

# Weniger ist mehr – die optimale Grundschule

Die optimale Schule gibt es vermutlich nicht. Aber nah dran wäre wünschenswert. Auf Basis der Erkenntnisse aus dem 5-jährigen Monitoring der St. Franziskus-Grundschule in Halle (Saale) soll nachfolgend eine mögliche Beschreibung gewagt werden. Alle positiven Erfahrungen werden zur Nachahmung empfohlen. Alle negativen Investitionen müssen nicht wiederholt werden – die resultierenden Änderungen bei Kosten und Energiemengen werden dargelegt.

Bauherrin und Betreiberin der St. Franziskus-Grundschule ist die Edith-Stein-Schulstiftung des Bistums Magdeburg. Das Gebäude wurde zwischen 2012 und 2014 errichtet. Ein Teil der Investitionskosten wurde über das Programm EnEff:Schule des BMWi gefördert (FKZ 0327 430 O), ebenfalls das zwischen 2013 und 2018 durchgeführte Monitoring.

Die Grundschule ist 2-zügig und bietet für bis zu 200 Schüler auch eine Hortbetreuung sowie Schulesen an. Schließzeiten gibt es nur über den Jahreswechsel und für 2 Wochen im Sommer. Der Personalstamm liegt bei ca. 40 Erwachsenen, einschließlich eines Hausmeisters, der mit seiner Familie im Gebäude wohnt.

## Entwurf und Raumkonzept

Der Baukörper ist dreigeschossig und weist ca. 3090 m<sup>2</sup> Nettogrundfläche auf, siehe Abbildung 1. Insgesamt ist das Raumkonzept nachahmenswert. Kleinere Verbesserungen betreffen u. a. die Größe von Technikflächen, die in der Planung unterschätzt wurden, so dass Abstellräume umgenutzt wurden, die jetzt anderweitig fehlen.

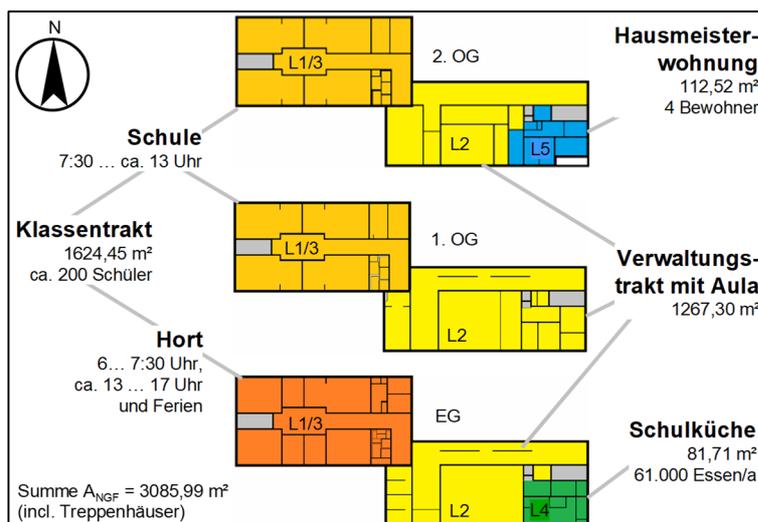


Abbildung 1 Vereinfachtes Grundrisschema mit Nutzungsbereichen und Lüftungszonen (L)

Ansonsten sind bezüglich des Fensterflächenanteils der Klassenräume (17 % der Grundfläche) und der Raumakustik positive Rückmeldungen zu verzeichnen und damit kein Verbesserungsbedarf gegeben.

## Holzbauteile und Baustoffauswahl

Die gesamte thermische Hülle ist als Holzrahmenbau mit Zellulosefüllung erstellt worden, siehe Abbildung 2. Lediglich die beiden Treppenhäuserkerne sind in Stahlbeton errichtet worden. Die Baugrube wurde mit Betonrecycling und die Zwischenräume der Fundamente mit Schaumglasschotter verfüllt. Das Konzept auf Basis ökologischer oder wiederverwerteter Baustoffe ist nachahmenswert.

Der Wärmedurchgangskoeffizient der opaken Außenbauteile liegt zwischen 0,10 und 0,13 W/(m<sup>2</sup>K). Eine etwas schlechtere Wärmedämmung wäre ggf. denkbar, wird aber nicht empfohlen.



**Abbildung 2 Klassenzimmer als Holzbau vor dem Innenausbau**

Die Simulationsergebnisse lassen den Schluss zu, dass der Außenwandaufbau auch ohne Dampfbremse schadensfrei funktioniert hätte. Damit ergibt sich als einzige Verbesserungsmaßnahme das Weglassen der Dampfbremse in der Wand. Das sparte Investitionen von ca. 51.000 €. Der zwischengedämmte Flachdachaufbau ist die bauphysikalische Engstelle. Allerdings wurden weder rechnerisch noch messtechnisch Feuchteschäden registriert.

### **Fenster und Türen**

Die Fenster sind mehrheitlich als Kastenfenster ausgeführt. Der Sommerbetrieb sieht eine Öffnung der Außenflügel vor, um Stauwärme im Kasten zu vermeiden. Der Winterbetrieb setzt auf eine Öffnung der Innenflügel. Der Wärmedurchgangskoeffizient der Gesamtkonstruktion liegt bei einem sehr guten Wert von ca.  $0,60 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ .

Durch das Monitoring konnte die winterliche Wärmepufferung des Fensterkastens nachgewiesen werden. Kritisch ist der Sommerfall: ist das äußere Fenster geschlossen, steigt die Temperatur im Kasten auf so hohe Werte, dass die Fenstergriffe nicht mehr gefahrlos angefasst werden können. Den Lehrern wird ein ständiges Öffnen und Schließen nach Wetterlage nicht zugemutet, insbesondere, weil das Bedienen der Außenflügel ein Öffnen der Innenflügel (und leere Fensterbretter) voraussetzt. Im Realbetrieb leitet der Hausmeister mit dem pauschalen Bedienen der Außenflügel im Frühjahr den Sommer und im Herbst den Winter ein.

Die Kastenfenster werden daher in einem modifizierten Konzept nicht empfohlen. Eine Ausführung mit Dreischiebenwärmeschutzverglasung führte zwar zu einer Verschlechterung der Energiebilanz (ca.  $+5100 \text{ kWh/a}$  Fernwärme), aber zu einer verständlicheren Bedienung und Benutzung. Die bislang im Scheibenzwischenraum platzierten Jalousien würden zu Außenjalousien. Der Nachteil hinsichtlich des Witterungs- und Vandalismusschutzes würde in Kauf genommen. Darüber hinaus sollten die modifizierten Fenster kleinere Öffnungsflügel (jetzt  $1,25 \text{ m}$  breit) aufweisen. Das minderte die Verletzungsgefahr im Innenraum.

Die modifizierte Fensterbauart führte zu geschätzten Minderkosten von ca.  $152.000 \text{ €}$ .

Die dreifachverglaste Türen sind fast uneingeschränkt empfehlenswert. Eine Verbesserung wäre ggf. gegeben, wenn sie automatisch angetrieben wären oder insgesamt kleinere Formate hätten. Für die Grundschul Kinder sind sie wegen der großen Masse kaum allein zu öffnen.

### **Luftdichtheit und Wärmebrücken**

Das Gebäude ist sehr kompakt ( $0,345 \text{ m}^{-1}$ ) und praktisch wärmebrückenfrei ( $\Delta U_{\text{WB}} = -0,001 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$ ). Die Luftdichtheit wurde zweimal gemessen. In der Bauphase wurde ein Prüfluftwechsel von  $n_{50} = 0,24 \text{ h}^{-1}$  nachgewiesen. Eine Nachmessung hat nach 3 Jahren Betrieb den Wert bestätigt ( $0,26 \text{ h}^{-1}$ ). Diese drei Eigenschaften werden ohne weitere Modifikation als optimal angesehen.

### **Fernwärmerücklaufnutzung**

Die Grundschule ist mit einem umschaltbaren Fernwärmeanschluss in den Rücklauf der Nachbarschule eingebunden. Regelbetrieb ist die Reihenschaltung mit Auslegungstemperaturen von  $45/35 \text{ °C}$ . Eine Umschaltung auf den Vorlauf ist möglich und nachgewiesen funktionsfähig (im Handbetrieb). Eine regelungstechnisch automatisierte Umschaltung – vor allem zum Zwecke der Trinkwassererwärmung für die Küche – wurde nicht umgesetzt. In einem modifizierten Konzept wäre die Verfügbarkeit von Hochtemperaturfernwärme innerhalb eingeschränkter Zeitfenster (außerhalb der morgendlichen Wiederaufheizung der Nachbarschule) sinnvoll.

### **Trinkwassererwärmung und Solarthermie**

Der Schulbetrieb nutzt nur im Ausnahmefall Warmwasser, welches dezentral in elektrischen Durchlauferhitzern erwärmt wird. Für die zentrale Trinkwassererwärmung ist eine Solarthermieanlage mit einem Pufferspeicher (Küche, 2000 l) und einem Trinkwarmwasserspeicher (Hausmeister, 200 l) vorhanden. Das 36 m<sup>2</sup> große Flachkollektorfeld ist an der Südfassade angebracht, siehe Abbildung 3. Der Jahresertrag liegt bei knapp 7000 kWh/a, so dass die Anlage die Erwartungen aus technischer Sicht erfüllt.



**Abbildung 3 Südliche Außenansicht der Schule mit Solarthermiefeld und Mikrowindkraft**

Problematisch ist das betriebswirtschaftliche Ergebnis. Die Solarthermie ist gegenüber den anderen verfügbaren Energieträgern nicht konkurrenzfähig. Daher würde das modifizierte Konzept ohne Solarthermie auskommen. Damit fielen auch die oben genannten Speicher kleiner aus oder gänzlich weg.

Die Nacherwärmung des Küchenpufferspeichers erfolgt derzeit ausschließlich mit Strom. In einem modifizierten, optimierten Konzept ist eine teilweise Fernwärmenutzung (50 %) aus Kostengründen geboten. In der Hausmeisterwohnung wird derzeit eine lokale Nacherwärmung des solar vorgewärmten Warmwassers per Durchlauferhitzer praktiziert. Nach Wegfallen der Solarthermie wäre dies der einzige Erzeuger.

Ein dritter Abnehmer der Solarwärme ist ein Salzhydratspeicher (Wärmespeicherkapazität 128 kWh). Dieser arbeitet grundsätzlich korrekt, jedoch ist das Solarkollektorfeld nicht so groß bemessen, dass es zu nennenswerten solaren Überschüssen käme. In einer optimierten Version der Schule entfielen dieser Speicher.

Durch die Modifikationen verringerten sich die Investitionskosten um 129.000 €. Der entgangene Solarertrag würde kompensiert durch je 2400 kWh/a an Strom und Fernwärme.

### **Stromerzeugung und -speicherung**

Für die Stromversorgung der Schule gibt es drei Anlagen zur Selbsterzeugung: zwei PV-Felder (77,1 kW<sub>peak</sub>) und eine Mikrowindkraftanlage (1 kW Nennleistung). Komplettiert wird das Versorgungssystem durch eine elektrochemische Batterie.

Der Ertrag der Photovoltaikanlage, siehe Abbildung 4, entspricht den Erwartungen. Die Selbstnutzung des produzierten Stroms liegt bei ca. 55 %, die Eigenversorgungsquote erreicht damit knapp 40 %. Eine Wirtschaftlichkeit ist gegeben. Die Anlage wird für die "optimierte Schule" empfohlen.



**Abbildung 4 Photovoltaik auf dem Dach**

Bei der Mikrowindkraftanlage, siehe Abbildung 3, wurde im Monitoring ein Betriebsbereitschaftsverlust von 135 W festgestellt. Insgesamt übersteigt der Eigenverbrauch damit den Ertrag um ein Vielfaches, so dass eine Installation nicht empfohlen wird. Somit entfielen 800 kWh/a an Stromverbrauch.

Die erste Batterieanlage (Speicherkapazität 25,6 kWh Lithium) war nach einem Softwareupdate nicht mehr kompatibel zu der Laderegelung. Die zweite (Bleigel) wurde von der Laderegelung nach knapp 5 Monaten Betriebszeit überladen, so dass ein Totalschaden eintrat. In der Betriebszeit konnte eine Gesamteffizienz von 67 % festgestellt werden. Die Batterie sollte in der optimierten Schule daher nicht zum Einsatz kommen.

Die beiden Modifikationen des Energiekonzeptes minderten die Investitionssumme um 64.000 €.

### **Lüftungstechnik und -regelung**

Neben der Lüftung für die Hausmeisterwohnung und die Küche gibt es 2 Hauptlüftungszonen in der Schule (siehe Abbildung 1). Der Klassentrakt ist mit einer Zu-/und Abluftanlage (7500 m<sup>3</sup>/h) – siehe Abbildung 5 – plus separater WC-Abluft ausgestattet. Der Verwaltungstrakt mit Aula hat eine zweite Großanlage (10.000 m<sup>3</sup>/a)



**Abbildung 5 Lüftungs- und Heizzentrale für den Klassentrakt**

In den Klassenräumen wurde mit einer Außenluftmenge von 18 ... 19 m<sup>3</sup>/h je Person dimensioniert. Trotz des geringen Wertes sind gute Luftqualitäten festzustellen, so dass hier kein Änderungsbedarf gesehen wird. Innerhalb der Anwesenheit von Personen ergeben sich in zwei untersuchten Klassenräumen nur geringe Überschreitungen des Grenzwertes von 1500 ppm (ca. 5 %).

Es gibt abgesehen von der Aula keine CO<sub>2</sub>-basierte Regelung. Die Lüftung der Klassenräume wird mit Bewegungsmeldern und Volumenstromreglern gesteuert ("an" oder "aus"), viele andere Räume werden dauerhaft durchlüftet. Am Wochenende und nachts sind die Anlagen ausgeschaltet.

Eine Optimierung wäre erreichbar, wenn alle Räume VSR aufwiesen, so dass kein unnötiger Volumenstrom bei Nutzerabwesenheit entstünde. Darüber hinaus kann in der Aula der Minimalvolumenstrom noch deutlich abgesenkt werden. Die Optimierung des Volumenstroms führte zu einer Stromeinsparung von etwa 11.600 kWh/a. Für 38 weitere VSR werden Schätzkosten von 38.000 € angesetzt.

Die gemessenen Ventilatoreffizienzen (SFP3) sind als durchschnittlich einzustufen. Die Wärme- und Feuchterückgewinnung der beiden Hauptlüftungsanlagen (Umschalt Speicher) arbeitet wie geplant und sind empfehlenswert. Der maximale Wirkungsgrad liegt bei 82 % (Prognose 92 %).

### **Zentrale Luftheizung**

Das realisierte Konzept sieht in allen Zonen nur eine Luftheizung vor. In der Hausmeisterwohnung sind elektrische Heizregister (mit Einzelraumregelung) installiert, die problemlos funktionieren und akzeptiert sind. In den anderen Lüftungszonen gibt es jeweils nur zentrale Fernwärmeheizregister, so dass alle angeschlossenen Räume mit derselben Zulufttemperatur versorgt werden.

In der St. Franziskus-Grundschule führt diese Art der Versorgung zwar zu geringen Wärmeverbräuchen, aber nur zu einer mäßigen Nutzerzufriedenheit. Es ist innerhalb einer Lüftungszone mit Differenzen der resultierenden Raumtemperaturen von bis zu 10 K zu rechnen. In zwei intensiv untersuchten Klassenräumen zeigt sich folgendes Messergebnis der Innentemperatur:

- Südraum: > 26 °C in 10 % sowie < 20 °C in 0,3 % der Zeit

- Nordraum:  $> 26\text{ °C}$  in 2 % sowie  $< 20\text{ °C}$  in 10 % der Zeit

Jegliche Änderung der Zulufttemperatur verschiebt das Problem nur von einem Raum in den anderen. Eine Verbesserung wäre gegeben, wenn wenigstens nach Himmelsrichtung und Nutzungsart (Klasse, Hort usw.) unterschieden worden wäre. In Hinblick auf ein optimiertes Konzept würde aber eine Heizkörperheizung empfohlen. Es wird davon ausgegangen, dass dies zu Mehrkosten von ca. 63.000 € (für ca. 100 Heizkörper) führte.

Allerdings ergäben sich größere Ersparnisse an Ventilatorenergie (-8.200 kWh/a), weil nur nutzungsbedingt gelüftet werden müsse, nicht zu Heizzwecken. Die Volumenströme in den Nebenflächen fielen sehr viel kleiner aus. Während der morgendlichen Aufheizphasen im Winter müsste nicht gelüftet werden.

### **Erdreichwärmeübertragung und Nachtkühlung**

Es ist aus den Messdaten erkennbar, dass die Vortemperierung der Außenluft im vorhandenen Erdwärmeübertrager (Länge 650 m, unter der Bodenplatte verlegt) technisch gut funktioniert. Im Winter werden knapp 28 MWh/a durch Luftvorwärmung, im Sommer 18 MWh/a durch Luftvorkühlung generiert. Allerdings ergibt sich kein wirtschaftlicher Betrieb.

In einem optimierten Konzept würde auf den EWT verzichtet, so dass die Investitionskosten um 196.000 € geringer ausfielen. Die Wärmemenge würde dann dem Fernwärmenetz entnommen. Für die Vorkühlung käme Kompressorkälte (ca. 2 x 10 kW) zum Einsatz, die etwa 20.000 € kostete und zu einer Erhöhung des Stromverbrauchs um 5200 kWh/a führte.

Die sommerliche Nachtlüftung wird als nachahmenswert erachtet. In der St. Franziskus-Grundschule wurden Temperaturabsenkungen von 3 ... 6 K erreicht.

### **Beleuchtung und Verschattung**

Die umgesetzten Beleuchtungsstärken sind normkonform und führen zu einer hohen Nutzerzufriedenheit. Das Gebäude wurde größtenteils mit Leuchtstofflampen ausgestattet. Aus heutiger Sicht sollten flächendeckend LED zum Einsatz kommen. Dies führte zu geringeren Stromverbräuchen (ca. -5700 kWh/a), aber im Winter zu einem leicht höheren Heizenergieverbrauch (ca. 2800 kWh/a).

Die Tageslichtversorgung liegt im mittleren Bereich. Auf der Nordseite muss häufig das Kunstlicht zugeschaltet werden. Auf der Südseite müssen bei sonnigen Tagen fast vollständig die Jalousien geschlossen werden, damit das Tafelbild (Whiteboard) erkennbar ist. Es wäre sinnvoll, die Jalousien unabhängig voneinander steuern zu können, um nur das tafelnahen Fenster separat zu verdunkeln.



**Abbildung 6 Klassenraum mit Kastenfenstern, Whiteboard und Luftheizung**

In den Klassenräumen ist die Beleuchtungssteuerung an Bewegungsmelder gekoppelt. Darüber hinaus gibt es mehrere Lichtszenarien mit Konstantlichtregelung. Beide Funktionen können bei Bedarf manuell übersteuert werden. Das Konzept ist grundsätzlich nachahmenswert. Verbesserungen ergäben sich aber mit einer konsequenten Nutzereinweisung, einfacher gestalteten Schaltern sowie einer nächtlichen Rücksetzung der Übersteuerung.

Die größte Kritik wird an den Jalousien geübt. Die Lamellen sind aus Nutzersicht zu schmal. Zur Vermeidung von Blendung muss die Außensicht praktisch auf null reduziert werden. Besser wären daher separat ansteuerbare, der Witterung ausgesetzte Außenjalousien (siehe "Kastenfenster") mit breiteren Lamellen.

Insgesamt führten die Modifikationen zu Mehrinvestitionen von ca. 46.000 €.

### **Nutzung von Regenwasser als Brauchwasser**

Die St. Franziskus-Grundschule ist mit einer Regenwassernutzungsanlage ausgestattet. Die Anlage ist passend dimensioniert und führt zu einer sehr positiv einzuschätzenden Deckungsrate von 66 % Regenwasser für die WCs. Im Zusammenhang mit dem Schulbildungskonzept kann Kindern der nachhaltige Umgang mit Ressourcen beigebracht werden. Rein betriebswirtschaftlich betrachtet ist die Anlage ein Zuschussgeschäft, da die zusätzlichen Pumpenergiekosten größer sind als die vermiedenen Frischwasserkosten.

In einer modifizierten Version würde auf die Anlage verzichtet. Damit entfielen ca. 16.000 € für die Investition und jährlich ca. 3900 kWh/a an Strom. Dafür müssten ca. 235 m<sup>3</sup>/a Frischwasser bezahlt werden.

### Messtechnik

Die messtechnische Ausstattung war einem Forschungsvorhaben angemessen. Es gab etwa 680 Datenpunkte, davon 400 extra für das Monitoring installierte. Für ein "normales" Projekt dieser Größe wären ca. 1/3 der Messpositionen ausreichend – die Hauptenergiezähler sowie eine Raumklimaerfassung ausgewählter Referenzräume. Das sparte knapp 52.000 € an Investition sowie im laufenden Betrieb 1700 kWh/a an Strom.

### Finale Verbrauchsmengen und –kosten

Die Schule erfüllt alle Anforderungen eines Passivhauses, z. B. einen Primärenergiebedarf von 113 kWh/(m<sup>2</sup>a). Der Primärenergiebedarf nach der geltenden Energieeinsparverordnung (EnEV 2014/16) liegt bei 45 kWh/(m<sup>2</sup>a) – das ist die Hälfte des Referenzbedarfs. Ein sehr guter Standard wurde erreicht, aber ein Nettonullenergiehaus kann nicht nachgewiesen werden.

Der witterungskorrigierte Wärmeenergieverbrauch aus drei Jahren Monitoring beläuft sich auf 11,3 kWh/(m<sup>2</sup>a). Das Gebäude schneidet diesbezüglich sehr gut ab. Eine Detailuntersuchung der relevanten Wärmeströme für das Jahr 2017 zeigt Abbildung 7. Würden alle vorher besprochenen Modifikationen des Energiekonzeptes umgesetzt, erhöhte sich der Fernwärmeverbrauch um etwa 38 MWh/a. Der Endenergieverbrauch läge dann bei knapp 24 kWh/(m<sup>2</sup>a). Die Verdoppelung ist vor allem dem Wegfallen des Erdreichwärmübertragers und der Solarthermie geschuldet. Die Jahresheizkosten steigen um 110 % auf etwa 4400 €/a.

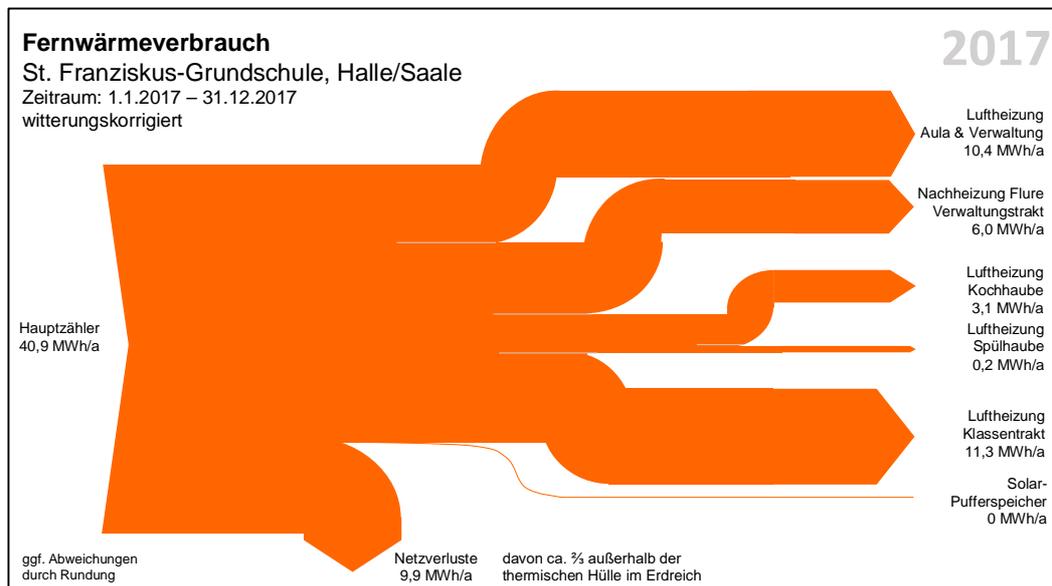


Abbildung 7 Sankeydiagramm für Fernwärme 2017

Der Stromverbrauch aus drei Jahren Monitoring beläuft sich auf 36,3 kWh/(m<sup>2</sup>a) – unter Berücksichtigung der Eigenstromproduktion ergeben sich 10,8 kWh/(m<sup>2</sup>a). Das Schulgebäude gehört damit zu den Vielverbrauchern. Eine Detailuntersuchung der relevanten Energieströme für das Jahr 2017 zeigt Abbildung 8. Würden alle vorher besprochenen Modifikationen des Energiekonzeptes umgesetzt, verminderte sich der Stromverbrauch um etwa 28 MWh/a. Der Endenergieverbrauch läge dann bei knapp 28 kWh/(m<sup>2</sup>a) bzw. 2 kWh/(m<sup>2</sup>a). Die Minderung ist vor allem dem Wegfallen der Regenwassernutzung, der Umstellung auf LED sowie den optimierten Luftvolumenströmen geschuldet. Die Jahreskosten lägen dann bei nur etwa 7000 €/a, d. h. 45 % niedriger als heute.

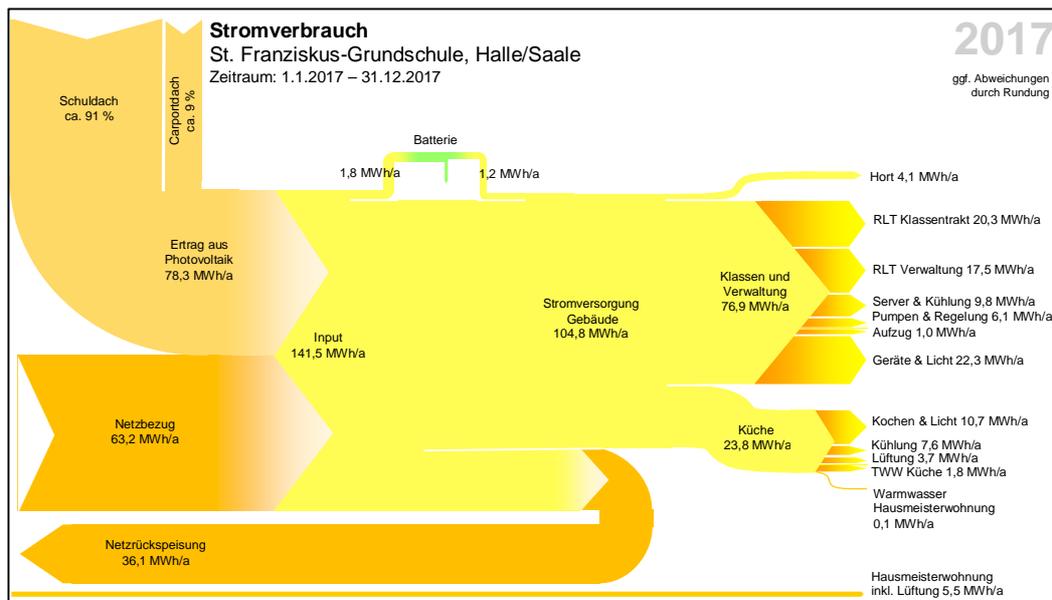


Abbildung 8 Sankeydiagramm für Strom 2017

Der Wasserverbrauch aus drei Jahren Monitoring liegt bei 265 l/(m<sup>2</sup>a). Nach Abzug der genutzten Regenwassermenge ergeben sich 197 l/(m<sup>2</sup>a). Die relevanten Medienströme für das Jahr 2017 zeigt Abbildung 9. Würde die Brauchwassernutzungsanlage nicht errichtet, erhöhte sich der Frischwasserverbrauch entsprechend um die dann fehlende Regenwassermenge. Die Jahreswasser- und -abwasserkosten lägen dann bei 4000 €/a (+ 9%).

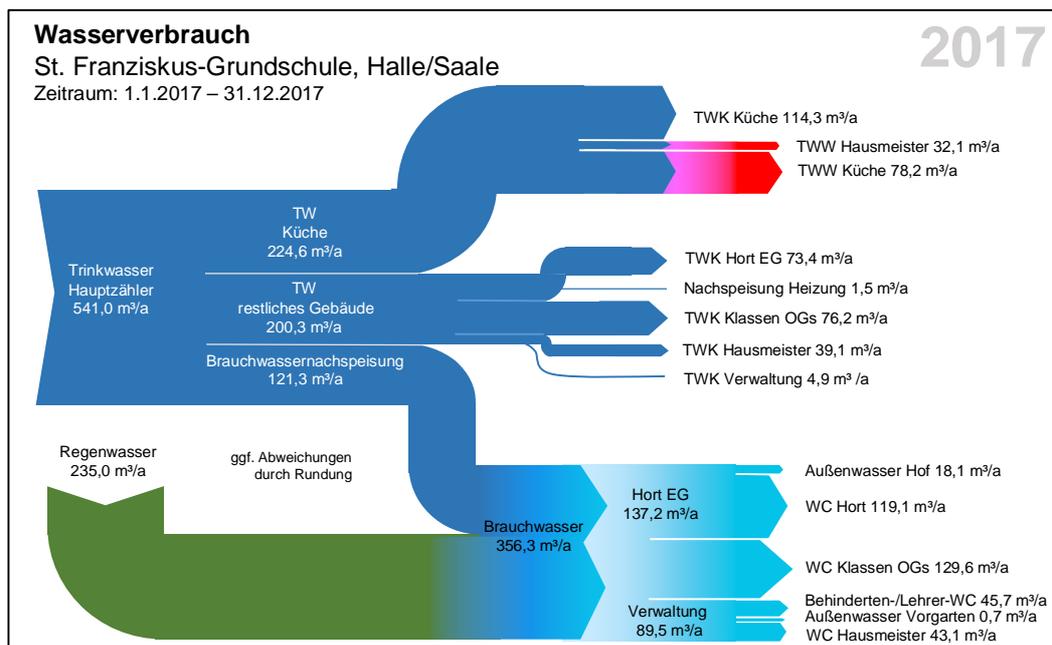


Abbildung 9 Sankeydiagramm für Wasser 2017

### Fazit

Aus Sicht des Monitorings ist das Grundkonzept der St. Franziskus-Schule (Passivhaus mit Photovoltaik) nachahmenswert, jedoch um einige Elemente bereinigt oder ergänzt. Teils aus rein technischer Motivation heraus, teils aus Gründen der Betriebswirtschaftlichkeit und zuletzt zur Verbesserung der Behaglichkeit.

Das Gebäude wurde zu Kosten von 8,20 Mio. € errichtet. In der empfohlenen Ausführung entfielen ca. 661.000 € für das Weglassen von Komponenten, auf der anderen Seite würden ca. 170.000 € für bislang fehlende Bauteile ausgegeben. Das modifizierte Energiekonzept bedeutete also insgesamt geringere Investitionen und geringere laufende Kosten (ca. 3000 €/a). Daher wäre dann "weniger tatsächlich mehr".

Kati Jagnow, Prof. Dr.-Ing., Hochschule Magdeburg/Stendal  
Katharina Gebhardt, M. Eng., Hochschule Magdeburg/Stendal

[1] Jagnow, K.; Gebhardt, K. et al: Energieoptimiertes Bauen – EnEff:Schule, Neubau der St. Franziskus-Grundschule in Halle (Saale) als Nullenergiehaus in Holzbauweise; Abschlussbericht in 12 Teilen; online unter [www.delta-q.de](http://www.delta-q.de); Hochschule Magdeburg/Stendal; 2018.

Manuskript für "Gebäudeenergieberater"; 2019.