

# **Umfassendes Monitoring und Qualitätssicherung des Holzbau-Demonstrationsvorhabens ‚Gymnasium Diedorf‘ einschließlich Betriebsoptimierung, Dokumentation und Ergebnisverbreitung**

## **Abschlussbericht zur 3. Förderphase**

gefördert von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt  
unter dem Aktenzeichen Az 29892/03

**Stand: 05.07.2019**

06/02		<b>Projektkennblatt</b> der <b>Deutschen Bundesstiftung Umwelt</b>			
Az	<b>29892/03</b>	Referat	<b>25</b>	Fördersumme	<b>338.800 €</b>
<b>Antragstitel</b>		<b>Umfassendes Monitoring und Qualitätssicherung des Holzbau-Demonstrationsvorhabens ‚Gymnasium Diedorf‘ einschließlich Betriebsoptimierung, Dokumentation und Ergebnisverbreitung</b>			
<b>Stichworte</b>		Plusenergiestandard, vorgefertigter Holzbau, offene Lernlandschaften, Schule, Neubau, integrale Planung, Monitoring			
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)		
<b>48 Monate</b>	<b>16.03.2015</b>	<b>15.03.2019</b>	<b>3</b>		
Zwischenberichte	1. Zwischenbericht vom 30.3.2017	2. Zwischenbericht vom 09.03.2018	3. Zwischenbericht vom 21.09.2018		
<b>Bewilligungsempfänger</b>	Landkreis Augsburg Prinzregentenplatz 4 86150 Augsburg			Tel	0821/3102-2452
				Fax	0821/3102-1452
				Projektleitung Hr. Schwindling	
				Bearbeiter Frau Lautenbacher-Dammer	
<b>Kooperationspartner</b>	<p>ZAE - Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e.V., Walther-Meißner-Str. 6, 85748 Garching</p> <p>Ingenieurbüro Herbert Mayr, Deubacher Str. 24, 86500 Rommelsried</p> <p>Wimmer Ingenieure GmbH, Wahlfeldstraße 2a, 86356 Neusäß</p> <p>ARGE Nagler/Kaufmann - Architekten Hermann Kaufmann ZT GmbH, Sportplatzweg 5, A-6858 Schwarzach; Florian Nagler Architekten GmbH, Theodor-Storm-Straße 16, 81245 München</p> <p>kplan AG, Bahnhofstraße 13, 93326 Abensberg</p> <p>Ascona GbR, Eschenrieder Straße 65, 82194 Gröbenzell</p> <p>Müller-BBM GmbH, Robert-Koch-Straße 11, 82152 Planegg</p> <p>Universität Augsburg und Pädagogische Hochschule Weingarten</p>				
Deutsche Bundesstiftung Umwelt • An der Bornau 2 • 49090 Osnabrück • Tel 0541/9633-0 • Fax 0541/9633-190 • <a href="http://www.dbu.de">http://www.dbu.de</a>					

### ***Zielsetzung und Anlass des Vorhabens***

Ein wichtiger Baustein für die Erreichung der im Schmuttertal-Gymnasium Diedorf gesetzten ehrgeizigen Projektziele ist der Aufbau eines Monitorings als Grundlage für eine Betriebsoptimierung. Hierzu wird ein ganzheitlicher Monitoringansatz verfolgt.

Die Vielzahl an Projektbeteiligten in Kombination mit innovativen technischen Lösungen, einer anspruchsvollen Regeltechnik und Problemen bei der Bauausführung erfordert eine überwachte Inbetriebnahme mit anschließender Optimierungsphase. Insbesondere bei der Funktionalität von Einzelanlagen und Gebäuden kommt es nicht selten zu Problemen nach der Inbetriebnahme, was sich durch niedrigeren Nutzerkomfort und geringe Akzeptanz bemerkbar macht. Defizite bei der Energieeffizienz werden oft aufgrund der fehlenden Kontrolle gar nicht oder erst verspätet erkannt.

Anhand der in der Monitoringphase gewonnen Messdaten wird eine Interpretation des Gebäudes bezüglich Energie- und Ressourceneffizienz, Klimabelastung und Erfüllung des Raumkomforts ermöglicht. Daraus sollen Empfehlungen und Maßnahmen zur Betriebsoptimierung abgeleitet werden, welche nach deren Durchführung hinsichtlich deren Effizienz und Effektivität bewertet und evaluiert werden können. Das Monitoring dient zudem als Grundlage für eine energetische Evaluierung, um die Erreichung des Plusenergiestandards zu dokumentieren und nachzuweisen.

### ***Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden***

Erfassung und Bewertung des Energie- und Ressourcenverbrauchs sowie des Raumkomforts im realen Gebäudebetrieb

Überprüfung von Funktionalität und Komfort, insbesondere im Hinblick auf die Eignung innovativer Technologien für den gegebenen Anwendungszweck und im Hinblick auf die tatsächliche Auswirkung im realen Gebäudebetrieb

Messungen zur Innenraumlufthygiene nach Fertigstellung und im laufenden Schulbetrieb und Bewertung der Ergebnisse

Stichprobenartige Messungen zur Raumakustik (Nachhallzeit, Schalldämmung, Schalldruckpegel) in ausgewählten Räumen und Bewertung der Ergebnisse

Erarbeiten von praxisnahen Vorschlägen für die Optimierung des Gebäudebetriebs mit Blick auf die Erreichung der ambitionierten Projektziele

Integration der Monitoring-Ergebnisse in die Betriebsführungsabläufe als Voraussetzung für die Optimierung des Gebäudebetriebs

Befragung zur Wirkung der räumlichen Gestaltung, des Holzbaus und des pädagogischen Konzepts auf das Lern- und Leistungsverhalten der Schüler und deren Determinanten

Erfolgskontrolle der Minimierung der Lebenszykluskosten durch Vergleich der in der Planungsphase geschätzten Betriebskosten mit den realen Kosten in der Nutzungsphase

Bewertung des Verhaltens der Holzkonstruktion im Bereich der konstruktiven Verbindungen und der Anschlüsse der Technischen Einbauten

## **Ergebnisse und Diskussion**

Die technischen Systeme arbeiten sehr zuverlässig. Insbesondere die für die Nutzung wichtigen Versorgungssysteme der Wärme-, Kälte- und Frischluftversorgung haben keine Ausfallzeiten. Einzig bei der Verschattungsanlage kommt es zu kurzzeitigen Fehlfunktionen, die den Betrieb aber nicht signifikant einschränken. Zudem arbeiten die anlagentechnischen Systeme weitgehend mit guter energetischer Effizienz, die zentralen Systeme weisen sogar durchgehend sehr gute Energieeffizienzen auf. Beispielsweise liegen die Stromverbräuche der LED-Beleuchtung deutlich unter den Planungsvorgaben. Dies wird durch eine tageslichtabhängige, bedarfsgerechte und zonierte arbeitende Steuerung erreicht. Im Rahmen der Optimierungsphase konnte hier der Stromverbrauch durch Anpassung der Regelparameter deutlich reduziert werden. Festgestellt wurde auch, dass einige verbaute Komponenten die in den Planungsunterlagen dargestellten Leistungs- und Effizienzwerte im Betrieb nicht erreicht haben und daher mit hohem Aufwand ausgetauscht werden mussten. Der Plusenergiestandard im Sinne der projektspezifischen Definition wurde insgesamt deutlich erreicht.

Einige bereits erarbeitete Verbesserungen müssen noch umgesetzt und kontrolliert werden. Dazu gehört die Umstellung der parallelen Betriebsweise der Pelletkessel auf eine Kesselfolgeschaltung mit regelmäßigem laufzeitabhängigem Wechsel des Führungskessels. Die daraus folgende Laufzeitverlängerung erhöht die Effizienz der Wärmeerzeuger und senkt insbesondere die bei Biomassefeuerungen relevanten Feinstaubemissionen deutlich. Außerdem sollte die Überprüfung aller Volumenstromregler erfolgen, um die Luftströmungen zu optimieren. Ein weiteres wichtiges noch abzuarbeitendes Optimierungsfeld betrifft die Verschattungsanlagen.

Der zur Verfügung gestellte Raumkomfort wird von den Nutzern als durchweg angenehm beschrieben. Insbesondere die niedrigen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in den Klassenräumen fallen gerade externen Besuchern der Schule positiv auf. Zusätzlich sorgt die Temperierung im Sommer dafür, dass ganzjährig ein hoher thermischer Raumluftkomfort erreicht wird.

Die „Steckmethode“ der tragenden Holzkonstruktion hat sich ebenso bewährt wie die gewählte Deckenkonstruktion im Holz-Beton-Verbund, die bis Ende 2018 keine nennenswerten Veränderungen im gemessenen Kriechverhalten gezeigt hat. Der Holzbau kann auch im Betrieb sehr gute TVOC- und Formaldehydwerte im Innenraum erreichen. Im Ergebnis kann die Schule als „sehr schadstoffarmes Gebäude“ gemäß DIN EN 15251 eingestuft werden. Es konnte zudem belegt werden, dass Architektur, die die Möglichkeit bietet, verstärkt mit LernLandschaften zu arbeiten, das Potenzial hat Lernprozesse von Schülern zu unterstützen. Die Ergebnisse der Evaluation zeigen, dass das Wohlfühlen im Schulgebäude, einzelne Aspekte der Unterrichtsqualität wie die konstruktive Unterstützung und das soziale Zusammenleben davon profitieren.

## **Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation**

Das Projekt stößt auch nach dreijähriger Betriebsphase immer noch auf großes Interesse in der Öffentlichkeit. Neben der Veröffentlichung in einem Fachbuch und regelmäßigen Besucherführungen gibt es weitere Fachpublikationen und Vorträge zur Monitoringphase.

## **Fazit**

Nach mehr als drei Jahren Betriebsphase kann zum Ende des Jahres 2018 eine positive Bilanz gezogen werden. Der Plusenergiestandard im Sinne der projektspezifischen Definition und auch die Komfortziele wurden deutlich erreicht. Auch zeigen die Beobachtungen, dass es bis heute keine Mängel an der Holzkonstruktion gibt und sich diese bewährt hat.

Wenige erarbeitete Verbesserungen konnten in der Projektlaufzeit nicht vollumfänglich verwirklicht werden. Hier wird dringend empfohlen wichtige noch ausstehende Maßnahmen in 2019 umzusetzen und einer Erfolgskontrolle zu unterziehen.

## Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung.....	14
2	Konzeption, Projektziele und Ablauf.....	15
2.1	Projektziele und Schwerpunkte des Monitoring.....	15
2.2	Konzeption, Planung und Einbau der Sensorik.....	16
3	Verfügbarkeit und Auswertung der Messdaten.....	18
3.1	Messdatenerfassung, Datenexport und -analyse.....	18
3.2	Datenverfügbarkeit.....	20
3.3	Klimadaten im Monitoringzeitraum.....	21
4	Energiebilanzen.....	25
4.1	Strom.....	25
4.2	Wärme.....	29
4.3	Kälte.....	33
4.4	Primärenergiebilanz und treibhausrelevante Emissionen.....	36
5	Raumluftkomfort der Referenzräume.....	38
5.1	Bewertungskriterien.....	38
5.2	Operative Raumlufttemperatur.....	41
5.3	Relative Raumluftfeuchte.....	42
5.4	CO <sub>2</sub> -Konzentration.....	43
6	Zentrale Haustechnik.....	45
6.1	Wärmeerzeugung.....	45
6.2	Kälteerzeugung.....	47
6.3	PV-Anlage.....	49
6.4	Lüftungssystem.....	54
7	Dezentrale Haustechnik.....	62
7.1	Verschattung.....	62
7.2	Beleuchtung und visuelle Behaglichkeit.....	65
7.3	Wärme-/Kälteverteilung.....	66
7.4	Versorgung Einzelräume.....	71
7.5	Brauchwarmwasser.....	75
7.6	Dachrinnenheizung.....	76
7.7	Elektrische Energie.....	77
8	Gebäudeleittechnik.....	81
8.1	Jahreszeitenmodi.....	81
8.2	Betriebsüberwachung.....	83

9	Innenraumlufthygiene.....	84
9.1	Rahmenbedingungen und Konzeption.....	84
9.2	Messergebnisse im Detail.....	85
9.2.1	Messung innerhalb von vier Wochen nach Fertigstellung.....	85
9.2.2	Wiederholung der Messung nach drei Betriebsjahren.....	86
9.2.3	Ergebnis der Messungen.....	86
9.3	Fazit.....	87
10	Akustische Qualität.....	88
10.1	Prüfergebnisse.....	88
10.1.1	Luftschalldämmung.....	88
10.1.2	Trittschalldämmung.....	93
10.1.3	Anlagen der Wasserinstallation.....	95
10.1.4	Nachhallzeiten.....	95
11	Einfluss der Architektur und des pädagogischen Konzepts auf Lehr- und Lernprozesse.....	98
11.1	Theoretische Überlegungen.....	98
11.2	Evaluationskonzept.....	99
11.3	Ergebnisse.....	100
11.3.1	Wirkung der Raumgestaltung und des pädagogischen Konzepts auf emotionales und motivationales Erleben.....	100
11.3.2	Wirkung der Raumgestaltung und des pädagogischen Konzepts auf Qualitätsmerkmale des Unterrichts.....	106
11.3.3	Wirkung der Raumgestaltung und des pädagogischen Konzepts der LernLandschaften auf das Klassenklima und Sozialverhalten.....	109
11.3.4	Wirkung der Raumgestaltung und des pädagogischen Konzepts auf das Lernverhalten der Schüler.....	112
11.4	Zusammenfassung.....	116
12	Lebenszykluskosten.....	117
12.1	Vorgehensweise und Grundlagen.....	117
12.2	Prognosewerte LEGEP.....	118
12.3	Auswertung der Betriebskosten.....	119
12.3.1	Ver- und Entsorgungskosten.....	119
12.3.2	Reinigungskosten.....	124
12.3.3	Wartungskosten.....	125
12.3.4	Reparaturkosten.....	127
12.3.5	Instandsetzungskosten.....	127
12.3.6	Gesamtübersicht.....	129
12.3.7	Kennwerte.....	130
12.4	Bewertung der Ergebnisse.....	132

13	Qualitätssicherung Holzbau .....	134
14	Zusammenfassung relevanter Kenndaten .....	138
15	Zusammenfassung und Ausblick .....	139
15.1	Öffentlichkeitsarbeit.....	139
15.2	Fazit Landkreis Augsburg als Bauherr.....	139
15.3	Fazit und Ausblick Monitoring.....	141

## Abbildungsverzeichnis

<i>Abbildung 3.1-1: Schematische Darstellung des Datenexports für das Monitoring .....</i>	18
<i>Abbildung 3.1-2: Lage und Charakteristika der fünf Referenzräume .....</i>	19
<i>Abbildung 3.3-1: Wetterstation Clima Sensor US auf dem Dach der Aula .....</i>	21
<i>Abbildung 3.3-2: Monatliche Extremwerte der Außenlufttemperaturen der Monitoringjahre 2017 und 2018 im Vergleich zum lokalen Testreferenzjahr des DWD .....</i>	22
<i>Abbildung 3.3-3: Monatliche und jährliche horizontale Globalstrahlungssummen der Monitoringjahre 2017 und 2018 im Vergleich zum Testreferenzjahr des DWD (TRY) für den Standort Diedorf .....</i>	23
<i>Abbildung 3.3-4: Klimafaktoren für die Außentemperatur und die Globalstrahlung im Monitoringzeitraum 2017 und 2018 im Vergleich zum Referenzklimadatensatz des DWD für den Standort Potsdam.....</i>	24
<i>Abbildung 4.1-1: Jahresstromverbrauch der Schulhauptverteilung in den Jahren 2017 und 2018.....</i>	26
<i>Abbildung 4.1-2: Monatlicher Stromverbrauch der Gebäudehauptverteilung 2017 – 2018 .....</i>	27
<i>Abbildung 4.1-3: Sortierte Jahresdauerlinie des Gesamtstromverbrauchs der Schule sowie des PV-Ertrags aus dem Jahr 2018 .....</i>	28
<i>Abbildung 4.1-4: Typisches Wochenprofil des Gesamtstromverbrauchs der Schule als gestapelte Gebäudeverbräuche aus dem März 2018 .....</i>	29
<i>Abbildung 4.2-1: Energiebilanz Wärmezeugung und -verbrauch 2017/2018.....</i>	30
<i>Abbildung 4.2-2: Monatlicher Wärmeverbrauch nach Verbrauchsarten 2017 - 2018.....</i>	31
<i>Abbildung 4.2-3: Klimabereinigter Wärmeverbrauch der Jahre 2017 und 2018 .....</i>	31
<i>Abbildung 4.2-4: Sortierte Jahresdauerlinien Wärmezeugung und -verbrauch für das Jahr 2018 ....</i>	32
<i>Abbildung 4.3-1: Energiebilanz Kälteerzeugung und -verbrauch 2017/2018 .....</i>	33
<i>Abbildung 4.3-2: Monatlicher Kälteverbrauch nach Verbrauchsarten 2017 - 2018 .....</i>	35
<i>Abbildung 4.4-1: Primärenergiebilanz Schmuttertal-Gymnasium Diedorf sowie Monitoring- und Planzahlen im Vergleich (witterungsbereinigt, Datengrundlage 2018) .....</i>	37
<i>Abbildung 5.1-1: Behaglichkeitsdiagramm für die relative Raumluftfeuchte in Abhängigkeit der Raumlufttemperatur [nach Leudsen und Freymark].....</i>	39
<i>Abbildung 5.1-2: Empfohlene operative Raumtemperatur in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur nach DIN EN 15251 .....</i>	40
<i>Abbildung 5.1-3: Allgemeine Klassifizierung der Raumluftqualität (IDA) nach DIN EN 13779 .....</i>	40
<i>Abbildung 5.2-1: Stundenmittelwerte der operativen Raumtemperatur in einem südorientierten Klassenraum .....</i>	41
<i>Abbildung 5.2-2: Statistische Auswertung der operativen Raumtemperatur im Jahr 2018.....</i>	42
<i>Abbildung 5.3-1: Stundenmittelwerte der rel. Raumluftfeuchte in einem südorientierten Klassenraum .....</i>	43
<i>Abbildung 5.4-1: CO<sub>2</sub>-Konzentration in einem südorientierten Klassenraum als Jahresdauerlinie.....</i>	44

<i>Abbildung 6.1-1: Tagesmittel der Heizleistung für die Fußbodenheizung in Abhängigkeit des 24h-Mittels der Außenlufttemperatur der Jahre 2017 und 2018 .....</i>	<i>45</i>
<i>Abbildung 6.1-2: Kesselleistung im Heizbetrieb .....</i>	<i>46</i>
<i>Abbildung 6.2-1: Leistungszahl (EER) der Kälteerzeugung in Abhängigkeit der Feuchtkugeltemperatur der Außenluft in den Betriebsjahren 2017 und 2018 .....</i>	<i>48</i>
<i>Abbildung 6.2-2: Elektrischer Stromverbrauch der Kälteerzeugung in der Nichtnutzungszeit (Abschaltung der Carterheizung).....</i>	<i>49</i>
<i>Abbildung 6.3-1: Luftbildaufnahme der PV-Anlage am Standort Diedorf.....</i>	<i>50</i>
<i>Abbildung 6.3-2: Begriffsdefinition von Photovoltaikenngrößen am Beispiel der elektrischen Leistungskurven des Gymnasiums am Freitag, den 30.09.2016 .....</i>	<i>51</i>
<i>Abbildung 6.3-3: Monatlicher PV-Ertrag, Autarkie und Eigenverbrauchsquote im Jahr 2018.....</i>	<i>52</i>
<i>Abbildung 6.3-4: Wirkungsgradkurve PV-Ertrag 2017 .....</i>	<i>53</i>
<i>Abbildung 6.4-1: Spezifische elektrische Zuluftventilatorleistung und Häufigkeitsverteilung von Luftvolumenströmen .....</i>	<i>55</i>
<i>Abbildung 6.4-2: Befeuchtungsgrad der Abluft bei aktivierter Adiabatik .....</i>	<i>57</i>
<i>Abbildung 6.4-3: Betriebsdaten der adiabatischen Verdunstungskühlung im Abluftstrang der zentralen Lüftungsanlage.....</i>	<i>58</i>
<i>Abbildung 6.4-4: WRG-Schema der Fa. SEW .....</i>	<i>59</i>
<i>Abbildung 6.4-5: Temperatúraustauschgrade der WRG ohne Einkopplung von Heizwärme .....</i>	<i>61</i>
<i>Abbildung 7.1-1: Verschattungssituation der Aula-Südfassade an einem sonnigen Septembertag</i>	<i>63</i>
<i>Abbildung 7.1-2: Verschattungssituation einer Südfassade an einem bedecktem Novembermorgen .</i>	<i>63</i>
<i>Abbildung 7.1-3: Lamellensteuerung der Verschattung an exemplarischen Tagen vor und nach der Optimierung .....</i>	<i>64</i>
<i>Abbildung 7.2-1: Sektorbezogene Helligkeitswerte [lux] auf Tischhöhe bei geringem Tageslichtangebot vor der Optimierung .....</i>	<i>65</i>
<i>Abbildung 7.2-2: Sektorbezogene Helligkeitswerte [lux] auf Tischhöhe bei mäßigem Tageslichtangebot nach der Optimierung.....</i>	<i>65</i>
<i>Abbildung 7.3-1: Lückenhafte Rohrdämmung am Fußbodenverteiler im Jahr 2017 .....</i>	<i>66</i>
<i>Abbildung 7.3-2: Undichtes Umschaltventil zwischen Warm- und Kaltwasserkreis .....</i>	<i>67</i>
<i>Abbildung 7.3-3: Elektrische Leistungsaufnahme einer Umwälzpumpe des Fußbodenverteilers in Abhängigkeit des geförderten Volumenstroms.....</i>	<i>69</i>
<i>Abbildung 7.3-4: Betriebscharakteristik Kesselkreisumpen im Vergleich .....</i>	<i>70</i>
<i>Abbildung 7.3-5: Speichertemperaturen und Kesselleistung in der Heizperiode .....</i>	<i>71</i>
<i>Abbildung 7.4-1: Monatliche elektrische Energiebilanz für den Referenzraum N119 im Jahr 2017 .....</i>	<i>72</i>
<i>Abbildung 7.4-2: Typisches Wochenprofil der Einzelraumregelung Klassenraum im Sommer .....</i>	<i>74</i>
<i>Abbildung 7.4-3: Zuluftsolltemperatur Klassenräume .....</i>	<i>75</i>
<i>Abbildung 7.5-1: Tagesprofil Frischwasserstation Sporthalle .....</i>	<i>76</i>
<i>Abbildung 7.6-1: Funktionalität Dachrinnenheizung Dezember 2016 bis Januar 2017 .....</i>	<i>77</i>

<i>Abbildung 7.7-1: Spannungsmessungen</i> .....	79
<i>Abbildung 7.7-2: Auswertung Netzfrequenz</i> .....	80
<i>Abbildung 8.1-1: Übergeordnete Betriebsmodi im Jahr 2018</i> .....	82
<i>Abbildung 9.1-1: Raumluft-Kontrollmessung in Klassenzimmer</i> .....	84
<i>Abbildung 9.2-1: Ergebnis der TVOC-Messung in Diedorf</i> .....	85
<i>Abbildung 9.2-2: Ergebnis der Formaldehyd-Messung in Diedorf</i> .....	85
<i>Abbildung 9.2-3: Übersicht der Messbedingungen</i> .....	86
<i>Abbildung 9.2-4: Zusammenfassung der Messergebnisse</i> .....	87
<i>Abbildung 11.1-1: Postulierter Wirkprozess der Raumgestaltung und des pädagogischen Handelns auf individuelles Lern- und Leistungsverhalten und deren Determinanten</i> .....	98
<i>Abbildung 11.2-1: Design zur Evaluation der Wirkung der Architektur und des pädagogischen Konzepts auf Lehr-Lernprozesse am Schmuttertal-Gymnasium in Diedorf</i> .....	99
<i>Abbildung 11.2-2: Zeitplan der Erhebungen zur Evaluation der Wirkung der Raumgestaltung und des pädagogischen Konzepts der LernLandschaft am Schmuttertal-Gymnasium Diedorf</i> .....	100
<i>Abbildung 11.3-1: Wirkung der Architektur und des pädagogischen Konzepts auf das Wohlbefinden der Schüler im Schulgebäude</i> .....	101
<i>Abbildung 11.3-2: Wirkung der Architektur und des pädagogischen Konzepts auf das Wohlbefinden der Schüler in den Klassenräumen</i> .....	102
<i>Abbildung 11.3-3: Wirkung der Architektur und des pädagogischen Konzepts auf die Lernfreude</i> .....	103
<i>Abbildung 11.3-4: Wirkung der Architektur und des pädagogischen Konzepts auf die Langeweile</i> .....	103
<i>Abbildung 11.3-5: Wirkung der Architektur und des pädagogischen Konzepts auf Ärger</i> .....	104
<i>Abbildung 11.3-6: Wirkung der Architektur und des pädagogischen Konzepts auf die intrinsische Motivation</i> .....	105
<i>Abbildung 11.3-7: Wirkung der Architektur und des pädagogischen Konzepts auf die Aufmerksamkeitssteuerung der Schülerinnen und Schüler</i> .....	106
<i>Abbildung 11.3-8: Wirkung der Architektur und des pädagogischen Konzepts auf die kognitive Aktivierung der Schüler</i> .....	107
<i>Abbildung 11.3-9: Wirkung der Architektur und des pädagogischen Konzepts auf die konstruktive Unterstützung der Schülerinnen und Schüler</i> .....	108
<i>Abbildung 11.3-10: Wirkung der Architektur und des pädagogischen Konzepts auf die Klarheit der Instruktion</i> .....	108
<i>Abbildung 11.3-11: Wirkung der Architektur und des pädagogischen Konzepts auf die Lehrer-Schüler-Beziehung</i> .....	110
<i>Abbildung 11.3-12: Wirkung der Architektur und des pädagogischen Konzepts auf die Unterstützung Gleichaltriger bei Problemen</i> .....	111
<i>Abbildung 11.3-13: Wirkung der Architektur und des pädagogischen Konzepts auf die Unterstützung Gleichaltriger im Unterricht</i> .....	112
<i>Abbildung 11.3-14: Wirkung der Architektur und des pädagogischen Konzepts der LernLandschaften auf das Planen des Lernverhaltens</i> .....	113

---

<i>Abbildung 11.3-15: Wirkung der Architektur und des pädagogischen Konzepts der LernLandschaften auf das Monitoring des Lernverhaltens.....</i>	<i>114</i>
<i>Abbildung 11.3-16: Wirkung der Architektur und des pädagogischen Konzepts der LernLandschaften auf die Regulation des Lernverhaltens .....</i>	<i>115</i>
<i>Abbildung 12.2-1: Prognose Folgekosten netto statisch in €/a für drei Varianten .....</i>	<i>118</i>
<i>Abbildung 12.2-2: Folgekosten dynamisiert und abgezinst in €/a .....</i>	<i>119</i>
<i>Abbildung 12.3-1: Prognose Endenergiebedarf in kWh/a bezogen auf den m<sup>2</sup> Energiebezugsfläche</i>	<i>120</i>
<i>Abbildung 12.3-2: Strombezug und Stromeinspeisung in absoluten Werten €/a brutto .....</i>	<i>121</i>
<i>Abbildung 12.3-3: Bezug von Pellets für die Heizung in absoluten Werten €/a brutto.....</i>	<i>122</i>
<i>Abbildung 12.3-4: Frischwasser- und Abwasserkosten in €/a absolut brutto.....</i>	<i>123</i>
<i>Abbildung 12.3-5: Ver- und Entsorgungskosten als Einnahmen und Ausgaben €/a absolut brutto .....</i>	<i>124</i>
<i>Abbildung 12.3-6: Reinigungskosten in €/a absolut brutto .....</i>	<i>125</i>
<i>Abbildung 12.3-7: Wartungskosten in €/a brutto absolut .....</i>	<i>126</i>
<i>Abbildung 12.3-8: Ergebnisse für die Berechnung der Instandsetzungsaufwendungen in €/a brutto absolut.....</i>	<i>128</i>
<i>Abbildung 12.3-9: Gesamte Folgekosten in €/a brutto Prognose und reale Kosten .....</i>	<i>129</i>
<i>Abbildung 12.3-10: Gesamte Folgekosten mit abgezinster Instandsetzungsrücklagein €/a brutto ...</i>	<i>130</i>
<i>Abbildung 12.3-11: Gesamte Folgekosten mit abgezinster Instandsetzungsrücklage in €/a brutto ..</i>	<i>131</i>
<i>Abbildung 12.3-12: : Gesamte Folgekosten mit abgezinster Instandsetzungsrücklage in €/a brutto</i>	<i>131</i>
<i>Abbildung 12.3-13: Gesamte Folgekosten mit abgezinster Instandsetzungsrücklage in €/a brutto ..</i>	<i>132</i>
<i>Abbildung 13-1: Detail Architekt .....</i>	<i>135</i>
<i>Abbildung 13-2: Detail Werkplanung .....</i>	<i>135</i>
<i>Abbildung 13-3: Detail Architekt .....</i>	<i>136</i>
<i>Abbildung 13-4: Detail Werkplanung .....</i>	<i>136</i>

## Tabellenverzeichnis

<i>Tabelle 1: Messergebnisse und Bewertung der Luftschalldämmung der Geschosstrenndecken .....</i>	<i>88</i>
<i>Tabelle 2: Messergebnisse und Bewertung der Luftschalldämmung der Trennwände.....</i>	<i>89</i>
<i>Tabelle 3: Messergebnisse und Bewertung der Luftschalldämmung der Trennwände.....</i>	<i>90</i>
<i>Tabelle 4: Messergebnis und Bewertung der Luftschalldämmung der Süd-/Westfassade des Musikraums im EG.....</i>	<i>93</i>
<i>Tabelle 5: Messergebnisse und Bewertung der Trittschalldämmung der Geschosstrenndecken .....</i>	<i>94</i>
<i>Tabelle 6: Messergebnisse und Bewertung der Trittschalldämmung der Treppenläufe.....</i>	<i>94</i>
<i>Tabelle 7: Messung der Armaturen im Raum WC-Knaben, Klassenhaus 1, 1. OG, Raum-Nr. N.1.16, gemessen im Raum Bio I (VE = 174,0 m<sup>3</sup>), Klassenhaus 1, EG, Raum-Nr. N.E.12 .....</i>	<i>95</i>
<i>Tabelle 8: Messung der Armaturen im Raum Damen, Aula, 1. OG, Raum-Nr. A.1.18, gemessen im Raum Kleiner Musikraum (VE = 146,0 m<sup>3</sup>), Klassenhaus 1, EG, Raum-Nr. A.E.05 .....</i>	<i>95</i>

## Begriffs- und Definitionsverzeichnis

<i>Achievement Emotions Questionnaire</i>	AEQ
<i>Arbeitsgemeinschaft der leitenden Medizinbeamten und -beamtinnen der Länder</i>	AGLMB
<i>Arbeitsgemeinschaft der obersten Landesgesundheitsbehörden</i>	AOLG
<i>Building Automation and Control Network</i>	BACnet
<i>Bruttogrundfläche</i>	BGF
<i>Brauchwarmwasser</i>	BWW
<i>Deutscher Wetterdienst</i>	DWD
<i>Energiebezugsfläche</i>	EBF
<i>Energy Efficiency Ratio</i>	EER
<i>Fußbodenheizung</i>	FBH
<i>Fußbodenkühlung</i>	FBK
<i>Frischwasserstation</i>	FWS
<i>Gebäudeleittechnik</i>	GLT
<i>Institut für Qualitätsmanagement und Umfeldhygiene</i>	IQUH
<i>Innenraumlufthygiene-Kommission</i>	IRK
<i>Klassenhaus</i>	KH
<i>Kältemaschine</i>	KM
<i>Kältemengenzähler</i>	KMZ
<i>Kälterückgewinnung</i>	KRG
<i>Kreislaufverbundsystem</i>	KVS
<i>Luftherhitzer</i>	LE
<i>Landratsamt</i>	LRA
<i>motivationale Selbstregulation bei Jugendlichen</i>	MoS-J
<i>Nutzfläche</i>	NF
<i>Nettoraumfläche</i>	NRF
<i>Niederspannungshauptverteilung</i>	NSHV
<i>Primärenergie</i>	PE
<i>Raumlufttechnik</i>	RLT
<i>spezifische Ventilatorleistung</i>	SFP
<i>Testreferenzjahr</i>	TRY
<i>Verein Deutscher Ingenieure</i>	VDI
<i>Luftvolumenstromregler</i>	VSR
<i>Wiederbeschaffungszeitwert</i>	WBZW
<i>Wärmerückgewinnung</i>	WRG

## 1 Zusammenfassung

Nach mehr als drei Jahren Betriebsphase kann zum Ende des Jahres 2018 eine positive Bilanz gezogen werden. Die anlagentechnischen Systeme arbeiten weitgehend mit guter energetischer Effizienz, sodass der Plusenergiestandard im Sinne der projektspezifischen Definition deutlich erreicht wurde. Insbesondere die zentralen Systeme weisen durchgehend sehr gute Energieeffizienzen auf. Bei der Kälteerzeugung konnte durch die Umsetzung von umfangreichen Optimierungspaketen die Leistungszahl (EER) von 3,4 auf 4,8 erhöht werden. Die für die Effizienz der gesamten Lüftungsanlage entscheidenden spezifischen Ventilatorwirkungsgrade liegen in den Hauptbetriebspunkten in den beiden effizientesten SFP Klassen 1 und 2. Der Wirkungsgrad der elektrischen Stromproduktion lag im letzten Monitoringjahr 2018 bei guten 15,00 % bezogen auf die horizontale Globalstrahlung. Die Stromverbräuche der LED-Beleuchtung liegen deutlich unter den Planungsvorgaben. Im Jahresmittel wird in den Klassenräumen lediglich 1,5 kWh/m<sup>2</sup>a elektrische Energie verbraucht.

Der zur Verfügung gestellte Raumkomfort wird von den Nutzern als durchweg angenehm beschrieben. Insbesondere die niedrigen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in den Klassenräumen fallen gerade externen Besuchern der Schule positiv auf.

Die Beobachtungen der letzten 3 Jahre zeigen, dass es bis heute keine Mängel an der Holzkonstruktion gibt und sich diese bewährt hat. Der Holzbau kann auch im Betrieb sehr gute TVOC- und Formaldehydwerte im Innenraum erreichen. Die Messergebnisse in allen untersuchten Schulräumen haben ergeben, dass in den Räumen auch nach dreijähriger Betriebsphase keine neuen Emissionsquellen aufgetreten und die bereits guten Werte weiter abgesunken sind. Auch bei Lüftungsausfall würden durch das Gebäude keinen Raumluftbelastungen verursacht werden, so dass das Schmuttertal-Gymnasium als „sehr schadstoffarmes Gebäude“ gemäß DIN EN 15251 eingestuft werden kann.

Dennoch zeigte die Evaluation auch einige Schwachpunkte auf. Nach Baufertigstellung nahm die Bereitschaft und Motivation insbesondere der ausführenden Firmen, aber auch der anderen Planungsbeteiligten deutlich ab, erforderliche Optimierungen durchzuführen. Aufgrund der guten wirtschaftlichen Lage der Baubranche in den Jahren 2017 und 2018 waren die Nacharbeiten am Gymnasium scheinbar wenig attraktiv. Etliche, vor allem jahreszeitliche Optimierungspunkte sind im Monitoringzeitraum zwar umgesetzt worden, konnten aber nicht abschließend evaluiert werden. Wenige erarbeitete Verbesserungen konnten in der Projektlaufzeit nicht vollumfänglich verwirklicht werden (Betriebsweise Pelletkessel, Verschattungsanlagen, Volumenstromregelung Lüftung, Neuparametrierung der Umwälzpumpen, Stromverbrauch der Präsentationmedien). Dokumentiert werden konnte auch, dass einige verbaute Komponenten die in den Planungsunterlagen dargestellten Leistungs- und Effizienzwerte im Betrieb nicht erreicht haben.

## 2 Konzeption, Projektziele und Ablauf

### 2.1 Projektziele und Schwerpunkte des Monitoring

Ein wichtiger Baustein für die Erreichung ehrgeiziger Projektziele ist der Aufbau eines Monitorings als Grundlage für eine Betriebsoptimierung. Die Vielzahl an Projektbeteiligten in Kombination mit innovativen technischen Lösungen, einer anspruchsvollen Regeltechnik und Problemen bei der Bauausführung erfordert eine überwachte Inbetriebnahme mit anschließender Optimierungsphase. Insbesondere bei der Funktionalität von Einzelanlagen und Gebäuden kommt es nicht selten zu Problemen nach der Inbetriebnahme, was sich durch niedrigeren Nutzerkomfort und geringe Akzeptanz bemerkbar macht. Defizite bei der Energieeffizienz werden oft aufgrund der fehlenden Kontrolle gar nicht oder erst verspätet erkannt.

Das Monitoring dient ebenfalls als Grundlage für eine energetische Evaluierung, um die Erreichung des Plusenergiestandards zu dokumentieren und nachzuweisen. Dabei werden auch die in der Planungsphase getroffenen Annahmen und Auslegungen im Gebäudebetrieb überprüft, um so in Zukunft optimierte Planungsprozesse zu erreichen.

Folgende Zielstellungen nach Themenschwerpunkten werden für das ganzheitliche Monitoring verfolgt:

- Hoher Raumkomfort und Behaglichkeit

Insbesondere der thermische Komfort und die Qualität der Raumluft spielen hier eine entscheidende Rolle. Die wichtigsten Aspekte sind dabei eine ganzjährig angenehme operative Raumlufttemperatur, nicht zu niedrige relative Raumluftfeuchten im Winter und die Vermeidung von hohen CO<sub>2</sub>-Konzentrationsspitzen. Weitere Themen sind ein hoher Anteil an Tageslichtnutzung, zugfreie Einbringung von Frischluft, geringe Nachhallzeiten für eine gute Raumakustik und ein ausreichender Blendschutz.

- Energieeffizienz und Nachhaltigkeit

In diesem Komplex geht es im ersten Schritt um die Optimierung der Energieeffizienz, angefangen bei den Einzelkomponenten (z. B. Umwälzpumpen) über gesamte Systeme (z. B. PV-Anlage) bis hin zum Gesamtgebäude (Erreichung des Plusenergiestandards im Betrieb). Dazu wurden sowohl Wirkungsgrade ermittelt als auch energetische, ökologische und wirtschaftliche Jahresbilanzen aufgestellt und bewertet.

- Lebenszyklus

Im Hinblick auf den Nachhaltigkeitsaspekt wurde außerdem überprüft, ob die in der Planungsphase geschätzten Betriebskosten mit den realen Kosten in der Nutzungsphase übereinstimmen. Dazu wurden Betriebskosten über drei Jahre im Detail analysiert und ausgewertet.

- Qualität Holzbau

Insbesondere spezielle Konstruktionsdetails und die Einbindung der haustechnischen Anlagen wurden im Rahmen der Nutzungsphase überprüft und bewertet.

- Betriebsoptimierung

Nach der Inbetriebnahme des Gebäudes sind sowohl die komforttechnischen als auch die energetischen und wirtschaftlichen Zustände im Hinblick auf die gesetzten Zielstellungen optimiert worden. In enger Zusammenarbeit mit dem Bauherrn, den Nutzern, den Planern

und den ausführenden Firmen sind Optimierungsvorschläge erarbeitet, umgesetzt und mit einer Erfolgskontrolle in Form einer Evaluation abgeschlossen worden.

Ergänzend erfolgte eine sozialwissenschaftliche Begleitforschung im Hinblick auf die Wirkungen des pädagogischen Konzepts und des Einflusses des Holzbaus auf das Lern- und Leistungsverhalten der Schüler sowie deren Akzeptanz.

## 2.2 Konzeption, Planung und Einbau der Sensorik

Im ersten Schritt ist auf Basis der von den Fachplanern und Architekten vorgestellten Konzepte für Gebäude, Anlagentechnik und Nutzung ein spezielles Monitoringkonzept entwickelt worden, welches die beschriebenen Zielstellungen in Bezug auf Raumkomfort, Energieeffizienz und Optimierung berücksichtigt. Folgende Schwerpunkte lassen sich hier differenzieren:

- Die detaillierte Vermessung von fünf Referenzräumen bzw. -zonen zur Analyse von Raum- und Nutzungskomfort, Energieverbräuchen sowie Schalt- und Regelvorgängen in den verschiedenen Betriebsmodi.
- Die redundante Vermessung von zentralen technischen Anlagen insbesondere des Heiz- und Kühlsystems sowie der Lüftungsanlage zur Beurteilung von Energieeffizienz und Wirtschaftlichkeit.
- Das separate Monitoring von Sondernutzungen wie Küche, Server, Sporthalle oder Aula.
- Die ergänzende Erfassung von Stromflüssen getrennt nach Nutzungsarten (Beleuchtung, Pumpen, Steuerung etc.).
- Eine verbesserte Wetterdatenaufzeichnung zur Optimierung des Gebäudebetriebs und der energetischen Bilanzierung.

Im weiteren Planungsverlauf wurde die Anzahl und Positionierung der einzelnen Messfühler erarbeitet und abgestimmt sowie die dazugehörigen Sensorspezifikationen dokumentiert (Messbereich, Messprinzip, Messgenauigkeit, Schnittstelle). Alle Dienstleistungen und Komponenten für den Aufbau der Messdatenerfassung wurden in den Leistungsverzeichnissen der Gewerke HLS und ELT zusammengefasst, ausgeschrieben, ausgeführt und abgerechnet.

Sowohl der Einbau der Standardsensoren für den Gebäudebetrieb als auch die Montage der zusätzlich notwendigen Monitoringfühler erfolgte durch die ausführenden Firmen der Gewerke Elektro und HLS. Bedingt durch den engen Zeitplan und die dadurch notwendige baubegleitende Planung, musste auch die Planung der Sensorik laufend an die neuen Bedingungen bzw. die Änderungen der anderen Gewerke angepasst werden.

Der Nutzungsbeginn des Gymnasiums erfolgte termingetreu zu Beginn des Schuljahres 2015/2016. Die Arbeiten an der technischen Gebäudeausrüstung, insbesondere an der Programmierung der Gebäudeautomation, wurden jedoch erst nach Bezug während des Gebäudebetriebs fertiggestellt.

Es hat sich gezeigt, dass alle Überlegungen, die Messgrößen möglichst genau zu erfassen (z. B. Definition von Genauigkeit und Montagestandort, Auswahl Sensorprodukt), konterkariert werden können, wenn die Sensoren nicht wie geplant eingebaut werden. Deshalb ist im Rahmen der Abnahme bzw. der Qualitätssicherung darauf geachtet worden, dass eine fehlerfreie Montage durchgeführt wird. Besondere Vorsicht ist geboten, wenn die ausführenden Firmen auf dem Gebiet des Monitorings keine ausreichenden Kenntnisse haben, um Fehler selbständig zu erkennen. Gerade bei dem Einbau der zusätzlichen Monitoringfühler, die nicht für den normalen Gebäudebetrieb notwendig sind, hat sich in der Bauausführung herausgestellt, dass etliche Sensoren falsch oder gar nicht eingebaut worden sind. Die Nachinstallation zog sich über Monate, weil die Firmen nach

Inbetriebnahme des Gebäudes nur noch sporadisch auf der Baustelle anzutreffen waren. Für zukünftige Projekte ist darauf zu achten, dass der Informationsfluss zum Thema „Wissenschaftliches Monitoring“ von den beteiligten Fachplanern bis zu den ausführenden Firmen sichergestellt wird.

### 3 Verfügbarkeit und Auswertung der Messdaten

#### 3.1 Messdatenerfassung, Datenexport und -analyse

Die für das Monitoring notwendigen Messwerte von Sensoren, Aktoren, Regelparametern und Betriebszuständen werden über die Bus-Systeme der Gewerke HLS und Elektro erfasst und auf Servern zusammengeführt. Per csv-Datei erfolgt der Datenexport aus den Serverdatenbanken zu einem unabhängigen Server des ZAE Bayern, der für die Leittechnik vor Ort nicht benötigt wird. Dabei werden Tagesdateien mit einer zeitlichen Auflösung von einer bis fünf Minuten erzeugt. Großer Vorteil dieser Systemarchitektur ist, dass es weiterhin klare Zuständigkeiten für Funktionalität und Gewährleistung der einzelnen Server gibt. Die Datenaufnahme erfolgt unabhängig und ohne Zugriff auf die für den Gebäudebetrieb notwendigen Server für HLS und Elektro. Die Weiterleitung zur Datenbank am ZAE Bayern erfolgt über eine gesicherte Internetverbindung. Dort werden die Daten in einer weiteren Datenbank abgelegt, auf Plausibilität geprüft und vorausgewertet. Auf diese Weise sind eine hohe Datenverfügbarkeit und eine rasche Auswertung gewährleistet. Weiterhin wird das am ZAE Bayern entwickelte Web-Browser-basierte Softwarepaket Medview2 eingesetzt, das die graphische Darstellung des zeitlichen Verlaufs der in der Datenbank abgelegten Messdaten erlaubt. So können ohne großen Aufwand aktuelle und historische Daten miteinander verglichen werden. Ebenso ist eine tabellarische Auswertung für z. B. Energiebilanzen oder eine Implementierung von Rechenkanälen möglich, in denen eine mathematische Verknüpfung und Berechnung von sekundären Werten erfolgt (z. B. 24h-Mittelwerte der Bauteilfühler). Des Weiteren kann eine Zugangsberechtigung für im Projekt beteiligte Personen eingerichtet werden, mit der jederzeit von einem externen Rechner Einsicht in die in der Datenbank gespeicherten Messdaten genommen werden kann. Ein Schema des gesamten Messdatentransfers ist in *Abbildung 3.1-1* dargestellt.

Die Umsetzung erfolgt bis zur Erstellung der csv-Datei durch die ausführenden Firmen, die Konfiguration des Messrechners sowie der Aufbau der externen Datenbank fallen in die Verantwortlichkeit des ZAE Bayern.

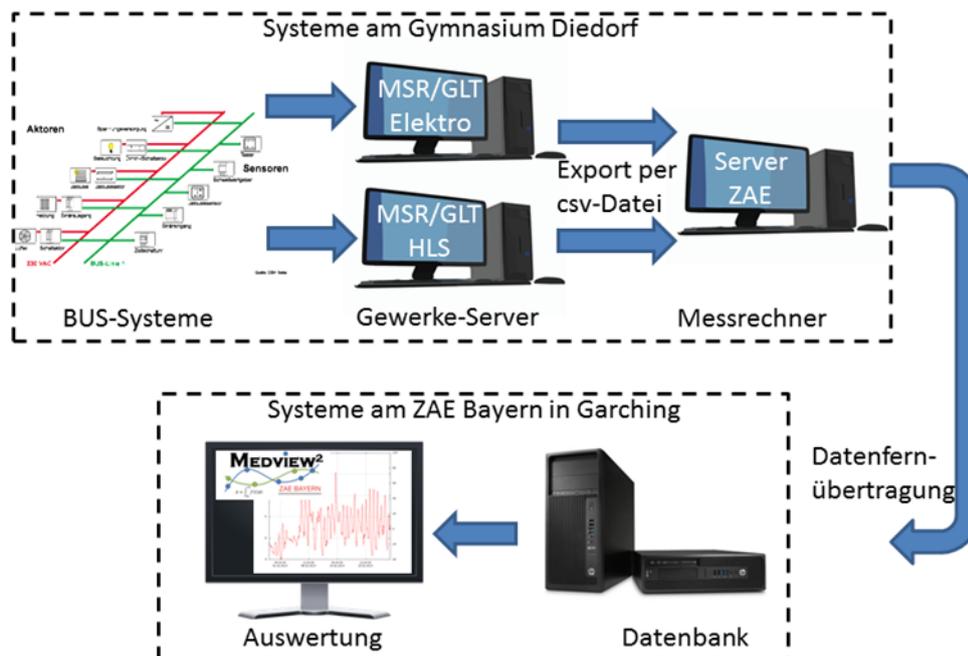


Abbildung 3.1-1: Schematische Darstellung des Datenexports für das Monitoring

Zur Aufzeichnung der Klimadaten werden Pyranometer, Wetterstationen sowie Außenlufttemperatur und -feuchtefühler eingesetzt.

In allen Klassenräumen bzw. Marktplätzen wird folgende Standardsensorik zur effizienten Haustechniksteuerung umgesetzt:

- Raumlufttemperatur zur Heizungsregelung
- CO<sub>2</sub>-Konzentration zur Lüftungsregelung
- Beleuchtungsstärke zur Kunstlichtregelung
- Präsenz zur Abschaltung der Versorgungsfunktionen

Darüber hinaus wurden fünf Referenzräume ausgewählt, mit dem Ziel, eine genaue Analyse des Raumkomforts, der anlagentechnischen Versorgungsfunktionen sowie des Stromverbrauchs zu erstellen. Dazu sind die Zonen mit zusätzlichen Sensoren ausgestattet. Standardmäßig werden in den Klassen raumweise Lufttemperatur zur Heizungsregelung und CO<sub>2</sub>-Konzentration zur Lüftungsregelung in der Mediensäule erfasst. Hinzu kommt die Erfassung von Beleuchtungsstärke zur Kunstlichtregelung, die Präsenz zur Abschaltung der Versorgungsfunktionen an zwei mittigen Positionen der Decke und die Erfassung der Fensterposition durch einen Schließkontakt. In den fünf Referenzräumen (Charakteristika siehe Abbildung 3.1-2) werden zur detaillierteren Analyse zusätzliche Parameter wie elektrische Verbräuche unterschieden nach Nutzungsarten, Oberflächen- und operative Raumtemperatur, relative Luftfeuchte, VOC-Konzentration oder Kennwerte, die für die Versorgungsfunktionen Heizen/Lüften/Kühlen/Verschatten/Beleuchten notwendig sind, erfasst (z.B. Positionsstellungen von Ventilen, Reglern oder anderen Bauteilen bzw. Systemzuständen, Soll- und Rückmeldebefehle).

Bezeichnung	Klasse Süd (geschlossen)	Klasse Süd (offen)	Klasse Nord (offen)	Klasse Süd (offen)	Marktplatz
Haus	KH 1, Physik III	KH 1, 6. Kl.	KH 1, 5. Kl.	KH 2, 9. Kl.	KH 2, 9. Kl.
Orientierung	Süd teilverschattet	Süd teilverschattet	Nord	Süd unversch.	Innen
Etage	EG	1. OG	1. OG	2. OG	2. OG
RaumNr.	NE 02	N 1.03	N 1.19	W 2.09	W 2.11

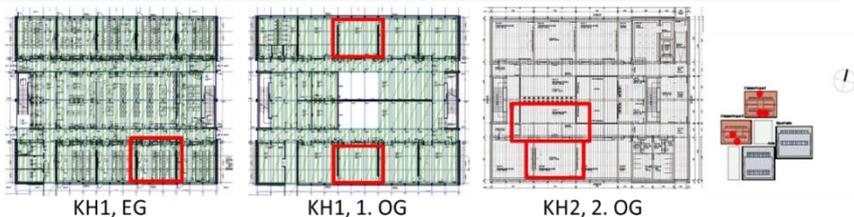


Abbildung 3.1-2: Lage und Charakteristika der fünf Referenzräume

In den Referenzräumen gibt es zusätzliche Messdaten für:

- Relative Raumluftfeuchte als Indikator für die Behaglichkeit
- VOC-Konzentration als Bewertungszahl für den Gesundheitsschutz

- Relative Raumlufffeuchte, Raumlufftemperatur, CO<sub>2</sub>-Konzentration und VOC-Konzentration an einem zweiten Standort im Raum
- Oberflächentemperaturen von Verglasung, Fensterrahmen, Fußboden und Außenwand sowie Strahlungstemperatur
- Volumenstrom sowie Lufttemperatur und -feuchte der Zuluft
- Wärme- und Kältemengenzähler für die Fußbodenheizung
- Stromverbräuche nach Nutzungsarten

### 3.2 Datenverfügbarkeit

Das Gymnasium wurde zu Beginn des Schuljahres 2015/2016 am 15.09.2015 offiziell in Betrieb genommen. Um diesen Termin überhaupt halten zu können, mussten alle Arbeiten, die die Funktionalität des Gebäudes nicht wesentlich beeinflussen, auf einen späteren Termin verschoben werden. Dazu gehörte auch die Umsetzung des Monitorings. Zwar war die Mehrzahl der Sensoren bereits im Gebäude verbaut, die Speicherung der Messdaten wurde aber erst im Laufe des Jahres 2016 realisiert. Erst dann konnten die Messwerte auf Funktionalität und Plausibilität untersucht werden. Insbesondere die Bereitstellung der Daten aus der Gebäudeleittechnik (GLT) zum Export in eine Datenbank war problematisch. Um mehrere tausend Datenpunkte aus dem Gebäudebetrieb effizient auswerten zu können, ist eine automatisierte Datenverarbeitung notwendig. Diese basiert auf einem einheitlichen Dateiformat, welches von den Gewerke-Servern ELT und HLS geliefert wird. Dazu müssen Vorgaben bezüglich Zahlen- und Buchstabenformat in bestimmter Zeilen- und Spaltensystematik umgesetzt werden. Die Realisierung stellte die ausführenden Firmen vor unerwartet große Probleme, sodass ein Monitoring nicht wie geplant zum 01.01.2016 beginnen konnte. Im gesamten Monitoringjahr 2016 kam es immer wieder zu Abweichungen im abgestimmten Format. Dabei waren vermeintliche Kleinlichkeiten wie die Änderung des Dezimaltrenners von „Punkt“ auf „Komma“ oder die Änderung der Einheiten von „K“ auf „Kelvin“ die Ursache. Es führt aber dazu, dass die automatisierte Messdatenauswertung nicht mehr funktioniert und eine aufwändige Fehlersuche mit anschließender manueller Korrektur notwendig ist, um keine Daten zu verlieren.

Für ein detailliertes Monitoring sind ebenfalls interne Komponentendaten zielführend, die über eine BUS-fähige Schnittstelle an die GLT übergeben werden. Auch hier verlief die Umsetzung zum Teil sehr schleppend. Eine funktionierende Schnittstelle für die beiden Pelletkessel konnte im Jahr 2016 gar nicht realisiert werden.

Diese Aspekte haben dazu geführt, dass im Monitoringjahr 2016 eher die Mängelbeseitigung und die vollumfängliche Betriebsfähigkeit der Sensorik im Vordergrund standen. Das eigentliche Ziel, durch eine Auswertung der Messwerte einen effizienten Schulbetrieb mit gutem Raumlufftkomfort zu realisieren, rückte in den Hintergrund.

Für zukünftige Projekte sollten geeignete Mechanismen vorgehalten werden, um die fristgerechte, vollumfängliche und qualitativ hochwertige Ausführung durch Planer und ausführende Firmen zu gewährleisten. Die Erfahrung hat gezeigt, dass nur über den Hebel Geld dieses Ziel erreicht werden kann. Ebenfalls muss gewährleistet sein, dass angezeigte Mängel nach Inbetriebnahme und Abnahme zügig umgesetzt werden. Auch hier waren bei diesem Projekt große Defizite zu erkennen.

Die folgende chronologische Auflistung zeigt, ab welchem Datum die wesentlichen Datenkanäle für das Monitoring in auswertbarer Form vorlagen:

- Professionelle Klimastation 25.02.2016
- Betriebsdaten „HLS“ 08.03.2016 (vollumfänglich 15.05.2017)
- Wärme-, Kältemengenzähler 18.08.2016
- Modbus-Wetterstationen 18.09.2016
- Betriebsdaten „ELT“ 23.10.2016 (vollumfänglich 31.01.2017)

Unter Betriebsdaten „HLS“ sind z. B. Ventilstellungen oder Luft- und Fluidtemperaturen zusammengefasst. Im Gewerk „ELT“ sind z. B. Parameter der Beleuchtung (Dimmwert) oder der Verschattung (Lamellenwinkelstellung) enthalten.

Aufgrund der eingeschränkten Datenverfügbarkeit im Jahre 2016 werden in den folgenden Auswertungen nur die Kalenderjahre 2017 und 2018 vollständig ausgewertet. Auch hier kam es insbesondere für das Gewerk „HLS“ teilweise zu Datenausfällen von bis zu einer Woche (z. B. für das Jahr 2018: 10 d im Februar, 7 d Ende April, 7 d im November). In diesen Zeiträumen konnte keine Messdatenauswertung erfolgen.

Die Pyranometer, die in die vier Himmelsrichtungen sowie die Horizontale orientiert sind, sind seit 27.03.2016 funktionsfähig, der Strahlungssensor in PV-Ebene ab 01.08.2016. Allerdings sind für die Pyranometer aufgrund von fehlerhafter Parametrierung plausible Messwerte erst ab dem 26.10.2016 vorhanden.

### 3.3 Klimadaten im Monitoringzeitraum

Auf dem Dachfirst der Aula ist eine professionelle Klimastation (Clima Sensor US von Thies Clima) installiert, mit der alle relevanten Parameter wie Außentemperatur und relative Luftfeuchte sowie Windparameter (Richtung und Geschwindigkeit), Luftdruck, orientierungsabhängige Helligkeit und Niederschlag aufgezeichnet werden.



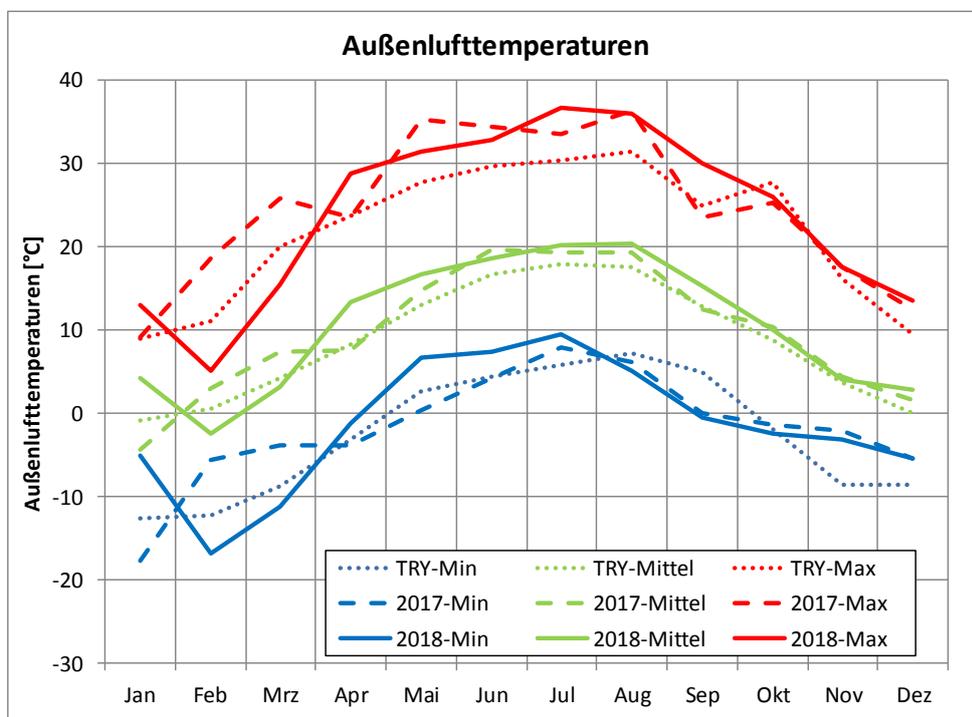
Abbildung 3.3-1: Wetterstation Clima Sensor US auf dem Dach der Aula

Zusätzlich gibt es für die Steuerung der Verschattung auf jedem Gebäudeteil jeweils eine Modbus-Wetterstation der Fa. Elsner. Für die folgenden Auswertungen wird auf die professionelle

Klimastation zurückgegriffen, nur bei größeren Datenlücken werden die Messwerte mit Hilfe der Elsner-Stationen abgeschätzt und ergänzt.

### Außenlufttemperatur

Die gemessenen Extrema der Außenlufttemperatur (Monatsmaximum, -minimum, -mittelwert) sind *Abbildung 3.3-2* zu entnehmen. Dabei ist zum Vergleich das Testreferenzjahr (TRY) des Deutschen Wetterdienstes (DWD) für den Standort Diedorf als Mittel der Jahre 1995 bis 2012 dargestellt. Seit 2017 sind ortsgenaue Daten für jeden deutschen Standort generierbar. Die Erzeugung erfolgt über das „Klimaberatungsmodul“ des DWD.



*Abbildung 3.3-2: Monatliche Extremwerte der Außenlufttemperaturen der Monitoringjahre 2017 und 2018 im Vergleich zum lokalen Testreferenzjahr des DWD*

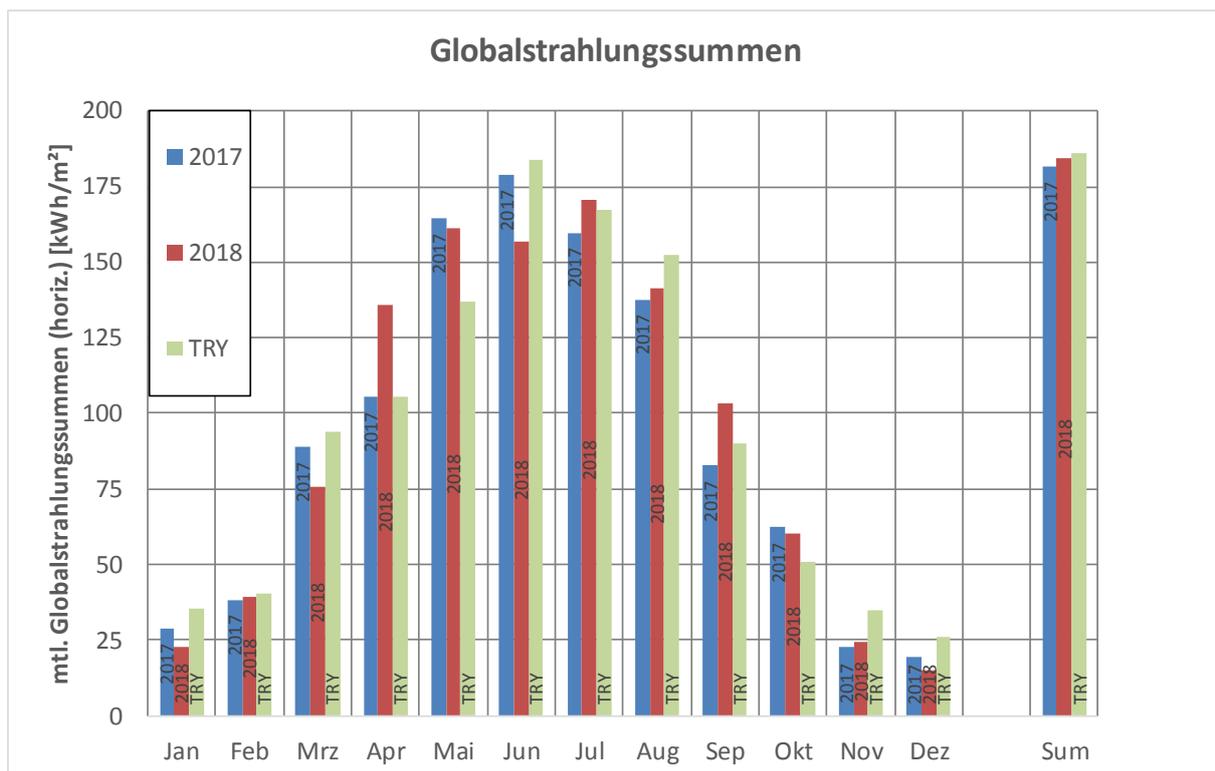
Die monatlichen Maximaltemperaturen der beiden Monitoringjahre lagen überwiegend über den langjährigen Maximalwerten des TRY. 2017 wurde das Jahresmaximum mit 36,4 °C im August gemessen, 2018 mit 36,8 °C im Juli. Ein anderes Bild zeigt sich bei den monatlichen Minima. Hier liegen die gemessenen Werte der Jahre 2017, 2018 nahe am langjährigen Mittel. Das Jahresminimum im Jahr 2017 lag im Januar bei -17,7° C, im darauffolgenden Jahr im Februar bei -16,7 °C. Die gemessenen monatlichen Mittelwerte im Monitoringzeitraum lagen überwiegend über dem langjährigen Mittel.

Oft wird die Witterung auf eine einzige Zahl, die Jahresdurchschnittstemperatur, reduziert, um pauschale Bewertungen vorzunehmen. Im langjährigen Mittel des TRY ist ein Wert von 8,6 °C dokumentiert. Für das Jahr 2017 wurde am Standort Diedorf eine Mitteltemperatur von 9,7 °C und 2018 von sogar 10,6 °C gemessen. Damit liegen die Werte um 1,1 K (2017) bzw. 2,0 K (2018) über dem langjährigen Mittel.

Die Auswertungen der Außenlufttemperatur in den Jahren 2017 und 2018 entsprechen auch Veröffentlichungen des DWD zur Klimaentwicklung der letzten Jahre. Das Klima wird insgesamt wärmer, wobei insbesondere die Ereignisse im Sommer extremer werden (Maximum, Dauer der Hitzeperioden). Die Minimumtemperaturen bleiben nahezu unverändert, nehmen aber in Ihrer Häufigkeit ab.

### Globalstrahlung

Die solaren Einstrahlungswerte sind hauptsächlich aus zwei Gründen für das Monitoring interessant. Zum einen beeinflussen die solaren Gewinne durch transparente Flächen insbesondere das sommerliche Raumklima, zum anderen haben sie einen direkten Einfluss auf den PV-Ertrag und damit auf die Erreichung des Plusenergiestandards. Daher ist eine Analyse der Globalstrahlung auf Basis von lokaler Sensorik notwendig. Zu diesem Zweck sind am Gebäude 6 Pyranometer installiert, die orientierungsabhängig die Einstrahlung messen (Ost, West, Süd, Nord, Horizontal, PV-Ebene). In *Abbildung 3.3-3* sind die monatlichen Strahlungssummen auf die horizontale Fläche, gemessen mit einem Pyranometer GSM 10.7, im Vergleich zum langjährigen lokalen Mittel des TRY (Standort Diedorf) vom DWD dargestellt.



*Abbildung 3.3-3: Monatliche und jährliche horizontale Globalstrahlungssummen der Monitoringjahre 2017 und 2018 im Vergleich zum Testreferenzjahr des DWD (TRY) für den Standort Diedorf*

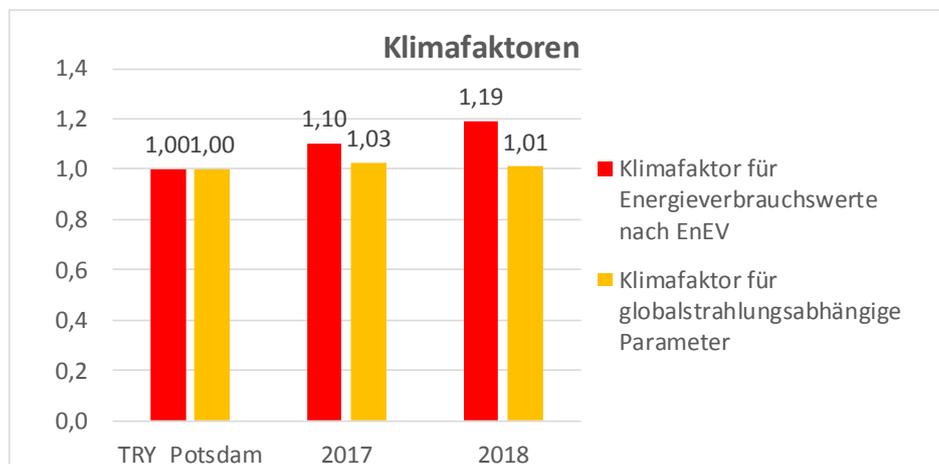
Die Monatswerte der Globalstrahlungssummen sind im Wesentlichen abhängig vom Zenitwinkel der Sonne und dem durchschnittlichen Bewölkungsgrad. *Abbildung 3.3-13* zeigt die typische Verteilung mit den Höchstwerten in den Monaten Mai bis Juli. Dabei ist kein signifikanter Trend zwischen den gemessenen Klimadaten der Jahre 2017 und 2018 und dem für Bedarfssimulationen verwendeten

Klimadatensatz des Deutschen Wetterdienstes für den Standort Diedorf zu erkennen. Über das Jahr summieren sich die Einstrahlungswerte auf 1116 kWh/m<sup>2</sup>a (TRY), 1105 kWh/m<sup>2</sup>a (2018) und 1089 kWh/m<sup>2</sup>a (2017). Die Abweichungen liegen unter 2,5 % und sind damit gering. Somit können PV-Ertragswerte zwischen den Monitoringdaten der Jahre 2017, 2018 und dem für Diedorf maßgebenden Normklimasatz nahezu direkt miteinander verglichen werden. Auch für sekundäre abgeleitete Größen wie z. B. die sommerlichen Raumüberhitzungsstunden spielt die Klimabereinigung für die vorliegenden Betrachtungsjahre eine untergeordnete Rolle.

### Klimafaktoren

Um klimaabhängige Größen aus unterschiedlichen Jahren oder sogar zwischen verschiedenen Standorten miteinander zu vergleichen, muss eine Klimabereinigung erfolgen. Dazu werden Klimafaktoren verwendet, mit denen die gemessenen Größen (z. B. PV-Ertrag, Heizenergieverbrauch) multipliziert werden. Im vorliegenden Projekt ist dafür die Methode der Korrektur über Heizgradtage gewählt worden. Die Klimata im Monitoringzeitraum werden dazu mit dem Normklimasatz des Deutschen Wetterdienstes für Potsdam (TRY) ins Verhältnis gesetzt (anders als bei *Abbildung 3.3-2* und *Abbildung 3.3-3*, dort wird das TRY für den Standort Diedorf verwendet). Somit sind Vergleiche von Verbrauchsdaten nicht nur zwischen einzelnen Jahren, sondern auch mit anderen Standorten in Deutschland möglich. Dieses Verfahren lehnt sich an offizielle Bekanntmachungen zur Klimabereinigung von Heizenergieverbräuchen an (Bekanntmachung der Regeln für Energieverbrauchswerte im Wohngebäudebestand vom 7. April 2015).

Zur Berechnung wurde eine Heizgrenztemperatur von 10 °C angesetzt (s. a. *Abbildung 6.1-1*).



*Abbildung 3.3-4: Klimafaktoren für die Außentemperatur und die Globalstrahlung im Monitoringzeitraum 2017 und 2018 im Vergleich zum Referenzklimadatensatz des DWD für den Standort Potsdam*

Die für den Heizenergieverbrauch relevanten Außenlufttemperaturen liegen im Monitoringzeitraum 2017 und 2018 deutlich über dem langjährigen Mittel, sodass Faktoren über 1,0 ermittelt wurden. So ist z. B. der Heizenergieverbrauch im Jahre 2017 mit dem Faktor von 1,10 und 2018 mit dem Faktor von 1,19 zu multiplizieren.

Ein anderes Bild zeigt sich bei der horizontalen Globalstrahlung, die für den PV-Ertrag oder die solaren Gewinne relevant ist. Hier sind die Abweichungen zwischen den Jahren und dem Standort gering.

## 4 Energiebilanzen

In den folgenden Kapiteln werden im Wesentlichen Energiebilanzen der Verbrauchsgrößen Wärme, Kälte und elektrischer Strom dargestellt. Die Abbildungen werden bei Bedarf durch jahreszeitliche Verläufe oder entsprechende Jahresdauerlinien ergänzt. Zusätzlich erfolgt eine Bewertung der Sachverhalte. Der Fokus in diesem Kapitel liegt allerdings auf der Bilanzierung. Detaillierte Analysen, Bewertungen und Optimierungsmaßnahmen mit abschließender Evaluation erfolgen in den Kapiteln „Zentrale Haustechnik“ und „Dezentrale Haustechnik“.

### 4.1 Strom

Die Architektur der Stromversorgung am Gymnasium basiert auf einer Niederspannungshauptverteilung (NSHV), die die Stromversorgung der Schule sichergestellt. Eine Ebene tiefer erfolgt die Versorgung über vier Gebäudehauptverteilungen (Klassenhaus 1 (KH1), Klassenhaus 2 (KH2), Aula, Sporthalle). In der gleichen Hierarchieebene steht ein Abgang zur Versorgung der zentralen RLT-Anlage.

In folgender Auflistung sind die wesentlichen Verbrauchsstellen der insgesamt fünf Stränge der ersten Versorgungsebene dargestellt:

- KH1 Beleuchtung, MSR-Technik, Steckdosen, Verschattungsanlage, Verdunkelung, Außenbeleuchtung, dezentrale Durchlauferhitzer, Labortechnik, Dachrinnenheizung, dezentrale RWA- und Sicherheitstechnik, Geräteraum auf der Freifläche
- KH2 Beleuchtung, zentrale Sicherheitsbeleuchtung, MSR-Technik, Steckdosen, Verschattungsanlage, dezentrale Durchlauferhitzer, Dachrinnenheizung, dezentrale RWA- und Sicherheitstechnik, Aufzug, Klimagerät UG, Brandmeldezentrale, Brennofen, Server
- Sport-halle Beleuchtung, MSR-Technik, Steckdosen, Anzeigetafeln, dezentrale Durchlauferhitzer, Dachrinnenheizung
- Aula Zentrale Technik Heizen/Kühlen (v. a. Pumpen, Kältemaschine, Kessel), MSR-Technik, Küche inkl. Geräte, Mensa, Beleuchtung, Steckdosen, Aufzug, Bühnentechnik, Bibliothek, Dachrinnenheizung, Außenbeleuchtung, Verschattungsanlage, dezentrale Durchlauferhitzer
- RLT 2 Ventilatoren der Küchen-RLT, Pumpen Lufterhitzer, 4 Ventilatoren der Haupt-RLT-Anlage

Die Verbräuche der einzelnen Stränge der Schulhauptverteilung sind in Abbildung 4.1-1 dargestellt.

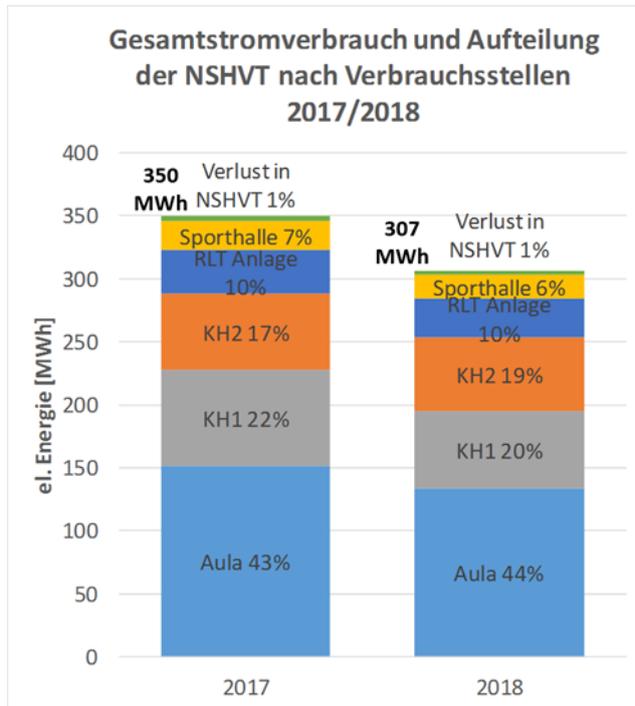


Abbildung 4.1-1: Jahresstromverbrauch der Schulhauptverteilung in den Jahren 2017 und 2018

Der Gesamtstromverbrauch im Jahr 2017 betrug 350 MWh und sank nach der Betriebsoptimierung im darauffolgenden Jahr 2018 auf 307 MWh. Der größte Verbrauch ist für das Aulagebäude bilanziert worden, in dem die zentrale Technik untergebracht ist. Die Stromeinsparung entfällt im Wesentlichen auf zwei Verteilungen. Im Aulagebäude konnte die Effizienz der Kältemaschine im Jahr 2018 deutlich gesteigert werden, was bei ähnlicher produzierter Kältemenge zu einem geringeren Stromverbrauch führte. Zum anderen entfiel ein Teil der eingesparten Energie auf das KH1. Im Jahr 2017 mussten aufgrund eines Wasserschadens für einige Wochen rund um die Uhr Lufttrockner laufen. Der Stromverbrauch für diese Sondermaßnahme summierte sich zu ca. 9 MWh, welche 2018 nicht mehr in der Bilanz auftauchen.

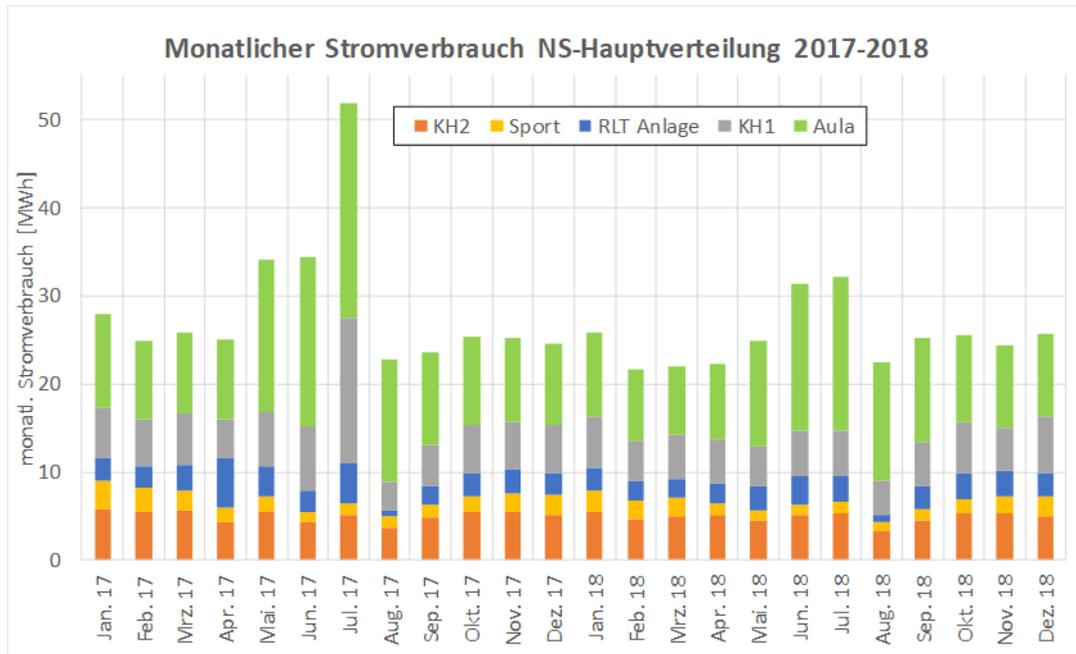


Abbildung 4.1-2: Monatlicher Stromverbrauch der Gebäudehauptverteilung 2017 – 2018

Der jahreszeitliche Verlauf des Stromverbrauchs ist in Abbildung 4.1-2 dargestellt. Die Verbräuche der Klassenhäuser sowie der Sporthalle sind nur leicht von der Jahreszeit beeinflusst. Der geringe Einfluss ist auf die verstärkte Nutzung der Beleuchtung in den Wintermonaten zurückzuführen. Die Betriebszeit und damit der Stromverbrauch der RLT-Anlage sind abhängig von der Belegungsdichte der Schule (Regelung über CO<sub>2</sub>-Konzentration) und somit kaum von der Witterung abhängig. Der geringste Verbrauchswert für die RLT-Anlage ist infolge der großen Ferien im August zu erkennen. In der Aula ist die zentrale Kältetechnik untergebracht, die u. a. auf einer elektrischen Kompressionskältemaschine basiert. Deutlich zu erkennen ist ein Anstieg des Stromverbrauchs in den Monaten Mai bis Juli.

Im Juli 2017 ist ein außergewöhnlich hoher Verbrauch zu sehen, der auf das KH1 und die schon beschriebene Bautrocknung zurückzuführen ist.

Ordnet man die gemessenen elektrischen Leistungen der Größe nach, erhält man die Jahresdauerlinie für das Gymnasium. Die Graphik für das Jahr 2018 ist in Abbildung 4.1-3 zu sehen. Ebenfalls dargestellt ist die sortierte Dauerlinie der Stromproduktion am Standort durch die PV-Anlage.

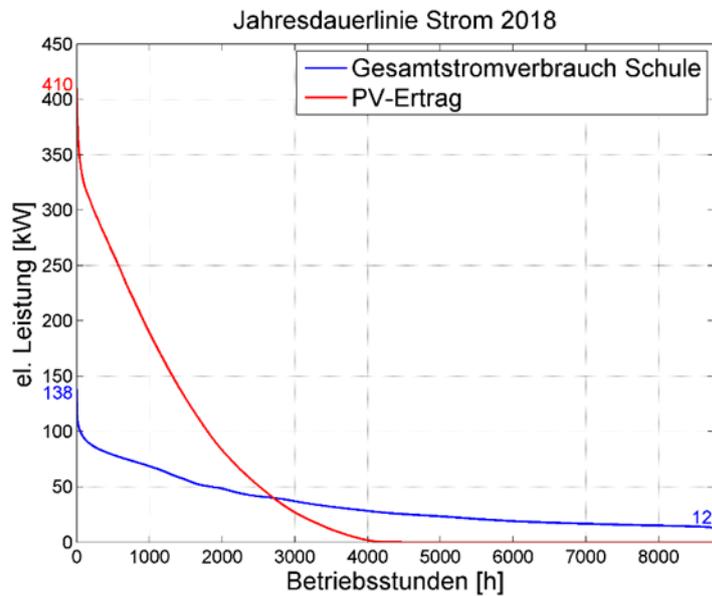


Abbildung 4.1-3: Sortierte Jahresdauerlinie des Gesamtstromverbrauchs der Schule sowie des PV-Ertrags aus dem Jahr 2018

Die Kurve des Stromverbrauchs verläuft relativ flach. Die Maximalleistung beträgt im Jahr 2018 138 kW, die Dauerleistung der Grundlast 12 kW.

Im Gegensatz dazu ist die Kurve des PV-Ertrags steiler. Die PV-Maximalleistung reicht mit 410 kW fast an die Auslegungsleistung der PV-Anlage von 439 kW<sub>p</sub> heran. Die Ertragsstunden der PV-Anlage liegen bei etwa 4000 h/Jahr.

Aus diesem Bild ist bereits zu erkennen, dass das dazugehörige Integral der PV-Stromerzeugung größer ist als das Integral des Stromverbrauchs der gesamten Schule.

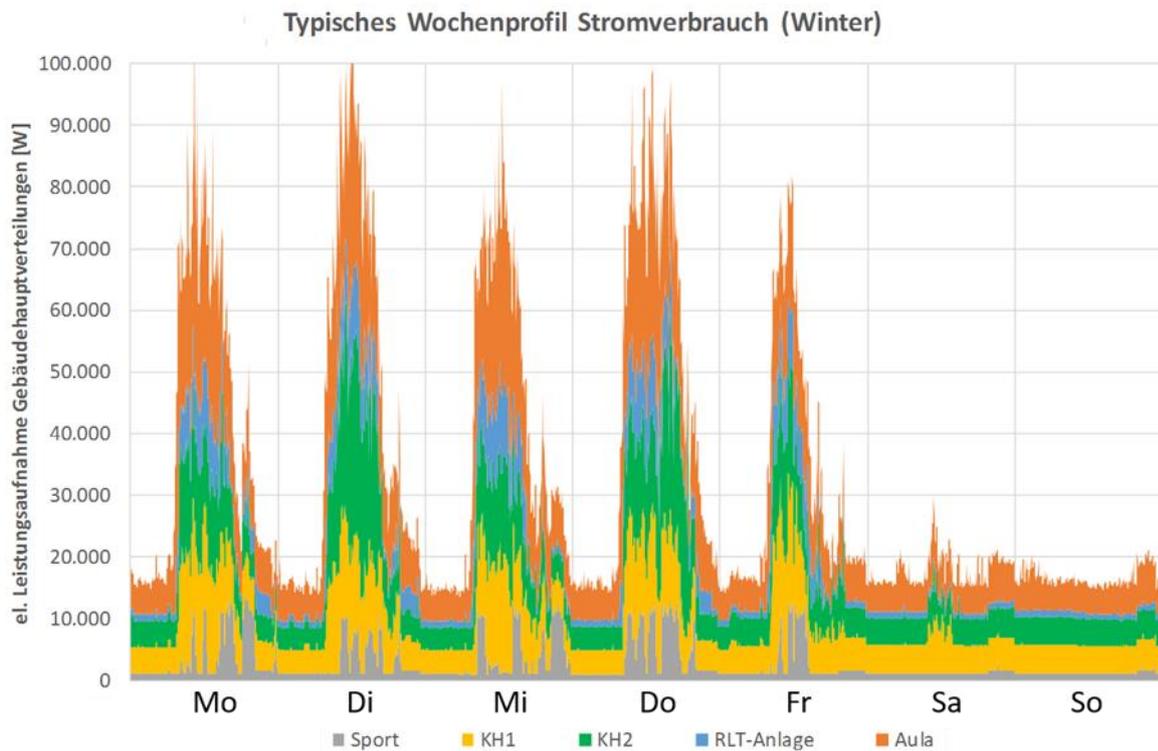


Abbildung 4.1-4: Typisches Wochenprofil des Gesamtstromverbrauchs der Schule als gestapelte Gebäudeverbräuche aus dem März 2018

Ein typisches Stromverbrauchsprofil am Gymnasium ist in Abbildung 4.1-4 dargestellt. Klar zu erkennen sind die Spitzen der fünf Werkzeuge, wobei der Freitagspeak etwas schmaler ausfällt, weil der Unterrichtsbetrieb meist gegen Mittag beendet ist. Der Hauptpeak fällt mit dem Schulbetrieb zwischen 07:30 bis 16:00 Uhr zusammen. Abends ist durch die Nutzung der Sporthalle noch ein leichter Anstieg zu erkennen, der aber im Wesentlichen aus dem Betrieb der zentralen Anlagentechnik (v. a. Lüftungsanlage) zur Versorgung der Sporthalle entsteht und nicht durch den Stromverbrauch in der Halle selbst. Das dargestellte Profil bildet eine typische Woche im Herbst ab. In den Sommermonaten wird der Verlauf durch den Betrieb der Kälteerzeugung leicht verändert.

## 4.2 Wärme

Die Wärmeerzeugung erfolgt ausschließlich über zwei Pelletkessel mit einer Nennwärmeleistung von jeweils 100 kW. Im Winterfall stehen zur Pufferung zwei Heizwasserpuffer mit jeweils 7500 l zur Verfügung. Die Wärmeverteilung erfolgt über zwei Verteilerbalken. Über den sogenannten WW-Verteiler werden zum einen die Frischwasserstationen der Sporthalle sowie der Küche und zum anderen die Zuluftvorkonditionierung der Lufterhitzer (LE) und die Zuheizung der Wärmerückgewinnung versorgt. Zusätzlich ist einzig die Fußbodenheizung (FBH) der Sporthallennebenräume auf diesen Verteiler aufgeschaltet. Über den „FB-Verteiler“ sind die weiteren Fußbodenheizungen der vier Gebäudeteile aufgeschaltet. Abbildung 4.2-1 zeigt die Aufteilung der Wärmeenergie für die Jahre 2017 und 2018.

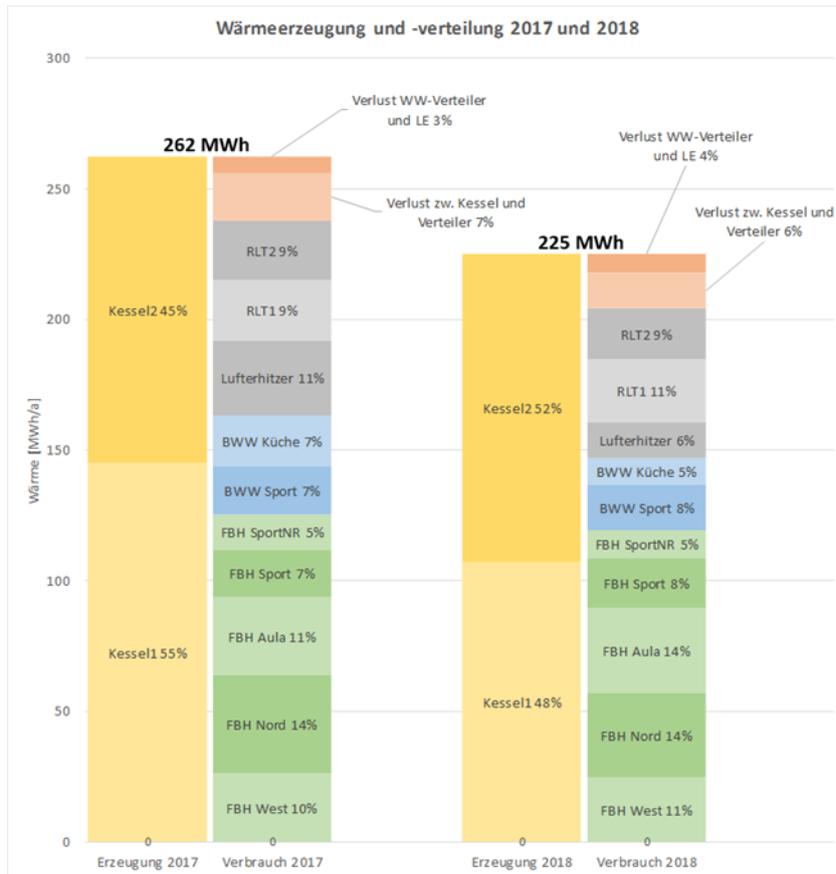


Abbildung 4.2-1: Energiebilanz Wärmeerzeugung und -verbrauch 2017/2018

Im Jahr 2018 sind 225 MWh (2017: 262 MWh) Wärme von den Pelletkesseln erzeugt worden. Die Laufzeiten der beiden Kessel sind dabei bedingt durch die parallele Fahrweise ähnlich. Hauptwärmeverbraucher ist die FBH mit 52 % im Jahr 2018 (2017: 47 %) und die Zuluftvorkonditionierung mit 26 % (2017: 29 %). Die Brauchwarmwasser-Bereitung schlägt nur mit 13 % zu Buche (2017: 14%). Die Wärmeeinkopplung in die Wärmerückgewinnung (RLT 1+2) betrug 18 % (2017) und 20 % (2018).

Die Verluste lassen sich messtechnisch in zwei Kategorien aufteilen. Zum einen die Verluste zwischen dem Kessel und den Verteilern. Damit sind im Wesentlichen die Speicherverluste und zu kleinen Teilen Verteilverluste im Heizraum gemeint. Hierfür sind Werte von 6 - 7 % der Erzeugerenergie ermittelt worden. Zum anderen die Verteilverluste ab dem WW-Verteiler im Bereich von 3 - 4 %. Dies sind vor allem Verluste über lange Verteilleitungen vom Heizraum zu den Wärmeübertragern der zentralen Lüftungsanlage.

Der zeitliche Verlauf des Wärmeverbrauchs nach Verbrauchsarten ist in Abbildung 4.2-2 dargestellt. Insbesondere bei der Fußbodenheizung und der Zuluftvorkonditionierung ist eine außentemperaturabhängige Verteilung zu erkennen. Die Heizperiode beschränkt sich auf die Monate November bis März. Die Verbräuche an Brauchwarmwasser (BWW) schwanken über das Jahr nur geringfügig.

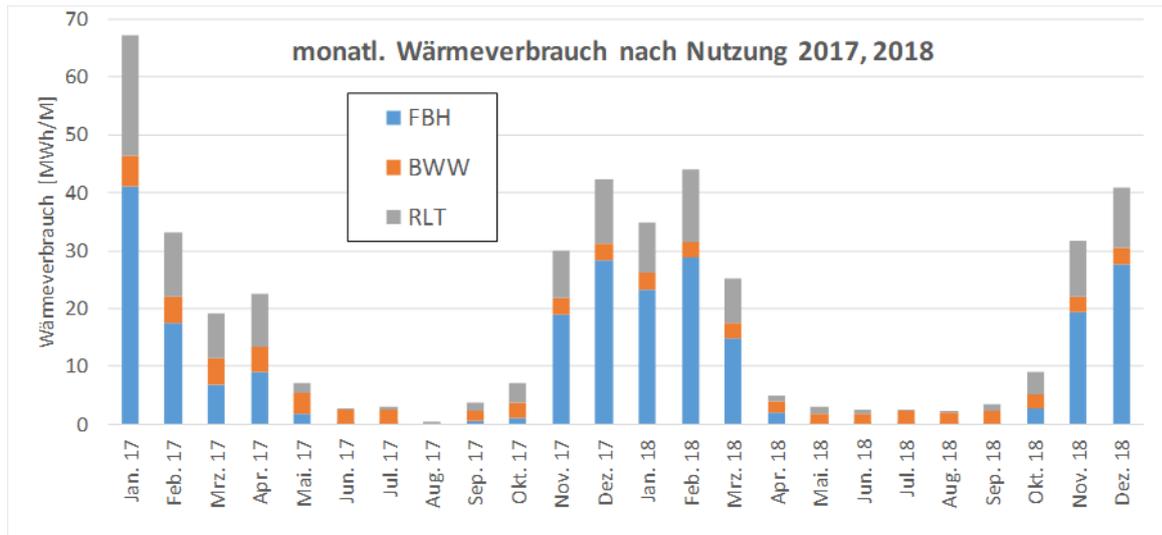


Abbildung 4.2-2: Monatlicher Wärmeverbrauch nach Verbrauchsarten 2017 - 2018

Um den Wärmeverbrauch verschiedener Jahre aussagekräftig miteinander zu vergleichen, muss eine Bereinigung mittels Klimafaktoren vorgenommen werden. Dabei wird nur der Heizwärmeverbrauch und nicht der Anteil an BWW bereinigt, sodass im vorliegenden Fall die Verbräuche von Fußbodenheizung, Luftheritzer und Vorwärmung der WRG korrigiert werden. Die verwendeten Klimafaktoren sind Abbildung 3.3-4 zu entnehmen.

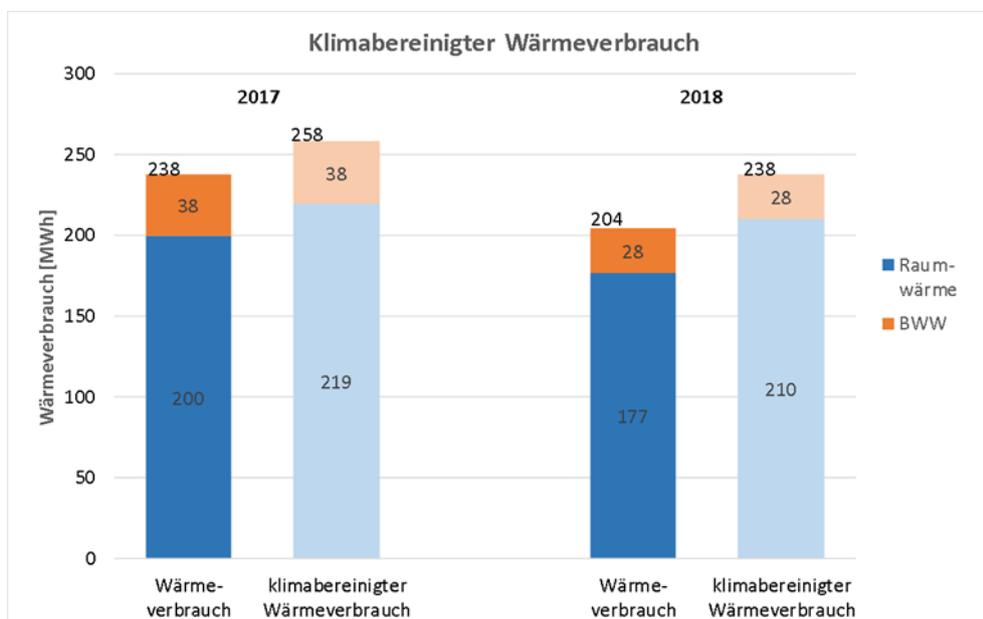


Abbildung 4.2-3: Klimabereinigter Wärmeverbrauch der Jahre 2017 und 2018

In Abbildung 4.2-3 ist für die Jahre 2017 bzw. 2018 sowohl der gemessene Wärmeverbrauch als auch der klimabereinigte Verbrauch dargestellt. Dabei sind die Aufwendungen für BWW separat ausgewiesen. Wie schon in Abbildung 4.2-1 zeigt sich, dass im Jahr 2017 mehr Heizenergie verbraucht wurde als in 2018. Zum Teil ist dies auf das kältere Wetter zurückzuführen. Allerdings ist

auch der bereinigte Verbrauch 2017 mit 258 MWh/a um 8 % höher als 2018 mit 238 MWh/a. Neben verändertem Nutzerverhalten hat auch eine dichtere Belegungsdichte im Jahr 2018 dazu geführt, dass weniger Heizenergie verbraucht wurde.

Abbildung 4.2-4 zeigt die Jahresdauerlinie 2018 der Wärmeerzeugung sowie des Wärmeverbrauchs. Die gesamte Erzeugungsleistung ergibt sich aus den Summen der beiden Wärmemengenzähler am Ausgang der Pelletkessel. Der Verbrauch wird durch die Wärmemengenzähler an den Abgängen der beiden Verteilerbalken gemessen.

Die Kurve der Erzeugerleistung wird bestimmt durch die Betriebsstrategie der beiden Kessel. Der Maximalwert orientiert sich an der Auslegungsleistung der Wärmeerzeuger von 200 kW. Meist sind im bilanzierten Zeitraum beide Kessel parallel angefordert worden. Systembedingt brauchen Biomassekessel einige Zeit, um die geforderte Maximalleistung abzurufen (siehe auch Abbildung 6.1-2), auch ist eine natürliche Modulation mit Spitzenlastbereich zu erkennen. Teillastzustände treten hingegen weniger auf. Somit fällt die Kurve ab ca. 1000 Betriebsstunden steil ab. Im Jahr 2018 sind lediglich 1600 Betriebsstunden festgestellt worden.

Die Lastkurve des Verbrauchs ergibt sich zum großen Teil aus den Anforderungen der Raumventile der Fußbodenheizung. Die Spitzenlast liegt im Bereich von 300 bis 400 kW. Die Differenz zur Wärmeerzeugerleistung wird aus den beiden Pufferspeichern bezogen und kann nur kurzzeitig gedeckt werden. Die Wärmeverbrauchskurve der FBH hat ca. 3.500 Betriebsstunden, was ungefähr 5 Monaten entspricht. Inklusive Brauchwarmwasser, WRG und Lufterhitzer liegen 5000 Betriebsstunden vor.

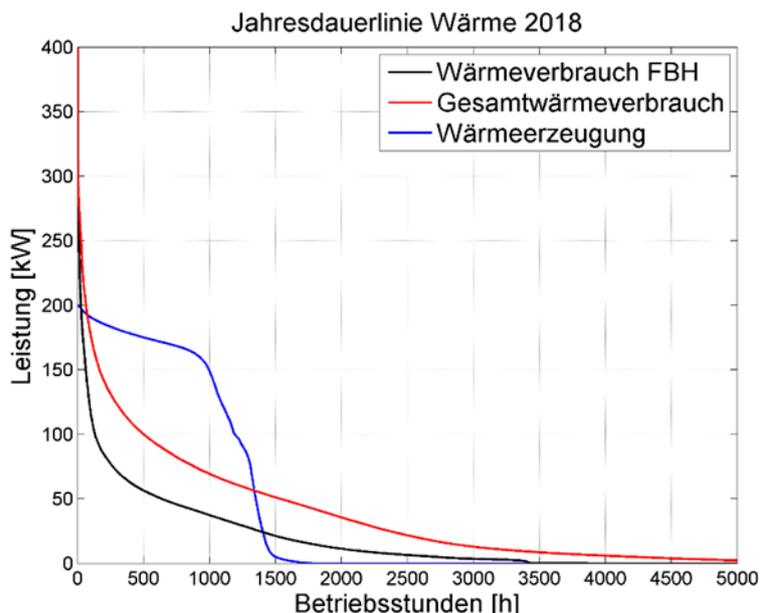


Abbildung 4.2-4: Sortierte Jahresdauerlinien Wärmeerzeugung und -verbrauch für das Jahr 2018

Grundsätzlich liegen für die Wärme relativ geringe Betriebsstunden vor. Zum einen hat das Gebäude aufgrund seiner Passivhauseigenschaften und der hohen Belegungsdichte einen niedrigen Heizenergieverbrauch sowie eine kurze Heizperiode. Zum anderen wird ganzjährig relativ wenig BWW benötigt, dabei trägt die Küche kaum zum BWW-Verbrauch bei. Auch die hohe Anzahl an

Nichtnutzungstagen, an denen die Raumsolltemperatur abgesenkt wird, führt zu einer Reduktion der Betriebsstunden.

### 4.3 Kälte

Die Schule wird hauptsächlich durch Außenluft und adiabate Verdunstung gekühlt. Der Restkühlbedarf wird durch eine Kompressionskälte gedeckt. Zu den Hauptmodi zählen somit freie Kühlung, adiabate Verdunstungskühlung und Kompressionskälte. Die Kälte-Nennleistung bei Auslegungsbedingungen liegt bei 136 kW. Das Kaltwasser gelangt über Anbindeleitungen in den Kältepuffer (7,5 m<sup>3</sup>) sowie in den Kaltwasserverteiler. Aus diesem werden direkt die Luftkühler und die Umluftgeräte der Wechselrichterräume versorgt. Ein dritter Abgang koppelt die Kälte in den Fußbodenverteiler ein, von wo aus dann die vier Gebäudeteile (Aula, Gebäude Nord, Gebäude West, Sporthalle) gespeist werden. Abbildung 4.3-1 zeigt die Bilanzierung der Kältemengen von der Erzeugung bis zu den Verbrauchern.

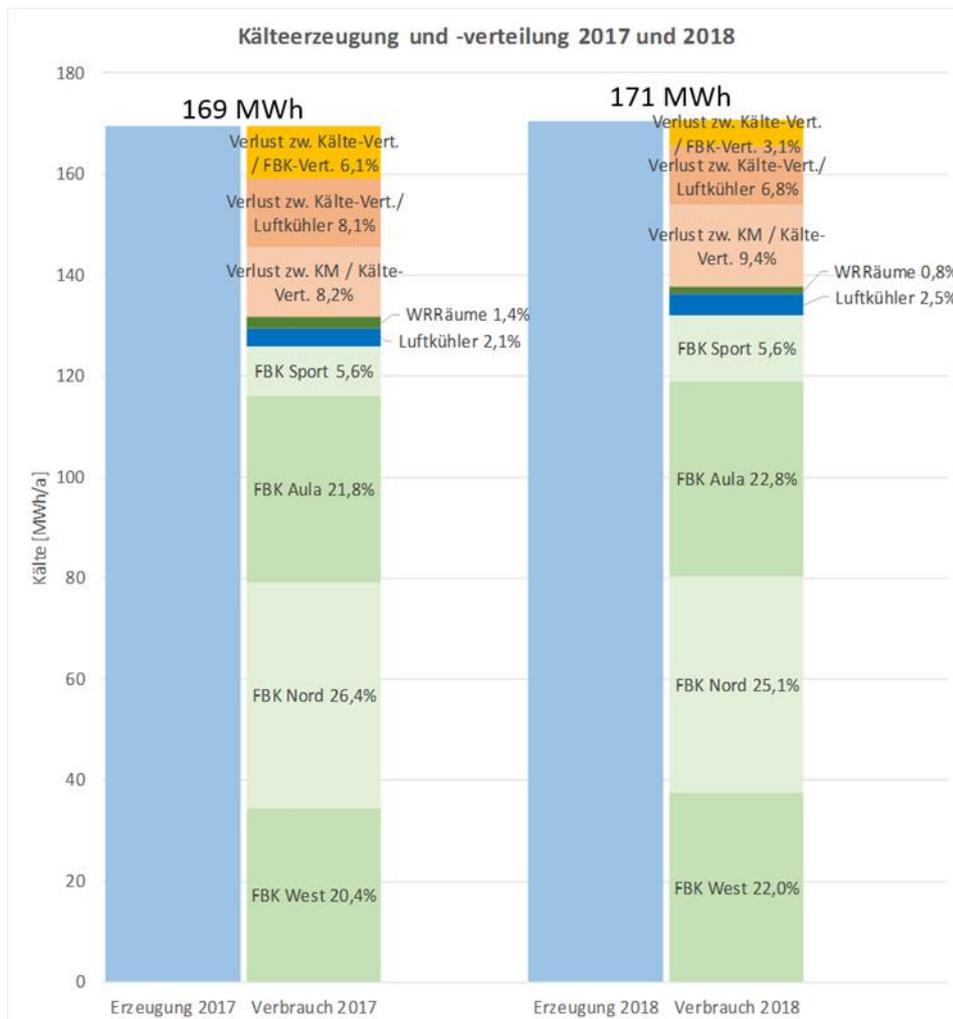


Abbildung 4.3-1: Energiebilanz Kälteerzeugung und -verbrauch 2017/2018

Im Jahr 2018 wurden 170 MWh Kälte erzeugt (2017: 169 MWh). Der größte Anteil der erzeugten Kälte wird in den beiden Klassenhäusern und dem Aulagebäude zur Kühlung über den Fußboden

(FBK) genutzt (2018/2017 ca. 70 %). Dabei sind die Anteile pro Gebäude mit 20-25 % ähnlich. Für die Sporthalle wurde 2018 6 % der Erzeugung benötigt. Praktisch nicht ins Gewicht fallen die Kühlung der Wechselrichterräume mit 1 % und die Versorgung der Luftkühler mit 2 %.

Die Gesamtverluste im System sind hoch (2018: 19,3 %). Über die Differenz der einzelnen gemessenen Kältemengen lassen sich die Verluste in drei Gruppen aufteilen. Der größte Teilverlust ist mit 9,4 % (2018) zwischen den Kältemengenzählern (KMZ) am Ausgang der Kältemaschine und dem am Eingang in den Kälteverteiler gemessen worden. Neben kurzen Leitungswegen sind der Kältespeicher und zwei Umwälzpumpen in diesem Bilanzierungsabschnitt enthalten. Verluste von 6,8 % sind zwischen dem Kälteverteiler und den Luftkühlern detektiert worden. Die Leitungslängen umfassen hier den Weg vom Heizraum zur zentralen Lüftungszentrale und summieren sich auf ca. 160 m (Vor- und Rücklauf). Die dritte Gruppe umfasst einen kurzen Bilanzierungsabschnitt zwischen dem Kälteverteiler und dem Fußbodenverteiler (3,1 %).

Eine genaue Analyse der Kälteverluste gestaltete sich schwierig, weil die integrierte Messtechnik im Kältekreis unter wirtschaftlichen Zwängen primär auf eine energetische Bilanzierung ausgerichtet war und nicht auf eine Detailanalyse des Kältekreises. So konnten z. B. nicht alle Abgänge einzeln mit Kältemengenzählern (KMZ) ausgestattet werden und eine redundante Kältemengenmessung fehlt. Ebenso sind die Funktionalität und Parametrierung der verwendeten Kältemengenzähler nicht auf eine detaillierte Analyse ausgerichtet.

Folgende Gründe für die hohen Kälteverluste konnten nachgewiesen werden. Eine detaillierte Beschreibung ist im Kapitel „Dezentrale Haustechnik-Wärme-/Kälteverteilung“ zu finden.

- Im Kältekreis werden ausschließlich Nassläuferpumpen verwendet, die die Abwärme des Motors in den Fluidkreislauf einbringen. Die Laufzeiten der Pumpen sind hoch.
- Die relevanten Verluste im Kältekreislauf lassen sich zum einen auf die fehlende Dämmung der Armaturen und Flansche und zum anderen auf die langen Vor- und Rücklaufleitungen zu den Luftkühlern zurückführen.
- Es ließen sich Wärmeeinträge in den Kältekreis nachweisen. Ursache ist vor allem eine zu hohe Leckage Rate der 3-Wege-Umschaltventile im Bereich des Fußbodenverters, wo hydraulisch Kalt- und Warmwasserkreis gekoppelt sind. Eine energetische Berechnung auf Basis der vorhandenen Messtechnik ist nicht möglich gewesen. Eine Abschätzung in Stillstandzeiten führt zu Eintragungswerten zwischen 400 W bis 1200 W. Ob diese Fehlströme auch im Betrieb auftreten und in welcher Höhe, konnte nicht bestimmt werden. Nachdem die Leckage Rate 2018 durch Nachrüstungen auf nahezu Null minimiert werden konnte, sollte eine erneue Verlustberechnung im Jahr 2019 erstellt werden.

Die Kältebilanz der Jahre 2017 und 2018 ist sowohl was die Absolutwerte betrifft, als auch was die prozentuale Aufteilung angeht, ähnlich. Die verbrauchte Kältemenge lag 2018 bei 137 MWh (2017: 131 MWh). Eine außentemperaturbereinigte Klimabereinigung ist beim Kälteverbrauch nicht zielführend, weil der Kältebedarf in erster Linie von den internen Gewinnen durch Personenbelegung sowie der solaren Einstrahlung abhängt. Eine einfache Abschätzung der Kühllasten eines südorientierten Klassenraum verdeutlicht dies:

- Kühllast durch Personenbelegung (30 Pers.): 3000 W
- Kühllast durch solare Einstrahlung: 675 W
- Kühllast durch Transmission: 115 W (Außentemperatur abhängig)

Da die Personenbelegung im Monitoringzeitraum nahezu unverändert blieb, wäre allenfalls eine Klimabereinigung über die solaren Gewinne und somit über die Globalstrahlungssumme sinnvoll. Abbildung 3.3-4 zeigt aber, dass im Monitoringzeitraum nahezu identische Einstrahlungswerte vorherrschten. Somit braucht der Kälteverbrauch für einen aussagekräftigen Vergleich zwischen den Jahren 2017 und 2018 nicht bereinigt werden.

Im Jahr 2018 steht einer produzierten Kältemenge von 171 MWh eine erzeugte Wärmemenge von 225 MWh gegenüber. Das Verhältnis von Wärme zu Kälte beträgt demnach 57 % / 43 %.

Wie sich der Kälteverbrauch zeitlich verteilt im Jahr darstellt, ist Abbildung 4.3-2 zu entnehmen. Der Verbrauch wird dominiert von den Aufwendungen für die FBK in den Monaten April bis September. Auffällig ist, dass die FBK im Jahr 2018 im Gegensatz zu 2017 schon im April aktiviert wurde. Dies ist in erster Linie auf eine optimierte Regelung zurückzuführen, die die Kühlung früher aktiviert, um einen höheren sommerlichen Raumluftkomfort zu generieren.

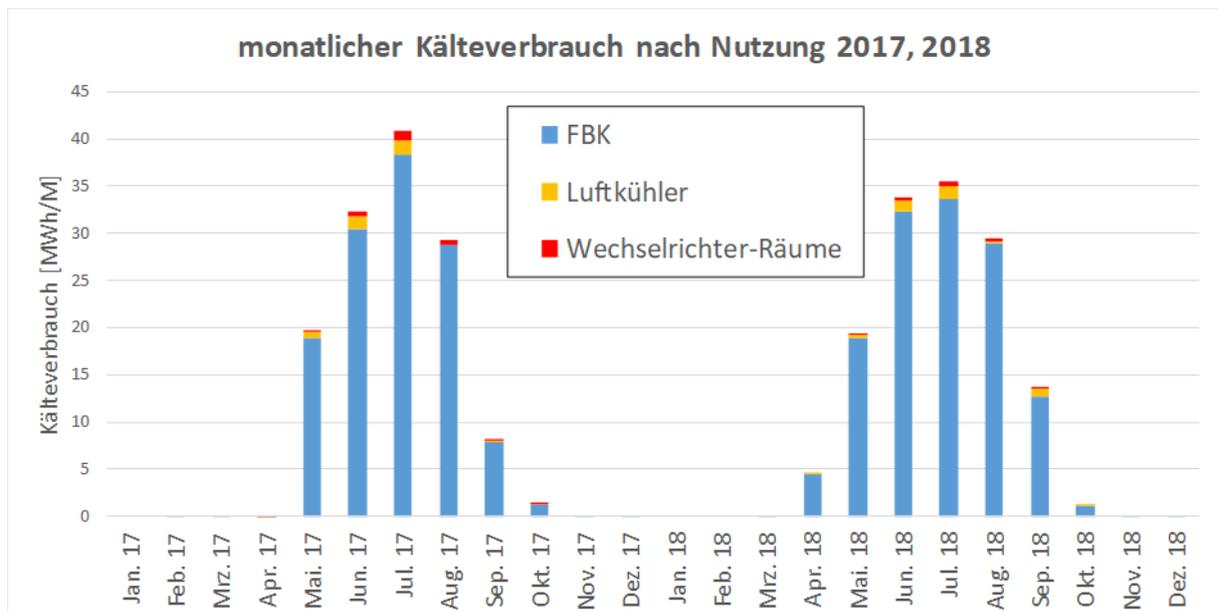


Abbildung 4.3-2: Monatlicher Kälteverbrauch nach Verbrauchsarten 2017 - 2018

#### 4.4 Primärenergiebilanz und treibhausrelevante Emissionen

In der Konzept- und Planungsphase wurde eine projektspezifische Definition des Plusenergiestandards ausgearbeitet. Demnach soll der gesamte nichtregenerative Primärenergiebedarf des Gebäudes (Haustechnik und nutzerinduzierte Bedarfe) in der Jahresbilanz geringer ausfallen als der durch Eigenerzeugung auf dem Schulgelände substituierte Primärenergieeinsatz. Gleiches gilt für die CO<sub>2</sub>-Äquivalent-Emissionen. Die für die Bilanz notwendigen Primärfaktoren sind im Rahmen der Konzeptphase im Jahr 2013 auf Basis der GEMIS-Datenbank (Globales Emissions-Modell integrierter Systeme) Version 4.8 ermittelt worden und über den gesamten Projektverlauf unverändert geblieben. Folgende Werte wurden verwendet:

	PE-Faktor n.e. [-]	CO <sub>2</sub> -Äquivalent [g/kWh <sub>Endenergie</sub> ]
Holzpellets	0,08	26
Netzstrombezug	2,21	594
Stromeinspeisung	2,25	656

Die unterschiedlichen Werte für Netzstrom und Stromeinspeisung berücksichtigen, dass der regenerative PV-Strom der Schule nur den nicht erneuerbaren Anteil von fossilen Kraftwerken verdrängen soll. Bilanzuell wird der gesamte PV-Strom ins Netz eingespeist.

Abbildung 4.4-1 zeigt die spezifische Primärenergiebilanz basierend auf den Daten des Jahres 2018. Der Heizenergieverbrauch sowie der PV-Ertrag sind hierbei klimabereinigt. Demnach ist deutlich mehr Primärenergie (PE) über die PV erzeugt worden, als das gesamte Schulgebäude in der Nutzung verbraucht. Der spezifische Verbrauchswert bezogen auf die beheizte Energiebezugsfläche (EBF) am Gymnasium von 11680 m<sup>2</sup> liegt bei 60,2 kWh<sub>PE</sub>/m<sup>2</sup><sub>EBF</sub>. Aus der Eigenstromproduktion ergibt sich eine spezifische Gutschrift für das Gebäude von 89 kWh<sub>PE</sub>/m<sup>2</sup><sub>EBF</sub>. Der Plusenergiestandard ist somit deutlich erreicht worden.

Die PE-Bilanz wird bei der Wärmeerzeugung mittels Pellets vom Stromverbrauch dominiert. Als größter Einzelverbraucher schlägt die Kälteerzeugung mit ca. 7,0 kWh<sub>PE</sub>/m<sup>2</sup><sub>EBF</sub> zu Buche. Über das Monitoring lässt sich ebenfalls der PE-Aufwand für Luftförderung und den Betrieb der Küche mit jeweils rd. 4 kWh<sub>PE</sub>/m<sup>2</sup><sub>EBF</sub> beziffern.

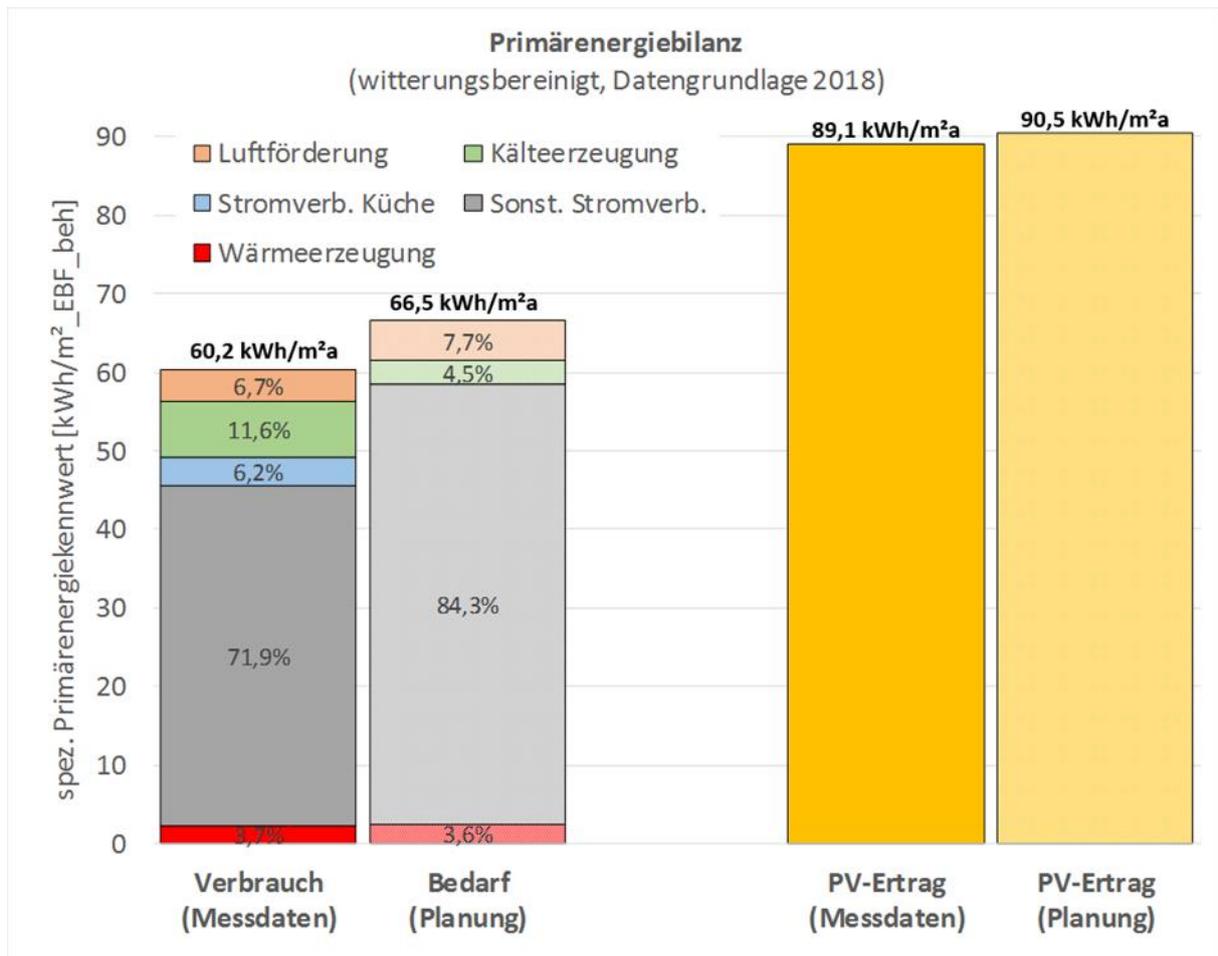


Abbildung 4.4-1: Primärenergiebilanz Schmuttertal-Gymnasium Diedorf sowie Monitoring- und Planzahlen im Vergleich (witterungsbereinigt, Datengrundlage 2018)

In Abbildung 4.4-1 sind neben den gemessenen Verbrauchswerten auch die Planzahlen zum Vergleich dargestellt. Die einfach zu prognostizierenden planerischen PV-Erträge sind um ca. 3 % höher als die realen Monitoringdaten. Der PE-Verbrauch der Schule ist um 10 % niedriger als in der Planungsphase angenommen. Allerdings hat sich der Anteil für Raumkühlung mehr als verdoppelt. Grund dafür ist die Umsetzung erhöhter Komfortanforderungen im Sommerbetrieb. In der Planungsphase waren die Anforderungen an die sommerliche Behaglichkeit relativ schwach definiert worden (max. 5 % der Anwesenheitszeit bei operativen Raumtemperaturen über 27 °C). In der Nutzungsphase hat sich dann das Temperaturband der DIN EN 15251 als favorisiertes Ziel herauskristallisiert. Aus dem Temperaturdiagramm in Abbildung 5.2-1 lässt sich herauslesen, dass selten Raumtemperaturen über 25 °C erreicht werden. Dies führt zu einem deutlichen Anstieg des Kühlenergieverbrauchs gegenüber der Planungsphase.

Die CO<sub>2</sub>-Äquivalent-Emissionen aus der Nutzung der Schule summieren sich pro Jahr zu 200 to/a. Dem gegenüber stehen 301 to CO<sub>2</sub>-Äquivalent pro Jahr, die durch die PV-Anlage vermieden werden, sodass auch hier eine deutliche Erreichung des Projektziels vorliegt.

## 5 Raumluftkomfort der Referenzräume

### 5.1 Bewertungskriterien

Für Komfortaspekte der Raumlufte werden die drei wichtigsten Aspekte Temperatur, relative Feuchte und CO<sub>2</sub>-Konzentration analysiert und bewertet. Dabei werden die Messwerte aus den Sensoren in der Mediensäule und der Klassenrückwand jeweils gemittelt. Im Folgenden werden entsprechende Benchmarks vorgestellt, mit denen anschließend die Bewertung der Messdaten in den Referenzräumen erfolgt.

Bei der Auswertung werden nur Anwesenheitszeiten innerhalb der Nutzungszeit von 07:30 bis 16:00 Uhr berücksichtigt. Die Detektion erfolgt über die Auswertung der Präsenzmelder. Ferienzeiten, Wochenenden oder Nächte sind somit für die Bewertung des Raumluftkomforts nicht relevant. Da die Belegungsdichte insbesondere in den normalen Klassenräumen relativ hoch ist, ist kein signifikant anderer Raumluftkomfort festgestellt worden, wenn man unabhängig der tatsächlichen Anwesenheit von Personen mit einem starren täglichen Auswertzeitraum von 07:30 bis 16:00 Uhr arbeitet.

Zur detaillierteren Analyse des Raumkomforts werden die Messwerte der relativen Feuchte und der operativen Raumtemperatur in Form von Stundenmittelwerten über ein gesamtes Jahr bewertet. Zusätzlich werden die Messdaten monatsgenau aufgelöst, was eine jahreszeitliche Analyse möglich macht. Ein signifikanter Einfluss der Tageszeit auf den Raumkomfort konnte nicht festgestellt werden.

#### Relative Raumlufffeuchte

Ein wichtiger Faktor für das Komfortgefühl des Menschen ist die relative Luftfeuchtigkeit (rF)  $\phi$ . Eine zu hohe relative Luftfeuchtigkeit  $\phi$  der Raumlufte tritt überwiegend an heißen Sommertagen auf und wird als Schwülegefühl empfunden, was zu einer verminderten Leistungsfähigkeit der Nutzer führt. Im Winter dagegen kann zu trockene Raumlufte in den Räumen auftreten, die eine Austrocknung der Nasen- und Rachenschleimhäute verursacht. Dies hat eine verstärkte Infektanfälligkeit und einen Anstieg der krankheitsbedingten Ausfallzeiten zur Folge. Laut DIN 15251 sollten daher die Grenzwerte 35-65 % für die relative Feuchtigkeit  $\phi$  eingehalten werden. Bei genauerer Betrachtung ist festzustellen, dass die als behaglich empfundene relative Luftfeuchtigkeit von der aktuellen Raumlufftemperatur abhängig ist. Mit steigender Raumlufftemperatur nimmt der zulässige Höchstwert für die relative Luftfeuchte ab. Stellt man die beiden Parameter als Stundenmittelwerte in einem Diagramm gegenüber (siehe Abbildung 5.1-1), ergeben sich Bereiche, in denen der Nutzer die Raumlufte als behaglich, noch behaglich, unbehaglich trocken bzw. unbehaglich feucht empfindet. Dieses Diagramm wird im Folgenden für die Bewertung der relativen Luftfeuchtigkeit in den Räumen des Gymnasiums verwendet.

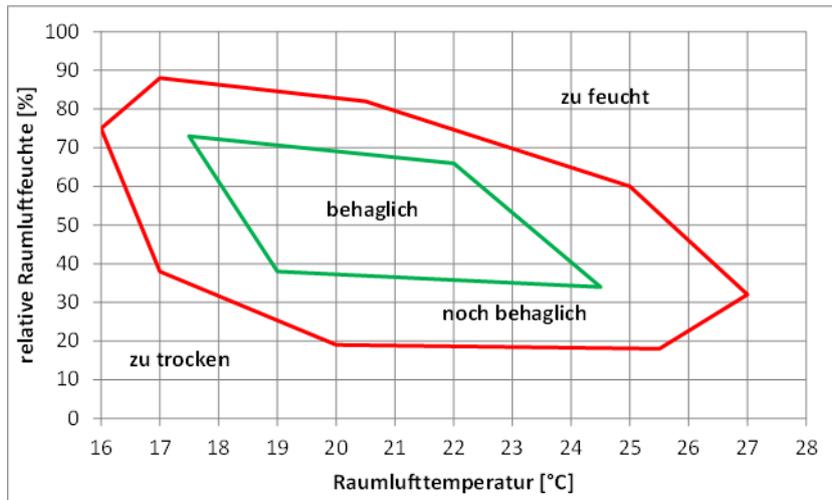


Abbildung 5.1-1: Behaglichkeitsdiagramm für die relative Raumluftfeuchte in Abhängigkeit der Raumlufttemperatur [nach Leudsen und Freymark]

### Operative Raumlufttemperatur

Die operative Raumlufttemperatur berücksichtigt im Gegensatz zur Raumlufttemperatur die Temperatur der Raumumschließungsflächen und ist damit ein besserer Indikator zu Bewertung des Komforts als nur die Raumlufttemperatur. Er wird deshalb auch in einschlägigen Publikationen und Normen verwendet. Zur Ermittlung dienten am Gymnasium Diedorf spezielle Strahlungstemperatursensoren, die zentral in den Räumen aufgehängt sind.

Es wurde aber festgestellt, dass sich bei Gebäuden mit Passivhaushülle kein großer Unterschied mehr zwischen Raumlufttemperatur und operativer Raumlufttemperatur einstellt, weil durch die gute Dämmwirkung die Bauteiloberflächentemperatur nahe der Raumlufttemperatur liegt.

Als Bewertungsgrundlage dient die DIN EN 15251 „Eingangsparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden“, in der Grenzwerte für die operative Raumtemperatur in Abhängigkeit von der Außentemperatur definiert sind (siehe Abbildung 5.2-1-2). Es wird berücksichtigt, dass der Mensch bei höheren Außentemperaturen auch höhere operative Raumtemperaturen als thermisch behaglich empfindet.

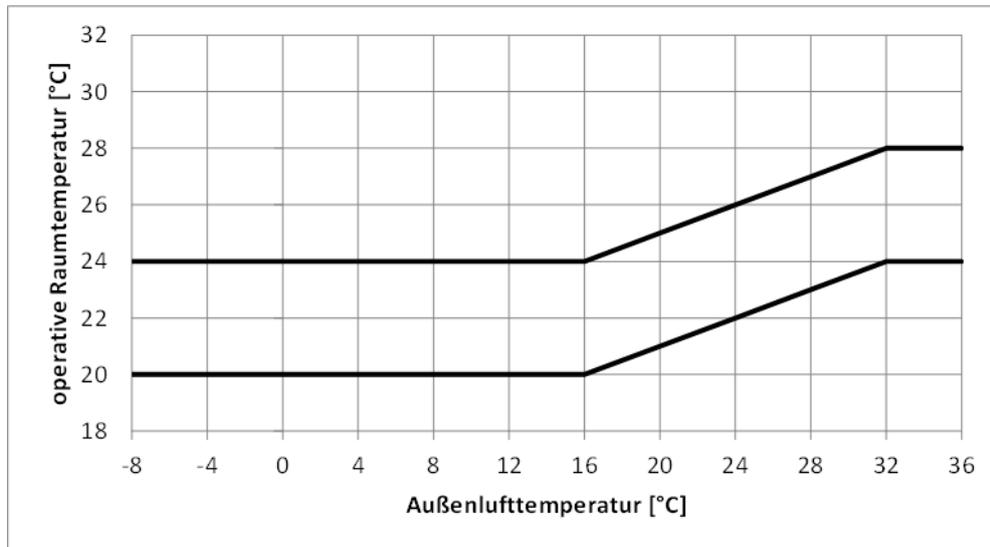


Abbildung 5.1-2: Empfohlene operative Raumtemperatur in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur nach DIN EN 15251

### CO<sub>2</sub>-Konzentration

Die CO<sub>2</sub>-Konzentration der ausgeatmeten Luft liegt mit 4 % um den Faktor 100 höher als bei Frischluft (0,04 %). Daher gilt der Parameter als allgemeiner Indikator zur Beurteilung der Lüftungssituation in Räumen. Insbesondere in Klassen mit einer hohen Belegungszahl pro Raumfläche können bei unzureichender Frischluftversorgung schnell zu hohe Werte erreicht werden. Folgen sind z. B. eine verminderte Konzentrationsfähigkeit.

Für die Bewertung der Messdaten wird auf die Norm DIN EN 13779 „Lüftung von Nichtwohngebäuden“ zurückgegriffen, in der in Abhängigkeit der Kategorie (IDA 1 = Hohe Raumluftqualität, IDA 4 = Niedrige Raumluftqualität) Standardwerte des CO<sub>2</sub>-Gehalts über dem Gehalt in der Außenluft aufgelistet sind (siehe Abbildung 5.1-3).

Tabelle A.10 — CO<sub>2</sub>-Gehalt in Räumen

Kategorie	CO <sub>2</sub> -Gehalt über dem Gehalt in der Außenluft, in ppm	
	Üblicher Bereich	Standardwert
IDA 1	≤ 400	350
IDA 2	400 – 600	500
IDA 3	600 – 1 000	800
IDA 4	> 1 000	1 200

Abbildung 5.1-3: Allgemeine Klassifizierung der Raumluftqualität (IDA) nach DIN EN 13779

Die Bewertung der CO<sub>2</sub>-Konzentration in den Referenzräumen wird auf Basis einer Dauerlinie vorgenommen, aus der die Über- und Unterschreitungsstunden direkt abzulesen sind. Darin sind drei Klassen enthalten:

Hohe Raumluftqualität	CO <sub>2</sub> -Konzentration < 800ppm
Mittlere/mäßige Raumluftqualität	800ppm < CO <sub>2</sub> -Konzentration < 1400ppm
Niedrige Raumluftqualität	CO <sub>2</sub> -Konzentration > 1400ppm

## 5.2 Operative Raumlufttemperatur

Die operativen Raumtemperaturen in den fünf Referenzräumen sind aufgrund der unterschiedlichen Randbedingungen wie Belegung, Ausrichtung oder pädagogischem Konzept (konventioneller Klassenraum/Marktplatz) leicht verschieden. Exemplarisch wird im Folgenden ein südorientierter offener Klassenraum (W209) analysiert. Die graphischen Darstellungen der anderen vier Räume sind dem Anlage 1 zu entnehmen.

Abbildung 5.2-1 zeigt die gemessenen operativen Raumlufttemperaturen nach Teiloptimierung im Jahr 2018. Auch in den Sommermonaten liegen die Temperaturen in einem angenehmen Bereich, in der Spitze werden nur sehr selten Temperaturen von über 26 °C erreicht. Der Komfort kann damit als gut bezeichnet werden. Nur wenige Wertepaare liegen außerhalb des Komfortbereichs und die Abweichungen zum Zielwert liegen alle unter 1 K. Die marginalen Unterschreitungen der Komforttemperatur im Juli/August (siehe Abbildung 5.2-2) sind Folge des Kühlkonzeptes ausschließlich nachts über die Fußbodenkühlung zu temperieren, um die Effizienz der Kälteerzeugung zu erhöhen. Tagsüber werden allein über die Speicherkapazität des Estrichs Wärmelasten aufgenommen. Dies setzt ein niedriges Temperaturniveau des Estrichs am Morgen voraus.

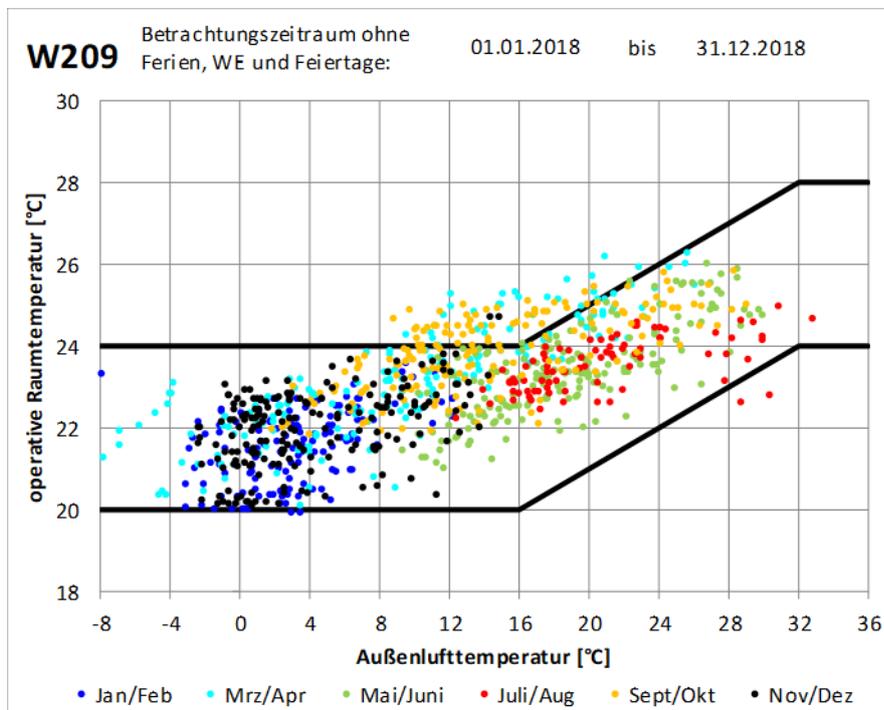


Abbildung 5.2-1: Stundenmittelwerte der operativen Raumtemperatur in einem südorientierten Klassenraum

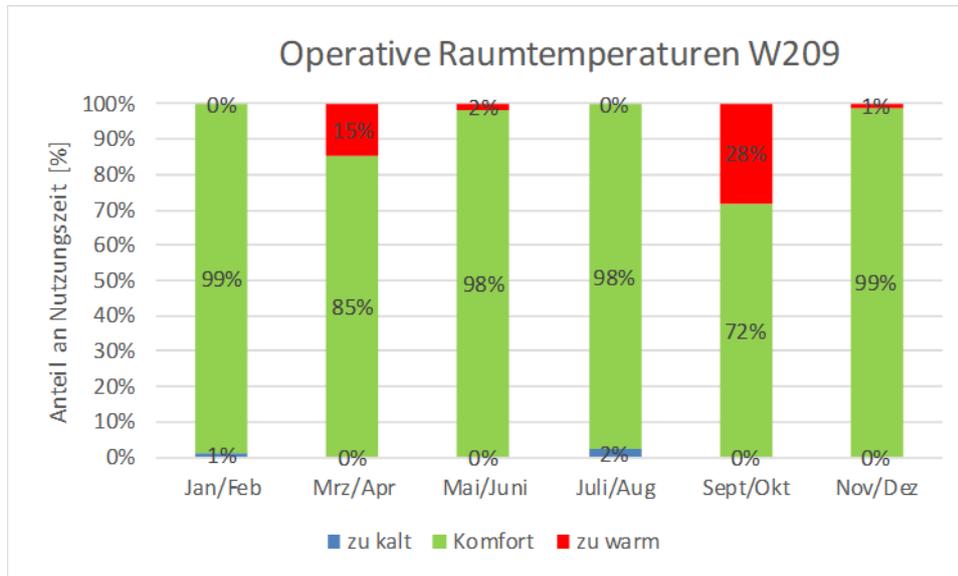


Abbildung 5.2-2: Statistische Auswertung der operativen Raumtemperatur im Jahr 2018

Der größte Einregelungsbedarf ergab sich für die Übergangsphasen März/April und September/Oktober, in denen regelungstechnisch ein automatisiertes Ein/Aus-Signal für die Gebäudekühlung definiert werden musste. Das dynamische Gebäudeverhalten ist insbesondere durch die hoch gedämmte Außenhülle und die Leichtbauweise des Holzbaus von der Anwesenheit der Personen bestimmt, was in der Planungsphase schwer abzubilden ist. Die Überschreitungsstunden (März/April 15 %, Sept/Okt 28 %) sind ausschließlich auf eine deaktivierte Kühlung zurückzuführen. Ziel der erneuten Optimierung nach der Kühlperiode 2018 war ein früheres Anschalten der Temperierung. Diese Maßnahme erfolgte in enger Abstimmung mit Nutzern und Bauherr. Es wird erwartet, dass Überschreitungsstunden für den Sommer 2019 weiter abnehmen.

### 5.3 Relative Raumluftfeuchte

Auch bei der Analyse der relativen Luftfeuchte wird exemplarisch auf den Raum W209 eingegangen. Die graphischen Auswertungen des Raumluftkomforts der anderen vier Referenzräume sind dem Anlage 1 zu entnehmen. Die grundsätzliche Bewertung der Aspekte relative Raumluftfeuchte, operative Raumlufttemperatur und CO<sub>2</sub>-Konzentration ist vergleichbar mit dem im Hauptteil des Abschlussberichts bewerteten Referenzraum W209.

Der Raum W209 weist relative Raumluftfeuchten auf, die ganzjährig stets im noch behaglichen Bereich liegen (siehe Abbildung 5.3-1). Dabei schwanken die Werte zwischen max. 55 % in den Sommermonaten und um 30 % in den Wintermonaten. Vereinzelt sind relative Feuchten bis 20 % detektiert worden, was der Nutzer durchaus als störend wahrnehmen kann. Allerdings sind nur sehr vereinzelte Rückmeldungen an die Schulleitung erfolgt. Lüftungstechnisch ist am Gymnasium ein Konzept ohne Feuchterückgewinnung umgesetzt worden, sodass man anlagentechnisch durch einen geringeren Zuluftvolumenstrom im Winter reagieren kann. Der Nutzer hat sich in einem Abwägungsprozess dafür entschieden, den Luftvolumenstrom unverändert zu lassen, um die CO<sub>2</sub>-Konzentrationen nicht zu erhöhen.

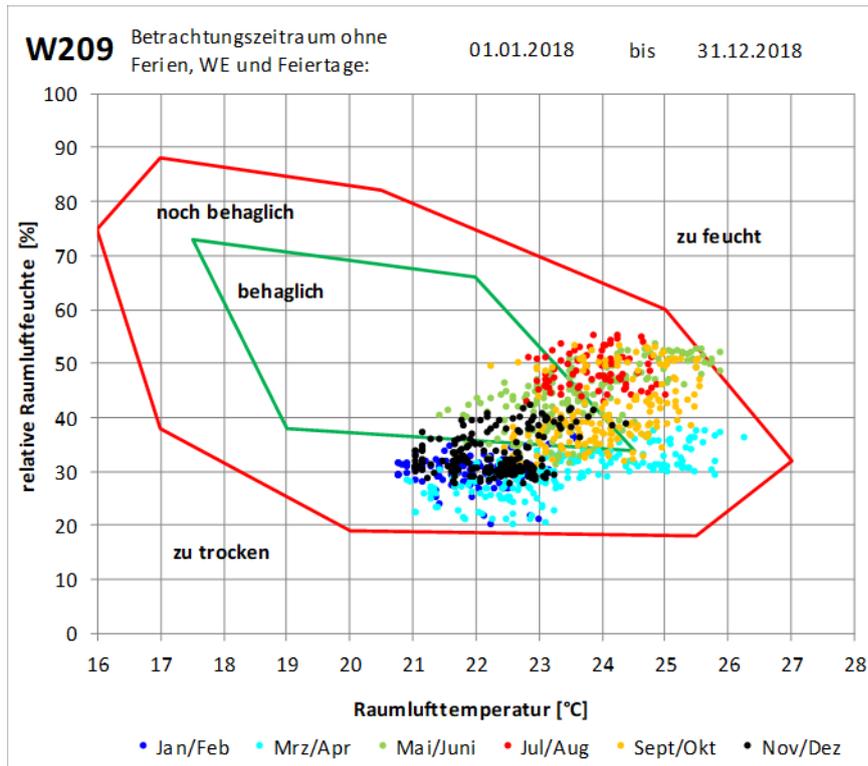


Abbildung 5.3-1: Stundenmittelwerte der rel. Raumluftfeuchte in einem südorientierten Klassenraum

## 5.4 CO<sub>2</sub>-Konzentration

Ab einer CO<sub>2</sub>-Konzentration von 1000 ppm öffnet sich der Luftvolumenstromregler (VSR) für die Klassenräume. Dieser Schwellwert wirkt sich damit direkt auf den Raumluftkomfort aus. Abbildung 5.4-1 zeigt die Messwerte des Jahres 2018 für den Raum W209. Die Luftqualität ist als sehr gut einzustufen. An nur 1,7 % der Anwesenheitszeit im Jahr liegen die Konzentrationen über 1400 ppm. Der Anteil der Anwesenheitsstunden mit Konzentrationen unter 800 ppm liegt bei 18 %. Die guten Luftbedingungen in der Schule werden nicht nur von den Nutzern, sondern auch von Besuchern immer wieder als sehr angenehm wahrgenommen.

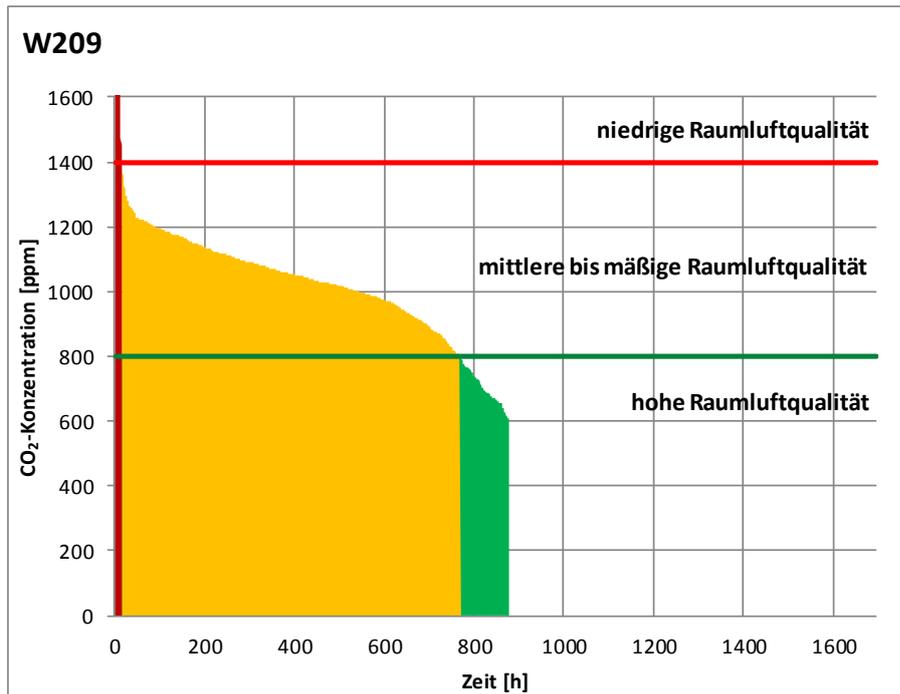


Abbildung 5.4-1: CO<sub>2</sub>-Konzentration in einem südorientierten Klassenraum als Jahresdauerlinie

Ebenfalls ist aus der Abbildung abzulesen, dass in dem betrachteten Referenzraum lediglich an 876 h im Jahr Personen anwesend waren. Bei Fachräumen ist eine noch geringere Anwesenheitsdauer festgestellt worden. Damit unterscheiden sich Schulbauten doch erheblich von anderen Nutzungstypen wie z. B. Bürogebäuden. Die DIN V18599 geht dort von einer jährlichen Anwesenheit von 1925 h aus.

## 6 Zentrale Haustechnik

Am Gymnasium Diedorf wird zentral für das gesamte Gebäude Wärme und Kälte erzeugt sowie zentral Frischluft über die Lüftungsanlage mit kombinierter Wärme-/Kälterückgewinnung und Adiabatik zur Verfügung gestellt. Ebenso wird die PV-Anlage als eine zentrale Anlage definiert, obwohl sowohl Wechselrichter als auch Module über den gesamten Schulkomplex verteilt sind. In den folgenden Kapiteln werden diese Systeme detailliert betrachtet und in Bezug auf die Projektziele bewertet.

### 6.1 Wärmeerzeugung

Als Wärmeerzeuger kommen am Gymnasium Diedorf zwei baugleiche Pelletkessel mit jeweils 100 kW zum Einsatz. Die Wärme wird zunächst in zwei jeweils 7,5 m<sup>3</sup> große Pufferspeicher geleitet. Anschließend erfolgt die Verteilung getrennt nach Temperaturniveau. Für Brauchwarmwasser (BWW), welches mittels Frischwasserstationen erzeugt wird und Nacherhitzer der Lüftungsgeräte sind Temperaturen bis max. 70 °C im Vorlauf notwendig. Für die Wärmeübergabe in die Räume mittels Fußbodenheizung (FBH) werden deutlich niedrigere Temperaturen verwendet (40 °C/30 °C).

#### Heizleistung

Bei Effizienzhäusern mit hoch gedämmter Außenhülle und nahezu Luftdichtheit hängt die Heizleistung immer weniger vom Außenklima ab. In diesem Zusammenhang ist auch die Heizleistung der Pelletskessel (200 kW) im Vergleich zu den internen Gewinnen durch Personenbelegung zu sehen (Näherung: 80 kW = 80 W bei 1000 Nutzern). In Abbildung 6.1-1 ist die Heizleistung der FBH in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur aufgetragen. Aufgrund der oben genannten Gründe streut die Verteilung stark. Bei hoher Personenbelegung kann trotz geringer Außenlufttemperatur die Heizleistung sehr gering sein. Um diese Einflüsse abzumildern, ist im Diagramm ein 24h-Mittelwert dargestellt. Es ist zu erkennen, dass ab ca. 10 °C Außentemperatur keine Heizleistung mehr benötigt wird. Damit decken sich die Monitoringergebnisse mit anerkannten Veröffentlichungen, die bei Passivhäusern von einer Heizgrenztemperatur von 10 °C ausgehen.

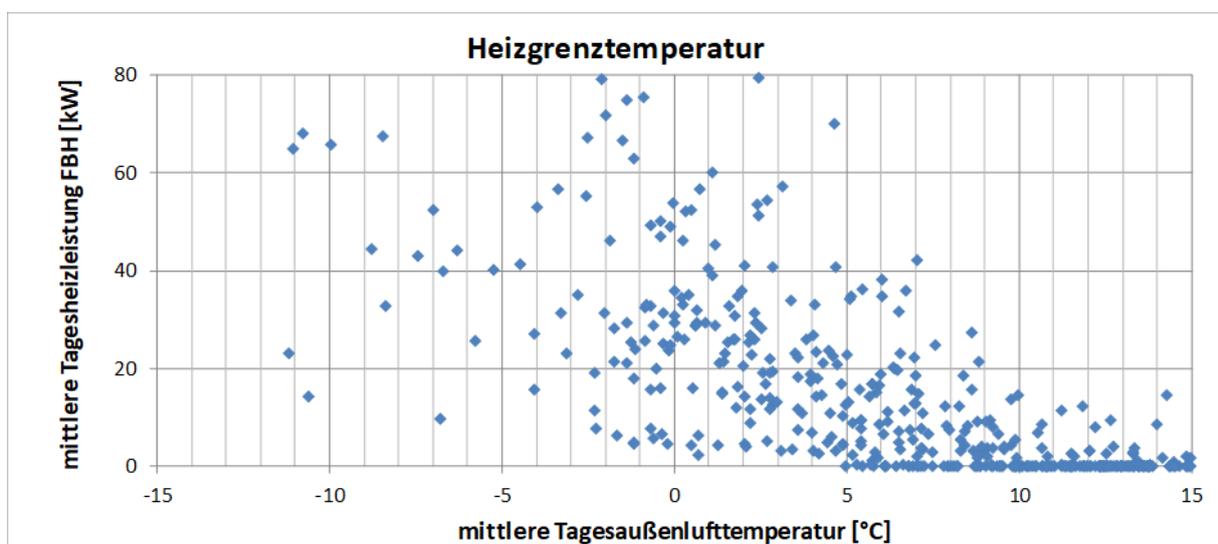


Abbildung 6.1-1: Tagesmittel der Heizleistung für die Fußbodenheizung in Abhängigkeit des 24h-Mittels der Außenlufttemperatur der Jahre 2017 und 2018

## Kesselleistung

Am Gymnasium sind zwei identische 100 kW Heizkessel in einer Parallelschaltung hydraulisch angebunden worden, was zu nahezu gleichen Betriebsbedingungen führt. In Abbildung 6.1-2 ist die erzeugte Wärmeleistung für zwei längere Heizzyklen im Winterfall dargestellt. Es fällt auf, dass Kessel 1 eine deutlich geringere Leistung abgibt als Kessel 2. Bei extremen Randbedingungen (kalte Außentemperatur und geringe Personenbelegung) kann diese Minderleistung zu spürbaren Komforteinbußen führen. Dabei sind die Auswirkungen eher beim BWB und insbesondere bei den Duschen festzustellen. Die vorhandene Gebäudeträgheit führt dazu, dass der thermische Raumkomfort kaum beeinträchtigt ist.

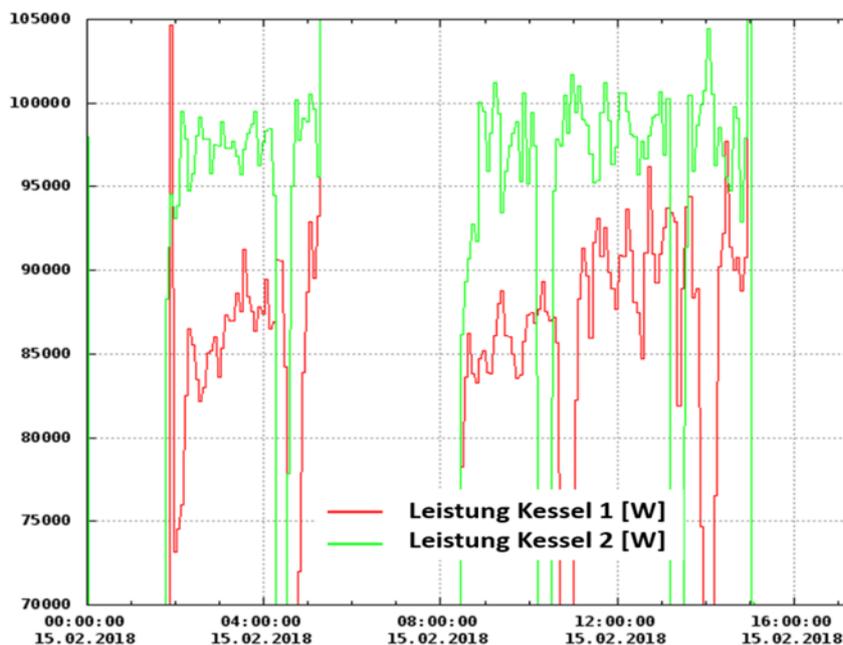


Abbildung 6.1-2: Kesselleistung im Heizbetrieb

Beim Vergleich von Leistungskennwerten aus technischen Datenblätter und gemessenen Monitoringdaten ist immer zu beachten, dass die dokumentierten Zahlen auf Prüfständen ermittelt wurden, auf denen die Randbedingungen optimal für eine gute Performance der Produkte gewählt wurden. Für Pelletkessel bedeutet dies z. B. eine ausreichend lange Leistungsbrandphase ohne Entaschungsvorgang unter Vollast nach einer optimalen Reinigung aller Komponenten. Diese Randbedingungen treten in der Praxis sehr selten auf, deshalb ist bei der Auswertung von Betriebsdaten meistens eine schlechtere Performance als in den technischen Datenblättern zu erkennen. Vor diesem Hintergrund sind die Leistungsdaten von Kessel 2 als sehr gut einzustufen.

Im Rahmen der Monitoringphase wurde der Hersteller aufgefordert, die Leistung von Kessel 1 zu optimieren. Dies stellt sich allerdings als sehr aufwändig heraus. Die größten Schwierigkeiten waren dabei:

- Wechselnde Ansprechpartner
- Das Wartungsteam vor Ort war über die Problematik nicht ausreichend informiert. Ausgeführt wurde lediglich die standardisierte Wartung
- Unzureichende Kommunikation bei den Wartungsterminen
- Problem wurde als solches erst nicht anerkannt oder auf externe Randbedingungen geschoben, die nicht im Aufgabenbereich der Firma liegen

Im Ergebnis ist es bis zum Ende 2018 nur teilweise gelungen, die Kesselleistung 1 an die Kesselleistung 2 anzunähern. Weitere Optimierungen an der Kesselfahrweise werden erst im Betriebsjahr 2019 umgesetzt. Dazu gehört in erster Linie der Betrieb mit nur einem Führungskessel, welcher nach festen Laufzeiten wechselt. So wird die Taktung der Kessel reduziert, was zu erhöhter Leistung und Effizienz führt und gleichzeitig zu niedrigeren Emissionen (v. a. Feinstaub).

### **Jahresnutzungsgrad Pelletkessel**

Der Jahresnutzungsgrad ist ein Maß zur Bestimmung der Kesseleffizienz, bei dem die erzeugte Wärmeenergie ins Verhältnis zum eingesetzten Heizwert des Brennstoffs gesetzt wird. Im vorliegenden Fall ist der Pelletverbrauch über die Laufzeit der Einschubschnecke unter Berücksichtigung des spezifischen Fördervolumens ermittelt worden. Dabei ist die Genauigkeit höher anzusetzen als eine Abschätzung über den Füllstand des Lagers oder über das Volumen der Pelletslieferungen. Die erzeugte Wärmemenge wurde über Wärmemengenzähler am Ausgang der Erzeuger bestimmt. Im Monitoringzeitraum 2017 bis 2018 ist für Kessel 1 ein Wert von 81 % ermittelt worden. Kessel 2 weist mit 84 % einen höheren Wert aus. Somit hat auch hier Kessel 1 eine schlechtere Performance als Kessel 2 (wie bei der Erzeugungsleistung).

Im Mittel ergibt sich aus den Messdaten ein guter Jahresnutzungsgrad der Pelletkessel von 82,4 %.

## **6.2 Kälteerzeugung**

Die Kältemaschine (KM) ist der größte elektrische Einzelverbraucher der Schule. Im Jahre 2017 machte sie 14 % des Jahresstromverbrauchs des Gymnasiums aus. Dabei wird die Kälte über einen Kompaktkaltwassersatz erzeugt, welcher je nach Randbedingungen den jeweils energieeffizientesten internen Betriebsmodus auswählt. Die Hauptbetriebsmodi sind dabei die freie Kühlung, die adiabate Verdunstungskühlung und die Kompressionskälte. Regeltechnisch wird eine Kälteerzeugung in der Nacht bei kalten Außenbedingungen angestrebt, in der die Kältespeicher (Puffer, Fußbodenaufbau) geladen sowie die Räume heruntergekühlt werden.

### **Interne Betriebsmodi**

Über eine Schnittstelle war es im Monitoring möglich, die internen Betriebsmodi zu identifizieren. Hier hat sich gezeigt, dass insbesondere die adiabate Verdunstungskühlung zur passiven und unterstützenden Kühlung 2017 selten funktioniert hat. Abbildung 6.2-1 zeigt die Leistungszahlen der Jahre 2017 und 2018. Der EER (Energy Efficiency Ratio) stellt das Verhältnis von erzeugter Kältemenge zum Stromverbrauch der Kälteerzeugung dar. 2017 ist ein rein linearer Zusammenhang zwischen den Wertepaaren zu kennen, der keine energieeffizienteren Modi zeigt. Im optimierten

Zustand des Jahres 2018 sind unterhalb von 12 °C Feuchtkugeltemperatur der Außenluft zwei Punktwolken zu erkennen, die sehr effiziente Betriebsmodi mit adiabatischer Kühlung darstellen.

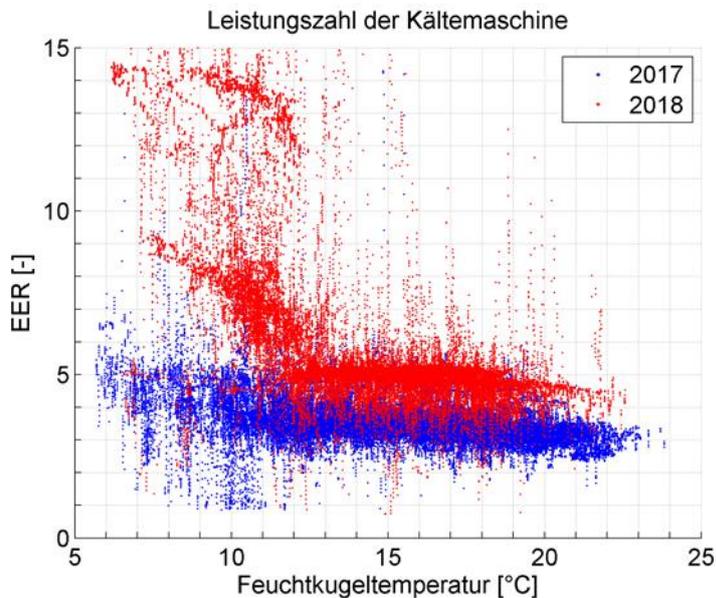


Abbildung 6.2-1: Leistungszahl (EER) der Kälteerzeugung in Abhängigkeit der Feuchtkugeltemperatur der Außenluft in den Betriebsjahren 2017 und 2018

### Stromverbrauch Nichtnutzungszeit

Im Winter wird die Kältemaschine nicht verwendet, sie braucht aber weiterhin eine nicht unerhebliche Menge an Strom. Der Stand-by-Verbrauch setzt sich bei der verwendeten Anlage aus zwei Bausteinen zusammen (siehe Abbildung 6.2-2):

Die Carterheizung verbraucht als Dauerleistung rd. 454 W und soll den Kältemittelkreis auf Betriebstemperatur halten, um ein zügiges Anfahren zu gewährleisten. Diese Funktion wird aber bei der umgesetzten Betriebsstrategie am Gymnasium nur einmal im Jahr benötigt. In einem aufwändigen Prozess mit dem Hersteller sind die Carterheizungen jetzt über die GLT ansteuer- und abschaltbar. Nach der Optimierung werden nur noch 93 W für Sensorik, Controller und Aktoren verbraucht. Insgesamt ergibt sich somit eine Reduktion des Gesamtstromverbrauchs der Kältemaschine im Winter von ca. 79 %.

Des Weiteren ist werkseitig ein Frostschutz implementiert, der u. a. durch Takten aller Umwälzpumpen in der Kälteerzeugung als Einfrierschutz wirkt. Bei einer Innenaufstellung, wie am Gymnasium realisiert, ist diese Sicherheitseinstellung nicht notwendig. Der Frostschutz wird zyklisch aktiviert und hat einen Leistungsverbrauch von ca. 960 W. Aufgrund der kurzen Betriebsdauer tragen die Peaks energetisch nur zu 8 % des Verbrauchs in der Nichtnutzungszeit bei. Somit ist eine Optimierung energetisch wenig ertragreich und wurde auch aufgrund der komplexen softwaretechnischen Umsetzung nicht weiterverfolgt.

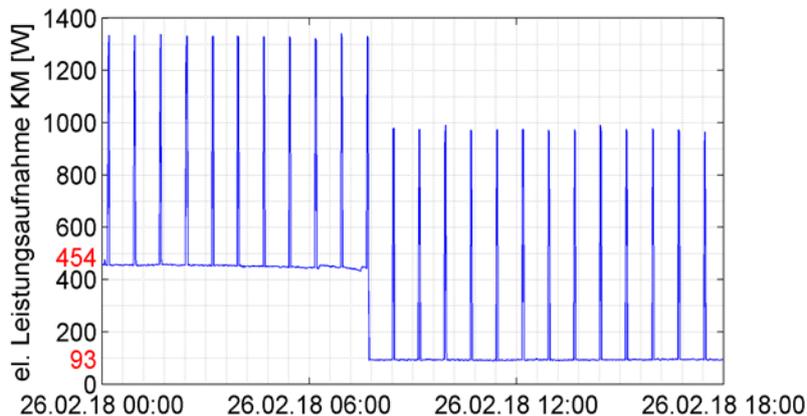


Abbildung 6.2-2: Elektrischer Stromverbrauch der Kälteerzeugung in der Nichtnutzungszeit (Abschaltung der Carterheizung)

### GLT-Regelung

In der ersten Phase des Monitorings fiel schnell auf, dass der für die Schaltung der internen Betriebsmodi notwendige Außentemperaturfühler in einem Luftkanal im Technikgeschoss installiert wurde, was zu einem nahezu ununterbrochenen Einsatz der Kompressoren führte. Der Sensor wurde anschließend nach Außen versetzt.

Im Rahmen einer generellen Optimierung des Temperaturniveaus der gesamten Kälteversorgung wurde die Vorlauf-Solltemperatur der Kälteerzeugung leicht angehoben. Dieser Parameter führt genauso zu einer besseren Effizienz wie die konsequente Erzeugung in der Nacht. Eine tageszeitliche Speicherung erfolgt hauptsächlich im dafür angepassten Estrich und zu keinen Teilen im Kältespeicher.

### Jahresarbeitszahl

Die erzeugte Kältemenge wurde mit einem Kältemengenzähler am Ausgang der Kältemaschine gemessen. Der dazu in Relation gesetzte Stromverbrauch umfasst alle Komponenten der Kompaktanlage wie Kompressor, Aktoren, Sensorik, Carterheizungen, Pumpen und Ventilatoren. Im Rahmen der Jahresbetrachtung sind auch die relevanten Stromverbräuche der Nichtnutzungszeit enthalten.

Im Jahr 2017 konnte ein Maschinen-Jahres-EER von 3,4 ermittelt werden. Durch die beschriebenen umfangreichen Optimierungen konnte er im folgenden Jahr auf sehr gute 4,8 gesteigert werden.

## 6.3 PV-Anlage

Die Dächer der vier Schulhäuser wurden als Satteldachkonstruktion ausgeführt, die nach Süden ausgerichtet ist. Aufgesetzte Dachreiter vergrößern die Aufstellfläche für PV-Module zusätzlich. Die Dachneigung beträgt 9°. Die Gebäude sind um 11° von Süden nach Südost gedreht. Somit besitzt die PV-Anlage einen Azimutwinkel von 169°. Eine Luftaufnahme der PV-Anlage ist Abbildung 6.3-1 zu sehen. Die Modulfläche, die in die Dachhaut integriert ist, wird auf allen vier Dächern durch Oberlichter unterbrochen.



Abbildung 6.3-1: Luftbildaufnahme der PV-Anlage am Standort Diedorf

Es kamen monokristalline Module der Firma Luxor vom Typ Eco Line 60/265 mit einer Nennleistung von 265 Wp zum Einsatz. Folgende Übersicht fasst die PV-Kenngrößen zusammen:

Gebäude- teil	Anzahl Module [n]	inst. PV-Leistung [kW <sub>p</sub> ]	Modulfläche [m <sup>2</sup> ]	Anzahl Wechselrichter [n]
KH 1	328	86,9	533,6	3
KH 2	242	64,1	393,7	2
Aula	496	131,4	806,9	4
Sport	593	157,1	964,7	5
Summe	1659	439,6	2699,0	14

### Begriffsdefinition

Die zur Analyse des PV-Systems wichtigen Terme werden in der Graphik der Abbildung 6.3-2 gezeigt. Aus dem Gesamtertrag der PV-Anlage und dem Gesamtstromverbrauch der Schule ergeben sich die Größen Netzeinspeisung, Eigenstromverbrauch und Netzbezug.

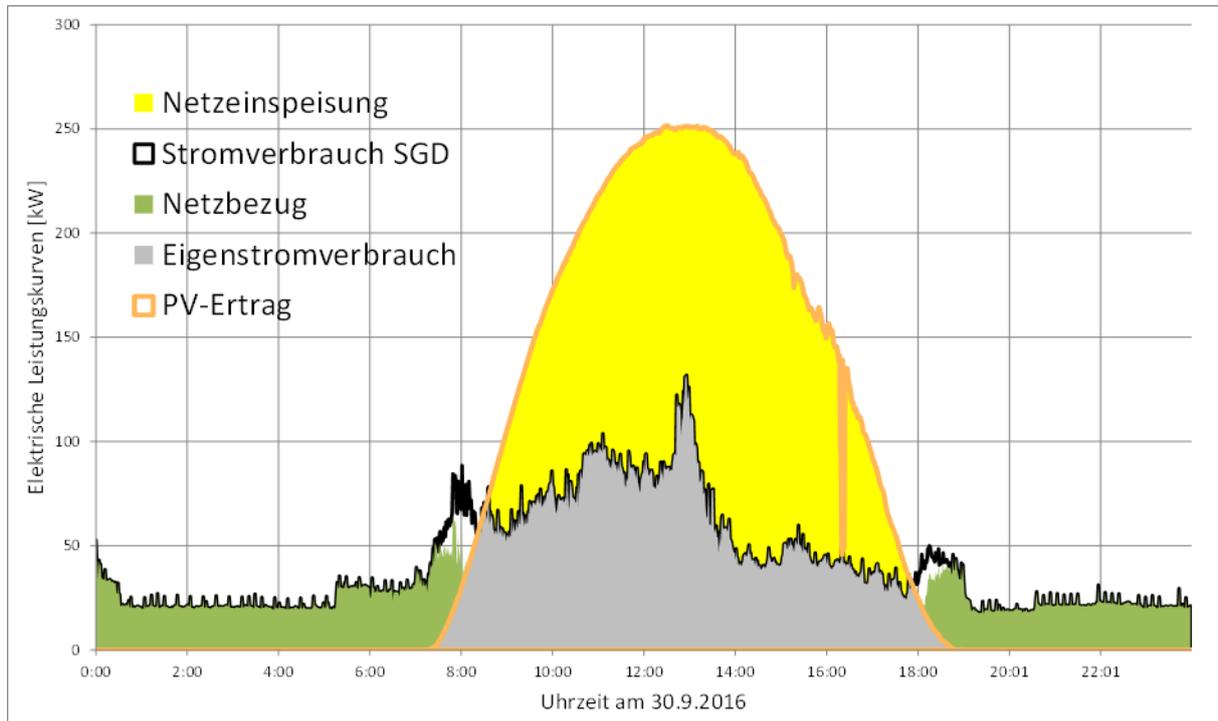


Abbildung 6.3-2: Begriffsdefinition von Photovoltaikkenngrößen am Beispiel der elektrischen Leistungskurven des Gymnasiums am Freitag, den 30.09.2016

Daraus lassen sich zwei Kennzahlen ableiten, die eine Bewertung der Integration der PV-Anlage in das anlagentechnische System des Gymnasiums erlauben. Die Eigenverbrauchsquote beschreibt das Verhältnis von selbst verbrauchtem Strom zum gesamten PV-Ertrag. Der Autarkiegrad setzt den Eigenstromverbrauch ins Verhältnis zum Gesamtstromverbrauch der Schule. So bedeutet ein Autarkiegrad von 33 %, dass ein Drittel des Gesamtstromverbrauchs durch die hauseigene PV-Anlage gedeckt werden kann. Wichtig ist in diesem Zusammenhang die Angabe des Bezugszeitraums, da das Ergebnis stark davon abhängt. Im Projekt ist der Eigenverbrauch für jeden Zeitschritt der Messdatenauswertung (1 min) ermittelt worden. Die Kennwerte ergeben sich dann aus den Monatssummen von Gesamt- und Eigenstromverbrauch sowie PV-Ertrag.

$$\text{Eigenverbrauchsquote} = \frac{\text{Eigenstromverbrauch}}{\text{PV\_Ertrag}} \quad \text{Autarkiegrad} = \frac{\text{Eigenstromverbrauch}}{\text{Gesamtstromverbrauch}}$$

Aus betriebswirtschaftlicher Sicht ist eine Maximierung des Eigenstromverbrauchs anzustreben, da die Kosten für Strombezug aus dem Netz die Gutschrift für eingespeisten Strom nach EEG deutlich übersteigen. Für das Gymnasium lagen 2018 mittlere Vergütungssätze von 12 ct./kWh bzw. durchschnittliche Bezugskosten von 21 ct./kWh vor. Auch aus Gründen der Netzentlastung bzw. der Netzdienlichkeit ist eine Maximierung der Eigenverbrauchsquote anzustreben.

### PV-Ertrag

Im Jahr 2018 lieferte die PV-Anlage 459 MWh elektrische Energie (2017: 457 MWh) und damit in der Jahressumme deutlich mehr, als die Schule an elektrischer Energie verbraucht (307 MWh). Davon wurden 132 MWh direkt selbst verbraucht, die restlichen 327 MWh in das öffentliche Netz eingespeist. Die monatlichen Erträge sind in Abbildung 6.3-3 als Summe von Eigenverbrauch und Netzeinspeisung dargestellt. Nur in den Monaten November bis Februar ist der monatliche PV-Ertrag geringer als der monatliche Gesamtstromverbrauch der Schule.

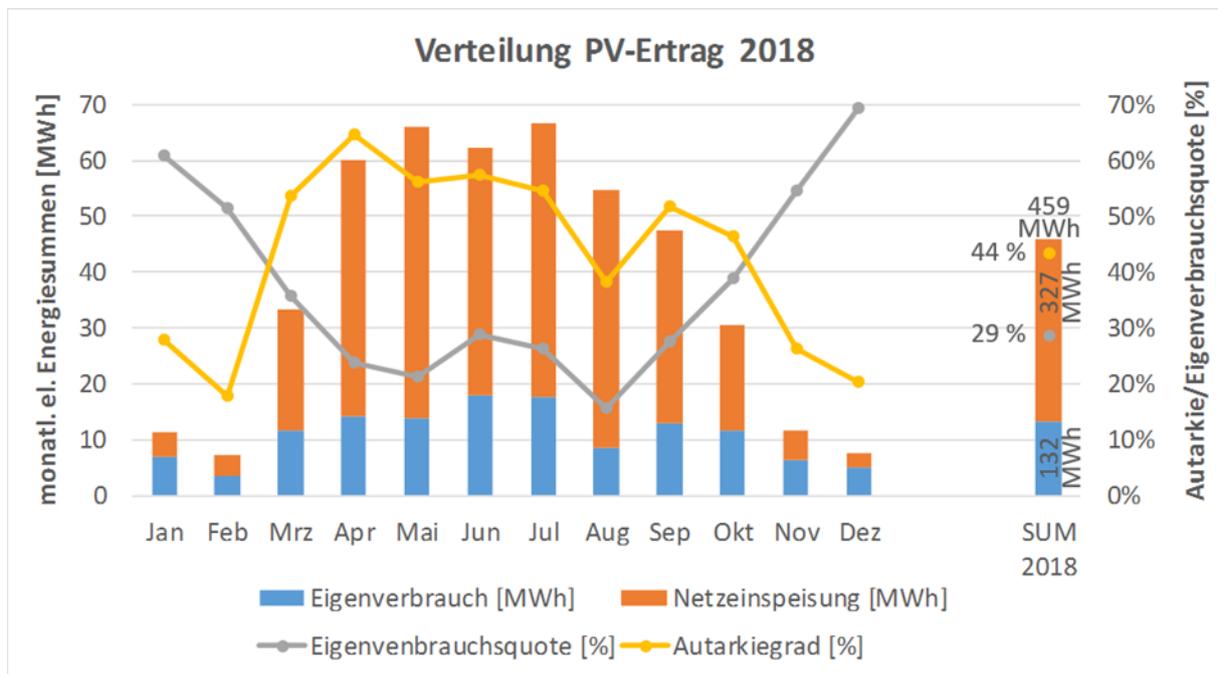


Abbildung 6.3-3: Monatlicher PV-Ertrag, Autarkie und Eigenverbrauchsquote im Jahr 2018

Bezogen auf die installierte Modulfläche des gesamten PV-Anlage von 2699 m<sup>2</sup>, ergibt sich ein spezifischer Jahresertrag 2018 von 170 kWh/(m<sup>2</sup> x a). Bei Berücksichtigung der verbauten Peakleistung von 439,6 kW<sub>Peak</sub> lässt sich ein spezifischer Wert von 1044 kWh/(kW<sub>Peak</sub> x a) errechnen.

### Systemintegration PV-Anlage

In Abbildung 6.3-3 ist ebenfalls die mittlere monatliche und jährliche Eigenverbrauchsquote bzw. der Autarkiegrad dargestellt. Grundsätzlich steigt die Eigenverbrauchsquote im Winter an, weil ein Großteil der geringen PV-Erträge selbst verbraucht werden kann. In den Monaten November bis Februar liegt die Quote bei über 50 %. Der Höchstwert ist 2018 im Dezember mit 69 % erreicht worden. Im Jahresmittel ergibt sich ein Wert von 29 %. Im August entsteht aufgrund der Nichtnutzung der Schule in den Sommerferien ein sehr geringer PV-Eigenverbrauch, sodass sowohl Eigenverbrauchsquote als auch Autarkiegrad sich deutlich gegenüber den anderen Monaten reduzieren. Grundsätzlich ist der Autarkiegrad in den strahlungsstarken Monaten am größten, weil aufgrund der höheren PV-Erträge der Eigenstromverbrauch steigt. Dies führt bei gleichbleibendem

Gesamtstromverbrauch zu einem Anstieg des Autarkiegrades. In den Monaten Juni und Juli ist aufgrund der teilweise strombasierten Kälteerzeugung der Gesamtstromverbrauch höher als in den restlichen Monaten. Folge davon ist ein Absinken des Autarkiegrades. Der höchste Grad ist im Jahr 2018 im April mit 65 % und der niedrigste im Februar mit 18 % gemessen worden. Im Jahresmittel ergibt sich ein Wert von 44 %, d. h. 44 % des Gesamtstromverbrauchs im Jahr können regenerativ über die PV erzeugt werden.

### Wirkungsgrad PV-Anlage

In der Planungsphase ist im Rahmen einer Jahresverlustberechnung der prognostizierte PV-Ertrag ermittelt worden. Dabei sind sowohl elektrische, geometrische und temperaturabhängige Verluste als auch Wirkungsgrade von Modulen und Wechselrichtern berücksichtigt worden. In Abhängigkeit der horizontalen Globalstrahlung kann nun ein berechneter Wirkungsgrad der PV ermittelt werden. Dieser beträgt 15,44 %, d. h. über 15 % der globalen horizontalen Globalstrahlung wird in nutzbare elektrische Energie umgewandelt.

Gleichfalls ist es möglich, den Wirkungsgrad auf die Einstrahlungsebene der PV-Module zu beziehen. Im Monitoringzeitraum sind nun die gemessenen Werte zum Vergleich ermittelt worden. Für das Jahr 2017 ergibt sich der in Abbildung 6.3-34 dargestellte Zusammenhang. Die Punktwolke kann vereinfacht als linearer Zusammenhang beschrieben werden. Es ergibt sich ein mittlerer Wirkungsgrad von 15,46 % (Steigung Regressionsgrade). Damit ist der Wert nahezu identisch mit den planerischen Vorgaben und als sehr gut anzusehen. Für das Evaluationsjahr 2018 ist der Wert auf 15,00 % zurückgegangen. Dies ist zum einen auf die natürliche Degradation der Module zurückzuführen. Studien vom Fraunhofer ISE gehen hier von Reduktionen von 0,1 bis 0,5 %/a aus. Der Modulhersteller garantiert eine Leistung von 85 % nach 25 Betriebsjahren und legt damit eine Degradation von 0,48 % pro Jahr zu Grunde. Ein weiterer Grund für das Absinken des Wirkungsgrades ist die erhöhte Verschmutzung der Module durch Vögel.

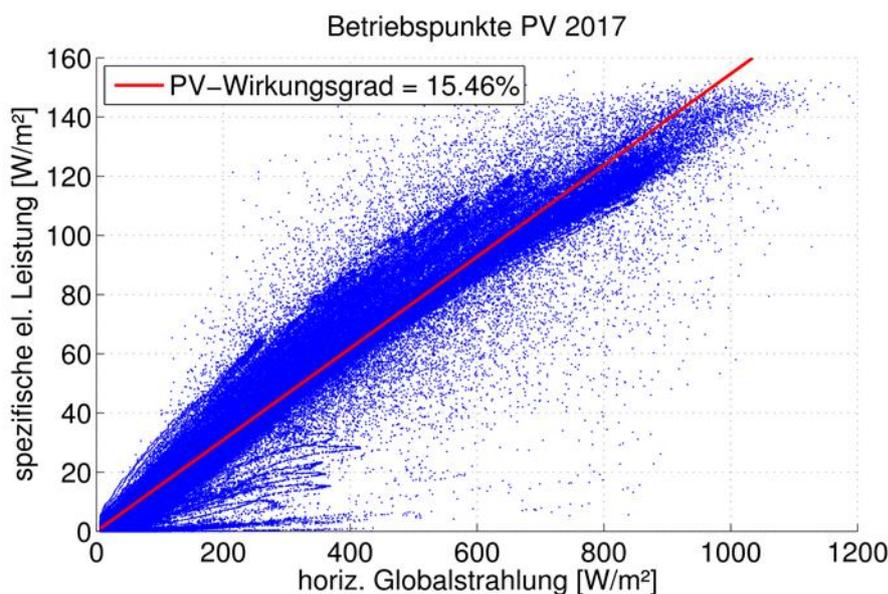


Abbildung 6.3-4: Wirkungsgradkurve PV-Ertrag 2017

## 6.4 Lüftungssystem

Die Quelllüftung stellt bedarfsgerecht Frischluft aus zwei zentralen Lüftungsanlagen mit einem maximalen Volumenstrom von je 22500 m<sup>3</sup>/h zur Verfügung. Eine hocheffiziente Wärmerückgewinnung (WRG) als Kreislaufverbundsystem gewährleistet die nötige Energieeffizienz. Im Sommerfall arbeitet die Anlage als Kälterückgewinnung (KRG), zusätzlich ist im Abluftstrom ein Verdunstungskühler installiert. Nacherhitzer bzw. -kühler konditionieren die Zuluft auf die gewünschte Temperatur. Ausgelegt ist die Anlage auf eine Lüftrate von 28,5 m<sup>3</sup>/(Pers. x h), die Regelung erfolgt nach tatsächlichem Bedarf raumweise über CO<sub>2</sub>-Sensoren. Die Verteilung innerhalb der Gebäude erfolgt energieoptimiert mit maximalen Strömungsgeschwindigkeiten von 1,5 m/s bis 2 m/s. Die Zuluft wird über Lüftungsgitter im Brüstungsbereich bodennah eingebracht. Die Absaugung erfolgt im Deckenbereich. Ein Teil strömt in die innen liegenden Marktplätze über. Die Flure und WCs haben eine separate Regelung. Die Lüftung übernimmt keine wesentliche Heiz- oder Kühlfunktionen, dafür ist die kombinierte Fußbodenheizung/-kühlung vorgesehen. Der Küchentrakt verfügt über eine separate zentrale Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung. Alle Volumenstromregler und Brandschutzklappen sind leicht zugänglich im Kellergeschoss angeordnet und minimieren so den Wartungsaufwand im Betrieb. Energetisch trägt die Lüftungsanlage mit 10 % zum Gesamtstromverbrauch des Gymnasiums bei.

Die Abmessungen der Lüftungshauptleitungen sowie der zentralen Lüftungsanlage betragen 2,4 x 2,1 m. Eine exakte Erfassung der Luftzustände über eine solch große Querschnittsfläche erfordert hochpräzise Spezialfühler sowie zusätzliche Einbauten wie z. B. Luftmischer, die eine homogene gleichverteilte Luftströmung erzeugen. Aus wirtschaftlichen Gründen konnte in diesem Projekt nur eine minimale Sensorik montiert werden. Die größte Fehlertoleranz weist dabei der eingesetzte Stabfühler im Querschnitt zur kombinierten Erfassung von Lufttemperatur und relativer Feuchte auf. Aus diesem Grund weisen die folgenden Auswertungsdiagramme alle eine hohe Streuung der Messwerte auf. Bei der Bewertung der Diagramme ist dies zu berücksichtigen.

### Ventilatoren

Die Lüftungsanlagen verbrauchten im Jahr 2018 ca. 10 % des Gesamtstromverbrauchs des Gymnasiums. Davon entfallen etwa 70 % auf die vier Ventilatoren der zentralen Lüftungsanlage und die zwei Ventilatoren der Küchenanlage. Die Auslegungsvolumenströme betragen für die Zentralanlage 45000 m<sup>3</sup>/h, aufgeteilt in zwei baugleiche Anlagen und für die Küchenanlage 5000 m<sup>3</sup>/h. Aufgrund der untergeordneten energetischen Bedeutung der Küchenanlage wird im Folgenden nur auf die Zentralanlage eingegangen.

Die Zu- und Abluftventilatoren sind als Hochleistungs-Radialventilatoren mit Direktantrieb und sechs rückwärtsgekrümmten Hohlprofilschaufeln ausgeführt. Der totale Druckverlust pro Strang beträgt 544 Pa. Der Antrieb erfolgt über einen stufenlos einstellbaren EC-Motor, der über einen Frequenzumrichter geregelt wird. Die maximale Leistungsaufnahme beträgt im Auslegungsfall 5,5 kW pro Ventilator. Dieser Wert ist auch über die Messdatenauswertung bestätigt worden.

Für eine Bewertung der Energieeffizienz ist in DIN EN 13779 und DIN EN 13053 eine Methode zur Bestimmung der spezifischen Ventilatorleistung beschrieben. Die Bewertung erfolgt mit 7 Stufen, wobei SFP 1 die effizienteste Klasse darstellt. Für zusätzliche Einbauten (z. B. Befeuchtereinheit der adiabatischen Abluftkühlung) kann der Grenzwert entsprechend angehoben werden. Maßgebend für die Bewertung ist der Auslegungsvolumenstrom von 22500 m<sup>3</sup>/h. Ausgeschrieben war die Effizienzklasse SFP 2, die bei großen Anlagen ein sehr gutes Benchmarking darstellt. Abbildung 6.4-1 zeigt die Auswertung der Ventilatorbetriebsdaten für das Jahr 2018.

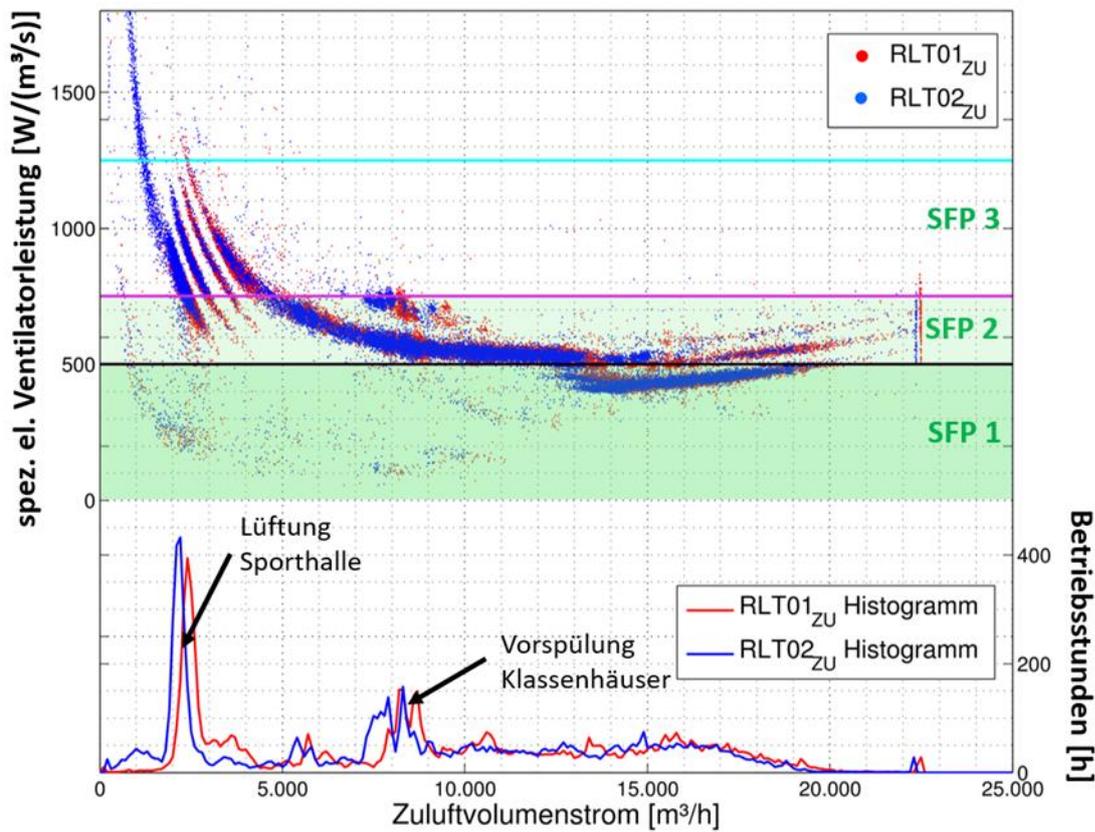


Abbildung 6.4-1: Spezifische elektrische Zuluftventilatorleistung und Häufigkeitsverteilung von Luftvolumenströmen

Die spezifischen Ventilatorleistungen von Anlage 1 und 2 sind nahezu deckungsgleich. Die meisten Betriebspunkte liegen in den beiden effizientesten SFP Klassen 1 und 2. Bezogen auf den Auslegungsvolumenstrom von 22500 m<sup>3</sup>/h wird SFP Klasse 2 erreicht und entspricht damit den Vorgaben aus der Planungsphase und den Ausschreibungsdokumenten. Bei Volumenströmen unter 5000 m<sup>3</sup>/h stiegen die spezifischen Werte systembedingt an.

Die sehr guten Werte sind zum einen auf die effizienten Motoren und zum anderen auf die extrem geringen Druckverluste im Verteilnetz zurückzuführen. Dabei sind im Auslegungsfall Strömungsgeschwindigkeiten bis max. 3 m/s (Zentralgerät 1,5 - 2 m/s, Haupt-, Verteil- und Anschlussleitungen 3 m/s) abgesetzt worden. Negative Folge sind relativ große Lüftungskanäle, die viel umbauten Raum im Kellergeschoss einnehmen. Im Rahmen des Forschungsprojektes konnte gezeigt werden, dass auch große Lüftungsanlagen mit entsprechender baulicher und anlagentechnischer Berücksichtigung sehr gute Effizienzwerte erreichen.

In Abbildung 6.4-1 ist ebenfalls ein Histogramm zur Häufigkeit von Luftvolumenströmen dargestellt. Dabei ist der Volumenstrom in 100 m<sup>3</sup>/h-Klassen eingeteilt worden. Die dazu gehörigen Betriebsstunden sind auf der Y-Achse dargestellt. Folgende Aspekte fallen auf:

- Der maximale Auslegungsvolumenstrom von 25000 m<sup>3</sup>/h je Anlage wird nicht erreicht. Dies bedeutet, dass die guten Raumluftkomfortbedingungen in der Schule theoretisch auch mit einer kleiner dimensionierten Anlage (z.B. 2 x 20000 m<sup>3</sup>/h) hätten erreicht werden können, was zur Einsparung von Investitionskosten geführt hätte.

- Der erste Peak im Histogramm bei Luftvolumenströmen um 2000 m<sup>3</sup>/h ist auf die Lüftung der Sporthalle zurückzuführen. Dabei wird für eine Dauer von 5 h zwischen 18:00 und 23:00 Uhr ein nahezu konstanter Luftvolumenstrom gefahren. Hier ist ein weiteres Optimierungspotential vorhanden.
- Der zweite Peak ist auf die Vorspülung der Klassenhäuser mit maximal geöffneten Volumenstromreglern vor Unterrichtsbeginn zurückzuführen. Hier wäre ein deutlich höherer Volumenstrom zu erwarten gewesen.
- Die Histogramme der beiden Lüftungsstränge sind nahezu identisch. Die Anlagen werden immer parallel angefordert. Aus dem Diagramm der spezifischen Ventilatorleistung ist zu entnehmen, dass größere Volumenströme spezifisch einen geringeren Energieverbrauch haben. Es wäre zu prüfen, ob in zeitlich gegrenzten Zeiträumen, wie z. B. dem Lüftungsbetrieb der Sporthalle nach 18:00 Uhr, mit nur einer Lüftungsanlage und entsprechend doppeltem Volumenstrom gefahren werden kann.

Insbesondere aus dem Histogramm des Luftvolumenstroms lassen sich Optimierungspotentiale ableiten. Aufgrund des begrenzten zeitlichen und finanziellen Gesamtrahmens für das Monitoring, war hier eine weitere Detailanalyse mit Erarbeitung und Umsetzung von Optimierungsmaßnahmen nicht möglich.

### **Adiabate Befeuchtung des Abluftvolumenstroms**

Ein zentraler Baustein der regenerativen Kälteerzeugung ist die adiabatische Verdunstungskühlung in der Abluft der zentralen Lüftungsanlage. Die Abluft aus den Klassenräumen wird mit Wasser befeuchtet, was zu einer sensiblen Abkühlung der Luft führt. Dies führt bei typischen Betriebspunkten im Sommer ( $T_{\text{Abluft}} = 25 \text{ C}$ ,  $RH_{\text{Abluft}} = 40 \text{ %}$ ) zu einem Kühleffekt von ca. 5 K, welcher über die Kälterückgewinnung auf die Zuluft übertragen wird.

Der Wirkungsgrad einer adiabaten Befeuchtung wird in der DIN EN 13053 über den Befeuchtungsgrad beschrieben. Dabei werden ähnlich wie beim Temperaturübertragungsgrad der WRG die tatsächliche Befeuchtung mit der maximal möglichen Befeuchtung ins Verhältnis gesetzt. Im Rahmen des Monitorings wurde untersucht, ob der gemessene Befeuchtungsgrad der Abluft nach dem Befeuchtermodul an den planerischen und ausgeschriebenen Wert von 85 % herankommt.

In folgender Abbildung 6.4-2 ist der gemessene Befeuchtungsgrad in Abhängigkeit des geförderten Abluftvolumenstroms aufgetragen. Zusätzlich sind die Betriebspunkte nach der Temperaturdifferenz zwischen Ablufttemperatur und seiner Feuchtkugeltemperatur eingefärbt. Laut Normberechnung sollte diese Temperaturdifferenz mindestens 10 K betragen. Im Betrieb werden allerdings so hohe Werte nicht erreicht, was die Aussagekraft aber nicht mindert, weil die Punktverteilung nur eine geringe Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz aufweist.

Bei kleinen Volumenströmen werden Austauschgerade von über 90 % erreicht. Mit zunehmendem Volumenstrom sinkt der Befeuchtungsgrad erwartungsgemäß leicht ab. In den Hauptbetriebspunkten sind Befeuchtungsgrade in der Nähe des Zielwertes gemessen worden.

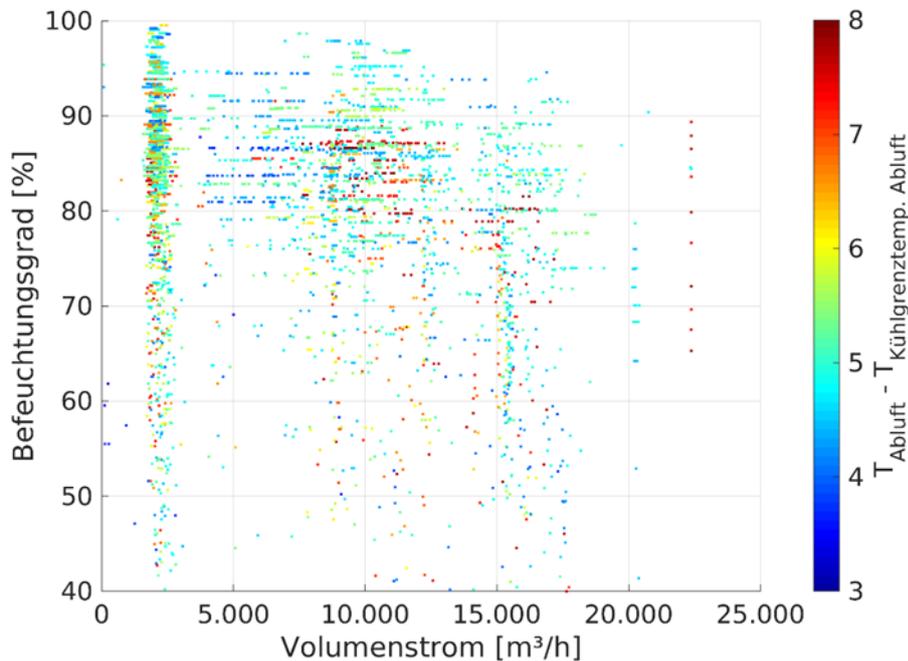


Abbildung 6.4-2: Befeuchtungsgrad der Abluft bei aktivierter Adiabatik

In Abbildung 6.4-3 ist die Arbeitsweise der adiabatischen Verdunstungskühlung anhand eines sommerlichen Tagesprofils dargestellt. Im Normalbetrieb sind die Luftbedingungen der Abluft (Temperatur, rel. Feuchte) vor und nach dem Befeuchter nahezu identisch. Die Außenlufttemperatur ist in diesem Zeitraum kälter als die theoretische Kühlgrenztemperatur, die durch eine adiabatische Befeuchtung erreicht werden kann. Mit ansteigender Außenlufttemperatur wird um 12:00 Uhr die Adiabatik aktiviert. Die Abluft wird durch das Befeuchtermodul von 60 % auf 85 % befeuchtet, wodurch die Ablufttemperatur von 23 °C auf die Kühlgrenztemperatur von 17 °C sinkt. Es ergibt sich für diesen Betriebspunkt ein  $\Delta T$  von ca. 6 K. Im Jahresmittel ist bei aktivierter Adiabatik ein Wert von 5,6 K ermittelt worden.

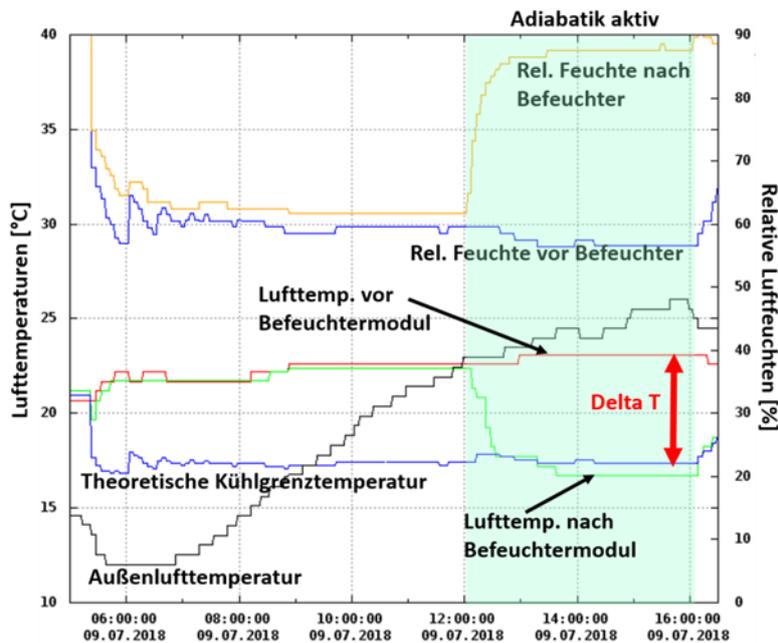


Abbildung 6.4-3: Betriebsdaten der adiabatischen Verdunstungskühlung im Abluftstrang der zentralen Lüftungsanlage

Zusammenfassend kann ein positives Fazit der adiabatischen Kühlung gezogen werden. Die Anlage selbst läuft seit der Inbetriebnahme gut und die planerischen Befeuchtungsgrade werden nahezu erreicht. So kann ein nennenswerter Anteil an Kühlenergie ohne Einsatz von nicht erneuerbaren Energieträgern generiert werden.

### Zwangsspülung

Die Klassenräume verfügen über keine Grundlüftung. Um den Raumluftkomfort insbesondere nach einer Nichtnutzungsphase, in der die Lüftungsanlage nicht läuft, zu erhöhen, werden alle Klassenräume zu fest vorgegebenen Zeiträumen für 30 Minuten mit hohem Volumenstrom zwangsgelüftet. Dies erfolgt vor Unterrichtsbeginn zwischen 05:30 und 07:00 Uhr. Dabei werden das Aulagebäude und die zwei Klassenhäuser jeweils um eine halbe Stunde versetzt gespült, weil sonst die zentrale Anlage keinen ausreichend großen Volumenstrom generieren könnte. Im Kühlfall wird bei Außenlufttemperaturen bis 8 °C zusätzlich die WRG und sämtliche Luftkonditionierungseinheiten deaktiviert, um direkt mit kalter Außenluft kühlen zu können. So können Zulufttemperaturen deutlich unter der Raumlufttemperatur erreicht werden. Komfortprobleme infolge zu kalter Zuluft sind vor Unterrichtsbeginn nicht relevant.

In Räumen mit geringer Personenbelegung (z. B. Lehrerteamräume, Besprechung) wird zusätzlich einmal um 12:00 Uhr für 30 Minuten zwangsgespült. Dadurch konnte eine deutliche Verbesserung des Raumluftkomforts erreicht werden. In der Nichtnutzungszeit wird die Lüftungsanlage aufgrund der bedarfsgesteuerten Regelung nicht aktiviert. Um in längeren Ferienzeiten trotzdem akzeptable Bedingungen in der Schule zur Verfügung zu stellen, wird aus Komfortgründen zweimal in der Woche zwangsgespült. Die WCs werden standardmäßig mit einer Grundlüftung belüftet.

## Wärmerückgewinnung (WRG)

Die kombinierte Wärme- und Kälterückgewinnung wurde am Gymnasium als Komplettsystem von der Fa. SEW geliefert. Der Leistungsumfang beinhaltet einen Außenluftwärmeübertrager zur Filtervorwärmung und einen Hauptwärmeübertrager für den Zuluftstrang der WRG. Für den Abluftstrang wurden die adiabate Befeuchtungseinheit und der Fortluftwärmeübertrager geliefert. Die Verbindung erfolgt über ein Kreislaufverbundsystem (KVS), welches über eine Pumpen- und Armaturengruppe betrieben wird. Zusätzlich kann über einen integrierten Plattenwärmeübertrager im Winter Wärme eingekoppelt werden. Die Regelung der Komponenten erfolgt nicht über die zentrale Gebäudeleittechnik, sondern über eine separate, weitgehend autarke Steuerung. Die restlichen RLT-Anlagenteile wie z. B. Kanäle oder Ventilatoren wurden von einem anderen Hersteller geliefert. Ein WRG-Schema ist in Abbildung 6.4-4 dargestellt.

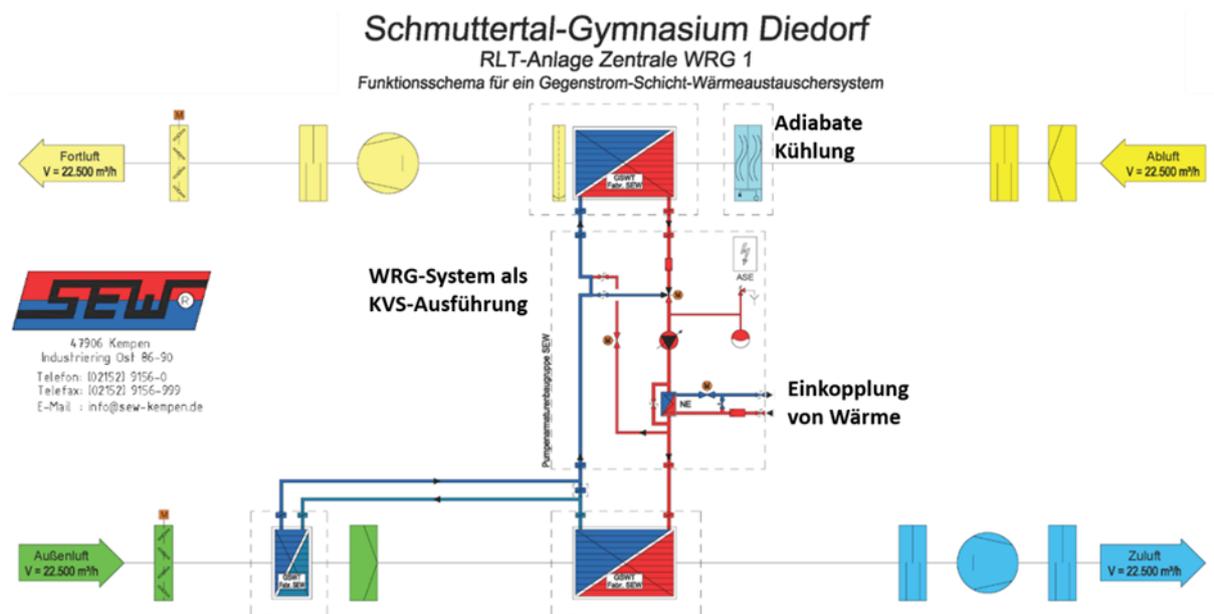


Abbildung 6.4-4: WRG-Schema der Fa. SEW

Die Funktionsweise und die Effizienz des WRG/KRG-Systems sind von entscheidender Bedeutung bei der energetischen Bewertung der Lüftungsanlage. Hilfreich sind dabei detaillierte Betriebsdaten, um einzelne Betriebszustände analysieren und bewerten zu können. Leider war es nicht möglich, die internen Daten des SEW-Systems auszulesen, sodass im Monitoring das System nur als Black-Box betrachtet werden kann.

## Effizienz der Wärmerückgewinnung

Die DIN EN 13053 gibt ein Verfahren zur Bewertung der thermischen Effizienz einer Wärmerückgewinnung vor. Wichtige Kenngröße ist dabei der Temperaturübertragungsgrad ( $\eta_t$ ) unter trockenen Bedingungen. Die Ermittlung erfolgt bei gleichen Massenströmen in Zu- und Abluftkanal bei einer Außentemperatur von 5 °C und Ablufttemperatur von 25 °C.

Der Temperaturübertragungsgrad ergibt sich nach folgender Formel:

$$\eta_t = \frac{t_{\text{Zuluft}} - t_{\text{Außenluft}}}{t_{\text{Abluft}} - t_{\text{Außenluft}}}$$

Dabei wird die tatsächlich erreichte Temperaturdifferenz an den Wärmeübertragern ins Verhältnis zur theoretisch maximalen Differenz gesetzt. Im vorliegenden Projekt ist in der Planungsphase ein Wert von 73 % festgelegt worden. Eine Variantenuntersuchung in der Konzeptphase hat gezeigt, dass bei höheren Übertragungsraten die Wirtschaftlichkeit für dieses WRG-System wieder sinkt. Die Kenngröße ist dabei auch ein Maß für die Auslegung der Wärmeübertragerflächen und der dazu passenden Betriebsbedingungen. Für die Bestimmung der Gesamteffizienz der WRG-Anlage ( $\eta_e$ ) sind zusätzlich noch die Aufwendungen für erforderliche Umwälzpumpen des KVS-Systems und die zusätzliche Ventilatorleistung, hervorgerufen durch die Druckverluste der WRG-Wärmeübertragern, zu berücksichtigen.

Die Übertragung des in der Norm vorgeschlagenen Verfahrens zur Bestimmung der Effizienz auf die Schule in Diedorf gestaltete sich schwierig. Zum einen war es nicht möglich, die elektrischen Verbräuche des Systems und seiner relevanten Komponenten separat zu messen und zum anderen waren die Regelalgorithmen zur internen Steuerung der Anlage nur in den Grundzügen bekannt. Das Hauptproblem bei der Bestimmung des realen Temperaturübertragungsgrades war, dass es wenige Zeiträume gegeben hat, in denen keine externe Wärme aus dem Heizsystem eingekoppelt wurde. Auch waren die Betriebszustände von einer hohen Volatilität geprägt, sodass sich selten konstante Betriebsbedingungen eingestellt haben, die für die Ermittlung von Kenndaten notwendig ist. Unter den beschriebenen Randbedingungen sind die in Abbildung 6.4-5 dargestellten Temperaturübertragungsgrade für die RLT Anlage 1 zu sehen. Zum Vergleich sind die planerischen Berechnungswerte als Trendlinie hinterlegt. Die gemessenen Werte liegen mehrheitlich unter den Anforderungen aus der Planungsphase. Allerdings kann daraus, aus den o. g. Gründen, keine negative Bewertung des Systems abgeleitet werden.

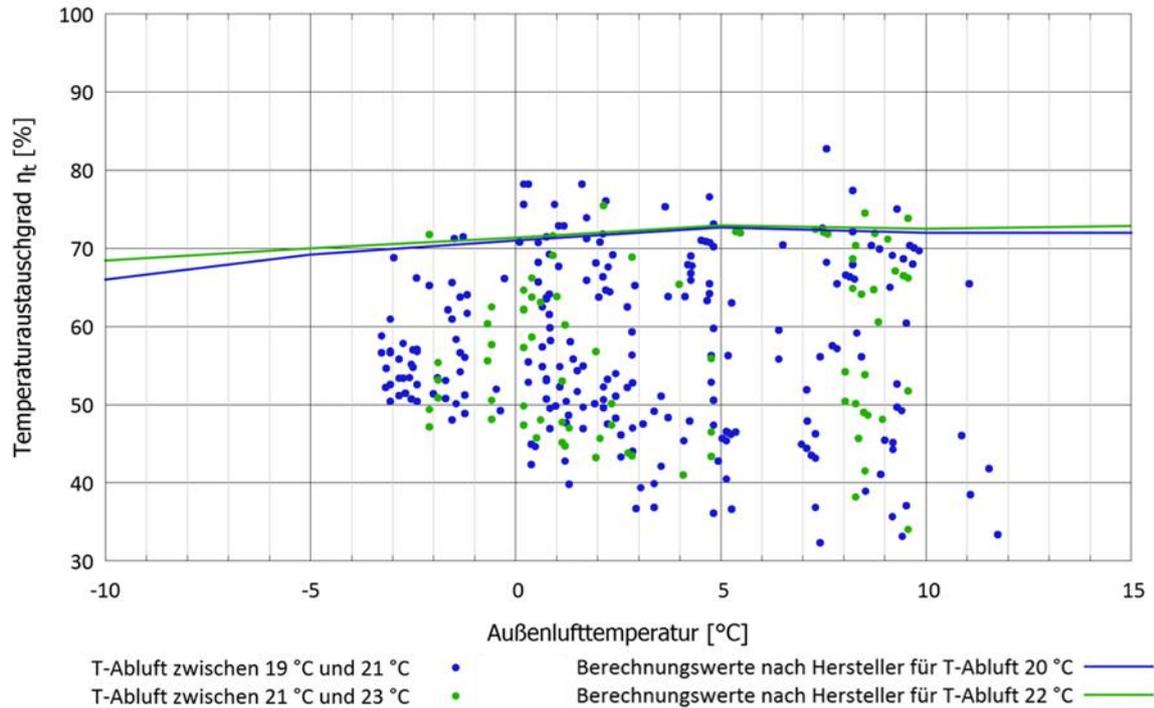


Abbildung 6.4-5: Temperaturaustauschgrade der WRG ohne Einkopplung von Heizwärme

### Eingesparte Energie

Über kombinierte Wärme- und Kältemengenzähler, die im KVS-System installiert sind, lässt sich die durch das WRG/KRG-System eingesparte Energie bestimmen. Dabei ist zwischen Sommer- und Winterbetrieb zu unterscheiden.

Im Jahresverlauf werden dem Abluftstrang pro Jahr ca. 95 MWh Wärme entzogen (RLT 1+2). Der größte Anteil der Energie fällt dabei in der Heizperiode an. Aber auch im Sommer in den kühlen Vormittagsstunden wird dem Abluftstrom Energie entzogen, um die Zuluft aus Komfortgründen vorzuwärmen. Die bilanzierte Menge entspricht damit ca. 40 % der durch die zwei Pelletskessel erzeugten Wärme und hat damit einen hohen Anteil in der Energiebilanz.

In Bezug auf die rückgewonnene Kältemenge konnte eine Jahressumme von ca. 10 MWh ermittelt werden. Der Betrag ist um einiges kleiner als die Wärmeenergie, weil nur bei Feuchtkugeltemperaturen der Abluft unter der Außentemperatur Beträge anfallen (insbesondere bei aktivierter adiabatischer Kühlung). Der Anteil der rückgewonnenen Kälte in Bezug zur am Gymnasium erzeugten Kälte beträgt im Jahresmittel ca. 7 %.

## 7 Dezentrale Haustechnik

### 7.1 Verschattung

Bei Gebäuden mit hoch gedämmter und nahezu luftdichter Außenhülle besteht im Sommer die Gefahr der Überhitzung. Verschärft wird diese Neigung bei Schulgebäuden, weil hier die Belegungsdichte in den Klassenräumen hoch ist und vermehrt digitale Medien (z. B. Whiteboards) genutzt werden. Ein zentraler Baustein, um Übertemperaturen zu verhindern, ist ein automatisierter außenliegender Sonnenschutz, der die solaren Wärmegegewinne bei hohen Einstrahlungswerten auf ein Optimum reduziert. Der Sonnenschutz steht dabei im Zielkonflikt mit Aspekten wie natürlicher Tageslichtnutzung und künstlicher Beleuchtung, Sichtverbindung nach außen sowie hohe Nutzerzufriedenheit und architektonischen Belangen. Eine intelligente automatisierte Regelung kann diese Gesichtspunkte berücksichtigen.

Der primäre Zweck des Sonnenschutzes ist die Reduzierung der solaren Einträge über die transparenten Flächen. Er dient nicht der Verdunkelung oder des Blendschutzes, hierfür sind gesonderte Systeme notwendig. Eine Zweckentfremdung ist technisch bei geringen Windlasten allerdings möglich. Primär aus Kostengründen ist am Gymnasium Diedorf ein flächendeckender Blendschutz nicht realisiert worden, obwohl er sinnvoll wäre.

Regeltechnisch wird die Verschattungsanlage automatisiert nach Zonen pro Fassadenebene für jedes Haus separat gesteuert. Dabei erfassen Sensoren die Helligkeit in der Fassadenebene und aktivieren ab einem Schwellwert die Verschattung. Der Lamellenwinkel wird automatisiert mit einer Cut-Off-Winkelsteuerung betrieben, sodass gerade keine Direktstrahlung ins Gebäude gelangt. Damit soll ein Maximum an Solarstrahlung im Sommer abgehalten werden und gleichzeitig ein Höchstmaß an Tageslichteintrag und Sichtverbindung nach Außen gewährleistet sein. Bei Unterschreitung eines Mindesthelligkeitwertes pro Fassade werden die Raffstores wieder eingefahren. Eine manuelle Übersteuerung per Taster, welcher per Schlüssel freigegeben werden muss, ist jederzeit möglich.

Im Folgenden werden relevante Aspekte der Verschattung im Monitoringzeitraum beschrieben.

#### **Funktionalität Verschattung**

Im Monitoringzeitraum gab es vereinzelt Probleme bei der uneingeschränkten Funktionalität der Verschattung im Automatikmodus. In den meisten Fällen arbeiteten die Sonnenschutzsysteme einwandfrei wie Abbildung 7.1-1 zeigt. Dargestellt ist eine Situation an einem sonnigen Septembermittag. Aufgrund der steil stehenden Sonne ist eine horizontale Lamellenstellung ausreichend, damit keine direkte Strahlung ins Gebäude gelangt. So ist eine maximale Sichtverbindung nach Außen gewährleistet.



*Abbildung 7.1-1: Verschattungssituation der Aula-Südfassade an einem sonnigen Septembermittag*

An einem bedeckten Novembermorgen wurde hingegen die in Abbildung 7.1-2 dargestellte Situation angetroffen. Die globale Solarstrahlung war kleiner als der für die Aktivierung notwendige Schwellwert, sodass keine Verschattung heruntergefahren sein dürfte. Die rot hinterlegten Behänge weisen eine Fehlfunktion auf. Der im EG aktivierte Raffstore ohne rote Einfärbung ist manuell heruntergefahren worden. Aus der Messdatenerfassung geht hervor, dass die Behänge auch nachts heruntergefahren waren. Es wurden mehrere Protokolle zum Hochfahren ignoriert. Die Behänge waren für ca. 2 Tage nicht ansprechbar. Anschließend haben die Systeme wieder einwandfrei funktioniert. Eine Systematik, welche Behänge betroffen waren und zu welcher Zeit die Fehlfunktion auftrat, konnte nicht gefunden werden. Es wurde versucht, über modifizierte Regelbefehle oder über den Austausch von Komponenten (z. B. Gateways) die Ursache dieses Phänomens festzustellen. Bis zum Ende des Monitoringzeitraums zum 31.12.2018 konnte noch kein Nachweis über die uneingeschränkte Funktionalität der Verschattung geführt werden. Die Mängelbeseitigung läuft im Jahr 2019 weiter.

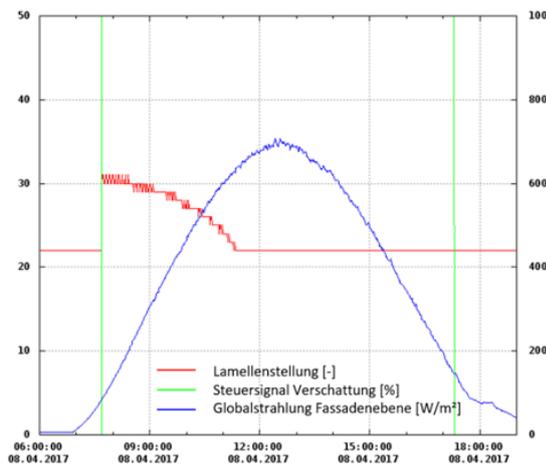


*Abbildung 7.1-2: Verschattungssituation einer Südfassade an einem bedecktem Novembermorgen*

### Regelgüte Lamellensteuerung

Für die Lamellennachführung ist in der GLT in Abhängigkeit von Sonnenstand, Geometrie des Raffstores (Lamellenabstand, -breite) und Orientierung der Fassade eine Funktion zum Nachfahren des Lamellenwinkels hinterlegt. Die Messdaten für einen sonnigen Tag sind in Abbildung 7.1-3 dargestellt. Vor der Optimierung wurde bei der Aktivierung der Verschattung gegen 07:30 Uhr am 08.04.2017 mit einem steilen Lamellenwinkel (rote Linie) begonnen. Der Winkel wird in Stufen abgesenkt, bis er mittags in die horizontale Endstellung (Abbildung: Lamellenstellung=22) gesteuert wird. Dabei ist aber kein stetiges Absenken, sondern ein dauerndes Nachjustieren zu erkennen, was auf zu optimierende Regelparameter hindeutet. In der Optimierungsphase sind die Parameter der Lamellenregelung angepasst worden, sodass unnötige Steuerbewegungen vermieden werden (rechtes Bild), was Bauteile und Bus-Systeme schont. Am Nachmittag ist aus geometrischen Gründen kein Anstieg des Lamellenwinkels mehr notwendig.

Lamellenstellung vor der Optimierung



Lamellenstellung nach der Optimierung

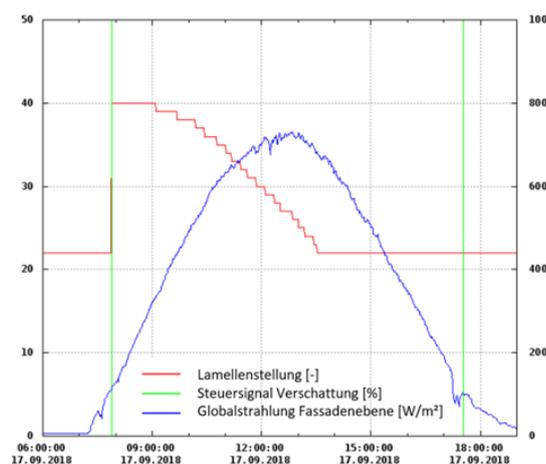


Abbildung 7.1-3: Lamellensteuerung der Verschattung an exemplarischen Tagen vor und nach der Optimierung

### Sommer-/Wintermodus

Grundsätzlich besteht die Möglichkeit, die Verschattungsanlage im Automatikmodus für verschiedene Randbedingungen anders zu parametrieren (Nutzungs-/Nichtnutzungszeit, Heiz- und Kühlbetrieb). Derzeit wird am Gymnasium in der Kühlperiode nicht zwischen Nutzungs- und Nichtnutzungszeit unterschieden. Das heißt, auch am Wochenende und in den Ferien wird bei einem Helligkeitsschwellwert auf die Fassade die Verschattung aktiviert und im Cut-Off-Winkel nachgeführt. Eine mögliche Optimierung wäre hier, tagsüber mit maximal gestelltem Lamellenwinkel zu arbeiten. Eine größtmögliche Sichtverbindung nach außen oder auch eine Tageslichtnutzung wäre in der Nichtnutzungszeit nicht relevant. Die Einflüsse auf den Solarertrag sind aber eher gering, sodass entschieden wurde, diese Möglichkeit nicht umzusetzen. Des Weiteren ist zu berücksichtigen, dass sich auch in der Nichtnutzungszeit immer wieder Personen im Gebäude aufhalten. Zum einen sind dies Handwerker und Hausmeister, die die Ferien dazu nutzen, ohne Beeinträchtigung des Schulablaufs notwendige Reparaturen durchzuführen und zum anderen Lehrer. Wichtig ist, dass eine

manuelle Übersteuerung grundsätzlich immer möglich ist, wenn man dazu berechtigt ist (Schlüsselspernung).

Auf den Winterbetrieb übertragen, würde das bedeuten, dass die Aktivierung der Verschattung zur Maximierung der solaren Gewinne gesperrt wird. Das heißt, dass im Automatikmodus bei ausreichend starker Strahlung und nennenswertem Heizwärmebedarf die Verschattung im Winter nicht herunterfahren sollte. Dazu muss das Gewerk HLS Informationen über den Heizwärmebedarf eines ganzen Gebäudes oder von Gebäudezonen an das Gewerk ELT übergeben, um die Verschattung zu sperren. Am Gymnasium ist hier mit dem Öffnungsgrad des FBH-Ventils gearbeitet worden. Bis zum Ende der Monitoringzeit konnte diese Funktionalität nicht zuverlässig nachgewiesen werden. Auch hier ist die Umsetzung für das Betriebsjahr 2019 vorgesehen.

## 7.2 Beleuchtung und visuelle Behaglichkeit

Die LED-Beleuchtung in den Klassenräumen wird manuell per Schalter aktiviert und dimmt auf den Zielwert von 500 lux. Dabei kann die fensterseitige Leuchtenreihe getrennt von den beiden raumtieferen Reihen geschaltet werden. Mittels Präsenzmelder wird die Beleuchtung mit einer Nachlaufzeit von 10 Minuten wieder ausgeschaltet.

Die folgenden beiden Diagramme stellen die gemessenen Helligkeiten eines in 12 Sektoren eingeteilten Klassenraums dar. Vor der Optimierung (Abbildung 7.2-1) sind unter Kunstlicht Helligkeiten über 800 lux gemessen worden. Die Beleuchtung dimmte nicht bzw. schaltete sich nicht aus. Nach der Optimierung schaltet sich die Fensterseite der Beleuchtung bei ausreichender Tageslichtversorgung aus, die hohen Helligkeiten sind tageslichtabhängig. In der Raumtiefe ist das Licht an und dimmt auf den Zielwert von 500 lux (siehe Abbildung 7.2-2).

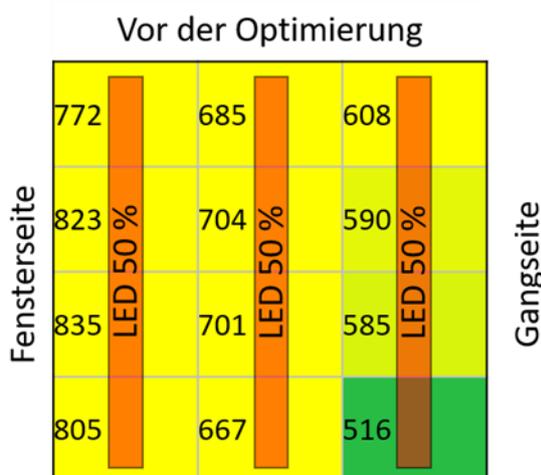


Abbildung 7.2-1: Sektorbezogene Helligkeitswerte [lux] auf Tischhöhe bei geringem Tageslichtangebot vor der Optimierung

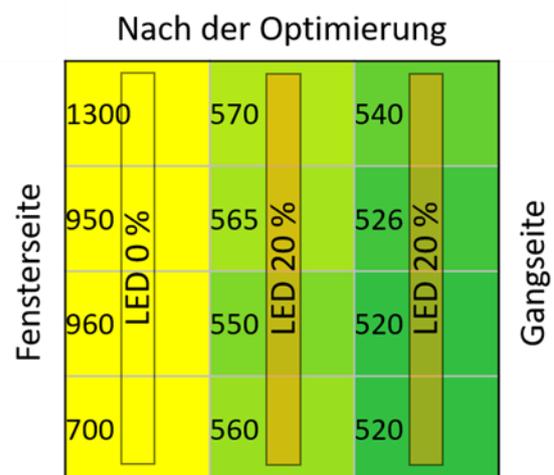


Abbildung 7.2-2: Sektorbezogene Helligkeitswerte [lux] auf Tischhöhe bei mäßigem Tageslichtangebot nach der Optimierung

### 7.3 Wärme-/Kälteverteilung

Beim Transport der Wärme vom Erzeuger zu den Übergabesystemen (FBH, Lufterhitzer, Frischwasserstationen) entstehen Wärmeverluste. Um diese soweit wie möglich zu minimieren, sind in der Planungsphase projektspezifische Anforderungen z. B. für Rohrdämmungen im energetischen Pflichtenheft definiert worden, die zu großen Teilen über die gesetzlichen Bestimmungen der EnEV hinausgehen. Im Rahmen der energetischen Bilanzierung liegen die gemessenen Wärmeverluste im Bereich von 10 % der Energieerzeugung (siehe Abbildung 4.2-1). Des Weiteren kommt es im Bereich der Wärmeverteilung immer wieder zu ineffizienten Betriebszuständen, indem z. B. Heizungswasser ungenutzt umgewälzt wird, was neben Energieverlusten auch zu einem unnötigen Pumpenstromverbrauch führt. Ebenso ist am Gymnasium zu beachten, dass neben der Wärme im Sommer auch Kälte gebraucht wird. Hier ist eine gleichzeitige Nutzung von Wärme und Kälte in nahen Gebäudezonen ebenso zu vermeiden wie eine Mischung von beiden Temperaturniveaus. Im Folgenden werden relevante Optimierungsergebnisse dargestellt.

#### Rohrdämmung

Die Minimierung von Wärmeverlusten ist grundsätzlich bei rationeller Energieanwendung zu beachten. Ganz besonders trifft das für ein Pilotprojekt mit Vorbildcharakter wie das Gymnasium Diedorf zu. Im Technikraum fanden sich im Bereich von Einbauten (Flansche, Pumpen, Ventile) der Heizkreisverteiler etliche Lücken in der Rohrdämmung (siehe Abbildung 7.3-1). Im Jahre 2018 wurden die erforderlichen Dämmungen nachgerüstet.

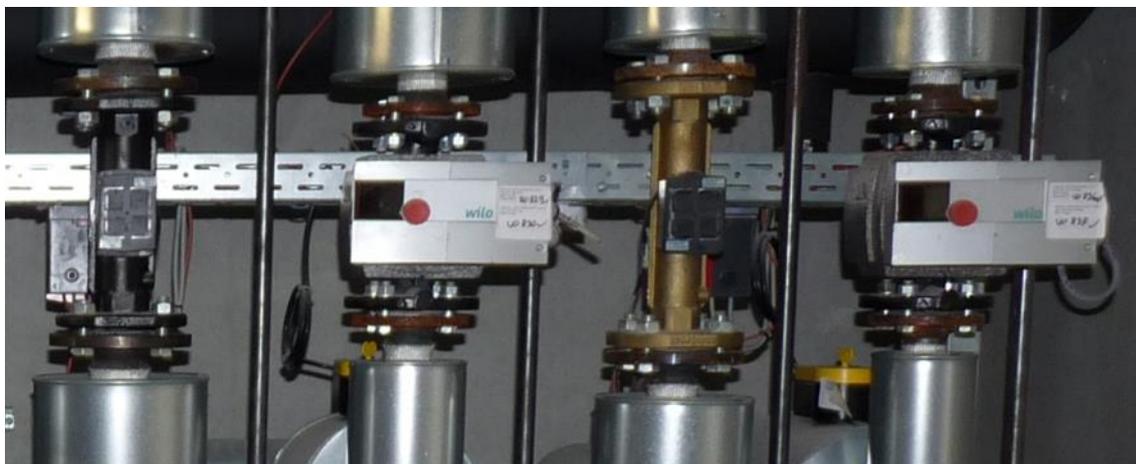


Abbildung 7.3-1: Lückenhafte Rohrdämmung am Fußbodenverteiler im Jahr 2017

#### Umschaltventil

Die Beheizung der Räume im Winter erfolgt ebenso wie die Temperierung im Sommer über dieselben im Estrich verlegten Fußbodenrohre. Somit muss im System eine hydraulische Trennung zwischen Warm- und Kaltwasser erfolgen. Auf der Verbrauchsseite kann der Fußbodenverteilerbalken sowohl mit Warm- als auch mit Kaltwasser durchströmt werden. Dazu kommen herkömmliche Drei-Wege-Ventile zu Einsatz, die das entsprechende Temperaturniveau in den Verteiler einkoppeln. Im Rahmen des Monitorings konnte gezeigt werden, dass diese Ventile eine nicht unerhebliche Undichtheit aufwiesen. In Abbildung 7.3-2 (linkes Bild) ist in einem grau hinterlegten Ruhezustand sowohl ein

Leckagestrom von im Mittel 70 l/h (blaue Linie) als auch Fluidtemperaturen um 50 °C im Kältekreis (rote Linie) zu erkennen. Im entsprechenden Datenblatt des 3-Wege-Ventils ist eine zulässige Leckagerate von 0,05 % des  $k_{vs}$ -Wertes beschrieben, was insgesamt einem Volumenstrom von 80 l/h entspricht. Der Wert stimmt damit ziemlich genau mit dem gemessenen Volumenstrom überein. Eine Abschätzung der hierdurch verursachten jährlichen Wärmeeinträge ist z. B. von Druck- und Temperaturdifferenzen im System abhängig und lässt sich mit minimaler Messtechnik nicht abschätzen. Im in Abbildung 7.3-2 dargestellten Zeitraum lässt sich eine Wärmeeintragsleistung von ca. 3,7 kW abschätzen. Hier liegt also keine mangelhafte Komponente vor, sondern es ist in der Planungsphase ein für den Anwendungsfall ungeeignetes Produkt gewählt worden. Im Rahmen der Optimierungsphase sind in den entsprechenden Rohrleitungen sowohl im Vor- als auch im Rücklauf zusätzlich motorisch betriebene dichtschießende Drosselklappen nachgerüstet worden. Die Leckagerate beträgt hier laut Datenblatt nur 0,0001 % des  $k_{vs}$ -Wertes, was einem ungefähren Volumenstrom von 0,8 l/h entspricht. Der Erfolg der Optimierungsmaßnahme lässt sich auch messtechnisch dokumentieren (siehe Abbildung 7.3-2, rechtes Bild). Es ist weder ein Leckagestrom detektiert worden, noch finden sich ungewöhnlich hohe Temperaturen im Kühlkreislauf. Vor- und Rücklauf liegen in der Stillstandzeit im Bereich der Temperatur des Technikraums bei ca. 25 °C.

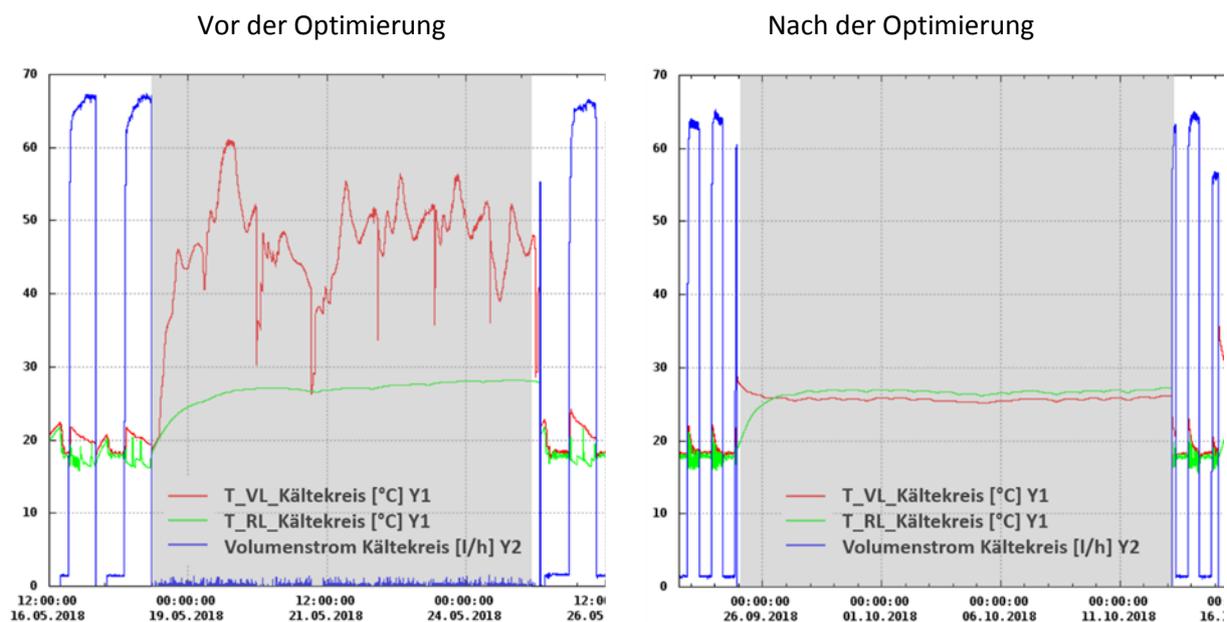


Abbildung 7.3-2: Undichtes Umschaltventil zwischen Warm- und Kaltwasserkreis

Eine hydraulische Trennung von Warm- und Kaltwasser ist ebenfalls zwischen den beiden Pufferspeichern im Sommerbetrieb notwendig. Ein Speicher sorgt weiterhin für die Brauchwarmwasserversorgung während der andere Pufferspeicher für die Kälteversorgung gebraucht wird. Die Volumenströme der vier Verbindungsstücke konnten aus Kostengründen nicht mit Volumenstrommessern ausgerüstet werden. Auch war eine messtechnische Abschätzung der Leckageraten über die Speichertemperaturen nicht möglich, weil keine ausreichend langen Zeiträume ohne Ein- und Ausgangsvolumenströme vorlagen. Laut Datenblatt liegt die zulässige Leckagerate  $< 0,0001$  % des  $K_{vs}$ -Wertes (bei 1,5 bar). Somit wird davon ausgegangen, dass die

Komponenten dicht schließen und es zu keiner nennenswerten direkten Vermischung zwischen den beiden Speichern über die Drosselklappen kommt (insbesondere, wenn man davon ausgeht, dass geringe Druckdifferenzen vorliegen).

Für zukünftige Bauvorhaben ist in jedem Fall darauf zu achten, dass die Anzahl der Kontaktpunkte zwischen Warm- und Kaltwasser minimiert werden (z. B. maximal zwei statt vier Verbindungsleitungen zwischen kaltem und warmem Speicher). Die Ausführung muss mit dichtschießenden Klappen erfolgen. Normale Regel- oder Beimischventile weisen eine zu hohe Leckagerate auf.

## **Pumpen**

In der zentralen Technik sind für die Umwälzung von Warm- und Kaltwasser insgesamt 23 Hocheffizienzpumpen vom Typ Wilo Stratos verbaut. Die Kältemaschine und die Pelletkessel besitzen als Erzeuger je eine eigene Pumpe, die die Pufferspeicher belädt. Je eine Pumpe im Wärme- und Kältenetz ist für die Förderung vom Speicher zu den Verteilern zuständig. Dies sind in der Regel auch die Pumpen mit den längsten Laufzeiten. Die Fußbodenheizungen werden vom Verteiler abgehend aufgrund der langen Leitungswege und der hohen Widerstände mit eigenen Pumpen betrieben. Jeder Lufterhitzer und die Wärmerückgewinnung verfügen über eine eigene Pumpe. Bei den Luftkühlern hingegen muss die Hauptbetriebspumpe die Versorgung sicherstellen. Im Rahmen des Monitorings ist der Stromverbrauch der wesentlichen Pumpen separat aufgezeichnet worden. In Bezug auf die Laufzeit und damit auf den Stromverbrauch untergeordnete Pumpen sind als Summe erfasst (z. B. Summe Pumpen aller Lufterhitzer). Insgesamt verbrauchen alle Umwälzpumpen ca. 4 % des Gesamtstromverbrauchs des Gymnasiums (2018: 12,4 MWh/a). Davon entfallen auf die reine Umwälzung von Warmwasser (BWW, Lufterhitzer, Kessel) 27 %, 33 % auf Kaltwasser (Kältekreis) und 40 % auf die kombinierte Umwälzung von Wärme- und Kältefluid in den Fußbodenkreisen.

Alle verbauten Pumpen wurden als Nassläufer ausgeführt. Diese Pumpenbauart gilt als besonders effizient. Hier wird der komplette Rotor inklusive Magnetspule vom Medium umströmt. Dadurch wird anfallende Abwärme sofort abgeführt und die Pumpen werden stets auf einem effizienten Temperaturniveau gehalten. Als Nachteil stellt sich dies jedoch im Kaltwasserkreislauf dar, da eine solche Wärmezufuhr der ohnehin schon geringen Temperaturspreizung entgegenwirkt. Aus Effizienzgründen ist es wichtig, den Volumenstrom im Rahmen der Auslegung zu minimieren, weil die elektrische Antriebsleistung einer Umwälzpumpe in der dritten Potenz mit dem Volumen- bzw. Massenstrom ansteigt.

Folgend werden für die Pumpen einige Analyse- und Optimierungsbeispiele im Rahmen des Monitorings beschrieben.

### Betriebscharakteristik

Bei modernen Pumpen haben sich zwei Regelstrategien durchgesetzt. Neben der Konstantdruckregelung ( $\Delta p$ -c) kommt vor allem die Proportionaldruckregelung ( $\Delta p$ -v) zur Anwendung. Im Teillastbetrieb wird der Förderdruck um bis zu 50 % gegenüber der Volllast gesenkt. Ein entsprechendes Kennfeld für den Antriebsstromverbrauch in Abhängigkeit des geförderten Volumenstroms für eine verwendete Wilo-Stratos 50/1-9 ist in Abbildung 7.3-3 dargestellt. In dieses

Diagramm sind ebenfalls die Messdaten der Pumpe im Betrieb integriert. Es zeigt sich, dass der Antriebsstromverbrauch nur auf der Max-Kennlinie verläuft. Im Teillastfall wird der geförderte Volumenstrom der Pumpen reduziert. Normalerweise bleibt bei differenzdruckgeregelten Pumpen der Förderdruck konstant ( $\Delta p-c$ ) oder er reduziert sich in Abhängigkeit der Anlagenkennlinie ( $\Delta p-v$ ). In jedem Fall wird die Drehzahl dem neuen Volumenstrom angepasst und reduziert. Damit einhergehend sinkt die Leistungsaufnahme der Pumpe. Dieses Verhalten ist bei der ausgewerteten Pumpe nicht zu erkennen. Hier wird zwar der Volumenstrom im Teillastbetrieb reduziert, die Antriebsleistung der Pumpe verläuft bis ca. 7 m<sup>3</sup>/h auf konstant hohem Niveau und fällt dann erst linear ab. Potentiale zur Stromeinsparung werden nicht genutzt. Es liegt nahe, dass die Pumpen nicht oder nur mangelhaft parametrisiert und eingestellt wurden. Dieses Verhalten konnte bei fast allen untersuchten Umwälzpumpen festgestellt werden.

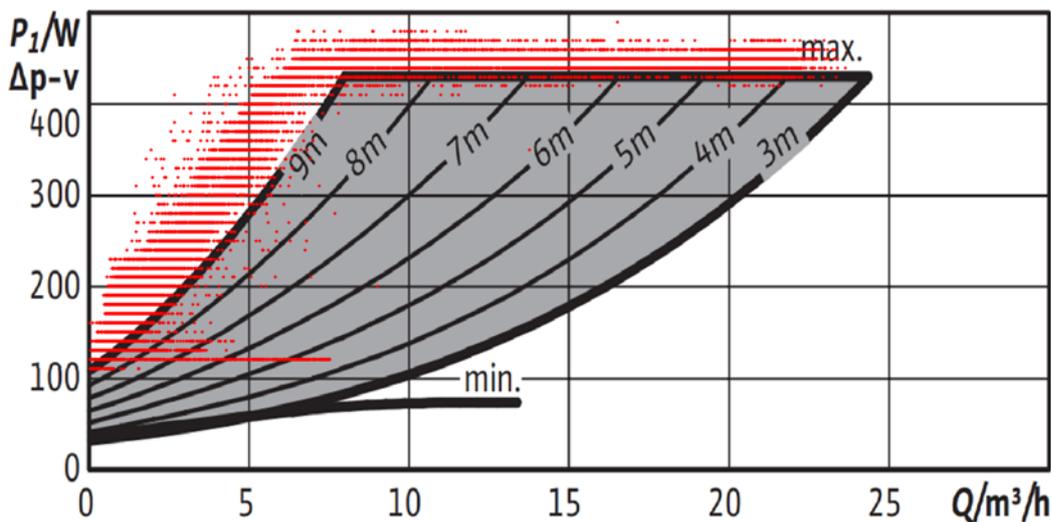


Abbildung 7.3-3: Elektrische Leistungsaufnahme einer Umwälzpumpe des Fußbodenverteilers in Abhängigkeit des geförderten Volumenstroms

#### Kesselkreispumpe

Bei der energetischen Bilanzierung ist aufgefallen, dass die Laufzeiten der zwei Kesselkreispumpen unterschiedlich sind, obwohl beide Kessel immer parallel angefordert werden. Abbildung 7.3-4 zeigt einen effizienten und korrekten Betrieb der Kesselpumpe 1 (durchgezogene Linie) im Vergleich zu einem ineffizienten Betrieb der Kesselpumpe 2 (gestrichelte Linie). Die Kessel sind in dem gezeigten Zeitraum zweimal aktiv. Bei Pumpe 1 stimmt der Betriebszeitraum mit dem der Kessel überein. Wenn keine Heizleistung erzeugt wird, ist die Pumpe aus und fördert keinen Volumenstrom. Pumpe 2 hingegen läuft nahezu die ganze Zeit durch, was unnötig elektrische Antriebsleistung verbraucht. Hinzu kommt, dass die Pumpe Heißwasser aus dem Pufferspeicher in den Wärmeübertrager des deaktivierten Pelletkessels fördert und so Wärme an die Umgebung abgibt. Die Energieverluste werden über WMZ detektiert und sind im Diagramm als thermische Verluste gekennzeichnet. In der Optimierungsphase wird die Steuerung von Pumpe 2 geändert.

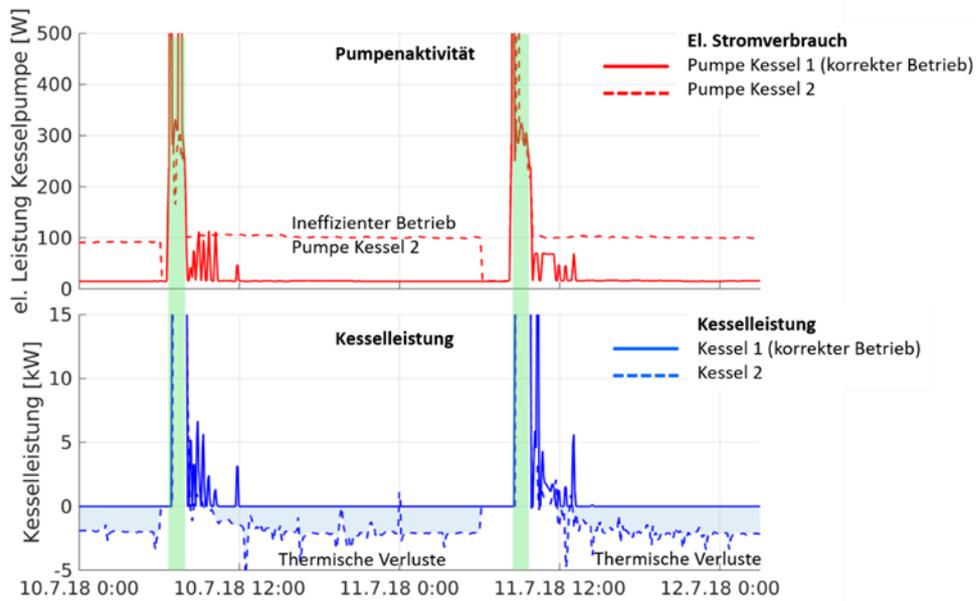


Abbildung 7.3-4: Betriebscharakteristik Kesselkreispumpen im Vergleich

### Thermische Speicher

Die thermischen Speicher haben in erster Linie die Aufgabe, ein Takten der Erzeuger zu minimieren sowie auftretende Lastspitzen oder Teillastzustände abzudecken. Am Gymnasium stehen dafür zwei Pufferspeicher mit jeweils einem Volumen von 7,5 m<sup>3</sup> zur Verfügung. Im Speicher sind jeweils über die Höhe fünf Temperatursensoren gleichmäßig angeordnet, um die Schichtung abzubilden. Abbildung 7.3-5 zeigt exemplarisch die Betriebsweise in der Heizperiode.

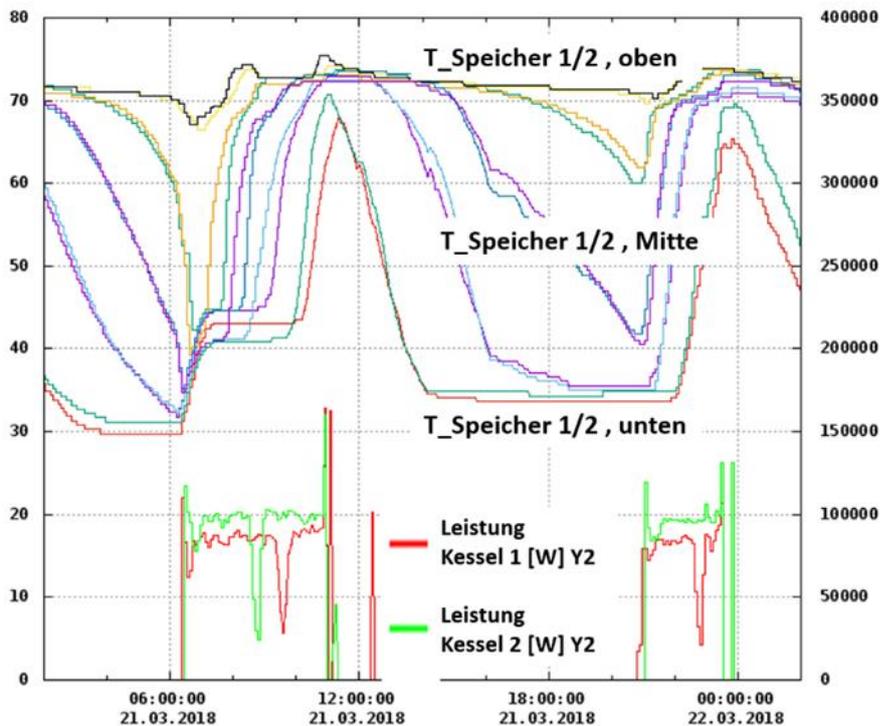


Abbildung 7.3-5: Speichertemperaturen und Kesselleistung in der Heizperiode

Die beiden Pelletkessel werden parallel bei einer Unterschreitung der oberen Speichertemperatur von 70 °C angefordert. Die Deaktivierung erfolgt bei unteren Speichertemperaturen oberhalb von 60 °C. Die Puffer sind mit mindestens 15 cm Dämmstärke (WLG 035) isoliert, um die Speicherverluste zu minimieren. Rechnerisch beträgt die Verlustleistung pro Speicher bei einer Temperaturdifferenz von 45 °C zwischen Speichermedium und Umgebung 150 W.

## 7.4 Versorgung Einzelräume

### Stromverbrauch

Über 3-Phasenzähler in den Klassenraumunterverteilungen der Referenzräume war es möglich, die Verbräuche für Beleuchtung, Präsentationsmedien und Steckdosen separat zu bilanzieren. Die Energieverbräuche für Aktoren der außenliegenden Raffstores wurden separat für eine Verschattungseinheit gemessen und anteilig auf die Referenzräume verteilt. Die Ergebnisse sind exemplarisch in Abbildung 7.4-1 für den Raum N119 im Jahr 2017 dargestellt.

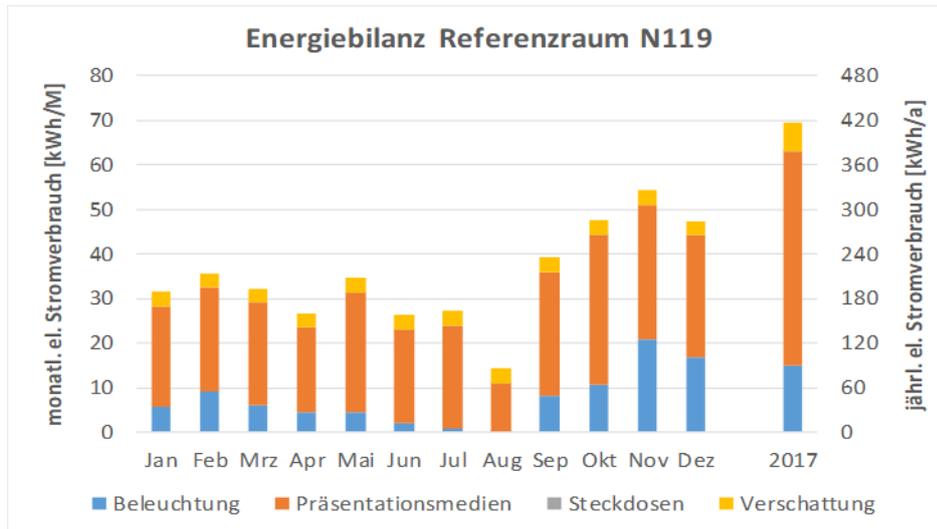


Abbildung 7.4-1: Monatliche elektrische Energiebilanz für den Referenzraum N119 im Jahr 2017

Demnach wird der überwiegende Teil (69 %) für die Präsentationsmedien (Tower-PC, Bildschirm, Whiteboard) verbraucht. Davon entfallen nur ca. 46 % auf die Nutzungszeit der Schule. Über die Hälfte des Stromverbrauchs fällt in den Nachstunden, den Wochenenden und in der Ferienzeit an, was im Diagramm auch am Stromverbrauch im Ferienmonat August abzuleiten ist. 21 % des Jahresstromverbrauchs in den Klassenräumen wird für die LED-Beleuchtung verbraucht, die Nutzung ist deutlich jahreszeitenabhängig. Für die Beleuchtung lässt sich ein spezifischer Jahresmittelwert von 1,5 kWh/m<sup>2</sup>a bezogen auf eine Klassenraumnettofläche von 60,8 m<sup>2</sup> errechnen. Die Steckdosen in den Klassenräumen werden so gut wie nicht verwendet. Die Aufwendungen für die Verschattung liegen bei ca. 9 % des Gesamtstromverbrauchs des Klassenraums.

Größtes Optimierungspotential bietet der Stromverbrauch der Präsentationsmedien in der Nichtnutzungszeit der Schule. Dazu sind für einen begrenzten Zeitraum mobile Strommessgeräte in einem Klassenraum nachgerüstet worden, um den Verbrauch der einzelnen Geräte direkt analysieren und spezifizieren zu können. Dabei kann man folgende Kernaussagen für die Nichtnutzungszeit (Nacht, Wochenende, Feiertage, Ferien) machen, welche auch auf alle anderen Räume mit entsprechender Ausstattung übertragen werden können:

- Die Medien sind zu keinem Zeitpunkt völlig stromlos ( $P_{el} < 10 \text{ W}$ ).
- In den Ferien (Pfingsten, Sommer, Herbst) sind die Medien mindestens alle im Sparmodus und verbrauchen zwischen 10 W und 22 W.
- In der Nacht während der Schultage und an den Wochenenden laufen PC/Bildschirm zu 10 – 40 % der Zeit. Der Whiteboard ist im Sparmodus ( $22 \text{ W} < P_{el} < 139 \text{ W}$ ).

Im Schulbetrieb dominiert der Stromverbrauch des Whiteboards mit el. Leistungen je nach Modell und Betriebseinstellungen von 200 bis 300 W.

Es wurde beschlossen, die auf den Rechnern bereits installierten Patches, die für eine komplette Abschaltung der Systeme sorgen sollen, zu aktualisieren. Für die Umsetzung sind viele Abteilungen insbesondere beim Nutzer und beim Bauherrn einzubeziehen, was den Optimierungsvorgang

deutlich erschwert und verzögert hat, sodass bis zum Ende der Monitoringperiode keine signifikante Stromeinsparung im Nichtnutzungsbetrieb nachgewiesen werden konnte.

### **Einzelraumregelung**

Die Raumlufttemperatur der meisten Räume lässt sich individuell über eine Einzelraumregelung einstellen. Der dafür notwendige Raumtemperaturfühler ist in der Mediensäule direkt neben der Tür positioniert. Über motorisch betriebene Ventile des Fußbodenverteilers lässt sich der Durchfluss durch die Fußbodenrohre steuern und damit die Übergabeleistung variieren. Die Regelalgorithmen unterscheiden dabei zwischen Heiz- und Kühlbetrieb.

Die Raumsolltemperatur beträgt im Winter standardmäßig 21 °C. Eine Absenkung auf einen Sollwert von 19°C erfolgt nur am Wochenende. Dazu wird die Heizung am Freitag um 9:00 gesperrt und mit einer Regelrampe beginnend am Sonntagmittag wieder auf 21 °C hochgefahren. In der Praxis ist allerdings zu erkennen, dass aufgrund der guten Dämmeigenschaften der Gebäudehülle die Solltemperatur im Absenkbetrieb selten erreicht wird. In den Ferien wird ebenfalls ein Absenkbetrieb gefahren, allerdings wird dann die Aufheizphase zum Schulbeginn verlängert, damit es nicht zu Komforteinbußen am ersten Schultag kommt. Eine Nachtabsenkung in einer Schulwoche ist aufgrund der Passivhauseigenschaften des Gebäudes energetisch nicht sinnvoll.

Im Kühlbetrieb wird auf eine Raumluft Solltemperatur von 21 °C geregelt. Die Freigabe erfolgt nur nachts zwischen 21:00 und 8:00, um Kälte mit gutem Wirkungsgrad erzeugen zu können. Die Speicherung erfolgt im dafür angepassten Estrich. Tagsüber werden allein über die Speicherkapazität des Estrichs Wärmelasten aufgenommen. Dies setzt ein niedriges Temperaturniveau am Morgen voraus. Aus Abbildung 7.4-2 ist zu entnehmen, dass die Solltemperatur von 21 °C im Sommer nicht erreicht wird. Die Kühlung arbeitet unter diesen Randbedingungen an der Kapazitätsgrenze. Am Wochenende wird ein reduzierter Betrieb gefahren, indem freitags die Kühlleistung verringert und auf einen Raumsollwert von 22,5 °C angehoben wird. Sonntags wird der Sollwert linear gleitend wieder auf 21 °C abgesenkt. Auch in den Ferien (insbesondere in den Sommerferien) bleibt die Kühlung aktiviert und regelt auf einen Sollwert von 24 °C. Im Herbstmodus kann die eingebrachte Kältemenge reduziert werden. Hier reicht eine Raumluft Solltemperatur von 24 °C aus.

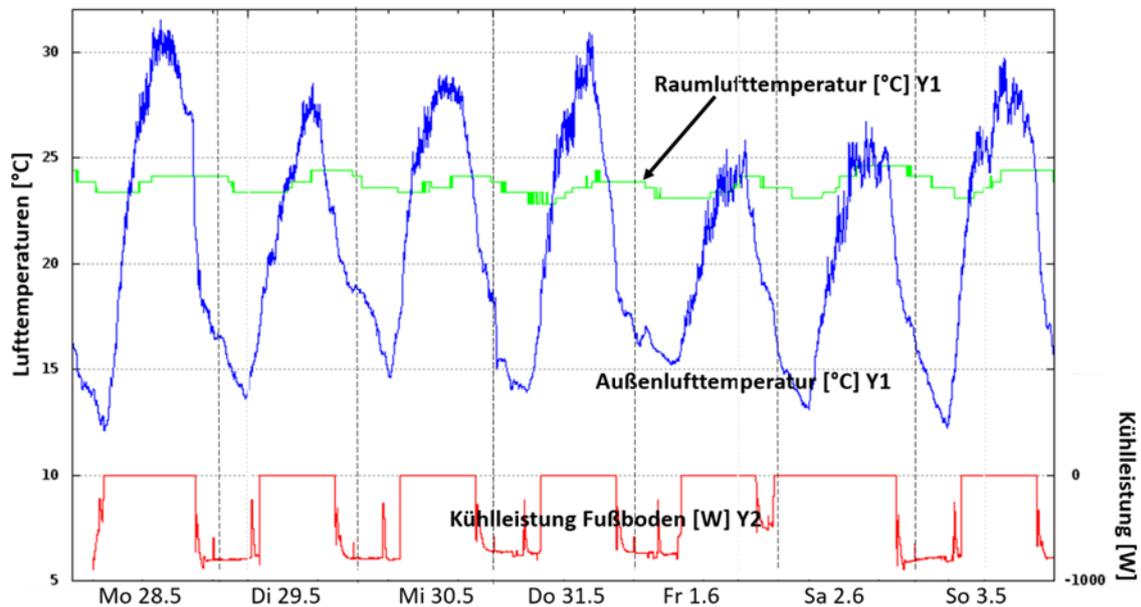


Abbildung 7.4-2: Typisches Wochenprofil der Einzelraumregelung Klassenraum im Sommer

Die wesentlichen Optimierungen der Einzelraumregelung bezogen sich auf den Kühlbetrieb. Auf der einen Seite sollte eine hohe Effizienz der Kälteerzeugung bei kalten Nachttemperaturen sichergestellt werden und zum anderen tagsüber ein angenehmer thermischer Raumkomfort herrschen. Dazu musste sowohl die Freigabezeit der Fußbodenkühlung als auch die Raumluftsollltemperatur mehrmals angepasst werden, um einen guten Kompromiss zu finden. Es wurde auch untersucht, ob die Kühlung in den Sommerferien in den beiden Klassenhäusern komplett abgeschaltet werden kann. Es zeigte sich schnell, dass die Raumtemperaturen dadurch zu warm wurden (im Extremfall bis 30 °C) und es zu Beschwerden von Personen, die sich auch im August im Gebäude aufhielten (v. a. Handwerker), kam.

## Zuluft

Die mechanische Zu- und Abluftanlage im Untergeschoss des Aulagebäudes stellt Frischluft zur Verfügung. Die Einbringung in die Räume erfolgt nach dem Quellluftprinzip. Die Zuluft wird mit geringen Luftgeschwindigkeiten und Untertemperatur in Bodennähe eingeblasen und im Deckenbereich wieder abgesaugt. Es bilden sich ein Kaltluftsee und eine vertikale Auftriebsströmung im Bereich von Wärmequellen im Raum (z. B. an Personen). Die Regelung erfolgt bedarfsgerecht über CO<sub>2</sub>-Raumluftfühler, die in der Mediensäule neben der Tür platziert sind. Ab einer CO<sub>2</sub>-Konzentration von 1000 ppm werden die Volumenstromregler geöffnet. Bei 1200 ppm sind sie zu 100 % offen. Die Zulufttemperatur ist im Normalfall auf 19 °C eingestellt und damit 2K unter Raumluftsollltemperatur. In der Monitoringphase ist die Zulufttemperatur dahingehend optimiert worden, dass sie in Abhängigkeit der Gebäudeteiltemperatur angepasst wird. Zum einen wird bei Unterschreitung der tatsächlichen Raumtemperatur vom Sollwert (d. h. einer Unterversorgung des Raumes mit Wärme), die Zulufttemperatur leicht bis auf 21 °C angehoben. So kann unterstützend über die Zuluft geheizt werden. Zum anderen wird bei steigenden Raumlufttemperaturen die Zulufttemperatur linear gleitend bis max. 21 °C angehoben. Dabei übernimmt die Lüftung einen kleinen Betrag zur

Gebäudekühlung und es werden zu kalte Einblastemperaturen vermieden, die schnell als unangenehme kalte Zugluft wahrgenommen werden können. Ebenso lässt sich die Zulufttemperatur für jeden der vier Gebäudeteile separat regeln, sodass ein sich gegebenenfalls einstellendes unterschiedliches Temperaturniveau Berücksichtigung findet. Ein exemplarischer Messdatenplot für den Sommer ist in Abbildung 7.1-17.4-3 dargestellt. Bei Gebäudemitteltemperaturen über 23,5 °C wird die Zuluftsolltemperatur erhöht. Die tatsächlichen Raumtemperaturen folgen dem Sollwert.

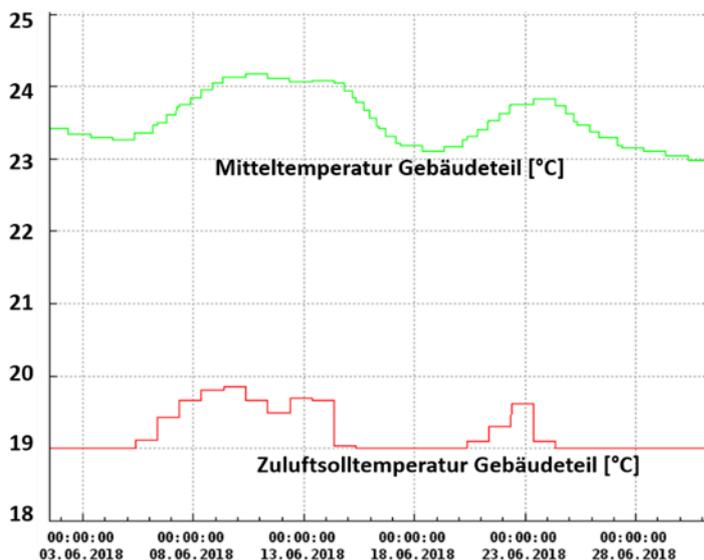


Abbildung 7.4-3: Zuluftsolltemperatur Klassenräume

## 7.5 Brauchwarmwasser

Das Brauchwarmwasser (BWW) wird mittels Frischwasserstationen (FWS) bereitgestellt. Dabei fungiert die FWS als Wärmeübertrager. Über einen Primärvolumenstrom vom Heißwasserpuffer wird Kaltwasser bedarfsgerecht und über kurze Leitungslängen an der Zapfstelle zur Verfügung gestellt. Im Bereich der Sporthallen sind 3 FWS zur BWW-Versorgung der Duschen und eine FWS im Bereich der Küche installiert. Ein typisches Tagesprofil der Sporthalle ist in Abbildung 7.5-1 dargestellt. Nach Inbetriebnahme stellte sich im Rahmen des Monitorings folgendes Bild dar (linke Graphik): Ganztägig (24/7) wurde ein konstanter Primärvolumenstrom (rote Linie) von 5000 l/h gefahren. Der konstante Volumenstrom ist bedingt durch die maximal möglichen gleichzeitigen Duschkvorgänge. Die VL-Temperatur (grüne Linie) bewegte sich dabei nachts um 60 °C, von 06:00 Uhr bis 12:00 Uhr bei nahezu konstant 70 °C und anschließend linear abfallend wieder bei 60 °C. Die Peaks der Zapftemperatur stellen Duschkvorgänge dar. Folge dieser Fahrweise waren hohe Wärmeverluste im Primärkreis sowie sehr lange Pumpenlaufzeiten. Im Rahmen der Optimierung ist der Primärkreis nur noch zu den Nutzungszeiten der Sporthalle zwischen 06:00 Uhr und 23:00 Uhr aktiv. Auch die VL-Temperaturen wurden optimiert. Aus Gründen des Legionellenschutzes wird das System weiterhin einmal täglich um 06:00 Uhr auf 70 °C hochgeheizt, anschließend bis 50 °C ausgekühlt (rechte Graphik). Dieses Temperaturniveau ist für Duschkvorgänge ausreichend. Die beschriebene Betriebsstrategie, in der Nichtnutzungszeit die FWS herunterzufahren, wird auch am Wochenende und in den Ferien umgesetzt.

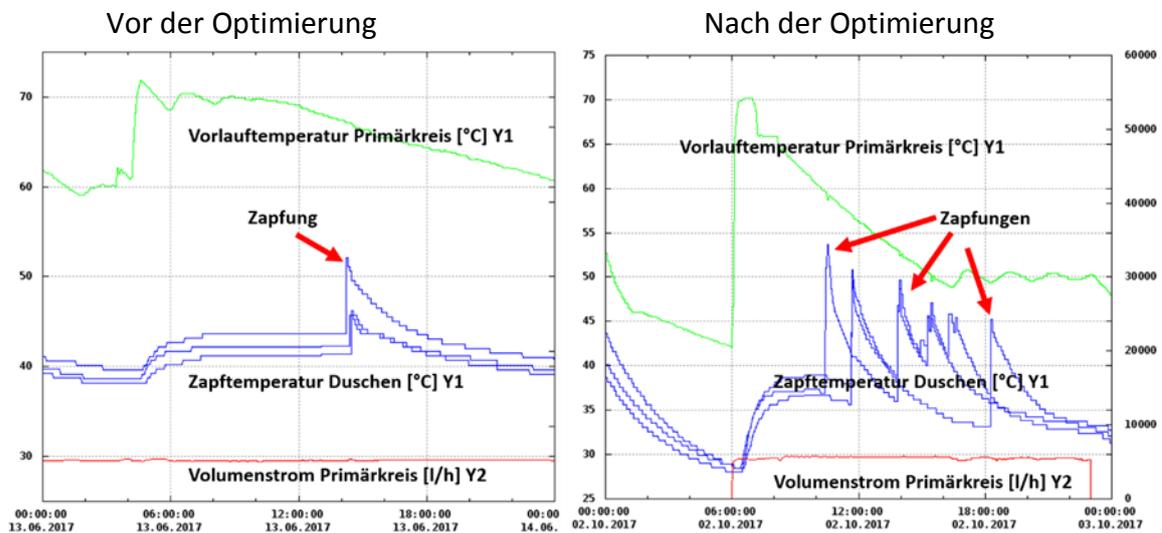


Abbildung 7.5-1: Tagesprofil Frischwasserstation Sporthalle

Ähnliche Optimierungsmaßnahmen wurden auch an der FWS der Küche umgesetzt. Dort konnte aufgrund der kürzeren Nutzungszeit die Sperrzeiten des Primärstroms ausgeweitet werden. Im Monitoring hat sich gezeigt, dass in der Küchenanlage sehr wenig Wasser gezapft wird (maximal eine kurze Zapfung am Tag), womit sich die Planungsannahmen nicht eingestellt haben. Die meisten Küchengeräte erzeugen ihr Brauchwarmwasser selber elektrisch (z. B. Spülmaschine). Somit ist eine BWW-Versorgung über die zentrale Wärmeherzeugung mittels FWS in der Küche nicht zielführend und mit zu hohen Verlusten behaftet.

## 7.6 Dachrinnenheizung

Dachrinnenheizungen sollen im Bedarfsfall das Zufrieren der Entwässerungssysteme auf dem Dach verhindern. Ebenso soll ein Abrutschen des Schnees von den PV-Modulen auf die Aufenthaltsflächen der Schule minimiert werden. Die Umsetzung eines solchen Systems an einem Vorzeigegymnasium in Bezug auf Energieeffizienz und energetischem Standard wurde kontrovers diskutiert. Letztlich hat sich das Planungsteam mit dem Bauherrn für die Umsetzung dieses Systems entschieden. Die Regelung soll in Abhängigkeit der Feuchtigkeit sowie der Außenlufttemperatur erfolgen. Laut Datenblatt des Herstellers ist die Leistung des Heizbandes selbstlimitierend.

Im Winter 2016/2017 wurde die Dachrinnenheizung der Sporthalle im Rahmen des Monitoring evaluiert (siehe Abbildung 7.6-1). Es konnte gezeigt werden, dass bei Temperaturen unterhalb des Gefrierpunktes die Heizung überwiegend angeschaltet war. Die Abhängigkeit von Niederschlagsereignissen konnte nicht nachgewiesen werden. Nach Angabe der ausführenden Firma war der Feuchtefühler defekt und falsch platziert. Im Winter 2016/2017 betrug der Stromverbrauch alleine für die Sporthalle 2220 kWh (bei einer Maximalleistung von 4,3 kW). Da die Steuersignale für alle Dachrinnenheizungen der Schule identisch sind, lässt sich über die am gesamten Standort installierten Heizleistungen der Gesamtstromverbrauch von 7800 kWh/a abschätzen. Dies entspricht ca. 2 % des Stromverbrauchs des gesamten Gymnasiums. Eine Selbstminimierung in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur konnte nicht nachgewiesen werden.

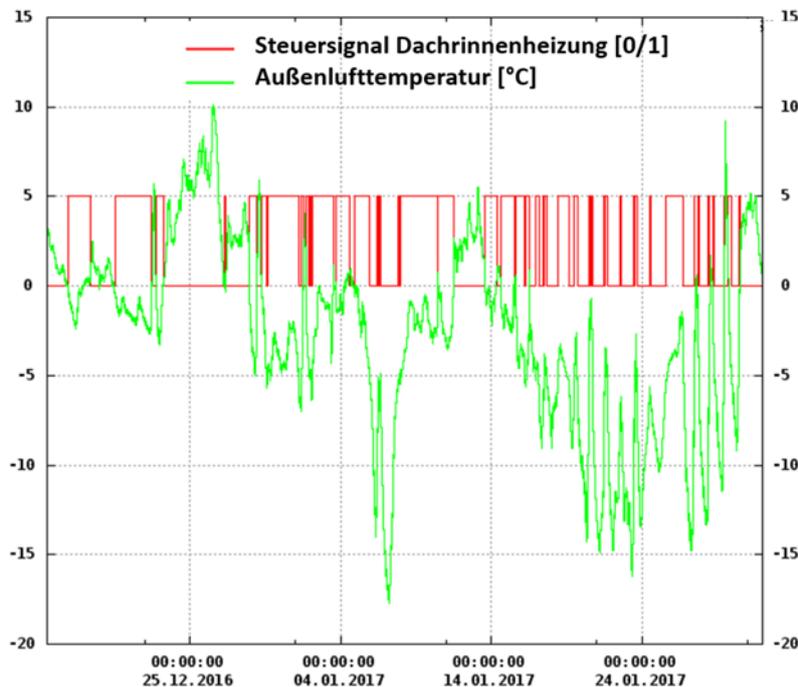


Abbildung 7.6-1: Funktionalität Dachrinnenheizung Dezember 2016 bis Januar 2017

Im Winter 2017/2018 konnte für die Dachrinnenheizung der Sporthalle keine Aktivität bzw. kein Stromverbrauch detektiert werden.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass in Bezug auf Energieeffizienz eine Dachrinnenheizung sehr kritisch zu sehen ist. Auch ist es den ausführenden Firmen im Monitoringzeitraum nicht gelungen, die Funktionalität des Systems annähernd sicher zu stellen. Des Weiteren gibt es immer wieder Probleme mit Verstopfung des Rinnenablaufs durch Blätter, weil die Heizbänder den Querschnitt verengen. Nach den bisherigen negativen Betriebserfahrungen sollten bei zukünftigen Vorhaben verstärkt auf andere Systeme gesetzt werden.

## 7.7 Elektrische Energie

Durch den Einsatz von immer mehr elektronischen Systemen, Netzteilen und Frequenzumrichter-Anlagen, treten immer mehr Problemen mit Netzverunreinigungen auf. Dies äußert sich z. B. durch transiente Überspannungen, Oberwellen oder kurzzeitige Stromspitzen. Letztgenannte entstehen hauptsächlich durch Schaltereignisse im Netz, wie z. B. das Ansprechen von Sicherungen und Leistungsschaltern, welches zu hohen Spannungsspitzen führen kann. Ursache für die transienten Überspannungen sind im Allgemeinen Schaltvorgänge im Netz.

Seit Inbetriebnahme des Gymnasiums Diedorf treten immer wieder Störungen durch oben genannte Ereignisse auf. Die in moderner Installationstechnik eingesetzten intelligenten Bus-Systeme wie KNX und DALI reagieren empfindlich auf Netzverunreinigungen. Dadurch kann es zu einem teilweisen Ausfall der Beleuchtung oder zu einer nicht funktionierenden Verschattungsanlage führen, wobei die

hier aufgeführten Störungen immer an den für die Beleuchtung oder der Verschattungssteuerung zuständigen Schaltaktoren auftreten. Ursache dafür sind Softwareabstürze in den Aktoren.

Zwar werden diese nicht zerstört, müssen aber nach solchen Ereignissen neu konfiguriert und programmiert werden. Unter Umständen kann dies zu Beeinträchtigungen des Unterrichts führen.

Weiter ist anzumerken, dass sich das Gebäude bei der Stromversorgung am Endpunkt der Mittelspannungsversorgung des Energielieferanten im Ortsnetz einer Marktgemeinde befindet. Hier ist besonders mit Spannungseinbrüchen, z. B. bei Gewittern und anderen Wetterereignissen zu rechnen, da hier vermehrt Schalttätigkeiten im Netz auftreten. Aus diesem Grund hat man sich entschieden, eine Langzeit Netzanalyse durchzuführen, die diese Ereignisse protokolliert, um auch gegenüber dem Netzbetreiber argumentieren zu können.

Der Netzbetreiber ist grundsätzlich verpflichtet, seinen Kunden einen sauberen, den Grenzen der EN-Normung 50160 entsprechenden, Strom zu liefern.

In den nachfolgenden Abbildungen sind Auszüge aus der Langzeitmessung vom 31.01.2018 - 05.03.2018 dargestellt. Die komplette Messung befindet sich z. Z. noch in der Auswertung.

Es zeigt sich aber hier bereits, dass im Gymnasium Diedorf erhebliche Netzprobleme seitens des Stromlieferanten bestehen.

Company Department	EMPTY EN50160-IEC61000-2-2LV-def		EMPTY EMPTY				
<b>Customer:</b>			<b>Phone:</b>				
<b>Address:</b>			<b>Reason:</b>				
<b>Contact:</b>			<b>Softwareversion:</b>	3.1.8.1 64bit			
<b>Spannungssystem:</b>	3 Leiter-Netz		<b>Messintervall:</b>	60 s			
<b>Nennspannung LE / LL (Primär):</b>	11547.01 V / 20000.00 V		<b>Rundsteuerfrequenz:</b>	75 Hz			
<b>Frequenz:</b>	50 Hz		<b>Messung Beginn:</b>	31.01.2018 12:19:00			
<b>Messung Ende:</b>			<b>Messung Ende:</b>	05.03.2018 17:03:00			
<b>Messdauer:</b>	33d 4h 44m 0s		<b>Anzahl Messintervalle:</b>	47804			
<b>Messgerätetyp:</b>	PQ-Box 200		<b>Seriennummer Gerät:</b>	1241-114			
<b>Firmware:</b>	3.013		<b>DSP-Version:</b>	4.021			
<b>Norm Details</b>							
	<b>Maximalwert</b>	<b>99.50%</b>	<b>0.50%</b>	<b>Minimalwert</b>	<b>Grenzwert Max</b>	<b>Grenzwert Min</b>	<b>Anzahl Intervalle</b>
<b>Frequenz:</b>	79,58 Hz	50,07 Hz	49,93 Hz	29,44 Hz	50,50 Hz	49,50 Hz	286.824
	<b>Maximalwert</b>	<b>99.00%</b>	<b>1.00%</b>	<b>Minimalwert</b>	<b>Grenzwert Max</b>	<b>Grenzwert Min</b>	<b>Anzahl Intervalle</b>
<b>Spannungsänderungen L12:</b>	20.476,89 V	20.369,62 V	19.916,59 V	2,72 V	22.000,00 V	18.000,00 V	47.804
<b>Spannungsänderungen L23:</b>	20.509,58 V	20.411,71 V	19.952,13 V	0,52 V	22.000,00 V	18.000,00 V	47.804
<b>Spannungsänderungen L31:</b>	20.553,52 V	20.436,44 V	19.986,32 V	2,23 V	22.000,00 V	18.000,00 V	47.804
	<b>Maximalwert</b>	<b>95.00%</b>			<b>Grenzwert Max</b>		<b>Anzahl Intervalle</b>
<b>Spannungsunsymmetrie:</b>	0,52	0,26			2,00		47.739
<b>Flicker L12:</b>	122,96	0,23			1,00		397
<b>Flicker L23:</b>	122,95	0,22			1,00		397
<b>Flicker L31:</b>	122,95	0,21			1,00		397
	<b>Maximalwert</b>	<b>99,00%</b>			<b>Grenzwert</b>		<b>Anzahl</b>
<b>Rundsteuer L12:</b>	0,00	0,00			9,00		0
<b>Rundsteuer L23:</b>	0,00	0,00			9,00		0
<b>Rundsteuer L31:</b>	0,00	0,00			9,00		0
<b>Spannungssystem M5</b>					<b>Spannungstoleranzband nicht erfüllt</b>		
<b>Messwerte LL</b>	<b>Grenzwert 99.00% (+10%;-10%)</b>		<b>Grenzwert 100.00% (+10%;-15%)</b>				
	<b>In Toleranz</b>	<b>Außer Toleranz</b>	<b>In Toleranz</b>	<b>Außer Toleranz</b>			
<b>Spannungsänderungen L12:</b>	99,86%	0,14%	99,86%	0,14%			
<b>Spannungsänderungen L23:</b>	99,86%	0,14%	99,86%	0,14%			
<b>Spannungsänderungen L31:</b>	99,86%	0,14%	99,86%	0,14%			

Abbildung 7.7-1: Spannungsmessungen

Aus der Abbildung ist ersichtlich, dass die Spannungstoleranz auf der Mittelspannungsseite nicht erfüllt ist.

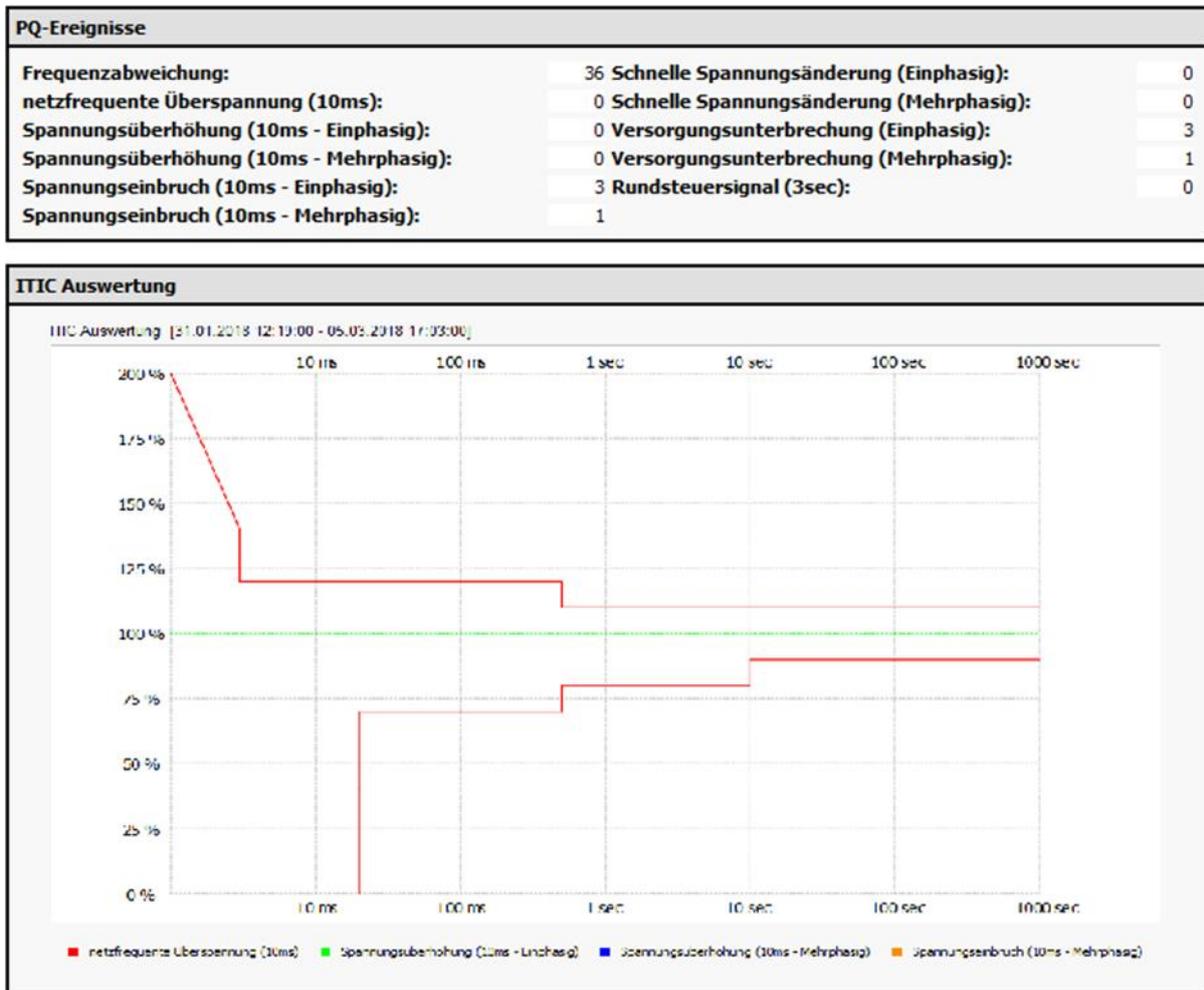


Abbildung 7.7-2: Auswertung Netzfrequenz

Die Abbildung zeigt, dass auch die Netzfrequenz nicht die EN-Norm erfüllt.

### Fazit

Die Netzprobleme im Gymnasium Diedorf sind nur durch einen Netzfilter oder durch Lieferung eines sich in den Grenzen der Norm befindlichen Stromproduktes in den Griff zu bekommen. Es empfiehlt sich auch, sich bei zukünftigen Bauvorhaben im Energie Plus Standard, wo sehr viele Bussysteme zum Einsatz kommen, USV-Systeme und Netzfilter einzuplanen. Dies kann jedoch zu deutlichen Zusatzkosten führen.

## 8 Gebäudeleittechnik

Das Gebäudeautomationssystem übernimmt das Überwachen, Steuern, Regeln und Aufzeichnen von Anlagen der technischen Gebäudeausrüstung. Als übergreifendes Bus-System für die komplette Elektroanlage kam der KNX-Bus zum Einsatz. Untergeordnete Anlagen wie Beleuchtung kommunizieren über den DALI-, Verschattungsanlagen über den SMI-Bus. Eine Kommunikation mit dem übergeordneten KNX-Bus erfolgt über Gateways. Für das Gewerk HLS wurde das Daten-Protokoll BACnet (Building Automation and Control Network) verwendet. Somit ist eine Kommunikation zwischen den einzelnen Informationsschwerpunkten, Einzelraumreglern oder Schnittstellen zu Drittgewerken mittels EDV-Netzwerk möglich. Der Datenaustausch mit dem Gewerk Elektrotechnik erfolgt über Profibus DP.

### 8.1 Jahreszeitenmodi

Das gesamte Schulgebäude wird über globale Betriebsmodi gesteuert, die einzelne Systeme freigeben oder sperren. Die Algorithmen sind zentral in der Gebäudeleittechnik (GLT) hinterlegt. Für die Steuerung der Versorgungsfunktionen Heizen/Kühlen sind vier Modi definiert worden, die in Abhängigkeit von trägen Bauteiltemperaturfühlern aktiviert werden. Insgesamt sind dazu 24 Sensoren über alle Gebäudeteile verteilt verbaut worden. Im Wintermodus sind beide Pufferspeicher warm, die Wärmeversorgung über Fußbodenheizung (FBH) und Luftherhitzer aktiv und die Kühlung gesperrt. Der Frühlingsmodus ist in zwei Phasen eingeteilt. In Phase eins werden die beiden Speicher bei gesperrten Kesseln ausgekühlt. Eine Beheizung des Gebäudes über FBH und Zuluftvorwärmung ist weiterhin aus der Kapazität der Puffer möglich. Bei Unterschreitung einer Grenztemperatur von 35 °C in den Speichern werden beide hydraulisch voneinander getrennt und sowohl Kälte- als auch Wärmeerzeuger freigeschaltet. Der eine Speicher fungiert nun als Wärmespeicher und sichert weiterhin die BWV-Versorgung des Gebäudes sowie die Zuluftvorkonditionierung, während der andere Speicher auf Temperaturen unter 20 °C heruntergekühlt wird, um als Puffer für den Kühlfall zu Verfügung zu stehen. Aus energetischer Sicht ist dabei wichtig, dass der Speicher nicht mit der Kältemaschine heruntergekühlt wird, sondern durch Wärmeentnahme zur Nutzung im Gebäude. Der Umschaltvorgang kann je nach Wärmeverbrauch einen Zeitraum von einigen Stunden bis zu mehreren Tagen umfassen, wenn der Umschaltvorgang z. B. auf einen Freitagnachmittag fällt. Im Sommermodus ist eine Vorheizung der Räume nur noch mit Hilfe der Luftherhitzer möglich. Die Fußbodenheizung wird ersetzt durch die Fußbodenkühlung. Dabei wird der Umschaltzeitpunkt für das gesamte Gymnasium festgelegt. Ein gleichzeitiges Kühlen von einem Gebäudeteil, während in einer anderen Zone noch über den Fußboden geheizt wird, ist nicht möglich. In der Praxis hat sich im Monitoringzeitraum gezeigt, dass insbesondere der Umschaltzeitpunkt im Frühjahr sehr abrupt ausfällt, weil Heizbetrieb und Kühlbetrieb unmittelbar aufeinander folgen. Grund dafür ist auch die wärmekapazitätsarme Konstruktion des Holzbaus. Es gibt also keine Phase, indem nicht irgendein Raum im Gymnasium geheizt oder gekühlt wird. Der Herbstmodus unterscheidet sich vom Sommermodus nur durch die Kühlgrenztemperatur der Räume, die von 21 °C auf 24 °C angehoben wird. Diese Temperatur ist im Herbst bei reduzierter Solarstrahlung ausreichend, um die Wärmelasten aus den Räumen abzuführen. Für die Umschaltung in den Wintermodus und damit eine hydraulische Verbindung beider Speicher muss der kalte Speicher wieder erwärmt werden. Eine Aufheizung über Wärmeeintrag ohne Aktivierung der Kessel hat sich in der Praxis als zu langwierig herausgestellt. Ohne Zuhilfenahme eines Wärmeerzeugers ist eine Erwärmung des Kältespeichers maximal nur bis zur durchschnittlichen Raumlufttemperatur am Umschaltzeitpunkt möglich, sodass die Temperaturdifferenz zur Speicherfluidtemperatur weniger als 10 K beträgt. Somit ist der Umschaltvorgang im Herbst energetisch bei weitem nicht so relevant wie im Frühjahr, wenn Temperaturdifferenzen von ca. 40 K abgekühlt werden müssen.

Für alle Betriebsarten wird die Brauchwarmwasserversorgung als Vorrangschaltung sichergestellt. Die Kühlung der Wechselrichterräume im UG ist in den Modi Frühjahr bis Herbst über Umluftgeräte möglich. In Abbildung 8.1-1 ist der Jahreszyklus der Betriebsmodi für das Jahr 2018 dargestellt.

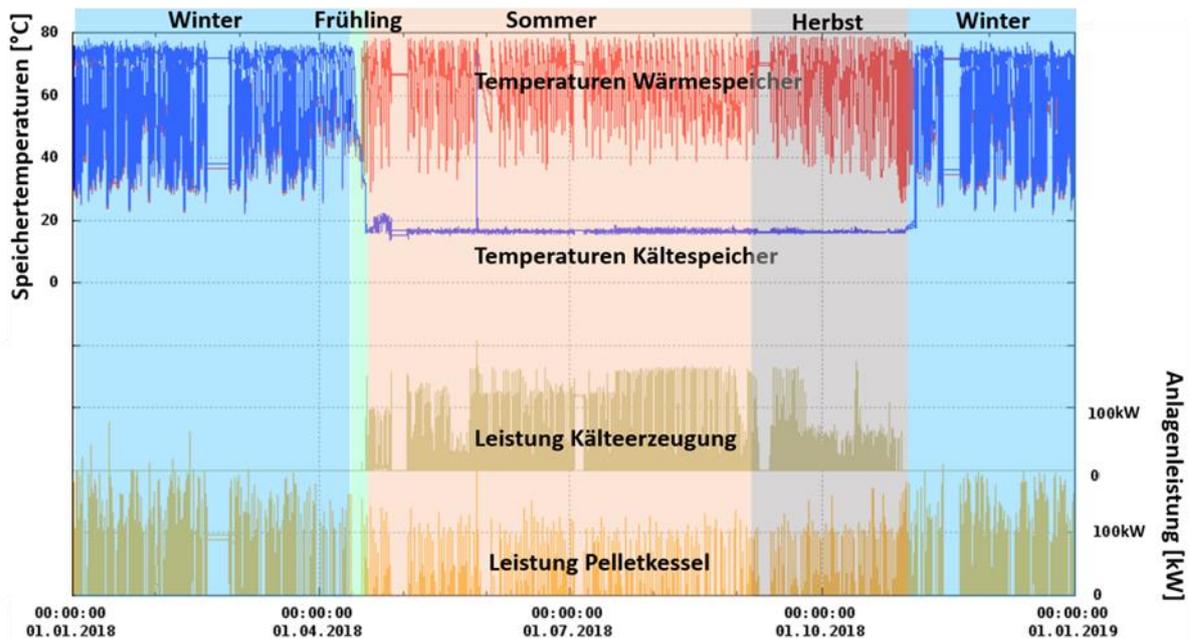


Abbildung 8.1-1: Übergeordnete Betriebsmodi im Jahr 2018

Im Winter liegt das Temperaturniveau beider Speicher je nach Schicht zwischen 30 °C und 70 °C, die beiden Pelletkessel liefern eine Gesamtwärmeleistung bis 200 kW. Die Trennung der beiden Speicher erfolgte 2018 zwischen dem 12. und 17. April. Ab dem 18. April beginnt die Kühlperiode mit der Erzeugung von Kälte. Der Sommermodus ist gekennzeichnet durch zwei unterschiedliche Temperaturniveaus in den Speichern sowie einen sporadisch taktenden Pelletkessel, der weiterhin die BWW-Versorgung der Duschen sicherstellt. Die Kälteerzeugung wird in diesem Zeitraum bedarfsgerecht angefordert. Die Umschaltung von Sommer- zu Herbstmodus erfolgte 2018 am 06. September. Der Herbstmodus unterscheidet sich in der Abbildung wenig vom Sommer, die erzeugte Kälteleistung wird etwas geringer. Am 30. Oktober wird die Kälteerzeugung mit Beginn des Wintermodus gesperrt, die Speicher wieder hydraulisch verbunden und auf hohem Temperaturniveau für Heizzwecke weiterverwendet.

Im Bild ist auch zu erkennen, dass im Jahr 2018 nicht unerhebliche Datenlücken im Bereich des Gewerks HLS auftraten (z. B. 10 d im Februar, 7 d Ende April, 7 d im November), die nur teilweise über redundante Sensoren ergänzt werden konnten.

Die größte Herausforderung während der Monitoringphase war, den Umschaltzeitpunkt zwischen den einzelnen Modi zu definieren. Hier sind die Grenzwerte mehrfach verschoben worden, um eine gute Balance zwischen Energieeffizienz und Raumluftkomfort zu erhalten. Dabei ist eine enge Abstimmung zwischen Planern, Bauherrn und Nutzern zwingend erforderlich. Erschwerend kam hinzu, dass das Temperaturniveau in der Schule von den internen Gewinnen der Schüler und Lehrer dominiert wird. Dies führt dazu, dass zum Ende der Sommerferien im September die Schule keine Überhitzung aufweist. Allerdings muss der Kühlmodus weiterhin aufrechterhalten werden, weil zum

Schulstart wieder hohe Kühllasten abgeführt werden müssen. Eine ähnliche Problematik tritt bei späten Osterferien und einem zu frühen Umschalten auf den Kühlmodus auf. Zum Ende der Osterferien musste immer geheizt werden.

## 8.2 Betriebsüberwachung

Am Gymnasium finden die Nutzer weit überdurchschnittliche Raumluftkomfortbedingungen vor. Die deutsche Durchschnittsschule hat weder eine Kühlung zur sommerlichen Temperierung noch eine Lüftungsanlage zur Regulierung der CO<sub>2</sub>-Konzentrationen. Um diesen Standard zu generieren, ist sowohl eine aufwändige Technik als auch eine betriebsoptimierte Steuerung über die GLT notwendig. Daher müssen die haustechnischen Anlagen in definierten Zyklen gewartet werden, um weiterhin einwandfrei zu funktionieren. Dies umfasst die einfache tägliche Sichtprüfung der Anlagenbauteile bis hin zur komplexen Inspektion von Systemen durch Fachpersonal wie z. B. dem Kompaktkaltwassersatz. Ebenso ist die volle Funktionalität der Versorgungssysteme regelmäßig an der GLT-Visualisierung zu kontrollieren. Das sind vor allen Dingen die Kälte- und Wärmeversorgung sowie die Lüftungs- und die Verschattungsanlage. Dazu steht dem Betreiber eine graphische Benutzeroberfläche zur Verfügung, über die alle wesentlichen Daten der Gewerke HLS und Elektro abrufbar sind. Dabei sind neben Momentanwerten auch Zeitreihen generierbar. Ebenso können Warnfunktionen programmiert werden.

Das Betreiben der Anlage erfordert damit nicht nur Know-how, sondern auch entsprechend Zeit, um die notwendigen Arbeiten zu erledigen. Damit sind die Aufgaben für den Betreiber anspruchsvoller als bei herkömmlichen Schulen und mit den bis dahin bekannten Aufgaben eines „Hausmeisters“ in keiner Weise zu vergleichen. Der Verantwortliche muss neben anlagentechnischen Grundkenntnissen auch detailliert über das Regelkonzept der Schule Bescheid wissen. Nur so kann die volle Funktionsfähigkeit geprüft werden. Von Vorteil wäre auch, wenn vor Ort eine erste Fehleranalyse gemacht werden könnte. All diese Aspekte müssen vom Betreiber berücksichtigt werden und in einer Aufgabenbeschreibung zusammengefasst werden. Hier hat es beim vorliegenden Projekt Defizite gegeben.

## 9 Innenraumlufthygiene

### 9.1 Rahmenbedingungen und Konzeption

„Gute“ Luft in Schulen ist eine wichtige Voraussetzung für gutes Lernen und Lehren. Die gesundheitliche Relevanz von Schadstoffen in der Luft hat in den letzten Jahren an Bedeutung gewonnen. Insbesondere Holzwerkstoffe sind unter den Bauprodukten nach wie vor die bedeutendsten Quellen für Formaldehyd in der Innenraumluft. Die Auswahl emissionsarmer Bauprodukte (z. B. geprüft durch „Blauer Engel“) sichert relativ niedrige Immissionskonzentrationen an flüchtigen organischen Verbindungen und Formaldehyd.

Ziel für das Schmuttertal-Gymnasium war die Bauproduktauswahl so zu gestalten, dass die Grenzwerte für TVOC und Formaldehyd mit Sicherheit unterschritten werden. Neben niedrigen Immissionskonzentrationen an flüchtigen und geruchsaktiven Stoffen sollte ein hinreichender Luftwechsel bei natürlicher wie mechanischer Belüftung (Qualität in Bezug auf CO<sub>2</sub>-Konzentration) sichergestellt werden.

Die Bewertung der TVOC, Einzel VOC und Formaldehydergebnisse erfolgte gemäß den Richtwerten vom „Ausschuss für Innenraumrichtwerte“ der Innenraumlufthygiene-Kommission des Umweltbundesamtes (IRK)<sup>1</sup>. Die Messungen mussten entsprechend den Anforderungen des BNB-Zertifizierungssystems nach DIN 16000 ff. durchgeführt werden. Zusätzlich wurde eine Bewertung des Ergebnisses nach dem Steckbrief 3.1.3 Innenraumlufthygiene des BNB-Zertifizierungssystems für das Schmuttertal-Gymnasium erstellt. Der Ausschuss für Innenraumrichtwerte bewertet Verunreinigungen der Innenraumluft und setzt bundeseinheitliche Richtwerte fest.

Insgesamt wurden im Monitoring zwei Messungen durchgeführt. Die erste Messung erfolgte direkt nach Schulfertigstellung im August 2015. Im Mai 2018 wurde die Messung nach drei Betriebsjahren in denselben Räumen wiederholt.



Abbildung 9.1-1: Raumluft-Kontrollmessung in Klassenzimmer

<sup>1</sup> Im Auftrag der Gesundheitsministerkonferenz wurde im Dezember 1993 eine „Ad-hoc-Arbeitsgruppe“ ins Leben gerufen, die Verunreinigungen der Innenraumluft quantitativ bewerten und bundeseinheitliche Richtwerte für die Innenraumluft festsetzen soll. Sie besteht aus Fachleuten der Innenraumlufthygienekommission (IRK) und Fachleuten der Arbeitsgruppe Innenraumluft des Umwelthygieneausschusses der Arbeitsgemeinschaft der Obersten Landesgesundheitsbehörden (AOLG), früher Arbeitsgemeinschaft der Leitenden Medizinalbeamten und -beamtinnen der Länder (AGLMB). Die Geschäftsstelle der Ad-hoc-Arbeitsgruppe wurde beim Umweltbundesamt angesiedelt. Gemäß Beschluss der AOLG vom 10. März 2015 wurde die Ad-hoc-Arbeitsgruppe in "Ausschuss für Innenraumrichtwerte" umbenannt.

## 9.2 Messergebnisse im Detail

### 9.2.1 Messung innerhalb von vier Wochen nach Fertigstellung

Mit Abschluss der Baumaßnahme wurden die Ziele durch eine Innenraummessung vor Inbetriebnahme überprüft. Im Rahmen der Messung wurden die Raumluftwerte bezüglich richt- und grenzwertrelevanter Substanzen überprüft. Am 20.08.2015 wurde diese erste Messung in Diedorf durch Herrn Weinisch vom Institut für Qualitätsmanagement und Umfeldhygiene (IQUH) durchgeführt. Die Labor-Analytik lieferte Dr. Wirkner.

Das Ergebnis zeigen die beiden nachfolgenden Abbildungen.

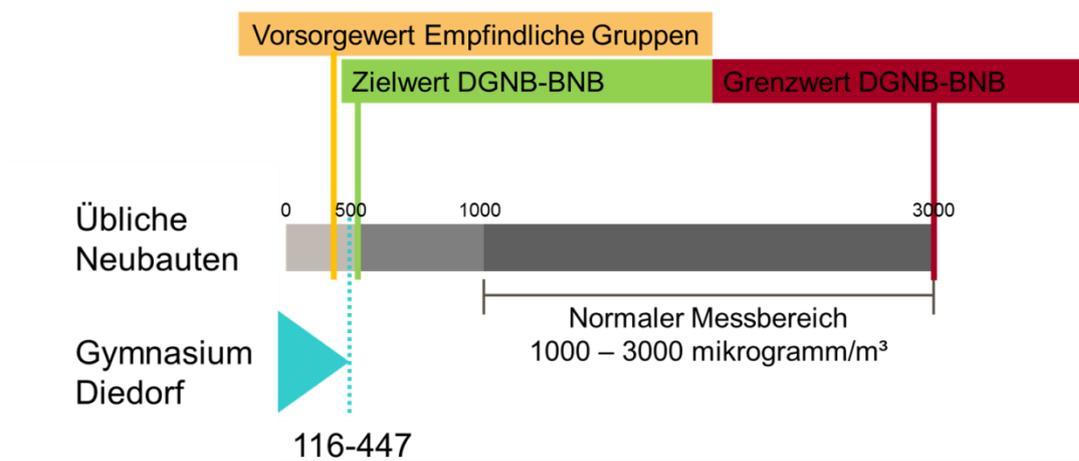


Abbildung 9.2-1: Ergebnis der TVOC-Messung in Diedorf

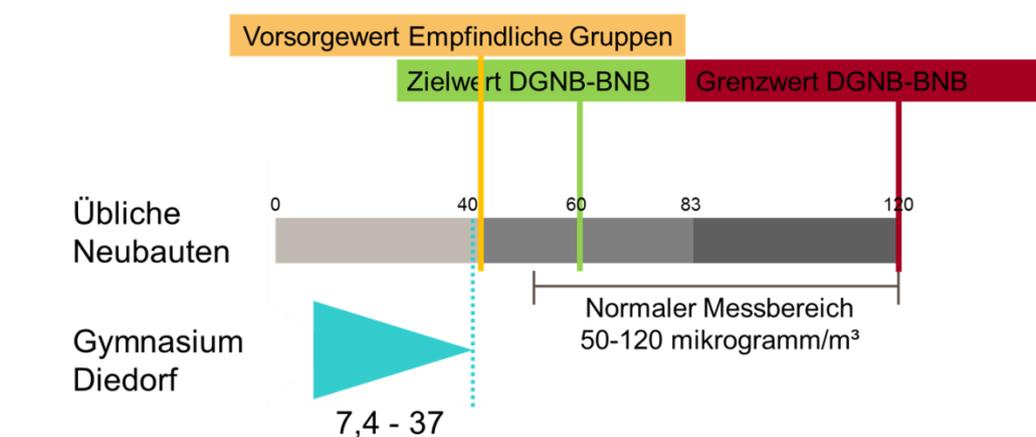


Abbildung 9.2-2: Ergebnis der Formaldehyd-Messung in Diedorf

Die Messergebnisse in allen untersuchten Schulräumen hatten ergeben, dass in den Räumen mit betriebenen raumlufttechnischen Anlagen (RLT) bei Bauübergabe keine Überschreitungen von Richt-

und Leitwerten des „Ausschuss für Innenraumrichtwerte“ der Innenraumlufthygiene-Kommission des Umweltbundesamtes (IRK) zu erwarten sind.

### 9.2.2 Wiederholung der Messung nach drei Betriebsjahren

Die Messung wurde erneut vom Institut für Qualitätsmanagement und Umfeldhygiene (IQUH) am 29.05.2018 in denselben 4 Messräumen des Schmuttertal-Gymnasiums durchgeführt.

Die Messraumvorbereitung wurde in Abstimmung mit dem Betreuungstechniker der MSR-Technik durchgeführt.

Raum	Lüftungsbedingungen	Verschlusszeit
Raum NE 0.2 KH 1, Physik III EG, Süd geschlossen	teilverschattet RLT Anlage durchgehend über Nacht an; Spülung der Räume, RLT Anlage weiterlaufend	8 h Verschlusszeit
Raum N 1.1.9 KH 1, 5. Klasse 1. OG, Nord	Worst case ohne Lüftung der Räume	>18 h Verschlusszeit
Raum N 2.03 KH 1, XX Klasse, 2. OG, Süd	unverschattet (ähnlich Raum W 2.09 in KH 2) RLT Anlage seit 08:00 Uhr an	8 h Verschlusszeit
Raum N 2.03 KH 1, XX Klasse, 2. OG, Süd	unverschattet (ähnlich Raum W 2.09 in KH 2) RLT Anlage seit 08:00 Uhr an Lüftung 13:45 – 14:00 Uhr.	1 h Verschlusszeit
Turnhalle	RLT Anlage seit 08:00 Uhr an	8 h Verschlusszeit

Abbildung 9.2-3: Übersicht der Messbedingungen

### 9.2.3 Ergebnis der Messungen

Das Gebäude ist als „sehr schadstoffarmes Gebäude“ gemäß DIN EN 15251 einzustufen. Erwartungsgemäß haben sich die Werte seit der Messung vom 20.08.2015 weiterhin verbessert. Mit der deutlichen Unterschreitung der BNB-Zielwerte für die Raumluftqualität wird die Höchstpunktzahl des Steckbriefs erreicht. Es liegen keine TVOC Leitwert- und VOC Richtwert 1 Überschreitungen vor.

Der nicht belüftete Raum N 1.19 liegt knapp über dem Best-Wert für TVOC und Formaldehyd. Dies bedeutet, dass auch bei Ausfall der Lüftungsanlage seitens des Gebäudes keine Belastungswerte auftreten.

	<b>NE02-Ph</b> RLT an 8h	<b>Turnhalle</b> RLT an 8h	<b>N 1.19</b> RLT aus >18h	<b>2.03</b> RLT an 8h	<b>2.03-1h</b> RLT an 1h
<b>Verbindung</b>	<b>µg/m<sup>3</sup></b>	<b>µg/m<sup>3</sup></b>	<b>µg/m<sup>3</sup></b>	<b>µg/m<sup>3</sup></b>	<b>µg/m<sup>3</sup></b>
TVOC	57,8	342,6	694,4	20,5	99
Formaldehyd	8,6	35	67	9,1	9,3
Summe bicyklische Terpene	1,1	21,1	131	<	<

Abbildung 9.2-4: Zusammenfassung der Messergebnisse

Der Gesamtbericht beinhaltet auch die gemessenen Einzelwerte und findet sich in der Anlage 2.

### 9.3 Fazit

Das Gebäude ist auch im korrekten Betriebszustand als „sehr schadstoffarmes Gebäude“ gemäß DIN EN 15251 einzustufen. Mit der deutlichen Unterschreitung der BNB-Zielwerte für die Raumluftqualität wird die Höchstpunktzahl des Steckbriefs erreicht.

Die Messergebnisse in allen untersuchten Schulräumen haben ergeben, dass in den Räumen auch nach dreijähriger Betriebsphase keine neuen Emissionsquellen aufgetreten und die bereits guten Werte weiter abgesunken sind. Auch bei Lüftungsausfall würden durch das Gebäude keinen Raumluftbelastungen verursacht werden.

Der Holzbau kann auch im Betrieb sehr gute TVOC- und Formaldehydwerte im Innenraum erreichen.

## 10 Akustische Qualität

Während der schulfreien Zeit wurden jeweils an zwei aufeinander folgenden Messtagen (03.11.2015 und 04.11.2015 sowie 29.03.2016 und 30.03.2016) bauakustische Güteprüfungen der Luft- und Trittschalldämmung, Schallpegelmessung von Wasserinstallationen sowie Messungen der Nachhallzeiten stichprobenartig in den Räumen des Gebäudes durchgeführt.

Die Prüfung der Luftschalldämmung zwischen Räumen erfolgte nach DIN EN ISO 16283-1.

Die Prüfung der Luftschalldämmung zwischen Fluren und Unterrichtsräumen erfolgte nach DIN EN ISO 16283-1 unter Berücksichtigung der DIN 4109-11. Die Ermittlung des Senderraumpegels erfolgte im Nahbereich.

Die Prüfung der Luftschalldämmung der Außenbauteile erfolgte nach DIN EN ISO 140-5. Die Beschallung der Fassade erfolgte von außen mit einem Lautsprecher unter einem Einfallswinkel von ca.  $\vartheta = 45^\circ$ . Die Prüfung erfolgte nach dem Bauteil-Lautsprecher-Verfahren.

Die Prüfung der Trittschalldämmung von Decken erfolgte nach DIN EN ISO 140-7; die Prüfung der Anlagen der Wasserinstallation gemäß DIN 4109-11 nach DIN EN ISO 10052 und die Messungen der Nachhallzeit wurden nach DIN EN ISO 3382 durchgeführt.

Die detaillierten Messergebnisse sowie die entsprechenden Anforderungen, Grundlagen und Bewertungen der Ergebnisse sind in ausführlichen Prüfberichten von Müller-BBM erläutert. An dieser Stelle werden lediglich Auszüge daraus dargestellt.

### 10.1 Prüfergebnisse

#### 10.1.1 Luftschalldämmung

Die Ergebnisse der Messungen der Luftschalldämmung sind in den nachfolgenden Tabellen zusammengefasst.

##### a) Geschosstrenndecken

Wie in der nachfolgenden Tabelle ersichtlich ist, erfüllen alle gemessenen Geschosstrenndecken die akustischen Anforderungen an den Luftschallschutz.

Tabelle 1: Messergebnisse und Bewertung der Luftschalldämmung der Geschosstrenndecken

Nr.	Prüfobjekt	Senderraum	Empfangsraum	Messergebnis	Bewertung nach o. g. Kriterium
1	Trenndecke	Unterrichtsraum N.2.01, Gebäude N, 2. OG	Unterrichtsraum N.1.01, Gebäude N, 1. OG	$R'_w = 62$ dB	erfüllt
2	Trenndecke	Unterrichtsraum N.1.02, Gebäude N, 1. OG	Unterrichtsraum N.E.02, Gebäude N, EG	$R'_w = 58$ dB	erfüllt
3	Trenndecke	Unterrichtsraum W.2.15, Gebäude W, 2. OG	Unterrichtsraum W.1.15, Gebäude W, 1. OG	$R'_w = 60$ dB	erfüllt
4	Trenndecke	Unterrichtsraum W.1.10, Gebäude W, 1. OG	Unterrichtsraum W.E.09, Gebäude W, EG	$R'_w = 58$ dB	erfüllt
5	Trenndecke	Ganztagsschule, Gebäude Aula, A.1.14, 1. OG	Großer Musikraum, Gebäude Aula, EG	$R'_w = 59$ dB	erfüllt

## b) Trennwände und Türen

Insgesamt wurden im ersten Messzyklus 21 Trennwände mit und ohne Tür gemessen.

Tabelle 2: Messergebnisse und Bewertung der Luftschalldämmung der Trennwände

Nr.	Prüfobjekt	Senderraum	Empfangsraum	Messergebnis	Erf. res. bewertetes Schalldämmmaß, bei Türen erf. $R'_{w,R}$	Bewertung
6	Unterrichtsraumtrennwand mit Tür	Unterrichtsraum N.2.01, Gebäude N, 2. OG	Unterrichtsraum N.2.02, Gebäude N, 2. OG	$R'_w = 41$ dB	$R'_{w,res} \geq 41$ dB	erfüllt
7	Unterrichtsraumtrennwand mit Tür	Unterrichtsraum N.1.02, Gebäude N, 1. OG	Unterrichtsraum N.1.01, Gebäude N, 1. OG	$R'_w = 44$ dB	$R'_{w,res} \geq 41$ dB	erfüllt
8	Unterrichtsraumtrennwand mit Tür	Unterrichtsraum N.E.01, Gebäude N, EG	Unterrichtsraum N.E.02, Gebäude N, EG	$R'_w = 43$ dB	$R'_{w,res} \geq 44$ dB	nicht erfüllt
9	Unterrichtsraumtrennwand mit Tür	Unterrichtsraum N.E.03, Gebäude N, EG	Unterrichtsraum N.E.02, Gebäude N, EG	$R'_w = 40$ dB	$R'_{w,res} \geq 44$ dB	nicht erfüllt
10	Unterrichtsraumtrennwand mit Tür	Unterrichtsraum W.E.18, Gebäude W, EG	Unterrichtsraum W.E.19, Gebäude W, EG	$R'_w = 41$ dB	$R'_{w,res} \geq 44$ dB	nicht erfüllt
11	Flurwand mit Tür und Glaselement	Flur N.E.33, Gebäude N, EG	Unterrichtsraum N.E.02, Gebäude N, EG	$R'_w = 33$ dB	$R'_{w,res} \geq 38$ dB	nicht erfüllt
12	Flurwand mit Tür und zwei Glaselementen	Flur W.E.32, Gebäude W, EG	Unterrichtsraum W.E.19, Gebäude W, EG	$R'_w = 35$ dB	$R'_{w,res} \geq 40$ dB	nicht erfüllt
13	Trennwand mit Tür und Glaselement	Marktplatz N.2.09, Gebäude N, 2. OG	Unterrichtsraum N.2.02, Gebäude N, 2. OG	$R'_w = 21$ dB	Keine Anforderung	-
14	Glastrennwand zum Luftraum über Marktplatz	Marktplatz N.1.08, Gebäude N, 1. OG	Marktplatz N.2.09, Gebäude N, 2. OG	$R'_w = 35$ dB	$R'_{w,res} \geq 42$ dB	nicht erfüllt

Tabelle 3: Messergebnisse und Bewertung der Luftschalldämmung der Trennwände

Nr.	Prüfobjekt	Senderraum	Empfangsraum	Messergebnis	Erf. res. bewertetes Schalldämmmaß, bei Türen erf. $R_{w,R}$	Bewertung
15	Treppenhauswand mit Tür	Treppenhaus N.1.31, Gebäude N, 1. OG	Unterrichtsraum N.1.01, Gebäude N, 1. OG	$R'_w = 40$ dB	$R'_{w,res} \geq 36$ dB	erfüllt
16	Glastrennwand mit zwei Türen	Treppenhaus N.2.31, Gebäude N, 2. OG	Marktplatz N.2.09, Gebäude N, 2. OG	$R'_w = 37$ dB	$R'_{w,res} \geq 38$ dB	nicht erfüllt
17	Trennwand zum Treppenhaus mit Glaselement	Treppenhaus W.E.31, EG	Unterrichtsraum W.E.18, EG	$R'_w = 52$ dB	$R'_{w,res} \geq 42$ dB	erfüllt
18	Tür zwischen Mehrzweckraum und großer Musikraum	Mehrzweckraum, A.E.03, EG	Großer Musikraum, A.E.02, EG	$R'_w = 37$ dB	$R_{w,R,Tür} \geq 37$ dB	erfüllt
19	Tür zwischen Mehrzweckraum und kleiner Musikraum	Mehrzweckraum, A.E.03, EG	Kleiner Musikraum, A.E.05, EG	$R'_w = 35$ dB	$R_{w,R,Tür} \geq 37$ dB	nicht erfüllt
20	Mobile Trennwand	Aula, A.E.11 EG	Mehrzweckraum, A.E.03, EG	$R'_w = 43$ dB	$R'_w \geq 42$ dB	erfüllt
21	Trennwand	Sprechzimmer, A.1.10, 1. OG	Sprechzimmer, A.1.09, 1. OG	$R'_w = 29$ dB	$R'_w \geq 42$ dB	nicht erfüllt
22	Trennwand	Sprechzimmer, A.1.08, 1. OG	Sprechzimmer, A.1.09, 1. OG	$R'_w = 27$ dB	$R'_w \geq 42$ dB	nicht erfüllt
23	Trennwand mit Tür	A.1.05 – A.1.07, 1. OG	Sprechzimmer, A.1.09, 1. OG	$R'_w = 33$ dB	$R'_{w,res} \geq 36$ dB	nicht erfüllt
24	Trennwand mit Tür	Ganztagschule, A.1.14, 1. OG	Schulberatung, A.1.13, 1. OG	$R'_w = 33$ dB	$R'_{w,res} \geq 43$ dB	nicht erfüllt
25	Trennwand	Ganztagschule, A.1.14, 1. OG	Besprechung, A.1.15, 1. OG	$R'_w = 43$ dB	$R'_{w,res} \geq 47$ dB	nicht erfüllt
26	Trennwand mit Tür	Schulberatung, A.1.13, 1. OG	Besprechung, A.1.15, 1. OG	$R'_w = 27$ dB	keine Anforderung	-

Es wurde festgestellt, dass in 13 Fällen der angestrebte Schalldämmwert nicht erfüllt wurde. Aus diesem Grund wurden im Anschluss teilweise Sanierungen und Nachbesserungen vorgenommen und anschließend Wiederholungsmessungen durchgeführt.

Im Folgenden werden die unterschiedlichen Trennwände gruppenweise zusammengefasst und die Messergebnisse bewertet.

#### **Klassenraumtrennwand mit Tür:**

Von fünf Wänden erfüllten nur zwei die Anforderung. Bei den anderen drei Trennwänden mit Tür wurde der erforderliche Wert um 1...4 dB unterschritten. Maßgeblich war in allen Fällen eine erhöhte Schallübertragung über die Funktionsfugen der Tür. Nach dem Nachjustieren der Türen wurden zwei der Trennwände erneut gemessen. In einem Fall wurde der geforderte Wert daraufhin erreicht, im anderen Fall wurde zwar eine Verbesserung um 1 dB festgestellt, der Zielwert aber immer noch nicht erreicht.

#### **Beurteilung:**

Eine Unterschreitung der Anforderung um ca. 4 dB ist merklich und macht sich durch eine erhöhte Schallübertragung über die Tür bemerkbar. Sofern der Wert nur um ca. 1 dB unterschritten wird, ist dies praktisch nicht wahrnehmbar. In Fällen, in denen eine störende Schallübertragung über die Türen erfolgt, müssen diese nachjustiert werden.

#### **Fachklassenraum Flurwand mit Tür**

Es wurden zwei Wände gemessen und die Anforderung um jeweils 5 dB unterschritten.

In beiden Fällen war eine auffällige Schallübertragung über die Bodenfunktionsfuge der Tür sowie über die Glasseitenlichter festzustellen.

#### **Beurteilung:**

Eine Unterschreitung um 5 dB ist subjektiv hörbar. Die Schallübertragungen vom Flur in den Klassenraum sind somit deutlich stärker als geplant. Der Schallschutz der Flurwände mit Türen der Fachklassenräume ist jedoch um über 10 dB besser als im Bereich der normalen Klassenräume im Bereich der offenen Lernlandschaften. Es wird vermutet, dass deshalb durch die Unterschreitung in der Praxis keine Beeinträchtigung stattfindet. Die Türen sind nachzujustieren, insbesondere im Bereich der Bodenfuge.

#### **Glastrennwand Marktplatz**

Gemessen wurde die Glastrennwand zwischen dem Marktplatz in N.2.09 im 2. OG zum Luftraum des Marktplatzes N.1.08 im 1. OG. Der geforderte Wert von  $R'w \geq 42$  dB wurde um 7 dB unterschritten.

#### **Beurteilung:**

Eine Differenz von 7 dB ist deutlich wahrnehmbar. Der vorhandene Schallschutz von  $R'w = 35$  dB wird jedoch für eine Glaswand subjektiv als sehr gut empfunden. Vermutlich wird in Verbindung mit der Transparenz der Wand keine Beeinträchtigung vorhanden sein. Da eine auffällige Schallübertragung

über die Glastrennwand selbst festgestellt wurde, entspricht ggf. die eingebaute Verglasung nicht der Anforderung.

#### **Glaswand zwischen Flur und Marktplatz**

Gemessen wurde die Glastrennwand mit zwei Türen zwischen dem Treppenhaus und dem Marktplatz N.2.09 im 2. OG. Die Anforderung wurde mit einem Messwert von  $R'w = 37$  dB um 1 dB knapp verfehlt.

Beurteilung:

Die Unterschreitung von 1 dB ist subjektiv nicht merkbar. In der Praxis ergeben sich hieraus keine Einschränkungen. Es gibt eine auffällige Schallübertragung über die Bodenfunktionsfugen der Türen.

#### **Klassenraumwand zum Treppenhaus**

Es wurde eine Trennwand mit Tür vom Unterrichtsraum im 1. OG zum Treppenhaus und eine Trennwand mit einem Glaselement zwischen dem Werkraum im EG und dem Treppenhaus gemessen. Die Anforderungen werden erfüllt.

#### **Türen zwischen Mehrzweckraum und Musikräumen**

Gemessen wurden jeweils die zweiflügligen Türen zwischen dem Mehrzweckraum und dem großen bzw. dem kleinen Musikraum. Die Anforderung von  $R_{w,Tür} \geq 37$  dB wird von der Tür zum großen Musikraum erreicht und von der Tür zum kleinen Musikraum um 2 dB verfehlt.

Beurteilung:

Es ist eine maßgebliche Schallübertragung über die Bodenfunktionsfuge der Tür festzustellen. Die Tür ist nachzujustieren.

#### **Mobile Trennwand Aula**

Die mobile Trennwand zwischen der Pausenhalle und dem Mehrzweckraum/der Bühne erfüllt die Anforderungen an das bewertete Schalldämm-Maß.

#### **Trennwände Sprechzimmer**

Gemessen wurden Trennwände zwischen den Sprechzimmern im Aula-Gebäude im 1. OG beim Direktorat. Die Anforderung von  $R'w \geq 42$  dB wurde mit Messwerten von  $R'w = 27...29$  dB deutlich verfehlt.

Ursache hierfür waren 50 mm dicke Akustik-Holzwoleleichtbauplatten, die über der Trennwand durchliefen.

Der Anschluss der Trennwand an die Decke wurde zwischenzeitlich saniert. Die Nachmessung ergab einen Wert von  $R'w = 54$  dB. Die Anforderung ist nun deutlich erfüllt.

Gemessen wurde außerdem eine Trennwand mit Tür zwischen dem Sprechzimmer und dem Verwaltungsbereich. Die Anforderung von  $R'_{w,res} \geq 36$  dB wurde um 3 dB verfehlt. Maßgeblich hierfür war eine auffällige Schallübertragung im Bereich von Leitungsdurchführungen durch die Decke und über Funktionsfugen der Tür. Nachdem diese verbessert wurden, konnte ein Schalldämm-Maß von  $R'_w = 35$  dB gemessen werden. Der Anforderungswert wird noch um ca. 1 dB knapp verfehlt. Subjektiv ist die Unterschreitung somit nicht mehr feststellbar.

### Bereich Schulpsychologie

Gemessen wurde hier die Trennwand mit Tür zwischen der Ganztagesklasse A.1.14 und dem Schulpsychologieraum A.1.13 sowie die Trennwand zwischen der Ganztagesklasse und dem Besprechungsraum A.1.15. In beiden Fällen wurde der angestrebte Schalldämmwert nicht erreicht. Die Wand ohne Tür verfehlt die Anforderung um 4 dB, die Wand mit Tür um 10 dB. Auffällig waren Schallübertragungen über die Leitungs- und Kanaldurchführungen durch die Wand sowie über die Tür selbst.

Nach der Messung sollte die Tür nachjustiert werden und die Undichtigkeiten bei den Durchdringungen abgedichtet werden. Die anschließende Nachmessung ergab jedoch lediglich eine Verbesserung von 2 dB. Die Anforderung wird immer noch deutlich verfehlt. Der Vergleich der frequenzabhängigen Messkurven zeigt, dass die Verbesserung im Wesentlichen bei hohen Frequenzen erfolgt. Dies könnte auf die Justierung der Funktionsfugen der Tür zurückzuführen sein. Bei der Nachmessung wurde eine sehr deutliche Nebenwegübertragung im Bereich der durchlaufenden Lüftungskanäle festgestellt. Es wird vermutet, dass die Abdichtungen in diesem Bereich noch nicht durchgeführt wurden. Hier sind weitere Abdichtungsmaßnahmen erforderlich.

### c) Fassade

Tabelle 4: Messergebnis und Bewertung der Luftschalldämmung der Süd-/Westfassade des Musikraums im EG

Nr.	Prüfobjekt	Senden	Empfangsraum	Messergebnis	Erf. res. bewertetes Schalldämm-Maß	Bewertung
27	Fassade, Süd	Freifläche (ebenerdig)	Großer Musikraum, A.E.02	$R'_{45^\circ,w} = 42$ dB	$R'_{w,res} \geq 34$ dB	erfüllt

Die gemessene Fassade erfüllt die akustische Anforderung an den Luftschallschutz.

## 10.1.2 Trittschalldämmung

Die Ergebnisse der Messungen der Trittschalldämmung sind in den nachfolgenden Tabellen zusammengefasst.

### a) Geschosstrenndecken

Tabelle 5: Messergebnisse und Bewertung der Trittschalldämmung der Geschosstrenndecken

Nr.	Prüfobjekt	Senderraum	Empfangsraum	Messergebnis	Bewertung nach o. g. Kriterium
28	Geschosstrenndecke	Unterrichtsraum, N.2.01, 2. OG	Unterrichtsraum, N.1.01, 1. OG	$L'_{n,w} = 46$ dB	erfüllt
29	Geschosstrenndecke	Unterrichtsraum N.1.02, 1. OG	Unterrichtsraum, N.E.02, EG	$L'_{n,w} = 47$ dB	erfüllt
30	Geschosstrenndecke	Unterrichtsraum W.1.16, 1. OG	Unterrichtsraum, W.E.19, EG	$L'_{n,w} = 45$ dB	erfüllt
31	Geschosstrenndecke	WC-Knaben, N.1.16, 1. OG	Unterrichtsraum, N.E.12, EG	$L'_{n,w} = 49$ dB	erfüllt
32	Geschosstrenndecke	Unterrichtsraum W.2.15, 2. OG	Unterrichtsraum, W.1.15, 1. OG	$L'_{n,w} = 47$ dB	erfüllt
33	Geschosstrenndecke	Unterrichtsraum W.1.10, 1. OG	Unterrichtsraum, W.E.09, EG	$L'_{n,w} = 46$ dB	erfüllt
34	Geschosstrenndecke	Ganztagschule Gebäude Aula, A.1.14, 1. OG	Großer Musikraum, Gebäude Aula, EG	$L'_{n,w} = 54$ dB	nicht erfüllt

Mit einer Ausnahme erfüllen alle gemessenen Geschosstrenndecken die akustischen Anforderungen an den Trittschallschutz.

Bei dieser Ausnahme handelt es sich um die Decke im Aula-Gebäude zwischen dem Raum Ganztageschule A.1.14 im 1. OG zum darunterliegenden großen Musikraum im EG. Die Anforderung von  $L'_{n,w} \leq 53$  dB wird mit einem Messwert von  $L'_{n,w} = 54$  dB knapp verfehlt. Die Abweichung wird als unkritisch eingestuft, da subjektiv ein Unterschied von 1 dB nicht feststellbar ist.

Es ist auffällig, dass bei gleicher Deckenkonstruktion das Messergebnis ca. 5...7 dB geringer ist als bei den anderen gemessenen Decken. Der Frequenzverlauf zeigt im Vergleich zu den anderen Messkurven mit ansteigender Frequenz keinen absteigenden Trittschallpegel, sondern dieser bleibt bis ca. 1000 Hz konstant, steigt dann nochmal leicht an und fällt erst anschließend stark ab. Dies deutet darauf hin, dass hier eine oder mehrere Körperschallbrücken zwischen schwimmendem Estrich und flankierenden Bauteilen bzw. der Trenndecke vorhanden sind.

## b) Treppenläufe

Tabelle 6: Messergebnisse und Bewertung der Trittschalldämmung der Treppenläufe

Nr.	Prüfobjekt	Senderraum	Empfangsraum	Messergebnis	Bewertung nach o. g. Kriterium
35	Treppenlauf	Treppenhaus N.2.31, 2. OG	Unterrichtsraum, N.2.02, 1. OG	$L'_{n,w} = 37$ dB	erfüllt
36	Treppenlauf	Treppenhaus W.E.31, EG	Unterrichtsraum, W.E.18, EG	$L'_{n,w} = 33$ dB	erfüllt
37	Treppenhausflur	Treppenhaus W.E.31, EG	Unterrichtsraum W.E.18, EG	$L'_{n,w} = 60$ dB	Keine Anforderung

Die gemessenen Treppenläufe erfüllen die Anforderungen an den Trittschallschutz

### 10.1.3 Anlagen der Wasserinstallation

Die Messergebnisse der Geräusche aus Anlagen der Wasserinstallation sind in den nachfolgenden Tabellen zusammengefasst.

Tabelle 7: Messung der Armaturen im Raum WC-Knaben, Klassenhaus 1, 1. OG, Raum-Nr. N.1.16, gemessen im Raum Bio I (VE = 174,0 m<sup>3</sup>), Klassenhaus 1, EG, Raum-Nr. N.E.12

Prüfgegenstand	Maximaler Schalldruckpegel $L_{AFmax}$ [dB]			Maximaler Norm-Schalldruckpegel $L_{AFmax,n}$ [dB]
	Zyklus 1, Raummitte	Zyklus 2, Raummitte	Zyklus 3, Raumecke Süd/West (oben)	
Nachhallzeiten: 500 Hz: 0,40 s. 1000 Hz: 0,40 s. 2000 Hz: 0,40 s.				
Fremdgeräuschpegel	$L_{Aeq} = 18,5$	$L_{Aeq} = 19,3$	$L_{Aeq} = 23,0$	( $L_{Aeq,n} = 29$ dB)
Waschbeckenablauf	$\leq 20,2$	$\leq 20,6$	$\leq 19,6$	$\leq 27$
Wand-WC (Ablaufgeräusch im Abwasserrohr)	27,1	28,7	$\leq 24,5$	<b>34</b>

Tabelle 8: Messung der Armaturen im Raum Damen, Aula, 1. OG, Raum-Nr. A.1.18, gemessen im Raum Kleiner Musikraum (VE = 146,0 m<sup>3</sup>), Klassenhaus 1, EG, Raum-Nr. A.E.05

Prüfgegenstand	Maximaler Schalldruckpegel $L_{AFmax}$ [dB]			Maximaler Norm-Schalldruckpegel $L_{AFmax,n}$ [dB]
	Zyklus 1, Raummitte	Zyklus 2, Raummitte	Zyklus 3, Raumecke Nord/Ost (oben)	
Nachhallzeiten: 500 Hz: 0,70 s. 1000 Hz: 0,80 s. 2000 Hz: 0,90 s.				
Fremdgeräuschpegel	$L_{Aeq} = 23,0$	$L_{Aeq} = 23,5$	$L_{Aeq} = 25,0$	( $L_{Aeq,n} = 29$ dB)
Wand-WC (Ablaufgeräusch im Abwasserrohr)	$\leq 23,3$	$\leq 24,1$	$\leq 28,9$	$\leq 30$

Die Messergebnisse (siehe Tabelle 7 und Tabelle 8) betragen  $L_{AF,max,n} \leq 27...34$  dB(A).

Die Anforderungen werden für beide geprüften Räume eingehalten.

### 10.1.4 Nachhallzeiten

Bei der Messung wurde das „Verfahren des abgeschalteten Rauschens“ verwendet. Es wurden 2 Schallquellenpositionen mit je 6 Mikrofonpositionen (insgesamt 12 Messungen) je Raum verwendet. Die Nachhallzeit wurde für einen Frequenzbereich von 50 Hz bis 5000 Hz in Terzbandbreite ermittelt.

Folgende Randbedingungen lagen bei der Messung vor:

- Temperatur: 20 °C - 21 °C
- Luftfeuchtigkeit: 45 % - 46 %

Es wurden Nachhallzeiten in folgenden Räumen gemessen: 3 Fachklassenzimmer, 3 Klassenräume, verteilt auf die Klassenhäuser 1 und 2 sowie das 1. und das 2. OG, 4 Marktplätze, Aula, großer und kleiner Musikraum, Mehrzweckraum, Sporthalle.

Die Messergebnisse können wie folgt zusammengefasst werden.

#### **a) Fachklassenzimmer**

Die Anforderungen an die Nachhallzeit werden erfüllt.

#### **b) Klassenzimmer**

Die Anforderungen an die Nachhallzeit werden erfüllt.

Lediglich bei einem Klassenzimmer im 2. OG (Raum N.2.02) wird bei tiefen Frequenzen der angestrebte Grenzwert knapp überschritten. Dies ist unkritisch. Aufgrund einer schrägen Dachdecke ergibt sich ein größeres akustisch wirksames Volumen. Da die wirksame schallabsorbierende Fläche nicht entsprechend proportional ansteigt, resultiert insbesondere bei tiefen Frequenzen eine längere Nachhallzeit.

#### **c) Marktplätze**

Die Anforderungen an die Nachhallzeit werden bei den gemessenen Marktplätzen mit einem Volumen von ca. 400 bis ca. 650 m<sup>3</sup> eingehalten.

Lediglich beim großen Marktplatz N.2.09 im 2. OG des Klassenhauses 1 mit einem Volumen von ca. 860 m<sup>3</sup> wird die angestrebte Nachhallzeit nur bei mittleren Frequenzen eingehalten und bei hohen und tiefen Frequenzen um bis zu ca. 17 % überschritten.

Bewertung der Ergebnisse:

Aufgrund der höheren Nachhallzeit kann der Geräuschpegel bei Gruppenarbeiten ggf. etwas lauter als sonst werden. Aufgrund des relativ gleichmäßigen Verlaufes der Nachhallzeit und dem im Vergleich zum Volumen für Sprachräume relativ geringen Wert ist eine gute Sprachverständlichkeit zu erwarten.

Ursache für die in diesem Marktplatz vorhandene längere Nachhallzeit sind einerseits das große Raumvolumen und andererseits die relativ großen Verglasungsanteile.

#### **d) Musikräume**

In beiden Musikräumen wird der angestrebte Bereich der Nachhallzeit von  $T = 0,6...1,0$  s im kleinen bzw.  $T = 0,7...1$  s im großen Musikraum im mit 33 Personen belegten Raum um bis zu 0,1 s unterschritten. Im unbesetzten bzw. mit weniger Schülern besetzten Raum wird der Zielbereich eingehalten.

#### Bewertung der Ergebnisse:

Für musikalische Darbietungen sind die Räume bei Vollbelegung etwas zu trocken. Dafür ist die Wortverständlichkeit für Sprache (Unterricht) besser und eventuelle Ungenauigkeiten beim Musizieren sind präziser herauszuhören.

Eine Ursache konnte nicht ausgemacht werden. Vermutlich haben einige Raumverkleidungen eine höhere schallabsorbierende Wirkung als erwartet bzw. berechnet.

#### **e) Pausenhalle**

Die Anforderungen an die Nachhallzeit in der Pausenhalle werden erreicht (bei durchschnittlicher Belegung mit 200 stehenden Schülern).

Der Nutzungsfall als Veranstaltungsraum mit offener mobiler Trennwand zum Mehrzweckraum wurde nicht gemessen. Der gleichmäßige Verlauf der Nachhallzeit lässt auch hierbei gute Verhältnisse erwarten.

#### **f) Mehrzweckraum**

Die Nachhallzeit im mit 33 Personen belegten Mehrzweckraum ist über einen großen Bereich insbesondere bei mittleren Frequenzen höher als für Musik- bzw. Sprachveranstaltungen gewünscht.

#### Bewertung der Ergebnisse:

Im Mehrzweckraum ist aufgrund der langen Nachhallzeit keine sehr gute Sprachverständlichkeit zu erwarten. Bei Musikveranstaltungen ist die lange Nachhallzeit eher positiv zu bewerten, da dadurch ein gutes Mitklingen des Raumes vorhanden ist.

Der geplante Bühnenvorhang war zum Messzeitpunkt nicht vorhanden. Mit diesem Vorhang wird sich die Nachhallzeit voraussichtlich entsprechend der Anforderungen (Musik oder Sprache) einstellen lassen.

#### **g) Sporthalle**

Die Anforderung an die Nachhallzeit wird für Frequenzen unter 1000 Hz eingehalten. Zwischen 1000 und 2000 Hz ist eine Überschreitung von bis zu ca. 11 % vorhanden.

#### Bewertung der Ergebnisse:

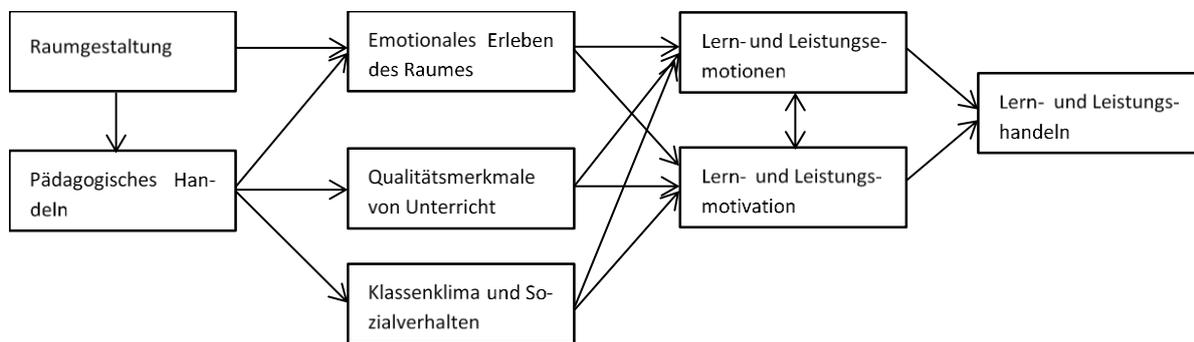
Die etwas erhöhte Nachhallzeit bei hohen Frequenzen wird sich in der praktischen Nutzung als Sporthalle nicht merkbar auswirken.

Die Ursache kann ohne weitere Untersuchungen nicht festgestellt werden. Vermutlich ist der Schallabsorptionsgrad der eingebauten absorbierenden Verkleidungen im Bereich zwischen 1000 und 2000 Hz geringer als gefordert bzw. berechnet.

# 11 Einfluss der Architektur und des pädagogischen Konzepts auf Lehr- und Lernprozesse

## 11.1 Theoretische Überlegungen

Ziel der Evaluation am Schmuttertal-Gymnasium Diedorf ist die Wirkung der räumlichen Gestaltung und des pädagogischen Konzepts der LernLandschaften auf individuelles Lern- und Leistungsverhalten und deren Determinanten sowie auf das Klassenklima und das Sozialverhalten der Schülerinnen und Schüler. Theoretisch erscheint ein Wirkprozess plausibel, wie er in *Abbildung 11.1-1* dargestellt ist.



*Abbildung 11.1-1: Postulierter Wirkprozess der Raumgestaltung und des pädagogischen Handelns auf individuelles Lern- und Leistungsverhalten und deren Determinanten*

Die Raumgestaltung sollte auf das emotionale Erleben des Raumes wirken (z. B. Wohlbefinden), welches direkt Lern- und Leistungse-motionen (z. B. Lernfreude) beeinflusst. Diese wiederum stehen in Zusammenhang mit Lern- und Leistungsmotivation (z. B. intrinsischer Motivation). Positive Emotionen sowie eine adaptive Lern- und Leistungsmotivation begünstigen die Quantität und Qualität von Lern- und Leistungshandlungen.

Ergänzend dazu ermöglicht und unterstützt die Raumgestaltung pädagogisches Handeln (z. B. Ermöglichung und Unterstützung von Gruppenarbeit), was sich auf Qualitätsmerkmale des Unterrichts (z. B. kognitive Aktivierung, konstruktive Unterstützung) auswirken sollte. Diese wiederum begünstigen positive Lern- und Leistungse-motionen sowie -motivation und beeinflussen so individuelles Lern- und Leistungshandeln der Schülerinnen und Schüler.

Schließlich sind LernLandschaften unter anderem durch verstärkte Kooperationen zwischen Schülern und gegenseitige Unterstützung charakterisiert. Dies lässt annehmen, dass das pädagogische Konzept der LernLandschaften sich positiv auf das Klassenklima und das Sozialverhalten der Schüler auswirkt. Das Klassenklima als Aspekt der schulischen Lernumwelt kann sich wiederum positiv auf die Lern- und Leistungsmotivation auswirken.

Überdies ist das Konzept der LernLandschaften durch erhöhte Anforderungen an die Selbstregulation des eigenen Lernverhaltens gekennzeichnet. Erfahrungen damit und Unterstützung bei dieser Anforderung lassen erwarten, dass positive Effekte auf metakognitive Lernstrategien zu erwarten sind.

## 11.2 Evaluationskonzept

Das Evaluationskonzept ist darauf ausgelegt, die postulierten Zusammenhänge durch Vergleiche auf sozialer und individueller Bezugsnorm zu prüfen: Unterscheiden sich die Schülerinnen und Schüler des Schmuttertal-Gymnasiums und der Kontrollschulen in den einzelnen Merkmalen vor dem Umzug des Schmuttertal-Gymnasiums in die neuen Räumlichkeiten und den damit einhergehendem verstärkten Arbeiten mit LernLandschaften nicht, jedoch im sich anschließendem Schuljahr, so ist dies ein Hinweis auf die Wirkung der neuen Räumlichkeiten und dem Arbeiten mit LernLandschaften (sozialer Vergleich). Verändert sich das Erleben und Verhalten der einzelnen Schülerin bzw. des einzelnen Schülers des Schmuttertal-Gymnasiums im Rahmen des Umzugs und der verstärkten Arbeit mit LernLandschaften, so ist dies ein weiterer Hinweis auf die Wirkung der Architektur und der Arbeit mit LernLandschaften (individueller Vergleich). Hierbei ist zu berücksichtigen, dass das individuelle Erleben und Verhalten im Laufe eines Schuljahres variiert, so dass nur Vergleiche zu ähnlichen Zeitpunkten als sinnvoll erscheinen. Bei der Interpretation der Ergebnisse aus dem individuellen Vergleich ist zu beachten, dass dieser mit alterskorrelierten Veränderungen konfundiert ist, da die Schülerinnen und Schüler bis zu zwei Jahre älter geworden sind. Konkret werden hierbei die Angaben ein- und derselben Schülerin bzw. ein- und desselben Schülers zum Oktober 2014 und Oktober 2015 (Anfang des Schuljahres) und zum März 2014 und März 2016 (Mitte des Schuljahres) verglichen. In folgender Abbildung ist das Evaluationskonzept visualisiert.

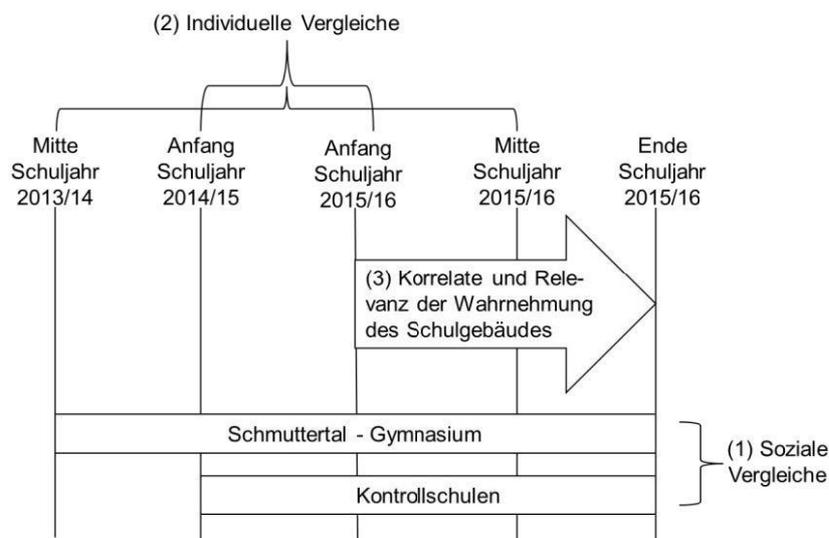


Abbildung 11.2-1: Design zur Evaluation der Wirkung der Architektur und des pädagogischen Konzepts auf Lehr-Lernprozesse am Schmuttertal-Gymnasium in Diedorf

Dieses Vorgehen bedarf der Operationalisierung der einzelnen Konstrukte zu mehreren Zeitpunkten sowohl am Schmuttertal-Gymnasium als auch bei Kontrollschulen mit vergleichbarer Schülerschaft, jedoch ohne der spezifischen Raumgestaltung und dem pädagogischen Konzept der LernLandschaft. Konkret wurden die Schülerinnen und Schüler des Schmuttertal-Gymnasiums vor dem Umzug in die neuen Räumlichkeiten befragt (Prätest 1 und 2), der mit Beginn des Schuljahres 2015/16 erfolgte. Nach dem Umzug des Schmuttertal-Gymnasiums in die neuen Räumlichkeiten erfolgten drei Messzeitpunkte, um Hinweise auf die direkte (Posttest 1), mittelfristige (Posttest 2) und langfristige (Posttest 3) Wirkung zu erhalten (siehe Abbildung 11.2-2).

	Schmuttertal-Gymnasium	Kontrollschulen
Prätest 1	März 2014	
Prätest 2	Oktober 2014	Oktober 2014
Posttest 1	Oktober 2015	Oktober 2015
Posttest 2	März 2016	März 2016
Posttest 3	Juli 2016	Juli 2016

Abbildung 11.2-2: Zeitplan der Erhebungen zur Evaluation der Wirkung der Raumgestaltung und des pädagogischen Konzepts der LernLandschaft am Schmuttertal-Gymnasium Diedorf

## 11.3 Ergebnisse

### 11.3.1 Wirkung der Raumgestaltung und des pädagogischen Konzepts auf emotionales und motivationales Erleben

Das vielfältige emotionale Erleben der Schüler wurde zum einen erfasst als (1) Wohlbefinden im Schulgebäude und (2) Wohlbefinden in den Klassenräumen und zum anderen durch klassische Lernemotionen wie (3) Lernfreude, (4) Langeweile und (5) Ärger. Überdies wurde (6) die intrinsische Motivation der Schüler betrachtet.

#### Wohlbefinden im Schulgebäude und in den Klassenräumen

Wohlbefinden ist definiert als die Wahrnehmung des Schulgebäudes respektive des Klassenzimmers als einen Ort zum Wohlfühlen. Zu dessen Operationalisierung wurden eigene Items entwickelt (z. B. „In unserem Schulgebäude fühle ich mich wohl“). Mit einem Cronbachs Alpha von .88 - .95 (über die einzelnen Messzeitpunkte hinweg) erwies sich sowohl die Skala „Wohlbefinden im Schulgebäude“ als auch die Skala „Wohlbefinden in den Klassenräumen“ als intern konsistent.

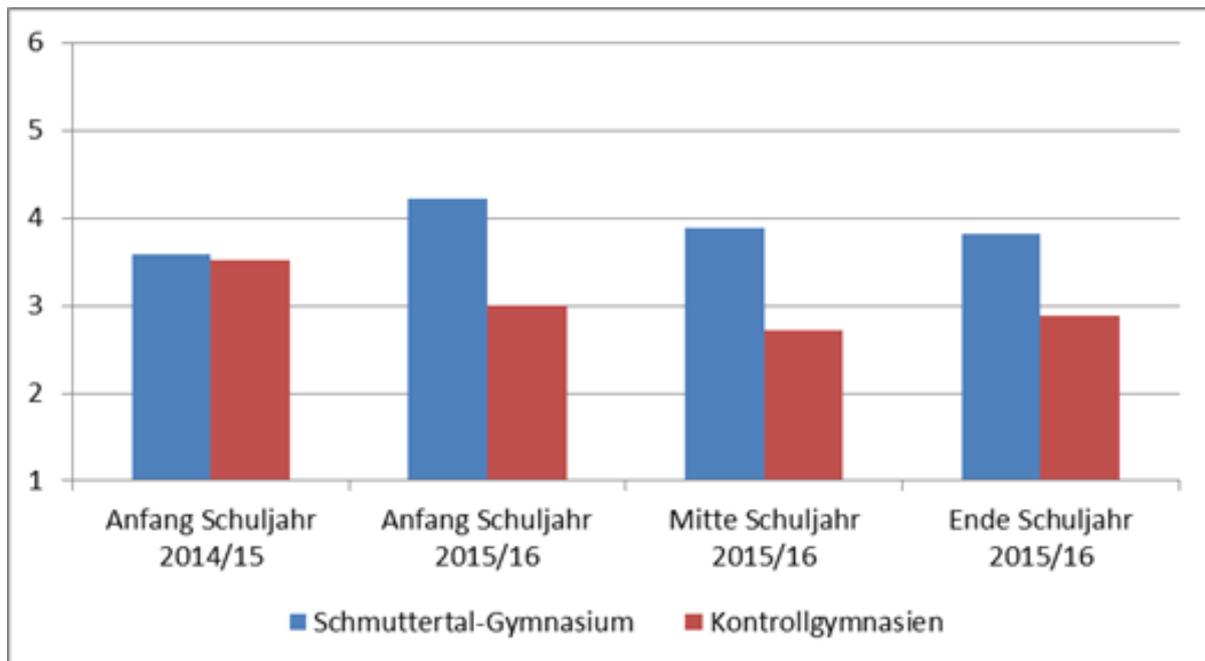


Abbildung 11.3-1: Wirkung der Architektur und des pädagogischen Konzepts auf das Wohlbefinden der Schüler im Schulgebäude

Verglichen mit Schülern der Kontrollschulen (sozialer Vergleich) berichteten die Schüler des Schmuttertal-Gymnasiums keine Unterschiede im Wohlbefinden im Schulgebäude vor dem Umzug (Anfang Schuljahr 2014/15), jedoch war nach dem Umzug und der verstärkten Arbeit mit LernLandschaften – und dies zu allen drei Messzeitpunkten – das Wohlbefinden der Schüler des Schmuttertal-Gymnasiums höher. Auf individueller Ebene erhöhte sich im Zuge des Umzugs in das neue Gebäude und der verstärkten Arbeit mit LernLandschaften das Wohlbefinden im Schulgebäude bei den Schülern des Schmuttertal-Gymnasiums. Diese positive Entwicklung war bei den Schülern der Kontrollschulen nicht zu beobachten.

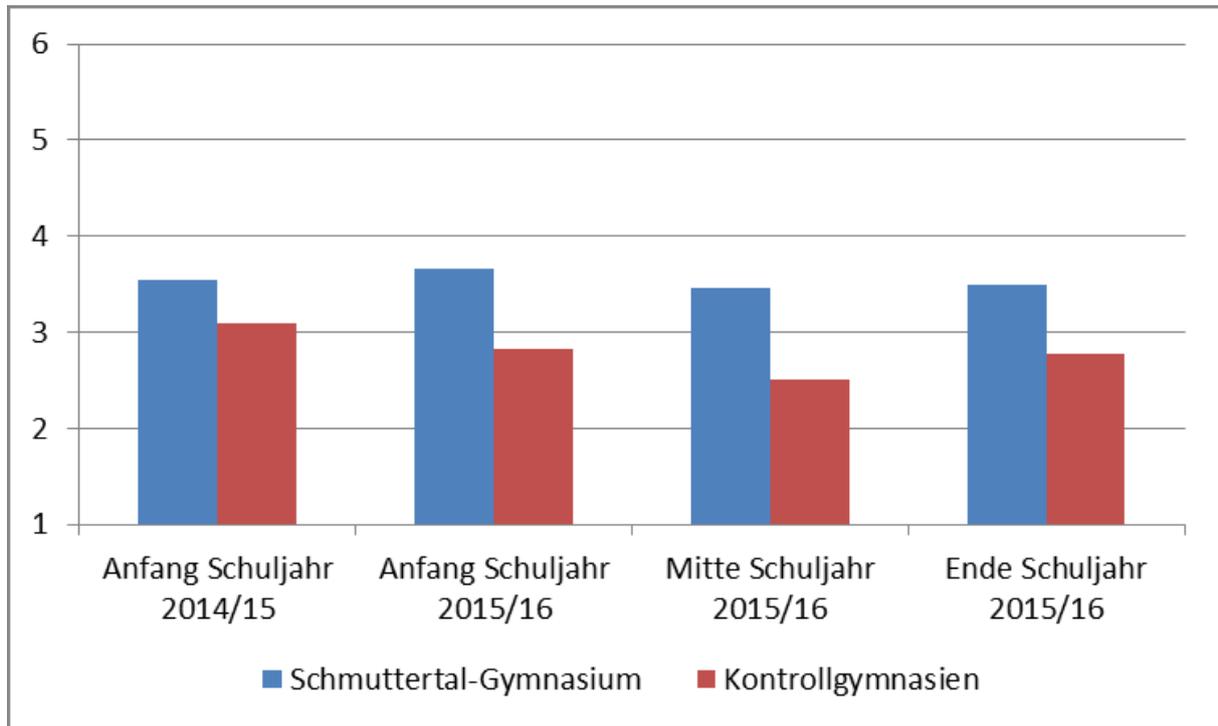


Abbildung 11.3-2: Wirkung der Architektur und des pädagogischen Konzepts auf das Wohlbefinden der Schüler in den Klassenräumen

In Bezug auf das Wohlbefinden in den Klassenräumen zeigte sich im sozialen Vergleich ein ähnliches Bild, allerdings berichteten hier die Schüler bereits vor dem Umzug und der verstärkten Arbeit mit LernLandschaften ein erhöhtes Wohlbefinden in den Klassenzimmern. Individuell veränderte sich das Wohlbefinden in den Klassenzimmern bei den Schülern des Schmuttertal-Gymnasiums nicht, was auch für die Schülerinnen und Schüler der Kontrollschulen beobachtet wurde.

### Lernfreude, Langeweile und Ärger

Lernfreude beschreibt das Ausmaß an erlebter Freude im Unterricht, welches die Schüler durch Beantwortung von Items wie „Der [Fach]-Unterricht macht mir Spaß“ angaben. In Analogie dazu ist Langeweile definiert als das Ausmaß an erlebter Langeweile im Unterricht (z. B. „Ich finde den [Fach]Unterricht langweilig“) und Ärger als das Ausmaß an erlebtem Ärger im Unterricht (z. B. „Im [Fach]-Unterricht bin ich genervt“). Sämtliche Items sind dem Achievement Emotions Questionnaire (AEQ) nach Pekrun, Goetz und Frenzel (2005) entnommen. Das Cronbachs Alpha variierte über die einzelnen Emotionen und die einzelnen Messzeitpunkte hinweg zwischen .77 und .95, was auf eine gute Messgenauigkeit hinweist.

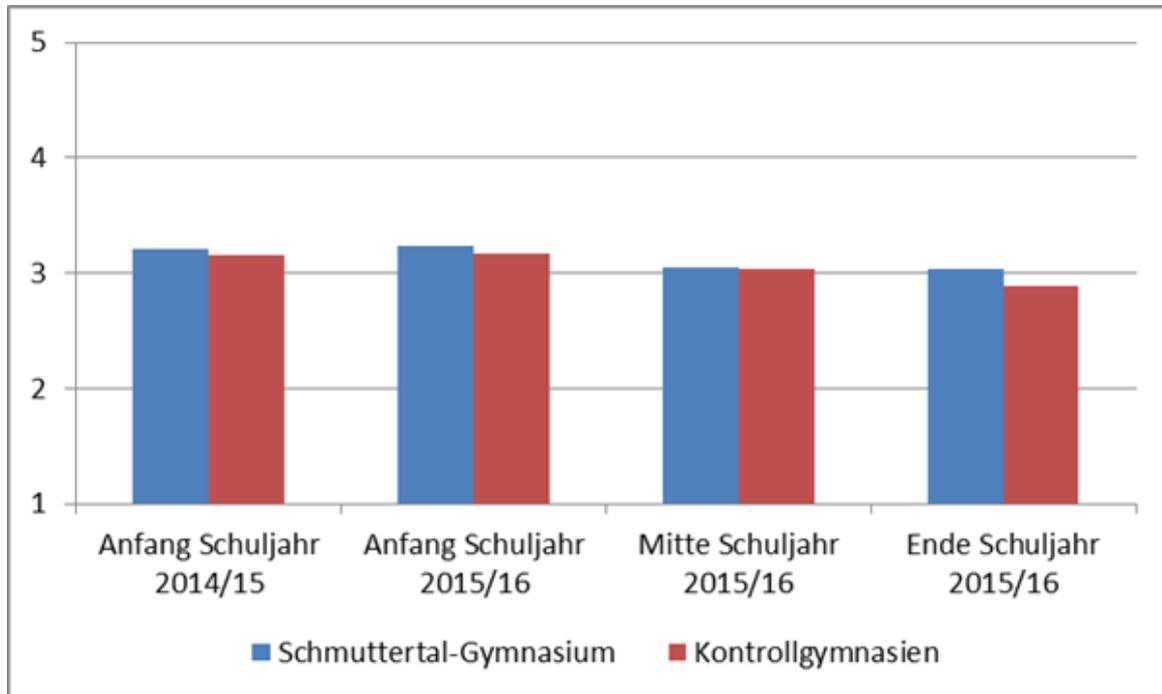


Abbildung 11.3-3: Wirkung der Architektur und des pädagogischen Konzepts auf die Lernfreude

Im Vergleich zu Schülern der Kontrollschulen berichteten die Schüler des Schmuttertal-Gymnasiums stets ähnlich viel Freude im Unterricht. Auch im individuellen Vergleich wurden keine Unterschiede in der Veränderung der Lernfreude zwischen den Schülern der verschiedenen Schulen im Vergleich zum Schuljahresbeginn beobachtet.

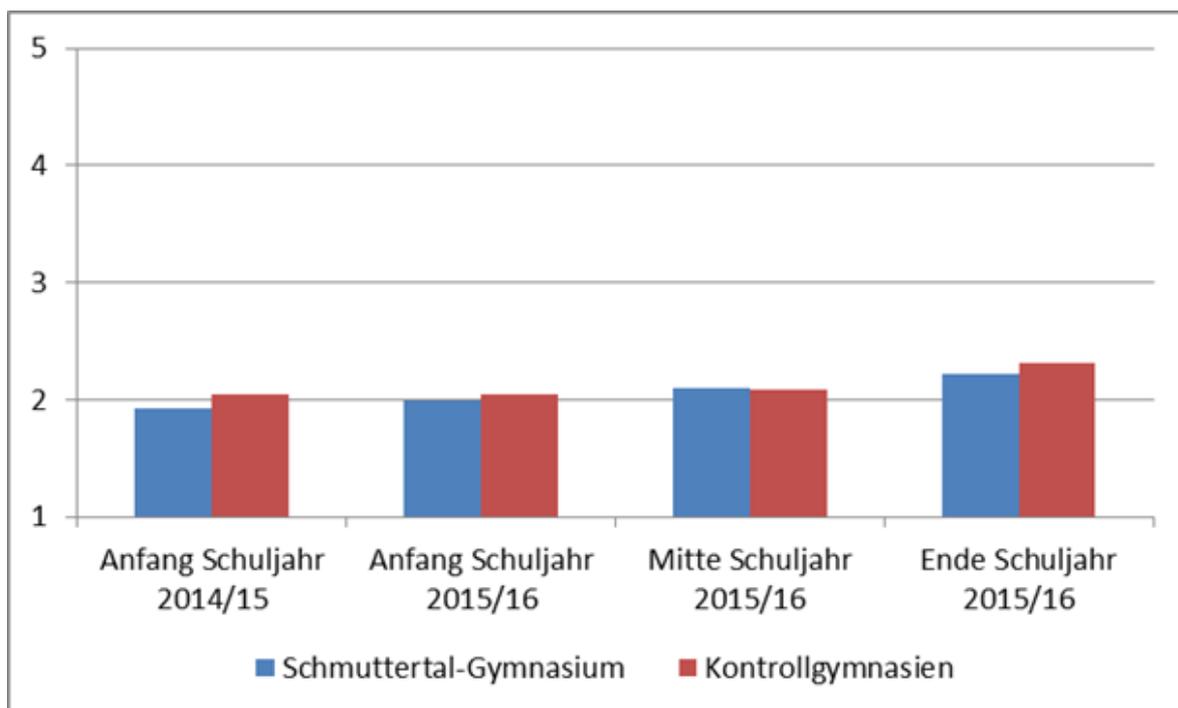


Abbildung 11.3-4: Wirkung der Architektur und des pädagogischen Konzepts auf die Langeweile

Im sozialen Vergleich berichteten die Schüler des Schmuttertal-Gymnasiums vor dem Umzug in ihre neuen Schulgebäude und dem verstärkten Arbeiten mit LernLandschaften weniger Langeweile im Unterricht als ihre Peers an den Kontrollschulen. Nach dem Umzug in das Schulgebäude und dem verstärkten Arbeiten mit LernLandschaften glich sich das Langeweile-erleben an. Entsprechend war bei den Schülern des Schmuttertal-Gymnasiums ein ungünstigerer Trend beim Erleben von Langeweile als bei den Schülerinnen und Schülern der Kontrollschulen zu beobachten.

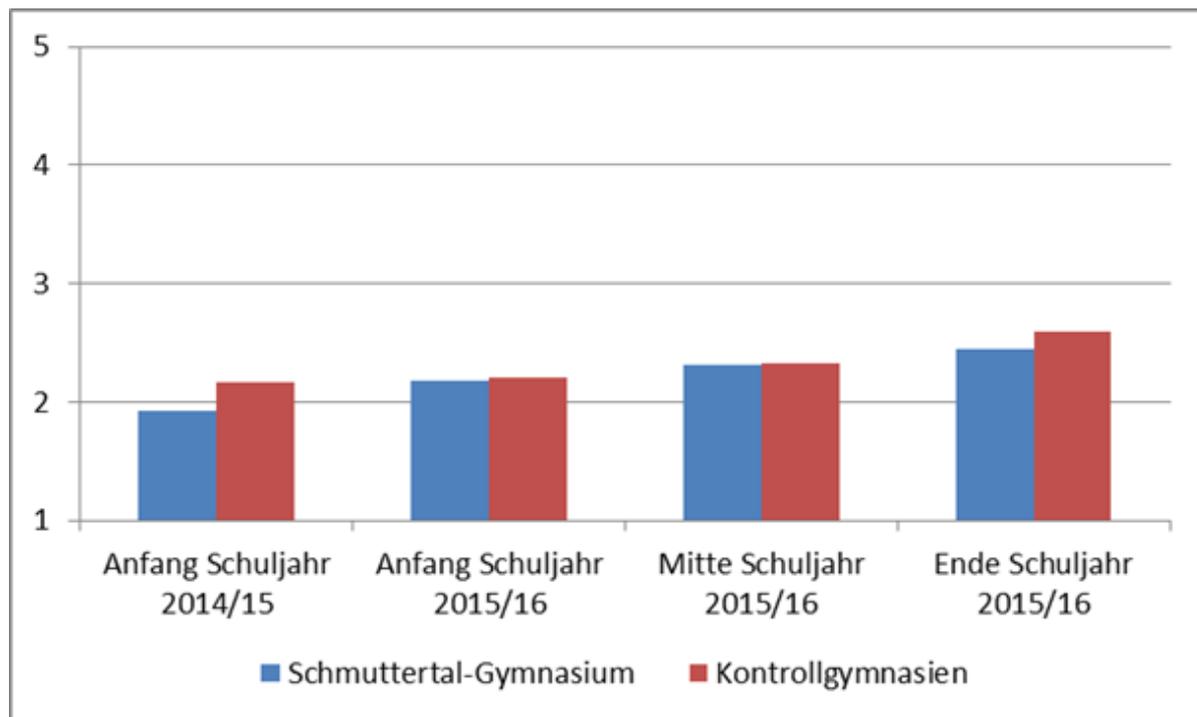


Abbildung 11.3-5: Wirkung der Architektur und des pädagogischen Konzepts auf Ärger

Schüler des Schmuttertal-Gymnasiums ärgerten sich im Unterricht zu sämtlichen Messzeitpunkten ähnlich häufig wie Schüler der Kontrollschulen. Weiterhin berichteten die Schüler des Schmuttertal-Gymnasiums von einer Zunahme an Ärger, sowohl im Vergleich zu Schuljahresbeginn und zur Mitte des Schuljahres.

### Intrinsische Motivation

Unter intrinsischer Motivation werden die Anreize einer Tätigkeit an sich verstanden. Sie manifestiert sich darin, dass die Tätigkeit an sich Spaß macht, sie sinnvoll oder herausfordernd erlebt wird oder sie einen einfach interessiert. Insbesondere Unterrichtshandeln, das den Schülern Kompetenzerfahrungen, Autonomieerleben und soziale Eingebundenheit ermöglicht – was den LernLandschaften immanent sein kann – wirkt positiv auf die intrinsische Motivation. Erfasst wurde die intrinsische Motivation der Schülerinnen und Schüler mit dem Fragebogen zur Erfassung motivationaler Selbstregulation bei Jugendlichen (MoS-J) von Bieg und Mittag (2005). Hierbei beantworteten die Schülerinnen und Schüler Items wie „Ich arbeite im [Fach]Unterricht gut mit, weil

es mir Spaß macht“. Das Cronbachs Alpha variierte über die Messzeitpunkte hinweg zwischen .89 und .94 verweist auf eine gute Messgenauigkeit.

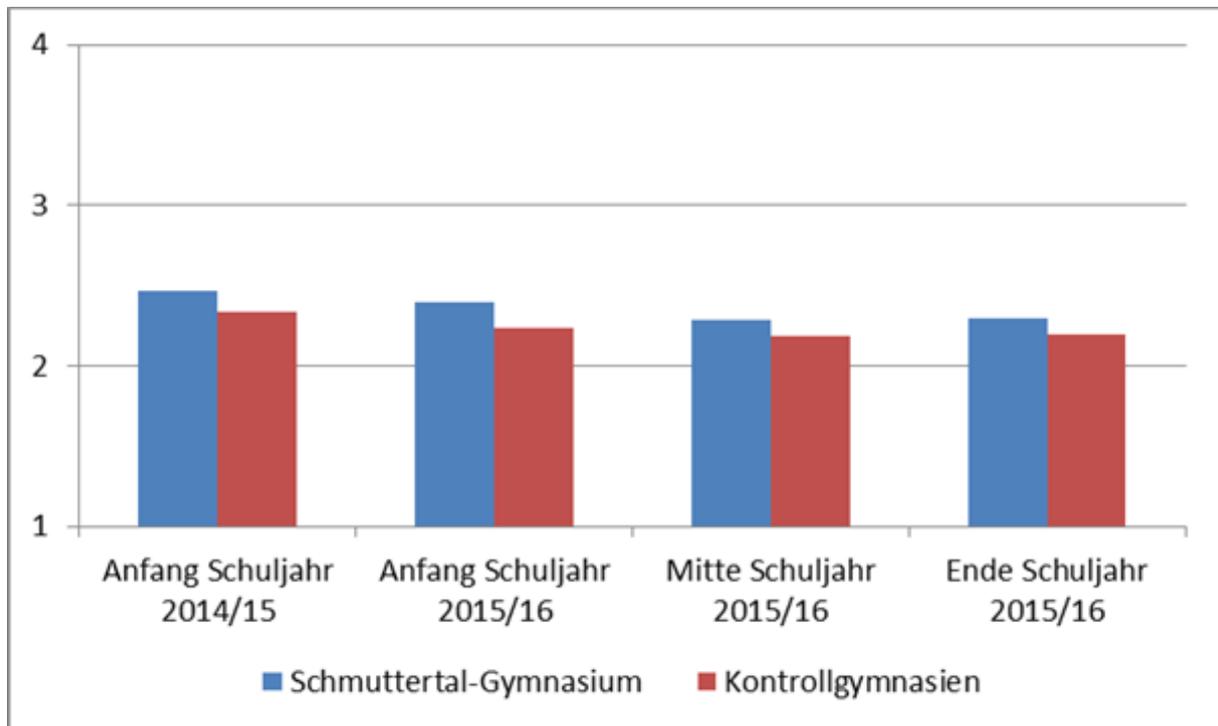


Abbildung 11.3-6: Wirkung der Architektur und des pädagogischen Konzepts auf die intrinsische Motivation

Im Vergleich zu den Kontrollschulen berichteten die Schüler des Schmuttertal-Gymnasiums, dass sie zu Beginn eines Schuljahres stärker intrinsisch motiviert lernen. Dieser Unterschied nivellierte sich jedoch im Laufe des Schuljahres nach dem Umzug und der verstärkten Arbeit mit LernLandschaften. Im individuellen Vergleich ging die intrinsische Motivation zurück, sowohl zu Beginn des Schuljahres als auch zur Mitte des Schuljahres.

### Resümee zur Wirkung der Raumgestaltung und des pädagogischen Konzepts auf emotionales Erleben

Die Raumgestaltung und das pädagogische Konzept scheinen das Wohlbefinden der Schüler zu begünstigen. Auf die Lernfreude, Langeweile und Ärger scheinen die Raumgestaltung und das pädagogische Konzept der LernLandschaften keinen direkten Einfluss zu haben. Die Unterschiede in der intrinsischen Motivation im sozialen Vergleich geben den Hinweis darauf, dass LernLandschaften intrinsisch motivierend wirken können, dieser positive Einfluss mit der Gewöhnung an das Konzept jedoch rückläufig ist.

### 11.3.2 Wirkung der Raumgestaltung und des pädagogischen Konzepts auf Qualitätsmerkmale des Unterrichts

Indikatoren guten Unterrichts sind vielfältig und manifestieren sich darin, individuelles Lernverhalten und deren individuelle Determinanten positiv zu beeinflussen. Im Rahmen der Evaluation wurden folgende Indikatoren fokussiert: Inwieweit begünstigt das Unterrichtshandeln, dass (1) Schülerinnen und Schüler ihre Aufmerksamkeit auf den Unterrichtsstoff lenken, (2) kognitiv aktiviert werden und so über die Lehrinhalte nachdenken, (3) bei Schwierigkeiten und Unsicherheiten konstruktiv unterstützt werden und (4) die Instruktion klar und verständlich für die Schülerinnen und Schüler ist.

#### Aufmerksamkeit und kognitive Aktivierung

Durch beispielsweise positives Classroom Management können Lehrkräfte dazu beitragen, dass Schüler weniger durch Störungen abgelenkt werden und so verstärkt ihre Aufmerksamkeit auf die Lehrinhalte richten. Erfasst wurde die Aufmerksamkeitssteuerung auf die Lehrinhalte mit Items wie „Im [Fach]Unterricht bin ich gedanklich abwesend“ (negativ codiert) in Anlehnung an Dresel (unveröffentlicht). Die interne Konsistenz der Skala variierte über die Messzeitpunkte hinweg zwischen .82 und .87 und erwies sich somit als messgenau.

Kognitive Aktivierung repräsentiert das Ausmaß an aktiver Auseinandersetzung der Schülerinnen und Schüler mit den Lehrinhalten. Durch beispielsweise entsprechende Fragen oder Aufgabenstellungen der Lehrkraft kann dies begünstigt werden. Erfasst wurde dies mit Items wie „Unser [Fach]lehrer/ unsere [Fach]lehrerin stellt oft Fragen, die man nicht spontan beantwortet kann, sondern die zum Nachdenken zwingen“ (Prenzel et al., 2006). Die Messgenauigkeit war mit Cronbachs Alphas zwischen .73 und .83 gut.

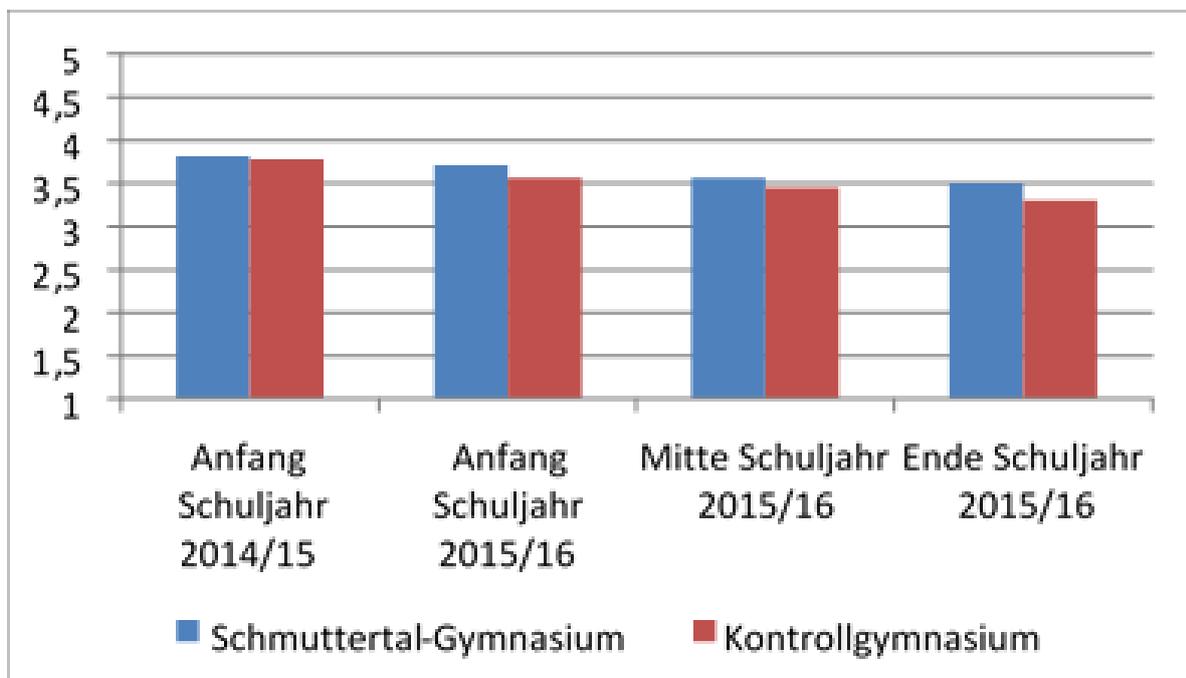


Abbildung 11.3-7: Wirkung der Architektur und des pädagogischen Konzepts auf die Aufmerksamkeitssteuerung der Schülerinnen und Schüler

Die Schüler des Schmuttertal-Gymnasiums berichteten im Vergleich zu den Schülern der Kontrollschulen vor dem Umzug und dem verstärkten Arbeiten mit LernLandschaften vergleichbare Aufmerksamkeit auf die Lehrinhalte. Im neuen Gebäude und dem verstärkten Arbeiten mit LernLandschaften lag die Aufmerksamkeit höher als bei den Kontrollschulen. Im individuellen Vergleich waren keine Unterschiede in der Veränderung zu beobachten.

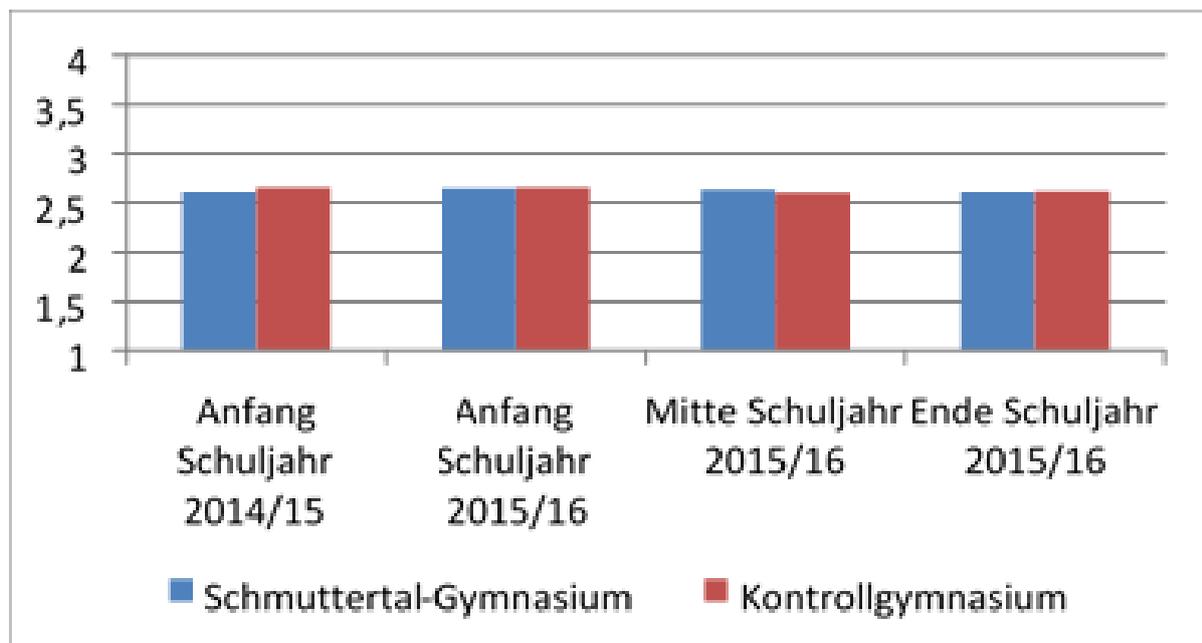


Abbildung 11.3-8: Wirkung der Architektur und des pädagogischen Konzepts auf die kognitive Aktivierung der Schüler

Im Vergleich zu den Schülern der Kontrollschulen berichteten die Schüler des Schmuttertal-Gymnasiums keinen erhöhten kognitiv aktivierenden Unterricht. Auch im Vergleich zu vor dem Umzug und der verstärkten Arbeit mit LernLandschaften wurde auf individueller Ebene keine Veränderung der kognitiven Aktivierung berichtet, was ebenso bei den Schülern der Kontrollschulen der Fall war.

### Konstruktive Unterstützung und Klarheit der Instruktion

Mit konstruktiver Unterstützung wird das Ausmaß an erlebter Unterstützung bei Lernprozessen während des Unterrichts betrachtet. Gemessen wurde diese nach Baumert et al. (2008) durch Items wie „Unser [Fach]lehrer/unsere [Fach]lehrerin unterstützt uns zusätzlich, wenn wir Hilfe brauchen“. Die Messgenauigkeit der Skala ist mit Cronbachs Alphas zwischen .85 und .92 zwischen den einzelnen Messzeitpunkten als gut zu bezeichnen.

Die Klarheit der Instruktion meint das Ausmaß an Verständlichkeit der Instruktion und manifestiert sich nach Baumert et al. (2008) in Items wie „Unser Lehrer unterrichtet [Fach] so verständlich, dass man auch schwierige Sachen begreift“. Cronbachs Alphas lagen zwischen .89 und .94.

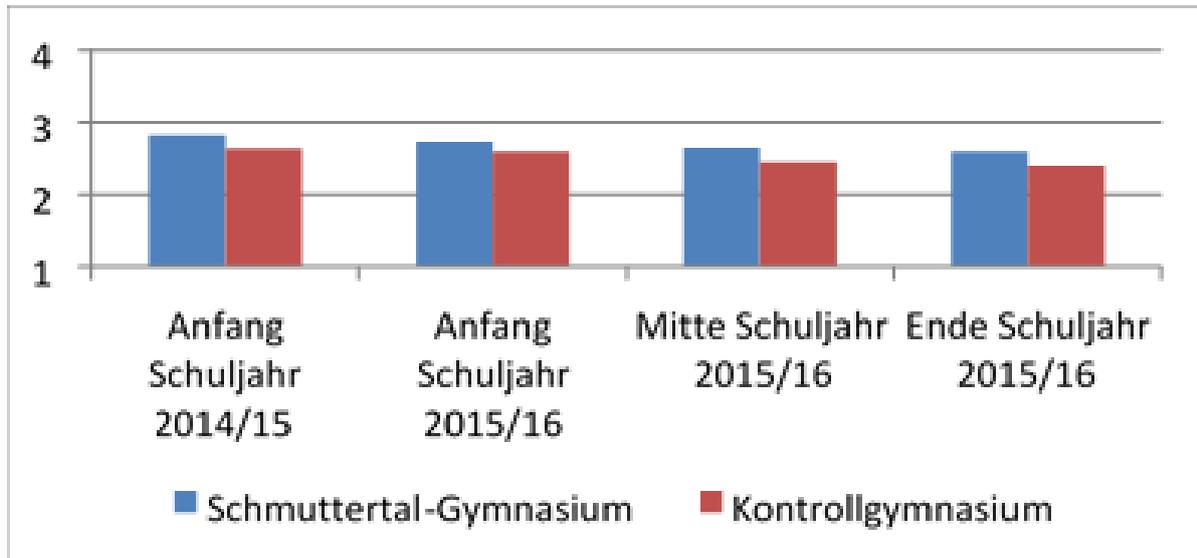


Abbildung 11.3-9: Wirkung der Architektur und des pädagogischen Konzepts auf die konstruktive Unterstützung der Schülerinnen und Schüler

Vor dem Umzug in das neue Gebäude und dem verstärktem Arbeiten mit LernLandschaften berichteten die Schüler des Schmuttertal-Gymnasiums eine konstruktive Unterstützung in ähnlichem Ausmaß wie die Schüler der Kontrollschulen. Nach dem Umzug hingegen erlebten die Schüler des Schmuttertal-Gymnasiums sowohl zu Beginn, zur Mitte und gegen Ende des Schuljahres eine erhöhte konstruktive Unterstützung. Auf individueller Ebene wurde ein Rückgang der konstruktiven Unterstützung berichtet, was bei den Schülern der Kontrollschulen hingegen nicht der Fall war.

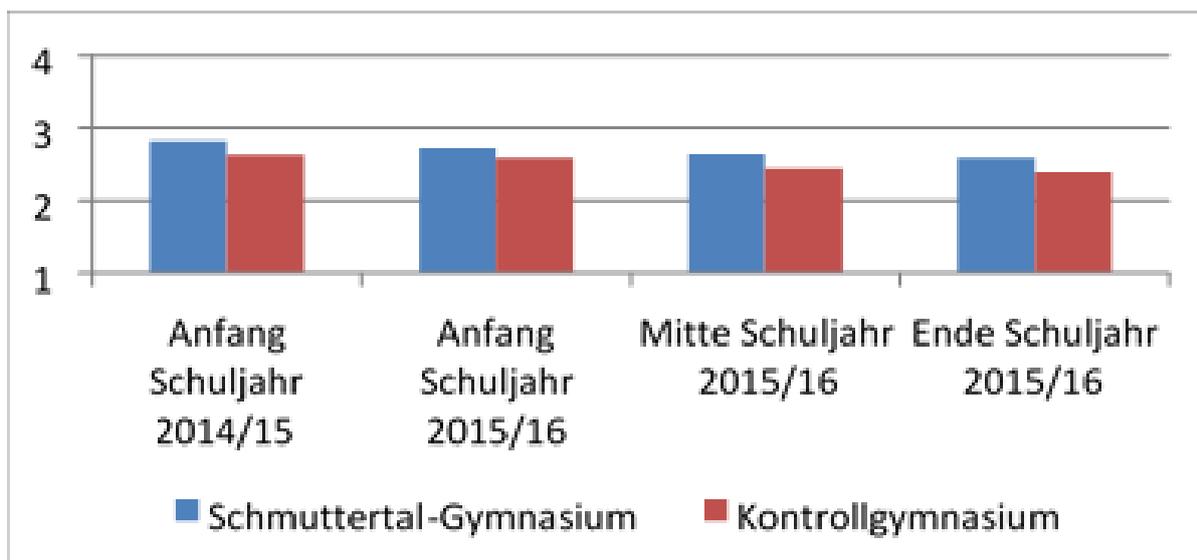


Abbildung 11.3-10: Wirkung der Architektur und des pädagogischen Konzepts auf die Klarheit der Instruktion

Am Schmuttertal-Gymnasium erleben die Schüler die Instruktion ähnlich klar wie an den Kontrollschulen. Auch auf individueller Ebene änderte sich in der Wahrnehmung einer klaren Instruktion nichts. Hierbei unterschieden sie sich nicht von Schülern der Kontrollschulen.

### **Resümee zur Wirkung der Raumgestaltung und des pädagogischen Konzepts auf emotionales Erleben**

Die Ergebnisse geben Hinweise darauf, dass die Raumgestaltung und das pädagogische Konzept der LernLandschaften Aspekte der Unterrichtsqualität positiv beeinflussen können, wofür die Ergebnisse zur Aufmerksamkeitssteuerung und konstruktiven Unterstützung sprechen, nicht jedoch die Ergebnisse zur kognitiven Aktivierung und Klarheit der Instruktion. Eine mögliche Erklärung für diese Befunde könnte eine verstärkte unterstützende Interaktion zwischen Lehrkraft und Schüler sein, die den LernLandschaften immanent ist. Für diese Interpretation sprechen auch die im Folgenden berichteten Ergebnisse zum Klassenklima und dem Sozialverhalten. Für das Verständnis der Veränderungen auf individueller Ebene ist zu reflektieren, dass bereits vor dem Umzug am Schmuttertal-Gymnasium mit LernLandschaften gearbeitet wurde.

### **11.3.3 Wirkung der Raumgestaltung und des pädagogischen Konzepts der LernLandschaften auf das Klassenklima und Sozialverhalten**

Ein wesentlicher Indikator positiven Klassenklimas ist eine (1) positive Lehrer-Schüler-Beziehung. Positives Sozialverhalten der Schüler zeigt sich beispielsweise, wenn diese (2) Gleichaltrige bei (2) persönlichen Problemen oder (3) im Unterricht unterstützen.

#### **Positive Lehrer-Schüler-Beziehung**

Neben positiven Schüler-Schüler-Beziehungen sind positive Lehrer-Schüler-Beziehungen die zentralen Merkmale eines positiven Klassenklimas. Erfasst wurde Letztgenanntes nach Kunter et (2003) mit Items wie „Ich komme mit den meisten Lehrern gut aus“. Über die einzelnen Messzeitpunkte hinweg variierte das Cronbachs Alpha zwischen .85 und .90, was auf eine sehr gute bis gute Messgenauigkeit hinweist.

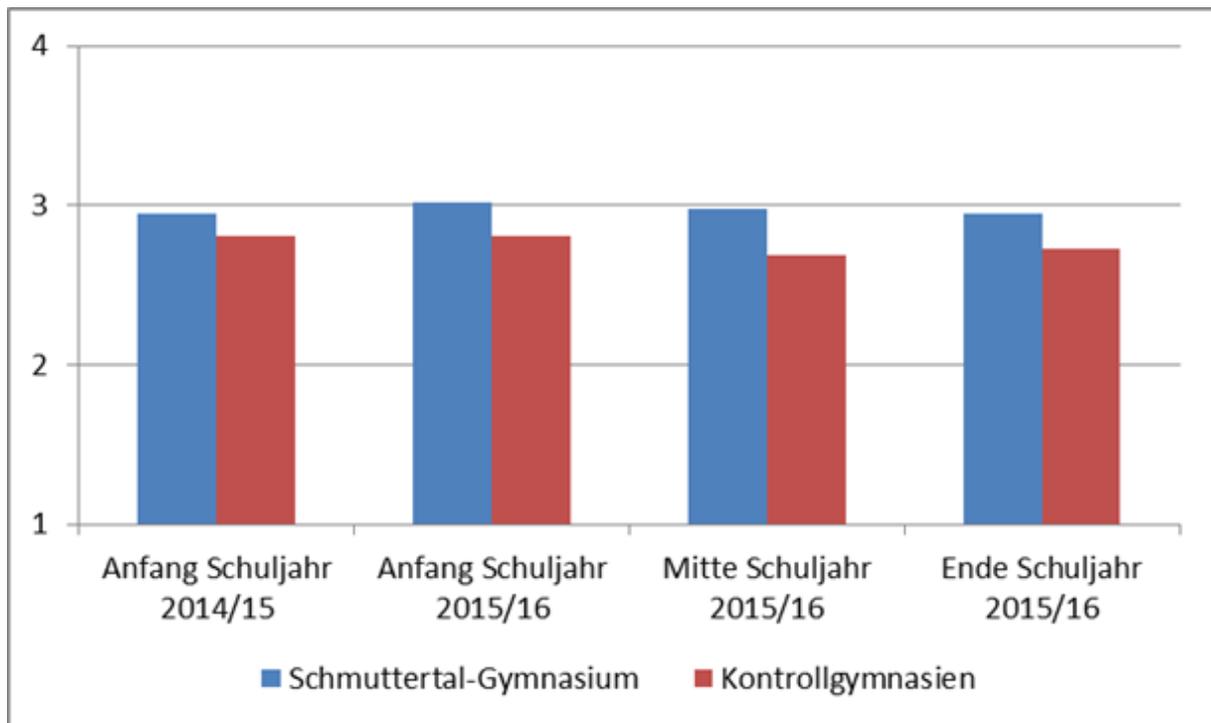


Abbildung 11.3-11: Wirkung der Architektur und des pädagogischen Konzepts auf die Lehrer-Schüler-Beziehung

Während vor dem Umzug und der verstärkten Arbeit mit LernLandschaften keine Unterschiede in einer positiven Lehrer-Schüler-Beziehung zu beobachten waren, berichteten die Schüler zur Mitte und gegen Ende des Schuljahres im Vergleich zu den Schülern der Kontrollschulen von einer positiveren Lehrer-Schüler-Beziehung. Auf individueller Ebene berichteten die Schüler des Schmuttertal-Gymnasiums von einer geringen Verschlechterung der Lehrer-Schüler-Beziehung vor und nach dem Umzug und der damit einhergehenden verstärkten Arbeit mit LernLandschaften, was bei den Schülern der Kontrollschulen nicht der Fall war.

### Unterstützung Gleichaltriger bei Problemen und im Unterricht

Die Unterstützung Gleichaltriger bei Problemen meint das Ausmaß an prosozialem Verhalten bei Problemen anderer. Es wurde über Items wie „Wie oft versuchst du anderen Jugendlichen zu helfen, wenn sie Probleme haben?“ gemessen (Kunter et al., 2003), was mit Cronbachs Alphas zwischen .86 und .89 zu den einzelnen Messzeitpunkten gut reliabel gelang.

Mit dem Ausmaß an positiver Unterstützung von Mitschülern bei Lernprozessen ist die Unterstützung Gleichaltriger im Unterricht definiert. Ein Beispielitem zu dessen Operationalisierung lautet „Wie oft versuchst du deinen Mitschülern bei einer Aufgabe zu helfen, die du schon gelöst hast?“ (Kunter et al., 2003). Auch hier gelang eine überwiegend messgenaue Operationalisierung (Cronbachs Alpha zwischen .86 - .91).

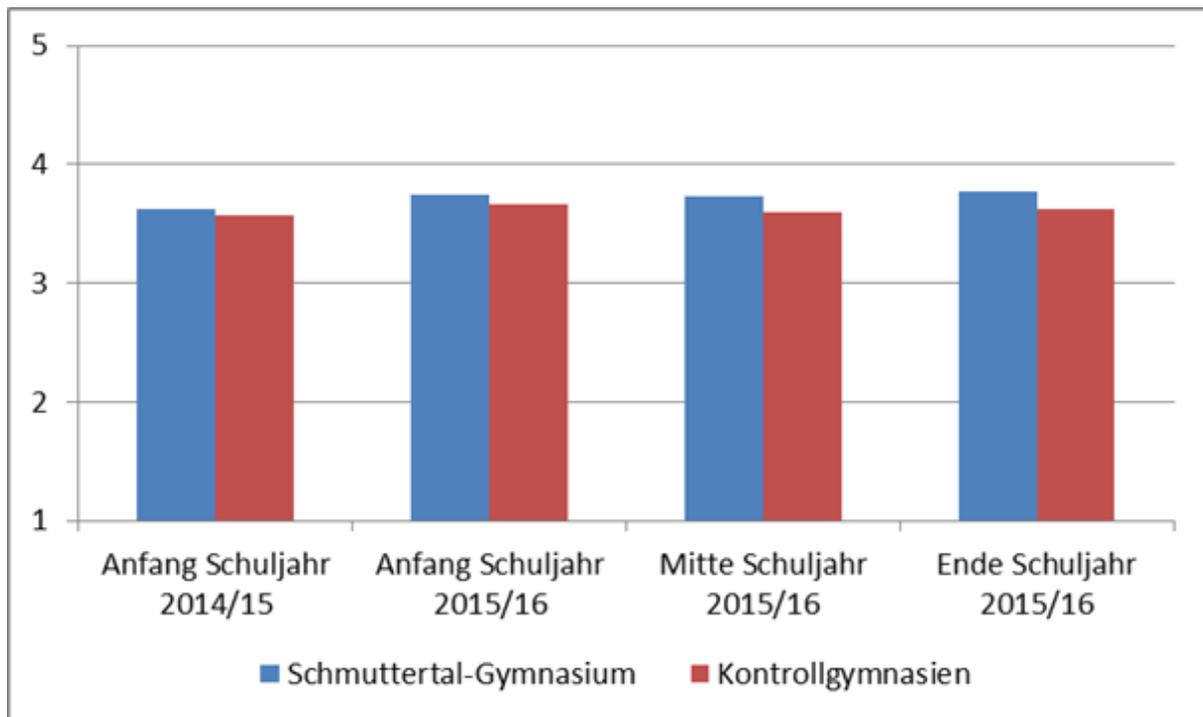


Abbildung 11.3-12: Wirkung der Architektur und des pädagogischen Konzepts auf die Unterstützung Gleichaltriger bei Problemen

Vor dem Umzug und der verstärkten Arbeit mit LernLandschaften und zu Beginn des neuen Schuljahres gab es keine Unterschiede in der Unterstützung Gleichaltriger bei Problemen zwischen den Schulen. Ab der Mitte des Schuljahres nach dem Umzug berichteten die Schüler des Schmuttertal-Gymnasiums im Vergleich zu ihren Peers aus den Kontrollschulen von einer verstärkten Unterstützung Gleichaltriger bei Problemen. Auch auf individueller Ebene wurde eine Steigerung der Unterstützung Gleichaltriger bei Problemen berichtet, was bei den Schülern der Kontrollschulen nicht der Fall war.

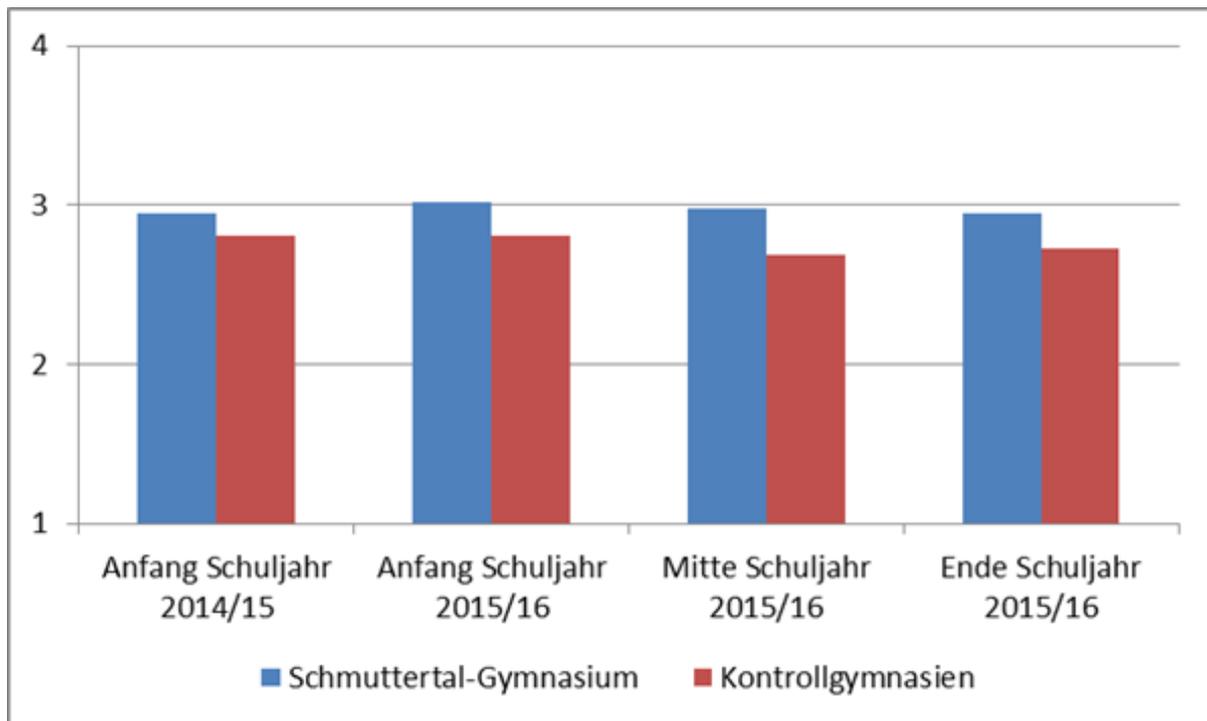


Abbildung 11.3-13: Wirkung der Architektur und des pädagogischen Konzepts auf die Unterstützung Gleichaltriger im Unterricht

Das Ergebnis zur Unterstützung Gleichaltriger im Unterricht ist analog zum Ergebnis zur Unterstützung Gleichaltriger bei Problemen. Es zeichnet sich dasselbe Bild ab – sowohl im sozialen als auch im individuellen Vergleich.

### Resümee zur Wirkung der Raumgestaltung und des pädagogischen Konzepts auf das Klassenklima und das Sozialverhalten

Resümierend verweisen die Ergebnisse darauf, dass die Raumgestaltung und das pädagogische Konzept der LernLandschaften sich günstig auf das Klassenklima und das Sozialverhalten der Schüler auswirken. Das Befundmuster deutet darauf hin, dass dieser Effekt nicht direkt mit der Einführung von LernLandschaften eintritt, sondern erst nach einiger Zeit.

### 11.3.4 Wirkung der Raumgestaltung und des pädagogischen Konzepts auf das Lernverhalten der Schüler

Lernverhalten ist ein komplexer Prozess mit vielfältigen Teilprozessen. Eine bewährte Sicht auf Lernverhalten ist die Betrachtung der Lernstrategien, die Schülerinnen und Schüler anwenden. Wesentliche metakognitive Lernstrategien sind (1) das Planen, (2) die Überwachung (Monitoring) und die (3) Regulation (Anpassung) des eigenen Lernverhaltens.

## Planen

Das Planen beschreibt das Ausmaß planerischer Organisation vor dem eigentlichen Beschäftigen mit den Lehrinhalten. Ein Beispielitem hierzu lautet „Beim Lernen für das Fach [Fach] überlege ich mir vorher, in welcher Reihenfolge ich den Stoff durcharbeite“ (Wild et al., 1992). Die Cronbachs Alphas lagen zu den einzelnen Messzeitpunkten zwischen .82 und .89.

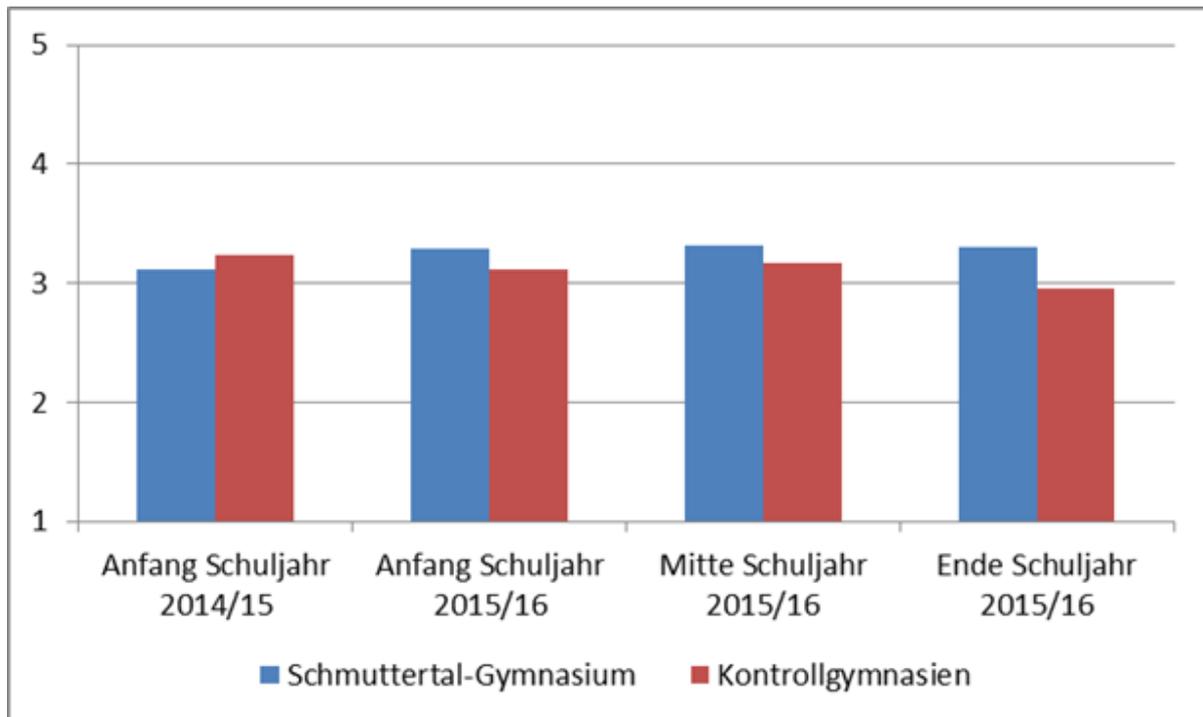


Abbildung 11.3-14: Wirkung der Architektur und des pädagogischen Konzepts der LernLandschaften auf das Planen des Lernverhaltens

Im sozialen Vergleich lagen keine Unterschiede zwischen den Schülern der verschiedenen Schulen vor. Nach dem Umzug in die neuen Räumlichkeiten und der verstärkten Arbeit mit LernLandschaften berichteten die Schüler des Schmuttertal-Gymnasiums von vermehrtem Planen zu Beginn des Schuljahres und am Ende, nicht jedoch zur Mitte des Schuljahres. Im individuellen Vergleich zeichnete sich eine marginal signifikante positive Entwicklung des Planens ab.

## Monitoring

Monitoring meint das Ausmaß an Überwachung des eigenen Lernverhaltens im Sinne dessen, wie zielführend das eigene Lernverhalten ist. Gemessen wurde Monitoring in Anlehnung an Wild et al. (1992) mit Items wie „Beim Lernen für das Fach [Fach] versuche ich festzustellen, ob ich den Stoff auch wirklich verstanden habe“ (Cronbachs Alpha: .83 - .90).

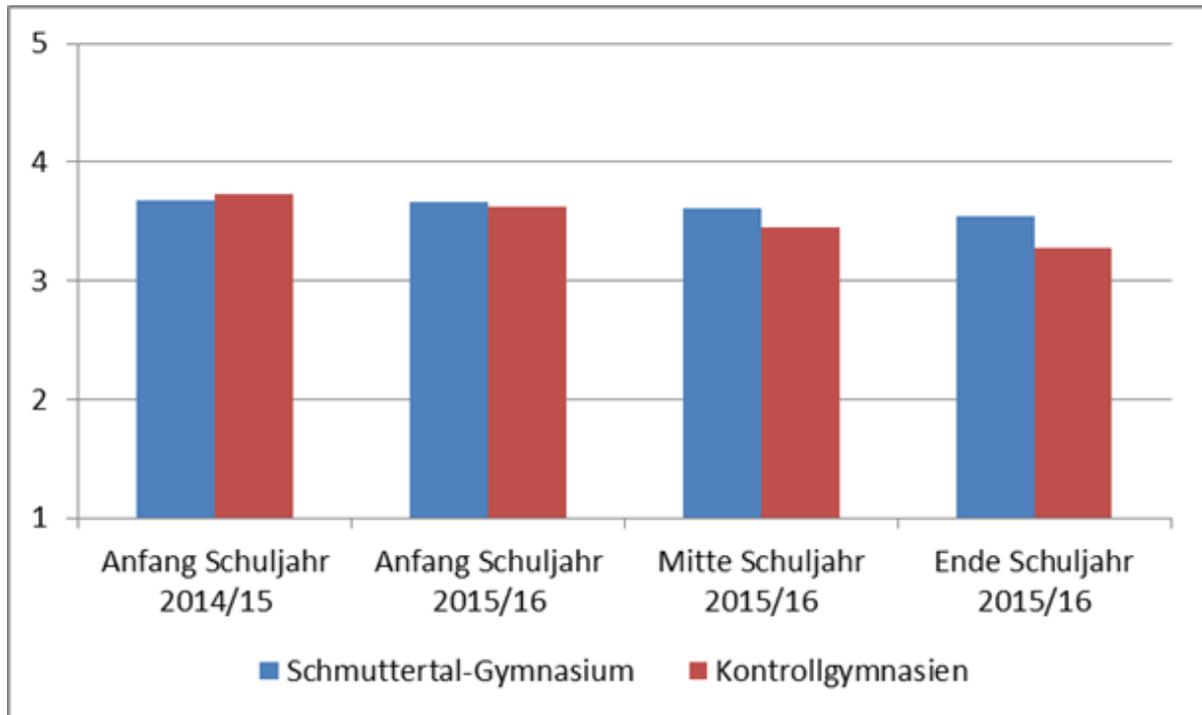


Abbildung 11.3-15: Wirkung der Architektur und des pädagogischen Konzepts der LernLandschaften auf das Monitoring des Lernverhaltens

Während sich die Schüler der verschiedenen Schulen vor dem Umzug in die neuen Räumlichkeiten und der verstärkten Arbeit mit LernLandschaften sowie zu Beginn des Schuljahres nicht unterschieden, so berichteten die Schüler des Schmuttertal-Gymnasiums von vermehrtem Monitoring im Vergleich zu ihren Peers aus den Kontrollschulen. Im individuellen Vergleich wurde keine Veränderung des Monitorings bei den Schülern des Schmuttertal-Gymnasiums im Zuge des Umzugs und der verstärkten Arbeit mit LernLandschaften beobachtet.

### Regulation

Das Ausmaß dessen, wie Schüler ihr Lernverhalten beispielsweise bei Schwierigkeiten oder veränderten Anforderungen anpassen, wird als Regulation bezeichnet. Items wie „Beim Lernen für das Fach [Fach] gehe ich den Stoff noch einmal durch, wenn ich merke, dass ich etwas nicht verstanden habe“ verdeutlichen dies (Wild et al., 1992; Cronbachs Alpha zwischen .72 - .82).

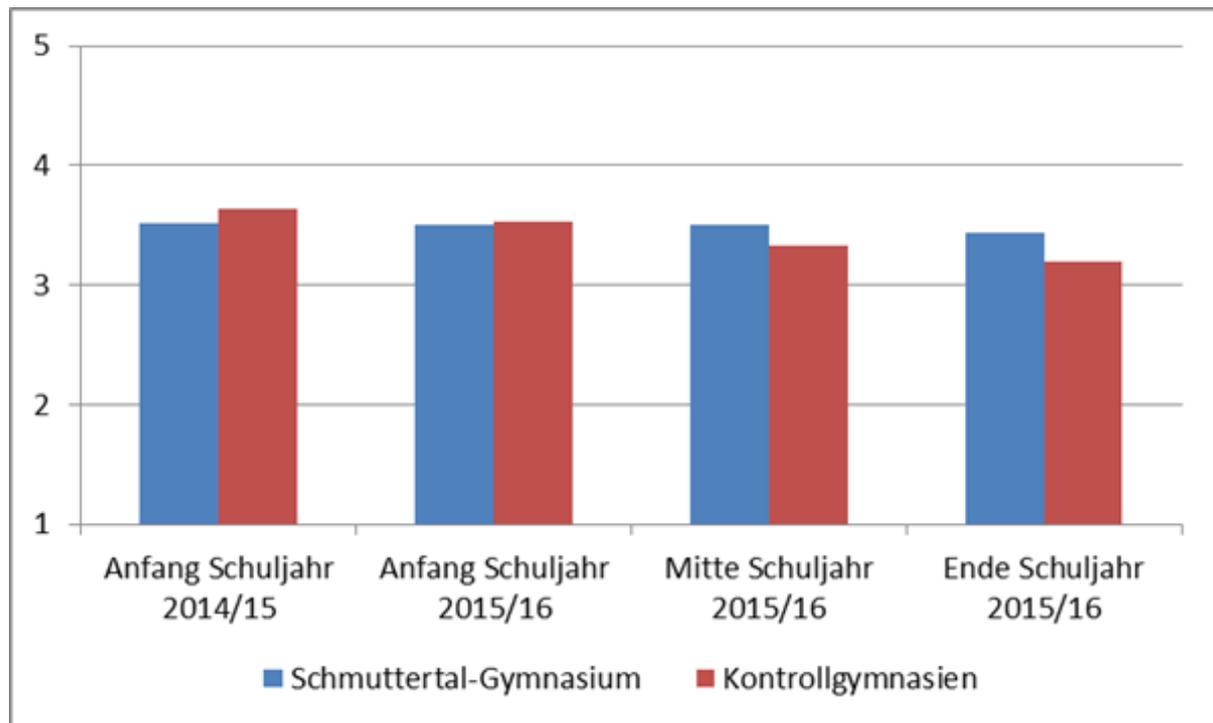


Abbildung 11.3-16: Wirkung der Architektur und des pädagogischen Konzepts der LernLandschaften auf die Regulation des Lernverhaltens

Die Ergebnisse aus dem sozialen Vergleich zur Regulation sind analog zu den Ergebnissen zum Monitoring. Während vor dem Umzug in die neuen Räumlichkeiten und der verstärkten Arbeit mit LernLandschaften und zum Anfang des Schuljahrs keine Unterschiede zwischen den Schulen berichtet wurden, war dies ab Mitte des Schuljahres zugunsten der Schüler aus dem Schmuttertal-Gymnasium der Fall. Auf individueller Ebene waren keine signifikanten Veränderungen zu beobachten.

### **Resümee zur Wirkung der Raumgestaltung und des pädagogischen Konzepts auf das Klassenklima und das Lernverhalten der Schüler**

Resümierend verweisen die Ergebnisse darauf, dass die Raumgestaltung und das pädagogische Konzept der LernLandschaften sich günstig auf das Lernverhalten der Schüler auswirken. Darauf verweisen insbesondere die Ergebnisse zu Monitoring und Regulation. Das Befundmuster deutet darauf hin, dass dieser Effekt nicht direkt mit der Einführung von LernLandschaften eintritt, sondern erst nach einiger Zeit. Diese Interpretation wird auch durch das Ergebnis zum Planen gestützt.

## 11.4 Zusammenfassung

Die Evaluation einer potenziellen Wirkung der Architektur und des pädagogischen Konzeptes der LernLandschaften auf die Lernprozesse der Schüler und das Klassenklima sowie das Sozialverhalten der Schüler erfolgte auf vier Ebenen: Auf Ebene der Unterrichtsqualität, auf Ebene individueller Determinanten schulischer Leistungen, auf Ebene des Lernverhaltens der Schüler sowie auf Ebene des Zusammenlebens.

Resümierend verweisen die Ergebnisse darauf, dass die Architektur und die damit unterstützte Möglichkeit, verstärkt mit LernLandschaften zu arbeiten, das Potenzial hat, Lernprozesse von Schülerinnen und Schülern zu unterstützen. Konkret zeigen die Ergebnisse, dass das Wohlfühlen im Schulgebäude, einzelne Aspekte der Unterrichtsqualität wie die konstruktive Unterstützung und das soziale Zusammenleben davon profitieren. Zugleich sind die Befunde nicht durchgängig bei allen Variablen, was darauf hinweist, dass die Architektur und das pädagogische Konzept der LernLandschaften nicht per se wirken, sondern entscheidend ist, wie Lehrkräfte das Potenzial, das darin steckt, letztendlich nutzen.

## 12 Lebenszykluskosten

### 12.1 Vorgehensweise und Grundlagen

Die vorhergesagten Baukosten der Planungsphase können bei Abschluss der Bauphase mit der Kostenfeststellung der DIN 276 unmittelbar verifiziert werden. Bei den berechneten Lebenszykluskosten muss mindestens eine zwei- oder mehrjährige Nutzungsphase erfolgen, während der die anfallenden Kosten ermittelt, gelistet und zusammen mit den vorhergesagten Ergebnissen verglichen und anschließend bewertet werden.

Die Aufgabe des LCC-Monitorings ist es, die Relevanz der Prognosewerte der LCC-Berechnung in Bezug auf die realen Kostenwerte in den ersten drei Betriebsjahren zu bestimmen.

Mit der Inbetriebnahme des Schmuttertal-Gymnasiums im Schuljahr 2015/2016 wurden auch die anfallenden Kosten für den Betrieb ab dem 01.08.2015 erfasst. Die Datenerfassung wurde durch die entsprechende Stelle in der Verwaltung des Landratsamtes (LRA) als Rechnungsbuchung durchgeführt. Eine Differenzierung und Zuordnung geschieht durch die Vergabe von Kostenstellen für die einzelnen Schulen.

Die Daten wurden als fortlaufende Listen mit Bildung von jährlichen Gesamtsummen zu Verfügung gestellt. Im Laufe des Monitorings wurden im LRA Besprechungen durchgeführt, mit dem Ziel, die Daten derart aufzubereiten, dass eine Auswertung nach der Struktur der DIN 18960 ermöglicht wurde. Insbesondere wurden folgende Einzelaspekte geklärt:

- Kontrolle einiger Datensätze in Bezug auf Jahreszuordnung, Zyklus (einmalig oder wiederholt), Abgrenzung zu Inbetriebnahmekosten (Lüftung) und Dauerbetrieb
- Abgrenzung zu Aufwendungen für Kantine
- Abgrenzung zu Aufwand für Vereine
- Klärung Beträge als Brutto- oder Nettobuchung

Im März 2018 wurden alle identifizierten Probleme in der Abteilung „Gebäudemanagement“ im LRA besprochen. Bisherige Unterlagen für die LCC-Berechnung und die Kostenaufstellung wurden erläutert. Hierbei wurde geklärt, dass alle Kosten als Bruttobeträge gebucht werden, weshalb die Vorhersagewerte in LEGEP, die als Nettobeträge dargestellt sind, für den Vergleich in brutto umgerechnet werden.

Eine Abgrenzung der Energieaufwendungen für die Kantine bzw. den Sporthallenbetrieb am Abend für die Vereine war nicht möglich, da separate Messstellen fehlen. Die Abrechnungen werden jährlich nach dem Haushaltsjahr durchgeführt, nicht nach dem Schuljahr. Diese Gliederung wird beibehalten. Deshalb startet die Zusammenstellung mit dem Jahr 2015 im September als Rumpffahr.

Zu berücksichtigen ist, dass die Schule in den Jahren 2015 bis 2017 noch nicht voll belegt war. Erst seit 2018 sind alle Klassen belegt. Eine Berücksichtigung dieses Umstands ist faktisch nicht möglich, da der Einfluss auf die einzelnen Kostengruppen nicht bestimmt werden kann. Das Faktum würde z. B. einen Anstieg spezifischer Verbrauchszahlen (z. B. Reinigungskosten) erklären. Die Schülerzahlen haben sich folgendermaßen entwickelt:

- 2015/2016: 608
- 2016/2017: 645
- 2017/2018: 697
- 2018/2019: 746

Die bedeutet eine Zunahme von 23 %. Die Lebenszykluskostenprognose beruht auf Flächen und Bauteilen und berücksichtigt keine Auslastungsangaben.

Die obigen Ergebnisse der Recherche wurden in der Sitzung des Monitoring Arbeitskreises am 16.11.2017 vorgestellt. Am 29.03.2018 wurde seitens des LRA Augsburg eine aktualisierte Tabelle der Folgekosten zur Verfügung gestellt. Das erweiterte Ergebnis wurde in der Sitzung am 03.05.2018 vorgestellt. Diese Informationen wurden für das Jahr 2018 im November 2018 ergänzt und bis Ende des Jahres 2018 fortgeschrieben. Dadurch konnten von 2016 – 2018 drei vollständige Betriebsjahre ausgewertet und final in eine vorbereitete Tabelle eingearbeitet werden.

Die folgenden grafischen Auswertungen zeigen links den von LEGEP berechneten Bedarf als Prognosewerte für die Ausgaben des Strombezugs (Farbe hellblau) bzw. die Einnahmen für die Stromeinspeisevergütung (Farbe orangerot) und die aus den gemeldeten Einzelbeträgen zusammengefassten jährlichen Kostenbeträge (Farbe dunkelblau) bzw. Einnahmebeträge (Farbe dunkelrot). Das Jahr 2015 ist ein Rumpffjahr mit den ersten vier Monaten des Schulbetriebs September bis Dezember.

## 12.2 Prognosewerte LEGEP

Die Folgekosten wurden in der LCC-Prognose für die unterschiedlichen Planungsvarianten berechnet. Die folgende Abbildung zeigt bei der Variante „Standard“ die hohen Energiekosten, die in der realisierten Variante des Gebäudes bis auf ein Fünftel des Werts reduziert werden konnten. Die dargestellten prognostizierten Kosten sind noch Nettowerte ohne Mehrwertsteuer.

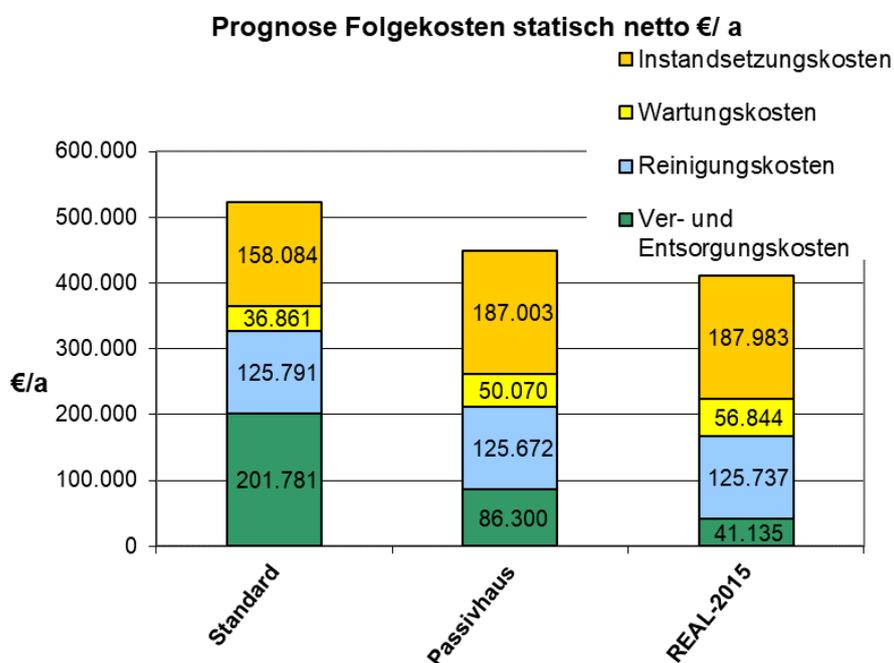


Abbildung 12.2-1: Prognose Folgekosten netto statisch in €/a für drei Varianten

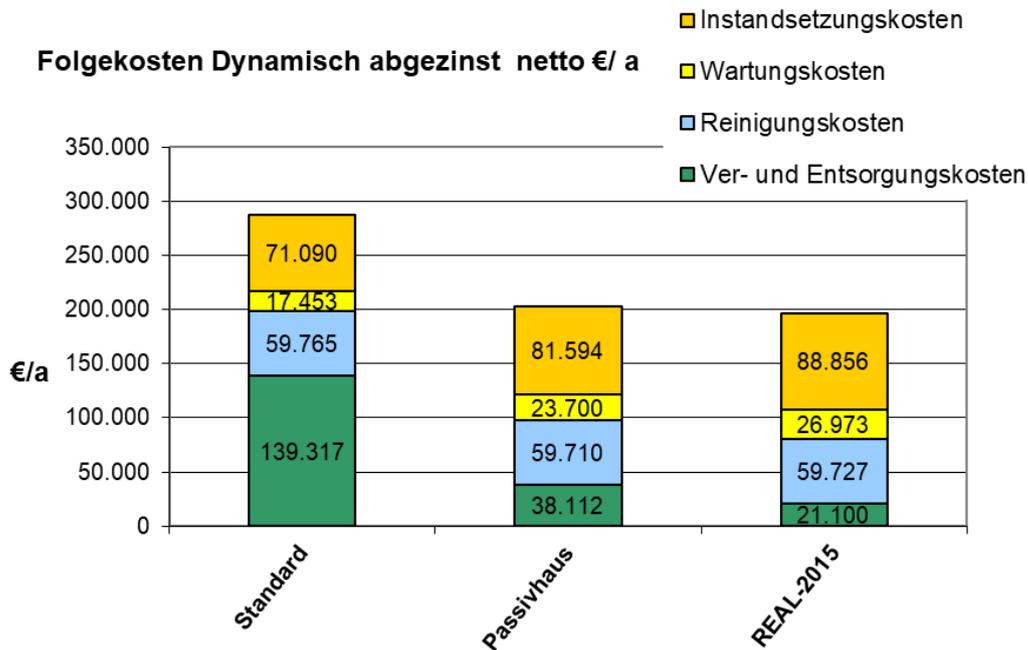


Abbildung 12.2-2: Folgekosten dynamisiert und abgezinst in €/a

Die Abbildung 12.2-2 zeigt im Vergleich zur statischen Berechnung den Einfluss der Preissteigerung bei den Energiekosten der Standardvariante und die Reduzierung des Anteils der Instandsetzung durch den Abzinsungseffekt bei Investitionen, die später im Lebenszyklus auftreten.

Die berechneten Prognosewerte werden als Vorgabe für die vergleichende Betrachtung zu Grunde gelegt.

## 12.3 Auswertung der Betriebskosten

### 12.3.1 Ver- und Entsorgungskosten

Die Prognose für die Versorgung mit Heizung, Warmwasser und Strom basiert auf den Berechnungen des Planungsbüros IP5 aus Karlsruhe für den Bedarf in kWh. Diese wird nochmals in der folgenden Abbildung als Bedarf an kWh/a dargestellt.

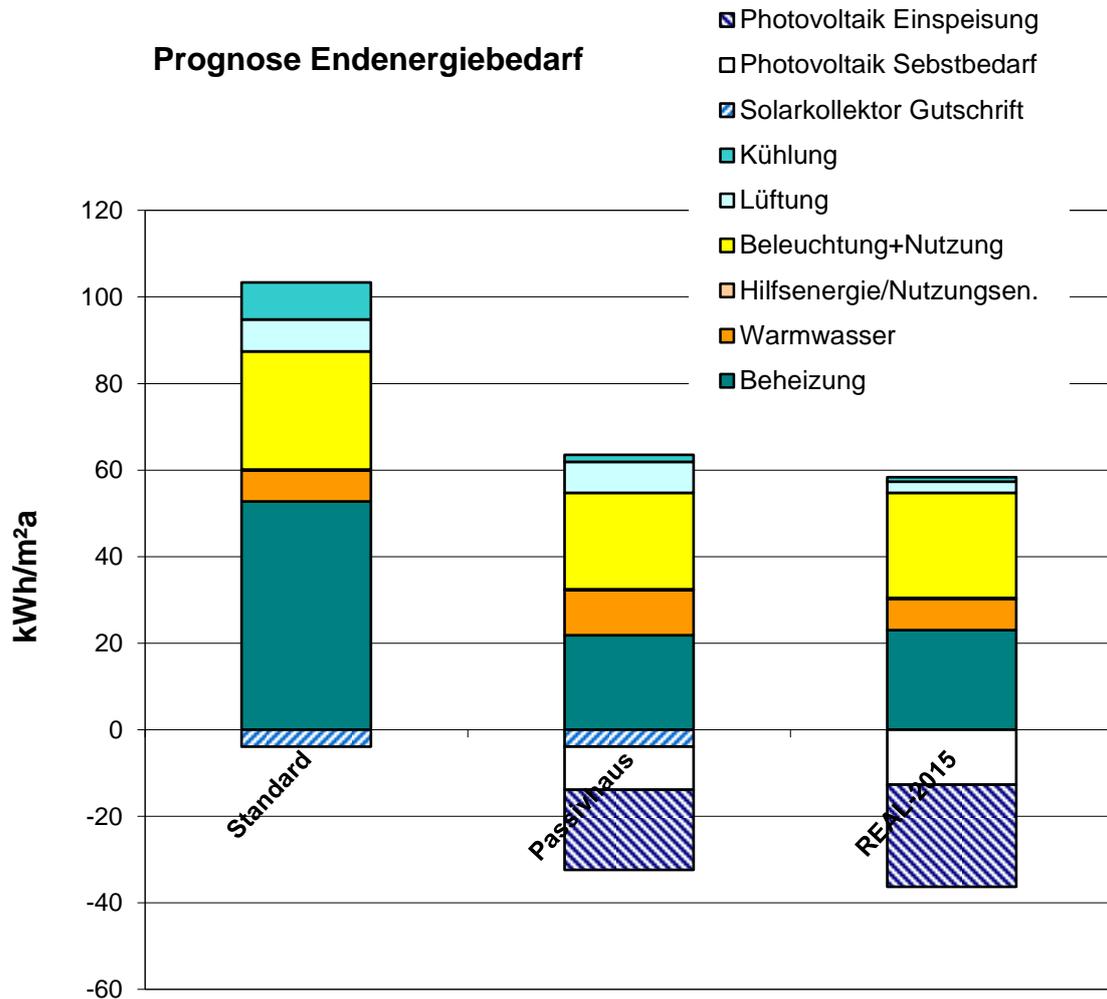


Abbildung 12.3-1: Prognose Endenergiebedarf in kWh/a bezogen auf den m<sup>2</sup> Energiebezugsfläche

Die Abbildung 12.3-2 zeigt den berechneten Endenergiebedarf aufgeteilt auf die verschiedenen Bedarfsquellen. Als negative Werte wird die Stromerzeugung der PV-Anlage dargestellt, aufgeteilt nach Eigenverbrauch und Netzeinspeisung.

### Energiebedarf und Energiekosten elektrischer Strom

Stromverbrauch und Photovoltaikerzeugung liegen als monatliche Einzelwerte, inklusive Eigenverbrauch, ab September 2015 vor. Berücksichtigt werden muss sowohl die Höhe der Einspeisevergütung als auch der Reststrombezug aus dem Netz. Eine finanzielle Deckungsrate von 46 – 48 % wurde erreicht. Dies ist ein sehr guter Wert, da in dem Objekt keine Speichertechnologie eingesetzt wird.

Die folgende Abbildung zeigt die prognostizierten und die realen jährlichen Stromkosten an.

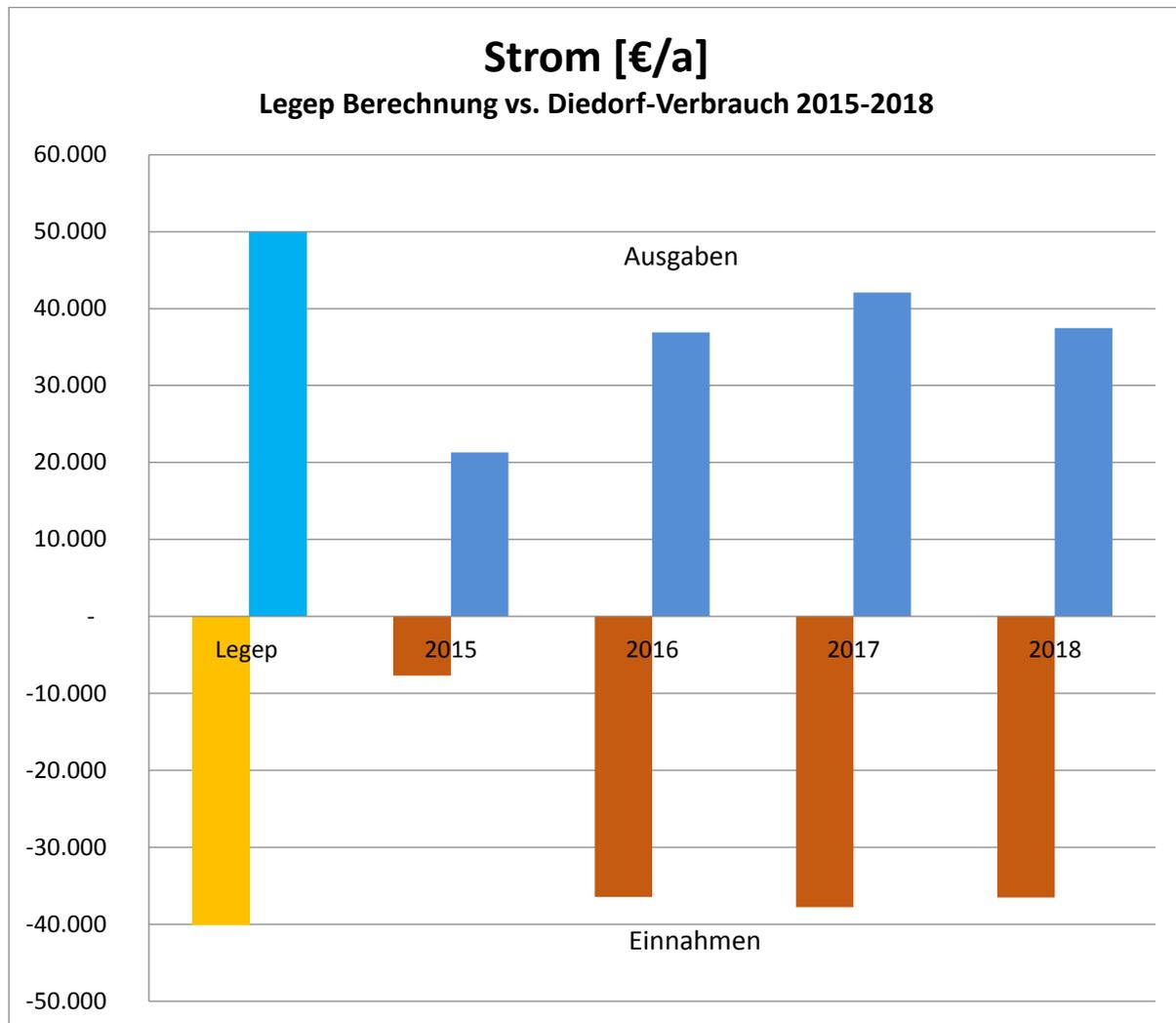


Abbildung 12.3-3: Strombezug und Stromeinspeisung in absoluten Werten €/a brutto

Die Einnahmen aus der Einspeisevergütung wurden mit 40.036 € brutto prognostiziert. Sie erreichen in den Jahren 2016 – 2018 reale Werte zwischen 36.448 € und 37.791 €. Das Jahr 2018 war besonders sonnenreich, trotzdem wurden geringere Werte als 2017 erreicht. Ursache hierfür war die starke Verunreinigung der PV-Paneele durch Taubendreck. Hierfür wird nach einer Abhilfe gesucht.

Die Ausgaben für den Strombezug wurden mit 49.962 € prognostiziert. Von 2016 bis 2018 wurden zwischen 36.893 € bis 42.097 € Strom bezogen.

Die prognostizierte Bedarfsberechnung für den Strom ist sowohl bei den Einnahmen wie bei den Ausgaben etwas höher als der tatsächliche Verbrauch bzw. die Einspeisung. Daraus berechnet sich ein Saldo für etwas höhere Ausgaben in der Höhe von 9.926 € in der Prognose gegenüber 400 € bis 4.300 € in der konkreten Abrechnung. Der geringere Verbrauchswert trotz höherer Schülerzahlen 2018 ist auf die Verbesserungen durch die Monitoring-Maßnahmen zurückzuführen.

Das geringere Ausgabensaldo ist auf die niedrigeren Verbräuche zurückzuführen und die hohe Eigenbedarfsdeckung, die durchschnittlich 45 % pro Jahr erreicht. Dies ist ohne Speichermaßnahmen ein sehr guter Wert.

Die Prognose der Stromkosten lag um ca. 20 % höher.

### Energiekosten Heizung

Heizungskostenwerte liegen in Form des Einkaufs der Pellets vor (1 – 2 x im Jahr), eine restliche eingelagerte Speichermenge an Pellets zum Endzeitpunkt der Datenerhebung konnte nicht ermittelt werden.

Die Ascheentsorgung ist erfasst, die Kosten für den Kaminkehrer sind bei den Wartungskosten verbucht.

Die folgende Abbildung zeigt die prognostizierten und die realen jährlichen Heizungskosten an.

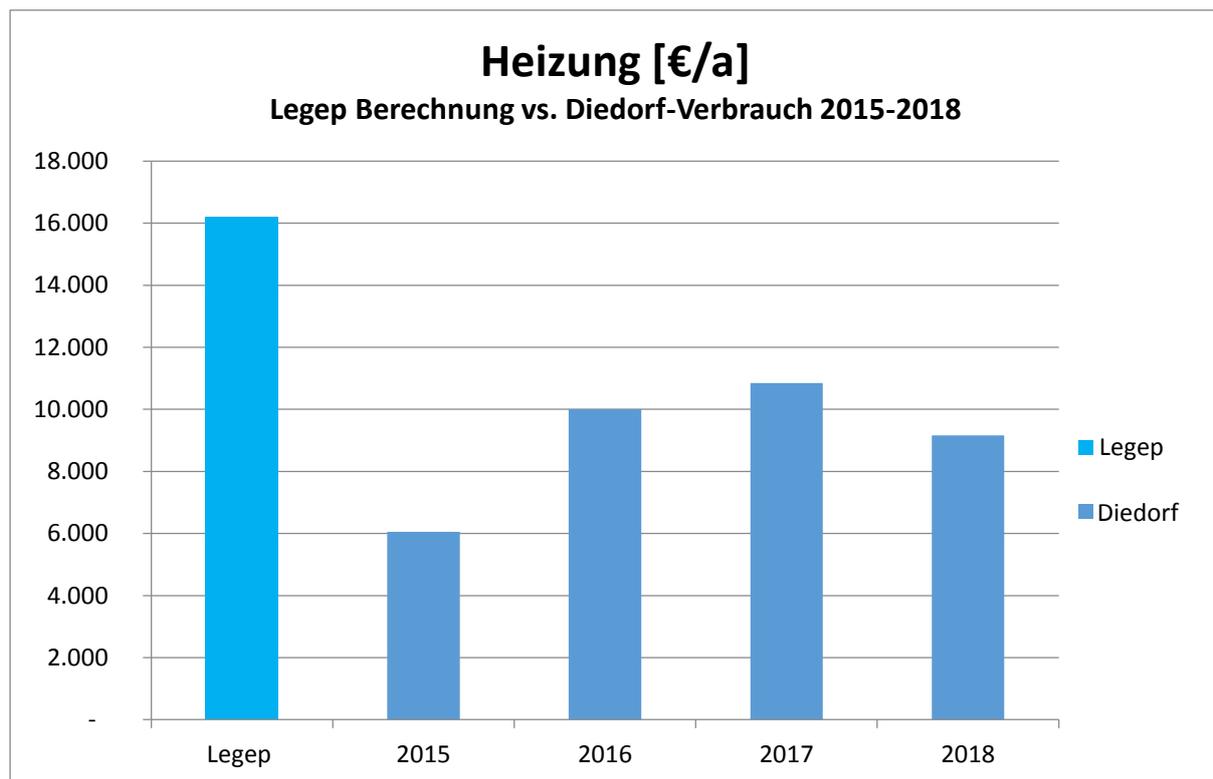


Abbildung 12.3-4: Bezug von Pellets für die Heizung in absoluten Werten €/a brutto

Der Bedarf an Holzpellets wurde mit 16.188 €/a brutto prognostiziert. Die Verbrauchswerte von 2016 bis 2018 liegen zwischen 10.009 € und 9.156 €. Das Jahr 2018 wird bezüglich der Heizgradtage als sehr günstig eingestuft. Eine Unschärfe ergibt sich durch die im Speicher vorhandene Restmenge, die nicht berücksichtigt wurde.

Die Aufwendungen für die Heizung sind um 30 % günstiger als die Prognose.

### Frischwasser – Abwasser

Die Gesamtkosten sind vorhanden in Form pauschaler Abschläge und einer jährlichen Abrechnung. Der Aufwand für den Verbrauch durch die Vereine wird nicht separat erfasst.

Die folgende Abbildung zeigt die prognostizierten und die realen jährlichen Wasser- und Abwasserkosten an.

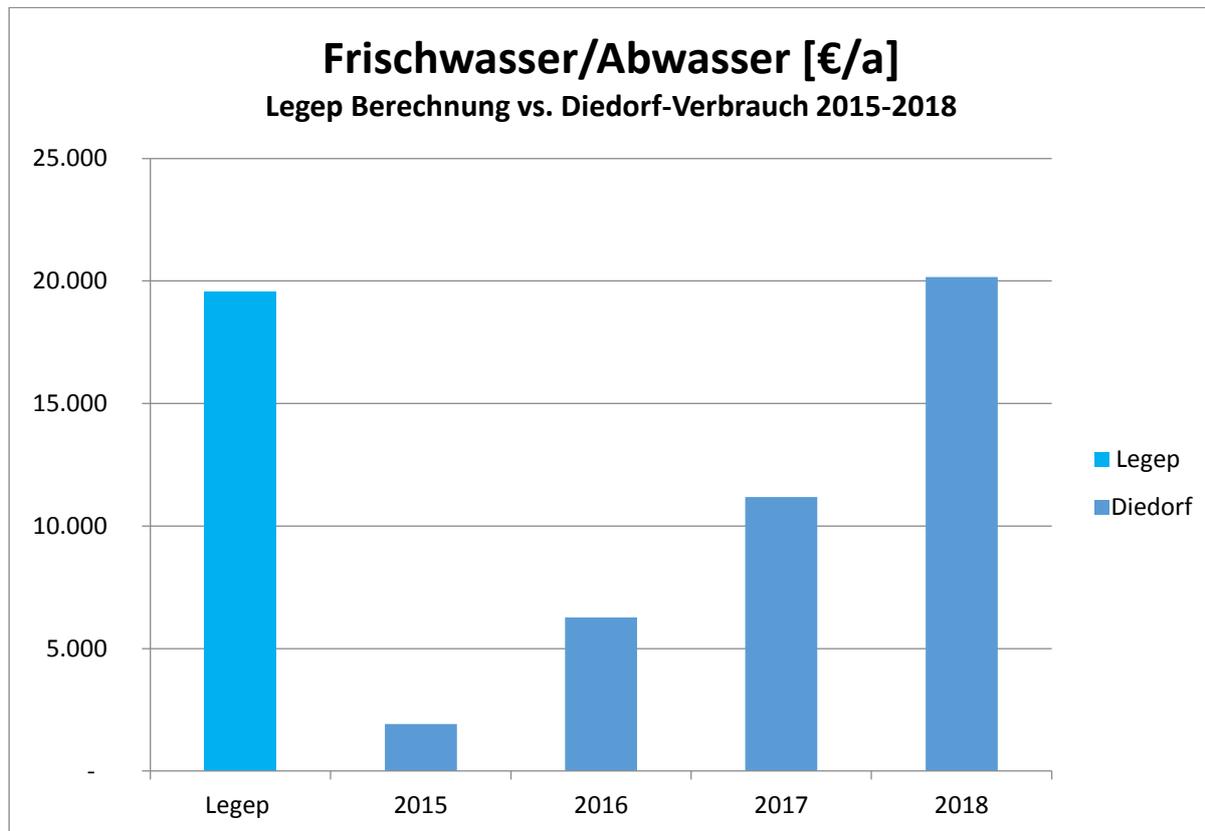


Abbildung 12.3-5: Frischwasser- und Abwasserkosten in €/a absolut brutto

Die Kosten für die Wasserversorgung und Abwasserentsorgung wurden mit 19.549 €/a brutto prognostiziert. Es werden reale Werte von 6.277 € bis 20.159 € erreicht. Das Jahr 2017 liegt mit 11.181 € in der Mitte zwischen den Werten von 2016 und 2018.

Der Verbrauch an Wasser war 2015 sehr hoch, die Außenanlagen wurden wegen des trockenen Sommers beregnet. Zusätzlich mussten vor Inbetriebnahme alle Leitungen gespült werden. 2016 – 2017 war gekennzeichnet durch einen sehr heißen Sommer, der Regenwasserspeicher erhielt bei Trockenheit Wasser über den Feuerwehrrhydrant, da das gespeicherte Regenwasser nicht ausreichte. Der vorgesehene Speichertank ist für die zu bewässernde Fläche zu klein. Diese Wettersituation wiederholt sich im Sommer 2018 abermals. Der extreme Mehrverbrauch 2018 lässt sich allein dadurch nicht erklären. Bei der Endbesprechung führte der Hinweis von ZAE auf ein nicht funktionierendes Ventil bei der Kühlanlage zu der Überlegung, dass der hohe Wasserverbrauch darauf zurückzuführen ist. Ein Vergleich der jährlichen Abrechnungsbeträge sollte in der Datenanalyse zur Aufdeckung derartiger Problemfälle führen.

Der prognostizierte Bedarf wird für den Endausbau als ausreichend genaue Vorhersage für den Verbrauch eingestuft.

### Gesamtbetriebskosten für Ver- und Entsorgung

Die gesamten Ver- und Entsorgungskosten bzw. Betriebskosten für Strom, Heizung, Wasser und Abwasser wurden als Saldo der Einnahmen und Ausgaben für die Prognose mit 45.663 € angegeben. Der tatsächliche Saldo der Einnahmen und Ausgaben liegt zwischen 17.000 € und 30.200 €. Die Schule im Vollbetrieb wird den Prognosewert wahrscheinlich um 30 % unterschreiten.

Die folgende Abbildung zeigt die prognostizierten und die realen jährlichen Betriebseinnahmen und -kosten an.

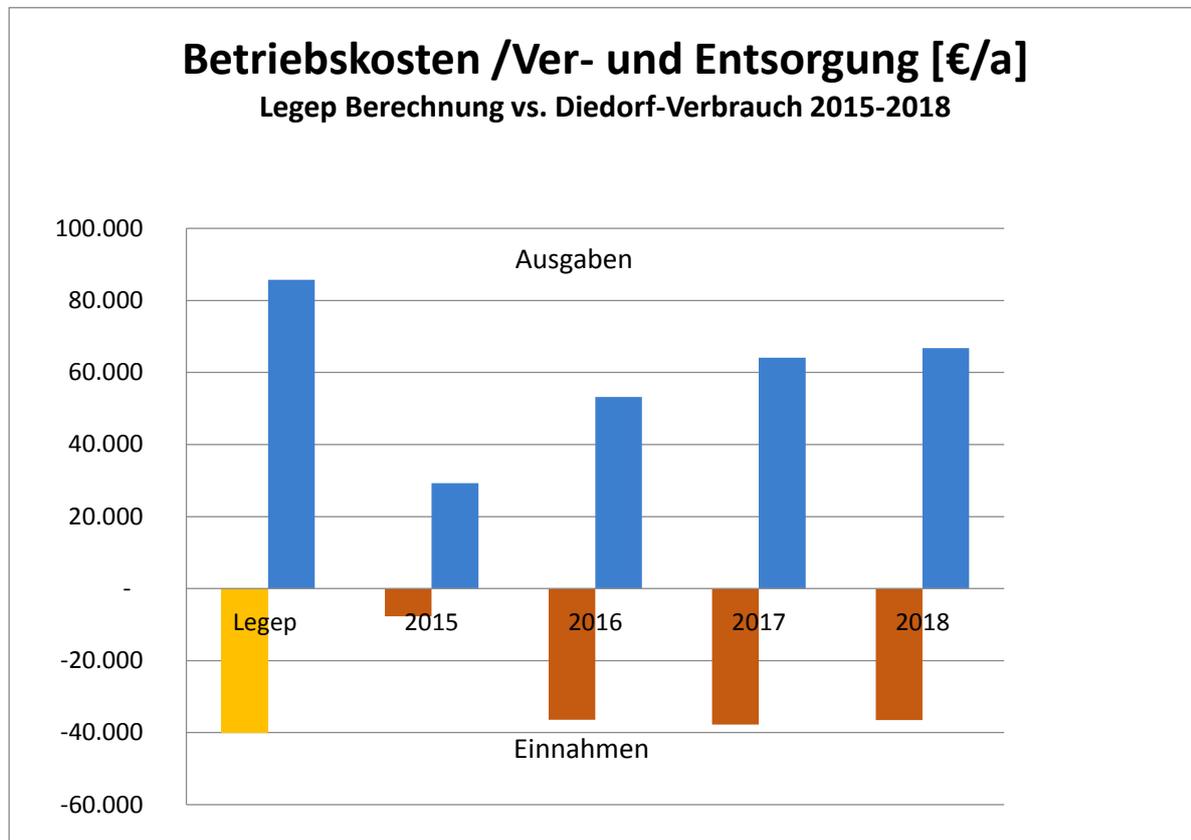


Abbildung 12.3-6: Ver- und Entsorgungskosten als Einnahmen und Ausgaben €/a absolut brutto

### 12.3.2 Reinigungskosten

Die Unterhaltsreinigung wurde nach einer Ausschreibung inklusive Sonderreinigung und Grundreinigung an eine Firma vergeben. Details des Vertrages sind nicht bekannt. Die Glasreinigung wurde separat vergeben.

Die nachfolgende Abbildung zeigt die prognostizierten und die realen jährlichen Reinigungskosten an.

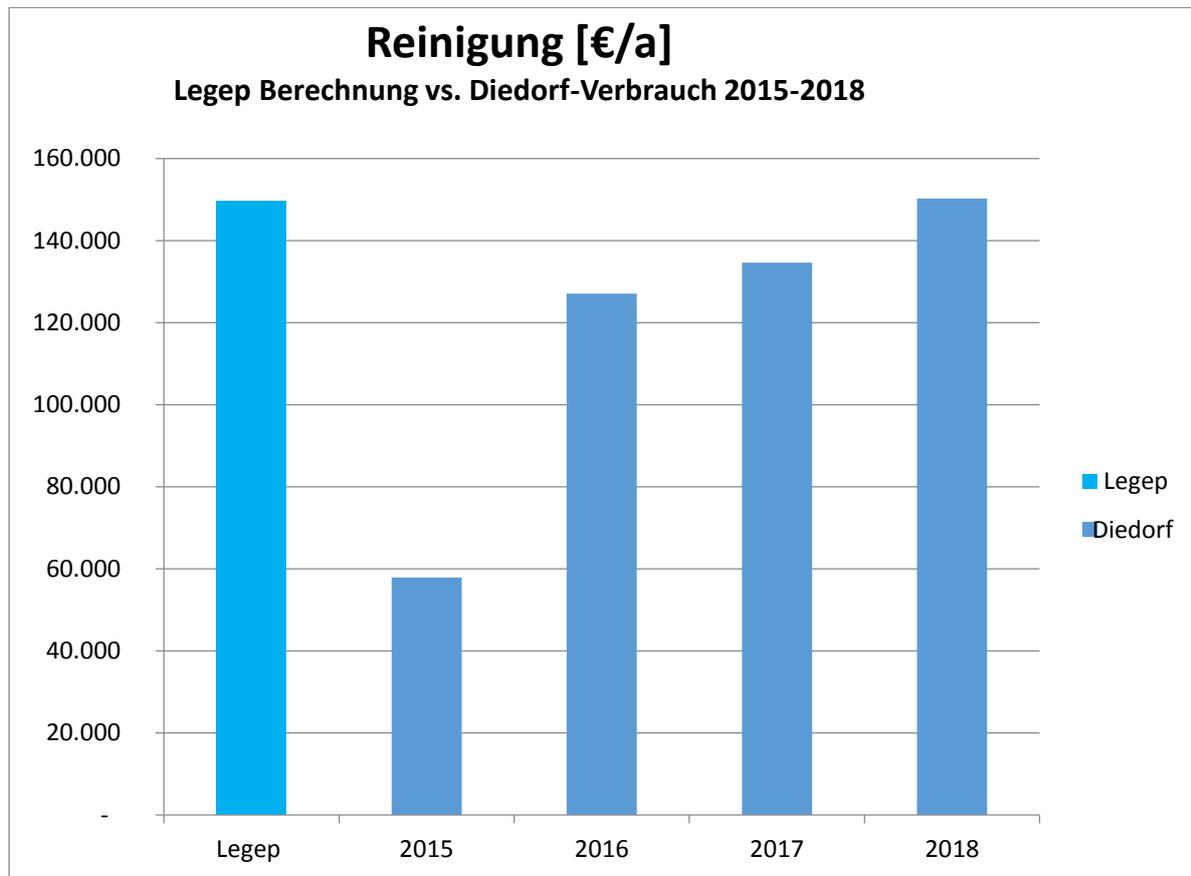


Abbildung 12.3-7: Reinigungskosten in €/a absolut brutto

Die Reinigungskosten wurden mit 149.627 € brutto prognostiziert. Sie erreichen ansteigend von 2016 bis 2018 im letzten Schuljahr den Höchstbetrag von 150.259 €. Die jährlich steigenden Reinigungskosten sind auf die Klassenzuwächse zurückzuführen. Außerdem wurde 2018 eine Sonderreinigung der Böden für ca. 10.000 € durchgeführt.

### Nicht berücksichtigte Kostenstellen bei der Reinigung

Die Ausgaben für den Hygienebedarf sind eine gesonderte Position, die von der Lebenszykluskostenberechnung bisher nicht erfasst wird. Die Ausgaben erreichen Werte von ca. 10.000 € jährlich und sollten deshalb nicht vernachlässigt werden. Grundsätzlich ließe sich ein Hygienebedarf mit den Elementen der Toiletten, Urinale und Waschbecken verknüpfen.

Ebenfalls nicht erfasst werden bislang Kostenangaben für die Müllentsorgung, da diese nicht einem Gebäudebauteil direkt zugeordnet werden können. Die Kosten erreichen in Diedorf ca. 5.800 €.

### 12.3.3 Wartungskosten

Die Wartung besteht aus vielen verschiedenen Einzelposten. Mehrere Wartungsverträge wurden teilweise erst 2016 nach der Behebung von Einzelmängeln abgeschlossen. Zu unterscheiden ist zwischen Wartungsarbeiten von Firmen und Prüfungen durch den TÜV.

Aufwändige Posten sind die Türenwartung, die Brandmeldeanlage mit einem Betrag von ca. 30.000 € Leasing im Jahr und die Automation mit der EDV-Anlage und die damit verbundenen Update-Kosten in Höhe von ca. 20.000 €/Jahr. Die Leasingrate für die Brandmeldeanlage wird von den Wartungskosten getrennt erfasst, da sie eigentlich Teil der Gebäudeherstellung sind. Diese Entscheidung wurde aus Gründen der technologischen Entwicklung getroffen, da die Anlagen einer ständigen Neuanforderung aufgrund von Normenentwicklungen unterliegen. Die jetzige Lösung führt wegen der hohen Leasingrate zu einer Verzerrung der Lebenszykluskostenrechnung, wenn sie in der Aufstellung berücksichtigt wird.

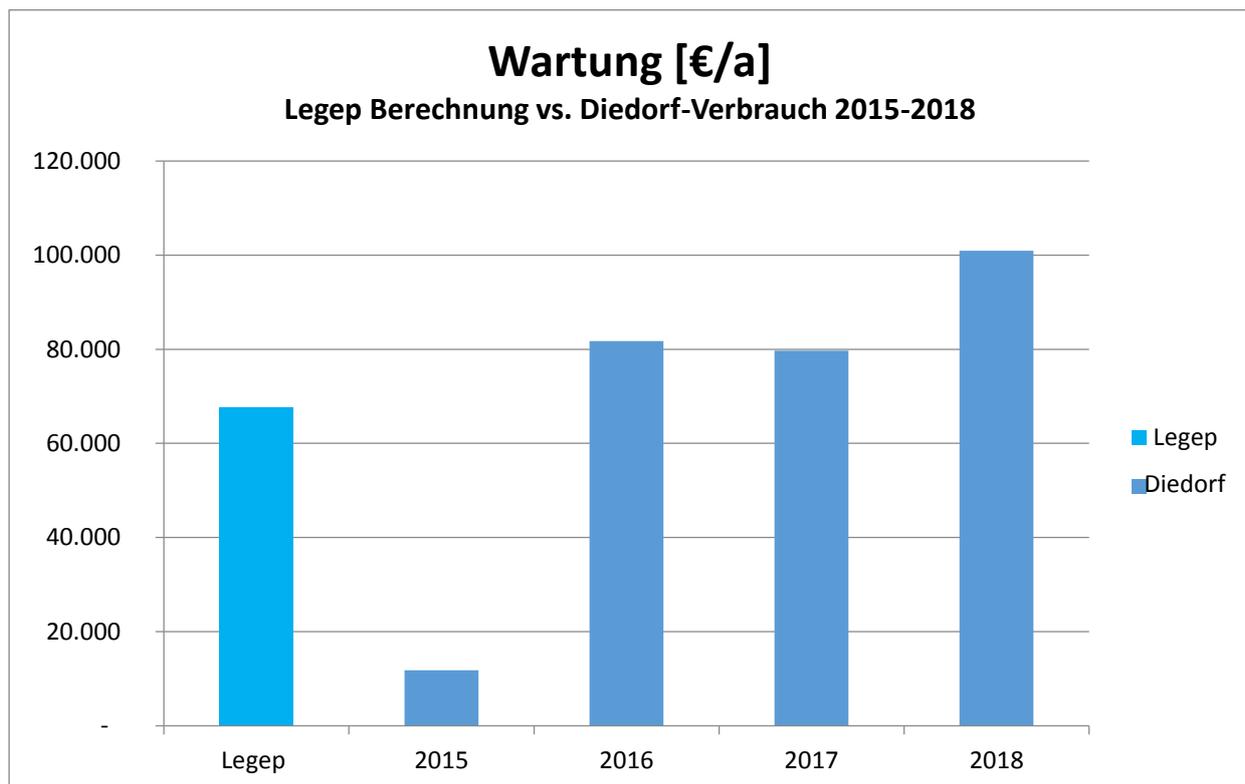


Abbildung 12.3-8: Wartungskosten in €/a brutto absolut

Die Wartungskosten wurden mit 56.844 € brutto prognostiziert. Die realen Kosten betragen in den Jahren 2016 und 2017 ca. 80.000 €. 2018 steigen sie um ca. 25 % an. Ursache für den Anstieg sind falsche Rechnungsstellungen der Aufzugsfirma und kleinere prozentuale Steigerungen bei verschiedenen Wartungsverträgen durch einen höheren Leistungsumfang.

#### Nicht erfasste Kostenstellen

Nicht erfasst werden bei den Wartungskosten die IT-Anlagen des Unterrichts, da die Lehrmittel nicht zu der Kostenstelle „Gebäudebetrieb“ zählen. Die Schmuttertalschule ist eine „White-board“ Schule. Dies bedeutet, dass die durch den Lehrer vorbereiteten Unterrichtsinhalte mittels Beamer projiziert werden. Der dafür notwendige Strombedarf für die Hardwareeinheit Rechner und Beamer ist im Stromverbrauch der Schule enthalten. Ein Diskussionspunkt bei der Verbrauchsanalyse war der Strombedarf am Wochenende, der durch den Dauerbetrieb dieser technischen Anlagen verursacht

wird. Ein Abschalten der Betriebseinheiten sei nicht möglich, da am Wochenende die Softwareupdates automatisch aufgespielt werden müssen.

Eine Anfrage beim Landratsamt Augsburg bezüglich der Kosten für diese Form des Lehrbetriebs ergab einen Betrag von ca. 22.000 €/a für die Leitungs- und Telefonanlagenkosten. Weiterhin müssen die jährlichen Software-Updatekosten für die Betriebssysteme berücksichtigt werden. Dieser Betrag konnte noch nicht in Erfahrung gebracht werden.

#### **12.3.4 Reparaturkosten**

Reparaturkosten wurden in der Lebenszykluskostenprognose nicht berücksichtigt, da sie mittels einer Zyklusangabe nicht vorhersagbar sind. Im Zertifizierungssystem nach BNB bzw. DGNB werden Reparaturkosten angesetzt. Die Werte werden im Zertifizierungssystem nach BNB gemäß einer Methode des VDI (Verein Deutscher Ingenieure) auf Basis der Herstellungskosten nach fixen Prozentsätzen ermittelt.

Wird diese Methode auf das Projekt des Gymnasiums angewendet, ergeben sich Reparaturkosten in Höhe von 66.600 €/a. Dieser Wert wird für den Monitoringvergleich in der Folgekostenbilanz ergänzt.

#### **12.3.5 Instandsetzungskosten**

Für die Ermittlung der Instandsetzungskosten können verschiedene Methoden angewendet werden. Ein Vorschlag der Kommunalen Gemeinschaftsstelle für Verwaltungsmanagement geht von 1,2 % des Wiederbeschaffungszeitwertes (WBZW) pro Jahr aus. Bei einem Bruttoansatz von 27.000.000 € brutto beträgt die Rücklage für die Instandsetzung jährlich 324.000 €. Der statische Ansatz berücksichtigt den unterschiedlichen Instandsetzungsbedarf entsprechend des Baualters nicht.

Eine an der Universität Karlsruhe entwickelte Methode dynamisiert den WBZW nach dem Baualter mit in Dezennien steigenden Aufwendungen. In den ersten 10 Jahren werden 0,6 % der Herstellungskosten angesetzt. Für das Schmuttertal-Gymnasium würde danach ein Betrag von 162.000 € anfallen.

Im Programm LEGEP werden die Instandsetzungsaufwendungen entsprechend der Erneuerungszyklen der Bauteile berechnet. Eine reguläre Instandsetzung beginnt erst nach ca. 7 Jahren mit den Erneuerungsbeschichtungen. Alle Instandsetzungsaufwendungen für 50 Nutzungsjahre werden summiert und pro Jahr angegeben. Dieser Wert bildet dann die Rückstellung für die Instandsetzungen. Statisch berechnet wurde er mit 223.700 €/a brutto berechnet. Für den Barwert abgezinst wurde er mit 105.700 €/a brutto berechnet.

Die folgende Abbildung zeigt die Ergebnisse der verschiedenen Methoden im Überblick.

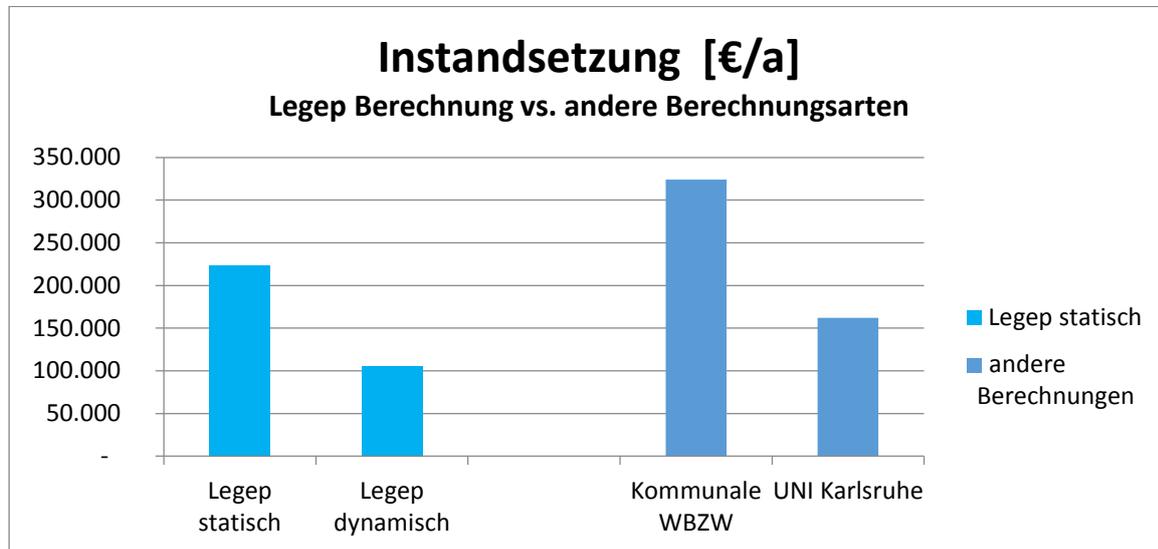


Abbildung 12.3-9: Ergebnisse für die Berechnung der Instandsetzungsaufwendungen in €/a brutto absolut

Die Ergebnisse der LEGEP-Barwertberechnung werden im Rahmen der Gesamtübersicht der Folgekosten berücksichtigt.

### Weitere nicht erfasste Kostenstellen

#### Außenanlage – Dachbegrünung

Die Außenanlagen und damit auch die Dachbegrünung werden in der LCC-Kalkulation nicht erfasst, da diese der Kostengruppe 500 zugeordnet werden. Die Lebenszykluskostenberechnung konzentrierte sich auf das Gebäude mit den Kostengruppen 300 und 400 nach DIN 276. Eine Angabe zur Kostengruppe 500 wäre bei Schulbauten mit den intensiv genutzten Freibereichen (Sport- und Pausenflächen) auf jeden Fall informativ. Die Pflege der Dachbegrünung kostete 2018 14.800 € brutto. Die Pflege und Wartung der Außenanlagen kostete zwischen 8.000 und 12.600 €/a brutto.

#### Personal

Berechnet wird eine Vollstelle für den Hausmeister. Personalkosten werden bislang in den LCC-Kosten nicht erfasst.

### 12.3.6 Gesamtübersicht

Die untere Abbildung zeigt die gesamten Folgekosten ohne Instandsetzungskosten jedoch mit den ergänzten Reparaturkosten, da dies der Ausgabensituation der Schule durch das Landratsamt entspricht.

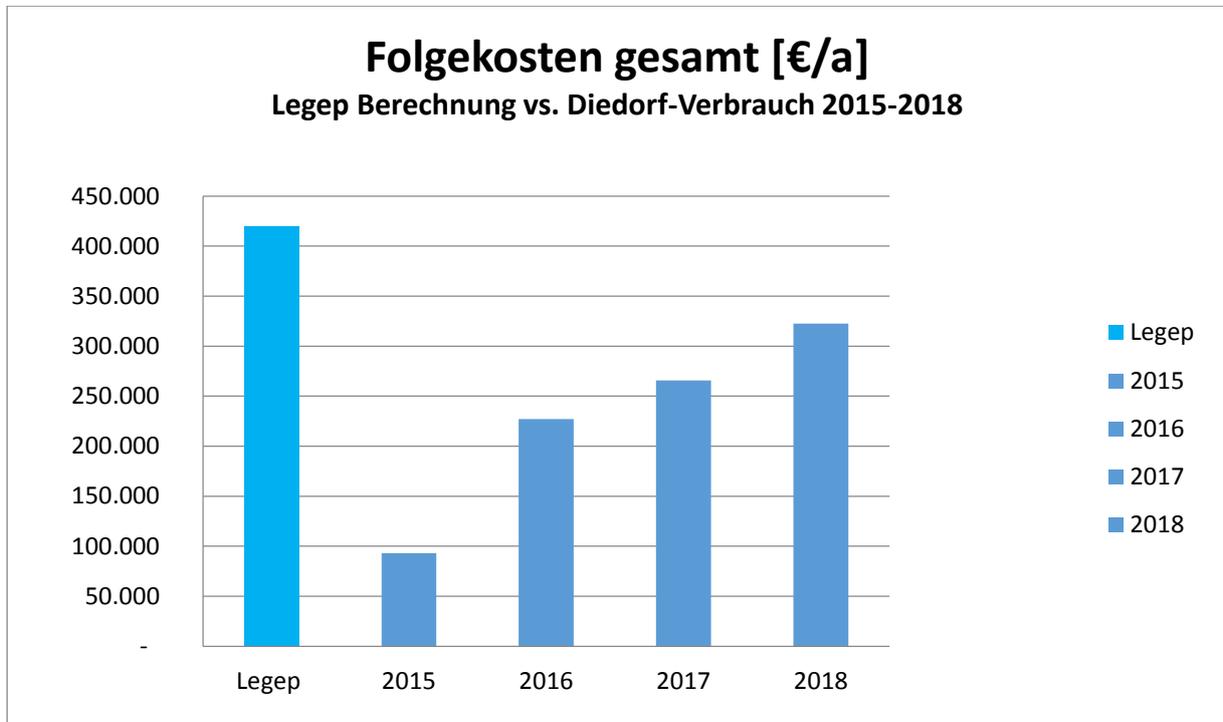


Abbildung 12.3-10: Gesamte Folgekosten in €/a brutto Prognose und reale Kosten

Die prognostizierten Ausgaben der Gesamtfolgekosten belaufen sich auf 409.600 €. Die realen Folgekosten (dunkelblaue Säulen) betragen ansteigend 227.020 €, 265.648 € und 322.720 €. Im Jahr 2018 bleiben die realen Folgekosten um 21 % unter dem Prognosewert.

Die Abbildung 12.3-11 zeigt die Folgekosten mit den prognostizierten Instandsetzungsrücklagen (abgezinst).

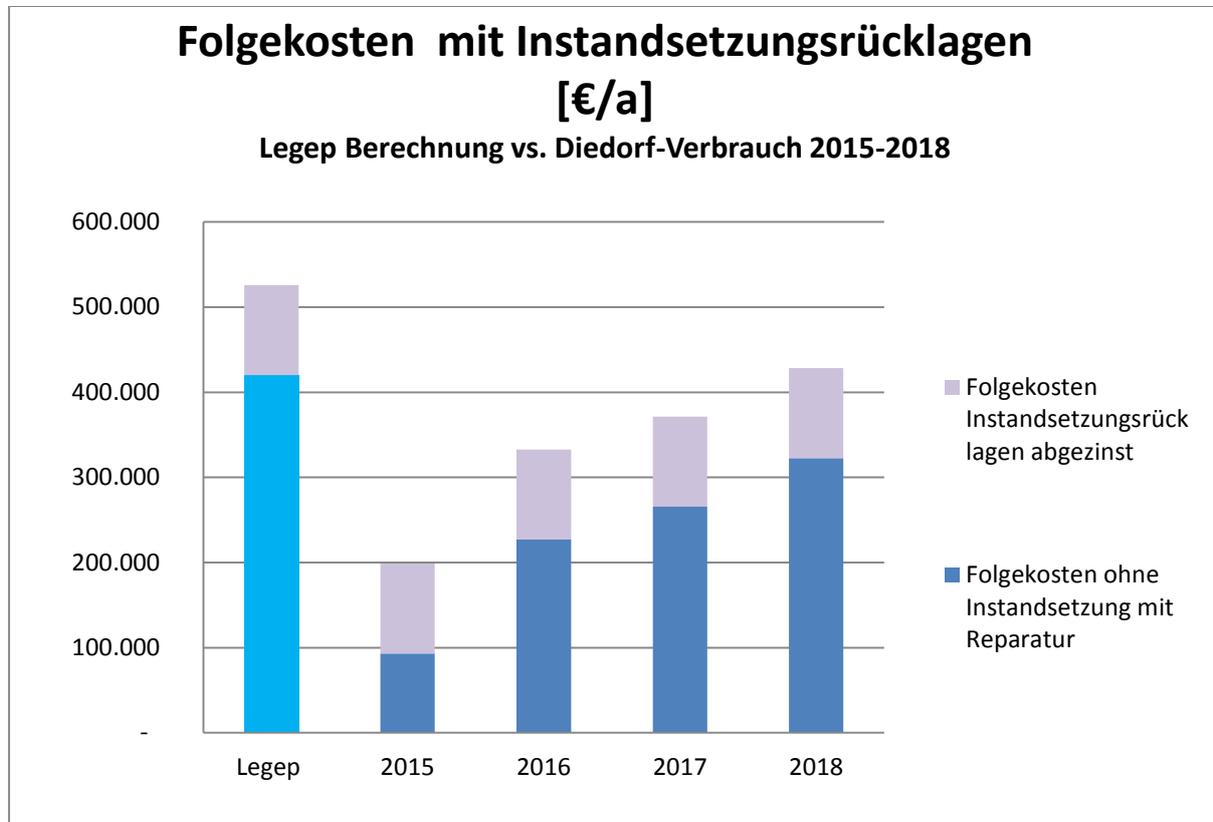


Abbildung 12.3-11: Gesamte Folgekosten mit abgezinster Instandsetzungsrücklage in €/a brutto

Es ergeben sich als Prognosewert 526.500 €, die realen Kosten würden bis 2018 auf 428.500 € ansteigen. Damit bleiben die realen Kosten um 18,6 % unter dem Prognosewert.

### 12.3.7 Kennwerte

Die folgenden Abbildungen beziehen die gesamten Folgekosten inklusive der Reparaturkosten und ohne zusätzliche Instandsetzungsrücklage auf verschiedene Flächenansätze:

- Bruttogrundfläche (BGF)
- Nettoraumfläche (NRF)
- Nutzfläche (NF)

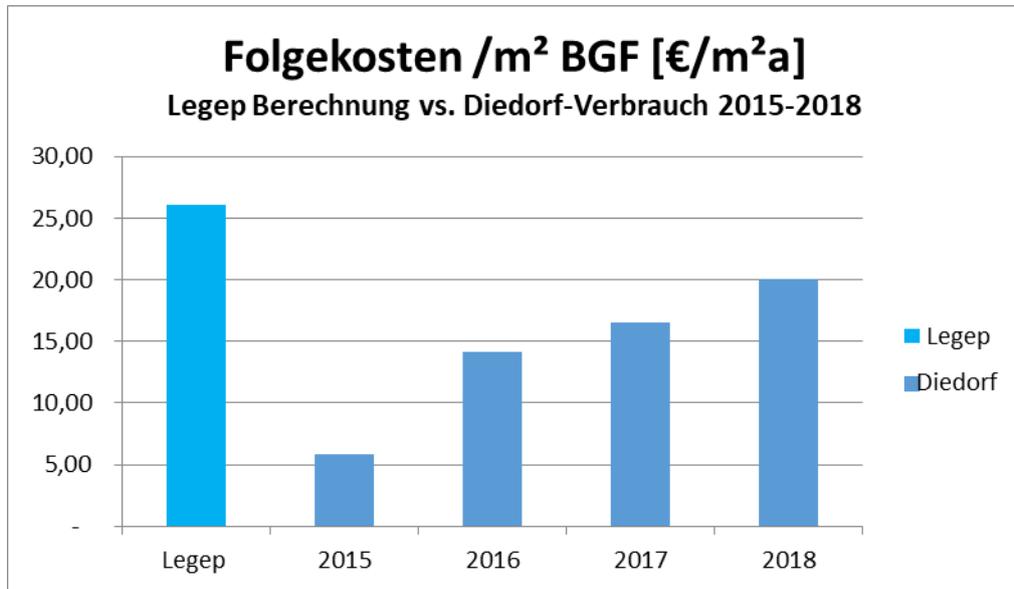


Abbildung 12.3-12: Gesamte Folgekosten mit abgezinster Instandsetzungsrücklage in €/a brutto

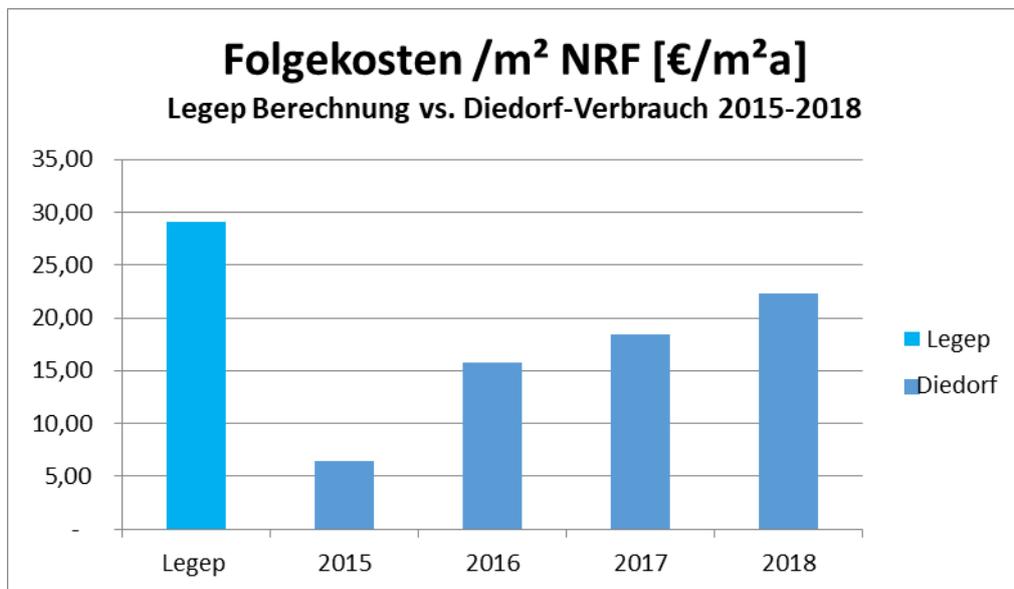


Abbildung 12.3-13: : Gesamte Folgekosten mit abgezinster Instandsetzungsrücklage in €/a brutto

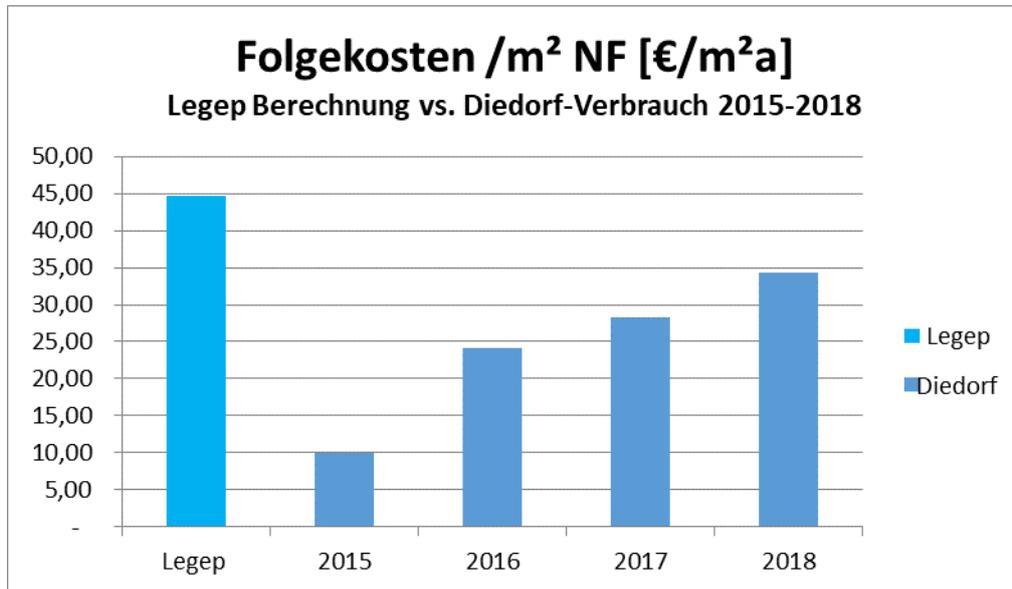


Abbildung 12.3-14: Gesamte Folgekosten mit abgezinster Instandsetzungsrücklage in €/a brutto

Die Kennwertebildung erlaubt einen Vergleich mit anderen Objekten einer ähnlichen Nutzungskategorie.

#### Vergleich mit anderen Schulen des Landkreises

Mit dem Landratsamt Augsburg wurde besprochen, ob Vergleiche mit den anderen Schulen im Landkreis möglich und sinnvoll wären. Diese Vergleiche sind wegen der unterschiedlichen Schulformen und -größen nicht durchführbar. Ein mögliches Vergleichsobjekt wäre das Paul-Klee-Gymnasium in Gersthofen. Dieses Gebäude stammt aus den 80er Jahren und soll durch einen Neubau ersetzt werden. Eine grobe Kostenabschätzung ergab wesentlich höhere Energiekosten und niedrigere Wartungskosten. Im Moment gibt es in der Datenbank des Landratsamts Augsburg keine Kennwerte.

## 12.4 Bewertung der Ergebnisse

Im Detail der einzelnen Kostenstellen gab es folgende Abweichungen:

- Heizungskosten: ca. 30 % niedriger
- Abwasser und Frischwasser: ca. 65 % niedriger
- Stromkosten: ca. 25 % niedriger
- Reinigungskosten: gleich hoch
- Wartungskosten ca. 30 % höher
- Reparaturkosten: ca. 20 % niedriger.

Die Prognoseberechnung der gesamten Lebenszykluskosten ergab eine Abweichung der realen Kosten von 18 % – 21 %. Da der Vollbetrieb erst in zwei Jahren erreicht wird, ist mit einem Anstieg der realen Kosten zu rechnen. Ebenso wird der Reparaturaufwand in späteren Betriebsjahren erfahrungsgemäß ansteigen. Die registrierte Abweichung wird sich dadurch auf 10 % bis ca. 15 % reduzieren.

Dies erlaubt die Aussage, dass die prognostische Lebenszyklusberechnung mit der Methode der elementbasierten Anwendung eine belastbare Größe für Planungsentscheidungen darstellt.

## 13 Qualitätssicherung Holzbau

Nach 3-jährigen Beobachtungen kann folgendes festgehalten werden:

- Die gewählte Schnittstellendefinition Rohbau – Ausbau hat sich auch im Nachhinein bezüglich der Holzbauqualität ausgezahlt. Das Vorgehen mit vorgeschaltetem nicht offenem Verfahren nach VOB/A-EU mit Teilnahmewettbewerb hat sich bewährt. Auch ist es klar von Vorteil, wenn sich die Gebäudehülle aus einer Hand realisieren lässt. Die Entscheidung, die Holzbauhülle inklusive Fenster und Notdachabdichtung zu vergeben, war richtig. Es gibt bis heute keinerlei Mängel an Wand und Dach.
- Die „Steckmethode“ der tragenden Holzkonstruktion hat sich bewährt. Es sind keine großen Schwundfugen der aneinander liegenden Längshölzer (z. B. Geschoßdeckenstoß in den Marktplatzlufträumen) erkennbar. Auch die Gabelstützen zur Lagesicherung (4 Elemente liegen auf einem Auflager) haben sich bewährt. Es sind keine Fugen, kein Schwinden und keine Zwängungen augenscheinlich erkennbar.
- Die gewählte Deckenkonstruktion mit Holz-Beton-Verbund wurde vom Tragwerksplanungsbüro Merz Kley Partner bezüglich dem Kriechverhalten gemessen. Die unterschiedlich bewährten Betone des Klassenhauses 1 mit normalen Bewehrungsmatten und dem im Klassenhaus 2 und in der Aula ausgeführten Beton mit Stahlfaserbewehrung zeigen bis heute keine nennenswerten Veränderungen im Kriechverhalten. Die Mittelwerte der gemessenen Punkte stimmen gut mit den rechnerisch ermittelten Werten überein.
- Im Zusammenspiel mit der Haustechnik gab es ebenfalls klar definierte Schnittstellen. Die Entscheidung, die Brandschutzklappen in die F-90 Decke über UG im Beton durch den Lüftungsbauer zu platzieren und die langen Leitungswege der Lüftung in F30 Kanälen durchs Gebäude zu führen, war richtig. Dies zeigt uns einerseits die geringen Wartungsprobleme für den Nutzer und andererseits, dass bei den Knotenpunkten mit den technischen Einbauten bis dato keine negativen Auswirkungen auf die Qualität des Holzbaus entstanden sind.
- Die Entscheidung des Bauherrn, keine Luftbefeuchtung für den Winter in die Zuluftanlage einzubauen, hat bisher zu keinen großen Schwindrissen geführt.

Die im Vorfeld extrem detaillierte Detailplanung der Architekten (konstruktiv, auch bezogen auf die maximale Elementierung, Wind- und Luftdichtigkeit) in Zusammenarbeit mit den Fachplanern sowie jeder genau gezeichnete statisch relevante Knotenpunkt der Tragwerksplaner, tragen einen entscheidenden Punkt zur Qualitätssicherung des Holzbaus bei.

Die ausführende Firma Kaufmann Bausysteme, A-6870 Reuthe hat den „level of detail“ des Schmuttertal-Gymnasiums noch einmal vertieft, dies zeigt der systematisch zusammengestellte Detailkatalog in Anlage 3.

Beispiele der Detailtiefen im Vergleich – Detailplanung Architekt und Werkplanung KBS

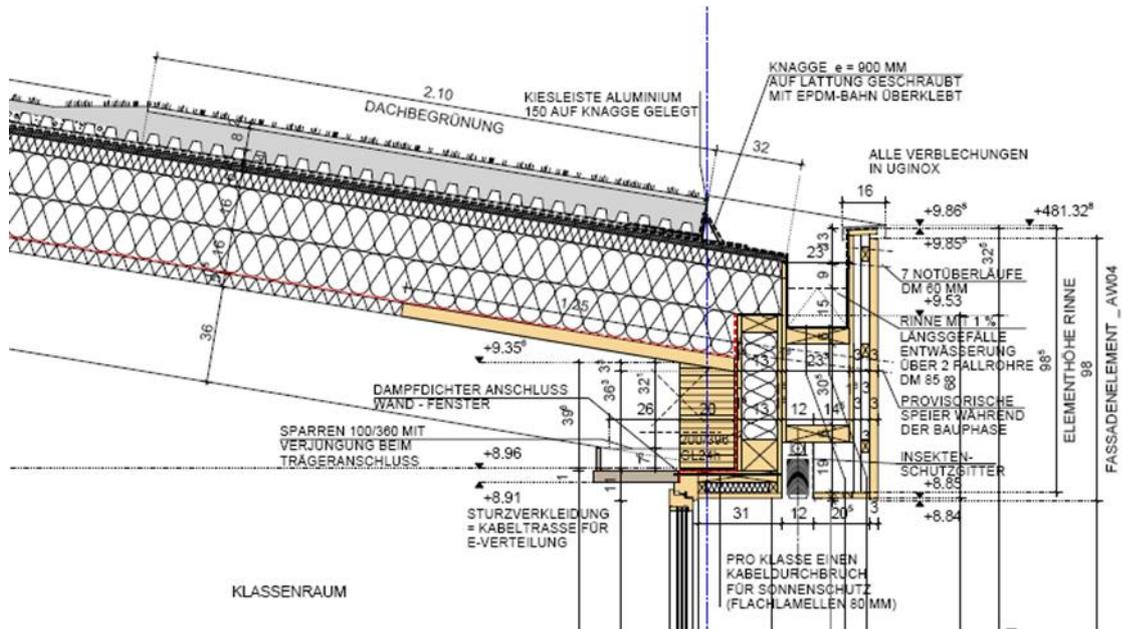


Abbildung 13-1: Detail Architekt

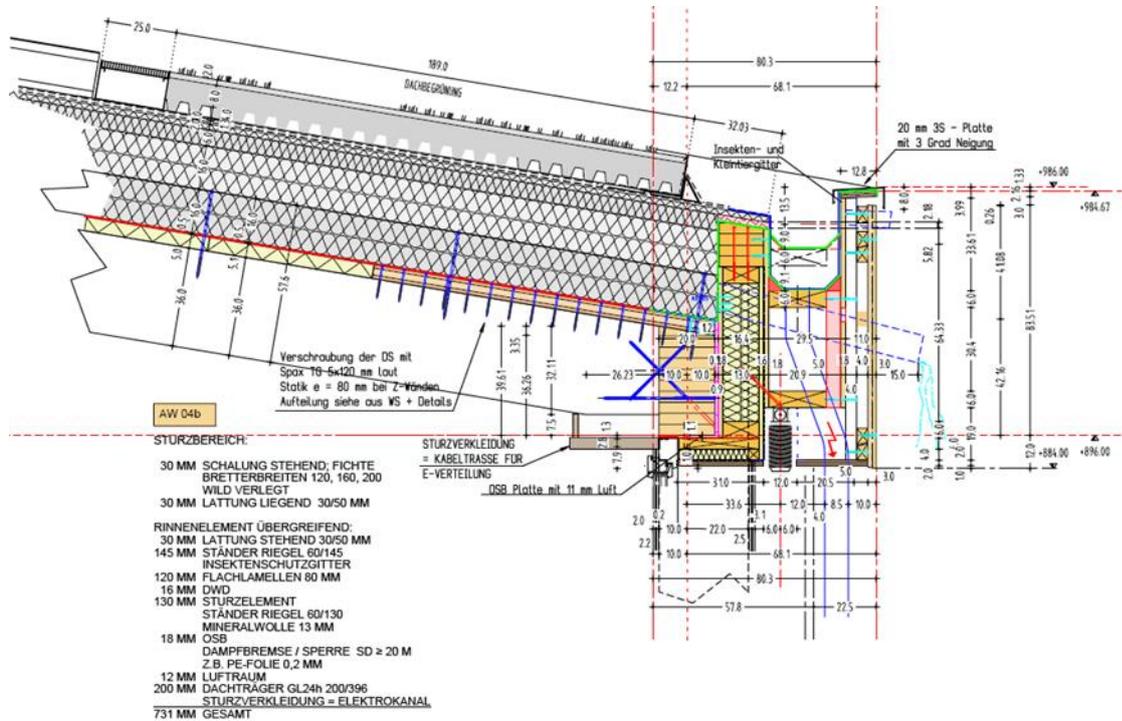


Abbildung 13-2: Detail Werkplanung



Im Ergebnis zeigt sich, dass um eine hohe Qualität im Holzbau zu erreichen und auch sicherzustellen, einige Faktoren zusammenstimmen und Entscheidungen im Sinne des Holzbaus getroffen und mit aller Konsequenz verfolgt werden müssen. Dies beginnt bei der Planung mit Einbezug der Fachplaner und zieht sich bis hin zu den Handwerkern. Durch die detaillierte Vorplanung und die bewusste Auswahl von ausführenden Firmen war es somit möglich, einen qualitativ hochwertigen Holzbau zu schaffen, der durch seine schlichte Funktionalität zeitlos wirkt. Die Beobachtungen der letzten 3 Jahre zeigen, dass es bis heute keine Mängel an der Holzkonstruktion gibt und sich diese bewährt hat.

## 14 Zusammenfassung relevanter Kenndaten

<b>Projektdaten</b>					
Planungsbeginn	[-]	02/2012			
Baubeginn	[-]	09/2013			
Bezug	[-]	09/2015			
Schüler ca.	[-]	960			
Errichtungskosten (KG200-700)	[€]	35.436.474			
<b>Gebäude</b>					
Energiebezugsfläche EBF (beh. Hauptnutzfläche)	[m <sup>2</sup> ]	11.680			
A/V-Verhältnis	[-]	0,28			
Bruttogrundfläche	[m <sup>2</sup> ]	16.046			
Heizgrenztemperatur	[°C]	10			
			<b>Monitoringjahr</b>		
			<b>2017</b>	<b>2018</b>	
<b>Klima</b>					
Maximaltemperatur	[°C]		36,4	36,8	
Minimaltemperatur	[°C]		-17,7	-16,6	
Jahresdurchschnittstemperatur	[°C]		9,7	10,6	
Globalstrahlungssumme	[kWh/m <sup>2</sup> a]		1089	1105	
Klimafaktor Heizen	[-]		1,10	1,19	
Klimafaktor Globalstrahlung	[-]		1,03	1,01	
<b>Energiebilanzen</b>					
<b>Gesamtstromverbrauch</b>					
Gesamtstromverbrauch	[MWh/a]		350	307	
Maximalleistung	[kW]			138	
Dauerleistung	[kW]			12	
<b>PV-Produktion</b>					
installiert Leistung	[kWp]	439,6			
PV-Ertrag absolut	[MWh/a]			459	
PV-Ertrag spezifisch (bezogen auf Modulfläche)	[kWh/m <sup>2</sup> a]			170	
PV-Ertrag spezifisch (bezogen auf instal. Leistung)	[kWh/kW x a]			1044	
Eigenverbrauchsquote	[%]			29	
Autarkiegrad	[%]			44	
Wirkungsgrad PV-Anlage (Bezug horiz. Golarstrahlung)	[%]		15,46	15,00	
<b>Wärme</b>					
Wärmeerzeugung, absolut	[MWh/a]		262	225	
Wärmeerzeugung, spezifisch (bezogen auf EBF)	[kWh/m <sup>2</sup> <sub>EBF</sub> a]		22	19	
Wärmeverbrauch (gemessen)	[MWh/a]		238	204	
Wärmeverbrauch (klimabereinigt)	[MWh/a]		258	238	
<b>Kälte</b>					
Kälteerzeugung	[MWh/a]		169	171	
Kälteerzeugung, spezifisch (bezogen auf EBF)	[kWh/m <sup>2</sup> <sub>EBF</sub> a]		14	15	
Kälteverbrauch	[MWh/a]		131	138	
Verhältnis Energiemenge Wärme- zu Kälteerzeugung				57 % : 43 %	
<b>Primärenergie</b>					
Nutzenergieverbrauch	[MWh/a]			534	
Endenergieverbrauch	[MWh/a]			582	
Primärenergieverbrauch absolut (klimabereinigt)	[MWh/a]	703			
Primärenergieverbrauch spezifisch (klimabereinigt)	[kWh/m <sup>2</sup> <sub>EBF</sub> a]	60			
PV-Ertrag absolut (klimabereinigt, Gutschrift)	[MWh/a]	1041			
PV-Ertrag spezifisch (klimabereinigt, Gutschrift)	[kWh/m <sup>2</sup> <sub>EBF</sub> a]	89			
<b>Treibhausrelevante Emissionen</b>					
CO <sub>2</sub> -Äquivalent Emissionen Verbrauch	[to_CO <sub>2</sub> /a]	200			
CO <sub>2</sub> -Äquivalent PV (Gutschrift)	[to_CO <sub>2</sub> /a]	301			
<b>Anlagentechnik</b>					
<b>Wärmeerzeugung</b>					
Kesselleistung	[kW]	2 x 100			
Jahresnutzungsgrad	[%]	82,4			
<b>Kälteerzeugung</b>					
Maschinen-Jahres-EER			3,4	4,8	

## 15 Zusammenfassung und Ausblick

### 15.1 Öffentlichkeitsarbeit

Folgende Fachveröffentlichungen und Vorträge haben im Monitoringzeitraum stattgefunden:

#### Fachveröffentlichungen

A. Robrecht: Klassenziel erreicht - Monitoring und Qualitätssicherung Plusenergieschule Diedorf, Gebäude Energieberater 02/2019, Stuttgart, Februar 2019, S12 – S.16

Deutsche Bundesstiftung Umwelt: Schmuttertal-Gymnasium, Architektur – Pädagogik – Ressourcen, DBU Bauband 1, DETAIL Verlag, 2016

Univ.-Prof. DI Hermann Kaufmann, Florian Nagler Architekten GmbH, Dipl.-Ing. Andreas Robrecht et al.: DBU-Abschlussbericht 2. Förderphase, Entwicklung eines integralen und zukunftsweisenden Planungsansatzes für den Neubau des Gymnasiums Diedorf bei Umsetzung des Plusenergiestandards in Holzbauweise und Entwicklung neuer Lösungen für offene Lernlandschaften mit umfassendem Monitoring und Dokumentation, Augsburg, 2016

Univ.-Prof. DI Hermann Kaufmann, Florian Nagler Architekten GmbH, Dipl.-Ing. Andreas Robrecht et al.: DBU-Abschlussbericht 1. Förderphase, Entwicklung eines integralen und zukunftsweisenden Planungsansatzes für den Neubau des Gymnasiums Diedorf bei Umsetzung des Plusenergiestandards in Holzbauweise und Entwicklung neuer Lösungen für offene Lernlandschaften mit umfassendem Monitoring und Dokumentation, Augsburg, 2012

#### Plenarvorträge und veröffentlichter Tagungsband

A. Robrecht, J. M. Kuckelkorn: Monitoring und Betriebsoptimierung der Plusenergieschule Schmuttertal-Gymnasium Diedorf, 22. Internationale Passivhaustagung 2018, München, 09.-10.03.2018

A. Robrecht: Anlagentechnisches Konzept und Betriebserfahrungen der Plusenergieschule Schmuttertal-Gymnasium Diedorf, tri 2018, 12. Internationales Symposium für energieeffiziente und nachhaltige Architektur, Bregenz 07.04.2018

### 15.2 Fazit Landkreis Augsburg als Bauherr

2009 entstand bei einem Besichtigungstermin die Vision einer ganz besonderen Schule in der traumhaften Landschaft des Naturparks Augsburg-westliche Wälder. Einer Schule, die nachhaltig, klimafreundlich, energieeffizient und innovativ als Leuchtturmprojekt weit über die Landkreisgrenzen hinausstrahlen sollte.

Der Landkreis, der sich den Namen „Bildungslandkreis“ auf seine Fahne schreibt, nahm mit großer Freude die Herausforderung an, das bis dahin erste und einzige deutsche Gymnasium im Plus-Energiestandard und Holzbauweise als größten Holz-Schulbau Europas zu errichten.

Zum ersten Mal in der Geschichte des Landkreises wurde, sowohl baulich als auch pädagogisch, ein völlig neuer, innovativer Weg eingeschlagen.

Der Landkreis konnte in dem Schulgebäude alle Elemente vereinen, die unter pädagogischen, ökologischen und technischen Gesichtspunkten eine gute Schule ausmachen. Der Übergang von klassischen Klassenraumkonzepten hin zu zeitgemäßen pädagogischen Konzepten wie z.B. offenen Lernlandschaften gelang auch Dank den Fördergebern Freistaat Bayern und Deutsche Bundesstiftung Umwelt. Die vorgeschlagene Umsetzung offener Lernlandschaften wurde vom Lehrerkollegium begeistert aufgegriffen und als Mitglied des integralen Planungsteams zusammen mit Bauherr, Architekten und Fachplanern weiterentwickelt. Das Gesamtergebnis des Schmuttertal Gymnasiums rechtfertigt den sehr hohen Kommunikationsaufwand während des gesamten Planungsprozesses.

Im Vergleich zur konventionellen Bauweise zeigen sich deutliche Vorteile:

Die bedarfsgerecht über CO<sub>2</sub>-Fühler gesteuerte Lüftungsanlage weist hervorragende Werte bei der Raumluftqualität auf, was die Konzentration bei den Nutzern dauerhaft verbessert. Die hervorragende Akustik, mit Nachhallzeiten < 0,4 sec vermeidet das sonst übliche Anschwellen des Geräuschpegels und erlaubt das unabhängige Arbeiten von mehreren Schülergruppen in einem Raum. Dies konnte auch im Betrieb bestätigt werden.

Das Schulgebäude hat nicht nur die kühnsten Träume des Schulleiters übertroffen, aus Lehrern halbe Architekten und aus Architekten halbe Lehrer gemacht, sondern es erhielt auch zahlreiche Preise und Auszeichnungen, wie den Bay. Energiepreis 2016, den Deutschen Nachhaltigkeitspreis 2016, den Deutschen Holzbaupreis 2017, den Deutschen Architekturpreis 2017, sowie eine Auszeichnung beim Thomas Wechs Preis 2018.

Seit der Fertigstellung des Schmuttertal Gymnasiums erfuhr die Schule große Aufmerksamkeit in den Medien und diversen Fachzeitschriften. Es gab in der Folge eine große Anzahl an Besichtigungen von deutschen und internationalen Interessenten, die sogar bis aus Japan anreisten.

Der Landkreis Augsburg ist stolz darauf mit dem neuen Schmuttertal Gymnasium einen großen Schritt hin zu einer pädagogisch und architektonisch richtungsweisenden Schule der Zukunft gemacht zu haben.

Gleichzeitig wurden aus dem Neubau weitere Erkenntnisse für zukünftige Schulbauprojekte des Landkreises Augsburg gewonnen:

- Der Aufwand hinsichtlich des Brandschutzes in einem reinen Holzbau zeigte sich aufwändiger gegenüber einem Massivbau. Schulbauten in Holz sind jederzeit wieder vorstellbar, jedoch, auf Grund der derzeitigen Vorschriften des Brandschutzes, mit der Einschränkung einer Ausführung als sog. „Hybridbauten“ (z.B. Massivdecken bei erforderlichen Brandschottungen, Massivwände im Bereich möglichen Brandüberschlags). Es ist jedoch auch davon auszugehen, dass die Anzahl der „allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen“ für Holzbauteile weiter steigen wird, und somit der Brandschutz bei Holzbauten erleichtert wird.
- Die Komfortziele sollen etwas reduziert werden, v.a. in Bezug auf den Luftwechsel in den Klassenräumen. In Diedorf ging man von ca. 30m<sup>3</sup>/Std/Schüler aus, legte die mittlere Luftwechselrate auf 25 m<sup>3</sup>/Std/Schüler aus und stellte nach Abschluss des Monitorings fest, dass 20 m<sup>3</sup>/Std./Schüler wohl ausreichend sind. Damit lässt sich die erforderliche Größe der Lüftungsanlage und damit verbunden die Investitionskosten deutlich reduzieren.
- Sofern die Möglichkeit einer Grundwassernutzung besteht, ist diese in ökologischer und wirtschaftlicher Hinsicht für eine Gebäudekühlung gegenüber der in Diedorf konzipierten adiabaten Kühlung zu bevorzugen.

- Die hervorragende Luftqualität der Schule resultiert zum einen aus der beschriebenen zentralen Lüftungsanlage, zum anderen auch aus dem erstmaligen Versuch, Risikobaustoffe für die lokale Umwelt zu vermeiden. Durch die Auswahl emissionsarmer Bauprodukte (geprüft nach AgBB oder „Blauer Engel“) sollte eine niedrigste Immisionskonzentration an flüchtigen organischen Verbindungen (TVOC) und Formaldehyd erreicht werden. Die Umsetzung erwies sich mitunter als schwierig und zeitraubend für Planer und ausführende Handwerker, da die Zuarbeit durch Industrie/Hersteller manche Entscheidung erschwerte. Das Ergebnis aber zeigte, sowohl vor Bezug der Schule, als auch nach dreijährigem Betrieb, Bestwerte hinsichtlich der sog. „Innenraumhygiene“.

TVOC und Formaldehydmesswerte liegen deutlich unter den BNB Zielwerten:

- TVOC Messwert 29.05.2018 i.M.: 242,9  $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{n}$  < Zielwert lt. DGNB-BNB: 500  $\mu\text{g}/\text{m}^3$
  - Formaldehyd Messwert 29.05.2018 i.M.: 25,8  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  < Zielwert lt. DGNB-BNB: 60  $\mu\text{g}/\text{m}^3$
- Bauweisen mit hohem Vorfertigungsgrad mindern Ausführungsfehler und reduzieren die Bauzeit im Vergleich zu Massivbauten, benötigen jedoch in der Planung einen höheren zeitlichen Aufwand, den es angemessen zu berücksichtigen gilt.
  - Bei zukünftigen Sanierungen und Neubauten werden, neben den Herstellungskosten, auch die Lebenszykluskosten betrachtet, um die Gesamtwirtschaftlichkeit des Gebäudes betrachten zu können (Betrachtung über einen Nutzungszeitraum von 50 Jahren und Vergleich mit einer „Standardvariante“ (Massivbau nach gültigem ENEC-Standard)).

### 15.3 Fazit und Ausblick Monitoring

Nach mehr als drei Jahren Betriebsphase kann zum Ende des Jahres 2018 eine positive Bilanz gezogen werden. Die technischen Systeme arbeiten sehr zuverlässig. Insbesondere die für die Nutzung wichtigen Versorgungssysteme der Wärme-, Kälte- und Frischluftversorgung haben keine Ausfallzeiten. Einzig bei der Verschattungsanlage kommt es zu kurzzeitigen Fehlfunktionen, die den Betrieb aber nicht signifikant einschränken.

Die anlagentechnischen Systeme arbeiten weitgehend mit guter energetischer Effizienz, sodass der Plusenergiestandard im Sinne der projektspezifischen Definition deutlich erreicht wurde.

Insbesondere die zentralen Systeme weisen durchgehend sehr gute Energieeffizienzen auf. Die Pelletkessel erreichen einen guten Jahresnutzungsgrad von 82,4 %. Bei der Kälteerzeugung konnte durch die Umsetzung von umfangreichen Optimierungspaketen im Bereich der internen und externen Steuerung die Leistungszahl (EER) von 3,4 auf 4,8 im letzten Monitoringjahr erhöht werden, was bei gleichbleibender erzeugter Kältemenge zu erheblichen Stromeinsparungen führt. Die für die Effizienz der gesamten Lüftungsanlage entscheidenden spezifischen Ventilatorwirkungsgrade liegen in den Hauptbetriebspunkten in den beiden effizientesten SFP Klassen 1 und 2. Dies ist vor allem auf die niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten im Verteilnetz zurückzuführen, die sich aufgrund der großzügigen Kanalquerschnitte einstellen. Der Wirkungsgrad der elektrischen Stromproduktion lag im letzten Monitoringjahr 2018 bei guten 15,00 % bezogen auf die horizontale Globalstrahlung. Der Gesamtertrag des PV-Systems entspricht dabei den Planungsvorgaben. Die Stromverbräuche der LED-Beleuchtung liegen deutlich unter den Planungsvorgaben. Im Jahresmittel wird in den Klassenräumen lediglich 1,5 kWh/m<sup>2</sup>a elektrische Energie verbraucht. Erreicht wird dies durch eine tageslichtabhängige, bedarfsgerechte und zonierte arbeitende Steuerung. Im Rahmen der Optimierungsphase konnte hier der Stromverbrauch durch Anpassung der Regelparameter deutlich reduziert werden.

Der zur Verfügung gestellte Raumkomfort wird von den Nutzern als durchweg angenehm beschrieben. Insbesondere die niedrigen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in den Klassenräumen fallen gerade externen Besuchern der Schule positiv auf. Zusätzlich sorgt die Temperierung im Sommer dafür, dass ganzjährig ein hoher thermischer Raumluftkomfort erreicht wird.

Die Beobachtungen der letzten 3 Jahre zeigen auch, dass es bis heute keine Mängel an der Holzkonstruktion gibt und sich diese bewährt hat.

Dennoch zeigte die Evaluation auch einige Schwachpunkte auf. Nach Baufertigstellung nahm die Bereitschaft und Motivation, insbesondere der ausführenden Firmen, aber auch der anderen Planungsbeteiligten deutlich ab, erforderliche Optimierungen durchzuführen. Dabei spielte der finanzielle Aspekt eine untergeordnete Rolle, weil für die Optimierungen ein Budget vorhanden gewesen ist. Aufgrund der guten wirtschaftlichen Lage der Baubranche in den Jahren 2017 und 2018 waren die Nacharbeiten am Gymnasium scheinbar wenig attraktiv. Etliche, vor allem jahreszeitliche Optimierungspunkte, sind im Monitoringzeitraum zwar umgesetzt worden, konnten aber nicht abschließend evaluiert werden. Wenige erarbeitete Verbesserungen konnten in der Projektlaufzeit nicht vollumfänglich verwirklicht werden und sind für das Jahr 2019 vorgesehen. Aufgrund des langsamen Optimierungsfortschrittes ließ sich auch die eigentlich beabsichtigte Trennung von zwei Jahren Optimierung und ein Jahr Evaluation im ungestörten Betrieb nicht komplett aufrechterhalten.

Es wird dringend empfohlen, auch 2019 weiterhin bereits erarbeitete Maßnahmen aus detektierten Defiziten umzusetzen und mit einer Erfolgskontrolle abzuschließen. Zum einen ist die Umstellung der parallelen Betriebsweise der Pelletkessel auf eine Kesselfolgeschaltung mit regelmäßigem laufzeitabhängigem Wechsel des Führungskessels zu nennen. Die daraus folgende Laufzeitverlängerung erhöht nicht nur die Effizienz der Wärmeerzeuger, sondern senkt insbesondere die bei Biomassefeuerungen relevanten Feinstaubemissionen deutlich. Zum anderen ist für 2019 die Überprüfung aller Volumenstromregler angesetzt, um die Luftströmungen zu optimieren. Dies gilt insbesondere für die Sporthalle im Abendbetrieb. Ein weiteres wichtiges Optimierungsfeld betrifft die Verschattungsanlagen. Hier müssen 2019 sowohl die erfolgten Hardwareänderungen zur Abstimmung der Fehlfunktionen als auch die Maximierung des Solarertrags im Winter durch Kombination mit dem Heizsignal abschließend evaluiert werden. Ebenso sind die Optimierungen im Bereich der Betriebsmodi (Ausweitung des Kühlbetriebs in den Übergangszeiten) sowie die Neuparametrierung der Umwälzpumpen zu überprüfen. Im Rahmen eines Unterrichtsprojektes wird der Stromverbrauch der Präsentationmedien in der Nichtnutzungszeit weiter optimiert.

Dokumentiert werden konnte auch, dass einige verbaute Komponenten die in den Planungsunterlagen dargestellten Leistungs- und Effizienzwerte im Betrieb nicht erreicht haben. Eine Mängelbeseitigung bzw. ein Austausch dieser Bauteile konnte nur mit hohem Aufwand auf Seiten des Planungsteams erreicht werden.

Das Gymnasium in Diedorf hebt sich im Bereich der Haustechnik von anderen Schulbauten deutlich ab. Die zentralen Versorgungssysteme für Wärme, Kälte und Frischluft benötigen in der Nutzung entsprechend geschultes Personal, um einen störungsfreien und effizienten Betrieb zu gewährleisten und die Instandhaltung ordnungsgemäß zu organisieren. Damit gehen die Anforderungen weit über die eines herkömmlichen Hausmeisters hinaus, was vom Bauherrn entsprechend berücksichtigt werden muss.

## Anlagenverzeichnis

Nr.	Bezeichnung
Anlage 1	Details_Raumluftkomfort_Referenzräume
Anlage 2	Bericht_Raumluftmessung_20182905
Anlage 3	Detailkatalog