Bauaufsichtlich anerkannte Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstelle von Baustoffen und Bauteilen.
Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet des Wärme- und Feuchteschutzes

Forschungsinstitut für
Wärmeschutz e.V. München

Lochhamer Schlag 4
82166 Gräfelfing

Tel: 089-85800-37
Fax: 089-85800-40
info@fiw-muenchen.de
www.fiw-muenchen.de

GEG - Gebäudeenergiegesetz

Untersuchung von neuen Anforderungen und Bewertungsansätzen zum Transmissionswärmeverlust H'_T und deren Auswirkungen auf die Ausführung der Gebäudehülle in Mauerwerksbauweise im Rahmen der Zusammenführung von EnEV, EEWärmeG und Energieeinspargesetz.

Bearbeitung:
Prof. Dr.-Ing. Andreas Holm
Florian Kagerer

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis **2**

Abbildungsverzeichnis **4**

Tabellenverzeichnis **6**

1 Gebäudeenergiegesetz **7**

2 Berechnungsrahmenbedingungen **8**

2.1 Typgebäude 8

2.2 Untersuchungsvarianten 8

3 Definition der Anforderungen an eine thermische Mindestqualität der Gebäudehülle **11**

3.1 spezifischer, auf die wärmeübertragende Umfassungsfläche bezogener Transmissionswärmeverlust - EnEV 2014/ 2016 11

3.2 Referentenentwurf zum Gebäudeenergiegesetz vom 23.01.2018 12

3.3 Äquivalenter Transmissionswärmeverlust - Kurzgutachten Ecofys, Öko-Institut, Prognos, dena 12

4 Methodischer Ansatz **15**

5 Energieeinsparverordnung EnEV 2014/2016 ..... **16**

5.1 Variation Bautypen 16

5.1.1 Transmissionswärmeverluste 16

5.1.2 Auswirkung auf die Ausführung der Außenwand 17

5.2 Variation Fensterfläche gesamt 19

5.2.1 Transmissionswärmeverluste 19

5.2.2 Auswirkung auf die Ausführung der Außenwand 20

5.3 Variation der südorientierten Fensterfläche 21

5.3.1 Transmissionswärmeverluste 21

5.3.2 Auswirkung auf die Ausführung der Außenwand 22

5.4 Zwischenfazit 23

5.4.1 Geschosshöhe 23

5.4.2 Dachtypologie 24

5.4.3 Unterer Gebäudeabschluss 24

6 Gebäudeenergiegesetz GEG **26**

6.1 Variation Bautypen 26

6.1.1 Transmissionswärmeverluste 26

6.1.2 Auswirkung auf die Ausführung der Außenwand 26

6.2 Variation Fensterfläche gesamt 27

6.2.1 Transmissionswärmeverluste 27

6.2.2 Auswirkung auf die Ausführung der Außenwand 28

6.3 Variation der südorientierten Fensterfläche 29

6.3.1 Transmissionswärmeverluste 29
6.3.2 Auswirkung auf die Ausführung der Außenwand 30
6.4 Zwischenfazit 31
6.4.1 Geschosshöhe 31
6.4.2 Dachtypologie 32
6.4.3 Unterer Gebäudeabschluss 32
6.4.4 Allgemein 32
7 Konzept Wohnflächen- Verfahren 33
7.1 Variation Bautypen 33
7.1.1 Transmissionswärmeverluste 33
7.1.2 Auswirkung auf die Ausführung der Außenwand 34
7.2 Variation der Fensterflächen gesamt 35
7.2.1 Transmissionswärmeverluste 35
7.2.2 Auswirkung auf die Ausführung der Außenwand 36
7.3 Variation der südorientierten Fensterflächen 37
7.3.1 Transmissionswärmeverluste 37
7.3.2 Auswirkung auf die Ausführung der Außenwand 38
7.4 Zwischenfazit 40
7.4.1 Geschosshöhe 40
7.4.2 Dachtypologie 40
7.4.3 Unterer Gebäudeabschluss 40
7.4.4 Allgemein 40
8 Fazit 42
8.1 Fachliche Bewertung 42
8.2 Politische Bewertung 44
Literaturverzeichnis 46

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: auf die wärmeübertragende Umfassungsfläche bezogener Transmissionswärmeverlust H'_T bzw. $H'_{T,eq}$. Die rote Linie markiert die Mindestanforderung an H'_T gemäß EnEV 2014/ 2016 Anlage1 Tabelle 2. 16

Abb. 2: erforderliche Wandstärken für H'_T bzw. $H'_{T,eq}$ für Mauerwerk mit verschiedener Wärmeleitfähigkeit λ. 18

Abb. 3: auf die wärmeübertragende Umfassungsfläche bezogener Transmissionswärmeverlust H'_T in Abhängigkeit des gesamten Fensterflächenanteils. Berechnungsverfahren nach EnEV 2014/ 2016. Die rote Linie markiert die Mindestanforderung an H'_T gemäß EnEV 2014/ 2016 Anlage1 Tabelle 2. 19

Abb. 4: erforderliche Wandstärke bei $H'_T = H'_{T,soll}$ für Mauerwerk mit λ=0,12 W/(mK) in Abhängigkeit des gesamten Fensterflächenanteils. 21

Abb. 5: auf die wärmeübertragende Umfassungsfläche bezogener Transmissionswärmeverlust H'_T in Abhängigkeit des südorientierten Fensterflächenanteils. Berechnungsverfahren nach EnEV 2014/ 2016. Die rote Linie markiert die Mindestanforderung an H'_T gemäß EnEV 2014/ 2016 Anlage1 Tabelle 2. 22

Abb. 6: erforderliche Wandstärke bei $H'_T = H'_{T,soll}$ für Mauerwerk mit λ=0,12 W/(mK) in Abhängigkeit des südorientierten Fensterflächenanteils. 23

Abb. 7: auf die wärmeübertragende Umfassungsfläche bezogener Transmissionswärmeverlust H'_T für verschiedene Bautypen, sortiert nach Fläche der Gebäudehülle. Die roten Kreuze markieren die Mindestanforderung an H'_T bei einem definierten Fensterflächenanteil von 20% für das Gesamtgebäude. 26

Abb. 8: erforderliche Wandstärke bei $H'_T = H'_{T,soll}$ für Mauerwerk mit verschiedener Wärmeleitfähigkeit λ. 27

Abb. 9: auf die wärmeübertragende Umfassungsfläche bezogener Transmissionswärmeverlust H'_T in Abhängigkeit des gesamten Fensterflächenanteils. Berechnungsverfahren nach Entwurf GEG 2018. Die rote Linie markiert die Mindestanforderung an H'_T bei einem definierten Fensterflächenanteil von 20% für das Gesamtgebäude. 28

Abb. 10: erforderliche Wandstärke bei $H'_T = H'_{T,soll}$ für Mauerwerk mit λ=0,12 W/(mK) im Bezug zur gesamten Fensterfläche. 29

Abb. 11: auf die wärmeübertragende Umfassungsfläche bezogener Transmissionswärmeverlust H'_T in Abhängigkeit des südorientierten Fensterflächenanteils. Berechnungsverfahren nach Entwurf GEG 2018. Die rote Linie markiert die Mindestanforderung an H'_T bei einem definierten Fensterflächenanteil von 20% für das Gesamtgebäude. 30

Abb. 12: erforderliche Wandstärke bei $H'_T = H'_{T,soll}$ für Mauerwerk mit λ=0,12 W/(mK) im Bezug zur südorientierten Fensterfläche. 31

Abb. 13: auf die Wohnfläche bezogener Transmissionswärmeverlust $H'_{T,Wfl}$ für verschiedene Bautypen, sortiert nach Wohnfläche. Die rote Linie markiert die Mindestanforderung an $H'_{T,eq,Wfl,soll}$ in Abhängigkeit der Wohnfläche. 34

Abb. 14: erforderliche Wandstärke bei $H'_{T,Wfl} = H'_{T,Wfl,soll}$ für Mauerwerk mit verschiedener Wärmeleitfähigkeit λ. 35

Abb. 15: auf die Wohnfläche bezogener Transmissionswärmeverlust $H'_{T,Wfl}$ in Abhängigkeit des gesamten Fensterflächenanteils. Berechnungsverfahren nach Entwurf Wfl-Verfahren 2018. 36
Abb. 16: erforderliche Wandstärke bei $H'_{T,Wfl} = H'_{T,Wfl,soll}$ für Mauerwerk mit λ=0,12 W/(mK) im Bezug zur gesamten Fensterfläche. 37
Abb. 17: auf die Wohnfläche bezogener Transmissionswärmeverlust $H'_{T,Wfl}$ in Abhängigkeit des südorientierten Fensterflächenanteils. Berechnungsverfahren nach Entwurf Wfl-Verfahren 2018. 38
Abb. 18: erforderliche Wandstärke bei $H'_{T,Wfl} = H'_{T,Wfl,soll}$ für Mauerwerk mit λ=0,12 W/(mK) im Bezug zur südorientierten Fensterfläche. 39

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Referenz U-Werte. 8
Tab. 2: Matrix Untersuchungsvarianten. 9
Tab. 3: Variation Fensterflächen. 9
Tab. 4: Maßangaben und Kennzahlen. 10
Tab. 5: Höchstwert des spezifischen, auf die wärmeübertragende Umfassungsfläche bezogener Transmissionswärmeverlust. 12
Tab. 6: Vergleich der Ergebnisse zum Transmissionswärmeverlust. 17
Tab. 7: Vergleich der Ergebnisse zum Transmissionswärmeverlust. 17
Tab. 8: Vergleich der Geradensteigungen zu den Transmissionswärmeverlusten. 20
Tab. 9: Verhältnis von Wand- und Fensterflächen zur Fläche der Gebäudehülle. 24
Tab. 10: Dachflächen und Anteile. 24
Tab. 11: erdberührte Bauteilflächen. 25
Tab. 12: Vergleich der Bezugsflächen. 33

1 Gebäudeenergiegesetz

Das Gebäudeenergiegesetz (GEG) [1] führt die die Energieeinsparverordnung (EnEV) [2], das Energieeinsparungsgesetz (EnEG) [3] und das Erneuerbaren-Energien-Wärmegesetz (EEWärmeG) [4] zu einem Gesetz zusammen und entspricht damit künftig den Vorgaben der Europäischen Union. Wesentliche Zielsetzung ist es, mit dem neuen Gebäudeenergiegesetz den ordnungspolitischen Rahmen zur Umsetzung des in den EU-Richtlinien 2010/31/EU [5] und 2018/844/EU [6] formulierten Niedrigstenergiegebäudestandard zu schaffen.

Mit dem Entwurf zum Gebäudeenergiesetz vom 23.01.2017 liegt eine erste Fassung vor, die zusammen mit der gegenwärtig geltenden Energieeinsparverordnung (EnEV) die Grundlage für weitere Diskussionen und Konzepte zur Neugestaltung bzw. Überarbeitung des künftigen Gesetzes bildet. Verbunden mit der geforderten Definition eines Niedrigstenergiegebäudestandards für die Jahre 2019 (öffentlich Bauten) und 2021 (alle anderen Bauten) bietet sich die Möglichkeit, die Anforderungen entsprechend der aktuell geltenden klimapolitischen Zielsetzungen und Verpflichtungen anzupassen und zu ergänzen sowie bisherige Kritikpunkte zu überarbeiten.

Die energetischen Anforderungen von EnEV und GEG und die dazugehörigen Bewertungsmethoden adressieren zum einen die bauliche Ausführung durch Festlegung einer thermischen Mindestqualität der Gebäudehülle (Transmissionswärmeverlust H'_T) und zum anderen die Versorgungstechnik durch gebäudebezogene Grenzwerte für den Primärenergiebedarf (Q_P).
Im Rahmen dieser Studie werden verschiedene Ansätze und Konzepte zur Begrenzung des Transmissionswärmeverlusts von Gebäuden im Vergleich zur bisherigen EnEV untersucht und bewertet. Grundlage der Untersuchung bildet ein typisches Einfamilienhaus, für das in unterschiedlichen Bauweisen und Konfigurationen (u.a. Dachkonstruktion, unterer Gebäudeabschluss, Raumhöhe, Fensterflächenanteil) die notwendigen, relevanten Kennwerte ermittelt werden.

Ziel der Untersuchung ist es, bei Berücksichtigung unterschiedlicher Varianten die Auswirkungen und Grenzen der Bewertungsmethoden und ihrer Anforderungen auf die Ausführung der Gebäudehülle und insbesondere auf die Außenwand in Mauerwerksbauweise aufzuzeigen.

2 Berechnungsrahmenbedingungen

2.1 Typgebäude

Die nachfolgenden Untersuchungen werden auf Basis eines Einfamilienhauses durchgeführt, das den bundesdeutschen Durchschnitt möglichst repräsentativ abbildet. Dazu wird auf das Einfamilienhaus- Typgebäude der Arbeitsgemeinschaft für zeitgemäßes Bauen e.V. [7] zurückgegriffen, dass auf der Basis einer umfangreichen Auswertung des Einfamiliengebäudebestandes entwickelt wurde. Um den Einfluss der verschiedenen Rechenmethoden bzw. Bewertungskonzepte auf unterschiedliche Bauweisen zu untersuchen, werden abweichend von der grundlegenden Definition des Typgebäudes einzelne Elemente des Gebäudes verändert und/ oder variiert. Den Ausgangsfall bildet ein der Geometrie des Typgebäudes entsprechendes Einfamilienhaus mit Fensterflächenanteilen von 15% für die Nord-, 20% für die Ost- und West- sowie 30% für die Südfassade. Die thermischen Bauteileigenschaften (U-Werte) entsprechen dabei den Angaben für das in der EnEV vorgegebene Referenzgebäude (Tab. 1).

Tab. 1: Referenz U-Werte.

Bauteil	U-Wert
	[W/(m²K)]
Außenwand	0,28
Außenwand gegen Erdreich	0,35
Bodenplatte gegen Erdreich	0,35
Dach/ oberste Geschossdecke	0,20
Fenster	1,30
Türen	1,80
Wärmebrückenzuschlag	0,05

2.2 Untersuchungsvarianten

Die zur Untersuchung zugrunde gelegten Varianten werden durch die unterschiedliche Ausführung folgender Elemente gebildet:

- Dachkonstruktion: Das Dach wird in den Berechnungen als Pult- und Satteldach untersucht. Das Pultdach sitzt auf dem Obergeschoss auf, so dass die Raumhöhe an allen Stellen über 2 m liegt und die Wohnfläche gemäß Wohnflächenverordnung [8] für die gesamte Fläche vollständig angerechnet werden kann. Das Satteldach schließt demgegenüber mit einer Dachneigung von 45°C direkt auf dem Erdgeschoss an. Durch die Dachschräge ergeben sich Teilbereiche von unter 2 bzw. 1 m Raumhöhe, wodurch die darunterliegenden Flächen dann nur noch zur Hälfte in die Wohnflächenberechnungen eingehen bzw. ohne Berücksichtigung bleiben.
- Unterer Gebäudeabschluss: Der untere Gebäudeabschluss wird alternativ durch eine Kellerkonstruktion mit 2,50 m Raumhöhe und Fundamentbodenplatte bzw. alleine durch die Fundamentbodenplatte ohne Keller gebildet.

- Raumhöhe: Alle Bauweisen werden mit zwei unterschiedlichen Raumhöhen von 2,50 und 2,75 m für die Wohnbereiche untersucht.
- Fensterflächenanteil: Zur Untersuchung des Einflusses der Fensterflächen werden zwei Untersuchungsschritte durchgeführt. Zunächst wird der gesamte Fensterflächenanteil unabhängig von der Orientierung in 10%-Schritten zwischen 10 und 90% variiert. Ergänzend wird nur der südorientierte Fensterflächenanteil wiederum in 10%-Schritten zwischen 10 und 90% verändert, während die weiteren Fensterflächenanteile dem Basisfall entsprechen (Tab. 3).

Damit ergeben sich folgende Untersuchungsvarianten (Tab. 2 + Tab. 3):

Tab. 2: Matrix Untersuchungsvarianten.

Gebäudetyp	Einfamilienhaus EFH							
Orientierung	Süd							
Raumhöhe	250mm				275mm			
Dachform	Pultdach		Satteldach		Pultdach		Satteldach	
Keller	o. Keller	m. Keller	o. Keller	m. Keller	o. Keller	m. Keller	o. Keller	m. Keller
Fenster	Variation entsprechend Tab. 3							

Tab. 3: Variation Fensterflächen.

Orientierung	Nord	Ost	Süd	West
Fensterflächenanteil	[%]	[%]	[%]	[%]
Referenzgebäude	15	20	30	20
Variation gesamte Fensterfläche	10-90	10-90	10-90	10-90
Variation südorientierte Fensterfläche	15	20	10-90	20

Die wichtigsten Maßangaben und Kennzahlen zu den geometrischen Verhältnissen der Gebäudevarianten auf Grundlage des Fensterflächenanteils für den Ausgangsfall werden in nachfolgender Tabelle (Tab. 4) zusammengefasst.

Tab. 4: Maßangaben und Kennzahlen.

Raumhöhe	250mm				275mm			
Dachform	Pultdach		Satteldach		Pultdach		Satteldach	
Keller	o. Keller	m. Keller	o. Keller	m. Keller	o. Keller	m. Keller	o. Keller	m. Keller
Bezeichnung	PD_oK_250	PD_mK_250	SD_oK_250	SD_mK_250	PD_ok_275	PD_mK_275	SD_oK_275	SD_mK_275
A_{AW}	190	190	113	113	205	205	120	120
$A_{AW,Ke}$	0	106	0	106	0	106	0	106
A_{Fe}	54	54	30	30	58	58	32	32
A_{Da}	94	94	129	129	94	94	129	129
$A_{Hülle}$	428	534	364	470	448	553	373	479
A_{Wfl}	137,4	137,4	109,1	109,1	137,4	137,4	109,1	109,1
A_N	185	266	144	224	200	280	151	231
V_e	579	830	449	700	625	876	472	723
$A_{Hülle}/V_e$	0,739	0,643	0,811	0,671	0,717	0,631	0,790	0,663
A_{AW}/A_{Fe}	3,52	3,52	3,77	3,77	3,53	3,53	3,75	3,75
$A_{AW}/A_{AW,Ke}$	-	1,79	-	1,07	-	1,93	-	1,13
A_{AW}/A_{Da}	2,02	2,02	0,88	0,88	2,18	2,18	0,93	0,93

3 Definition der Anforderungen an eine thermische Mindestqualität der Gebäudehülle

Aus den unterschiedlichen Ansätzen zu den normativen Anforderungen an die thermische Qualität der Gebäudehülle resultieren verschiedene Wechselwirkungen und Auswirkungen auf die Spezifikation von Gebäuden (insbesondere mit Keller/ ohne Keller, Flachdach-Steildach, Geschosshöhe, Fensterflächenanteile).
Diese sollen im Weiteren näher untersucht werden, um zu analysieren, wie sich die verschiedenen Ansätze auf die einzelnen Punkte auswirken und wie – bei Bedarf – Kompensationen erfolgen müssten.

3.1 spezifischer, auf die wärmeübertragende Umfassungsfläche bezogener Transmissionswärmeverlust - EnEV 2014/ 2016

Zur Sicherstellung eines thermischen Mindeststandards für die Gebäudehülle wird in der bestehenden Energieeinsparverordnung (EnEV 2014/ 2016) ein Höchstwert für den spezifischen, auf die wärmeübertragende Umfassungsfläche bezogener Transmissionswärmeverlust in Abhängigkeit des Gebäudetyps (freistehend, Anbau, sonstige) und der Gebäudenutzfläche ($A_N \leq 350$ m² bzw. $A_N > 350$ m²) definiert. Dieser bildet letztlich den mittleren U-Wert der gesamten Gebäudehülle inklusive der Verluste über Wärmebrücken ab und stellt damit einen einfachen Indikator für die Beurteilung der thermischen Qualität der Gebäudehülle dar.

$$H'_T = \frac{\sum_{i=1}^{n}(A_i \cdot U_i \cdot F_i)}{A_{Hülle}} \qquad \text{Gl. 1}$$

H'_T	Transmissionswärmeverlustkoeffizient [W/(m²K)]
A_i	Fläche des Bauteils i [m²]
U_i	U-Wert des Bauteils i [W/(m²K)]
F_i	Temperaturkorrekturfaktor des Bauteils i [-]
$A_{Hülle}$	Fläche der Gebäudehülle [m²]

Der Grenzwert ist für die gesamte Gebäudehülle einzuhalten, definiert also keine bauteilspezifischen Vorgaben (z.B. für Fenster, Dach, etc.). Damit besteht die Möglichkeit, thermisch ungünstigere Bauteile durch günstigere zu kompensieren und so die Gebäudehülle auch aus wirtschaftlicher Sicht zu optimieren, solange der normativ geforderte Mindestwärmeschutz für jedes Bauteil erfüllt ist. So bleibt – innerhalb eines bestimmten Rahmens – ein technologieoffener Ansatz erhalten, der verschiedene Konzepte und Lösungen für die Gebäudehülle ermöglicht.

Tab. 5: Höchstwert des spezifischen, auf die wärmeübertragende Umfassungsfläche bezogener Transmissionswärmeverlust.

Zeile	Gebäudetyp		Höchstwert des spezifischen Transmissionswärmeverlusts
1	Freistehendes Wohngebäude	Mit $A_N \leq 350m^2$	$H'_T = 0{,}40\ W/(m^2K)$
		Mit $A_N > 350m^2$	$H'_T = 0{,}50\ W/(m^2K)$
2	Einseitig angebautes Wohngebäude		$H'_T = 0{,}45\ W/(m^2K)$
3	Alle anderen Wohngebäude		$H'_T = 0{,}65\ W/(m^2K)$
4	Erweiterungen und Ausbauten von Wohngebäuden gemäß § 9 Absatz 5		$H'_T = 0{,}65\ W/(m^2K)$

3.2 Referentenentwurf zum Gebäudeenergiegesetz vom 23.01.2018

Der Referentenentwurf zum neuen Gebäudeenergiegesetz vom 23.01.2018 sieht einen Erhalt des spezifischen Transmissionswärmeverlusts H'_T als Kennwert vor. Anstelle des für den Gebäudetypen pauschalen Tabellenwertes (Tab. 5) tritt hier ein Grenzwert, der anhand des Referenzgebäudes und den darin definierten spezifischen Vorgaben für die einzelnen Bauteile berechnet wird.

Durch den Wegfall der gebäudespezifischen Grenzwerte (Tab. 5) ergeben sich die neuen Grenzwerte ausschließlich aus dem Referenzgebäudeverfahren. Hierin sind keine Vorgaben enthalten, den Fensterflächenanteil zu beschränken. Damit ist zum einen ein hoher Freiheitsgrad für die Gestaltung von Gebäuden gegeben, zum anderen reduziert sich aber auch die Anforderung an eine Mindestqualität der thermischen Gebäudehülle gegenüber dem aktuellen Stand deutlich, da H'_T vom Bauteil mit den ungünstigsten Eigenschaften (Fenster) abhängig ist. Um aus klimaschutzpolitischer Sicht kontraproduktive Entwicklungen einzuschränken, ist daher eine Begrenzung des Fensterflächenanteils auf 20% für den rechnerischen Nachweis auf Basis des Referenzgebäudes in Diskussion.

3.3 Äquivalenter Transmissionswärmeverlust - Kurzgutachten Ecofys, Öko-Institut, Prognos, dena

Der konzeptionelle Ansatz für eine äquivalenten Transmissionswärmeverlust [9] sieht vor, dass mit Änderung des Flächenbezugs (Wohnfläche statt wärmeübertragende Umfassungsfläche) und dem Einbezug solarer Gewinne (nur für südorientierte Fensterflächen) neue Anreize zum einen für kompaktes Bauen (Wohnflächenbezug) zum anderen für die Optimierung der solaren Gewinne (südorientierte Fensterflächen) geschaffen werden.
Zur Begrenzung der Transmissionsverluste werden verschiedene Ansätze diskutiert

- empirische Grenzwertformel in Abhängigkeit des Gebäudetyps (EFH, MFH) und der Wohnfläche
- Tabellenwerte in Abhängigkeit von Gebäudetyp, Gebäudegröße und Bausituation (freistehend, Anbau)
- Fester Grenzwert in Abhängigkeit von Gebäudetyp und Bausituation – ohne Wohnflächenbezug.

Um einer sommerlichen Überhitzung durch zu große Fensterflächen entgegen zu treten, wird auf den normativen sommerlichen Mindestwärmeschutz nach DIN 4108-2 verwiesen, dessen Vorgaben unabhängig von den energetisch angestrebten Standards weiterhin einzuhalten sind. Da sowohl für die tabellarischen Grenzwerte als auch für den festen Grenzwert die empirische Grenzwertformel die Grundlage bildet, wird dieses nachfolgend dargestellt und als konzeptioneller Ansatz im Weiteren mit untersucht.
Ausgangspunkt stellt zunächst der äquivalente Transmissionswärmeverlust $H'_{T\,äq,Wfl}$ dar:

$$H'_{T\,äq,Wfl} = \frac{H'_{T\,S,äq} \cdot A_{Hülle}}{A_{Wfl}} \qquad \text{Gl. 2}$$

$H'_{T\,äq,Wfl}$	äquivalenter, auf die Wohnfläche bezogener Transmissionswärmeverlustkoeffizient [W/(m²$_{Wfl}$K)]
$H'_{T\,S,äq}$	äquivalenter, auf die wärmeübertragende Umfassungsfläche bezogener Transmissionswärmeverlustkoeffizient [W/(m²$_{Hülle}$K)]
$A_{Hülle}$	Fläche der Gebäudehülle [m²]
A_{Wfl}	Wohnfläche [m²]

Die Berücksichtigung der solaren Gewinne bei der Berechnung des Transmissionswärmeverlust $H'_{T\,S,äq}$ sieht zunächst eine Reduktion des U-Werts der südorientierten Fensterflächen um den Gesamtenergiedurchlassgrad g vor. Dieser wird um den pauschalen Faktor 0,66 für Verschattung, Verschmutzung und Abweichungen von der Normalen abgemindert:

$$U_{w,S,äq} = U_{w,S} - 0{,}66 \cdot g \qquad \text{Gl. 3}$$

$U_{w,S,äq}$	äquivalenter U-Wert für Südfenster [W/(m²K)]
$U_{w,S}$	U-Wert der Südfenster [W/(m²K)]
g	Gesamtenergiedurchlassgrad [-]
0,66	Abminderungsfaktor für Verschattung, Verschmutzung, etc.

Die einzuhaltenden Grenzwerte für den äquivalenten Transmissionswärmeverlust ergeben sich aus einer empirischen Grenzwertformel. Neben der Wohnfläche und dem Anteil der nicht angebauten Außenwandfläche gehen der konstante Faktor a und der Summand b in die Berechnung mit ein, die für Ein- und Mehrfamilienhäuser unterschieden werden. Daraus ergibt sich folgende Grenzwertformel:

$$H'_{T\,äq,Wfl,max} = f_{AW} \cdot a \cdot A_{Wfl}{}^{-\frac{1}{2}} + b$$ Gl. 4

$H'_{T\,äq,Wfl,max}$	Grenzwert des äquivalenten, auf die Wohnfläche bezogenen Transmissionswärmeverlustkoeffizienten [W/(m²$_{Wfl}$K)]
f_{AW}	Faktor für Anteil der nicht angebauten Außenwandflächen [%]
A_{Wfl}	Wohnfläche [m²]
a	Gebäudetypspezifische Konstante (EFH: a=9,9; MFH: a=14,0) [W/(m⁴K)]
b	Gebäudetypspezifische Konstante (EFH: b=0,31; MFH: b=0,16) [W/(m²K)]

4 Methodischer Ansatz

Auf Basis der in Kapitel 2 erläuterten Berechnungsrahmenbedingungen und definierten Untersuchungsvarianten werden im Weiteren die drei Verfahren aus Kapitel 3 analysiert, die als Möglichkeiten zur Festlegung eines thermischen Standards für die Gebäudehülle im Rahmen des Gebäudeenergiegesetzes diskutiert werden. Durch Berücksichtigung der unterschiedlichen Varianten (Dach, unterer Gebäudeabschluss, Raumhöhe, Fensterflächenanteil) sollen mögliche Auswirkungen und Konsequenzen der Berechnungsverfahren auf die Ausführung der Außenwand als Teil der thermischen Gebäudehülle für ein typisches Einfamilienhaus aufgezeigt werden. Die Untersuchung erfolgt entsprechend nachfolgenden Schritten:

(I) Im ersten Schritt werden die Transmissionswärmeverluste entsprechend der jeweiligen Verfahren auf Basis der definierten Untersuchungsvarianten (Tab. 2) mit festem Fensterflächenanteil (Tab. 3 - Referenzgebäude) ermittelt. Damit ergeben sich in Abhängigkeit von Dachkonstruktion, unterem Gebäudeabschluss und Raumhöhe im Ergebnis acht Varianten.

(II) Im zweiten Schritt wird zusätzlich der Fensterflächenanteil des gesamten Gebäudes unabhängig von der Orientierung in Schritten von 10% zwischen 10 und 90% variiert (Tab. 3 – Variation gesamte Fensterfläche).

(III) Im dritten Schritt entsprechen die Fensterflächenanteile für Norden, Osten und Westen dem Referenzgebäude während der Fensterflächenanteil der Südseite zwischen 10 und 90% variiert wird (Tab. 3 – Variation südorientierte Fensterfläche).

(IV) Um den Einfluss der Berücksichtigung solarer Gewinne auf alle Rechenverfahren und Varianten gleichermaßen zu untersuchen, wird zusätzlich der äquivalente Transmissionswärmeverlust ermittelt. Dazu werden die Schritte 1 bis 3 wiederholt wobei die solaren Gewinne über die südorientierten Fensterflächen mit in die Berechnungen eingehen.

(V) Der Abgleich mit den jeweiligen Verfahrensgrenzwerten zeigt, welche Varianten die Anforderungen erfüllen oder überschreiten.

(VI) Abschließend werden die Auswirkungen auf die Ausführung der Außenwand aufgezeigt. Dazu wird für alle zuvor untersuchten Varianten ermittelt, welche Wandstärken bei marktüblichen thermischen Qualitäten mit λ = 0,08 - 0,12 W/(m K) für monolithisches Mauerwerk notwendig sind, um die jeweiligen Anforderungen einzuhalten. Die thermischen Eigenschaften der weiteren Bauteile der Gebäudehülle bleiben dabei unverändert und entsprechen dem Referenzfall.

5 Energieeinsparverordnung EnEV 2014/2016

Die nachfolgenden Ergebnisse beruhen auf Berechnungen des Transmissionswärmeverlusts nach aktuellem EnEV-Verfahren. Als Grenzwerte gelten damit entweder die Tabellenwerte in Abhängigkeit des Gebäudetyps, wie in Tabelle 2 von Anlage 1 der EnEV 2016 (siehe Tab. 5) definiert, oder der auf Basis des Referenzgebäudes berechnete Wert, sofern dabei der Tabellenwert unterschritten wird (Bsp.: der rechnerische Wert beträgt H'_T=0,37 gegenüber dem Tabellenwert H'_T=0,40 W/(mK) aus der Tabelle => es gilt der rechnerische Wert). Zusätzlich wird zum Vergleich der äquivalente Transmissionswärmeverlust $H'_{T,eq}$ ausgewiesen, bei dem, wie in Abschnitt 3 geschildert, die solaren Gewinne über die südorientierten Fensterflächen berücksichtigt werden.

5.1 Variation Bautypen

Entsprechend der Systematik von Tab. 2 wurden die nachfolgenden Bautypen des zugrunde gelegten Gebäudes berechnet und untersucht.

5.1.1 Transmissionswärmeverluste

Die Ergebnisse aus den Berechnungen der Transmissionswärmeverluste nach EnEV-Verfahren zeigen, dass die Pultdachvarianten die tabellarische Mindestanforderung an die Gebäudehülle ($H'_{T,soll} \leq 0{,}40$ W/(mK)) überschreiten (Abb. 1, linke Seite). Zugrunde gelegt sind dabei die thermischen Eigenschaften des Referenzgebäudes. Demgegenüber unterschreiten die Satteldachvarianten den geforderten Grenzwert, womit entsprechend der Definition der EnEV 2016 der berechnete Wert auf Basis des Referenzgebäudes als Mindestanforderung gilt.

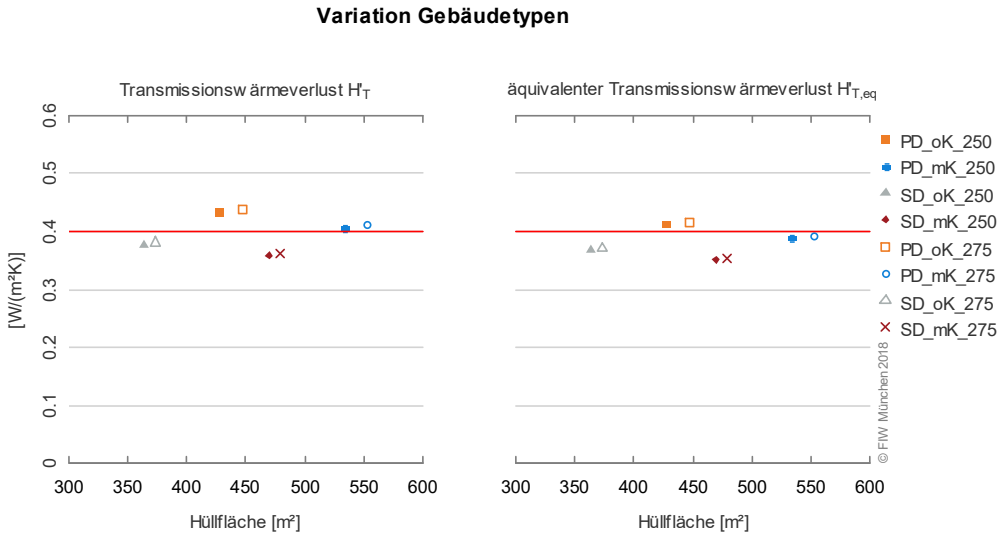

Abb. 1: auf die wärmeübertragende Umfassungsfläche bezogener Transmissionswärmeverlust H'_T bzw. $H'_{T,eq}$. Die rote Linie markiert die Mindestanforderung an H'_T gemäß EnEV 2014/ 2016 Anlage1 Tabelle 2.

Obwohl das A/V-Verhältnis für die Pultdachvarianten etwas günstiger ausfällt als bei den Satteldachvarianten, schneiden Letztere im Ergebnis mit geringeren Transmissionsverlusten ab. Bei den Varianten mit Satteldach liegen im Vergleich größere Bauteilflächen mit sehr

geringen U-Wert (z.B. Dach) vor, während die Flächenanteile mit höheren U-Werten (z.B. Fenster und Außenwand) etwas niedriger sind (vgl. Tab. 6).

Tab. 6: Vergleich der Ergebnisse zum Transmissionswärmeverlust.

Variante		PD_oK_250	PD_mK_250	SD_oK_250	SD_mK_250	PD_oK_275	PD_mK_275	SD_oK_275	SD_mK_275
Fläche Gebäudehülle $A_{Hülle}$	[m²]	428	534	364	470	448	553	373	479
Beheiztes Gebäudevolumen V_e	[m³]	579	830	449	700	625	876	472	723
A_{AW}	[m²]	190	190	113	113	205	205	120	120
$A_{AW,Ke}$	[m²]	0	106	0	106	0	106	0	106
A_{Fe}	[m²]	54	54	30	30	58	58	32	32
A_{Da}	[m²]	94	94	129	129	94	94	129	129
$A_{Hülle}$	[m²]	428	534	364	470	448	553	373	479
$A_{Hülle}/V_e$	[-]	0,739	0,643	0,811	0,671	0,717	0,631	0,790	0,663

Die Berücksichtigung solarer Gewinne über die südorientierten Fenster führt gegenüber dem geltendem EnEV-Verfahren zu geringeren Transmissionswärmeverlusten (zwischen ~2 und 5%). Damit würde die Variante „Pultdach mit Keller“ nun in beiden Variationen (250 bzw. 275cm) die tabellarischen Mindestanforderungen der EnEV erfüllen, sofern diese keine Anpassungen erfahren. Auch die Variante Pultdach ohne Keller nähert sich dem Grenzwert von 0,40 W/(mK) an.

Tab. 7: Vergleich der Ergebnisse zum Transmissionswärmeverlust.

Variante		PD_oK_250	PD_mK_250	SD_oK_250	SD_mK_250	PD_oK_275	PD_mK_275	SD_oK_275	SD_mK_275
Transmissionswärmeverlust H'_T	[W/(m²K)]	0,432	0,405	0,377	0,359	0,437	0,410	0,381	0,362
Äquivalenter Transmissionswärmeverlust $H'_{T,eq}$	[W/(m²K)]	0,411	0,388	0,367	0,351	0,416	0,393	0,371	0,354
$H'_{T,eq}/H'_T$	[-]	0,951	0,958	0,973	0,978	0,952	0,959	0,974	0,978

5.1.2 Auswirkung auf die Ausführung der Außenwand

Für die Darstellung der Auswirkungen auf die Ausführung der Außenwand werden fünf thermische Qualitäten mit Wärmeleitfähigkeiten zwischen 0,08 und 0,12 W/ (mK) zugrunde gelegt, wie sie für gegenwärtige Wandsysteme zur Verfügung stehen, und die Stärke soweit angepasst, dass die Anforderungen an den Transmissionswärmeverlust erreicht werden. Alle anderen Bauteile entsprechen den Werten, die für das EnEV-Referenzgebäude definiert sind und bleiben unverändert.

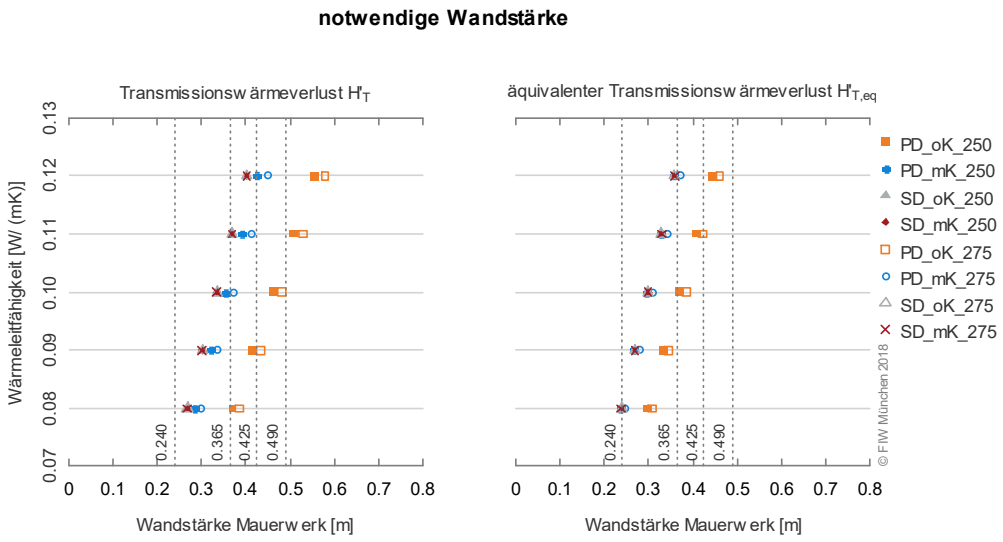

Abb. 2: erforderliche Wandstärken für H'_T bzw. $H'_{T,eq}$ für Mauerwerk mit verschiedener Wärmeleitfähigkeit λ.

Unterschreitet der Transmissionsverlust H'_T des Gebäudes den tabellarischen Grenzwert der EnEV gilt der berechnete Wert auf Basis des Referenzgebäudes als Mindestanforderung. Das bedeutet für diese Varianten, dass eine Ausführung auf Grundlage des Referenzgebäudes auch immer eine Einhaltung der Mindestanforderungen entspricht. Dies gilt in dieser Untersuchung für alle Varianten mit Satteldach, weshalb deren Ergebnisse gleich ausfallen und in der Darstellung übereinander liegen (Abb. 2, links).

Zur Einhaltung der Grenzwerte bei den Pultdachvarianten ist demgegenüber die Ausführung der Außenwand in höherer thermischer Qualität notwendig. Dazu muss entweder eine günstigere Wärmeleitfähigkeit, eine größere Wandstärke oder beides gewählt werden.

Für die Varianten „Satteldach“ (mit und ohne Keller) und „Pultdach mit Keller“ können die EnEV-Anforderungen mit marktüblichen Steinqualitäten bei einer Standardwandstärke von 365mm eingehalten werden. Die Variante „Pultdach ohne Keller“ stößt hier, bei Anwendung der höchsten thermischen Qualität, bereits an ihre Grenzen, so dass entweder größere Wandstärken oder zusätzliche Maßnahmen an anderen Bauteilen zur Kompensation notwendig werden.

Die Berücksichtigung der solaren Gewinne durch den äquivalenten Transmissionswärmeverlust führt zu günstigeren Ergebnissen für die notwendigen Wandstärken, die in Abhängigkeit des südorientierten Fensterflächenanteils und der sonstigen wärmeübertragenden Umfassungsfläche für jeden Bautyp spezifisch ausfallen (Abb. 2, rechts). Die Varianten „Satteldach mit und ohne Keller“ fallen dabei nahezu identisch aus. Leicht höhere Werte für die Wandstärke ergeben sich für die Pultdach-Variante mit 275cm Raumhöhe und Keller. Die höchsten Wandstärken sind für Pultdachvariante ohne Keller in beiden Ausführungshöhen notwendig. Damit sind auf Basis eines Standardmauerwerks mit 365mm Stärke die Varianten mit Satteldach in allen hier zugrunde gelegten Ausführungen und die Variante Pultdach mit Keller umsetzbar. Dies trifft auch für die Variante Pultdach ohne Keller bei Mauerwerk mit sehr günstigen Wärmeleitfähigkeiten zu. Die Pultdachvariante ohne Keller ist bei thermischen Qualitäten des Mauerwerks über 0,10 W/(m²K) nur mit höheren Wandstärken oder Kompensationsmaßnahmen an anderen Bauteilen zu realisieren.

5.2 Variation Fensterfläche gesamt

Bei den nachfolgenden Betrachtungen wird in Ergänzung zu den zuvor untersuchten Bautypen zusätzlich der Einfluss des Fensterflächenanteils des Gesamtgebäudes untersucht und dargestellt. Dazu wird der gesamte Fensterflächenanteil in Schritten von 10% zwischen 10 und 90% variiert.

5.2.1 Transmissionswärmeverluste

Abweichend zu den vorhergehenden Typgebäuden mit von der Orientierung abhängigen festen Fensterflächenanteilen (siehe Tab. 3) werden nachfolgend die Ergebnisse auf Grundlage variabler Fensterflächenanteile abgebildet. Dabei verhält sich der Transmissionswärmeverlust mit zunehmenden Fensterflächenanteil linear. Das Bauteil mit dem höchstem U-Wert (Fenster) bestimmt in der Folge das Gesamtergebnis. Die tabellarische Mindestanforderung der EnEV wird dabei für die Variante „Pultdach ohne Keller“ bereits ab einem Fensterflächenanteil von knapp über 15% überschritten. Im günstigsten Fall (Satteldach mit Keller) sind Fensterflächenanteile bis zu etwa 35% möglich. Alle anderen Varianten bewegen sich in Bereichen dazwischen. Höhere Fensterflächenanteile benötigen also häufig zusätzliche Effizienzmaßnahmen, um die niedrigeren thermischen Qualitäten auszugleichen.

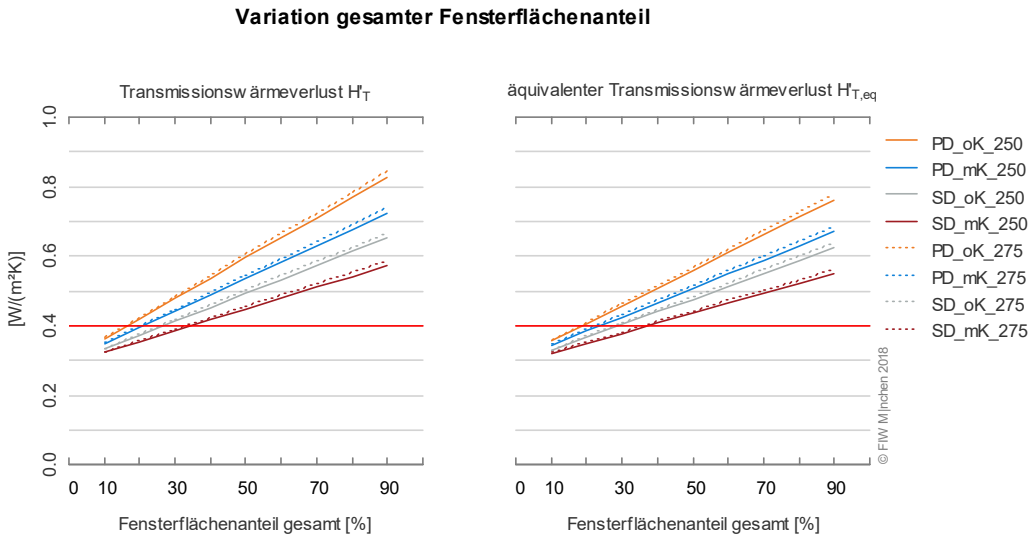

Abb. 3: auf die wärmeübertragende Umfassungsfläche bezogener Transmissionswärmeverlust H'_T in Abhängigkeit des gesamten Fensterflächenanteils. Berechnungsverfahren nach EnEV 2014/ 2016. Die rote Linie markiert die Mindestanforderung an H'_T gemäß EnEV 2014/ 2016 Anlage1 Tabelle 2.

Mit Berücksichtigung der solaren Gewinne fallen die Werte für den Transmissionswärmeverlust $H'_{T,eq}$ niedriger aus. Der lineare Verlauf der Ergebnisse zeigt sich insgesamt leicht flacher. Der Fensterflächenanteil nimmt für alle Orientierungen gleichermaßen zu, so dass der Einfluss der solaren Gewinne auf der Südseite nicht dominiert. Die Steigung der Geraden fallen gegenüber dem herkömmlichen Rechenverfahren zwischen 12 und 3% geringer aus (Tab. 8).

Tab. 8: Vergleich der Geradensteigungen zu den Transmissionswärmeverlusten.

Variante		PD_oK_250	PD_mK_250	SD_oK_250	SD_mK_250	PD_oK_275	PD_mK_275	SD_oK_275	SD_mK_275
Transmissionswärmeverlust H'_T	[-]	0,058	0,047	0,040	0,031	0,058	0,047	0,041	0,031
Äquivalenter Transmissionswärmeverlust $H'_{T,eq}$	[-]	0,051	0,041	0,037	0,029	0,053	0,043	0,038	0,030
$H'_{T,eq}/H'_T$	[-]	0,88	0,87	0,93	0,94	0,91	0,91	0,93	0,97

Die Mindestanforderung der EnEV ($H'_T \leq 0{,}40$) wird von den untersuchten Varianten abhängig vom Bautyp bei einem maximalen, gesamten Fensterflächenanteil von knapp 20 bis 40% eingehalten. Darüber hinaus sind Verbesserungen an den thermischen Eigenschaften der Bauteile notwendig.

5.2.2 Auswirkung auf die Ausführung der Außenwand

Nachfolgende Grafiken (Abb. 4) zeigen die Mindestwandstärke in Abhängigkeit des Fensterflächenanteils für die Wärmeleitfähigkeiten von λ=0,08 und 0,12 W/ (mK) ohne und mit Berücksichtigung der solaren Gewinne auf der Südseite. Die höhere thermische Qualität des Steins ermöglicht dabei Fensterflächenanteile bis zu etwa 35%, abhängig vom Gebäudetyp. Darüber hinaus sind Wandstärken notwendig, die eine wirtschaftliche Umsetzung erschweren, so dass zusätzliche Maßnahmen an anderen Bauteilen in der Regel vorgezogen werden.
Bei einer Wandstärke von 365 mm ergibt sich für die hier untersuchten Typgebäude eine sinnvolle Grenze des Fensterflächenanteils für die Satteldachvarianten von etwa 30% und für die Pultdachvarianten von etwa 20%. Bei weiteren Erhöhungen der Fensterflächenanteile bedarf es zusätzlicher Kompensationsmaßnahmen an Außenwand oder der opaken Gebäudehülle. Die sinnvolle Grenze der Kompensation alleine über die Außenwand ist damit aber bei einem Fensterflächenanteil von etwa 30% bereits gegeben.
Die Berücksichtigung der solaren Gewinne über die südorientierten Fensterflächen erlaubt größere Fensterflächenanteile von bis zu 40% für die Satteldachvarianten und bis zu knapp 30% für die Pultdachvarianten.

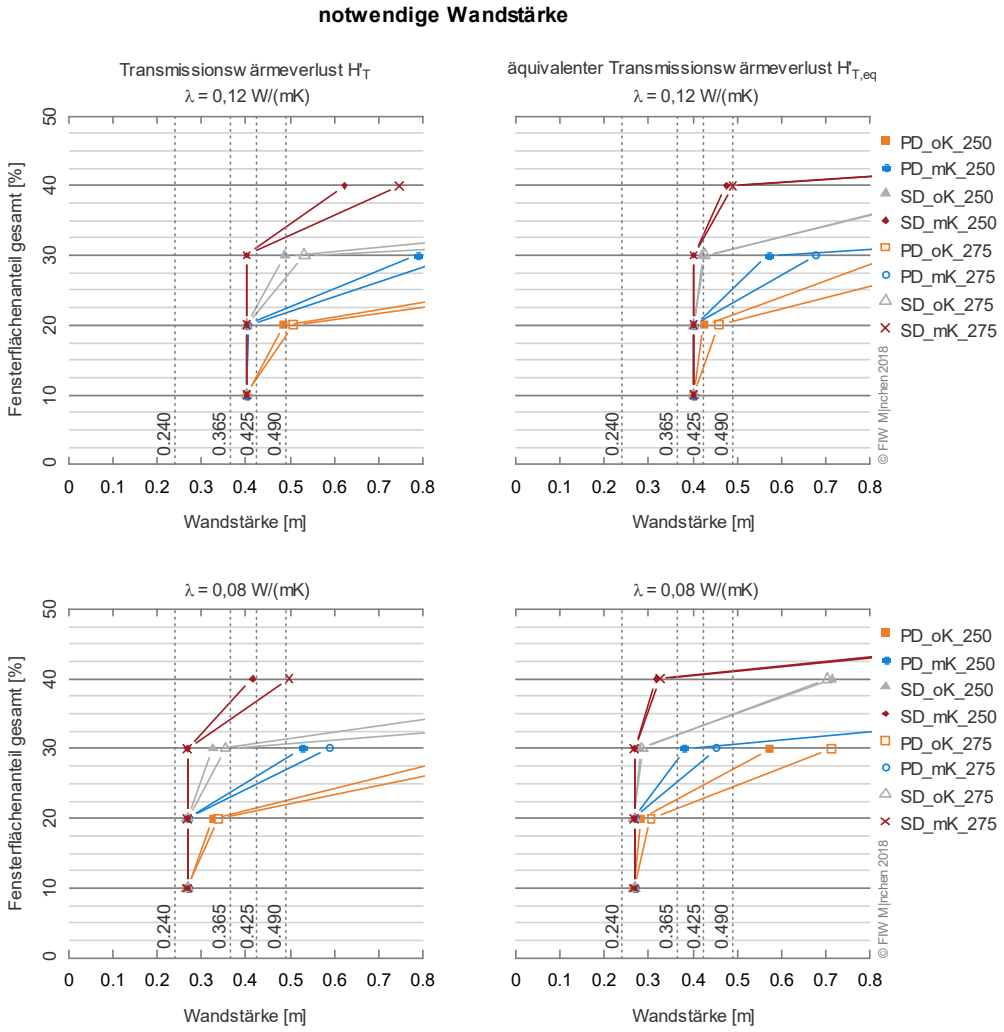

Abb. 4: erforderliche Wandstärke bei $H'_T = H'_{T,soll}$ für Mauerwerk mit λ=0,12 W/(mK) in Abhängigkeit des gesamten Fensterflächenanteils.

5.3 Variation der südorientierten Fensterfläche

Basierend auf den grundlegenden Varianten (Tab. 2) wird nachfolgend der Einfluss des südorientierten Fensterflächenanteils untersucht. Dazu wird dieser zwischen 10 und 90% variiert und der Transmissionswärmeverlust berechnet Die Fensterflächen der anderen Orientierungen bleiben unverändert (Ost/West: 20%, Nord: 15%) (siehe auch Tab. 3, Zeile 4).

5.3.1 Transmissionswärmeverluste

Mit zunehmenden südorientierten Fensterflächenanteil steigt auch der Transmissionswärmeverlust der Gebäudehülle H'_T linear an. Die Steigung fällt für die Satteldachvarianten sehr flach aus, so dass die Mindestanforderungen der EnEV mit südorientierten Fensterflächenanteilen zwischen maximal 55 bis 90% (je nach Bauart mit oder ohne Keller) erreicht werden können. Für die Pultdachvarianten sind die Grenzen auf Basis der Referenzrahmenbedingungen bereits früher erreicht. Hier ergeben sich Fensterflächenanteile zwischen knapp über 10% (PD_oK_250) bis maximal etwa 25% (PD_mK_250). Ein großer Teil der untersuchten Varianten überschreitet den Grenzwert von

$H'_T \leq 0{,}40$ W/ (mK). Entsprechend sind Kompensationsmaßnahmen durch bessere thermische Bauteileigenschaften an der Wand selbst oder an anderen Bauteilen notwendig.

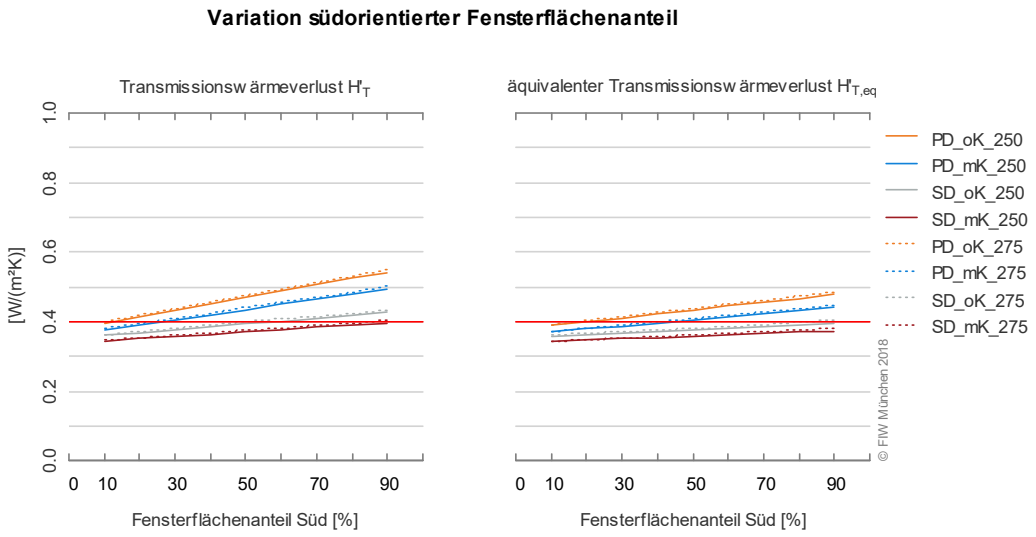

Abb. 5: auf die wärmeübertragende Umfassungsfläche bezogener Transmissionswärmeverlust H'_T in Abhängigkeit des südorientierten Fensterflächenanteils. Berechnungsverfahren nach EnEV 2014/ 2016. Die rote Linie markiert die Mindestanforderung an H'_T gemäß EnEV 2014/ 2016 Anlage1 Tabelle 2.

Der Einfluss des äquivalenten Transmissionswärmeverlusts mit Berücksichtigung der solaren Gewinne ist für diesen Fall (ausschließlich Variation Fensterfläche Süd) deutlicher (Abb. 5, rechts). Der Verlauf zeigt sich deutlich flacher, so dass für die Satteldachvarianten Fensterflächenanteile auf der Südseite möglich sind, die in der realen Praxis einer vollständigen Verglasung gleichkommen (>80%). Auch bei den Pultdachvarianten ergeben sich Fensterflächenanteile bis zu 45%. Erst dann sind weitere Maßnahmen notwendig.

5.3.2 Auswirkung auf die Ausführung der Außenwand

Bei Wärmeleitfähigkeiten zwischen 0,08 und 0,12 W/ (mK) sind bei einer Wandstärke von 365mm für die Satteldachvarianten Fensterflächenanteile bis über 80% möglich. Das entspricht in der Praxis einer vollständigen Verglasung. Für die Pultdachvarianten liegt die Grenze bei gleicher Mauerwerksstärke bei knapp unter 50% erreicht. Die Varianten mit Keller schneiden im Vergleich günstiger ab. Der geringere Transmissionswärmeverlust durch die Kellerbauteile verbessert den Gesamtwert der Gebäudehülle.

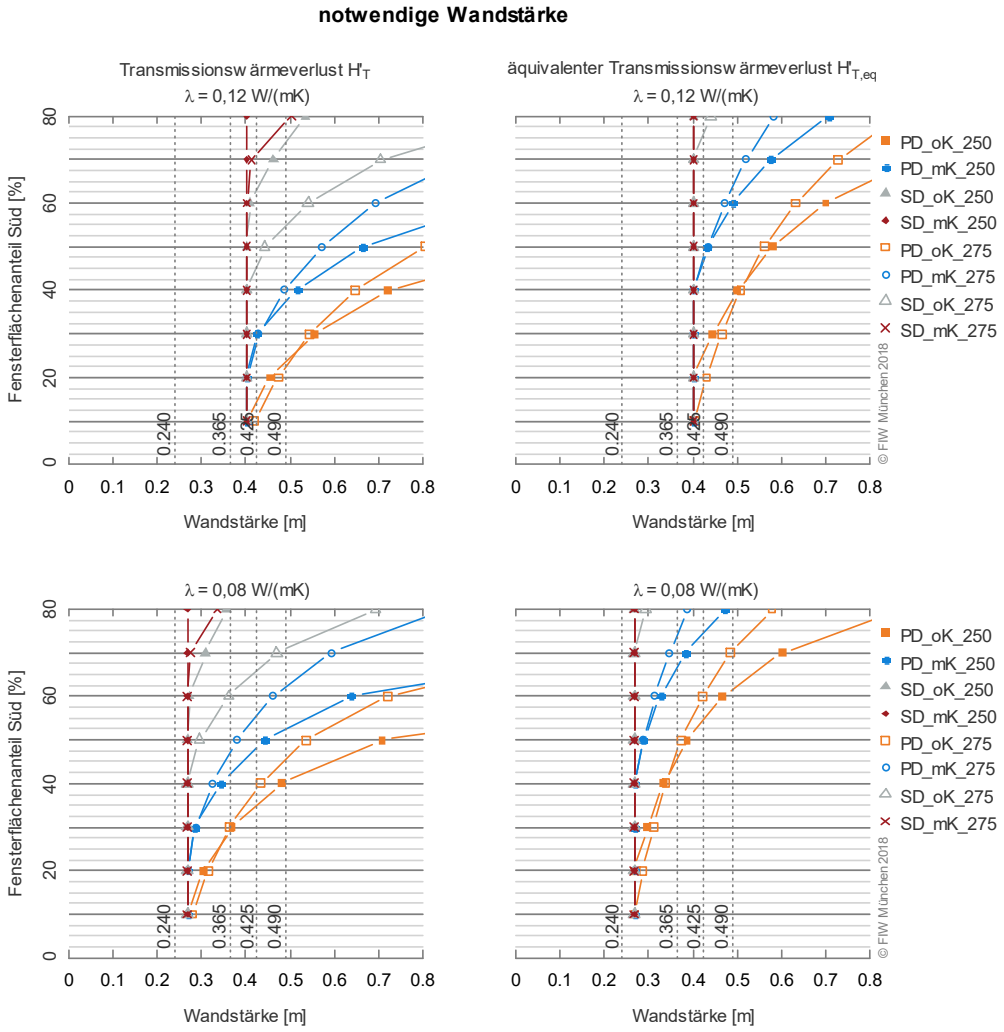

Abb. 6: erforderliche Wandstärke bei $H'_T = H'_{T,soll}$ für Mauerwerk mit λ=0,12 W/(mK) in Abhängigkeit des südorientierten Fensterflächenanteils.

Die Berücksichtigung der solaren Gewinne auf der Südseite des Gebäudes bedeutet für alle Varianten eine einfachere Erfüllung der thermischen Anforderungen. Die Variation des südorientierten Fensterflächenanteils macht die bei diesem Verfahren auftretende Begünstigung von transparenten Bauteilflächen auf der Südseite deutlich: Im Vergleich zum Standardverfahren der EnEV können deutlich Fensterflächenanteile umgesetzt werden. Für die Pultdachlösungen ergeben sich Maximalwerte zwischen 50 und 70%, für die Satteldachvarianten sind letztlich Vollverglasungen möglich, ohne dass gesonderte Kompensationen notwendig werden.

5.4 Zwischenfazit

Aus den dargestellten Ergebnissen lassen sich die Einflüsse der einzelnen Parameter auf das „EnEV-Verfahren“ wie folgt darstellen:

5.4.1 Geschosshöhe

Die Differenzierung nach Geschosshöhe (250cm und 275cm) ergibt für die Berechnung der Transmissionswärmeverluste H'_T nur geringe Unterschiede (Abb. 3: durchgezogene vs.

gepunktete Linie bei gleicher Farbzuordnung). Gegenüber der Raumhöhe 250cm zeigen die Varianten mit 275cm leicht höhere Werte und einen etwas steileren Verlauf der Transmissionsverluste H'_T in Abhängigkeit des gesamten Fensterflächenanteils. Die Geschosshöhe bedingt den Anteil der Wand- und Fensterflächen an der Gesamthüllfläche der Fassade (Tab. 9).

Tab. 9: Verhältnis von Wand- und Fensterflächen zur Fläche der Gebäudehülle.

Variante		PD_oK_250	PD_mK_250	SD_oK_250	SD_mK_250	PD_oK_275	PD_mK_275	SD_oK_275	SD_mK_275
Fläche Gebäudehülle	[m²]	428	534	364	470	448	553	373	479
Wand- und Fensterfläche (Fassade)	[m²]	243	243	143	143	263	263	153	153
Fassade/ Hülle	[-]	0,57	0,46	0,39	0,30	0,59	0,48	0,41	0,32

5.4.2 Dachtypologie

Die Variation der gesamten Fensterfläche erlaubt für die Pultdachvarianten einen Fensterflächenanteil zwischen etwa 15 und 20% und für die Satteldachvarianten zwischen etwa 25 und 30%, zu dem die Anforderung an die thermische Qualität der Gebäudehülle rechnerisch erfüllt werden kann.
Aufgrund der geometrischen Eigenschaften der Satteldachvariante fällt der Anteil der thermisch günstigeren Flächen der Gebäudehülle höher aus als bei der Pultdachvariante (Tab. 10). Dadurch sind größere, relative Fensterflächen möglich.
Darüber hinaus gehende, höhere Fensterflächenanteile müssen entsprechend durch Verbesserung der thermischen Eigenschaften anderer Bauteile (z.B. U-Wert der Außenwand) kompensiert werden.

Tab. 10: Dachflächen und Anteile.

Variante		PD_oK_250	PD_mK_250	SD_oK_250	SD_mK_250	PD_oK_275	PD_mK_275	SD_oK_275	SD_mK_275
Dachfläche	[m²]	94	94	129	129	94	94	129	129
Fläche Gebäudehülle	[m²]	428	534	364	470	448	553	373	479
Dach/ Hülle	[-]	0,22	0,18	0,35	0,27	0,21	0,17	0,35	0,27

5.4.3 Unterer Gebäudeabschluss

Die Varianten mit Berücksichtigung eines beheizten Kellers erreichen im Vergleich günstigere Ergebnisse für den Transmissionsverlust H'_T, da der Anteil der opaken Bauteilfläche mit geringeren U-Werten höher ausfällt.
Mit steigenden gesamten Fensterflächenanteil nimmt auch die Differenz des Transmissionsverlustes der Varianten mit und ohne Keller zu. Die Entwicklung des

Verhältnisses von opaker zu transparenter Bauteilfläche ist für die Kellervarianten im Vergleich günstiger und damit der Einfluss der Fensterflächen niedriger.

Tab. 11: erdberührte Bauteilflächen.

Variante		PD_oK_250	PD_mK_250	SD_oK_250	SD_mK_250	PD_oK_275	PD_mK_275	SD_oK_275	SD_mK_275
Erdberührte Bauteilflächen (Erde)	[m²]	91	197	91	197	91	197	91	197
Wand- und Fensterfläche (Fassade)	[m²]	243	243	143	143	263	263	153	153
Fläche Gebäudehülle	[m²]	428	534	364	470	448	553	373	479
Erde/ Hülle	[-]	0,21	0,37	0,25	0,42	0,20	0,36	0,24	0,41
Erde/ Fassade	[-]	0,37	0,81	0,64	1,38	0,35	0,75	0,59	1,29

6 Gebäudeenergiegesetz GEG

Im Kapitel 3.2 wurden die wesentlichen Änderungen des Gebäudeenergiegesetzes im Vergleich zur EnEV 2016 erläutert. Nachfolgend werden die Auswirkungen des geänderten Berechnungsverfahrens auf die Ausführung der Außenwand durch die Untersuchung verschiedener Gebäudekonfigurationen dargestellt.

6.1 Variation Bautypen

Zunächst werden – in Analogie zu Kapitel 5.1 – die Gebäudetypen für die Berechnung variiert. Die thermischen Qualitäten der Bauteile richten sich nach dem EnEV-Referenzgebäude.

6.1.1 Transmissionswärmeverluste

Die Grenzwerte des Transmissionswärmeverlust werden bei diesem Verfahren mit einem Fensterflächenanteil von 20% berechnet. Durch den Wegfall der tabellarischen Mindestwerte für die Gebäudehülle fallen sonst die Anforderungen deutlich hinter das bisherige Niveau zurück, da vollverglaste Gebäude möglich sind. Die beiden Pultdachvarianten verfehlen den Grenzwert knapp, die Satteldachvarianten liegen in etwa auf dem Niveau der Anforderungen.

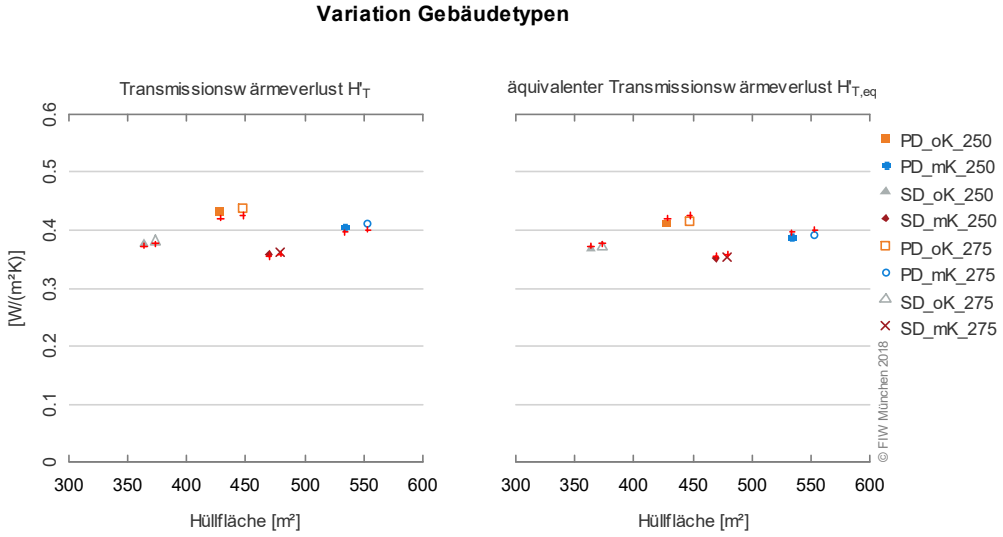

Abb. 7: auf die wärmeübertragende Umfassungsfläche bezogener Transmissionswärmeverlust H'_T für verschiedene Bautypen, sortiert nach Fläche der Gebäudehülle. Die roten Kreuze markieren die Mindestanforderung an H'_T bei einem definierten Fensterflächenanteil von 20% für das Gesamtgebäude.

Die äquivalenten Transmissionswärmeverluste (Abb. 7, rechts) zeigen, dass bei diesem Verfahren alle Anforderungen an die Typgebäude mit einer Ausführung nach Referenzgebäude erfüllt werden können.

6.1.2 Auswirkung auf die Ausführung der Außenwand

Für die Ausführung der Außenwand bedeutet das, dass die Anforderungen an den Wärmeverlust mit herkömmlichen Mauerwerksstärken von 365mm und Wärmeleitfähigkeiten zwischen 0,08 und 0,1 W/ (mK) erfüllt werden. Erst bei ungünstigeren thermischen

Steinqualitäten (λ>0,10) sind höhere Wandstärken oder weitere Maßnahmen an den sonstigen Bauteilen notwendig. Der Unterschied zwischen den Bautypen ist sehr gering, da die Ausführung als Referenzgebäude die Anforderung in fast allen Fällen bereits erfüllt.

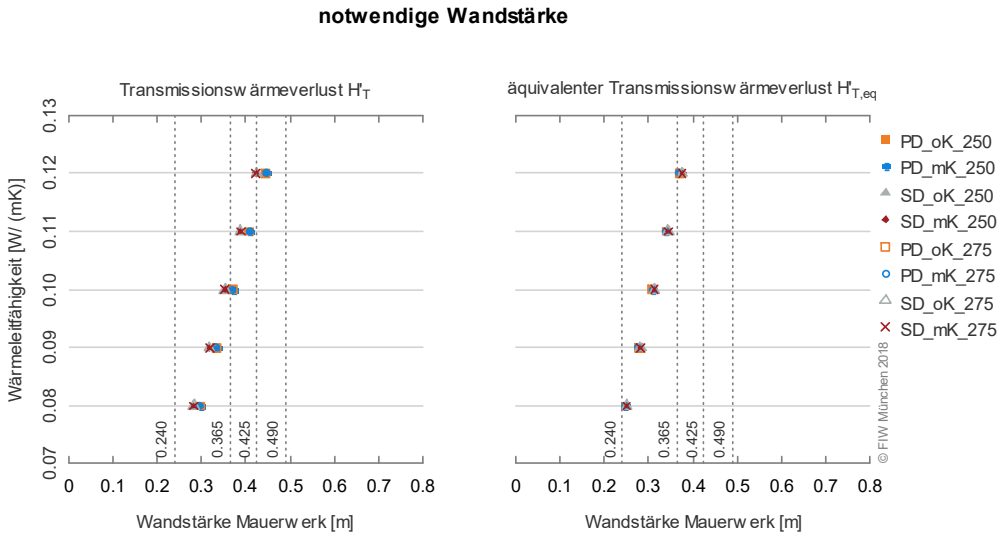

Abb. 8: erforderliche Wandstärke bei $H'_T = H'_{T,soll}$ für Mauerwerk mit verschiedener Wärmeleitfähigkeit λ.

Die Berücksichtigung der solaren Gewinne führt die Ergebnisse noch näher zusammen, so dass zwischen den Varianten keine Unterschiede mehr auftreten (Abb. 8, rechts). Damit werden die Anforderungen an die Gebäudehülle für alle hier untersuchten thermischen Steinqualitäten bei Wandstärken von 365mm erreicht.

6.2 Variation Fensterfläche gesamt

Bei den nachfolgenden Betrachtungen wird in Ergänzung zu den zuvor untersuchten Bautypen zusätzlich der Einfluss des Fensterflächenanteils des Gesamtgebäudes untersucht und dargestellt. Dazu wird der gesamte Fensterflächenanteil in Schritten von 10% zwischen 10 und 90% variiert.

6.2.1 Transmissionswärmeverluste

Die Ergebnisse für die Transmissionswärmeverluste entsprechen aufgrund des gleichen Rechenverfahrens Kapitel 5.2.1. Im Unterschied dazu ergeben sich die Grenzwerte der Typgebäude bei einer Berechnung auf Basis des Referenzgebäudes bei einem festgelegtem Fensterflächenanteil von 20% (Abb. 9, links). Der Transmissionswärmeverlust erreicht damit Werte etwa zwischen 0,35 und 0,42 W/(m²K). Die Unterschiede hinsichtlich der Anforderungen an die thermische Gebäudehülle sind im Vergleich zum EnEV-Verfahren zunächst gering. Lediglich die Variante „Pultdach ohne Keller“ würde die derzeitigen Anforderungen (H'_T ≤0,4 W/(m²K)) knapp verfehlen. Durch die Bildung des Grenzwertes in Abhängigkeit des Fensterflächenanteils sind allerdings größere Fensterflächen damit immer mit Kompensationsmaßnahmen verbunden. Davon sind alle Bautypen gleichermaßen betroffen. Eine bestimmte Konfiguration lässt dabei nicht mehr Spielraum.

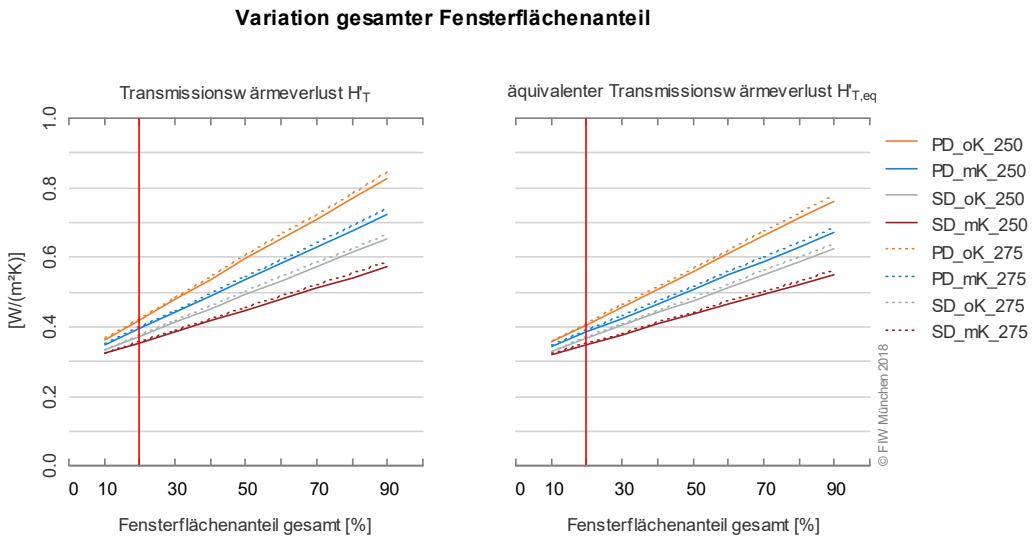

Abb. 9: auf die wärmeübertragende Umfassungsfläche bezogener Transmissionswärmeverlust H'_T in Abhängigkeit des gesamten Fensterflächenanteils. Berechnungsverfahren nach Entwurf GEG 2018. Die rote Linie markiert die Mindestanforderung an H'_T bei einem definierten Fensterflächenanteil von 20% für das Gesamtgebäude.

Wie in den Fällen zuvor bewirkt eine Berücksichtigung der solaren Gewinne im Ergebnis günstigere Werte für den Transmissionswärmeverlust. Es ergeben sich zunächst aber keine spezifischen Vorteile für bestimmte Konfigurationen, da der Grenzwert alleine vom Fensterflächenanteil abhängig ist.

6.2.2 Auswirkung auf die Ausführung der Außenwand

Für die zugrunde gelegten Wärmeleitfähigkeiten von 0,08 bis 0,12 W/ (mK) beträgt der maximale Fensterflächenanteil zwischen etwa 30 und 35% für die Satteldachvarianten und zwischen etwa 20 und 25% für die Pultdachvarianten, um bei einer herkömmlichen Mauerwerksstärke von 365mm zu bleiben (Abb. 10, links).

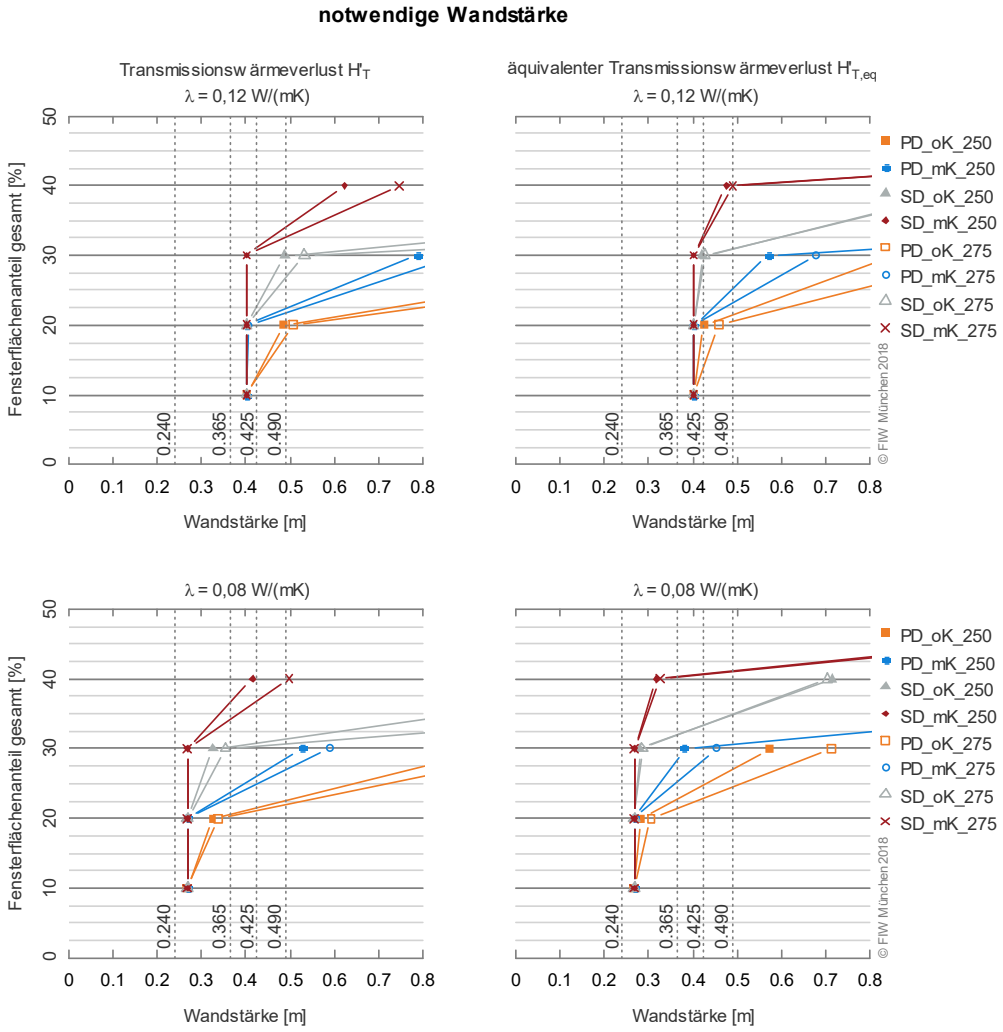

Abb. 10: erforderliche Wandstärke bei $H'_T = H'_{T,soll}$ für Mauerwerk mit λ=0,12 W/(mK) im Bezug zur gesamten Fensterfläche.

Mit Berücksichtigung der solaren Gewinne nimmt die potenzielle Fensterfläche wiederum zu. Die Satteldachvarianten bewegen sich dann im Maximum bei etwa 32 bis 40% und die Pultdachvarianten bei 20 bis knapp 30% Fensterflächenanteil, die ohne zusätzliche Maßnahmen umsetzbar sind.

6.3 Variation der südorientierten Fensterfläche

Basierend auf den grundlegenden Varianten (Tab. 2) wird nachfolgend der Einfluss des südorientierten Fensterflächenanteils untersucht. Dazu wird dieser zwischen 10 und 90% variiert und der Transmissionswärmeverlust berechnet Die Fensterflächen der anderen Orientierungen bleiben unverändert (Ost/West: 20%, Nord: 15%) (siehe auch Tab. 3, Zeile 4).

6.3.1 Transmissionswärmeverluste

Die Ergebnisse für die Transmissionswärmeverluste entsprechen aufgrund des gleichen Rechenverfahrens Kapitel 5.3.1. Im Unterschied dazu ergeben sich die Grenzwerte der Typgebäude bei einer Berechnung auf Basis des Referenzgebäudes bei einem festgelegtem

Fensterflächenanteil von 20% (Abb. 11, links). Der Transmissionswärmeverlust erreicht damit Werte etwa zwischen 0,35 und knapp über 0,40 W/(m²K).
Wie im vorhergehenden Kapitel sind die Unterschiede zum EnEV-Verfahren gering. Auch mit der nur einseitigen Variation des Fensterflächenanteils würde die Variante „Pultdach ohne Keller“ die derzeitigen Anforderungen (H'_T ≤0,4 W/(m²K)) knapp verfehlen. Durch die Bildung des Grenzwertes in Abhängigkeit des Fensterflächenanteils sind allerdings größere Fensterflächen immer mit Kompensationsmaßnahmen verbunden. Die etwas steileren Verläufe der Geradensteigungen für die Pultdachvarianten zeigt, dass hier die Kompensationsmaßnahmen aufwändiger ausfallen werden als bei den Satteldachvarianten mit sehr geringen Steigungen.

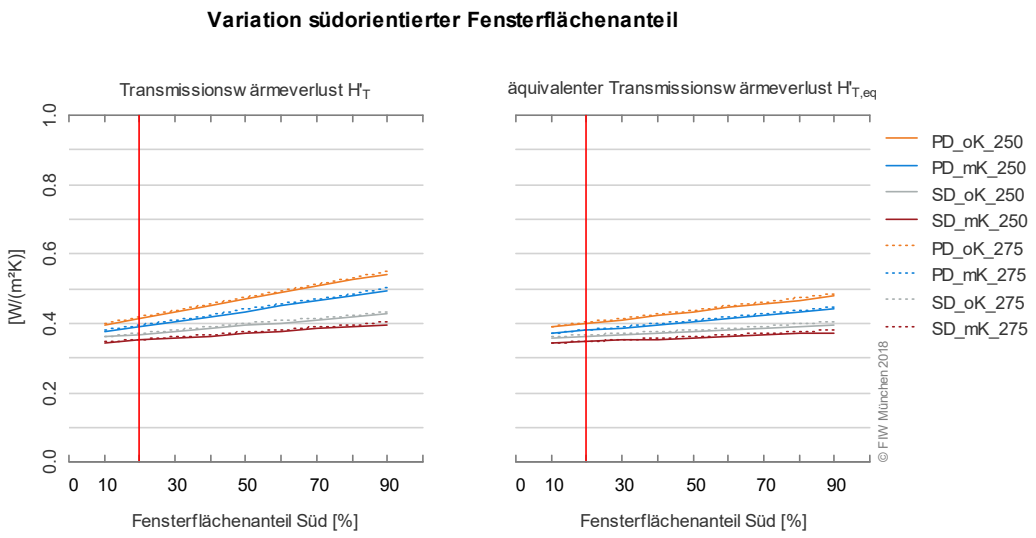

Abb. 11: auf die wärmeübertragende Umfassungsfläche bezogener Transmissionswärmeverlust H'_T in Abhängigkeit des südorientierten Fensterflächenanteils. Berechnungsverfahren nach Entwurf GEG 2018. Die rote Linie markiert die Mindestanforderung an H'_T bei einem definierten Fensterflächenanteil von 20% für das Gesamtgebäude.

Durch die Berücksichtigung der solaren Gewinne flacht der Verlauf der Geraden nochmal stark ab (Abb. 11). Hohe Fensterflächenanteile auf der Südseite sind damit leichter zu realisieren, da sich daraus keine großen Anforderungen an die Kompensationsmaßnahmen ableiten lassen.

6.3.2 Auswirkung auf die Ausführung der Außenwand

Für die Pultdachvarianten ergeben sich südorientierte Fensterflächenanteile zwischen maximal 30 und knapp 50%. Deutlich wird, dass die Varianten mit Keller im Vergleich höhere Fensterflächenanteile für die Südseite ermöglichen, da der Transmissionswärmeverlust für die gesamte Gebäudehülle verbessert wird.
Der maximale Fensterflächenanteil für die Satteldachvarianten für die Südseite beträgt zwischen etwa 60% und 80%, was einer Vollverglasung entspricht (Abb. 12).

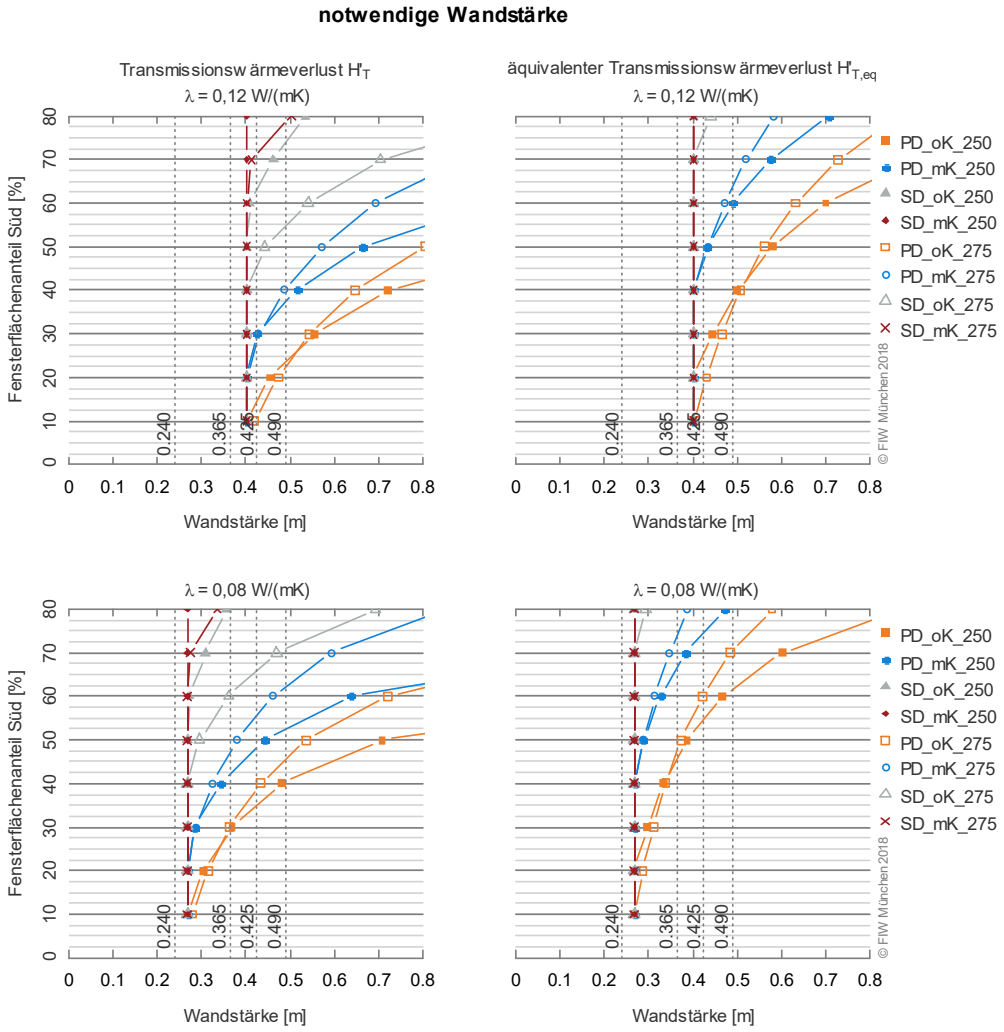

Abb. 12: erforderliche Wandstärke bei $H'_T = H'_{T,soll}$ für Mauerwerk mit λ=0,12 W/(mK) im Bezug zur südorientierten Fensterfläche.

Die Berücksichtigung der solaren Gewinne erlaubt für die Satteldachvarianten praktisch einen beliebigen Fensterflächenanteil auf der Südseite, ohne Auswirkungen auf die Mauerwerksstärken. Für die Pultdachvarianten liegt das Maximum zwischen etwa 50 und 70%.

6.4 Zwischenfazit

Aus den dargestellten Ergebnissen lassen sich die Einflüsse der einzelnen Parameter auf das „GEG-Verfahren“ wie folgt darstellen:

6.4.1 Geschosshöhe

Die Variation der Geschosshöhe mit 250 und 275cm zeigt keine bedeutenden Einflüsse auf die Ergebnisse zum Transmissionswärmeverlust der untersuchten Gebäude. Die vergrößerte Gebäudehüllfläche führt erwartungsgemäß zu leicht höheren Verlusten. Die Veränderung des Grenzwertes (Referenzgebäude auf Basis 20% gesamter Fensterflächenanteil) bedeutet gegenüber dem Tabellenverfahren der EnEV einen geringeren Einfluss des Bautypus.

6.4.2 Dachtypologie

Die Dachtypologie hat, wie bereits im EnEV-Verfahren erläutert, einen höheren Einfluss auf das Gesamtergebnis. Mit Ausführung als Satteldach reduziert sich in dieser Betrachtung die Außenwandfläche während sich gleichzeitig die thermischen Eigenschaften (aufgrund der Definitionen des Referenzgebäudes) verbessern. Insgesamt ergeben sich aus thermischer Sicht daraus günstigere Ergebnisse für die Satteldachkonstruktionen gegenüber dem Pultdachvarianten.

6.4.3 Unterer Gebäudeabschluss

Wie für die Dachtypologie gilt auch für den unteren Gebäudeabschluss, dass aufgrund des Rechenverfahrens (Abminderungsfaktor für erdberührte Bauteile) die thermischen Eigenschaften der Gebäudehülle mit Ausführung eines Kellers auf Grundlage des Referenzgebäudes verbessert werden. So schneiden die Varianten mit Keller für alle Betrachtungen etwas günstiger ab.

6.4.4 Allgemein

Das Verfahren nach Entwurf des GEG mit einer Begrenzung des Fensterflächenanteils für das Referenzgebäude von 20% führt zu keinen massiven Änderungen gegenüber dem aktuellen Verfahren, sondern zu Verschiebungen im Detail, die im Vergleich aber eine höhere Flexibilität bei der Umsetzung von Gebäuden erwarten lassen.
Durch die gebäudespezifische Bestimmung des Grenzwertes anhand des Referenzgebäudes kommt der Definition der Referenzeigenschaften eine höhere Bedeutung zu (Gebäude erfüllt automatisch die Anforderungen in allen Fällen) und schafft damit mehr Klarheit. Erfüllt das Referenzgebäude automatisch die Anforderungen, reduziert sich der planerische Aufwand für die thermische Gebäudehülle massiv. Allerdings ist dann auch zu erwarten, dass sich eine „Einheitsgebäudehülle“ entwickelt.
Ohne Begrenzung des Fensterflächenanteils bedeutet das Rechenverfahren eine deutliche Reduktion der gesetzlichen Anforderungen an die thermische Qualität der Gebäudehülle. Dann sind rechnerisch auch vollständig verglaste Gebäude mit entsprechend hohen Wärmeleitfähigkeiten möglich.

7 Konzept Wohnflächen- Verfahren

Das Konzept des Wohnflächen-Verfahrens (Kapitel 3.3) sieht als wesentliche Änderung im Vergleich zu den zuvor dargestellten Methoden einen neuen Flächenbezug vor. Anstelle der wärmeübertragenden Umfassungsfläche tritt die nutzbare Wohnfläche des Gebäudes, also ausschließlich die Fläche der Wohnräume ohne beheizte Keller. Damit bleibt die Bezugsfläche durch Einflüsse von Geschosshöhe, Ausführung des unteren Gebäudeabschlusses oder Dachkonstruktion unverändert (Tab. 12 - A_{Wfl}). Tendenziell schneiden kompaktere Bauweisen dadurch besser ab, was mit diesem Rechenansatz auch gefördert werden soll. Der Vergleich von Hüll- und Wohnfläche der untersuchten Varianten zeigt massive Unterschiede für die Bezugsflächen mit entsprechenden Auswirkungen auf das Gesamtergebniss.

Tab. 12: Vergleich der Bezugsflächen.

Bezeichnung	PD_oK_250	PD_mK_250	SD_oK_250	SD_mK_250	PD_ok_275	PD_mK_275	SD_oK_275	SD_mK_275
$A_{Hülle}$	428	534	364	470	448	553	373	479
A_{Wfl}	137,4	137,4	109,1	109,1	137,4	137,4	109,1	109,1
$A_{Hülle}/A_{Wfl}$	3,11	3,89	3,34	4,31	3,26	4,02	3,42	4,39

7.1 Variation Bautypen

Zunächst erfolgt die Variation der Bautypen auf Basis der Referenzausführung mit festen Fensterflächenanteilen.

7.1.1 Transmissionswärmeverluste

Den durch die Grenzwertgleichung (Gl. 4) ermittelten Verlauf der Grenzwerte in Abhängigkeit der Wohnfläche kann nur von der Variante „Satteldach ohne Keller“ bei einer Raumhöhe von 250cm unterschritten werden. Alle anderen Varianten verfehlen die Anforderungen zum Teil erheblich (Abb. 13). Insbesondere die Ausführungen mit Keller als unterem Gebäudeabschluss liegen weit ab von der Grenzwertlinie. Die Berücksichtigung der solaren Gewinne verbessert das Ergebniss leicht, die Mindestanforderungen können aber weiterhin nicht eingehalten werden.

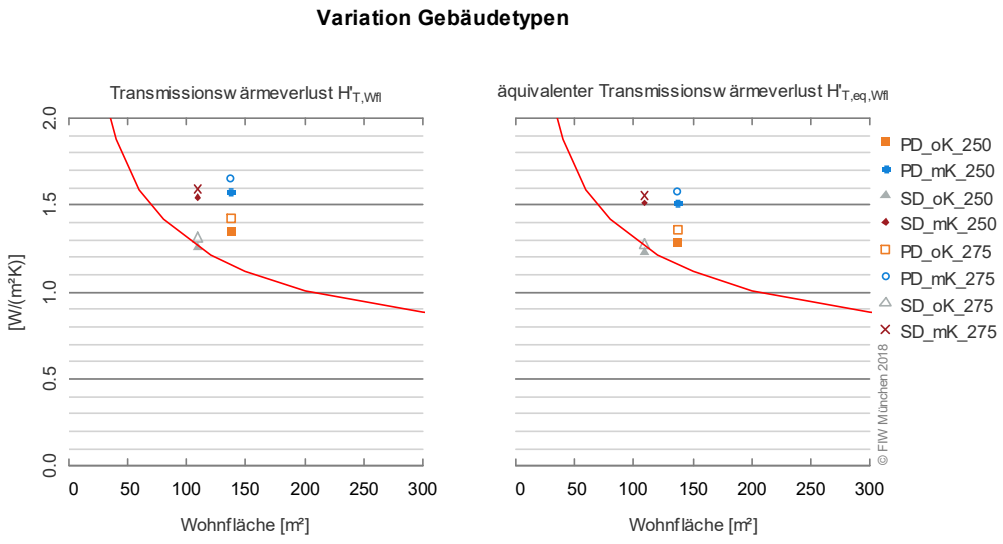

Abb. 13: auf die Wohnfläche bezogener Transmissionswärmeverlust $H'_{T,Wfl}$ für verschiedene Bautypen, sortiert nach Wohnfläche. Die rote Linie markiert die Mindestanforderung an $H'_{T,eq,Wfl,soll}$ in Abhängigkeit der Wohnfläche.

7.1.2 Auswirkung auf die Ausführung der Außenwand

Auf Basis einer Mauerwerksstärke von 365mm kann nur die Satteldachvariante ohne Keller die Anforderungen erfüllen. Die Raumhöhe macht sich bemerkbar, weshalb bei 275cm die Anforderungen zwar noch erfüllt werden können, aber unter Umständen bereits bessere Steinqualitäten notwendig werden.

Bereits für die Variante „Pultdach ohne Keller“ ist allerdings ein Mauerwerk von über 50cm erforderlich. Das bedeutet, dass nur erhebliche Kompensationsmaßnahmen diese Variante möglich machen können. Alle anderen Varianten sind im Hinblick auf die Grenzwertlinie als Anforderung technisch nicht mehr realisierbar.

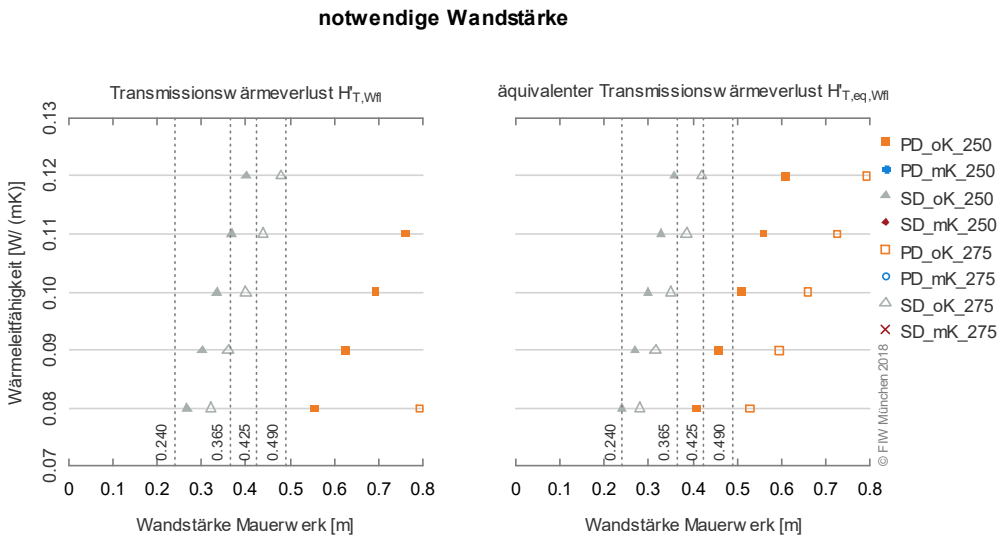

Abb. 14: erforderliche Wandstärke bei $H'_{T,Wfl} = H'_{T,Wfl,soll}$ für Mauerwerk mit verschiedener Wärmeleitfähigkeit λ.

Durch die Bildung des äquivalenten Transmissionswärmeverlustkoeffizienten rückt auch die Pultdachvariante ohne Keller in den Bereich der Möglichkeiten (Abb. 14, rechts). Allerdings reicht alleine die Auswahl eines geeigneten Mauerwerks nicht aus. Zusätzliche Maßnahmen sind notwendig. Die Varianten mit Keller scheiden weiterhin komplett aus.

7.2 Variation der Fensterflächen gesamt

Bei den nachfolgenden Betrachtungen wird in Ergänzung zu den zuvor untersuchten Bautypen zusätzlich der Einfluss des Fensterflächenanteils des Gesamtgebäudes untersucht und dargestellt. Dazu wird der gesamte Fensterflächenanteil in Schritten von 10% zwischen 10 und 90% variiert.

7.2.1 Transmissionswärmeverluste

Der Verlauf der Transmissionswärmeverluste in Abhängigkeit des gesamten Fensterflächenanteils weist sehr steile Gradienten auf, d.h. dass mit steigenden Fensterflächenanteil der wohnflächenbezogene Transmissionswärmeverlust deutlich zunimmt. Mit Hilfe der Grenzwertformel erhält man auf Basis der Wohnfläche je einen Grenzwert für die Satteldach- bzw. die Pultdachvarianten. Damit ist aus nachfolgender Grafik () schnell nachvollziehbar, dass die Variante „Pultdach ohne Keller“ bei einem Fensterflächenanteil von etwa 10% und die Varianten „Satteldach ohne Keller“ bei einem Fensterflächenanteil von etwa 20% bereits an ihre Grenzen stoßen. Die Varianten mit Keller liegen unabhängig vom Fensterflächenanteil deutlich über dem Grenzbereich.

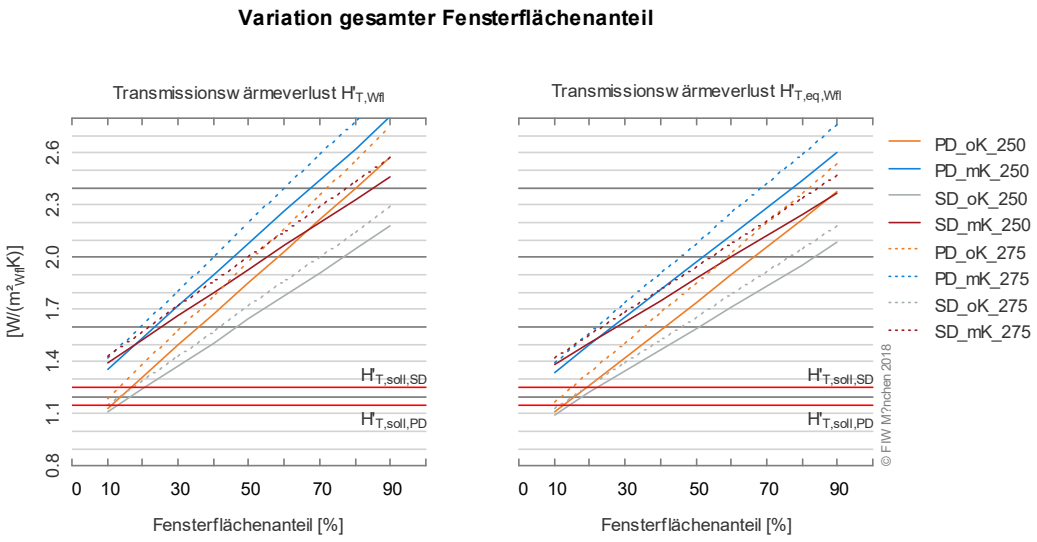

Abb. 15: auf die Wohnfläche bezogener Transmissionswärmeverlust $H'_{T,Wfl}$ in Abhängigkeit des gesamten Fensterflächenanteils. Berechnungsverfahren nach Entwurf Wfl-Verfahren 2018.

Der Einfluss der solaren Gewinne bei der Bewertung der Ergebnisse ist insgesamt gering. Zwar fallen die Gradienten in allen Fällen etwas flacher aus wodurch auch größere Fensterflächenanteile in der Ausführung machbar sind, ohne die Grenzwerte zu verletzen, für die Mehrzahl der Untersuchungsvarianten ist die Einhaltung der Anforderungen nicht möglich.

7.2.2 Auswirkung auf die Ausführung der Außenwand

Für die Umsetzung bedeuten die vorhergehenden Ergebnisse, dass nur die Varianten ohne Kellerkonstruktion die Chance besitzen, die thermischen Anforderungen einzuhalten. Die Satteldachvarianten ohne Keller können bei ambitionierteren thermischen Qualitäten der Außenwand und realitätsnahen Fensterflächenanteilen mit einer herkömmlichen Mauerwerksstärke von 365 mm realisiert werden. Die Pultdachvarianten ohne Keller bedürfen sehr geringer Fensterflächenanteile oder zusätzlicher Kompensationsmaßnahmen an anderen Bauteilen. Ausführungen mit Keller sind auf Basis der hier angewendeten Grenzwertbildung technisch nicht mehr umsetzbar. Damit werden bereits die wesentlichen Defizite des Verfahrens auf Basis einer empirischen Grenzwerteformel und Wohnflächenbezug offenbar. Die resultierenden Einschränkungen hinsichtlich baulich umsetzbarer Varianten fallen so erheblich aus, dass die Sinnhaftigkeit dieses Bewertungsansatzes in keiner Weise gegeben ist.

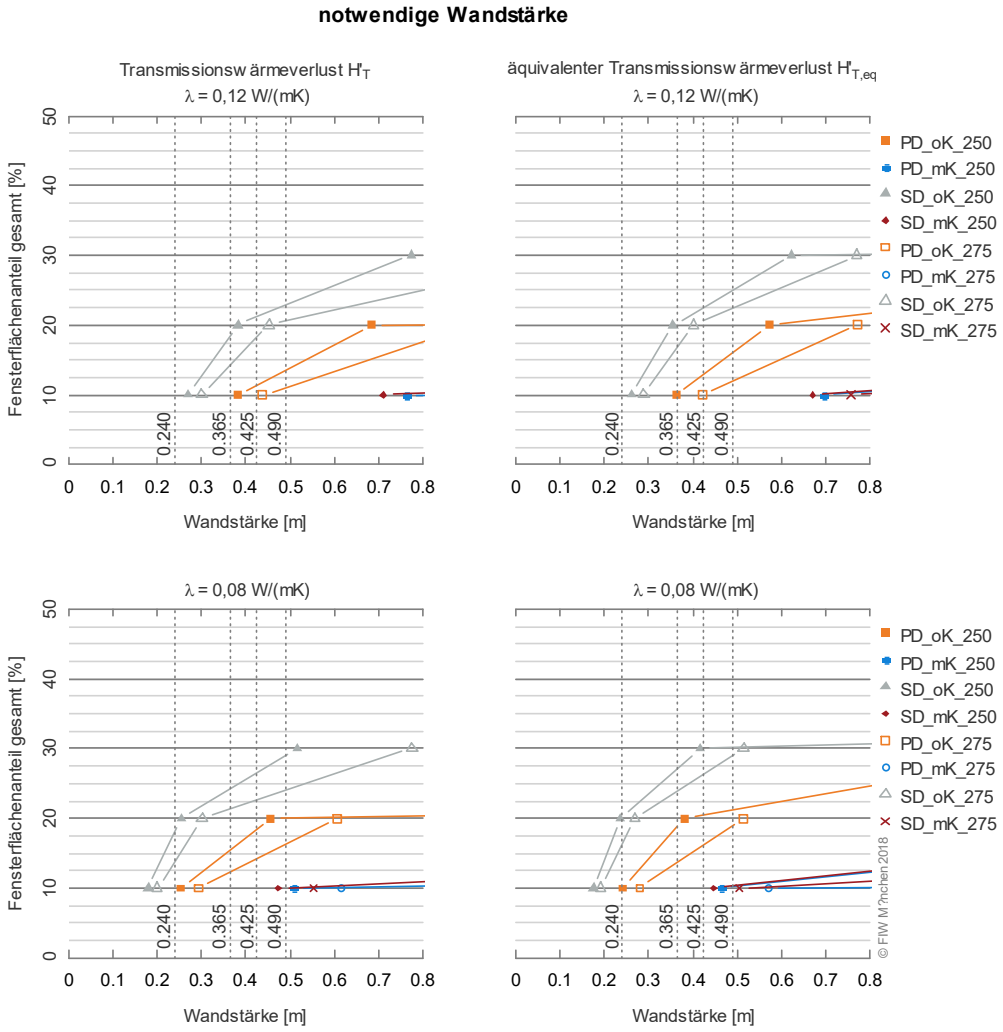

Abb. 16: erforderliche Wandstärke bei $H'_{T,Wfl} = H'_{T,Wfl,soll}$ für Mauerwerk mit λ=0,12 W/(mK) im Bezug zur gesamten Fensterfläche.

Daran ändert auch die Berücksichtigung der solaren Gewinne nichts. Zwar eröffnet der äquivalente Transmissionswärmeverlust $H'_{T,Wfl,eq}$ etwas mehr Spielraum für die Ausführung der Außenwand, die Varianten mit Keller sind aber weiterhin praktisch ausgeschlossen.

7.3 Variation der südorientierten Fensterflächen

Basierend auf den grundlegenden Varianten (Tab. 2) wird nachfolgend der Einfluss des südorientierten Fensterflächenanteils untersucht. Dazu wird dieser zwischen 10 und 90% variiert und der Transmissionswärmeverlust berechnet Die Fensterflächen der anderen Orientierungen bleiben unverändert (Ost/West: 20%, Nord: 15%) (siehe auch Tab. 3, Zeile 4).

7.3.1 Transmissionswärmeverluste

Wird alleine der südorientierte Fensterflächenanteil variiert, fallen die Gradienten für den Transmissionswärmeverlust in Abhängigkeit des Fensterflächenanteils geringer aus. Durch Insbesondere durch den geringeren südorientierten Fensterflächenanteil der Satteldachvarianten verlaufen die dazugehörigen Geraden deutlich flacher (Abb. 17) als für die Pultdachvarianten. Für die Varianten ohne Keller ergeben sich daraus etwas mehr

Möglichkeiten im Hinblick auf den Fensterflächenanteil. Die Bauweisen mit Keller überschreiten die Grenzwerte wiederrum deutlich.

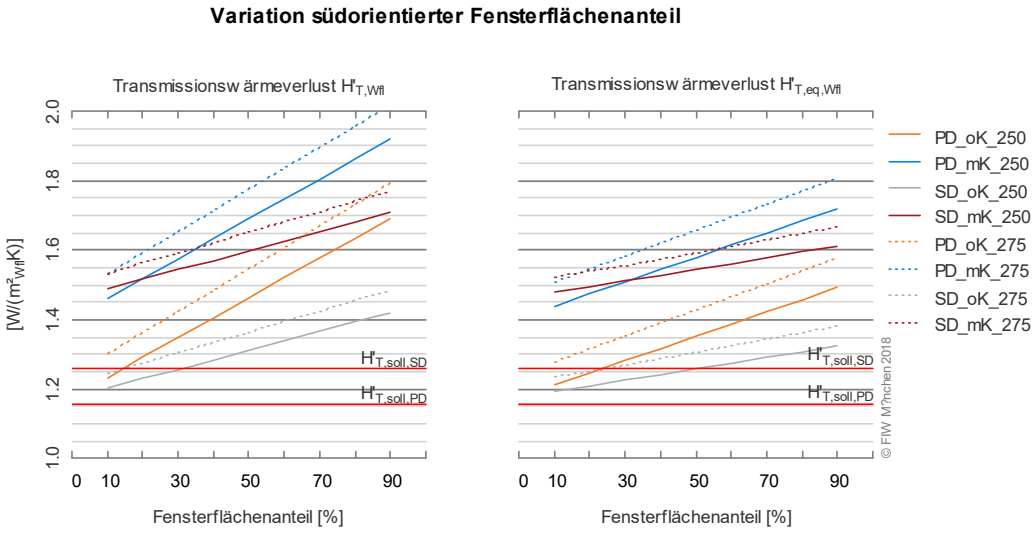

Abb. 17: auf die Wohnfläche bezogener Transmissionswärmeverlust $H'_{T,Wfl}$ in Abhängigkeit des südorientierten Fensterflächenanteils. Berechnungsverfahren nach Entwurf Wfl-Verfahren 2018.

Da nur die Fensterfläche auf der Südseite variiert wird, ist der Einfluss der solaren Gewinne bei der Berechnung der äquivalenten Transmissionswärmeverluste $H'_{T,Wfl,eq}$ offensichtlicher (Abb. 17, rechts)

7.3.2 Auswirkung auf die Ausführung der Außenwand

Für die untersuchten Wärmeleitfähigkeiten von λ=0,08 bis 0,12 W/(m K) kann die Variante „Satteldach ohne Keller“ auf Basis eines Mauerwerks von 365 mm für südorientierte Fensterflächenanteile zwischen etwa minimal 10 und maximal 55% ausgeführt werden. Die Variante „Pultdach ohne Keller“ erlaubt kaum noch Spielraum bei der alleinigen Betrachtung der Außenwand, in Kombination mit weiteren Kompensationsmaßnahmen an anderen Bauteilen sind auch für diesen Fall Möglichkeiten denkbar, die die Anforderungen erfüllen und damit umsetzbar sind. Die Kombination mit Keller scheidet jedoch für alle hier dargestellten Bautypen aus, da die Grenzwerte nicht eingehalten werden können.

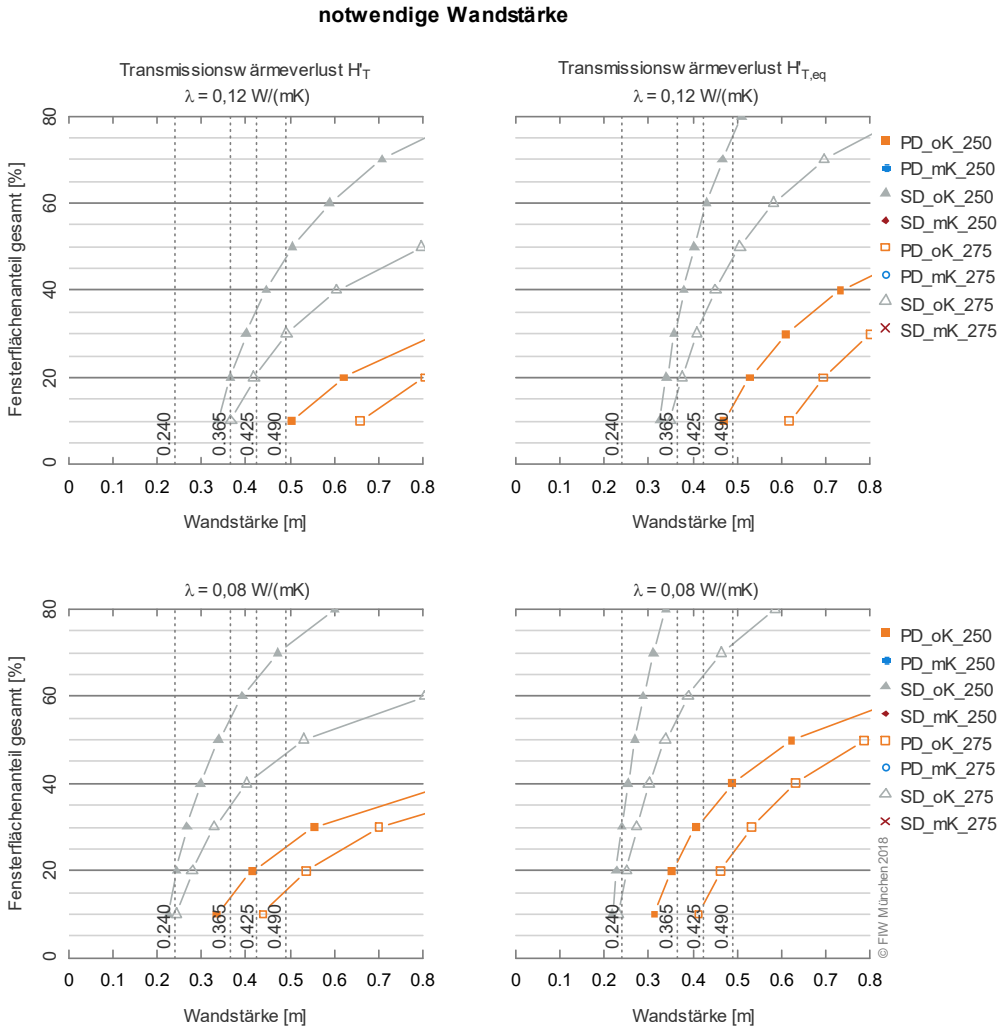

Abb. 18: erforderliche Wandstärke bei $H'_{T,Wfl} = H'_{T,Wfl,soll}$ für Mauerwerk mit λ=0,12 W/(mK) im Bezug zur südorientierten Fensterfläche.

Der Einbezug solarer Gewinne macht sich für die Satteldachvariante ohne Keller am stärksten bemerkbar. Abhängig von der thermischen Qualität der Außenwand ist bis hin zu maximaler Verglasung der Südseite eine Mauerwerksstärke bis zu 365 mm ausreichend, um die Anforderungen an die Gebäudehülle zu erfüllen. Ohne weitere Kompensationsmaßnahmen sind dagegen die Möglichkeiten für die Variante Pultdach bereits stärker eingeschränkt. Im Vergleich zum Rechenverfahren ohne solare Gewinne rücken zwar verschieden Varianten in den Bereich, der realisierbar wäre, dennoch sind die Grenzen schnell erreicht.

Alle Kombinationen mit Kellerausführung sind, wie bereits in den Fällen zuvor, auf Basis der empirischen Grenzwertformel nicht umsetzbar.

7.4 Zwischenfazit

Aus den dargestellten Ergebnissen lassen sich die Einflüsse der einzelnen Parameter auf das „Wohnflächen-Verfahren“ wie folgt darstellen:

7.4.1 Geschosshöhe

Die Veränderung der Bezugsfläche wirken sich die unterschiedlichen Geschosshöhen von 250 und 275 mm stärker auf den spezifischen Transmissionswärmeverlust aus. Beim Hüllflächenbezug verhalten sich die Transmissionswärmeverluste und die Fläche der Gebäudehülle direkt proportional, d.h. bei zunehmender Hüllfläche verändern sich die spezifischen Wärmeverluste nur gering. Bei dem hier angewandten Verfahren besteht zwischen der Wohnfläche und der Gebäudehüllfläche allerdings kein Zusammenhang. Bei zunehmender Hüllfläche aufgrund höherer Geschosse bleibt die Wohnfläche unberührt. Damit steigen daher auch die spezifischen Transmissionswärmeverluste.

7.4.2 Dachtypologie

Die Satteldachvarianten weisen gegenüber den Pultdachvarianten geringere Flächenanteile für die Außenwand auf. Damit reduziert sich die Bedeutung von opaker Außenwand und Verglasung im Vergleich zu den anderen Bauteilen bei der Berechnung des Transmissionswärmeverlusts. Aufgrund des Wohn- anstelle des Hüllflächenbezugs wirkt sich die Art der Dachausbildung auf die Ergebnisse deutlicher aus. Die Varianten mit Satteldach schneiden daher günstiger ab.

7.4.3 Unterer Gebäudeabschluss

Bei der hier untersuchten Konzeption eines wohnflächenbezogenen Transmissionswärmeverlusts bewirkt der untere Gebäudeabschluss die größten Unterschiede für die Bewertung der Varianten. Zwar gehen die Wärmeverluste über die entsprechenden Bauteile (Bodenplatte bzw. Kellerwände und -boden) in die Berechnung mit ein, für die Bezugsfläche wird jedoch ein Keller gemäß Wohnflächenverordnung nicht berücksichtigt. Da bei Ausführung mit Keller die Wärmeverluste zunehmen, aber die Wohnfläche unverändert bleibt, steigen der spezifische Transmissionswärmeverlust überproportional. Die empirische Grenzwertformel lässt hier keine Unterscheidung zu und lässt mit ihrer strengen Auslegung keine Kellerlösungen für die hier untersuchten Varianten zu. Da das hier verwendete Typgebäude als repräsentativ betrachtet werden kann, sind ähnliche Ergebnisse auf für andere Gebäudegeometrien und Bauweisen zu erwarten.

7.4.4 Allgemein

Das Verfahren mit Wohnflächenbezug auf Basis des aktuellen Diskussionsstands (Wohnfläche ausschließlich nach Definition Wohnflächenverordnung) führt im Vergleich zum EnEV- aber auch zum GEG-Verfahren zu vollständig veränderten Ergebnissen. Die Wohnfläche eines Gebäudes mit und ohne Keller ist in beiden Fällen gleich, während sich die Hüllfläche massiv unterscheidet. Auch die Raumhöhe findet keine Berücksichtigung. Im Ergebnis führt das für die zugrunde gelegten Gebäudekonfigurationen dazu, dass Gebäude mit Keller praktisch nicht mehr umgesetzt werden können. Die Kompensation durch höhere thermische Qualitäten ist dabei für die untersuchten Typgebäude ausgeschlossen. Das Ziel,

kompakte Bauweisen zu fördern wird hier vollständig überbewertet, da die Grenzwertformel unsinnig hohe Anforderungen stellt. Unstrittig ist, dass kompakteres Bauen energetisch günstiger ist. Der gewählte Ansatz versucht dabei das Rad neu zu erfinden, ohne dass sich rechnerische, planerische, methodische oder politische Vorteile erkennen lassen. Hinzukommt, dass die bisherige Definition des Transmissionswärmeverlustkoeffizienten dem mittleren U-Wert der Gebäudehülle entspricht und damit einfache Orientierung über die thermische Qualität der Gebäudehülle gibt. Durch die neuen Bezugswerte geht die Vergleichbarkeit vollständig verloren.
Die Berücksichtigung solarer Gewinne spielt für dieses Verfahren letztlich keine Rolle. Zwar reduzieren sich dadurch die Anforderungen. Diese können aber für eine Vielzahl von Gebäudetypen und -konfigurationen trotzdem nicht eingehalten werden.

8 Fazit

8.1 Fachliche Bewertung

Mit der geplanten Zusammenführung von EnEG, EnEV und EEWärmeG in Form des Gebäudeenergiegesetzes GEG ergibt sich die Möglichkeit, energetische Anforderungen an die Gebäudehülle und Bewertungsmethodik den aktuellen Entwicklungen und klimapolitischen Zielsetzungen anzupassen sowie Unstimmigkeiten bzw. Schwachstellen zu beseitigen. Häufige Kritikpunkte gegenüber der aktuellen EnEV sind u.a. das verhältnismäßig komplizierte Rechenverfahren auf Basis eines Referenzgebäudes zur Bestimmung der Transmissionswärmeverluste H'_T und des Endenergiebedarfs, der Entfall regulierender Vorgaben zur Kompaktheit von Gebäuden im Vergleich zu den früheren Verordnungen (A/V_e-Verhältnis in der WSchVO) sowie bei Wohngebäuden die volumenabhängige Nutzfläche A_N als Energiebezugsfläche. Daher werden sowohl im Referentenentwurf zum Gebäudeenergiegesetz vom 23.01.2017 als auch in einem Kurzgutachten zur Ergänzung und Umstellung des Anforderungssystems verschiedene neue Ansätze zur Definition der Mindestanforderungen an die thermische Qualität der Gebäudehülle benannt, die versuchen, verschieden Kritikpunkte aufzugreifen. Davon wurden im Rahmen dieser Studie folgende Methoden im Vergleich zur bisherigen Verfahren nach EnEV 2014/2016 untersucht und bewertet:

- Definition der Mindestanforderungen an die thermische Qualität der Gebäudehülle mittels Referenzgebäude und definiertem Fensterflächenanteil (GEG-Verfahren).
- Veränderung der Bezugsgröße der Transmissionswärmeverluste von der Gebäudehüllfläche zur Wohnfläche verbunden mit Mindestanforderungen auf Basis einer empirischen Grenzwertformel (Wohnflächen-Verfahren).
- Berücksichtigung solarer Gewinne bei der Berechnung des Transmissionswärmeverlusts durch Bildung eines äquivalenten U-Werts für südorientierte Fensterflächen bzw. eines äquivalenten Transmissionswärmeverlustkoeffizienten $H'_{T,eq}$ für die Gebäudehülle (alle Verfahren).

Durch das im GEG-Entwurf benannte und durch einen festen Fensterflächenanteil ergänzte Verfahren ergeben sich im Vergleich zu den bisherigen EnEV-Anforderungen kaum Unterschiede. Die Ergebnisse für die untersuchten Gebäudevarianten und die Auswirkungen auf die Ausführung der Außenwände bzw. Gebäudehülle sind zu ähnlich, um Vor- oder Nachteile für das eine oder andere Verfahren klar benennen zu können. Demgegenüber weist der Bewertungsansatz des Kurzgutachtens mit veränderten Flächenbezug und Bildung eines äquivalenten Transmissionswärmeverlusts massive methodische Schwächen auf, so dass eine Vielzahl an Gebäudekonfigurationen künftig nicht mehr oder nur sehr schwer zu realisieren wäre. Die wichtigsten Ergebnisse und Erkenntnisse der Untersuchung können wie folgt zusammengefasst werden:

GEG-Verfahren:

- Das GEG-Verfahren auf Basis des Referenzgebäudes führt für die untersuchten Gebäudevarianten zu nahezu gleichwertigen Ergebnissen für den

Transmissionswärmeverlust im Vergleich zum EnEV-Verfahren. Entscheidend dabei ist, dass der Fensterflächenanteil mit 20% festgelegt ist. Ohne Begrenzung der Fensterflächen wären die Anforderungen solange erfüllt, wie die thermischen Eigenschaften des Referenzgebäudes angewendet würden. Damit ergäben sich zum einen zwar mehr Möglichkeiten bei der Gestaltung von Gebäuden, zum anderen aber auch niedrigere Anforderungen an die thermische Qualität der Gebäudehülle als sie heute bereits in der EnEV formuliert sind.

- Bei Anwendung des GEG-Verfahrens sind die Auswirkungen auf die Außenwand als Teil der thermischen Gebäudehülle vergleichsweise gering. Die meisten der untersuchten Varianten können mit marktüblichen thermischen Qualitäten und Wandstärken umgesetzt werden. Im Bedarfsfall sind zusätzliche Kompensationsmaßnahmen für weitere Bauteile möglich, die aber im technisch machbaren Bereich liegen.

Wohnflächen-Verfahren:

- Der auf die wärmeübertragende Umfassungsfläche bezogene Transmissionswärmeverlust bildet den mittleren Wärmedurchgang (U-Wert) der Gebäudehülle ab und lässt damit einen schnellen Vergleich mit Bauteil-U-Werten und eine einfache Abschätzung der thermischen Qualität der Gebäudehülle zu. Demgegenüber führt das „Wohnflächen-Verfahren“ aufgrund der neuen Bezugsfläche zu völlig veränderten Ergebnissen. Die Vergleichbarkeit mit Bauteil-U-Werten und damit die Beurteilung der qualitativen Beschaffenheit der Gebäudehülle geht vollständig verloren.
- Zur Ermittlung der Wohnfläche werden ausschließlich Flächen berücksichtigt, die einer Wohnnutzung zugeschrieben werden können. Intention ist, eine kompaktere Bauweise zu fördern, die alleine aufgrund der günstigeren Geometrie (kleines A/V_e-Verhältnis – Gebäudehüllfläche A zu beheiztem Volumen V_e) geringere Energiebedarfe aufweist. Dieses Ziel wird allerdings durch maximale Anforderungen auf Basis einer empirischen Grenzwertformel überbewertet. Im Ergebnis ist eine Realisierung der untersuchten Bautypen in Kombination mit beheiztem Keller mit marktverfügbaren Materialien nicht mehr möglich.
- Zur Begünstigung kompakten Bauens existieren bereits bewährte und erfolgreiche Methoden, die einfacher und sinnvoller anwendbar sind. Als Beispiel sei hier die Grenzwerte für den Transmissionswärmeverlust der WSchVO’95 genannt, die in Abhängigkeit des A/V_e-Verhältnisses gebildet wurden. Hinsichtlich der Thematik „kompaktes Bauen“ ist aber auch die Überlegung zulässig, dass durch die Baukosten vermutlich bereits ein funktionierendes und wirksameres Regulativ gegeben ist, um raumgreifende Bauweisen zu unterbinden.

Äquivalenter Transmissionswärmeverlust:

- Ohne zusätzliche Anpassung der Mindestanforderungen an die thermische Qualität der Gebäudehülle bedeutet ein äquivalenter Transmissionswärmeverlust mit Berücksichtigung von solaren Gewinnen für südorientierte Fensterflächen eine Reduktion der Energieeffizienz von Gebäuden. Die Außenwände können im

Vergleich zum bisherigen Rechenverfahren mit schlechteren thermischen Eigenschaften ausgeführt werden bzw. Kompensationsmaßnahmen sind mit geringeren Anforderungen umsetzbar.

- Die Berücksichtigung der solaren Gewinne bei Gebäuden stellt keine Neuerung dar. Sie ist Bestandteil jeder Energiebilanzierung zur Berechnung des End- und Primärenergiebedarfs von Gebäuden.
- Mit dem Einbezug bei der Ermittlung der Transmissionswärmeverluste findet daher keine zusätzliche Förderung der passiven Solarnutzung statt. Letztlich handelt es ich nur um eine bilanzielle Verschiebung, die im Ergebnis zu einer geringeren thermischen Qualität der Gebäudehülle und insgesamt zu Lasten der Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden geht.

8.2 Politische Bewertung

Die Ergebnisse der Studie lassen sich zu folgenden politischen Thesen zusammenfassen:

- Der Entwurf des Gebäudeenergiegesetzes sieht wie die EnEV das Referenzgebäudeverfahren als Nachweis der energetischen Anforderungen vor. Werden die Bauteil- und Anlageneigenschaften des Referenzgebäudes übernommen, sind die Anforderungen automatisch erfüllt. Damit werden eine höhere Transparenz und Vereinfachung gegenüber der EnEV erreicht.
- Die thermische Qualität der gesamten Gebäudehülle ergibt sich damit aus der Summe der einzelnen Bauteileigenschaften. Der Umfang des ungünstigen Bauteils wird dadurch nicht begrenzt, was einer Reduktion der Anforderungen im Vergleich zur EnEV darstellt. Die Überarbeitung des GEG-Verfahrens sieht daher einen festen Fensterflächenanteil für das Referenzgebäude vor (20%). Deutliche methodische Vorteile gegenüber der EnEV sind damit nicht mehr gegeben.
- Die Auswirkungen des EnEV- und GEG-Verfahrens auf die Ausführung der Außenwand als Bestandteil der thermischen Gebäudehülle sind vergleichbar. Die Anforderungen können im Regelfall durch marktverfügbare Qualitäten von Mauerwerk bei üblichen Wandstärken realisiert werden. Variationen der Bauweisen (Fensterflächenanteil, Geschosshöhe, Dachkonstruktion, unterer Gebäudeabschluss) können durch Kompensationsmaßnahmen ausgeglichen werden.
- Mit der Umstellung auf einen wohnflächenbezogenen Transmissionswärmeverlust geht die Vergleichbarkeit der thermischen Qualität der Gebäudehülle zu Bauteil-U-Werten und zu bestehenden Gebäuden verloren, was die Bewertung des Gebäudekonzeptes erschwert.
- Die Grenzwertformel in Kombination mit dem Wohnflächenbezug führt zu unrealistisch hohen Anforderungen an die Gebäudehülle. Bestimmte Bauweisen (z.B. mit beheiztem Keller) werden praktisch ausgeschlossen, Kompensationsmaßnahmen reichen nicht mehr aus. Zur Förderung kompakten Bauens greift dieser Ansatz zu kurz und ist damit ungeeignet.
- Niedrigere Energieverbräuche durch kompaktes Bauen ist unstrittig, die Relevanz einer zusätzlichen Regulierung allerdings nicht. Die energetischen Anforderungen an Gebäude (Primärenergiebedarf), die bauliche Praxis und der nutzerorientierte

Bedarf sowie die Baukosten stellen indirekte Regulative dar, die das kompakte Bauen fördern. Bei Bedarf existieren ansonsten zusätzliche Instrumente, die sich bewährt haben und vor allem auch funktionieren.

- Die Berücksichtigung solarer Gewinne ist bereits Bestandteil jeder energetischen Bilanzierung von Gebäuden. Der äquivalente Transmissionswärmeverlust stellt lediglich eine bilanzielle Verschiebung dar, die zu einer Reduktion der Anforderungen an die thermische Qualität der Gebäudehülle führt. Dies stellt einen klimapolitischen Rückschritt dar.
- Die damit verbundene Begünstigung südorientierter Fensterflächen gibt einen Anreiz zu einer insgesamt südorientierten Bauweise. Bauen steht immer im Kontext von sozialen, gesellschaftlichen, ökonomischen, gestalterischen und technischen Anforderungen. Ein allein südorientierter Städtebau wird dieser Komplexität nicht gerecht. Zudem wird die energiewirtschaftliche Relevanz der Südorientierung von Gebäuden dabei überbewertet.

Literaturverzeichnis

[1] Gesetz zur Einsparung von Energie und zur Nutzung Erneuerbarer Energien zur Wärme- und Kälteerzeugung in Gebäuden. Gebäudeenergiegesetz - GEG 2017.

[2] Verordnung über energieeinsparenden Wärmeschutz und energieeinsparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung -EnEV). EnEV 2014 2015.

[3] Gesetz zur Einsparung von Energie in Gebäuden (Energieeinsparungsgesetz). EnEG 2013.

[4] Gesetz zur Förderung Erneuerbarer Energien im Wärmebereich (Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz). EEWärmeG 2015.

[5] Richtlinie 2010/31/EU über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden. Straßburg 2010.

[6] Richtlinie (EU) 2018/844 zur Änderung der Richtlinie 2010/31/EU über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden und der Richtlinie 2012/27/EU über Energieeffizienz 2018.

[7] Walberg, D.; Brosius, O.; Schulze, T.; Cramer, A.: Massiv- und Holzbau bei Wohngebäuden. Vergleich von massiven Bauweisen mit Holzfertigbauten aus kostenseitiger, bautechnischer und nachhaltiger Sicht. Kiel 2015.

[8] Verordnung zur Berechnung der Wohnfläche. Wohnflächenverordnung - WoFlV 2003.

[9] Bettgenhäuser, K.; Hermelink, A.; Offermann, M.; Petersdorff, C.; Manteuffel, B. von; Bürger, V.; Thamling, N.; Siegert, D.: Kurzgutachten zur Frage einer Ergänzung oder Umstellung des Anforderungssystems. Köln, Freiburg, Berlin 2018.