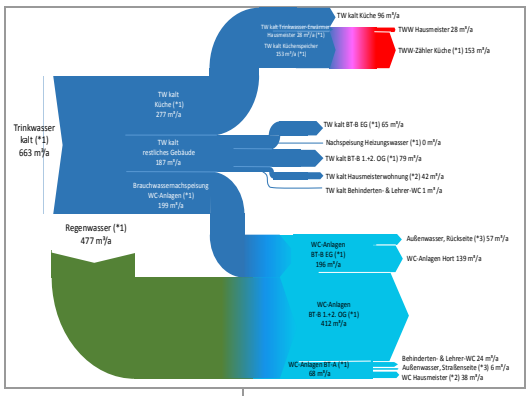


Energieoptimiertes Bauen – EnEff:Schule
Neubau der St. Franziskus-Grundschule in Halle (Saale)
als Nullenergiehaus in Holzbauweise

Abschlussbericht
Teil 3: Bilanzen

Prof. Dr.-Ing. K. Jagnow
Dipl.-Ing. (FH) K. Gebhardt, M. Eng.

Die Verantwortung für den Inhalt
des Berichtes liegt bei den Verfassern.

Magdeburg, September 2018

unter dem Förderkennzeichen
FKZ 0327430O
gefördert durch das:
Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie
aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Impressum

Projektförderung:

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
unter dem Förderkennzeichen FKZ 0327430O
Im Förderprogramm Energieoptimiertes Bauen (EnOB) – EnEff: Schule

Projektträger:

Projektträger Jülich (PTJ)
Wilhelm-Johnen-Straße
52428 Jülich

Projektlaufzeit:

01.04.2013 - 31.03.2018

Fördermittelnehmer und Forschungskooperationspartner:

Edith-Stein-Schulstiftung des Bistums Magdeburg
Max-Josef-Metzger-Str. 1
39104 Magdeburg

Verantwortliche Berichtverfasser:

Prof. Dr.-Ing. Kati Jagnow
Dipl.-Ing. (FH) Katharina Gebhardt, M. Eng.
Fachbereich Wasser, Bau, Umwelt und Sicherheit
Hochschule Magdeburg/Stendal
Breitscheidstraße 2, 39114 Magdeburg

Projektbearbeiter:

Prof. Dr.-Ing. Kati Jagnow
Dipl.-Ing. (FH) Katharina Gebhardt, M. Eng.
Ina Asmussen, M. Eng.
Stefan Bethke, M. Eng.
Yujin Guo, M. Eng.
Florian Hallensleben, M. Eng.
Sandra Jäger, M. Eng.
Martin Könnig, M. Eng.
Yabo Liu, M. Eng.
Melanie Münch, M. Eng.
Kevin Muschalla, M. Eng.
Heidrun Neumann, B. Eng.
Sandra Schlehf, M. Eng.
Jianbang Song, M. Eng.
Julia Stresing, M. Eng.
Florian Switala, M. Eng.
Xiaoya Wang, M. Eng.
Jana Wohlfahrt, B. Eng.

Datenstand:

Magdeburg, 30.09.2018

Inhalt

Impressum 3

1 Zusammenfassung 7

2 Verbrauchsauswertung 15
2.1 Messorte und Zählerschemen 15
2.2 Randdaten der Bilanz 15
2.3 Fernwärmeverbrauch 16
2.4 Stromverbrauch 19
2.5 Wasserverbrauch 22
2.6 Betrachtung der Schule mit Hort und Verwaltung 26
2.7 Betrachtung der Küche 28
2.8 Betrachtung der Hausmeisterwohnung 30

3 Bedarf nach Passivhausprojektierung 33
3.1 Ergebnisse der Nachweise 33
3.2 Hinweise zur Bilanzierung 37
3.3 Vergleich mit dem Verbrauch 38

4 Bedarf nach DIN V 18599 39
4.1 Ergebnisse der Nachweise 39
4.2 Hinweise zur Bilanzierung 43
4.3 Variationen der Detailtiefe 44
4.4 Vergleich mit dem Verbrauch 45

5 Ökologische Baustoffbilanz 47
5.1 Vorgehensweise 47
5.2 Gesamtergebnisse 50
5.3 Ergebnisse nach Gewerkegruppen 53
5.4 Massen und Volumina 56

6 Anhang 57
6.1 Literatur 57
6.2 Nomenklatur 58
6.3 Abbildungs- und Tabellenverzeichnis 59
6.4 Weitere Ergebnisse der Ökobilanzierung 61
6.5 Weitere Sankeydiagramme 66
6.6 Planer, Ausführende, Projektbeteilige 68
6.7 Überblick über separate Anhänge 68

1 Zusammenfassung

Der vorliegende Bericht wertet die Verbrauchswerte der St. Franziskus-Grundschule für Fernwärme, Strom sowie Wasser aus. Für die drei Jahre 2015 bis 2017 des Monitorings werden Sankeydiagramme (Energiefluss, Stoffströme) zur Veranschaulichung erstellt. Anhand von flächen- oder personenbezogenen Kennwerten wird das Gebäude bewertet.

Darüber hinaus werden die Ergebnisse der Bedarfsbilanzen – PHPP-Bilanzierung und EnEV-Nachweis – benannt und eingeordnet. Die Schwierigkeiten bei der Erstellung der Bedarfsbilanzen werden thematisiert.

Der letzte Abschnitt widmet sich der ökologischen Bilanzierung der eingesetzten Baustoffe, u. a. hinsichtlich des Primärenergieeinsatzes, Süßwasserverbrauchs und klimaschädlicher Emissionen. Die Kennwerte aus der Herstellungsphase des Gebäudes werden mit denen des Betriebs verglichen.

Fernwärmeverbrauch

Die Fernwärme versorgt in dem Gebäude im Wesentlichen die Luftheizanlagen. Ein Beitrag zur Trinkwassererwärmung durch Nachheizung des Solar-Pufferspeichers ist entgegen der ursprünglichen Planung nicht gegeben. Abbildung 1-1 zeigt beispielhaft den Energiefluss für die Fernwärme für das Jahr 2017.

Hauptabnehmer ist die Luftheizanlage für die Aula & Verwaltung mit Nachheizung für die Flure mit einem jährlichen Anteil von in Summe ca. 40 % des Gesamtverbrauchs. Auf die Küche entfallen knapp 10 %. Der Klassentrakt verbraucht etwas mehr als 25 %. Das restliche Viertel sind Verluste über das Rohrnetz (im Erdreich und im Gebäude).

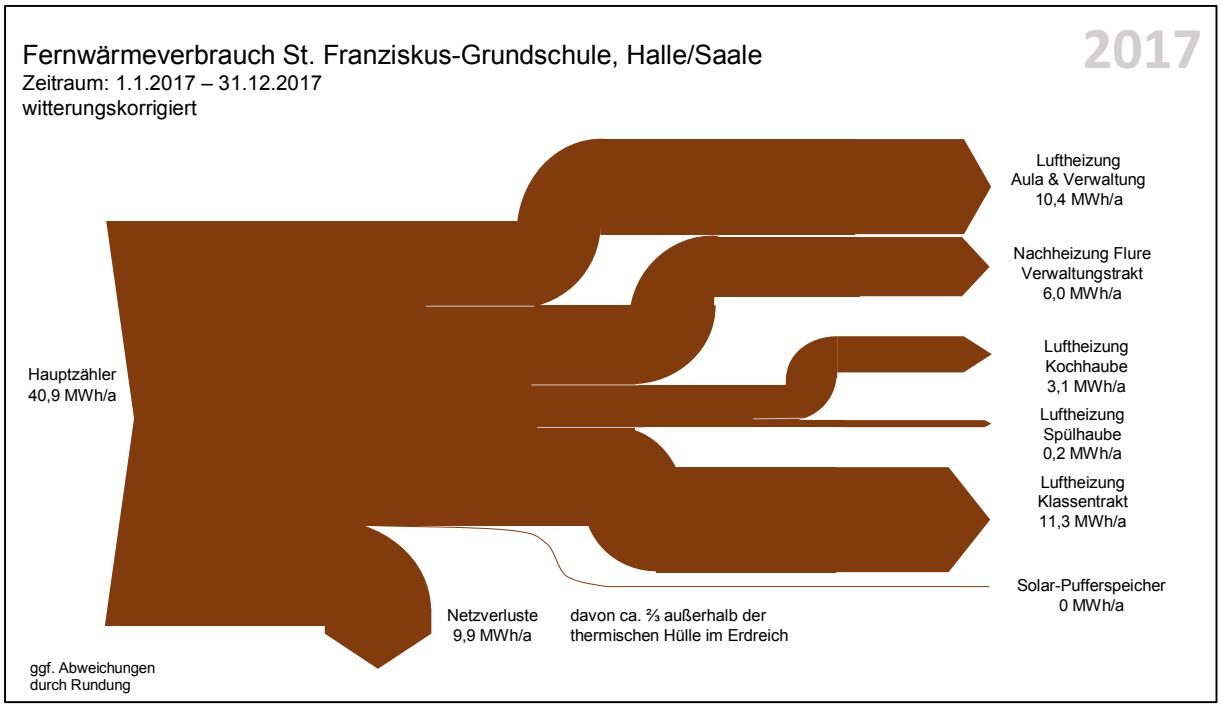


Abbildung 1-1: Sankeydiagramm witterungskorrigierter Fernwärmeverbrauch 2017

Es ergeben sich als Mittelwerte der drei Monitoringjahre 2015 bis 2017 Verbrauchskennwerte von 11,3 kWh/(m²a) bezogen auf die Gesamtfläche (3085,99 m²) bzw. bezogen auf die Fläche mit Fernwärmeversorgung (2973,47 m²) 11,7 kWh/(m²a).

Die VDI 3807 gibt Vergleichskennwerte an [1]. Der Mittelwert für den Heizenergieverbrauch von Grundschulen liegt bei 123 kWh/(m²a), ein Richtwert für Modernisierungen bei 73 kWh/(m²a). Die St. Franziskus-Grundschule schneidet im Bereich Wärme somit sehr gut ab. Der gemessene Verbrauchskennwert liegt unter 10 % des Wertes einer mittleren deutschen Grundschule.

Stromverbrauch

Ein Stromverbrauch ist in allen Zonen gegeben, in der Hausmeisterwohnung wird er auch zum Heizen genutzt. Abbildung 1-2 zeigt exemplarisch das Energieflussbild für 2017.

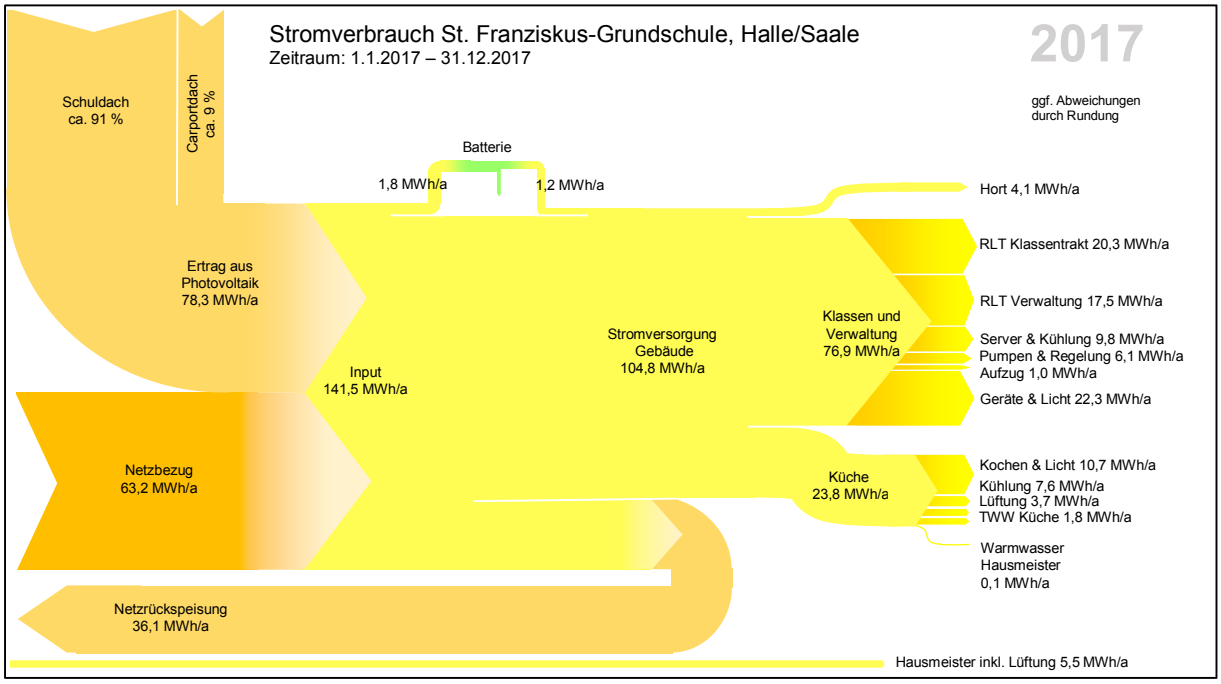


Abbildung 1-2: Sankeydiagramm Stromverbrauch 2017

Der Stromverbrauch für das Schulgebäude beläuft sich im Mittel der Messperiode 2015 bis 2017 auf 112,1 MWh/a (incl. Haumeisterwohnung). Davon werden knapp ⅔ aus dem Netz bezogen und ⅓ selbst produziert (Autarkiegrad). Die Photovoltaik-Anlage erzielt einen jährlichen Stromertrag von 78,9 MWh/a. Die Selbstnutzungsquote des erzeugten Stroms liegt bei 52 %. Der Rest wird ins Netz zurückgespeist. Bilanziell ergibt sich ein Nettostromverbrauch von 74,1 MWh/a (Strombezug aus dem Netz minus Rückspeisung in das Netz).

Hauptverbraucher ist der Klassentrakt mit etwa ⅔ des Verbrauchs. Die Schulküche verbraucht etwa 25 %, der Hausmeister in seiner Wohnung 5 %, der Hort liegt als kleinste Nutzungseinheit bei 4 %.

Es ergibt sich folgender Verbrauchskennwert ohne Berücksichtigung der Eigenproduktion als Mittelwert der Jahre 2015 bis 2017: 36,3 kWh/(m²a) (bezogen auf die Gesamtfläche 3085,99 m²). Wird die PV-Produktion abgezogen und voll gegen den Verbrauch angerechnet, ergibt sich bezogen auf die Gesamtfläche ein Kennwert von 10,8 kWh/(m²a).

Die VDI 3807 gibt Vergleichskennwerte an [1]. Der Mittelwert für den Stromverbrauch von Grundschulen liegt bei 10 kWh/(m²a), ein Richtwert für Modernisierungen bei 6 kWh/(m²a).

Die St. Franziskus-Grundschule schneidet im Bereich Strom – je nach Betrachtung – durchschnittlich bis schlecht ab. Der bilanzielle Kennwert (Verbrauch minus Produktion) ist vergleichbar mit dem durchschnittlichen Bestand.

Der eigentliche Verbrauch ist mehr als 3 Mal so hoch und ergibt sich aus der nicht durchschnittlichen Ausstattung mit Lüftungstechnik, Server, Küche etc. Mit einer weiteren Lüftungsoptimierung werden ab 2019 noch weitere Stromeinsparungen erwartet.

Wasserverbrauch

Abbildung 1-3 zeigt exemplarisch für die gesamte Monitoringphase das Flussbild für Wasser für 2017. Der Wasserverbrauch des gesamten Gebäudes beläuft sich auf 817 m³/a, wovon 75 % als Trinkwasser gekauft werden und 25 % als Regenwasser aufgefangen und als Brauchwasser für die WC-Anlagen genutzt werden.

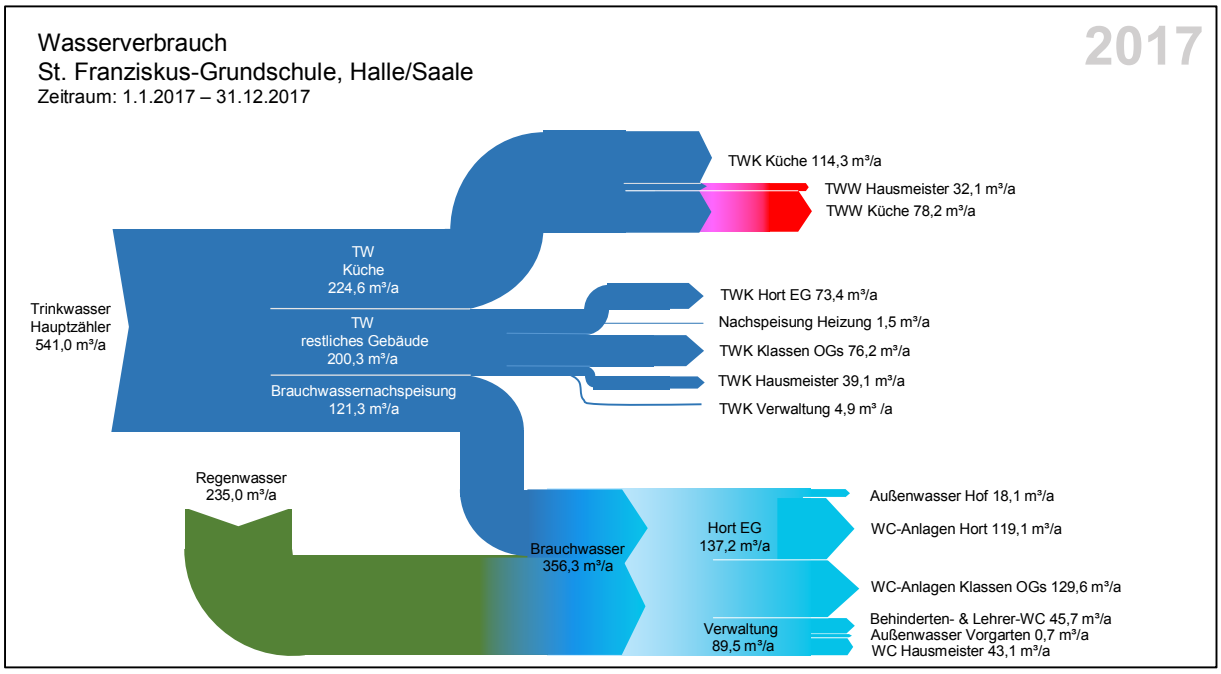


Abbildung 1-3: Sankeydiagramm Wasserverbrauch 2017

Es ergibt sich bezogen auf die gesamte Nettogrundfläche (3085,99 m²) als Mittelwert der drei Jahre 2015 bis 2017 ein Verbrauchskennwert von 265 l/(m²a). Klammert man das Regenwasser aus, sinkt der Kennwert auf 197 l/(m²a). Ohne Küche und Hausmeisterwohnung liegt der Verbrauchskennwert bei 158 l/(m²a).

Die VDI 3807 gibt Vergleichskennwerte an [1]. Der Mittelwert für den Wasserverbrauch von Grundschulen liegt bei 140 l/(m²a), ein Richtwert für Modernisierungen bei 81 l/(m²a). Die St. Franziskus-Grundschule schneidet im Bereich Wasser – je nach Betrachtung – durchschnittlich bis mittelmäßig ab.

Es wird davon ausgegangen, dass einerseits die Küche eine überdurchschnittliche Ausstattung für eine Schule ist, andererseits in Halle gleichzeitig eine überdurchschnittliche Nutzungsintensität (Hort, Ferienbetreuung) vorliegt. Es ist also nicht verwunderlich, dass der Wasserverbrauch bei fast dem Doppelten des Durchschnitts liegt. Auch der Wasserbezug vom Versorger liegt noch 40 % über dem Schnitt. Erst nach Bereinigung um Hausmeisterwohnung und Küche ergibt sich ein fast durchschnittlicher Wasserverbrauch des Schulgebäudes.

In der Hausmeisterwohnung wird personenbezogen mit 77 l/(Person · d) sehr wenig Wasser verbraucht.

Bedarf nach Passivhausprojektierung

Während der Projektlaufzeit wurde der Passivhausnachweis 2011 erstmalig erstellt und anschließend mehrfach aktualisiert. Die letzte Aktualisierung erfolgte am Ende der Monitoringphase 2018. Es kann festgestellt werden, dass die St. Franziskus-Grundschule in allen energetischen Bewertungskriterien dem Passivhausstandard entspricht, siehe Abbildung 1-4.

Es hat nach Wunsch der Bauherrin aber keine Zertifizierung des Gebäudes durch das Passivhaus Institut Darmstadt stattgefunden. Man entschied sich für ein Passivhaus-Zertifikat des Niedrig-Energie-Instituts Detmold.

Baujahr:	2014		Innentemperatur:	20,0	°C
Zahl WE:	1		Interne Wärmequellen:	3,5	W/m²
Umbautes Vol. V_e:	13307,6	m³	mittlere Geschosshöhe:	3,56	m
Personenzahl:	234,0				

Gebäudekennwerte mit Bezug auf Energiebezugsfläche und Jahr — verwendet: Monatsverfahren

				Anforderungen	Erfüllt?*
	Energiebezugsfläche	2615,1	m²		
Heizen	Heizwärmebedarf	**7,5**	**kWh/(m²a)**	15 kWh/(m²a)	**ja**
	Heizlast	**9,6**	**W/m²**	10 W/m²	**ja**
Kühlen	Kühlbedarf gesamt		**kWh/(m²a)**	-	**-**
	Kühllast		**W/m²**	-	**-**
	Übertemperaturhäufigkeit (> 25 °C)	0,0	%	-	**-**
Primärenergie	Heizen, Kühlen, Entfeuchten, WW, Hilfs- und Haushaltsstrom	**113**	**kWh/(m²a)**	120 kWh/(m²a)	**ja**
	WW, Heizung und Hilfsstrom	48	kWh/(m²a)	-	**-**
	PE-Einsparung durch solar erzeugten Strom	58	kWh/(m²a)	-	**-**
Luftdichtheit	Drucktest-Luftwechsel n_{50}	**0,26**	**1/h**	0,6 1/h	**ja**

* leeres Feld: Daten fehlen; '-': keine Anforderung

Passivhaus?	**ja**

Abbildung 1-4: Passivhausnachweis 2018

Zusammenfassend ist als Fazit der PHPP-Bilanzierung festzuhalten, dass insbesondere die Mischnutzung aus Wohn- und Nichtwohnbau die Berechnung unübersichtlicher machte. Auch einzelne Kennwerte der Wohnbauberechnung erwiesen sich als unpassend für eine Bilanzierung im Nichtwohnungsbau, z. B. zur Bewertung der Schulküche.

Die Freiheitsgrade bei der Berechnung sind sehr groß, so dass das Endergebnis sehr beliebig werden kann. Der Umfang der zu bilanzierenden elektrischen Geräte in einer Schule ist nicht eindeutig – zumal davon das Endergebnis entscheidend abhängt (Stichwort: Stromverbrauch für Regenwassernutzung, Sicherheitstechnik, Aufzug). Zudem ergeben sich aufgrund von Teilbenutzungsfaktoren (Beleuchtung. Lüftung, Geräte) sehr starke Varianzen beim Endergebnis.

Die finale Berechnung nach dem PHPP ergibt einen Fernwärmebedarf von 28,0 MWh/a sowie 111,3 MWh/a für Strom (ohne Berücksichtigung von Eigenstromerzeugung).

Der errechnete Fernwärmebedarf liegt bei nur 70 % des Messwertes von 39,4 MWh/a. Die Differenz wird kleiner, wenn eine entsprechend realistischere Innentemperatur von z. B. 23°C angesetzt wird (Bedarf dann 38,6 MWh/a). Der Stromkennwert ist fast eine Punktlandung – der Verbrauch beträgt 112,0 MWh/a. Die Randdaten der Bedarfsberechnung 2018 wurden möglichst realistisch gewählt, so dass dieses Ergebnis nicht überrascht.

Bedarf nach DIN V 18599

Die St. Franziskus-Grundschule wurde ebenfalls mehrfach nach der DIN V 18599 bewertet. Einerseits liegt der energetische Nachweis aus dem Bauantrag vor. Er wurde erneut nach Fertigstellung und bei Projektende erstellt. Darüber hinaus wurden Variantenberechnungen durchgeführt, um beispielsweise die Auswirkungen detaillierter oder vereinfachter Datenerhebung zu testen.

Es ist festzustellen, dass das Gebäude die EnEV 2009 einhält, die aufgrund des Bauantrags offiziell gilt. Auch die bei Projektende geltende EnEV 2016 wird immer noch deutlich erfüllt. Die Ergebnisse der Energiebedarfsberechnung sowie der Verbrauchseinschätzung des EnEV-Energieausweises 2018 zeigt Abbildung 1-5.

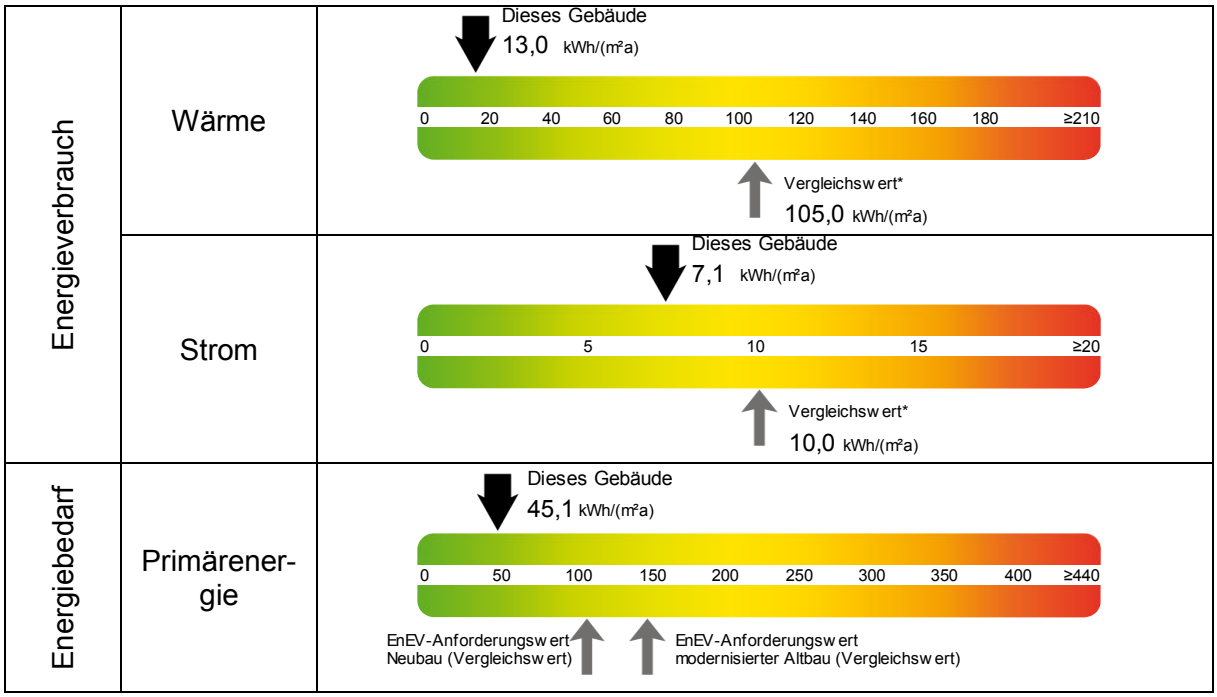


Abbildung 1-5: Ergebnisse des Energieausweises 2018

Die Randdaten der EnEV-Bedarfsberechnung 2018 führen zu einem Fernwärmebedarf von 80,2 MWh/a sowie einem Strombedarf von 122,8 MWh/a (ohne Eigennutzung von PV-Strom).

Der tatsächliche Fernwärmeverbrauch von 39,4 MWh/a wird um den Faktor 2 deutlich überschätzt. Die Detailuntersuchung zeigt, dass die Luftheizung insbesondere in der Küche (hoher Luftwechsel) sowie den Verkehrsflächen falsch berechnet wird. Sie liefert rechnerisch teils deutlich mehr Wärme an das Gebäude als es dem Heizwärmebedarf entspricht. Es ist dies eine Schwäche des Bilanzansatzes bei Gebäuden mit sehr gutem Standard, aber hoher Nutzungsintensität.

Hinsichtlich des Strombedarfs ergibt sich ein ähnliches Bild. Der bilanzierte Strombedarf ohne Berücksichtigung der PV-Produktion liegt in etwa bei dem Verbrauchswert von 112,0 MWh/a. Allerdings bilanziert die Norm keinen Anwendungsstrom (PCs, Medientechnik, Kühlschränke usw.), sondern nur TGA-Strom (Beleuchtung, Ventilatoren, Pumpen). Anhand der Detailauswertung der Strombilanz ergibt sich ein Anteil des gemessenen Stroms von ca. 72 MWh/a für die Verbraucher, welche in der DIN V 18599 bilanziert werden. Damit liegt der Bilanzwert um etwa den Faktor 1,7 über dem Messwert.

Die Erkenntnisse werden in die Normung zurückgespeist.

Ökologische Baustoffbilanz

Der Jahresenergieverbrauch bei der Gebäudenutzung ist nur ein Teil der im Lebenszyklus anfallenden Verbräuche. Darüber ergibt sich die in der Literatur oft als "graue Energie" benannte Energie für die Herstellung von Produkten, den Transport, die Lagerung und letztendlich die Entsorgung. Für die St. Franziskus-Grundschule wird im Rahmen der Ökobilanzierung nur der Herstellungsaufwand bestimmt.

Bilanziert wird das Gebäude mit den technischen Anlagen zur Energieerzeugung, -speicher und -verteilung innerhalb und außerhalb der thermischen Hülle. Die Baustoffdaten werden erhoben und mit geschätzten Lebensdauern ein anteiliger jährlicher Herstellungsaufwand ermittelt. Nicht bewertet werden aufgrund fehlender Bewertungsgrundlagen: die elektrischen Durchlauferhitzer, die Batteriespeicheranlage, die Regenwassernutzungsanlage (Zisterne und Zwischenspeicher), diverse Einbauten in die technischen Anlagen (Rauchmelder, Bewegungsmelder, Luftauslässe, Absperrarmaturen, Messfühler usw.). Darüber hinaus ist die mobile Innenausstattung (Tische, Schränke, PCs usw.) nicht Teil der Untersuchung.

Im Rahmen der Bilanzierung werden folgende Größen auf Basis der Kennwerte der ÖKOBAUDAT bestimmt:

- Sachbilanz
  - total erneuerbare Primärenergie (PERT)
  - total nicht erneuerbare Primärenergie (PENRT)
  - Einsatz von Süßwasserressourcen (FW)
- Wirkungsbilanz
  - Treibhauspotenzial (GWP)
  - Ozonabbaupotenzial (ODP)
  - Versauerungspotenzial (AP)
  - Eutrophierungspotenzial (EP)
  - Photooxidantienbildungspotenzial (POCP)

Tabelle 1-1: Ergebnisse der Ökobilanzierung mit Summen der Gewerkengruppen

Bauteile	Sachbilanz				Wirkungsabschätzung				
	Total Erneuerbare Primärenergie (PERT)	Total Nicht-erneuerbare Primärenergie (PENRT)	Totale Primärenergie (PE)	Einsatz von Süßwasserressourcen (FW)	Globales Erwärmungspotenzial (GWP)	Abbau Potenzial der stratosphärischen Ozonschicht (ODP)	Versauerungspotenzial von Boden und Wasser (AP)	Eutrophierungspotenzial (EP)	Bildungspotenzial für troposphärisches Ozon
	[MJ]	[MJ]	[MJ]	[m³]	[kg CO_2-Äqv]	[kg CFC11-Äqv]	[kg SO_2-Äqv]	[kg Phosphat-Äqv]	[kg Ethen-Äqv]
Summe	12.018.518	15.951.925	27.970.443	341.399	68.931	0,01069	3010,8	498,9	352,2
Aufteilung nach Gewerken									
Fundament und Außenhülle	5.698.024	5.391.261	11.089.285	151.675	-172.931	0,00585252	888,4	141,9	96,59
Innenausbau und Treppen	3.636.135	4.032.564	7.668.700	184.635	-34.946	0,00379973	805,3	101,0	97,37
Bodenbeläge und Wandfarben	2.038.026	2.164.637	4.202.663	3.322	37.032	0,00100786	467,5	187,0	49,09
Sanitärausstattung und Solarthermie	30.220	249.369	279.589	96	17.540	0,00000171	96,3	5,7	6,42
Lüftung, Heizung und Pumpen	125.962	2.403.860	2.529.822	505	109.193	0,00000445	329,8	29,2	46,78
Elektroausstattung, Beleuchtung und PV	490.150	1.710.235	2.200.385	1.167	113.043	0,00002441	423,6	34,1	56,24

Tabelle 1-1 zeigt die zusammengefassten Ergebnisse. Neben der Summenbildung sind Aufteilungen nach Gewerken erfolgt.

Aufgrund der installierten Massen bzw. Volumina führt die Gebäudehülle samt dem Innenausbau zum größten Energie- und Süßwasseraufwand. Bei den Wirkungsabschätzungen kehrt sich das Bild allerdings um. Das globale Erwärmungspotential ist bei den TGA-Anlagen aufgrund des hohen Metalleinsatzes am größten. Die Bodenbeläge und Wandfarben des Innenaufbaus haben unter den Gewerkegruppen das größte Eutrophierungspotential.

Die Erstellung des Gebäudes führt unter Beachtung der Lebensdauern der einzelnen Baustoffe und Bauteile zu einem gesamten Primärenergieeinsatz von 60,1 kWh/(m²a). Davon sind **35,0 kWh/(m²a)** nicht erneuerbar. Zum Vergleich: das Gebäude hat im Betrieb einen jährlichen Endenergieverbrauch von 22,1 kWh/(m²a) für Fernwärme und Strom, was einem Verbrauch an nicht erneuerbarer Primärenergie von **21,8 kWh/(m²a)** entspricht.

Im Vergleich ist festzustellen, dass der auf die Lebensdauer umgelegte Primärenergieeinsatz für die Erstellung des Gebäudes etwa 60 % oberhalb der Menge des laufenden Betriebs liegt. Wäre das Gebäude als Massivbau ohne Holz- und Zelluloseeinsatz als Massivbau erstellt worden, läge der Herstellungsaufwand noch weit deutlicher über dem des laufenden Verbrauchs.

Die Herstellung des Gebäudes ist zudem mit einem sehr großen Süßwasserverbrauch verbunden. Dabei fallen insbesondere Metalle, aber auch die Zellulosefasern als entscheidende Positionen auf. Die Bilanzierung führt zu einem auf die Zeit umgelegten Wassereinsatz von **6.646 m³/a**. Dem gegenüber steht ein Trinkwassereinsatz in der Nutzung von nur ca. **609 m³/a**. Damit ist die Nutzungsdauer für den Lebenszyklus nicht entscheidend. Dies bedeutet natürlich nicht, dass während der Nutzungszeit mit der Ressource Wasser verschwenderisch umgegangen werden soll. Jedoch zeigt es, dass die Produktionsprozesse für das Gebäude entscheidend sind.

Der Vorteil des Holzbaus sowie die Verwendung von teilweise recycelten Materialien zeigt sich am besten bei der Betrachtung der äquivalenten CO_2-Emissionen. Der auf die Lebensdauer umgelegten Menge aus der Gebäudeerstellung von **1,3 kg/(m²a)** stehen **7,9 kg/(m²a)** in der Nutzung gegenüber. Hier lässt sich in der Nutzungsphase noch deutliches Einsparpotential generieren, wenn der Strom ökologischer wird – egal ob Netzstrom oder selbst produzierter Strom. Darüber hinaus ist der sehr geringe Wärmeverbrauch des Gebäudes von Vorteil, am Strom könnte es noch Ersparnisse geben.

Fazit zum "Nullenergiestandard"

Eine einheitliche Definition des "Nullenergiestandards" gibt es nicht. Die Fachliteratur schwankt zwischen Betrachtungen von End- oder Primärenergie und ist sich ebenso uneinig, ob alle Stromverbraucher in die Betrachtung einbezogen werden oder der Nutzerstromverbrauch ausgeklammert wird.

Für die St. Franziskus-Grundschule sind folgende relevante Verbrauchskennwerte für die Endenergie gegeben, welche in Primärenergie umgerechnet werden können:

1. Stromproduktion: q_E = 25,5 kWh/(m²a) → mit f_P = 1,8: q_P = 45,9 kWh/(m²a)
2. Fernwärme q_E = 11,3 kWh/(m²a) → mit f_P = 0,21: q_P = 2,4 kWh/(m²a)
3. Stromverbrauch q_E = 36,3 kWh/(m²a) → mit f_P = 1,8: q_P = 65,3 kWh/(m²a)
4. Strom für TGA q_E = 22,9 kWh/(m²a) → mit f_P = 1,8: q_P = 41,2 kWh/(m²a)

Der gemessene Gesamtstromverbrauch wurde anhand der Strombedarfsbilanz aufgeteilt. Etwa 63 % des Stromeinsatzes fällt auf Anwendungen der Heizung, Lüftung, Beleuchtung, Trinkwassererwärmung und Kälte (siehe Abschlussbericht 10).

Anhand der Verbrauchswerte lässt sich folgendes erkennen: die St. Franziskus-Grundschule erreicht den anvisierten Standard "Nullenergie" nicht, wenn auf Endenergieebene q_E bilanziert wird und alle Endenergien berücksichtigt werden (1. minus 2. + 3.). Es fehlen 22,1 kWh/(m²a) bis zur "Nullenergielinie".

Wenn ausschließlich der TGA-Strom berücksichtigt wird und zudem eine Primärenergiebilanz erfolgt (q_P), wird der "Nullenergiestandard" erreicht. Es ergibt sich ein Überschuss von 2,3 kWh/(m²a) (1. minus 2. + 4.).

Die St. Franziskus-Grundschule liegt im guten Mittelfeld der EnEff:Schule Projekte [2].

In jedem Fall ist festzuhalten, dass der gewählte Standard – gegenüber dem üblichen Schulneubau oder gar dem Bestand – sehr energieeffizient ist. Betrachtet man die gewählten Baustoffe, gilt dieses umso mehr. Dass es Optimierungspotential v. a. im Bereich des Heizung- und Lüftungskonzeptes gibt, steht außer Frage. Eine optimale Schule könnte – mit überschaubaren Änderungen am Konzept – tatsächlich die "Nullenergie" erreichen.

2 Verbrauchsauswertung

Der nachfolgende Abschnitt wertet die Verbrauchswerte der St. Franziskus-Grundschule für Fernwärme, Strom, Solarthermie sowie Wasser aus. Für die drei Jahre 2015 bis 2017 des Monitorings werden Sankeydiagramme (Energiefluss, Stoffströme) zur Veranschaulichung erstellt. Anhand von flächen- oder personenbezogenen Kennwerten wird das Gebäude bewertet.

Die einzelnen Nutzeinheiten (Hausmeister, Küche, Klassen- und Verwaltungstrakt mit Hort) werden zusätzlich individuell betrachtet. Dazu dienen monatliche Darstellungen der Verbrauchswerte in den beiden Intensivmonitoringjahren 2016 und 2017.

2.1 Messorte und Zählerschemen

Im Abschlussbericht 4 zur Ausstattung des Gebäudes mit Messtechnik sind alle Zählerpositionen beschrieben sowie zwei Schemata zu finden, auf denen die Haupt- und Unterzählstellen erkennbar sind. Es wird an dieser Stelle auf eine Wiederholung verzichtet.

2.2 Randdaten der Bilanz

Für die Erstellung der Energiebilanzen – Bedarfs- oder Verbrauchsbilanzen – werden Flächen als Bezugsmaße benötigt. Eine detaillierte Übersicht ist im Abschlussbericht 2 zu finden. Abbildung 2-1 fasst die wichtigsten Nettogrundflächenangaben (NGF) zusammen.

Das Gebäude wird bei der Angabe überwiegend geteilt in die drei Bereiche: Hausmeisterwohnung (blau), Küche (grün) sowie Schule mit Hort und Verwaltung (Restflächen, gelb/orange).

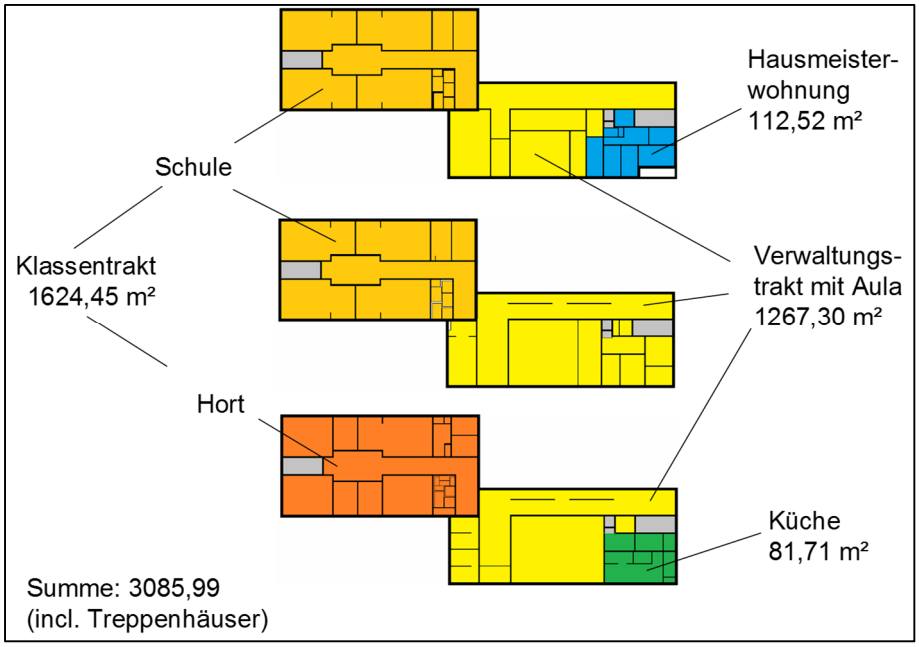


Abbildung 2-1: Flächenzusammenstellung NGF zur Kennwertbildung

Sofern für die Berechnung Wetterdaten benötigt werden, gelten folgende Datensätze:

- EnEV-Nachweis: Datensatz Mittelklima Potsdam (Referenzklima),
- Passivhausplanung: mittleres Wetter Deutschland,
- Verbrauchsauswertung: Wetterdaten für die Station "Leipzig/Schkeuditz" des DWD.

2.3 Fernwärmeverbrauch

Die Fernwärme versorgt in dem Gebäude im Wesentlichen die Luftheizanlagen. Der Beitrag zur Trinkwassererwärmung durch Nachheizung des Solar-Pufferspeichers ist entgegen der ursprünglichen Planung nicht gegeben.

Jährlicher Verbrauch als Sankeydiagramm

Abbildung 2-2 bis Abbildung 2-4 zeigen die Energieflussbilder für die Fernwärme für die Jahre 2015 bis 2017. Die Daten sind witterungskorrigiert. Die nicht witterungskorrigierten Werte sind im Anhang 6.5 zu finden.

Die Beschreibung der Messpunkte, ggf. vorhandener Datenlücken, Korrekturverfahren und Auswertevorgänge incl. Witterungskorrektur ist im Abschlussbericht 9 zur Heizung nachzulesen. An dieser Stelle folgt allein die Ergebnisdarstellung und Interpretation.

Zunächst ist im Vergleich der Jahre festzuhalten, dass der sehr geringe Verbrauch des Klassentraktes im Jahr 2015 auf eine falsche Programmierung der Lüftungsregelung zurückzuführen war. Nachdem dieses Problem behoben war, nahmen Nutzerbeschwerden über zu kalte Räume stark ab und die Energieflüsse zu. Die Darstellungen für 2016 und 2017 sind sich sehr ähnlich.

Hauptabnehmer ist die Luftheizanlage für die Aula & Verwaltung mit Nachheizung für die Flure mit einem jährlichen Anteil von in Summe ca. 40 % des Gesamtverbrauchs. Auf die Küche entfallen knapp 10 %. Der Klassentrakt verbraucht etwas mehr als 25 %. Das restliche Viertel sind Verluste über das Rohrnetz (im Erdreich und im Gebäude).

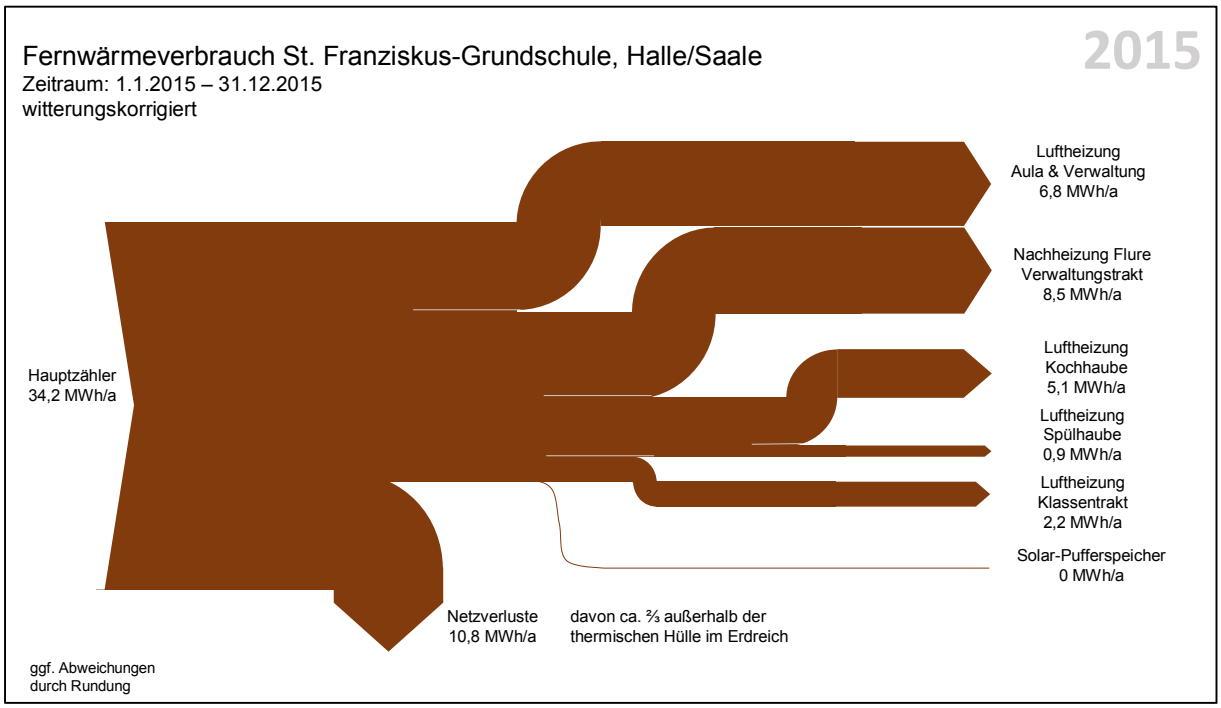


Abbildung 2-2: Sankeydiagramm witterungskorrigierter Fernwärmeverbrauch 2015

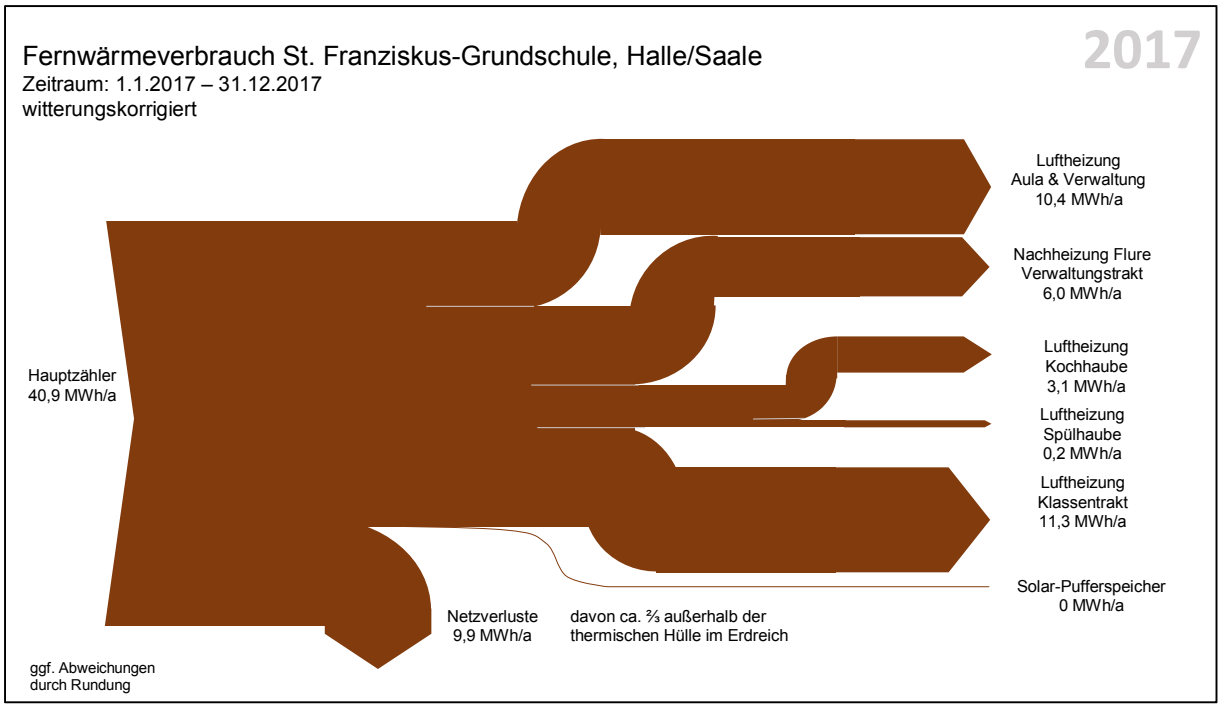


Abbildung 2-3: Sankeydiagramm witterungskorrigierter Fernwärmeverbrauch 2017

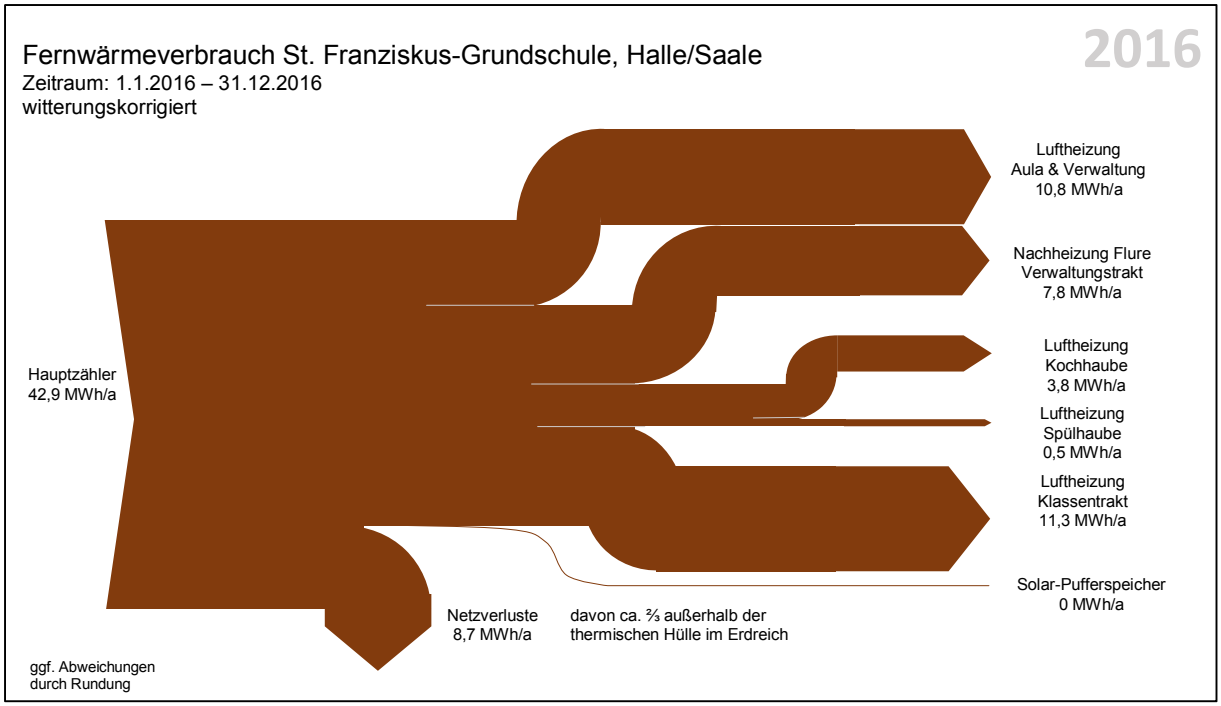


Abbildung 2-4: Sankeydiagramm witterungskorrigierter Fernwärmeverbrauch 2016

Es ergeben sich bezogen auf die Nettogrundfläche folgende Verbrauchskennwerte als Mittelwerte der drei Jahre:

- absolut: 34,77 MWh/a
- bezogen auf die Gesamtfläche (3085,99 m² NGF): 11,3 kWh/(m²a)
- bezogen auf die Fläche mit Fernwärmeversorgung (2973,47 m² NGF): 11,7 kWh/(m²a)

Die VDI 3807 gibt Vergleichskennwerte an [1]. Der Mittelwert für den Heizenergieverbrauch von Grundschulen liegt bei 123 kWh/(m²a), ein Richtwert für Modernisierungen bei 73 kWh/(m²a).

Die St. Franziskus-Grundschule schneidet im Bereich Wärme somit sehr gut ab. Der gemessene Verbrauchskennwert liegt unter 1/10 des Wertes einer mittleren deutschen Grundschule.

Monatlicher Verbrauch nach Nutzern

Abbildung 2-5 zeigt die monatlichen Energiemengen für die Hauptverbraucher in den Jahren 2016 und 2017. In den Übergangsmonaten benötigt nur die Küche Wärme, die beiden Hauptnutzungszonen haben nur etwa ein halbes Jahr Heizperiode. Der Netzverlust fällt immer an.

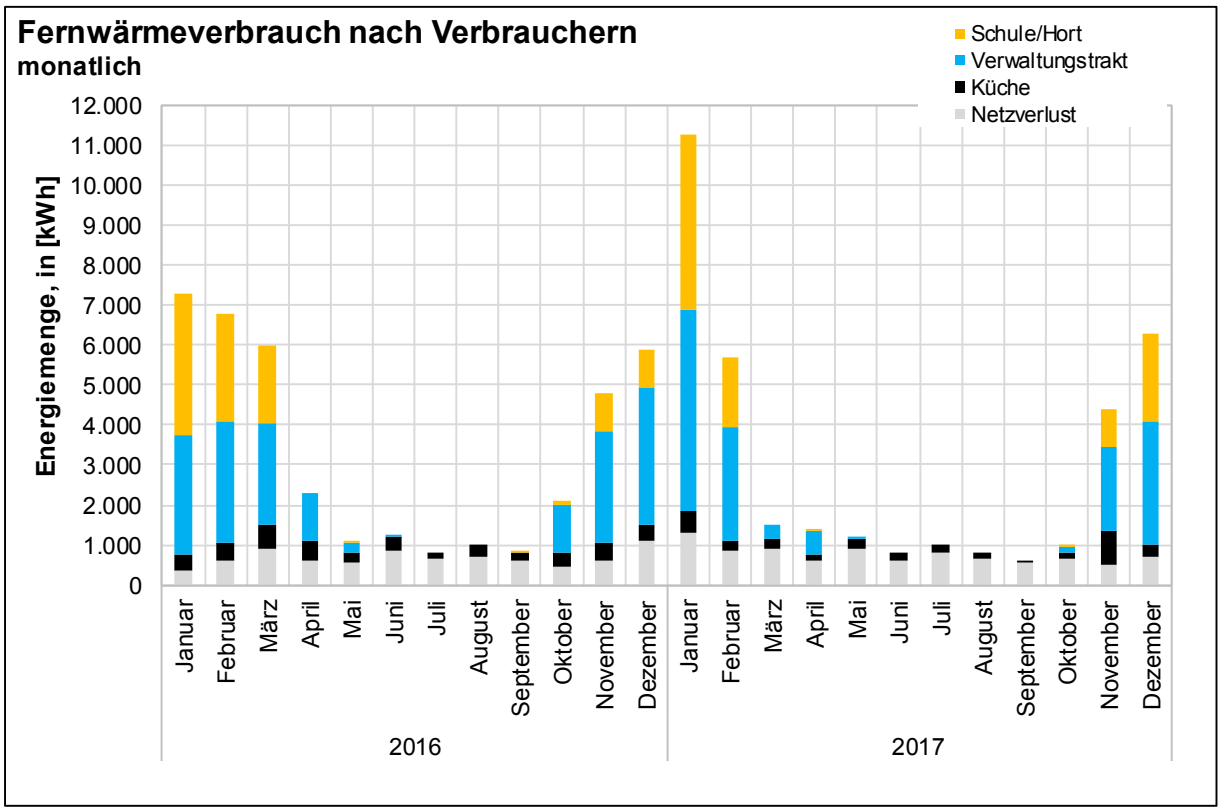


Abbildung 2-5: Monatlicher Fernwärmeverbrauch 2016/17 nach Nutzern

Es lässt sich für jeden Gebäudeteil ein Jahresverbrauch ermitteln und ein individueller Kennwert bilden:

- Schule/Hort (1624,45 m²)
  - absolut: 9,9 MWh/a
  - flächenbezogen: 6,1 kWh/(m²a)
- Verwaltung (1267,30 m²)
  - absolut: 15,8 MWh/a
  - flächenbezogen: 12,5 kWh/(m²a)
- Küche (81,71 m² NGF)
  - absolut: 3,8 MWh/a
  - flächenbezogen: 46,5 kWh/(m²a)
- Netzverlust in allen Zonen (2973,47 m²)
  - absolut: 8,6 MWh/a
  - flächenbezogen: 2,9 kWh/(m²a)

2.4 Stromverbrauch

Der Stromverbrauch betrifft alle Zonen, in der Hausmeisterwohnung wird er auch zum Heizen genutzt.

Jährlicher Verbrauch als Sankeydiagramm

Abbildung 2-6 bis Abbildung 2-8 zeigen die Energieflussbilder für den Strom für die Jahre 2015 bis 2017. Die Daten der Hausmeisterwohnung (teilweise Heizung) sind wegen der offensichtlichen Geringfügigkeit nicht witterungskorrigiert.

Die Beschreibung der Messpunkte, ggf. vorhandener Datenlücken, Korrekturverfahren und Auswertevorgänge ist im Abschlussbericht 10 zur Strombilanzierung nachzulesen. An dieser Stelle folgt allein die Ergebnisdarstellung und Interpretation.

Zunächst ist im Vergleich der Jahre festzuhalten, dass die Energieflüsse insgesamt ähnlich ausfallen. Das erste Jahr zeigt einen leicht höheren Verbrauch des Gebäudes.

Der Stromverbrauch für das Schulgebäude beläuft sich im Mittel auf 112,1 MWh/a (incl. Hausmeisterwohnung). Davon werden knapp ⅔ aus dem Netz bezogen und ⅓ selbst produziert (Autarkiegrad). Die Photovoltaik-Anlage erzielt einen jährlichen Stromertrag von 78,9 MWh/a. Die Selbstnutzungsquote des erzeugten Stroms liegt bei 52 %. Der Rest wird ins Netz zurückgespeist. Bilanziell ergibt sich ein Nettostromverbrauch von 74,1 MWh/a (Strombezug aus dem Netz minus Rückspeisung in das Netz).

Hauptverbraucher ist der Klassentrakt mit etwa ⅔ des Verbrauchs. Die Schulküche verbraucht etwa 25 %, der Hausmeister in seiner Wohnung 5 %, der Hort liegt als kleinste Nutzungseinheit bei 4 %.

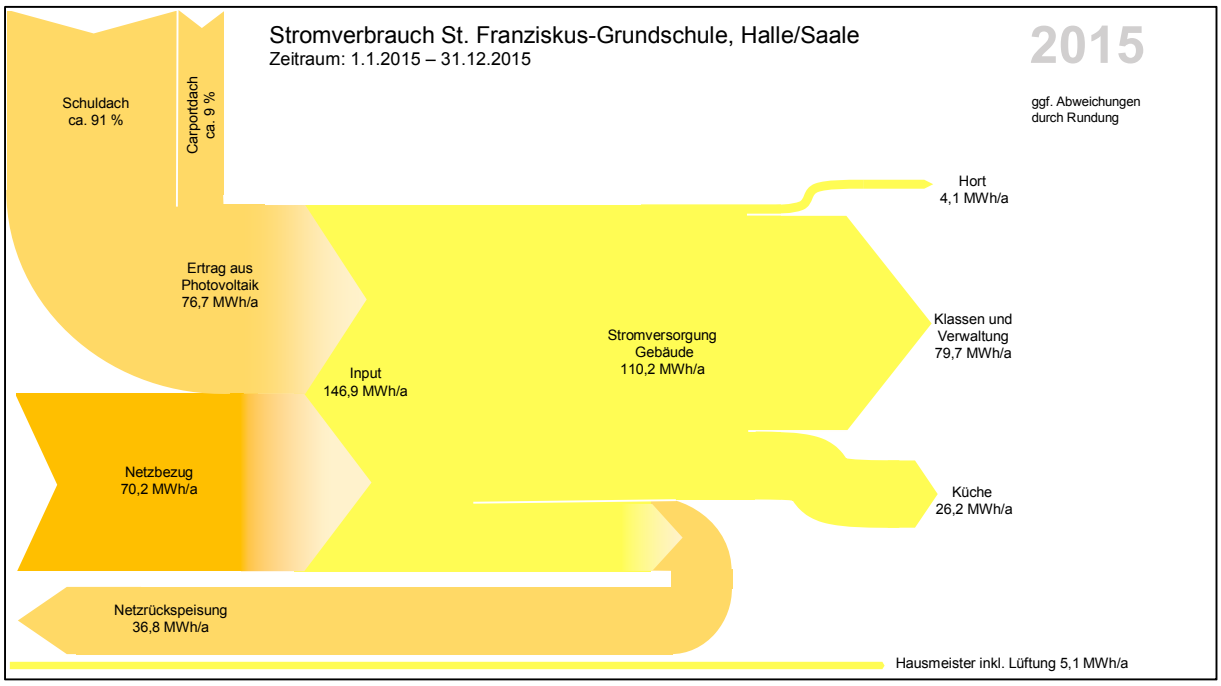


Abbildung 2-6: Sankeydiagramm Stromverbrauch 2015

Es ergeben sich bezogen auf die Nettogrundfläche folgende Verbrauchskennwerte ohne Berücksichtigung der Eigenproduktion als Mittelwerte der drei Jahre:

- absolut: 112,1 MWh/a
- bezogen auf die Gesamtfläche (3085,99 m² NGF): 36,3 kWh/(m²a)

Wird die PV-Produktion abgezogen und voll gegen den Verbrauch angerechnet, ergibt sich folgendes Bild:

- absolut: 33,3 MWh/a
- bezogen auf die Gesamtfläche (3085,99 m² NGF): 10,8 kWh/(m²a)

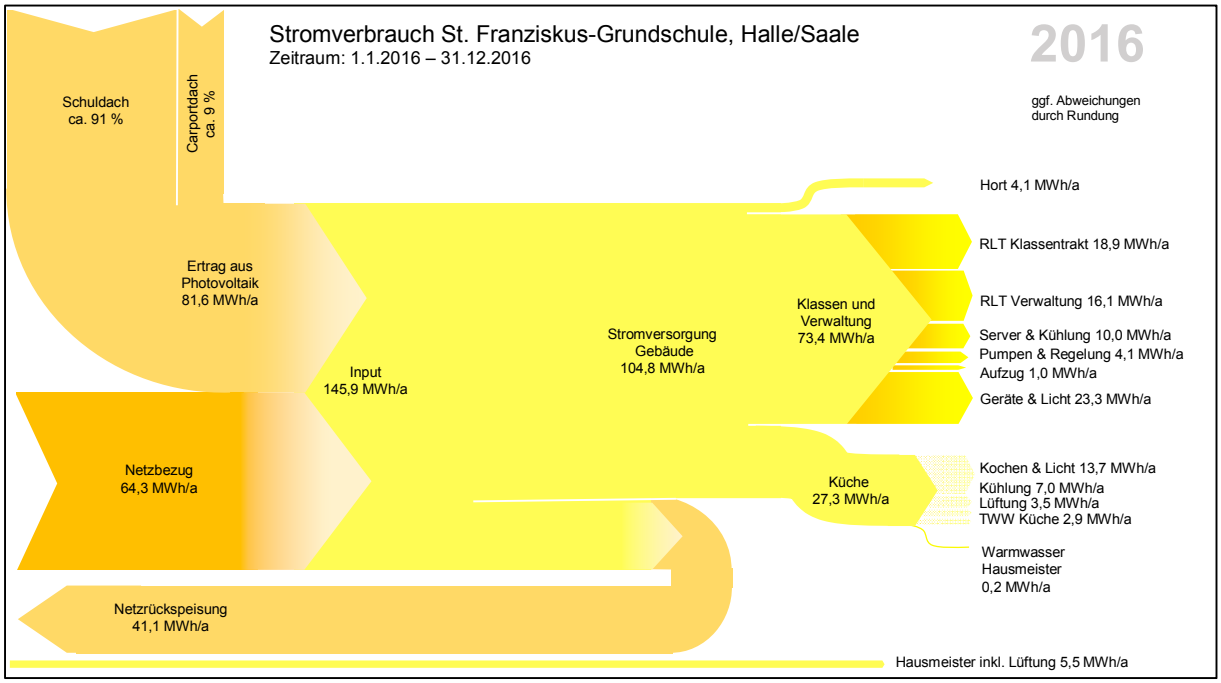


Abbildung 2-7: Sankeydiagramm Stromverbrauch 2016

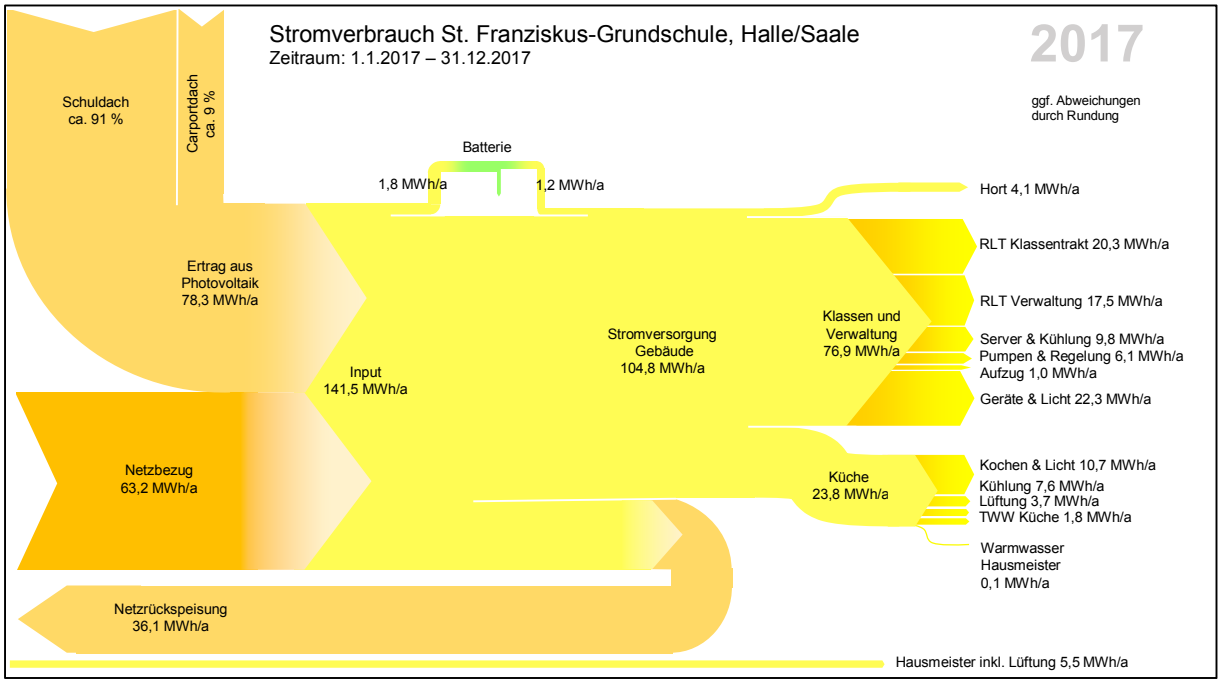


Abbildung 2-8: Sankeydiagramm Stromverbrauch 2017

Die VDI 3807 gibt Vergleichskennwerte an [1]. Der Mittelwert für den Stromverbrauch von Grundschulen liegt bei 10 kWh/(m²a), ein Richtwert für Modernisierungen bei 6 kWh/(m²a).

Die St. Franziskus-Grundschule schneidet im Bereich Strom – je nach Betrachtung – durchschnittlich bis schlecht ab. Der bilanzielle Kennwert (Verbrauch minus Produktion) ist vergleichbar mit dem durchschnittlichen Bestand.

Der eigentliche Verbrauch ist mehr als 3 Mal so hoch und ergibt sich aus der nicht durchschnittlichen Ausstattung mit Lüftungstechnik, Server, Küche etc.

Mit einer weiteren Lüftungsoptimierung werden noch weitere Stromeinsparungen erwartet.

Monatlicher Verbrauch nach Nutzern

Abbildung 2-9 zeigt die monatlichen Energiemengen für die Hauptverbraucher in den Jahren 2016 und 2017. Bis auf die deutlich erkennbaren Ferien ist der Verbrauch wenig von der Witterung abhängig.

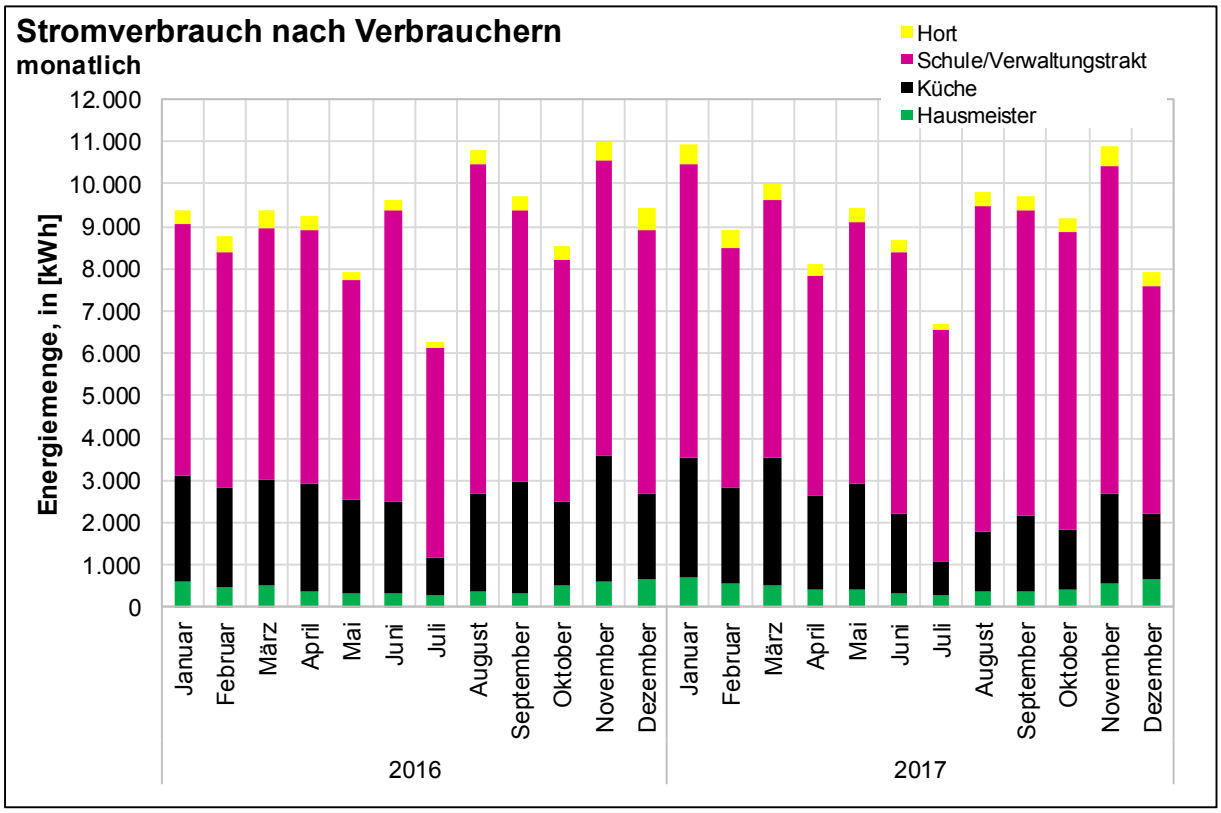


Abbildung 2-9: Monatlicher Stromverbrauch 2016/17 nach Nutzern

Es lässt sich für jeden Gebäudeteil ein Jahresverbrauch ermitteln und ein individueller Kennwert bilden:

- Schule und Verwaltungstrakt (2412,3 m²)
  - absolut: 75,1 MWh/a
  - flächenbezogen: 31,1 kWh/(m²a)
- Hort (479,45 m²)
  - absolut: 4,1 MWh/a
  - flächenbezogen: 8,5 kWh/(m²a)
- Hausmeisterwohnung (112,53 m²)
  - absolut: 5,4 MWh/a
  - flächenbezogen: 48,1 kWh/(m²a)
- Küche (81,71 m² NGF)
  - absolut: 25,5 MWh/a
  - flächenbezogen: 312,7 kWh/(m²a)

Die Küche sticht nutzungsbedingt aus den Kennwerten hervor. Im Hort fällt kein Lüftungsanlagenstrom an, da dieser im Klassentrakt enthalten ist. Die Hausmeisterwohnung ist sehr positiv einzuschätzen, denn der Kennwert enthält alle Energieaufwendungen.

2.5 Wasserverbrauch

Jährlicher Verbrauch als Sankeydiagramm

Abbildung 2-10 bis Abbildung 2-12 zeigen die Flussbilder für Wasser für die Jahre 2015 bis 2017. Die Beschreibung der Messpunkte, ggf. vorhandener Datenlücken, Korrekturverfahren und Auswertevorgänge incl. Witterungskorrektur ist im Abschlussbericht 12 nachzulesen. An dieser Stelle folgt allein die Ergebnisdarstellung und Interpretation.

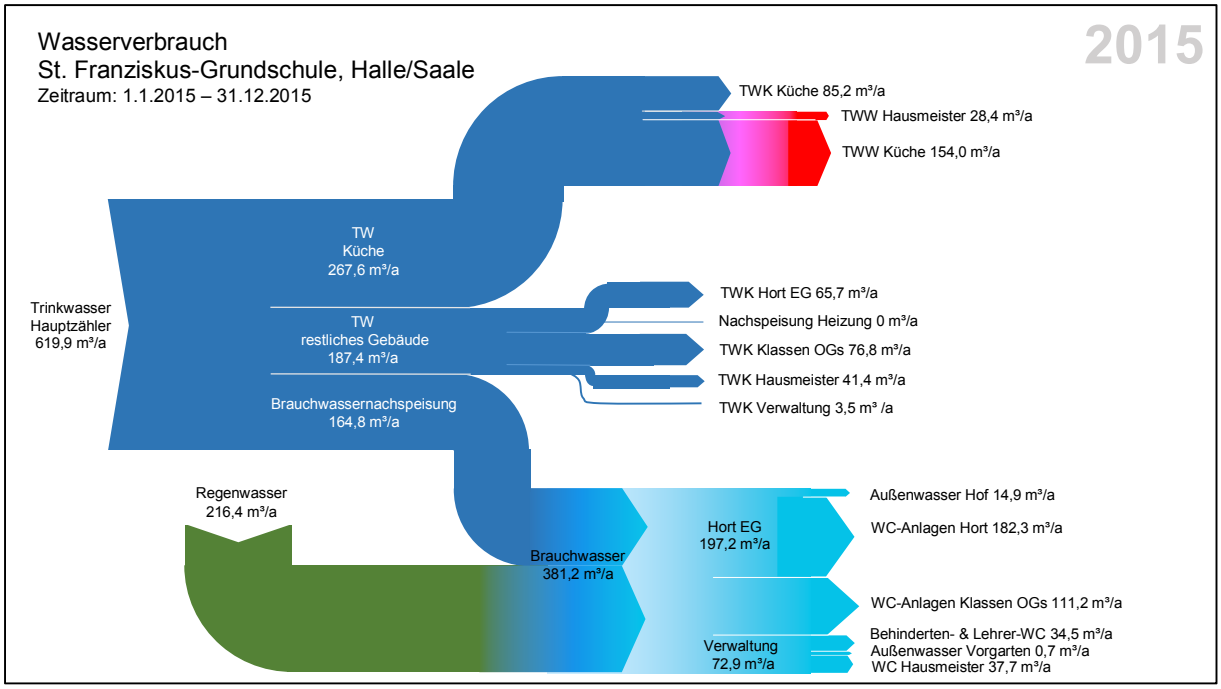


Abbildung 2-10: Sankeydiagramm Wasserverbrauch 2015

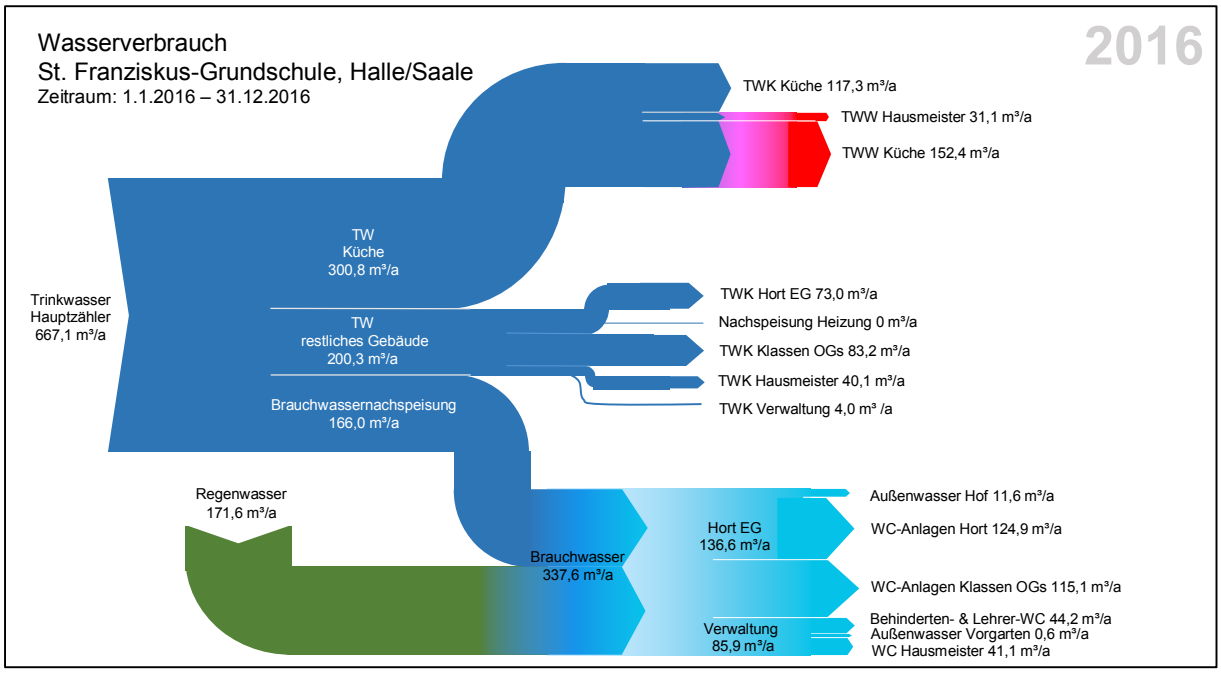


Abbildung 2-11: Sankeydiagramm Wasserverbrauch 2016

Zunächst ist im Vergleich der Jahre festzuhalten, dass zum einen die Küche im Jahr 2016 einen Betreiberwechsel zu verzeichnen hat, der zu einer großen Wassereinsparung führte. Darüber hinaus war im Jahr 2016 die Regenwassernutzung mehrere Monate außer Betrieb, was zu einer geringeren Regenwassernutzung führte.

Der Wasserverbrauch des gesamten Gebäudes beläuft sich auf 817 m³/a, wovon 75 % als Trinkwasser gekauft werden und 25 % als Regenwasser aufgefangen und als Brauchwasser für die WC-Anlagen genutzt werden.

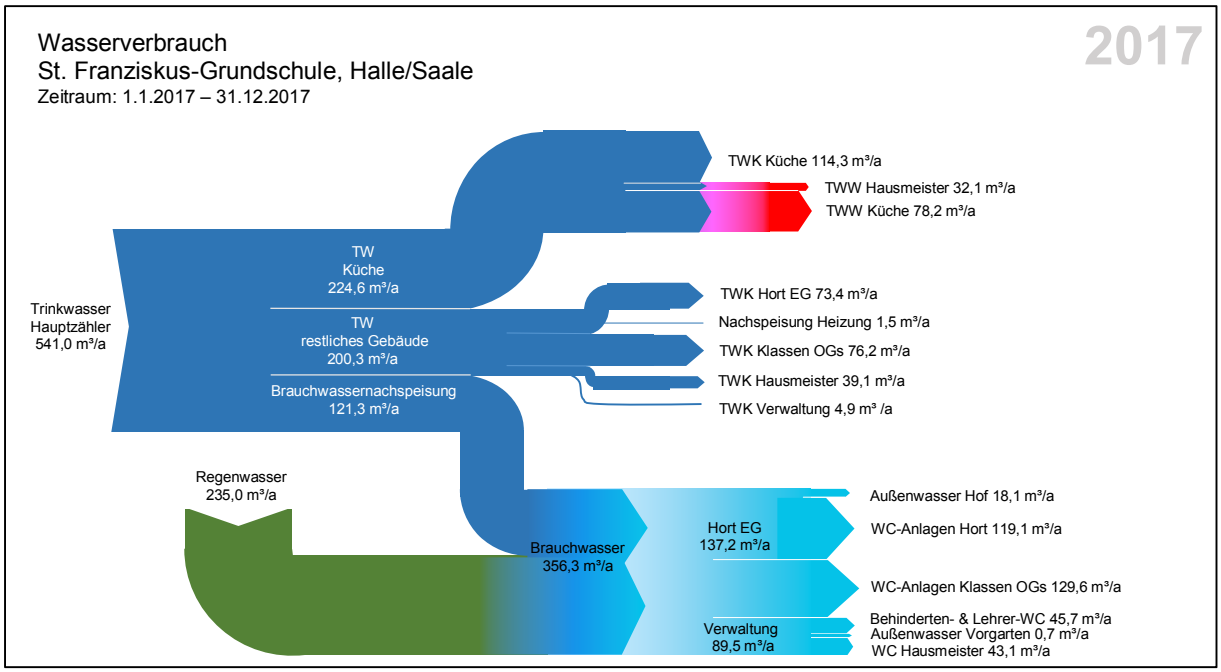


Abbildung 2-12: Sankeydiagramm Wasserverbrauch 2017

Es ergeben sich bezogen auf die Nettogrundfläche folgende Verbrauchskennwerte als Mittelwerte der drei Jahre:

- absolut: 817,0 MWh/a
- bezogen auf die Gesamtfläche (3085,99 m² NGF): 265 l/(m²a)

Klammert man das Regenwasser aus, sieht die Bilanz wie folgt aus:

- absolut: 609,3 MWh/a
- bezogen auf die Gesamtfläche (3085,99 m² NGF): 197 l/(m²a)

Die VDI 3807 gibt Vergleichskennwerte an [1]. Der Mittelwert für den Wasserverbrauch von Grundschulen liegt bei 140 l/(m²a), ein Richtwert für Modernisierungen bei 81 l/(m²a). Die St. Franziskus-Grundschule schneidet im Bereich Wasser – je nach Betrachtung – eher mittelmäßig ab. Der Wasserverbrauch liegt bei fast dem Doppelten des Durchschnitts. Auch der Wasserbezug vom Versorger liegt noch 40 % über dem Schnitt.

Es wird davon ausgegangen, dass einerseits die Küche eine überdurchschnittliche Ausstattung für eine Schule ist, andererseits in Halle gleichzeitig eine überdurchschnittliche Nutzungsintensität (Hort, Ferienbetreuung) vorliegt.

Monatlicher Verbrauch nach Nutzern

Abbildung 2-13 zeigt die monatlichen Wassermengen für die Hauptverbraucher in den Jahren 2016 und 2017. Die Ferien sowie der Betreiberwechsel für die Küche ab August 2017 sind gut erkennbar. Abbildung 2-14 zeigt die Auswertung des Brauchwassers.

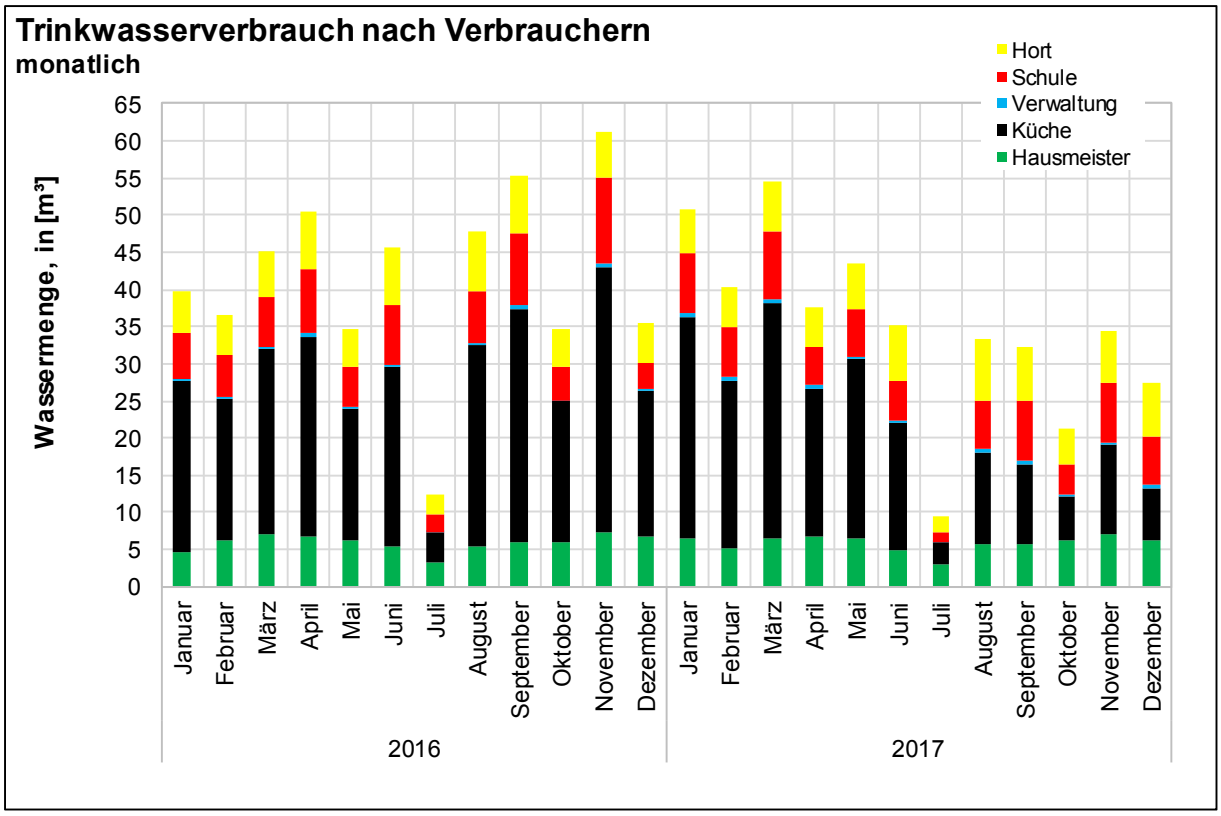


Abbildung 2-13: Monatlicher Trinkwasserverbrauch 2016/17 nach Nutzern

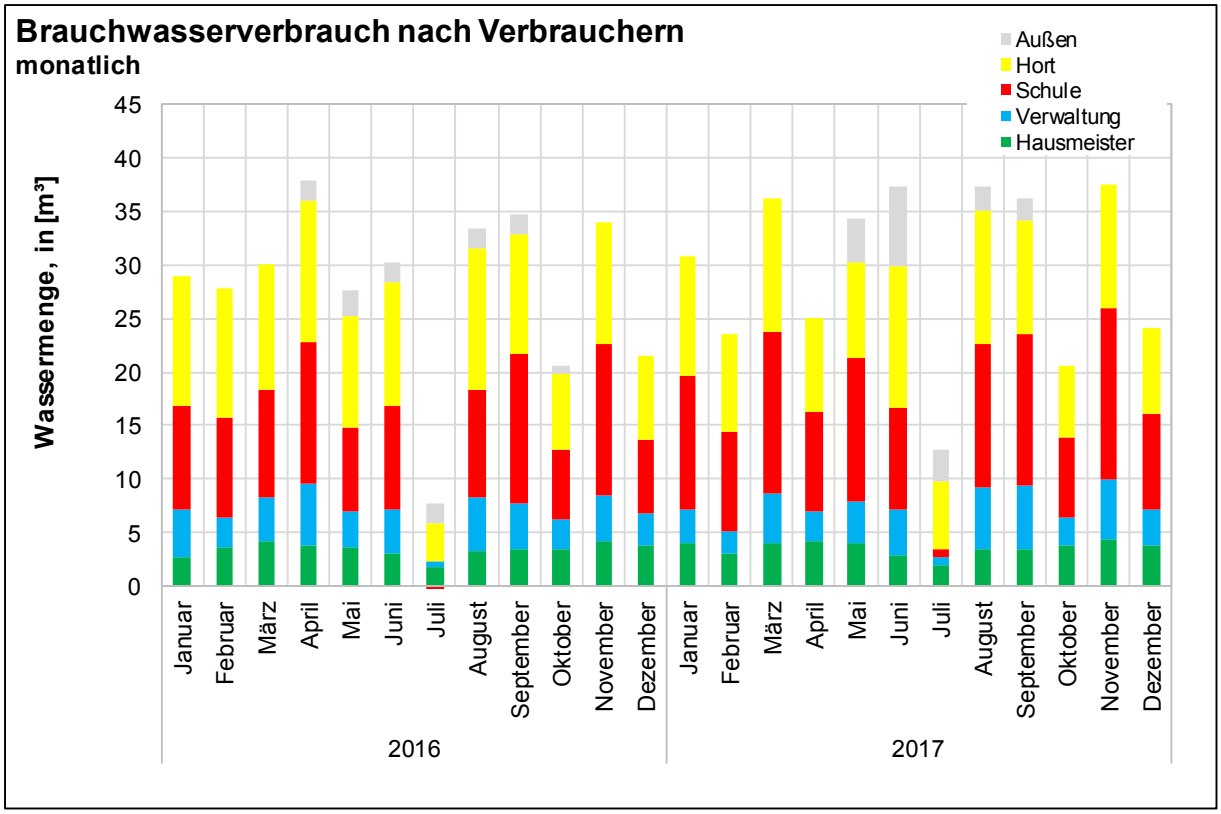


Abbildung 2-14: Monatlicher Brauchwasserverbrauch 2016/17 nach Nutzern

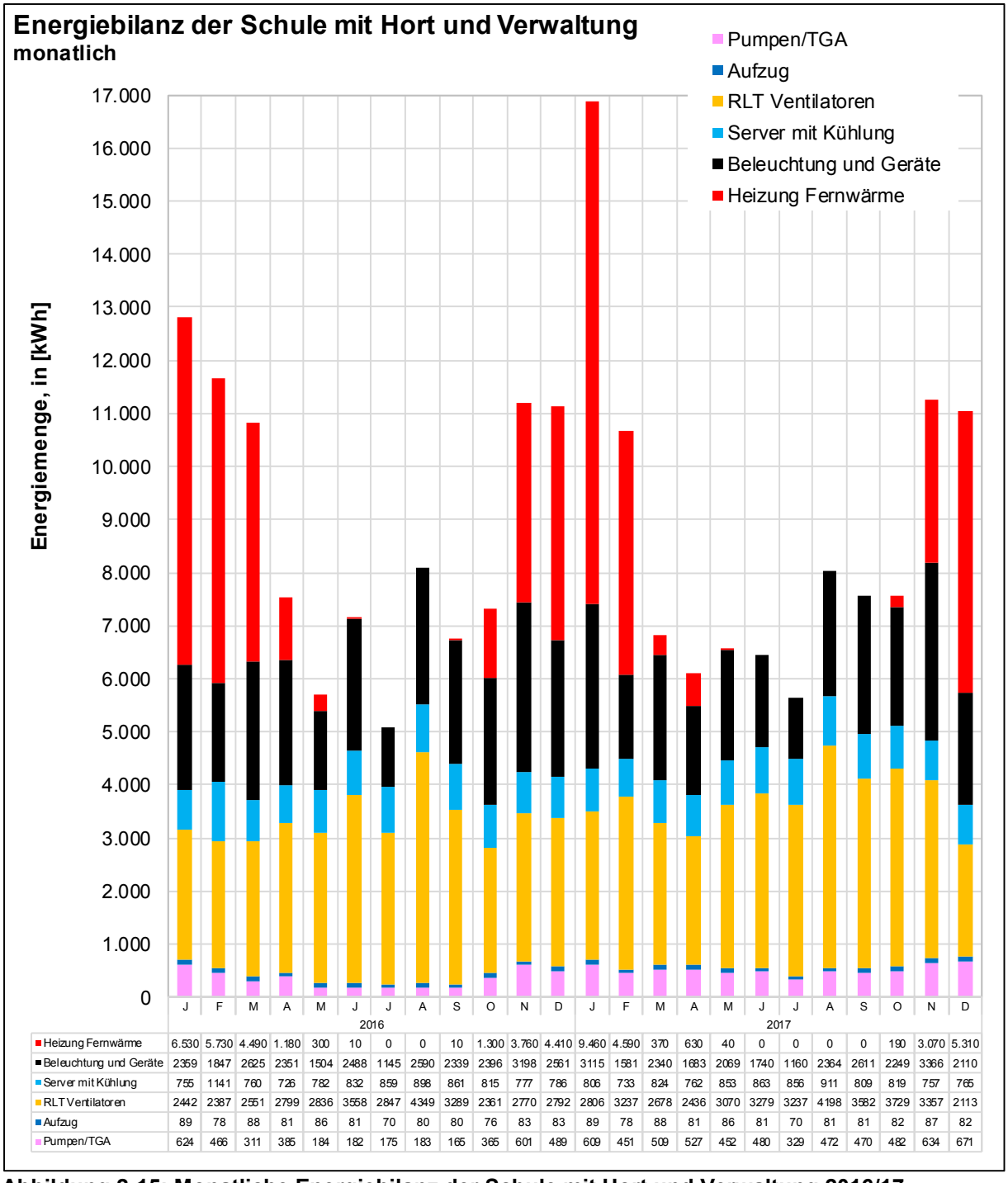
Es lässt sich für jeden Gebäudeteil ein Jahresverbrauch ermitteln und ein individueller Kennwert bilden:

- Küche (81,71 m² NGF)
    - absolut: 234,4 m³/a
    - flächenbezogen: 2869 l/(m²a)
- Hausmeister (112,53 m² NGF)
    - absolut: 70,6 + 42,1 = 112,7 m³/a (TW + BW)
    - flächenbezogen: 628 + 374 = 1002 l/(m²a)
    - personenbezogen: 48 + 29 = 77 l/(Person · d)
- Schule mit Hort und Verwaltung (2891,75 m²)
    - absolut: 155,0 + 302,8 = 457,7 m³/a
    - flächenbezogen: 54 + 105 = 158 l/(m²a)

Nach Bereinigung des Kennwertes um die Küche und Hausmeisterwohnung ergibt sich mit 158 l/(m²a) ein fast durchschnittlicher Wasserverbrauch des Schulgebäudes. In der Hausmeisterwohnung wird personenbezogen sehr wenig Wasser verbraucht.

2.6 Betrachtung der Schule mit Hort und Verwaltung

Abbildung 2-15 und Abbildung 2-16 zeigen die monatlichen Bilanzen für Energie (Strom plus Fernwärme) und Wasser (Trinkwasser und Brauchwasser) der 2891,75 m² großen Schule incl. Hort und Verwaltung.

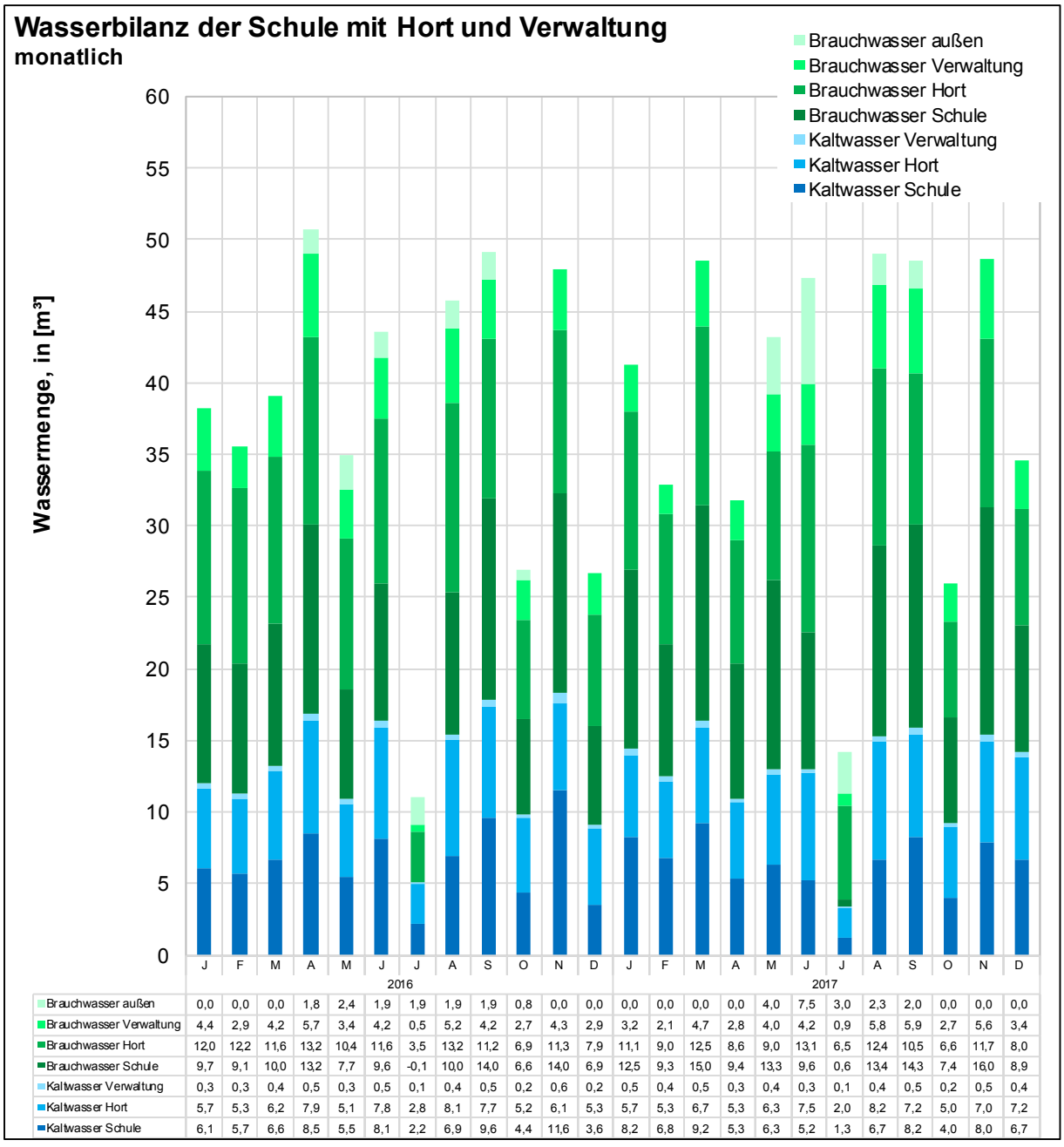


	J 2016	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J 2017	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Heizung Fernwärme	6.530	5.730	4.490	1.180	300	10	0	0	10	1.300	3.760	4.410	9.460	4.590	370	630	40	0	0	0	0	190	3.070	5.310
Beleuchtung und Geräte	2359	1847	2625	2351	1504	2488	1145	2590	2339	2396	3198	2561	3115	1581	2340	1683	2069	1740	1160	2364	2611	2249	3366	2110
Server mit Kühlung	755	1141	760	726	782	832	859	898	861	815	777	786	806	733	824	762	853	863	856	911	809	819	757	765
RLT Ventilatoren	2442	2387	2551	2799	2836	3558	2847	4349	3289	2361	2770	2792	2806	3237	2678	2436	3070	3279	3237	4198	3582	3729	3357	2113
Aufzug	89	78	88	81	86	81	70	80	80	76	83	83	89	78	88	81	86	81	70	81	81	82	87	82
Pumpen/TGA	624	466	311	385	184	182	175	183	165	365	601	489	609	451	509	527	452	480	329	472	470	482	634	671

Abbildung 2-15: Monatliche Energiebilanz der Schule mit Hort und Verwaltung 2016/17

25 % des gesamten Energieeinsatzes werden in Form von Strom für den Betrieb der Lüftungsanlagen verwendet. Der Jahresverlauf ist relativ konstant – im Sommer wegen der Nachtlüftung etwas höher. Für Heizung werden 18 % Energie als Fernwärme aufgewendet – mit deutlichem Jahresgang.

Die sonstigen Stromanwendungen sind: der Aufzug mit 1 % der Energie, der Server mit Kühlung verbraucht 7 % sowie die Pumpen 3 %. Die Gerätenutzung und Beleuchtung benötigt 18 % der Jahresenergiezufuhr.



	J 2016	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J 2017	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Brauchwasser außen	0,0	0,0	0,0	1,8	2,4	1,9	1,9	1,9	1,9	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,0	7,5	3,0	2,3	2,0	0,0	0,0	0,0
Brauchwasser Verwaltung	4,4	2,9	4,2	5,7	3,4	4,2	0,5	5,2	4,2	2,7	4,3	2,9	3,2	2,1	4,7	2,8	4,0	4,2	0,9	5,8	5,9	2,7	5,6	3,4
Brauchwasser Hort	12,0	12,2	11,6	13,2	10,4	11,6	3,5	13,2	11,2	6,9	11,3	7,9	11,1	9,0	12,5	8,6	9,0	13,1	6,5	12,4	10,5	6,6	11,7	8,0
Brauchwasser Schule	9,7	9,1	10,0	13,2	7,7	9,6	-0,1	10,0	14,0	6,6	14,0	6,9	12,5	9,3	15,0	9,4	13,3	9,6	0,6	13,4	14,3	7,4	16,0	8,9
Kaltwasser Verwaltung	0,3	0,3	0,4	0,5	0,3	0,5	0,1	0,4	0,5	0,2	0,6	0,2	0,5	0,4	0,5	0,3	0,4	0,3	0,1	0,4	0,5	0,2	0,5	0,4
Kaltwasser Hort	5,7	5,3	6,2	7,9	5,1	7,8	2,8	8,1	7,7	5,2	6,1	5,3	5,7	5,3	6,7	5,3	6,3	7,5	2,0	8,2	7,2	5,0	7,0	7,2
Kaltwasser Schule	6,1	5,7	6,6	8,5	5,5	8,1	2,2	6,9	9,6	4,4	11,6	3,6	8,2	6,8	9,2	5,3	6,3	5,2	1,3	6,7	8,2	4,0	8,0	6,7

Abbildung 2-16: Monatliche Wasserbilanz der Schule mit Hort und Verwaltung 2016/17

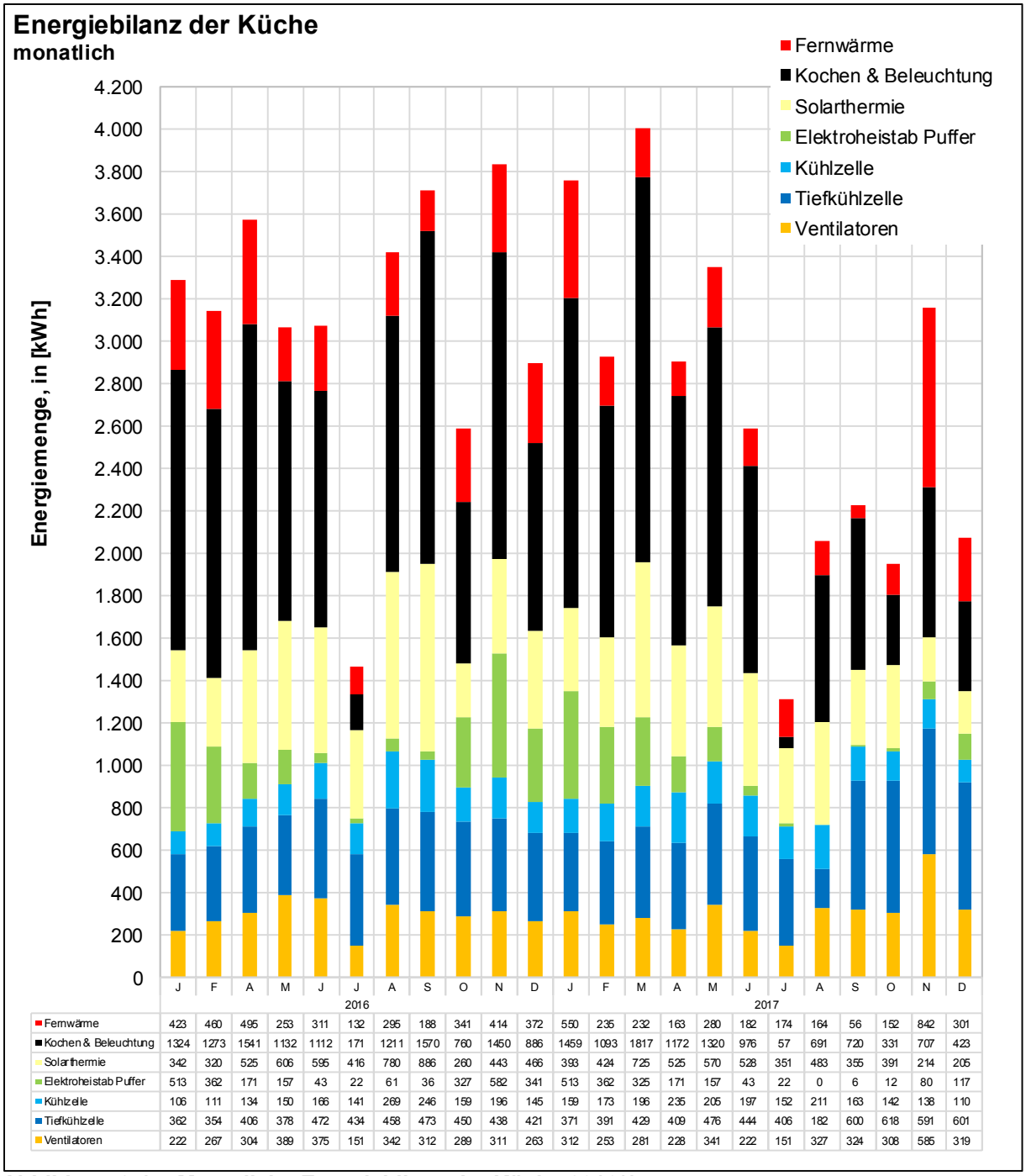
Die Kaltwassermengen betragen 34 % des Wasserverbrauchs, der Rest ist Brauchwasser (welches auch in Teilen aus Kaltwasser besteht, siehe Abschlussbericht 12) für die WCs und die Außenbewässerung.

Der Verwaltungstrakt mit dem Behinderten-WC, dem Sanitärraum für das Verwaltungspersonal sowie die Teeküche machen nur 11 % des Gesamtverbrauchs aus. 3 % werden als Brauchwasser eingesetzt. Der Rest wird im Klassentrakt mit Hort verbraucht.

Alle Ferienzeiten sind deutlich erkennbar.

2.7 *Betrachtung der Küche*

Abbildung 2-17 und Abbildung 2-18 zeigen die monatlichen Bilanzen für Energie (Strom, Solarwärme und Fernwärme) und Wasser (warmes und kaltes Trinkwasser) der 81,71 m² großen Schulküche.



	J	F	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
	2016											2017											
Fernwärme	423	460	495	253	311	132	295	188	341	414	372	550	235	232	163	280	182	174	164	56	152	842	301
Kochen & Beleuchtung	1324	1273	1541	1132	1112	171	1211	1570	760	1450	886	1459	1093	1817	1172	1320	976	57	691	720	331	707	423
Solarthermie	342	320	525	606	595	416	780	886	260	443	466	393	424	725	525	570	528	351	483	355	391	214	205
Elektroheistab Puffer	513	362	171	157	43	22	61	36	327	582	341	513	362	325	171	157	43	22	0	6	12	80	117
Kühlzelle	106	111	134	150	166	141	269	246	159	196	145	159	173	196	235	205	197	152	211	163	142	138	110
Tiefkühlzelle	362	354	406	378	472	434	458	473	450	438	421	371	391	429	409	476	444	406	182	600	618	591	601
Ventilatoren	222	267	304	389	375	151	342	312	289	311	263	312	253	281	228	341	222	151	327	324	308	585	319

Abbildung 2-17: Monatliche Energiebilanz der Küche 2016/17

11 % der gesamten Energiezufuhr in die Küche stammen aus Solarthermie und weisen einen deutlichen Jahresgang auf. Ebenso wie die 7 % Nachheizung für den Pufferspeicher.

Die 16 % Heizenergie auf Fernwärme ist deutlich weniger witterungsabhängig als zu vermuten wäre. Es ist festzustellen, dass die Lüftungsanlage im Winter weniger betrieben wird als im Sommer. Das zeigt sich auch an den Ventilatorstromaufwendungen (10 % des Energieeinsatzes).

Die Küchenanwendungen machen 21 % (Kühlung) sowie 35 % (Kochen und Beleuchtung) aus. Sie werden über Strom gedeckt.

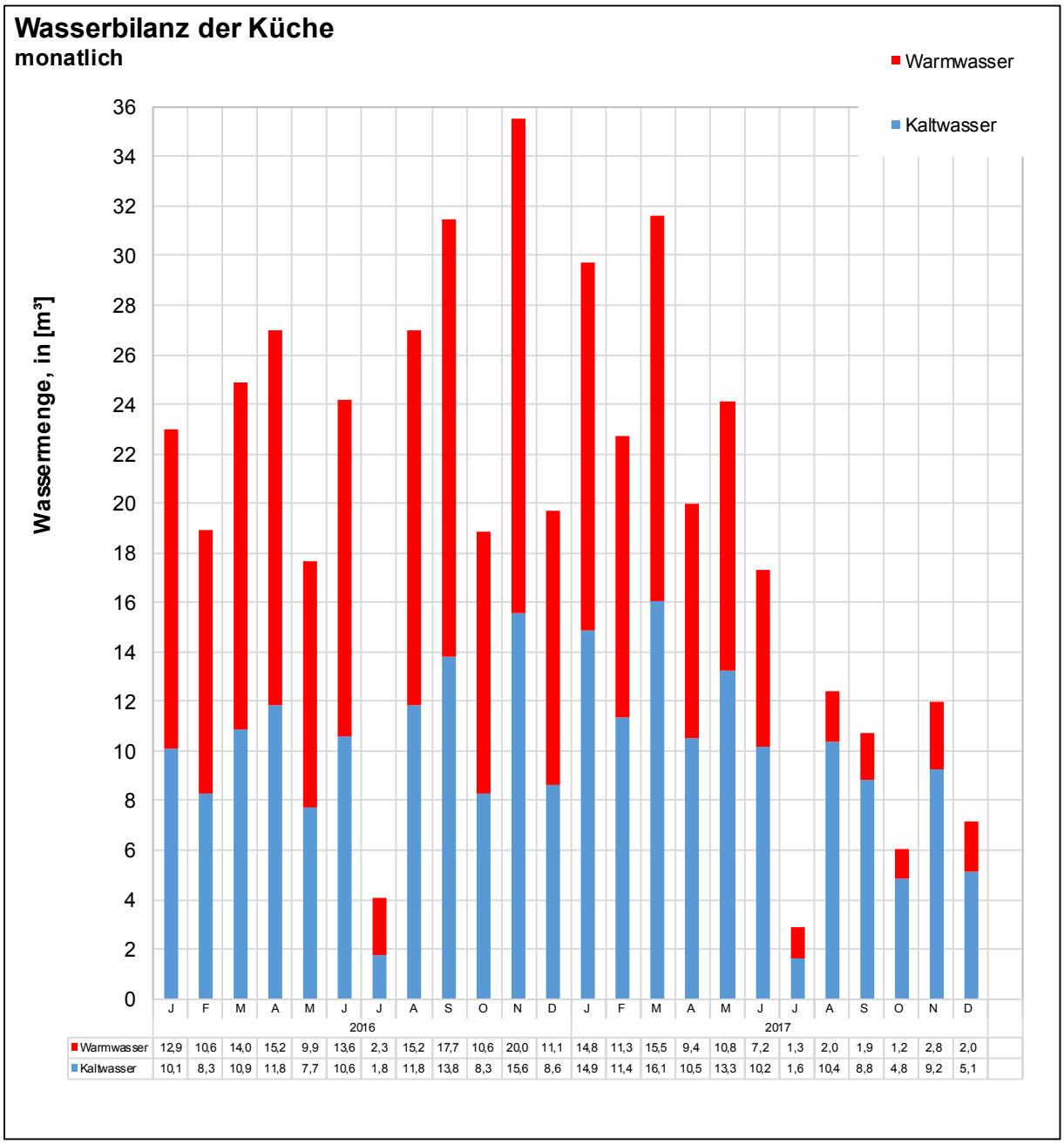


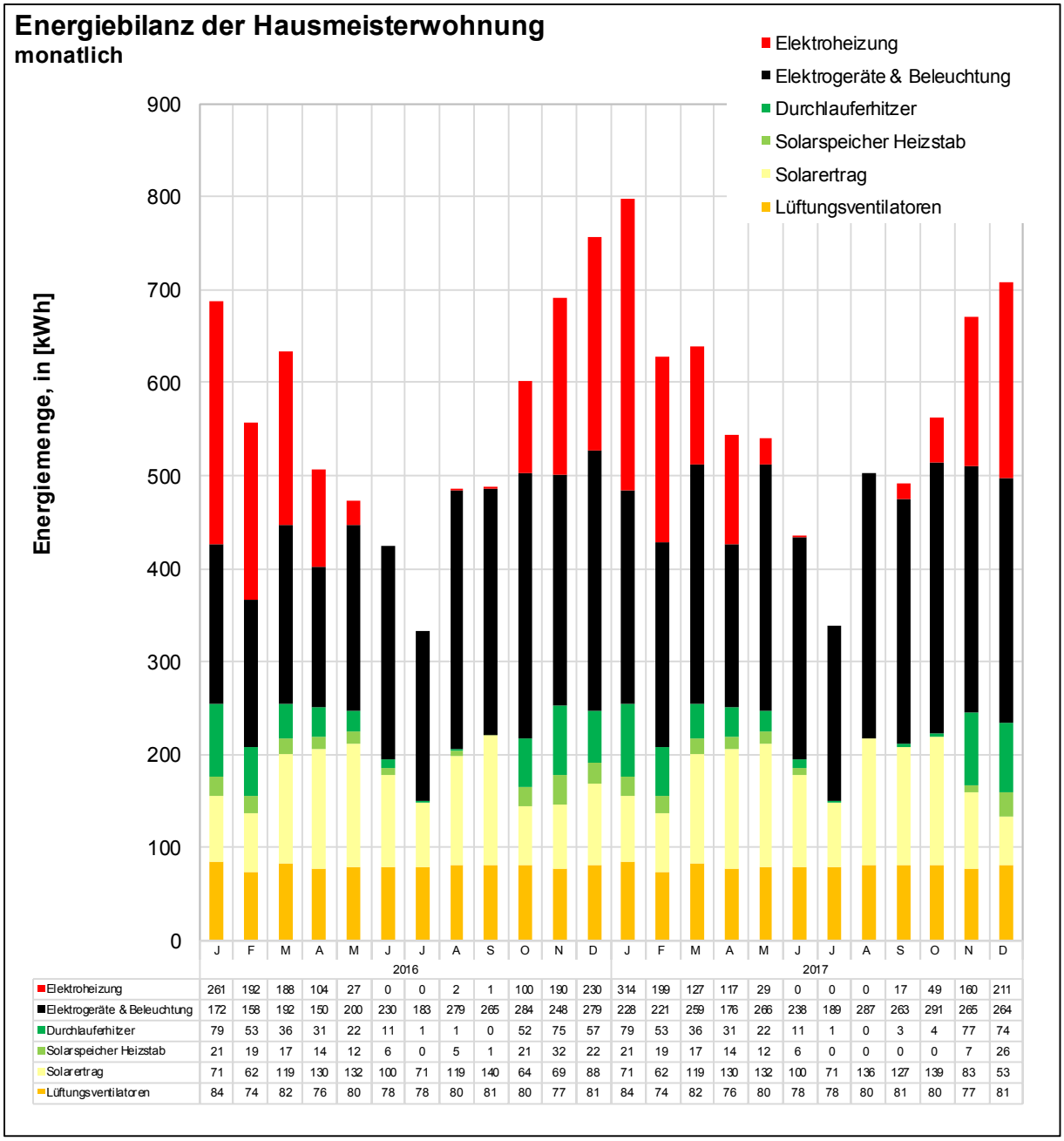
Abbildung 2-18: Monatliche Wasserbilanz der Küche 2016/17

Im Mittel der gesamten Messperiode 2016/17 wird in der Küche 50 % Warm- und 50 % Kaltwasser verbraucht. Allerdings sind die Verhältnisse bis Sommer 2017 deutlich anders als mit dem neuen Betreiber danach.

Während der erste Betreiber 47 % Kaltwasser und 53 % Warmwasser verbrauchte, ist es später eine Verteilung von 80 % Kaltwasser und 20 % Warmwasser. Darüber hinaus wird deutlich weniger verbraucht.

2.8 Betrachtung der Hausmeisterwohnung

Abbildung 2-19 und Abbildung 2-20 zeigen die monatlichen Bilanzen für Energie (Strom und Solarwärme) und Wasser (warmes und kaltes Trinkwasser sowie Brauchwasser) der 112,53 m² großen Hausmeisterwohnung.



	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
	2016												2017											
Elektroheizung	261	192	188	104	27	0	0	2	1	100	190	230	314	199	127	117	29	0	0	0	17	49	160	211
Elektrogeräte & Beleuchtung	172	158	192	150	200	230	183	279	265	284	248	279	228	221	259	176	266	238	189	287	263	291	265	264
Durchlauferhitzer	79	53	36	31	22	11	1	1	0	52	75	57	79	53	36	31	22	11	1	0	3	4	77	74
Solarspeicher Heizstab	21	19	17	14	12	6	0	5	1	21	32	22	21	19	17	14	12	6	0	0	0	0	7	26
Solarertrag	71	62	119	130	132	100	71	119	140	64	69	88	71	62	119	130	130	132	100	71	136	127	139	83	53
Lüftungsventilatoren	84	74	82	76	80	78	78	80	81	80	77	81	84	74	82	76	80	78	78	80	81	80	77	81

Abbildung 2-19: Monatliche Energiebilanz der Hausmeisterwohnung 2016/17

Die Jahresgänge der Heizenergie und Solarthermie sind gut erkennbar. Insgesamt wird der Verbrauch von 6,7 MWh/a zu 18 % von Solarenergie deckt. 8 % des Energieeinsatzes werden in Form von Strom der Trinkwassererwärmung zugeführt. Diese macht also insgesamt 26 % des Gesamtverbrauchs aus. 14 % der eingesetzten Energiemengen versorgen die Lüftungsanlage, 19 % die Heizung (beides Strom). Der Rest (41 %) ist Stromeinsatz für Geräte und Beleuchtung.

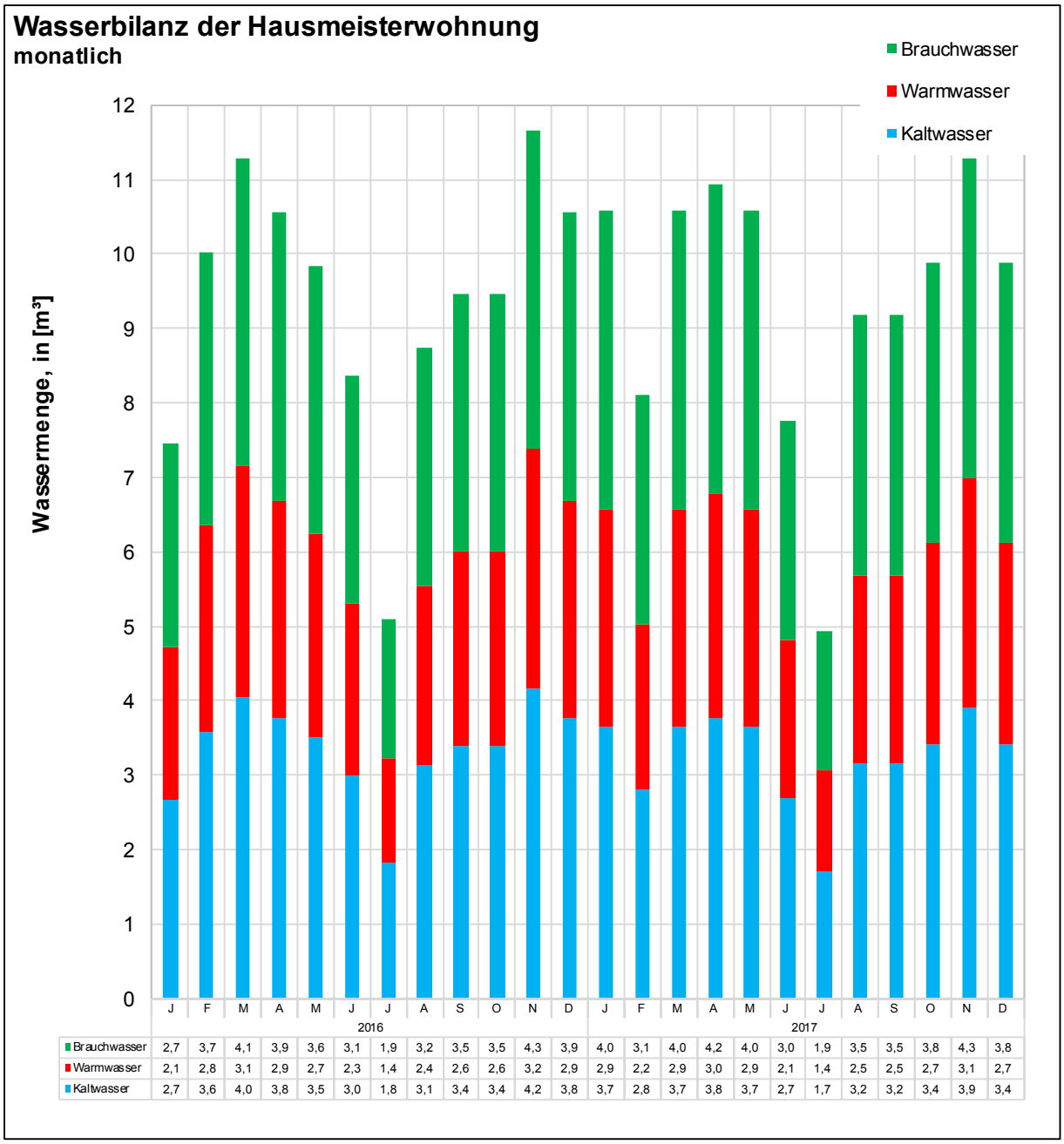


Abbildung 2-20: Monatliche Wasserbilanz der Hausmeisterwohnung 2016/17

Die Urlaubszeiten sind in der Monatsbilanz gut erkennbar. Etwa 35 % des Wasserverbrauchs werden als kaltes Trinkwasser genutzt, 28 % erwärmt. Die restlichen 37 % sind Brauchwasser der Toiletten.

3 Bedarf nach Passivhausprojektierung

Während der Projektlaufzeit wurde der Passivhausnachweis zunächst erstellt und anschließend mehrfach aktualisiert. Nachfolgend werden die einzelnen Schritte kurz dokumentiert, wesentliche Änderungen gegenüber der Vorversion erläutert sowie relevante Fehlannahmen benannt.

Da keine tatsächliche Zertifizierung des Gebäudes durch das Passivhaus Institut Darmstadt stattgefunden hat, wurde für alle Berechnungen unverändert mit die Version 7.1 des PHPP verwendet.

Als Fazit vorab kann festgestellt werden: die St. Franziskus-Grundschule entspricht in allen energetischen Bewertungskriterien dem Passivhausstandard. Eine weitere Überprüfung der verwendeten Produkte hinsichtlich vorhandener oder möglicher Zertifizierung hat nicht stattgefunden.

3.1 Ergebnisse der Nachweise

Die Ergebnisse aller Versionen sind in Tabelle 3-1 zusammengefasst. Die ausführlichen Ergebnisse sind im separaten Anhang B zu finden.

Tabelle 3-1: Ergebnisse des Passivhausnachweises

Größe	Formelzeichen	Einheit	Bauantrag [3]	Inbetriebnahme [4]	Monitoring [5]	Final
Nutzung						
Personen	P	-	230	230	230	234
Geometrie						
Energiebezugsfläche	A_{EB}	m²	3171,5	2616,2	2918,1	2615,1
Hüllfläche	A_H	m²	4716,67	4673,79	4673,79	4673,79
umbautes Volumen	V_e	m³	14295	13775	13775	13308
Luftvolumen	V	m³	7929	7848	7854	8337
Kompaktheit	A/V_e	m^{-1}	0,33	0,34	0,34	0,35
Gebäudehülle						
mittlerer U-Wert	H_T'	W/(m²K)	0,160	0,176	0,156	0,167
Gebäudedichtheit	n_{50}	h^{-1}	0,40	0,24	0,26	0,26
Heizung/Trinkwarmwasser						
Aufwandszahl Heizverteilung	e_H	-	103 %	121 %	106 %	145 %
Aufwandszahl Trinkwarmwasser	e_{TW}	-	104 %	1593 %	110 %	151 %
solarer Trinkwarmwasseranteil	α_{TW}	-	40 %	10 %	35 %	57 %
solarer Heizungsanteil	α_H	-	8 %	0 %	0 %	0 %
Leistungen						
Heizlast	q_h	W/m²	9,7	7,3	7,0	9,6
interne Wärmegewinne	q_i	W/m²	2,8	5,3	3,9	3,5
Lüftungsanlage						
mittlerer Luftwechsel	n	h^{-1}	0,66	0,58	0,60	0,84
Bereitstellungsgrad Lüftung	η_{WRG}	%	76,6	88,2 %	88,2 %	88,5
Ventilatorstrom	SFP	Wh/m³	0,50	0,50	0,59	0,64
Strombedarf						
Nutzen Nichtwohnbau	q_{Strom}	kWh/(m²a]	27,8	57,1	43,2	40,8
Hilfsenergien	q_{HE}	kWh/(m²a]	8,0	13,0	12,8	16,3
Nutzwärmebedarf						
Heizwärmebedarf	q_h	kWh/(m²a)	9,9	2,8	5,1	7,5
Trinkwasserbedarf	q_{tw}	kWh/(m²a)	7,7	2,2	6,7	2,2
Endenergien						
Endenergie Fernwärme	$q_{E,FW}$	kWh/(m²a)	13,9	28,8	9,6	10,7
Endenergie Strom	$q_{E,Strom}$	kWh/(m²a)	28,8	61,6	44,0	42,5
Primärenergie						
Primärenergiebedarf	q_P	kWh/(m²a)	75,9	166,2	116,3	112,9
erzeugter Strom	$q_{P,erz}$	kWh/(m²a)	-	52,5	52,5	58,1

Bauantragsphase 2011

In der Bauantragsphase erstellte der damalige Planer N&S die Nachweise [3]. Aufgrund der Insolvenz während der Bauausführung erfolgte keine Aktualisierung der Daten durch die Fachplaner mehr.

Das Gebäude wurde im groben korrekt hinsichtlich der Geometrie abgebildet. Die Energiebezugsfläche wurde allerdings zu groß ermittelt, da keine Abzüge für Verkehrsflächen o. ä. angesetzt wurden, sondern die komplette Nettogrundfläche gewählt wurde. Das führt zu insgesamt zu geringeren flächenbezogenen Kennwerten.

Der Luftdichtheitstest wurde deutlich schlechter eingeschätzt, als er später tatsächlich ausfiel. Die U-Werte der Bauteile passen gut zur späteren Ausführung, jedoch wurde das Dach vergessen und mit 0 W/(m³K) gerechnet, was u. a. zu einem zu guten H_T'-Wert führt und sich auf alle weiteren Kennwerte (Heizlast, Heizwärmebedarf, Endenergie, Primärenergie) auswirkt.

Die Rohrleitungsnetze wurden besser – vor allem kürzer – eingeschätzt als später gebaut. Bei der Solarthermie ist eine Heizungsunterstützung eingerechnet, die später nicht umgesetzt wurde. Der Trinkwassernutzwärmebedarf für die Küche wurde anhand der angegebenen Standardkennwerte sowie der geschätzten Essenszahlen stark überschätzt.

Die Küchenlüftung war noch nicht geplant, so dass im gesamten Gebäude nur eine zentrale Anlage angenommen wurde – anstelle der später vorhandenen 7 Anlagen. Die Luftvolumenströme der Lüftungsanlagen passen dennoch bereits gut zur finalen Energiebilanz, der Wärmebereitstellungsgrad wurde jedoch unterschätzt, die Stromeffizienz der Ventilatoren aber im Gegenzug zu gut angesetzt.

Nutz- und Hilfsstromaufwand wurden beide deutlich unterschätzt. Hauptgrund dafür ist, dass etliche Anwendungen überhaupt nicht bilanziert wurden. Die Wohnungsnutzung ist nicht Teil der Bilanzierung. Im Gegenzug wurden aber auch keine Erträge aus PV abgeschätzt (diese sind ohnehin nicht nachweisrelevant).

Bei der Endenergie wurde der Fernwärmebedarf leicht überschätzt (vor allem im Bereich Warmwasser für die Küche) und der Strombedarf recht deutlich unterschätzt, s. o.. Insgesamt ergab sich eine deutliche Erfüllung aller Passivhauskriterien.

Inbetriebnahme 2014

Parallel zur Inbetriebnahme wurde eine Bachelorarbeit von Sandra Schlehf [4] erarbeitet, die den vorhandenen Nachweis ergänzte und korrigierte.

Die Energiebezugsfläche wurde neu ermittelt und ist entsprechend gesunken, so dass alle Kennwerte leicht größer ausfallen. Das geometrische Aufmaß wurde anhand der Ausführungspläne neu erstellt, jedoch sind die Höhenangaben (brutto und netto) nicht korrekt – es wurde von Pauschalwerten ausgegangen.

Die Eingabe des fehlenden Dach-U-Wertes führte zu einem etwas schlechteren mittleren U-Wert. Der gemessene Gebäudedichtheitskennwert n_{50} wurde berücksichtigt.

Die Rohrleitungsnetze wurden erstmals näherungsweise aufgemessen. Jedoch führte eine Fehleingabe im Bereich Trinkwarmwasserbereitung zu stark falschen Zapfleitungsverlusten. Dies zieht eine Reihe von Fehlern nach sich: einen falschen Nutzungsgrad für die Trinkwasserverteilung, einen zu geringen solaren Deckungsanteil, zu große interne Wärmelasten, einen zu kleinen Heizwärmebedarf und eine zu große Endenergie für Fernwärme.

Grund ist die Mischnutzung des Gebäudes bzw. die teilweise auf Wohnbauten abgestimmten Berechnungsansätze: es wird eine Frequenz der Trinkwasserzapfung angenommen, die sich für 230 Bewohner in einer Wohnung ergäbe.

Alle 7 Lüftungsanlagen wurden in dem Nachweis ergänzt und mit den bekannten Volumenströmen beschrieben. Die mittlere Wärmebereitstellungsgrade wurden ergänzt, deren Mittelwert steigt dadurch. Der Ventilatorstrom wurde wegen fehlender Daten noch nicht angepasst.

Eine Reihe von elektrischen Stromverbrauchern wurden ergänzt. Wegen der Mischnutzung von Wohn- und Nichtwohnbau jedoch teilweise mit deutlich falschen Annahmen zur Nutzungszeit bzw. Nutzungsintensität. Teils erfolgten Doppelbilanzierungen. Nutz- und Hilfsstromaufwand wurden damit deutlich überschätzt.

Erträge aus PV wurden erstmalig aus einer Simulation übernommen.

Bei der Endenergie wurde der Fernwärme- und Strombedarf stark überschätzt. Insgesamt ergab sich damit keine Erfüllung der Passivhauskriterien – der Primärenergiebedarf ist zu hoch.

Monitoringphase 2017

Gegen Ende der Monitoringphase lagen alle Planungsdaten vor, so dass der vorhandene drei Jahre alte Nachweis weiter aktualisiert wurde. Dies erfolgte im Rahmen einer Masterarbeit von Kevin Muschalla [5].

Die geometrischen Daten und U-Werte mussten nur geringfügig modifiziert werden. Der unterdessen vorliegende zweite Nachweis der Gebäudedichtheit nach 3 Betriebsjahren wurde berücksichtigt. Die Höhenangaben im Nachweis sind immer noch fehlerhaft.

Die Fehler bei der Bilanzierung der Rohrleitungsverluste im Bereich Trinkwarmwasser wurden behoben, damit auch alle Folgefehler. Allerdings wurde der Trinkwassernutzen zu hoch eingeschätzt, da der Küchenverbrauch doppelt bilanziert wurde – bei der Berechnung der Trinkwassererwärmung und der elektrischen Geräte (hier Spülmaschine).

Die Ventilatorkennwerte alle 7 Lüftungsanlagen wurden nach realer Ausführung bzw. Planung ergänzt, so dass der entsprechende SFP-Kennwert deutlich schlechter – aber realistischer – wird. Für die Küchenlüftung wird ein zu hoher Wärmebereitstellungsgrad angesetzt.

Für die elektrischen Stromverbraucher wurden korrekte Annahmen zur Nutzungszeit bzw. Nutzungsintensität getroffen, so dass der Strombedarf deutlich kleiner ausfällt. Einige Doppelbilanzierungen erfolgten jedoch immer noch – beispielsweise die Spülmaschine, s. o.

Die Endenergien für Strom und Fernwärme liegen bereits nah am finalen Bilanzergebnis. Das Gebäude erfüllt nun die Passivhauskriterien – beim Primärenergiebedarf jedoch nur knapp.

Endbilanz 2018

Die finale Bilanz räumte letzte bekannte Unzulänglichkeiten aus und ist als Endergebnis für das Projekt anzusehen.

Die Gebäudehöhen wurden angepasst, was Auswirkungen auf die Volumina und mittleren Luftwechsel hat. Bei den Lüftungsanlagen wurden die teilweise verwendeten Rückwärmzahlen durch die Wärmebereitstellungsgrade (mit Ventilatorabwärme) ersetzt. Der Wirkungsgrad für den Erdreichwärmeübertrager wird deutlich verschlechtert, indem der Standardwert mit Kennwerten aus der Simulation überschrieben wird (80 % zu 11 %).

Bei der Heizungsanlage werden die Erdleitungen ergänzt, die das Gebäude mit der Nachbarschule verbindet. Das verschlechtert den Verteilungsnutzungsgrad deutlich und erhöht den Fernwärmebedarf leicht. Die Doppelbilanzierung der Spülmaschine wurde behoben, dafür noch einige relevante Stromverbraucher ergänzt: die Sicherheitstechnik, die Regenwassernutzung und der Aufzug.

In der Zusammenfassung ergibt sich eine Erfüllung aller Kriterien – die Primärenergie wird moderat eingehalten, siehe Abbildung 3-1.

Passivhaus Nachweis

Objekt:	St. Franziskus Grundschule				
Straße:	Murmansker Straße 13				
PLZ/Ort:	06130 Halle				
Land:	Deutschland				
Objekt-Typ:	Nichtwohngebäude				
Klima:	Standard Deutschland				
Bauherr(en):	Edith-Stein-Schulstiftung des Bistums Magdeburg				
Straße:	Max-Joseph-Metzger-Str. 1				
PLZ/Ort:	39104 Magdeburg				
Architekt:	Steinblock Architekten				
Straße:	Porsestr. 19				
PLZ/Ort:	39104 Magdeburg				
Haustechnik:	Theurich & Klose				
Straße:	Vahrenwalder Str. 117				
PLZ/Ort:	30165 Hannover				
Baujahr:	2014		Innentemperatur:	20,0	°C
Zahl WE:	1		Interne Wärmequellen:	3,5	W/m²
Umbautes Vol. V_e:	13307,6	m³	mittlere Geschosshöhe:	3,56	m
Personenzahl:	234,0				

Gebäudekennwerte mit Bezug auf Energiebezugsfläche und Jahr — verwendet: Monatsverfahren

				Anforderungen	Erfüllt?*
	Energiebezugsfläche	2615,1	m²		
Heizen	Heizwärmebedarf	**7,5**	**kWh/(m²a)**	15 kWh/(m²a)	ja
	Heizlast	**9,6**	**W/m²**	10 W/m²	ja
Kühlen	Kühlbedarf gesamt		**kWh/(m²a)**	-	-
	Kühllast		**W/m²**	-	-
	Übertemperaturhäufigkeit (> 25 °C)	0,0	%	-	-
Primärenergie	Heizen, Kühlen, WW, Hilfs- und Entfeuchten, Haushaltsstrom	**113**	**kWh/(m²a)**	120 kWh/(m²a)	ja
	WW, Heizung und Hilfsstrom	48	kWh/(m²a)	-	-
	PE-Einsparung durch solar erzeugten Strom	58	kWh/(m²a)	-	-
Luftdichtheit	Drucktest-Luftwechsel n_{50}	**0,26**	**1/h**	0,6 1/h	ja

* leeres Feld: Daten fehlen; '-': keine Anforderung

Passivhaus?	ja

Abbildung 3-1: Passivhausnachweis 2018

3.2 Hinweise zur Bilanzierung

Nachfolgend werden tabellarisch Hinweise zur Berechnung gegeben, siehe Tabelle 3-2. Eingabedaten, die bis zum Projektende nicht verfügbar waren und daher angenommen werden müssen, werden benannt. Darüber hinaus werden Bilanzschritte identifiziert, die entweder besonders aufwändig oder fehleranfällig bei der Ermittlung waren. Zu guter Letzt werden Kennwerte benannt, die – beispielsweise aufgrund der eigentlich für Wohnbauten vorgesehenen Bilanzierung – im Nichtwohnbau nicht passend sind. Die Reihenfolge der Benennung entspricht dem Auftreten bei der Bilanzierung mit der PHPP-Exceltabelle.

Tabelle 3-2: Hinweise zum Passivhausnachweis

Blatt	Hinweise
U-Werte	• Berechnung von Bauteilen mit mehr als 3 Bereichen ist nicht möglich; im vorliegenden Gebäude ergab die Holzkonstruktion bis zu 8 Bereiche; Berechnung erfolgte extern
Fenster	• Eingabe der diversen Fenster wegen des großen Gebäudes sehr aufwändig
Verschattung	• Eingabe der diversen Fenster wegen des großen Gebäudes sehr aufwändig
Zusatz Lüftung	• Zuluft-Abluft-Anlage mit Zuluftüberschuss sowie separate Abluftanlage (zusammen balanciert) führte zu Fehlermeldung bzw. Warnhinweisen • raumweise Eingabe der Zu- und Ablufträume mit Volumenstrom wegen der Größe des Gebäudes sehr aufwändig • Überströmvolumenstrom nicht eindeutig; im Gebäude gibt es reine Überströmräume, aber auch Räume mit Zuluft- und Abluftüberschuss • Reduktionszeiten führten zu Fehlermeldungen, weil bei unterschiedlich gewählten Reduktionen (für Klassenräume, WCs usw.) die jahresmittleren Zu- und Abluftvolumenströme nicht gleich hoch sind; innerhalb jeder ausbalancierten Lüftungszone müssen zur Vereinfachung alle Reduktionsfaktoren der betroffenen Räume gleich sein • Standardwerte für den Erdreichwärmeübertrager passen gar nicht zur Simulation; diese ergibt näherungsweise im Sommer wie im Winter einen Wirkungsgrad von 11 % (Definition: erreicht die Austrittsluft Erdreichtemperatur sind 100 % Wirkungsgrad gegeben, erfolgt keine Temperaturänderung sind es 0 %); der Vorschlagswert für das vorhandene System von 80 % wurde nicht verwendet
Lüftung	• für die Küchenlüftungsgeräte, die aus einer Zulufteinheit mit Ventilator und WRG (Hersteller A) sowie einer separaten Ablufteinheit mit Ventilator (ggf. Hersteller B) bestehen, gibt es keine eindeutigen Rückwärmzahlen und auch keine Wärmebereitstellungsgrade; • es liegen Simulationen zur Rückwärmzahl (ohne Ventilatorabwärme) vor – je nach Außentemperatur liegen die Werte zwischen 30 % und knapp 60 %; ein unterer Wert wurde angenommen
Sommer	• als Anlagenluftwechsel im Sommer wurde ein Link zum Blatt "Zusatz Lüftung" gesetzt und der winterliche Wert verwendet
WW+Verteil	• größtes Problem ist das Ausfüllen bei gemischter Wohn- und Nichtwohnbaunutzung • als Nutzwärmemenge muss nur der Wohnbauanteil eingegeben werden, wobei die Personenzahl (hier 230 Schüler/Lehrer plus 4 Bewohner = 234) manuell auf 4 Personen herabgesetzt werden muss (Zelle überschrieben) • der Nutzwärmebedarf der Spülmaschine (der Schulküche) ist automatisch verlinkt und muss nicht noch zusätzlich an dieser Stelle eingegeben werden – Gefahr der Doppelbilanzierung • die Begrifflichkeit "Warmwasser nichtelektrischer Bedarf Wasch- und Spülmaschinen" ist in diesem Zusammenhang irreführend, da auch die Warmwasserbereitung als solches in der Schule über Solarthermie und Strom erfolgt (gemeint ist: der Restbedarf an Energie, der nicht schon im Blatt "Strom NiWo" bilanziert ist) • die Zapfverluste der Einzelleitungen hängen ab von der Personenzahl und der Anzahl der Wohneinheiten; die Schule wurde als "1 Wohneinheit" deklariert und mit 234 Personen besetzt; entsprechend groß (und falsch) werden die Zapfverluste; mehr als 250.000 Zapfungen wurden geschätzt; Problem umgangen, indem händisch 4 Personen der Wohnung eingegeben wurden; Zapfverluste in der Schulküche sind nicht abgebildet
SolarWW	• für die beiden Solarspeicher waren die Teilvolumina des Bereitschaftsteils in den Herstellerunterlagen nicht angegeben und wurden mit ⅓ angenommen
Strom	• das Blatt wurde für die Hausmeisterwohnung ausgefüllt; dazu wurde die Personenzahl 4 eingetragen und die verlinkte Zelle überschrieben • das Ergebnis dieses Blattes wurde insgesamt unter "Strom NiWo" händisch als sonstiger Verbraucher verlinkt, um eine Summe zu erzielen
Strom NiWo	• aufgrund der Mischnutzung ist die Beleuchtung der Hausmeisterwohnung bereits im

Blatt	Hinweise
	Blatt "Strom" abgebildet, so dass sie hier nicht doppelt bilanziert wird; das führt zu einer Fehlermeldung über fehlende Flächenanteile bei der Beleuchtung • diverse Schulausstattung (Whiteboards, Serverkühlung, Händetrockner, Sicherheitstechnik, Mediengeräte) sowie Küchengeräte (Kühlschrank der Teeküche usw.) wurden in den freien Eingabekästchen zusätzlich ergänzt • der angegeben Kennwert für "Kochen" einer Mahlzeit passt für eine Schulküche nicht; auf Basis der realen Messwerte wurde er mit 0,15 kWh/Essen angesetzt (geringer als alle vorgeschlagenen Kennwerte), siehe auch [6]
Hilfsstrom	• die Pumpenlaufzeiten passen nicht, wurden aber – der Geringfügigkeit wegen – nicht geändert; es werden durchgehende Laufzeiten für die gesamte Heizperiode angesetzt, eine Abschaltung ist nicht rechnerisch vorgesehen • die Druckerhöhungsanlage für die Regenwassernutzung sowie der Aufzug (knapp 4000 + 1000 kWh/a Endenergie) wurden ergänzt – Kennwert wie gemessen
PE-Kennwert	• die Aufteilung des Gesamtverbrauchs (hier für Heizung) auf zwei Energieträger wurde anhand der Messwerte vorgenommen – bis zum Vorliegen der Messwerte wurde anhand der Flächen geteilt
Nutz NiWo	• Kennwerte zur relativen Abwesenheit wurden angepasst • Aula: Wert der Kantine erhöht (50 % statt 0 %) • Hort: wie Klassenzimmer, aber mehr Abwesenheit (75 %)

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass insbesondere die Mischnutzung aus Wohn- und Nichtwohnbau die Berechnung unübersichtlicher machte – wenngleich das Problem lösbar war.

Die Freiheitsgrade bei der Berechnung sind sehr groß, so dass das Endergebnis sehr beliebig werden kann. Der Umfang der zu bilanzierenden elektrischen Geräte in einer Schule ist nicht eindeutig – zumal davon das Endergebnis entscheidend abhängt (Stichwort: Stromverbrauch für Regenwassernutzung, Sicherheitstechnik, Aufzug). Zudem ergeben sich aufgrund von Teilbenutzungsfaktoren (Beleuchtung. Lüftung, Geräte) sehr starke Varianzen beim Endergebnis.

3.3 Vergleich mit dem Verbrauch

Die Randdaten der Bedarfsberechnung 2018 wurden möglichst realistisch gewählt. Damit ergeben sich folgende Ergebnisse:

- Fernwärme: 27.964 kWh/a
- Strom: 111.266 kWh/a

Der Verbrauch ohne Berücksichtigung der Eigenstromproduktion beläuft sich auf (Wärme witterungskorrigiert, Mittelwert 2015 – 2017):

- Fernwärme: 39,4 MWh/a
- Strom: 112,0 MWh/a

Der Fernwärmebedarf liegt bei nur 70 % des Messwertes. Die Differenz wird kleiner, wenn eine entsprechend realistischere Innentemperatur von z. B. 23°C angesetzt wird (Bedarf dann 38,6 MWh/a). Der Stromkennwert ist fast eine Punktlandung; es wurde darauf geachtet, möglichst alle Stromverbraucher grundsätzlich zu erfassen.

4 Bedarf nach DIN V 18599

Die St. Franziskus-Grundschule wurde mehrfach nach der DIN V 18599 bewertet. Einerseits wurde der energetische Nachweis im Rahmen des Bauantrags, nach Fertigstellung und bei Projektende geführt, siehe Kapitel 4.1. Andererseits wurden Variantenberechnungen durchgeführt, um beispielsweise die Auswirkungen detaillierter oder vereinfachter Datenerhebung zu testen, siehe Kapitel 4.3.

Es ist vorab festzustellen, dass das Gebäude die EnEV 2009 einhält, die aufgrund des Bauantrags offiziell gilt. Auch die bei Projektende geltende EnEV 2016 wird immer noch deutlich erfüllt.

4.1 Ergebnisse der Nachweise

Tabelle 4-1 gibt eine Übersicht über die EnEV-Ergebnisse der drei relevanten Berechnungen während der Projektbearbeitung: den Nachweis für den Bauantrag, erstellt vom damaligen Planer N&S [7], den Energieausweis über das fertig gestellte Projekt sowie eine Nachberechnung am Ende der Monitoringphase mit allen dann bekannten Randdaten. Eine Erläuterung wesentlicher Unterschiede bei der Bilanzierung folgt unter der Tabelle.

Tabelle 4-1: Ergebnisse des EnEV-Nachweises

Größe	Formel-zeichen	Einheit	Bauantrag [7]	Baufertig-stellung	Final
EnEV	-	-	2009	2009	2016
Jahr der Berechnung	-	-	2010	2014	2018
Allgemeine Annahmen					
Zonenzahl (konditioniert)	-	-	1	9	10
Stromerzeugung PV, Wind	-	-	nein	nein	ja
Geometrie					
Nettogrundfläche	A_{NGF}	m²	3172,0	2965,9	2962,9
umbautes Volumen	V_e	m³	14295	11990	12771
Luftvolumen	V	m³	9516	9592	9425
Hüllfläche	A	m²	4716,71	4779,57	4782,81
Kompaktheit	A/V_e	m^{-1}	0,33	0,40	0,37
Gebäudehülle					
transparente Bauteile, real	$\bar{U}$	W/(m²K)	0,72	0,61	0,61
transparente Bauteile, Anforderung	$\bar{U}_{max}$	W/(m²K)	1,9	1,9	1,5
opake Bauteile, real	$\bar{U}$	W/(m²K)	0,09	0,20	0,20
opake Bauteile, Anforderung	$\bar{U}_{max}$	W/(m²K)	0,35	0,35	0,28
Endenergie nach Gewerken					
Heizung	$q_{h,f}$	kWh/(m²a)	13,2	24,7	28,4
Warmwasser	$q_{w,f}$	kWh/(m²a)	18,6	12,3	7,1
Beleuchtung	$q_{l,f}$	kWh/(m²a)	11,7	6,6	6,8
Lüftung	$q_{v,f}$	kWh/(m²a)	0,8	11,2	22,9
Kühlung	$q_{c,f}$	kWh/(m²a)	0,1	0,0	1,7
Stromerzeugung	$q_{pv,f}$	kWh/(m²a)	-0,0	-0,0	-17,8
Endenergie nach Energieträger					
Fernwärme	q_E	kWh/(m²a)	26,3	34,1	27,0
Strom	q_E	kWh/(m²a)	18,3	20,4	21,9
Primärenergie					
Istgebäude	q_P	kWh/(m²a)	72,5	61,1	45,1
Referenz/Anforderungswert	q_P	kWh/(m²a)	81,0	128,5	104,7

Alle Originaldaten der EnEV-Nachweise finden sich im separaten Anhang A zu diesem Bericht.

Bauantrag

Zu der Berechnung aus dem Bauantrag liegt eine separate Berechnungsdokumentation als PDF vor. Eine einlesbare Berechnungsdatei für eine Software ist jedoch nicht gegeben. Da der Planer im Verlaufe der Bauausführung insolvent ging, konnten nicht mehr alle Daten rekonstruiert werden, die dem Nachweis zugrunde liegen.

Aus den vorhandenen Unterlagen ergibt sich, dass das Gebäude als Einzoner mit dem Nutzungsprofil Schule gerechnet wurde. Hausmeisterwohnung als auch die nicht konditionierten Treppenhäuser wurden übermessen. Die angesetzte Qualität der Gebäudehülle entsprach in etwa der Bauausführung, lediglich die Pfosten-Riegel-Fassade wurde schlechter angesetzt als später tatsächlich errichtet.

Für die Heizung wurde eine Luftheizung aus Fernwärme verwendet, die Warmwasserbereitung mit Fernwärme und Solarthermie angesetzt. Das entsprach dem Planungsstand. Das Gebäude erhielt in der Berechnung eine Lüftungsanlage mit 92 % Wärmerückgewinnung – grundsätzlich wie geplant, jedoch zusammengefasst in einem Gerät. Die Beleuchtung wurde angesetzt wie ausgeführt: als direkte Beleuchtung mit stabförmigen Leuchtstofflampen.

Eine Stromerzeugung wurde nicht eingerechnet, weil der damalige Energieausweis nach EnEV 2009 dies nicht vorsah.

Im Ergebnis ist festzuhalten, dass der Stromaufwand für die Lüftung sowie der Fernwärmeaufwand für die Heizung deutlich unterschätzt wurde. Dies ergibt sich vor allem aufgrund der Annahme, das gesamte Gebäude würde nur aus Klassenraumflächen bestehen. Aufgrund der zu hohen Standardkennwerte für Küchen wurde im Gegenzug die Trinkwassererwärmung jedoch hinsichtlich des Energiebedarfs überschätzt.

Baufertigstellung

Das Gebäude wurde zur Baufertigstellung als mehrzoniges Projekt erneut gerechnet. Als geltende EnEV gilt immer noch die Version von 2009 aus dem Bauantrag.

Die Fluchttreppen und Aufzugsschächte wurden als nicht konditioniert angesetzt – wie real ausgeführt (es gibt weder Heizflächen noch Luftzuführung). Daher ergibt sich ein kleineres Volumen, jedoch eine größere Hüllfläche als im Bauantrag – siehe auch Abbildung 2-1, Seite 15. Die Kompaktheit sinkt entsprechend. Die äußere Gebäudehülle enthält aufgrund dieser Herangehensweise neben der Holzkonstruktion nun auch ungedämmte Stahlbetontrennwände (zu den Treppen), was den mittleren Wärmedurchgangskoeffizienten der opaken Flächen deutlich verschlechtert.

Da auch energieintensive Nutzungen wie die Küche nun vorhanden sind, und vor allem alle Lüftungsanlagen in der Software berücksichtigt sind, steigt der rechnerische Energiebedarf für die Heizung und Lüftung deutlich an.

Im Bereich Trinkwarmwasser wurde die geplante Anzahl von Schulessen (300 Stück täglich) zugrunde gelegt und von einer Trinkwassererwärmung mit Solar und Fernwärme ausgegangen. Beleuchtungsleistungen, Leitungslängen sowie die Daten der Lüftungsanlagen wurden der tatsächlichen Planung entnommen und nicht mit Standardwerten gerechnet.

Die Erzeugung von Strom wurde wiederum nicht berücksichtigt, da die EnEV 2009 dies nicht im Nachweis vorsah.

Die Hausmeisterwohnung ist als separate Zone vorhanden – jedoch nicht mit Wohnnutzung, sondern mit dem Nutzungsprofil "Bettenzimmer" als Teil des Nichtwohnbaus. Die Bilanzierung als Wohnung hätte zu zwei Energieausweisen geführt, was vermieden werden sollte.

Offenkundige Fehler bei der Berechnung, die im weiteren Projektverlauf erkannt wurden, sind: die Kühlung des Serverraum wurde vernachlässigt und die Höhenmaße zur Bestimmung der Volumina waren falsch.

ENERGIEAUSWEIS für Nichtwohngebäude

gemäß den §§ 16 ff. Energieeinsparverordnung (EnEV)

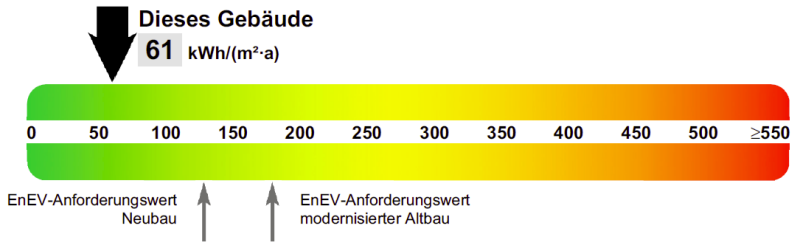
Gültig bis: 30.04.2024

Aushang

Gebäude

Hauptnutzung/ Gebäudekategorie	Grundschule mit Schulküche und Hausmeisterwohnung (BWZK 4100)
Sonderzone(n)	
Adresse	Murmansker Straße 13 06130 Halle (Saale)
Gebäudeteil	
Baujahr Gebäude	2014
Baujahr Wärmeerzeuger	2014
Baujahr Klimaanlage	2014
Nettogrundfläche	2.966 m²

Primärenergiebedarf „Gesamtenergieeffizienz“



Aufteilung Energiebedarf

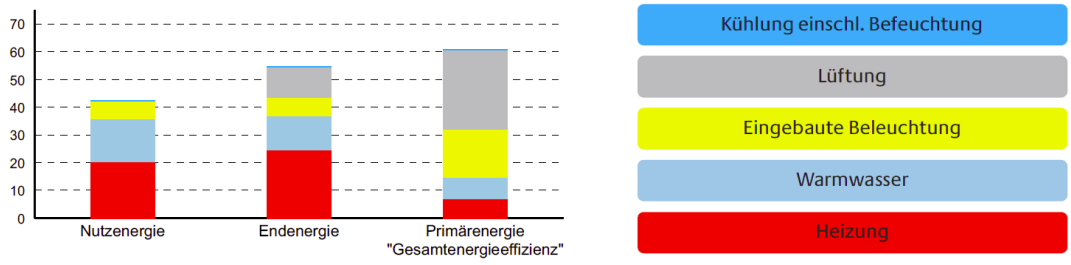


Abbildung 4-1: Öffentlicher Aushang 2014

Finale Bilanz

Zum Projektende wurde die Berechnung final wiederholt; Basis war die Berechnungsdatei von 2014. Erkannte Fehler bei der Berechnung wurden behoben, aber auch reale Abweichungen des Betriebs bei der Bilanzierung berücksichtigt.

Da es sich um eine Nachrechnung handelt, wurde als Rechenmodus die derzeit geltende EnEV 2016 zugrunde gelegt. Sie ermöglicht die Abbildung der Stromerzeugung aus Photovoltaik und Wind, welche unter Verwendung von Standardeffizienzen eingerechnet wurde.

Die Zonierung ist prinzipiell so belassen worden wie 2014 erstellt, jedoch wurde der Serverraum als gekühlte Zone angelegt. Im Aufmaß wurden die Höhen korrigiert, was das Volumen verändert und auch die Kompaktheit verbessert.

Hinsichtlich der Außenhülle ist festzustellen, dass die 2016 geltenden Anforderungen höher sind, aber immer noch erfüllt werden.

Bei den Lüftungsanlagen wurde auf die Berechnung mit Standardeffizienzen zurückgegriffen, was realistischer ist, wenn auch die Ergebnisse hier deutlich steigen.

Die Trinkwassererwärmung wurde modifiziert: die reale Anzahl an Schulessen (203 Stück/Tag) ist berücksichtigt, aber auch die Nachheizung des Pufferspeichers per Strom und nicht per Fernwärme – da der reale Betrieb so abläuft.

Die Primärenergie sinkt insgesamt, vor allem aufgrund der einberechneten Eigenstromerzeugung, aber auch aufgrund der besseren Primärenergiefaktoren (2009: 2,4 | 2016: 1,8). Der Anforderungswert an einen Neubau ist jedoch ebenfalls gesunken. Das Gebäude erfüllt diesen Wert immer noch deutlich.

Parallel zu der Energiebedarfsberechnung wurde auch eine Verbrauchsauswertung für die Jahre 2015 – 2017 erstellt. Die Ergebnisse von finaler Bedarfs- und Verbrauchsbewertung zeigt Abbildung 4-2.

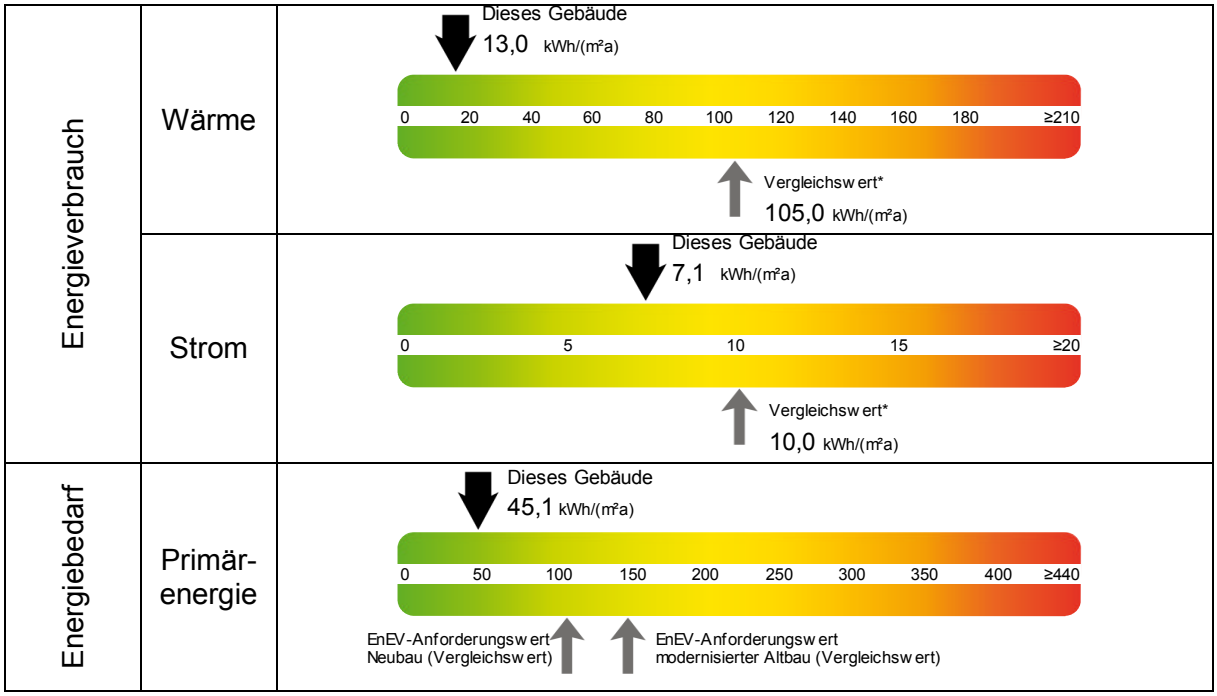


Abbildung 4-2: Ergebnisse des Energieausweises 2018

4.2 Hinweise zur Bilanzierung

Nachfolgend werden tabellarisch Hinweise zur Berechnung (Stand 2018) gegeben, siehe Tabelle 4-2. Insbesondere werden Bilanzschritte benannt, an denen die Norm (oder die Software) keine korrekte Abbildung der Realität vorsieht und daher Vereinfachungen oder Näherungen gewählt wurden. Die Reihenfolge der Benennung entspricht dem Auftreten bei der Bilanzierung mit der Software.

Tabelle 4-2: Hinweise zum EnEV-Nachweis

Bilanzschritt	Hinweise
Zonierung	• die Treppenhäuser sind indirekt über die Stahlbetoninnenwände sowie die (geschlossenen) Brandschutztüren beheizt, sie haben jedoch keinen Anschluss an die RLT und auch keine Heizflächen • sie wurden daher als unbeheizte Zone angelegt, so dass die ungedämmten Trennwände zur Bilanzgrenze wurden
Sonnenschutz	• die Kennwerte für die Jalousie mit silberner und schwarzer Seite wurden anhand der Farbe "grau" ermittelt
Luftvolumenstrom RLT	• die realen Luftvolumenströme der RLT-Anlagen wurden nicht in die Berechnung integriert; sie sind bekannt und liegen in den meisten Fällen unter den Standardwerten der Norm (nach Nutzungsprofil) • werden sie eingegeben, steigt der rechnerische Energiebedarf, weil die Differenzmenge der beiden Volumenströme (Bedarf minus Anlagenvolumenstrom) als Fensterluftwechsel interpretiert wird
Überströmung zwischen Zonen	• Volumenströme zwischen den Zonen wurden nach Planung abgebildet • in der Software kann jeder Zone nur eine andere Zone zwecks Luftaustausch zugeordnet werden, so dass die realen Verhältnisse vereinfacht wurden (Zone 1 steht mit Zonen 4 und 11 im Luftaustausch, gerechnet wurde nur der relevantere Wert)
Ventilatorkennwerte	• da die Ventilatorvolumenströme nicht sinnvoll eingegeben werden konnten, wurde auch darauf verzichtet, die geplanten Differenzdrücke und Ventilatorwirkungsgrade zu hinterlegen
Feuchterückgewinnung	• die Feuchterückgewinnung der beiden zentralen RLT-Anlagen wurde nicht angesetzt, weil das Nutzungsprofil "Klassenzimmer" keine Feuchteanforderung aufweist
Konditionierung	• die vorhandene Konditionierung über Luft ohne statische (oder andere) raumweise angeordnete Nachheizflächen ist in der Norm nicht abgebildet
Zulufttemperatur	• die real vorliegenden Zulufttemperaturen der reinen (zentralen) Luftheizung konnten nicht monatlich eingegeben werden • die realen Zulufttemperaturen liegen zwischen 20 und 29°C, der mögliche Eingabebereich geht aber nur bis 24°C • daher wurde der Jahresmittelwert von 22°C verwendet
Solarthermie	• die kombinierte Warmwasserbereitung mit einer gemeinsamen Solarthermieanlage für die Hausmeisterwohnung (als "Bettenzimmer" mit dem Warmwasserbedarf eines "Heimes" angenähert) und die Küche lässt sich nicht mit Standardwerten abbilden • die Software verweist auf eine Simulation, welche sich mangels passender Software nicht umsetzen ließ • zwei Solarthermieanlagen wurden angelegt, wobei die reale Kollektorfläche komplett der Küche zugeschlagen wurde und die Hausmeisterwohnung bilanziell nur einen Speicher mit Elektronachheizung aufweist
semidezentrale Trinkwassererwärmung	• die teils zentrale und teils dezentrale Trinkwassererwärmung in der Hausmeisterwohnung lässt sich nicht abbilden • es wurde eine vollzentrale elektrische Speicherwassererwärmung gerechnet
Leitungslängen Heizung	• die realen Leitungslängen wurden bei der Berechnung verwendet • da keine korrekte Zuordnung zu den einzelnen Nutzern (hier zentralen Luftheizregistern) möglich war, wurde wie folgt verfahren: • je ⅓ der Verteil- und Anbindeleitungen wurden den zentralen Anlagen "Klassentrakt", "Verwaltungstrakt" und "Küche" zugeordnet • die Steigestränge wurden zu je 50 % auf "Klassentrakt" und "Verwaltungstrakt" verteilt
Erdleitung	• da keine Kennwerte für Erdleitungen vorhanden sind, wurde die Anschlussleitung an das Gymnasium als "Kellerleitung" berechnet
Pumpenleistungen	• alle Pumpenleistungen wurden mit Standardwerten berechnet, da teils unklar war, welche Leistung im Auslegungspunkt vorliegt
Photovoltaik	• trotz vorliegender Simulation der PV-Anlage wurde der Nachweis mit Standardwerten erstellt, weil die Simulationsranddaten nicht für den Standort Potsdam vorliegen

4.3 Variationen der Detailtiefe

Im Rahmen ihrer Masterarbeiten untersuchten Stefan Bethke [8] und Kevin Muschalla [5] die Auswirkungen unterschiedlicher Detaillierungen bei der Berechnung nach DIN V 18599 auf das Bilanzergebnis. Basis waren die jeweils zum Zeitpunkt der Arbeit vorliegenden Erkenntnisse zur Planung, Ausführung und Nutzung.

Tabelle 4-3 zeigt die Erkenntnisse aus der Inbetriebnahmephase 2014. Es ist anzumerken, dass die Hausmeisterwohnung nicht in die Bilanzierung einbezogen wurde.

Die reale Nutzung ergibt sich auf Basis des Standardprofils, jedoch mit angepassten Zeiten, Volumenströmen und Belegungsdichten. Bei den Technikranddaten wurden folgende Größen real angesetzt: Leuchtenwirkungsgrade, Leitungslängen, Speichergrößen, Ventilatorkennwerte und Pumpenleistungen aus der Planung.

Es zeigt sich, dass die Berechnung als Mehrzoner zu einer höheren Bedarfsabschätzung für Wärme und Strom führt und in der durchgeführten Variation den größten Einfluss hat. Parallel zur Bilanzierung wurde auch der Zeitaufwand für die Bearbeitung geschätzt. Insbesondere die Datenerhebung für die reale Technikausführung zeigt sich als sehr zeitaufwändig.

Tabelle 4-3: Variantenberechnung 2014 [8]

	Variante 1	**Variante 2**	**Variante 3**	**Variante 4**
Randdaten				
Nutzung	Standard	Real	Standard	Standard
Technik	Standard	Real	Standard	Real
Gebäudemodell	Einzoner	Einzoner	8-Zoner	8-Zoner
EnEV	2009	2009	2009	2009
Ergebnisse für die Endenergie, in [kWh/(m²a)]				
Strombedarf	30,1	34,3	28,4	27,0
Fernwärme	22,1	21,8	29,1	32,6
geschätzte Bearbeitungszeit, in [h]				
Zeit	71	131	95	134

Tabelle 4-4 fasst die Ergebnisse der Variantenrechnung am Ende der Monitoringphase zusammen. Auf eine Berechnung als Einzoner wurde verzichtet. Die Anpassung der Nutzungsdaten umfasste neben den o. g. Daten noch eine Einschätzung der relativen Abwesenheit. Die Technikdaten konnten genauer eingegeben werden, da die Ausführung komplett dokumentiert war. Bei den Technikranddaten wurden folgende Größen real angesetzt: Beleuchtungsleistung, Leitungslängen, Speichergrößen, Photovoltaikerträge, Ventilatorkennwerte und Pumpenleistungen aus der Ausführung.

Tabelle 4-4: Variantenberechnung 2017 [5]

	Variante 1	**Variante 2**	**Variante 3**
Randdaten			
Nutzung	Standard	Standard	Real
Technik	Standard	Real	Real
Gebäudemodell	9-Zoner	9-Zoner	9-Zoner
EnEV	2016	2016	2016
Ergebnisse für die Endenergie, in kWh/(m²a)			
Strombedarf	30,9	12,8	11,0
Fernwärme	33,0	22,7	22,8

Es zeigt sich, dass die Erhebung der realen Nutzungsranddaten keinen nennenswerten Einfluss auf das Ergebnis hat. Die realen technischen Eigenschaften führen jedoch zu einer deutlich geringeren bilanzierten Energiemenge – insbesondere bei der Beleuchtung, aber auch beim Hilfsenergieaufwand der Ventilatoren. Die Erkenntnisse sind in die Bilanzierung des finalen Energieausweises eingeflossen.

4.4 Vergleich mit dem Verbrauch

Die Randdaten der EnEV-Bedarfsberechnung 2018 führen zu folgenden Ergebnissen:

- Fernwärme: 80.117 kWh/a
- Strom: 122.796 kWh/a (65.001 kWh/a Netzstrom zzgl. 57.795 kWh/a Stromproduktion)

Der Verbrauch ohne Eigenstromproduktion beläuft sich auf (Wärme witterungskorrigiert, Mittelwert 2015 – 2017):

- Fernwärme: 39,4 MWh/a
- Strom: 112,0 MWh/a

Es ist festzuhalten, dass der Fernwärmeverbrauch mit dem Faktor 2 deutlich überschätzt wird. Die Detailuntersuchung zeigt, dass die Luftheizung insbesondere in der Küche (hoher Luftwechsel) falsch berechnet wird. Sie liefert rechnerisch teils deutlich mehr Wärme an das Gebäude als es dem Heizwärmebedarf entspricht. Es ist dies eine Schwäche des Bilanzansatzes bei Gebäuden mit sehr gutem Standard, aber hoher Nutzungsintensität. Die Erkenntnisse werden in die Normung zurückgespeist.

Hinsichtlich des Strombedarfs ergibt sich ein ähnliches Bild. Der bilanzierte Strombedarf ohne Berücksichtigung der PV-Produktion liegt in etwa bei dem Verbrauchswert. Allerdings bilanziert die Norm keinen Anwendungsstrom (PCs, Medientechnik, Kühlschränke usw.), sondern nur TGA-Strom (Beleuchtung, Ventilatoren, Pumpen). Anhand der Detailauswertung der Strombilanz – siehe Abschlussbericht 10 – ergibt sich ein Anteil des gemessenen Stroms von ca. 72 MWh/a für die Verbraucher, welche in der DIN V 18599 bilanziert werden. Damit liegt der Bilanzwert um etwa den Faktor 1,7 über dem Messwert.

5 Ökologische Baustoffbilanz

Der Jahresenergieverbrauch bei der Gebäudenutzung ist nur ein Teil der im Lebenszyklus anfallenden Verbräuche. Darüber hinaus fällt die in der Literatur oft als "graue Energie" benannte Energie an, die für die Herstellung von Produkten, den Transport, die Lagerung und letztendlich die Entsorgung benötigt wird.

Im Rahmen des Monitorings wurde die Zeit bis zum Eintreffen auswertbarer Messwerte u. a. genutzt, um den Herstellungsaufwand des Gebäudes (Energie, Wasser) zu bewerten und die damit verbundenen Schadstoffemissionen zu bestimmen. Es sind dazu insgesamt 6 Abschlussarbeiten erstellt worden, deren Kern- oder Teilaufgabe die ökologische Baustoffbilanz war. In der Reihenfolge der Bearbeitung:

- Melanie Münch: Außengebäudehülle [9]
- Ina Asmussen, Beleuchtung [10]
- Heidrun Neumann und Jana Wohnfahrt: Heizung, Trinkwasser, Brauchwasser [11]
- Xiaoya Wang: Lüftung, Abwasser [12]
- Jianbang Song: Innenausbau, Bodenbeläge [13]
- Yabo Liu: Elektroausstattung und Photovoltaik [14].

Die Erkenntnisse wurden anschließend von Julia Stresing in einer zentralen Bewertungsdatei zusammengeführt. Basis aller Bewertungen sind die Kennwerte der Datenbank „ÖKOBAUDAT“ [15].

Nachfolgend werden zunächst die Gesamtergebnisse vorgestellt und eingeordnet. Die Grenzen der Bewertung werden aufgezeigt. Im nächsten Schritt werden Ergebnisse nach Gewerkegruppen zusammengefasst und teilweise grafisch ausgewertet.

5.1 Vorgehensweise

Lebenszyklusorientierte Ökobilanzen sind ein Werkzeug zur Quantifizierung und Bewertung ökologisch verträglichen Bauens. Sie dienen der Bestimmung von Umwelteinwirkungen von Bauprodukten, welche die Lebenszyklusphasen von der Rohstoffgewinnung bis zur Auslieferung am Werktor umfassen. Für die einzelnen Bauprodukte werden die Ergebnisse dieser in den Umwelt-Produktdeklarationen (EPDs) zusammengefasst, welche durch das Institut für Bauen und Umwelt herausgegeben werden. Zudem wird vom Informationsportal Nachhaltiges Bauen die Datenbank „ÖKOBAUDAT“ mit branchenspezifischen Durchschnittsdaten für Bauprodukte zur Verfügung gestellt [15] [16].

Nach DIN EN ISO 14040 besteht eine Ökobilanz aus folgenden Elementen:

- Zieldefinition
- Sachbilanz
- Wirkungsabschätzung
- Interpretation der Ergebnisse

Zieldefinition

In der Zieldefinition wird zunächst der Bilanzraum festgelegt. Im Fall von Gebäuden werden der Lebensweg (-abschnitt) und die zu erhebenden Daten definiert. Die räumlichen und zeitlichen Grenzen des Systems werden festgelegt. Eine Abgrenzung des Bilanzraumes sollte sinnvoll gewählt werden (plausibel und sachlich). Das betrachtete Objekt ist zu beschreiben und Ausschlusskriterien und bestehende Ausgangspunkte (unberücksichtigte Prozesse) sind abzustecken, da es angesichts der zu komplexen Struktur nicht machbar ist eine universelle Ökobilanz aufzustellen [17].

Für die St. Franziskus-Grundschule wird das Gebäude mit den technischen Anlagen zur Energieerzeugung, -speicher und -verteilung innerhalb und außerhalb der thermischen Hülle als Bilanzraum definiert. Die Baustoffdaten werden erhoben und mit geschätzten Lebensdauern ein anteiliger jährlicher Herstellungsaufwand ermittelt.

Nicht bewertet werden aufgrund fehlender Bewertungsgrundlagen: die elektrischen Durchlauferhitzer, die elektrochemische Batteriespeicheranlage, die Regenwassernutzungsanlage (Zisterne und Zwischenspeicher), diverse Einbauten in die technischen Anlagen (Rauchmelder, Bewegungsmelder, Luftauslässe, Absperrarmaturen, Messfühler usw.). Darüber hinaus ist die mobile Innenausstattung (Tische, Schränke, PCs usw.) nicht Teil der Untersuchung.

Sachbilanz

Danach werden die umweltrelevanten Daten für Materialien und Energien in Stoff- und Energiebilanzen, sowie Emissionen in die Luft, den Boden und das Wasser in der Sachbilanz erfasst. Die Sachbilanz umschließt alle Lebensphasen von der Rohstofferschließung über die Produktion, den Einsatz im Gebäude, die verschiedenen Transportwege und schließlich die Entsorgung bzw. Weiterverwendung eines Produktes [17].

Der modulare Aufbau der Ökobilanzen ermöglicht ein getrenntes Bearbeiten der einzelnen Lebensphasen und trägt erheblich zur Überschaubarkeit der Datenmenge bei. Nach „ÖKOBAUDAT“ werden die Indikatoren zur Bewertung in Inputs und Outputs unterteilt:

- Inputs
    - Total erneuerbare Primärenergie (PERT)
    - Total nicht erneuerbare Primärenergie (PENRT)
    - Einsatz von Sekundärstoffen (SM)
    - Einsatz von Süßwasserressourcen (FW)
- Outputs
    - Gefährlicher Abfall zur Deponie (HWD)
    - Stoffe zum Recycling (MFR)

Im Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB) spielen nur zwei dieser Kriterien – nicht erneuerbarer Primärenergiebedarf und Gesamtprimärenergiebedarf – eine Rolle. Daher werden diese sowie der Einsatz von Süßwasserreserven in die Auswertung der St. Franziskus-Grundschule einbezogen.

Wirkungsabschätzung

Anschließend werden die Daten aufbauend auf der Sachbilanz in der Wirkungsbilanz in Wirkungskategorien gruppiert und bezüglich ihrer Umweltbeeinflussung erörtert. Die Wirkungen werden dabei in Potenzialen aufgeführt. Zur Wirkungsabschätzung werden vor allem folgende Wirkungskategorien verwendet [17]:

- Treibhauspotenzial (GWP)
- Ozonabbaupotenzial (ODP)
- Versauerungspotenzial (AP)
- Eutrophierungspotenzial (EP)
- Photooxidantienbildungspotenzial (POCP)

Durch das in CO_2-Äquivalenten angegebene Treibhauspotenzial wird der anthropogene Anteil an der Erwärmung des Erdklimas ausgedrückt. Die Leitsubstanz des Treibhausgases ist Kohlendioxid. Andere Spurengase wie Kohlenmonoxid (CO), Methan (CH_4), Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW) werden in CO_2-Äquivalente umgerechnet. Der Integrationszeitraum beschreibt die Lebenszeit der Gase in der Atmosphäre, die bei der Berechnung berücksichtigt wird.

In der Literatur wird ein üblicher Zeitraum von 100 Jahren angegeben. Da der Kohlenstoffdioxidspeicher von nachwachsenden Baustoffen im Gebäude am Ende des Lebenszyklus verwertet wird, ist es nicht möglich mit Hilfe der Wirkungskategorie eine Angabe über deren Menge zu machen [18]**.**

Das Ozonabbaupotenzial beschreibt den Effekt des Abbaus der Ozonschicht, die durch den jeweiligen Stoff ausgelöst werden kann. Dazu wird aus Modellberechnungen das Verhältnis von dem Ozonabbauwert für den zu bestimmenden Stoff und einem Ozonabbauwert einer Referenzsubstanz gebildet. Als Referenzsubstanz dient ein FCKW (R11). Parameter, die das Ozonabbaupotenzial beeinflussen, sind unter anderem die Anzahl der Halogenatome und die atmosphärische Lebensdauer [19]**.**

Das Schwefeldioxid-Äquivalent ist der Indikator für das Versauerungspotenzial. Die Umwandlung von Luftschadstoffen wie Stickoxide (NO_X) und Schwefeldioxid (SO_2) in Säuren bewirkt eine Versauerung des Regens durch die Verringerung des pH-Wertes. Das Versauerungspotenzial dient zur Bestimmung, in welchem Ausmaß ein Schadstoff zum Gesamtproblem beiträgt. Deren Ursachen liegen in Verbrennungsprozessen der Industrie, Kraftwerken, Haushalten und dem Verkehr [18] [19]**.**

Das Eutrophierungspotenzial stellt die Überdüngung von Gewässern und Böden dar. Es ist zu unterscheiden zwischen natürlicher und anthropogen bedingter Anreicherung. Von Menschen verursachte Eutrophierung entsteht durch Phosphate und Nitrate, die aus Abwässern und der landwirtschaftlichen Düngung durch Niederschläge in die Gewässer gelangen. Als natürlicher Prozess läuft er während der schrittweisen Alterung der Seen ab [19]**.**

Photooxidantienbildungspotenzial oder Sommersmog wird in Form des Ethen-Äquivalents (C_2H_4-Äquivalent) beschrieben. Bodennahes Ozon ist bei hoher Konzentration ein Schadstoff. Es entsteht durch Stickstoffoxide und die Kombination von Kohlenwasserstoffen und Sonneneinstrahlung. Zur Quantifizierung der Ozonbildung durch verschiedene Stoffe wird das photochemische ozonbildende Potenzial festgelegt. Ethen gilt dabei als Referenzwert. Lösemittel zählen zu den auslösenden Baustoffen [18] [19]**.**

Alle fünf Parameter werden für die St. Franziskus-Grundschule bestimmt.

ÖKOBAUDAT

Die ursprünglich vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit herausgegebene „ÖKOBAUDAT“ (Herausgeber seit 2017: Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat) stellt als Baustoffdatenbank das Datenfundament für die Ökobilanzierung der Gebäudeebene, die mittels „Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen“ für Bundesgebäude (BNB) und Zertifizierungssystem der Deutschen Gesellschaft Nachhaltiges Bauen e. V. (DGNB) durchgeführt wird, dar. Sie ist ein Instrument zur Bestimmung globaler ökologischer Wirkungen auf die Umwelt und für jeden frei zugänglich (als Download oder Online). Damit ist eine einheitliche Grundlage für die Bewertung geschaffen. Gegliedert ist die Datenbank in folgende Kategorien [9]:

- Mineralische Baustoffe
- Dämmstoffe
- Holzprodukte
- Metalle
- Anstriche und Dichtmassen
- Bauprodukte aus Kunststoffen
- Komponenten von Fenstern
- Türen und Vorhangfassaden
- Gebäudetechnik
- Sonstiges

Die Datensätze lassen sich verschiedenen Typen zuordnen. Zum einen den generischen Datensätzen, die auf technischem Wissen oder der Literatur basieren und mit Sicherheitszuschlägen versehen sind. Auf der anderen Seite stehen firmen- oder verbandsspezifische Datensätze aus Umweltdeklarationen. Diese sind entweder aus repräsentativen oder durchschnittlichen Daten erhoben. Die Datenbank auf ihrem aktuellsten Stand vom September 2018 umfasst über 1000 verschiedene Bauprodukte.

Nach DIN EN 15804 ist eine Einordnung der Datensätze in die verschiedenen Lebenswegmodule A bis D notwendig. Darin stehen die Module A1 bis A3 für die Herstellungsphase, die Module A4 und A5 für die Errichtungsphase (Bau/Einbau inklusive Transport zur Baustelle). Die Module B1 bis B7 umfassen die Nutzungsphase, die Module C1 bis C4 die Entsorgungsphase (inklusive Abbruch und Transport) und das Modul D die Recycling-, Rückgewinnung- oder Wiederverwendungspotenziale.

Die Module A1 bis A3 werden in der „ÖKOBAUDAT“ zusammengefasst und werden auch für die St. Franziskus-Grundschule bestimmt.

Interpretation der Ergebnisse

Im letzten Schritt der Ökobilanz werden die Ergebnisse zusammengefasst, die Wirkungspotenziale bewertet sowie interpretiert und daraus letztlich Schlussfolgerungen gezogen.

Für die St. Franziskus-Grundschule wird ein Vergleich der Daten der Herstellung (Phase A) sowie den gemessenen Verbrauchswerten für Fernwärme, Strom und Wasser (Phase B) gezogen. Die Phasen C und D bleiben – aufgrund fehlender Daten für viele Stoffe – ohne Detailauswertung.

5.2 Gesamtergebnisse

Tabelle 5-1 zeigt die zusammengefassten Ergebnisse der Ökobilanzierung der Baustoffe mit den 4 Parametern der Sachbilanz sowie den 5 Parametern der Wirkungsabschätzung. Neben der Summenbildung sind die Aufteilungen nach Gewerken und Stoffgruppen erfolgt.

Aufgrund der installierten Massen bzw. Volumina führt die Gebäudehülle samt dem Innenausbau zum größten Energie- und Süßwasseraufwand. Bei den Wirkungsabschätzungen kehrt sich das Bild allerdings um. Das globale Erwärmungspotential ist bei den TGA-Anlagen aufgrund des hohen Metalleinsatzes am größten. Die Bodenbeläge und Wandfarben des Innenaufbaus haben unter den Gewerkegruppen das größte Eutrophierungspotential.

Eine Einzelaufstellung aller 87 verschiedenen Stoffe bzw. Bauelemente liefern die Tabellen im Anhang 6.4. Es ist darin ebenfalls die angesetzte Lebensdauer zur Umrechnung der Absolutwerte in die Jahreswerte zu finden. Der separate Anhang C zu diesem Bericht enthält die Originaltabellen.

Tabelle 5-1: Ergebnisse der Ökobilanzierung mit Gewerke- und Stoffgruppensummen

Bauteile	Sachbilanz				Wirkungsabschätzung				
	Total Erneuerbare Primärenergie (PERT)	Total Nicht-erneuerbare Primärenergie (PENRT)	Totale Primärenergie (PE)	Einsatz von Süßwasserressourcen (FW)	Globales Erwärmungspotenzial (GWP)	Abbau Potenzial der stratosphärischen Ozonschicht (ODP)	Versauerungspotenzial von Boden und Wasser (AP)	Eutrophierungspotenzial (EP)	Bildungspotenzial für troposphärisches Ozon
	[MJ]	[MJ]	[MJ]	[m³]	[kg CO_2-Äqv]	[kg CFC11-Äqv]	[kg SO_2-Äqv]	[kg Phosphat-Äqv]	[kg Ethen-Äqv]
Summe	12.018.518	15.951.925	27.970.443	341.399	68.931	0,01069	3011	498,9	352,2
Aufteilung nach Gewerken									
Fundament und Außenhülle	5.698.024	5.391.261	11.089.285	151.675	-172.931	0,00585252	888,4	141,9	96,59
Innenausbau und Treppen	3.636.135	4.032.564	7.668.700	184.635	-34.946	0,00379973	805,3	101,0	97,37
Bodenbeläge und Wandfarben	2.038.026	2.164.637	4.202.663	3.322	37.032	0,00100786	467,5	187,0	49,09
Sanitärausstattung und Solarthermie	30.220	249.369	279.589	96	17.540	0,00000171	96,3	5,7	6,42
Lüftung, Heizung und Pumpen	125.962	2.403.860	2.529.822	505	109.193	0,00000445	329,8	29,2	46,78
Elektroausstattung, Beleuchtung und PV	490.150	1.710.235	2.200.385	1.167	113.043	0,00002441	423,6	34,1	56,24
Aufteilung nach Stoffgruppen									
Metalle	276.622	2.817.182	3.093.804	138.269	223.384	0,00029792	776,5	63,5	89,30
Mineralische Baustoffe	161.084	1.822.212	1.983.296	40.573	147.448	0,00209197	328,0	72,4	20,85
Kunststoffe	646.661	3.056.344	3.703.005	17.584	107.663	0,00020439	396,9	167,8	48,03
Holz und Holzwerkstoffe	10.048.784	5.589.401	15.638.185	143.074	-569.397	0,00632498	812,3	125,8	106,92
Fenster und Türen	374.210	810.142	1.184.352	142	34.116	0,00174360	209,8	31,0	27,96
Beleuchtung	18.802	219.538	238.341	584	14.630	0,00000235	43,5	4,8	3,24
Geräte	17.697	139.759	157.457	65	10.840	0,00000177	51,6	3,6	4,38
PV und Solar	474.658	1.497.347	1.972.004	1.108	100.247	0,00002371	392,5	30,0	51,52

Für das gesamte Gebäude ergeben sich absolute Kennwerte, mittlere Jahreswerte sowie flächenbezogene Jahreswerte. Sie werden nachfolgend ausgewertet und eingeordnet. Zum Vergleich der Kennzahlen sind die Verbrauchswerte bzw. die daraus abgeleiteten Primärenergiekennwerte und CO_2-Äquivalente geeignet.

Primärenergie

Die Erstellung des Gebäudes führt unter Beachtung der Lebensdauern der einzelnen Baustoffe und Bauteile zu einem gesamten Primärenergieeinsatz von 59,4 kWh/(m²a). Davon sind 34,5 kWh/(m²a) nicht erneuerbar.

- Erneuerbare Primärenergie:
  - absolut: 12.018.518 MJ = 3.338.477 kWh
  - jährlich: 277.380 MJ/a = 77.050 kWh/a
  - jährlich, flächenbezogen: 25,0 kWh/(m²a)
- Nicht erneuerbare Primärenergie:
  - absolut: 15.951.925 MJ = 4.431.090 kWh
  - jährlich: 382.741 MJ/a = 106.317 kWh/a
  - jährlich, flächenbezogen: **34,5 kWh/(m²a)**
- Gesamte Primärenergie:
  - jährlich, flächenbezogen: 59,4 kWh/(m²a)

Der Gebäude hat folgende Verbrauchswerte für Fernwärme und Strom, die mit Hilfe von Primärenergiefaktoren in die nichterneuerbare Primärenergie umgerechnet werden.

- Fernwärme, witterungskorrigiert, Mittel 2015 – 2017:
  - jährlich: 34,77 MWh/a
  - jährlich, flächenbezogen: 11,3 kWh/(m²a)
  - nicht erneuerbarer Primärenergiefaktor: 0,21 [20]
  - nicht erneuerbare Primärenergie: 2,4 kWh/(m²a)
- Strom, netto (Verbrauch abzüglich Produktion), Mittel 2015 – 2017:
  - jährlich: 33,27 MWh/a
  - jährlich, flächenbezogen: 10,8 kWh/(m²a)
  - nicht erneuerbarer Primärenergiefaktor: 1,8 [21]
  - nicht erneuerbare Primärenergie: 19,4 kWh/(m²a)
- alle Energieträger:
  - Endenergie: 22,1 kWh/(m²a)
  - nicht erneuerbare Primärenergie: **21,8 kWh/(m²a)**

Im Vergleich ist festzustellen, dass der auf die Lebensdauer umgelegte Primärenergieeinsatz für die Erstellung des Gebäudes 60 % oberhalb der Menge des laufenden Betriebs liegt. Wäre das Gebäude als Massivbau ohne Holz- und Zelluloseeinsatz erstellt worden, läge der Herstellungsaufwand über dem des laufenden Verbrauchs.

Süßwasserressourcen

Die Herstellung des Gebäudes führt zu einem auf die Zeit umgelegten Wassereinsatz von 6.556 m³/a. Dem gegenüber steht ein Trinkwassereinsatz in der Nutzung von nur ca. 609 m³/a (ohne Regenwasser). Damit ist die Nutzungsdauer für den Lebenszyklus nicht entscheidend.

- Einsatz von Süßwasserressourcen bei der Herstellung:
  - absolut: 341.399 m³
  - jährlich: 6.556 m³/a

- Einsatz von Trinkwasser in der Nutzung (Mittelwerte 2015 – 2017):
  - jährlich: 609 m³/a

Dies bedeutet natürlich nicht, dass während der Nutzungszeit mit der Ressource verschwenderisch umgegangen werden soll. Jedoch zeigt es, dass die Produktionsprozesse für das Gebäude entscheidend sind. Dabei fallen insbesondere Metalle, aber auch die Zellulosefasern als entscheidende Positionen auf.

Äquivalente CO_2-Emissionen

Der Vorteil des Holzbaus sowie die Verwendung von teilweise recycelten Materialien zeigt sich am besten bei der Betrachtung der äquivalenten CO_2-Emissionen. Der auf die Lebensdauer umgelegten Menge aus der Gebäudeerstellung von 1,3 kg/(m²a) stehen 7,9 kg/(m²a) in der Nutzung gegenüber.

- Äquivalente CO_2-Emissionen bei der Herstellung:
  - absolut: 68.931 kg
  - jährlich: 3.968 kg/a
  - jährlich, flächenbezogen: 1,3 kg/(m²a)

- Äquivalente CO_2-Emissionen für die Nutzung der Energieträger:
    - Fernwärmeverbrauch jährlich, flächenbezogen: 11,3 kWh/(m²a)
    - Bewertung der Fernwärme: 169,7 g/kWh [20]
    - Stromverbrauch jährlich, flächenbezogen: 10,8 kWh/(m²a)
    - Bewertung des Stroms: 550 g/kWh [21]
    - CO_2-Menge, flächenbezogen: 7,9 kg/(m²a)

Hier lässt sich in der Nutzungsphase noch deutliches Einsparpotential generieren, wenn der Strom ökologischer wird – egal ob Netzstrom oder selbst produzierter Strom. Darüber hinaus ist der sehr geringe Wärmeverbrauch des Gebäudes von Vorteil, am Strom könnte es noch Ersparnisse geben.

5.3 Ergebnisse nach Gewerkegruppen

Die nachfolgenden Grafiken stellen die Primärenergie, den Süßwassereinsatz sowie die CO_2-Emissionen für einzelne Gewerke und deren Untergruppen zusammen. Es wird unterschieden in folgende Gewerke (Untergruppen ggf. in Klammern):

- Fundament und Außenhülle (Außenwand, Außenfenster und Türen, Fundament, Bodenplatte, Dach)
- Innenausbau und Treppen (Decken, Treppenhäuser und Treppen, Innenwände, Innenfenster und Türen)
- Bodenbeläge und Wandfarben
- Sanitärausstattung und Solarthermie
- Lüftung, Heizung und Pumpen
- Elektroausstattung, Beleuchtung und PV

Gesamtprimärenergie

Abbildung 5-1 und Abbildung 5-2 zeigen die Kennzahlen der Gesamtprimärenergie. Auffällig sind die Bodenbeläge – Laminat und Linoleum – welche energieintensiv hergestellt werden. Die beiden Produkte sind energieintensiver als Edelstahl (bezogen auf die Masse). Bei der Lüftungsausstattung schlägt die sehr große Metallmasse zu Buche, bei der Elektrotechnik die Photovoltaikanlage. Dagegen sind die sonstigen Konstruktionselemente der Gebäudehülle weniger energieintensiv.

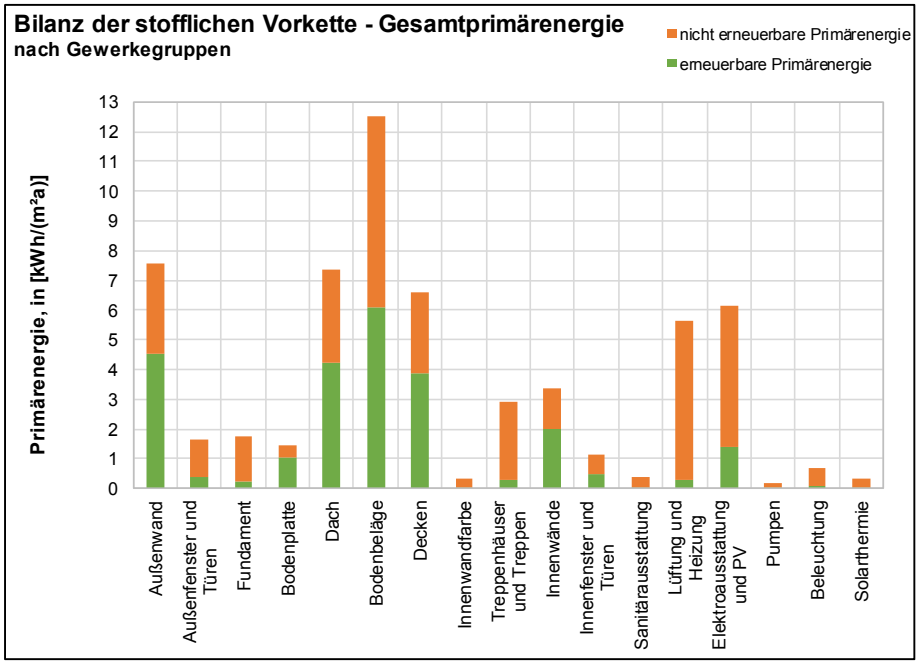


Abbildung 5-1: Gesamtprimärenergie – Zusammenfassung nach Gewerkegruppen

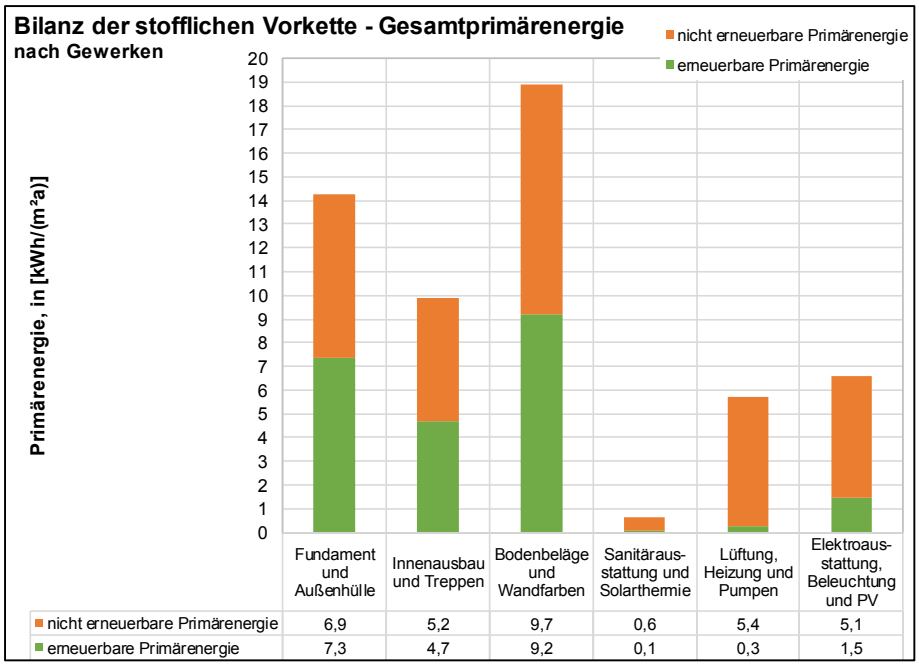


Abbildung 5-2: Gesamtprimärenergie – Zusammenfassung nach Gewerken

CO_2-Äquivalent

Abbildung 5-3 und Abbildung 5-4 zeigen das globale Erwärmungspotential. Die überwiegend aus Holz bestehenden Konstruktionselemente binden CO_2 und führen zu negativen Kennwerten. Auffällig sind die Elemente mit hohem Stahl- und Betoneinsatz: Treppenhäuser sowie Lüftungsanlage. Darüber hinaus ist auch die Photovoltaikanlage als Teil der Elektrotechnik ein Verursacher für CO_2-Emissionen.

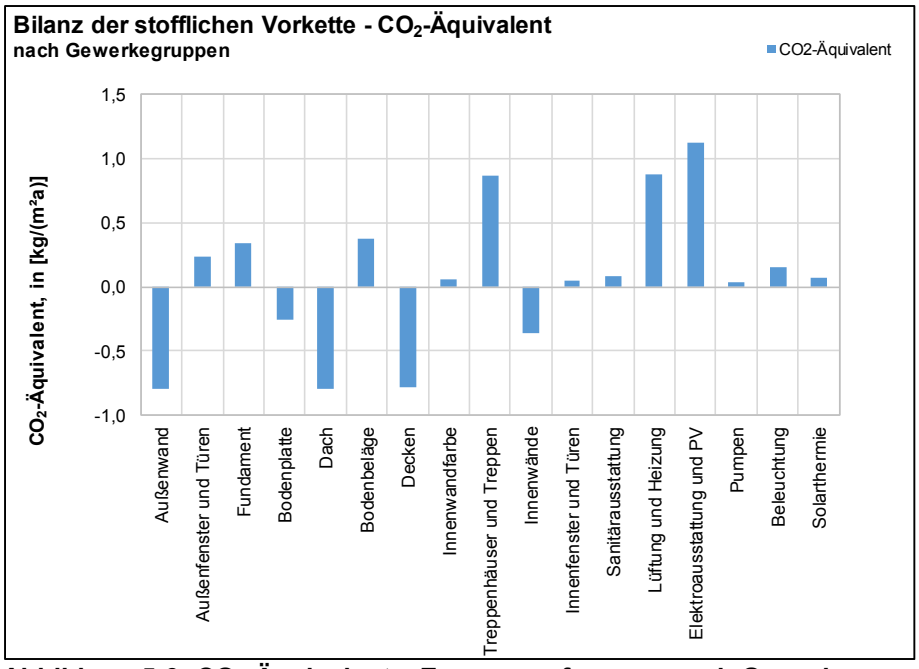


Abbildung 5-3: CO_2-Äquivalent – Zusammenfassung nach Gewerkegruppen

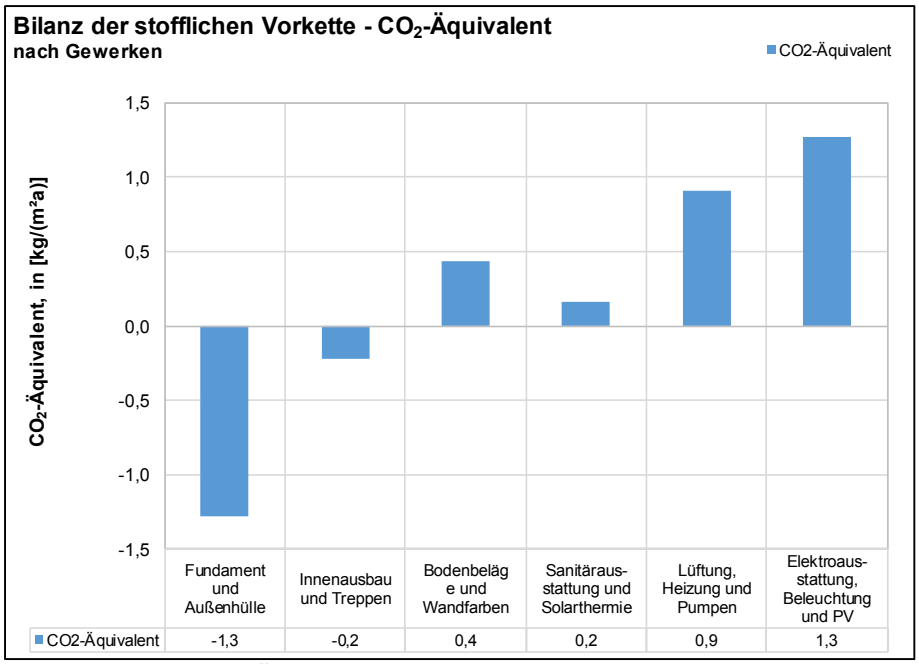


Abbildung 5-4: CO_2-Äquivalent – Zusammenfassung nach Gewerken

Süßwasserverbrauch

Hinsichtlich des Süßwasserverbrauchs fallen die Bauteile aus Holz und mit Zellulosefüllung auf, siehe Abbildung 5-5 und Abbildung 5-6. Am intensivsten ist jedoch der Einsatz von Wasser bei den Betonteilen, d. h. hier in den Betontreppenhäusern.

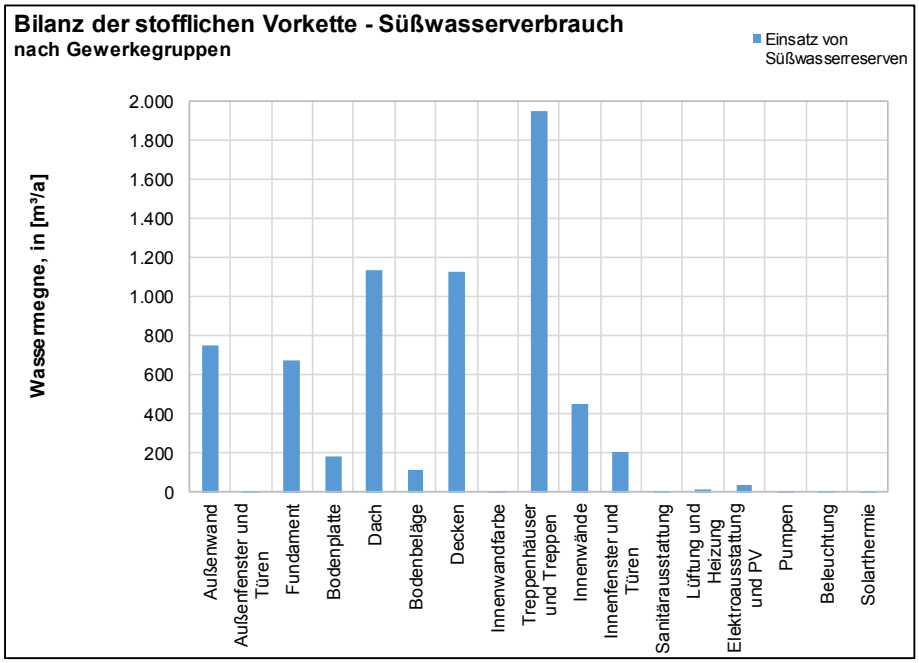


Abbildung 5-5: Süßwasserverbrauch – Zusammenfassung nach Gewerkegruppen

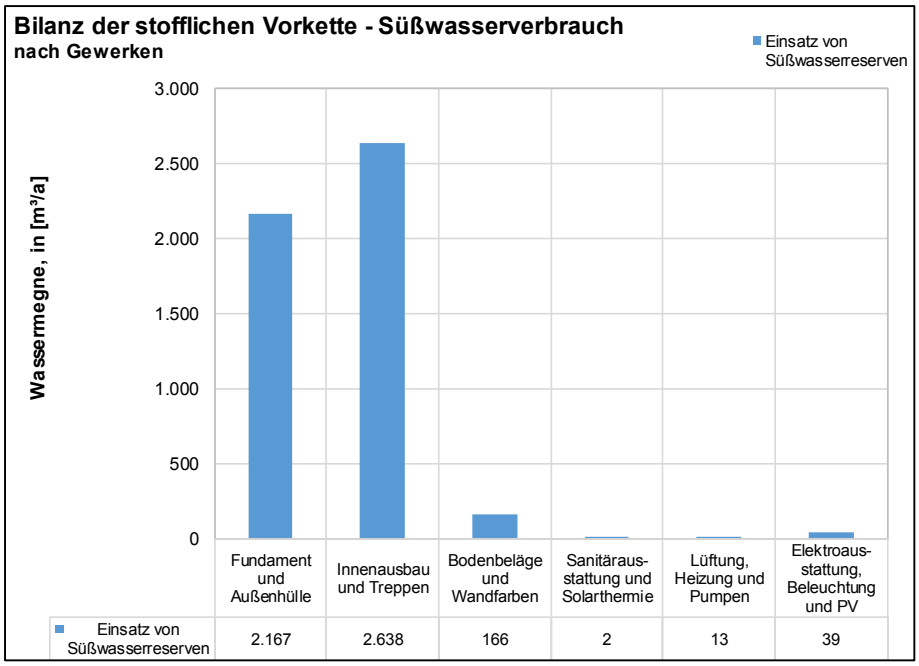


Abbildung 5-6: Süßwasserverbrauch – Zusammenfassung nach Gewerken

5.4 Massen und Volumina

Tabelle 5-2 stellt abschließend die Massen und Volumina der Baustoffe zusammen – jeweils soweit diese erhoben wurden. Keine Angaben gibt es zu Fenstern und Türen, der Pfosten-Riegel-Fassade, den Innenwandfarben, Lüftungsgeräten, der Beleuchtung, der Photovoltaik-anlage, den Pumpen und Solarkollektoren.

Tabelle 5-2: Massen- und Volumensummen der Baustoffe

Element	Volumen [m³]	Masse [t]	Dicht [kg/m³]
Außenwand	857	173	202
Fundament	1240	1397	1126
Bodenplatte	230	50	219
Dach	660	203	308
Bodenbeläge	52	68	1306
Decken	1047	167	160
Treppenhäuser	148	370	2496
Innenwände	317	77	243
Summe Gebäudehülle	4551	2506	551
Sanitärausstattung	k. A.	3	k. A.
Heizung und Lüftung	k. A.	39	k. A.
Elektroinstallation	k. A.	3	k. A.
Solarthermie	k. A.	1	k. A.
Summe TGA	k. A.	46	k. A.

Die Masse der tabellierten Bauteile (2552 t) führt zu 64 LKW-Ladungen mit einem 40-Tonner. Ausgehend von der Nutzerzahl ergibt sich eine Baustoffmasse von 11 Tonnen/Person.

Im Schnitt weist die Baukonstruktion (einschließlich aller Massivbauteile) eine Dichte von 550 kg/m³ auf. Die Holzbauteile liegen im Bereich 200 … 300 kg/m³, die Massivbauteile weit über 1000 kg/m³. Bei einem Massivbau läge der Massenbedarf also ungleich höher.

6 Anhang

6.1 Literatur

[1] VDI 3807 Blatt 2, *Verbrauchskennwerte für Gebäude - Verbrauchskennwerte für Heizenergie, Strom und Wasser,* Berlin: Beuth, 2014.

[2] K. Voss und et al, Performance von Gebäuden, Karlsruhe: Fraunhofer IRB Verlag, 2016.

[3] Ingenieurbüro Naumann & Stahr, „Passivhausnachweis," 2011.

[4] S. Schlehf, „Bachelorarbeit "Zertifizierung der Grundschule Sankt Franziskus als Passivhausschule"," Hochschule Magdeburg-Stendal, Magdeburg, 2014.

[5] K. Muschalla, „Masterarbeit „Energiebilanzierung mit verschiedenen Energiebilanzverfahren für eine Passivhausschule"," Hochschule Magdeburg-Stendal, Magdeburg, 2018.

[6] Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, „Energieeffiziente Kantinen und Gewerbeküchen," in *Protokollband 47*, Darmstadt, 2012.

[7] Ingenieurbüro Naumann & Stahr, *Berechnungsdokumentation gemäß dem integralen Ansatz der DIN V 18599,* Leipzig, 2010.

[8] S. Bethke, „Masterarbeit "Vergleichende energetische Bewertung nach verschiedenen Bilanzmethoden für eine Grundschule in Passivhausbauweise anhand der St. Franziskus-Grundschule in Halle (Saale)"," Hochschule Magdeburg-Stendal, Magdeburg, 2014.

[9] M. Münch, „Masterarbeit "Ökologische Bewertung einer Passivhausschule"," Hochschule Magdeburg-Stendal, Magdeburg, 2015.

[10] I. Asmussen, „Masterarbeit „Energetische Bewertung der Beleuchtung in einer Passivhausschule"," Hochschule Magdeburg-Stendal, Magdeburg, 2015.

[11] H. Neumann und J. Wohlfahrt, „Bachelorarbeit "Ökologische Bewertung einer Passivhausschule mit Schwerpunkt technische Gebäudeausrüstung (TGA)"," Hochschule Magdeburg-Stendal, Magdeburg, 2016.

[12] X. Wang, „Masterarbeit "Ökobilanz für die technische Gebäudeausrüstung einer Passivhausschule"," Hochschule Magdeburg-Stendal, Magdeburg, 2017.

[13] J. Song, „Masterarbeit "Ökobilanz für den Innenausbau einer Passivhausschule"," Hochschule Magdeburg-Stendal, Magdeburg, 2017.

[14] Y. Liu, „Masterarbeit „Ökobilanz für die Elektroausstattung einer Passivhausschule"," Hochschule Magdeburg-Stendal, Magdeburg, 2017.

[15] Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat (BMI), „Ökobaudat," [Online]. Available: http://www.oekobaudat.de/.

[16] B. u. S. Bundesministerium für Verkehr, „Leitfaden Nachhaltiges Bauen," 2013.

[17] C. M. Pohlmann, Dissertation "Ökologische Betrachtung für den Hausbau - Ganzheitliche Energie-und Kohlendioxidbilanzierung für zwei verschiedene Holzhauskonstruktionen", Hamburg, 2002.

[18] H. König, „Ministerium für Ländlichen Raum und Verbraucherschutz," 2014. [Online]. Available: http://forstbw.de/wald-im-land/rohstofflieferant/bauen-mit-holz/urbanes-bauen/kapitel-3-zukunftsfaehiger-baustoff/die-erstellung-von-oekobilanzen.html. [Zugriff am 28 10 2014].

[19] P. Eyerer und H.-W. Reinhardt, Ökologische Bilanzierung von Baustoffen und Gebäuden, Basel: Birkhäuser Verlag, 2000.

[20] EVH Energieversorgung Halle GmbH, „Primärenergiefaktor," 14 02 2014. [Online]. Available: http://www.evh.de/EVH/Grosskunden/Waerme/Primaerenergiefaktor/. [Zugriff am 14 02 2014].

[21] DIN V 18599, *Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung,* Berlin: Beuth, 2016.

[22] PE International AG, „Erläuterungsdokument Ökobaudat," 2013.

[23] S. Jäger und F. Switala, „Masterarbeit "Vergleich von Energiebedarfsbilanzen und Verbrauchs-daten für eine Passivhausschule"," Hochschule Magdeburg-Stendal, Magdeburg, 2016.

[24] M. Könnig, „Masterarbeit "Analytische Auswertung der St. Franziskus-Grundschule"," Hochschule Magdeburg-Stendal, Magdeburg, 2018.

[25] Y. Guo, „Masterarbeit "Detailanalyse für eine elektrisch versorgte Wohnung in Passivhausbauweise"," Hochschule Magdeburg-Stendal, Magdeburg, 2018.

[26] Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, „Passivhaus-Schulen," in *Protokollband Passivhaus-Schulen*, Darmstadt, 2006.

6.2 Nomenklatur

Tabelle 6-1: Lateinische Formelzeichen

Formelzeichen	Erläuterung	Einheit
A	Fläche	m²
e	Aufwandszahl	-, %
f	Faktor	-, %
H_T'	flächenbezogener Transmissionswärmeverlust	W/(m²K)
n, n_{50}	Luftwechselrate	h^{-1}
q	flächenbezogene Energiemenge	kWh/(m²a)
Q	Energiemenge	kWh/a
$\dot{q}$	flächenbezogene Leistung	W/m²
U	Wärmedurchgangskoeffizient	W/(m²K)
V	Volumen	m³

Tabelle 6-2: Griechische Formelzeichen

Formelzeichen	Erläuterung	Einheit
α	Deckungsanteil	-, %

Tabelle 6-3: Indices

Index	Erläuterung
c	Kühlung
e	extern
E	End(energie)
EB	Energiebezug(sfläche)
f	End(energie)
FW	Fernwärme
H	Hüll(fläche)
h	Heizung
H	Heizung
HE	Hilfsenergie
i	intern
l	Beleuchtung
max	maximal
NGF	Nettogrund(fläche)
P	Primär(energie)
PV	Photovoltaik
TW	Trinkwarmwasser
v	Lüftung
w	Warmwasser

Tabelle 6-4: Abkürzungen

Kürzel	Erläuterung
CO_2	Kohlenstoffdioxid
DIN	Deutsches Institut für Normung; deutsche Norm
DIN V	Deutsches Institut für Normung; deutsche Vornorm
DN	engl. Diameter Nominal, Nennweite (von Rohren etc.)
DWD	Deutscher Wetterdienst
EN	Europäische Norm
EnEV	Energieeinsparverordnung (Jahr 2009)
EnOB	(Forschung für) Energieoptimiertes Bauen
EnSan	(Forschung für) Energieoptimiertes Bauen in der Sanierung
EWT	Erdwärmetauscher, Erdwärmeübertrager
ISO	International Standardisation Organisation; internationale Norm
PV	Photovoltaik
RLT	Raumlufttechnik
TGA	Technische Gebäudeausrüstung
PHPP	Passivhausprojektierungspaket
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
PERT	Primärenergie erneuerbar
PENRT	Primärenergie nicht erneuerbar
GWP	Treibhauspotenzial
ODP	Ozonabbaupotenzial
SM	Einsatz von Sekundärstoffen
HWD	Gefährlicher Abfall zur Deponie
MFR	Stoffe zum Recycling
AP	Versauerungspotenzial
EP	Eutrophierungspotenzial
POCP	Photooxidantienbildungspotenzial
PE	Primärenergie
NGF	Nettogrundfläche
SFP	Spezifische Ventilatorenergie
WRG	Wärmerückgewinnung
FW	Einsatz von Süßwasserressourcen
BNB	Bewertung Nachhaltiges Bauen
DGNB	Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen
FCKW	Fluorchlorkohlenwasserstoffe

6.3 Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abbildung 1-1: Sankeydiagramm witterungskorrigierter Fernwärmeverbrauch 2017 7
Abbildung 1-2: Sankeydiagramm Stromverbrauch 2017 8
Abbildung 1-3: Sankeydiagramm Wasserverbrauch 2017 9
Abbildung 1-4: Passivhausnachweis 2018 10
Abbildung 1-5: Ergebnisse des Energieausweises 2018 11
Abbildung 2-1: Flächenzusammenstellung NGF zur Kennwertbildung 15
Abbildung 2-2: Sankeydiagramm witterungskorrigierter Fernwärmeverbrauch 2015 16
Abbildung 2-3: Sankeydiagramm witterungskorrigierter Fernwärmeverbrauch 2017 17
Abbildung 2-4: Sankeydiagramm witterungskorrigierter Fernwärmeverbrauch 2016 17
Abbildung 2-5: Monatlicher Fernwärmeverbrauch 2016/17 nach Nutzern 18
Abbildung 2-6: Sankeydiagramm Stromverbrauch 2015 19
Abbildung 2-7: Sankeydiagramm Stromverbrauch 2016 20
Abbildung 2-8: Sankeydiagramm Stromverbrauch 2017 20
Abbildung 2-9: Monatlicher Stromverbrauch 2016/17 nach Nutzern 21
Abbildung 2-10: Sankeydiagramm Wasserverbrauch 2015 22
Abbildung 2-11: Sankeydiagramm Wasserverbrauch 2016 22
Abbildung 2-12: Sankeydiagramm Wasserverbrauch 2017 23
Abbildung 2-13: Monatlicher Trinkwasserverbrauch 2016/17 nach Nutzern 24
Abbildung 2-14: Monatlicher Brauchwasserverbrauch 2016/17 nach Nutzern 24
Abbildung 2-15: Monatliche Energiebilanz der Schule mit Hort und Verwaltung 2016/17 26
Abbildung 2-16: Monatliche Wasserbilanz der Schule mit Hort und Verwaltung 2016/17 27
Abbildung 2-17: Monatliche Energiebilanz der Küche 2016/17 28
Abbildung 2-18: Monatliche Wasserbilanz der Küche 2016/17 29
Abbildung 2-19: Monatliche Energiebilanz der Hausmeisterwohnung 2016/17 30

Abbildung 2-20: Monatliche Wasserbilanz der Hausmeisterwohnung 2016/17 31
Abbildung 3-1: Passivhausnachweis 2018 36
Abbildung 4-1: Öffentlicher Aushang 2014 41
Abbildung 4-2: Ergebnisse des Energieausweises 2018 42
Abbildung 5-1: Gesamtprimärenergie – Zusammenfassung nach Gewerkegruppen 53
Abbildung 5-2: Gesamtprimärenergie – Zusammenfassung nach Gewerken 54
Abbildung 5-3: CO_2-Äquivalent – Zusammenfassung nach Gewerkegruppen 54
Abbildung 5-4: CO_2-Äquivalent – Zusammenfassung nach Gewerken 55
Abbildung 5-5: Süßwasserverbrauch – Zusammenfassung nach Gewerkegruppen 55
Abbildung 5-6: Süßwasserverbrauch – Zusammenfassung nach Gewerken 56
Abbildung 6-1: Sankeydiagramm nicht witterungskorrigierter Fernwärmeverbrauch 2015 66
Abbildung 6-2: Sankeydiagramm nicht witterungskorrigierter Fernwärmeverbrauch 2016 66
Abbildung 6-3: Sankeydiagramm nicht witterungskorrigierter Fernwärmeverbrauch 2017 67

Tabelle 1-1: Ergebnisse der Ökobilanzierung mit Summen der Gewerkengruppen 12
Tabelle 3-1: Ergebnisse des Passivhausnachweises 33
Tabelle 3-2: Hinweise zum Passivhausnachweis 37
Tabelle 4-1: Ergebnisse des EnEV-Nachweises 39
Tabelle 4-2: Hinweise zum EnEV-Nachweis 43
Tabelle 4-3: Variantenberechnung 2014 [8] 44
Tabelle 4-4: Variantenberechnung 2017 [5] 44
Tabelle 5-1: Ergebnisse der Ökobilanzierung mit Gewerke- und Stoffgruppensummen 51
Tabelle 5-2: Massen- und Volumensummen der Baustoffe 56
Tabelle 6-1: Lateinische Formelzeichen 58
Tabelle 6-2: Griechische Formelzeichen 58
Tabelle 6-3: Indices 58
Tabelle 6-4: Abkürzungen 58
Tabelle 6-5: Ergebnisse der Ökobilanzierung mit Summen der Gewerkegruppensummen 61
Tabelle 6-6: Detaillierte Ergebnisse der Ökobilanzierung – Primärenergie PERT und PENRT 61
Tabelle 6-7: Detaillierte Ergebnisse der Ökobilanzierung – Süßwasser, GWP und ODP 62
Tabelle 6-8: Detaillierte Ergebnisse der Ökobilanzierung – AP, EP und POCP 64
Tabelle 6-9: Planer, Ausführende Projektbeteiligte 68

6.4 Weitere Ergebnisse der Ökobilanzierung

Tabelle 6-5: Ergebnisse der Ökobilanzierung mit Summen der Gewerkegruppensummen

Bauteile	Sachbilanz				Wirkungsabschätzung				
	Total Erneuerbare Primärenergie (PERT)	Total Nicht-erneuerbare Primärenergie (PENRT)	Totale Primärenergie (PE)	Einsatz von Süßwasserressourcen (FW)	Globales Erwärmungspotenzial (GWP)	Abbau Potenzial der stratosphärischen Ozonschicht (ODP)	Versauerungspotenzial von Boden und Wasser (AP)	Eutrophierungspotenzial (EP)	Bildungspotenzial für troposphärisches Ozon
	[MJ]	[MJ]	[MJ]	[m³]	[kg CO_2-Äqv]	[kg CFC11-Äqv]	[kg SO_2-Äqv]	[kg Phosphat-Äqv]	[kg Ethen-Äqv]
Außenwand	2.518.386	1.686.617	4.205.004	37.513	-122.782	0,00153581	233,7	28,1	32,03
Außenfenster und Türen	179.196	550.265	729.461	122	29.373	0,00069009	154,5	21,9	19,17
Fundament	199.842	1.365.495	1.565.337	54.204	83.502	0,00160275	207,8	50,1	9,31
Bodenplatte	918.067	392.647	1.310.714	14.464	-64.399	0,00067749	67,2	10,9	8,04
Dach	1.882.533	1.396.236	3.278.769	45.371	-98.625	0,00134638	225,4	30,9	28,05
Bodenbeläge	2.036.177	2.129.020	4.165.197	3.314	35.195	0,00100736	437,9	186,4	48,50
Decken	2.161.343	1.502.480	3.663.823	56.421	-120.011	0,00137294	272,0	40,1	28,56
Innenwandfarbe	1.849	35.617	37.466	8	1.838	0,00000051	29,6	0,6	0,59
Treppenhäuser und Treppen	148.256	1.471.647	1.619.903	97.501	134.349	0,00030929	368,7	35,5	47,20
Innenwände	1.111.735	763.401	1.875.136	22.551	-54.935	0,00058356	100,7	15,6	11,87
Innenfenster und Türen	214.801	295.036	509.838	8.162	5.650	0,00153394	63,8	9,9	9,75
Sanitärausstattung	13.490	157.014	170.504	54	11.006	0,00000040	56,1	3,4	3,73
Lüftung und Heizung	124.191	2.387.174	2.511.365	498	108.000	0,00000435	324,3	28,8	46,38
Elektroausstattung und PV	473.948	1.570.715	2.044.663	1.117	103.703	0,00002316	391,3	30,8	53,06
Pumpen	1.771	16.686	18.457	7	1.193	0,00000010	5,5	0,4	0,40
Beleuchtung	16.202	139.520	155.722	50	9.339	0,00000125	32,4	3,3	3,18
Solarthermie	16.730	92.355	109.085	41	6.534	0,00000131	40,2	2,4	2,69

Tabelle 6-6: Detaillierte Ergebnisse der Ökobilanzierung – Primärenergie PERT und PENRT

Bauteile	Lebensdauer	Total Erneuerbare Primärenergie (PERT)		Total Nichterneuerbare Primärenergie (PENRT)		Totale Primärenergie (PE)	
	[a]	[MJ]	[MJ·a]	[MJ]	[MJ·a]	[MJ]	[MJ·a]
Akustikplatte Heradesign	30	44.220	1.474	77.400	2.580	121.620	4.054
Aluminium eloxiert	50	30.634	613	94.332	1.887	124.966	2.499
Armaturen Edelstahl	30	33	1	308	10	341	11
Armaturen Messing	30	197	7	1.245	42	1.442	48
Becken aus Edelstahl	30	1.386	46	13.001	433	14.387	480
Befestigungsmittel	50	10.185	204	176.400	3.528	186.585	3.732
Beton C30/37	80	11.346	142	135.000	1.688	146.346	1.829
Beton C50/60 unbewehrt	80	11.404	143	143.481	1.794	154.884	1.936
Bewehrungsstahl	80	39.695	496	358.535	4.482	398.230	4.978
Bimskörnung (Ausgleichsschüttung)	50	229	5	2.411	48	2.640	53
Brettschichtholz (BSH)	50	1.163.302	23.266	554.976	11.100	1.718.277	34.366
Dispersionsgrundierung	20	23	1	2.258	113	2.281	114
Dünnbettmörtel	30	4.411	147	31.673	1.056	36.084	1.203
Edelstahlblech	50	34	1	682	14	716	14
Edelstahlrohr	50	15.567	311	131.751	2.635	147.318	2.946
Eiche	30	22.901	763	6.332	211	29.233	974
EPDM-Dachabdichtung	20	154	8	1.649	82	1.803	90
Fassadentafel Cedral-Eternit	50	30.676	614	104.144	2.083	134.820	2.696
Fenster	40	180.035	4.501	530.441	13.261	710.476	17.762
Fliesenkleber	30	371	12	3.559	119	3.929	131
Foamglasdämmung	50	26.907	538	6.115	122	33.022	660
Fugendichtungsband aus Butyl	30	2.379	79	98.722	3.291	101.100	3.370
Fugendichtungsband aus PE-/PP-Folie	30	193	6	8.497	283	8.690	290
Geberitverbundrohr	30	492	16	4.508	150	5.000	167
Gehäuse Downlight 18W (CFL,G24D)	20	2.226	111	10.993	550	13.219	661

Bauteile	Le-bens-dauer	Total Erneuerbare Primärenergie (PERT)		Total Nichterneuer-bare Primärenergie (PENRT)		Totale Primärenergie (PE)	
	[a]	[MJ]	[MJ·a]	[MJ]	[MJ·a]	[MJ]	[MJ·a]
Gipskartonplatte (gelocht)	50	505	10	6.977	140	7.482	150
Gipskartonplatte (imprägn.)	50	14.633	293	250.676	5.014	265.310	5.306
Glasfaserplatte	50	18.109	362	561.676	11.234	579.785	11.596
Glasvlies (Glasfaser)	50	427	9	7.525	150	7.951	159
Grobspanplatte OSB/4	50	3.954.475	79.090	1.378.593	27.572	5.333.068	106.661
Holzfaserdämmplatte	50	1.912.151	38.243	1.123.598	22.472	3.035.749	60.715
Holz-Hauseingangstür Thermosafe	30	17.907	597	24.490	816	42.397	1.413
Innentüren aus Holz/Holzwerkstoffen	30	155.538	5.185	143.567	4.786	299.105	9.970
Kies (getrocknet)	80	829	10	63.332	792	64.161	802
Kompaktleuchtstofflampe 18W (Vorschaltgerät extern)	20	95	5	1.075	54	1.170	58
Konstruktionsvollholz (KVH)	50	2.122.412	42.448	854.449	17.089	2.976.861	59.537
Küchengeräte aus Edelstahl	20	3.384	169	31.745	1.587	35.129	1.756
Kupfer	50	9.373	187	50.911	1.018	60.284	1.206
Kupferrohr	50	381	8	5.782	116	6.163	123
Laminat	20	289.586	14.479	188.320	9.416	477.905	23.895
Leuchtstoffröhre T5-14W	10	14	1	116	12	129	13
Leuchtstoffröhre T5-28W	10	240	24	2.018	202	2.259	226
Leuchtstoffröhre T5-36W	10	26	3	213	21	239	24
Leuchtstoffröhrenfsg. T8-18W (LFL)	20	312	16	5.776	289	6.088	304
Leuchtstoffröhrenfsg. T8-36W (LFL)	20	41	2	1.037	52	1.079	54
Lichtschalter	20	156	8	1.803	90	1.959	98
Linoleum	20	548.976	27.449	734.451	36.723	1.283.427	64.171
Lüftungsgeräte mit WRG	30	12.580	419	81.911	2.730	94.491	3.150
Lüftungskanal (verkintes Stahlblech)	50	29.700	594	546.538	10.931	576.239	11.525
mineralischer Mörtel (Ausgleich)	50	2.502	50	15.885	318	18.386	368
Mineralwolle	50	2.084	42	25.597	512	27.682	554
Mitteldichte Holzfaserplatte (MDF) be-schichtet	50	2.042	41	-723	-14	1.318	26
Natursteinplatte weich (Marmor)	50	1.049	21	10.279	206	11.328	227
PE-HD-Rohr	50	63.164	1.263	1.664.306	33.286	1.727.469	34.549
PE-Noppenfolie	30	273	9	16.210	540	16.483	549
PE-Schaum	50	8.208	164	8.208	164	16.416	328
Pfosten-Riegel-Fassade	40	20.730	518	111.644	2.791	132.374	3.309
Photovoltaik	30	460.377	15.346	1.441.563	48.052	1.901.940	63.398
Polypropylen (PP) Unterspannbahn	50	2.100	42	91.066	1.821	93.166	1.863
Powerpaneel TE	50	7.704	154	68.872	1.377	76.576	1.532
Pufferspeicher Stahl	30	1.254	42	21.672	722	22.926	764
Pumpen	20	1.771	89	16.686	834	18.457	923
PVC	50	3.514	70	70.338	1.407	73.853	1.477
PVC -Dachabdichtungsbahn	30	4.747	158	98.493	3.283	103.240	3.441
PVC-Rohr	50	88	2	1.431	29	1.519	30
Rasterleuchte 2x T8-36 (LFL)	20	6.457	323	35.158	1.758	41.615	2.081
Rasterleuchte Deckenintegriert 3x T5-14W (LFL)	20	893	45	4.534	227	5.427	271
Sanitärkeramik	30	1.037	35	32.581	1.086	33.618	1.121
Schaumglasschotter	80	9.957	124	572.453	7.156	582.411	7.280
Schnittholz Zeder (Thermoholz)	50	313.483	6.270	92.954	1.859	406.437	8.129
Schotter (Betonrecycling)	80	36.659	458	299.849	3.748	336.509	4.206
Solaranlage Flachkollektor	30	14.280	476	55.784	1.859	70.064	2.335
Splitt (getrocknet)	80	2.598	32	45.558	569	48.156	602
Stabparkett	40	121.884	3.047	359.109	8.978	480.994	12.025
Stahlprofil	50	93.965	1.879	1.338.623	26.772	1.432.588	28.652
Steckdose	20	528	26	6.100	305	6.627	331
Steinwolle (Steinfaser)	50	8	0	404	8	413	8
Steinzeugfliese	30	2.035	68	67.973	2.266	70.008	2.334
Tectofin Dachabdichtung	30	12.349	412	256.209	8.540	268.559	8.952
VARIFLEX Raumtrennsystem	40	19.787	495	35.160	879	54.947	1.374
Volumenstromregler VRE,VR	20	1.050	53	18.200	910	19.250	963
Vorschaltgerät EVG	20	3.128	156	40.179	2.009	43.307	2.165
Wandfarbe (weiß)	10	1.849	185	35.617	3.562	37.466	3.747
Wannenleuchte (Feuchtraum) T8-36W	20	2.771	139	38.420	1.921	41.191	2.060
Zellulosefaser	50	100.948	2.019	366.087	7.322	467.035	9.341
Zementestrich	30	325	11	21.205	707	21.531	718
Zementmörtel	30	70	2	3.249	108	3.319	111
Summe		12.018.518	277.380	15.951.925	382.741	27.970.443	660.121
Summe [kWh]		3.338.477	77.050	4.431.090	106.317	7.769.568	183.367
Kennwert [pro m²]			25,0		34,5		59,4

Tabelle 6-7: Detaillierte Ergebnisse der Ökobilanzierung – Süßwasser, GWP und ODP

Bauteile	Le-bens-daue r	Einsatz von Süß-wasserressourcen (FW)		Globales Erwär-mungspotenzial (GWP)		Abbau Potenzial der strato-sphärischen Ozonschicht (ODP)	
	[a]	[m³]	[m³·a]	[kg CO_2-Äqv.]	[kg CO_2-Äqv.·a]	[kg CFC 11-Äqv.]	[kg CFC 11-Äqv.·a]
Akustikplatte Heradesign	30	13	0,4	4.368	145,6	0,00000009	0,0000000031
Aluminium eloxiert	50	1	0,0	6.662	133,2	0,00001984	0,0000003968
Armaturen Edelstahl	30	0	0,0	25	0,8	0,00000000	0,0000000000
Armaturen Messing	30	1	0,0	79	2,6	0,00000003	0,0000000010
Becken aus Edelstahl	30	6	0,2	1.062	35,4	0,00000004	0,0000000012
Befestigungsmittel	50	10.360	207,2	13.580	271,6	0,00000847	0,0000001694
Beton C30/37	80	31	0,4	31.816	397,7	0,00010084	0,0000012605
Beton C50/60 unbewehrt	80	22	0,3	33.867	423,3	0,00009673	0,0000012092
Bewehrungsstahl	80	40.655	508,2	24.457	305,7	0,00008099	0,0000010124
Bimskörnung (Ausgleichsschüttung)	50	5	0,1	150	3,0	0,00001773	0,0000003546
Brettschichtholz (BSH)	50	41.286	825,7	-73.938	-1.478,8	0,00008445	0,0000016891
Dispersionsgrundierung	20	21	1,1	55	2,8	0,00001560	0,0000007802
Dünnbettmörtel	30	0	0,0	4.141	138,0	0,00001661	0,0000005538
Edelstahlblech	50	45	0,9	56	1,1	-0,00000008	-0,0000000017
Edelstahlrohr	50	69	1,4	11.401	228,0	0,00000042	0,0000000083
Eiche	30	0	0,0	-2.109	-70,3	0,00000058	0,0000000192
EPDM-Dachabdichtung	20	1	0,0	82	4,1	0,00000031	0,0000000153
Fassadentafel Cedral-Eternit	50	45	0,9	7.019	140,4	0,00031221	0,0000062443
Fenster	40	94	2,3	26.667	666,7	0,00083821	0,0000209553
Fliesenkleber	30	4	0,1	636	21,2	0,00000048	0,0000000160
Foamglasdämmung	50	0	0,0	397	7,9	0,00000013	0,0000000026
Fugendichtungsband aus Butyl	30	92	3,1	4.333	144,4	0,00000491	0,0000001636
Fugendichtungsband aus PE-/PP-Folie	30	4	0,1	243	8,1	0,00000040	0,0000000134
Geberitverbundrohr	30	2	0,1	226	7,5	0,00000003	0,0000000011
Gehäuse Downlight 18W (CFL,G24D)	20	6	0,3	842	42,1	0,00000022	0,0000000112
Gipskartonplatte (gelocht)	50	9	0,2	433	8,7	0,00000040	0,0000000080
Gipskartonplatte (imprägn.)	50	450	9,0	15.906	318,1	0,00005192	0,0000010383
Glasfaserplatte	50	340	6,8	36.320	726,4	0,00003704	0,0000007407
Glasvlies (Glasfaser)	50	436	8,7	625	12,5	0,00000091	0,0000000182
Grobspanplatte OSB/4	50	672	13,4	-269.636	-5.392,7	0,00463392	0,0000926785
Holzfaserdämmplatte	50	1.152	23,0	-46.368	-927,4	0,00005310	0,0000010620
Holz-Hauseingangstür Thermosafe	30	5	0,2	389	13,0	0,00003471	0,0000011571
Innentüren aus Holz und Holzwerk-stoffen	30	0	0,0	-1.105	-36,8	0,00086971	0,0000289904
Kies (getrocknet)	80	527	6,6	4.098	51,2	0,00000100	0,0000000125
Kompaktleuchtstofflampe 18W (Vor-schaltgerät extern)	20	1	0,0	69	3,5	0,00000000	0,0000000001
Konstruktionsvollholz (KVH)	50	66.568	1.331,4	-143.468	-2.869,4	0,00013433	0,0000026865
Küchengeräte aus Edelstahl	20	16	0,8	2.594	129,7	0,00000009	0,0000000045
Kupfer	50	25	0,5	4.062	81,2	0,00000024	0,0000000048
Kupferrohr	50	1	0,0	265	5,3	0,00000001	0,0000000003
Laminat	20	45	2,2	-7.160	-358,0	0,00000164	0,0000000820
Leuchtstoffröhre T5-14W	10	0	0,0	8	0,8	0,00000000	0,0000000001
Leuchtstoffröhre T5-28W	10	2	0,2	150	15,0	0,00000001	0,0000000011
Leuchtstoffröhre T5-36W	10	0	0,0	16	1,6	0,00000000	0,0000000001
Leuchtstoffröhrenfassung T8-18W (LFL)	20	2	0,1	422	21,1	0,00000002	0,0000000008
Leuchtstoffröhrenfassung T8-36W (LFL)	20	0	0,0	89	4,4	0,00000000	0,0000000000
Lichtschalter	20	1	0,0	107	5,4	0,00000001	0,0000000003
Linoleum	20	381	19,1	31.519	1.576,0	0,00000086	0,0000000430
Lüftungsgeräte mit WRG	30	40	1,3	6.516	217,2	0,00000122	0,0000000406
Lüftungskanal (verkintes Stahlblech)	50	206	4,1	46.299	926,0	0,00000075	0,0000000149
mineralischer Mörtel (Ausgleich)	50	0	0,0	969	19,4	0,00001076	0,0000002151
Mineralwolle	50	328	6,6	2.108	42,2	0,00000074	0,0000000147
Mitteldichte Holzfaserplatte (MDF) beschichtet	50	0	0,0	-9	-0,2	0,00000510	0,0000001020
Natursteinplatte weich (Marmor)	50	1.127	22,5	821	16,4	0,00001343	0,0000002686
PE-HD-Rohr	50	197	3,9	46.141	922,8	0,00000168	0,0000000336
PE-Noppenfolie	30	299	10,0	542	18,1	0,00000371	0,0000001236
PE-Schaum	50	6	0,1	528	10,6	0,00000001	0,0000000002
Pfosten-Riegel-Fassade	40	43	1,1	8.164	204,1	0,00000096	0,0000000240
Photovoltaik	30	1.077	35,9	96.181	3.206,0	0,00002248	0,0000007495
Polypropylen (PP) Unterspannbahn	50	1.347	26,9	3.346	66,9	0,00001172	0,0000002345
Powerpaneel TE	50	34	0,7	5.839	116,8	0,00027772	0,0000055545
Pufferspeicher Stahl	30	7	0,2	1.442	48,1	0,00000006	0,0000000020

Bauteile	Lebensdauer	Einsatz von Süßwasserressourcen (FW)		Globales Erwärmungspotenzial (GWP)		Abbau Potenzial der stratosphärischen Ozonschicht (ODP)	
	[a]	[m³]	[m³·a]	[kg CO_2-Äqv.]	[kg CO_2-Äqv.·a]	[kg CFC 11-Äqv.]	[kg CFC 11-Äqv.·a]
Pumpen	20	7	0,3	1.193	59,6	0,00000010	0,0000000051
PVC	50	13	0,3	2.989	59,8	0,00000042	0,0000000083
PVC -Dachabdichtungsbahn	30	4.206	140,2	4.885	162,8	0,00004570	0,0000015234
PVC-Rohr	50	76	1,5	64	1,3	0,00000016	0,0000000031
Rasterleuchte 2x T8-36 (LFL)	20	16	0,8	2.612	130,6	0,00000049	0,0000000244
Rasterleuchte Deckenintegriert 3x T5-14W (LFL)	20	2	0,1	332	16,6	0,00000007	0,0000000034
Sanitärkeramik	30	1	0,0	2.049	68,3	0,00000003	0,0000000009
Schaumglasschotter	80	344	4,3	12.925	161,6	0,00131203	0,0000164004
Schnittholz Zeder (Thermoholz)	50	4.424	88,5	-26.781	-535,6	0,00000887	0,0000001775
Schotter (Betonrecycling)	80	33.372	417,1	21.517	269,0	0,00006943	0,0000008679
Solaranlage Flachkollektor	30	31	1,0	4.066	135,5	0,00000122	0,0000000408
Splitt (getrocknet)	80	2.368	29,6	3.009	37,6	0,00000492	0,0000000615
Stabparkett	40	64	1,6	18.054	451,3	0,00056747	0,0000141868
Stahlprofil	50	86.880	1.737,6	109.625	2.192,5	0,00018707	0,0000037414
Steckdose	20	2	0,1	363	18,1	0,00000002	0,0000000009
Steinwolle (Steinfaser)	50	0	0,0	30	0,6	0,00000075	0,0000000151
Steinzeugfliese	30	2.023	67,4	4.211	140,4	0,00000408	0,0000001361
Tectofin Dachabdichtung	30	10.940	364,7	12.708	423,6	0,00011888	0,0000039627
VARIFLEX Raumtrennsystem	40	8.142	203,5	908	22,7	0,00048043	0,0000120108
Volumenstromregler VRE,VR	20	6	0,3	1.260	63,0	0,00000044	0,0000000221
Vorschaltgerät EVG	20	14	0,7	3.012	150,6	0,00000035	0,0000000177
Wandfarbe (weiß)	10	8	0,8	1.838	183,8	0,00000051	0,0000000507
Wannenleuchte (Feuchtraum) T8-36W	20	7	0,3	1.788	89,4	0,00000008	0,0000000041
Zellulosefaser	50	20.349	407,0	-61.048	-1.221,0	0,00004032	0,0000008064
Zementestrich	30	0	0,0	2.522	84,1	0,00006379	0,0000021265
Zementmörtel	30	0	0,0	455	15,2	0,00001353	0,0000004508
Summe		341.399	6.556	68.931	3.968	0,01069	0,00023
Kennwert [pro m²]			2,12		1,29		0,000000074

Tabelle 6-8: Detaillierte Ergebnisse der Ökobilanzierung – AP, EP und POCP

Bauteile	Lebensdauer	Versauerungspotenzial von Boden und Wasser (AP)		Eutrophierungspotenzial (EP)		Bildungspotenzial für troposphärisches Ozon (POCP)	
	[a]	[kg SO_2-Äqv.]	[kg SO_2-Äqv.·a]	[kg Phosphat-Äqv.]	[kg Phosphat-Äqv.·a]	[kg Ethen-Äqv.]	[kg Ethen-Äqv.·a]
Akustikplatte Heradesign	30	11,3	0,376	1,8	0,059	-0,17	-0,006
Aluminium eloxiert	50	39,7	0,794	1,9	0,037	2,15	0,043
Armaturen Edelstahl	30	0,2	0,006	0,0	0,000	0,01	0,000
Armaturen Messing	30	0,5	0,016	0,0	0,001	0,03	0,001
Becken aus Edelstahl	30	7,2	0,239	0,4	0,013	0,42	0,014
Befestigungsmittel	50	40,3	0,805	3,2	0,065	5,50	0,110
Beton C30/37	80	44,3	0,554	7,0	0,088	5,39	0,067
Beton C50/60 unbewehrt	80	45,6	0,570	7,0	0,087	5,46	0,068
Bewehrungsstahl	80	57,6	0,720	4,8	0,060	5,70	0,071
Bimskörnung (Ausgleichsschüttung)	50	0,2	0,005	0,0	0,001	0,02	0,000
Brettschichtholz (BSH)	50	77,4	1,547	9,8	0,195	4,96	0,099
Dispersionsgrundierung	20	0,2	0,010	0,4	0,021	0,06	0,003
Dünnbettmörtel	30	5,9	0,195	5,1	0,170	0,68	0,023
Edelstahlblech	50	0,5	0,009	0,0	0,001	0,01	0,000
Edelstahlrohr	50	75,5	1,509	4,1	0,082	4,44	0,089
Eiche	30	0,6	0,020	0,1	0,003	0,39	0,013
EPDM-Dachabdichtung	20	0,3	0,016	0,0	0,001	0,03	0,001
Fassadentafel Cedral-Eternit	50	17,9	0,358	2,8	0,055	6,23	0,125
Fenster	40	152,1	3,803	22,0	0,549	20,49	0,512
Fliesenkleber	30	0,8	0,026	0,1	0,004	0,08	0,003
Foamglasdämmung	50	0,9	0,017	0,1	0,002	0,07	0,001
Fugendichtungsband aus Butyl	30	6,5	0,218	0,7	0,022	0,97	0,032
Fugendichtungsband aus PE-/PP	30	0,1	0,004	0,0	0,001	0,09	0,003
Geberitverbundrohr	30	0,5	0,018	0,1	0,002	0,06	0,002
Gehäuse Downlight 18W (CFL,G24D)	20	3,3	0,163	0,2	0,012	0,28	0,014
Gipskartonplatte (gelocht)	50	0,7	0,013	0,2	0,003	0,08	0,002
Gipskartonplatte (imprägn.)	50	24,0	0,480	6,0	0,119	1,84	0,037
Glasfaserplatte	50	42,2	0,843	7,8	0,155	4,56	0,091

Bauteile	Lebensdauer	Versauerungspotenzial von Boden und Wasser (AP)		Eutrophierungspotenzial (EP)		Bildungspotenzial für troposphärisches Ozon (POCP)	
	[a]	[kg SO_2-Äqv.]	[kg SO_2-Äqv.·a]	[kg Phosphat-Äqv.]	[kg Phosphat-Äqv.·a]	[kg Ethen-Äqv.]	[kg Ethen-Äqv.·a]
Glasvlies (Glasfaser)	50	2,7	0,054	0,3	0,006	0,88	0,018
Grobspanplatte OSB/4	50	248,2	4,964	47,2	0,944	41,99	0,840
Holzfaserdämmplatte	50	35,1	0,703	4,5	0,090	7,52	0,150
Holz-Hauseingangstür Thermosafe	30	5,6	0,187	0,8	0,028	1,15	0,038
Innentüren aus Holz und Holzwerkstoffen	30	21,9	0,732	4,2	0,141	4,30	0,143
Kies (getrocknet)	80	5,6	0,070	1,0	0,013	-0,34	-0,004
Kompaktleuchtstofflampe 18W (Vorschaltgerät extern)	20	0,3	0,015	0,0	0,002	0,02	0,001
Konstruktionsvollholz (KVH)	50	125,2	2,504	15,3	0,306	9,16	0,183
Küchengeräte aus Edelstahl	20	17,5	0,876	0,9	0,047	1,03	0,052
Kupfer	50	28,7	0,573	1,4	0,028	1,59	0,032
Kupferrohr	50	0,9	0,018	0,1	0,002	0,10	0,002
Laminat	20	27,5	1,377	9,5	0,473	14,44	0,722
Leuchtstoffröhre T5-14W	10	0,0	0,004	0,0	0,000	0,00	0,000
Leuchtstoffröhre T5-28W	10	0,9	0,086	0,1	0,009	0,06	0,006
Leuchtstoffröhre T5-36W	10	0,0	0,000	0,0	0,001	0,01	0,001
Leuchtstoffröhrenfassung T8-18W (LFL)	20	1,5	0,075	0,1	0,007	0,20	0,010
Leuchtstoffröhrenfassung T8-36W (LFL)	20	0,3	0,015	0,0	0,001	0,04	0,002
Lichtschalter	20	0,3	0,014	0,0	0,002	0,03	0,001
Linoleum	20	247,2	12,359	150,3	7,517	12,05	0,602
Lüftungsgeräte mit WRG	30	26,3	0,877	2,1	0,068	2,68	0,089
Lüftungskanal (verkintes Stahlblech)	50	157,8	3,156	14,4	0,288	22,26	0,445
mineralischer Mörtel (Ausgleich)	50	3,6	0,072	0,4	0,007	0,00	0,000
Mineralwolle	50	9,8	0,195	1,4	0,027	0,74	0,015
Mitteldichte Holzfaserplatte (MDF) beschichtet	50	0,5	0,010	0,1	0,003	0,07	0,001
Natursteinplatte weich (Marmor)	50	4,5	0,091	0,5	0,010	0,33	0,007
PE-HD-Rohr	50	81,7	1,634	8,7	0,174	18,01	0,360
PE-Noppenfolie	30	1,1	0,038	0,1	0,003	0,21	0,007
PE-Schaum	50	1,1	0,023	0,1	0,003	0,09	0,002
Pfosten-Riegel-Fassade	40	30,1	0,753	3,9	0,098	2,02	0,051
Photovoltaik	30	360,9	12,029	28,6	0,953	49,87	1,662
Polypropylen (PP) Unterspannbahn	50	8,4	0,169	1,0	0,020	1,80	0,036
Powerpaneel TE	50	17,7	0,354	1,6	0,033	1,59	0,032
Pufferspeicher Stahl	30	4,1	0,138	0,4	0,014	0,67	0,022
Pumpen	20	5,5	0,275	0,4	0,022	0,40	0,020
PVC	50	0,5	0,010	0,7	0,014	1,48	0,030
PVC -Dachabdichtungsbahn	30	13,6	0,453	1,6	0,053	3,65	0,122
PVC-Rohr	50	0,1	0,002	0,0	0,000	0,03	0,001
Rasterleuchte 2x T8-36 (LFL)	20	8,5	0,426	0,8	0,039	0,84	0,042
Rasterleuchte Deckenintegriert 3x T5-14W (LFL)	20	1,1	0,054	0,1	0,005	0,10	0,005
Sanitärkeramik	30	1,8	0,060	0,3	0,009	0,24	0,008
Schaumglasschotter	80	64,0	0,800	28,5	0,356	2,87	0,036
Schnittholz Zeder (Thermoholz)	50	9,6	0,193	1,6	0,031	0,60	0,012
Schotter (Betonrecycling)	80	53,3	0,666	9,6	0,120	-5,70	-0,071
Solaranlage Flachkollektor	30	31,6	1,053	1,4	0,046	1,65	0,055
Splitt (getrocknet)	80	4,9	0,062	0,8	0,011	-0,21	-0,003
Stabparkett	40	103,0	2,574	14,9	0,372	13,87	0,347
Stahlprofil	50	352,4	7,047	30,9	0,617	46,61	0,932
Steckdose	20	0,9	0,047	0,1	0,005	0,10	0,005
Steinwolle (Steinfaser)	50	0,2	0,004	0,0	0,001	0,02	0,000
Steinzeugfliese	30	7,3	0,244	0,8	0,026	0,46	0,015
Tectofin Dachabdichtung	30	35,4	1,179	4,1	0,137	9,51	0,317
VARIFLEX Raumtrennsystem	40	8,5	0,214	0,9	0,022	0,96	0,024
Volumenstromregler VRE,VR	20	6,5	0,326	0,5	0,025	0,54	0,027
Vorschaltgerät EVG	20	16,1	0,803	1,4	0,071	1,18	0,059
Wandfarbe (weiß)	10	29,6	2,957	0,6	0,059	0,59	0,059
Wannenleuchte (Feuchtraum) T8-36W	20	0,4	0,021	0,4	0,022	0,44	0,022
Zellulosefaser	50	116,7	2,334	12,7	0,254	6,78	0,136
Zementestrich	30	5,0	0,168	0,8	0,027	0,65	0,022
Zementmörtel	30	0,9	0,031	0,2	0,006	0,09	0,003
Summe		3011	79,5	498,9	15,5	352,19	9,2
Kennwert [pro m²]			0,026		0,0050		0,0030

6.5 *Weitere Sankeydiagramme*

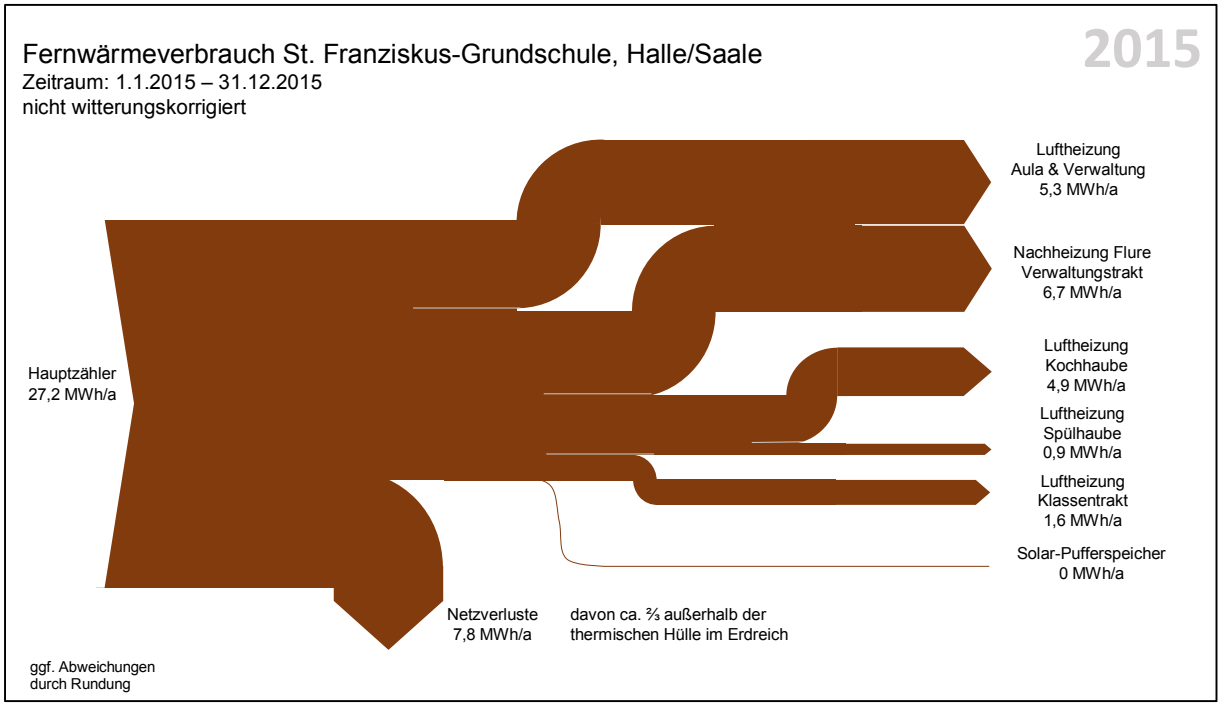


Abbildung 6-1: Sankeydiagramm nicht witterungskorrigierter Fernwärmeverbrauch 2015

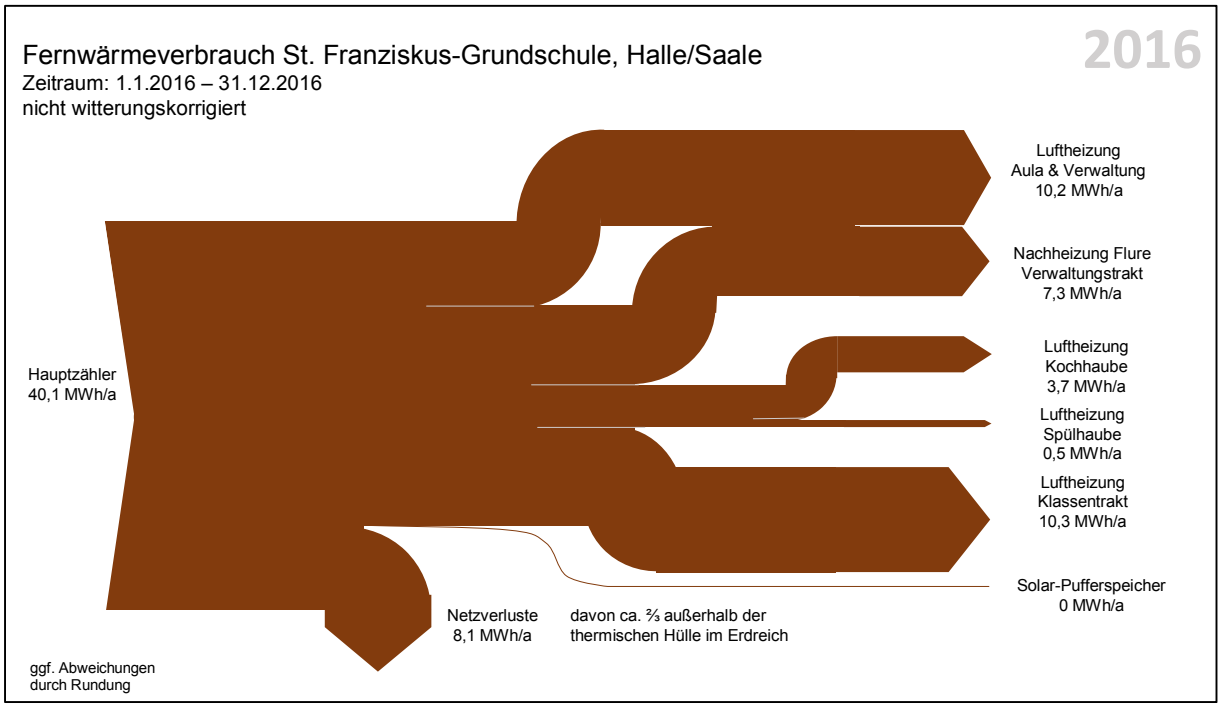


Abbildung 6-2: Sankeydiagramm nicht witterungskorrigierter Fernwärmeverbrauch 2016

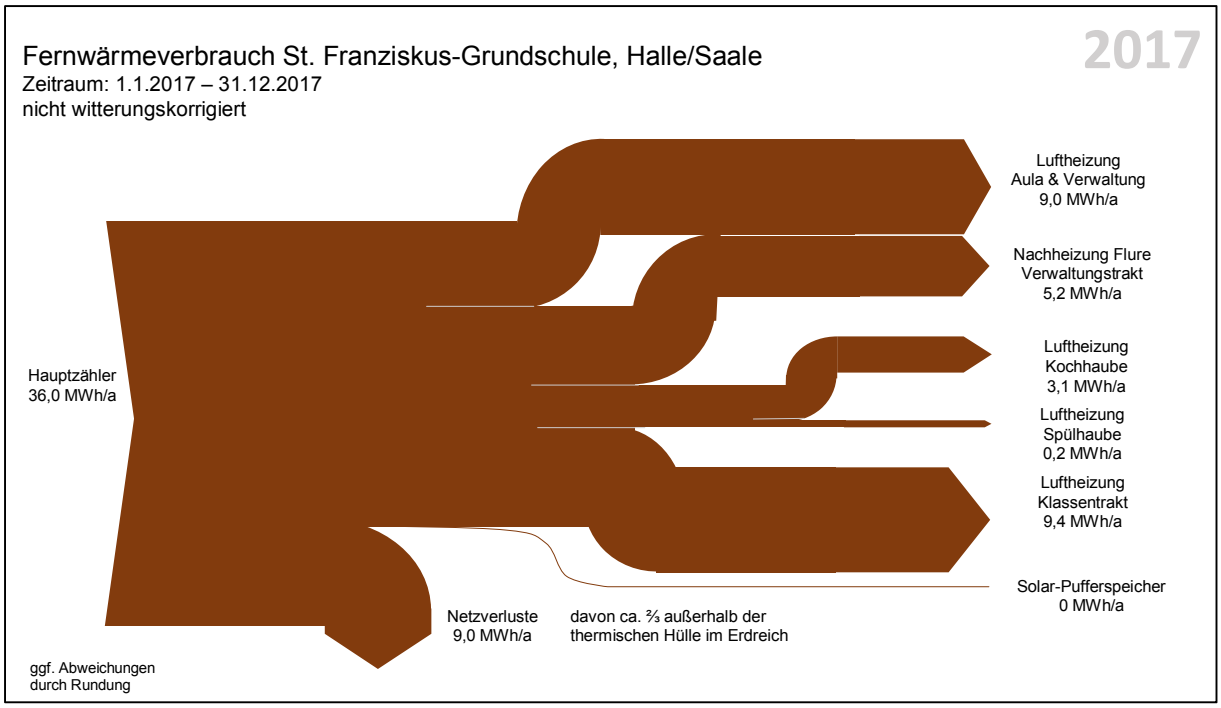


Abbildung 6-3: Sankeydiagramm nicht witterungskorrigierter Fernwärmeverbrauch 2017

6.6 Planer, Ausführende, Projektbeteilige

Tabelle 6-9: Planer, Ausführende Projektbeteiligte

Kurz	ausführliche Angabe	Gewerk/Verant-wortlichkeit
AIB	AIB GmbH Architekten Ingenieure Bautzen Herr Medack, Herr Hoffmann Liselotte-Herrmann-Str. 4 02625 Bautzen	Elektrotechnik, Planer
GEDES	Gedes e.V. Herr Döring Promenadenring 8 02708 Löbau	Messtechnik, Ausführung
HOLLENBACH	Sachverständigenbüro Herr Hollenbach Karlstraße 14 39261 Zerbst	Projektsteuerer
N&S	Ing.-Büro Naumann u. Stahr GbR Herr Naumann, Herr Reichel, Herr Stahr Sommerfelder Straße 11 04299 Leipzig	TGA, Planung (zu Beginn)
STEINBLOCK	Steinblock Architekten GmbH Herr Tietze Porsestraße 19 39104 Magdeburg	Architektur
TUK	Theurich+Klose Ingenieurgesellschaft mbH Herr Gierlich, Herr Adolf, Herr v. Goldammer Vahrenwalder Str. 117 30165 Hannover	TGA, Planung (zum Schluss)

6.7 Überblick über separate Anhänge

Als separate Anhänge liegen vor:

A EnEV und DIN V 18599
B PHPP Nachweis
C Ökobilanz
D Sankeydiagramme