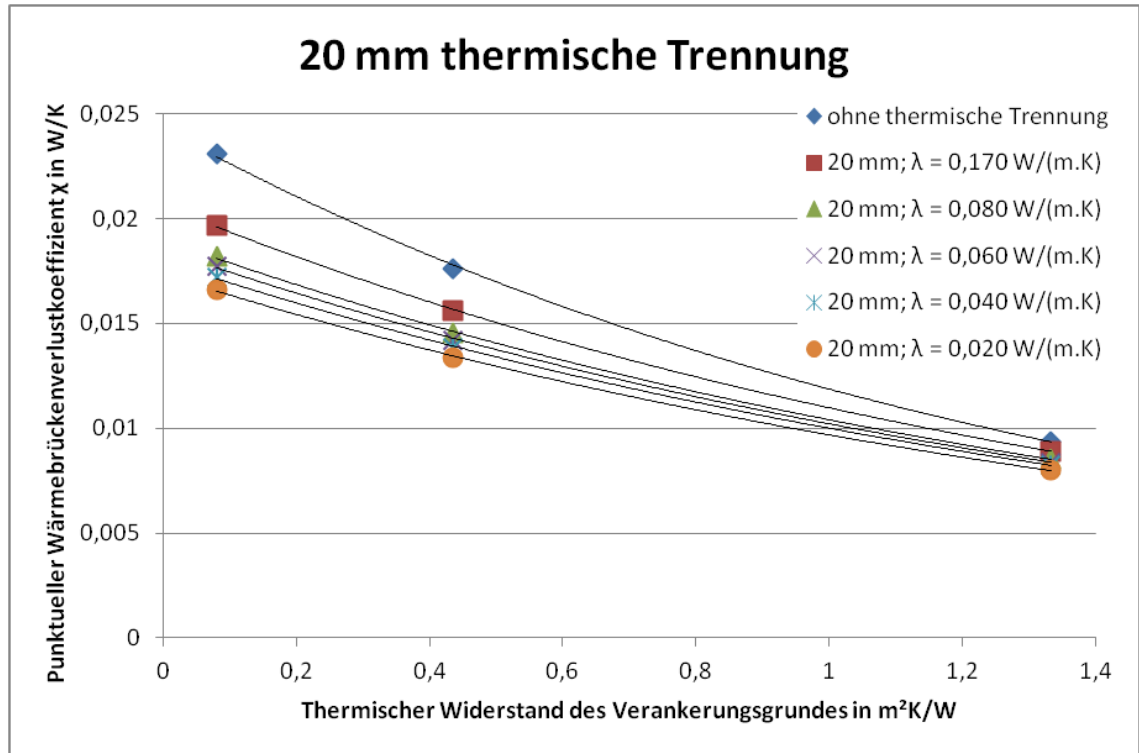


Abb. 32: χ -Werte der Edelstahl-Konsole „MFT-Fox Large“ bei 20 mm thermischer Trennung (λ variabel) in Abhängigkeit des thermischen Widerstandes des Verankerungsgrundes

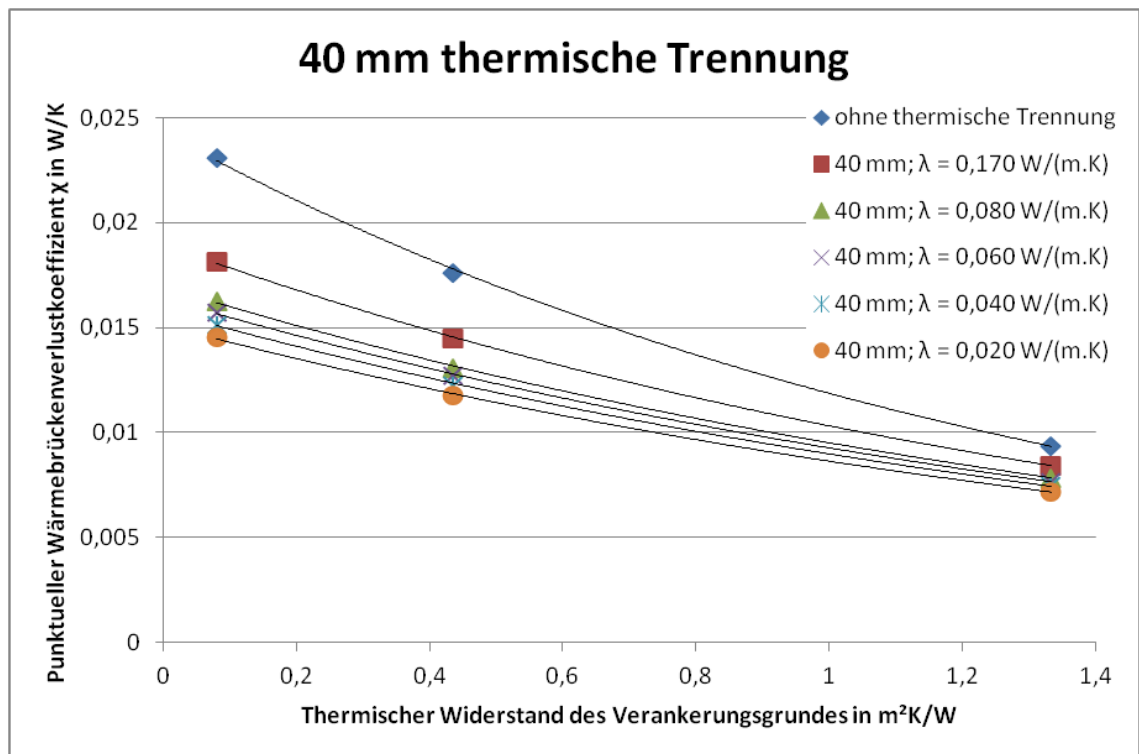


Abb. 33: χ -Werte der Edelstahl-Konsole „MFT-Fox Large“ bei 40 mm thermischer Trennung (λ variabel) in Abhängigkeit des thermischen Widerstandes des Verankerungsgrundes

Anders als bei der Aluminium-Konsole „MacFox“ fällt bei der Edelstahl-Konsole „MFT-Fox“ der Unterschied zwischen den χ -Werten bei Stahlbeton-

und bei Vollholz-Untergrund wesentlich geringer aus, was vor allem an den stark verringerten χ -Werten bei Stahlbeton-Untergrund liegt. Bei Vollholz-Untergrund wirkt sich die Änderung von Aluminium- auf Edelstahl-Konsolen nicht so deutlich auf die χ -Werte aus, da diese aufgrund des hohen thermischen Widerstandes des Verankerungsgrundes ohnehin auf einem sehr niedrigen Niveau liegen und somit absolut betrachtet nur noch geringere Verbesserungen möglich sind.

In Hinblick auf den Unterschied zwischen hoher und geringer Wärmeleitfähigkeit zeigt sich bei der Edelstahl-Konsole „MFT-Fox“ anders als bei der Aluminium-Konsole „MacFox“ mit zunehmender Dicke der thermischen Trennung eine durchwegs steigende Tendenz (Abb. 34). Dennoch liegen die Kurven der unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten der thermischen Trennung bei der Edelstahl-Konsole „MFT-Fox“ grundsätzlich sehr eng beisammen – in absoluten Zahlen betrachtet sogar wesentlich enger als bei der Aluminium-Konsole „MacFox“ (Abb. 35). Es lässt sich somit festhalten, dass bei Edelstahl-Konsolen durch eine verringerte Wärmeleitfähigkeit der thermischen Trennung nur noch eine geringe Verbesserung der χ -Werte erzielt werden kann.

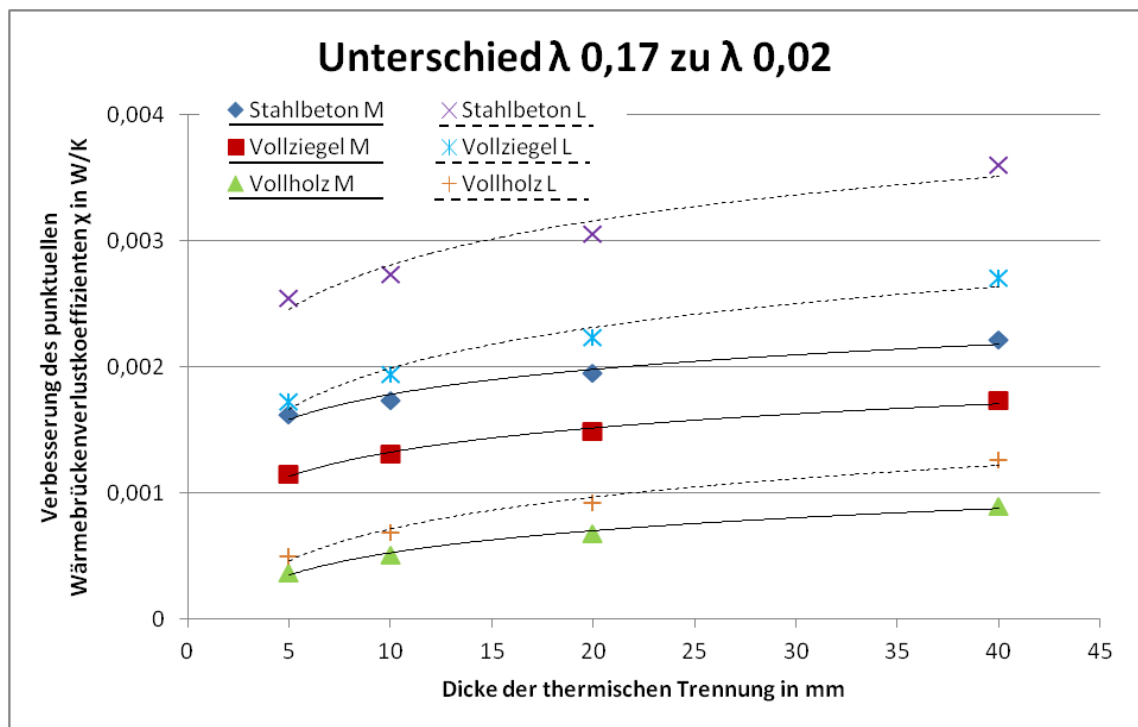


Abb. 34: Verbesserung der χ -Werte der Edelstahl-Konsolen „MFT-Fox Medium“ und „MFT-Fox Large“ bei Verringerung der Wärmeleitfähigkeit der thermischen Trennung von $\lambda = 0,17$ W/(m.K) auf $\lambda = 0,02$ W/(m.K) in Abhängigkeit der Dicke der thermischen Trennung

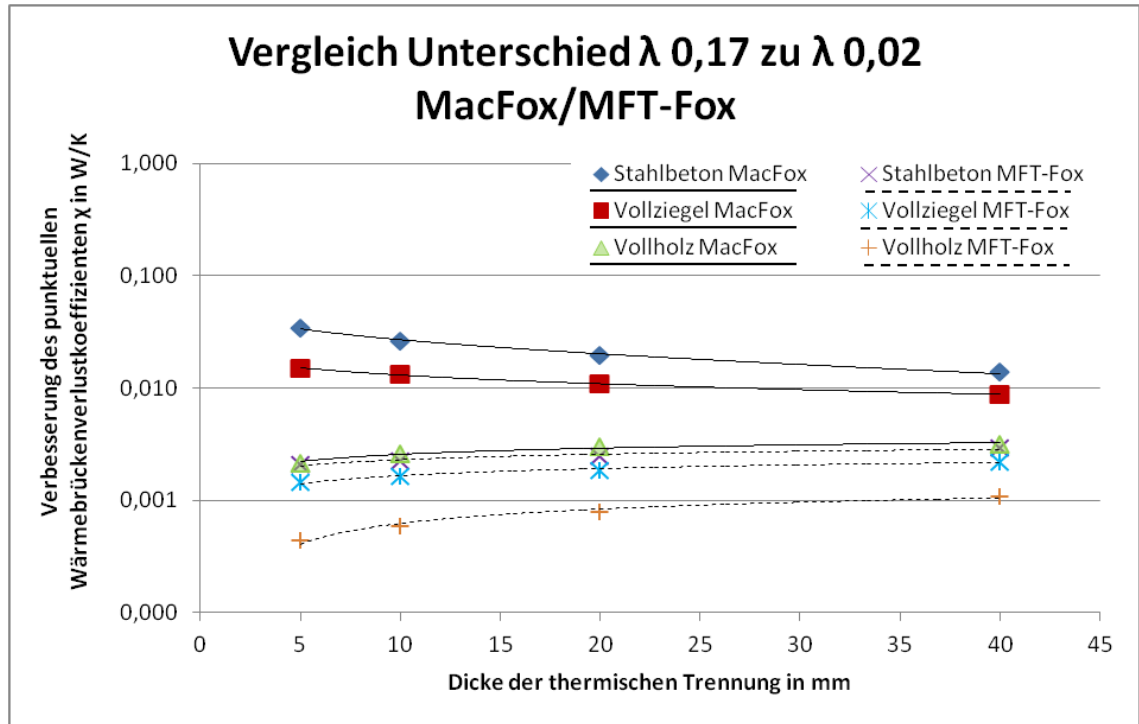


Abb. 35: Vergleich der Verbesserung der χ -Werte der Konsolen „MacFox“ (Aluminium) und „MFT-Fox“ (Edelstahl) bei Verringerung der Wärmeleitfähigkeit der thermischen Trennung von $\lambda = 0,17 \text{ W/(m.K)}$ auf $\lambda = 0,02 \text{ W/(m.K)}$ in Abhängigkeit der Dicke der thermischen Trennung

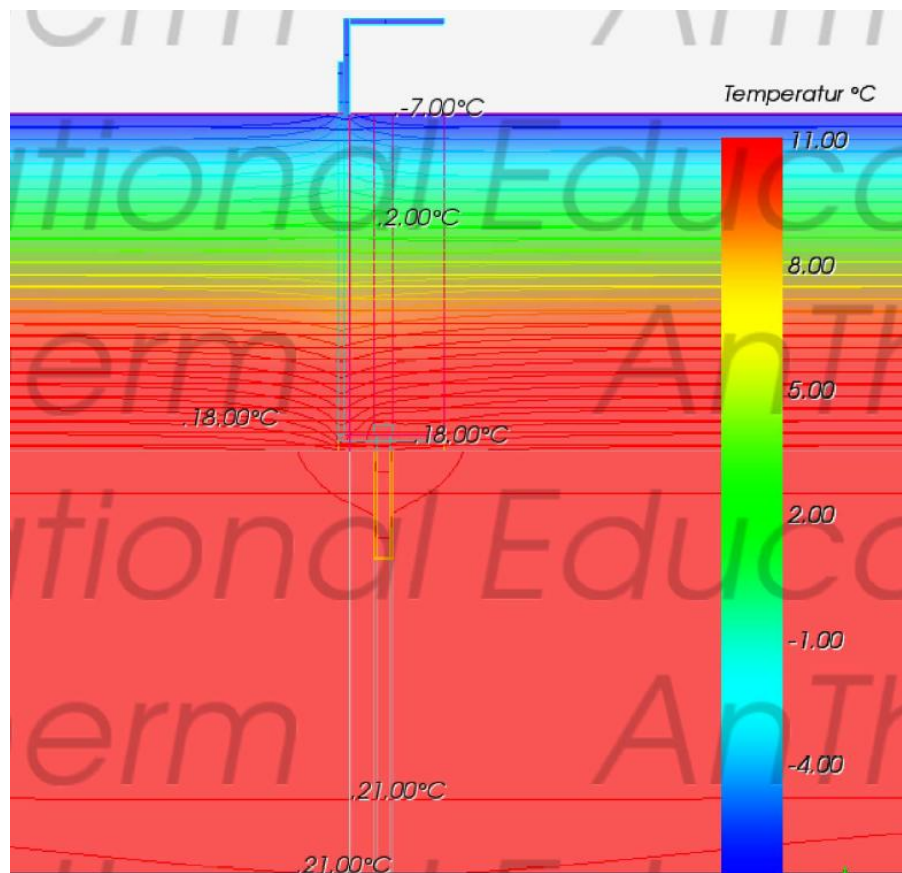


Abb. 36: Verlauf der Isothermen bei der Edelstahl-Konsole „MFT-Fox Medium“ bei 5 mm thermischer Trennung mit $\lambda = 0,08 \text{ W/(m.K)}$ auf STB-Untergrund, Abbildung um 90° gedreht

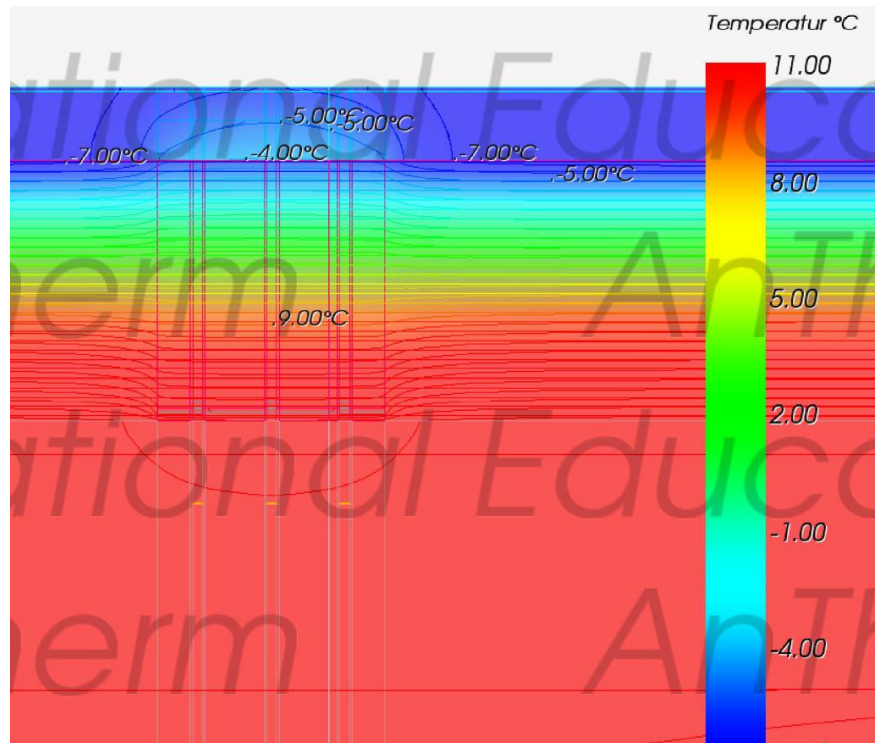


Abb. 37: Verlauf der Isothermen bei der Edelstahl-Konsole „MFT-Fox Large“ bei 5 mm thermischer Trennung mit $\lambda = 0,08 \text{ W/(m.K)}$ auf STB-Untergrund, Abbildung um 90° gedreht

Der Verlauf der Isothermen ist bei der Edelstahl-Konsole „MFT-Fox“ verglichen mit der Aluminium-Konsole „MacFox“ aufgrund der geringeren Wärmebrückenwirkung extrem homogen (Abb. 36 und Abb. 37).

4.1.5 Prozentuelle Verringerung der χ -Werte durch thermische Trennung

In den nachfolgenden Abbildungen (Abb. 38 und Abb. 39) wird die prozentuelle Verringerung der χ -Werte in Abhängigkeit der Dicke der thermischen Trennung für die unterschiedlichen Verankerungsgründe und Konsolen-Typen angegeben. Als Referenz dient dabei jeweils die entsprechende Variante ohne thermische Trennung. Im Sinne einer besseren Übersichtlichkeit wurden die Ergebnisse, die sich aus den verschiedenen Wärmeleitfähigkeiten des thermischen Trennelementes ergeben haben, gemittelt. Die dargestellten Kurven sind demnach nur zum generellen Vergleich zwischen den unterschiedlichen Verankerungsgründen und Konsolen-Typen geeignet.

Bei einem Vergleich zwischen den Aluminium- und den Edelstahl-Konsolen zeigt sich auch hier, dass die prozentuelle Verringerung der χ -Werte bei den Edelstahl-Konsolen deutlich geringer ausfällt (Abb. 40 und Abb. 41). Dabei

wurden jeweils die Werte der Konsolen-Typen „Medium“ und „Large“ gemittelt, um die Anzahl der Graphen gering zu halten.

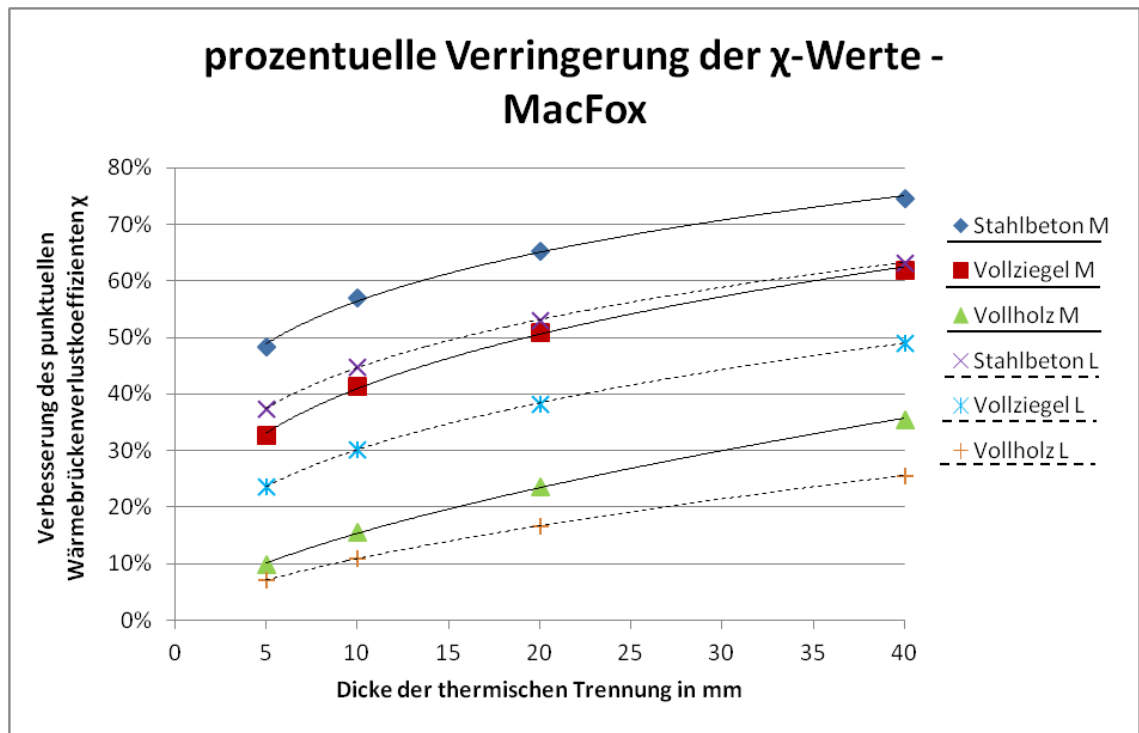


Abb. 38: prozentuelle Verringerung der χ -Werte der Aluminium-Konsolen „MacFox“ (Medium und Large) in Abhängigkeit des Verankerungsgrundes sowie der Dicke der thermischen Trennung

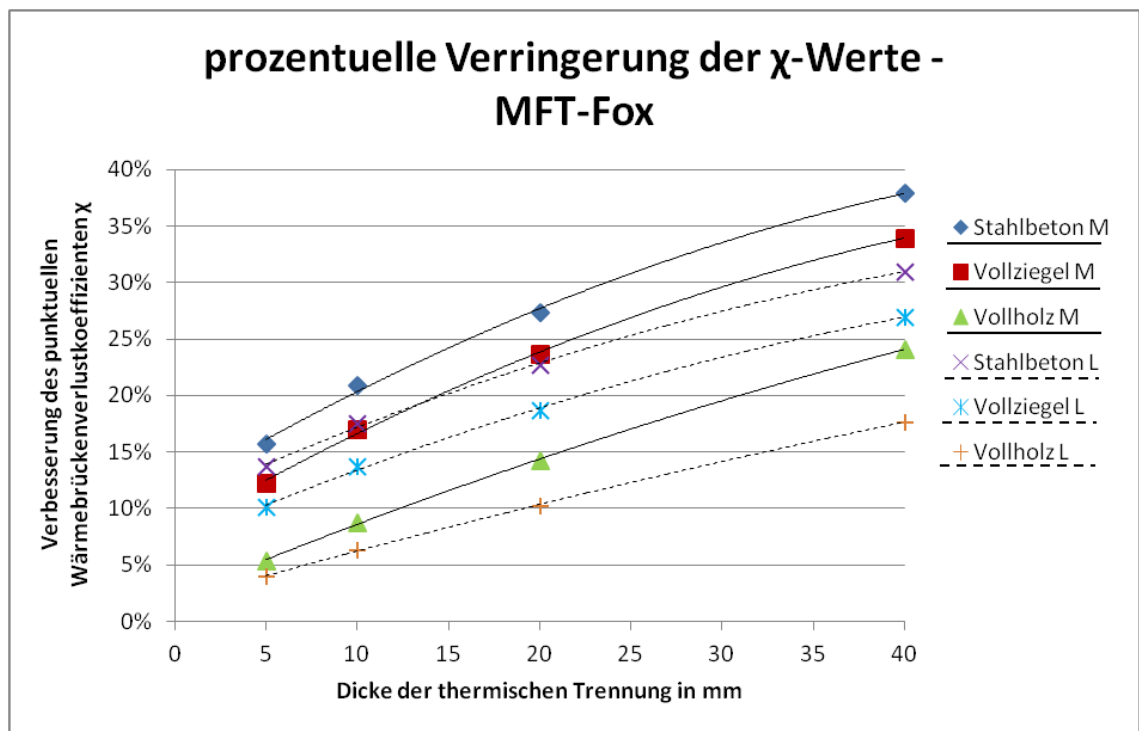


Abb. 39: prozentuelle Verringerung der χ -Werte der Edelstahl-Konsolen „MFT-Fox“ (Medium und Large) in Abhängigkeit des Verankerungsgrundes sowie der Dicke der thermischen Trennung

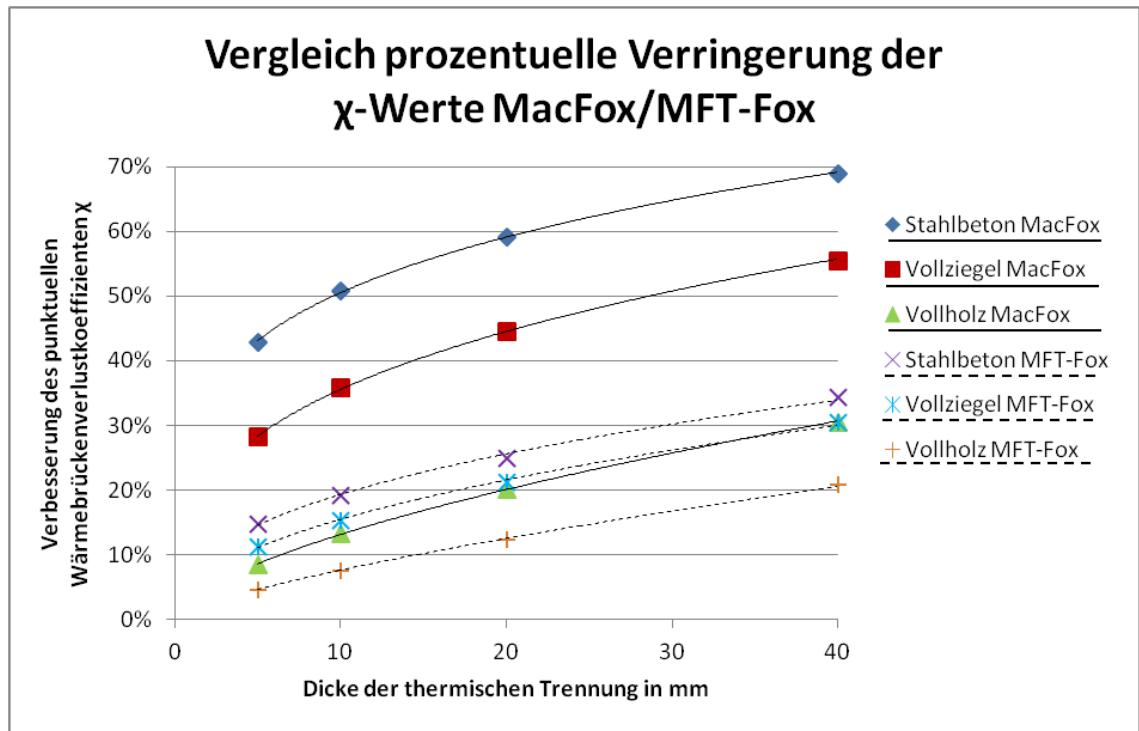


Abb. 40: prozentuelle Verringerung der χ -Werte der Konsolen „MacFox“ (Aluminium) und „MFT-Fox“ (Edelstahl) in Abhängigkeit des Verankerungsgrundes sowie der Dicke der thermischen Trennung

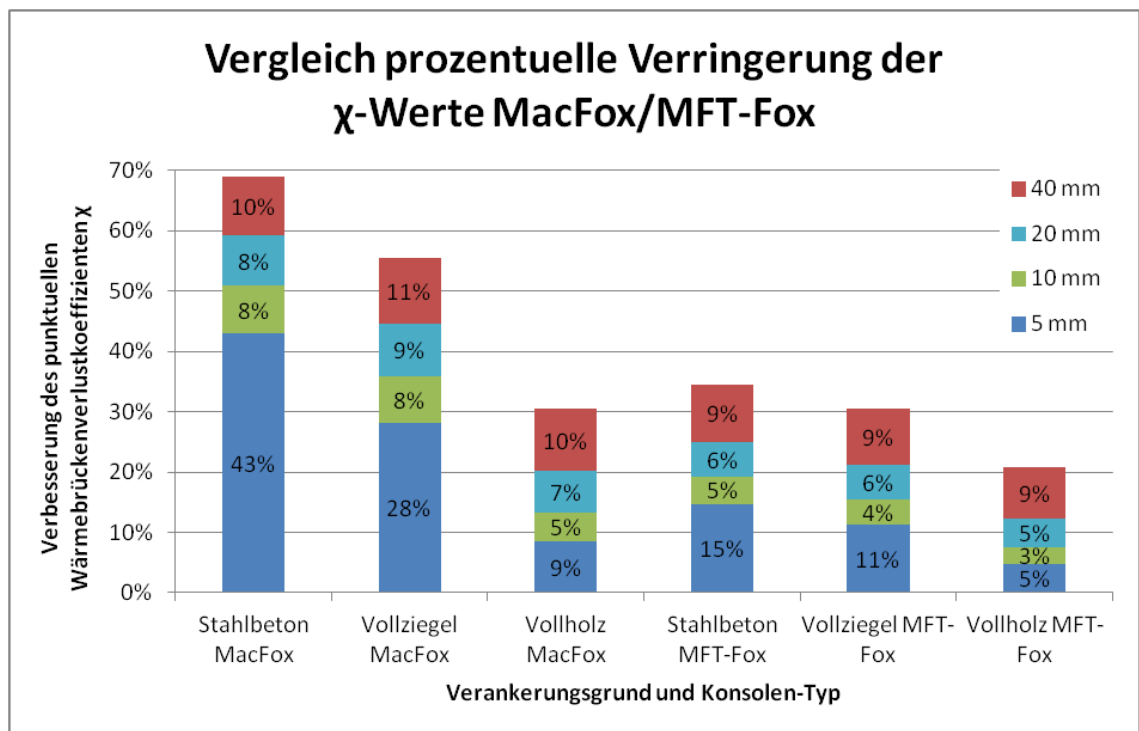


Abb. 41: (Zusätzliche) prozentuelle Verringerung der χ -Werte der Konsolen „MacFox“ (Aluminium) und „MFT-Fox“ (Edelstahl) je nach Dicke der thermischen Trennung in Abhängigkeit des Verankerungsgrundes

Den größten Anteil an der Verringerung des χ -Wertes macht bei Stahlbeton- bzw. Vollziegel-Untergrund der Sprung von 0 mm auf 5 mm thermische Trennung aus. Des Weiteren lässt sich erkennen, dass eine Erhöhung der Dicke der thermischen Trennung von 20 mm auf 40 mm bei allen betrachteten Varianten eine deutliche Verringerung der χ -Werte von ca. zehn Prozent bewirkt (Abb. 41). Insbesondere bei Verankerungsgründen (z.B. Holz) bzw. Unterkonstruktionen (z.B. aus Edelstahl) mit hohem thermischen Widerstand kann dies einen bedeutenden Anteil an der gesamten Verringerung der χ -Werte ausmachen.

Neben den bauphysikalischen Vorteilen einer verbesserten thermischen Trennung von einzelnen Konsolen müssen jedoch auch die statischen Nachteile, sprich die Einbußen bei der Tragfähigkeit zufolge ebendieser dickeren bzw. weniger druckfesten thermischen Trennung berücksichtigt werden. Diesem Thema sei das nachfolgende Kapitel gewidmet.

4.2 Statische Belastbarkeit der Konsolen bei thermischer Trennung

Für die Beurteilung der Veränderung der statischen Tragfähigkeit der Verankerungselemente wird das Programm C-FIX herangezogen. Dabei wird die Tragfähigkeit der Aluminium-Konsolen „MacFox Medium“ und „MacFox Large“ (Abb. 42) in Abhängigkeit der Dicke und der Druckfestigkeit der thermischen Trennung auf Stahlbeton- (Betongüte C20/25) und auf Vollziegeluntergrund (Druckfestigkeit $\geq 10 \text{ N/mm}^2$; Mörtelfestigkeit mind. M2,5) berechnet. Für Holz-Untergründe werden aufgrund der fehlenden Auswahlmöglichkeit im Programm die Ergebnisse der Berechnungen mit Ziegel-Untergrund herangezogen. Da grundsätzlich nur die Dübel-Tragfähigkeit berechnet wird, werden die Berechnungsergebnisse auch für die Edelstahl-Konsolen „MFT-Fox Medium“ und „MFT-Fox Large“ herangezogen. Es wird vorausgesetzt, dass die Konsolen selbst derart bemessen sind, dass sie erst nach den Verankerungselementen versagen würden (siehe auch Kapitel 3.2).

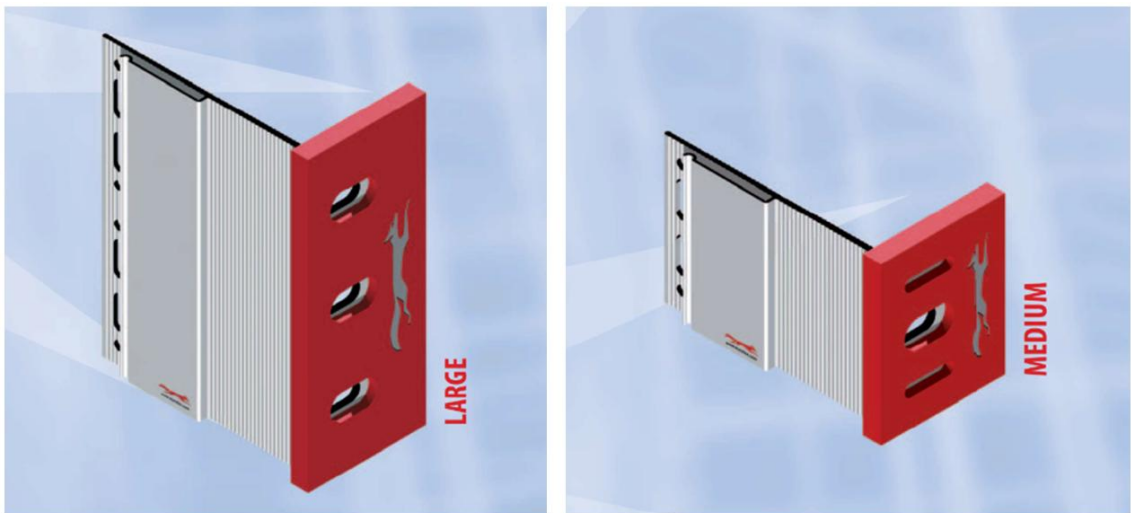


Abb. 42: Aluminium-Konsolen „MacFox Large“ (links) und „MacFox Medium“ (rechts), inkl. thermischer Trennung (rot) [EUR17]

In den nachfolgenden Abbildungen (Abb. 44, Abb. 45 und Abb. 46) ist die Veränderung der Tragfähigkeit der betrachteten Aluminium-Konsolen „MacFox Medium“ und „MacFox Large“ auf Stahlbeton- und auf Vollziegeluntergrund in Abhängigkeit der Dicke und der Druckfestigkeit der thermischen Trennung angegeben. Bei der Konsole „MacFox Medium“, die in baustatischer Hinsicht als Gleitlager fungiert, ist das Ergebnis von der Dicke der thermischen Trennung unabhängig, da diese nur einen Dübel besitzt und somit nur zur Aufnahme von Normalkräften (keine Querkräfte oder Biegemomente) geeignet

ist (Abb. 43). Aus diesem Grund reduziert sich hier die Darstellung auf einen Graphen je Verankerungsgrund (Abb. 44). Die Ergebnisse beziehen sich auf die Tragfähigkeit der jeweiligen Konsole ohne thermische Trennung.

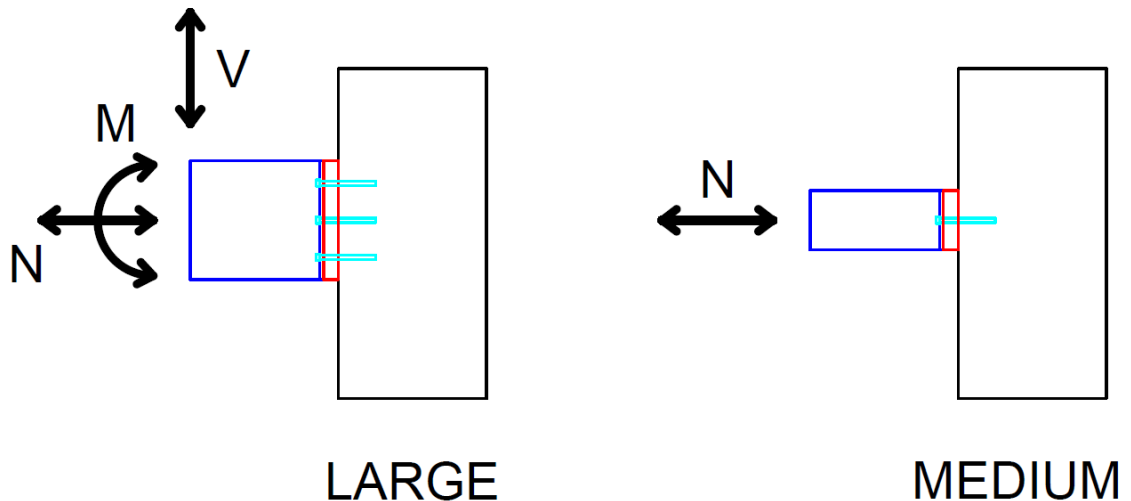


Abb. 43: Schematische Darstellung der Belastung der Konsolen „Large“ (Festpunkt) und „Medium“ (Gleitpunkt)

Während bei Stahlbetonuntergrund der markanteste Einbruch der Tragfähigkeit bei einer Reduktion der Druckfestigkeit der thermischen Trennung von 10 N/mm^2 auf $3,5 \text{ N/mm}^2$ zu beobachten ist (Abb. 44, Abb. 45), zeigt sich bei Vollziegeluntergrund über einen weiten Bereich ein konstanter Verlauf der Tragfähigkeit, bis diese bei einer Reduktion der Druckfestigkeit der thermischen Trennung von $0,8 \text{ N/mm}^2$ auf $0,3 \text{ N/mm}^2$ rasant gegen null abnimmt (Abb. 46). Der Grund dafür liegt darin, dass die Festigkeit von Vollziegelmauerwerk wesentlich geringer ist als jene von Stahlbeton. Aus diesem Grund ist bei sehr Druckfesten thermischen Trennungen die Tragfähigkeit der Konsole in erster Linie durch die Festigkeit des Vollziegelmauerwerks beschränkt. Erst wenn die Druckfestigkeit der thermischen Trennung weit unter jene des Mauerwerks sinkt, wird diese für die Gesamt-Tragfähigkeit der Konsole maßgebend.

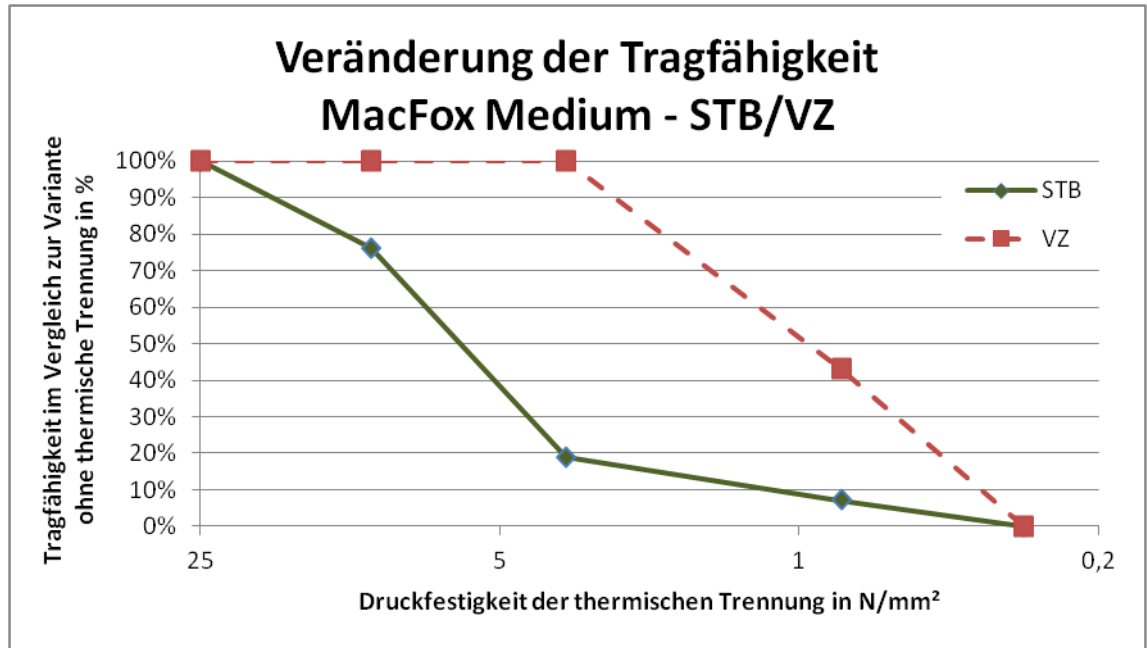


Abb. 44: Veränderung der Tragfähigkeit der Aluminium-Konsole „MacFox Medium“ auf Stahlbeton- bzw. Vollziegeluntergrund im Vergleich zur Variante ohne thermische Trennung je nach Druckfestigkeit der thermischen Trennung

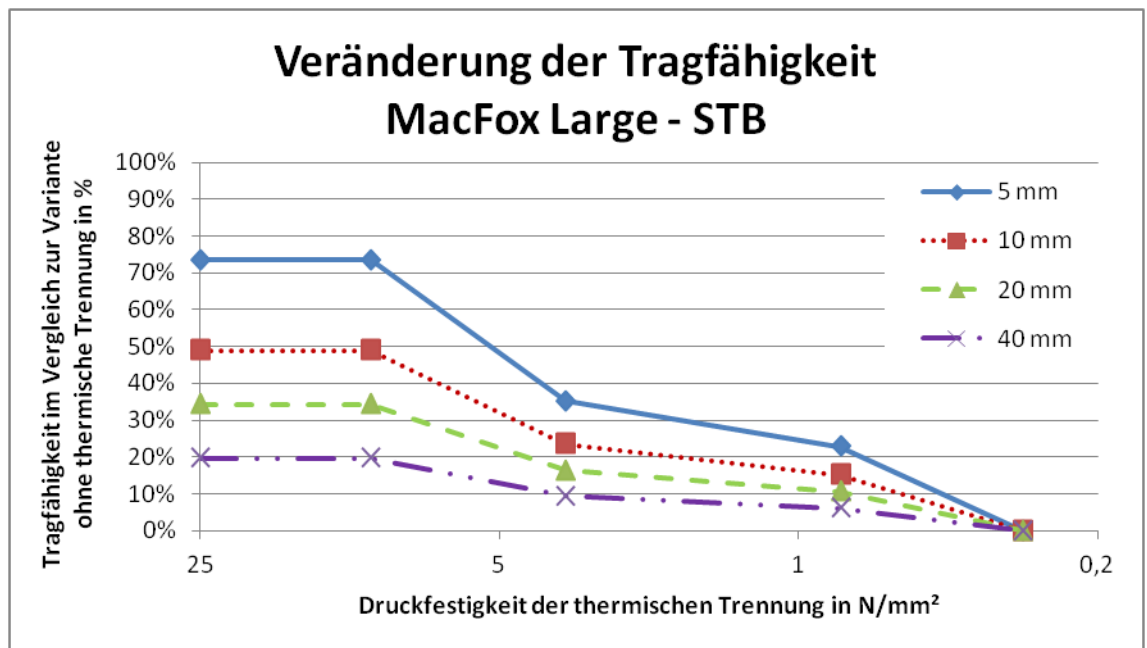


Abb. 45: Veränderung der Tragfähigkeit der Aluminium-Konsole „MacFox Large“ auf Stahlbetonuntergrund im Vergleich zur Variante ohne thermische Trennung je nach Dicke und Druckfestigkeit der thermischen Trennung

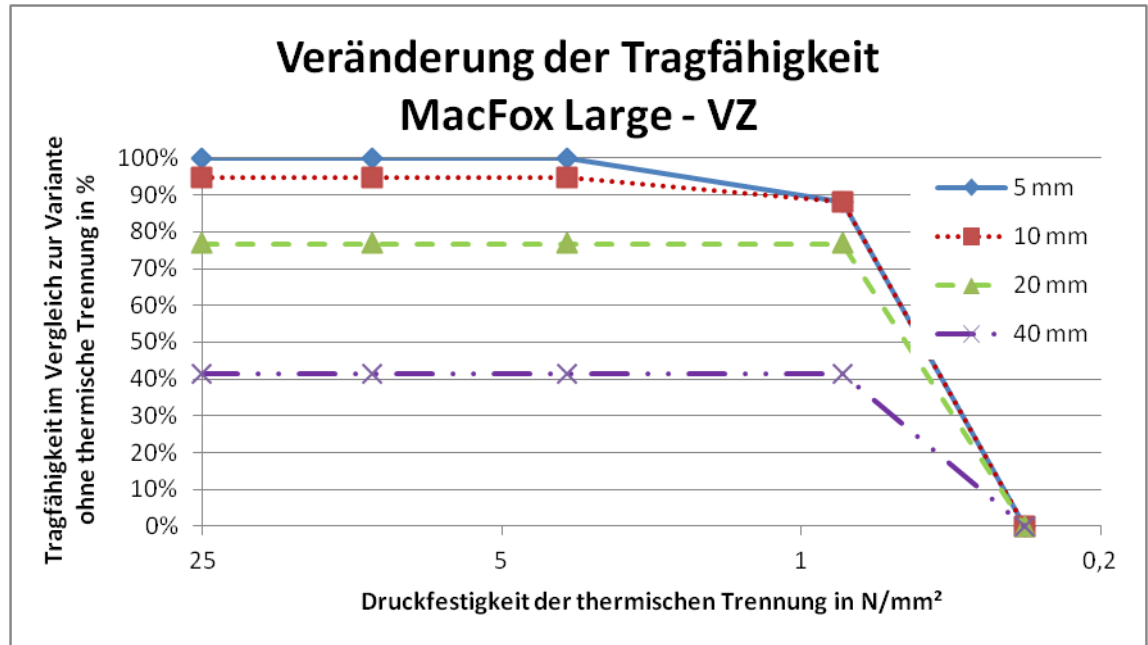


Abb. 46: Veränderung der Tragfähigkeit der Aluminium-Konsole „MacFox Large“ auf Vollziegeluntergrund im Vergleich zur Variante ohne thermische Trennung je nach Dicke und Druckfestigkeit der thermischen Trennung

Softwarebedingt muss die Druckfestigkeit der thermischen Trennung mindestens 0,5 N/mm² betragen. Darunter wird auf null N/mm² abgerundet und die Konsole kann somit rechnerisch nur noch Vertikalkräfte aufnehmen, da hierbei die thermische Trennung nicht beansprucht wird.

Für die Ermittlung der Gesamt-Tragfähigkeit der Fassaden-Unterkonstruktion wird das Verhältnis von Fest- und Gleitpunkten (MacFox Large bzw. Medium) benötigt. Dieses wird der Richtlinie „Bestimmung der wärmetechnischen Einflüsse von Wärmebrücken bei vorgehängten hinterlüfteten Fassaden“ [BFE98] entnommen. Für einen typischen Fassadenausschnitt mit 12,30 m² Fassadenfläche werden demzufolge bei Verwendung einer Aluminium-Unterkonstruktion mit 6 mm thermischer Trennung und einer 15 cm vorgehängten⁴ Bekleidung mit Faserzementplatten sowie 20 cm Beton als Verankerungsgrund insgesamt zehn Fest- und 14 Gleitpunkte benötigt (Abb. 47). Dabei werden ein Fassadeneigengewicht von 0,2 kN/m², ein Winddruck von 1,1 kN/m² sowie ein Windsog von 0,77 kN/m² zugrunde gelegt.

⁴ zwölf cm Wärmedämmung und mind. drei cm Hinterlüftungslichte

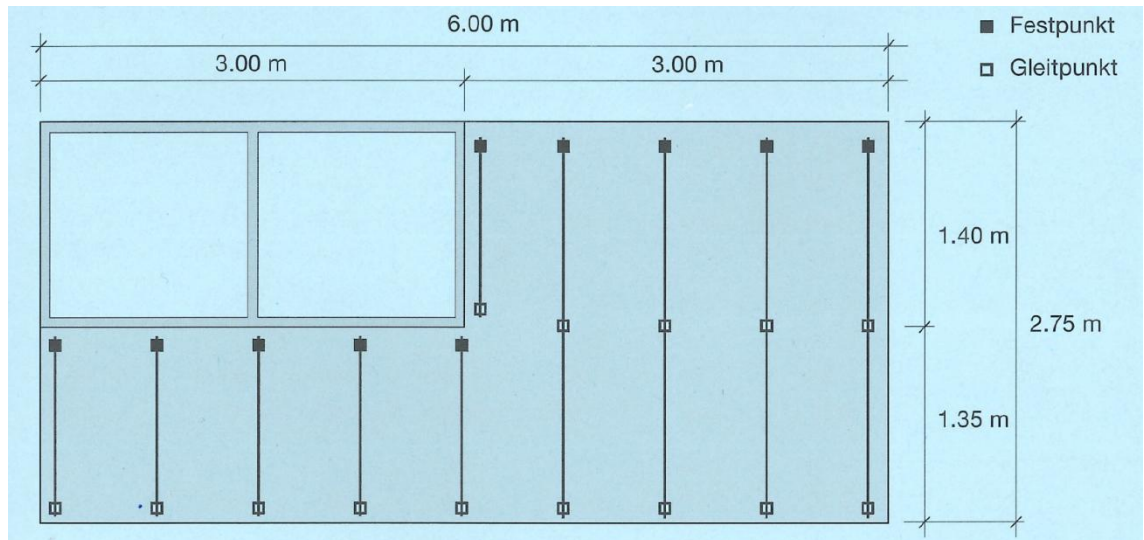


Abb. 47: Montageschema für typischen Fassadenausschnitt [BFE98]

Bei Verwendung dieses Verhältnisses von Fest- und Gleitpunkten wird, unter Berücksichtigung der zuvor bestimmten Abminderung der Tragfähigkeit der Aluminium-Konsolen „MacFox Medium“ und „MacFox Large“, die Veränderung der Tragfähigkeit der Fassaden-Unterkonstruktion auf Stahlbeton- und auf Vollziegel-Untergrund je nach Dicke und Druckfestigkeit der thermischen Trennung ermittelt (Abb. 48 und Abb. 49).

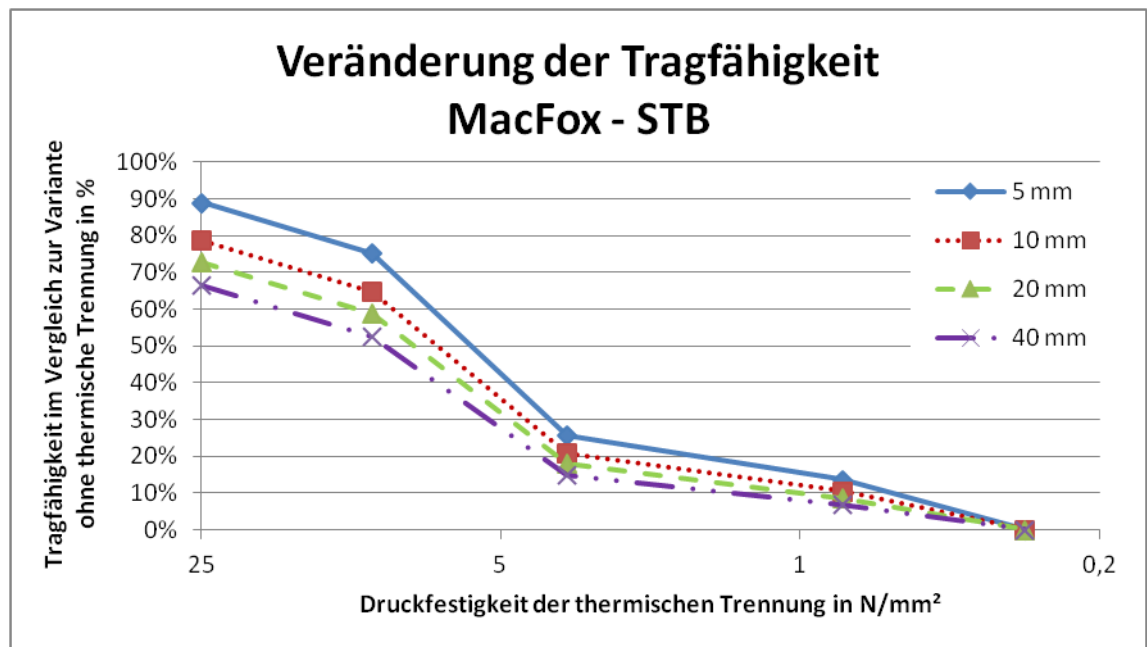


Abb. 48: Veränderung der Gesamt-Tragfähigkeit bei „MacFox“-Aluminium-Konsolen auf Stahlbetonuntergrund im Vergleich zur Variante ohne thermische Trennung je nach Druckfestigkeit der thermischen Trennung

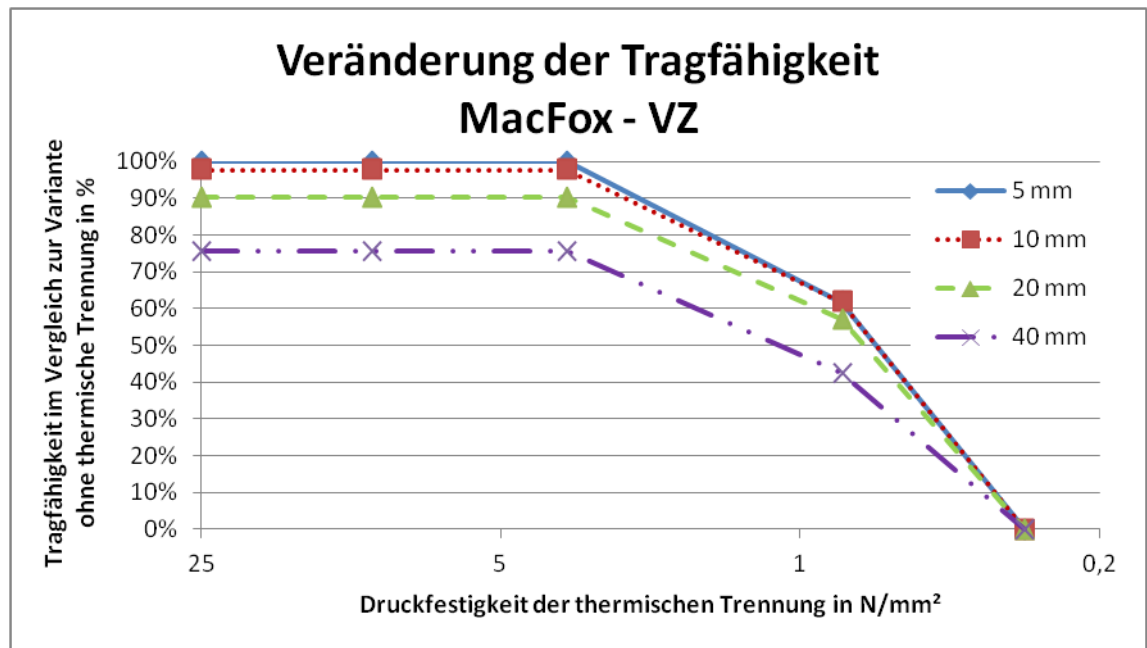


Abb. 49: Veränderung der Gesamt-Tragfähigkeit bei „MacFox“-Aluminium-Konsolen auf Vollziegeluntergrund im Vergleich zur Variante ohne thermische Trennung je nach Druckfestigkeit der thermischen Trennung

Wie schon in den vorangegangenen Abbildungen zeigt sich auch hier wieder die stetige Abnahme der Tragfähigkeit der Konsolen bei abnehmender Druckfestigkeit der thermischen Trennung. Bei Stahlbeton-Untergrund ist bei einer Druckfestigkeit der thermischen Trennung von unter fünf N/mm² mit einer Abminderung der Tragfähigkeit auf unter 25 % zu rechnen. Bei Vollziegel-Untergrund ist eine vergleichbare Abminderung erst bei einer Druckfestigkeit der thermischen Trennung von unter 0,5 N/mm² zu erwarten. Demgemäß ist insbesondere bei Untergründen mit hoher Tragfähigkeit auf eine möglichst hohe Druckfestigkeit der thermischen Trennung Wert zu legen.

Anders dargestellt (Abb. 50 und Abb. 51) wird erkennbar, dass bei (relativ zum Verankerungsgrund) harten thermischen Trennungen die Tragfähigkeit der Fassaden-Unterkonstruktion mit größer werdender Dicke der thermischen Trennung kontinuierlich abnimmt und somit die Tragfähigkeit bei lediglich 5 mm thermischer Trennung noch wesentlich größer ist als bei 40 mm. Je geringer die Druckfestigkeit der thermischen Trennung im Vergleich zum Verankerungsgrund, desto geringer wird der Einfluss der Dicke der thermischen Trennung: Bei Stahlbeton-Untergrund und einer Druckfestigkeit der thermischen Trennung von 3,5 N/mm² oder gar 0,8 N/mm² verringert sich die Tragfähigkeit bei einer Erhöhung von 5 mm auf 40 mm thermische Trennung nur mehr geringfügig. Bei

0,3 N/mm² Druckfestigkeit der thermischen Trennung sinkt die Tragfähigkeit rechnerisch unabhängig von deren Dicke auf null, weshalb von einer Darstellung in den Balkendiagrammen abgesehen wurde.

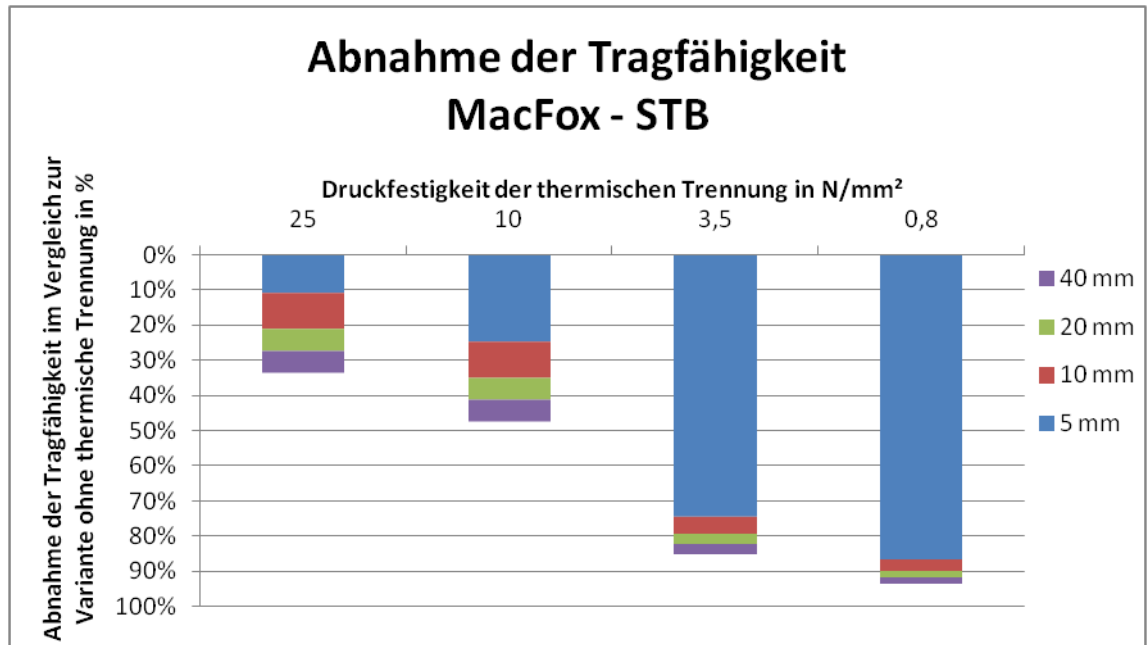


Abb. 50: Abnahme der Gesamt-Tragfähigkeit bei „MacFox“-Aluminium-Konsolen auf Stahlbetonuntergrund im Vergleich zur Variante ohne thermische Trennung je nach Dicke und Druckfestigkeit der thermischen Trennung

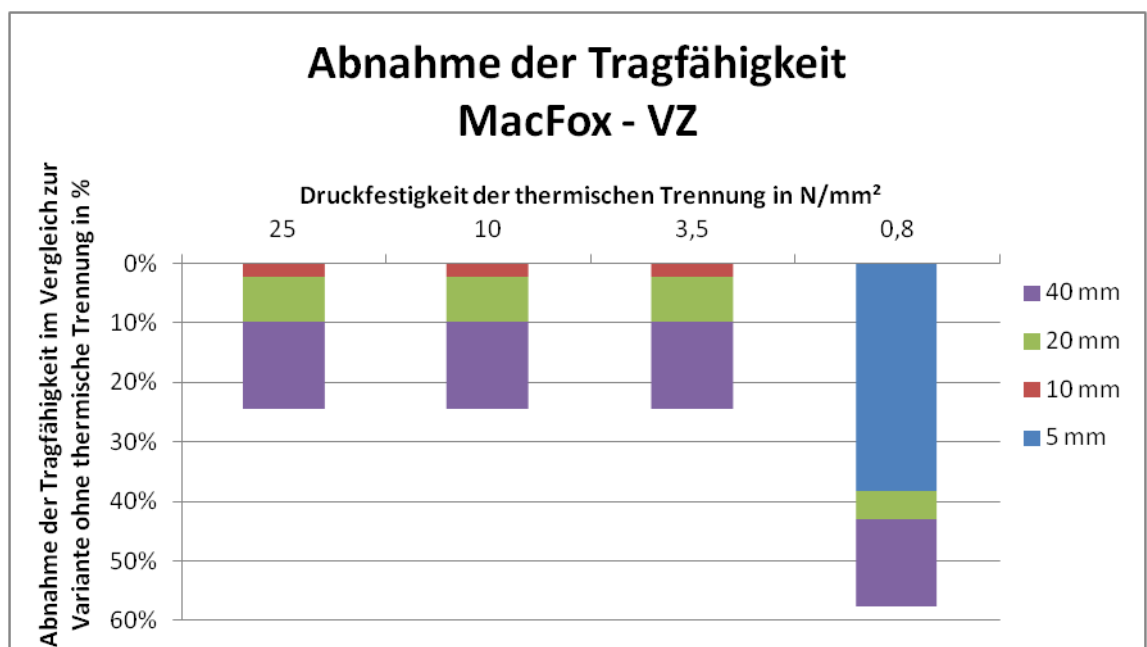


Abb. 51: Abnahme der Gesamt-Tragfähigkeit bei „MacFox“-Aluminium-Konsolen auf Vollziegeluntergrund im Vergleich zur Variante ohne thermische Trennung je nach Dicke und Druckfestigkeit der thermischen Trennung

Insgesamt kann aus statischer Sicht von thermischen Trennungen mit einer Druckfestigkeit von unter 3,5 N/mm² abgeraten werden, da hierbei jedenfalls mit

einer stark reduzierten Tragfähigkeit der Konsolen zu rechnen ist. Je höher die Festigkeit des Verankerungsgrundes, desto härter sollte auch die thermische Trennung sein. Während bei Vollholz- bzw. Vollziegel-Untergrund die Druckfestigkeit der thermischen Trennung mit $3,5 \text{ N/mm}^2$ noch ausreichend erscheint, sollte bei Stahlbeton-Untergrund die Druckfestigkeit der thermischen Trennung mindestens 10 N/mm^2 betragen.

Um Aussagen über den Gesamteffekt einer verbesserten thermischen Trennung treffen zu können, müssen die bauphysikalischen und statischen Berechnungsergebnisse zusammengeführt und die resultierenden ΔU -Werte ermittelt werden. Dies soll Ziel und Inhalt des nun folgenden Kapitels sein.

4.3 Vergleich der ΔU -Werte je nach thermischer Trennung

Für die Berechnung der ΔU -Werte muss, wie im Kapitel 4.2 beschrieben, eine Annahme bezüglich der erforderlichen Anzahl an Fest- und Gleitpunkten getroffen werden. Diese Annahme entspricht auch den Richtwerten für die erforderliche Anzahl an Konsolen je m^2 in Abhängigkeit des Verankerungsgrundes (Tab. 9).

Tab. 9: Richtwerte für die erforderliche Anzahl an Konsolen je m^2 in Abhängigkeit des Verankerungsgrundes [BRO17]

Verankerungsgrund	Konsolen je m^2
Stahlbeton	2
Vollholz	3
Vollziegel	3
Normalziegel	4,5

Da die Angabe von konkreten ΔU -Werten von hinterlüfteten Fassaden nicht das primäre Ziel dieser Arbeit ist, werden in den nachfolgenden Diagrammen lediglich prozentuelle Veränderungen der ΔU -Werte in Abhängigkeit der Qualität der thermischen Trennung miteinander verglichen. Die genauen Berechnungsergebnisse mit Angabe der ΔU -Werte sind im Anhang zu finden (Kapitel 8.4).

Bei Stahlbeton als Verankerungsgrund ist nur unter bestimmten Umständen eine Verringerung des ΔU -Wertes durch die thermische Trennung möglich: Es bedarf hier eines druckfesten thermischen Trennelementes mit einer Dicke von fünf bis zehn Millimetern. Mit abnehmender Druckfestigkeit der thermischen Trennung steigt der ΔU -Wert markant an (Abb. 52 und Abb. 53). Bei Edelstahl-Unterkonstruktion kommt es in keinem der untersuchten Fälle zu einer Verringerung des ΔU -Wertes. Wenn dennoch eine thermische Trennung gewünscht ist, sollte deren Dicke maximal 5 mm und deren Druckfestigkeit mindestens 10 N/mm^2 ($\lambda = 0,08 \text{ W/(m.K)}$) betragen.

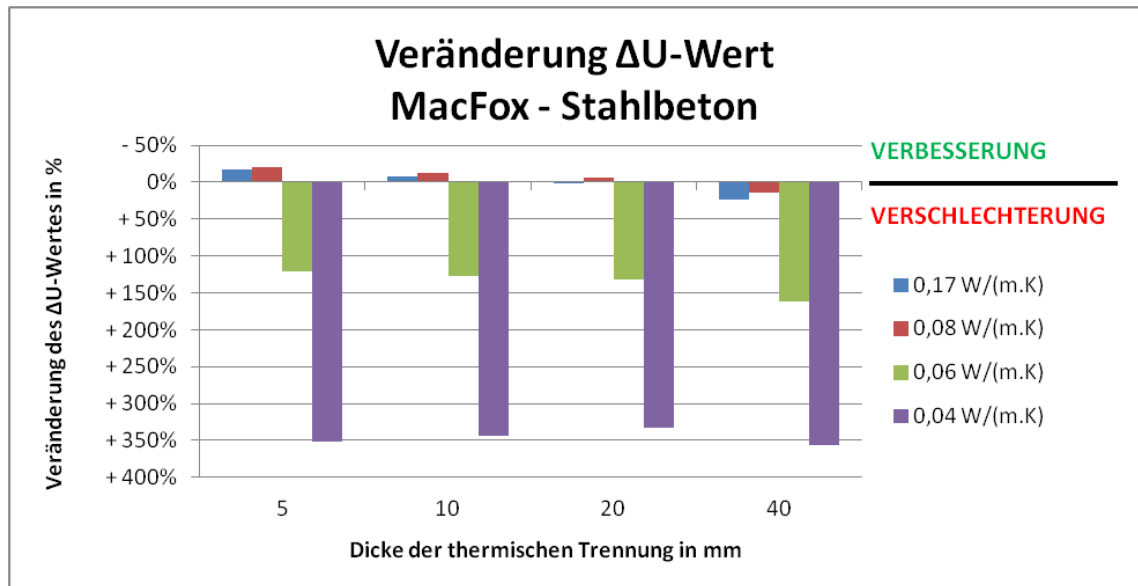


Abb. 52: Veränderung des ΔU -Wertes im Vergleich zur Variante ohne thermische Trennung bei Verwendung der Aluminium-Konsolen „MacFox“ auf Stahlbeton-Untergrund je nach Dicke und Wärmeleitfähigkeit der thermischen Trennung

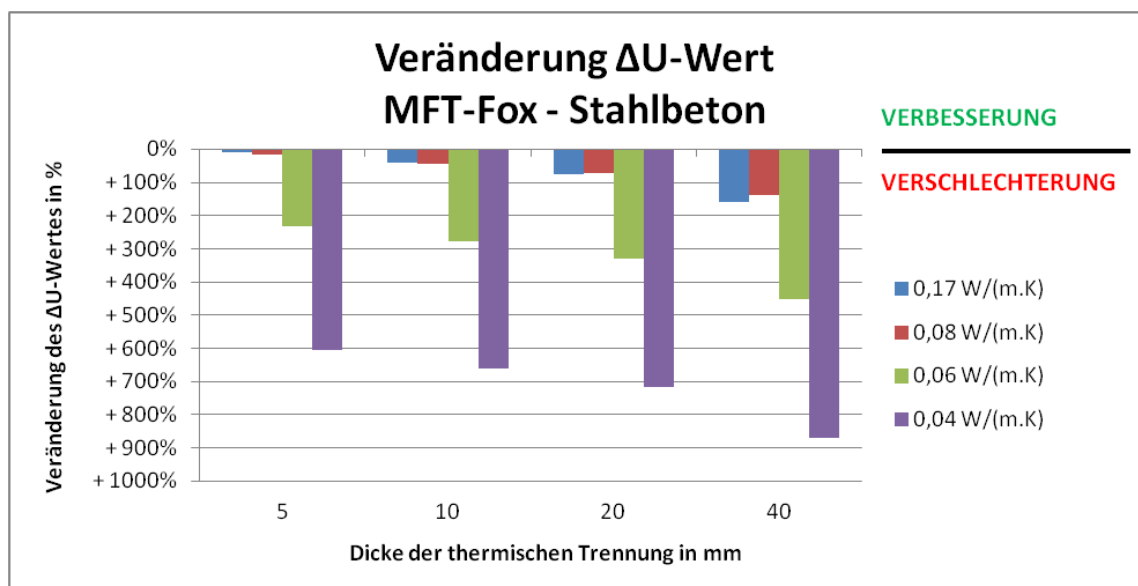


Abb. 53: Veränderung des ΔU -Wertes im Vergleich zur Variante ohne thermische Trennung bei Verwendung der Edelstahl-Konsolen „MFT-Fox“ auf Stahlbeton-Untergrund je nach Dicke und Wärmeleitfähigkeit der thermischen Trennung

Bei Vollziegel als Verankerungsgrund hat die Druckfestigkeit der thermischen Trennung weniger Einfluss auf den ΔU -Wert der Fassaden-Unterkonstruktion. Hier werden die besten Werte bei einer Wärmeleitfähigkeit der thermischen Trennung von 0,06 W/(m.K) bzw. 0,08 W/(m.K) erzielt (Abb. 54 und Abb. 55), wobei die optimale Dicke der thermischen Trennung bei

Edelstahl-Unterkonstruktion mit fünf Millimetern wesentlich geringer ist als bei Aluminium-Unterkonstruktion (20 mm).

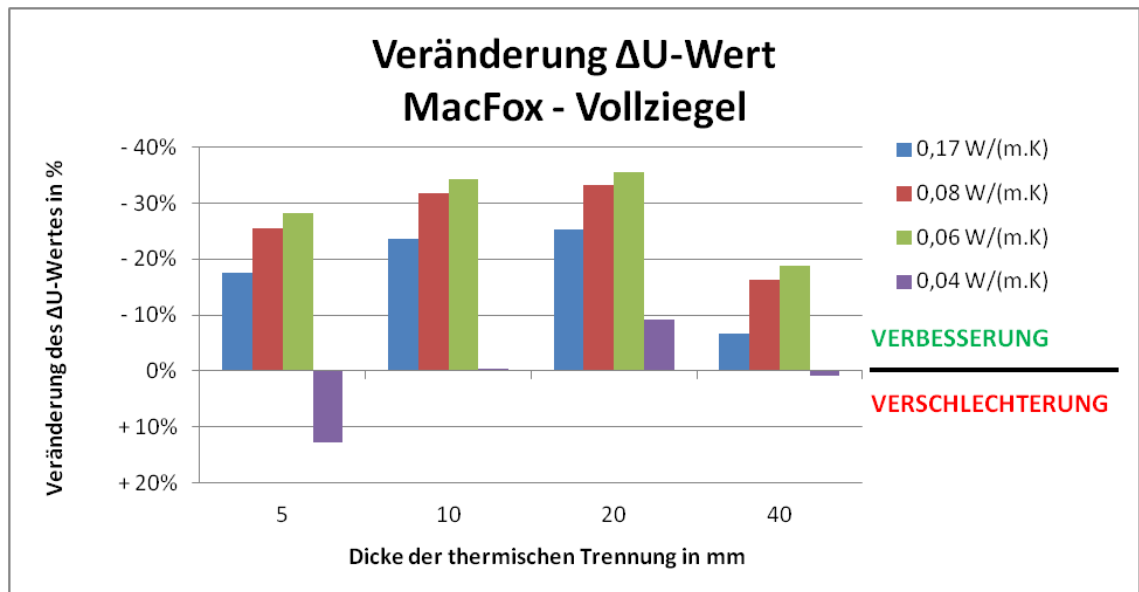


Abb. 54: Veränderung des ΔU -wertes im Vergleich zur Variante ohne thermische Trennung bei Verwendung der Aluminium-Konsolen „MacFox“ auf Vollziegel-Untergrund je nach Dicke und Wärmeleitfähigkeit der thermischen Trennung

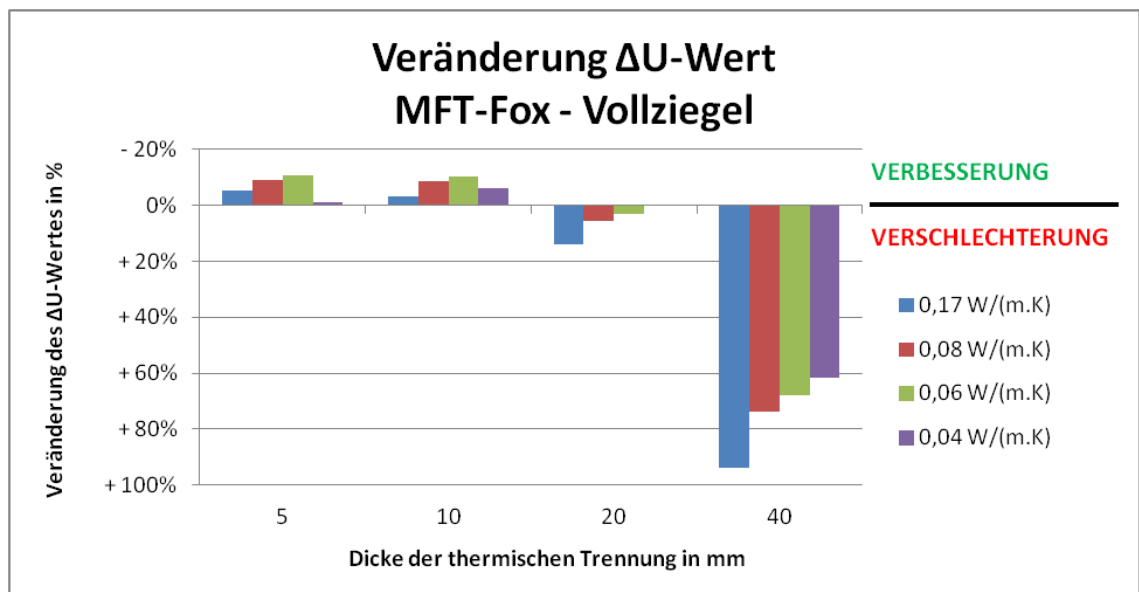


Abb. 55: Veränderung des ΔU -wertes im Vergleich zur Variante ohne thermische Trennung bei Verwendung der Edelstahl-Konsolen „MFT-Fox“ auf Vollziegel-Untergrund je nach Dicke und Wärmeleitfähigkeit der thermischen Trennung

Auch bei Vollholz als Verankerungsgrund hat die Druckfestigkeit der thermischen Trennung nur einen geringen Einfluss auf den ΔU -Wert der Fassaden-Unterkonstruktion. Erst bei sehr weichen bzw. sehr dicken thermischen Trennungen kommt es zu einem deutlichen Anstieg des ΔU -wertes

(siehe Graphen mit $\lambda = 0,04 \text{ W}/(\text{m.K})$ bzw. 40 mm thermischer Trennung in Abb. 56 und Abb. 57). Die besten Werte werden wieder bei einer Wärmeleitfähigkeit der thermischen Trennung von $0,06 \text{ W}/(\text{m.K})$ bzw. $0,08 \text{ W}/(\text{m.K})$ erzielt.

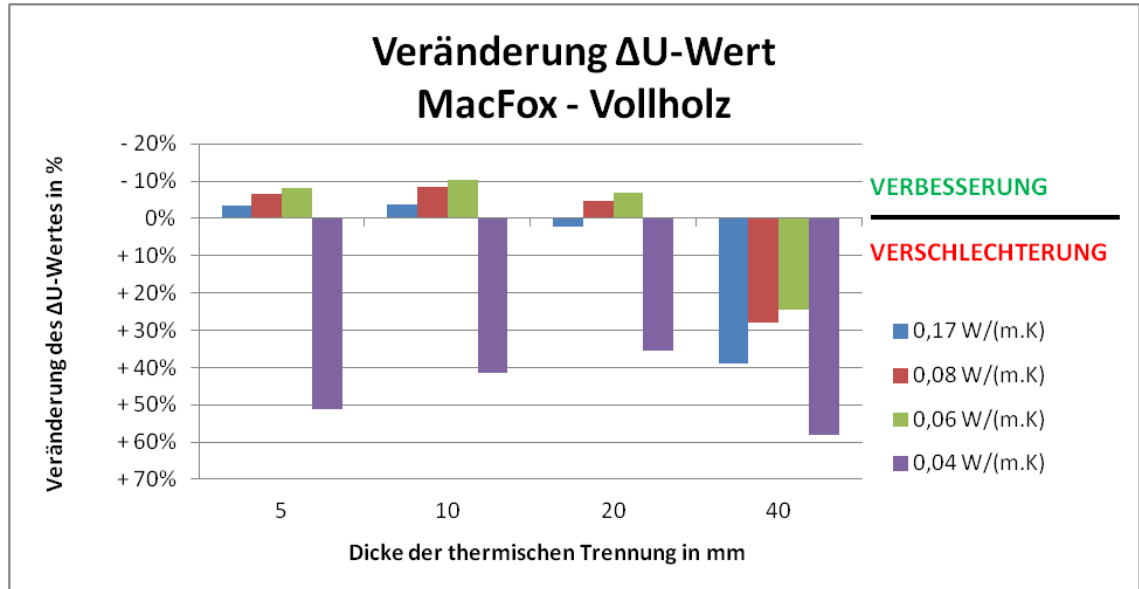


Abb. 56: Veränderung des ΔU -Wertes im Vergleich zur Variante ohne thermische Trennung bei Verwendung der Aluminium-Konsolen „MacFox“ auf Vollholz-Untergrund je nach Dicke und Wärmeleitfähigkeit der thermischen Trennung

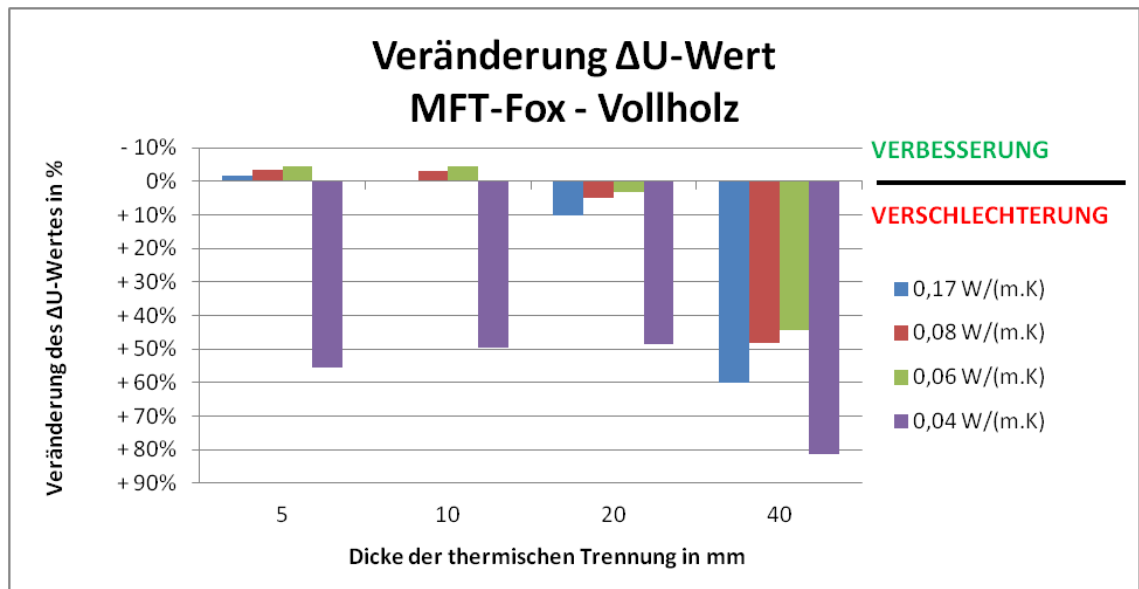


Abb. 57: Veränderung des ΔU -Wertes im Vergleich zur Variante ohne thermische Trennung bei Verwendung der Edelstahl-Konsolen „MFT-Fox“ auf Vollholz-Untergrund je nach Dicke und Wärmeleitfähigkeit der thermischen Trennung

Insgesamt lässt sich beobachten, dass die optimale Dimensionierung des thermischen Trennelementes (in Bezug auf dessen Dicke, Wärmeleitfähigkeit und Druckfestigkeit) in hohem Maße vom Material der Unterkonstruktion sowie

dem Material des Verankerungsgrundes abhängig ist (Tab. 10). Die größte Verbesserung des ΔU -Wertes (35% bzw. $0,082 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$) wird bei Aluminium-Unterkonstruktion und Vollziegel als Verankerungsgrund erreicht. Die optimale Dicke der thermischen Trennung variiert zwischen 5 mm und 20 mm. Die optimale Wärmeleitfähigkeit der thermischen Trennung bewegt sich zwischen $0,06 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ bei Vollziegel und Vollholz und $0,08$ bzw. $0,17 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ bei Stahlbeton als Verankerungsgrund. Eine Erhöhung der Dicke der thermischen Trennung auf 40 mm bzw. eine Verringerung der Wärmeleitfähigkeit auf $\lambda = 0,04 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ verbunden mit einer Verringerung der Druckfestigkeit auf $0,8 \text{ N}/\text{mm}^2$ bewirken in allen Fällen eine deutliche Ver-schlechterung des ΔU -Wertes.

Tab. 10: optimale Dimensionierung des thermischen Trennelementes in Abhängigkeit der Konsole und des Verankerungsgrundes

Konsole	Verankerungsgrund	Veränderung ΔU -Wert		Dicke mm	Wärmeleitfähigkeit λ W/(m.K)	Druckfestigkeit N/mm ²
		%	W/m ² K			
-	-	%	W/m ² K	mm	W/(m.K)	N/mm ²
MacFox (Aluminium)	Stahlbeton	-20 %	-0,049	5 mm	0,08	10
	Vollziegel	-35 %	-0,082	20 mm	0,06	3,5
	Vollholz	-10 %	-0,006	10 mm	0,06	3,5
MFT-Fox (Edelstahl)	Stahlbeton	+11 %	+0,003	5 mm	0,17	25
	Vollziegel	-11 %	-0,004	5 mm	0,06	3,5
	Vollholz	-4 %	-0,001	10 mm	0,06	3,5

Im Allgemeinen kann festgehalten werden, dass die in der Praxis weit verbreitete Ausführungsvariante mit standardmäßig 5 mm thermischer Trennung mit einer Wärmeleitfähigkeit von $\lambda = 0,08 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ einen guten Kompromiss zwischen statischen Anforderungen an die Tragfähigkeit der Konsolen und bauphysikalischen Anforderungen an den Wärmeschutz und die Wärmebrückenfreiheit darstellt. Unter Zugrundelegung einer solchen thermischen Trennung ergeben sich in Abhängigkeit des Verankerungsgrundes sowie des Materials der Unterkonstruktion bei 16 cm Wärmedämmung und einem Fassadeneigengewicht von $0,2 \text{ kN}/\text{m}^2$ (analog den Randbedingungen gemäß Kapitel 4.2) ΔU -Werte zwischen $0,19 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ bei Aluminium-Konsolen

auf Stahlbeton-Untergrund und $0,02 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ bei Edelstahl-Konsolen auf Vollholz-Untergrund (Abb. 58)

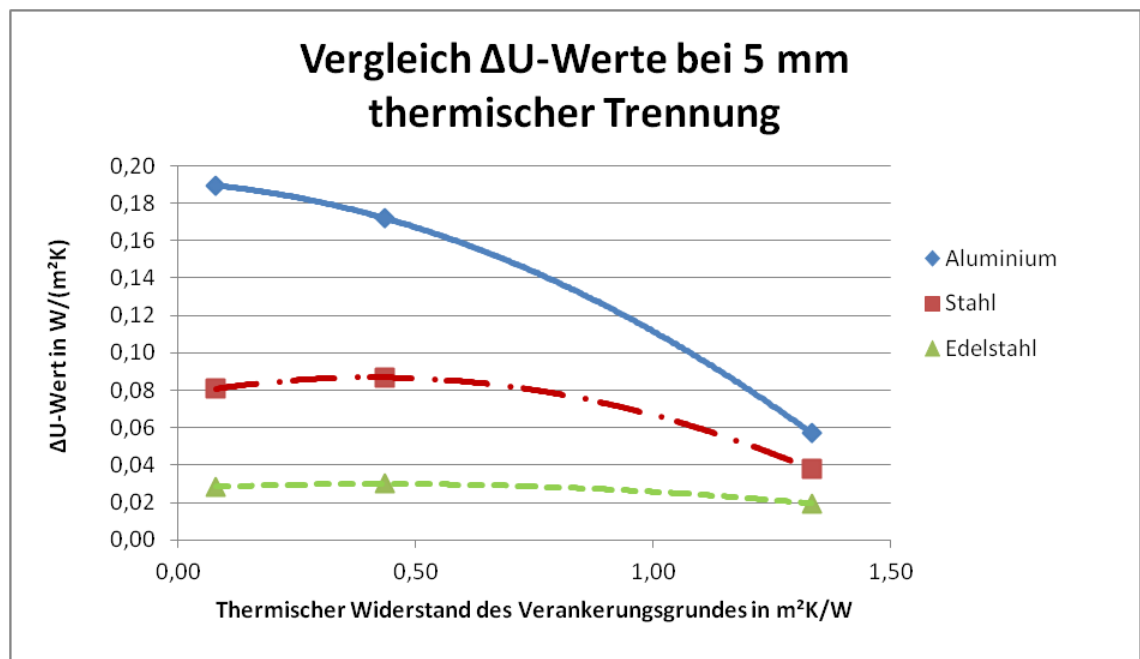


Abb. 58: ΔU -Werte bei 5 mm thermischer Trennung in Abhängigkeit des Materials der Unterkonstruktion und des thermischen Widerstandes des Verankerungsgrundes

Da die Mehrzahl der Neubauten in Stahlbeton-Bauweise ausgeführt wird, bietet das nachfolgende Kapitel Übersichtstabellen sowie Diagramme für ΔU -Werte von Fassaden-Unterkonstruktionen auf Stahlbeton-Untergrund.

4.4 Übersichtstabellen für ΔU -Werte bei Stahlbeton-Untergrund

Die nachfolgenden Übersichtstabellen (Tab. 11, Tab. 12 und Tab. 13) gehen von einer Dicke der thermischen Trennung der Konsolen von 5 mm mit einer Wärmeleitfähigkeit von $\lambda = 0,08 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ aus. Als Verankerungsgrund wird einheitlich mit 20 cm Stahlbeton gerechnet, da damit der größte Teil der Neubauten in Österreich abgedeckt wird. Für das Fassadeneigengewicht werden die Varianten $0,1 \text{ kN}/\text{m}^2$, $0,2 \text{ kN}/\text{m}^2$ und $0,3 \text{ kN}/\text{m}^2$ angegeben. Die sonstigen Randbedingungen (Winddruck $1,1 \text{ kN}/\text{m}^2$, Windsog $0,77 \text{ kN}/\text{m}^2$, Hinterlüftungslichte vier Zentimeter) sind ident mit jenen in Kapitel 4.2.

Die Wärmeleitfähigkeit der Regeldämmung wird mit $\lambda = 0,032 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ angegeben. Da diese einen vernachlässigbaren Einfluss auf den ΔU -Wert hat, wird derselbe Wert für alle Wärmebrückenberechnungen verwendet. Die Dämmstärke selbst variiert zwischen den Werten 4 cm und 30 cm in Schritten von jeweils zwei Zentimetern. Die Anzahl der erforderlichen Konsolen wurde in Anlehnung an Kapitel 4.2 unter Zugrundelegung der Aluminium-Konsolen „MacFox“ sowie der Edelstahl-Konsolen „MFT-Fox“ aus Kapitel 4.1 ermittelt und von der Firma Eurofox GmbH auf Plausibilität geprüft [MAY18]. Die ΔU -Werte werden für Unterkonstruktionen aus Aluminium, Stahl und Edelstahl angegeben, wobei für den Fall der Stahl-Unterkonstruktion die Geometrie der „MFT-Fox“ Konsolen (Edelstahl) herangezogen wurde.

Unter den drei Übersichtstabellen sind die jeweiligen ΔU -Wert-Verläufe auch grafisch dargestellt (Abb. 59, Abb. 60 und Abb. 61). Hierbei ist erkennbar, dass der ΔU -Wert je nach Material der Unterkonstruktion unterschiedlich stark von der Dämmstärke abhängt: Bei einem Fassadengewicht von $0,2 \text{ kN}/\text{m}^2$ und Aluminium-Unterkonstruktion steigt der ΔU -Wert von $0,16 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ bei 4 cm Dämmung um 33 % auf $0,21 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ bei 30 cm Dämmung an. Dahingegen sinkt der ΔU -Wert bei Stahl-Unterkonstruktion von ca. $0,10 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ bei 4 cm Dämmung um 26 % auf $0,07 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ bei 30 cm Dämmung und bei Edelstahl-Unterkonstruktion von ca. $0,04 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ bei 4 cm Dämmung um 50 % auf $0,02 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ bei 30 cm Dämmung. Der Einfluss des Fassadeneigengewichtes hält sich mit ca. +/- 8 % bei Verringerung auf $0,1 \text{ N}/\text{m}^2$ bzw. Erhöhung auf $0,3 \text{ N}/\text{m}^2$ in Grenzen. Bei höheren Fassadengewichten (z.B. bei Fassadenbegrünungspaneelen) bzw. bei größeren Abständen zwischen Fassadenplatte

und Verankerungsgrund ist jedoch jedenfalls eine auf hinterlüftete Fassaden spezialisierte Fachfirma zurate zu ziehen.

Tab. 11: ΔU -Werte bei $0,1 \text{ kN/m}^2$ Fassadeneigengewicht und 5 mm thermischer Trennung mit $\lambda = 0,08 \text{ W/(m.K)}$ bei Stahlbeton-Untergrund in Abhängigkeit der Dämmstärke und des Materials der Unterkonstruktion

Fassadeneigengewicht: $0,1 \text{ kN/m}^2$									
Variation der Dämmung		U0	Anzahl Konsolen je m^2			ΔU -Wert			
cm	W/(m.K)	W/(m^2K)	Gleitpunkte	Festpunkte	gesamt	W/ m^2K			
						Aluminium	Stahl	Edelstahl	
4	0,032	0,63	0,97	0,69	1,66	0,145	0,088	0,041	
6	0,032	0,45	0,99	0,71	1,70	0,159	0,090	0,039	
8	0,032	0,35	1,01	0,72	1,73	0,168	0,088	0,036	
10	0,032	0,29	1,03	0,74	1,77	0,173	0,086	0,033	
12	0,032	0,24	1,05	0,75	1,80	0,178	0,084	0,031	
14	0,032	0,21	1,07	0,76	1,84	0,181	0,081	0,029	
16	0,032	0,19	1,09	0,78	1,87	0,184	0,078	0,028	
18	0,032	0,17	1,11	0,79	1,91	0,185	0,076	0,026	
20	0,032	0,15	1,13	0,81	1,94	0,187	0,074	0,025	
22	0,032	0,14	1,15	0,82	1,97	0,189	0,072	0,024	
24	0,032	0,13	1,17	0,84	2,01	0,190	0,070	0,023	
26	0,032	0,12	1,19	0,85	2,04	0,191	0,068	0,022	
28	0,032	0,11	1,21	0,87	2,08	0,192	0,066	0,021	
30	0,032	0,10	1,23	0,88	2,11	0,193	0,065	0,020	

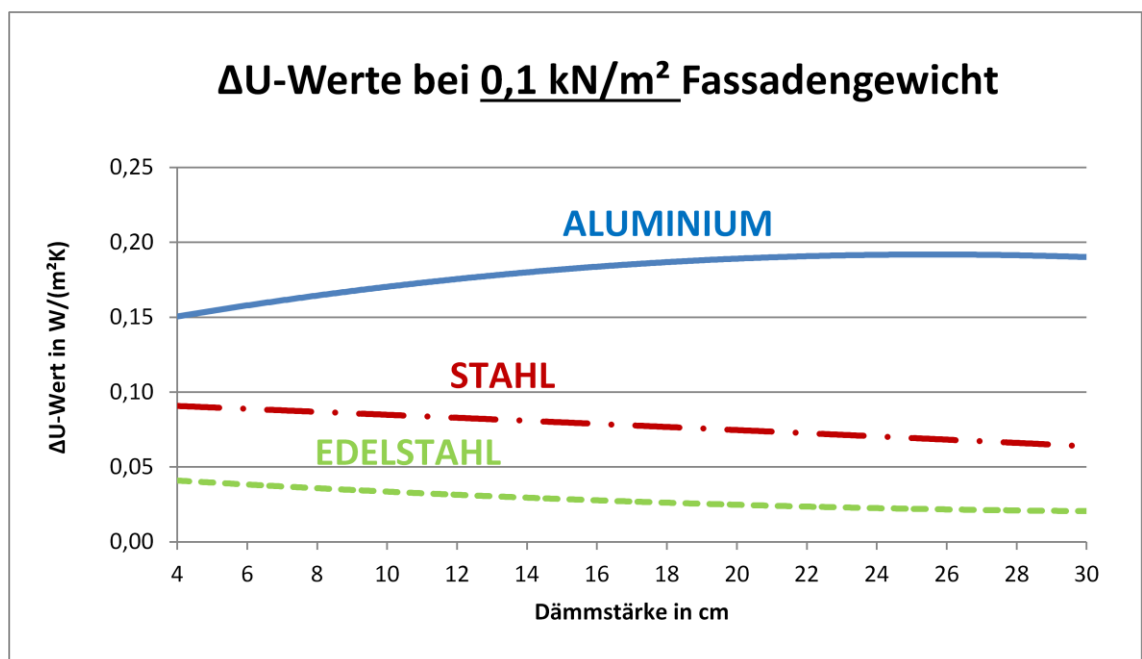


Abb. 59: ΔU -Werte bei $0,1 \text{ kN/m}^2$ Fassadeneigengewicht und 5 mm thermischer Trennung mit $\lambda = 0,08 \text{ W/(m.K)}$ bei Stahlbeton-Untergrund in Abhängigkeit der Dämmstärke und des Materials der Unterkonstruktion

Tab. 12: ΔU -Werte bei $0,2 \text{ kN/m}^2$ Fassadeneigengewicht und 5 mm thermischer Trennung mit $\lambda = 0,08 \text{ W/(m.K)}$ bei Stahlbeton-Untergrund in Abhängigkeit der Dämmstärke und des Materials der Unterkonstruktion

Fassadeneigengewicht: $0,2 \text{ kN/m}^2$									
Variation der Dämmung		U0 W/(m ² K)	Anzahl Konsolen je m ²			ΔU-Wert			
cm	W/(m.K)		Gleitpunkte	Festpunkte	gesamt	W/m ² /K			
						Aluminium	Stahl	Edelstahl	
4	0,032	0,63	1,05	0,75	1,80	0,157	0,095	0,044	
6	0,032	0,45	1,07	0,77	1,84	0,172	0,097	0,042	
8	0,032	0,35	1,09	0,78	1,88	0,182	0,096	0,039	
10	0,032	0,29	1,12	0,80	1,91	0,188	0,093	0,036	
12	0,032	0,24	1,14	0,81	1,95	0,192	0,091	0,034	
14	0,032	0,21	1,16	0,83	1,99	0,196	0,088	0,032	
16	0,032	0,19	1,18	0,84	2,03	0,199	0,085	0,030	
18	0,032	0,17	1,20	0,86	2,06	0,201	0,082	0,028	
20	0,032	0,15	1,23	0,88	2,10	0,202	0,080	0,027	
22	0,032	0,14	1,25	0,89	2,14	0,204	0,078	0,026	
24	0,032	0,13	1,27	0,91	2,18	0,206	0,076	0,025	
26	0,032	0,12	1,29	0,92	2,21	0,207	0,074	0,024	
28	0,032	0,11	1,31	0,94	2,25	0,208	0,072	0,023	
30	0,032	0,10	1,34	0,95	2,29	0,209	0,070	0,022	

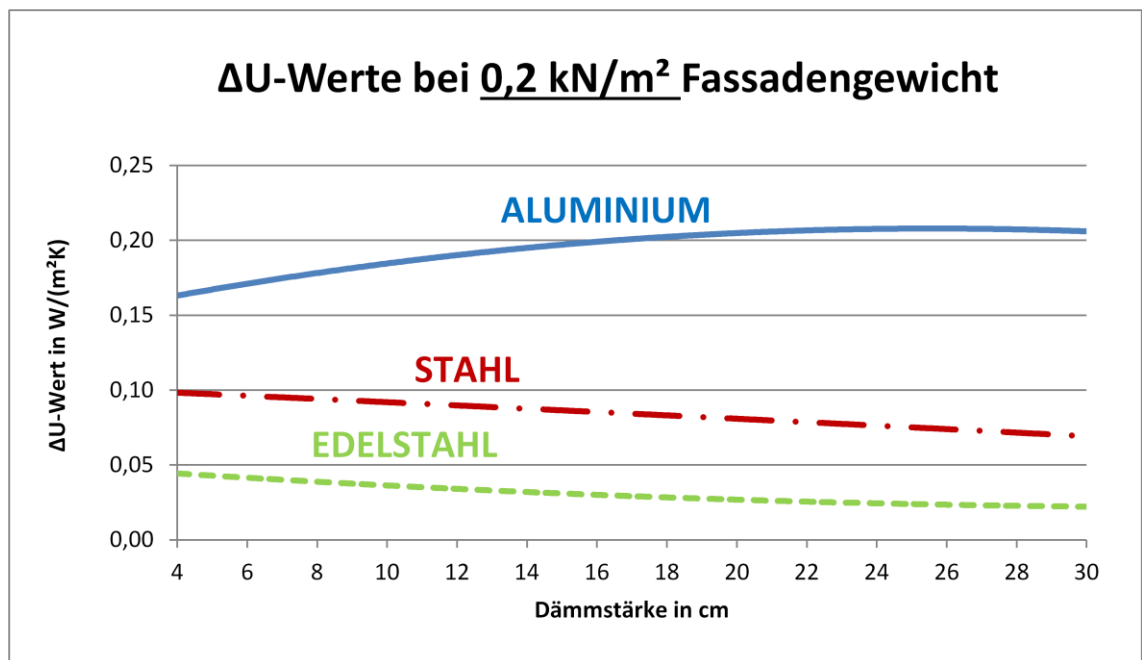


Abb. 60: ΔU -Werte bei $0,2 \text{ kN/m}^2$ Fassadeneigengewicht und 5 mm thermischer Trennung mit $\lambda = 0,08 \text{ W/(m.K)}$ bei Stahlbeton-Untergrund in Abhängigkeit der Dämmstärke und des Materials der Unterkonstruktion

Tab. 13: ΔU -Werte bei $0,3 \text{ kN/m}^2$ Fassadeneigengewicht und 5 mm thermischer Trennung mit $\lambda = 0,08 \text{ W/(m.K)}$ bei Stahlbeton-Untergrund in Abhängigkeit der Dämmstärke und des Materials der Unterkonstruktion

Fassadeneigengewicht: $0,3 \text{ kN/m}^2$									
Variation der Dämmung		U0	Anzahl Konsolen je m^2			ΔU -Wert			
cm	W/(m.K)	W/(m^2K)	Gleitpunkte	Festpunkte	gesamt	W/ $\text{m}^2\text{/K}$			
						Aluminium	Stahl	Edelstahl	
4	0,032	0,63	1,13	0,81	1,94	0,169	0,103	0,048	
6	0,032	0,45	1,16	0,83	1,98	0,186	0,105	0,045	
8	0,032	0,35	1,18	0,84	2,02	0,196	0,103	0,042	
10	0,032	0,29	1,20	0,86	2,06	0,202	0,101	0,039	
12	0,032	0,24	1,23	0,88	2,10	0,207	0,098	0,036	
14	0,032	0,21	1,25	0,89	2,14	0,211	0,095	0,034	
16	0,032	0,19	1,27	0,91	2,18	0,214	0,092	0,032	
18	0,032	0,17	1,30	0,93	2,22	0,216	0,089	0,031	
20	0,032	0,15	1,32	0,94	2,26	0,218	0,086	0,029	
22	0,032	0,14	1,34	0,96	2,30	0,220	0,084	0,028	
24	0,032	0,13	1,37	0,98	2,34	0,222	0,082	0,027	
26	0,032	0,12	1,39	0,99	2,38	0,223	0,079	0,025	
28	0,032	0,11	1,41	1,01	2,42	0,224	0,077	0,025	
30	0,032	0,10	1,44	1,03	2,47	0,225	0,076	0,024	

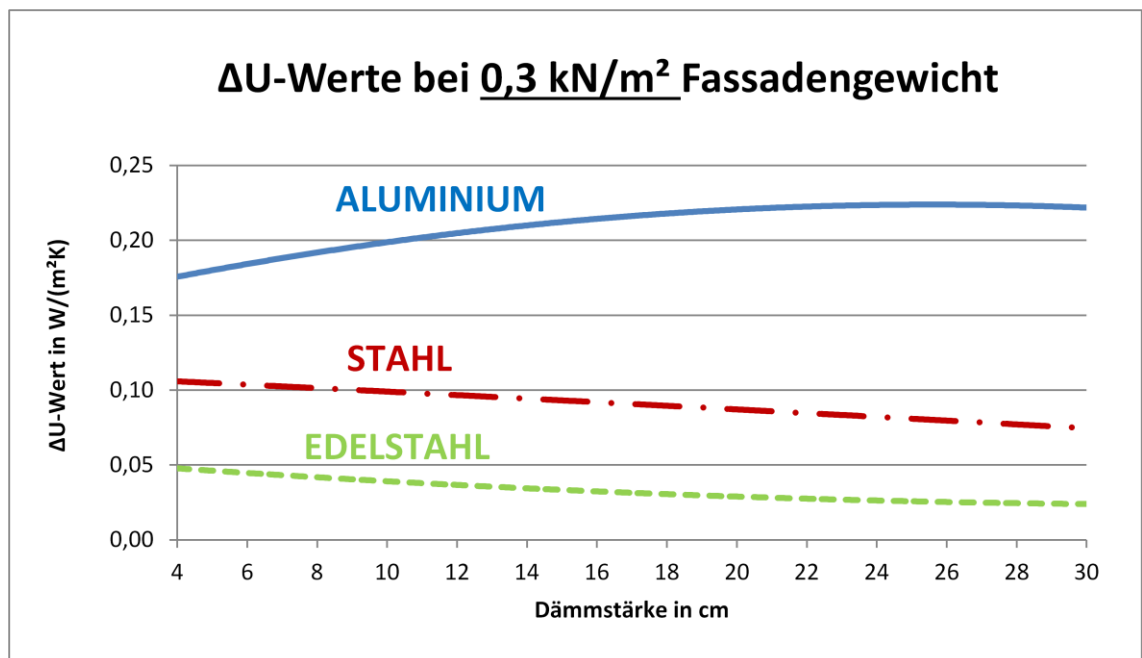


Abb. 61: ΔU -Werte bei $0,3 \text{ kN/m}^2$ Fassadeneigengewicht und 5 mm thermischer Trennung mit $\lambda = 0,08 \text{ W/(m.K)}$ bei Stahlbeton-Untergrund in Abhängigkeit der Dämmstärke und des Materials der Unterkonstruktion

Nachfolgend werden die Ergebnisse dieses Kapitels zusammengefasst und Empfehlungen für die thermische Trennung von Konsolen bei hinterlüfteten Fassaden formuliert.

4.5 Empfehlungen und Ausblick

Die durchgeführten Wärmebrücken- und statischen Berechnungen haben gezeigt, dass eine Erhöhung der Dicke bzw. Verringerung der Wärmeleitfähigkeit der thermischen Trennung nicht unbedingt eine Verbesserung des ΔU -Wertes zur Folge haben müssen. Bei zu großer Dicke der thermischen Trennung nimmt die Tragfähigkeit der Konsolen der hinterlüfteten Fassade rasant ab, wodurch die reduzierte Wärmebrückenwirkung je Konsole durch die stark erhöhte Anzahl an statisch erforderlichen Konsolen wieder aufgehoben wird. Analog verhält es sich mit thermischen Trennungen, die zwar eine sehr geringe Wärmeleitfähigkeit aufweisen, dafür aber auch eine wesentlich geringere Druckfestigkeit. Dies führt wiederum zu einer verringerten Tragfähigkeit und somit einer erhöhten erforderlichen Anzahl an Konsolen, wodurch es insgesamt zu einer deutlichen Verschlechterung der ΔU -Werte kommen kann.

Im Sinne einer wärmebrückenarmen Bauweise von hinterlüfteten Fassaden erweist sich jedenfalls die Verwendung von Edelstahl als Unterkonstruktionsmaterial als vorteilhaft, da thermische Trennelemente zur Wärmebrückenreduktion schnell an ihre technischen Grenzen stoßen, sodass Aluminium-Unterkonstruktionen auch bei optimal dimensionierten thermischen Trennelementen eine maßgebliche Schwächung der Fassade darstellen.

Es ist folglich entscheidend, insbesondere bei der Auswahl der Konsolen auf eine hohe thermische Qualität zu achten. Um den Planern eine Auswahl an Konsolen bereitzustellen, die auch für den Einsatz bei Passivhäusern geeignet sind, listet das Passivhaus Institut in deren Komponentendatenbank derzeit 15 Fassadenanker unterschiedlicher Hersteller mit an gebauten Beispielgebäuden gemessenen ΔU -Werten zwischen 0,025 und 0,004 W/(m².K) [PHI2018]. Dabei handelt es sich durchwegs um Edelstahl- oder Kunststoffkonsolen.

Weitere Forschung im Gebiet der thermischen Trennungen von Konsolen für hinterlüftete Fassaden macht aus Sicht des Verfassers nur Sinn, wenn die Entwicklungen in Richtung höherer Druckfestigkeit bei gleichbleibender Wärmeleitfähigkeit bzw. geringerer Wärmeleitfähigkeit bei gleichbleibender Druckfestigkeit gehen. Nur auf diese Weise kann sowohl den statischen als auch den bauphysikalischen Belangen Genüge getan werden.

Als kritischer Betrachter könnte man sich die Frage stellen, ob thermische Trennungen in Zukunft überhaupt noch erforderlich sein werden, hat doch die Wahl des Materials der Konsolen einen wesentlich größeren Einfluss auf den ΔU -Wert als die üblichen thermischen Trennelemente. Aktuelle Entwicklungen auf dem Gebiet der wärmebrückenfreien Fassadenkonsolen gehen immer mehr in Richtung glasfaserarmerter Kunststoffkonsolen, die aufgrund der geringen Wärmeleitfähigkeit des Materials von ca. $0,4 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ keine zusätzliche thermische Trennung mehr benötigen. Der Nachteil von Kunststoff-Konsolen ist jedoch deren Brennbarkeit, weshalb deren Einsatz bei Hochhäusern untersagt ist.

Die größte Herausforderung für die Forschung im Gebiet der wärmebrückenfreien Konsolen wird aus Sicht des Verfassers die Entwicklung von Konsolen sein, die einerseits die Nichtbrennbarkeit des Edelstahl und andererseits die geringe Wärmeleitfähigkeit des Kunststoffs in einem Produkt vereinen. Ob dies etwa Isokorb-ähnliche Konsolen, Konsolen aus glasfaserarmiertem ultrahochfesten Beton oder einfach nur Konsolen aus Glas sein werden, wird sich in naher Zukunft zeigen.

5 Wärmebrücken bei begrünten, hinterlüfteten Fassaden

Im zweiten Teil dieser Arbeit liegt der Fokus auf begrünten, hinterlüfteten Fassaden und den durch die jeweilige Unterkonstruktion entstehenden Wärmebrücken. Anhand von konkreten Projekten, bei denen wandgebundene Fassadenbegrünungselemente montiert wurden, werden sowohl durch Simulation als auch, wo möglich, anhand von Wärmestrommessungen die entstehenden Wärmebrücken ermittelt und bewertet. Bodengebundene Fassadenbegrünungen sind nicht Gegenstand der Untersuchungen, da deren Vielfalt den Rahmen dieser Arbeit sprengen würde.

Es wurden insgesamt vier Projekte ausgewählt, die im Zentrum der nachfolgenden Ausführungen stehen sollen: Zwei Gymnasien, die aktuell von der Technischen Universität Wien im Rahmen eines Forschungsprojektes mit Fassadenbegrünungs-Paneelen der Firmen Optigrün® bzw. Techmetall ausgestattet wurden, ein Bauvorhaben mit einer Grünfassade der Firma 90^{DE}GREEN® sowie das Amtsgebäude der MA 31, dessen Fassade im Jahr 2015 saniert und mit massiven, von einem Stahlgerüst eingefassten Pflanzenträgern bestückt wurde. Bei der Auswahl der Projekte wurde darauf geachtet, dass deren Außenwände außenseitig gedämmt sind und die Unterkonstruktionen bzw. die Konsolen der Fassadenbegrünungen die Dämmebene durchdringen. Dies liegt darin begründet, dass Fassadenbegrünungen, die an ungedämmten Wänden (z.B. Bestandsmauerwerk) montiert werden, keine Wärmebrücken verursachen, sondern hier sogar zu einer Reduktion der winterlichen Wärmeverluste führen können [KOR16].

In den folgenden Abschnitten werden die ausgewählten Projekte und deren Begrünungsmaßnahmen im Detail erläutert.

5.1 Beispiele ausgeführter Projekte

5.1.1 BG und BRG Diefenbachgasse – System Optigrün®

Das Bundesgymnasium und Bundesrealgymnasium Diefenbachgasse befindet sich im 15. Wiener Gemeindebezirk und wurde im Sommer 2017 im Rahmen des Projektes „GRÜNEzukunftSCHULEN“ [GRU18] im Bereich einer Gemeinschaftsdachterrasse im dritten Obergeschoß (Abb. 63) mit einer 2 m hohen und knapp 5 m breiten Fassadenbegrünung der Firma Optigrün®

ausgestattet (Abb. 62). Damit ergibt sich eine Gesamtfläche der Fassadenbegrünung von ca. 10 m².



Abb. 62: Diefenbachgasse – Fassadenbegrünung System Optigrün®

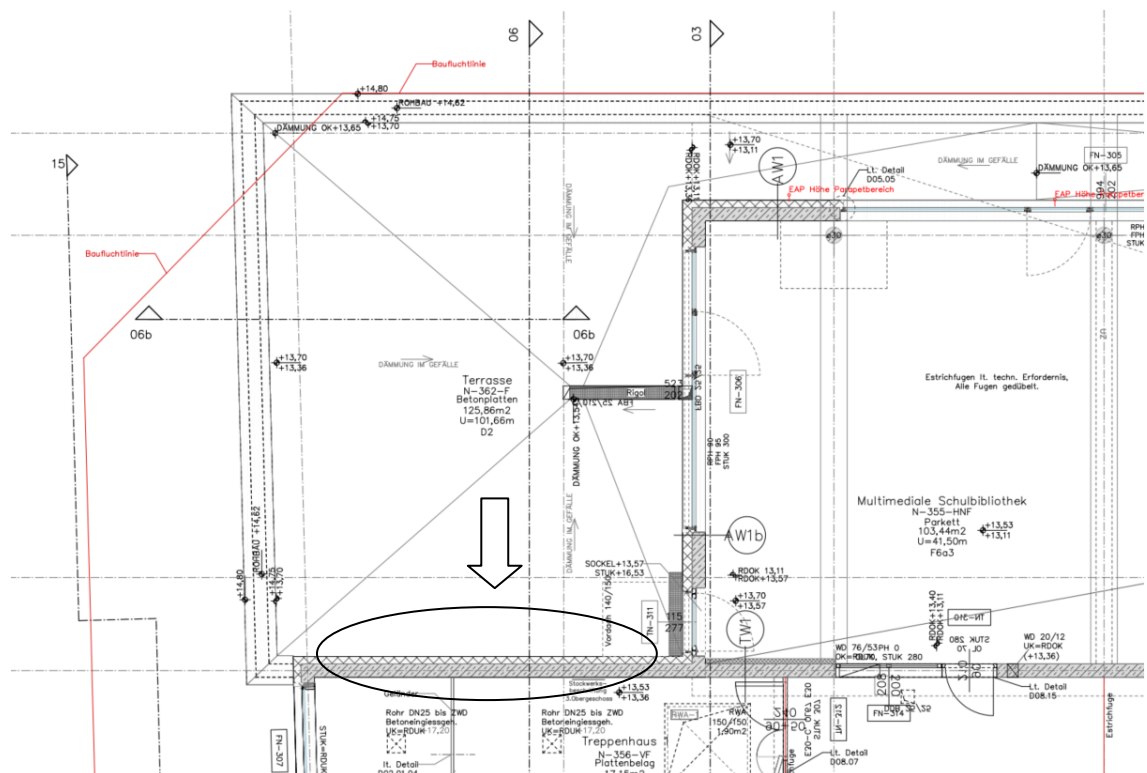


Abb. 63: Diefenbachgasse – Position der Fassadenbegrünung im Grundriss

Die Außenwand, an der die Fassadenbegrünung errichtet wurde, besteht aus einer 25 cm dicken Stahlbetonwand mit einem WDVS aus 14 cm EPS und einer Deckschicht von ca. 5 mm [SCH15].

Im Zuge der Montage der Fassadenbegrünung wurden als vertikale Unterkonstruktion Halfenschienen mithilfe von Schwerlastankern mit 26 cm Länge und 10 mm Durchmesser direkt an die bestehende WDVS-Fassade montiert. Nach Abzug der Wärmedämmung und eines geringen Überstandes ergibt sich eine Verankerungstiefe im Stahlbeton von ca. 10 cm. Zum Schutz der Fassade und zur thermischen Trennung wurden die Halfenschienen mit einem PE-/PP-Schaumstoffklebeband von ca. 1 mm Dicke von der Bestandsfassade getrennt. Am Fußpunkt wurden die Halfenschienen direkt auf den Betonplatten des Terrassendaches aufgestellt, um die Momentenbelastung der Gewindestangen zu verringern (Abb. 64).

Die substratgefüllten Kassetten selbst werden in eine speziell profilierte horizontale Unterkonstruktion eingehängt, in welcher auch der Bewässerungsschlauch verläuft, der das unter den Kassetten angebrachte Speichervlies befeuchtet (Abb. 65).

An der Wandinnenseite wurden direkt nach Fertigstellung der Fassadenbegrünung Wärmestrommessfolien angebracht, um in weiterer Folge Messdaten zur Beurteilung des Wärmebrückeneffektes zufolge der durch die Dämmebene verlaufenden Schwerlastanker zu sammeln (Abb. 66).

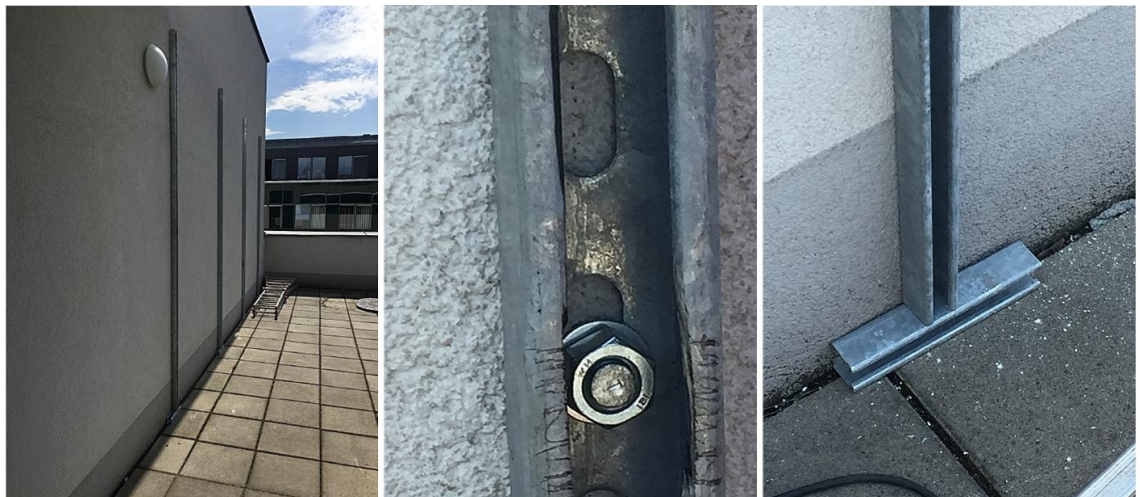


Abb. 64: Diefenbachgasse – Montage der Fassadenbegrünung (1)



Abb. 65: Diefenbachgasse – Montage der Fassadenbegrüung (2)

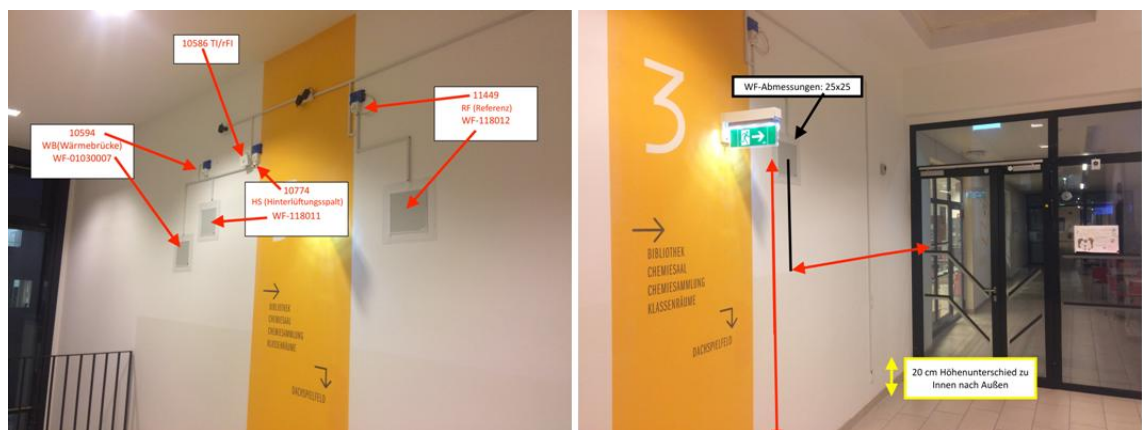


Abb. 66: Diefenbachgasse – Position der Wärmestrommessfolien

5.1.2 BRG Schumeierplatz – System Techmetall

Das Bundesrealgymnasium Schumeierplatz im 16. Wiener Gemeindebezirk ist ebenfalls Pilotschule im Rahmen des Projektes „GRÜNEzukunftSCHULEN“ [GRU18]. Ende Sommer 2017 wurde hier eine Fassadenbegrüung der Firma Techmetall montiert (Abb. 67). Die begrünte Fläche besitzt eine L-Form und setzt sich aus sieben bzw. zwölf Trogreihen zusammen. Die Höhe der Fassadenbegrüung beträgt somit 1,75 m bzw. 3 m, die Breite 8 m bzw. 2 m. Damit ergibt sich eine Gesamtfläche der Fassadenbegrüung von 16,5 m².

Die Außenwand, an der die Fassadenbegrüung angebracht wurde, besteht auch bei dieser Schule aus einer 25 cm dicken Stahlbetonwand mit einer EPS-Wärmedämmung von 14 cm und einer ca. 5 mm dicken Deckschicht.



Abb. 67: Schumeierplatz – Fassadenbegrünung System Techmetall [GRU18b]

Für die Montage der Fassadenbegrünung wurden hier die vertikalen Tragprofile ebenfalls durch ein ca. 1 mm dickes PE-/PP-Schaumstoffklebeband von der Bestandsfassade getrennt und mithilfe von Gewindestangen im Verankerungsgrund befestigt. Die Gewindestangen besitzen eine Länge von 27,5 cm und einen Durchmesser von 20 mm. Als vertikales Tragprofil dienen in diesem Fall 8 cm breite und 4 cm dicke Aluminiumhohlprofile. Eine horizontale Unterkonstruktion ist bei diesem System nicht erforderlich (Abb. 68).

Die trapezförmigen Aluminium-Tröge werden direkt auf die vertikale Tragkonstruktion geschraubt und können im Anschluss sofort mit dem Speichervlies ausgekleidet und mit Substrat und Pflanzen befüllt werden. Vor dem Befüllen mit Substrat muss noch der Bewässerungsschlauch hinter den Pflanzen eingelegt werden (Abb. 69).

Auch bei diesem Projekt wurden an der Wandinnenseite Wärmestrommessfolien zur messtechnischen Erfassung der systembedingten Wärmebrücken angebracht (Abb. 70). Dabei wurde eine Messfolie genau an der Position eines Befestigungsmittels und eine weitere genau zwischen zwei Befestigungsmitteln angebracht. Zum Vergleich wurde eine dritte Wärmestrommessfolie an einer Stelle der Außenwand ohne Fassadenbegrünung positioniert.



Abb. 68: Schumeierplatz – Montage der Fassadenbegrüung (1)

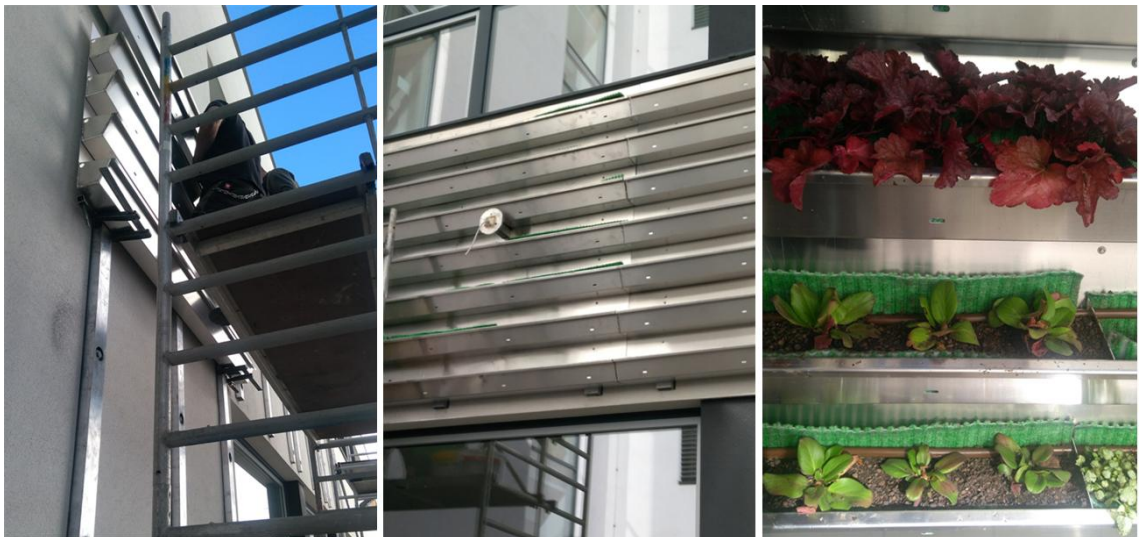


Abb. 69: Schumeierplatz – Montage der Fassadenbegrüung (2)

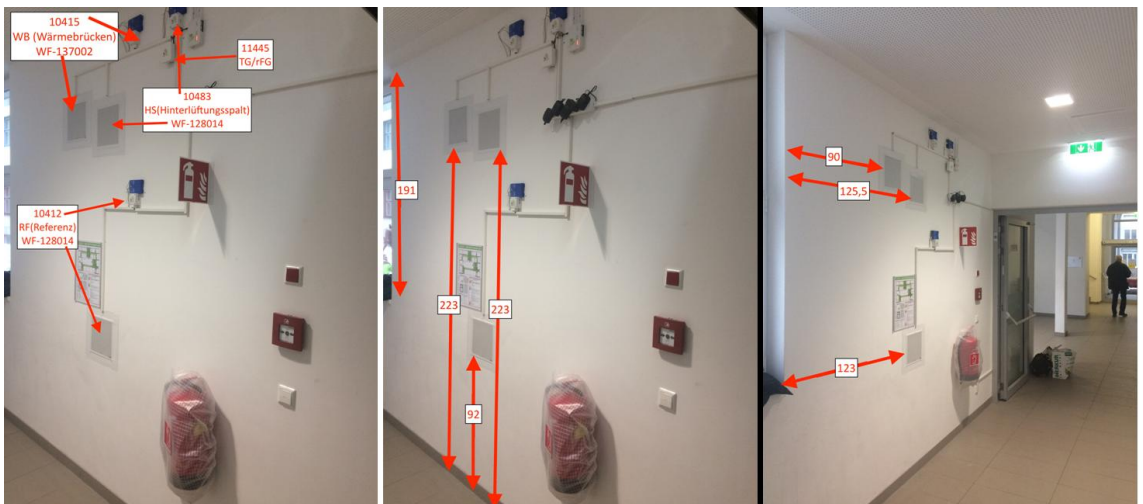


Abb. 70: Schumeierplatz – Position der Wärmestrommessfolien

5.1.3 Wittmayergasse 2 – System 90^{DE}GREEN®

Die technischen Daten für die Fassadenbegrünung in der Wittmayergasse 2 (Abb. 71) wurden dankenswerter Weise von Herrn Andreas Lichtblau von der Firma 90 DEGREEEN GmbH zur Verfügung gestellt.



Abb. 71: Wittmayergasse 2 – Fassadenbegrünung System 90^{DE}GREEN® [LIC18]

Es handelt sich hierbei um ein klassisches Gründerzeitgebäude, dessen Hoffassade auf einer Fläche von 5,56 m mal 8,60 m mit dem System 90^{DE}GREEN® begrünt wurde [HIL16]. Die Montage erfolgte durch die Firma Hilti Austria Ges.m.b.H., wobei als Wandabstandhalter die Aluminium-Konsole „MFT-FOX HI“ [HIL18] und als horizontale Unterkonstruktion L-Profile verwendet wurden (Abb. 72). Eine Unterscheidung in Fix- und Gleitpunkte ist bei diesem System nicht erforderlich.

Der Verankerungsgrund ist Beton (Dicke: Annahme 20 cm) und die Dämmstärke beträgt 18 cm (Material: Annahme EPS, $\lambda = 0,035 \text{ W}/(\text{m.K})$). Die Hinterlüftungslichte wurde mit 2 cm bemessen, sodass die L-Profile ca. 4 cm in die Dämmung hineinragen. Die Last des Begrünungselementes wurde mit $100 \text{ kg}/\text{m}^2$ angegeben. Der vertikale und horizontale Achsabstand der Konsolen beträgt jeweils ca. 57 cm (Abb. 73) [HIL16].

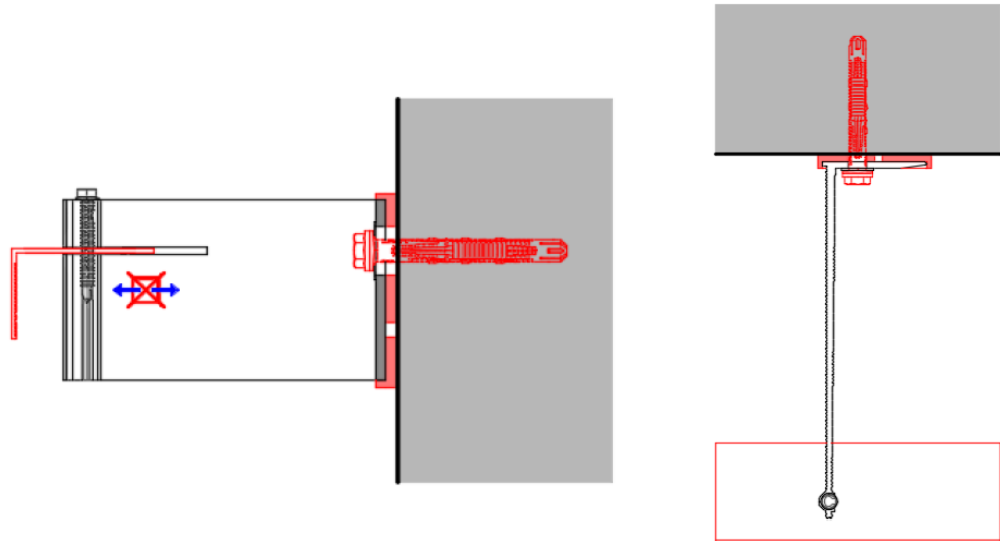


Abb. 72: Wittmayergasse 2 – Detail der Unterkonstruktion [HIL16]

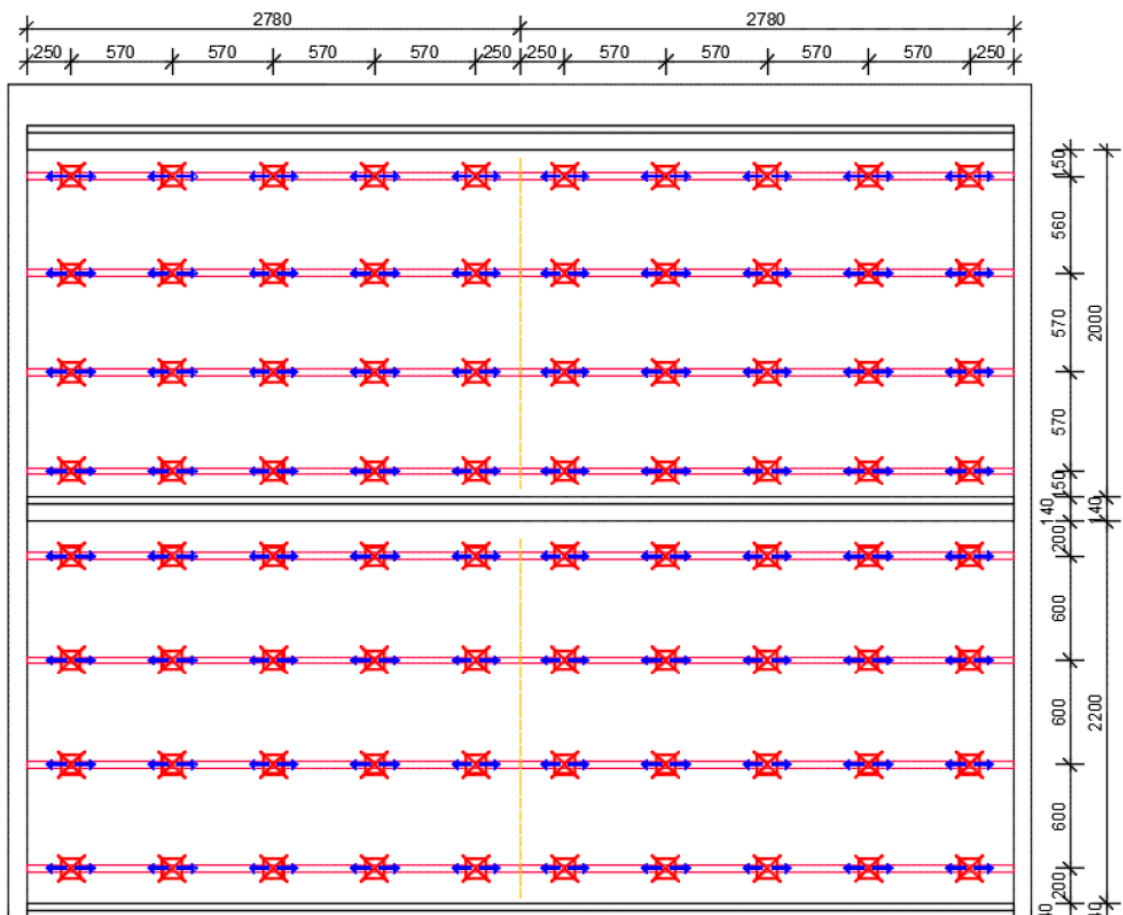


Abb. 73: Wittmayergasse 2 – Ausschnitt Montageschema [HIL16]

5.1.4 Amtsgebäude MA 31 – Troglösung

An der Fassade der Zentrale der MA 31 – Wiener Wasser in der Grabnergasse 4-6 wurde im Dezember 2015 auf 990 m² [OKO18] eine wandgebundene Begrünung mit Trögen und Kletterpflanzen errichtet (Abb. 74).

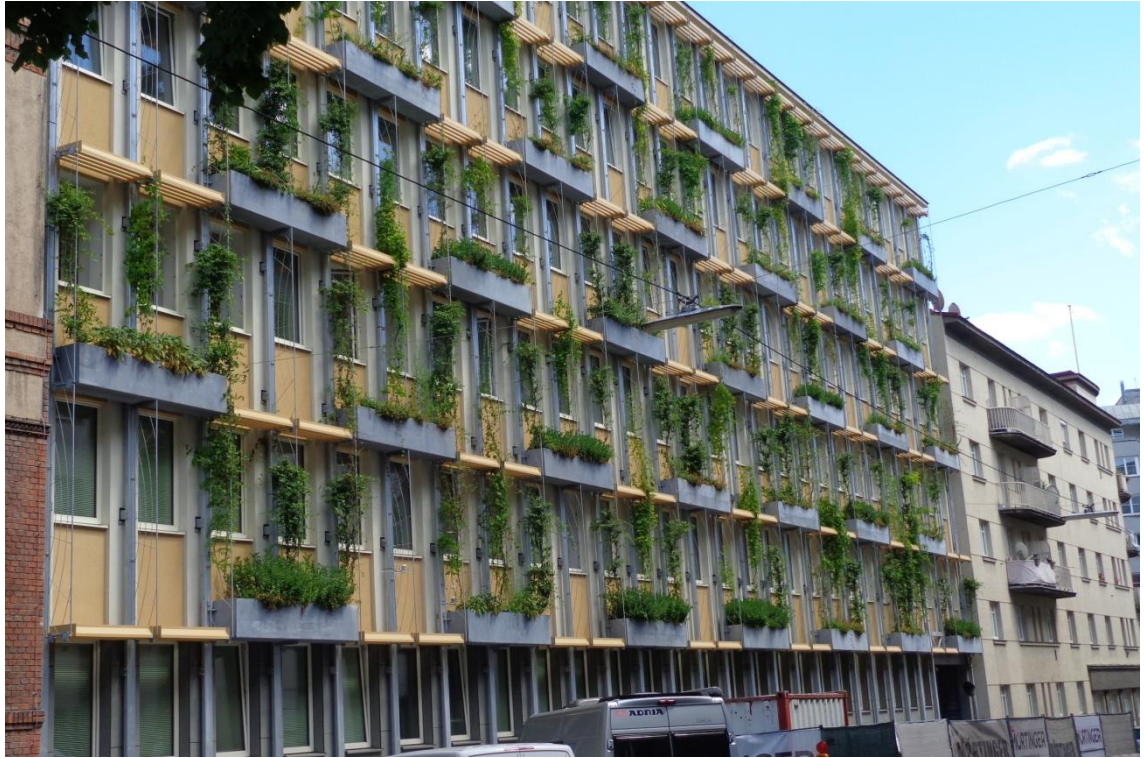


Abb. 74: MA 31 – Fassadenbegrünung mit Trögen und Kletterpflanzen

Das Gebäude besitzt eine Lochfassade mit Fenstern der Breite 118 cm und Höhe 191 cm sowie Abständen zwischen den Fenstern von horizontal 45 cm und vertikal 154 cm (Abb. 75). Für die durchgeführten Wärmebrückenberechnungen wurde eine Referenzfläche von vier Fensterachsen gewählt, um sowohl einen Wandabschnitt mit Pflanzentrog als auch einen Abschnitt ohne Trog zu erfassen. Die Referenzfläche umfasst somit insgesamt 22,5 m², die sich aus 9,0 m² Fensterfläche und 13,5 m² Wandfläche zusammensetzen.

Im Bereich der Stützen, an denen die Unterkonstruktion für die Fassadenbegrünung befestigt wurde, liegt ein Wandaufbau aus 50 cm Stahlbeton, 16 cm im Zuge der Sanierung außen aufgebracht Mineralwolle-Putzträgerplatten und einer verputzten Heraklith-Innenverkleidung von 6 cm Dicke vor (Abb. 76).

Die Unterkonstruktion besteht aus einer massiven Stahlkonstruktion aus vertikalen, rechteckigen Hohlprofil-Stützen, die in regelmäßigen Abständen (alle 1,73 m bzw. zwei Mal pro Geschoß) mit gabelförmigen Konsolen in der Wand

verankert werden (Abb. 77). Da nach jeder Fensterachse eine Stütze angeordnet ist, folgt für die gewählte Referenzfläche eine Anzahl von insgesamt acht Konsolen. In statischer Hinsicht stellen diese Konsolen Gleitlager dar. Als Festlager dienen jeweils die Stützen-Fundamente.

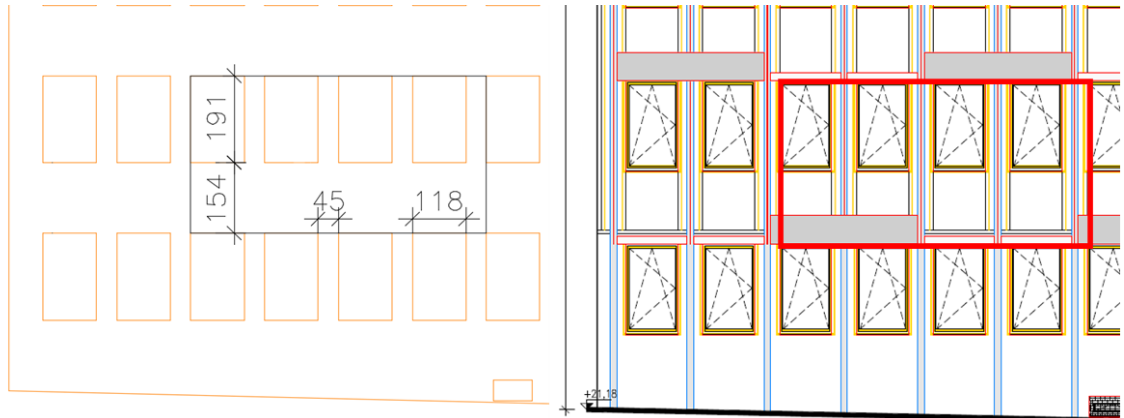


Abb. 75: MA 31 – Abmessungen der Lochfassade sowie der Referenzfläche

AW 02 Außenwand Stützen Straßenseite - saniert	Dicke [cm]	λ [W/mK]
Deckschicht	0,5 cm	
MW-PT	16,0 cm	0,036 W/mK
STB-Stütze Bestand	50,0 cm	
Herklith-BM Bestand	6,0 cm	0,390 W/mK
Innenputz Bestand	1,5 cm	
Gesamtdicke:	74,0 cm	

Abb. 76: MA 31 – straßenseitiger Außenwand-Aufbau im Stützen-Bereich

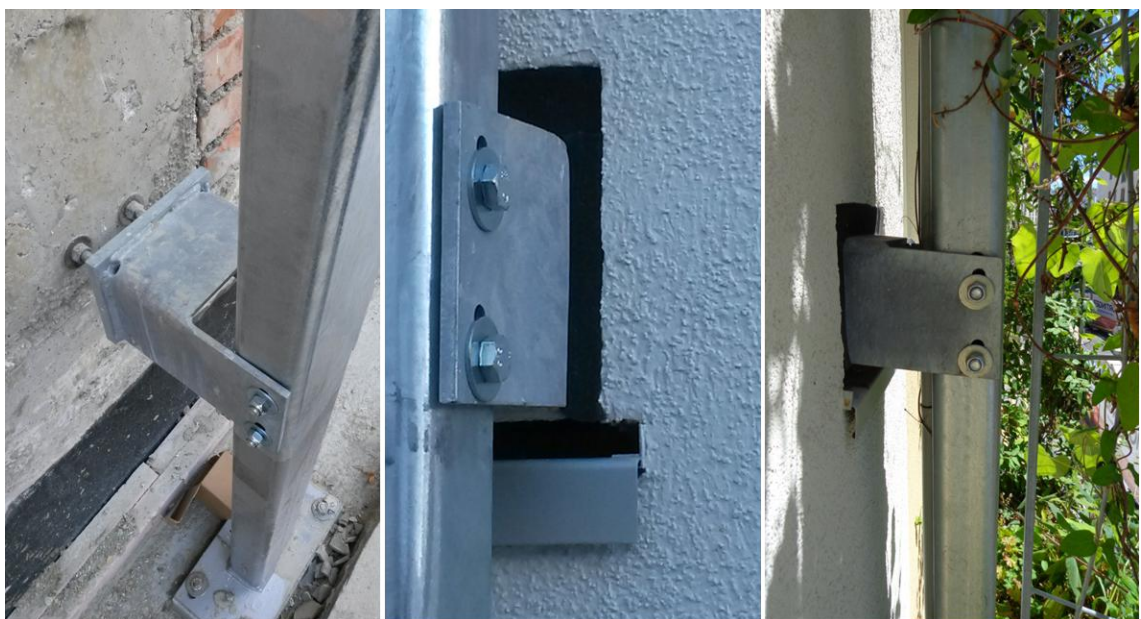


Abb. 77: MA 31 – Ausführung der Konsolen zur Stabilisierung der vertikalen Unterkonstruktion

5.2 Wärmebrückenberechnungen und -messungen

Die nachfolgenden Abschnitte beschäftigen sich mit den Ergebnissen der Wärmebrückenberechnungen der jeweiligen Fassadenbegrünungssysteme und bieten im Falle der beiden Pilotschulen (BRG Diefenbachgasse bzw. BRG Schumeierplatz) zusätzlich einen Vergleich der Berechnungen mit vor Ort erfolgten Wärmestrommessungen.

5.2.1 BG und BRG Diefenbachgasse – System Optigrün®

Die erforderlichen Angaben für die Wärmebrückensimulation im AnTherm® entstammen einer ausführlichen Fotodokumentation während der Montage der Fassadenbegrünungspaneele sowie einer E-Mail des zuständigen Technikers der Firma Optigrün [HAS18]. Unter Zugrundelegung einer gleichmäßigen Verteilung der Schwerlastanker wird der entsprechende Einflussbereich eines einzelnen Ankers betrachtet. Da der Wärmestrom sowohl im Bereich eines Ankers (= Wärmebrücke) als auch zwischen zwei Ankern (= Hinterlüftung) gemessen wurde (jeweils an der Wandinnenseite), muss den beiden Datensätzen ein gewisser Anteil an diesem Einflussbereich zugewiesen werden, um einen für die Gesamtkonstruktion repräsentativen U-Wert bzw. ΔU -Wert zu erhalten (Abb. 78).

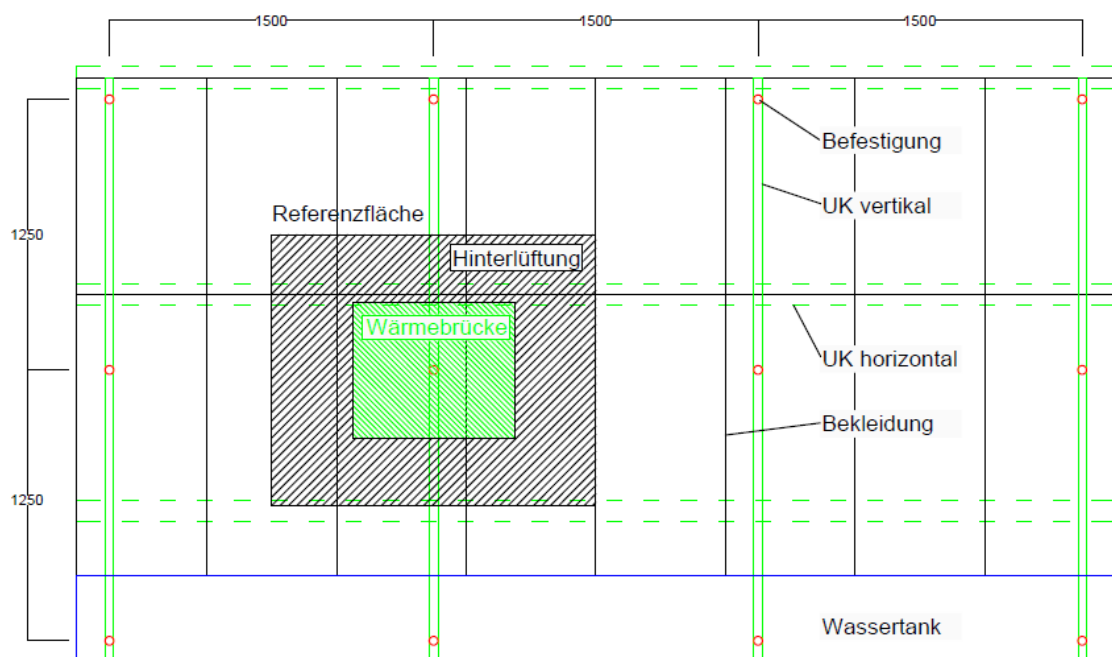


Abb. 78: Diefenbachgasse – Aufteilung des Einflussbereiches eines Ankers in die Bereiche „Wärmebrücke“ und „Hinterlüftung“

Wie anhand obiger Abbildung ersichtlich ist, wird der Wärmestrommessfolie im Bereich der Wärmebrücke (Schwerlastanker) eine rechteckige Fläche mit einem Drittel der Breite sowie einem Drittel der Höhe bezogen auf den Einflussbereich zugeordnet. Die Bestimmung dieser Maße erfolgt durch Auswertung der Wärmestromlinien im Bereich der Wärmebrücke gemäß der weiter unten angeführten thermischen Wärmebrückensimulation (Abb. 80 bzw. Anhang 8.5). Der Anteil der Fläche der Wärmebrücke am Einflussbereich beträgt somit ca. 11 %. Für die restliche Fläche werden die Messwerte der Wärmestrommessfolie zwischen zwei Schwerlastankern (Bereich „Hinterlüftung“) herangezogen.

Die für die Auswertung verwendeten Messdaten beschränken sich auf den Zeitraum vom 13.01.2018 bis zum 11.03.2018. Zur weiteren Bearbeitung wurden über den gesamten Messzeitraum bereinigte Mittelwerte gebildet.⁵ Eine Auflistung der verwendeten Werte ist im Anhang zu finden (Kapitel 8.5), wobei sich der angegebene Wärmestrom der Referenzmessung auf einen Wandabschnitt ohne Fassadenbegrünung bezieht.

Anhand der Messdaten der Referenzmessung wird der U-Wert der unbegrünten Wand nach ISO/DIS 9869-1 [ISO13] gemäß Gleichung (2) ermittelt.

$$U = \frac{q}{(T_i - T_e)} = \frac{1}{R_T} \quad (2)$$

U	Wärmedurchgangskoeffizient in W/(m ² .K)
q	Wärmestrom in W/m ²
T _i	Innenlufttemperatur in K
T _e	Außenlufttemperatur in K
R _T	Wärmedurchgangswiderstand in m ² .K/W

Bei Auswertung der Messdaten im Bereich der Fassadenbegrünung ergibt sich unter Berücksichtigung des Verhältnisses Fläche

⁵ Es wurden die Messwerte zwischen 23 Uhr und 6 Uhr und mit einer Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außenlufttemperatur von mindestens zehn Kelvin für die Mittelwertbildung herangezogen. Zu hohe oder niedrige bzw. aus anderen Gründen unplausibel erscheinende Werte wurden ausgeschlossen.

Hinterlüftungsspalt zu Fläche Wärmebrücke von 9:1 (vgl. Abb. 83) eine gemessene Veränderung des Wärmedurchgangskoeffizienten zufolge der Fassadenbegrünung von:

$$\Delta U = -0,020 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \quad (3)$$

Das heißt, es kommt durch die Anbringung der Fassadenbegrünung bei Auswertung der Messdaten zu einer Verringerung der Wärmeverluste durch die Wandkonstruktion in der Größe von ca. 29 % des U-Wertes der unbegrünten Referenzwand.⁶

Zur Plausibilisierung der Messdaten wird zusätzlich eine Wärmebrückensimulation des betrachteten Wandausschnittes im Einflussbereich eines Ankers durchgeführt. Ein Schnitt durch ein Befestigungsmittel ist in Abb. 79 zu sehen. Die Breite des Details entspricht mit 1,5 m dem horizontalen Achsabstand der Schwerlastanker.

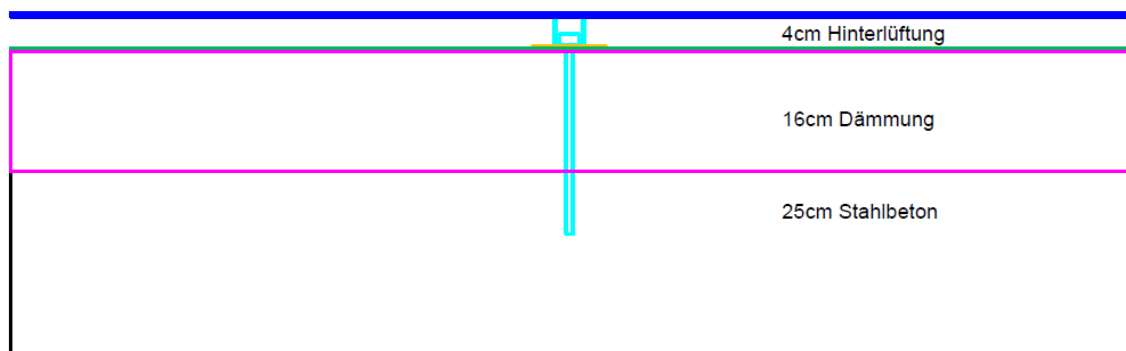


Abb. 79: Diefenbachgasse – Detail der Unterkonstruktion, Abbildung um 90° gedreht

Für die Erstellung eines 3D-Schichten-Modells werden in AnTherm® fünf Schichten eingegeben: im Zentrum der Schwerlastanker als maßgebliche Wärmebrücke, danach das horizontale Tragprofil (vereinfacht als fünf Millimeter dicke und zehn Zentimeter breite Aluminiumplatte abgebildet) und zu äußerst die Halfenschiene als vertikale Unterkonstruktion (Tab. 14). Die Gesamtschichtdicke des 3D-Modells entspricht mit 1,25 m dem vertikalen Achsabstand der Schwerlastanker.

⁶ Bezogen auf den Bereich des Hinterlüftungsspalt es ergibt sich gemäß Auswertung der Messdaten durch die Berücksichtigung der Unterkonstruktion eine Erhöhung des U-Wertes von $\Delta U = 0,012 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, was im vorliegenden Fall einer Erhöhung um ca. 32 % entspricht.

Tab. 14: Diefenbachgasse - Eingabe Schichten in AnTherm®

Nr.	Schicht	Dicke in mm
1	Halfenschiene	575,00
2	Tragprofil horizontal	45,55
3	Schwerlastanker	8,90
4	Tragprofil horizontal	45,55
5	Halfenschiene	575,00
-		gesamt: 1.250,00

Der durch die Simulation bestimmte punktuelle Wärmebrücken-Verlustkoeffizient eines einzelnen Schwerlastankers beträgt:

$$\chi = 0,021 \text{ W/K} \quad (4)$$

Durch Multiplikation mit der durchschnittlichen Ankerdichte von 1,09 Stk/m² und Berücksichtigung des erhöhten äußeren Wärmeübergangskoeffizienten zufolge der hinzugekommenen Hinterlüftungsebene ($R_{se} = 0,13 \text{ m}^2\cdot\text{K/W}$ statt $0,04 \text{ m}^2\cdot\text{K/W}$ [ONO15]) ergibt sich eine Veränderung des Wärmedurchgangskoeffizienten von:

$$\Delta U = 0,021 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \quad (5)$$

Dieses Simulationsergebnis weicht zwar vom Ergebnis der Wärmestrommessungen relativ stark ab. Dennoch deutet auch das Ergebnis der Wärmebrückensimulation darauf hin, dass die Veränderung der winterlichen Wärmeverluste zufolge der statisch erforderlichen Schwerlastanker in diesem konkreten Beispiel jedenfalls sehr gering ist⁷. Diese Aussage wird auch durch den relativ homogenen Verlauf der Isothermen bestätigt (Abb. 80).

Ergänzend muss angemerkt werden, dass sowohl die Ergebnisse der Wärmestrommessungen als auch jene der Wärmebrückensimulationen mit einer gewissen Ungenauigkeit behaftet sind. So hängt z.B. der U-Wert inklusive Unterkonstruktion sehr stark von der Aufteilung des betrachteten Einflussbereiches auf die vorhandenen Wärmestrommessfolien (Bereich Hinterlüftungsspalt und Bereich Wärmebrücke) ab. Außerdem geht das angewendete

⁷ ΔU -Wert vergleichbar mit jenem bei Edelstahl-Unterkonstruktion, siehe Kapitel 4.4

Mittelwert-Verfahren zur U-Wert-Bestimmung von einer möglichst geringen Schwankung der Messwerte aus. Bei größeren Schwankungen wird dieses Verfahren zunehmend ungenau.

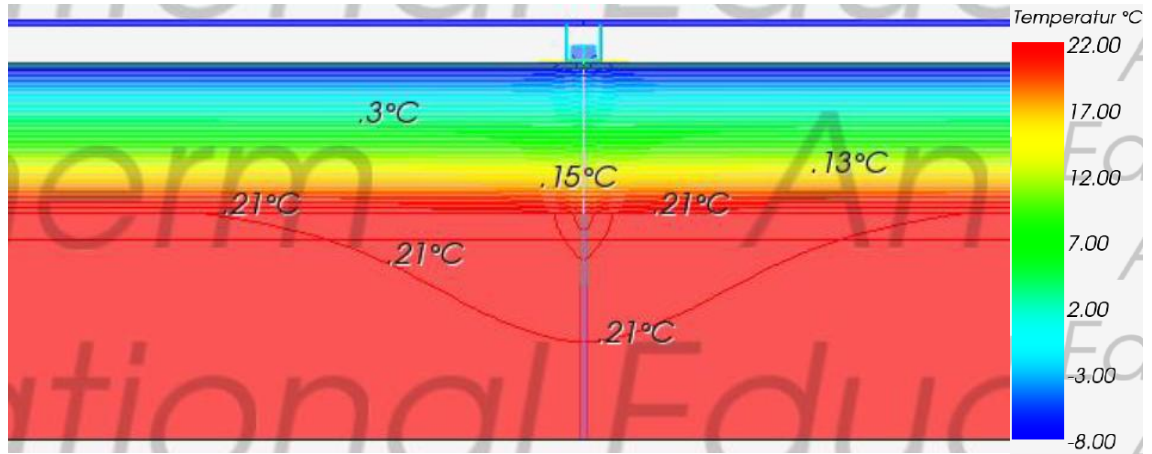


Abb. 80: Diefenbachgasse – Verlauf der Isothermen, Abbildung um 90° gedreht



Abb. 81: Diefenbachgasse – seitliche Verkleidung der Begrünungskassetten

Eine weitere Erklärung für die Divergenz zwischen den Mess- und den Simulationsergebnissen könnte auch die unzureichende Abbildung der Wirkung der Fassadenbegrünung in der Wärmebrückensimulation sein. In der Simulation wird im Hinterlüftungsspalt grundsätzlich Außentemperatur (-8°C) angenommen. Die Messwerte haben jedoch gezeigt, dass die mittlere Temperatur im Hinterlüftungsspalt mit 3,05°C um über zwei Grad Celsius höher ist als auf der Dachterrasse selbst (0,21°C), da die Begrünungskassetten seitlich verkleidet sind (Abb. 81). Es kann daher der Fassadenbegrünung eine gewisse Dämmwirkung zugewiesen werden, wodurch der Wärmeverlust über die Unterkonstruktion nach außen verringert wird.

Auch zu beachten ist, dass sich der Wassertank für die automatische Bewässerung direkt unterhalb der Fassadenbegrünung befindet. Dieser ist mit einer elektrischen Tankheizung zur Gewährleistung der Frostfreiheit ausgestattet. Ein Einfluss dieser Tankheizung auf das Ergebnis der Wärmestrommessungen kann daher nicht ausgeschlossen werden.

Im Vergleich zur Wärmebrückensimulation ergibt sich bei Heranziehen der Gleichung (1), dem Näherungsverfahren aus der ÖNORM EN ISO 6946 Anhang F [ONO15], eine Erhöhung des Wärmedurchgangskoeffizienten um ca. zehn Prozent:

$$\Delta U = 0,023 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \quad (6)$$

Damit kann im vorliegenden Fall zumindest von einer „wärmebrückenarmen“ Unterkonstruktion gesprochen werden.

Eine Möglichkeit zur maßgeblichen Verringerung der Wärmebrückewirkung der Unterkonstruktion stellt die Änderung des Materials von Stahl auf Edelstahl dar. Durch diese Maßnahme ließe sich beim vorliegenden System ein ΔU -Wert (gemäß Wärmebrückensimulation sowie gemäß Näherungsverfahren) von deutlich unter 0,01 W/(m²·K) und somit eine praktisch wärmebrückenfreie Unterkonstruktion erreichen.⁸

⁸ Die Erhöhung des Wärmedurchgangskoeffizienten bei Verwendung von Edelstahl als Material für die Unterkonstruktion der untersuchten begrünten Fassade beträgt im Vergleich zur Referenzwand ohne Fassadenbegrünung ca. $\Delta U=0,006 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

5.2.2 BRG Schumeierplatz – System Techmetall

Genauso wie beim BG und BRG Diefenbachgasse wurde auch beim BRG Schumeierplatz während der Errichtung der Fassadenbegrünung eine ausführliche Fotodokumentation durchgeführt, die als primäre Informationsquelle für die Wärmebrückensimulationen in AnTherm® gedient hat. Ergänzende technische Informationen wurden einer Email von Herrn Sascha Haas, Geschäftsführer der Firma Techmetall, entnommen [HAA18].

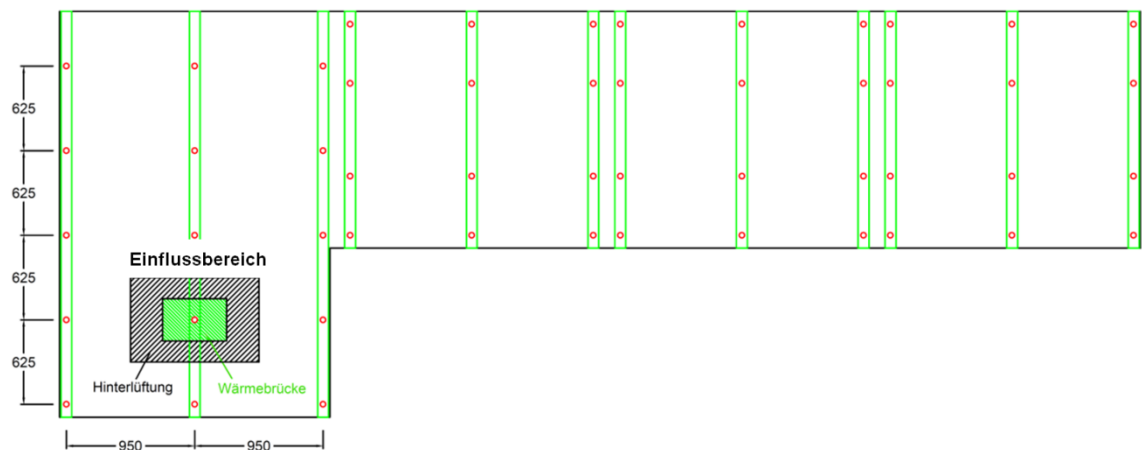


Abb. 82: Schumeierplatz – Aufteilung des Einflussbereiches eines Befestigungsmittels in die Bereiche „Wärmebrücke“ und „Hinterlüftung“

Für die Wärmebrückensimulation wird wieder der Einflussbereich eines zentral gelegenen Befestigungsmittels herangezogen (Abb. 82). Die Auswertung der Wärmestromlinien gemäß der Ergebnisse der Wärmebrückensimulation (Abb. 84 bzw. Anhang 8.5) ergibt für die Wärmestrommessfolie im Bereich der Wärmebrücke einen Anteil an der Fläche des Einflussbereiches von ca. 25 %. Für die Messfolie im Bereich des Hinterlüftungsspaltens verbleiben somit ca. 75 % der Fläche des Einflussbereiches.

Für die Auswertungen der Wärmestrommessungen wurden die Messdaten vom 06.12.2017 bis zum 12.03.2018 herangezogen. Die bereinigten Mittelwerte der verwendeten Messdaten sind im Anhang zu finden (Kapitel 8.5).⁹

⁹ Es wurden die Messwerte zwischen 23 Uhr und 6 Uhr und mit einer Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außenlufttemperatur von mindestens zehn Kelvin für die Mittelwertbildung herangezogen. Zu hohe oder niedrige bzw. aus anderen Gründen unplausibel erscheinende Werte wurden ausgeschlossen.

Mithilfe von Gleichung (2) ergibt sich für die unbegrünte Wand (Referenzmessung) ein Wärmedurchgangskoeffizient von:

$$U = 0,172 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \quad (7)$$

Der flächengewichtete U-Wert im Bereich der Fassadenbegrünung (bezogen auf den Einflussbereich eines Befestigungsmittels) beträgt unter Berücksichtigung des Verhältnisses von Wärmebrücke zu Hinterlüftungsspalt von 4:1 (vgl. Abb. 82):

$$U = 0,232 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \quad (8)$$

Die gemessene Veränderung des Wärmedurchgangskoeffizienten zufolge der Fassadenbegrünung der Schule BRG 16 Schumeierplatz beträgt somit:

$$\Delta U = 0,061 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \quad (9)$$

Es kommt folglich durch die Anbringung der Fassadenbegrünung bei Auswertung der Messdaten zu einer Vergrößerung der Wärmeverluste durch die Wandkonstruktion in der Größe von ca. 35 % des U-Wertes der Referenzwand, was in etwa der Erhöhung des U-Wertes zufolge einer gedämmten hinterlüfteten Fassade mit Stahl-Unterkonstruktion und 5 mm thermischer Trennung entspricht (vgl. Kapitel 4.4).¹⁰

Bei der Wärmebrückensimulation wird mit einer EPS-F plus-Dämmung ($\lambda = 0,032 \text{ W}/\text{m}\cdot\text{K}$) von 14 cm Dicke gerechnet. Die Dämmebene wird von Gewindestangen aus Stahl mit einem Durchmesser von 2 cm durchdrungen, die mithilfe eines 2-Komponenten-Injektionsmörtels in die Bohrlöcher eingeklebt wurden. Die so entstehende Zwischenschicht zwischen Gewindestange und Stahlbeton wird mit einer Dicke von einem Millimeter angenommen. Für die Breite des betrachteten Details wurden analog zum horizontalen Achsabstand der Gewindestangen 95 cm gewählt (Abb. 83).

¹⁰ Der U-Wert im Bereich des Hinterlüftungsspalt es beträgt gemäß Auswertung der Messdaten $U = 0,219 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$. Durch die Berücksichtigung der Unterkonstruktion erhöht sich dieser Wert um $\Delta U = 0,014 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, was einer Erhöhung des U-Wertes um ca. 6 % entspricht.

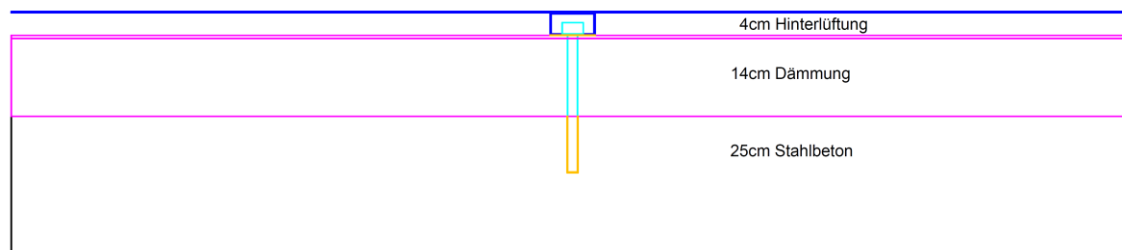


Abb. 83: Schumeierplatz – Detail der Unterkonstruktion, Abbildung um 90° gedreht

Das in AnTherm® erstellte 3D-Schichten-Modell setzt sich aus fünf Schichten zusammen: Als zentrales Element befindet sich in der Mitte die Gewindestange, gefolgt von zwei Schichten, die jeweils einen Schnitt durch den umhüllenden Injektionsmörtel darstellen. Danach folgt als flankierendes Element die vertikale Tragkonstruktion (Tab. 15). Die Gesamt-Schichtdicke des 3D-Modells entspricht mit 62,5 cm dem vertikalen Achsabstand der Gewindestangen.

Tab. 15: Schumeierplatz - Eingabe Schichten in AnTherm®

Nr.	Schicht	Dicke in mm
1	Tragprofil vertikal	302,75
2	Injektionsmörtel	0,90
3	Gewindestange	17,70
4	Injektionsmörtel	0,90
5	Tragprofil vertikal	302,75
-		gesamt: 625,00

Abb. 84 zeigt den Verlauf der Isothermen im betrachteten Bereich. Der durch die Simulation bestimmte punktuelle Wärmebrücken-Verlustkoeffizient einer einzelnen Gewindestange beträgt:

$$\chi = 0,064 \text{ W/K} \quad (10)$$

Durch Multiplikation mit der durchschnittlichen Verteilungsdichte der Befestigungsmittel von 1,68 Stk/m² und Berücksichtigung des erhöhten äußeren Wärmeübergangskoeffizienten zufolge der hinzugekommenen Hinterlüftungsebene ($R_{se} = 0,13 \text{ m}^2\cdot\text{K/W}$ statt $0,04 \text{ m}^2\cdot\text{K/W}$ [ONO15]) ergibt sich eine Veränderung des Wärmedurchgangskoeffizienten von:

$$\Delta U = 0,103 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \quad (11)$$

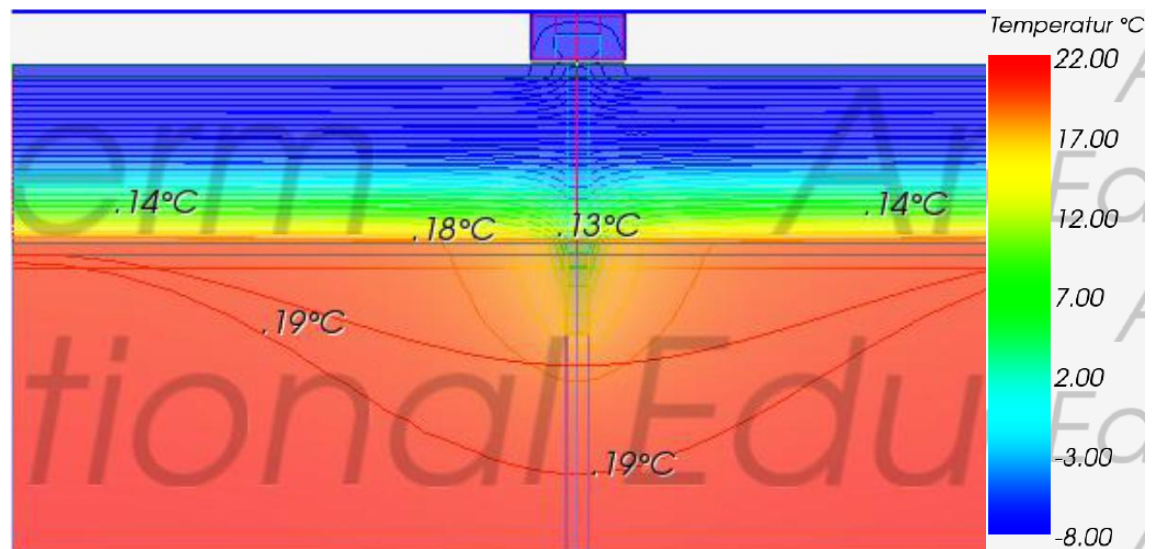


Abb. 84: Schumeierplatz – Verlauf der Isothermen, Abbildung um 90° gedreht

Die Abweichung vom Wärmestrom-Messergebnis ist mit ca. 50 % zwar recht groß, dennoch erscheint die Größenordnung plausibel, da sowohl die Anzahl als auch der Querschnitt der Befestigungselemente im Vergleich zum BRG Diefenbachgasse deutlich erhöht sind. Auf mögliche Gründe für eine Abweichung zwischen Messwerten und Simulationsergebnissen wurde bereits in Kapitel 5.2.1 eingegangen.

Bei Auswertung der Wärmebrückensimulation unter Berücksichtigung der gemessenen Temperaturen anstelle der Normwerte kommt es in diesem Fall zu keiner maßgeblichen Veränderung des Ergebnisses, da einerseits die mittlere Temperatur im Hinterlüftungsspalt sogar niedriger als die mittlere Außenlufttemperatur ist und da andererseits der Wärmeverlust vom Innenraum über die Unterkonstruktion der Fassadenbegrünung zum Außenraum (nicht zum Hinterlüftungsspalt) hier nicht abgemindert werden kann, da das Techmetall-System zur Gänze aus Aluminium besteht und daher den Gesamt-Wärmeverlust maßgeblich erhöht.¹¹

¹¹ Den Simulationsergebnissen zufolge macht der Transmissions-Wärmeverlust über die Aluminium-Bekleidung ca. 32 % vom Gesamt-Wärmeverlust über die Außenwand aus.

Im Vergleich zur Wärmebrückensimulation ergibt sich bei Heranziehen der Gleichung (1), dem Näherungsverfahren aus der ÖNORM EN ISO 6946 Anhang F [ONO15], ein um 47 % erhöhter Wärmedurchgangskoeffizient von:

$$\Delta U = 0,151 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \quad (12)$$

Damit liegt der Wärmebrückenzuschlag laut ÖNORM EN ISO 6946 in diesem Fall deutlich auf der sicheren Seite. Der Grund dafür könnte in der Vernachlässigung des Einflusses des Injektionsmörtels liegen, der für eine gewisse thermische Trennung zwischen den Gewindestangen und dem Verankerungsgrund sorgt.

Durch Änderung des Materials von Stahl bzw. Aluminium auf Edelstahl lässt sich die Wärmebrückenwirkung der Unterkonstruktion in etwa auf ein Fünftel verringern: Statt rund 50 % (bei Heranziehen der weiter oben angeführten Simulationsergebnisse) beträgt der U-Wert-Zuschlag bei Edelstahl-Unterkonstruktion beim vorliegenden Befestigungssystem nur noch ca. 10 % des U-Wertes der Referenzwand ohne Fassadenbegrünung. Eine „wärmebrückenfreie“ Unterkonstruktion ($\Delta U \leq 0,01 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$) lässt sich hier jedoch mit den untersuchten Maßnahmen nicht erreichen.¹² Grund dafür könnte sein, dass die Paneele (im Gegensatz zur Fassadenbegrünung im BRG Diefenbachgasse) seitlich nicht verkleidet sind und somit vollständig hinterlüftet werden. Außerdem spielt die nächtliche Wärmeabstrahlung an den kalten Nachthimmel eine wesentliche Rolle, da die Fassadenbegrünungspaneele von der Firma Techmetall (abgesehen von dem Substrat und den Pflanzen) gänzlich aus metallischen Werkstoffen bestehen.

¹² Die Erhöhung des Wärmedurchgangskoeffizienten bei Verwendung von Edelstahl als Material für die Unterkonstruktion der untersuchten begrünten Fassade beträgt im Vergleich zur Referenzwand ohne Fassadenbegrünung ca. $\Delta U=0,025 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

5.2.3 Wittmayergasse 2 – System 90^{DE}GREEN®

Da zur Fassadenbegrünung in der Wittmayergasse 2 keine Messdaten vorliegen, wurde der Wärmebrückeneffekt zufolge der angebrachten Fassadenbegrünung hier lediglich rechnerisch mit der Software AnTherm® ermittelt. Die für die Simulation erforderlichen Eingangsdaten wurden einem von Herrn Andreas Lichtblau (90 DEGREEN GmbH) zur Verfügung gestellten Angebot der Firma Hilti entnommen [HIL16].

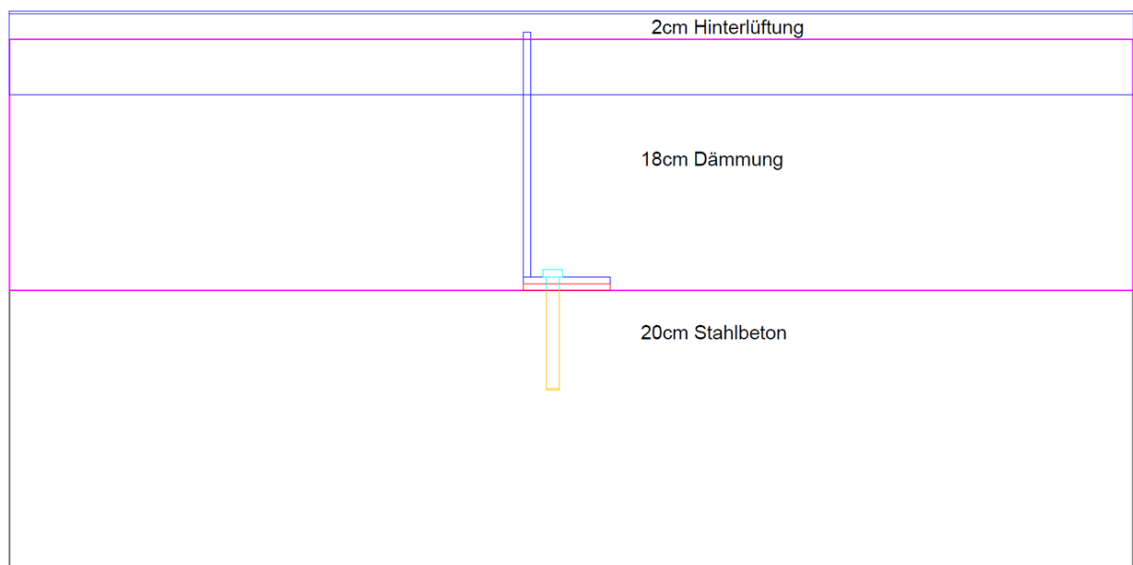


Abb. 85: Wittmayergasse 2 – Detail der Unterkonstruktion, Abbildung um 90° gedreht

Die verwendete Konsole „MFT-Fox HI“ ist vergleichbar mit der im ersten Teil dieser Arbeit angeführten Konsole „MacFox“, wobei das als Unterkonstruktion dienende L-Profil hier horizontal statt vertikal eingeschoben wird (Abb. 85). Die Breite des Details entspricht dem horizontalen Achsabstand der Konsolen von 57 cm (vgl. Abb. 86). Die Begrünungspaneele selbst werden für die Wärmebrückensimulationen vernachlässigt, da aufgrund der gedämmten Ausführung jedenfalls keine Erhöhung des ΔU -Wertes erwartet wird.

Für die Eingabe im AnTherm® als 3D-Schichten-Projekt wurden die einzelnen Schichten sowie deren Dicken gemäß nachfolgender Tabelle (Tab. 16) eingegeben, wobei die Position der Befestigungsschraube im oberen Viertelpunkt der Konsole und der Steg der horizontalen Unterkonstruktion (L-Profil) als im unteren Bereich der Schraube liegend angenommen wurden. Die Gesamtdicke des Details entspricht dem vertikalen Achsabstand der Konsolen von 57 cm (Abb. 86).

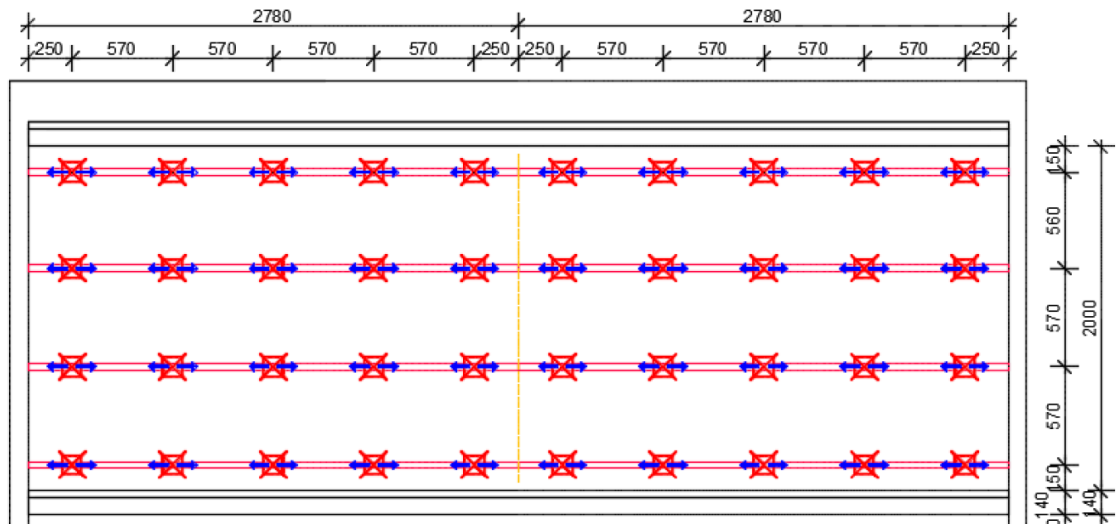


Abb. 86: Wittmayergasse 2 – Ausschnitt aus dem Montageschema der Firma Hilti Austria Ges.m.b.H. [HIL16]

Tab. 16: Wittmayergasse 2 - Eingabe Schichten in AnTherm®

Nr.	Schicht	Dicke in mm
1	Wand	245,0
2	Konsole	17,6
3	Dübel	0,4
4	Schraube	6,9
5	L-Profil Steg (Schraube)	2,0
6	L-Profil Flansch (Dübel)	0,4
7	L-Profil Flansch (Konsole)	37,6
8	Konsole	15,1
9	Wand	245,0
-		gesamt: 570,0

Der durch die Simulation bestimmte punktuelle Wärmebrücken-Verlustkoeffizient einer „MFT-Fox HI“-Konsole beträgt unter den zugrundeliegenden Bedingungen:

$$\chi = 0,079 \text{ W/K} \quad (13)$$

Daraus ergibt sich durch Multiplikation mit der durchschnittlichen Konsolendichte von 3,08 Stk/m² eine Erhöhung des Wärmedurchgangskoeffizienten von:

$$\Delta U = 0,241 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)} \quad (14)$$

Bei einem gegebenen U-Wert der unbegrünten Wand von ca. $0,19 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ entspricht dies einer Erhöhung um 130 % zufolge der Unterkonstruktion für die Fassadenbegrünung. Um den ΔU -Wert zu reduzieren müsste das Material der Unterkonstruktion (bei gleichzeitiger Reduktion der Stegdicke von 5 mm auf 2,5 mm) auf Stahl (ΔU -Wert = $0,11 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$) bzw. Edelstahl (ΔU -Wert = $0,04 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$) geändert werden (Abb. 87). Dies entspricht für den Fall der Stahl-Unterkonstruktion einer Reduktion des ΔU -Wertes auf ca. die Hälfte und für den Fall der Edelstahl-Unterkonstruktion auf ca. 15 %.

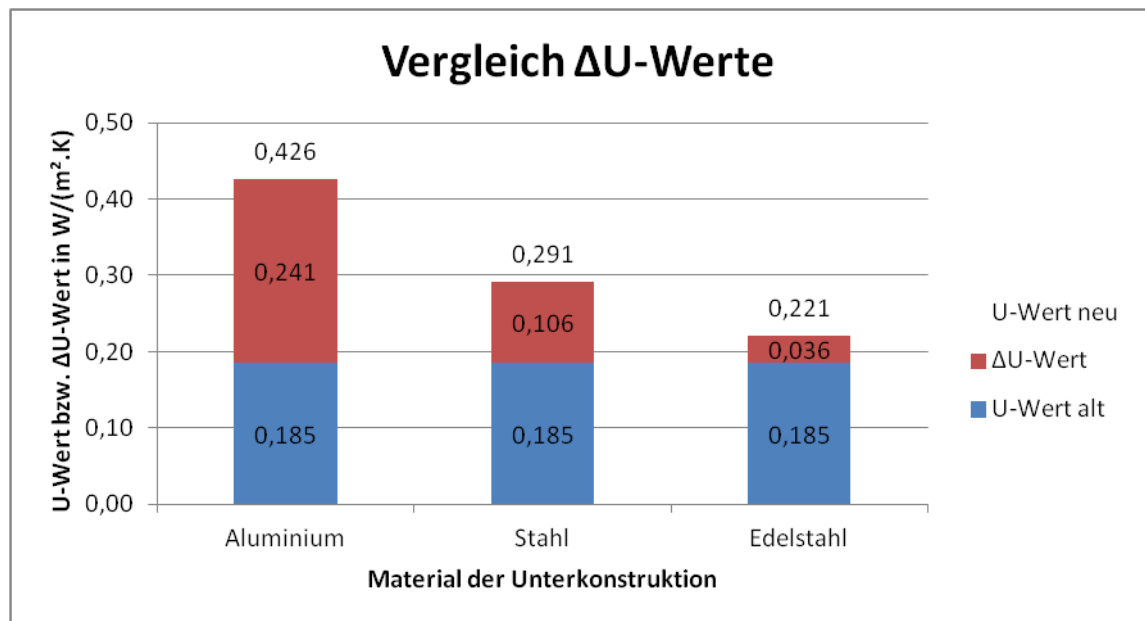


Abb. 87: Wittmayergasse 2 – ΔU -Wert in Abhängigkeit des Materials der Unterkonstruktion bei Vernachlässigung der Fassadenbegrünungspaneele

Die obenstehenden Berechnungen gehen normgemäß davon aus, dass im Hinterlüftungsspalt Außenluftbedingungen herrschen. Lediglich der Wärmeübergangswiderstand R_{se} ist gemäß ÖNORM EN ISO 6946 auf $0,13 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ erhöht, da im Hinterlüftungsspalt eine ruhigere Luftschicht angenommen wird [ONO15]. Außerdem werden nicht metallische äußere Beplankungen vernachlässigt, da deren Einfluss auf den Wärmeverlust als unwesentlich eingestuft wird [BFE98]. Da die Fassadenbegrünungspaneele von 90^{DE}GREEN® jedoch eine fünf Zentimeter dicke Dämmschicht enthalten, wurde untersucht, ob dadurch sogar eine Reduktion der Wärmeverluste durch die Außenwandkonstruktion erreicht wird. Die Simulationsergebnisse zeigen in Abhängigkeit des Materials der Unterkonstruktion eine geringfügige Verringerung des ΔU -Wertes (Abb. 88).

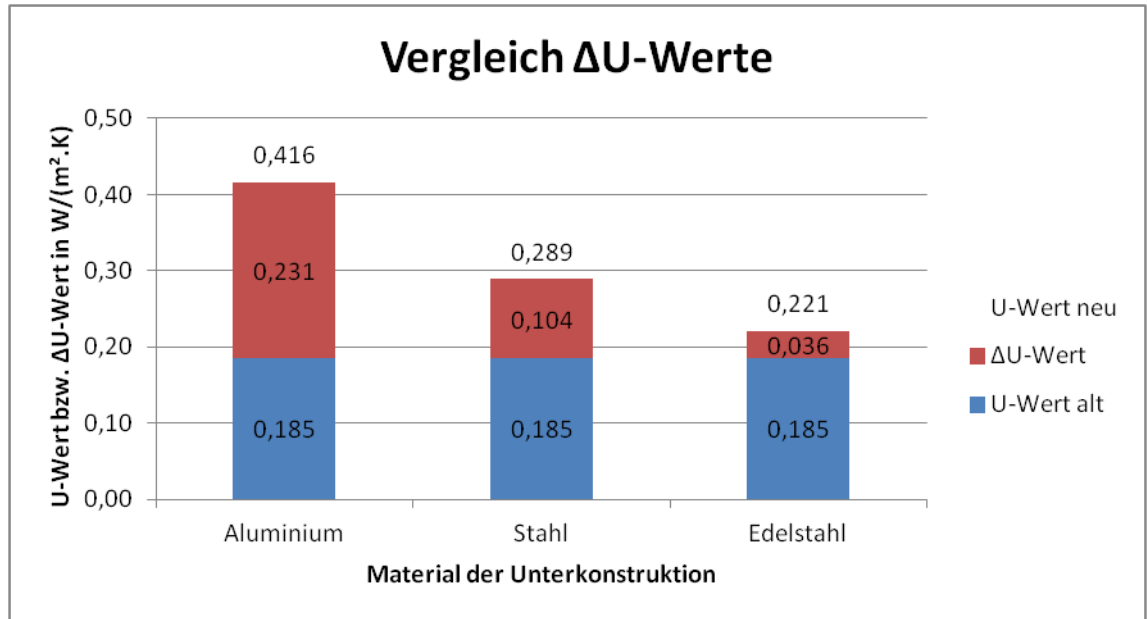


Abb. 88: Wittmayergasse 2 – ΔU -Wert in Abhängigkeit des Materials der Unterkonstruktion bei Berücksichtigung der wärmegedämmten Fassadenbegrünungspaneele

Insgesamt bleibt die Schlussfolgerung für dieses System dieselbe: Bei Verwendung konventioneller Aluminium-Konsolen als Unterkonstruktion für flächige, wandgebundene Fassadenbegrünungssysteme kommt es aufgrund einer deutlich erhöhten Anzahl an Konsolen (um ca. 50 % von üblicherweise zwei auf etwa drei Konsolen je Quadratmeter) zu entsprechend erhöhten U-Wert-Zuschlägen, die den U-Wert der Außenwandkonstruktion sogar mehr als verdoppeln können.

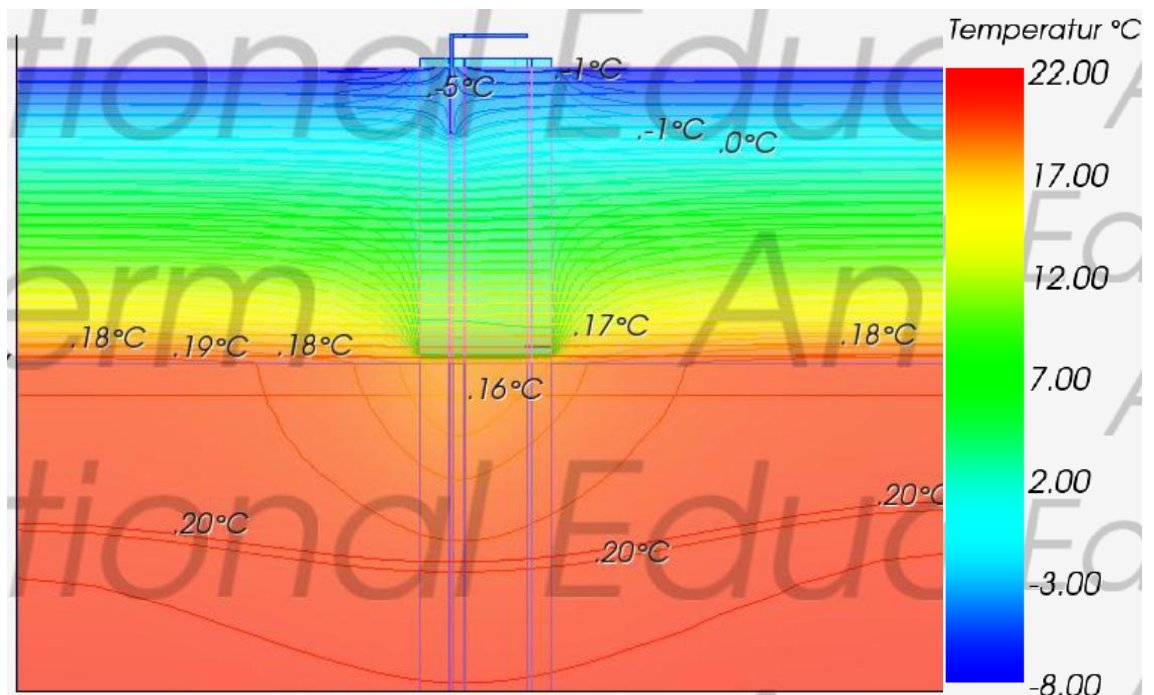


Abb. 89: Wittmayergasse 2 – Verlauf der Isothermen, Abbildung um 90° gedreht

Der Verlauf der Isothermen (Abb. 89) verdeutlicht die starke Auskühlung des Verankerungsgrundes im Bereich der Konsolen auf unter 16°C.

Bei Heranziehen der Gleichung (1), dem Näherungsverfahren aus der ÖNORM EN ISO 6946 Anhang F [ONO15], ergibt sich eine Erhöhung des Wärmedurchgangskoeffizienten von:

$$\Delta U = 0,967 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \quad (15)$$

Dieser Wert übersteigt das Simulationsergebnis um ein Vielfaches, womit die Eignung des Näherungsverfahrens für solche komplexen Unterkonstruktionen grundsätzlich in Frage zu stellen ist. Ein Grund dafür dürfte die im vereinfachten Verfahren mangelhafte Abbildbarkeit der thermischen Trennung zwischen Konsolen-Grundplatte und Verankerungsgrund sein. Um mit dem Näherungsverfahren ein realistischeres Ergebnis zu bekommen, muss das System jedenfalls stark vereinfacht werden. Beispielsweise könnte angenommen werden, dass die Dämmebene lediglich von einer Gewindestange mit dem Durchmesser des verwendeten Ankerbolzens (10 mm) und dem Material der Konsole (in diesem Fall Aluminium) durchdrungen wird. Bei Zugrundelegung dieses vereinfachten Systems ergibt sich mit dem Näherungsverfahren eine Erhöhung des Wärmedurchgangskoeffizienten von:

$$\Delta U = 0,195 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \quad (16)$$

Dieser Wert ist nun sogar geringfügig besser als das Ergebnis der thermischen Wärmebrückensimulation, da die Querschnittsfläche der Aluminium-Konsole tatsächlich auch wesentlich größer ist, als in diesem vereinfachten System angenommen. Das Näherungsverfahren kann somit bei Befestigungen mit keinem einheitlichen Querschnitt eine detaillierte Wärmebrückensimulation nicht ersetzen.

5.2.4 Amtsgebäude MA 31 – Troglösung

Beim Amtsgebäude der MA 31 liegen leider keine Wärmestrom-Messdaten im Bereich der Konsolen für die Fassadenbegrünung vor. Aus diesem Grund erfolgt die Ermittlung des ΔU -Wertes zufolge der Unterkonstruktion der Fassadenbegrünung hier rein rechnerisch. Außerdem wird, wie in Kapitel 4, der Einfluss unterschiedlicher thermischer Trennungen der Unterkonstruktion auf den ΔU -Wert überprüft. Dabei ist jedoch die Ausgangssituation eine andere: Da die gesamten vertikalen Lasten aus der Fassadenbegrünung über die vorgestellte Stahl-Konstruktion direkt in den Boden eingeleitet werden, ergibt sich für die Konsolen eine reine Normalkraft-Beanspruchung. Damit bleibt die statisch erforderliche Anzahl an Konsolen pro Quadratmeter auch bei höherer thermischer Trennung konstant.

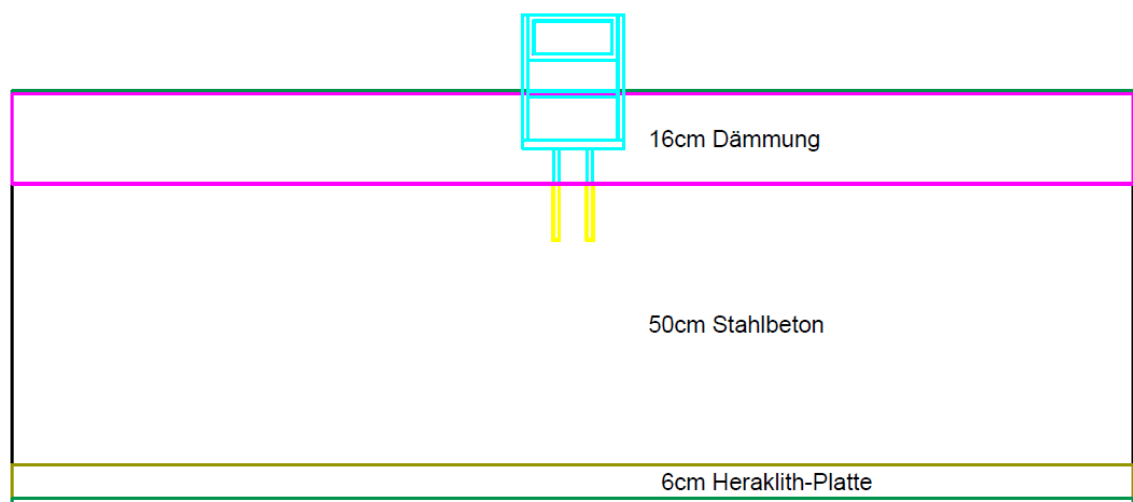


Abb. 90: MA 31 – Auto-CAD-Zeichnung der Konsole als Grundlage für den DXF-Import in AnTherm®, Abbildung um 90° gedreht

Die Geometrie der Konsole (Abb. 91) wurde einem Detailplan der Firma Rataplan [RAT18] entnommen. Demgemäß beträgt der Abstand zwischen Konsolen-Grundplatte und Verankerungsgrund mindestens zwei Zentimeter (justierbar). Die Verankerungslänge der Dübel im Stahlbeton beträgt 9,5 cm. Die Dicke der Grundplatte ist mit 1,5 cm und die Blechstärke der beiden Konsolen-Stege mit je 0,8 cm angegeben. Als vertikales Tragprofil wird ein Hohlprofil mit den Abmessungen 8 cm mal 16 cm und einem Abstand zur Wärmedämmung von ca. 5,5 cm verwendet.

Die tatsächliche Dicke der thermischen Trennung der Konsolen-Grundplatte vom Verankerungsgrund variiert aufgrund der mittels Laser-Scan ermittelten Unebenheiten der Bestandsfassade von über sieben Zentimetern zwischen 24 mm und 101 mm [HUB18]. Für die Wärmebrückenberechnungen wurde daher der Mittelwert (62,5 mm) herangezogen. Als Material der thermischen Trennung wurde das gleiche Material wie für die Fassadendämmung (Mineralwolle mit einer Wärmeleitfähigkeit von $\lambda = 0,036 \text{ W/(m.K)}$) verwendet.

Das in AnTherm® erstellte 3D-Schichten-Modell setzt sich aus neun Schichten zusammen: Als zentrales Element befinden sich in der Mitte die beiden Ankerbolzen, gefolgt von zwei Schichten, die jeweils einen Schnitt durch den umhüllenden Kunststoff-Dübel darstellen. Danach folgen die Konsole (inkl. der Konsolen-Laschen, die das vertikale Tragprofil mit der Konsole verbinden) sowie als flankierendes Element die vertikale Tragkonstruktion (Tab. 17). Die Gesamt-Schichtdicke des 3D-Modells entspricht mit 225 cm dem vertikalen Achsabstand der Konsolen (Abb. 91).

Tab. 17: MA 31 - Eingabe Schichten in AnTherm®

Nr.	Schicht	Dicke in mm
1	Tragprofil vertikal	1.060,00
2	Konsolen-Laschen	10,00
3	Konsole	49,25
4	Dübel	1,30
5	Ankerbolzen	8,90
6	Dübel	1,30
7	Konsole	49,25
8	Konsolen-Laschen	10,00
9	Tragprofil vertikal	1.060,00
-		gesamt: 2.250,00

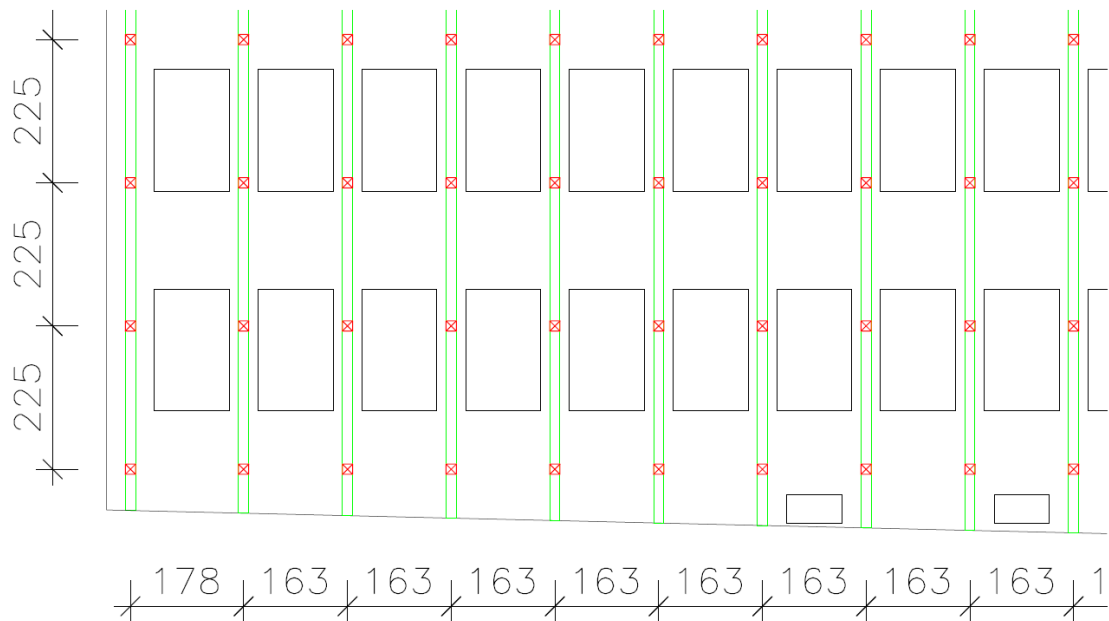


Abb. 91: MA 31 – Darstellung der Achsabstände der Konsolen anhand eines repräsentativen Wandausschnittes

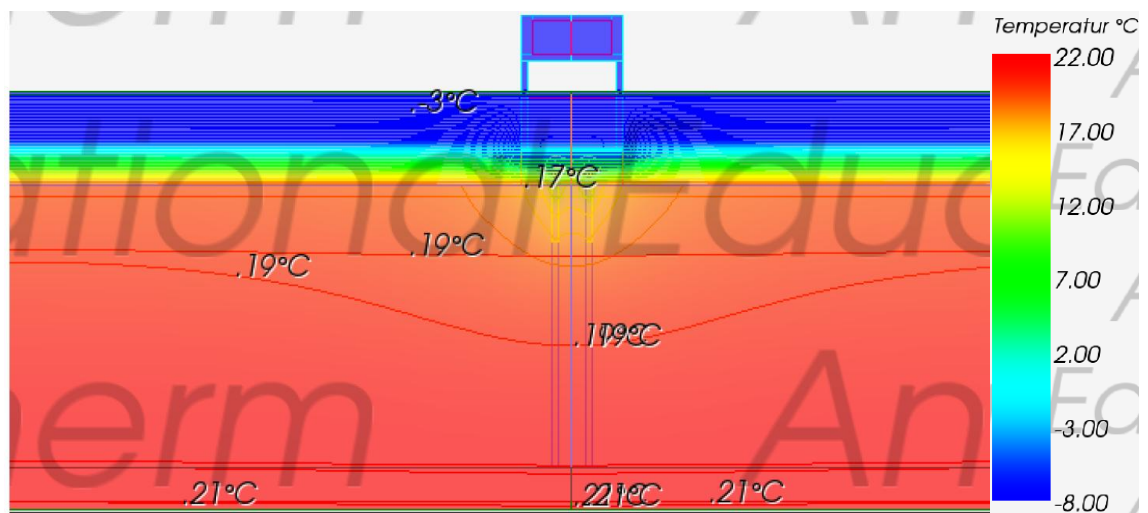


Abb. 92: MA 31 – Verlauf der Isothermen im Bereich der Konsole bei 30 mm thermischer Trennung mit $\lambda = 0,08 \text{ W/(m.K)}$ auf STB-Untergrund, Abbildung um 90° gedreht

Abb. 92 zeigt den Verlauf der Isothermen im betrachteten Bereich. Der durch die Simulation bestimmte punktuelle Wärmebrücken-Verlustkoeffizient einer einzelnen Konsole beträgt:

$$\chi = 0,071 \text{ W/K} \quad (17)$$

Unter Berücksichtigung einer Anzahl von acht Konsolen auf der Referenzfläche von $13,5 \text{ m}^2$ (= 0,59 Konsolen je Quadratmeter) ergibt sich eine Vergrößerung des Wärmedurchgangskoeffizienten von:

$$\Delta U = 0,042 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \quad (18)$$

Dies entspricht einer Vergrößerung des U-Wertes der ungestörten Wand von ca. 21 % von 0,20 W/(m²·K) auf ca. 0,24 W/(m²·K). Damit ist der ΔU -Wert in diesem konkreten Fall aufgrund der Ableitung der vertikalen Lasten über das vorgestellte Stahlgerüst und der dadurch ermöglichten guten thermischen Trennung der Konsolen deutlich geringer als bei konventionellen hinterlüfteten Fassaden mit Stahl-Unterkonstruktion.¹³

Bei Heranziehen der Gleichung (1), dem Näherungsverfahren aus der ÖNORM EN ISO 6946 Anhang F [ONO15], ergibt sich eine Erhöhung des Wärmedurchgangskoeffizienten von:

$$\Delta U = 0,229 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \quad (19)$$

Dieser Wert übersteigt das Simulationsergebnis auch bei dieser Konsole um ein Vielfaches, da die Wirkung der thermischen Trennung nicht korrekt abgebildet werden kann. Bei Vereinfachung des Systems analog zur Vorgangsweise in Kapitel 5.2.3, sodass die Dämmebene lediglich von den beiden Ankerbolzen (Durchmesser jeweils 20 mm) durchdrungen wird, ergibt sich mit dem Näherungsverfahren eine Erhöhung des Wärmedurchgangskoeffizienten von:

$$\Delta U = 0,073 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \quad (20)$$

Im Vergleich zum ΔU -Wert gemäß Formel 19 ist dieser Wert schon deutlich näher am Ergebnis der thermischen Wärmebrückensimulation, jedoch immer noch um ca. 74 % zu hoch. Eine realistische Abbildung der Wärmebrückewirkung zufolge einer derart komplexen Konsole ist folglich mit dem Näherungsverfahren nicht möglich.

¹³ Zum Vergleich: Bei einer hinterlüfteten Fassade mit Stahl-Konsolen und fünf Millimeter thermischer Entkoppelung würde sich bei ansonsten gleichem Wandaufbau in etwa ein doppelt so hoher ΔU -Wert von 0,08 W/(m²·K) ergeben.

Nachfolgend wird für den vorliegenden Fall eines vorgestellten Stahlgerüsts zur vertikalen Lastabtragung der Einfluss der thermischen Trennung auf den ΔU -Wert im Detail untersucht. Dabei wird deren Dicke zwischen zwei und 16 Zentimetern (entsprechend der vorhandenen Dämmstärke) sowie deren Wärmeleitfähigkeit zwischen $\lambda = 0,08 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ und $\lambda = 0,02 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ variiert. Eine thermische Trennung aus Hartkunststoff mit $\lambda = 0,17 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ wird hier nicht untersucht, da die Druckfestigkeit der thermischen Trennung in diesem Fall statisch nicht von Bedeutung ist und der Fokus daher auf der thermischen Komponente der thermischen Trennung liegen sollte. Als Verankerungsgrund werden wieder die Varianten Stahlbeton, Vollziegel und Vollholz untersucht, wobei der Wandaufbau ansonsten nicht verändert wird.

Bei Stahlbeton als Verankerungsgrund zeigt sich ein großes Potenzial zur Reduktion des ΔU -Wertes bei Erhöhung der Dicke der thermischen Trennung (Abb. 93) bzw. bei Änderung des Materials der Unterkonstruktion von Stahl auf Edelstahl (Abb. 94). Eine Erhöhung der Dicke der thermischen Trennung von 20 mm auf 160 mm bewirkt hier bei Stahl-Unterkonstruktion eine Reduktion des ΔU -Wertes um ca. 70 % (von ca. $0,07 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ auf ca. $0,02 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$) und bei Edelstahl-Unterkonstruktion sogar um über 80 % (von ca. $0,04 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ auf ca. $0,005 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$). Dabei bedeutet eine thermische Trennung von 160 mm Dicke, dass die Grundplatte der Konsole nicht in die Außenwanddämmung hineinragt, sodass lediglich die beiden Ankerbolzen je Konsole die Dämmebene durchdringen. Dadurch wird der punktuelle Wärmebrücken-Verlustkoeffizient auf ein Minimum reduziert und eine annähernd wärmebrückenfreie Befestigung der Unterkonstruktion für die Fassadenbegrünung ermöglicht.

Zur besseren Übersichtlichkeit sind in den beiden Abbildungen für Stahlbeton-Untergrund (Abb. 93, Abb. 94) die Mittelwerte der Ergebnisse bei Vollziegel- und Vollholz-Untergrund angeführt, worauf in den nachfolgenden Absätzen genauer eingegangen wird.

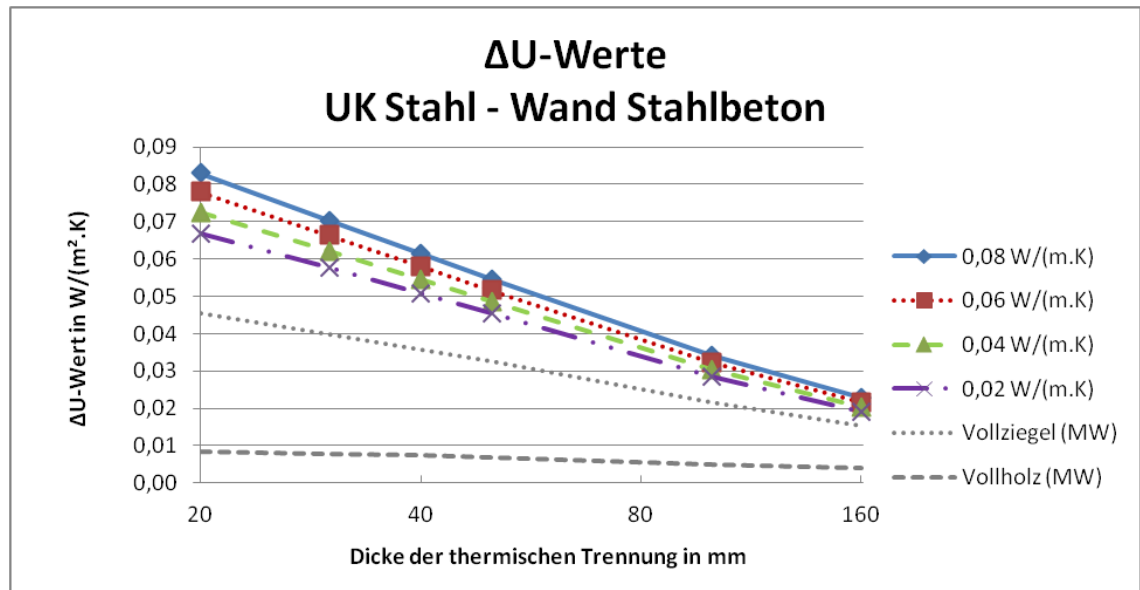


Abb. 93: MA 31 – Veränderung des ΔU -Wertes bei Stahl-Unterkonstruktion auf Stahlbetonuntergrund je nach Dicke und Wärmeleitfähigkeit der thermischen Trennung

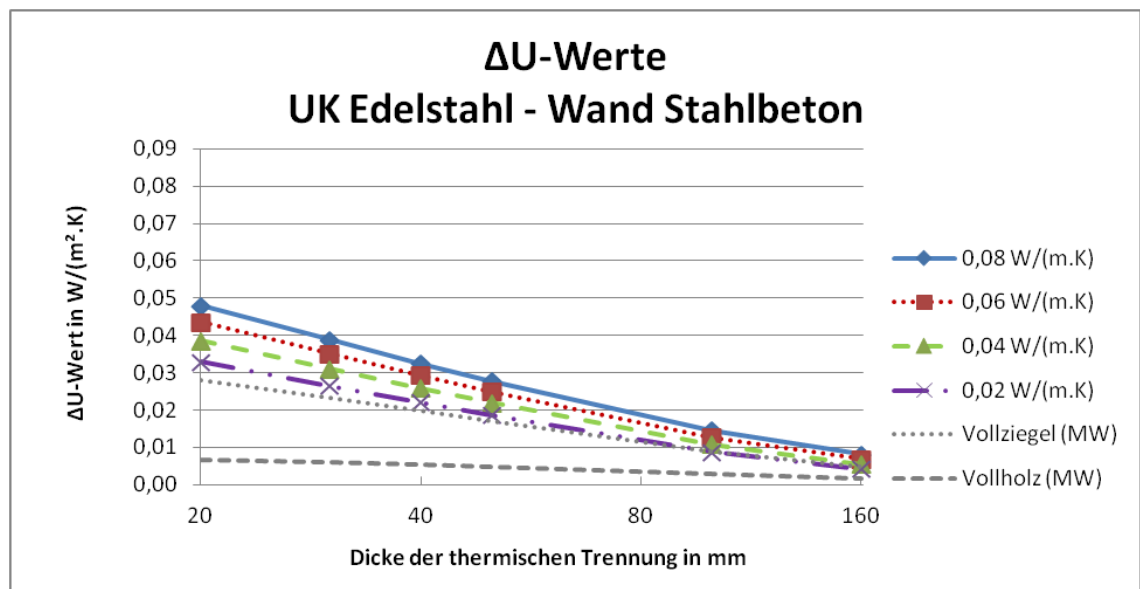


Abb. 94: MA 31 – Veränderung des ΔU -Wertes bei Edelstahl-Unterkonstruktion auf Stahlbetonuntergrund je nach Dicke und Wärmeleitfähigkeit der thermischen Trennung

Wie in den Abbildungen für Stahlbeton-Untergrund (Abb. 93, Abb. 94) zu sehen ist, sind die ΔU -Werte bei Vollziegel und Vollholz aufgrund des höheren thermischen Widerstandes des Verankerungsgrundes deutlich geringer und der Verlauf der Kurven flacher. Insbesondere bei Vollholz-Untergrund ist in absoluten Zahlen kaum noch eine Verringerung der ΔU -Werte bei Erhöhung der Dicke der thermischen Trennung zu verzeichnen.

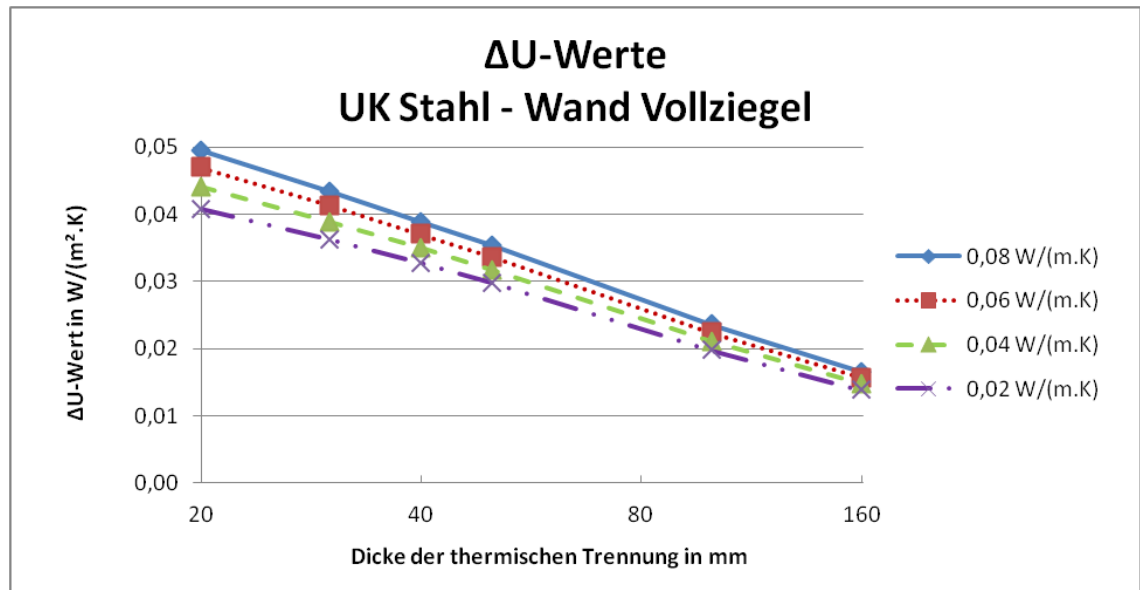


Abb. 95: MA 31 – Veränderung des ΔU -Wertes bei Stahl-Unterkonstruktion auf Vollziegeluntergrund je nach Dicke und Wärmeleitfähigkeit der thermischen Trennung

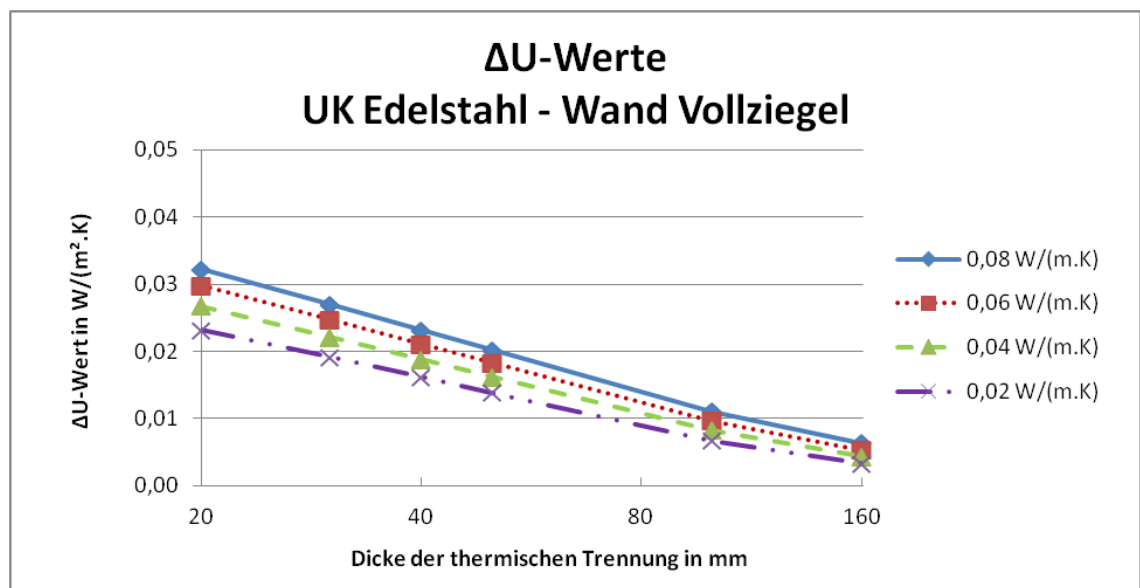


Abb. 96: MA 31 – Veränderung des ΔU -Wertes bei Edelstahl-Unterkonstruktion auf Vollziegeluntergrund je nach Dicke und Wärmeleitfähigkeit der thermischen Trennung

Bei Vollziegel-Untergrund bewirkt eine Erhöhung der Dicke der thermischen Trennung von 20 mm auf 160 mm bei Stahl-Unterkonstruktion (Abb. 95) eine Reduktion des ΔU -Wertes um ca. 66 % (von ca. 0,045 W/(m².K) auf ca. 0,015 W/(m².K)) und bei Edelstahl-Unterkonstruktion (Abb. 96) auch hier um über 80 % (von ca. 0,03 W/(m².K) auf ca. 0,004 W/(m².K)).

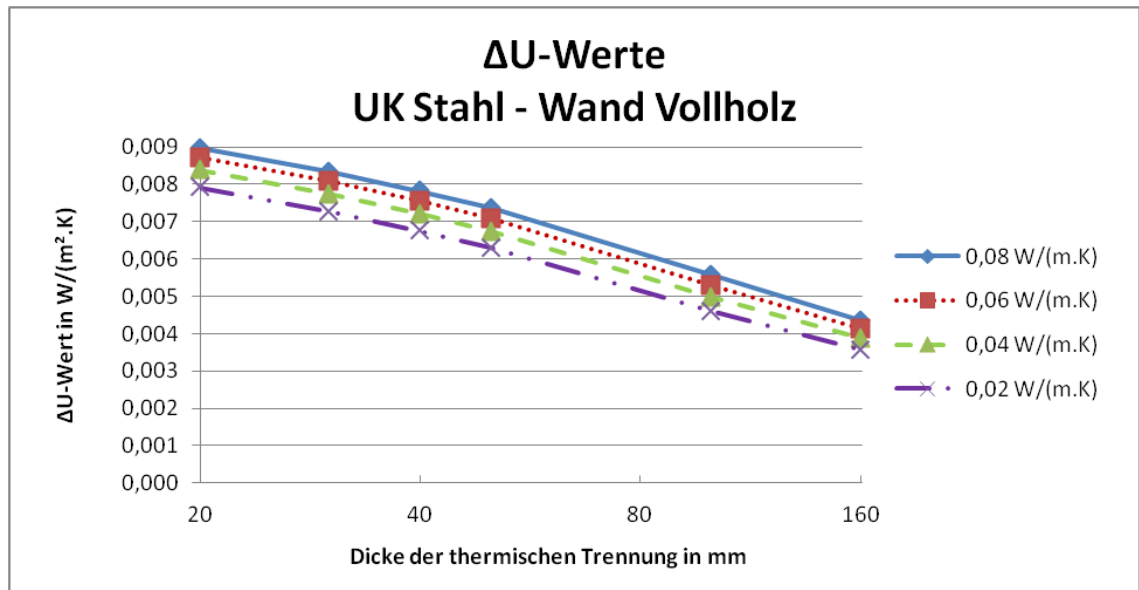


Abb. 97: MA 31 – Veränderung des ΔU -Wertes bei Stahl-Unterkonstruktion auf Vollholzuntergrund je nach Dicke und Wärmeleitfähigkeit der thermischen Trennung

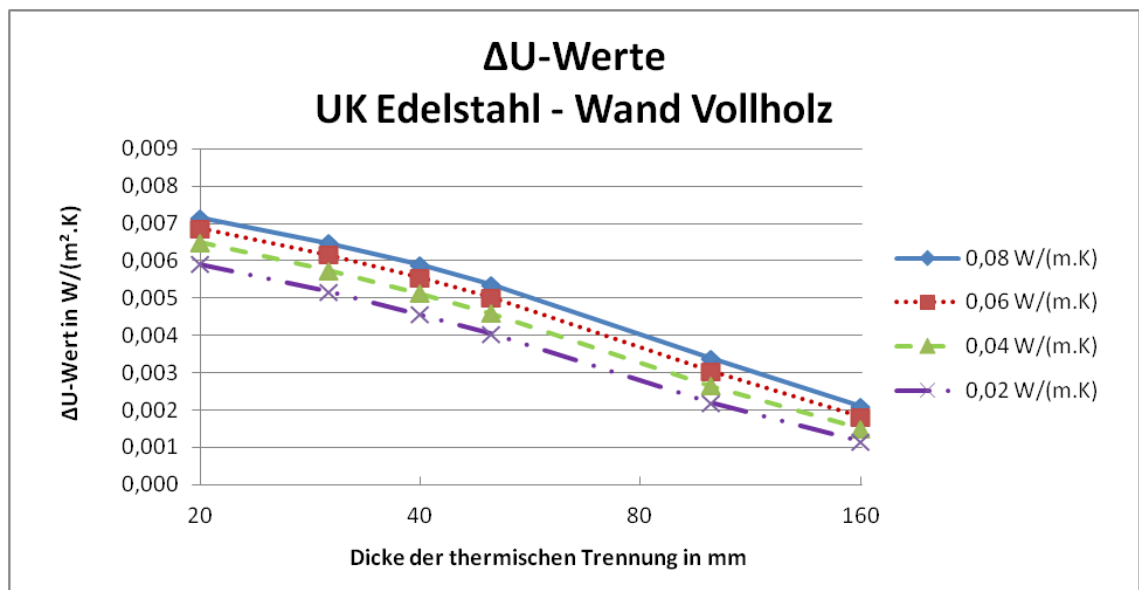


Abb. 98: MA 31 – Veränderung des ΔU -Wertes bei Edelstahl-Unterkonstruktion auf Vollholzuntergrund je nach Dicke und Wärmeleitfähigkeit der thermischen Trennung

Ein ähnliches Bild zeigt sich bei Vollholz-Untergrund (Abb. 97, Abb. 98), wobei hier die geänderte Skalierung der Ordinate zu beachten ist. Aufgrund des hohen thermischen Widerstandes des tragenden Holzquerschnittes ist der Einfluss der punktuellen Wärmebrücken zufolge der Stahl- bzw. Edelstahl-Konsolen selbst bei geringer thermischer Trennung nahezu vernachlässigbar (ΔU -Werte stets $< 0,01 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$). Relativ betrachtet bewirkt eine Erhöhung der Dicke der thermischen Trennung von 20 mm auf 160 mm bei Stahl-Unterkonstruktion hier immer noch eine Reduktion des ΔU -Wertes um über

50 % (von ca. $0,008 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ auf ca. $0,004 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$) und bei Edelstahl-Unterkonstruktion um über 70 % (von ca. $0,006 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ auf ca. $0,001 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$).

Im Allgemeinen lässt sich festhalten, dass durch Verbesserung der Wärmeleitfähigkeit der thermischen Trennung von $\lambda = 0,08 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ auf $\lambda = 0,02 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ sowie Erhöhung von deren Dicke von zwei auf 16 Zentimeter und durch Änderung des Materials der Unterkonstruktion von Stahl auf Edelstahl unter den gegebenen Randbedingungen¹⁴ insgesamt eine Reduktion des ΔU -Wertes von mindestens 87 % (Vollholz) bis zu maximal 95 % (Stahlbeton) erzielt werden kann (Abb. 99).

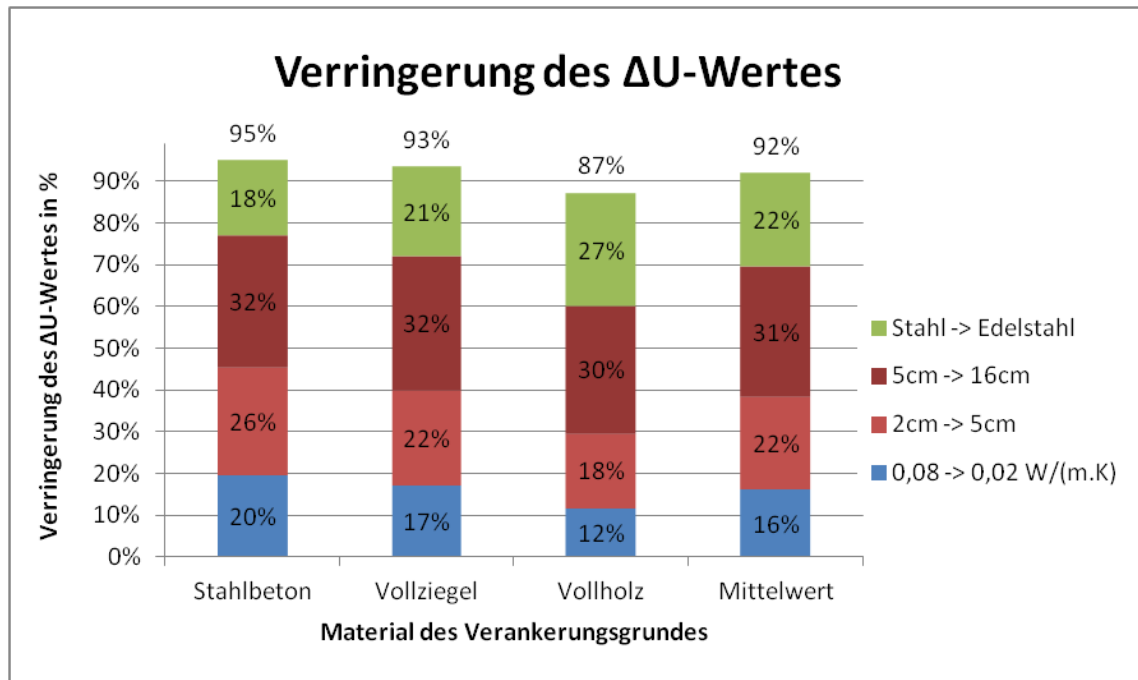


Abb. 99: MA 31 – Verbesserung des ΔU -Wertes bei Verringerung der Wärmeleitfähigkeit bzw. Erhöhung der Dicke der thermischen Trennung sowie bei Änderung des Materials der Unterkonstruktion von Stahl auf Edelstahl

Dabei lässt sich durch Verringerung der Wärmeleitfähigkeit der thermischen Trennung mit im Mittel 16 % (bezogen auf eine Dicke der thermischen Trennung von zwei Zentimetern und Stahl-Unterkonstruktion) die geringste Reduktion des ΔU -Werts erzielen. Wird zusätzlich die Dicke der thermischen Trennung von zwei auf fünf bzw. sogar auf 16 Zentimeter erhöht, verringert sich

¹⁴ bezogen auf den gegenständlichen Wandaufbau und die gegebene Geometrie der Fassaden-Unterkonstruktion (Konsole und Tragprofil)

der ΔU -Wert durchschnittlich um weitere 22 % (5 cm) bzw. 53 % (16 cm). Eine Änderung des Materials der Unterkonstruktion von Stahl auf Edelstahl kann schlussendlich den ΔU -Wert im Mittel nochmals um 22 % reduzieren.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass bei fassadengebundener Begrünung auf einer selbsttragenden, in der Außenwand rückverankerten Fassaden-Unterkonstruktion die wärmetechnische Qualität der thermischen Trennung eine wesentliche Rolle spielt. Durch eine maßgebende Erhöhung der Dicke und Senkung der Wärmeleitfähigkeit der thermischen Trennung können hier die ΔU -Werte effektiv reduziert werden. Im Optimalfall sollten die Konsolen der Fassaden-Unterkonstruktion aus der Dämmebene herausgerückt werden. Somit würde die Wärmedämmung nur durch die statisch unbedingt erforderlichen Ankerbolzen bzw. Gewindestangen durchdrungen werden (vergleichbar mit den Systemen, die bei den Schulen Diefenbachgasse und Schumeierplatz angewandt wurden). Zusätzlich sollte als Material für die Unterkonstruktion bevorzugt Edelstahl verwendet werden – insbesondere dann, wenn wärmebrückenfreie, passivhaustaugliche Systeme gewünscht werden.

5.3 Vergleich der Berechnungsergebnisse

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Wärmebrückenberechnungen sowie -messungen der angeführten Projekte kurz zusammengefasst und daraus allgemeine Handlungsempfehlungen für die Ausführung der Unterkonstruktion bei Fassadenbegrünungssystemen abgeleitet.

1. BG und BRG Diefenbachgasse – System Optigrün®

Als Fassadenbegrünung im BRG Diefenbachgasse wurde ein Kassetten-system der Firma Optigrün® verwendet, das an einer mit 14 cm WDVS gedämmten Stahlbeton-Außenwand nachträglich montiert wurde. Die vertikale Unterkonstruktion stellen Halfenschienen (aus Stahl) dar, die mit Schwerlastankern an der Fassade befestigt werden und am Fußpunkt auf den Betonplatten des Terrassendaches aufgestellt sind. Die horizontale Unterkonstruktion stellen speziell geformte Aluminium-Profile dar.

Die Achsabstände der Schwerlastanker betragen 125 cm (vertikal) bzw. 150 cm (horizontal). Bei einem punktuellen Wärmebrücken-Verlustkoeffizienten gemäß Wärmebrückensimulation in AnTherm® von $\chi = 0,021 \text{ W/K}$ ergibt dies eine minimale Erhöhung des Wärmedurchgangskoeffizienten von $\Delta U = 0,021 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Die Auswertung der Messdaten hingegen lässt auf eine geringfügige Reduktion des Wärmedurchgangskoeffizienten zufolge der vorgestellten, hinterlüfteten Fassadenbegrünung von $\Delta U = -0,020 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ schließen.

2. BRG Schumeierplatz – System Techmetall

Beim BRG Schumeierplatz wurde an einer mit 14 cm WDVS gedämmten Stahlbeton-Wand ein modulares Trogsystem der Firma Techmetall ausgeführt. Die vertikale Unterkonstruktion stellt hier ein Aluminium-Profil dar, das mittels Gewindestangen (aus Stahl) nachträglich an der Außenwand befestigt wurde. Die Tröge und deren Grundplatte bestehen ebenfalls aus Aluminium.

Die Achsabstände der Gewindestangen betragen im betrachteten Abschnitt 62,5 cm (vertikal) bzw. 95 cm (horizontal), wobei die Achsabstände über die

gesamte Fläche betrachtet stark variieren und tendenziell sogar geringer sind als im gewählten Bereich. Jedenfalls beträgt der punktuelle Wärmebrücken-Verlustkoeffizient einer einzelnen Gewindestange gemäß Wärmebrückensimulation $\chi = 0,064 \text{ W/K}$. Dies ergibt unter den genannten Bedingungen eine Erhöhung des Wärmedurchgangskoeffizienten von $\Delta U = 0,103 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Der gemessene Wert ist auch hier deutlich besser und postuliert eine Erhöhung von $\Delta U = 0,061 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

3. Wittmayergasse 2 – System 90^{DE}GREEN®

Das Bestandsgebäude in der Wittmayergasse 2 wurde mit einem Plattensystem der 90 DEGREEN GmbH ausgestattet. Im Zuge der Anbringung von 18 cm Außenwanddämmung wurden die mit 5 cm Mineralwolle ausgestatteten Begrünungsplatten mithilfe der Aluminium-Konsole MFT-FOX HI der Firma Hilti Austria Ges.m.b.H. als vorgehängte hinterlüftete Fassade auf Beton-Untergrund montiert.

Die Achsabstände der Konsolen sind mit jeweils nur 57 cm im Vergleich zu den anderen Beispielprojekten relativ gering, womit sich ein enger Konsolen-Raster mit 3,08 Stk/m² ergibt. Der durch die Simulation bestimmte punktuelle Wärmebrücken-Verlustkoeffizient einer „MFT-Fox HI“-Konsole beträgt hier $\chi = 0,079 \text{ W/K}$, woraus insgesamt eine verhältnismäßig große Erhöhung des Wärmedurchgangskoeffizienten von $\Delta U = 0,241 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ folgt. Die gedämmte Ausführung der Begrünungsplatten hat nur einen geringen Einfluss und führt bei Stahlbeton-Untergrund zu einer Reduktion des ΔU -Wertes um 0,01 W/(m²·K).

4. Amtsgebäude MA 31 – Troglösung

Das Amtsgebäude der MA 31 wurde im Zuge einer umfassenden Sanierung straßenseitig mit 16 cm WDVS sowie einer Fassadenbegrünung in Form eines selbsttragenden vorgestellten Stahl-Gerüsts mit massiven Pflanzentrögen ausgestattet. Während die vertikale Lastableitung direkt über die Stahl-Konstruktion erfolgt, werden horizontale Lasten über gabelförmige Stahl-Konsolen in die Stahlbeton-Außenwandstützen eingeleitet. Die Dicke der thermischen Trennung zwischen den Konsolen und dem Verankerungsgrund ist aufgrund der

Unebenheit der Bestandsfassade großen Schwankungen unterworfen, beträgt jedoch im Mittel 6,25 cm. Die Achsabstände der Konsolen betragen 225 cm (vertikal) bzw. 163 cm (horizontal), nach Abzug der Fenster ergeben sich somit 0,59 Konsolen je Quadratmeter Außenwandfläche.

Der durch die Wärmebrückensimulation bestimmte punktuelle Wärmebrücken-Verlustkoeffizient einer einzelnen Konsole beträgt bei Zugrundelegung der mittleren Dicke der thermischen Trennung $\chi = 0,071 \text{ W/K}$. Daraus folgt eine Erhöhung des Wärmedurchgangskoeffizienten im Vergleich zur nicht begrünten Außenwandkonstruktion von $\Delta U = 0,042 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

Die ermittelten ΔU -Werte der ausgewählten Projekte sind in Tab. 18 nochmals zusammenfassend angeführt. Dabei muss stets bedacht werden, dass die angegebenen ΔU -Werte nur in Verbindung mit den projektspezifischen Randbedingungen gelten und insbesondere bei anderen Verankerungsgründen große Unterschiede zu erwarten sind. Aus diesem Grund sind auch die ΔU -Werte der unterschiedlichen Systeme in Tab. 18 nicht direkt untereinander vergleichbar, da die Wandaufbauten nicht dieselben sind.

Tab. 18: Vergleich der gemessenen, simulierten bzw. normgemäß berechneten ΔU -Werte der ausgewählten Beispielprojekte

Objekt	System	Anzahl Konsolen pro m ²	ΔU -Wert in W/(m ² ·K)		
			Messung	Simulation	Norm
-	-				
BRG Diefenbachgasse	Optigrün	1,09	- 0,020	0,021	0,023
BRG Schumeierplatz	Techmetall	1,68	0,061	0,103	0,151
Wittmayergasse 2	90 ^{DE} GREEN	3,08	-	0,231	0,967
MA 31 - Grabnergasse	Troglösung	0,59	-	0,042	0,229

Zum direkten Vergleich der Systeme untereinander werden die ΔU -Werte in Tab. 19 unter Zugrundelegung eines einheitlichen Wandaufbaus von 25 cm Stahlbeton und 14 cm EPS-F plus (analog zum Aufbau im BRG Schumeierplatz) neu berechnet. Dabei ist zu beachten, dass die Randbedingungen der Wärmebrückenmessung im BRG Diefenbachgasse nun nicht mehr exakt mit

jenen der Simulation zusammenpassen. Außerdem werden in dieser Tabelle die ΔU -Werte (insbesondere bei den Wärmestrommessungen relevant) auf den U-Wert im Hinterlüftungsspalt statt auf den U-Wert der Referenzwand bezogen.

Tab. 19: Vergleich der auf einen einheitlichen Wandaufbau bezogenen ΔU -Werte der ausgewählten Beispielprojekte

Objekt	System	Anzahl Konsolen pro m ²	ΔU -Wert in W/(m ² .K)		
			Messung	Simulation	Norm
-	-				
BRG Diefenbachgasse	Optigrün	1,09	0,012	0,024	0,025
BRG Schumeierplatz	Techmetall	1,68	0,014	0,107	0,151
Wittmayergasse 2	90 ^{DE} GREEN	3,08	-	0,236	1,197
MA 31 - Grabnergasse	Troglösung	0,59	-	0,040	0,270

Die ΔU -Werte in der Spalte „Norm“ beziehen sich auf die Ergebnisse des Näherungsverfahrens aus der ÖNORM EN ISO 6946 Anhang F [ONO15]. Dieses liegt grundsätzlich weit auf der sicheren Seite und ist nur für jene Fälle geeignet, wo die Wärmedämmung von einem durchgehenden, einheitlichen Querschnitt durchdrungen wird (z.B. Gewindestange, Schwerlastanker etc.). In allen Fällen, wo die Wärmebrücke aus einer Konsole mit thermischer Trennung besteht, wird die Wärmebrückenwirkung um ein Vielfaches überschätzt, was an den Ergebnissen der Projekte „Wittmayergasse 2“ und „MA 31 – Grabnergasse“ zu erkennen ist.

Beim Vergleich der Ergebnisse aus Messung und Simulation fällt auf, dass die Wärmebrückenmessungen in beiden Fällen deutliche bessere ΔU -Werte ergeben. Dies lässt darauf schließen, dass der scheinbar positive Einfluss der Fassadenbegrünung auf den tatsächlichen Wärmeverlust durch eine gedämmte Außenwand derzeit rechnerisch noch nicht hinreichend genau abgebildet werden kann.

5.4 Empfehlungen zur Ausführung der Unterkonstruktion bei Fassadenbegrünungen

In Bezug auf die Ausführung der Unterkonstruktion für begrünte Fassaden können folgende Empfehlungen abgeleitet werden:

- Systeme mit Stahl-Unterkonstruktion (BRG Diefenbachgasse bzw. MA 31 – Grabnergasse) sind gegenüber Systemen mit Aluminium-Unterkonstruktion jedenfalls zu bevorzugen. Eine weitere Verringerung der Wärmebrückenwirkung kann durch Edelstahl- bzw. Kunststoff-Konsolen erzielt werden.
- Wenn möglich sind die vertikalen Lasten direkt über die Begrünungs-Unterkonstruktion abzuleiten (BRG Diefenbachgasse bzw. MA 31 – Grabnergasse), da somit die erforderliche Anzahl an Befestigungselementen stark reduziert werden kann.
- Die Dämmebene sollte nach Möglichkeit nur von stabförmigen Befestigungselementen durchdrungen werden (BRG Diefenbachgasse bzw. BRG Schumeierplatz). Massive Konsolen sollten, wenn erforderlich, erst außerhalb der Dämmebene angeordnet werden.
- Die Wirkung einer zusätzlichen, im Begrünungselement integrierten Dämmschicht ist sehr gering, kann jedoch im Einzelfall zu einer weiteren Reduktion der Wärmeverluste führen.

Abschließend kann festgehalten werden, dass bei sorgfältiger Planung der Unterkonstruktion von begrünten, hinterlüfteten Fassaden deren Wärmebrücken auf ein Minimum reduziert werden können und sogar wärmebrückenfreie Konstruktionen möglich sind. In jedem Fall sind jedoch die projektspezifischen Rahmenbedingungen gesondert zu berücksichtigen und durch einen fachlich spezialisierten Fassadenplaner entsprechende Lösungsvorschläge zu erarbeiten, die sowohl den statischen als auch den bauphysikalischen Belangen Genüge tun.

Es folgt nun der dritte und letzte Teil dieser Arbeit, in dem ein theoretisches Modell einer Art Doppelfassade entwickelt und sowohl statisch als auch bauphysikalisch untersucht wird, bei dem der Fassadenbegrünung in einem gewissen Abstand Photovoltaik-Module vorgestellt werden.

6 Entwicklung eines Modells für Fassadenbegrünung mit vorgelagerten Photovoltaik-Modulen

Der dritte Teil dieser Arbeit beschäftigt sich mit der Entwicklung eines numerischen Modells zur Kombination von Fassadenbegrünung und zusätzlich vorgehängten Photovoltaik-Modulen (in weiterer Folge „PV-Module“ genannt). Zur Gewährleistung einer ausreichenden Belichtung der Fassadenbegrünung werden die PV-Module entweder transparent ausgeführt oder ausreichend dimensionierte Abstände zwischen den Modulen vorgesehen. Außerdem sollen die PV-Module vertikal verschiebbar montiert werden, um diese auch als Sonnen- und Blendschutz verwenden zu können.

Zu Beginn der Überlegungen ist ein Fassadenraster zu definieren, um daraus möglichst universelle Annahmen für den horizontalen und vertikalen Achsabstand der Tragprofile abzuleiten. Um das Ergebnis weiter einzugrenzen, wird den weiteren Ausführungen eine Nutzung als Bürogebäude zugrundegelegt. In nachfolgender Tabelle (Tab. 20) sind die Ergebnisse der Literaturrecherche sowie die für diese Arbeit getroffenen Festlegungen des horizontalen und vertikalen Achsabstandes der Tragprofile angeführt.

Tab. 20: Übliche Spannweite sowie in dieser Arbeit verwendete Werte des horizontalen und vertikalen Achsabstandes der Tragprofile

horizontaler Achsabstand (Achsraster) in Metern		
Literaturrecherche	1,25 - 1,45	[GOL18, SCH18, TEK18, WIK18]
Beispielprojekte	1,35	[BAU18, MAN18, QBC18, UNI18]
verwendeter Wert	1,35	

vertikaler Achsabstand (Geschoßhöhe) in Metern		
Literaturrecherche	3,5 - 3,85	[GOL18]
Beispielprojekte	3,5	[BAU18a]
verwendeter Wert	3,5	

Die gewählte Geschoßhöhe ist mit 3,5 Metern hoch genug, um einerseits für Bürogebäude einen realistischen Wert darzustellen und andererseits bei der Anwendung auf Wohngebäude deutlich auf der sicheren Seite zu liegen

(übliche Geschoßhöhen für Wohngebäude betragen zwischen 2,60 und 3,10 Metern [LKG18]).

Die Größe von PV-Modulen variiert sehr stark. Exemplarisch sei das Maß 100 cm mal 164 cm [TOP18] angeführt, wovon im Sturz- bzw. Brüstungsbereich zwischen zwei Fensterbändern ein bis zwei Module (je nach Fenstergröße und Anordnung der Module) Platz hätten. Zur vertikalen Verschiebbarkeit der Module ist die Anbringung einer tragenden Unterkonstruktion an den PV-Modulen erforderlich, um die großen vertikalen Achsabstände entsprechend der gewählten Geschoßhöhe zu überbrücken.

Auf Grundlage des gewählten Fassadenrasters sowie in Anlehnung an die Fassadenbegrünung des Gebäudes der MA 31 in der Grabnergasse (Kapitel 5.1.4) wurde die Geometrie des Stahlgerüsts für das geplante Modell festgelegt.

6.1 Geometrie

Die Gesamtgröße des Modells wird mit einer Breite von 21,60 m und einer Höhe von genau 21 m gewählt. Dies entspricht dem 16-fachen horizontalen bzw. dem sechsfachen vertikalen Achsabstand. Die begrünte Fassadenfläche ist daher mit 453,60 m² nur ca. halb so groß wie jene beim Gebäude der MA 31 in der Grabnergasse [OKO18].

Aufgrund der Breite der Pflanzentröge beträgt die minimale Tiefe der Konstruktion 60 cm. Um allfällige Wartungsarbeiten an der Fassadenbegrünung zu erleichtern, sollte zusätzlich ein gewisser Abstand zwischen den Trögen und den PV-Modulen vorgesehen werden. Es werden daher auch Varianten mit einer größeren Konstruktionstiefe von 80 cm bzw. 100 cm untersucht.

6.2 Baustatische Modellbildung

Im statischen Sinne entsprechen die vertikalen Tragprofile statisch unbestimmt gelagerten Gerberträgern, da die gelenkigen Verbindungen stets knapp über oder knapp unter jeder zweiten Konsole angeordnet sind. Gemeinsam mit den geschoßweise erforderlichen, ebenfalls statisch unbestimmt gelagerten Durchlaufträgern (den horizontalen Tragprofilen), welche stets über vier Felder durchgehen, bilden sie ein flächenhaftes Tragsystem. Die Aussteifung in

6.3 Querschnitte

Im gesamten Modell werden lediglich neun unterschiedliche Querschnitte verwendet, um auf der Baustelle ein versehentliches Verwechseln möglichst hintanzuhalten und ein möglichst einfaches Zusammenbauen zu ermöglichen. Die Querschnitte wurden dem jeweiligen Anwendungsfall entsprechend gewählt und bedarfsgerecht dimensioniert. Je nach Projekt können jedoch aus architektonischen oder statischen Gründen auch andere Profile gewählt werden, wobei die Ausrichtung der Profile (starke / schwache Achse) zu beachten ist.

Eine Auflistung der verwendeten Querschnitte ist in Tab. 21 zu finden. Dabei sei darauf hingewiesen, dass in allen Fällen Baustahl S235 zugrundegelegt wird. Unter Umständen können weitere Profile, z.B. als zusätzliche Unterkonstruktion für die PV-Module, erforderlich sein. Die PV-Module selbst, der Gitterrost für die Wartungsarbeiten sowie ggf. benötigte Rankhilfen für die Kletterpflanzen werden im Modell nicht berücksichtigt.

Tab. 21: für das Begrünungs-Modell verwendete Querschnitte

Profil	Maße in mm	Anwendung
Rechteckrohr RRO	200x100x16	Haupttragprofil
Rechteckrohr RRO	200x100x6	Aussteifungsrahmen
Quadratrohr QRO	100x10	PV-Tragschienen
Quadratrohr QRO	400x10	Pflanztröge
Flachstahl	12/150	Befestigung Tröge
Doppel-T-Träger IPE	80	horizontale Schubkraftverbinder
Rundstahl RD	24	Verankerung in der Fassade

Nachfolgend wird auf die unterschiedlichen Möglichkeiten zur Ausbildung der Konsolen eingegangen, wobei zwischen hauptsächlich senkrecht auf die Fassade beanspruchten Konsolen (geschoßweise Lasteinleitung in die Fassade) und massiven Konsolen zur Unterfangung der vertikalen Tragprofile unterschieden wird. Auf die Ausbildung der Fundamente in Variante 1 wird in dieser Arbeit nicht eingegangen, da diese keinen Einfluss auf den ΔU -Wert der Außenwandkonstruktion haben.

6.4 Konsolen

Die Ausbildung der Konsolen zur Unterfangung der Stützen und Einleitung der gesamten vertikalen Lasten in die Fassade hat in enger Zusammenarbeit zwischen Statik, Bauphysik und Architektur zu erfolgen, um einen sowohl in technischer als auch wirtschaftlicher Hinsicht optimierten und auf das jeweilige Projekt angepassten Lösungsansatz zu erarbeiten. Nachfolgend sei eine exemplarische Auflistung von Ausführungsvarianten (schematische Darstellung siehe Abb. 102) geboten, wobei von Fall zu Fall zu untersuchen ist, ob zusätzliche Maßnahmen zur Reduktion der Wärmebrücken (wie z.B. die örtliche Anbringung einer Schaumglas-Innendämmung bzw. das Umdämmen der Stützen bis zu einer gewissen Höhe) erforderlich sind. Die Tiefe der Konsolen wurde in allen drei Fällen einheitlich mit 26 cm eingegeben:

- A) fachwerkartige, thermisch getrennte Stahl- bzw. Edelstahlkonsolen (Abb. 102-A);
- B) mit Isokörben oder Edelstahl-Ankern thermisch getrennte Stahlbeton-Konsolen (Abb. 102-B) oder
- C) allseitig gedämmte Stahlbetonkonsolen mit thermisch getrennter Auflagerung der abzufangenden Stützen (Abb. 102-C).

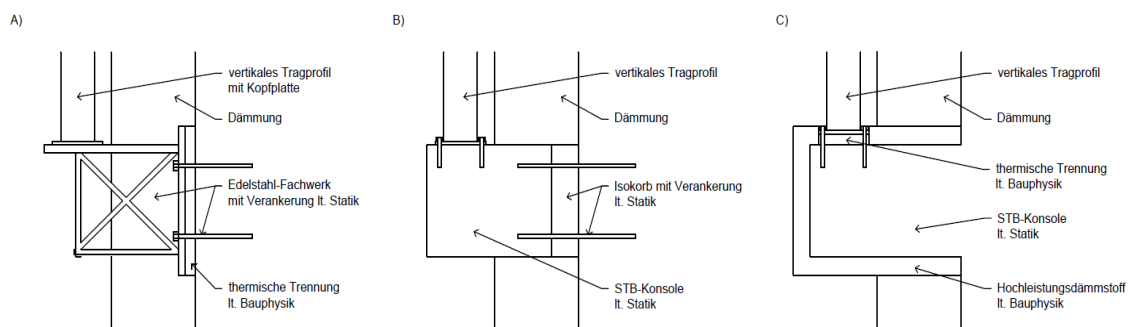


Abb. 102: Beispielhafte, schematische Darstellung möglicher Konsolen-Ausbildungen zur Unterfangung der vertikalen Tragprofile (Festpunkte).

Für alle anderen Konsolen, die lediglich als Gleitlager und somit zur ausschließlichen Einleitung von horizontalen Lasten senkrecht zur Fassade dienen, können sowohl statisch als auch bauphysikalisch weniger aufwändige Konstruktionen zur Anwendung kommen. In dieser Arbeit werden hierfür exemplarisch folgende drei Konsolen verwendet und hinsichtlich ihrer technischen Eignung untersucht; die Tiefe der Konsolen wurde einheitlich mit 22 cm gewählt:

- D) gabelartige Stahl- bzw. Edelstahlkonsolen in Anlehnung an die Ausführung bei der Fassadenbegrünung des Amtsgebäudes der MA 31 in der Grabnergasse aus Kapitel 5.1.4 (Abb. 103-D),
- E) thermisch trennendes Befestigungssystem mit L-Winkeln und Distanzstück aus glasfaserverstärktem Kunststoff [KRA18] (Abb. 103-E) und
- F) Schwerlast-Befestigungssystem mit massiver Gewindestange aus glasfaserverstärktem Kunstharz sowie Distanzstück aus Glasfaser-Verbundmaterial [ETA18] (Abb. 103-F).

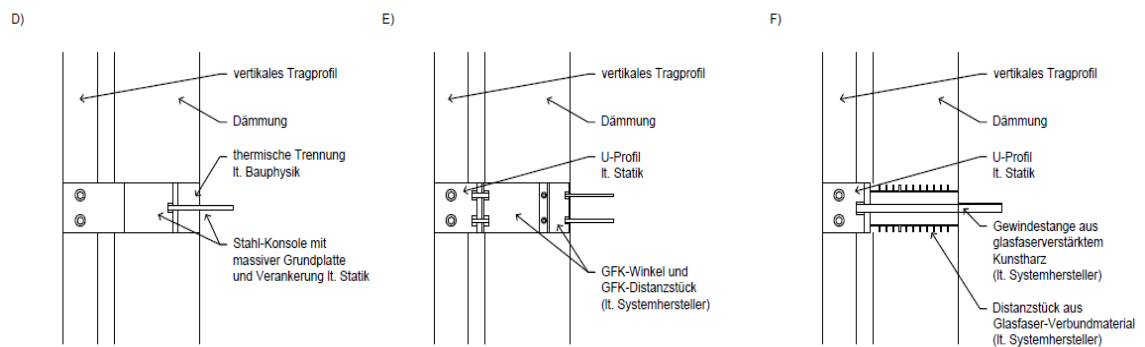


Abb. 103: Beispielhafte, schematische Darstellung möglicher Konsolen-Ausbildungen zur Einleitung der horizontalen Lasten in die Fassade (Gleitpunkte).

Für die Berechnungen der punktuellen Wärmebrücken-Verlustkoeffizienten der unterschiedlichen Konsolen-Typen wird auf das Kapitel 6.8 verwiesen. Unter gleichzeitiger Berücksichtigung der jeweils statisch maximal zulässigen Belastungen können in weiterer Folge konkrete Anwendungsempfehlungen sowie grobe Abschätzungen der insgesamt zu erwartenden Auswirkungen auf den Wärmedurchgangskoeffizienten abgeleitet werden.

6.5 Montage

Um einen möglichst hohen Vorfertigungsgrad und eine dementsprechend schnelle Montage zu erreichen, wird das Modell aus nur wenigen unterschiedlichen Elementen zusammengesetzt, die je nach Bedarf und lokalen Gegebenheiten angeordnet werden können. Dabei kommen folgende Elemente zum Einsatz:

- vertikales Tragprofil, über zwei Geschoße durchgehend, Gesamtlänge 7,0 m bzw. über EG 8,0 m

- Pendelstütze im EG (zum einfachen Austausch bei Beschädigung) bzw. im obersten Geschoß, Länge 3,0 m
- horizontales Tragprofil zur Montage der PV-Paneele, über fünf Stützen durchgehend, Gesamtlänge 5,4 m
- horizontale Lastverteilungsstäbe in Ebene der vertikalen Tragprofile, Länge 1,35 m
- biegesteife Rahmen in Ebene der vertikalen Tragprofile, Höhe 3,5 m, Breite 1,15 m
- Pflanztröge, Breite und Höhe 0,6 m, Länge 2,7 m
- Konsolen (siehe Kapitel 0)

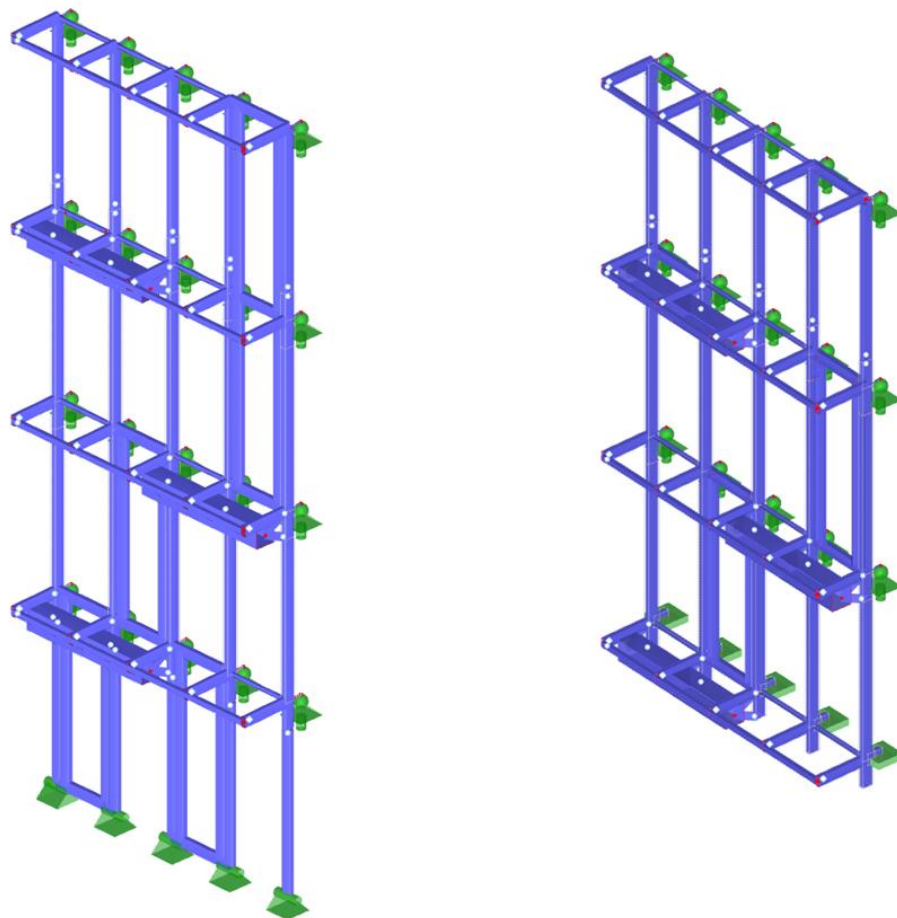


Abb. 104: Vereinfachtes Modell mit nur vier Geschoßen und fünf Stützen-Reihen; links: Variante 1, rechts: Variante 2.

Abb. 104 zeigt ein vereinfachtes Modell für die beiden untersuchten Varianten (Var. 1: bis zum Fundament durchlaufende Stützen; Var. 2: Unterfangung der Stützen über dem Erdgeschoß). Darin sind die einzelnen, oben angeführten Elemente ersichtlich. Eine Erweiterung sowohl in der Breite als auch in der Höhe ist je nach Bedarf möglich. Die Verbindungsgelenke der vertikalen Tragprofile sind, mit Ausnahme der Gelenke über den Pendelstützen im EG, stets einen halben Meter über den Konsolen angeordnet, um ein einfaches Aufstocken zu ermöglichen.

Nachfolgend wird auf die getroffenen Lastannahmen eingegangen, die den statischen Berechnungen zugrundegelegt werden.

6.6 Lastannahmen

6.6.1 Photovoltaik-Module

Für das Eigengewicht der vorgehängten PV-Module werden (inklusive Unterkonstruktion) Lasten von $0,30 \text{ kN/m}^2$ angenommen [IWR17, PHO17, PHO17a]. Diese Belastung wird auf der sicheren Seite liegend als Flächenlast auf die gesamte Fassade an vorderster Ebene (vor den Pflanzentrögen) angesetzt, da nach dem Prinzip der Doppelfassaden (vergleiche Kapitel 2.3) im Bereich der Fenster anstelle der PV-Module eine transparente Außenhaut vorgesehen werden könnte.

6.6.2 Fassadenbegrünung mit Paneelen

Die Lasten zufolge flächenhafter Fassadenbegrünungen mithilfe von Systemlösungen (siehe Kapitel 2.2.6) betragen im wassergesättigten Zustand und inklusive dem Gewicht der Pflanzen ca. $1,10 \text{ kN/m}^2$ [LIC18a]. Auf der sicheren Seite liegend wird mit $1,30 \text{ kN/m}^2$ gerechnet. Die Last der Begrünungs-Paneele wird unter Berücksichtigung des Fensterflächenanteils lediglich auf zwei Drittel der Fassadenfläche angesetzt.

6.6.3 Fassadenbegrünung mit Trögen

Bei Fassadenbegrünung mit Trögen muss unterschieden werden zwischen den Lasten zufolge der Tröge (inklusive Substrat) und der Pflanzen selber. Für die Tröge wird eine Größe von $60 \text{ cm} \times 60 \text{ cm} \times 270 \text{ cm}$ (entspricht dem

doppelten horizontalen Achsabstand der Tragprofile) angenommen, wobei die Verteilung der Tröge analog zur Fassadenbegrünung der MA 31 in der Grabnergasse (siehe Kapitel 5.1.4) vorgesehen wird.¹⁵ Bei einer maximalen Wichte des Substrats von 22 kN/m³ und einem Gewicht des Troges selbst von ca. 50 kg ergibt sich eine abschnittsweise Streckenlast zufolge der Tröge von 0,98 kN/m.

Für die Ermittlung der Lasten zufolge der Kletterpflanzen wird angenommen, dass jeder Trog mit zwei Pflanzen bestückt wird. Bei einem maximalen Gewicht einer „ausgewachsenen“ Kletterpflanze von 800 kg ergibt dies umgelegt auf die gesamte Fassade eine Flächenlast von 0,85 kN/m².

6.6.4 Nutzlast zufolge Wartung

Gemäß ÖNORM B 1991-1-1 [ONO17] wird eine Nutzlast von 1,0 kN/m² (Kategorie H, Nutzlasten auf Dachkonstruktionen) angesetzt. Da davon ausgegangen werden kann, dass die Wartungsarbeiten stets nur auf einem Geschoß erfolgen, wird diese Flächenlast als auf den obersten Revisionssteg wirkend eingegeben. Von dieser Einwirkung betroffen sind somit alle in diesem Bereich befindlichen Haupttragprofile, PV-Tragschienen und horizontalen Schubkraftverbinder.

6.6.5 Windlasten

Die Windlasten werden gemäß ÖNORM EN 1991-1-4 [ONO11] nach Gleichung (19) ermittelt:

$$w_e = q_p(z_e) \cdot c_{pe} \quad (19)$$

w_e Winddruck außen in kN/m²

q_p Böengeschwindigkeitsdruck in kN/m²

z_e Bezugshöhe für den Außendruck in m

c_{pe} Aerodynamischer Beiwert für den Außendruck

¹⁵ Schachbrettartige Anordnung der Tröge, sodass bei jeder vierten Stütze ein neuer Trog beginnt. Dabei sind die Tröge geschoßweise unterhalb der Fenster angeordnet.

Dabei errechnet sich der Böengeschwindigkeitsdruck aus dem Grundwert des Basisgeschwindigkeitsdrucks und der gewählten Bezugshöhe für die Geländekategorie III (Gebiete mit gleichmäßiger Vegetation oder Bebauung, z.B. Dörfer, vorstädtische Bebauung, Waldgebiete), welcher Bauvorhaben im städtischen Gebiet jedenfalls zugeordnet werden können, nach Gleichung (21), wobei als Mindesthöhe in dieser Geländekategorie zehn Meter anzusetzen sind:

$$q_p = q_{b,0} \cdot 1,75 \cdot \left(\frac{z_e}{10}\right)^{0,29} \quad (21)$$

$q_{b,0}$ Grundwert des Basisgeschwindigkeitsdrucks in kN/m^2

Für die Bezugshöhe wird die maximale Höhe des Modells von 21 m gewählt. Für den aerodynamischen Außendruckbeiwert wird gemäß ÖNORM B 1991-1-4 [ONO13b] für den Winddruck 0,8 und für den Windsog -1,45 gewählt¹⁶ – diese Werte liegen bis zu einem Verhältnis Gebäudehöhe zur Gebäudebreite von fünf jedenfalls auf der sicheren Seite. Für den Grundwert des Basisgeschwindigkeitsdrucks wird der Maximalwert für Wien (0,46 kN/m^2) herangezogen.

Insgesamt werden vier Lastfälle berücksichtigt: Winddruck senkrecht auf die Fassade, Windsog senkrecht auf die Fassade, jeweils auf die PV-Module wirkend, sowie Winddruck und -sog zugleich parallel zur Fassade (horizontal) auf die Stützen wirkend (von beiden Seiten kommend).

6.6.6 Schneelasten

Die charakteristischen Schneelasten werden gemäß ÖNORM B 1991-1-3 [ONO13a] für Wien mit 2,20 kN/m^2 eingegeben. Da für die Wartungswege lediglich ein Gitterrost vorgesehen ist, werden die Schneelasten ausschließlich auf die projizierten Grundrissflächen der Tröge angesetzt. Es werden keine Abminderungsfaktoren für übereinanderliegende Tröge berücksichtigt.

¹⁶ Für die Ermittlung der aerodynamischen Beiwerte für den Außendruck wurde ein Gebäude mit den Verhältnissen $h/b = 5$ und $d/b = 0,7$ angenommen. Als Beiwert für den Winddruck wird der Wert von Fläche D und für den Windsog jener von Fläche A herangezogen.

6.6.7 Lasten zufolge Imperfektionen

Die Lasten zufolge Imperfektionen werden gemäß EN 1991-1-3 [CSN05] auf die vertikalen Tragprofile angesetzt, wobei laut Besprechung mit Herrn Univ.Ass. Hochreiner von der Technischen Universität Wien [HOC18] basierend auf den Ergebnissen der kleinsten Knickfigur des Tragsystems zwei unterschiedliche Anfangsschiefstellungen angesetzt werden (Abb. 105). Beim ersten Imperfektions-Lastfall (LF1) wird eine einheitliche Anfangsschiefstellung der vertikalen Tragprofile in Y-Richtung (senkrecht zur Fassade) berücksichtigt, woraus Zugkräfte für die Verankerungen resultieren. Der zweite Imperfektions-Lastfall (LF2) entspricht einer Zick-Zack-förmigen, horizontalen Anfangsschiefstellung der vertikalen Tragprofile in X-Richtung (in Fassadenebene), wobei sich die Richtung der Schiefstellung stets in den gelenkigen Verbindungsstellen ändert.

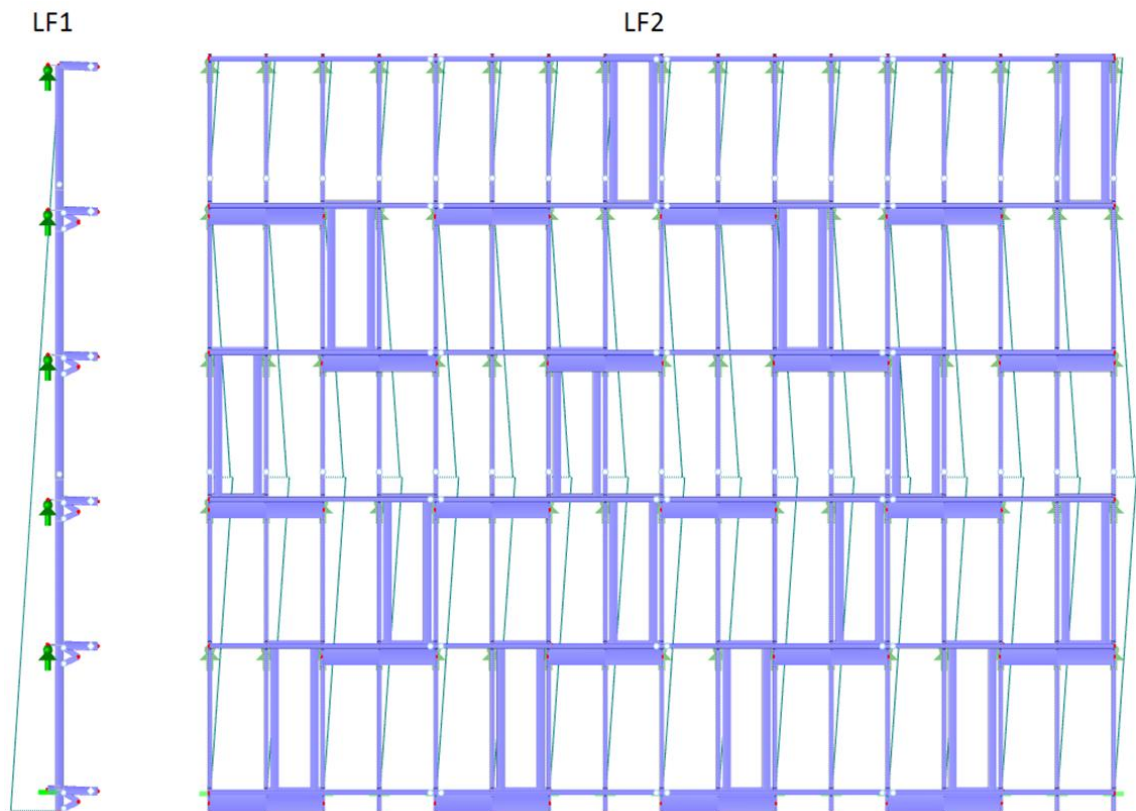


Abb. 105: Angesetzte Imperfektions-Lastfälle: LF1 (links): Einheitliche Schiefstellung der vertikalen Tragprofile in Y-Richtung; LF2 (rechts): Zick-Zack-Schiefstellung der vertikalen Tragprofile in X-Richtung

6.6.8 Temperaturlasten

Die Temperatur-Lasten werden gemäß ÖNORM EN 1991-1-5 [ONO12] wie folgt angesetzt, wobei von einer Montage-Temperatur von 10 °C ausgegangen wird:

- Temperatur-Lastfall 1:
 - $T_{\min} = + 10 \text{ °C}$
 - $T_{\max} = + 37 \text{ °C}$

- Temperatur-Lastfall 2:
 - $T_{\min} = - 24 \text{ °C}$
 - $T_{\max} = + 10 \text{ °C}$

Die angeführten Temperaturlastfälle werden auf alle Balkenstäbe angesetzt.

Nachfolgende Tabelle (Tab. 22) bietet eine Auflistung der eingegebenen Lastfälle. Ein Auszug der, vom Berechnungsprogramm generierten, maßgebenden Lastkombinationen ist im Anhang (Kapitel 8.5) angeführt.

Tab. 22: Vorhandene Lastfälle in RSTAB

Nr.	Kategorie	Lastfall
LF1	Ständig	Eigengewicht PV-Module
LF2	Ständig	Eigengewicht Kletterpflanzen
LF3	Wind	Windsog
LF4	Wind	Winddruck
LF5	Imperfektion	Imperfektion
LF6	Temperatur	Temperatur – $T_{\max} +37 \text{ °C}$, $T_{\min} +10 \text{ °C}$
LF7	Temperatur	Temperatur – $T_{\max} +10 \text{ °C}$, $T_{\min} -24 \text{ °C}$
LF8	Schnee	Schnee
LF9	Verkehrslasten	Nutzlast Wartung (Kategorie H)
LF10	Ständig	Eigengewicht Tröge
LF11	Wind	Wind seitlich (links)
LF12	Wind	Wind seitlich (rechts)

Nach dieser kurzen Vorstellung des Aufbaus und der Belastung des Modells wird im nachfolgenden Kapitel auf die Ergebnisse der Statik-Berechnungen der unterschiedlichen untersuchten Varianten eingegangen.

6.7 Ergebnisse der statischen Berechnungen mit RSTAB

Insgesamt wurden sechs Modelle erstellt und im Statik-Programm RSTAB berechnet. Dabei wird grundsätzlich, wie bereits in Kapitel 6.1 erwähnt, entsprechend der lokalen Gegebenheiten zwischen folgenden zwei Situationen unterschieden:

- Variante 1: Stützen vor der Fassade durchgehend und auf einem gesonderten Fundament aufgelagert (ausreichend Platz im Gehsteigbereich erforderlich)
- Variante 2: Stützen über dem EG unterfangen und über massive Konsolen in der Fassade rückverankert (nicht ausreichend Platz im Gehsteigbereich vorhanden)

Für beide Varianten wird die Auskragung der PV-Module und somit die Breite des Wartungssteiges zwischen 60 cm, 80 cm und 100 cm variiert, um den Einfluss der Größe der Auskragung auf die Auflagerkräfte zu untersuchen.

Die Option der vollflächigen Begrünung mit Fassadenbegrünungspaneeelen wird nicht weiterverfolgt, da sich bei genauerer Betrachtung herausstellt, dass bei einer Begrünung mit Trögen und Kletterpflanzen weitaus höhere Lasten zu erwarten sind. Ebenso nicht weiterverfolgt wird der ursprüngliche Modell-Entwurf mit zwei Stützebenen und erhöhter Anzahl an Fassaden-Konsolen, da es hierbei aufgrund der hohen Systemsteifigkeit bei Anwendung der Temperaturlastfälle zu extrem hohen inneren Zwängen und somit unbeherrschbaren Auflagerreaktionen kommen würde. Ein weiterer Grund, warum diese Modell-Variante verworfen wurde, ist die Problematik der baubehördlichen Genehmigung: Je größer der Einfluss der Konstruktion auf den öffentlichen Bereich (örtliche Reduktion der nutzbaren Gehsteigbreite aufgrund von Abstützungen im Gehsteigbereich), desto schwerer ist es, dafür eine Genehmigung zu erlangen. Eine Darstellung des ursprünglichen Systems mit zwei Stützebenen ist im Anhang (Kapitel 8.8) zu finden.

Die Berechnungsergebnisse von Variante 1 sind in Tab. 23 und jene von Variante 2 in Tab. 24 angeführt, eine Übersicht der maßgebenden Werte findet sich in Abb. 108 und Abb. 108. Dabei handelt es sich stets um Maximal- bzw. Minimalwerte, wobei zwischen den Werten für die Standard-Konsolen (Gleitlager)

und für die Unterfangungs-Konsolen bzw. die Stützen-Fundamente (Festlager) unterschieden wird.¹⁷ Die maximale horizontale Knotenpunktverschiebung wird lediglich zu Vergleichszwecken angeführt und soll zeigen, dass mit zunehmender Auskrägung die Bedeutung der Aussteifungsmaßnahmen aufgrund der erhöhten horizontalen Windbeanspruchung (mehr Angriffsfläche für den Wind) zunimmt. In der Realität wird die maximale Verschiebung aufgrund der zusätzlichen aussteifenden Wirkung der PV-Module jedenfalls deutlich geringer ausfallen. Beispielhaft wird untenstehend die Darstellung der globalen Verformungen bei Variante 2 mit 100 cm Auskrägung angeführt (Abb. 106).

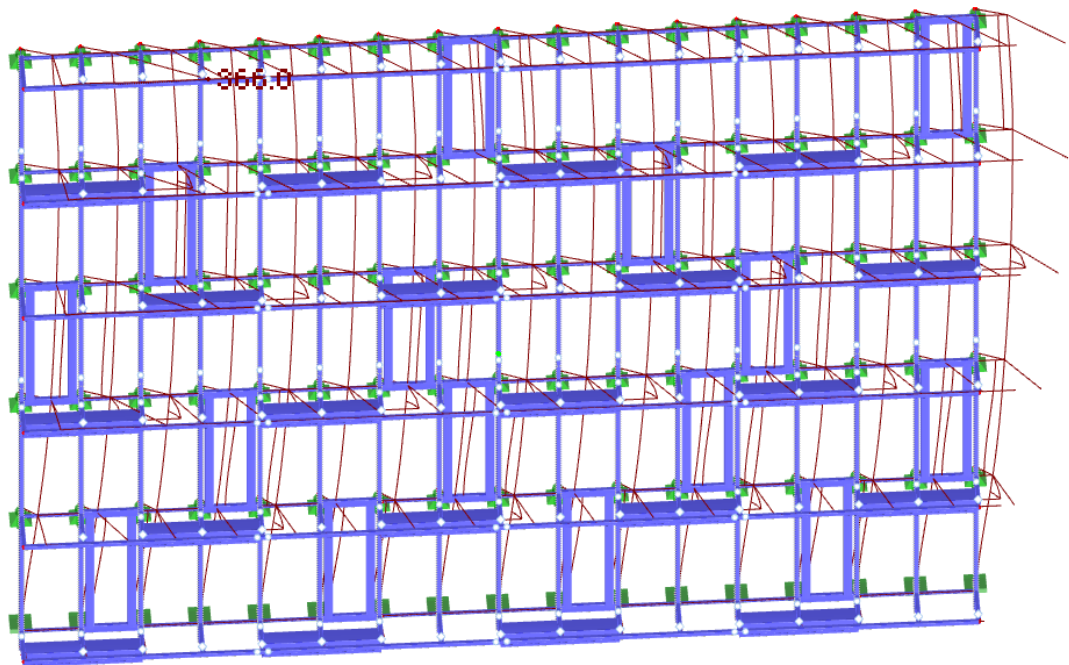


Abb. 106: Darstellung der globalen Verformungen bei Variante 2 mit 100 cm Auskrägung

Insgesamt treten bei den Standard-Konsolen Lasten in X-Richtung (horizontal, in Fassadenebene) von bis zu 60 kN, in Y-Richtung (orthogonal zur Fassade) von bis zu 38 kN (Sog) bzw. 63 kN (Druck)¹⁸ und in Z-Richtung (vertikal) von bis zu 6 kN auf (Tab. 23). Die Maximalwerte beziehen sich dabei in der Regel auf die Konsolen in den Randbereichen. In Feldmitte ist mit weit-aus geringeren Lasten zu rechnen. Es macht daher Sinn, in den Randbereichen

¹⁷ Die Werte gelten für den Grenzzustand der Tragfähigkeit.

¹⁸ Die angeführten Werte (Druck und Sog) gelten unter Zugrundelegung einer weitestgehende druckdichten Fassade ohne Fugen.

Tab. 23: Ergebnisse der RSTAB-Berechnungen bei Variante 1 – Stützen durchgehend

Wartungssteg	Position	Variante 1: Stützen durchgehend						
		Px+ [kN]	Px- [kN]	Py+ [kN]	Py- [kN]	Pz+ [kN]	Pz- [kN]	u [mm]
60 cm	Konsolen	45,87	6,19	28,53	47,51	3,36	5,67	219,0
	Fundament	81,77	1,63	0,87	6,92	204,82	112,15	
80 cm	Konsolen	51,49	10,35	31,43	55,81	3,39	6,06	327,6
	Fundament	85,28	10,35	0,86	6,95	215,33	120,06	
100 cm	Konsolen	60,14	30,33	38,49	63,40	3,43	6,47	571,0
	Fundament	90,35	30,33	0,84	6,97	229,75	131,96	

Tab. 24: Ergebnisse der RSTAB-Berechnungen bei Variante 2 – Stützen unterfangen

Wartungssteg	Position	Variante 2: Stützen unterfangen						
		Px+ [kN]	Px- [kN]	Py+ [kN]	Py- [kN]	Pz+ [kN]	Pz- [kN]	u [mm]
60 cm	Konsolen	39,37	5,57	27,20	44,71	3,26	5,43	172,2
	Unterfangung	99,61	30,30	11,22	29,83	225,30	39,32	
80 cm	Konsolen	43,46	5,70	29,80	52,36	3,29	5,80	238,0
	Unterfangung	101,38	35,34	12,96	32,52	234,17	43,87	
100 cm	Konsolen	48,82	13,24	35,99	58,76	3,31	6,18	366,0
	Unterfangung	106,30	34,23	14,88	35,28	246,10	49,53	

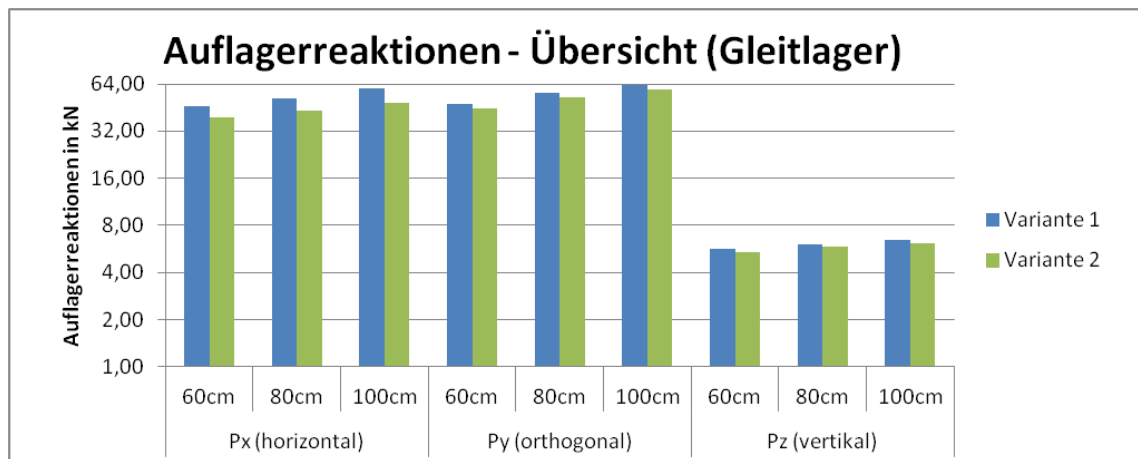


Abb. 107: Übersicht zu den Auflagerreaktionen der Gleitlager (Standard-Konsolen)

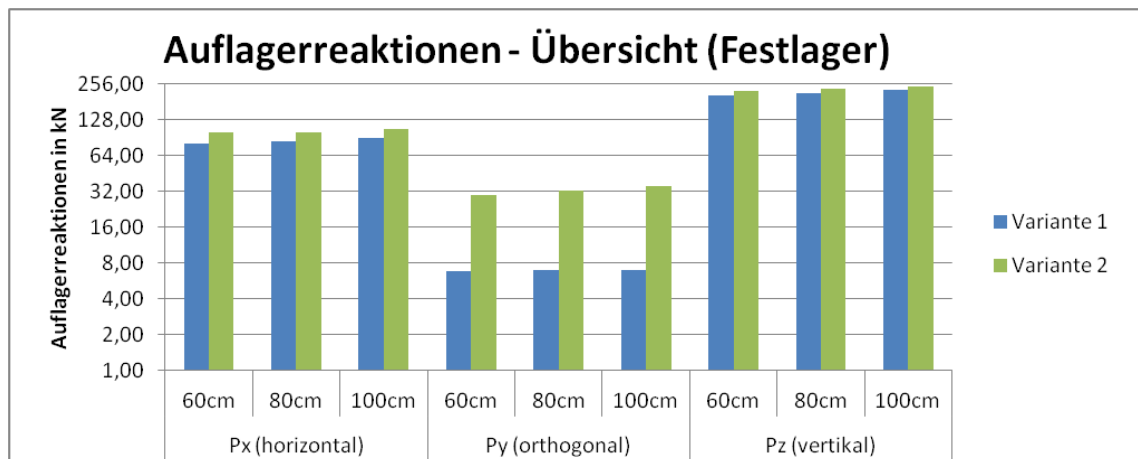


Abb. 108: Übersicht zu den Auflagerreaktionen der Festlager (Fundamente bzw. Unterfangungen)

und besonders in den Ecken Sonderlösungen zur sicheren Ableitung der maximalen Auflagerkräfte in den Verankerungsgrund vorzusehen. Im Gegenzug können in den Mittelfeldern statisch weniger aufwändige Konstruktionen mit geringerer Wärmebrückenwirkung ausgeführt werden.

Detaillierte Darstellungen der maximalen und minimalen Lagerreaktionen in X-, Y- und Z-Richtung für alle sechs untersuchten Varianten sind im Anhang (Kapitel 8.9) zu finden.

Bei einem Vergleich der beiden Varianten lässt sich erkennen, dass im Falle der durchgehenden Stützen (Variante 1) die Extremwerte der Standard-Konsolen (Gleitlager) bei allen Kraftanteilen mitunter deutlich höher liegen als bei Unterfangung der Stützen (Variante 2, siehe Abb. 107). Ein ähnliches Bild zeigt sich auch bei der maximalen horizontalen Gesamtverschiebung. Umgekehrt verhält sich die Beanspruchung der Fußpunkte (Fundamente bzw. Unterfangungen, siehe Abb. 108): hier weist Variante 2 (insbesondere orthogonal zur Fassade) stets höhere Auflagerreaktionen auf als Variante 1. Dies lässt sich damit erklären, dass es sich bei den Konsolen zur Unterfangung der Stützen und Einleitung der gesamten vertikalen Lasten in die Fassade (Variante 2) im Gegensatz zu den gelenkig gelagerten Pendelstützen im Bereich der Fundamente (Variante 1) um sehr steife Konstruktionen handelt, die im Modell als vollkommene Einspannungen angenommen werden. Da steife Konstruktionen Lasten anziehen, ist es verständlich, dass in dieser Variante für die deutlich weicheren Standard-Konsolen nur mehr ein geringerer Anteil an der Gesamtbelastung übrig bleibt.

In Bezug auf die Veränderung der Lagerreaktionen bei Vergrößerung der Auskragung ist in Tab. 25 ersichtlich, dass insbesondere die Minimalwerte in X-Richtung (horizontal, in Fassadenebene) stark zunehmen (rot hinterlegte Felder). Auch die Maximalwerte in Y-Richtung (orthogonal zur Fassade) zeigen in den meisten Fällen eine deutliche Zunahme (gelb hinterlegte Felder). Die betragsmäßig geringsten Veränderungen werden bei den Extremwerten in Z-Richtung verzeichnet. Eine Verringerung der Lagerreaktionen (grün hinterlegte Felder) tritt lediglich in zwei Fällen auf.

Tab. 25: Veränderung der Auflagerkräfte bei Erhöhung der Auskragung auf 80 cm bzw. 100 cm; rot: Veränderung $\geq 50\%$; gelb: Veränderung $\geq 20\%$; grün: Veränderung $\leq 0\%$

Veränderung in %			Konsolen		Fundament/Unterfangung	
			Var.1	Var.2	Var.1	Var.2
Px	max	60 → 80 cm	+12%	+10%	+4%	+2%
		60 → 100 cm	+31%	+24%	+10%	+7%
	min	60 → 80 cm	+67%	+2%	+535%	+17%
		60 → 100 cm	+390%	+138%	+1761%	+13%
Py	max	60 → 80 cm	+10%	+10%	-1%	+16%
		60 → 100 cm	+35%	+32%	-3%	+33%
	min	60 → 80 cm	+17%	+17%	+0%	+9%
		60 → 100 cm	+33%	+31%	+1%	+18%
Pz	max	60 → 80 cm	+1%	+1%	+5%	+4%
		60 → 100 cm	+2%	+2%	+12%	+9%
	min	60 → 80 cm	+7%	+7%	+7%	+12%
		60 → 100 cm	+14%	+14%	+18%	+26%

Es folgen nun die Berechnungen der Wärmebrücken zufolge der in Kapitel 6.4 angeführten beispielhaften Konsolen, um im nächsten Schritt deren Eignung für die Anwendung im vorliegenden Begrünungsmodell beurteilen und Aussagen über die resultierende Verschlechterung des Wärmedurchgangskoeffizienten der als Verankerungsgrund dienenden Außenwand treffen zu können.

6.8 Ergebnisse der Wärmebrückenberechnungen der Konsolen

Den Wärmebrückenberechnungen wird eine Referenzwand mit 20 cm Stahlbeton sowie einem WDVS aus 24 cm Mineralwolle-Putzträgerplatten und 0,8 cm Deckschicht zugrundegelegt (Abb. 109). Der U-Wert der Außenwandkonstruktion beträgt somit ohne Fassadenbegrünung $U_0 = 0,144 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$.

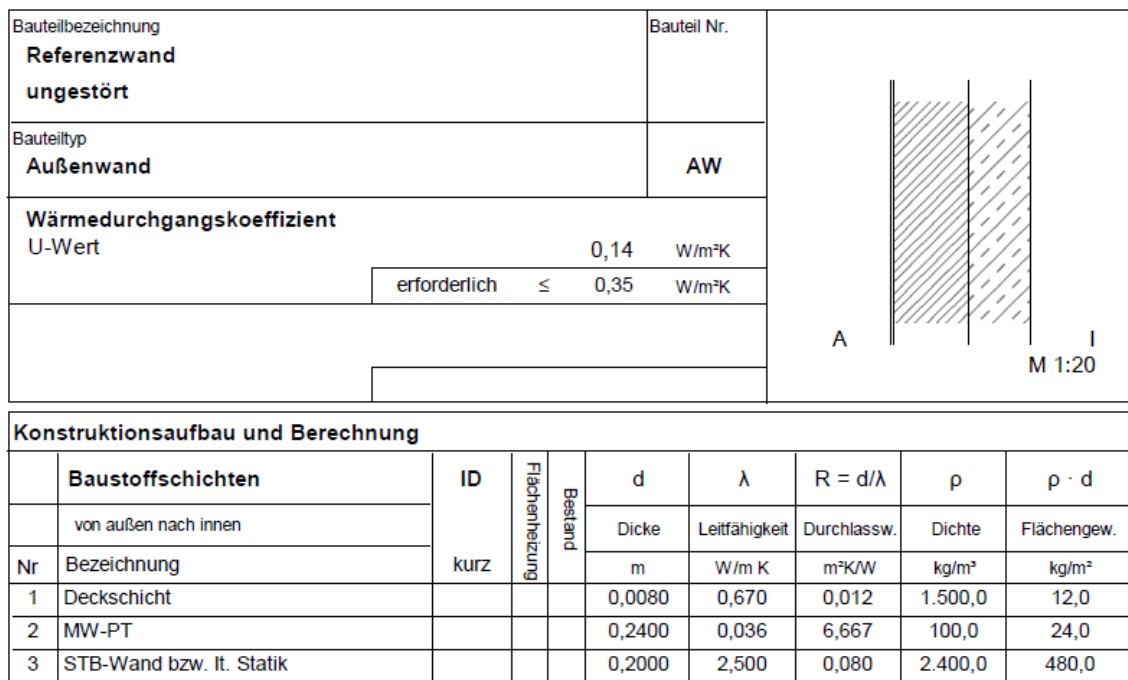


Abb. 109: Konstruktionsaufbau und U-Wert der Referenzwand ohne Fassadenbegrünung

Im Gegensatz zu einer gewöhnlichen hinterlüfteten Fassade müssen im untersuchten Modell aufgrund des hohen Gewichtes der Pflanzentröge und Kletterpflanzen sowie aufgrund der weiten Vorhängung der PV-Module wesentlich höhere Lasten in den Verankerungsgrund eingeleitet werden. Um dennoch die Wärmebrückenverluste gering zu halten, sollten bei der Auswahl und Anordnung der Konsolen die nachfolgenden bauphysikalischen Prinzipien zur Vermeidung von Wärmebrücken berücksichtigt werden (siehe auch Kapitel 4.5):

Prinzip 1: Verringerung der Anzahl der Konsolen auf ein Minimum

Prinzip 2: Verringerung der Querschnittsfläche der Konsolen auf ein Minimum

Prinzip 3: Verwendung von Konsolen aus Materialien möglichst niedriger Wärmeleitfähigkeit bei gleichzeitig ausreichender Tragwirkung

Prinzip 4: Vorsehen druckfester thermischer Trennelemente zwischen massiven Konsolen-Grundplatten und Verankerungsgrund, deren Dicke unter Berücksichtigung sowohl bauphysikalischer als auch statischer Belange zu dimensionieren ist

Prinzip 5: Vermeidung von inneren Zwängen innerhalb der Fassadenkonstruktion, die zu einer zusätzlichen Belastung der Konsolen führen würden

Prinzip 6: Ableitung von vertikalen Kräften direkt ins Fundament, damit die Konsolen lediglich durch horizontale Kräfte beansprucht werden

In Kapitel 6.4 wurden bereits sechs Konsolen-Typen vorgestellt, die den oben genannten Prinzipien weitestgehend Genüge tun. Diese wurden einer detaillierten dreidimensionalen Wärmebrückenberechnung in AnTherm® unterzogen, um deren thermischen Eigenschaften miteinander zu vergleichen. Bei Betrachtung der χ -Werte der Konsolen fällt auf, dass die Typen A bis C deutlich schlechtere Ergebnisse liefern als die Typen D bis F (Tab. 26). Dies ist auch durchaus plausibel, da erstere zur direkten Einleitung der gesamten vertikalen Lasten in den Verankerungsgrund dienen und somit wesentlich massiver ausgeführt werden müssen.

Tab. 26: berechnete χ -Werte der Konsolen-Typen A bis F

Konsole	Beschreibung	Material	λ -Wert W/(m.K)	χ -Wert W/K
Typ A1	thermisch getrennte Fachwerk-artige	Stahl	60	0,322
Typ A2	Konsole	Edelstahl	15	0,159
Typ B	thermisch getrennte Auskragung	Stahlbeton	2,30	0,200
Typ C	allseitig gedämmte Auskragung	Stahlbeton	2,30	0,210
Typ D1	thermisch getrennte gabelartige	Stahl	60	0,120
Typ D2	Konsole mit massiver Grundplatte	Edelstahl	15	0,051
Typ E	Doppel-L-Winkel mit Distanzstück	GFK	0,44	0,028
Typ F	Gewindestange mit Distanzstück	GFK	0,30	0,013

Bei einem Vergleich mit den χ -Werten der Konsolen MacFox (Aluminium) und MFT-Fox (Edelstahl) für gewöhnliche hinterlüftete Fassaden aus Kapitel 4.1

zeigt sich, dass die Konsolen-Typen A bis C mitunter sogar einen höheren χ -Wert aufweisen, als MacFox-Konsolen der Bauart „Large“ ohne thermische Trennung. Die Konsolen-Typen D bis F hingegen sind mit gut thermisch getrennten MacFox- bzw. sogar MFT-Fox-Konsolen in thermischer Hinsicht gleichwertig (Abb. 110).

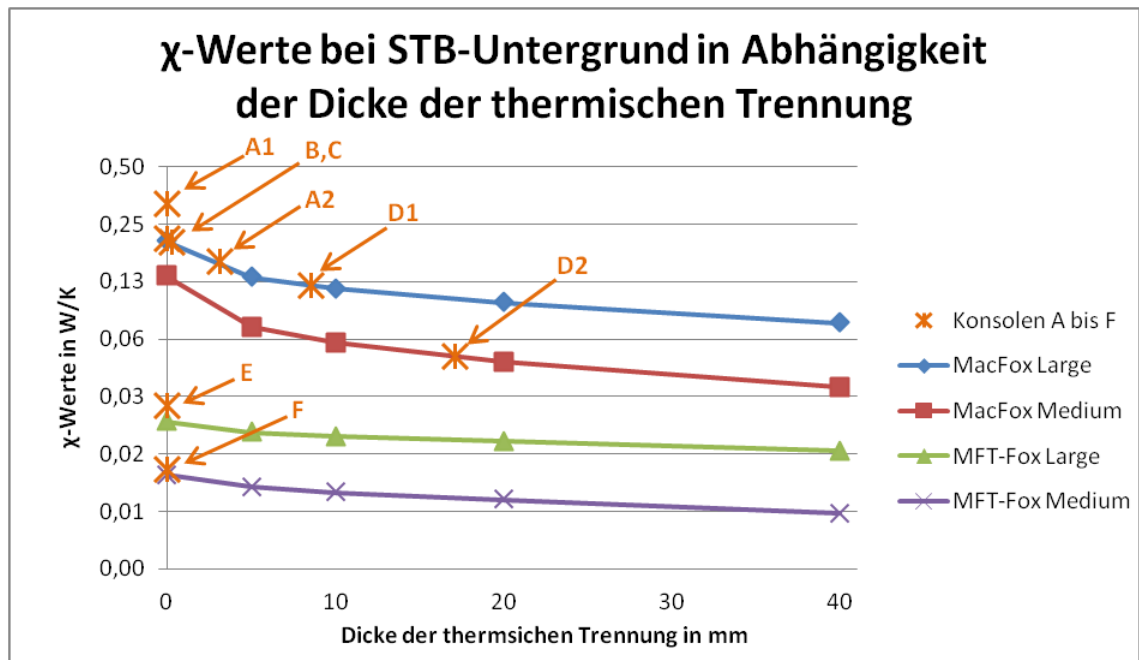


Abb. 110: Vergleich der χ -Werte der Konsolen A bis F mit jenen der Konsolen MacFox (Aluminium) und MFT-Fox (Edelstahl) in Abhängigkeit der Dicke der thermischen Trennung (mit $\lambda = 0,08 \text{ W/(m.K)}$)

Aus den berechneten χ -Werten ergibt sich unter Berücksichtigung des Anteils der Konsolen je Quadratmeter Wandfläche die gesuchte Verschlechterung des Wärmedurchgangskoeffizienten ΔU . Da sich dieser Wert lediglich auf die opake Außenwandfläche bezieht, ist er direkt vom Anteil der Fensterflächen abhängig: Je größer der Fensterflächenanteil, desto kleiner ist der verbleibende opake Außenwandanteil, dem der Wärmebrücken-Verlustkoeffizient zugerechnet wird.

Bei der Variante 1 des zugrundeliegenden Modells wird nur eine Art von Konsolen (Typen D bis F gemäß Tab. 26) benötigt, da lediglich horizontale Lasten in den Verankerungsgrund übertragen werden müssen. Die gesamten vertikalen Lasten werden direkt in das Fundament abgeleitet. Bezogen auf den U-Wert der Referenzwand $U_0 = 0,144 \text{ W/(m}^2\text{.K)}$ ist hier in Abhängigkeit des Fensterflächenanteils und des verwendeten Konsolen-Typs mit einer Ver-

schlechterung des Wärmedurchgangskoeffizienten von $\Delta U = 0,003 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ bis $\Delta U = 0,108 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ zu rechnen (Abb. 111). Diese enorme Spanne verdeutlicht die Bedeutung der Wahl eines thermisch hochwertiger Befestigungssystems.

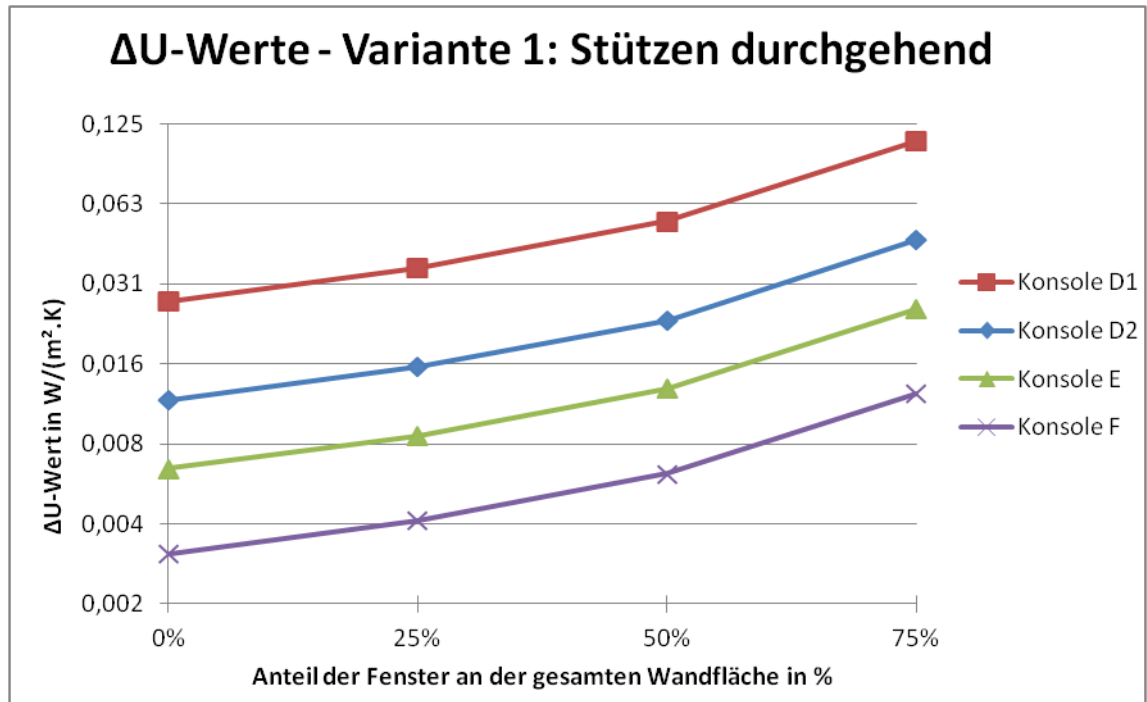


Abb. 111: ΔU -Werte – Variante 1: Stützen durchgehend, Konsolen D bis F (Standard-Konsolen / Gleitpunkte) in Abhängigkeit des Anteils der Fenster an der gesamten Wandfläche

Bei der Variante 2 des Modells kommen über dem Erdgeschoß für die Unterfangung der Stützen andere Konsolen (Typen A bis C gemäß Tab. 26) zum Einsatz als in den restlichen Geschoßen (Typen D bis F gemäß Tab. 26). Da sich hierbei unzählige Kombinationsmöglichkeiten ergeben, muss für die weiteren Betrachtungen eine sinnvolle Auswahl getroffen werden (Abb. 112). Dieser Auswahl liegen folgende Entscheidungen zugrunde:

- Die Konsole E (Doppel-L-Winkel und Distanzstück aus GKF) wird nicht weiter verfolgt, da sie der Konsole F (Gewindestange und Distanzstück aus GKF) sowohl in statischer als auch in bauphysikalischer Hinsicht unterlegen ist.
- Die Konsolen A2 und D2 (Edelstahl) werden gegenüber den Konsolen A1 und D1 (Stahl) bevorzugt. Es soll jedoch auch der Unterschied zwischen den jeweiligen Kombinationen dargestellt werden.

- Die Konsolen B (thermisch getrennte Auskrägung) und C (allseits gedämmte Auskrägung) sind in thermischer Hinsicht nahezu gleichwertig. Im Vergleich zur Konsole A2 (Edelstahl-Fachwerk) liefern sie jedoch schlechtere Werte. Sie werden daher jeweils nur einmal für die ΔU -Wert-Auswertung herangezogen.

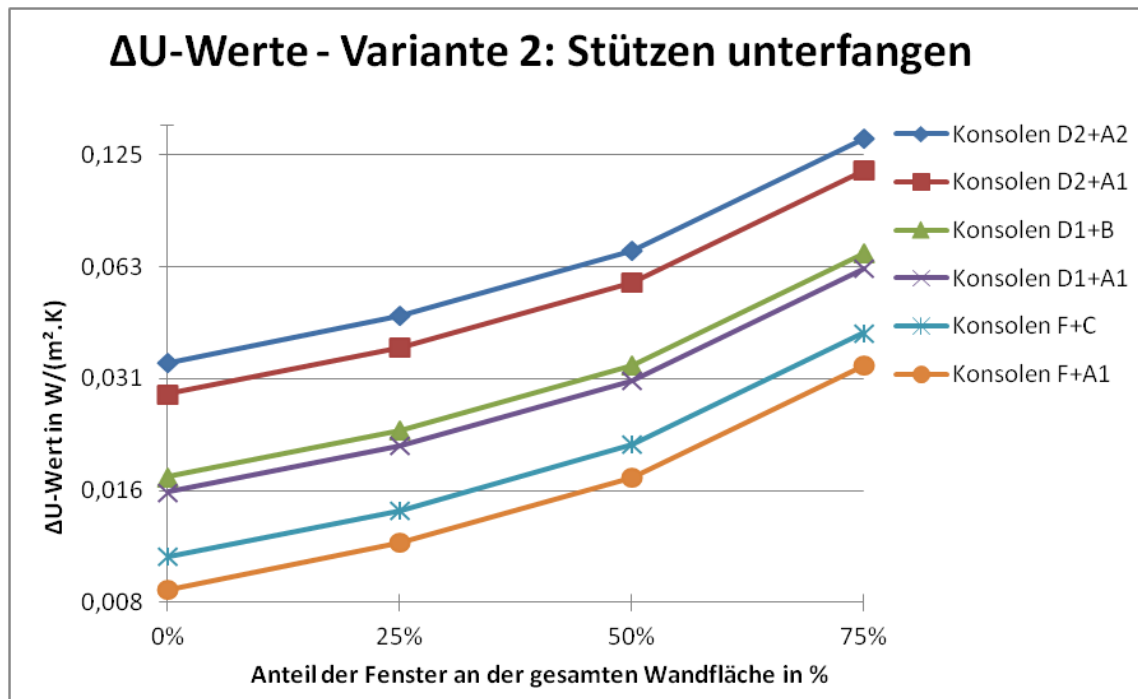


Abb. 112: ΔU -Werte – Variante 2: Stützen unterfangen, Konsolen D bis F (Standard-Konsolen / Gleitpunkte) in Kombination mit Konsolen A bis C (Konsolen zur Unterfangung / Festpunkte) in Abhängigkeit des Anteils der Fenster an der gesamten Wandfläche

Die resultierende Verschlechterung des Wärmedurchgangskoeffizienten liegt bei Variante 2 in Abhängigkeit des Fensterflächenanteils und der verwendeten Konsolentypen zwischen $\Delta U = 0,008 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$ und $\Delta U = 0,138 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$. Im Vergleich zu Variante 1 bedeutet dies eine Vergrößerung der Wärmebrückenwirkung von 28 % bis 181 %. Außerdem fällt auf, dass der ΔU -Wert bei Variante 2 primär von der Wahl der Standard-Konsolen für die Obergeschoße (Konsolen D bis F) abhängt, da diese im zugrundeliegenden Modell zahlenmäßig den größten Anteil ausmachen. Der Einfluss der Konsolen für die Unterfangung der Stützen (Konsolen A bis C) ist vergleichsweise gering.

Es folgt nun eine Zusammenfassung und Analyse der Ergebnisse sowohl der statischen als auch der bauphysikalischen Berechnungen der beiden untersuchten Modellvarianten.

6.9 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Die durchgeführten Berechnungen haben gezeigt, dass bei gleichzeitiger Anbringung von Fassadenbegrünung und vorgehängter Photovoltaik mit sehr hohen Lagerreaktionen gerechnet werden muss. Insbesondere in den Rand- und Eckbereichen können statische Sonderlösungen erforderlich werden, um auch Lastspitzen sicher in den Verankerungsgrund ableiten zu können.

Der Unterschied zwischen durchgehenden Stützen, die vertikale Lasten direkt in das Fundament einleiten (Variante 1), und Unterfangung der Stützen durch massive Konsolen über dem Erdgeschoß (Variante 2) hat sich in statischer Hinsicht als kaum signifikant herausgestellt. In Hinblick auf die Belastung der Standard-Konsolen in den Obergeschoßen hat sich die Unterfangung der Stützen sogar als vorteilhaft erwiesen, da die hier erforderliche Einspannung zur Einleitung der vertikalen Lasten in den Verankerungsgrund eine Reduktion der Belastung der darüber befindlichen Konsolen bewirkt.

In Hinblick auf den resultierenden ΔU -Wert zufolge der Fassaden-Konsolen ist die Variante 1 mit den durchgehenden Stützen zu bevorzugen, da die in Variante 2 erforderlichen massiven Konsolen über EG einen bedeutenden zusätzlichen Wärmeverlust bewirken und somit den ΔU -Wert der gesamten Konstruktion in die Höhe treiben. Den größten Einfluss auf den ΔU -Wert haben jedoch jedenfalls die Standard-Konsolen, da deren Anzahl im zugrundeliegenden Modell bei Weitem überwiegt.

In Abhängigkeit des Anteils der Fensterflächen an der gesamten Fassadenfläche sowie in Abhängigkeit der verwendeten Konsolentypen werden Verschlechterungen des Wärmedurchgangskoeffizienten von $\Delta U = 0,003 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ bis $\Delta U = 0,138 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ erreicht. Diese große Spanne ist einerseits auf die stark unterschiedliche Wärmebrückenwirkung der untersuchten Konsolen und andererseits auf den großen Einfluss des Fensterflächenanteils zurückzuführen. Um einen ΔU -Wert zu erreichen, der einer thermisch gut getrennten hinterlüfteten Fassade mit Edelstahl-Unterkonstruktion gleichkommt, ist die Verwendung von Edelstahl- bzw. glasfaserarmierten Kunststoffkonsolen erforderlich. Von Stahl- oder Aluminium-Konsolen wird jedenfalls im Sinne der Wärmebrückenvermeidung dringend abgeraten.

7 Zusammenfassung

Eine systematische Analyse des Einflusses der Dicke sowie der Druckfestigkeit von thermischen Trennelementen auf die Verschlechterung des Wärmedurchgangskoeffizienten zufolge der Unterkonstruktion von hinterlüfteten Fassaden hat gezeigt, dass je nach Verankerungsgrund (Stahlbeton, Vollziegel oder Vollholz) und Material der Unterkonstruktion (Aluminium oder Edelstahl) eine Dicke der thermischen Trennung von 5 mm bzw. 10 mm nicht überschritten werden sollte. Bei dickeren thermischen Trennungen nimmt die Tragfähigkeit der einzelnen Konsolen überproportional stark ab, sodass es in Summe aufgrund der höheren erforderlichen Anzahl an Konsolen sogar zu einer Verschlechterung des ΔU -Wertes kommt (siehe Kapitel 4).

Dass selbst bei Fassadenbegrünungen trotz der hohen, in den Verankerungsgrund abzuleitenden Eigenlasten ΔU -Werte erreichbar sind, die jenen von gewöhnlichen hinterlüfteten Fassaden mit Edelstahl-Unterkonstruktion gleichkommen, haben Wärmestrommessungen im Bereich von neu errichteten, kleinflächigen Fassadenbegrünungen an zwei Wiener Schulen gezeigt. Hier wurden Veränderungen des Wärmedurchgangskoeffizienten von $\Delta U = -0,020 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ bzw. $\Delta U = 0,061 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ gemessen (siehe Kapitel 5). Bei einem anderen Wohnbau-Projekt wurde im Rahmen einer Sanierung eine großflächige Fassadenbegrünung errichtet. Aufgrund der Verwendung einer Aluminium-Unterkonstruktion mit einer hohen Anzahl an Konsolen je Quadratmeter resultiert hier mit $\Delta U = 0,241 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ein überaus hoher Wärmebrückenverlust. Bei der Fassadenbegrünung des Amtsgebäudes der MA 31 in der Grabnergasse wurden große Pflanztröge mithilfe eines selbsttragenden Stahlgerüsts vor die Fassade gestellt. Thermisch sehr gut getrennte Stahlkonsolen dienen lediglich der horizontalen Lagesicherung und verursachen einen entsprechend geringen Wärmeverlust von $\Delta U = 0,042 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

In Anlehnung an diese letztgenannte Lösung wurde in Kapitel 6 ein numerisches Modell zur Kombination von Fassadenbegrünung und vorgehängter Photovoltaik entwickelt, das die gleichzeitige Nutzung der ökologischen Vorteile beider Systeme an ein und derselben Fassade ermöglichen soll. In statischer Hinsicht wurden dabei sechs verschiedene Modell-Varianten untersucht: Einerseits wurde der Abstand der PV-Module zur Fassade zwischen 60 cm und

100 cm variiert; andererseits wurde einmal mit bis zum Gehsteig durchgehenden Stützen und einmal mit massiven Konsolen zur Unterfangung der Stützen über dem EG gerechnet. Für die Beurteilung der resultierenden ΔU -Werte wurden jeweils drei unterschiedliche Konsolen-Typen für die Standard-Konsolen (Gleitpunkte) sowie für die massiven Unterfangungs-Konsolen (Festpunkte) untersucht. Bei Verwendung von Edelstahl- oder glasfaserarmierten Kunststoffkonsolen können in Abhängigkeit des Fensterflächenanteils Wärmebrückenverluste von $\Delta U = 0,03 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ oder sogar geringer erreicht werden.

Abschließend lässt sich festhalten, dass das Material der Unterkonstruktion sowie insbesondere der Fassadenkonsolen den ΔU -Wert am stärksten beeinflusst. Bei hohen Lasten der Fassadenbekleidung (z.B. Fassadenbegrünung) ist es jedenfalls ratsam, die vertikalen Lasten über Stützen direkt in den Untergrund abzuleiten, um die Konsolen nur durch horizontal wirkende Kräfte zu belasten. In diesem Fall kann die Dicke der thermischen Trennung wesentlich erhöht werden, ohne einen Einbruch in der Tragfähigkeit zu bewirken.

Die aktuelle Entwicklung geht immer mehr in Richtung „wärmebrückenfreier“ Unterkonstruktionen für hinterlüftete Fassaden. Auch Fassadenbegrünungen und gebäudeintegrierte Photovoltaik werden bei öffentlichen wie auch privaten Bauherren immer beliebter. Den Spagat zwischen zunehmendem Gewicht der Fassadenbekleidungen einerseits und immer strenger werdenden Anforderungen an die Wärmebrückenwirkung andererseits zu meistern, wird für den Fassadenplaner eine der wichtigsten Aufgaben in näherer Zukunft darstellen.

8 **Anhang**

8.1 **Beispiel eines AnTherm®-Berechnungsprotokolls**

Detailangaben zu der Bauteilkonstruktionseingabe

LNr.	Nr.	C	X1	Y1	Z1	X2	Y2	Z2	DX	DY	DZ	T	Details
1													1000 Tragprofil
1	1		-1000	160	0	1062	1160	1000	2062	1000	1000	R	außen / Raumzelle
1	2		-1000	-1200	0	1062	-200	1000	2062	1000	1000	R	innen / Raumzelle
1	3		-1000	0	0	1062	160	1000	2062	160	1000	B	Daemmung_EPS_040
1	4		-1000	-200	0	1062	0	1000	2062	200	1000	B	Stahlbeton
1	5		5	160	0	7	205	1000	2	45	1000	B	Aluminium
1	6		7	203	0	50	205	1000	43	2	1000	B	Aluminium
2													36 Abstandhalter
2	1		-1000	160	1000	1062	1160	1036	2062	1000	36	R	außen / Raumzelle
2	2		-1000	-1200	1000	1062	-200	1036	2062	1000	36	R	innen / Raumzelle
2	3		-1000	0	1000	1062	160	1036	2062	160	36	B	Daemmung_EPS_040
2	4		-1000	-200	1000	1062	0	1036	2062	200	36	B	Stahlbeton
2	5		-3	0	1000	65	5	1036	68	5	36	B	therm_Trennung 080
2	6		0	5	1000	62	10	1036	62	5	36	B	Aluminium
2	7		0	10	1000	5	185	1036	5	175	36	B	Aluminium
2	8		5	160	1000	7	205	1036	2	45	36	B	Aluminium
2	9		7	203	1000	50	205	1036	43	2	36	B	Aluminium
3													1 Dübel
3	1		-1000	160	1036	1062	1160	1037	2062	1000	1	R	außen / Raumzelle
3	2		-1000	-1200	1036	1062	-200	1037	2062	1000	1	R	innen / Raumzelle
3	3		-1000	0	1036	1062	160	1037	2062	160	1	B	Daemmung_EPS_040
3	4		-1000	-200	1036	1062	0	1037	2062	200	1	B	Stahlbeton
3	5		-3	0	1036	65	5	1037	68	5	1	B	therm_Trennung 080
3	6		0	5	1036	62	10	1037	62	5	1	B	Aluminium
3	7		0	10	1036	5	185	1037	5	175	1	B	Aluminium
3	8		37	10	1036	45	15	1037	9	5	1	B	Stahl
3	9		37	-51	1036	45	0	1037	9	51	1	B	Hartkunststoff
3	10		5	160	1036	7	205	1037	2	45	1	B	Aluminium
3	11		7	203	1036	50	205	1037	43	2	1	B	Aluminium
4													6 Schraube
4	1		-1000	160	1037	1062	1160	1043	2062	1000	6	R	außen / EN ISO 6946:1996 Außenwand mit Hing
4	2		-1000	-1200	1037	1062	-200	1043	2062	1000	6	R	innen / EN ISO 6946:1996 Außenwand mit Hint
4	3		-1000	0	1037	1062	160	1043	2062	160	6	B	Daemmung_EPS_040
4	4		-1000	-200	1037	1062	0	1043	2062	200	6	B	Stahlbeton
4	5		-3	0	1037	65	5	1043	68	5	6	B	therm_Trennung 080
4	6		0	5	1037	62	10	1043	62	5	6	B	Aluminium
4	7		0	10	1037	5	185	1043	5	175	6	B	Aluminium
4	8		5	160	1037	7	205	1043	2	45	6	B	Aluminium
4	9		7	203	1037	50	205	1043	43	2	6	B	Aluminium
4	10		37	10	1037	45	15	1043	9	5	6	B	Stahl
4	11		38	-50	1037	44	10	1043	6	60	6	B	Stahl
4	12		44	-50	1037	45	0	1043	1	50	6	B	Hartkunststoff
4	13		37	-50	1037	38	0	1043	1	50	6	B	Hartkunststoff
4	14		37	-51	1037	45	-50	1043	9	1	6	B	Hartkunststoff
5													1 Dübel
5	1		-1000	160	1043	1062	1160	1044	2062	1000	1	R	außen / Raumzelle
5	2		-1000	-1200	1043	1062	-200	1044	2062	1000	1	R	innen / Raumzelle
5	3		-1000	0	1043	1062	160	1044	2062	160	1	B	Daemmung_EPS_040
5	4		-1000	-200	1043	1062	0	1044	2062	200	1	B	Stahlbeton
5	5		-3	0	1043	65	5	1044	68	5	1	B	therm_Trennung 080
5	6		0	5	1043	62	10	1044	62	5	1	B	Aluminium
5	7		0	10	1043	5	185	1044	5	175	1	B	Aluminium
5	8		37	10	1043	45	15	1044	9	5	1	B	Stahl
5	9		37	-51	1043	45	0	1044	9	51	1	B	Hartkunststoff
5	10		5	160	1043	7	205	1044	2	45	1	B	Aluminium

Abb. 113: Beispiel eines AnTherm®-Berechnungsprotokolls, Seite 1

5	-41	7	203	1043	50	205	1044	43	2	1	B	Aluminium
6										36	R	Abstandhalter
6	1	-1000	160	1044	1062	1160	1080	2062	1000	36	R	außen / Raumzelle
6	2	-1000	-1200	1044	1062	-200	1080	2062	1000	36	R	innen / Raumzelle
6	3	-1000	0	1044	1062	160	1080	2062	160	36	B	Daemmung_EPS_040
6	4	-1000	-200	1044	1062	0	1080	2062	200	36	B	Stahlbeton
6	5	-3	0	1044	65	5	1080	68	5	36	B	therm_Trennung_080
6	6	0	5	1044	62	10	1080	62	5	36	B	Aluminium
6	7	0	10	1044	5	185	1080	5	175	36	B	Aluminium
6	8	5	160	1044	7	205	1080	2	45	36	B	Aluminium
6	9	7	203	1044	50	205	1080	43	2	36	B	Aluminium
7										1000	R	Tragprofil
7	1	-1000	160	1080	1062	1160	2080	2062	1000	1000	R	außen / Raumzelle
7	2	-1000	-1200	1080	1062	-200	2080	2062	1000	1000	R	innen / Raumzelle
7	3	-1000	0	1080	1062	160	2080	2062	160	1000	B	Daemmung_EPS_040
7	4	-1000	-200	1080	1062	0	2080	2062	200	1000	B	Stahlbeton
7	5	5	160	1080	7	205	2080	2	45	1000	B	Aluminium
7	6	7	203	1080	50	205	2080	43	2	1000	B	Aluminium

M=Baustoff, S=Raum, P=Power, L=Adiabat

Baustoffe

c	Name	λ [W/(m·K)]	μ [-]	ρ [kg/m³]	c [kJ/(kg·K)]
Blue	Aluminium	200	100000	2700	0,92
Pink	Daemmung_EPS_040	0,04	60	15,8	1,45
Yellow	Hartkunststoff	0,17	100000	1390	0,9
Cyan	Stahl	60	100000	7850	0,48
Grey	Stahlbeton	2,5	105	2400	1
Red	therm_Trennung_080	0,08	8	550	

Verwendete Wärmeübergangswiderstände

C	Raum	Rs(W)	Rs(T)	Beschreibung
Grey	außen	Rs=0,13 m²K/W	Rs=0,13 m²K/W	EN ISO 6946:1996 Außenwand mit t
Grey	außen	Rs=0,13 m²K/W	Rs=0,13 m²K/W	Raumzelle
Grey	innen	Rs=0,13 m²K/W	Rs=0,13 m²K/W	EN ISO 6946:1996 Außenwand mit t
Grey	innen	Rs=0,13 m²K/W	Rs=0,13 m²K/W	Raumzelle

Abb. 114: Beispiel eines AnTherm®-Berechnungsprotokolls, Seite 2

Schichtaufbauten und U-Wert-Berechnungen

außen \leftrightarrow innen @ BackLeft: (-1000, 160, 0) x (-1000, -200, 0)

Baustoff / Oberfläche	λ [W/(m·K)]	d [mm]	R_s [m ² K/W]	α [W/m ² K]	R [m ² K/W]
außen/Raumzelle			0.1300	7.6923	0.1300
Daemmung_EPS_040	0.0400	160.0000			4.0000
Stahlbeton	2.5000	200.0000			0.0800
innen/Raumzelle			0.1300	7.6923	0.1300
	Σ	360.0000	U-Wert:	0.2304	[W/m²K]

außen \leftrightarrow innen @ BackRight: (1062, 160, 0) x (1062, -200, 0)

Baustoff / Oberfläche	λ [W/(m·K)]	d [mm]	R_s [m ² K/W]	α [W/m ² K]	R [m ² K/W]
außen/Raumzelle			0.1300	7.6923	0.1300
Daemmung_EPS_040	0.0400	160.0000			4.0000
Stahlbeton	2.5000	200.0000			0.0800
innen/Raumzelle			0.1300	7.6923	0.1300
	Σ	360.0000	U-Wert:	0.2304	[W/m²K]

außen \leftrightarrow innen @ FrontLeft: (-1000, 160, 2080) x (-1000, -200, 2080)

Baustoff / Oberfläche	λ [W/(m·K)]	d [mm]	R_s [m ² K/W]	α [W/m ² K]	R [m ² K/W]
außen/Raumzelle			0.1300	7.6923	0.1300
Daemmung_EPS_040	0.0400	160.0000			4.0000
Stahlbeton	2.5000	200.0000			0.0800
innen/Raumzelle			0.1300	7.6923	0.1300
	Σ	360.0000	U-Wert:	0.2304	[W/m²K]

außen \leftrightarrow innen @ FrontRight: (1062, 160, 2080) x (1062, -200, 2080)

Baustoff / Oberfläche	λ [W/(m·K)]	d [mm]	R_s [m ² K/W]	α [W/m ² K]	R [m ² K/W]
außen/Raumzelle			0.1300	7.6923	0.1300
Daemmung_EPS_040	0.0400	160.0000			4.0000
Stahlbeton	2.5000	200.0000			0.0800
innen/Raumzelle			0.1300	7.6923	0.1300
	Σ	360.0000	U-Wert:	0.2304	[W/m²K]

Abb. 115: Beispiel eines AnTherm®-Berechnungsprotokolls, Seite 3

Thermische Leitwerte [W / m ² K]		
Raum	außen	innen
außen		1,060655
innen	1,060655	

Verwendete Wärmeübergangswiderstände		
Raum	Wert	Oberfläche
außen	Rs=0,13 m ² K/W	EN ISO 6946:1996 Außenwand mit Hinterlüftung, Rs
außen	Rs=0,13 m ² K/W	Raumzelle
innen	Rs=0,13 m ² K/W	EN ISO 6946:1996 Außenwand mit Hinterlüftung, Rs
innen	Rs=0,13 m ² K/W	Raumzelle

Genauigkeitsangaben			
Raum	Schließfehler [W / K]	Leitwert-Summe [W / K]	Leitwertbezogener Schließfehler
außen	2,57573e-007	1,060655	2,42843e-007
innen	-2,57573e-007	1,060655	-2,42843e-007

Abb. 116: Beispiel eines AnTherm®-Berechnungsprotokolls, Seite 4

Randbedingungen (Lufttemperaturen / Leistungen)

	Raumtemp. [°C]	Min.Temp. [°C]	Max.Temp. [°C]	Grenzfeuchte [%]	$R_{s,i}$
außen	-10,00	-9,11	9,69	100,00 %	
innen	20,00	18,78	19,10	92,72 %	0,96

Verwendete Wärmeübergangswiderstände

Raum	Wert	Oberfläche
außen	$R_s=0,13 \text{ m}^2\text{K/W}$	Raumzelle
innen	$R_s=0,13 \text{ m}^2\text{K/W}$	Raumzelle

Gewichte für den kältesten Oberflächenpunkt

	außen	innen
$g(\text{außen})$	0,970199	0,040538
$g(\text{innen})$	0,029801	0,959462

Abb. 117: Beispiel eines AnTherm®-Berechnungsprotokolls, Seite 5

Koordinaten (x,y,z) des kältesten Punkt jedes Raumes

	x [mm]	y [mm]	z [mm]	Temp.[°C]	f_{Rsi}^*
außen	291,0000	160,0000	1040,0000	-9,11	
innen	38,7500	-200,0000	1040,0000	18,78	0,96

f_{Rsi}^* - Schimmel- und Kondensationsschutzkriterien sind erfüllt.

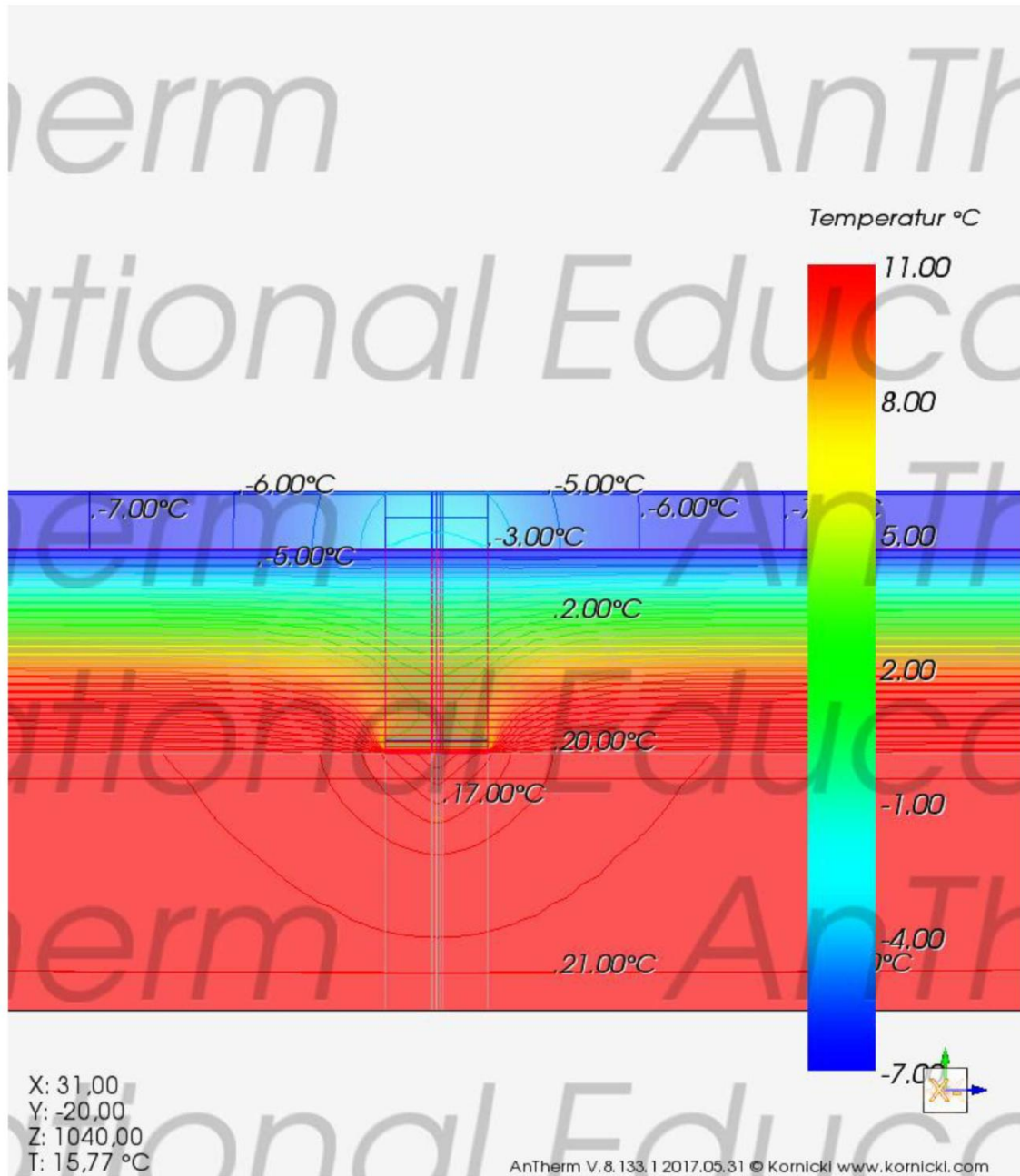
Randbedingungen (Lufttemperaturen und Raumfeuchten / Leistungen)

	Raumtemp. [°C]	Rel.Feuchte [%]	Part.druck [hPa]
außen	-10,00	80,00	2,0747
innen	20,00	53,00	12,3858

Temperaturen und Dampfdrucke ausgewählter Punkte

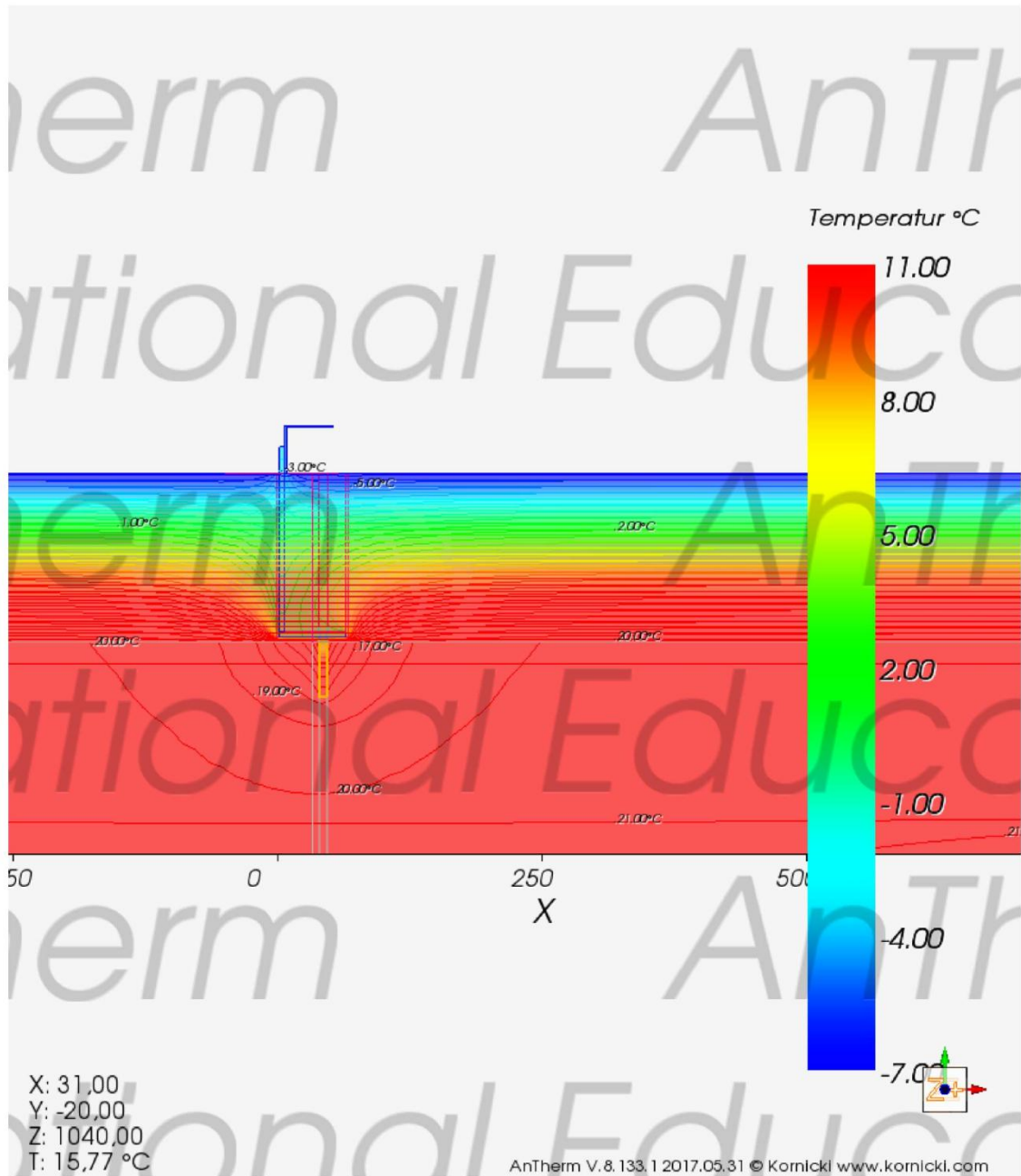
x [mm]	y [mm]	z [mm]	T [°C]	Sät.druck [hPa]	Part.druck [hPa]	
291,0000	160,0000	1040,0000	-9,11	2,81	2,07	min. außen -10°C/80%
-5,0000	160,0000	1040,0000	9,69	12,02	2,07	max. außen -10°C/80%
38,7500	-200,0000	1040,0000	18,78	21,67	12,39	min. innen 20°C/53%
-1000,0000	-200,0000	24,7500	19,10	22,10	12,39	$f_{Rsi}=0,96$ (92,72%) max. innen 20°C/53%

Abb. 118: Beispiel eines AnTherm®-Berechnungsprotokolls, Seite 6

Bild

AnTherm - Heat & Vapour Transfer -Thermal Bridges- Walter,Udo,Klaus,Tomasz
Copyright (c) 2003-2017 M.Kornicki Dienstleistungen in EDV & IT <http://www.kornicki.eu>

Abb. 119: Beispiel eines AnTherm®-Berechnungsprotokolls, Seite 7

Bild

AnTherm - Heat & Vapour Transfer - Thermal Bridges - Walter, Udo, Klaus, Tomasz
Copyright (c) 2003-2017 M.Kornicki Dienstleistungen in EDV & IT <http://www.kornicki.eu>

Abb. 120: Beispiel eines AnTherm®-Berechnungsprotokolls, Seite 8

8.2 Beispielberechnungen Firma Eurofox

8.2.1 MacFox-Konsolen auf Stahlbeton-Untergrund



www.hilti.com

Firma:
Adresse:
Tel. | Fax |
E-Mail:



PROFIS Facade 2.5.4

Seite: 2
Projekt:
Standort:
Datum: 06.12.2017
Bearbeiter:

1 Fassadenabschnitt 1 - Facade Segment 1

1.1 Thermische Berechnung

1.1.1 Eingabedaten

Materialtyp Untergrund:	Beton
Untergrunddicke d_b :	200,0 mm
Wärmeleitfähigkeit Untergrund λ_b :	2,0000 W/mK
Hersteller Dämmung:	Isover
Typ Dämmung:	Type 040
Dicke Dämmung d_i :	160,0 mm
Wärmeleitfähigkeit Dämmung λ_i :	0,0400 W/mK
Fläche Fassadenabschnitt A:	1,0 m ²
Horizontale Profilauskragung y_2 :	20,0 mm

1.1.2 Ungestörte Wand

$$U_0 = \frac{1}{\left(\frac{1}{8} + \frac{d_b}{\lambda_b} + \frac{d_i}{\lambda_i} + \frac{1}{8}\right)}$$

Wärmedurchgangskoeff. der ungestörten Wand U_0 : 0,2299 W/m²K

1.1.3 Punktueller Wärmeverlust

Konsole	Anzahl	χ
MFT-MFI L 185	1	0,1085 W/K
MFT-MFI M 185	1	0,0635 W/K

Tatsächlicher punktueller Wärmeverlust (gesamt) $\sum\chi$: 0,1720 W/K

1.1.4 Linearer Wärmeverlust

Profil	Eindringtiefe	Gesamtlänge l	ψ
MFT-L 60x40 2,0 6m	15,0 mm	2,000 m	0,0012 W/mK

Tatsächlicher linearer Wärmeverlust (gesamt) $\sum(\psi \cdot l)$: 0,0024 W/K

1.1.5 Gesamtwärmeverlust

$$U = \frac{U_0 \cdot A + \sum(\psi \cdot l) + \sum\chi}{A} = U_0 + \Delta U$$

Gesamtwärmeverlust durch thermische Brücken ΔU : 0,1744 W/m²K

Wärmedurchgangskoeffizient U: 0,4042 W/m²K

Abb. 121: Beispielberechnung Firma Eurofox - MacFox-Konsolen auf Stahlbeton-Untergrund

8.2.2 MacFox-Konsolen auf Vollziegel-Untergrund

			
www.hilti.com		PROFIS Facade 2.5.4	
Firma:		Seite:	2
Adresse:		Projekt:	
Tel. Fax		Standort:	
E-Mail:		Datum:	06.12.2017
		Bearbeiter:	

1 Fassadenabschnitt 1 - Facade Segment 1**1.1 Thermische Berechnung****1.1.1 Eingabedaten**

Materialtyp Untergrund:	Mauerwerk
Untergrunddicke d_b :	300,0 mm
Wärmeleitfähigkeit Untergrund λ_b :	0,6900 W/mK
Hersteller Dämmung:	Isover
Typ Dämmung:	Type 040
Dicke Dämmung d_i :	160,0 mm
Wärmeleitfähigkeit Dämmung λ_i :	0,0400 W/mK
Fläche Fassadenabschnitt A:	1,0 m ²
Horizontale Profilauskragung y_2 :	20,0 mm

1.1.2 Ungestörte Wand

$$U_0 = \frac{1}{\left(\frac{1}{8} + \frac{d_b}{\lambda_b} + \frac{d_i}{\lambda_i} + \frac{1}{8}\right)}$$

Wärmedurchgangskoeff. der ungestörten Wand U_0 : 0,2135 W/m²K

1.1.3 Punktueller Wärmeverlust

Konsole	Anzahl	X
MFT-MFI L 185	1	0,0619 W/K
MFT-MFI M 185	2	0,0381 W/K

Tatsächlicher punktueller Wärmeverlust (gesamt) $\sum X$: 0,1382 W/K

1.1.4 Linearer Wärmeverlust

Profil	Eindringtiefe	Gesamtlänge l	ψ
MFT-L 60x40 2,0 6m	15,0 mm	2,000 m	0,0010 W/mK

Tatsächlicher linearer Wärmeverlust (gesamt) $\sum(\psi \cdot l)$: 0,0021 W/K

1.1.5 Gesamtwärmeverlust

$$U = \frac{U_0 \cdot A + \sum(\psi \cdot l) + \sum X}{A} = U_0 + \Delta U$$

Gesamtwärmeverlust durch thermische Brücken ΔU : 0,1403 W/m²K

Wärmedurchgangskoeffizient U: 0,3538 W/m²K

Abb. 122: Beispielberechnung Firma Eurofox - MacFox-Konsolen auf Vollziegel-Untergrund

8.2.3 MFT-Fox-Konsolen auf Stahlbeton-Untergrund

www.hilti.com

PROFIS Facade 2.5.4

Firma:

Seite:

2

Adresse:

Projekt:

Tel. | Fax

Standort:

E-Mail:

Datum:

04.12.2017

Bearbeiter:

1 Fassadenabschnitt 1 - U-Wert 035er Dämmung**1.1 Thermische Berechnung****1.1.1 Eingabedaten**

Materialtyp Untergrund:	Beton
Untergrunddicke d_b :	250,0 mm
Wärmeleitfähigkeit Untergrund λ_b :	2,0000 W/mK
Hersteller Dämmung:	
Typ Dämmung:	Type 035
Dicke Dämmung d_i :	160,0 mm
Wärmeleitfähigkeit Dämmung λ_i :	0,0350 W/mK
Fläche Fassadenabschnitt A:	1,0 m ²
Horizontale Profilauskragung y_2 :	20,0 mm

1.1.2 Ungestörte Wand

$$U_0 = \frac{1}{\left(\frac{1}{8} + \frac{d_b}{\lambda_b} + \frac{d_i}{\lambda_i} + \frac{1}{8}\right)}$$

Wärmedurchgangskoeff. der ungestörten Wand U_0 : 0,2022 W/m²K**1.1.3 Punktueller Wärmeverlust**

Konsole	Anzahl	χ
FOX-VTR + Isolator L 186	1	0,0249 W/K
FOX-VTR + Isolator M 186	1	0,0132 W/K

Tatsächlicher punktueller Wärmeverlust (gesamt) $\sum\chi$: 0,0380 W/K**1.1.4 Linearer Wärmeverlust**

Profil	Eindringtiefe	Gesamtlänge l	ψ
MFT-L 60x40 2,0 6m	14,0 mm	2,000 m	0,0012 W/mK

Tatsächlicher linearer Wärmeverlust (gesamt) $\sum(\psi \cdot l)$: 0,0024 W/K**1.1.5 Gesamtwärmeverlust**

$$U = \frac{U_0 \cdot A + \sum(\psi \cdot l) + \sum\chi}{A} = U_0 + \Delta U$$

Gesamtwärmeverlust durch thermische Brücken ΔU : 0,0405 W/m²KWärmedurchgangskoeffizient U: 0,2426 W/m²K**Abb. 123: Beispielberechnung Firma Eurofox - MFT-Fox-Konsolen auf Stahlbeton-Untergrund**

8.2.4 MFT-Fox-Konsolen auf Vollziegel-Untergrund

www.hilti.com

PROFIS Facade 2.5.4

Firma:

Seite:

2

Adresse:

Projekt:

Tel. | Fax

Standort:

E-Mail:

Datum:

04.12.2017

Bearbeiter:

1 Fassadenabschnitt 1 - U-Wert 035er Dämmung**1.1 Thermische Berechnung****1.1.1 Eingabedaten**

Materialtyp Untergrund:	Mauerwerk
Untergrunddicke d_b :	300,0 mm
Wärmeleitfähigkeit Untergrund λ_b :	0,6900 W/mK
Hersteller Dämmung:	
Typ Dämmung:	Type 035
Dicke Dämmung d_i :	160,0 mm
Wärmeleitfähigkeit Dämmung λ_i :	0,0350 W/mK
Fläche Fassadenabschnitt A:	1,0 m ²
Horizontale Profilauskragung y_2 :	20,0 mm

1.1.2 Ungestörte Wand

$$U_0 = \frac{1}{\left(\frac{1}{8} + \frac{d_b}{\lambda_b} + \frac{d_i}{\lambda_i} + \frac{1}{8}\right)}$$

Wärmedurchgangskoeff. der ungestörten Wand U_0 : 0,1903 W/m²K**1.1.3 Punktueller Wärmeverlust**

Konsole	Anzahl	χ
FOX-VTR + Isolator L 186	1	0,0166 W/K
FOX-VTR + Isolator M 186	1	0,0090 W/K

Tatsächlicher punktueller Wärmeverlust (gesamt) $\sum\chi$: 0,0257 W/K**1.1.4 Linearer Wärmeverlust**

Profil	Eindringtiefe	Gesamtlänge l	ψ
MFT-L 60x40 2,0 6m	14,0 mm	2,000 m	0,0009 W/mK

Tatsächlicher linearer Wärmeverlust (gesamt) $\sum(\psi \cdot l)$: 0,0018 W/K**1.1.5 Gesamtwärmeverlust**

$$U = \frac{U_0 \cdot A + \sum(\psi \cdot l) + \sum\chi}{A} = U_0 + \Delta U$$

Gesamtwärmeverlust durch thermische Brücken ΔU : 0,0275 W/m²KWärmedurchgangskoeffizient U: 0,2178 W/m²K

Abb. 124: Beispielberechnung Firma Eurofox - MFT-Fox-Konsolen auf Vollziegel-Untergrund

8.3 Ergebnisse Statik-Berechnung

8.3.1 MacFox-Konsolen auf Stahlbeton-Untergrund

MacFox	Zwischenschicht		N kN	Vy kN	Mx kNm	Ausnutzung		
	mm	N/mm ²				N	V	N+V
						%	%	%
Large	0	-	4	12,5	0,1	93,2 %	22,2 %	96,2 %
Large	5	100	4	1,5	0,1	68,5 %	56,9 %	99,6 %
Large	5	10	4	1,5	0,1	68,5 %	56,9 %	99,6 %
Large	5	3,5	1,5	1,5	0,1	28,5 %	47,2 %	47,6 %
Large	5	0,8	0,5	1,5	0,02	8,9 %	43,0 %	30,8 %
Large	5	0,1	0	1,5	0	0,0 %	41,4 %	0,0 %
Large	10	100	4	1	0,1	68,5 %	52,6 %	94,7 %
Large	10	10	4	1	0,1	68,5 %	52,6 %	94,7 %
Large	10	3,5	1,8	1	0,1	33,2 %	44,4 %	48,7 %
Large	10	0,8	0,5	1	0,02	8,9 %	39,7 %	27,6 %
Large	10	0,1	0	1	0	0,0 %	38,2 %	0,0 %
Large	20	100	4	0,7	0,1	68,5 %	57,2 %	99,9 %
Large	20	10	4	0,7	0,1	68,5 %	57,2 %	99,9 %
Large	20	3,5	1,8	0,7	0,1	33,2 %	48,4 %	52,7 %
Large	20	0,8	0,5	0,7	0,02	8,9 %	43,2 %	31,0 %
Large	20	0,1	0	0,7	0	0,0 %	41,6 %	0,0 %
Large	40	100	4	0,4	0,1	68,5 %	56,1 %	98,6 %
Large	40	10	4	0,4	0,1	68,5 %	56,1 %	98,6 %
Large	40	3,5	1,8	0,4	0,1	33,2 %	47,4 %	51,7 %
Large	40	0,8	0,5	0,4	0,02	8,9 %	42,3 %	30,2 %
Large	40	0,1	0	0,4	0	0,0 %	40,8 %	0,0 %
Medium	0	-	1	0	0,15	98,5 %	-	-
Medium	5 - 40	100	1	0	0,15	98,5 %	-	-
Medium	5 - 40	10	0,6	0	0,12	75,0 %	-	-
Medium	5 - 40	3,5	0,4	0	0,02	18,6 %	-	-
Medium	5 - 40	0,8	0,09	0	0,01	7,0 %	-	-
Medium	5 - 40	0,1	0	0	0	0,0 %	-	-

Abb. 125: Ergebnisse der Statik-Berechnungen der MacFox-Konsolen auf Stahlbeton-Untergrund

8.3.2 MacFox-Konsolen auf Vollziegel-Untergrund

MacFox	Zwischenschicht		N kN	Vy kN	Mx kNm	Ausnutzung		
	mm	N/mm ²				N %	V %	N+V %
Large	0	-	1,14	0,51	0,04	94,3 %	25,5 %	99,9 %
Large	5	100	1,14	0,51	0,04	94,3 %	25,5 %	99,9 %
Large	5	10	1,14	0,51	0,04	94,3 %	25,5 %	99,9 %
Large	5	3,5	1,14	0,51	0,04	94,3 %	25,5 %	99,9 %
Large	5	0,8	1,04	0,51	0,03	83,2 %	25,5 %	90,6 %
Large	5	0,1	0	0,51	0	0,0 %	25,5 %	0,0 %
Large	10	100	1,13	0,51	0,03	89,3 %	30,2 %	99,6 %
Large	10	10	1,13	0,51	0,03	89,3 %	30,2 %	99,6 %
Large	10	3,5	1,13	0,51	0,03	89,3 %	30,2 %	99,6 %
Large	10	0,8	1,04	0,51	0,03	83,2 %	30,2 %	94,5 %
Large	10	0,1	0	0,51	0	0,0 %	30,2 %	0,0 %
Large	20	100	0,88	0,51	0,03	72,4 %	47,0 %	99,5 %
Large	20	10	0,88	0,51	0,03	72,4 %	47,0 %	99,5 %
Large	20	3,5	0,88	0,51	0,03	72,4 %	47,0 %	99,5 %
Large	20	0,8	0,88	0,51	0,03	72,4 %	47,0 %	99,5 %
Large	20	0,1	0	0,51	0	0,0 %	47,0 %	0,0 %
Large	40	100	0,45	0,51	0,02	39,1 %	80,5 %	99,7 %
Large	40	10	0,45	0,51	0,02	39,1 %	80,5 %	99,7 %
Large	40	3,5	0,45	0,51	0,02	39,1 %	80,5 %	99,7 %
Large	40	0,8	0,45	0,51	0,02	39,1 %	80,5 %	99,7 %
Large	40	0,1	0	0,51	0	0,0 %	80,5 %	0,0 %
Medium	0	-	0,28	0	0,04	99,7 %	-	-
Medium	5 - 40	100	0,28	0	0,04	99,7 %	-	-
Medium	5 - 40	10	0,28	0	0,04	99,7 %	-	-
Medium	5 - 40	3,5	0,28	0	0,04	99,7 %	-	-
Medium	5 - 40	0,8	0,28	0	0,01	42,9 %	-	-
Medium	5 - 40	0,1	0	0	0	0,0 %	-	-

Abb. 126: Ergebnisse der Statik-Berechnungen der MacFox-Konsolen auf Vollziegel-Untergrund

8.4 Berechnungsergebnisse ΔU-Werte

8.4.1 Konsole MacFox

Variation der thermischen Trennung (Dicke und Lambda)					Anzahl Abstandhalter (MacFox - STB)		Anzahl Abstandhalter (MacFox - VZ/VH)		UK aus Aluminium / Schrauben DM7 aus Stahl / Dübel DM10 aus Hart-PVC											
Dämmung		therm. Trennung		Festpunkte	Gleitpunkte	Festpunkte	Gleitpunkte	MacFox Medium			MacFox Large			ΔU-Wert			Veränderung ΔU-Wert durch thermische Trennung			
Berechnung:	mm	W/(m.K)	mm	W/(m.K)					Chi-Wert			Chi-Wert			=(10*χL+14*χM)/A			=1-ΔU/ΔU0		
Einheit:	mm	W/(m.K)	mm	W/(m.K)					W/K			W/K			W/m²/K			W/m²/K		
Variante:									Var.01.xx	Var.02.xx	Var.03.xx	Var.04.xx	Var.05.xx	Var.06.xx	Var.04.xx	Var.05.xx	Var.06.xx	Var.07.xx	Var.08.xx	Var.09.xx
Untergrund:									Stahlbeton	Vollziegel	Vollholz	Stahlbeton	Vollziegel	Vollholz	Stahlbeton	Vollziegel	Vollholz	Stahlbeton	Vollziegel	Vollholz
R-Grund:									0,08	0,43	1,33	0,08	0,43	1,33	0,08	0,43	1,33	0,08	0,43	1,33
Variante																				
Var.xx.00	160	0,04	-	-					-	-	-	-	-	-	-	-	-			
Var.xx.01	160	0,04	-	-	7,35	10,66	15,00	21,00	0,1340	0,0645	0,0169	0,2040	0,0990	0,0265	0,2380	0,2308	0,0612			
Var.xx.02	160	0,04	5	0,17	10,00	10,66	15,00	21,00	0,0873	0,0514	0,0163	0,1489	0,0839	0,0256	0,1967	0,1901	0,0591	-17%	-18%	-3%
Var.xx.03	160	0,04	5	0,08	10,00	14,00	15,00	21,00	0,0724	0,0453	0,0156	0,1316	0,0776	0,0250	0,1894	0,1720	0,0571	-20%	-25%	-7%
Var.xx.04	160	0,04	5	0,06	20,92	56,45	15,00	21,00	0,0677	0,0431	0,0153	0,1262	0,0753	0,0247	0,5254	0,1655	0,0562	121%	-28%	-8%
Var.xx.05	160	0,04	5	0,04	32,34	150,00	17,00	48,80	0,0622	0,0403	0,0149	0,1197	0,0725	0,0242	1,0733	0,2601	0,0925	351%	13%	51%
Var.xx.06	160	0,04	5	0,02	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	0,0556	0,0366	0,0141	0,1121	0,0687	0,0235	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Var.xx.07	160	0,04	10	0,17	15,00	10,66	15,84	21,00	0,0721	0,0452	0,0157	0,1299	0,0768	0,0249	0,2209	0,1761	0,0588	-7%	-24%	-4%
Var.xx.08	160	0,04	10	0,08	15,00	14,00	15,84	21,00	0,0596	0,0391	0,0147	0,1150	0,0704	0,0240	0,2081	0,1575	0,0560	-13%	-32%	-9%
Var.xx.09	160	0,04	10	0,06	31,39	56,45	15,84	21,00	0,0562	0,0372	0,0143	0,1108	0,0684	0,0236	0,5406	0,1516	0,0548	127%	-34%	-10%
Var.xx.10	160	0,04	10	0,04	48,51	150,00	17,00	48,80	0,0523	0,0350	0,0138	0,1062	0,0660	0,0231	1,0571	0,2301	0,0866	344%	0%	41%
Var.xx.11	160	0,04	10	0,02	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	0,0481	0,0323	0,0130	0,1011	0,0633	0,0223	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Var.xx.12	160	0,04	20	0,17	21,43	10,66	19,54	21,00	0,0572	0,0379	0,0146	0,1092	0,0679	0,0237	0,2398	0,1726	0,0625	1%	-25%	2%
Var.xx.13	160	0,04	20	0,08	21,43	14,00	19,54	21,00	0,0475	0,0326	0,0133	0,0973	0,0620	0,0224	0,2236	0,1541	0,0584	-6%	-33%	-5%
Var.xx.14	160	0,04	20	0,06	44,84	56,45	19,54	21,00	0,0451	0,0311	0,0129	0,0942	0,0604	0,0220	0,5503	0,1489	0,0569	131%	-35%	-7%
Var.xx.15	160	0,04	20	0,04	69,29	150,00	19,54	48,80	0,0425	0,0294	0,0123	0,0909	0,0585	0,0215	1,0307	0,2097	0,0829	333%	-9%	36%
Var.xx.16	160	0,04	20	0,02	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	0,0397	0,0276	0,0116	0,0874	0,0565	0,0207	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Var.xx.17	160	0,04	40	0,17	37,50	10,66	36,18	21,00	0,0414	0,0293	0,0127	0,0849	0,0562	0,0215	0,2947	0,2155	0,0851	24%	-7%	39%
Var.xx.18	160	0,04	40	0,08	37,50	14,00	36,18	21,00	0,0348	0,0251	0,0113	0,0759	0,0511	0,0201	0,2711	0,1933	0,0783	14%	-16%	28%
Var.xx.19	160	0,04	40	0,06	78,47	56,45	36,18	21,00	0,0332	0,0240	0,0108	0,0737	0,0498	0,0196	0,6224	0,1874	0,0761	162%	-19%	24%
Var.xx.20	160	0,04	40	0,04	121,27	150,00	36,18	48,80	0,0315	0,0228	0,0103	0,0713	0,0483	0,0190	1,0874	0,2326	0,0967	357%	1%	58%
Var.xx.21	160	0,04	40	0,02	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	0,0297	0,0215	0,0096	0,0688	0,0467	0,0183	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.

Abb. 127: Ergebnisse der ΔU-Wert-Berechnungen der Konsole MacFox

8.4.2 Konsole MFT-Fox

Variation der thermischen Trennung (Dicke und Lambda)					Anzahl Abstandhalter (MFT-Fox - STB)		Anzahl Abstandhalter (MFT-Fox - VZ/VH)		UK aus Edelstahl / Schrauben DM7 aus Edelstahl / Dübel DM10 aus Hart-PVC											
Dämmung		therm. Trennung		Festpunkte	Gleitpunkte	Festpunkte	Gleitpunkte	MFT-Fox Medium			MFT-Fox Large			ΔU-Wert			Verbesserung ΔU-Wert durch thermische Trennung			
Achse vert.:				0	0	0	0	Chi-Wert			Chi-Wert			=(10*xL+14*xM)/A			=1-ΔU/ΔU0			
Einheit:	mm	W/(m.K)	mm	W/(m.K)				W/K			W/K			W/m²/K			W/m²/K			
Variante:								Var.07.xx	Var.08.xx	Var.09.xx	Var.10.xx	Var.11.xx	Var.12.xx	Var.10.xx	Var.11.xx	Var.12.xx	Var.10.xx	Var.11.xx	Var.12.xx	
Untergrund:								Stahlbeton	Vollziegel	Vollholz	Stahlbeton	Vollziegel	Vollholz	Stahlbeton	Vollziegel	Vollholz	0	0	0	
R-Grund:								0,08	0,43	1,33	0,08	0,43	1,33	0,08	0,43	1,33	0,08	0,43	1,33	
Variante																				
Var.xx.00	160	0,04	-	-				-	-	-	-	-	-	-	-	-				
Var.xx.01	160	0,04	-	-	7,35	10,66	15,00	21,00	0,0121	0,0094	0,0052	0,0231	0,0176	0,0094	0,0243	0,0330	0,0202			
Var.xx.02	160	0,04	5	0,17	10,00	10,66	15,00	21,00	0,0111	0,0088	0,0051	0,0213	0,0167	0,0092	0,0269	0,0312	0,0199	11%	-5%	-2%
Var.xx.03	160	0,04	5	0,08	10,00	14,00	15,00	21,00	0,0105	0,0084	0,0049	0,0203	0,0161	0,0091	0,0284	0,0299	0,0195	17%	-9%	-4%
Var.xx.04	160	0,04	5	0,06	20,92	56,45	15,00	21,00	0,0102	0,0083	0,0049	0,0199	0,0158	0,0090	0,0808	0,0294	0,0194	232%	-11%	-4%
Var.xx.05	160	0,04	5	0,04	32,34	150,00	17,00	48,80	0,0099	0,0080	0,0048	0,0194	0,0155	0,0089	0,1719	0,0325	0,0314	606%	-1%	55%
Var.xx.06	160	0,04	5	0,02	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	0,0095	0,0077	0,0047	0,0188	0,0150	0,0087	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Var.xx.07	160	0,04	10	0,17	15,00	10,66	15,84	21,00	0,0106	0,0085	0,0050	0,0206	0,0163	0,0091	0,0343	0,0319	0,0202	41%	-3%	0%
Var.xx.08	160	0,04	10	0,08	15,00	14,00	15,84	21,00	0,0098	0,0080	0,0048	0,0194	0,0154	0,0089	0,0348	0,0302	0,0196	43%	-8%	-3%
Var.xx.09	160	0,04	10	0,06	31,39	56,45	15,84	21,00	0,0095	0,0078	0,0047	0,0190	0,0152	0,0088	0,0922	0,0295	0,0194	279%	-10%	-4%
Var.xx.10	160	0,04	10	0,04	48,51	150,00	17,00	48,80	0,0092	0,0075	0,0046	0,0185	0,0148	0,0086	0,1853	0,0309	0,0302	661%	-6%	49%
Var.xx.11	160	0,04	10	0,02	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	0,0088	0,0072	0,0045	0,0179	0,0143	0,0084	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Var.xx.12	160	0,04	20	0,17	21,43	10,66	19,54	21,00	0,0099	0,0080	0,0048	0,0197	0,0156	0,0089	0,0429	0,0376	0,0223	76%	14%	10%
Var.xx.13	160	0,04	20	0,08	21,43	14,00	19,54	21,00	0,0090	0,0073	0,0045	0,0182	0,0145	0,0085	0,0419	0,0348	0,0212	72%	6%	5%
Var.xx.14	160	0,04	20	0,06	44,84	56,45	19,54	21,00	0,0087	0,0071	0,0044	0,0177	0,0142	0,0084	0,1046	0,0339	0,0209	330%	3%	3%
Var.xx.15	160	0,04	20	0,04	69,29	150,00	19,54	48,80	0,0084	0,0069	0,0043	0,0172	0,0138	0,0082	0,1992	0,0329	0,0301	719%	0%	49%
Var.xx.16	160	0,04	20	0,02	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	0,0080	0,0066	0,0041	0,0166	0,0134	0,0080	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Var.xx.17	160	0,04	40	0,17	37,50	10,66	36,18	21,00	0,0089	0,0072	0,0044	0,0181	0,0145	0,0084	0,0630	0,0639	0,0324	159%	94%	60%
Var.xx.18	160	0,04	40	0,08	37,50	14,00	36,18	21,00	0,0076	0,0064	0,0040	0,0163	0,0131	0,0079	0,0582	0,0573	0,0300	139%	74%	48%
Var.xx.19	160	0,04	40	0,06	78,47	56,45	36,18	21,00	0,0074	0,0061	0,0039	0,0157	0,0127	0,0077	0,1344	0,0554	0,0292	453%	68%	44%
Var.xx.20	160	0,04	40	0,04	121,27	150,00	36,18	48,80	0,0071	0,0058	0,0037	0,0152	0,0123	0,0075	0,2357	0,0533	0,0367	869%	62%	81%
Var.xx.21	160	0,04	40	0,02	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	0,0067	0,0055	0,0035	0,0145	0,0118	0,0072	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.

Abb. 128: Ergebnisse der ΔU-Wert-Berechnungen der Konsole MFT-Fox

8.5 Ermittlung des Einflussbereiches der Befestigungselemente zur Auswertung der Messdaten der untersuchten begrünt, hinterlüfteten Fassaden

8.5.1 BG und BRG Diefenbachgasse

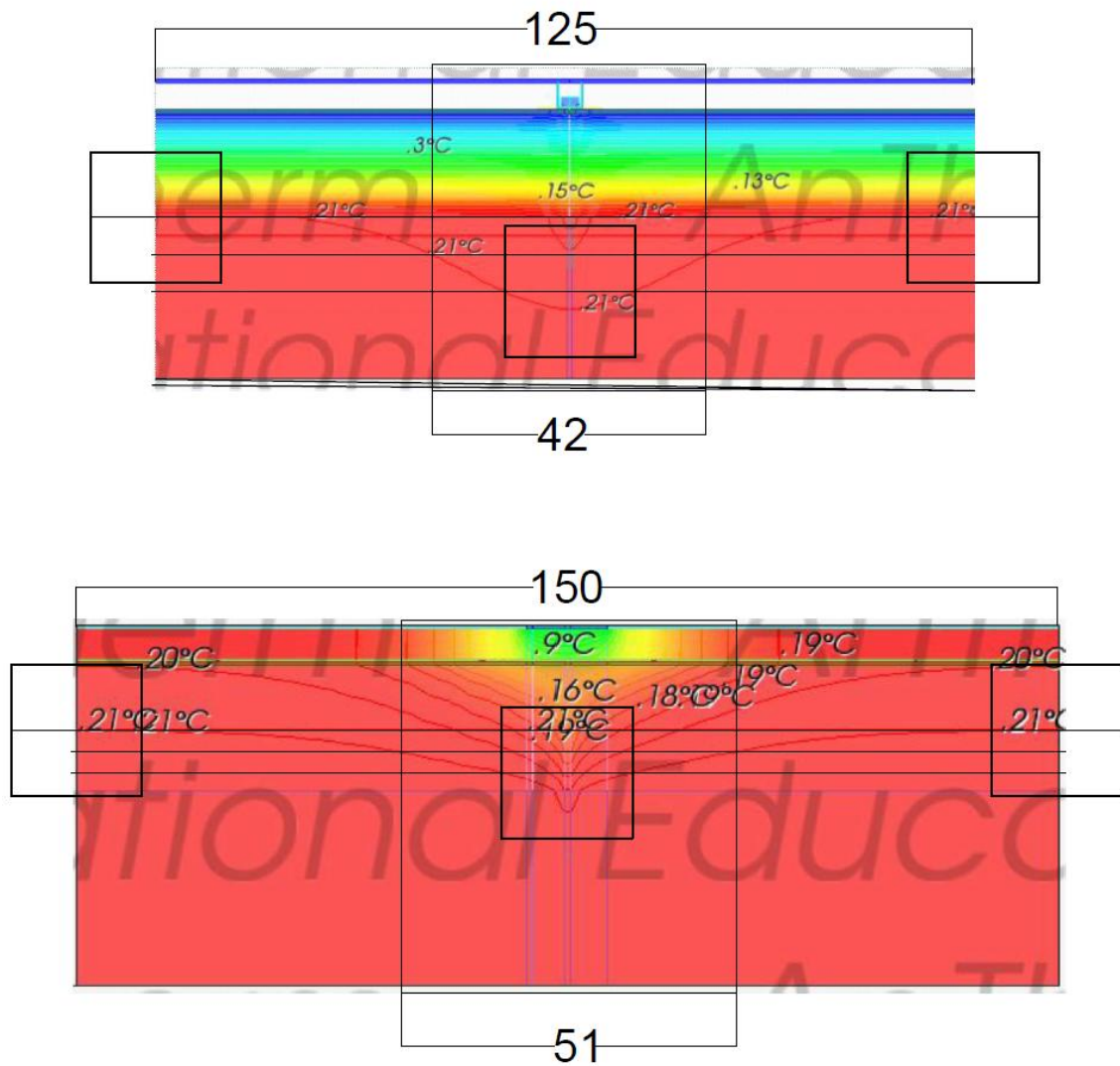


Abb. 129: Diefenbachgasse – Ermittlung des Einflussbereiches der Befestigungselemente

8.5.2 BRG Schumeierplatz

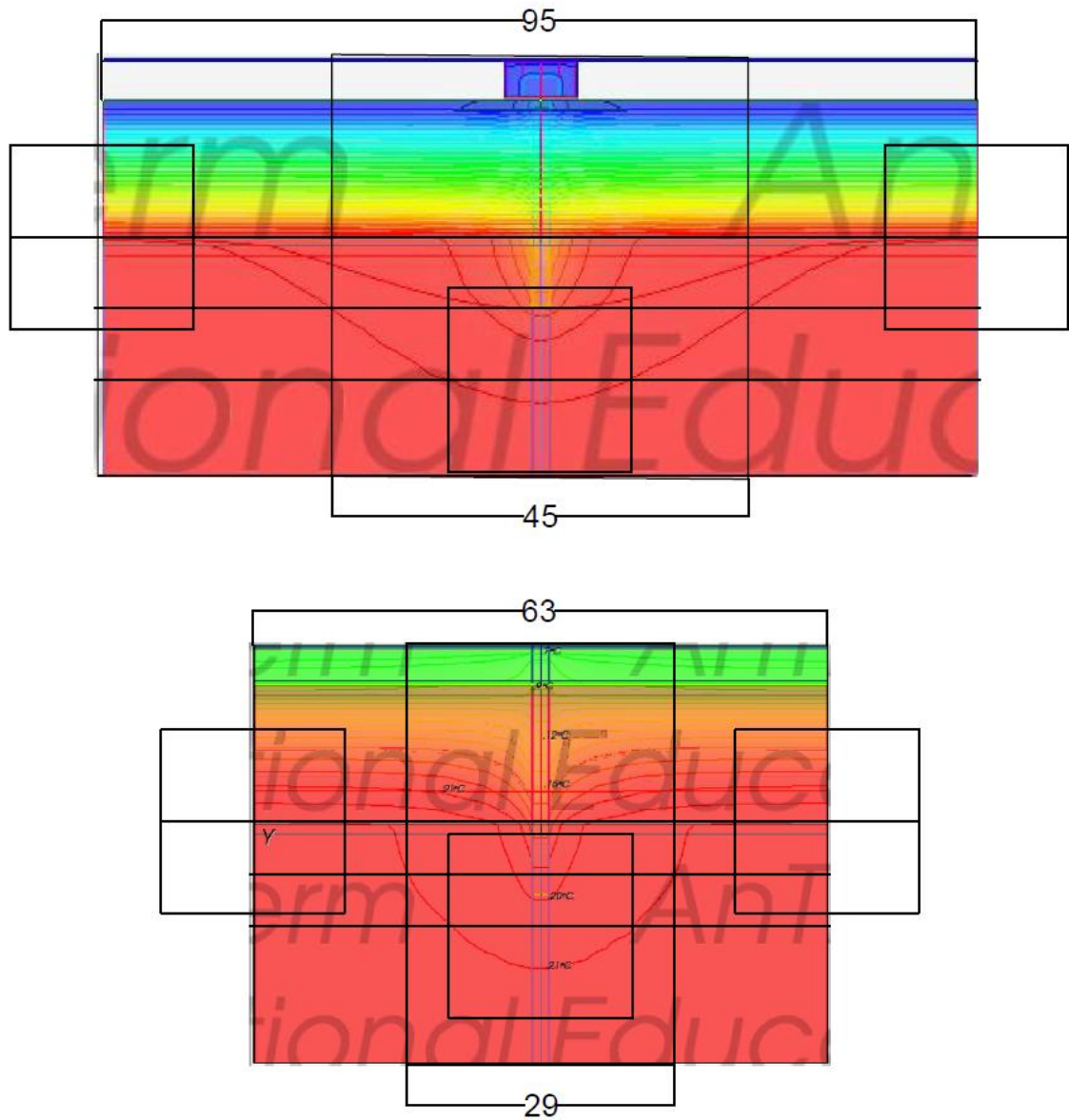


Abb. 130: Schumeierplatz – Ermittlung des Einflussbereiches der Befestigungselemente

8.6 Bereinigte Mittelwerte der verwendeten Messdaten

Tab. 27: Diefenbachgasse – bereinigte Mittelwerte der verwendeten Messdaten

Ort	Messgröße	Mittelwert	Einheit
Innen	Lufttemperatur	21,94	°C
Hinterlüftungsspalt	Lufttemperatur	3,05	°C
Außen	Lufttemperatur	0,21	°C
Referenzmessung	Wärmestrom	-1,48	W/m ²
Hinterlüftungsspalt	Wärmestrom	-0,80	W/m ²
Wärmebrücke	Wärmestrom	-3,13	W/m ²

Tab. 28: Schumeierplatz – bereinigte Mittelwerte der verwendeten Messdaten

Ort	Messgröße	Mittelwert	Einheit
Innen	Lufttemperatur	21,10	°C
Hinterlüftungsspalt	Lufttemperatur	1,86	°C
Außen	Lufttemperatur	2,09	°C
Referenzmessung	Wärmestrom	-3,26	W/m ²
Hinterlüftungsspalt	Wärmestrom	-4,16	W/m ²
Wärmebrücke	Wärmestrom	-5,19	W/m ²

Bei den angeführten Messwerten handelt es sich um bereinigte Mittelwerte. Dabei wurden die Messwerte zwischen 23 Uhr und 6 Uhr mit einer Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außenlufttemperatur von mindestens zehn Kelvin für die Mittelwertbildung herangezogen. Zu hohe oder niedrige bzw. aus anderen Gründen unplausibel erscheinende Werte wurden ausgeschieden.

Da zum Zeitpunkt der Auswertung erst die Messdaten von einem Winter vorlagen und die Fassadenbegrünungspaneele im ersten Winter noch nicht sehr dicht bewachsen sind, können bei den Ergebnissen nach Auswertung der Messdaten der kommenden Heizperioden noch Änderungen auftreten. Außerdem sollten die Ergebnisse mit einem dynamischen Verfahren zur U-Wert-Bestimmung auf Plausibilität überprüft werden, da das angewendete statische Verfahren insbesondere bei kurzen Messperioden sowie größeren Schwankungen der Messdaten relativ ungenau wird.

8.7 Maßgebliche Lastkombinationen aus RSTAB

Vorhandene Lastkombinationen	
GZT LK1	1.35*LF1 + 1.35*LF2 + 1.5*LF3 + 1.35*LF10 + LF5
GZT LK2	1.35*LF1 + 1.35*LF2 + 1.5*LF4 + 1.35*LF10 + LF5
GZT LK3	1.35*LF1 + 1.35*LF2 + 1.5*LF6 + 1.35*LF10 + LF5
GZT LK4	1.35*LF1 + 1.35*LF2 + 1.5*LF7 + 1.35*LF10 + LF5
GZT LK5	1.35*LF1 + 1.35*LF2 + 1.5*LF8 + 1.35*LF10 + LF5
GZT LK6	1.35*LF1 + 1.35*LF2 + 1.5*LF9 + 1.35*LF10 + LF5
GZT LK7	1.35*LF1 + 1.35*LF2 + 1.35*LF10 + LF5
GZT LK8	1.35*LF1 + 1.35*LF2 + 1.35*LF10 + 1.5*LF11 + LF5
GZT LK9	1.35*LF1 + 1.35*LF2 + 1.35*LF10 + 1.5*LF12 + LF5
G Ch LK10	LF1 + LF2 + LF3 + LF10 + LF5
G Ch LK11	LF1 + LF2 + LF4 + LF10 + LF5
G Ch LK12	LF1 + LF2 + LF6 + LF10 + LF5
G Ch LK13	LF1 + LF2 + LF7 + LF10 + LF5
G Ch LK14	LF1 + LF2 + LF8 + LF10 + LF5
G Ch LK15	LF1 + LF2 + LF9 + LF10 + LF5
G Ch LK16	LF1 + LF2 + LF10 + LF5
G Ch LK17	LF1 + LF2 + LF10 + LF11 + LF5
G Ch LK18	LF1 + LF2 + LF10 + LF12 + LF5
G Hä LK19	LF1 + LF2 + 0.2*LF3 + LF10 + LF5
G Hä LK20	LF1 + LF2 + 0.2*LF4 + LF10 + LF5
G Hä LK21	LF1 + LF2 + 0.5*LF6 + LF10 + LF5
G Hä LK22	LF1 + LF2 + 0.5*LF7 + LF10 + LF5
G Hä LK23	LF1 + LF2 + 0.2*LF8 + LF10 + LF5
G Hä LK24	LF1 + LF2 + LF10 + LF5
G Hä LK25	LF1 + LF2 + LF10 + 0.2*LF11 + LF5
G Hä LK26	LF1 + LF2 + LF10 + 0.2*LF12 + LF5
G Qs LK27	LF1 + LF2 + LF10 + LF5
LAG LK28	1.1*LF1 + 1.1*LF2 + 1.5*LF3 + 1.1*LF10 + LF5
LAG LK29	0.9*LF1 + 0.9*LF2 + 1.5*LF3 + 0.9*LF10 + LF5
LAG LK30	1.1*LF1 + 1.1*LF2 + 1.5*LF4 + 1.1*LF10 + LF5
LAG LK31	0.9*LF1 + 0.9*LF2 + 1.5*LF4 + 0.9*LF10 + LF5
LAG LK32	1.1*LF1 + 1.1*LF2 + 1.5*LF6 + 1.1*LF10 + LF5
LAG LK33	0.9*LF1 + 0.9*LF2 + 1.5*LF6 + 0.9*LF10 + LF5
LAG LK34	1.1*LF1 + 1.1*LF2 + 1.5*LF7 + 1.1*LF10 + LF5
LAG LK35	0.9*LF1 + 0.9*LF2 + 1.5*LF7 + 0.9*LF10 + LF5
LAG LK36	1.1*LF1 + 1.1*LF2 + 1.5*LF8 + 1.1*LF10 + LF5
LAG LK37	0.9*LF1 + 0.9*LF2 + 1.5*LF8 + 0.9*LF10 + LF5
LAG LK38	1.1*LF1 + 1.1*LF2 + 1.5*LF9 + 1.1*LF10 + LF5
LAG LK39	0.9*LF1 + 0.9*LF2 + 1.5*LF9 + 0.9*LF10 + LF5
LAG LK40	1.1*LF1 + 1.1*LF2 + 1.1*LF10 + LF5
LAG LK41	0.9*LF1 + 0.9*LF2 + 0.9*LF10 + LF5
LAG LK42	1.1*LF1 + 1.1*LF2 + 1.1*LF10 + 1.5*LF11 + LF5
LAG LK43	0.9*LF1 + 0.9*LF2 + 0.9*LF10 + 1.5*LF11 + LF5
LAG LK44	1.1*LF1 + 1.1*LF2 + 1.1*LF10 + 1.5*LF12 + LF5
LAG LK45	0.9*LF1 + 0.9*LF2 + 0.9*LF10 + 1.5*LF12 + LF5

Abb. 131: Ergebnisse der ΔU -Wert-Berechnungen der Konsole MFT-Fox

8.8 Modell des Stahlgerüsts mit zwei Ständerebenen

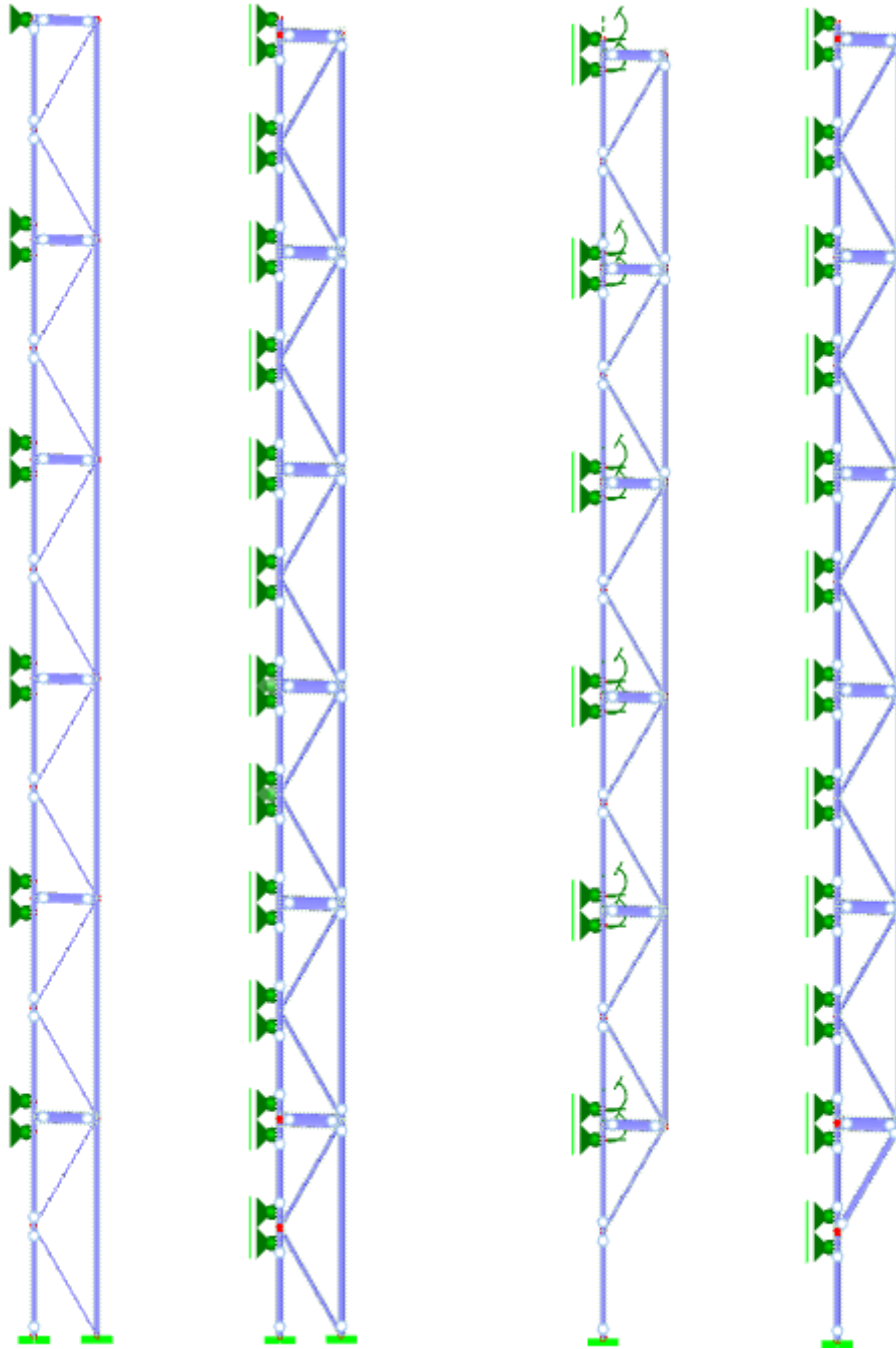


Abb. 132: Modell des Stahlgerüsts mit zwei Ständerebenen und zwei bzw. vier Konsolen je Geschoß; links: zwei Varianten mit durchgehenden Stützen; rechts: zwei Varianten mit nur einer durchgehenden Stützen-Reihe

Die numerischen Simulationen haben bei diesem ersten Modell-Entwurf extrem hohe Lagerreaktionen aufgrund von Temperaturzwängungen ergeben, die auf die hohe Steifigkeit des Systems und das Fehlen von Bewegungsmöglichkeiten bei thermischen Längenänderungen zurückgeführt wurden. Aus diesem Grund wurde das System in weiterer Folge vereinfacht und die vordere, zweite Stützenreihe sowie die Diagonalstäbe gänzlich weggelassen.

8.9 Ergebnisse der RSTAB-Berechnungen des Begrünungsmodells im Grenzzustand der Tragfähigkeit

8.9.1 Variante 1 – Stützen durchgehend – Knickfiguren

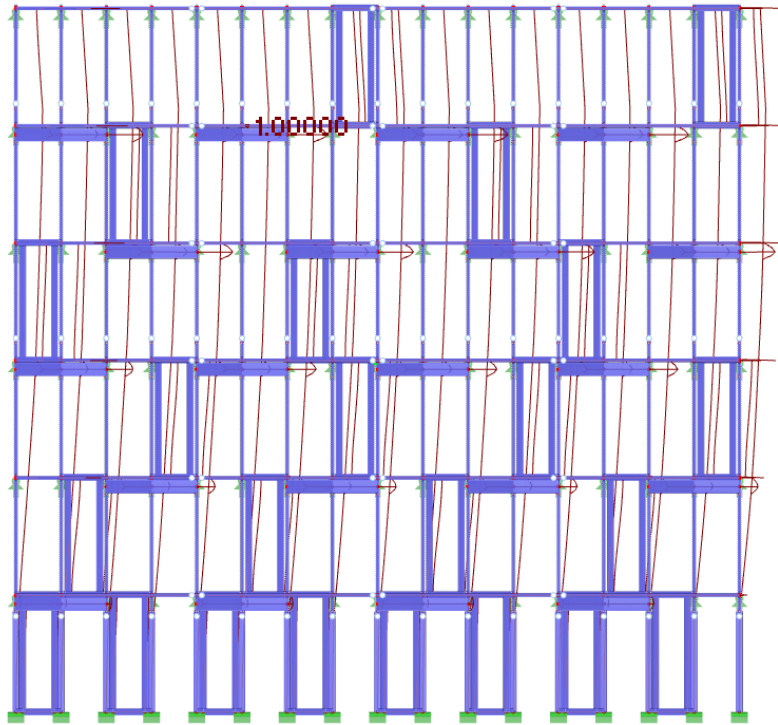


Abb. 133: Variante 1, 60 cm Auskragung, erste Eigenform bei 3.671 Hz, in Y-Richtung

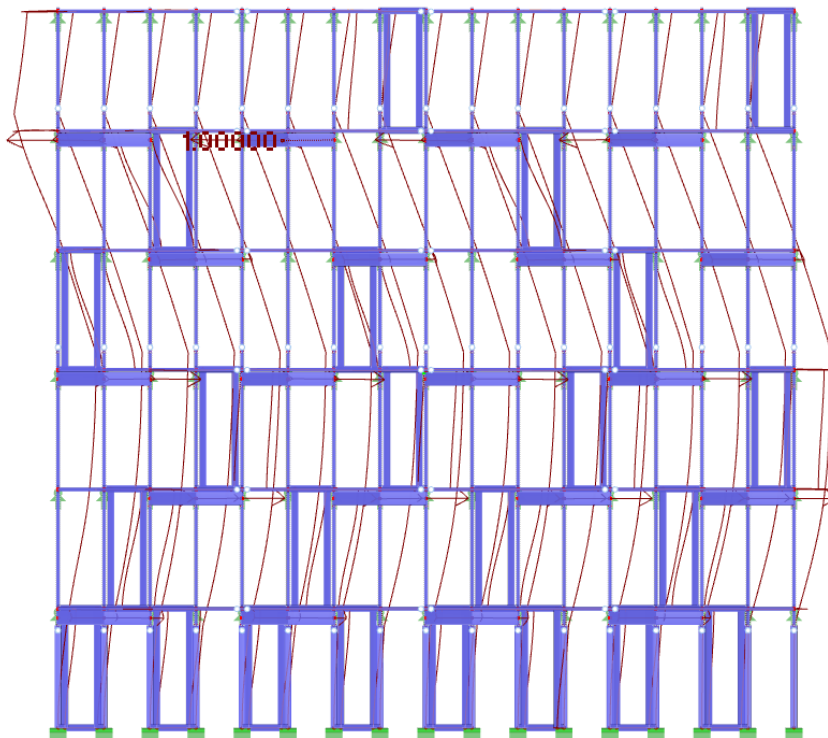


Abb. 134: Variante 1, 60 cm Auskragung, zweite Eigenform bei 5.505 Hz, in Y-Richtung

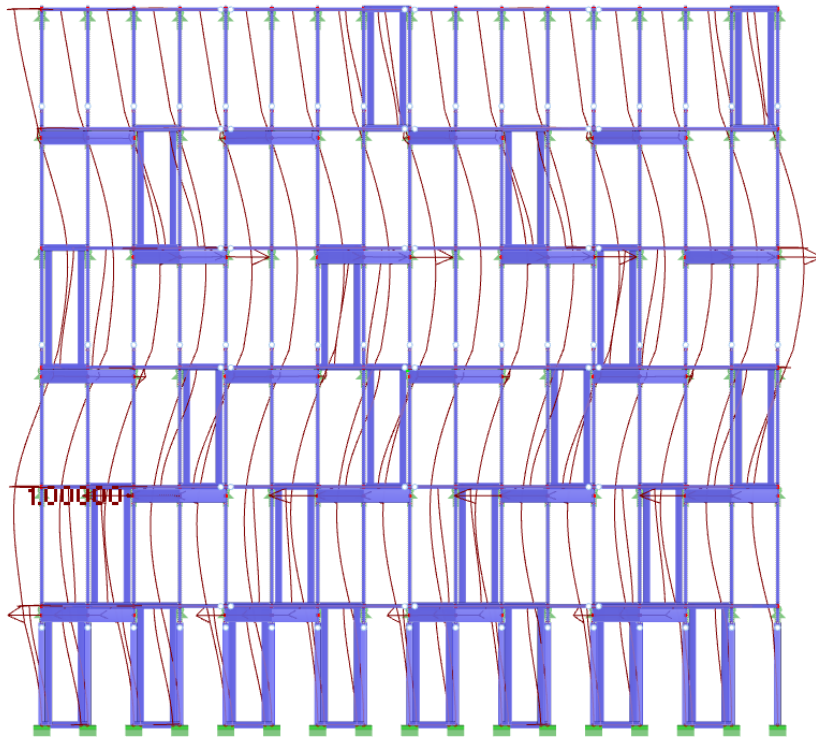


Abb. 135: Variante 1, 60 cm Auskragung, dritte Eigenform bei 7.453 Hz, in Y-Richtung

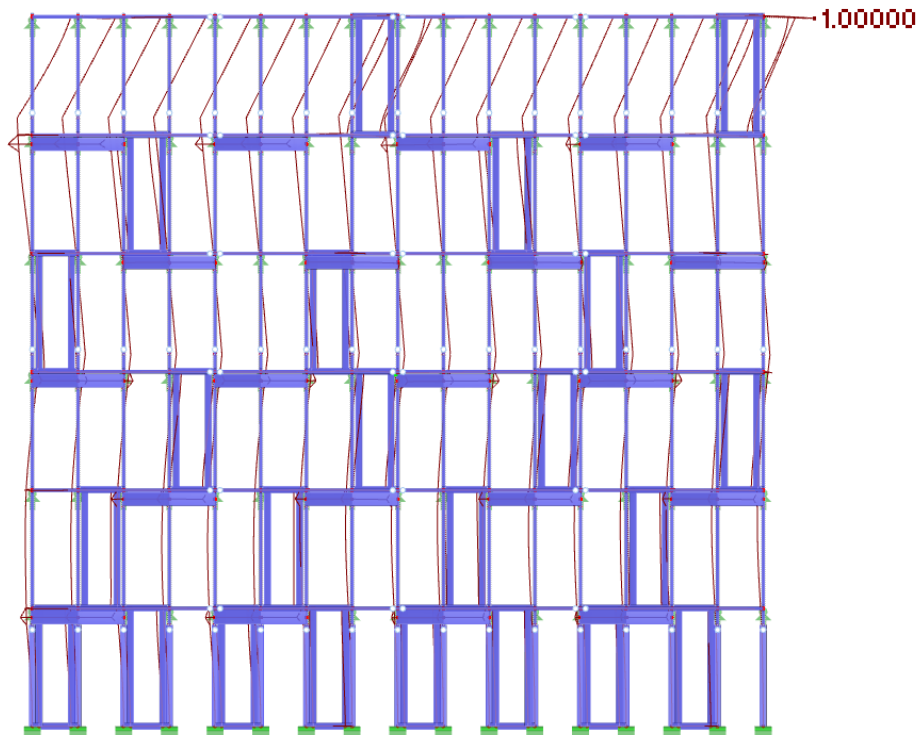


Abb. 136: Variante 1, 60 cm Auskragung, vierte Eigenform bei 8.007 Hz, in Y-Richtung

Die Knickfiguren bei Variante 1 mit 80 cm Auskragung und mit 100 cm Auskragung werden nicht angeführt, da die Unterschiede zu den abgebildeten Knickfiguren bei 60 cm Auskragung marginal sind.

8.9.2 Variante 1 – Stützen durchgehend – Schnittgrößenverteilungen

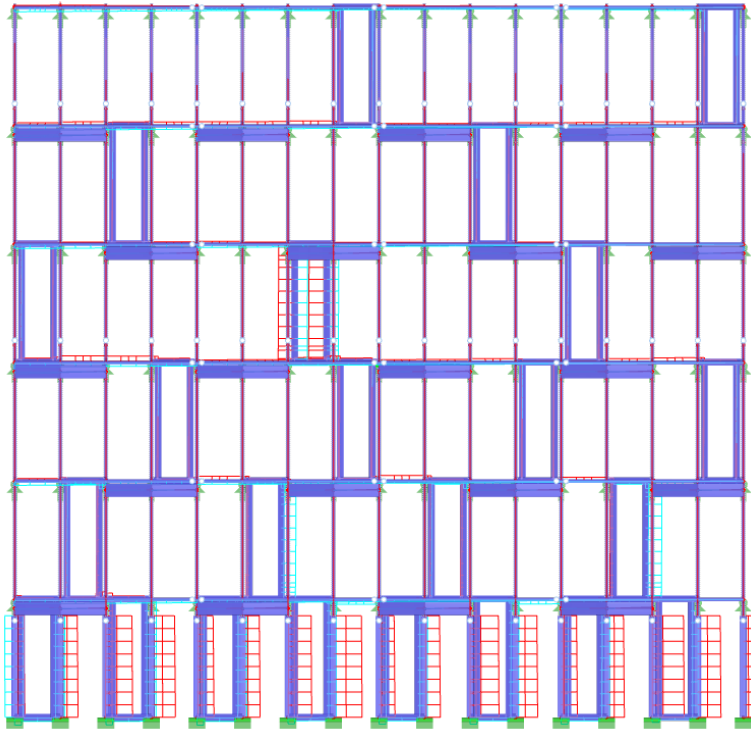


Abb. 137: Variante 1, 60 cm Auskragung, Extremwerte der Normalkräfte im Grenzzustand der Tragfähigkeit (Maximum: 220,93 kN)

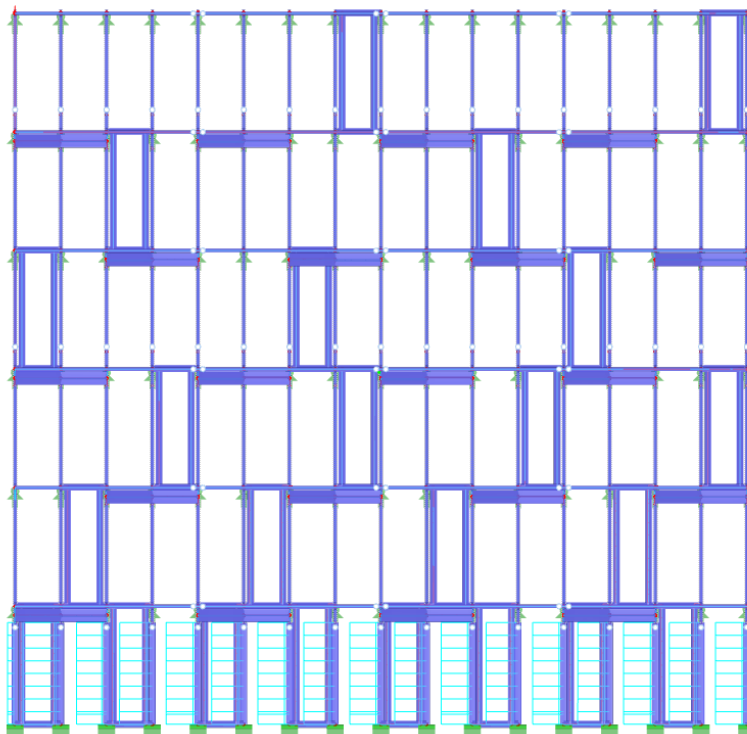


Abb. 138: Variante 1, 60 cm Auskragung, Extremwerte der Torsionsmomente im Grenzzustand der Tragfähigkeit (Maximum: 36,34 kNm)

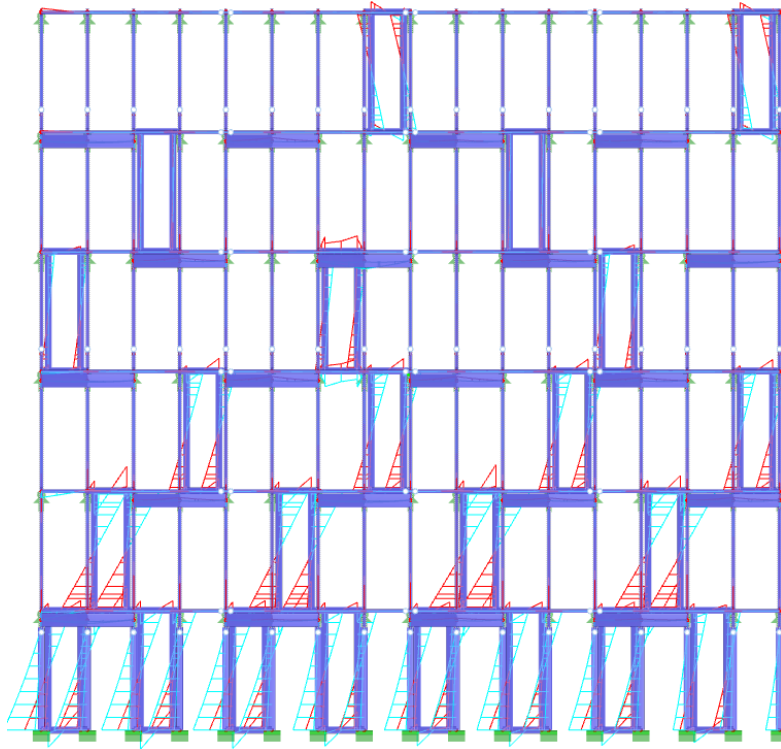


Abb. 139: Variante 1, 60 cm Auskragung, Extremwerte der Biegemomente um die Y-Achse im Grenzzustand der Tragfähigkeit (Maximum: 67,98 kNm)

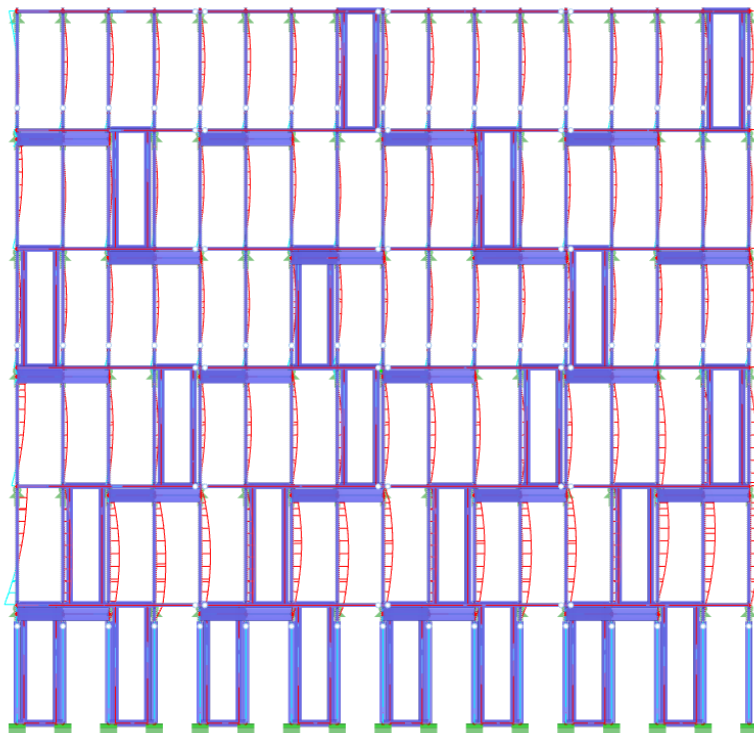


Abb. 140: Variante 1, 60 cm Auskragung, Extremwerte der Biegemomente um die Z-Achse im Grenzzustand der Tragfähigkeit (Maximum: 10,60 kNm)

Die Schnittgrößenverteilungen bei Variante 1 mit 80 cm Auskragung und mit 100 cm Auskragung werden nicht angeführt, da die Unterschiede zu den abgebildeten Schnittgrößenverteilungen bei 60 cm Auskragung marginal sind.

8.9.3 Variante 1 – Stützen durchgehend – 60 cm Auskrragung

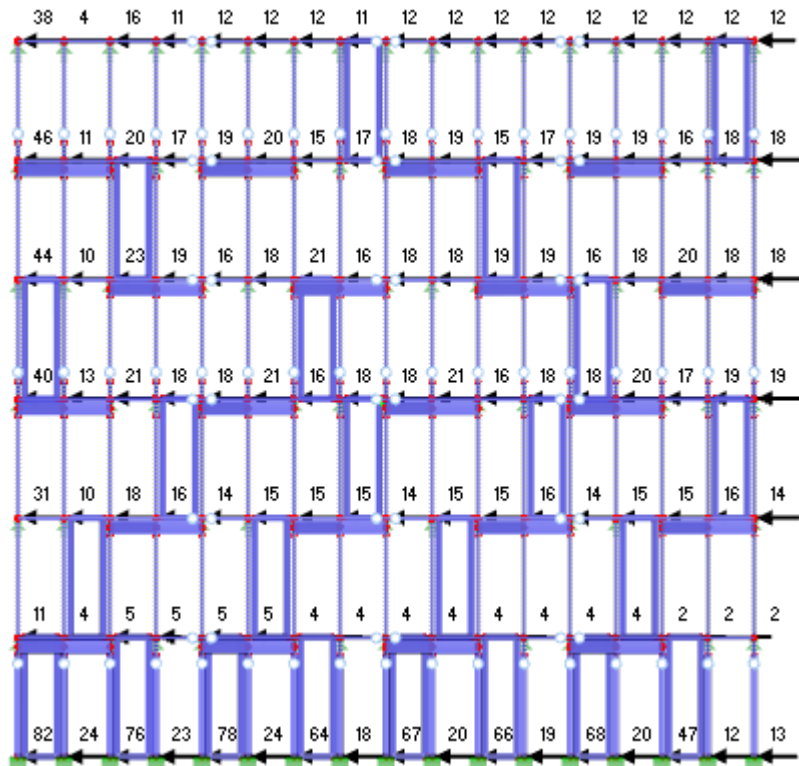


Abb. 141: Variante 1, 60 cm Auskrragung, Maximalwerte der Lagerreaktionen in X-Richtung

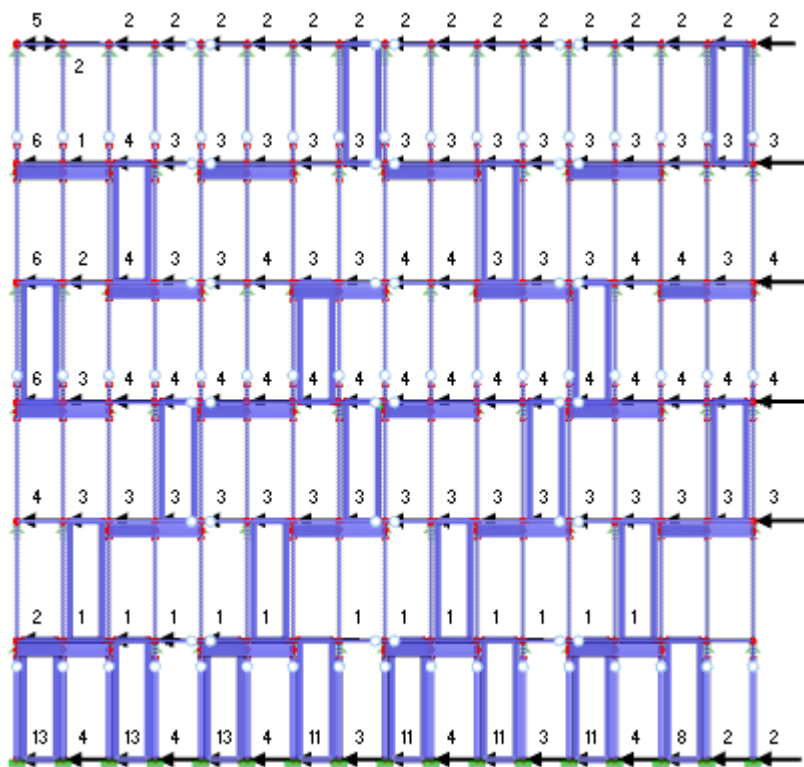


Abb. 142: Variante 1, 60 cm Auskrragung, Minimalwerte der Lagerreaktionen in X-Richtung

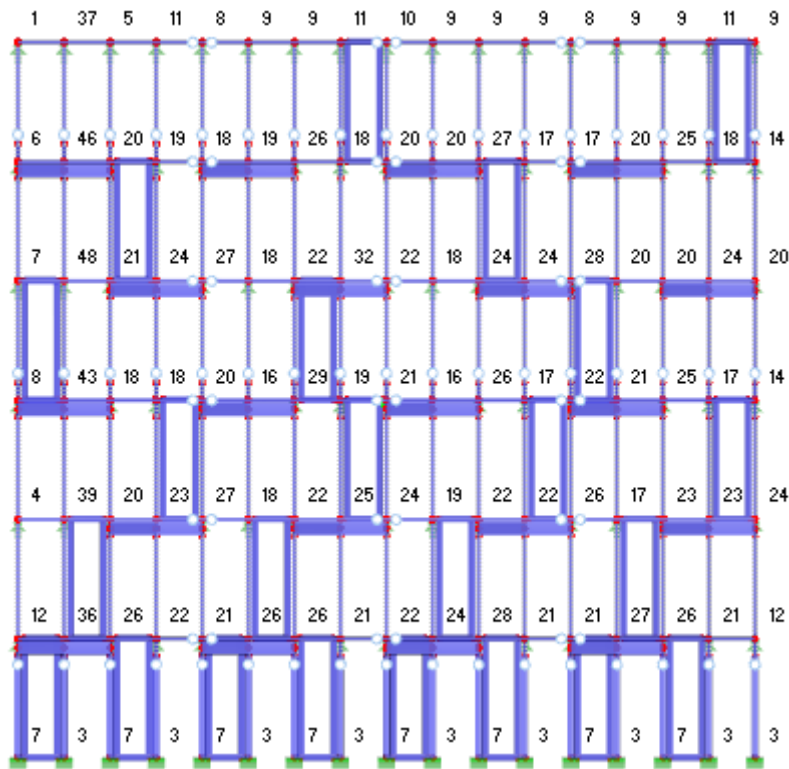


Abb. 143: Variante 1, 60 cm Auskrugung, Maximalwerte der Lagerreaktionen in Y-Richtung

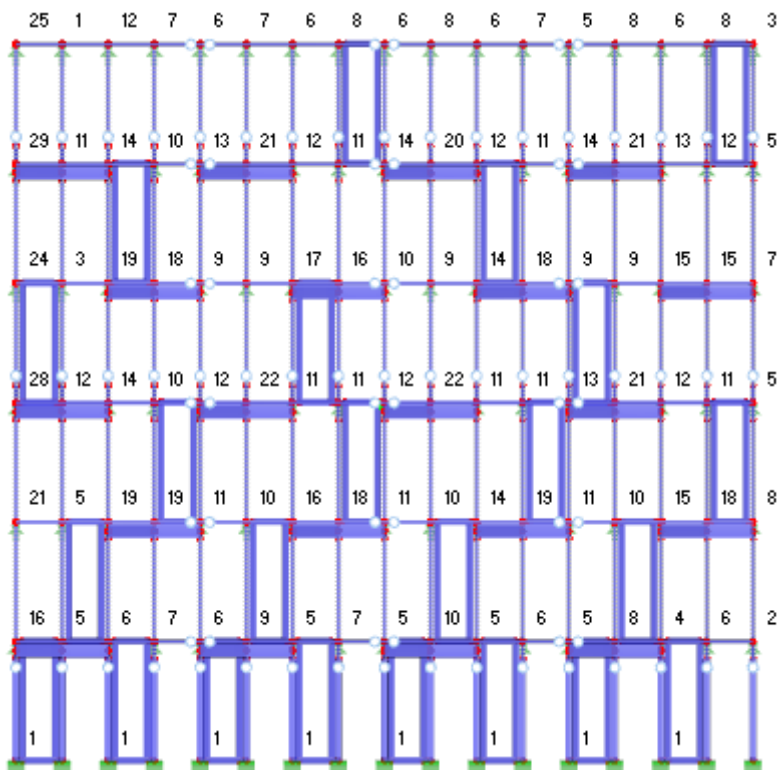


Abb. 144: Variante 1, 60 cm Auskrugung, Minimalwerte der Lagerreaktionen in Y-Richtung

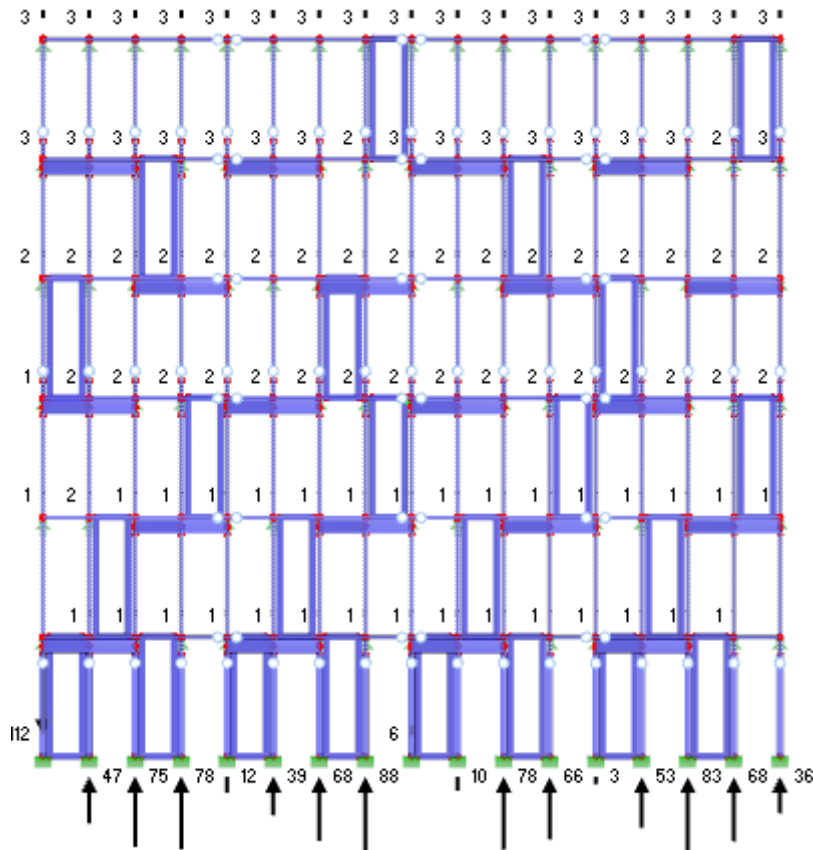


Abb. 145: Variante 1, 60 cm Auskrägung, Maximalwerte der Lagerreaktionen in Z-Richtung

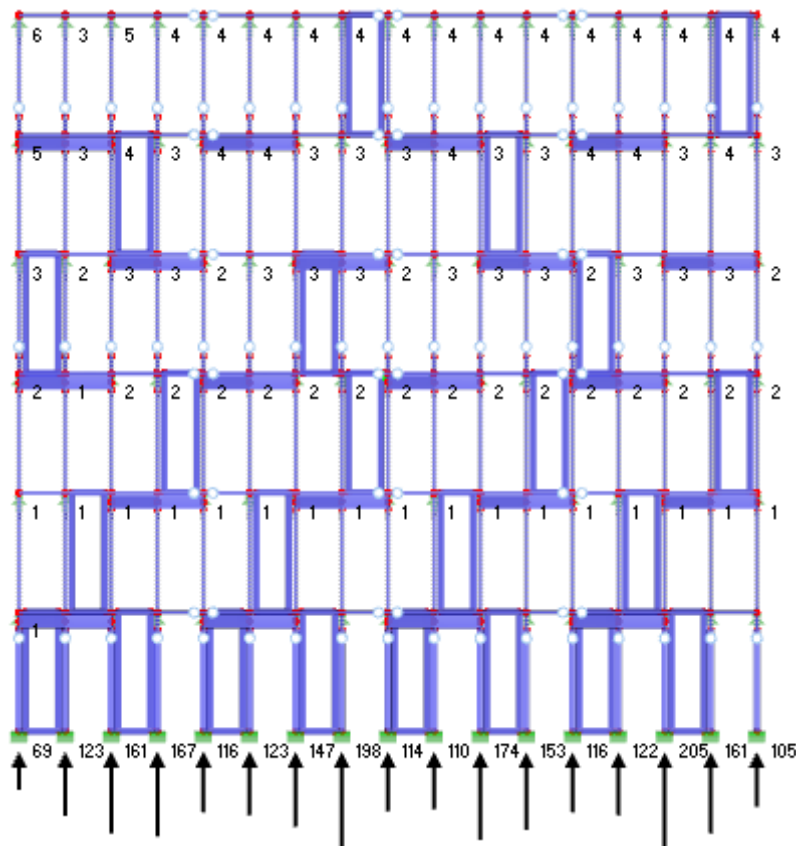


Abb. 146: Variante 1, 60 cm Auskrägung, Minimalwerte der Lagerreaktionen in Z-Richtung

8.9.4 Variante 1 – Stützen durchgehend – 80 cm Auskragung

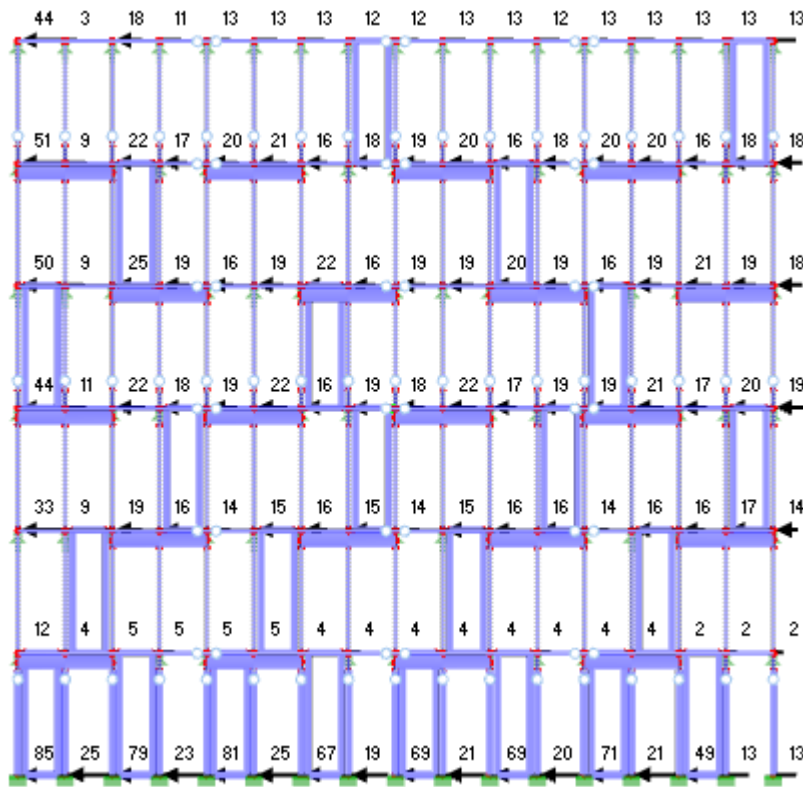


Abb. 147: Variante 1, 80 cm Auskragung, Maximalwerte der Lagerreaktionen in X-Richtung

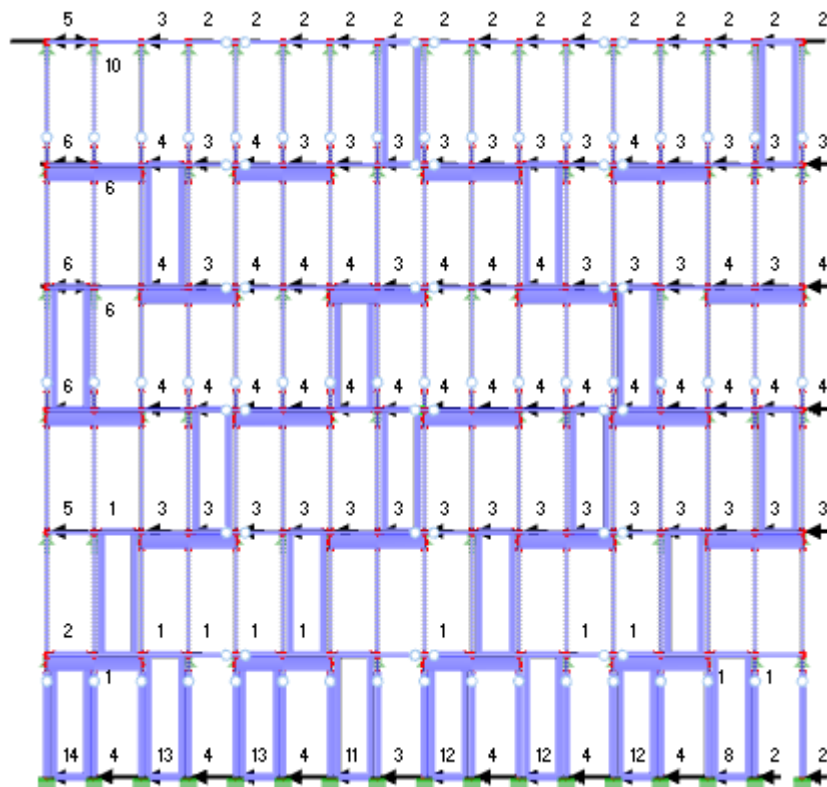


Abb. 148: Variante 1, 80 cm Auskragung, Minimalwerte der Lagerreaktionen in X-Richtung

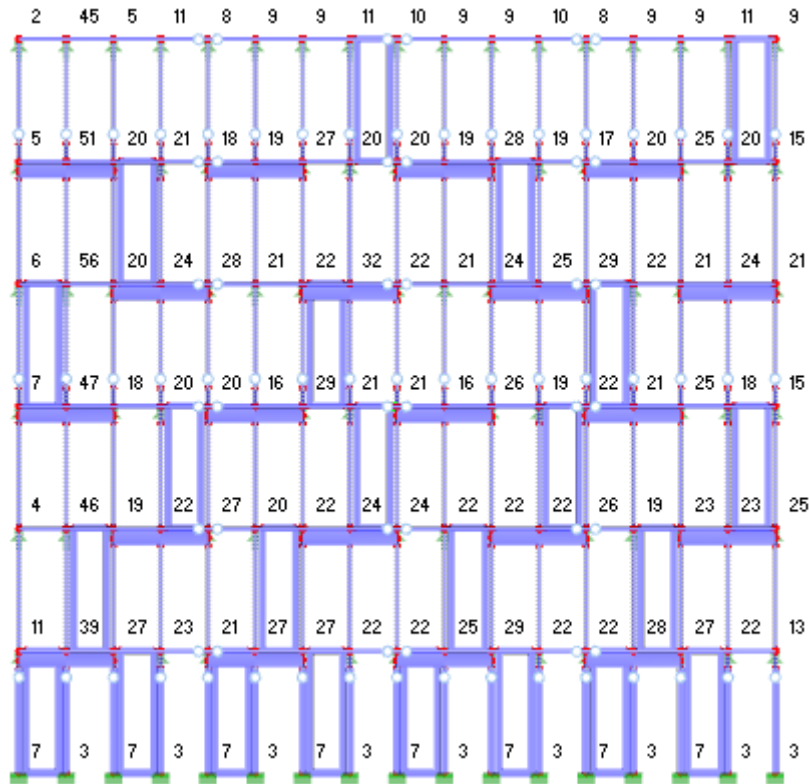


Abb. 149: Variante 1, 80 cm Auskrägung, Maximalwerte der Lagerreaktionen in Y-Richtung

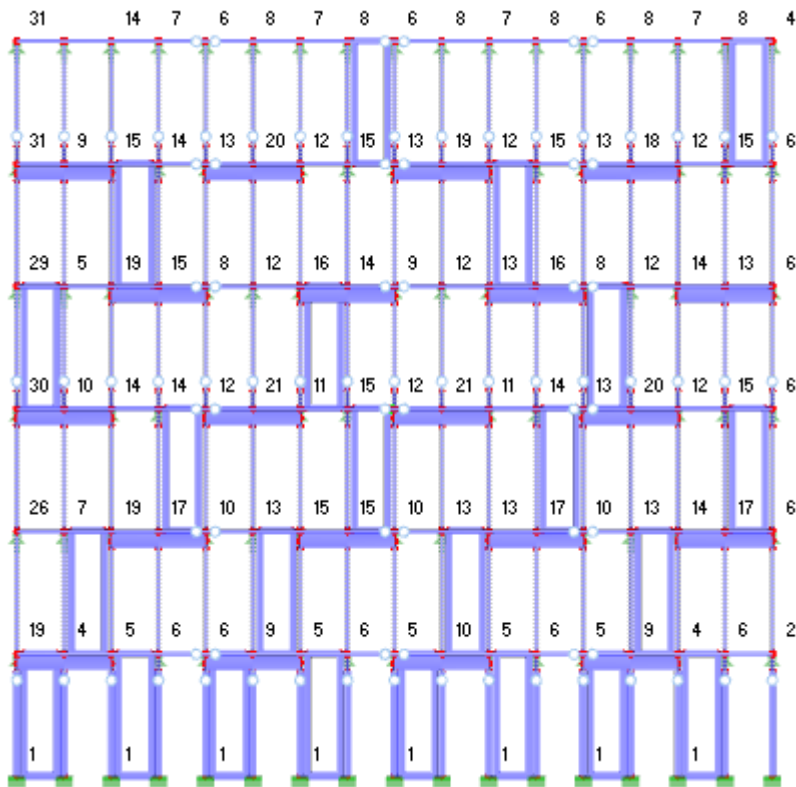


Abb. 150: Variante 1, 80 cm Auskrägung, Minimalwerte der Lagerreaktionen in Y-Richtung

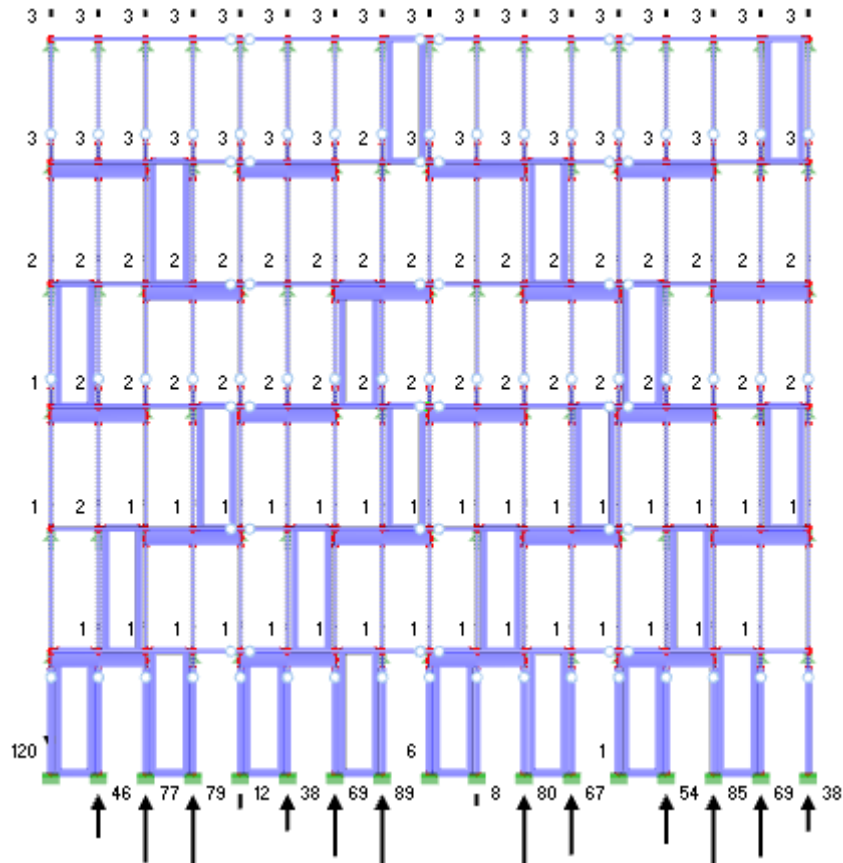


Abb. 151: Variante 1, 80 cm Auskrugung, Maximalwerte der Lagerreaktionen in Z-Richtung

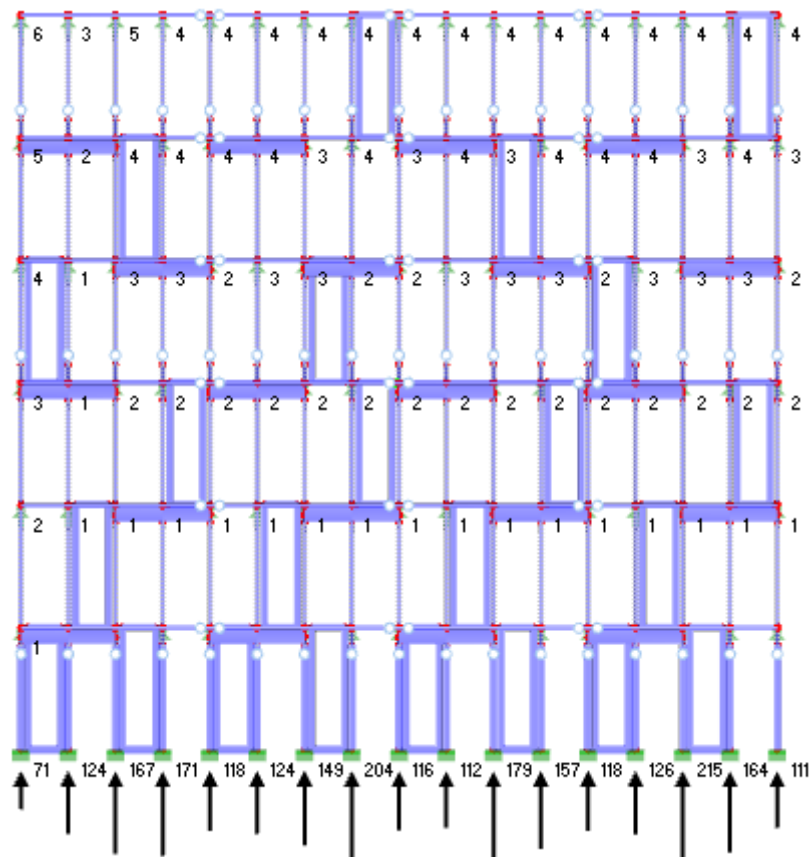


Abb. 152: Variante 1, 80 cm Auskrugung, Minimalwerte der Lagerreaktionen in Z-Richtung

8.9.5 Variante 1 – Stützen durchgehend – 100 cm Auskrägung

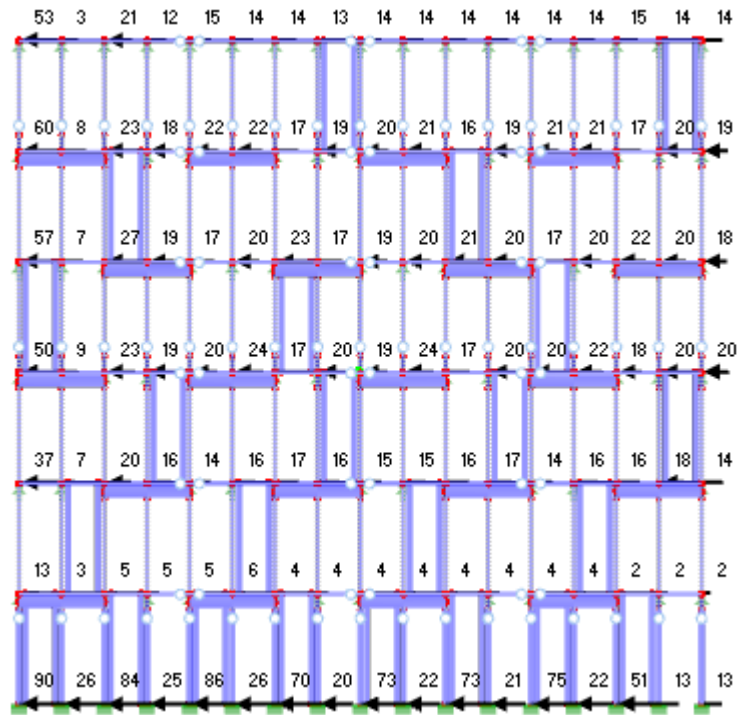


Abb. 153: Variante 1, 100 cm Auskrägung, Maximalwerte der Lagerreaktionen in X-Richtung



Abb. 154: Variante 1, 100 cm Auskrägung, Minimalwerte der Lagerreaktionen in X-Richtung

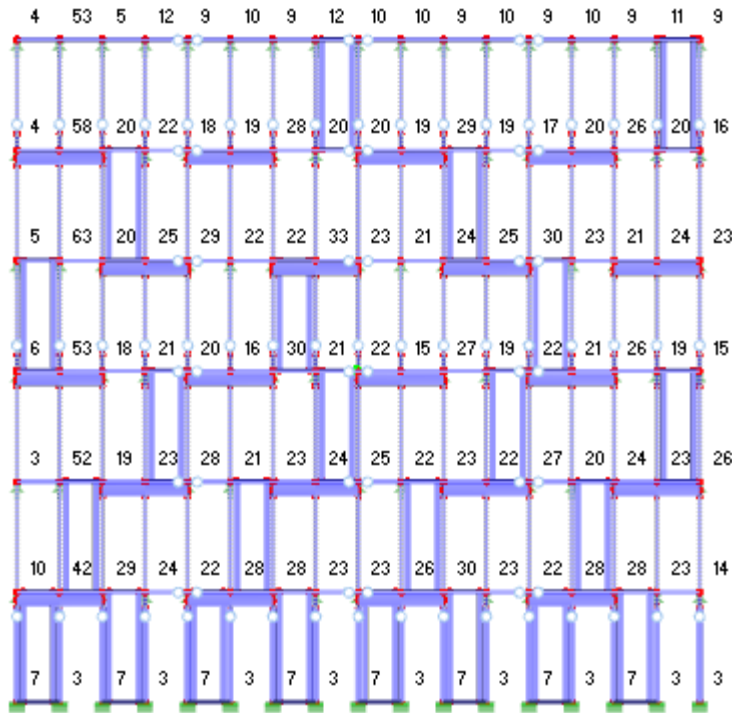


Abb. 155: Variante 1, 100 cm Auskragung, Maximalwerte der Lagerreaktionen in Y-Richtung

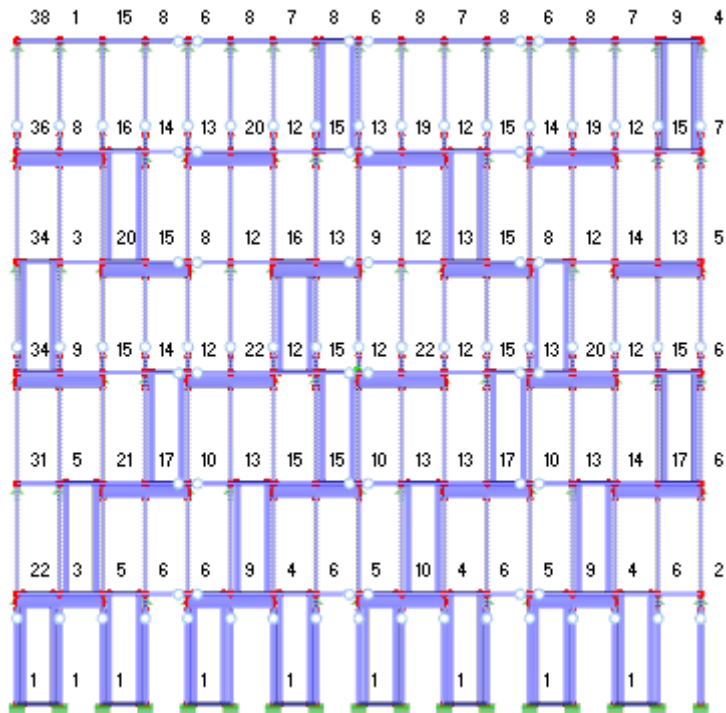


Abb. 156: Variante 1, 100 cm Auskragung, Minimalwerte der Lagerreaktionen in Y-Richtung

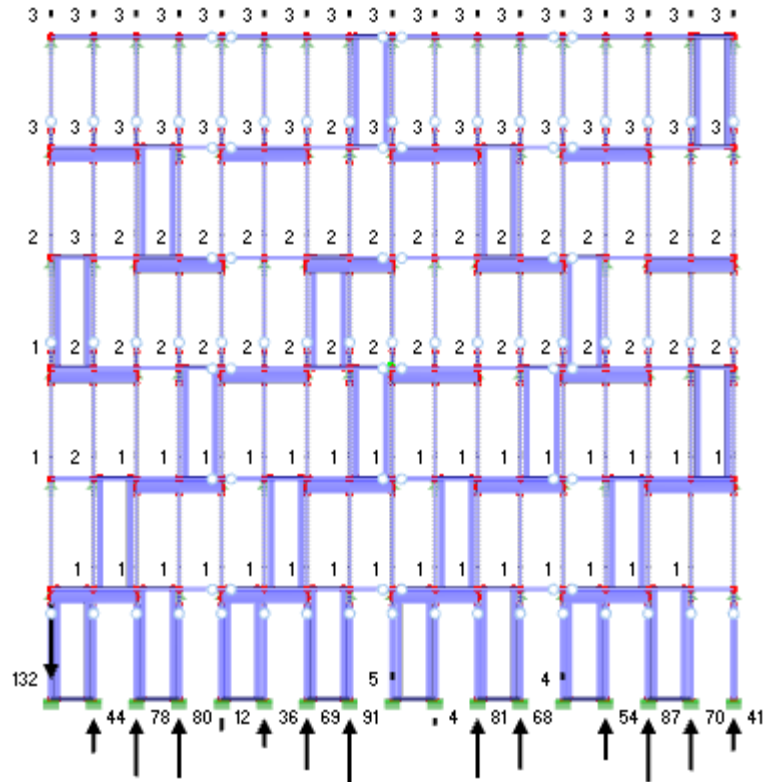


Abb. 157: Variante 1, 100 cm Auskrugung, Maximalwerte der Lagerreaktionen in Z-Richtung

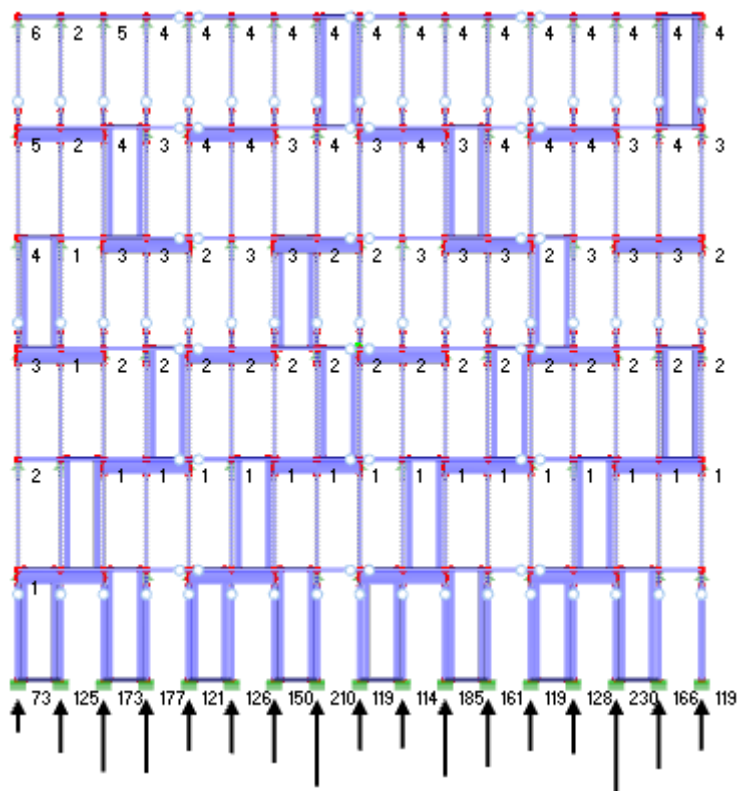
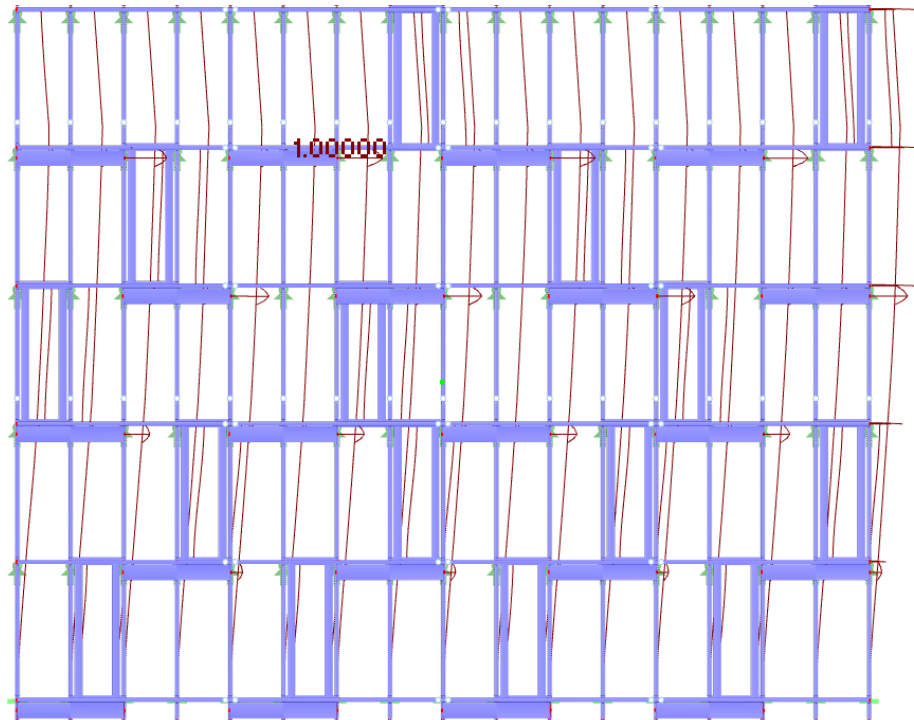
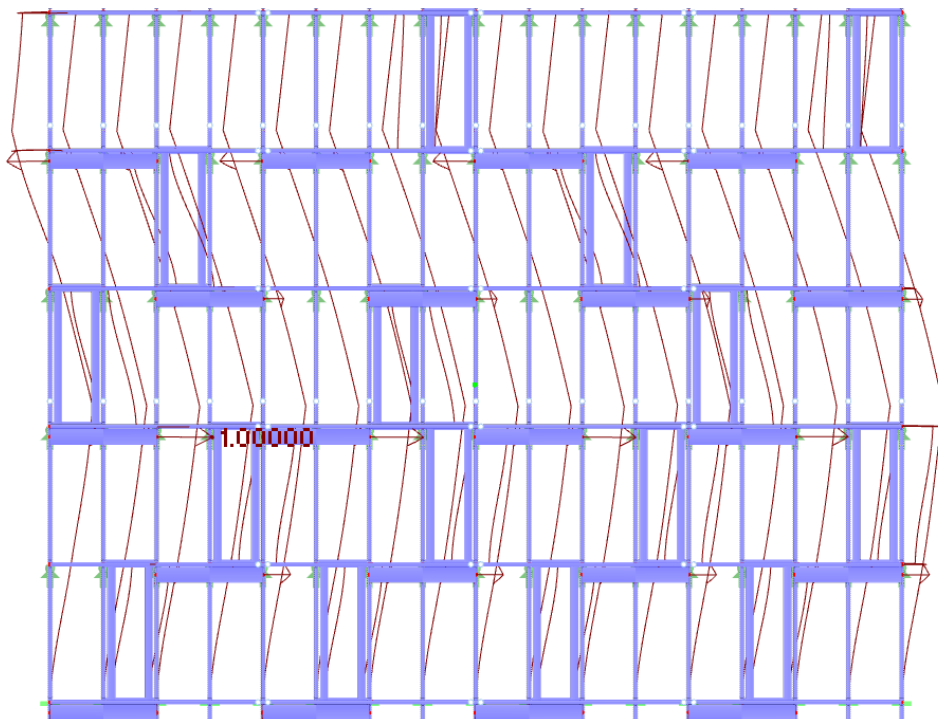


Abb. 158: Variante 1, 100 cm Auskrugung, Minimalwerte der Lagerreaktionen in Z-Richtung

8.9.6 Variante 2 – Stützen unterfangen – Knickfiguren

Abb. 159: Variante 2, 60 cm Auskrägung, erste Eigenform bei 3.938 Hz, in Y-RichtungAbb. 160: Variante 2, 60 cm Auskrägung, zweite Eigenform bei 5.752 Hz, in Y-Richtung

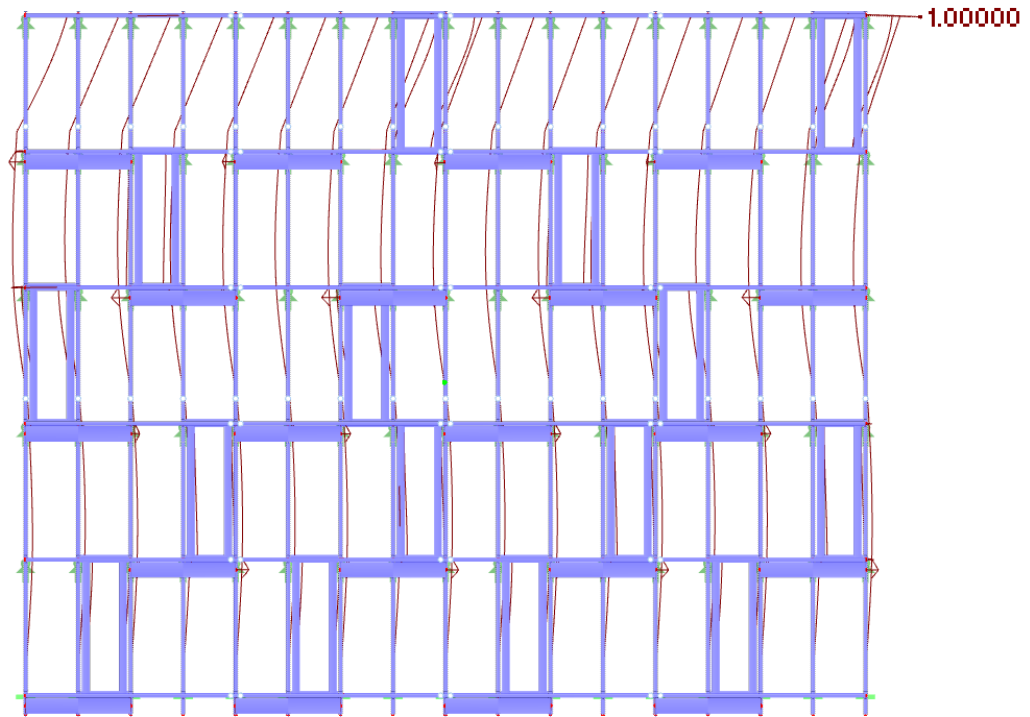


Abb. 161: Variante 2, 60 cm Auskrägung, dritte Eigenform bei 7.881 Hz, in Y-Richtung

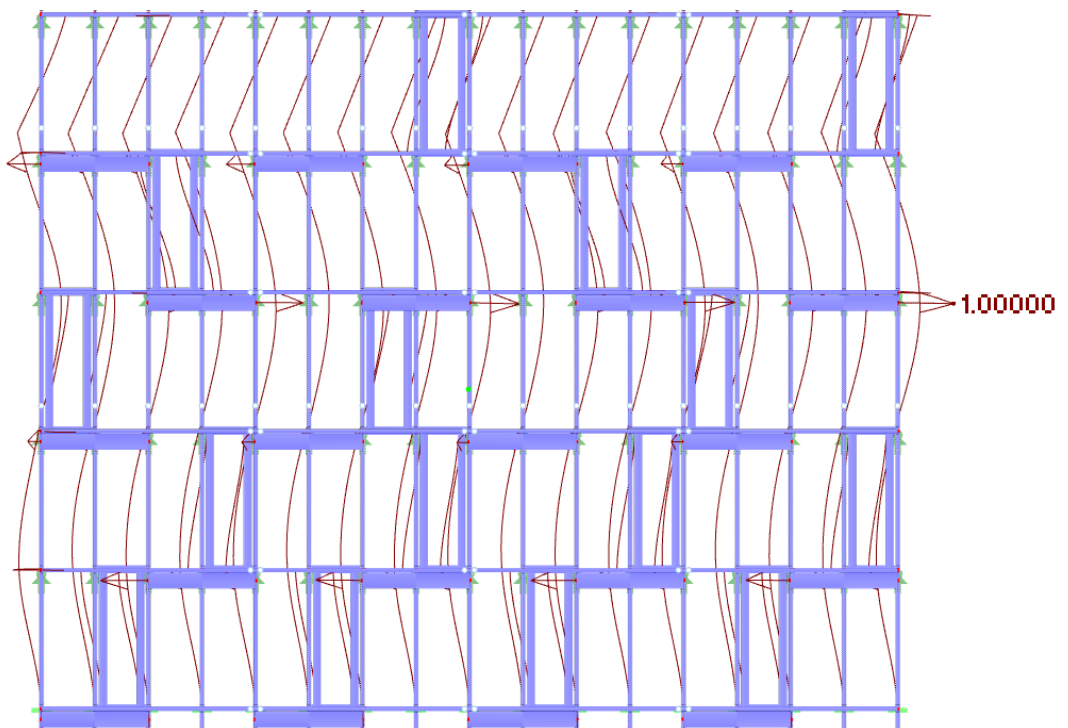


Abb. 162: Variante 2, 60 cm Auskrägung, vierte Eigenform bei 8.441 Hz, in Y-Richtung

Die Knickfiguren bei Variante 2 mit 80 cm Auskrägung und mit 100 cm Auskrägung werden nicht angeführt, da die Unterschiede zu den abgebildeten Knickfiguren bei 60 cm Auskrägung marginal sind.

8.9.7 Variante 2 – Stützen unterfangen – Schnittgrößenverteilungen

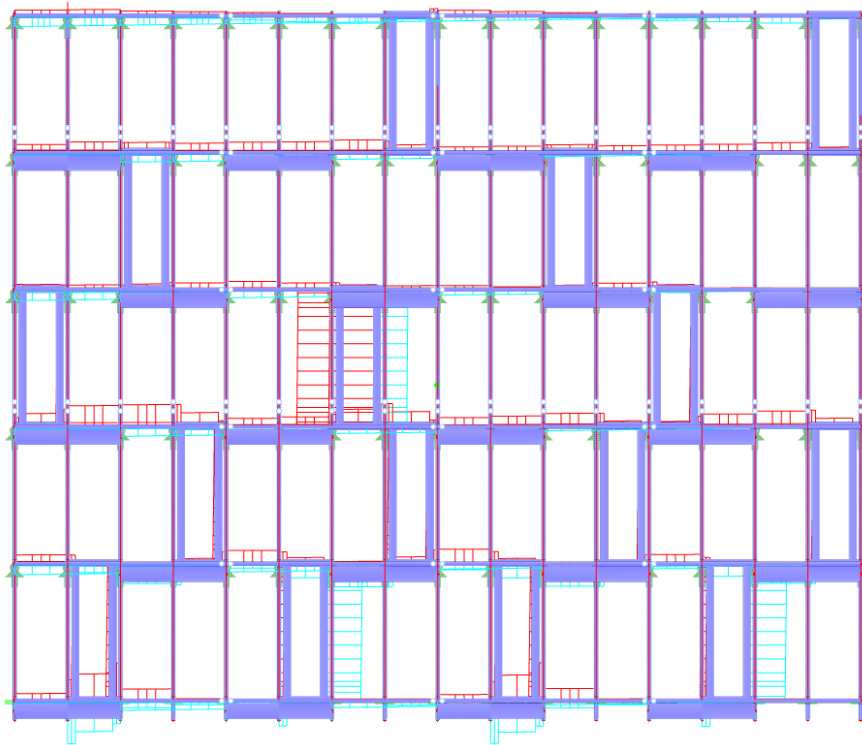


Abb. 163: Variante 2, 60 cm Auskragung, Extremwerte der Normalkräfte im Grenzzustand der Tragfähigkeit (Maximum: 115,47 kN)

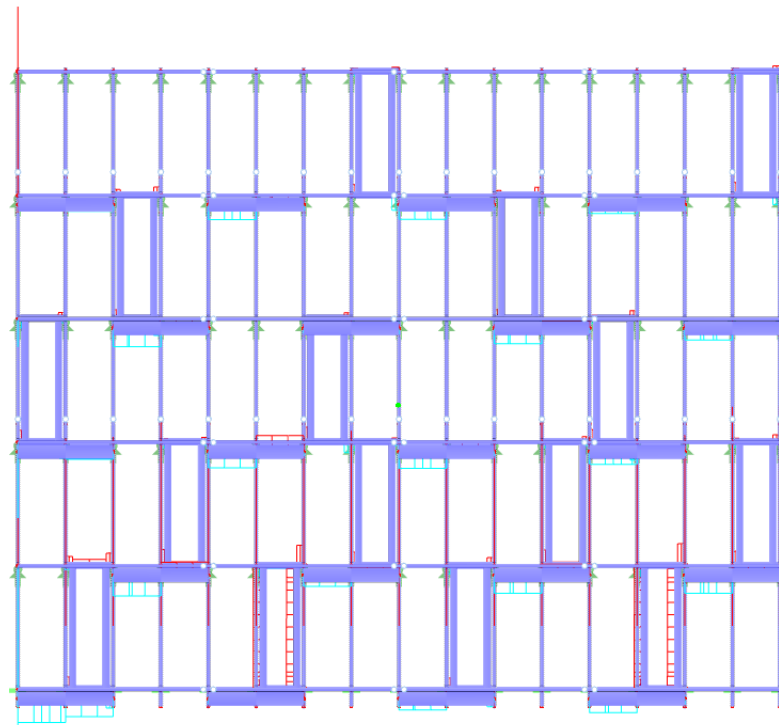


Abb. 164: Variante 2, 60 cm Auskragung, Extremwerte der Torsionsmomente im Grenzzustand der Tragfähigkeit (Maximum: 6,42 kNm)

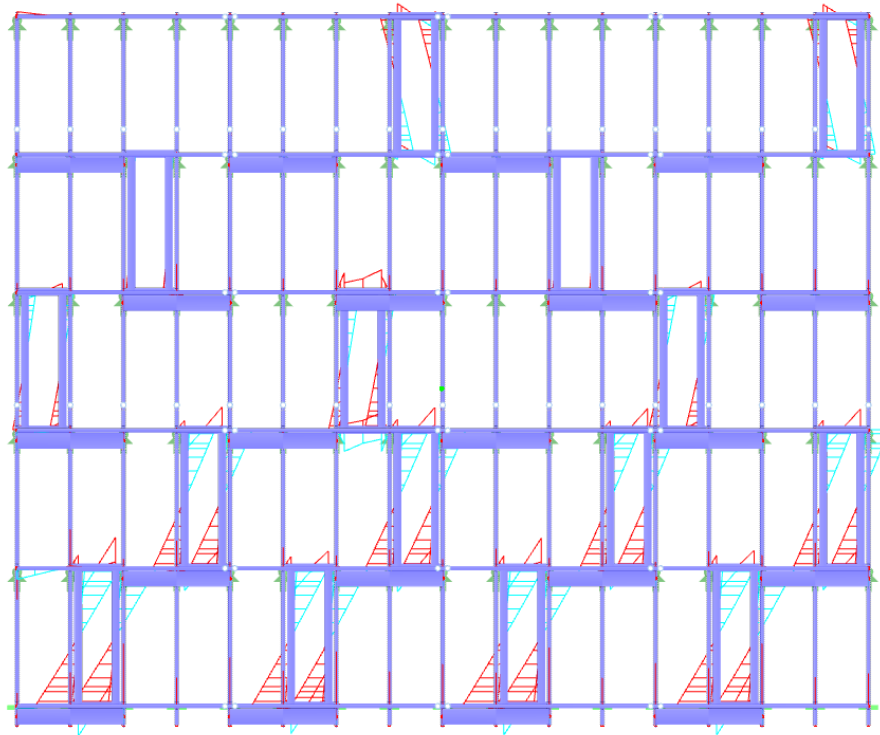


Abb. 165: Variante 2, 60 cm Auskrägung, Extremwerte der Biegemomente um die Y-Achse im Grenzzustand der Tragfähigkeit (Maximum: 61,06 kNm)

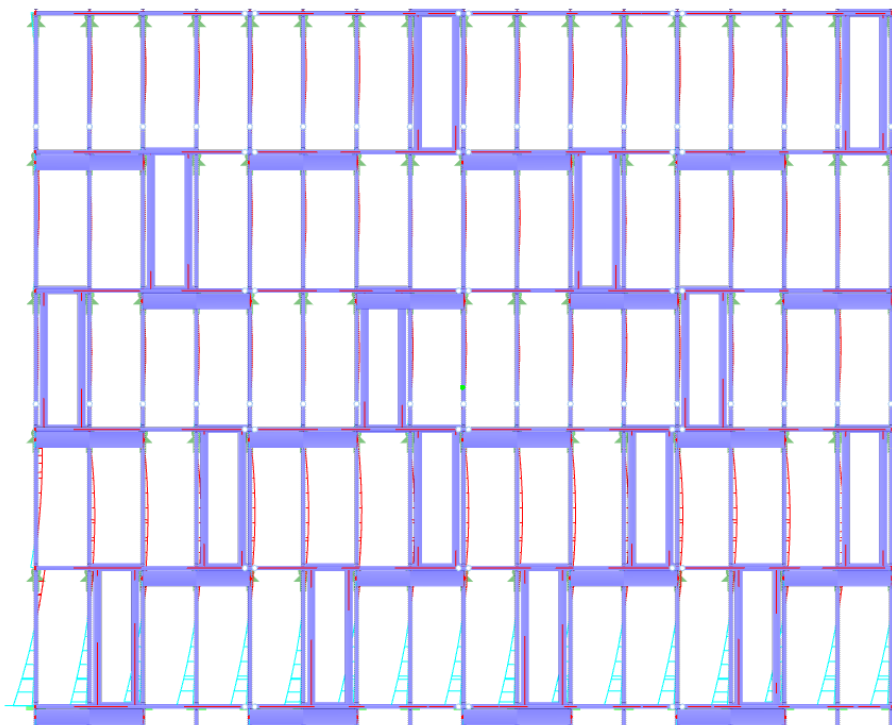


Abb. 166: Variante 2, 60 cm Auskrägung, Extremwerte der Biegemomente um die Z-Achse im Grenzzustand der Tragfähigkeit (Maximum: 41,42 kNm)

Die Schnittgrößenverteilungen bei Variante 2 mit 80 cm Auskrägung und mit 100 cm Auskrägung werden nicht angeführt, da die Unterschiede zu den abgebildeten Schnittgrößenverteilungen bei 60 cm Auskrägung marginal sind.

8.9.8 Variante 2 – Stützen unterfangen – 60 cm Auskragung

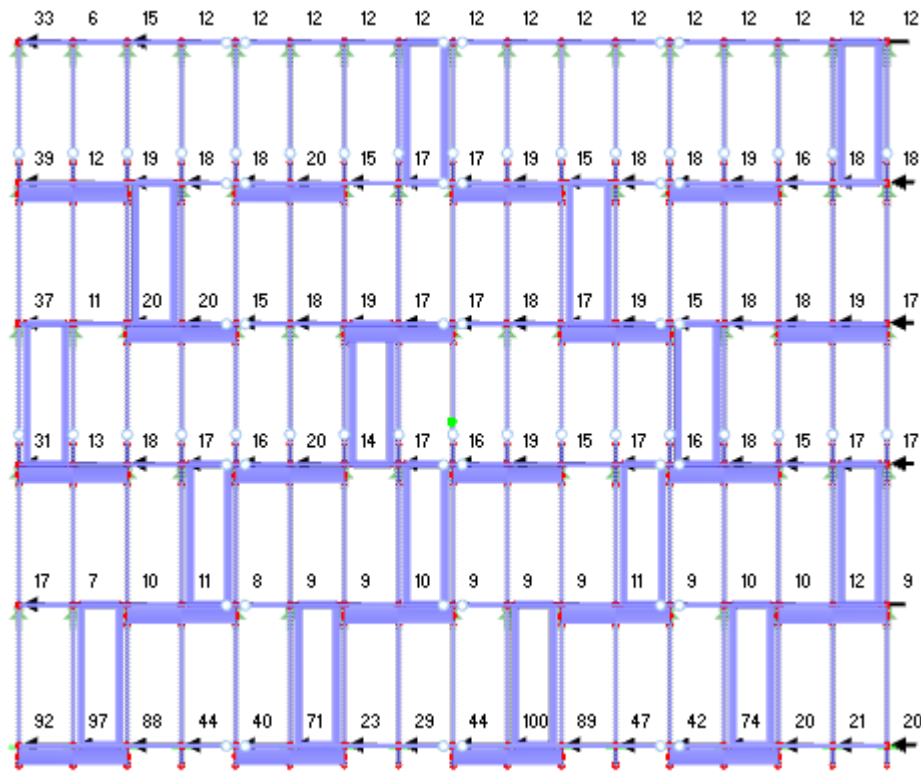


Abb. 167: Variante 2, 60 cm Auskragung, Maximalwerte der Lagerreaktionen in X-Richtung

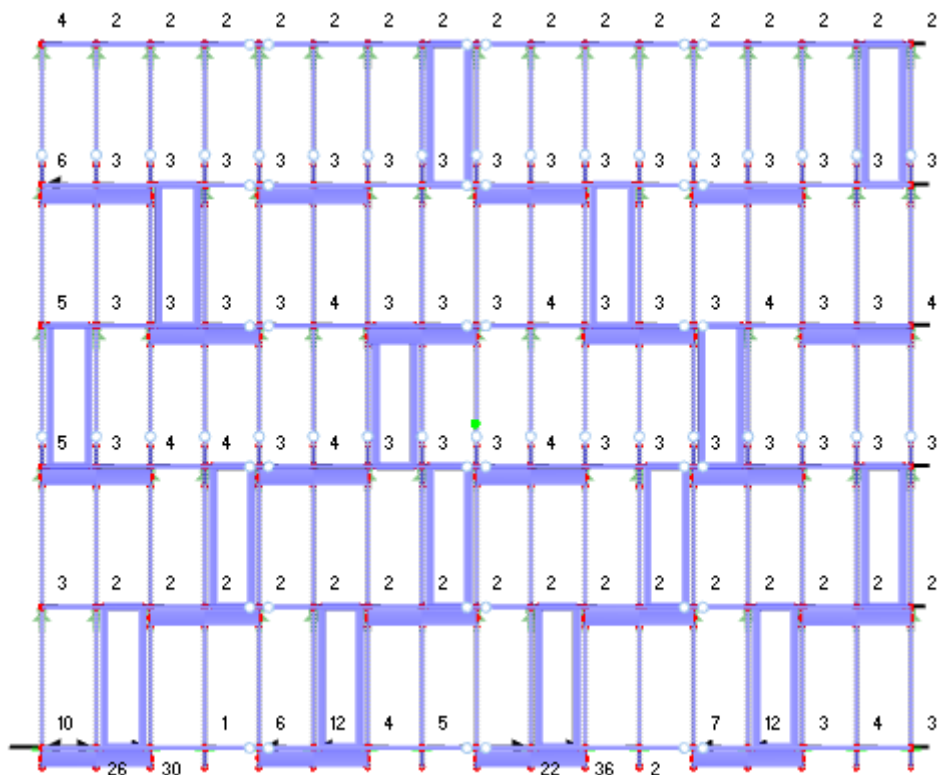


Abb. 168: Variante 2, 60 cm Auskragung, Minimalwerte der Lagerreaktionen in X-Richtung

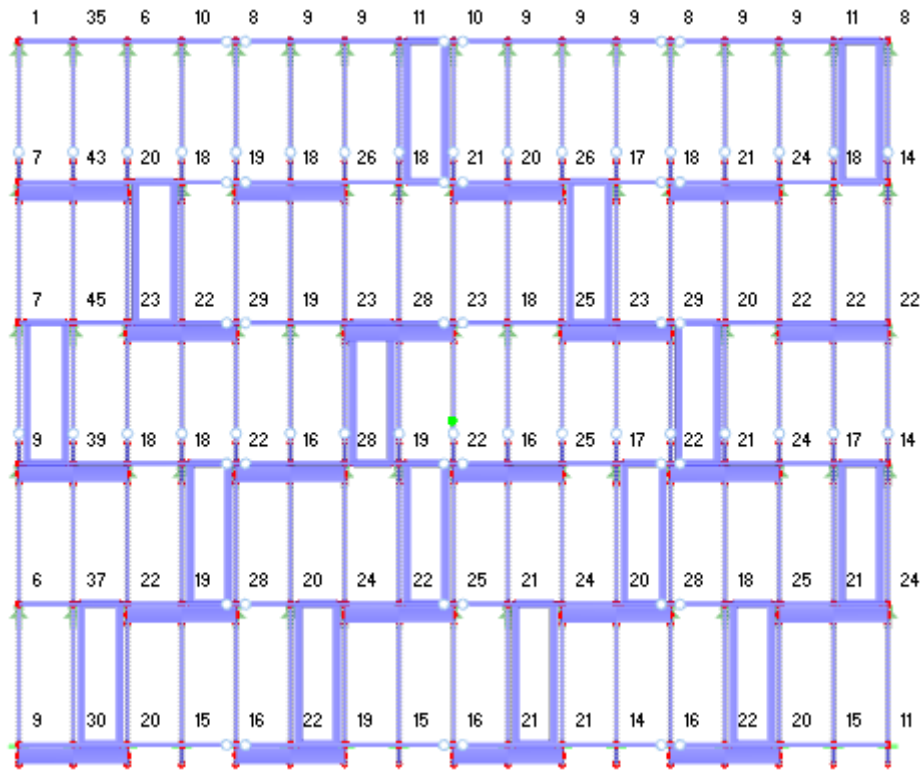


Abb. 169: Variante 2, 60 cm Auskrugung, Maximalwerte der Lagerreaktionen in Y-Richtung

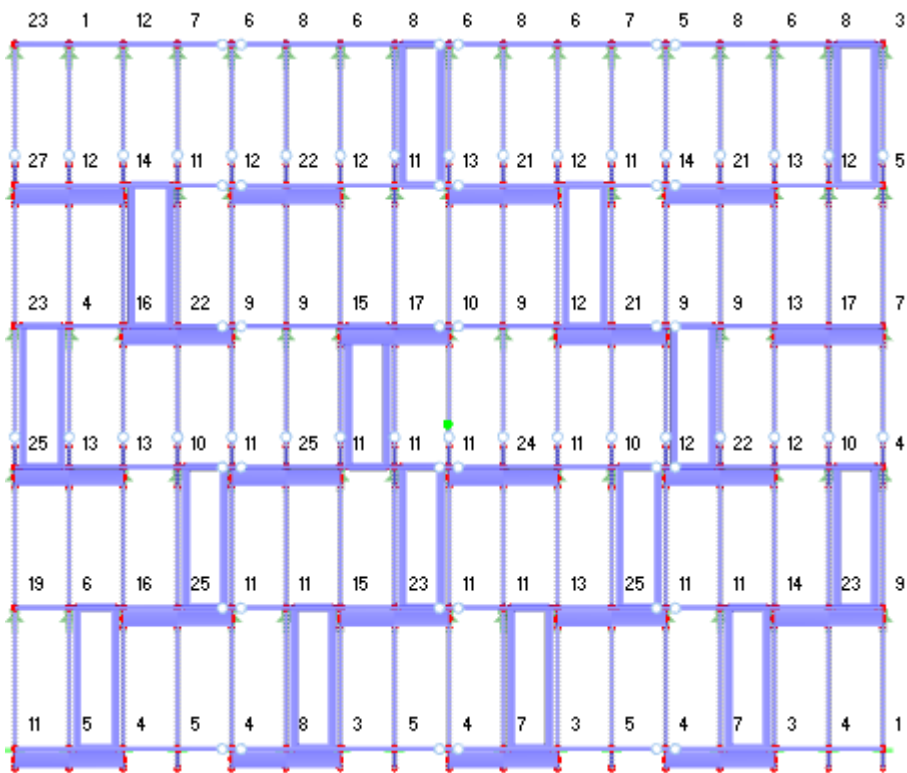


Abb. 170: Variante 2, 60 cm Auskrugung, Minimalwerte der Lagerreaktionen in Y-Richtung

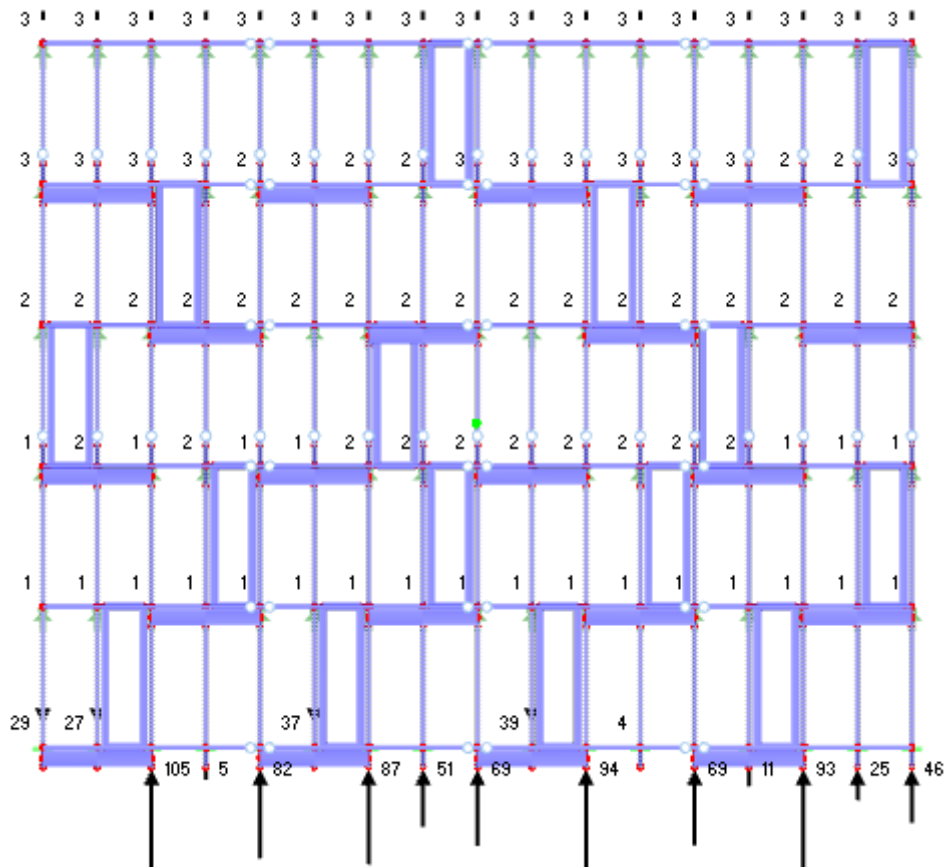


Abb. 171: Variante 2, 60 cm Ausragung, Maximalwerte der Lagerreaktionen in Z-Richtung

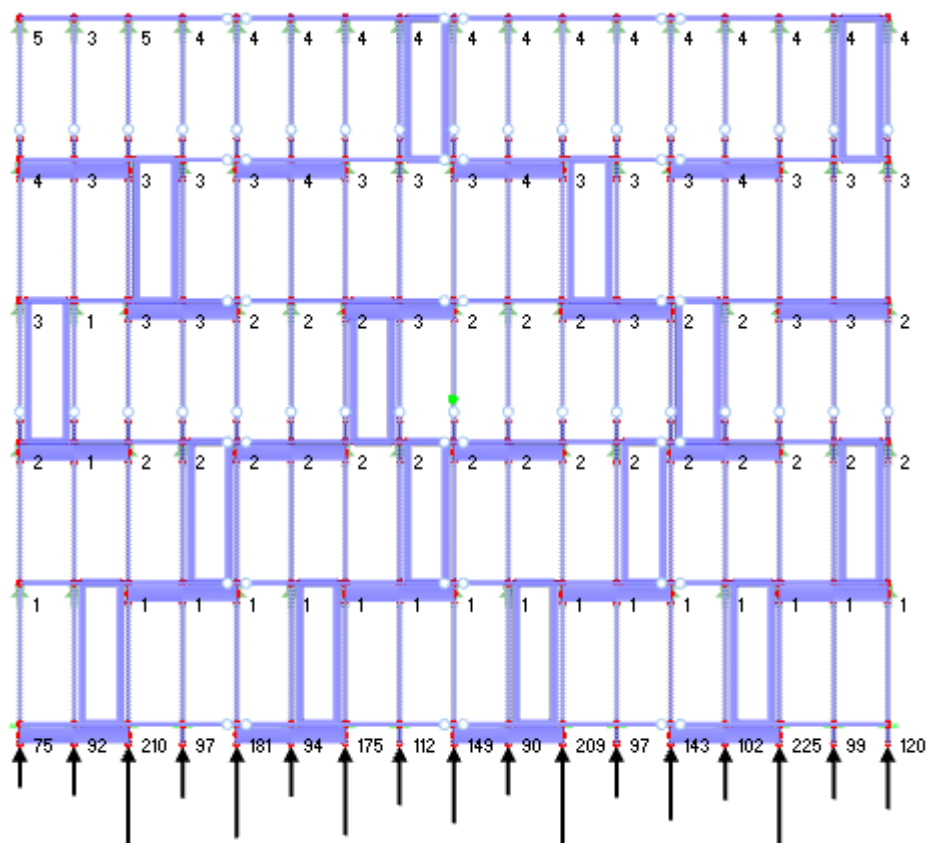


Abb. 172: Variante 2, 60 cm Ausragung, Minimalwerte der Lagerreaktionen in Z-Richtung

8.9.9 Variante 2 – Stützen unterfangen – 80 cm Auskragung

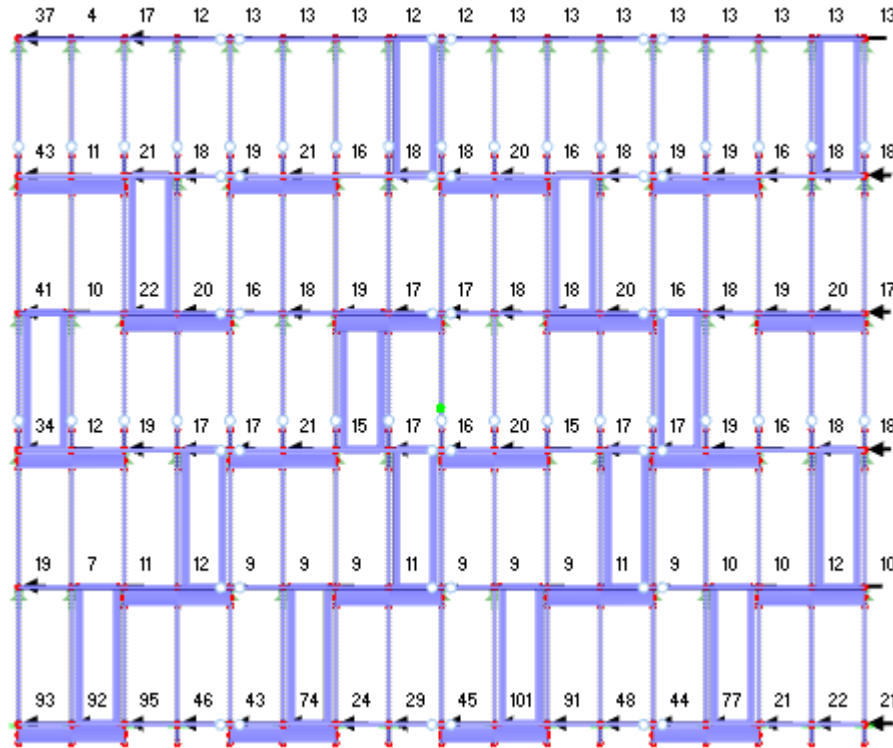


Abb. 173: Variante 2, 80 cm Auskragung, Maximalwerte der Lagerreaktionen in X-Richtung

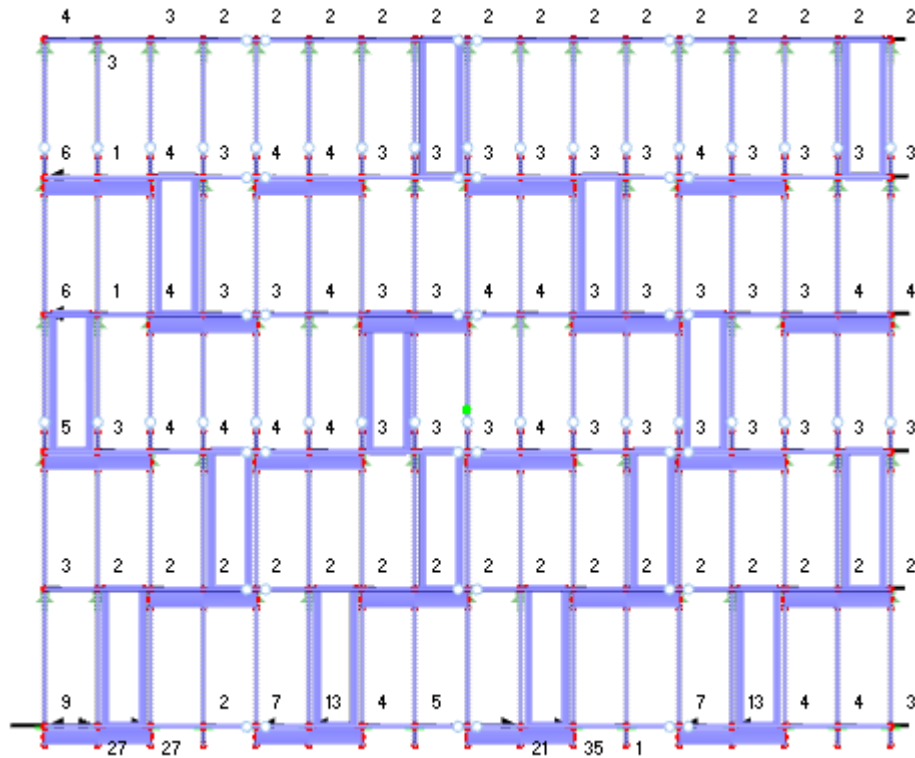


Abb. 174: Variante 2, 80 cm Auskragung, Minimalwerte der Lagerreaktionen in X-Richtung

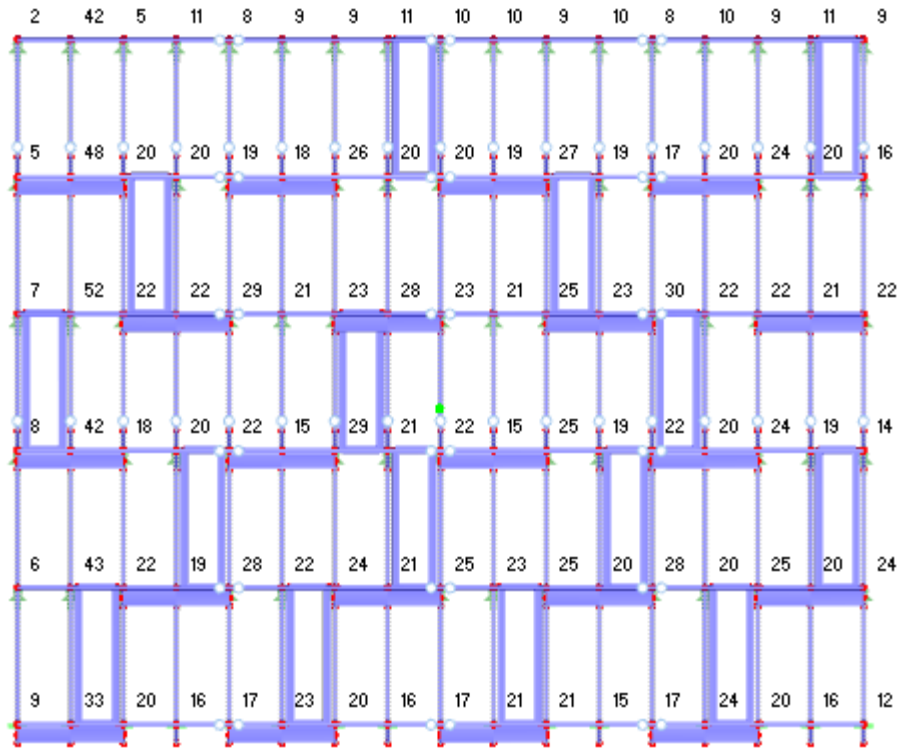


Abb. 175: Variante 2, 80 cm Auskragung, Maximalwerte der Lagerreaktionen in Y-Richtung

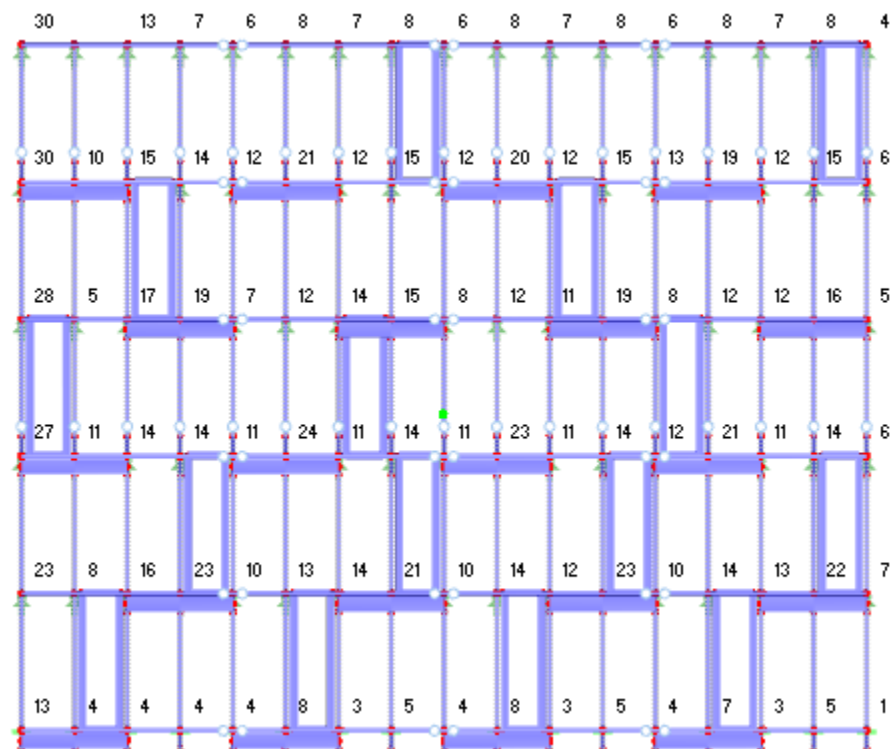


Abb. 176: Variante 2, 80 cm Auskragung, Minimalwerte der Lagerreaktionen in Y-Richtung

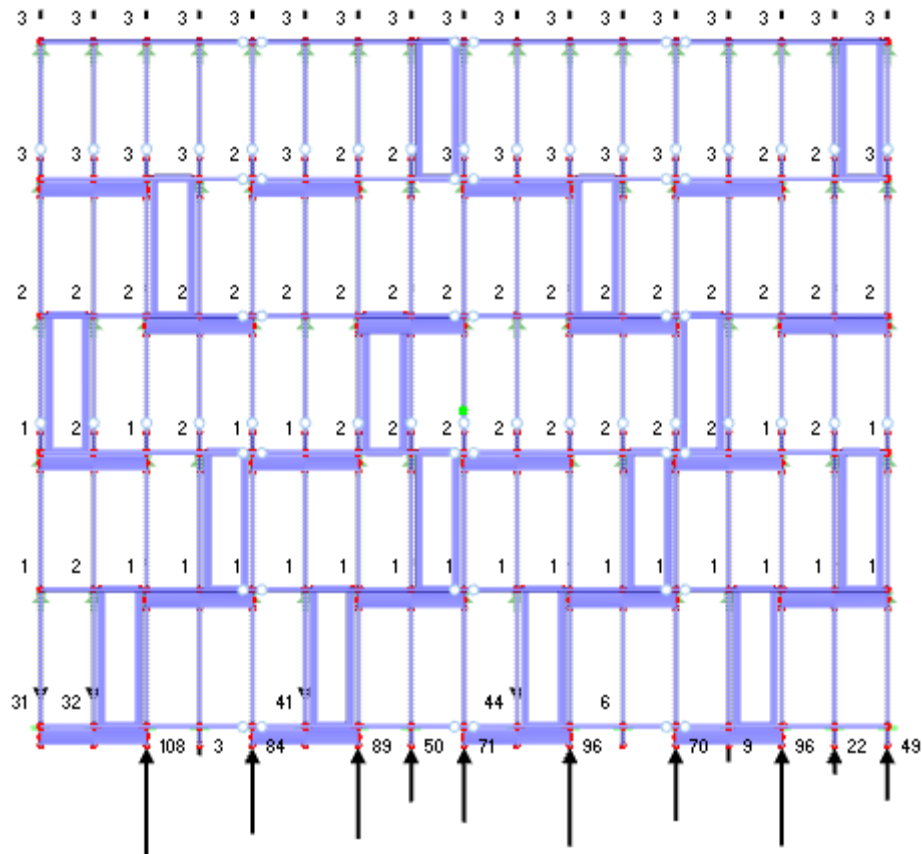


Abb. 177: Variante 2, 80 cm Auskragung, Maximalwerte der Lagerreaktionen in Z-Richtung

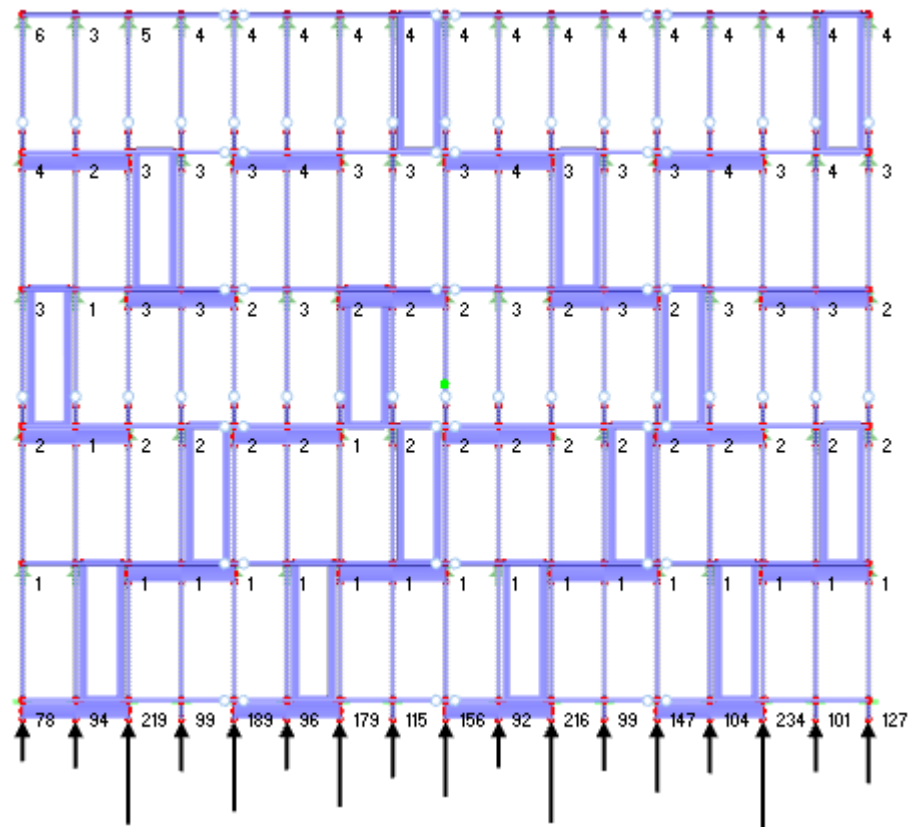


Abb. 178: Variante 2, 80 cm Auskragung, Minimalwerte der Lagerreaktionen in Z-Richtung

8.9.10 Variante 2 – Stützen unterfangen – 100 cm Auskragung

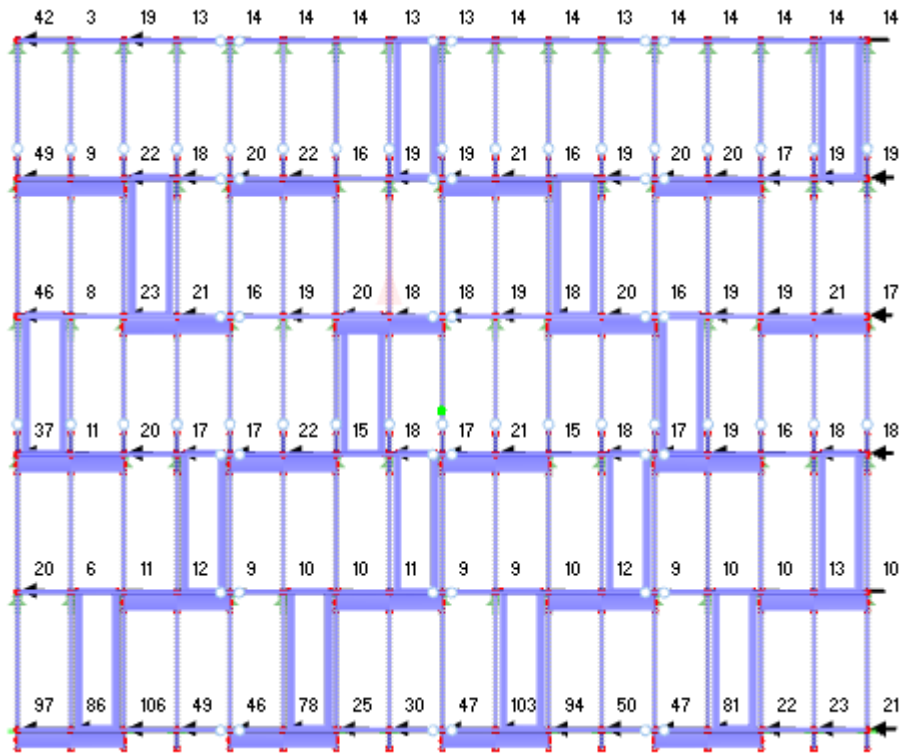


Abb. 179: Variante 2, 100 cm Auskragung, Maximalwerte der Lagerreaktionen in X-Richtung

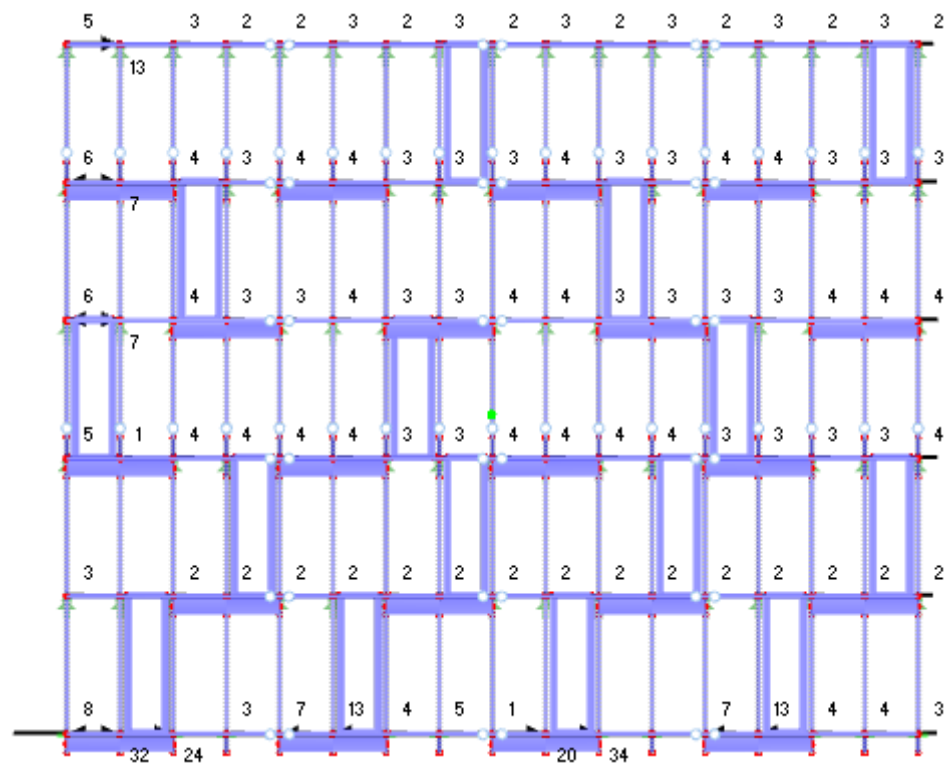


Abb. 180: Variante 2, 100 cm Auskragung, Minimalwerte der Lagerreaktionen in X-Richtung

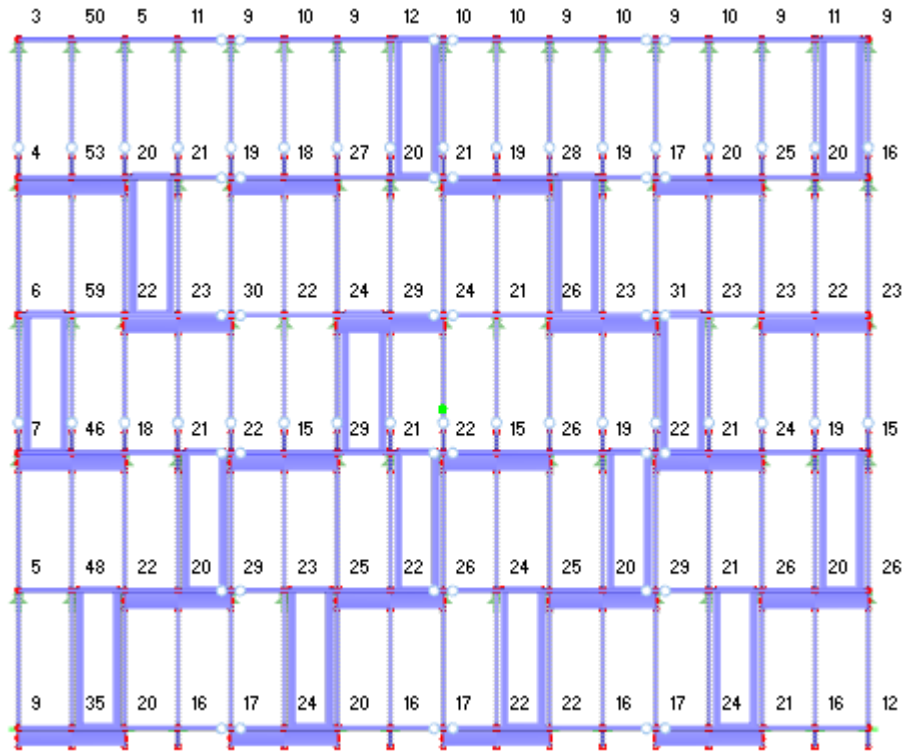


Abb. 181: Variante 2, 100 cm Auskragung, Maximalwerte der Lagerreaktionen in Y-Richtung

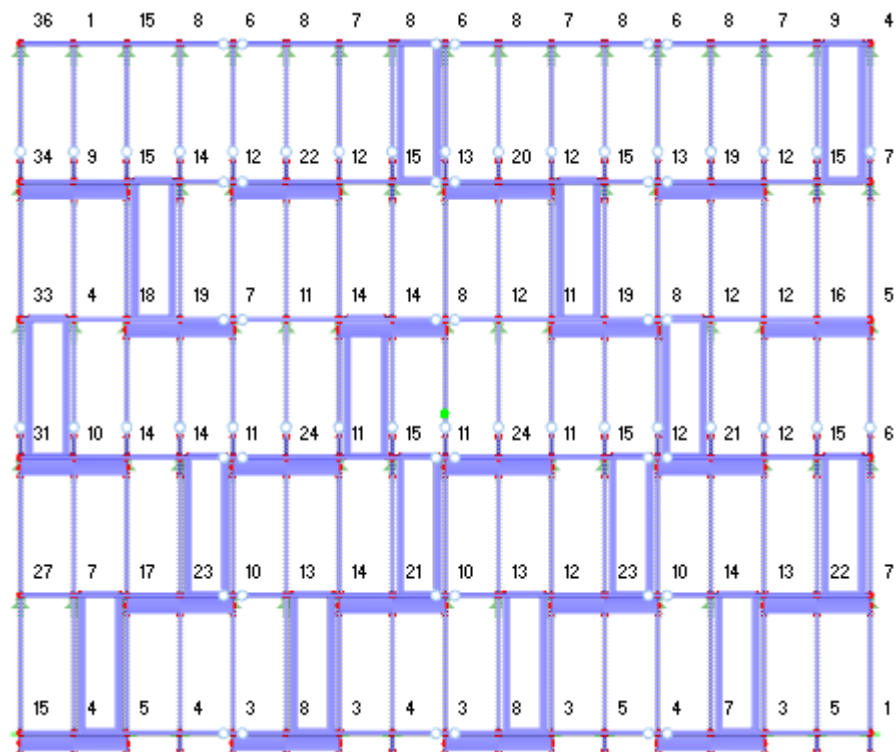


Abb. 182: Variante 2, 100 cm Auskragung, Minimalwerte der Lagerreaktionen in Y-Richtung

8.10 Eingabe der Konsolen A bis F in AnTherm®

8.10.1 Konsole A

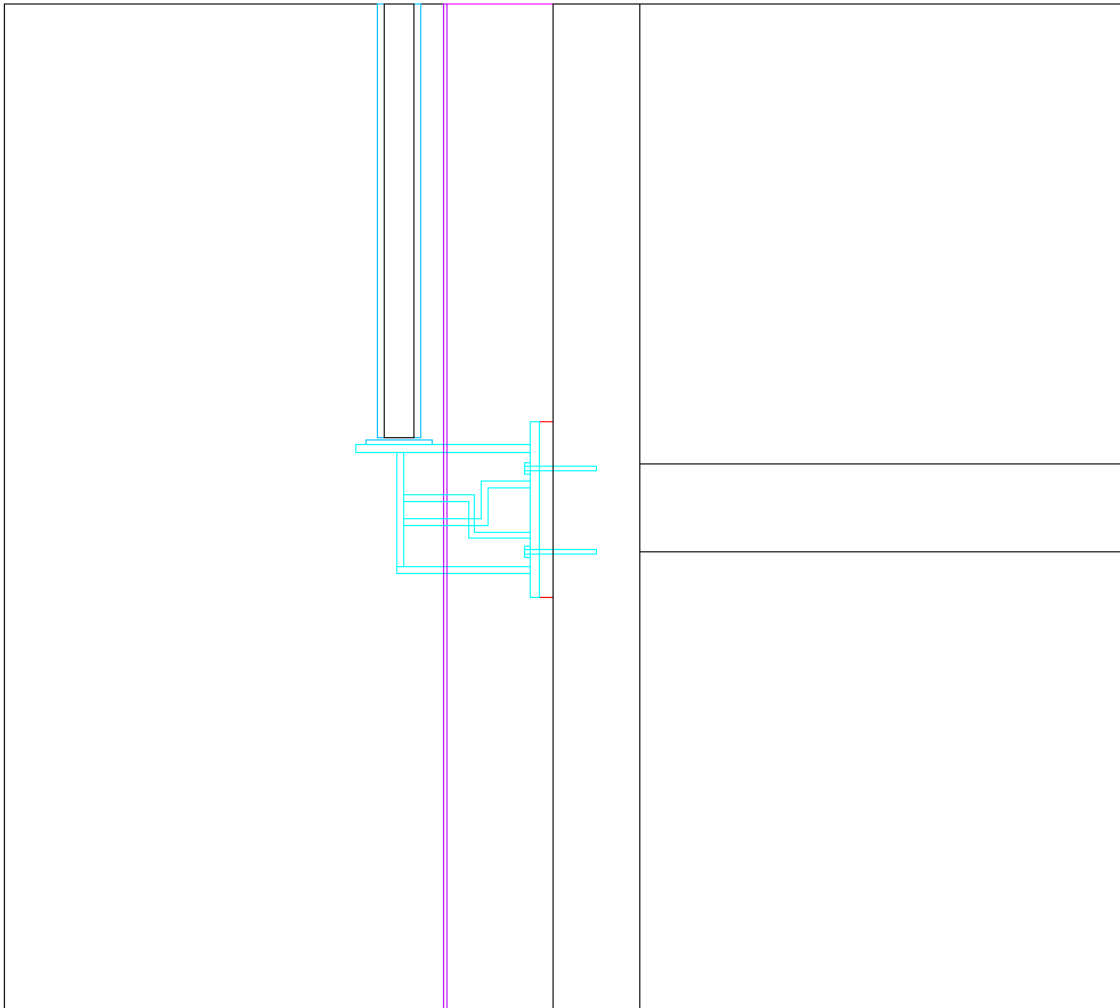


Abb. 185: Konsole A – Grundlage für Import in AnTherm®

Tab. 29: Konsole A - Eingabe Schichten in AnTherm®

Nr.	Schicht	Dicke in mm
1	Außenwand	545
2	Konsole	30
3	Konsole / Stützenwand	20
4	Konsole / Stütze	160
5	Konsole / Stützenwand	20
6	Konsole	30
7	Außenwand	545
-		gesamt: 1.350

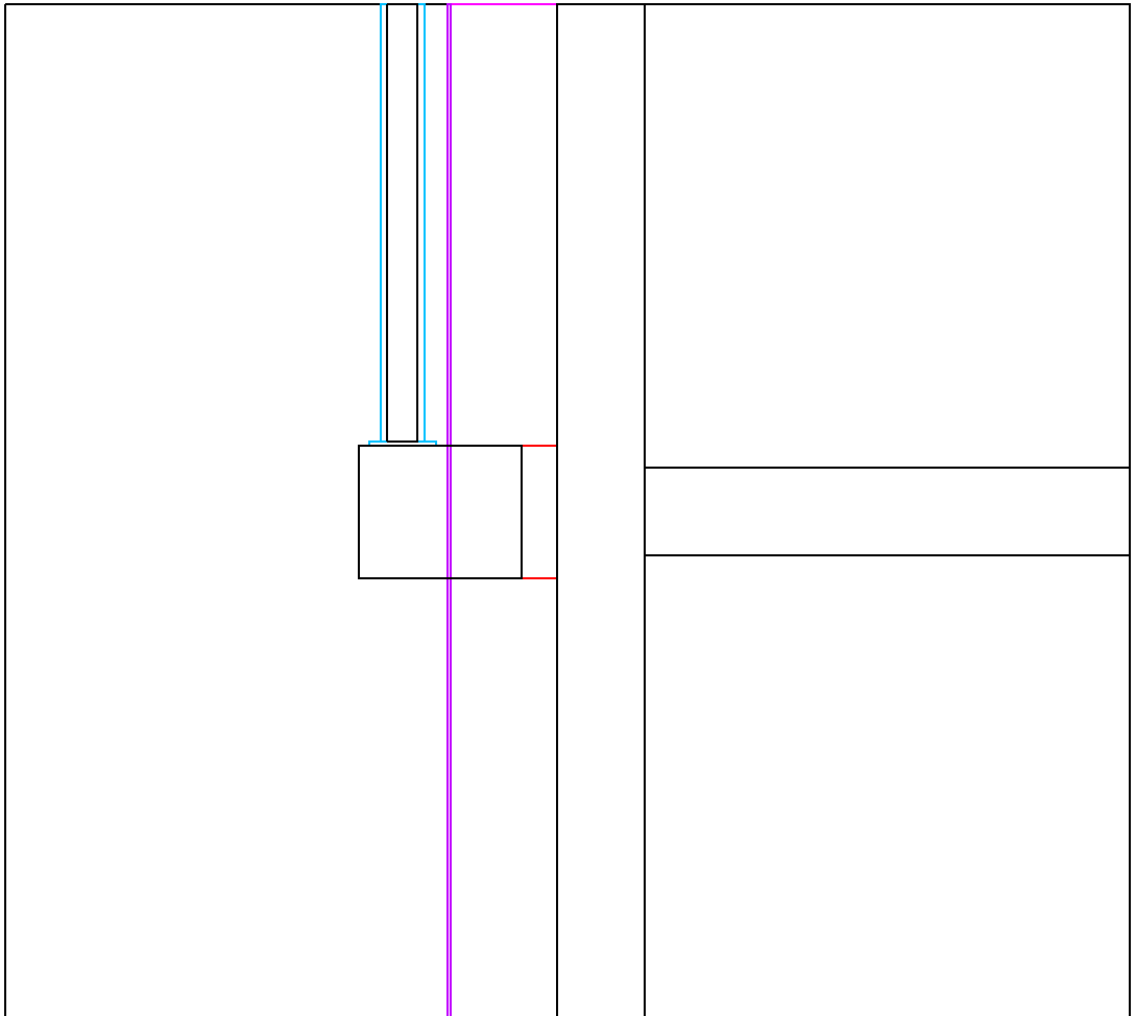
8.10.2 Konsole B

Abb. 186: Konsole B – Grundlage für Import in AnTherm®

Tab. 30: Konsole B - Eingabe Schichten in AnTherm®

Nr.	Schicht	Dicke in mm
1	Außenwand	545
2	Konsole	30
3	Konsole / Stützenwand	20
4	Konsole / Stütze	160
5	Konsole / Stützenwand	20
6	Konsole	30
7	Außenwand	545
-		gesamt: 1.350

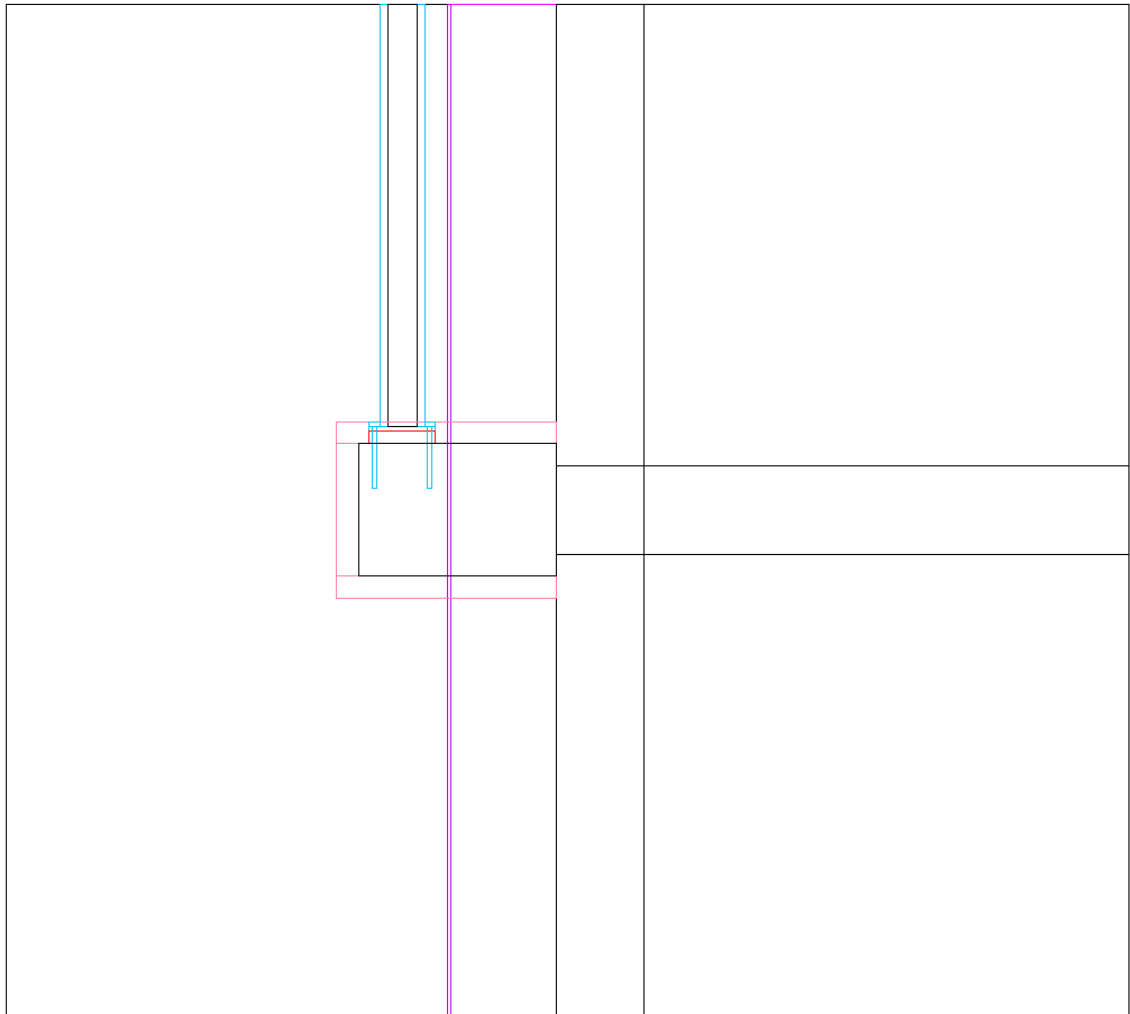
8.10.3 Konsole C

Abb. 187: Konsole C – Grundlage für Import in AnTherm®

Tab. 31: Konsole C - Eingabe Schichten in AnTherm®

Nr.	Schicht	Dicke in mm
1	Außenwand	445
2	Konsole / Aerogel	100
3	Konsole	30
4	Konsole / Stützenwand	20
5	Konsole / Stütze	160
6	Konsole / Stützenwand	20
7	Konsole	30
8	Konsole / Aerogel	100
9	Außenwand	445
-		gesamt: 1.350

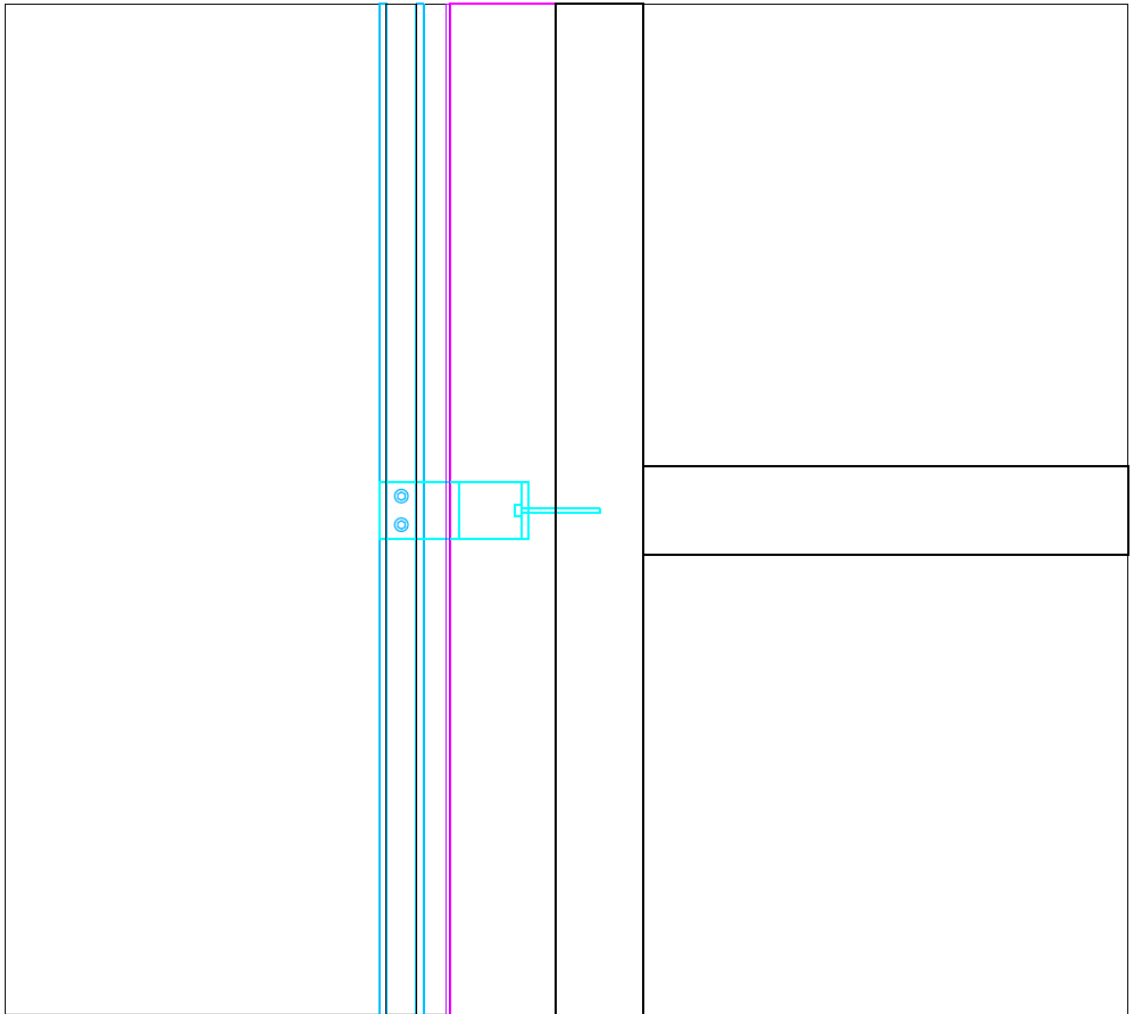
8.10.4 Konsole D

Abb. 188: Konsole D – Grundlage für Import in AnTherm®

Tab. 32: Konsole D - Eingabe Schichten in AnTherm®

Nr.	Schicht	Dicke in mm
1	Außenwand	565
2	Fahnenblech	10
3	Konsole / Stützenwand	10
4	Konsole / Stütze	180
5	Konsole / Stützenwand	10
6	Fahnenblech	10
7	Außenwand	565
-		gesamt: 1.350

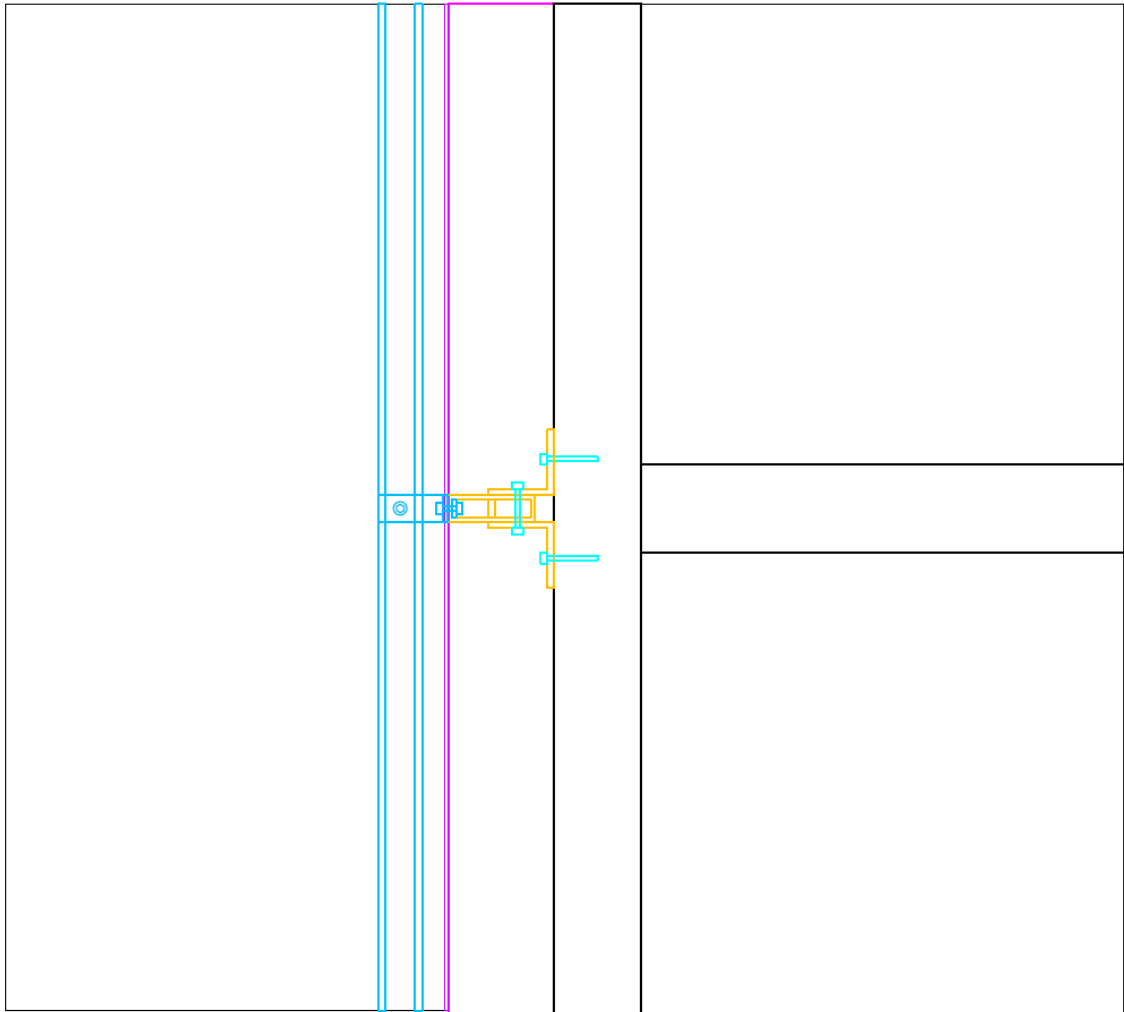
8.10.5 Konsole E

Abb. 189: Konsole E – Grundlage für Import in AnTherm®

Tab. 33: Konsole E - Eingabe Schichten in AnTherm®

Nr.	Schicht	Dicke in mm
1	Außenwand	565
2	Fahnenblech	10
3	Konsole / Stützenwand	16
4	Konsole / Stütze	168
5	Konsole / Stützenwand	16
6	Fahnenblech	10
7	Außenwand	565
-		gesamt: 1.350

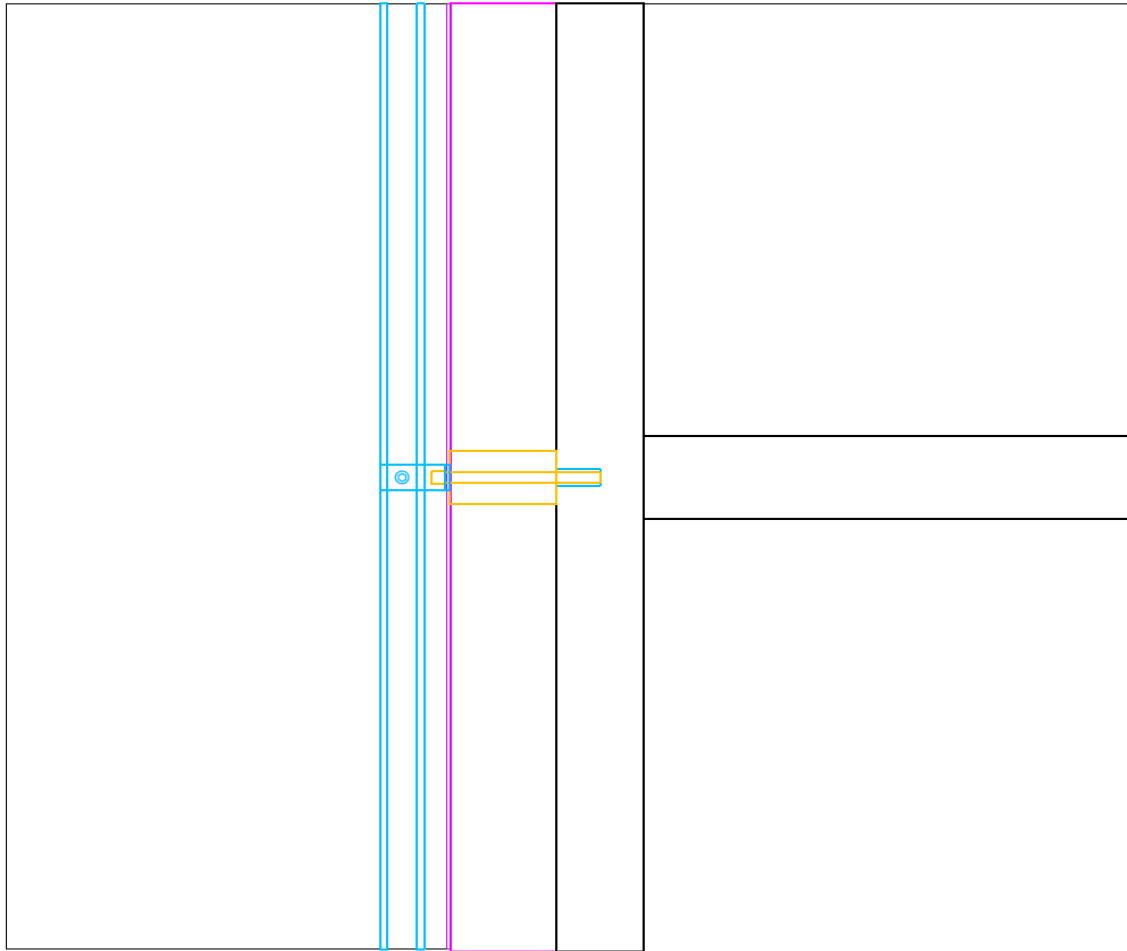
8.10.6 Konsole F

Abb. 190: Konsole F – Grundlage für Import in AnTherm®

Tab. 34: Konsole E - Eingabe Schichten in AnTherm®

Nr.	Schicht	Dicke in mm
1	Außenwand	565
2	Fahnenblech	10
3	Konsole / Stützenwand	16
4	Stütze	27,5
5	Distanzstück / Stütze	47
6	Konsole / Stütze	19
7		47
8	Stütze	27,5
9	Konsole / Stützenwand	16
10	Fahnenblech	10
11	Außenwand	565
-		gesamt: 1.350

8.11 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Funktionen von Bauwerksbegrünung [LEI16] © PFOSER - JAKOB AG 2015, Nachbearbeitung: KRAUS, 2016	10
Abb. 2: Montage eines Klettergerüsts an einer ungedämmten Betonwand: 1. Loch bohren, 2. Dübel einschlagen, 3. Abstandhalter anschrauben, 4. Rankstäbe befestigen. © Brandmeier Begrünungssysteme, Inzlingen [GUN04].....	14
Abb. 3: Montage eines Klettergerüsts an einer Außenwand mit WDVS: 1. Dämmung aufschneiden, 2. Loch in den Verankerungsgrund bohren, 3. Stützhülse in die Dämmebene einsetzen, 4. Gewindestange einkleben, 5. Dichtring anlegen, 6. Distanzhalter aufsetzen und befestigen. © Brandmeier Begrünungssysteme, Inzlingen [GUN04].....	15
Abb. 4: Montage eines Klettergerüsts an einer gedämmten Wand mit hinterlüfteter Fassade [KOH12].....	16
Abb. 5: Prinzipskizze der Optigrün®-Systemlösung Fassadengarten® © Optigrün international AG [OPT13].....	17
Abb. 6: Prinzipskizze des Wandbegrünungssystems der Fa. Techmetall [TEC17b].....	18
Abb. 7: Prinzipskizze des Wandbegrünungssystems der Fa. 90 ^{DE} GREEN® [LIC17].....	19
Abb. 8: Kastenfenster-Fassade [KNA07]	21
Abb. 9: Schacht-Kasten-Fassade [KNA07].....	21
Abb. 10: Korridorfassaden [KNA07].....	22
Abb. 11: Zweite-Haut-Fassaden [KNA07].....	22
Abb. 12: Einstellungen im Programm AnTherm® für den DXF-Import.....	25
Abb. 13: Einstellung der Feinraster-Parameter im AnTherm®	27
Abb. 14: AutoCAD-Zeichnung der Konsole MacFox als Grundlage für den DXF-Import in AnTherm®; rot: thermische Trennung; Abbildung um 90° gedreht	33
Abb. 15: χ -Werte der Aluminium-Konsole „MacFox Medium“ bei 5 mm thermischer Trennung (λ variabel) in Abhängigkeit des thermischen Widerstandes des Verankerungsgrundes	35
Abb. 16: χ -Werte der Aluminium-Konsole „MacFox Medium“ bei 10 mm thermischer Trennung (λ variabel) in Abhängigkeit des thermischen Widerstandes des Verankerungsgrundes	35
Abb. 17: χ -Werte der Aluminium-Konsole „MacFox Medium“ bei 20 mm thermischer Trennung (λ variabel) in Abhängigkeit des thermischen Widerstandes des Verankerungsgrundes	36
Abb. 18: χ -Werte der Aluminium-Konsole „MacFox Medium“ bei 40 mm thermischer Trennung (λ variabel) in Abhängigkeit des thermischen Widerstandes des Verankerungsgrundes	36
Abb. 19: χ -Werte der Aluminium-Konsole „MacFox Large“ bei 5 mm thermischer Trennung (λ variabel) in Abhängigkeit des thermischen Widerstandes des Verankerungsgrundes	38
Abb. 20: χ -Werte der Aluminium-Konsole „MacFox Large“ bei 10 mm thermischer Trennung (λ variabel) in Abhängigkeit des thermischen Widerstandes des Verankerungsgrundes	38
Abb. 21: χ -Werte der Aluminium-Konsole „MacFox Large“ bei 20 mm thermischer Trennung (λ variabel) in Abhängigkeit des thermischen Widerstandes des Verankerungsgrundes	39
Abb. 22: χ -Werte der Aluminium-Konsole „MacFox Large“ bei 40 mm thermischer Trennung (λ variabel) in Abhängigkeit des thermischen Widerstandes des Verankerungsgrundes	39
Abb. 23: Verbesserung der χ -Werte der Aluminium-Konsolen „MacFox Medium“ und „MacFox Large“ bei Verringerung der Wärmeleitfähigkeit der thermischen Trennung von $\lambda = 0,17$ W/(m.K) auf $\lambda = 0,02$ W/(m.K) in Abhängigkeit der Dicke der thermischen Trennung.....	40
Abb. 24: Verlauf der Isothermen bei der Aluminium-Konsole „MacFox Medium“ bei 5 mm thermischer Trennung mit $\lambda = 0,08$ W/(m.K) auf STB-Untergrund, Abbildung um 90° gedreht..	41
Abb. 25: Verlauf der Isothermen bei der Aluminium-Konsole „MacFox Large“ bei 5 mm thermischer Trennung mit $\lambda = 0,08$ W/(m.K) auf STB-Untergrund, Abbildung um 90° gedreht..	41

Abb. 26: χ -Werte der Edelstahl-Konsole „MFT-Fox Medium“ bei 5 mm thermischer Trennung (λ variabel) in Abhängigkeit des thermischen Widerstandes des Verankerungsgrundes	43
Abb. 27: χ -Werte der Edelstahl-Konsole „MFT-Fox Medium“ bei 10 mm thermischer Trennung (λ variabel) in Abhängigkeit des thermischen Widerstandes des Verankerungsgrundes	43
Abb. 28: χ -Werte der Edelstahl-Konsole „MFT-Fox Medium“ bei 20 mm thermischer Trennung (λ variabel) in Abhängigkeit des thermischen Widerstandes des Verankerungsgrundes	44
Abb. 29: χ -Werte der Edelstahl-Konsole „MFT-Fox Medium“ bei 40 mm thermischer Trennung (λ variabel) in Abhängigkeit des thermischen Widerstandes des Verankerungsgrundes	44
Abb. 30: χ -Werte der Edelstahl-Konsole „MFT-Fox Large“ bei 5 mm thermischer Trennung (λ variabel) in Abhängigkeit des thermischen Widerstandes des Verankerungsgrundes	46
Abb. 31: χ -Werte der Edelstahl-Konsole „MFT-Fox Large“ bei 10 mm thermischer Trennung (λ variabel) in Abhängigkeit des thermischen Widerstandes des Verankerungsgrundes	46
Abb. 32: χ -Werte der Edelstahl-Konsole „MFT-Fox Large“ bei 20 mm thermischer Trennung (λ variabel) in Abhängigkeit des thermischen Widerstandes des Verankerungsgrundes	47
Abb. 33: χ -Werte der Edelstahl-Konsole „MFT-Fox Large“ bei 40 mm thermischer Trennung (λ variabel) in Abhängigkeit des thermischen Widerstandes des Verankerungsgrundes	47
Abb. 34: Verbesserung der χ -Werte der Edelstahl-Konsolen „MFT-Fox Medium“ und „MFT-Fox Large“ bei Verringerung der Wärmeleitfähigkeit der thermischer Trennung von $\lambda = 0,17 \text{ W/(m.K)}$ auf $\lambda = 0,02 \text{ W/(m.K)}$ in Abhängigkeit der Dicke der thermischen Trennung.....	48
Abb. 35: Vergleich der Verbesserung der χ -Werte der Konsolen „MacFox“ (Aluminium) und „MFT-Fox“ (Edelstahl) bei Verringerung der Wärmeleitfähigkeit der thermischer Trennung von $\lambda = 0,17 \text{ W/(m.K)}$ auf $\lambda = 0,02 \text{ W/(m.K)}$ in Abhängigkeit der Dicke der thermischen Trennung .	49
Abb. 36: Verlauf der Isothermen bei der Edelstahl-Konsole „MFT-Fox Medium“ bei 5 mm thermischer Trennung mit $\lambda = 0,08 \text{ W/(m.K)}$ auf STB-Untergrund, Abbildung um 90° gedreht..	49
Abb. 37: Verlauf der Isothermen bei der Edelstahl-Konsole „MFT-Fox Large“ bei 5 mm thermischer Trennung mit $\lambda = 0,08 \text{ W/(m.K)}$ auf STB-Untergrund, Abbildung um 90° gedreht..	50
Abb. 38: prozentuelle Verringerung der χ -Werte der Aluminium-Konsolen „MacFox“ (Medium und Large) in Abhängigkeit des Verankerungsgrundes sowie der Dicke der thermischen Trennung	51
Abb. 39: prozentuelle Verringerung der χ -Werte der Edelstahl-Konsolen „MFT-Fox“ (Medium und Large) in Abhängigkeit des Verankerungsgrundes sowie der Dicke der thermischen Trennung	51
Abb. 40: prozentuelle Verringerung der χ -Werte der Konsolen „MacFox“ (Aluminium) und „MFT-Fox“ (Edelstahl) in Abhängigkeit des Verankerungsgrundes sowie der Dicke der thermischen Trennung	52
Abb. 41: (Zusätzliche) prozentuelle Verringerung der χ -Werte der Konsolen „MacFox“ (Aluminium) und „MFT-Fox“ (Edelstahl) je nach Dicke der thermischen Trennung in Abhängigkeit des Verankerungsgrundes	52
Abb. 42: Aluminium-Konsolen „MacFox Large“ (links) und „MacFox Medium“ (rechts), inkl. thermischer Trennung (rot) [EUR17].....	54
Abb. 43: Schematische Darstellung der Belastung der Konsolen „Large“ (Festpunkt) und „Medium“ (Gleitpunkt)	55
Abb. 44: Veränderung der Tragfähigkeit der Aluminium-Konsole „MacFox Medium“ auf Stahlbeton- bzw. Vollziegeluntergrund im Vergleich zur Variante ohne thermische Trennung je nach Druckfestigkeit der thermischen Trennung	56
Abb. 45: Veränderung der Tragfähigkeit der Aluminium-Konsole „MacFox Large“ auf Stahlbetonuntergrund im Vergleich zur Variante ohne thermische Trennung je nach Dicke und Druckfestigkeit der thermischen Trennung	56

Abb. 46: Veränderung der Tragfähigkeit der Aluminium-Konsole „MacFox Large“ auf Vollziegeluntergrund im Vergleich zur Variante ohne thermische Trennung je nach Dicke und Druckfestigkeit der thermischen Trennung	57
Abb. 47: Montageschema für typischen Fassadenausschnitt [BFE98]	58
Abb. 48: Veränderung der Gesamt-Tragfähigkeit bei „MacFox“-Aluminium-Konsolen auf Stahlbetonuntergrund im Vergleich zur Variante ohne thermische Trennung je nach Druckfestigkeit der thermischen Trennung	58
Abb. 49: Veränderung der Gesamt-Tragfähigkeit bei „MacFox“-Aluminium-Konsolen auf Vollziegeluntergrund im Vergleich zur Variante ohne thermische Trennung je nach Druckfestigkeit der thermischen Trennung	59
Abb. 50: Abnahme der Gesamt-Tragfähigkeit bei „MacFox“-Aluminium-Konsolen auf Stahlbetonuntergrund im Vergleich zur Variante ohne thermische Trennung je nach Dicke und Druckfestigkeit der thermischen Trennung	60
Abb. 51: Abnahme der Gesamt-Tragfähigkeit bei „MacFox“-Aluminium-Konsolen auf Vollziegeluntergrund im Vergleich zur Variante ohne thermische Trennung je nach Dicke und Druckfestigkeit der thermischen Trennung	60
Abb. 52: Veränderung des ΔU -Wertes im Vergleich zur Variante ohne thermische Trennung bei Verwendung der Aluminium-Konsolen „MacFox“ auf Stahlbeton-Untergrund je nach Dicke und Wärmeleitfähigkeit der thermischen Trennung	63
Abb. 53: Veränderung des ΔU -Wertes im Vergleich zur Variante ohne thermische Trennung bei Verwendung der Edelstahl-Konsolen „MFT-Fox“ auf Stahlbeton-Untergrund je nach Dicke und Wärmeleitfähigkeit der thermischen Trennung	63
Abb. 54: Veränderung des ΔU -Wertes im Vergleich zur Variante ohne thermische Trennung bei Verwendung der Aluminium-Konsolen „MacFox“ auf Vollziegel-Untergrund je nach Dicke und Wärmeleitfähigkeit der thermischen Trennung	64
Abb. 55: Veränderung des ΔU -Wertes im Vergleich zur Variante ohne thermische Trennung bei Verwendung der Edelstahl-Konsolen „MFT-Fox“ auf Vollziegel-Untergrund je nach Dicke und Wärmeleitfähigkeit der thermischen Trennung	64
Abb. 56: Veränderung des ΔU -Wertes im Vergleich zur Variante ohne thermische Trennung bei Verwendung der Aluminium-Konsolen „MacFox“ auf Vollholz-Untergrund je nach Dicke und Wärmeleitfähigkeit der thermischen Trennung	65
Abb. 57: Veränderung des ΔU -Wertes im Vergleich zur Variante ohne thermische Trennung bei Verwendung der Edelstahl-Konsolen „MFT-Fox“ auf Vollholz-Untergrund je nach Dicke und Wärmeleitfähigkeit der thermischen Trennung	65
Abb. 58: ΔU -Werte bei 5 mm thermischer Trennung in Abhängigkeit des Materials der Unterkonstruktion und des thermischen Widerstandes des Verankerungsgrundes	67
Abb. 59: ΔU -Werte bei 0,1 kN/m ² Fassadeneigengewicht und 5 mm thermischer Trennung mit $\lambda = 0,08$ W/(m.K) bei Stahlbeton-Untergrund in Abhängigkeit der Dämmstärke und des Materials der Unterkonstruktion	69
Abb. 60: ΔU -Werte bei 0,2 kN/m ² Fassadeneigengewicht und 5 mm thermischer Trennung mit $\lambda = 0,08$ W/(m.K) bei Stahlbeton-Untergrund in Abhängigkeit der Dämmstärke und des Materials der Unterkonstruktion	70
Abb. 61: ΔU -Werte bei 0,3 kN/m ² Fassadeneigengewicht und 5 mm thermischer Trennung mit $\lambda = 0,08$ W/(m.K) bei Stahlbeton-Untergrund in Abhängigkeit der Dämmstärke und des Materials der Unterkonstruktion	71
Abb. 62: Diefenbachgasse – Fassadenbegrünung System Optigrün®	75
Abb. 63: Diefenbachgasse – Position der Fassadenbegrünung im Grundriss	75
Abb. 64: Diefenbachgasse – Montage der Fassadenbegrünung (1)	76
Abb. 65: Diefenbachgasse – Montage der Fassadenbegrünung (2)	77
Abb. 66: Diefenbachgasse – Position der Wärmestrommessfolien	77

Abb. 67: Schumeierplatz – Fassadenbegrünung System Techmetall [GRU18b].....	78
Abb. 68: Schumeierplatz – Montage der Fassadenbegrünung (1).....	79
Abb. 69: Schumeierplatz – Montage der Fassadenbegrünung (2).....	79
Abb. 70: Schumeierplatz – Position der Wärmestrommessfolien.....	79
Abb. 71: Wittmayergasse 2 – Fassadenbegrünung System 90 ^{DE} GREEN® [LIC18].....	80
Abb. 72: Wittmayergasse 2 – Detail der Unterkonstruktion [HIL16].....	81
Abb. 73: Wittmayergasse 2 – Ausschnitt Montageschema[HIL16].....	81
Abb. 74: MA 31 – Fassadenbegrünung mit Trögen und Kletterpflanzen.....	82
Abb. 75: MA 31 – Abmessungen der Lochfassade sowie der Referenzfläche.....	83
Abb. 76: MA 31 – straßenseitiger Außenwand-Aufbau im Stützen-Bereich.....	83
Abb. 77: MA 31 – Ausführung der Konsolen zur Stabilisierung der vertikalen Unterkonstruktion	83
Abb. 78: Diefenbachgasse – Aufteilung des Einflussbereiches eines Ankerns in die Bereiche „Wärmebrücke“ und „Hinterlüftung“	84
Abb. 79: Diefenbachgasse – Detail der Unterkonstruktion, Abbildung um 90° gedreht.....	86
Abb. 80: Diefenbachgasse – Verlauf der Isothermen, Abbildung um 90° gedreht.....	88
Abb. 81: Diefenbachgasse – seitliche Verkleidung der Begrünungskassetten	88
Abb. 82: Schumeierplatz – Aufteilung des Einflussbereiches eines Befestigungsmittels in die Bereiche „Wärmebrücke“ und „Hinterlüftung“	90
Abb. 83: Schumeierplatz – Detail der Unterkonstruktion, Abbildung um 90° gedreht.....	92
Abb. 84: Schumeierplatz – Verlauf der Isothermen, Abbildung um 90° gedreht.....	93
Abb. 85: Wittmayergasse 2 – Detail der Unterkonstruktion, Abbildung um 90° gedreht.....	95
Abb. 86: Wittmayergasse 2 – Ausschnitt aus dem Montageschema der Firma Hilti Austria Ges.m.b.H. [HIL16]	96
Abb. 87: Wittmayergasse 2 – ΔU -Wert in Abhängigkeit des Materials der Unterkonstruktion bei Vernachlässigung der Fassadenbegrünungspaneele	97
Abb. 88: Wittmayergasse 2 – ΔU -Wert in Abhängigkeit des Materials der Unterkonstruktion bei Berücksichtigung der wärmegeprägten Fassadenbegrünungspaneele.....	98
Abb. 89: Wittmayergasse 2 – Verlauf der Isothermen, Abbildung um 90° gedreht.....	98
Abb. 90: MA 31 – Auto-CAD-Zeichnung der Konsole als Grundlage für den DXF-Import in AnTherm®, Abbildung um 90° gedreht.....	100
Abb. 91: MA 31 – Darstellung der Achsabstände der Konsolen anhand eines repräsentativen Wandausschnittes.....	102
Abb. 92: MA 31 – Verlauf der Isothermen im Bereich der Konsole bei 30 mm thermischer Trennung mit $\lambda = 0,08 \text{ W/(m.K)}$ auf STB-Untergrund, Abbildung um 90° gedreht	102
Abb. 93: MA 31 – Veränderung des ΔU -Wertes bei Stahl-Unterkonstruktion auf Stahlbetonuntergrund je nach Dicke und Wärmeleitfähigkeit der thermischen Trennung.....	105
Abb. 94: MA 31 – Veränderung des ΔU -Wertes bei Edelstahl-Unterkonstruktion auf Stahlbetonuntergrund je nach Dicke und Wärmeleitfähigkeit der thermischen Trennung.....	105
Abb. 95: MA 31 – Veränderung des ΔU -Wertes bei Stahl-Unterkonstruktion auf Vollziegeluntergrund je nach Dicke und Wärmeleitfähigkeit der thermischen Trennung	106
Abb. 96: MA 31 – Veränderung des ΔU -Wertes bei Edelstahl-Unterkonstruktion auf Vollziegeluntergrund je nach Dicke und Wärmeleitfähigkeit der thermischen Trennung	106
Abb. 97: MA 31 – Veränderung des ΔU -Wertes bei Stahl-Unterkonstruktion auf Vollholuntergrund je nach Dicke und Wärmeleitfähigkeit der thermischen Trennung	107

Abb. 98: MA 31 – Veränderung des ΔU -Wertes bei Edelstahl-Unterkonstruktion auf Vollholzuntergrund je nach Dicke und Wärmeleitfähigkeit der thermischen Trennung	107
Abb. 99: MA 31 – Verbesserung des ΔU -Wertes bei Verringerung der Wärmeleitfähigkeit bzw. Erhöhung der Dicke der thermischen Trennung sowie bei Änderung des Materials der Unterkonstruktion von Stahl auf Edelstahl	108
Abb. 100: Statisches Tragsystem des Stahlgerüsts – Variante 1: Lasteinleitung direkt in den Untergrund.	117
Abb. 101: Statisches Tragsystem des Stahlgerüsts – Variante 2: Lasteinleitung über Konsolen in die Fassade.	118
Abb. 102: Beispielhafte, schematische Darstellung möglicher Konsolen-Ausbildungen zur Unterfangung der vertikalen Tragprofile (Festpunkte).	120
Abb. 103: Beispielhafte, schematische Darstellung möglicher Konsolen-Ausbildungen zur Einleitung der horizontalen Lasten in die Fassade (Gleitpunkte).	121
Abb. 104: Vereinfachtes Modell mit nur vier Geschoßen und fünf Stützen-Reihen; links: Variante 1, rechts: Variante 2.	122
Abb. 105: Angesetzte Imperfektions-Lastfälle: LF1 (links): Einheitliche Schiefstellung der vertikalen Tragprofile in Y-Richtung; LF2 (rechts): Zick-Zack-Schiefstellung der vertikalen Tragprofile in X-Richtung	126
Abb. 106: Darstellung der globalen Verformungen bei Variante 2 mit 100 cm Auskragung	129
Abb. 107: Übersicht zu den Auflagerreaktionen der Gleitlager (Standard-Konsolen)	130
Abb. 108: Übersicht zu den Auflagerreaktionen der Festlager (Fundamente bzw. Unterfangungen)	130
Abb. 109: Konstruktionsaufbau und U-Wert der Referenzwand ohne Fassadenbegrünung ...	133
Abb. 110: Vergleich der χ -Werte der Konsolen A bis F mit jenen der Konsolen MacFox (Aluminium) und MFT-Fox (Edelstahl) in Abhängigkeit der Dicke der thermischen Trennung (mit $\lambda = 0,08 \text{ W/(m.K)}$)	135
Abb. 111: ΔU -Werte – Variante 1: Stützen durchgehend, Konsolen D bis F (Standard-Konsolen / Gleitpunkte) in Abhängigkeit des Anteils der Fenster an der gesamten Wandfläche	136
Abb. 112: ΔU -Werte – Variante 2: Stützen unterfangen, Konsolen D bis F (Standard-Konsolen / Gleitpunkte) in Kombination mit Konsolen A bis C (Konsolen zur Unterfangung / Festpunkte) in Abhängigkeit des Anteils der Fenster an der gesamten Wandfläche	137
Abb. 113: Beispiel eines AnTherm®-Berechnungsprotokolls, Seite 1	141
Abb. 114: Beispiel eines AnTherm®-Berechnungsprotokolls, Seite 2	142
Abb. 115: Beispiel eines AnTherm®-Berechnungsprotokolls, Seite 3	143
Abb. 116: Beispiel eines AnTherm®-Berechnungsprotokolls, Seite 4	144
Abb. 117: Beispiel eines AnTherm®-Berechnungsprotokolls, Seite 5	145
Abb. 118: Beispiel eines AnTherm®-Berechnungsprotokolls, Seite 6	146
Abb. 119: Beispiel eines AnTherm®-Berechnungsprotokolls, Seite 7	147
Abb. 120: Beispiel eines AnTherm®-Berechnungsprotokolls, Seite 8	148
Abb. 121: Beispielberechnung Firma Eurofox - MacFox-Konsolen auf Stahlbeton-Untergrund	149
Abb. 122: Beispielberechnung Firma Eurofox - MacFox-Konsolen auf Vollziegel-Untergrund	150
Abb. 123: Beispielberechnung Firma Eurofox - MFT-Fox-Konsolen auf Stahlbeton-Untergrund	151
Abb. 124: Beispielberechnung Firma Eurofox - MFT-Fox-Konsolen auf Vollziegel-Untergrund	152

Abb. 125: Ergebnisse der Statik-Berechnungen der MacFox-Konsolen auf Stahlbeton-Untergrund	153
Abb. 126: Ergebnisse der Statik-Berechnungen der MacFox-Konsolen auf Vollziegel-Untergrund	154
Abb. 127: Ergebnisse der ΔU -Wert-Berechnungen der Konsole MacFox.....	155
Abb. 128: Ergebnisse der ΔU -Wert-Berechnungen der Konsole MFT-Fox.....	156
Abb. 129: Diefenbachgasse – Ermittlung des Einflussbereiches der Befestigungselemente ..	157
Abb. 130: Schumeierplatz – Ermittlung des Einflussbereiches der Befestigungselemente	158
Abb. 131: Ergebnisse der ΔU -Wert-Berechnungen der Konsole MFT-Fox.....	160
Abb. 132: Modell des Stahlgerüsts mit zwei Ständerebenen und zwei bzw. vier Konsolen je Geschoß; links: zwei Varianten mit durchgehenden Stützen; rechts: zwei Varianten mit nur einer durchgehenden Stützen-Reihe	161
Abb. 133: Variante 1, 60 cm Auskragung, erste Eigenform bei 3.671 Hz, in Y-Richtung	162
Abb. 134: Variante 1, 60 cm Auskragung, zweite Eigenform bei 5.505 Hz, in Y-Richtung	162
Abb. 135: Variante 1, 60 cm Auskragung, dritte Eigenform bei 7.453 Hz, in Y-Richtung	163
Abb. 136: Variante 1, 60 cm Auskragung, vierte Eigenform bei 8.007 Hz, in Y-Richtung.....	163
Abb. 137: Variante 1, 60 cm Auskragung, Extremwerte der Normalkräfte im Grenzzustand der Tragfähigkeit (Maximum: 220,93 kN).....	164
Abb. 138: Variante 1, 60 cm Auskragung, Extremwerte der Torsionsmomente im Grenzzustand der Tragfähigkeit (Maximum: 36,34 kNm).....	164
Abb. 139: Variante 1, 60 cm Auskragung, Extremwerte der Biegemomente um die Y-Achse im Grenzzustand der Tragfähigkeit (Maximum: 67,98 kNm)	165
Abb. 140: Variante 1, 60 cm Auskragung, Extremwerte der Biegemomente um die Z-Achse im Grenzzustand der Tragfähigkeit (Maximum: 10,60 kNm).....	165
Abb. 141: Variante 1, 60 cm Auskragung, Maximalwerte der Lagerreaktionen in X-Richtung.	166
Abb. 142: Variante 1, 60 cm Auskragung, Minimalwerte der Lagerreaktionen in X-Richtung..	166
Abb. 143: Variante 1, 60 cm Auskragung, Maximalwerte der Lagerreaktionen in Y-Richtung.	167
Abb. 144: Variante 1, 60 cm Auskragung, Minimalwerte der Lagerreaktionen in Y-Richtung..	167
Abb. 145: Variante 1, 60 cm Auskragung, Maximalwerte der Lagerreaktionen in Z-Richtung.	168
Abb. 146: Variante 1, 60 cm Auskragung, Minimalwerte der Lagerreaktionen in Z-Richtung..	168
Abb. 147: Variante 1, 80 cm Auskragung, Maximalwerte der Lagerreaktionen in X-Richtung.	169
Abb. 148: Variante 1, 80 cm Auskragung, Minimalwerte der Lagerreaktionen in X-Richtung..	169
Abb. 149: Variante 1, 80 cm Auskragung, Maximalwerte der Lagerreaktionen in Y-Richtung.	170
Abb. 150: Variante 1, 80 cm Auskragung, Minimalwerte der Lagerreaktionen in Y-Richtung..	170
Abb. 151: Variante 1, 80 cm Auskragung, Maximalwerte der Lagerreaktionen in Z-Richtung.	171
Abb. 152: Variante 1, 80 cm Auskragung, Minimalwerte der Lagerreaktionen in Z-Richtung..	171
Abb. 153: Variante 1, 100 cm Auskragung, Maximalwerte der Lagerreaktionen in X-Richtung	172
Abb. 154: Variante 1, 100 cm Auskragung, Minimalwerte der Lagerreaktionen in X-Richtung	172
Abb. 155: Variante 1, 100 cm Auskragung, Maximalwerte der Lagerreaktionen in Y-Richtung	173
Abb. 156: Variante 1, 100 cm Auskragung, Minimalwerte der Lagerreaktionen in Y-Richtung	173
Abb. 157: Variante 1, 100 cm Auskragung, Maximalwerte der Lagerreaktionen in Z-Richtung	174
Abb. 158: Variante 1, 100 cm Auskragung, Minimalwerte der Lagerreaktionen in Z-Richtung	174
Abb. 159: Variante 2, 60 cm Auskragung, erste Eigenform bei 3.938 Hz, in Y-Richtung	175

Abb. 160: Variante 2, 60 cm Auskrägung, zweite Eigenform bei 5.752 Hz, in Y-Richtung	175
Abb. 161: Variante 2, 60 cm Auskrägung, dritte Eigenform bei 7.881 Hz, in Y-Richtung	176
Abb. 162: Variante 2, 60 cm Auskrägung, vierte Eigenform bei 8.441 Hz, in Y-Richtung.....	176
Abb. 163: Variante 2, 60 cm Auskrägung, Extremwerte der Normalkräfte im Grenzzustand der Tragfähigkeit (Maximum: 115,47 kN).....	177
Abb. 164: Variante 2, 60 cm Auskrägung, Extremwerte der Torsionsmomente im Grenzzustand der Tragfähigkeit (Maximum: 6,42 kNm).....	177
Abb. 165: Variante 2, 60 cm Auskrägung, Extremwerte der Biegemomente um die Y-Achse im Grenzzustand der Tragfähigkeit (Maximum: 61,06 kNm).....	178
Abb. 166: Variante 2, 60 cm Auskrägung, Extremwerte der Biegemomente um die Z-Achse im Grenzzustand der Tragfähigkeit (Maximum: 41,42 kNm).....	178
Abb. 167: Variante 2, 60 cm Auskrägung, Maximalwerte der Lagerreaktionen in X-Richtung.	179
Abb. 168: Variante 2, 60 cm Auskrägung, Minimalwerte der Lagerreaktionen in X-Richtung..	179
Abb. 169: Variante 2, 60 cm Auskrägung, Maximalwerte der Lagerreaktionen in Y-Richtung.	180
Abb. 170: Variante 2, 60 cm Auskrägung, Minimalwerte der Lagerreaktionen in Y-Richtung..	180
Abb. 171: Variante 2, 60 cm Auskrägung, Maximalwerte der Lagerreaktionen in Z-Richtung.	181
Abb. 172: Variante 2, 60 cm Auskrägung, Minimalwerte der Lagerreaktionen in Z-Richtung..	181
Abb. 173: Variante 2, 80 cm Auskrägung, Maximalwerte der Lagerreaktionen in X-Richtung.	182
Abb. 174: Variante 2, 80 cm Auskrägung, Minimalwerte der Lagerreaktionen in X-Richtung..	182
Abb. 175: Variante 2, 80 cm Auskrägung, Maximalwerte der Lagerreaktionen in Y-Richtung.	183
Abb. 176: Variante 2, 80 cm Auskrägung, Minimalwerte der Lagerreaktionen in Y-Richtung..	183
Abb. 177: Variante 2, 80 cm Auskrägung, Maximalwerte der Lagerreaktionen in Z-Richtung.	184
Abb. 178: Variante 2, 80 cm Auskrägung, Minimalwerte der Lagerreaktionen in Z-Richtung..	184
Abb. 179: Variante 2, 100 cm Auskrägung, Maximalwerte der Lagerreaktionen in X-Richtung	185
Abb. 180: Variante 2, 100 cm Auskrägung, Minimalwerte der Lagerreaktionen in X-Richtung	185
Abb. 181: Variante 2, 100 cm Auskrägung, Maximalwerte der Lagerreaktionen in Y-Richtung	186
Abb. 182: Variante 2, 100 cm Auskrägung, Minimalwerte der Lagerreaktionen in Y-Richtung	186
Abb. 183: Variante 2, 100 cm Auskrägung, Maximalwerte der Lagerreaktionen in Z-Richtung	187
Abb. 184: Variante 2, 100 cm Auskrägung, Minimalwerte der Lagerreaktionen in Z-Richtung	187
Abb. 185: Konsole A – Grundlage für Import in AnTherm®.....	188
Abb. 186: Konsole B – Grundlage für Import in AnTherm®.....	189
Abb. 187: Konsole C – Grundlage für Import in AnTherm®	190
Abb. 188: Konsole D – Grundlage für Import in AnTherm®	191
Abb. 189: Konsole E – Grundlage für Import in AnTherm®.....	192
Abb. 190: Konsole F – Grundlage für Import in AnTherm®.....	193

8.12 Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Lastklassen von Fassadenankern [PHI17].....	6
Tab. 2: bauphysikalische Baustoff-Kennwerte	26
Tab. 3: zulässige Druckspannungen in Abhängigkeit von der Wärmeleitfähigkeit des thermischen Trennelementes	29
Tab. 4: Dicke, Wärmeleitfähigkeit und thermischer Widerstand der gewählten Verankerungsgründe	32
Tab. 5: MacFox Medium - Eingabe Schichten in AnTherm®	34
Tab. 6: MacFox Large - Eingabe Schichten in AnTherm®.....	37
Tab. 7: MFT-Fox Medium - Eingabe Schichten in AnTherm®	42
Tab. 8: MFT-Fox Large - Eingabe Schichten in AnTherm®.....	45
Tab. 9: Richtwerte für die erforderliche Anzahl an Konsolen je m ² in Abhängigkeit des Verankerungsgrundes [BRO17].....	62
Tab. 10: optimale Dimensionierung des thermischen Trennelementes in Abhängigkeit der Konsole und des Verankerungsgrundes	66
Tab. 11: ΔU -Werte bei <u>0,1 kN/m²</u> Fassadeneigengewicht und 5 mm thermischer Trennung mit $\lambda = 0,08 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ bei Stahlbeton-Untergrund in Abhängigkeit der Dämmstärke und des Materials der Unterkonstruktion	69
Tab. 12: ΔU -Werte bei <u>0,2 kN/m²</u> Fassadeneigengewicht und 5 mm thermischer Trennung mit $\lambda = 0,08 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ bei Stahlbeton-Untergrund in Abhängigkeit der Dämmstärke und des Materials der Unterkonstruktion	70
Tab. 13: ΔU -Werte bei <u>0,3 kN/m²</u> Fassadeneigengewicht und 5 mm thermischer Trennung mit $\lambda = 0,08 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ bei Stahlbeton-Untergrund in Abhängigkeit der Dämmstärke und des Materials der Unterkonstruktion	71
Tab. 14: Diefenbachgasse - Eingabe Schichten in AnTherm®.....	87
Tab. 15: Schumeierplatz - Eingabe Schichten in AnTherm®	92
Tab. 16: Wittmayergasse 2 - Eingabe Schichten in AnTherm®	96
Tab. 17: MA 31 - Eingabe Schichten in AnTherm®	101
Tab. 18: Vergleich der gemessenen, simulierten bzw. normgemäß berechneten ΔU -Werte der ausgewählten Beispielprojekte.....	112
Tab. 19: Vergleich der auf einen einheitlichen Wandaufbau bezogenen ΔU -Werte der ausgewählten Beispielprojekte	113
Tab. 20: Übliche Spannweite sowie in dieser Arbeit verwendete Werte des horizontalen und vertikalen Achsabstandes der Tragprofile	115
Tab. 21: für das Begrünungs-Modell verwendete Querschnitte	119
Tab. 22: Vorhandene Lastfälle in RSTAB	127
Tab. 23: Ergebnisse der RSTAB-Berechnungen bei Variante 1 – Stützen durchgehend.....	130
Tab. 24: Ergebnisse der RSTAB-Berechnungen bei Variante 2 – Stützen unterfangen.....	130

Tab. 25: Veränderung der Auflagerkräfte bei Erhöhung der Auskragung auf 80 cm bzw. 100 cm; rot: Veränderung ≥ 50 %; gelb: Veränderung ≥ 20 %; grün: Veränderung ≤ 0 %	132
Tab. 26: berechnete χ -Werte der Konsolen-Typen A bis F	134
Tab. 27: Diefenbachgasse – bereinigte Mittelwerte der verwendeten Messdaten	159
Tab. 28: Schumeierplatz – bereinigte Mittelwerte der verwendeten Messdaten	159
Tab. 29: Konsole A - Eingabe Schichten in AnTherm®	188
Tab. 30: Konsole B - Eingabe Schichten in AnTherm®	189
Tab. 31: Konsole C - Eingabe Schichten in AnTherm®	190
Tab. 32: Konsole D - Eingabe Schichten in AnTherm®	191
Tab. 33: Konsole E - Eingabe Schichten in AnTherm®	192
Tab. 34: Konsole E - Eingabe Schichten in AnTherm®	193

9 Literatur

[ANT17] AnTherm® Wärmebrücken-Berechnungsprogramm von Kornicki Dienstleistungen in EDV & IT: <http://www.antherm.at/>.

Aktualisierungsdatum: 23.11.2017

[ANT17a] AnTherm®-Tutorials – Dreidimensionale Analyse von Kornicki Dienstleistungen in EDV & IT.

http://hilfe.antherm.eu/Tutorials/tutor02en/3d/3d_00_ThreeDimensionalAnalysis.htm. Aktualisierungsdatum: 23.11.2017

[AUS18] Austrotherm Resolution Fassade von Austrotherm GmbH.

<https://www.austrotherm.at/produkte/austrotherm-resolution/austrotherm-resolution-fassade/>. Aktualisierungsdatum: 18.04.2018

[BAU18] Bürogebäude Capricorn in Düsseldorf von BauNetz Media GmbH.

<https://www.baunetzwissen.de/fassade/objekte/buero-verwaltung/bueroegebaeude-capricorn-in-duesseldorf-1469409>.

Aktualisierungsdatum: 23.04.2018

[BAU18a] Bürogebäude in Hamburg von BauNetz Media GmbH.

<https://www.baunetzwissen.de/fassade/objekte/buero-verwaltung/bueroegebaeude-in-hamburg-1642697>.

Aktualisierungsdatum: 23.04.2018

[BFE98] BFE, EMPA, FVHF, SFHF, SSIV, SVDW, SESSISOL und SZFF: Bestimmung der wärmetechnischen Einflüsse von Wärmebrücken bei vorgehängten hinterlüfteten Fassaden. 1. Auflage. Berlin: Fachverband Baustoffe und Bauteile für vorgehängte hinterlüftete Fassaden e. V., 1998.

[BRO98] Brodersen K. Die hängenden Gärten von Babylon. In: Sarkowicz H. (eds) Die Geschichte der Gärten und Parks. Frankfurt am Main: Insel Verlag, 1998.

[BRO17] Gespräch mit Herrn Ing. Bernhard Brocza, Fa. Eurofox GmbH, am 06.12.2017.

[CFI17] C-FIX von Fischer Deutschland Vertriebs GmbH.

<https://www.fischer.de/de-de/service/bemessungssoftware-fixperience/c-fix>.

Aktualisierungsdatum: 24.11.2017

[COM17] Produktdatenblatt Compacfoam. Leichtbauwerkstoff für Konstruktion und Dämmung von Compacfoam GmbH. http://www.compacfoam.de/soubory/produktdatenblatt%20compacfoam_de_allgemein.pdf. Aktualisierungsdatum: 24.11.2017

[CSN05] CSN EN 1993-1-1. Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings. Brüssel: Europäisches Komitee für Normung, 2005.

[DEG17] 90deGREEN – Ein Komplettsystem von der Mauer bis zur Pflanze von 90 DEGREEN GmbH. <http://www.90degreen.com/web/das-system>. Aktualisierungsdatum: 28.09.2017

[DLU18] RSTAB – Die Stabwerk-Software von Dlubal Software GmbH. <https://www.dlubal.com/de/produkte/stabwerksprogramm-rstab/was-ist-rstab>. Aktualisierungsdatum: 10.09.2018

[ENG18] Engelbrecht, M. von Fa. Würth Handelsges.m.b.H.: Email vom 06.02.2018 mit Auskünften zur Wärmeleitfähigkeit des Produktes „Injektionsmörtel Allrounder WIT-VM 250“.

[EUR17] Eurofox Artikelliste 2011 von Eurofox GmbH. http://eurofox.at/dnld/EUROFOX_Artikelliste_Partlist.pdf. Aktualisierungsdatum: 24.11.2017

[FIS18] Bemessungssoftware FIXPERIENCE Downloads und Systemanforderungen von fischer Austria GmbH. <https://www.fischer.at/de-at/service/bemessungssoftware-fixperience/download-fixperience>. Aktualisierungsdatum: 14.04.2018

[GOL18] GOLDBECK Bürogebäude von GOLDBECK GmbH. https://www.goldbeck.de/fileadmin/Redaktion/Downloads/Prospekte/Dokumente/05070_GB_Pros_Buero_Dienstl_Real_X02_web_Doppels.pdf. Aktualisierungsdatum: 23.04.2018

[GOT26] Gothein M. L. Geschichte der Gartenkunst. Jena: Verlag Eugen Diederichs, 1926.

[GRU18] Kategorie: Über das Projekt von GRÜNEzukunftSCHULEN.
<http://www.grueneschulen.at/category/ueber-das-projekt/>.

Aktualisierungsdatum: 04.01.2018

[GRU18a] BG 15 Optigrün von GRÜNEzukunftSCHULEN.
http://www.grueneschulen.at/bg15_24/. Aktualisierungsdatum: 04.01.2018

[GRU18b] Begrünte Wand an der Außenfassade. Schule Schumeierplatz, Oktober 2017 von GRÜNEzukunftSCHULEN.
http://www.grueneschulen.at/img_9063/. Aktualisierungsdatum: 04.01.2018

[GSC13] Gscheidle H., Röder J. Außenwände. In: Fouad N. (eds) Lehrbuch der Hochbaukonstruktionen. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2013.

[GUN04] Gunkel R. Fassadenbegrünung: Kletterpflanzen und Klettergerüste. Stuttgart: Ulmer Verlag, 2004.

[HAA18] Haas S.: Email vom 19.02.2018 mit Auskünften zur Fassadenbegrünung im BRG 16.

[HAS18] Hascher S.: Email vom 07.02.2018 mit Auskünften zur Fassadenbegrünung im GRG 15.

[HIL16] Hilti-Angebot vom 20.05.2016.
Dokumentname: „Ing._Wolfgang_Ziegler_BVH_Wittmayergasse“, übermittelt von Herrn Andreas Lichtblau per E-Mail am 03.10.2017.

[HIL17] Konsolen von Hilti Austria Ges.m.b.H.
<https://www.hilti.at/fassadensysteme/konsolen>.

Aktualisierungsdatum: 24.11.2017

[HIL18] Konsole MFT-FOX HI 180 M 11 von Hilti Austria Ges.m.b.H.
<https://www.hilti.at/fassadensysteme/konsolen/2084339>.

Aktualisierungsdatum: 19.03.2018

[HOC18] Hochreiner, G. von TU Wien: Unterlagen zur Besprechung vom 07.05.2018 mit Festlegungen zur Geometrie des Stahlgerüsts des Begrünungs-Modells in Kapitel 6.

[HUB18] Huber G., RATAPLAN-Architektur ZT GmbH. Angaben zur thermischen Trennung der Stahlkonstruktion bei der Fassadenbegrünung der MA 31 in der Grabnergasse 4-6 übermittelt per E-Mail am 12.04.2018.

[IBP81] Schumacher R., Mechel F.P. Mitteilung 67. Schallschutz von hinterlüfteten Fassaden. In: Fraunhofer Institut für Bauphysik (eds) Neue Forschungsergebnisse, kurz gefasst. 9. Ausgabe. Stuttgart, 1981.

[ISO13] ISO/DIS 9869-1. Thermal insulation — Building elements -- In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance — Part 1: Heat flow meter method. Genf: International Organization for Standardization, 2013.

[IWR17] Informationen über Photovoltaik von IWR Institute for renewable energy. <http://www.iwr.de/solar/erricht/photovoltaik.html>. Aktualisierungsdatum: 31.08.2017

[KNA07] Knaack U., Klein T., Bilow M., Auer T.: Fassaden. Prinzipien der Konstruktion. Basel: Birkhäuser Verlag AG, 2007.

[KOH12] Köhler M. Handbuch Bauwerksbegrünung: Planung - Konstruktion - Ausführung. Köln: Müller Rudolf, 2012.

[KOH93] Köhler M. Fassaden- und Dachbegrünung. Stuttgart: Verlag Ulmer, 1993.

[KOR08] Körner S., Bellin-Harder F., Nagel A. Grün und Gesundheit. Literaturstudie. Kassel: Universität Kassel, 2008.

[KOR16] Korjenic A., Tudiwer D., Soledad M.: Bauphysikalische Auswirkungen von Bauwerksbegrünungen. Wien: Technische Universität Wien, 2016.

[LEI16] Leitfassaden Fassadenbegrünung. 1. Ausgabe. Wien: Magistrat der Stadt Wien, Wiener Umweltschutzabteilung – MA 22, 2016.

[LIC17] Lichtblau A. Dokument „90degreeen -Schema deutsch- Detail-Mod4“ übermittelt per E-Mail am 03.10.2017.

[LIC18] Lichtblau A, 90DEGREEEN GmbH. Bilder übermittelt per E-Mail am 19.04.2018.

[LIC18a] Lichtblau A. 90^{DE}GREEN ...der Garten für Ihre Wand. Wiener Neudorf: 90DEGREEEN GmbH, 2018/01.

http://www.90degreeen.com/web/download/90degreeen_Infomappe.pdf.

Aktualisierungsdatum: 21.05.2018

[LIE89] Liesecke, H.J. et al. Grundlagen der Dachbegrünung: zur Planung, Ausführung und Unterhaltung von Extensivbegrünungen und einfachen Intensivbegrünungen. Berlin: Platzer Verlag, 1989.

[LKG18] Geschoßhöhe von LKG - Ingenieurbüro für Bautechnik.
<http://www.elkage.de/src/public/showterms.php?id=3440>.

Aktualisierungsdatum: 23.04.2018

[MAC17] MacFox von Eurofox GmbH.
<http://eurofox.at/de/eurofoxsystem/macfox/index.html>.

Aktualisierungsdatum: 24.11.2017

[MAC17a] Produktdatenblatt MacFox Isolator neu von Eurofox GmbH.
http://www.eurofox.at/dnld/MacFOX_Isolator_de.pdf.

Aktualisierungsdatum: 24.11.2017

[MAN18] twin yards, München von Mantel A., PORR AG.
<http://worldofporr.porr-group.com/index.php?id=5384#/page/9>.

Aktualisierungsdatum: 23.04.2018

[MAY18] Mayrhofer, K. von Fa. Eurofox GmbH.: Email vom 05.04.2018 mit Auskünften zur statisch erforderlichen Anzahl an „MacFox“- bzw. „MFT-Fox“-Konsolen je nach Dämmstärke und Fassadeneigengewicht.

[MER14] Merkblatt 821. Edelstahl Rostfrei – Eigenschaften von Informationsstelle Edelstahl Rostfrei.
http://www.edelstahl-rostfrei.de/downloads/iser/MB_821.pdf.

Aktualisierungsdatum: 24.11.2017

[MFT17] MFT-FOX VTR-1L-adhesive-rivet-screws. Hilti Austria Ges.m.b.H. Übermittelt von Herrn Dario Kalcic am 09.10.2017.

[OFH13] Brandschutz bei hinterlüfteten Fassaden. Brunn am Gebirge: Österreichischer Fachverband für hinterlüftete Fassaden, November 2013

[OFH15] Planung und Ausführung von vorgehängten hinterlüfteten Fassaden. Brunn am Gebirge: Österreichischer Fachverband für hinterlüftete Fassaden, März 2015

[OFH17] Die Mehr Fassade von Österreichischer Fachverband für hinterlüftete Fassaden. www.oefhf.at/content/fm/13/704/OEFHF_Die%20Mehr-Fassade.pdf. Aktualisierungsdatum: 24.12.2017

[OIB15] OIB-Richtlinie 2. Brandschutz. Wien: Österreichisches Institut für Bautechnik, März 2015.

[OIB15a] OIB-Richtlinie 2.3. Brandschutz bei Gebäuden mit einem Fluchtniveau von mehr als 22 m. Wien: Österreichisches Institut für Bautechnik, März 2015.

[OKO18] Natürliche Klimaanlage: Stadt Wien als Vorreiter bei Fassadenbegrünung von Oekonews. https://www.oekonews.at/?mdoc_id=1108679. Aktualisierungsdatum: 05.01.2018

[ONO00] ÖNORM EN 12154. Vorhangfassaden – Schlagregendichtheit – Leistungsanforderungen und Klassifizierung. Wien: Österreichisches Normungsinstitut, 2000-03-01.

[ONO00a] ÖNORM EN 14019. Vorhangfassaden – Stoßfestigkeit – Leistungsanforderungen. Wien: Österreichisches Normungsinstitut, 2000-12-01.

[ONO01] ÖNORM EN 13116. Vorhangfassaden – Widerstand gegen Windlast – Leistungsanforderungen. Wien: Österreichisches Normungsinstitut, 2001-11-01.

[ONO02] ÖNORM EN 12152. Vorhangfassaden – Luftdurchlässigkeit – Leistungsanforderungen und Klassifizierung. Wien: Österreichisches Normungsinstitut, 2002-05-01.

[ONO11] ÖNORM EN 1991-1-4. Eurocode 1 – Einwirkungen auf Tragwerke. Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen – Windlasten. Wien: Österreichisches Normungsinstitut, 2011-05-15.

[ONO12] ÖNORM EN 1991-1-5. Eurocode 1 – Einwirkungen auf Tragwerke. Teil 1-5: Allgemeine Einwirkungen – Temperatureinwirkungen. Wien: Österreichisches Normungsinstitut, 2012-01-01.

[ONO13] ÖNORM B 8110-7. Wärmeschutz im Hochbau — Teil 7: Tabellierte wärmeschutztechnische Bemessungswerte. Wien: Österreichisches Normungsinstitut, 2013-03-15.

- [ONO13a] ÖNORM B 1991-1-3. Eurocode 1 – Einwirkungen auf Tragwerke.
Teil 1-3: Allgemeine Einwirkungen – Schneelasten. Wien: Österreichisches Normungsinstitut, 2013-09-01.
- [ONO13b] ÖNORM B 1991-1-4. Eurocode 1 – Einwirkungen auf Tragwerke.
Teil 1-3: Allgemeine Einwirkungen – Windlasten. Wien: Österreichisches Normungsinstitut, 2013-05-01.
- [ONO15] ÖNORM EN ISO 6946. Bauteile — Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient — Berechnungsverfahren. Wien: Österreichisches Normungsinstitut, 2015-06-15.
- [ONO15a] ÖNORM EN 13830. Vorhangfassaden – Produktnorm. Wien: Österreichisches Normungsinstitut, 2015-06-15.
- [ONO17] ÖNORM B 1991-1-1. Eurocode 1 – Einwirkungen auf Tragwerke.
Teil 1-3: Allgemeine Einwirkungen – Wichten, Eigengewicht, Nutzlasten im Hochbau. Wien: Österreichisches Normungsinstitut, 2017-02-01.
- [ONV01] ON V 31. Katalog für wärmetechnische Rechenwerte von Baustoffen und Bauteilen. Wien: Österreichisches Normungsinstitut, 2001-12-01.
- [OPT13] Optigrün-Systemlösung "Fassadengarten". Fassadenkorb. Krauchenwies-Göggingen: Optigrün international AG, 24.06.2013.
- [OPT15] Optigrün-Systemlösung „Fassadengarten“. Lebendes Kunstwerk. Design. Blickfang. Krauchenwies-Göggingen: Optigrün international AG, 07/2015.
- [OPT17] Fassadengarten Lösung 1 von Optigrün international AG.
<http://www.optigruen.at/systemloesungen/fassadengarten/loesung-1/>.
Aktualisierungsdatum: 28.09.2017
- [PEC02] Pech A.: Vorlesungen über Baukonstruktionen. Kapitel Fassaden. Skriptum zur Vorlesung „Baukonstruktionen“. Wien: Fachhochschule Campus Wien, 2002.
- [PFO16] Pfoster N.: Fassade und Pflanze. Potenziale einer neuen Fassadengestaltung. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt, 2016.

[PHI17] Passivhaus Institut: Kriterien und Algorithmen. Zertifizierte Passivhauskomponente – Fassadenanker. Version 2.0. 08.05.2017.

[PHI18] Komponentendatenbank – Fassadenanker von Passivhaus Institut.
http://www.passiv.de/alte_komponentendatenbank/fassadenanker.
Aktualisierungsdatum: 24.06.2018.

[PHO17] Dachstatik von PhotovoltaikZentrum – Michael Ziegler.
<http://www.photovoltaik-guide.de/wissenswertes/solaranlagen/dachstatik>.
Aktualisierungsdatum: 31.08.2017

[PHO17a] Dach-Statik von Photovoltaikforum GmbH.
<https://www.photovoltaikforum.com/montagesysteme-f4/dach-statik-t6613.html>.
Aktualisierungsdatum: 31.08.2017

[PON17] Pons Online- Wörterbuch Latein-Deutsch von PONS GmbH.
https://de.pons.com/%C3%BCbersetzung?q=facies&l=dela&in=ac_la&lf=de.
Aktualisierungsdatum: 23.12.2017

[PUR17] Produktdatenblatt purenit® Universal-Dämmplatte (purenit® 550 MD) von Puren GmbH.
https://www.puren.com/fileadmin/migrated/content_uploads/05-td_purenit_platten_1404.pdf. Aktualisierungsdatum: 24.11.2017

[QBC18] QBC4 – Bauteil 4 im Quartier Belvedere Central von QBC Immobilien GmbH. <http://www.qbc.at/qbc/qbc-4-buero/>. Aktualisierungsdatum: 23.04.2018

[RAT18] Übermittelt per E-Mail von Frau Höhndorf Susanne, Firma Rataplan, am 10.01.2018.

[SCH10] Schöberl & Pöll GmbH: Bauteilkatalog Ausschreibungsplanung. Bauphysikalische Kennwerte Wärme- und Schallschutz für die Erweiterung des BG + BRG Diefenbachgasse 15–27, 1150 Wien. 07.12.2010.

[SCH18] Das Büromieter ABC Folge 1: A wie Achsraster von Schön C., Horst F. G. Angermann GmbH. <http://blog.angermann.de/2015/01/19/das-buero-mieter-abc-folge-1-a-wie-achsraster/>. Aktualisierungsdatum: 23.04.2018

[SEN17] Thermische Trennungen für den Metall- und Fensterbau von Senova® Kunststoffe GmbH & Co. KG.

http://www.senova.com/de/content/download/9977/156791/version/5/file/Thermische_Trennungen_D_2015.pdf. Aktualisierungsdatum: 24.11.2017

[SFH17] U-Wert Berechnungsprogramm vom Schweizer Fachverband für hinterlüftete Fassaden. <http://www.sfhf.ch/u-wert/index.php?type=systeme>. Aktualisierungsdatum: 16.10.2017

[SLE17] Slentite®. Eine Platte für jedes Klima von BASF SE. http://www.polyurethanes.basf.de/pu/solutions/de/function/conversions:/publish/content/group/News_und_Medien/Polyurethan/Slentite_DE.pdf. Aktualisierungsdatum: 24.11.2017

[STO17] Technisches Merkblatt STO-Thermostop-Element GP von Sto Ges.m.b.H. http://www.sto.at/webdocs/0000/SDB/T_07610-003_0204_DE_02_00.PDF. Aktualisierungsdatum: 24.11.2017

[STY17] Styprotech®-Fassadensystem. Technische Detailinformationen von ThyssenKrupp Plastics Austria. https://www.thyssenkrupp-plastics.at/fileadmin/media/TKP_Oesterreich_PDFs_Upload/Produkte/Verlegsysteme/Fassadensystem/TKPA_TD_Fassadensystem_low.pdf. Aktualisierungsdatum: 24.11.2017

[TEC17] Grünwand Klimafassade von Tech Metall Erzeugungs-, Handel und Montage GesmbH. <http://techmetall.com/#gruenwand>. Aktualisierungsdatum: 28.09.2017

[TEC17a] System Grünwand. Tech Metall GmbH, Dachgrün Objektbe-
grünungen GmbH.
Download von <http://www.gruenwand.at/#>. Aktualisierungsdatum: 28.09.2017

[TEC17b] Dokument „Prinzipskizze Grünwand“ von Tech Metall Erzeugungs-, Handel und Montage GesmbH. Bereitgestellt von Maria Soledad, Technische Universität Wien, 2017.

[TEK18] Raster (Achsraster, Fassadenraster etc.) von tektorum.de. <https://www.tektorum.de/konstruktion-technik/3068-raster-achsraster-fassadenraster-etc.html>. Aktualisierungsdatum: 23.04.2018

[THE17] Technische Daten zu Thermostop®-Plus Kunststoffunterlagen (1 – 10 mm) von TECaid Soziale Werkstätte e.V. <https://thermostop-plus.com/wp->

[content/uploads/Tech_Daten_TS_1-10mmTabelle160506.pdf](#).

Aktualisierungsdatum: 24.11.2017

[TOP18] Solarmodule – Größe und Abmessungen von Top50-Solar®.
<http://www.top50-solar.de/experten-forum-energiewende/98/solarmodule-gr%C3%B6%C3%9Fe-und-abmessungen>. Aktualisierungsdatum: 23.04.2018

[UHI15] Urban Heat Islands Strategieplan Wien. Wien: Wiener Umweltschutzabteilung – Magistratsabteilung 22, 2015.

[UNI18] Quartier West von unit Gesellschaft für Projektentwicklung mbH.
<http://www.quartierwest.com/>. Aktualisierungsdatum: 23.04.2018

[WIK18] Flächenwirtschaftlichkeit von Wikimedia Foundation Inc.
<https://de.wikipedia.org/wiki/Fl%C4chenwirtschaftlichkeit>. Aktualisierungsdatum: 23.04.2018