

# Inhaltsverzeichnis

<b>Kurzfassung .....</b>	<b>VII</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>IX</b>
<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>XI</b>
<b>1 Aktuelle energiepolitische Trends und Entwicklung der Gebäudeenergieeffizienz .....</b>	<b>1</b>
1.1 Entwicklung des Energieverbrauchs in Deutschland .....	1
1.2 Der Wohnungsbestand in Deutschland .....	3
1.3 Gesetzliche Anforderungen .....	4
1.4 Ziel der Arbeit .....	6
<b>2 Stand der Technik .....</b>	<b>9</b>
2.1 Berechnungsverfahren und normative Grundlagen .....	9
2.1.1 Grundlagen der DIN V 4108-6 / DIN V 4701-10 .....	10
2.1.2 Grundlagen der DIN V 18599 .....	13
2.1.3 Witterungsbereinigung von Verbrauchsdaten .....	15
2.1.4 Definition der Energieperformancelücke (EPL) .....	16
2.2 Baukonstruktive und anlagentechnische Sanierungsmaßnahmen .....	17
2.2.1 Transmissionswärmeverluste im Gebäudebestand und mögliche Sanierungsmaßnahmen .....	17
2.2.2 Anlagenverluste im Gebäudebestand und mögliche Sanierungsmaßnahmen .....	19
2.3 Abweichung zwischen Bedarfs- und Verbrauchswerten .....	21
<b>3 Sanierung eines typischen Wohngebäudes der 60er Jahre .....</b>	<b>25</b>
3.1 Ausgangszustand der Gebäude .....	25
3.2 Durchgeführte Sanierungsmaßnahmen .....	27
3.2.1 Sanierungsvarianten von Riegel R1 .....	29
3.2.2 Sanierungsvarianten von Riegel R2 .....	31
3.2.2.1 Anlagentechnische Sanierung von Riegel 2 Eingang 1 .....	32
3.2.2.2 Anlagentechnische Sanierung von Riegel 2 Eingang 2 .....	33
3.2.2.3 Anlagentechnische Sanierung von Riegel 2 Eingang 3 .....	34
3.2.3 Sanierungsvarianten von Riegel R3 .....	35
3.2.3.1 Anlagentechnische Sanierung von Riegel 3 Eingang 1 .....	36
3.2.3.2 Anlagentechnische Sanierung von Riegel 3 Eingang 2 .....	37
3.2.3.3 Anlagentechnische Sanierung von Riegel 3 Eingang 3 .....	38
3.3 Bedarfsberechnungen nach EnEV und bilanzierte Energieeinsparpotentiale .....	38
3.3.1 Excel-Tool zur Erstellung von EnEV-Berechnungen auf Basis von DIN V 4108/ DIN V 4701 .....	40
3.3.2 Energieeinsparpotential der Gebäudehülle: spezifischer Transmissionswärmetransferkoeffizient .....	41

3.3.3	Jahres-Heizwärmebedarf vor und nach der Sanierung .....	43
3.3.4	Jahres-Endenergiebedarf vor und nach der Sanierung .....	44
3.3.5	Primärenergieeinsparpotential nach der energetischen Sanierung .....	45
3.3.6	Vergleich des spezifischen Heizwärmebedarfs nach DIN V 4108-6 in Verbindung mit DIN V 4701-10 und DIN V 18599 .....	46
<b>4</b>	<b>Monitoring.....</b>	<b>49</b>
4.1	Messtechnisches Konzept .....	49
4.1.1	Installierte Messtechnik im Raum .....	50
4.1.2	Installierte Messtechnik im Gebäude .....	51
4.1.3	Installierte Messtechnik im Außenbereich .....	52
4.2	Datenmanagement und Auswertung .....	53
4.2.1	Erzeugung von HDF5-Dateien .....	53
4.2.2	HDF5-Viewer zur Analyse und Visualisierung der Messdaten .....	54
4.3	Kennwerte aus dem Monitoring .....	54
4.3.1	Gegenüberstellung der Außentemperaturen und Strahlung .....	54
4.3.2	Gegenüberstellung der Heizgradtage .....	56
4.3.3	U-Wert-Analysen .....	58
4.3.4	Wärmepumpen und deren Arbeitszahlen .....	62
4.3.5	Vergleich der Heizwärmeverbrauchsdaten .....	65
4.3.6	Ergebnisse des Trinkwarmwasserverbrauchs.....	67
4.3.7	Vergleich des Trinkwarmwasser- und Heizwärmeverbrauchs für Riegel R2.E1 und R3.E1 bis R3.E3 .....	69
4.3.8	Gegenüberstellung des Gesamtenergieverbrauchs für Riegel R2.E1 und R3.E1 .....	71
4.4	Innenraumzustände und Nutzerverhalten .....	73
4.4.1	Gemessene Wohnungstemperaturen .....	73
4.4.2	Fensteröffnungsverhalten .....	76
4.4.3	Gemessene relative Feuchte .....	78
4.4.4	CO <sub>2</sub> -Gehalt in den Wohnungen .....	81
4.4.5	Begleitende Nutzerbefragung und deren Ergebnisse.....	83
4.5	Wärmeverschiebung innerhalb eines Riegels .....	87
<b>5</b>	<b>Vergleich von Bedarfs- und Verbrauchswerten .....</b>	<b>93</b>
5.1	Gegenüberstellung der Heizwärmeverbräuche mit den Bedarfswerten.....	93
5.2	Vergleich der Energiebedarfs- und -verbrauchswerte für die Trinkwarmwassererzeugung.....	94
5.3	Gegenüberstellung der Endenergieverbräuche und -bedarfswerte .....	95
5.4	Vergleich der Primärenergieverbrauchs und -bedarfswerte .....	96
5.5	Analyse der Energieperformancelücke .....	97
<b>6</b>	<b>Auswirkungen individueller Parameter auf die Energiebedarfsberechnung .....</b>	<b>101</b>
6.1	Direkte und indirekte Nutzereingriffsmöglichkeiten .....	101
6.2	Analyse der gemessenen Innenraumtemperaturen .....	102

6.2.1	Temperaturanalyse für das Badezimmer .....	103
6.2.2	Temperaturanalyse für die Küche .....	104
6.2.3	Temperaturanalyse für das Wohnzimmer .....	105
6.2.4	Temperaturanalyse für die Sanierungsvarianten.....	107
6.2.5	Auswirkungen der gemessenen Innenraumtemperaturen auf die Bedarfsberechnungen nach EnEV .....	110
6.3	Untersuchung des Lüftungsverhaltens .....	111
6.3.1	Analyse des Fensteröffnungsverhaltens .....	111
6.3.1.1	Fensteröffnungsverhalten im Badezimmer.....	112
6.3.1.2	Fensteröffnungsverhalten in der Küche .....	114
6.3.1.3	Fensteröffnungsverhalten im Wohnzimmer.....	116
6.3.2	Gegenüberstellung des Fensteröffnungsverhaltens für die einzelnen Sanierungsvarianten.....	118
6.3.3	Ermittlung der vorhandenen Luftwechselzahlen.....	120
6.3.3.1	Luftwechselzahlen durch Fensterlüftung im Badezimmer .....	123
6.3.3.2	Luftwechselzahlen durch Fensterlüftung in der Küche .....	124
6.3.3.3	Luftwechselzahlen durch Fensterlüftung im Wohnzimmer .....	125
6.3.4	Gegenüberstellung der Luftwechselzahlen durch Fensterlüftung für die einzelnen Sanierungsvarianten.....	126
6.3.5	Auswirkungen des ermittelten Luftwechsels auf die Bedarfsberechnungen nach EnEV.....	128
6.4	Betrachtung der internen Wärmegewinne.....	130
6.4.1	Ansätze zur Bilanzierung interner Wärmegewinne aus der Literatur ....	130
6.4.2	Entwicklung der Berücksichtigung interner Wärmegewinne in der Normung .....	131
6.4.3	Ermittlung der Basisdaten zur Bestimmung der internen Wärmegewinne für die betrachteten Gebäude.....	132
6.4.3.1	Mieterstrukturen.....	132
6.4.3.2	Angesetzter Bilanzraum.....	133
6.4.4	Abschätzung der internen flächenbezogenen Wärmeströme und Zusammenwirken der einzelnen Quellen .....	133
6.4.4.1	Einfluss der Nutzer .....	133
6.4.4.2	Abschätzung des Stromverbrauchs privater Haushalte.....	133
6.4.4.3	Abschätzung der Geräteausstattung und Betriebsdauer.....	134
6.4.4.4	Abschätzungen der flächenbezogenen internen Wärmeströme .....	135
6.4.5	Auswirkungen der ermittelten internen Gewinne auf den Heizwärmebedarf nach EnEV .....	136
6.5	Analyse des Trinkwarmwasser-Energieverbrauchs für die dezentralen Systeme .....	138
6.5.1	Gegenüberstellung von Zapfprofilen.....	138
6.5.2	Gegenüberstellung des wohnungsweisen Energieverbrauchs im Jahresverlauf .....	143
6.5.3	Vergleich des jährlichen Energieverbrauchs für die dezentrale Trinkwassererzeugung.....	145
6.5.4	Auswirkungen des ermittelten Energieverbrauchs für die Trinkwassererzeugung auf die Energiebedarfsberechnung.....	147

---

6.6	Gegenüberstellung des Heizwärmebedarfs unter Verwendung der gewonnenen Messdaten und der Verbrauchswerte .....	147
<b>7</b>	<b>Fazit</b> .....	<b>155</b>
<b>8</b>	<b>Ausblick</b> .....	<b>159</b>
<b>9</b>	<b>Nomenklatur</b> .....	<b>163</b>
<b>10</b>	<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>169</b>
<b>11</b>	<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>179</b>
<b>12</b>	<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>181</b>
<b>13</b>	<b>Anhang</b> .....	<b>189</b>
13.1	Innenraumtemperaturen während der Heizperiode 2012 .....	189
13.2	Innenraumtemperatur während der Heizperiode 2013 .....	191
13.3	Lüftungsverhalten während der Heizperiode 2012 .....	198
13.4	Lüftungsverhalten während der Heizperiode 2013 .....	201
13.5	Trinkwarmwasserverbrauch im Jahr 2012 .....	213
13.6	Trinkwarmwasserverbrauch im Jahr 2013 .....	214