



Projektarbeit zum Kurs Modellierung Dynamischer Systeme I (WS 2019/20):

Dokumentation >Musterhaus<



Lehrstuhl:

Technische Universität München
Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stefan Winter

Betreuer:

M. Sc. Nina Flexeder
M. Sc. Patrick Dumler

Verfasser:

Raphael Amann (03665192)
Tobias Jürgens (03708108)
Benedikt Köck (03708135)

eingereicht am:

16. März 2020

Inhalt

Inhalt.....	2
1 Aufgabenstellung der Arbeit und individuelles Ziel der Untersuchung.....	3
2 Objektbeschreibung	4
3 EnEV Berechnung und Messung	6
4 Modellierung in TRNSYS und Modellbeschreibung	7
4.1 Simulation der EnEV-Berechnung in TRNSYS.....	8
4.2 Annäherung an das reale System.....	10
5 Modellierung in WUFI und Modellbeschreibung	13
5.1 Simulation mit realen Messwerten im vereinfachten Modell	13
5.2 Vergleich mit anderen Wetterdatensätzen	15
5.3 Vergleich mit TRNSYS.....	15
6 Fazit.....	18
Literaturverzeichnis.....	19
Abbildungsverzeichnis	20
Tabellenverzeichnis	21
Anhang A.....	22

1 Aufgabenstellung der Arbeit und individuelles Ziel der Untersuchung

In Zeiten des Klimawandels wird immer mehr Wert auf Nachhaltigkeit gelegt. In Folge dessen werden verstärkt natürliche Baustoffe wie zum Beispiel Holz eingesetzt. Im Rahmen einer Seminararbeit wurde daher ein mobiles Musterhaus gebaut, um die Dämm- und Speicherwirkung von Massivholzwänden zu untersuchen und mit der Wärmebedarfsrechnung nach EnEV verglichen.

Nun soll im Rahmen einer thermischen Simulation desselben Objekts festgestellt werden, inwieweit eine Simulation mit TRNSYS oder WUFI mit der Realität übereinstimmt. Hierzu wurden bereits in der vorangehenden Seminararbeit die Temperatur und Luftfeuchtigkeit innen und außen, sowie der Energieverbrauch der Heizung am Realobjekt gemessen. Nun soll das Modell in TRNSYS und WUFI mit möglichst ähnlichen Bedingungen entworfen werden, um einen Vergleich zu ermöglichen. Als Vergleichswerte werden dabei der Heizenergiebedarf und die Innentemperatur herangezogen.

Die Anforderungen an das Gebäude sind hierbei relativ simpel, da es sich lediglich um ein Versuchsobjekt handelt. Für den Vergleich wird von einer über das ganze Jahr konstanten Innentemperatur von 20 °C ausgegangen, die allein durch eine Elektroheizung von 1000 W gehalten werden soll. Von einer Belüftung und Kühlung wird für den Vergleich nicht ausgegangen, da dies während der Messung ebenfalls nicht der Fall war.

2 Objektbeschreibung

Bei dem betrachteten Musterhaus handelt es sich um eine Massivholzkonstruktion. Sowohl die Wand und die Decke, als auch der Boden bestehen aus 25 cm Massivholz. Von innen nach außen befinden sich hierbei zunächst 10 cm dicke, senkrecht stehende Balken, gefolgt von fünf Lagen Nut & Feder Brettern mit jeweils 3 cm. Sämtliche Bauteile wurden bewusst sägerau eingebaut, um die benötigten Bearbeitungsschritte gering zu halten und zwischen den Lagen eine möglichst geringe Kontaktfläche zu erreichen. Dadurch wird eine ruhende Luftschicht eingeschlossen, was die Dämmwirkung verbessern soll. Bei den zwei Fenstern sowie der Fenstertür handelt es sich um eine Dreifachverglasung mit einem Rahmen aus Lärchenholz (Köck, 2019, p. 4).

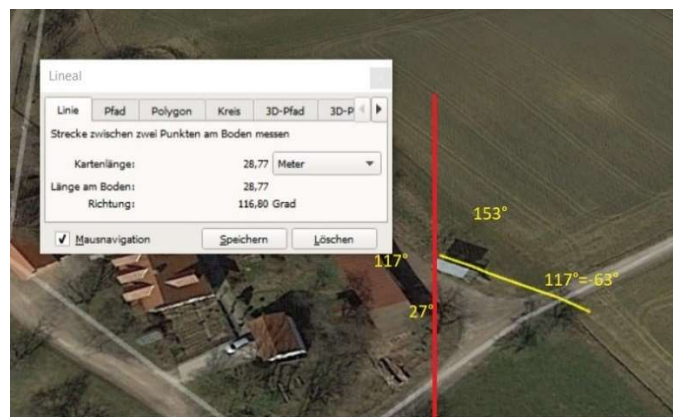


Abbildung 1: Orientierung des Objekts im Satellitenbild ([Google])

Da das Gebäude mit 2,5 x 5 Meter mobil auf eine LKW-Wechselbrücke gebaut wurde, kann es theoretisch an jedem Ort aufgestellt werden. Die für diese Arbeit entscheidenden Messungen wurden allerdings in 94327 Bogen durchgeführt. Die genauen Daten können Tabelle 1 und die exakte Ausrichtung Abbildung 1 entnommen werden.

Als Standortklimadatensatz wurde zunächst München-Riem gewählt, da zum genauen Standort in TRNSYS keine genauen Messungen vorliegen, und München-Riem am ehesten den am Standort vorliegenden Bedingungen entspricht. Mithilfe der vor Ort gemessenen Außentemperaturen soll der Datensatz rechnerisch so gut wie möglich angepasst werden. Da keine genauen Messungen der solaren Einstrahlung vorgenommen wurden, wird hier angenommen, dass der Standortklimadatensatz annäherungsweise den Werten des realen Standorts entspricht. Dabei liegt keinerlei Verschattung vor.

Tabelle 1: Gebäudedaten des Musterhauses

1 Gebäudedaten							
Volumen (Außenmaß) [m³]		$V_e =$	32,50		$f_G = 0,32$ wenn $2,5 \leq h_G \leq 3$ sonst = $1/h_G - 0,04$ m ⁻¹		
Geschosshöhe [m]		$h_G =$	2,35		$f_G = 0,39$		
Nutzfläche [m²]		$A_{Nl} = f_G \cdot V_e =$	12,53				
Anzahl Wohneinheiten [-]			1,00				
2 Wärmeverlust Q_T [kWh/a]							
2.1 Spezifischer Transmissionswärmeverlust H_T [W/K]							
Kürzel	Orientierung/ Einbausituation	Zuord- nung	Neigung	Fläche	Wärmedurch- gangskoeffizient	Temperatur- korrekturfaktor	Transmissions- wärmeverlust
		[Kürzel] [°]		A_i [m²]	U_i [W/(m²K)]	$F_{x,i}$ [-]	$U_i \cdot A_i \cdot F_{x,i}$ [W/K]
2.1.1 Außenwände							
AW 1	West		90°	6,50	0,48	1,0	3,11
AW 2	Nord		90°	11,74	0,48	1,0	5,61
AW 3	Ost		90°	4,19	0,48	1,0	2,00
AW 4	Süd		90°	11,74	0,48	1,0	5,61
2.1.2 Fenster, Fenstertüren							
W 2	Nord	AW 2	90°	1,26	0,74	1,0	0,93
W 3	Ost	AW 3	90°	2,31	0,96	1,0	2,22
W 4	Süd	AW 4	90°	1,26	0,61	1,0	0,76
2.1.4 Dach							
D 1	0		0	12,50	0,48	1,0	6,06
2.1.11 Decken nach unten gegen Außenluft (Durchfahrten, Erker)							
AG 6	Decke über Außenluft			12,50	0,47	1,0	5,86
Summe Hüllfläche			$A = \sum A_i$ [m²] =	64,00			
Spezifischer Transmissionswärmeverlust Bauteilflächen					$H_T = \sum U_i \cdot A_i \cdot F_{x,i}$ [W/K] =		32,16
2.1.12 Wärmebrückenkorrekturwert							
Auswahl: detailliert - gem. DIN EN ISO 10211-2							
pauschal - ohne Berücksichtigung DIN 4108 Bbl. 2				$\Delta U_{WB} = 0,10$ [W/(m²K)]			
optimiert - mit Berücksichtigung DIN 4108 Bbl. 2				$\Delta U_{WB} = 0,05$ [W/(m²K)]			
detailliert - gem. DIN EN ISO 10211-2				$\Delta U_{WB} =$ Eingabe [W/(m²K)]			
				ΔU_{WB} [W/(m²K)] =			
				0,018			
				0,018			
2.1.13 Berechnung spezifischer Transmissionswärmeverlust							
Spezifischer Transmissionswärmeverlust					$H_T = \sum U_i \cdot A_i \cdot F_{x,i} + \Delta U_{WB} \cdot A$ [W/K] =		33,31

Da das Gebäude lediglich ein Versuchsobjekt ist, hat es nur einen Raum, wodurch eine Zonierung nicht nötig ist. Für den Vergleich wird außerdem kein spezifisches Benutzerprofil und keinerlei Lüftung verwendet, da dies den Bedingungen der Realmessung entspricht. Außer der einfachen Elektroheizung gibt es außerdem keine Gebäudetechnik sowie, abgesehen von der Messtechnik, keine inneren Wärmegewinne. Das Thermostat wurde auf 20,5 °C bis 21 °C eingestellt, sodass die Solltemperatur des Gebäudes in der Heizperiode immer in diesem Rahmen liegt (Köck, 2019, p. 7).

3 EnEV Berechnung und Messung

Im Rahmen der vorangegangenen Projektarbeit wurde eine Energiebedarfsrechnung nach EnEV mithilfe einer Excel-Tabelle der Universität Kassel durchgeführt. Die Gebäudedaten wurden hierbei wie in Tabelle 1 angegeben übernommen und zusätzlich die Werte für den Transmissionswärmeverlust sowie die solaren Gewinne transparenter und opaker Bauteile berechnet. Die solaren Gewinne der transparenten Bauteile wurden mit einem Faktor für den Ausnutzungsgrad multipliziert und gemeinsam mit den solaren Gewinnen opaker Bauteile von den Transmissionswärmeverlusten subtrahiert.

Außerdem rechnet die EnEV mit Raumtemperaturen von 19 °C und der Außenlufttemperatur eines Normjahres, wie im Anhang dargestellt. Von allen Werten wurden die Monatsmittelwerte ermittelt und damit die Berechnung in der Excel-Tabelle durchgeführt.

Für die Messung im Realbetrieb wurde ein eigens dafür zusammengestelltes Messsystem verwendet. Sämtliche Werte wurden in Zeitschritten von fünf Minuten über ein ganzes Jahr gemessen und aufgezeichnet.

Außerhalb der Heizperiode heizt sich das Gebäude teilweise auf über 21 °C auf. Da für den Vergleich lediglich der Heizverbrauch betrachtet wird, wird dies zunächst jedoch nicht berücksichtigt. Bei einem Vergleich der Heizperiode wurde eine Abweichung von 70,7 % zwischen Messwerten und EnEV-Berechnung festgestellt (Köck, 2019, p. 7).

Eine tabellarische Gegenüberstellung der Auswertung ist in Tabelle 9 unter Anhang A zu finden.

4 Modellierung in TRNSYS und Modellbeschreibung

Das TRNSYS Modell für die Berechnung des Heizenergiebedarfs, in Abbildung 2 dargestellt, ist im Prinzip relativ simpel aufgebaut. Über die „Equation“ werden alle Daten in die richtigen Einheiten umgerechnet und die Solltemperatur des Innenraumes festgelegt. Über den Integrator wird die Heizleistung über alle Zeitschritte auf integriert und dadurch die insgesamt benötigte Heizenergie berechnet.

Als Betrachtungszeitraum wurde ein Jahr gewählt, was 8760 Stunden entspricht. In den „Control Cards“ wurde außerdem ein Abstand der Zeitschritte von 0,2 h festgelegt. Die Toleranzen für die Meldungen „WARNING“ und „ERROR“ beschränken sich jeweils auf eine Anzahl von 30 Auffälligkeiten bzw. Fehler. Alle weiteren Einstellungen in den „Control Cards“ wurden unverändert übernommen.

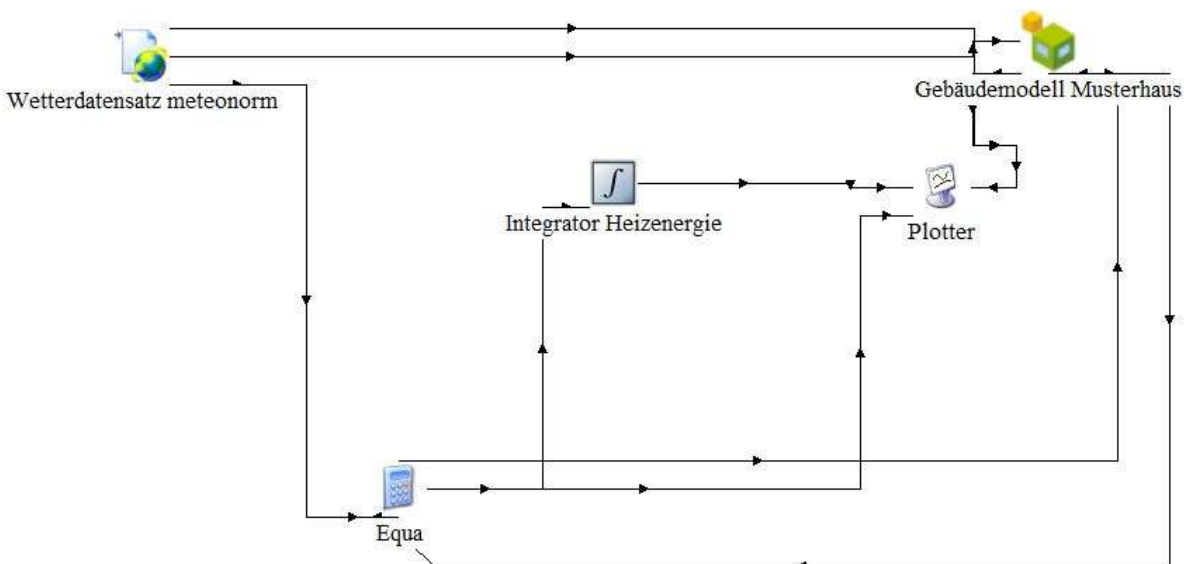


Abbildung 2: Screenshot des in TRNSYS aufgestellten Modells des Musterhauses

Im „Building Type“ wurde –dem realen Modell entsprechend- eine Zone mit einem Airnode erstellt. Dieser weist ein Volumen von 22,5 m³ und eine Kapazität von 27 kJ/K auf. Die Oberflächen („Surfaces“) und die zugehörigen Einstellungen entsprechen den Angaben in den Übersichtstabellen 2 und **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** Zusätzlich wurde für den View-to-sky-factor an den Außenwänden ein dimensionsloser Wert von je 0,5, für das Dach 1,0 und für die Bodenplatte 0,0 angenommen, da das Musterhaus bei den Messungen nicht durch die umliegende Bebauung beeinflusst wurde. Für die Heizung wurde im „Heating Type“ als Solltemperatur („set temperature“) die Konstante „HEIZUNG_SOLL_TEMP“ gewählt, die in der „Equation“ festgelegt ist. Die Heizkraft („Heating Power“) wurde entsprechend der in der

Realität eingebauten Elektroheizung zu 3600 kJ/h angenommen (was 1000 W entspricht). Der radiative Anteil liegt bei 60 %.

4.1 Simulation der EnEV-Berechnung in TRNSYS

Es wurde zunächst ein vereinfachtes Modell mit den in TRNSYS vorhandenen Materialdaten nach Tabelle 2 aufgestellt und anschließend der Energieverbrauch der Elektroheizung mit dem exakten Klimadatensatz von Meteororm für München-Riem simuliert. Dabei trat jedoch bei einem Heizenergiebedarf von 3.651 kWh eine massive Abweichung von 2.275 kWh zur Realmessung und von 1621 kWh zur EnEV Berechnung auf. Ausgehend von diesem Ergebnis wurde deutlich, dass das in TRNSYS angelegte Modell nicht der Realität entsprechen kann, weshalb es Schritt für Schritt angepasst und spezifiziert wurde. Dabei wurde nach jedem Schritt stets eine Simulation durchgeführt und mit den gemessenen und nach EnEV berechneten Ergebnissen verglichen, um festzustellen, inwieweit die jeweilige Änderung näher an der Realität liegt. Der Aufbau des endgültigen Bauteilaufbaus ist in Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 2: Übersichtstabelle der Bauteile im vereinfachten Modell

Bauteil	Kürzel	Bauteil-schicht	Baustoff	Kategorie	Orien-tierung	Azimet [°]	Geosurf	Schicht-stärke [m]	Fläche [m ²]	Solar absorptance [-]	Rohdichte [kg/m ³]	Lamda [W/mK]	U-Wert [W/m ² K]
Wand 1	AW 1	Massivholz	Fichte_Kiefer	E	Westen	117	0	0,25	6,5	0,6	600	0,089	0,48
Wand 2	AW 2	Massivholz	Fichte_Kiefer	E	Norden	27	0,2	0,25	11,74	0,6	600	0,089	0,48
Wand 3	AW 3	Massivholz	Fichte_Kiefer	E	Osten	297	0,2	0,25	4,19	0,6	600	0,089	0,48
Wand 4	AW 4	Massivholz	Fichte_Kiefer	E	Süden	207	0,1	0,25	11,74	0,6	600	0,089	0,48
Decke	D 1	Massivholz	Fichte_Kiefer	E	Horizontal	0	0	0,25	12,5	0,6	600	0,089	0,48
Boden	AG 6	Massivholz	Fichte_Kiefer	E	Horizontal	0	0,5	0,25	12,5	0,6	600	0,089	0,48
Fenster	W2	Verglasung	3-fach WSV; Kryptonfüllung	E	Süden	27	0	0,028	1,26	0,6	-	0,089	0,97
Fenstertür	W 3	Verglasung	3-fach WSV; Kryptonfüllung	E	Osten	297	0	0,028	2,31	0,6	-	-	0,68
Fenster	W 4	Verglasung	3-fach WSV; Kryptonfüllung	E	Norden	207	0	0,028	1,26	0,6	-	-	0,68
Fensterrahmen	CBR 1	Holzrahmen	Lärche	E	Süden	27	0	-	5,62 m	0	-	-	0,015
Fenstertürahmen	CBR 1	Holzrahmen	Lärche	E	Osten	297	0	-	6,5 m	0	-	-	0,015
Fenster-rahmen	CBR 1	Holzrahmen	Lärche	E	Norden	207	0	-	5,62 m	0	-	-	0,015

Der Vorteil gegenüber der Simulation des realen Systems liegt darin, dass in der EnEV vereinfachte Randbedingungen angenommen werden, die sich schneller und präziser in TRNSYS umsetzen lassen. Dazu wurde das Gebäude im Modell zuerst nach den Anforderungen der EnEV angepasst. Die Heizungssolltemperatur wurde zu 19°C (anstatt der tatsächlich vorgegebenen 20,75°C) angenommen. Der Wetterdatensatz „München-Riem“ wurde so verändert, dass die Außentemperaturen den in der Umgebung des Musterhauses gemessenen Temperaturen entsprechen.

Tabelle 3: Übersichtstabelle der Bauteile im endgültigen Model

Bauteil	Kürzel	Bauteil-schicht	Baustoff	Kategorie	Orien-tierung	Geosurf	Azimet [°]	Schicht-stärke [m]	Fläche [m ²]	Solar absorptance [-]	Rohdichte [kg/m ³]	Lamda [W/mK]	U-Wert [W/m ² K]
Wand 1	AW 1	Holzbalken	Fichte_Kiefer	E	Westen	0	117	0,1	6,5	0,6	470	0,089	0,335
		Luftschicht x 5	Luft					0,01			1,005	0,026	
		Nut & Feder x 5	Fichte_Kiefer					0,15			470	0,089	
Wand 2	AW 2	Holzbalken	Fichte_Kiefer	E	Norden	0,2	27	0,1	11,74	0,6	470	0,089	0,335
		Luftschicht x 5	Luft					0,01				0,026	
		Nut & Feder x 5	Fichte_Kiefer					0,15			470	0,089	
Wand 3	AW 3	Holzbalken	Fichte_Kiefer	E	Osten	0,2	297	0,1	4,19	0,6	470	0,089	0,335
		Luftschicht x 5	Luft					0,01				0,026	
		Nut & Feder x 5	Fichte_Kiefer					0,15			470	0,089	
Wand 4	AW 4	Holzbalken	Fichte_Kiefer	E	Süden	0,1	207	0,1	11,74	0,6	470	0,089	0,335
		Luftschicht x 5	Luft					0,01				0,026	
		Nut & Feder x 5	Fichte_Kiefer					0,15			470	0,089	
Decke	D 1	Holzbalken	Fichte_Kiefer	E	Horizontal	0	0	0,1	12,5	0,6	470	0,089	0,335
		Luftschicht x 6	Luft					0,01				0,026	
		Nut & Feder x 5	Fichte_Kiefer					0,15			470	0,089	
		Stahlbedeckung	Stahl					0,002			7800	54,000	
Boden	AG 6	Holzbalken	Fichte_Kiefer	E	Horizontal	0,5	0	0,1	12,5	0,6	470	0,089	0,335
		Luftschicht x 5	Luft					0,01				0,026	
		Nut & Feder x 5	Fichte_Kiefer					0,15			470	0,089	
Fenster	W2	Verglasung	3-fach WSV; Kryptonfüllung	E	Norden	0	27	0,028	1,26	0,6	-	-	0,68
Fenstertür	W3	Verglasung	3-fach WSV; Kryptonfüllung	E	Osten	0	297	0,028	2,31	0,6	-	-	0,97
Fenster	W4	Verglasung	3-fach WSV; Kryptonfüllung	E	Süden	0	207	0,028	1,26	0,6	-	-	0,68
Fensterrah-men	CBR 1	Holzrahmen	Lärche	E	Süden	0	27	-	5,62 m	0	-	-	0,015
Fensterräh-men	CBR 1	Holzrahmen	Lärche	E	Osten	0	297	-	6,5 m	0	-	-	0,015
Fenster-rahmen	CBR 1	Holzrahmen	Lärche	E	Norden	0	207	-	5,62 m	0	-	-	0,015

Zunächst wurde die Außentemperatur des Standortklimadatensatzes mit den realen Messwerten abgeglichen. Da auch hierbei eine deutliche Abweichung auftritt, musste der Datensatz entsprechend angepasst werden, um einen Vergleich zu ermöglichen. Hierzu wurde, für einen ersten Vergleich mit der EnEV Berechnung, mit einer konstanten Außentemperatur von $T_{amb} = 1$ simuliert. Hierbei ergab sich allerdings immer noch eine Abweichung von ca. 100 kWh pro Monat für die benötigte Heizenergie. Dies bedeutet, dass die Abweichung nicht allein am Wetterdatensatz liegen konnte. Es wurden daher verschiedene Anpassungen an den einzelnen Bauteilen unter ingenieurmäßigen Annahmen vorgenommen, um eine Übereinstimmung zu erreichen. Zunächst wurde eine Anpassung der Wärmeleitfähigkeit von Holz vorgenommen. Ausgehend von DIN EN ISO 10456:2010-05, nach der Nutzholz zwischen 0,12 W/mK und 0,13 W/mK liegt und Sperrholz einen Minimalwert von 0,09 W/mK aufweist, wurde der Lambda-Wert geringfügig überschätzt und der niedrigste mögliche Wert gewählt, um der Realität näher zu kommen (Normenausschuss Bauwesen (NABau), 2010, pp. 19–20).

Abschließend wurden, um einen genaueren Wetterdatensatz zu erhalten, jeweils die Monatsmittelwerte miteinander verglichen. Anschließend wurden die Temperaturen der einzelnen Monate über die „Equation“ mithilfe einer Formel, die die jeweilige Differenz aufrechnet, angepasst. In Formel 1 ist beispielhaft die Berechnung für den Monat Januar dargestellt:

$$T_{\text{amb_mittel}} = T_{\text{amb_mittel_Riem}} + (5.97 * ge(\text{TIME}, 0) * le(\text{TIME}, 744)) \quad (1)$$

Dieses Prinzip wurde so fortgeführt, dass die Formel alle Monate des betrachteten Jahres berücksichtigt. Dadurch ergibt sich folgender Temperaturverlauf (grün):

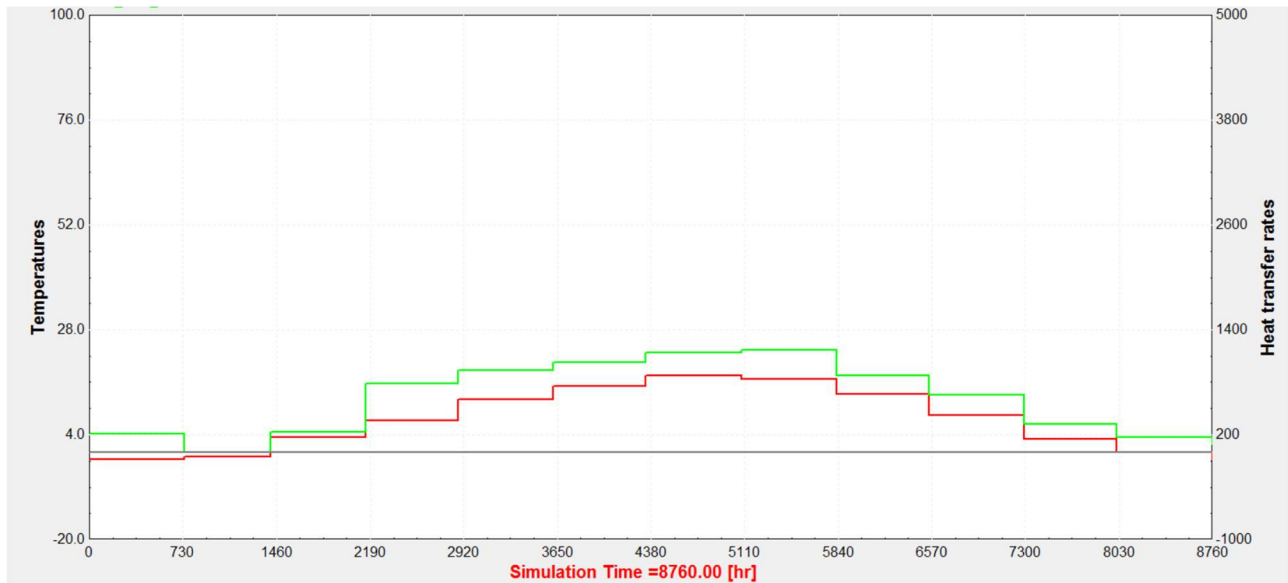


Abbildung 3: Vergleich der Monatsmittelwerte aus dem Wetterdatensatz „München-Riem“ mit den modifizierten Mittelwerten

Zum Vergleich ist auch in Rot der Temperaturverlauf eingezeichnet, der aus dem Wetterdatensatz für München-Riem stammt. Die graue Linie verläuft genau bei 0 °C. Es ist bereits optisch deutlich erkennbar, dass sich die beiden Verläufe erheblich voneinander unterscheiden und damit etwaige Berechnungen mit dem unveränderten Temperaturverlauf zu einem fehlerhaften Ergebnis führen. Die gemessenen Außentemperaturen sind dabei in jedem Monat etwas höher als die Außentemperaturen aus dem Wetterdatensatz München-Riem.

Unter diesen Rahmenbedingungen ergibt sich für den Gesamtenergiebedarf im Jahr ein Wert von 2069 kWh. Das vorliegende Ergebnis für die EnEV-Berechnung liegt bei nur etwa 1759 kWh. Damit liegt ein Unterschied von 310 kWh zur Handrechnung vor, was in etwa 15 % entspricht.

4.2 Annäherung an das reale System

Wie bei der Simulation der Berechnung nach EnEV wurde der modifizierte Temperaturverlauf verwendet. Es wurde jedoch mit einer anderen Datei im „Building Type“ gearbeitet, die die in der Realität vorhandenen Luftschichten zwischen den sägerauen Nut-und-Feder-Brettern berücksichtigt. Dabei wurde ein Wandaufbau angenommen, in dem auf die Massivholzwand nach außen hin immer je eine Luftschicht und eine Nut-und-Feder-Schicht folgt:

Tabelle 4: Wandaufbau in TRNSYS

Schicht (von innen nach außen)	Name der Schicht	Schichtdicke (cm)
1	Massivholzwand	10 cm
2	Luftschicht	0,2 cm
3	Nut-und-Feder-Brett	3,0 cm
4	Luftschicht	0,2 cm
5	Nut-und-Feder-Brett	3,0 cm
6	Luftschicht	0,2 cm
7	Nut-und-Feder-Brett	3,0 cm
8	Luftschicht	0,2 cm
9	Nut-und-Feder-Brett	3,0 cm
10	Luftschicht	0,2 cm
11	Nut-und-Feder-Brett	3,0 cm

Die Decke wurde auf dieselbe Art und Weise verändert, es kommen lediglich eine Metalldeckung und eine weitere Luftschicht, die sich zwischen der Deckung und der letzten Bretterlage befindet, als zusätzliche Schichten hinzu. Die Annahme einer durchgehenden Luftschicht von 2 mm stellt eine Vereinfachung dar, in der Realität variiert durch die Sägerauigkeit der Abstand zwischen den Schichten. Es wurde darüber hinaus mit einer Infiltration von 0,2 1/h gerechnet, ein Vergleich mit der Rechnung ohne Infiltration ergab jedoch, dass sich dadurch der Gesamtenergieverbrauch für das Gebäude nicht verändert.

Berechnet man erneut den gesamten Energieverbrauch im Jahresverlauf in kWh für den modifizierten Temperaturverlauf, ergibt sich ein Wert von 2159 kWh. Das bedeutet eine Abnahme um etwa 10 % im Vergleich zur vorhergehenden Berechnung unter EnEV-Bedingungen in TRNSYS. Dies verdeutlicht, dass die zuvor getroffene Annahme nur eine moderate Auswirkung im Modell hat, obwohl sie günstig gewählt ist. In der Realität ist deutlich mehr Potenzial zur Wärmeleitung durch die Wand gegeben, da keine durchgängigen Luftschichten vorliegen. Trotzdem wurde am realen Modell eine Verbesserung von ca. 486 kWh im Vergleich zur EnEV-Berechnung festgestellt, was sowohl in Relation, als auch in absoluten Zahlen deutlich mehr als in der Modellierung ist.

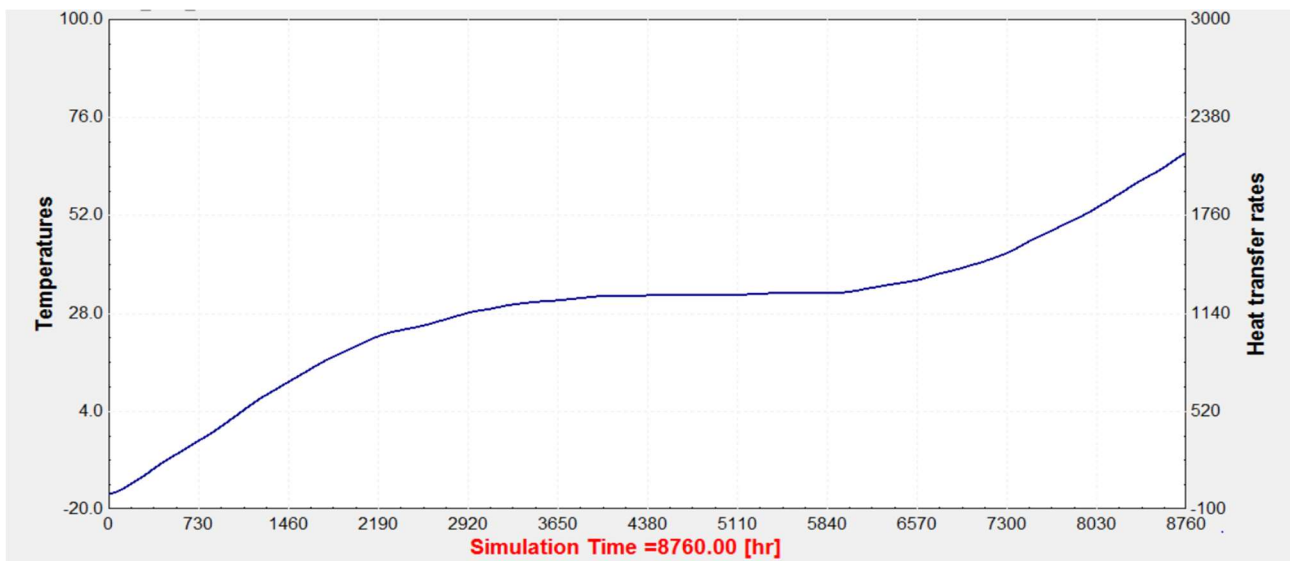


Abbildung 4: Akkumulierter Energieverbrauch im Jahresverlauf (Annäherung an das reale Modell)

Wie zu erwarten, fällt beinahe der gesamte Energiebedarf während der Heizperiode an. Über die Sommermonate muss kaum geheizt werden. Dies ist in der Abbildung 4 deutlich an dem flachen Verlauf im Zeitraum zwischen dem 01.05. (nach 2880 h) und dem 31.09. (nach 6552 h) erkennen.

Trotzdem ist nach wie vor eine enorme Differenz zum real gemessenen Wert 1273,25 kWh feststellbar (ca. 59 %). Diese immense Abweichung hat mehrere Ursachen. Zum einen führt die Verwendung von Monatsmittelwerten zu ungenaueren Ergebnissen, als wenn für die Berechnungen Temperaturen verwendet würden, die über einen kleineren Zeitraum (z.B. stundenweise) gemittelt wurden. Dazu kommt, dass weiterhin alle weiteren verwendeten Datenreihen zum Wetter aus dem Wetterdatensatz „München-Riem“ stammen. Das trifft auch für sämtliche Strahlungskomponenten zu, die deshalb nicht den realen Umgebungsbedingungen entsprechen. Da das Musterhaus über relativ große Fensterflächen verfügt, entsteht dadurch eine große Abweichung. Es liegen jedoch keine Strahlungsmessungen für das Musterhaus vor, sodass sich dieses Problem nicht ohne weitere Messungen lösen lässt. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die beiden TRNSYS-Modelle kaum dazu geeignet sind, das vorliegende Objekt in einer zufriedenstellenden Weise abzubilden, da die Abweichungen zu den Messwerten schlicht zu groß sind. Es fällt dabei insbesondere auf, dass der errechnete Energieverbrauch stets deutlich höher ist als der gemessene.

5 Modellierung in WUFI und Modellbeschreibung

Aufbauend auf das Simulationsmodell in TRNSYS wurde anschließend ein weiteres Modell in WUFI aufgestellt, um die Ergebnisse zusätzlich validieren zu können. Sämtliche Maße sowie die Ausrichtung entsprechen also dem Modell in TRNSYS. Das Modell wird bildlich in Abbildung 5 dargestellt.

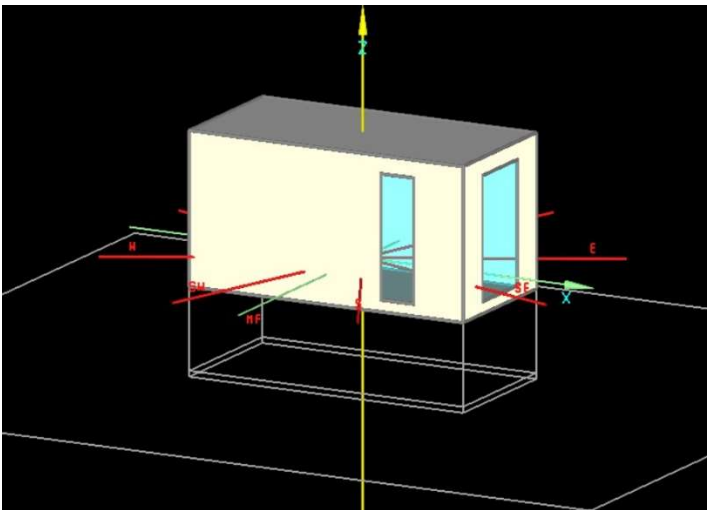


Abbildung 5: Ansicht des Modells in WUFI

5.1 Simulation mit realen Messwerten im vereinfachten Modell

Zunächst wurde auch in WUFI ein vereinfachtes Modell mit Massivholzwänden ohne Luftschichten simuliert.

Dabei weisen die einzelnen Bauteile folgende Eigenschaften auf:

Bauteile							
Nr	Name	Typ	Umgebung außen	Fläche [m ²]	Ausrichtung	Neigung [°]	R [m ² K/W]
1	Bodenplatte über Außenluft	Opak	Außenluft	12,5	Horizontal (100 %)	180	2.907
2	Flachdach	Opak	Außenluft	12,5	Horizontal (100 %)	0	2.907
3	Wände	Opak	Außenluft	33,96	SO (12 %), SW (35 %), NEIN (53 %)	90	2.907
4	Fenster Festverglast	Transparent	Außenluft	1,26	SW (100 %)	90	1.639
5	Fenstertür	Transparent	Außenluft	2,52	SO (100 %)	90	1.042
6	Fenster	Transparent	Außenluft	1,26	NEIN (100 %)	90	1.351

Abbildung 6: Bauteilliste in WUFI

Für die opaken Bauteile wurde 25cm Fichtenholz mit folgenden Eigenschaften zugrunde gelegt:

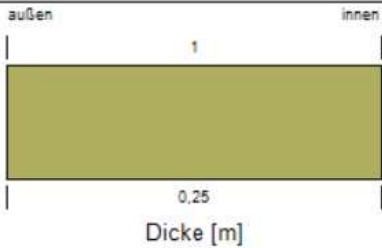

Homogene Schichten Wärmedurchlasswiderstand: 2,907 m ² K/W (ohne R _{si} ,R _{se}) Wärmeübergangskoeffizient (U-Wert): 0,321 W/m ² K Dicke: 0,25 m						
Nr.	Material/Schicht (außen -> innen)	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Dicke [m]	Farbe
1	Spruce	400	1880	0,086	0,25	

Abbildung 7: Eigenschaften des in WUFI verwendeten Fichtenholzes

Als Wetterdaten wurden für den Fall 1 die Messwerte der Außentemperatur, die für das komplette Jahr 2018 in Fünf-Minuten-Schritten vorliegen, verwendet. Da hierfür leider keine Solar-Strahlungswerte gemessen wurden und die Feuchtigkeitsmessung konstant bei 100 % liegt, wurden die restlichen Daten aus dem Testreferenzjahr 2011 des Deutschen Wetterdienstes übernommen. Die Testreferenzjahre für München sind leider nicht frei verfügbar, weshalb die Daten für Klimazone 13 verwendet wurden ([BBR]). Dies entspricht der Klimazone Passau, welche von allen 15 Klimazonen am ehesten den Bedingungen am Standort entspricht, allerdings wurde die Wetterstation dort abgebaut und durch Mühldorf ersetzt, welches die klimatischen Bedingungen in der Zone am besten repräsentiert ([BBR] & [DWD], 2014, p. 6). Es wurden zunächst die Stundenmittelwerte der gemessenen Temperaturen in Excel berechnet und anschließend in den Wetterdatensatz übernommen. Die erste Stunde des Folgejahres, welche im originalen Testreferenzjahr noch mit dazu genommen wird, wurde annäherungsweise als gleich zur ersten gemessenen Temperatur angenommen. Die Lage, Höhe über NN und Zeitzone wurde manuell für den Standort in Bogen angegeben.

Auf Grundlage dieser Annahmen erhält man folgendes Ergebnis:

Tabelle 5: Vergleich der WUFI-Ergebnisse mit den realen Messwerten

Auswertung Messergebnisse Musterhaus															
Messwerte:															
Ergebnisse		Januar	Februar	Marz	April	Mai	Juni	Juli	August	September	Oktober	November	Dezember	Jahresmittelwert Jahressumme	Betrachtungzeit raum Ja,Fe,Mä,No,De
Innenlufttemperatur	°C	20,49	20,61	20,75	23,64	26,34	28,22	29,34	31,02	24,52	22,00	20,87	20,67	24,04 °C	20,68 °C
Außenlufttemperatur	°C	4,40	-0,03	4,68	15,86	18,91	20,65	22,91	23,51	17,54	13,24	6,53	3,58	12,65 °C	3,83 °C
Temperaturdifferenz	°C	16,08	20,64	16,06	7,78	7,44	7,57	6,43	7,50	6,98	8,75	14,34	17,09	11,39 °C	16,84 °C
Gemessener Heizwärmebedarf	kWh/mth	270,18	258,28	221,09	30,39	3,96	0,56	0,51	0,58	16,94	80,02	208,46	285,24	1376,21 kWh/a	1243,25 kWh
Anteil des Heizwärmebedarfs im Betrachtungszeitraum vom ganzen Jahr															
90%															
gemessene Außentemperaturen in Wufi eingelesen und simuliert															
Innenlufttemperatur	°C	20,69	20,69	20,79	22,55	26,80	29,07	30,33	31,70	24,35	21,26	20,72	20,69	24,14 °C	20,72 °C
Außenlufttemperatur	°C	3,95	-0,12	4,39	15,41	18,47	20,21	22,47	23,06	17,09	12,78	6,14	3,24	12,26 °C	3,52 °C
Temperaturdifferenz	°C	16,74	20,81	16,41	7,14	8,33	8,86	7,86	8,64	7,26	8,49	14,58	17,45	11,88 °C	17,20 °C
Simulierter Heizwärmebedarf	kWh/mth	272,06	314,96	238,88	31,78	0,00	0,00	0,00	0,00	13,78	78,73	233,19	321,30	1504,68 kWh/a	1380,39 kWh
Abweichung von Messwerten		100,7%	121,9%	108,0%	104,6%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	81,4%	98,4%	111,9%	112,6%	109,3%	111,0%

In manchen Monaten kann man eine sehr gute Übereinstimmung der Simulation mit den Messwerten feststellen, bei anderen gibt es eine Abweichung bis zu 21 %. Durchschnittlich erhält man eine Abweichung der Simulation von den Messwerten von etwa 10 %. Ursache hierfür können aber auch die eingefügten Solar-Strahlungswerte darstellen, die nicht der Wirklichkeit im gemessenen Jahr und am entsprechenden Standort darstellen.

5.2 Vergleich mit anderen Wetterdatensätzen

Für weitere Simulationen wurden die Wetterdatensätze von Passau und München verwendet. Da bei beiden Datensätzen der Jahresmittelwert der Außentemperatur (8,19 °C bzw. 7,95 °C) um etwa 4 °C niedriger liegt als bei den Messdaten (12,65 °C), wurde auch die Heizungs-Solltemperatur um etwa 4 °C niedriger eingestellt (16,22 °C bzw. 15,98 °C anstatt 20,68 °C)

Tabelle 6: Vergleich der WUFI-Ergebnisse für die Standorte Passau und München

Simulation mit WUFI															
Vergleich Klima Passau															
Jahresmittelwert Außentemperatur		8,19 °C													
Temperaturdifferenz aus Messwerte		8,03 °C												Jahresmittelwert	Betrachtungzeit
Heizungs Solltemperatur		16,22 °C												Jahressumme	raum
															Ja,Fe,Mä,No,De
Innenlufttemperatur	°C	16,36	16,29	16,32	17,85	23,90	22,12	26,35	25,13	19,46	17,45	16,30	16,28	19,48 °C	16,31 °C
Außentemperatur	°C	0,18	-1,97	1,71	8,65	14,51	15,28	17,84	17,28	12,81	9,65	3,65	-1,30	8,19 °C	0,45 °C
Temperaturdifferenz	°C	16,19	18,26	14,61	9,20	9,39	6,85	8,51	7,85	6,65	7,80	12,65	17,58	11,29 °C	15,86 °C
Simulierter Heizwärmebedarf	kWh/mth	248,58	282,25	222,29	59,86	0,00	0,26	0,00	0,00	11,80	47,99	206,42	310,92	1390,38 kWh/a	1270,47 kWh
Abweichung von Messwerten														98,98%	97,86%
Vergleich Klima München															
Grundlage für Simulation															
Jahresmittelwert Außentemperatur		7,95 °C													
Temperaturdifferenz aus Messwerte		8,03 °C												Jahresmittelwert	Betrachtungzeit
Heizungs Solltemperatur		15,98 °C												Jahressumme	raum
															Ja,Fe,Mä,No,De
Innenlufttemperatur	°C	16,11	16,05	16,18	17,75	19,99	22,99	25,17	25,43	22,45	16,46	16,24	16,02	19,24 °C	16,12 °C
Außentemperatur	°C	-3,17	0,03	3,03	8,11	12,02	15,54	17,11	17,21	14,35	7,49	3,98	-0,32	7,95 °C	0,71 °C
Temperaturdifferenz	°C	19,28	16,02	13,14	9,64	7,97	7,45	8,06	8,22	8,10	8,97	12,26	16,34	11,29 °C	15,41 °C
Simulierter Heizwärmebedarf	kWh/mth	308,56	229,95	169,30	45,14	18,22	0,00	0,00	0,00	13,98	98,27	165,36	293,32	1342,09 kWh/a	1166,48 kWh
Abweichung von Messwerten														102,54%	106,58%

Hier lässt sich bezogen auf das gesamte Jahr eine sehr gute Übereinstimmung mit lediglich einer Abweichung von 1 % bzw. 2,5 % feststellen.

Unter Berücksichtigung der Vergleichbarkeit der einzelnen Simulationen mit der realen Messung kann man feststellen, dass die Massivholz-Gebäudehüllen mit einer Wärmeleitfähigkeit von 0,086 W/mK eine sehr gute Übereinstimmung mit der Realität aufweist. Auf alle Fälle ist eine Wärmeleitfähigkeit von 0,13 W/mK, wie sie landläufig verwendet wird, weit entfernt von der Realität.

5.3 Vergleich mit TRNSYS

Um nun einen möglichst genauen Vergleich mit TRNSYS zu ermöglichen, wurden in WUFI ebenfalls die Luftschichten und die Metallbedeckung des Dachs berücksichtigt. Hierbei wurden dieselben Werte und Bauteilaufbauten verwendet, wie in Abbildung 10 dargestellt.

Tabelle 7: Aufbau des Vergleichsmodells in WUFI

Bauteil	Bauteil-schicht	Baustoff	Schicht-stärke [m]	Fläche [m ²]	Rohdichte [kg/m ³]	Lamda [W/mK]	R-Wert [m ² K/W]
Wände	Massivholz	Fichte	0.1	6.5	600	0.089	3.292
	Luftschicht x 5	Luft	0.002		1293	0.026	
	Massivholz x 5	Fichte	0.03		600	0.089	
Decke	Massivholz	Fichte	0.1	11.74	600	0.089	3.369
	Luftschicht x 5	Luft	0.002		1293	0.026	
	Massivholz x 5	Fichte	0.03		600	0.089	
	Stahlbedeckung				7800	54.000	
Boden	Massivholz	Fichte	0.1	6.5	600	0.089	3.292
	Luftschicht x 5	Luft	0.002		1293	0.026	
	Massivholz x 5	Fichte	0.03		600	0.089	
Fenster Festverglast	Verglasung	3-fach Verglasung	0.028	1.26	-	-	0.61
Fenstertür	Verglasung	3-fach Verglasung	0.028	2.31	-	-	0.96
Fenster	Verglasung	3-fach Verglasung	0.028	1.26	-	-	0.74

Die Ergebnisse des Vergleichs sind in Tabelle 6 dargestellt. Deutlich zu erkennen ist hierbei, dass das Gesamtergebnis von WUFI fast identisch zur Realität ist. Vor allem im Winter ist die Übereinstimmung groß, wohingegen sie in den Sommer und Herbstmonaten doch stark abweicht.

Tabelle 8: Tabellarische Darstellung der Auswertung des Vergleichs

Auswertung Messergebnisse Musterhaus															
Messwerte:		Januar	Februar	März	April	Mai	Juni	Juli	August	September	Oktober	November	Dezember	Jahresmittelwert Jahressumme	Betrachtungszeitraum Ja,Fe,Mä,No,De
Ergebnisse															
Innenlufttemperatur	°C	20.49	20.61	20.75	23.64	26.34	28.22	29.34	31.02	24.52	22.00	20.87	20.67	24.04 °C	20.68 °C
Außenlufttemperatur	°C	4.40	-0.03	4.68	15.86	18.91	20.65	22.91	23.51	17.54	13.24	6.53	3.58	12.65 °C	3.83 °C
Temperaturdifferenz	°C	16.08	20.64	16.06	7.78	7.44	7.57	6.43	7.50	6.98	8.75	14.34	17.09	11.39 °C	16.84 °C
Gemessener Heizwärmebedarf	kWh/mth	270.18	258.28	221.09	30.39	3.96	0.56	0.51	0.58	16.94	80.02	208.46	285.24	1376 kWh/a	1243 kWh
Anteil des Heizwärmebedarfs im Betrachtungszeitraum vom ganzen Jahr															90%
Wufi Simulation München inkl. Luftschichten															
Innenlufttemperatur	°C	20.67	20.69	20.84	22.79	27.49	29.78	30.99	32.38	24.82	21.38	20.73	20.69	24.44 °C	20.73 °C
Außenlufttemperatur	°C	3.95	-0.12	4.39	15.41	18.47	20.21	22.47	23.06	17.09	12.78	6.14	3.24	12.26 °C	3.52 °C
Temperaturdifferenz	°C	16.72	20.81	16.45	7.38	9.02	9.57	8.52	9.33	7.73	8.60	14.60	17.45	12.18 °C	17.21 °C
Simulierter Heizwärmebedarf	kWh/mth	244	283	212	26	0	0	0	0	11	67	209	291	1343 kWh/a	1239 kWh
Abweichung von Messwerten		90%	110%	96%	85%	0%	0%	0%	0%	63%	83%	100%	102%	98%	99.7%
TRNSYS Simulation Real inkl. Luftschichten															
Innenlufttemperatur	°C	20.75	20.75	20.75	20.75	20.76	20.93	21.36	21.27	20.78	20.75	20.75	20.75	20.86 °C	20.75 °C
Außenlufttemperatur	°C	4.40	-0.03	4.68	15.86	18.91	20.65	22.91	23.51	17.55	13.24	6.53	3.52	12.26 °C	3.82 °C
Temperaturdifferenz	°C	16.35	20.78	16.07	4.89	1.84	0.28	-1.54	-2.25	3.23	7.51	14.22	17.23	8.22 °C	16.93 °C
Simulierter Heizwärmebedarf	kWh/mth	341	347	300	148	86	32	6	8	80	172	281	357	2158 kWh/a	1626 kWh
Abweichung von Messwerten		126%	134%	136%	487%	2168%	5749%	1246%	1404%	471%	215%	135%	125%	161%	131.2%

Trotz des gleichen Jahresmittelwertes der Temperatur weichen die Ergebnisse von WUFI und TRNSYS doch deutlich voneinander ab. Gerade im Sommer sieht man hier sehr deutlich den

Einfluss der Monatsmittelwerte, die für die Annäherung für TRNSYS verwendet wurden. Hierdurch kann die Wärmespeicherfunktion nicht wie bei WUFI korrekt berechnet werden, sondern es wird wie bei der EnEV Berechnung stets ein Heizbedarf benötigt. Leider kann das Format des selbst erstellten Wetterdatensatzes nicht auf TRNSYS übertragen werden, weshalb ein direkter Vergleich mit diesem nicht möglich ist. Auch hier zeigt sich erneut der starke Einfluss der verwendeten Klimadaten auf das Ergebnis der Simulation. Es ist also fraglich, wie genau ein statistischer Wetterdatensatz, der mit den Simulationsprogrammen mitgeliefert wird, tatsächlich die Realität darstellt.

6 Fazit

Abschließend kann festgehalten werden, dass für das gewählte Gebäude die Modellierung mit TRNSYS mit den gegenwärtig vorliegenden Daten nicht zu zufriedenstellenden bzw. realistischen Ergebnissen führt. Es ist jedoch durchaus möglich, dass mit einem vollständigen Wetterdatensatz genauere Resultate erzielt werden könnten. Um dies zu überprüfen, müssten am Standort des Musterhauses weitere Messungen durchgeführt werden, um beispielsweise zutreffende Strahlungswerte zu erhalten. Dass man unter weitgehender Vernachlässigung der Strahlung bereits deutlich plausiblere Resultate erreichen kann, die an die real gemessenen Werte heranreichen, zeigen die Ergebnisse der Modellierung des Gebäudes in WUFI Plus. Diese wurden mit den weniger detaillierten Wetterdatensätzen, die in WUFI vorliegen, ermittelt. Für eine zielführende Simulation mit umfangreicheren Wetterdatensätzen, wie sie in TRNSYS verwendet werden, ist es jedoch essentiell, geeignete Daten zu verwenden und ggf. zu erheben, die dem betrachteten Standort entsprechen. Andernfalls können, wie in dieser Arbeit gezeigt, große Ungenauigkeiten auftreten. Es ist darüber hinaus noch zu prüfen, welchen Einfluss die Berücksichtigung der Bauteilfeuchte in WUFI auf die Ergebnisse hat.

Literaturverzeichnis

(BBR)Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung. Zukunft Bau. Retrieved from https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/FP/ZB/Auftragsforschung/5EnergieKlimaBauen/2008/Testreferenzjahre/TRY2011_Datensatz.html on 08.03.2020. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBR).

(BBR)Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung; (DWD)Deutscher Wetterdienst. (2014). *Handbuch: Testreferenzjahre von Deutschland für mittlere, extreme und zukünftige Witterungsverhältnisse Witterungsverhältnisse*. Offenbach.

Google. Google Maps. Retrieved from <https://www.google.de/maps/place/Bernlohe+1,+94327+Bogen/@48.8868867,12.7434841,108m/data=!3m1!1e3!4m5!3m4!1s0x47756c19681d2f79:0x9a336f7a0dfdda5!8m2!3d48.88684!4d12.74369> on 14.12.2019.

Köck, B. (2019). *Dämm- und Speicherwirkung von Massivholzwänden ohne Wärmedämmung* (Seminararbeit). Technische Universität München, München.

Normenausschuss Bauwesen (2010-5). *Baustoffe und Bauprodukte – Wärme- und feuchtetechnische Eigenschaften – Tabellierte Bemessungswerte und Verfahren zur Bestimmung der wärmeschutztechnischen Nenn- und Bemessungswerte*. (DIN EN ISO 10456).

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Orientierung des Objekts im Satellitenbild ([Google])	4
Abbildung 2: Screenshot des in TRNSYS aufgestellten Modells des Musterhauses.....	7
Abbildung 3: Vergleich der Monatsmittelwerte aus dem Wetterdatensatz „München-Riem“ mit den modifizierten Mittelwerten.....	10
Abbildung 4: Akkumulierter Energieverbrauch im Jahresverlauf (Annäherung an das reale Modell)	12
Abbildung 5: Ansicht des Modells in WUFI	13
Abbildung 6: Bauteilliste in WUFI.....	13
Abbildung 7: Eigenschaften des in WUFI verwendeten Fichtenholzes.....	14

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Gebäudedaten des Musterhauses.....	5
Tabelle 2: Übersichtstabelle der Bauteile im vereinfachten Modell	8
Tabelle 3: Übersichtstabelle der Bauteile im endgültigen Model.....	9
Tabelle 4: Wandaufbau in TRNSYS.....	11
Tabelle 5: Vergleich der WUFI-Ergebnisse mit den realen Messwerten	14
Tabelle 6: Vergleich der WUFI-Ergebnisse für die Standorte Passau und München	15
Tabelle 7: Aufbau des Vergleichsmodells in WUFI	16
Tabelle 8: Tabellarische Darstellung der Auswertung des Vergleichs.....	16
Tabelle 9: Tabellarische Darstellung der Messergebnisse und EnEV Auswertung	22

Anhang A

Tabelle 9: Tabellarische Darstellung der Messergebnisse und EnEV Auswertung

Messwerte:															
Ergebnisse	Einheit	Januar	Februar	Marz	April	Mai	Juni	Juli	August	September	Oktober	November	Dezember	Jahresmittelwert	Betrachtungszeitraum
		Jahressumme													Ja,Fe,Mä,No,De
Innenlufttemperatur	°C	20,49	20,61	20,75	23,64	26,34	28,22	29,34	31,02	24,52	22,00	20,87	20,67	24,04 °C	20,68 °C
Außenlufttemperatur	°C	4,40	-0,03	4,68	15,86	18,91	20,65	22,91	23,51	17,54	13,24	6,53	3,58	12,65 °C	3,83 °C
Temperaturdifferenz	°C	16,08	20,64	16,06	7,78	7,44	7,57	6,43	7,50	6,98	8,75	14,34	17,09	11,39 °C	16,84 °C
Gemessener Heizwärmebedarf	kWh/mth	270,18	258,28	221,09	30,39	3,96	0,56	0,51	0,58	16,94	80,02	208,46	285,24	1376,21 kWh/a	1243,25 kWh
Anteil des Heizwärmebedarfs im Betrachtungszeitraum vom ganzen Jahr															90%
Vergleich mit Normwerten mittels Berechnungsblatt der Uni Kassel (https://www.uni-kassel.de/fb06/fachgebiete/architektur/bauphysik/downloads.html)															
Innenlufttemperatur	°C	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19,00 °C	19,00 °C
Außenlufttemperatur	°C	1	1,9	4,7	9,2	14,1	16,7	19	18,6	14,3	9,5	4,1	0,9	9,50 °C	2,52 °C
Temperaturdifferenz	°C	18,0	17,1	14,3	9,8	4,9	2,3	0,0	0,4	4,7	9,5	14,9	18,1	9,50 °C	16,48 °C
Transmissionswärmeverlust	kWh/mth	446	383	354	235	121	55	0	10	113	235	357	449	2758,00 kWh/a	1.989,00 kWh
Solare Wärmegewinne transparente Bauteile	kWh/mth	48	40	98	160	161	158	147	144	120	95	34	24	1229,00 kWh/a	244,00 kWh
Solare Wärmegewinne opake Bauteile	kWh/mth	-3,99	-2,77	5,32	17,46	19,71	20,98	18,67	15,06	9,06	3,11	-4,55	-6,61	91,45 kWh/a	-12,60 kWh
Ausnutzungsgrad Wärmegewinne	%	0,999	0,999	0,988	0,858	0,517	0,19	0	0	0,632	0,957	0,999	1		
Berechneter Heizwärmebedarf	kWh/mth	402	346	252	80	18	4	0	0	28	141	328	432	2030,29 kWh/a	1.758,90 kWh
Anteil des Heizwärmebedarfs im Betrachtungszeitraum vom ganzen Jahr															87%
Anteil des gemessenen Heizwärmebedarf am berechneten Heizwärmebedarf															71%
Berechnung der Normwerte mit HT' =28W/K anstatt 33W/K															
Tage je Monat	d	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	365 d	
rechnerischer															
Transmissionswärmeverlust															
QT=Summe(HT'x deltaT) je Zeitschritt	kWh/mtf	374,98	321,75	297,90	197,57	102,08	46,37	0,00	8,33	94,75	197,90	300,38	377,06	2319,07 kWh/a	1672,07 kWh
Heizwärmebedarf	kWh/mtf	331	285	196	45	9	12	0	8	13	104	271	360	1633,87 kWh/a	1442,02 kWh

Selbständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.



Raphael Amann



Tobias Jürgens



Benedikt Köck

München, 16. März 2020