

EA Systems Dresden GmbH
Würzburger Str. 14
01187 Dresden



Bericht

102. Grundschule in Dresden

Bewertung des Energiesparpotentials durch eine Pumpenabschaltung

Empfänger: Landeshauptstadt Dresden
Geschäftsbereich Stadtentwicklung, Bau, Verkehr und
Liegenschaften
Amt für Hochbau und Immobilienverwaltung
Abt. Technischen Anlagen / Energiewirtschaft
Lingnerallee 3
01069 Dresden

Bearbeiter: EA Systems Dresden GmbH
Würzburger Str. 14
01187 Dresden

Projektleiter: Dipl.-Ing. Torsten Schwan

Projektbearbeiter: Dipl.-Ing. Alexander Hentschel
Dipl.-Ing. Tom Eckhardt

Version: V 2.0
Datum: 16.07.2020

Adresse
EA Systems Dresden GmbH
Würzburger Str. 14
01187 Dresden
Geschäftsführer:
Dipl.-Ing. René Unger

Kontakt
Tel. +49 351 467 136-50

Internet
www.ea-energie.de

Amtsgericht Dresden
HRB 31344
Steuernummer
203/108/12693

Bankverbindung
Deutsche Bank AG
IBAN: DE04 8707 0024 0601 9897 00
BIC: DEUTDEDBCHE

Vorwort

Die Landeshauptstadt Dresden möchte im Rahmen des EU-geförderten Smart City Projekts MatchUp den Energiebedarf der kommunalen Gebäude im Stadtteil Johannstadt elektronisch erfassen und effizient steuern. Für die Aufnahme passender Daten im ersten Beispielgebäude, der 102. Grundschule „Johanna“, wurde daher ein ganzheitliches Monitoring-Konzept umgesetzt, dessen hochauflösende Daten für das erste Betriebsjahr von Februar 2019 bis März 2020 ausgewertet wurden. Anhand dieser Ergebnisse wurde nun der Digitale Zwilling des Modells kalibriert und damit weitere Untersuchungen für die Anpassungen der Heizungsregelung durchgeführt.

Der hier vorliegende Bericht wurde im Rahmen des EU-Forschungsprojekts MatchUp von der EASD als Linked-Partner der Landeshauptstadt Dresden erarbeitet. Die erzielten Ergebnisse und dargestellten Vorgehensweisen wurden nachfolgend in Absprache mit der Landeshauptstadt Dresden als interne Arbeitsgrundlage in deutscher Sprache verfasst. Eine Kurzfassung der Ergebnisse wird als Beitrag der EASD zur turnusmäßigen Berichterstattung für MatchUp in englischer Sprache nachgeführt.

Preface

The state capital Dresden is one of the lead cities in the “Horizon 2020” Smart City project MatchUp. Major projects actions focus on electronic measurement and efficient control of energy flows in buildings. For this purpose, Dresden wants to optimize the municipal buildings in the city quarter Johannstadt. First measurements started in 102nd elementary school “Johanna”. Therefore, a holistic monitoring concept has been implemented onsite. The collected measurement data with high temporal resolution was then evaluated for the first operation year between February 2019 and March 2020. Now these results were taken into account to calibrate the existing Digital Twin model as basis of further analyzes of heating system control optimization.

This project report has been written by EA Systems Dresden as linked third party of state capital Dresden within MatchUp. As agreed by both partners, results and described procedures were documented in German language as an internal working paper. A short abstract of all results will be added in English language to the regular project documentation as an additional EASD contribution to MatchUp.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	I
Preface	I
Inhaltsverzeichnis	II
1 Einleitung und Motivation	3
2 Simulationsmodell	5
2.1 Modellerstellung	6
2.2 Validierung der Modelle	7
2.3 Erstellung der Profile	8
2.3.1 Wetterdaten	8
2.3.2 Vorlauftemperaturen und Gesamtvolumenstrom	8
2.3.3 Belegung der Räume	9
2.3.4 Raumsolltemperaturen	9
3 Auswertung der Szenarien	12
3.1 Nachtabstaltung der Pumpen	12
3.1.1 Raumtemperaturen	12
3.1.2 Energiesparpotential	15
3.2 Saisonale Abschaltung der Pumpen anhand Monaten	17
3.2.1 Raumtemperaturen	17
3.2.2 Energieeinsparung	20
3.3 Saisonale Abschaltung der Pumpen anhand der Außentemperatur	22
3.3.1 Raumtemperaturen	23
3.3.2 Energieeinsparung	24
4 Fazit	27

1 Einleitung und Motivation

Das durch die Europäische Union geförderte „Horizon 2020“-Verbundforschungsvorhaben MatchUp, in welchem Dresden, neben Valencia und Antalya als Lead-City auftritt, dient der Erarbeitung und Erprobung moderner Technologien zur Energieverbrauchssenkung sowie regenerativen Energienutzung und –speicherung im Gebäude- und Mobilitätskontext. In der Landeshauptstadt Dresden soll darin das Stadtquartier Johannstadt zum „Smart City Quartier“ ausgebaut werden.

Im Rahmen der Action 2 des Dresdner Arbeitspakets soll ein ganzheitliches Energieverbrauchserfassungs- und -steuerungssystem aufgebaut werden. Dieses „Building Control Center“, welches modernste, internetbasierte Informationsverarbeitungsansätze nutzen wird, soll dabei u.a. die Energieverbräuche in den kommunalen Gebäuden in der Johannstadt erfassen und auf Basis intelligenter Bewertungsverfahren eine energieeffiziente Anlagensteuerung ermöglichen.



Abbildung 1: Ansicht der 102. Grundschule nach der Sanierung von der Hofseite

Als erstes Beispiel für eine derartige elektronische Energiedatenerfassung und -verarbeitung wurde die 102. Grundschule „Johanna“ in der Pfotenhauerstraße 40 in der Johannstadt mit elektronischen Zählern und einer fernauslesbaren Kommunikationsinfrastruktur ausgestattet werden. Hierfür wurde ein ganzheitliches Messstellenkonzept erstellt, welches Anfang 2019 durch die beauftragten Unternehmen umgesetzt worden ist.

Die 102. Grundschule „Johanna“ wurde in den 1970er Jahren als Gebäude des Schultyps „Dresden“ erbaut. Diese Art von Gebäude ist als Schulgebäude vielfach in der Landeshauptstadt Dresden erbaut wurden. Neben der recht ähnlichen Kubatur ist auch das energetische Verhalten zu anderen Schulgebäuden des gleichen Typs in Dresden sehr ähnlich. Auch durch die umfangreichen Sanierungsmaßnahmen nach der Wiedervereinigung hat sich dieser Ähnlichkeitsaspekt nicht oder nur im sehr geringen Maße geändert. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass die nachfolgend dargestellten Erkenntnisse zu einem ganzheitlichen Monitoring-Konzept auch einfach auf andere Schulen im Stadtgebiet Dresden zu adaptieren sind. Diesbezüglich können in der Folge die in Rahmen von MatchUp entwickelten Lösungen einfach multipliziert werden.

Der nachfolgende Bericht untersucht anhand von vier Raummodellen, welche mit den Messdaten der 102. Grundschule kalibriert wurden, welches Energieeinsparpotential die zeitweise Abschaltung der Heizungspumpen bringt. Dazu wird einerseits die Abschaltung der Pumpen über Nacht betrachtet und andererseits wird betrachtet, wie lange die Pumpe im Sommer abgeschaltet werden kann. Aus den Ergebnissen sollen Optimierungsmöglichkeiten in der Heizungsregelung für die 102. Grundschule abgeleitet werden.

2 Simulationsmodell

Für die Untersuchung des Energieeinsparpotentials durch eine Nachtabschaltung bzw. einer saisonalen Abschaltung der Heizungspumpen wurden vier verschiedene Räume der 102. Grundschule „Johanna“ modelliert. Diese Räume wurden ausgewählt, da für diese Messdaten der Raumtemperatur, der CO₂-Konzentration und der relativen Feuchte der Raumluft u.a. für den Zeitraum vom 11.02.2020 bis 23.03.2020 zur Verfügung stehen.

Diese Messdaten wurden verwendet, um die Modelle zu kalibrieren. Die Position der überwachten Räume (jeweils blau markiert) im Gebäude ist in Abbildung 2 – 4 zu sehen. Die Auswahl der Räume für das Monitoring erfolgte im Vorfeld der Messdatenaufnahme gemeinsam mit dem AHI anhand der Position der Räume, deren Nutzung und damit deren Repräsentativität in für das gesamte Schulgebäude.

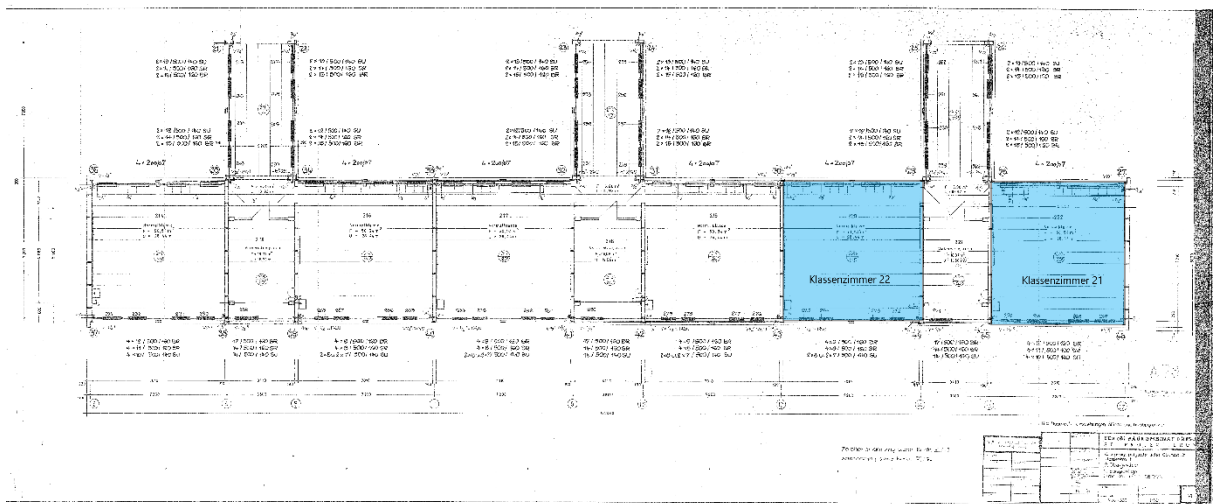


Abbildung 2: Bauplan Klassentrakt OG 2 - Überwachte Klassenzimmer (Zimmer 21 und 22, blau markiert)

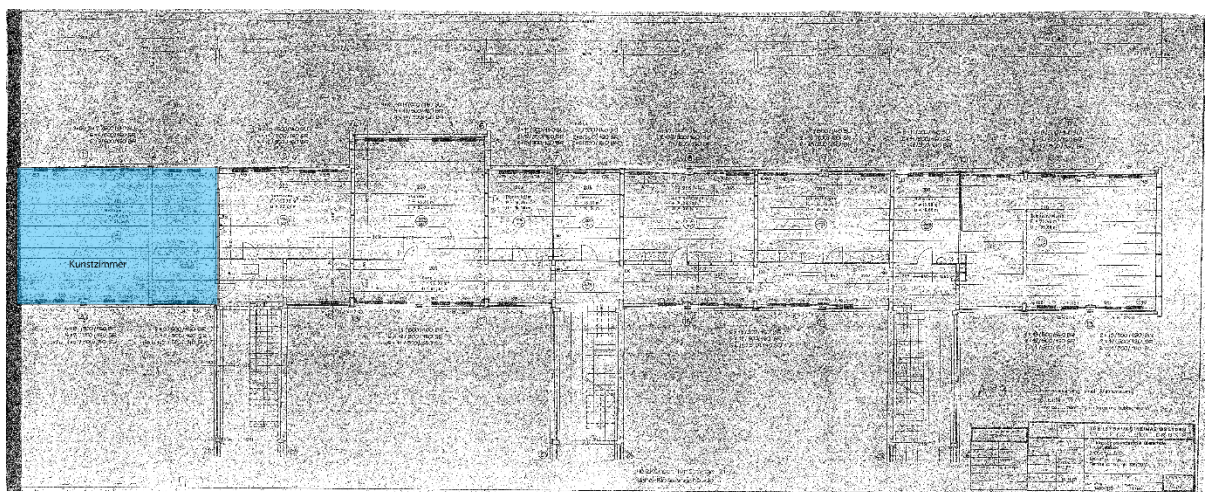


Abbildung 3: Bauplan Hauptgebäude OG 2 - Überwachtes Kunstzimmer (blau markiert)

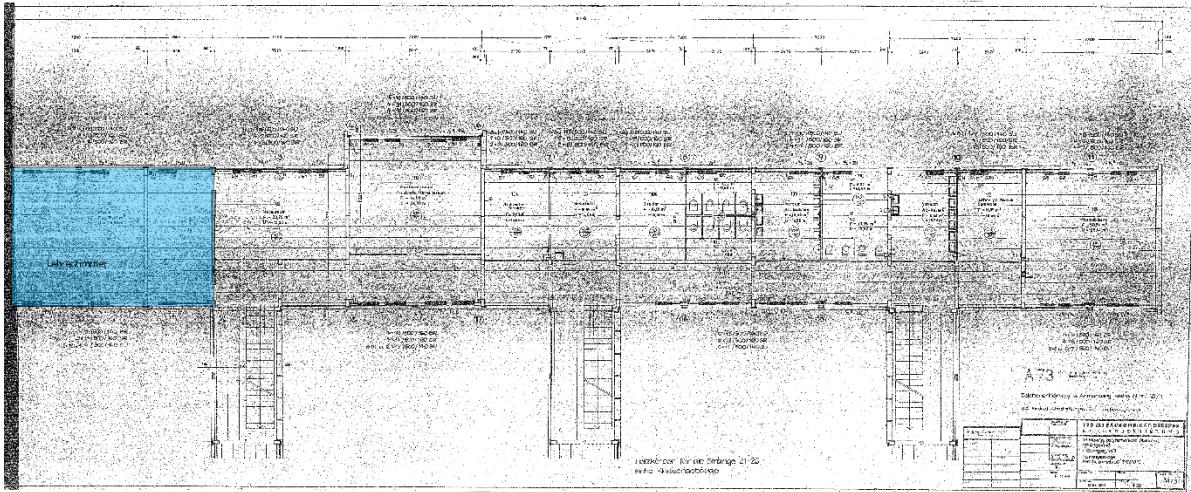


Abbildung 4: Bauplan Hauptgebäude OG 1 - Überwachtes Lehrerzimmer (blau markiert)

2.1 Modellerstellung

Für die Simulation der Raumnutzung wird ein Profil der anwesenden Personen im Raum erstellt. Hierfür wurde aus dem Anstieg der gemessenen CO₂-Konzentrationen die Anzahl der Personen abgeleitet. Es wurde angenommen, dass die Schüler im Durchschnitt 20 l/h¹ an CO₂ an die Raumluft abgeben.

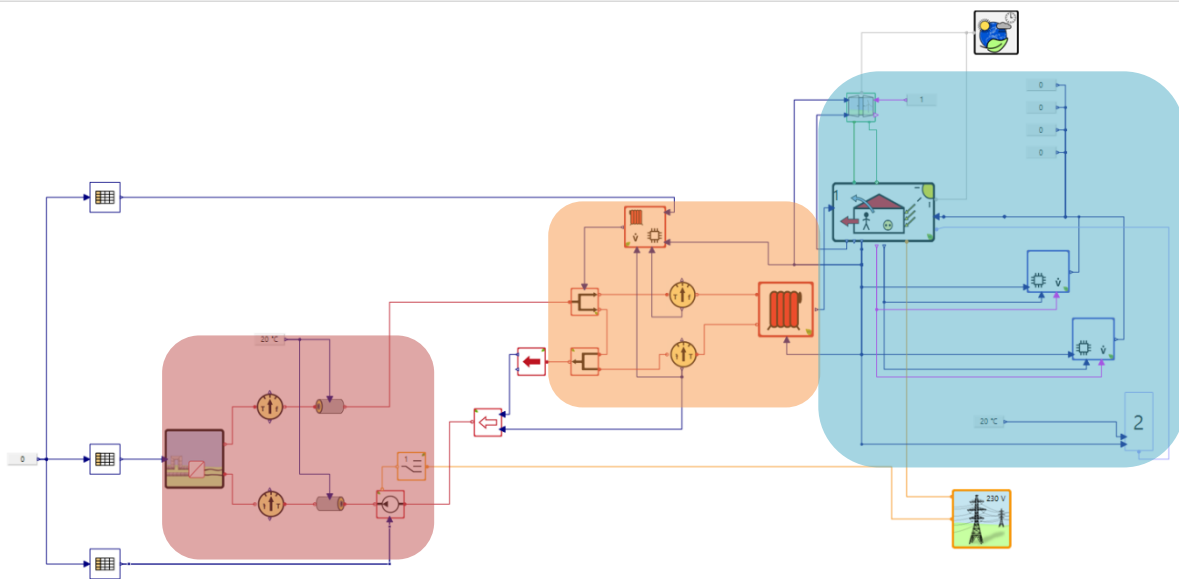


Abbildung 5: Simulationsmodell mit Hauptbestandteilen (rot - Heizzentrale, gelb - Heizkörper im Raum, blau – Raummodell)

¹ Quelle: Hehl, O.; Grams, H.: Ein Modell zur Simulation der Qualität der Innenraumluft am Beispiel von CO₂; Niedersächsisches Landesgesundheitsamt, Mai 2013

Weiterhin wurde aus standortspezifischen Wetterdaten ein Profil für die Umgebungsbedingungen erstellt. Weiterhin wurde für den Volumenstrom und die Vorlauftemperatur ein Profil erstellt, welches für das Simulationsmodell verwendet wird.

Das Modell in SimulationX ist in Abbildung 5 zu sehen. Dabei sind die Hauptbestandteile farblich hervorgehoben. Die Heizzentrale mit der Übergabestation der Fernwärme, der Umwälzpumpe und den Rohrleitungen ist mit rot markiert. Gelb hervorgehoben ist das Modell des Heizkörpers mit zugehörigem Volumenstromregler. Das Raumverhalten wird mit den Komponenten im blauen Bereich simuliert. Es werden Luftwechsel über das Fenster und verfügbare Verschattungselemente in die Betrachtungen mit einbezogen.

2.2 Validierung der Modelle

Da für die Räume, welche modelliert wurden, auch reale Messdaten zur Verfügung standen, konnten die Simulationsergebnisse mit diesen Messdaten verglichen werden. Damit kann gezeigt werden, dass sich das Raummodell sehr ähnlich zum realen Raum verhält. Hierzu wurde die simulierte und gemessene Raumtemperatur miteinander verglichen. In Abbildung 6 sind die Messdaten und die simulierten Ergebnisse grafisch dargestellt.

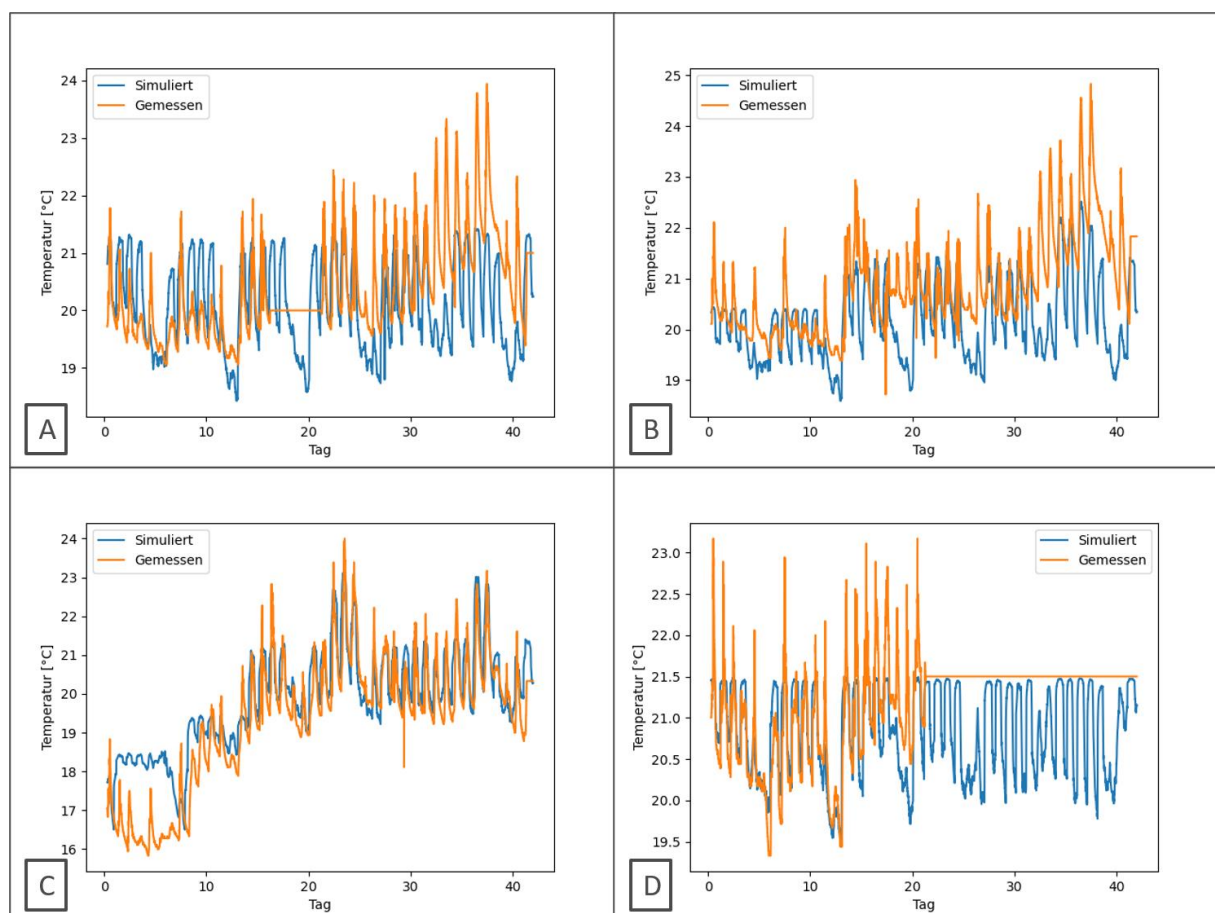


Abbildung 6: Vergleich der Raumtemperaturen für das Simulationsmodell und den realen Messdaten (A: Klassenzimmer 21, B: Klassenzimmer 22, C: Kunstzimmer, D: Lehrerzimmer)

Es ist zu erkennen, dass die Raummodelle die realen Schwankungen nachbilden können. Lediglich sehr große Temperatursprünge können durch das Simulationsmodell nicht abgebildet werden. Diese Spitzen können unterschiedliche, individuelle Ursachen wie beispielsweise eine erhöhte Aktivität der Schüler oder zusätzliche elektrische Verbraucher im Klassenzimmer. Solche Ereignisse werden vom Simulationsmodell nicht abgebildet. Insgesamt sind die Ergebnisse jedoch hinreichend genau, um die möglichen Einsparpotentiale ermitteln zu können.

2.3 Erstellung der Profile

Für die Untersuchung des Einsparpotentials durch eine nächtliche bzw. saisonale Pumpenabschaltung sollen Jahressimulation durchgeführt werden. Somit kann eine bessere Vergleichbarkeit der Ergebnisse erzielt werden, da es ansonsten zu einer Verzerrung der Ergebnisse kommt, wenn nur ein bestimmter Zeitraum, welcher kürzer als ein Jahr ist, da es saisonale Schwankungen im Heizbedarf gibt. Es werden hierfür Jahresprofile für die unterschiedlichen Modellkomponenten benötigt. Die Erstellung dieser Profile soll in den nachfolgenden Abschnitten näher erläutert werden.

2.3.1 Wetterdaten

Zur Abbildung der Umgebungseinflüsse werden Wetterdaten benötigt. Diese Datensätze wurden aus zwei Quellen zusammengetragen. Zum einen wurden Messdaten von der Wettermessstation auf dem Windberg in Freital verwendet und zum anderen Daten des Deutschen Wetterdienst (DWD) von der Messstation in Dresden Strehlen und Dresden Klotzsche. In Tabelle 1 sind die von den beiden Quellen verwendeten Daten aufgelistet.

Tabelle 1: Verwendete Datenquellen für die Wetterdaten

Datensatz	Quelle
Umgebungstemperatur	DWD (Strehlen)
Solarstrahlung (Direkt-, Diffus-, Globalstrahlung)	DWD (Klotzsche)
Windrichtung und -geschwindigkeit	Wetterstation Windberg

Da die Messdaten für die Wetterstation auf dem Windberg nur ab 06.04.2019 13:57 Uhr verfügbar sind, wurde für das durchgängige Jahresprofil der Zeitraum vom 07.04.2019 00:00 Uhr bis zum 07.04.2020 00:00 Uhr verwendet. Der gleiche Zeitraum wurde auch für die Wetterdaten des DWD verwendet.

2.3.2 Vorlauftemperaturen und Gesamtvolumenstrom

Für das Jahresprofil der Vorlauftemperatur und des Gesamtvolumenstroms wurden aus den Messdaten von 2019 und 2020 ein durchgängiges Jahresprofil erzeugt. Es wurden die gleichen Zeiträume wie für die Wetterdaten verwendet, damit auch die witterungsabhängige Heizkurve korrekt abgebildet wird. Das Hauptgebäude und der Klassentrakt der 102. Grundschule werden über zwei Heizkreise versorgt, deswegen wurden für diese beiden Systeme die Jahresprofile für die Vorlauftemperatur und den Gesamtvolumenstrom bestimmt.

2.3.3 Belegung der Räume

Zur Erstellung eines Jahresprofils für die Belegung der Räume wurden die zuvor für die Kalibrierung erstellten Profile der Raumbesetzung analysiert. Die Daten wurden in die folgenden drei Typtage unterteilt:

- Wochentag
- Ferien (Hortbetrieb) (nur für Typ Grundschule)
- Wochenende/Feiertage (Keine Nutzung)

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sollen auch übertragbar sein für Oberschulen, welche auch nach dem Gebäudetyp Dresden errichtet wurden. Deswegen wird für diese auch ein angepasstes Belegungsprofil erzeugt.

Die Belegung aus den Messdaten wurden für die einzelnen Typtage überlagert und durch die Anzahl der zugehörigen Messtage geteilt. Somit ergab sich ein mittleres Belegungsprofil. Das unbearbeitete Profil weist einige Schwankungen auf, welche sich einerseits durch einen veränderlichen Luftwechsel zustande kommt, da teilweise gelüftet wird oder Türen geöffnet werden und andererseits ist die Aktivität der Schüler nicht konstant. Das Profil wurde nachträglich noch an die Unterrichtszeiten angepasst, damit während der Unterrichtszeiten die Anzahl der Personen im Raum konstant bleibt.

2.3.4 Raumsolltemperaturen

Die am Heizkörperthermostate eingestellte Solltemperatur ändert sich je nach Nutzung. Theoretisch werden die Thermostate während den Zeiten, in denen die Schule nicht genutzt wird, auf die Stufe 2 gestellt. Dies entspricht einer Solltemperatur ungefähr 16 °C. In Nutzungszeiten wird diese erhöht. Dies hängt von der Einstellung der Nutzer ab. Um dieses Nutzerverhalten besser abschätzen zu können wurde untersucht, ob es eine Abhängigkeit von der Raumlufttemperatur zur Außentemperatur und der Raumbesetzung gibt.

In Abbildung 7 bis Abbildung 10 sind die Umgebungstemperatur gegenüber der Innenraumtemperatur aufgetragen für die Zeiten in denen sich Personen im Raum aufhalten (orange) und in denen der Raum nicht genutzt (blau) wird. Es ist zu erkennen, dass die Raumtemperatur mit steigender Umgebungstemperatur zunimmt. Bei den Klassenzimmern ist zu erkennen, dass die Nutzer keinen Einfluss auf die Raumtemperatur haben, d. h. es wurden keine Veränderungen der Thermostateinstellungen vorgenommen. Die mittlere Temperatur liegt bei 21°C. Deswegen wird diese als Solltemperatur in der Nutzungszeit für die Jahresprofile verwendet. Bei den Daten des Kunstzimmers in Abbildung 9 ist zu sehen, dass bei Anwesenheit von Personen die Raumtemperatur bei 21°C liegt. Ein Teil der Messpunkte zeigt eine Raumtemperatur zwischen 16 und 18°C, aber nur vereinzelt die Nutzung des Raums. Das lässt darauf schließen, dass in dieser Zeit der Raum nicht genutzt wurde und deswegen das Thermostat auf 17°C eingestellt wurde. Deswegen werden für die Nichtnutzungszeiten des Gebäudes 17°C als Solltemperatur angenommen. Für das Lehrerzimmer ist zu erkennen, dass während der Nutzungszeit die Raumtemperatur im Mittel bei ungefähr 22°C liegt. Ansonsten beträgt die mittlere Raumtemperatur ungefähr 21°C. Somit wurde für das Lehrerzimmer angenommen, dass während der Nutzungszeit die Solltemperatur 22°C beträgt.

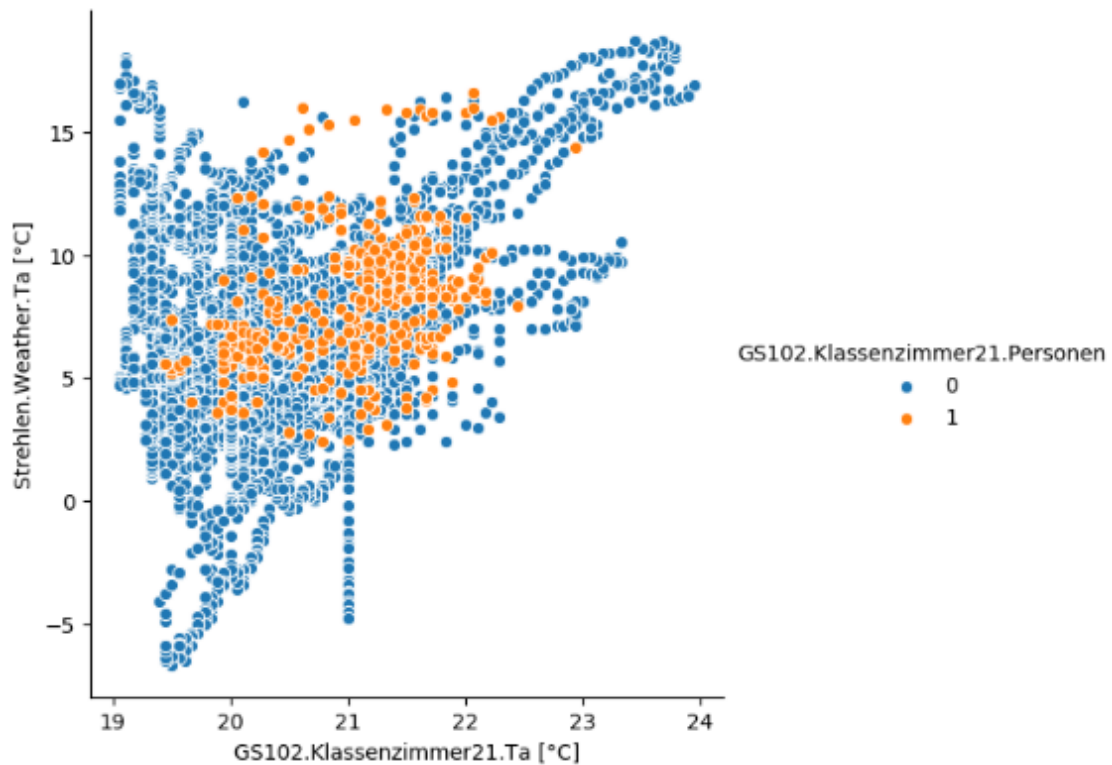


Abbildung 7: Umgebungstemperatur gegenüber Raumtemperatur bei Nutzung (1) und Nichtnutzung (0) im Klassenzimmer 21

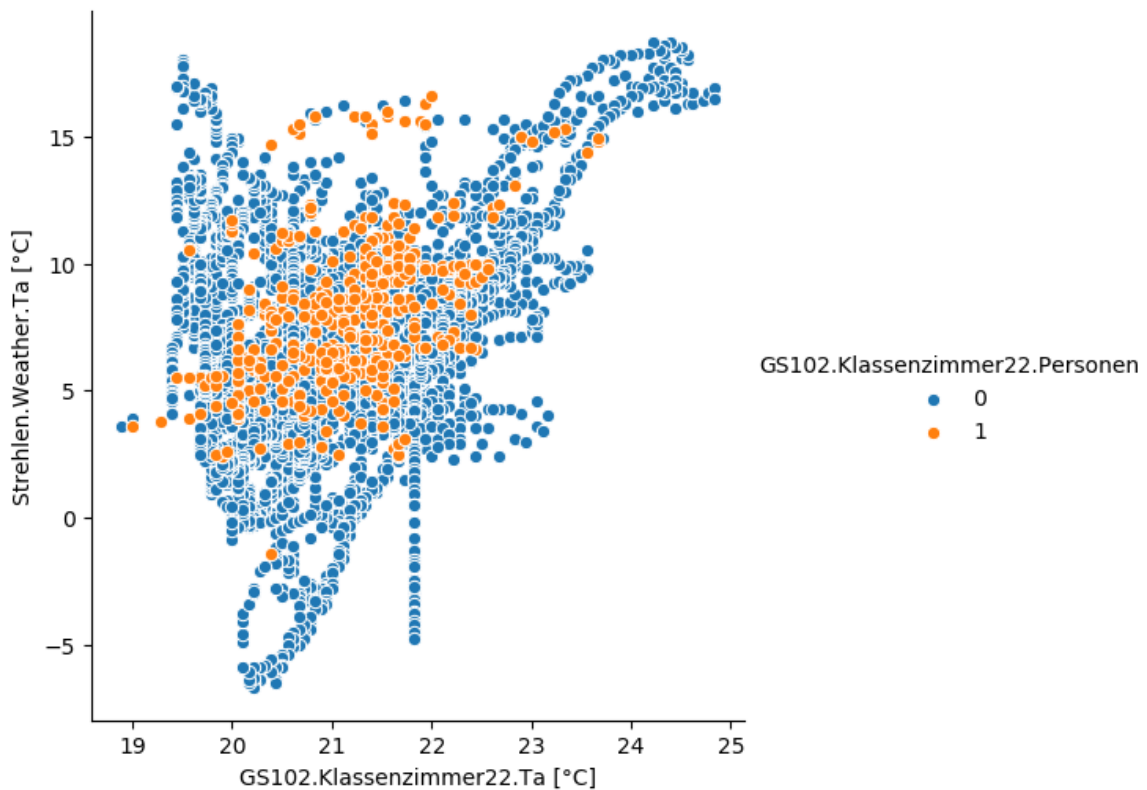


Abbildung 8: Umgebungstemperatur gegenüber Raumtemperatur bei Nutzung (1) und Nichtnutzung (0) im Klassenzimmer 22

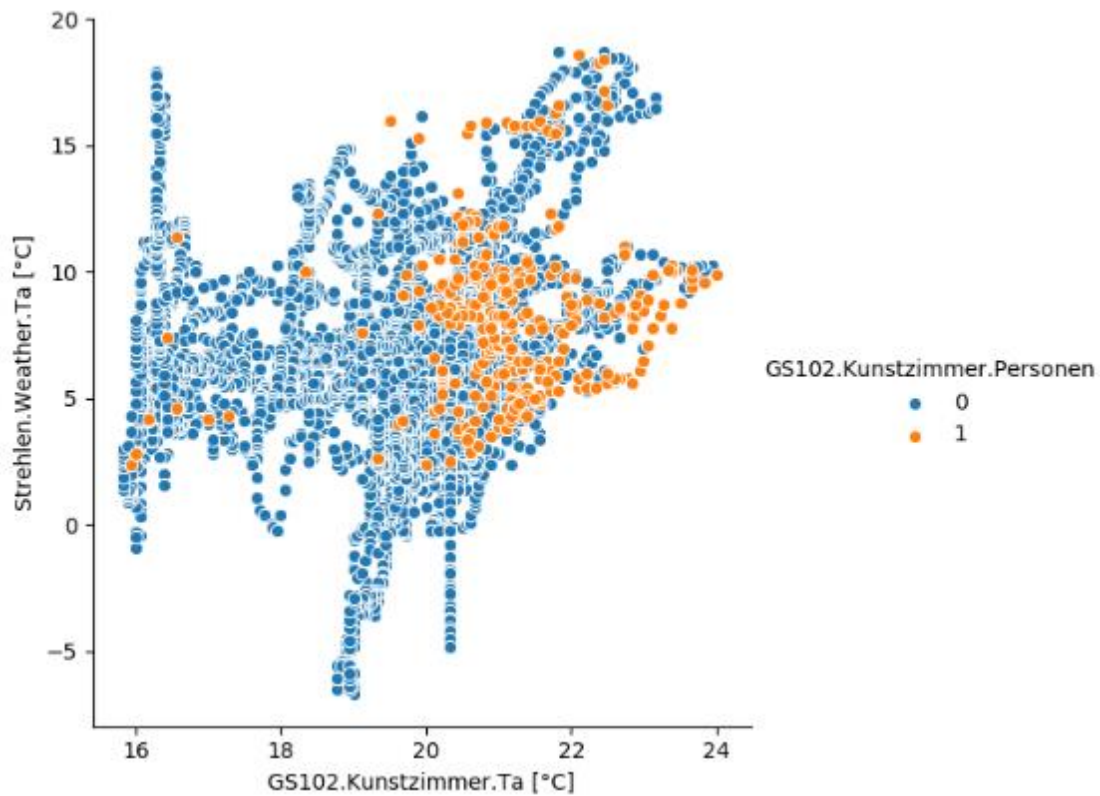


Abbildung 9: Umgebungstemperatur gegenüber Raumtemperatur bei Nutzung (1) und Nichtnutzung (0) im Kunstzimmer

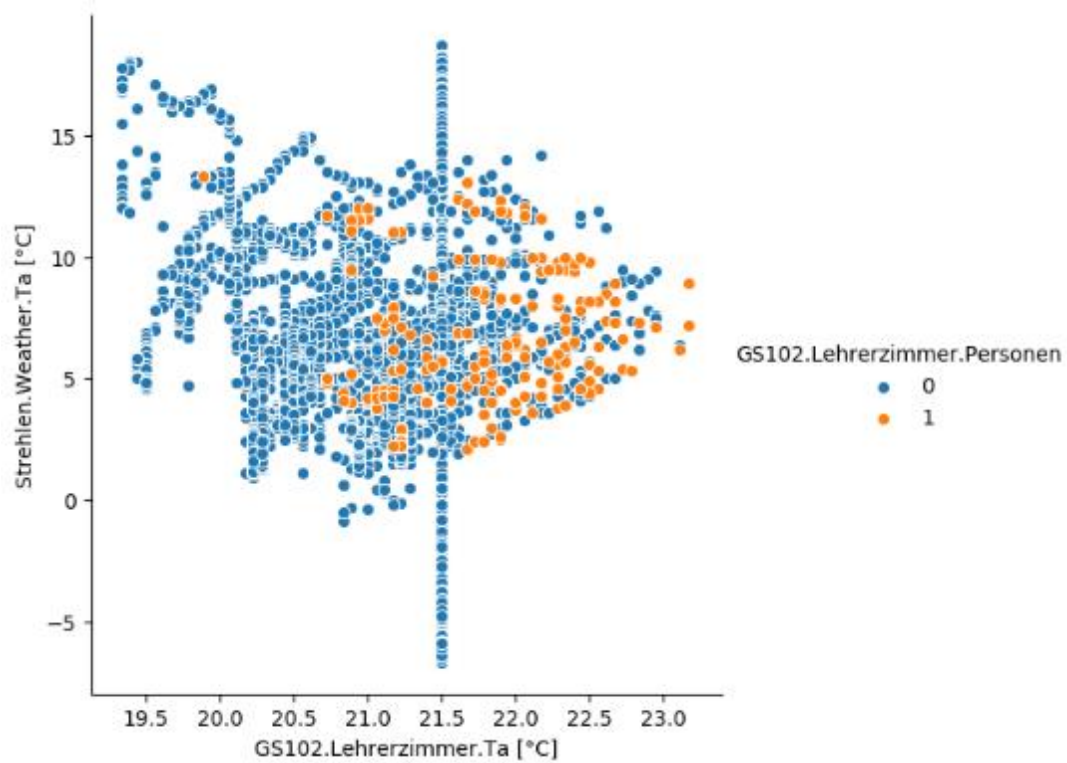


Abbildung 10: Umgebungstemperatur gegenüber Raumtemperatur bei Nutzung (1) und Nichtnutzung (0) im Lehrerzimmer

3 Auswertung der Szenarien

3.1 Nachtabstaltung der Pumpen

3.1.1 Raumtemperaturen

Das Abschalten der Pumpen soll keinen Einfluss auf die Raumtemperatur haben, wenn das Gebäude genutzt wird. Deswegen sollte eine Raumtemperatur von 20 °C um 6:00 Uhr erreicht werden, wenn die Schule genutzt wird. Um den Einfluss des Zeitpunktes des Wiedereinschaltens zu untersuchen, wurde gezählt wie häufig die Anforderung nicht eingehalten wurde. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 11 grafisch dargestellt. Dabei ist zu erkennen, dass im Zeitraum von 2:00 Uhr bis 5:00 Uhr die Anzahl der Unterschreitungen für alle Räume zunimmt. Um 5:30 Uhr ist ein starker Anstieg zu erkennen. Es ist auch zu sehen, dass es im Ausgangsszenario, d.h. dass die Pumpen nicht abgeschaltet werden, trotzdem an etwa 25 Tagen für die Klassenzimmer bzw. rund 10 Tagen für das Lehrerzimmer um 6:00 Uhr die geforderten 20 °C nicht erreicht werden. Das hängt vor allem mit der reduzierten Vorlauftemperatur am Wochenende zusammen. Dadurch kann die Heizung an kalten Tagen nicht genügend Heizleistung bereitstellen, um die Raumtemperatur konstant zu halten. Deswegen fällt die Temperatur langsam ab, weswegen am Montagmorgen eine längere Zeit benötigt wird, um die geforderte Temperatur zu erreichen.

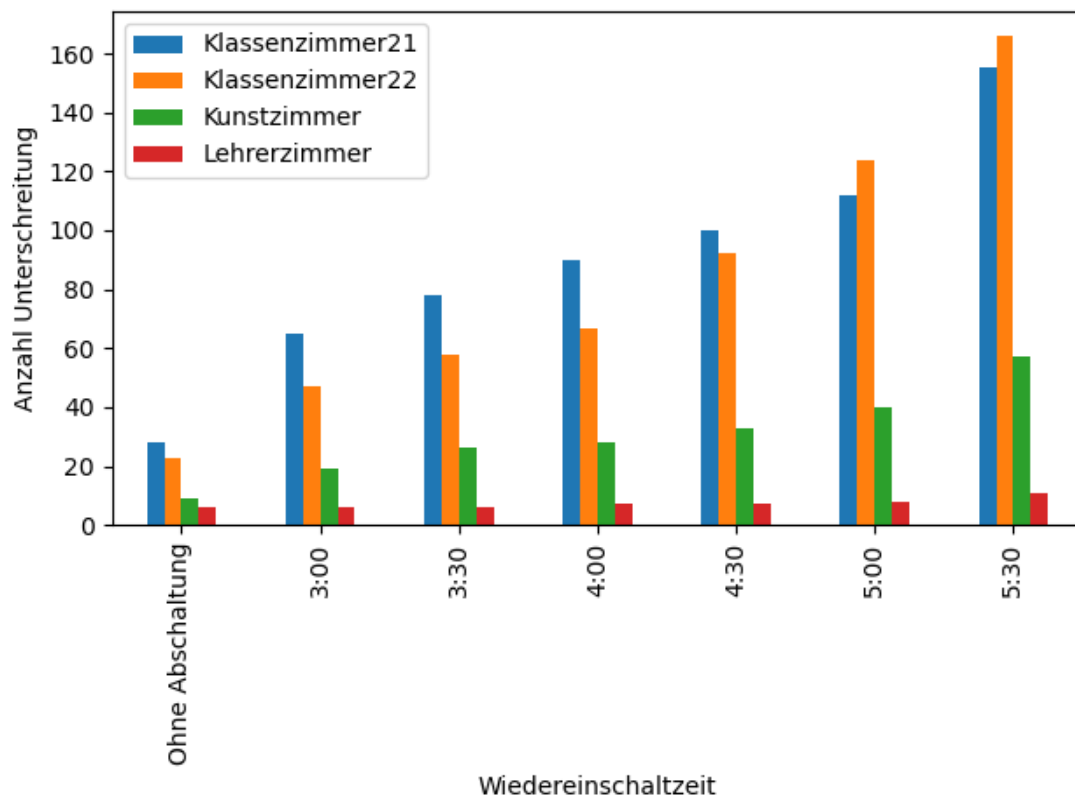


Abbildung 11: Anzahl der Tage, an denen die Anforderung von 20°C um 6:00 Uhr unterschritten wurde

Weiterhin wurde untersucht wie hoch die Temperatur ist, falls es zu einem Unterschreiten der geforderten Raumtemperatur um 6:00 Uhr kommt. Dazu wurden Boxplots erstellt. In Abbildung 12 ist der Aufbau eines Boxplots dargestellt. Er dient dazu die Streuung der Datenpunkte besser nachzuvollziehen indem er die Daten in vier Quartile teilt, wobei jedes davon 25 % der Datenpunkte repräsentiert. Die mittlere Linie des Boxplots repräsentiert den Medianwert. Dieser Wert liegt zwischen allen anderen Punkten, d.h. 50% der Werte liegen oberhalb des Medians und 50% unterhalb.

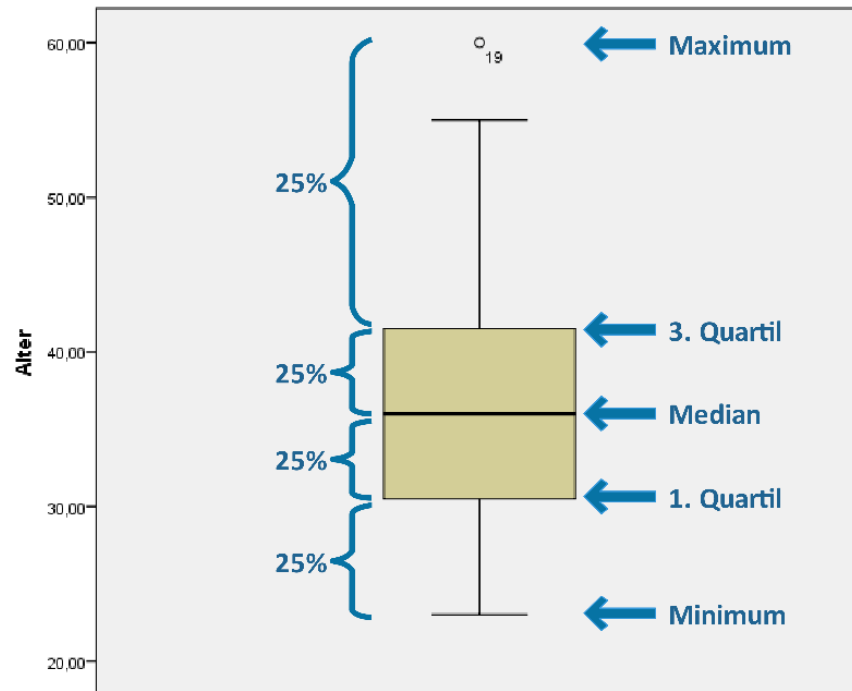


Abbildung 12: Darstellung eines Boxplots mit Erläuterung der einzelnen Bereiche (Quelle: <https://novustat.com/statistik-blog/spss-boxplot-interpretieren.html>, 30.06.2020)

In Abbildung 13 sind die Boxplots für die Temperaturen um 6:00 Uhr, wenn die Temperatur unterhalb von 20°C lag. Diese zeigen die Streuung der Temperaturen. Dabei gibt die orangefarbene Linie den Median an, also die Temperatur, die in der Mitte aller Werte liegt, d.h. die Hälfte der Daten liegt über diesem Wert und die andere Hälfte darunter. Es ist zu erkennen, dass der Median für die Klassenzimmer bis 4:00 Uhr relativ gleichbleibend bei ca. 19,6 °C liegt und rund 75 % der gemessenen Werte zwischen 19 °C und 20 °C liegt. Für das Klassenzimmer 22 bleibt der Median sogar bis 5:00 Uhr auf diesem Temperaturniveau. Allerdings sinken die minimalen Temperaturen auch je später die Pumpen wieder eingeschaltet werden. Für das Lehrerzimmer liegt der Median bis 3:30 Uhr etwas höher bei rund 19,7°C. Danach sinkt er langsam ab bis auf rund 19,4 °C um 5:30 Uhr. Die minimale Temperatur um 5:30 Uhr liegt bei etwa 17,9°C wohingegen bei den Klassenzimmern die niedrigste Temperatur bei 16°C liegt. Für das Lehrerzimmer nimmt der Median mit späteren Wiedereinschaltzeitpunkt zu. Das liegt daran, dass die geforderte Temperatur häufiger nicht eingehalten wird und dadurch die Anzahl der Datenpunkte steigt, aber die Temperatur beim Unterschreiten liegt jeweils nur geringfügig unterhalb der Grenze von 20°C. Somit liegen mehr Datenpunkte im Bereich von 19,9°C bis 20°C. Diese Ergebnisse zeigen, dass die Abschaltung nur geringfügig einen Einfluss auf das Lehrerzimmer hat.

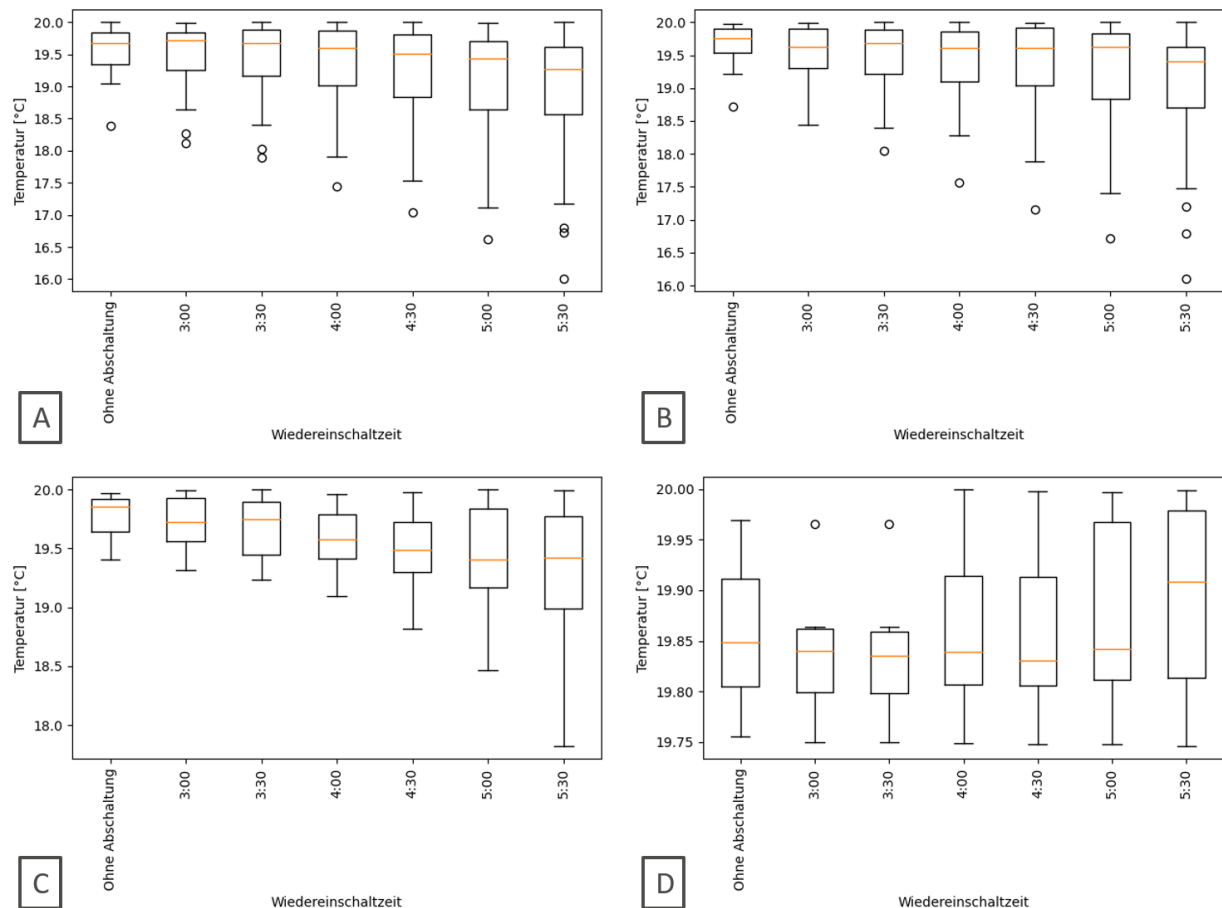


Abbildung 13: Raumtemperatur um 6:00 Uhr bei Unterschreiten von 20°C (A - Klassenzimmer 21, B- Klassenzimmer 22, C – Kunstzimmer, D: Lehrerzimmer)

Da ein Großteil der Schüler erst zum Einlass vor Unterrichtsbeginn um 7:40 Uhr in die Schule kommt, wurde zusätzlich das Verhalten der Raumtemperatur um 7:00 Uhr untersucht, wenn zuvor um 6:00 Uhr die geforderte Raumtemperatur nicht eingehalten wurde. Die Ergebnisse sind in Abbildung 14 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass für alle Szenarien die Raumtemperatur für das Klassenzimmer 21 in mindestens 75 % der Fälle über 20 °C liegt. Die geringste Temperatur liegt bei minimal rund 18,5 °C, wenn die Pumpe erst um 5:30 Uhr wieder eingeschaltet wird. Für das Klassenzimmer 22 ist zu erkennen, dass der Median mit späteren Einschaltzeitpunkten ansteigt und bei 5:30 Uhr rund 21°C erreicht. Dieses Verhalten hängt mit dem Überschwingen der Heizkörper zusammen, d.h. da die Raumtemperatur um 6:00 Uhr stärker unterschritten wurde, versucht der Heizkörper mit maximaler Leistung den Raum wieder aufzuheizen. Da die Heizkörperthermostat die veränderte Raumtemperatur verzögert messen und der Heizkörper nicht sofort komplett auskühlt wird auch nach Erreichen der erforderlichen Raumtemperatur Heizleistung an den Raum abgegeben. Das gleiche Verhalten zeigt sich auch für das Kunstzimmer, wenn der Einschaltzeitpunkt nach 4:30 Uhr liegt. Für das Lehrerzimmer ist die Temperaturverteilung relativ gleich zwischen 20,4°C und 21,9°C. Durch die nur geringfügige Unterschreitung um 6:00 Uhr können die Heizkörper den Raum bis 7:00 Uhr auf die Solltemperatur von 21°C heben. Somit lässt sich hieraus auch erkennen, dass die Abschaltung für das Lehrerzimmer

unkritisch ist. Das liegt insbesondere auch an der Lage des Raums im Gebäude. Das Lehrerzimmer grenzt im Vergleich zu den anderen Zimmern oben, unten und mit einer Wand an andere Räume. Dadurch verringern sich die Wärmeverluste.

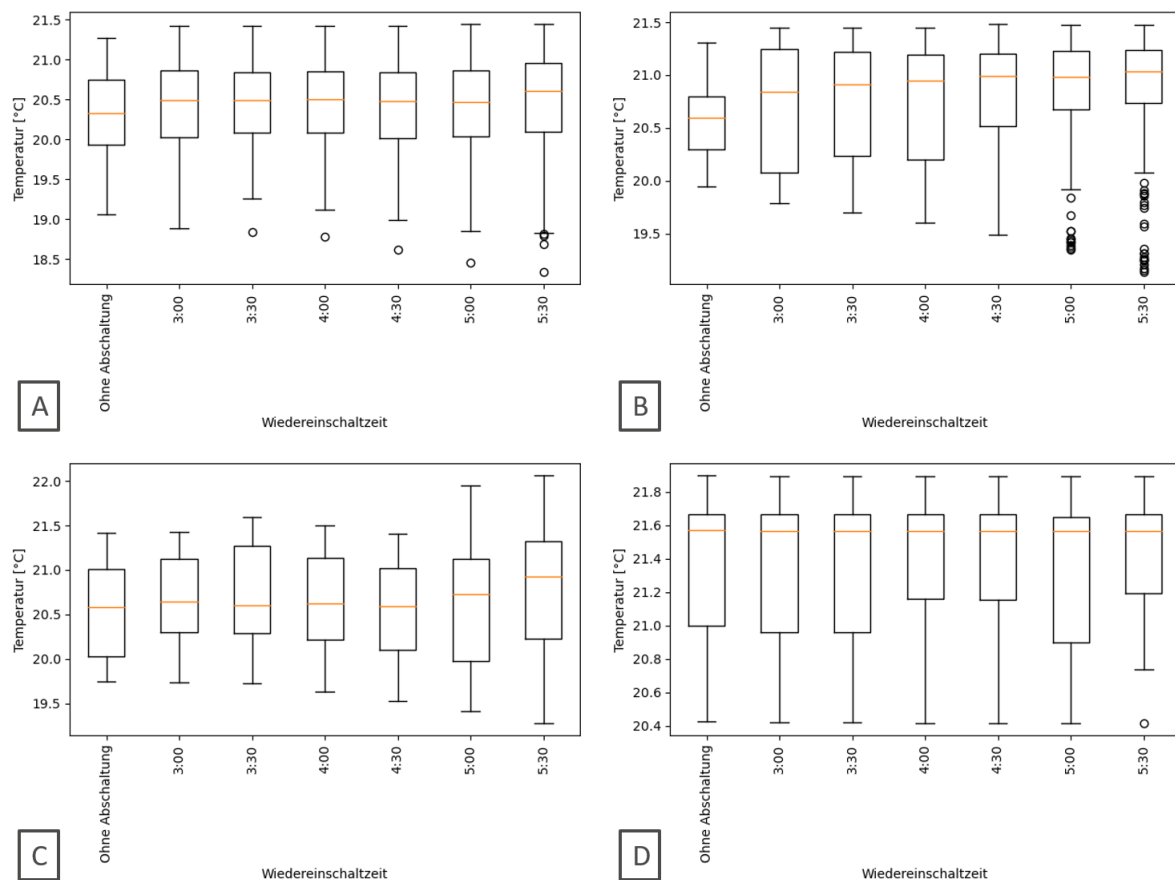


Abbildung 14: Raumtemperatur um 7:00 Uhr, wenn die Temperatur um 6:00 Uhr unterschritten wurde (A - Klassenzimmer 21, B- Klassenzimmer 22, C – Kunstzimmer, D: Lehrerzimmer)

3.1.2 Energiesparpotential

Für die betrachteten Wiedereinschaltzeiten wurde untersucht wie hoch das energetische Einsparpotential ist. Es wird von der aktuellen Betriebsweise der Heizungsanlage ausgegangen, d.h. die Temperatur wird während der Nacht und in den Nichtnutzungszeiten (Wochenende) um 15 K abgesenkt. Alle Energieeinsparungen beziehen sich auf diesen Ausgangszustand.

Das Einsparpotential an elektrischer Energie für den Umwälzpumpenbetrieb ist in Abbildung 15 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Energieeinsparung linear ansteigt. Das liegt vor allem daran, dass aufgrund der geringen Vorlauftemperaturen während der Nacht die Heizkörperventile mehr öffnen, um die Raumtemperatur zu halten. Es wird, sobald die Pumpen wieder anschalten, der Volumenstrom bereitgestellt, welcher eigentlich benötigt würde zum Erreichen der benötigten Heizleistung. Dadurch wird mehr Energie eingespart je länger die Pumpe abgeschaltet bleibt.

Das Einsparpotential ist für alle Räume nahezu gleich groß, da es sich um eine Hochrechnung, kleiner Unterschiede ergeben sich lediglich durch die Aufteilung des Pumpenvolumenstroms auf die beiden Gebäudeteile Hauptgebäude und Klassentrakt und darin witterungs- und nutzungsbedingt unterschiedlicher Thermostateinstellungen.

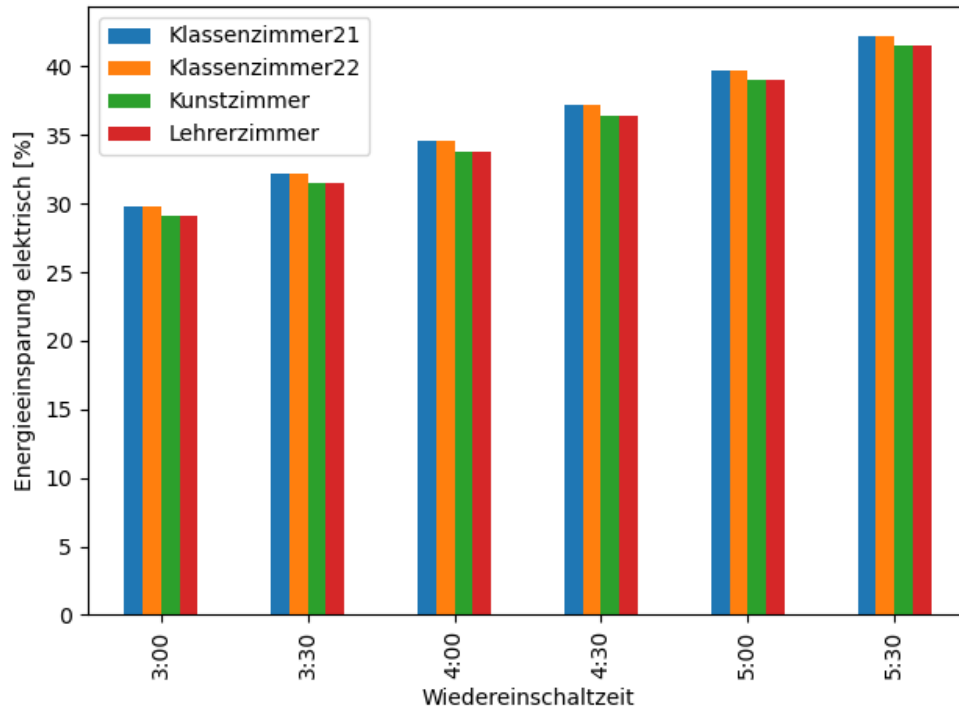


Abbildung 15: Einsparung Elektroenergie für den Umwälzpumpenbetrieb in Abhängigkeit von der Wiedereinschaltzeit

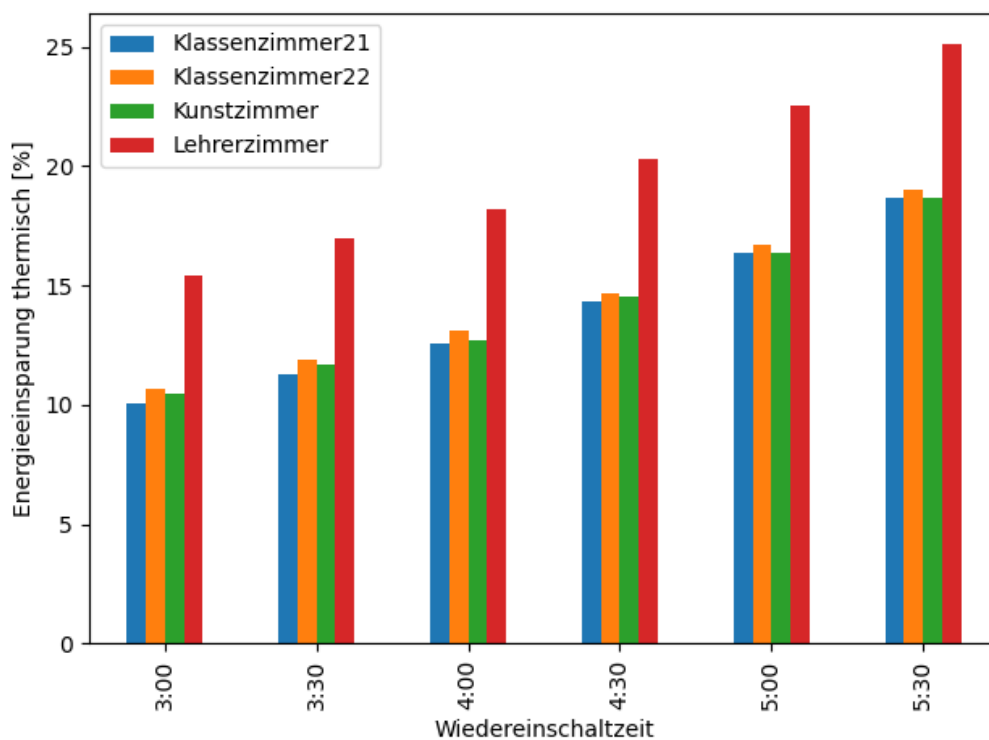


Abbildung 16: Einsparung Wärme in Abhängigkeit von der Wiedereinschaltzeit

In Abbildung 16 sind die Einsparpotentiale an Heizenergie für die betrachteten Wiedereinschaltzeitpunkte und die vier untersuchten Beispielsräume dargestellt. Auch hier ist zu erkennen, dass die Einsparungen ansteigen je später die Pumpen wieder eingeschaltet werden. Jedoch steigt das Einsparpotential um 5:30 Uhr stärker an als für die vorangegangenen Einschaltzeitpunkte.

Das liegt insbesondere daran, dass in dieser Zeit die Vorlauftemperatur des Heizkreislaufs (d.h. Ende des Absenkbetriebs) wieder angehoben wurde und somit mehr Heizwärme abgerufen werden kann, welche benötigt wird, um die in der Nacht gefallene Raumtemperatur wieder auf die geforderte Solltemperatur anzuheben. Für die drei Räume im 2. OG (d.h. beide Klassenzimmer und das Kunstzimmer) sind Einsparpotentiale an Heizenergie jeweils ungefähr auf dem gleichen Niveau und sind niedriger als jene für das Lehrerzimmer. Das ist damit zu begründen, dass diese Räume in der obersten Etage liegen und drei Außenwände und das Dach als Begrenzung zur (kalten) Außenluft haben. Somit ist der Wärmeverlust an die Umgebung in diesen Räumen größer, welcher beim Wiedereinschalten der Pumpen ausgeglichen werden muss. Für das Lehrerzimmer liegen die möglichen Einsparungen höher. Da der Raum an mehr Räumen (1. OG) angrenzt und somit geringere Wärmeverluste hat, wird weniger Energie beim Wiedereinschalten benötigt.

3.2 Saisonale Abschaltung der Pumpen anhand Monaten

In diesem Szenarium werden die Umlaufpumpen des Heizungssystems basierend auf einem monatlichen Zeitplan ausgeschaltet. In der Simulation wird analysiert wann die Pumpen abgeschaltet werden können um zwar eine maximal hohe Energieeinsparung zu erzielen, jedoch die Raumtemperatur während der Nutzung nicht unter 20 °C fallen zu lassen.

Das Modell ermöglicht es eine effiziente und einfache Variation der Ein- und Ausschaltmonate. Die möglichen Ausschaltmonate wurden zwischen April und Juni und für die Wiedereinschaltmonate der Heizungspumpe Juli bis September definiert. So dass neun Varianten entstehen die man gegeneinander Vergleichen kann. Besonderes Augenmerk fällt dabei auf die Parameter:

- Behaglichkeit bzw. Raumtemperatur
- Energieeinsparung durch die Pumpenabschaltung thermisch und elektrisch

In diesem Szenario ist es durch die harte monatliche Ab- und Zuschaltung der Heizungs-umwälzpumpe selbstverständlich, dass es an einigen Tagen aufgrund der niedrigen Außentemperaturen zu verringerten Behaglichkeit kommen kann. Die Optimierungsaufgabe besteht also darin die Energieeinsparung zu maximieren jedoch die Zufriedenheit und Behaglichkeit für die Schüler und Lehrer nicht zu riskieren.

3.2.1 Raumtemperaturen

In der Abbildung 17 ist zum einen zu erkennen, dass auch ohne Abschaltung es an einigen Tagen zu einer Unterschreitung der Raumtemperatur kommen kann. Vergleicht man die unterschiedlichen Szenarien stellt man fest, dass eine späte Abschaltung der Umwälzpumpe einen größeren Einfluss auf das Raumklima hat als eine frühzeitige Wiedereinschaltung. Dies ist mit der thermischen Trägheit des Gebäudekörpers zu begründen.

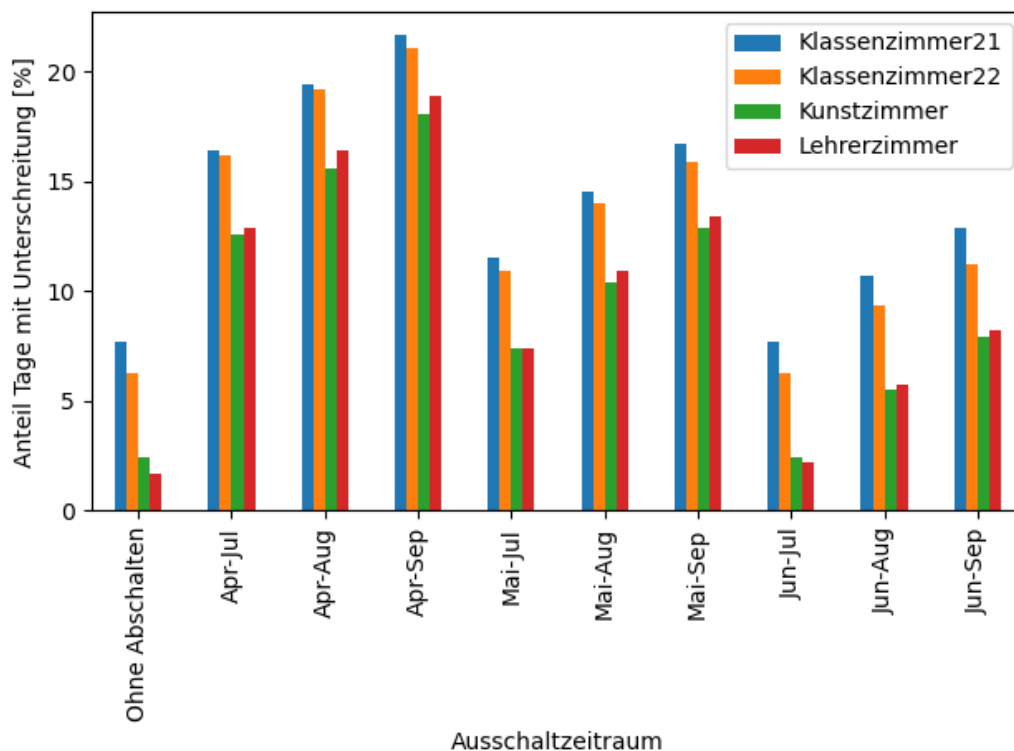


Abbildung 17: Anteil der Tage, an denen die Anforderung von 20°C um 6:00 Uhr unterschritten wurde

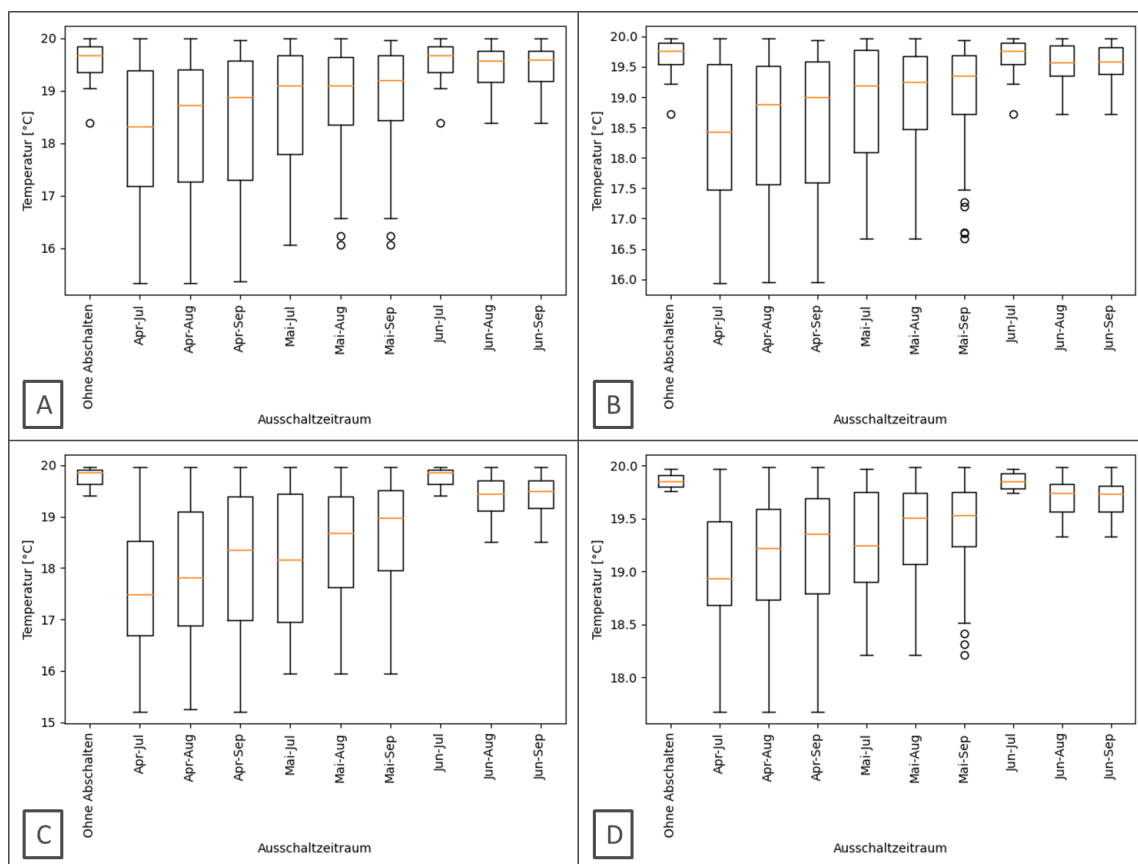


Abbildung 18: Raumtemperatur um 6:00 Uhr bei Unterschreiten von 20 °C (A - Klassenzimmer 21, B- Klassenzimmer 22, C – Kunstzimmer, D: Lehrerzimmer)

Wie auch in Kapitel 3.1.1 wird in Abbildung 18 und Abbildung 19 die Raumtemperatur nochmals detailliert betrachtet. Die erste Abbildung veranschaulicht wie niedrig die Temperaturen um 6:00 Uhr morgens in den Räumen sind, wenn die 20 °C nicht erreicht wurden. Es ist bemerkenswert, dass in den Varianten mit den Abschaltmonaten April und Mai eine Großzahl an Tagen mit geringen Temperaturen von im Durchschnitt ca. 18 °C aufweist. Lediglich in dem Abschaltmonat Juni herrschen bei einer Unterschreitung der Raum-solltemperatur 19,5 °C. Dieses Ergebnis ist bei allen untersuchten Räumen gleichermaßen zu verzeichnen.

Dieser Temperaturabfall durch die Abschaltung wird in der Abbildung 19 nochmals verdeutlicht. Hier wird der exemplarische Jahresverlauf der Raumtemperatur im Klassenzimmer 21 für die unterschiedlichen Szenarien dargestellt. Es ist zu sehen, dass bei einer Pumpenabschaltung im April oder Mai über längere Zeiten die Temperatur unter 20 °C abfällt. Nur bei einer Abschaltung im Juni ist die Außentemperaturen bereits konstant hoch um das Raumklima aufrechtzuhalten. Anders verhält sich der Einfluss einer verkürzten Pumpenabschaltung. Aus der Simulation und den damit einhergehenden Visualisierungen lässt sich nur ein Unterschied zwischen einer Wiedereinschaltung im Juli, August oder September darstellen. Dieser betrifft die Anzahl der Tage an dem die Temperatur unterschritten wird. Diese Unterschreitung beläuft sich jedoch anders als bei den anderen Szenarien auf geringe 0,5 K. Somit ist zwischen den Varianten Jun – Jul, Jun – Aug und Jun – Sep eine genauere Betrachtung der Energieeinsparung möglich.

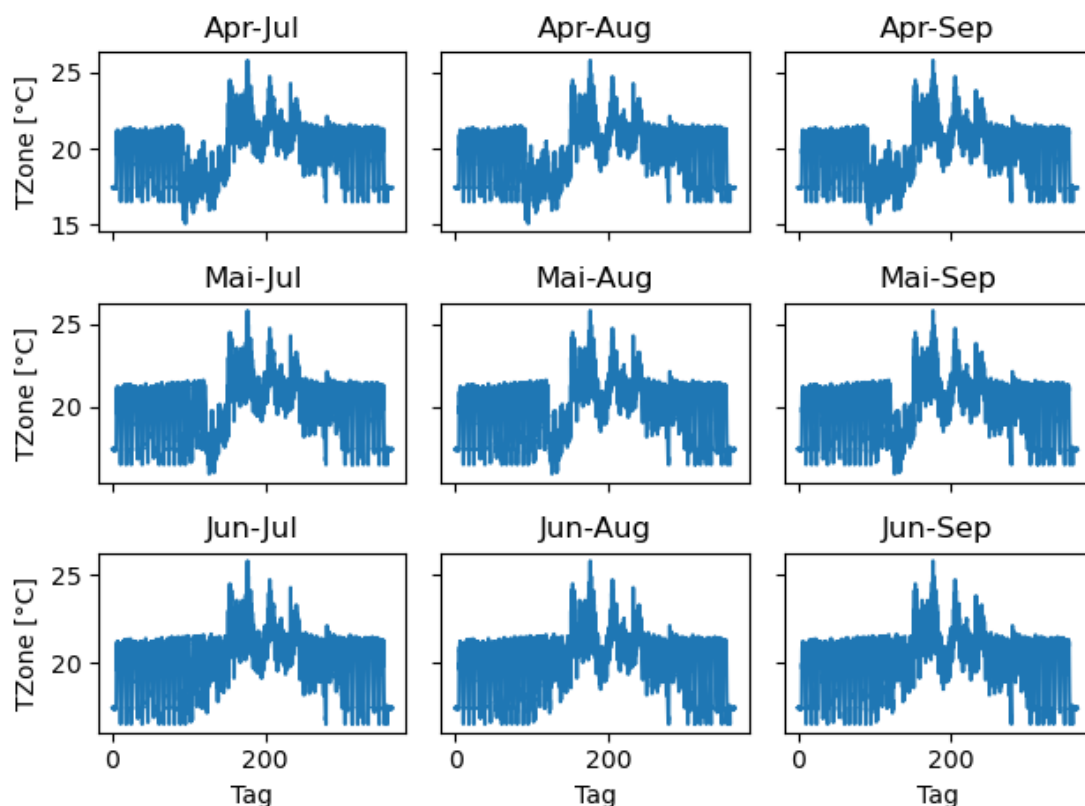


Abbildung 19: Exemplarische Raumtemperatur im Jahresverlauf des Klassenzimmers 21 für alle Abschaltvarianten

3.2.2 Energieeinsparung

Nachdem die Auswirkungen der monatlichen Pumpenabschaltung auf die Raumtemperatur untersucht wurden, wird in diesem Kapitel die potentielle Energieeinsparung dieser Maßnahme sowohl thermisch als auch elektrisch untersucht.

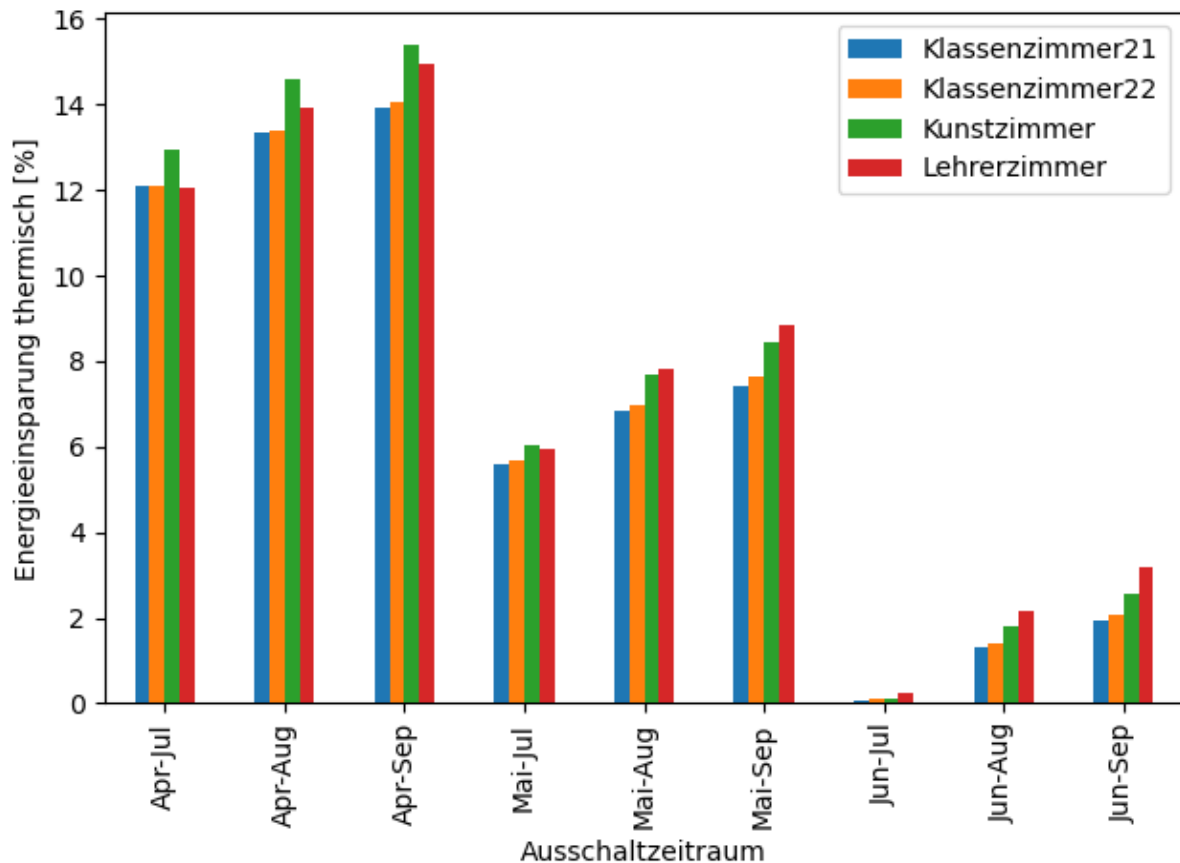


Abbildung 20 zeigt dabei die thermische Energieeinsparung der unterschiedlichen Szenarien für die unterschiedlichen Betrachtungsräume. Als Erstes fällt ein starker Zusammenhang zwischen Ausschaltmonat und der potentiellen Wärmeeinsparung auf. Je eher die Heizung ausgeschaltet wird desto mehr Energie wird eingespart. Dies ist nicht weiter verwunderlich, da bereits im Kapitel 3.2.1 festgestellt wurde, dass zu diesem Monaten die Umgebungstemperatur noch nicht ausreichend und konstant hoch genug ist um den Räume auf einer behaglichen Temperatur von 20 °C zu halten. Es wird somit nicht überschüssige Pumpenenergie eingespart sondern die Räume werden in dieser Zeit unterversorgt. Anders verhält es sich mit den Szenarien mit dem Abschaltmonat Juni. Hier konnte bereits festgestellt werden dass diese Energie nicht zwingend für eine Raumerwärmung notwendig ist. Hier ist zu sehen, dass eine Pumpenabschaltung zwischen Juni und Juli aus thermischer Sicht zu keiner nennenswerten Energieeinsparung führt. Nutzt man jedoch die thermische Trägheit des Gebäudes und verlängert man die Ausschaltzeit bis in den September so sind Wärmeeinsparungen von bis zu 3 % in den individuellen Räumen möglich.

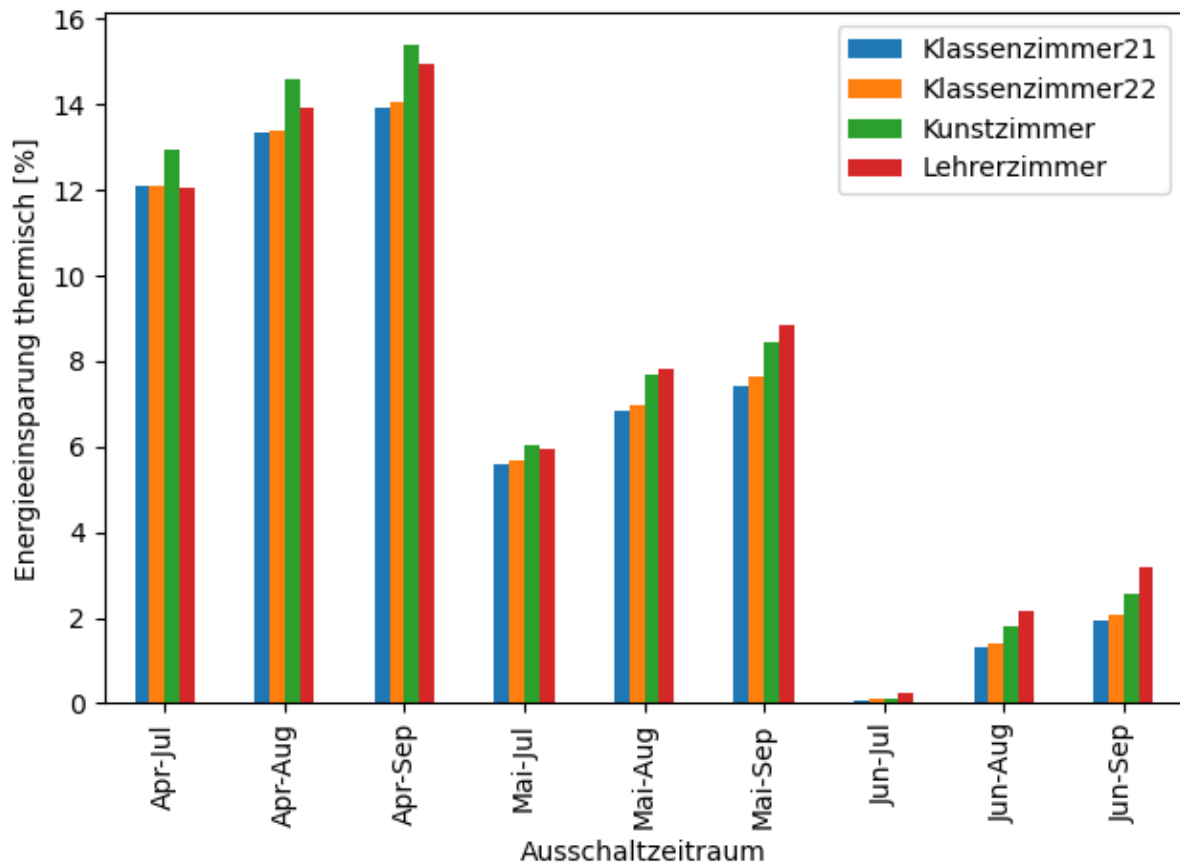


Abbildung 20: Einsparung Wärme für den Umwälzpumpenbetrieb in Abhängigkeit der Abschaltmonate

In Abbildung 21 wird die Einsparung einer Pumpenabschaltung auf die elektrische Energiebilanz dargestellt. Die Szenarien zeigen ein ähnliches Verhalten bei den elektrischen Energieeinsparpotentialen wie auch bei den Wärmeeinsparpotentialen. In den Abschaltmonaten Juni bis September können jährlich je nach Raum bis zu 2,5 % elektrische Energie durch eine Abschaltung der Umwälzpumpe eingespart werden.

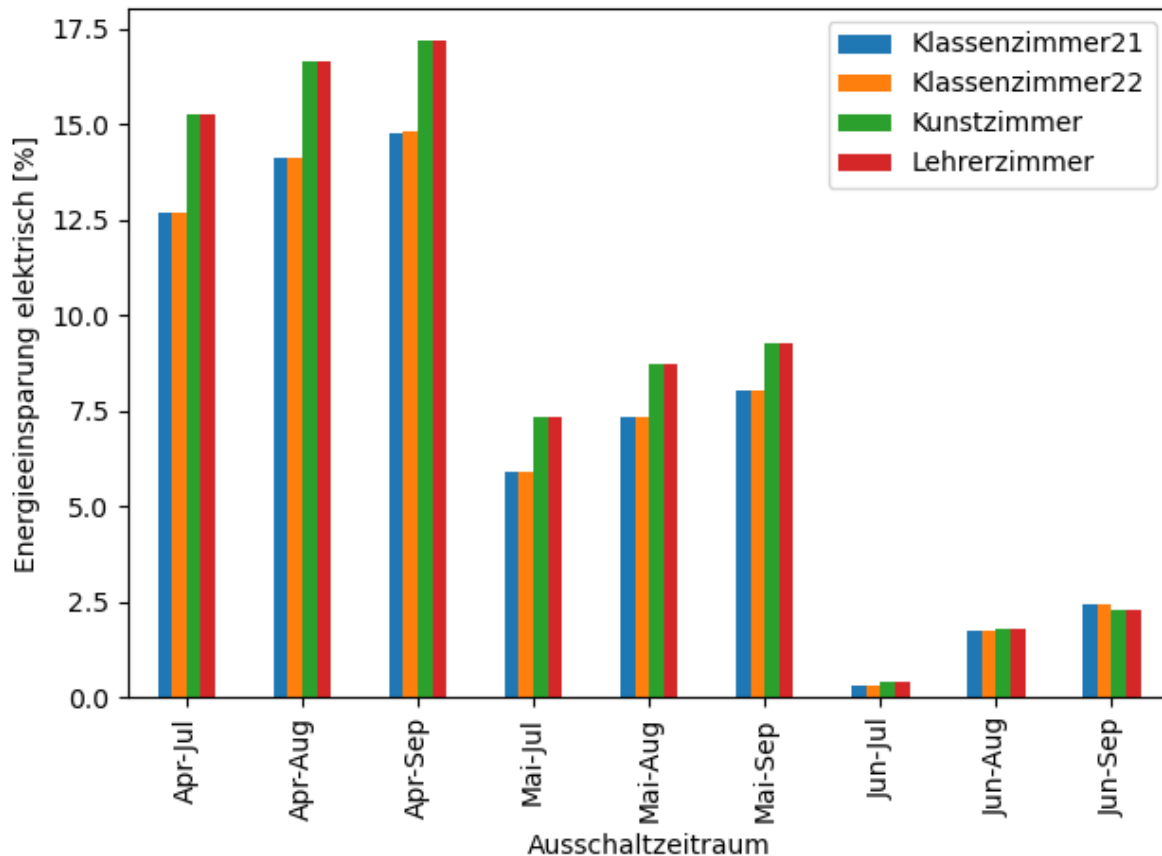


Abbildung 21 Einsparung Elektroenergie für den Umwälzpumpenbetrieb in Abhängigkeit der Abschaltmonate

Im Vergleich zu den in Kapitel 3.1 vorgestellten nächtlichen Pumpenabschaltung kommt es bei dieser Variante nur zu marginalen Energieeinsparungen. Diese sollten jedoch nicht unterschätzt werden, da der Aufwand für die Umsetzung deutlich geringer ist. Auch ist eine Kombination aus beiden Varianten möglich und führt besonders unter dem Aspekt der Hochskalierung auf viele Schulgebäude in Dresden zu einen nennenswerten Gesamteffekt. Des Weiteren ist anzumerken, dass bei einer starren monatlichen Abschaltung der Umwälzpumpen theoretisches Einsparungspotential vergeben wird, da sich die Monate sowohl innerhalb der Tagestemperaturen als auch von Jahr zu Jahr unterscheiden können. Daher wird im Kapitel 3.3 eine dynamischere saisonale Abschaltung der Umwälzpumpe untersucht.

3.3 Saisonale Abschaltung der Pumpen anhand der Außentemperatur

In diesem Szenarium werden die Umlaufpumpen des Heizungssystems basierend auf der Außentemperatur ein- und ausgeschaltet. Auch hier könne unterschiedliche Ein- und Ausschalttemperaturen im Modell simuliert werden. Wie auch in den anderen Szenarien bilden

die beiden Parameter, Raumtemperatur in Nutzungsphasen bei 20 °C und eine maximale Energieeinsparung die vorgegebenen Rahmenbedingungen für die Optimierung.

In dieser Betrachtung wurde die Umwälzpumpe bei der angegebenen oberen Temperaturgrenze abgeschaltet und der entsprechenden unteren Temperaturgrenze wieder zugeschaltet. Das hat den Vorteil, dass dynamisch auf witterungsbedingte Temperaturschwankungen reagiert und insbesondere in den Übergangsmonaten auch ein entsprechendes Energieeinsparpotential, im Vergleich zur starren monatlichen Abschaltung, genutzt werden kann.

3.3.1 Raumtemperaturen

In diesem Abschnitt wird der Einfluss dieser Energieeinsparmaßnahme auf die Raumtemperaturen betrachtet. Wie auch bei den anderen Maßnahmen und der unregelmäßigen Variante kommt es auch bei dieser Variante zu Tagen, an denen die Zimmer um 6:00 Uhr morgens nicht 20°C aufweisen. Abbildung 22 zeigt allerdings, dass dieser Anteil im Vergleich zur unregelmäßigen Variante nicht erheblich höher ausfällt.

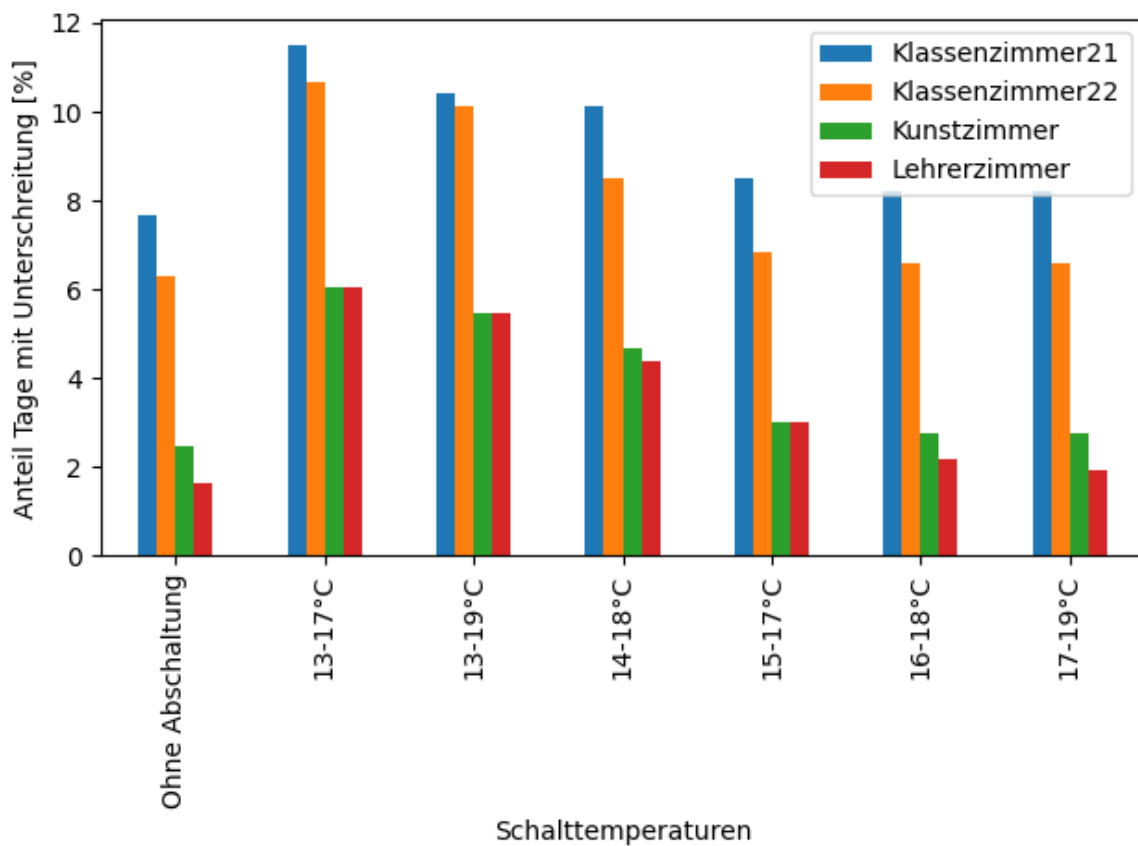


Abbildung 22 Anteil der Tage, an denen die Anforderung von 20°C um 6:00 Uhr unterschritten wurde

Noch deutlicher wird es, wenn die Temperaturen bei einer solchen Unterschreitung betrachtet werden. Hier fällt auf, dass in allen Zimmern und auch allen Varianten es lediglich zu einer minimalen Unterschreitung der Raumtemperatur von ca. 0.3 K kommt. Teilweise ist kein Unterschied zu der Ursprungsvariante zu erkennen. Dies zeigt dass im Vergleich zur starren saisonalen Abschaltung der Umwälzpumpe, diese dynamische Abschaltung das

Raumklima nicht, bzw. marginal beeinflusst und somit aus dieser Sicht gut als Energieeinsparmaßnahme eignet. Wählt man die Schalttemperaturen besonders niedrig oder mit einer hohen Spreizung zwischen Ein- und Ausschalten so kann man eine Verringerung der Raumtemperatur erkennen.

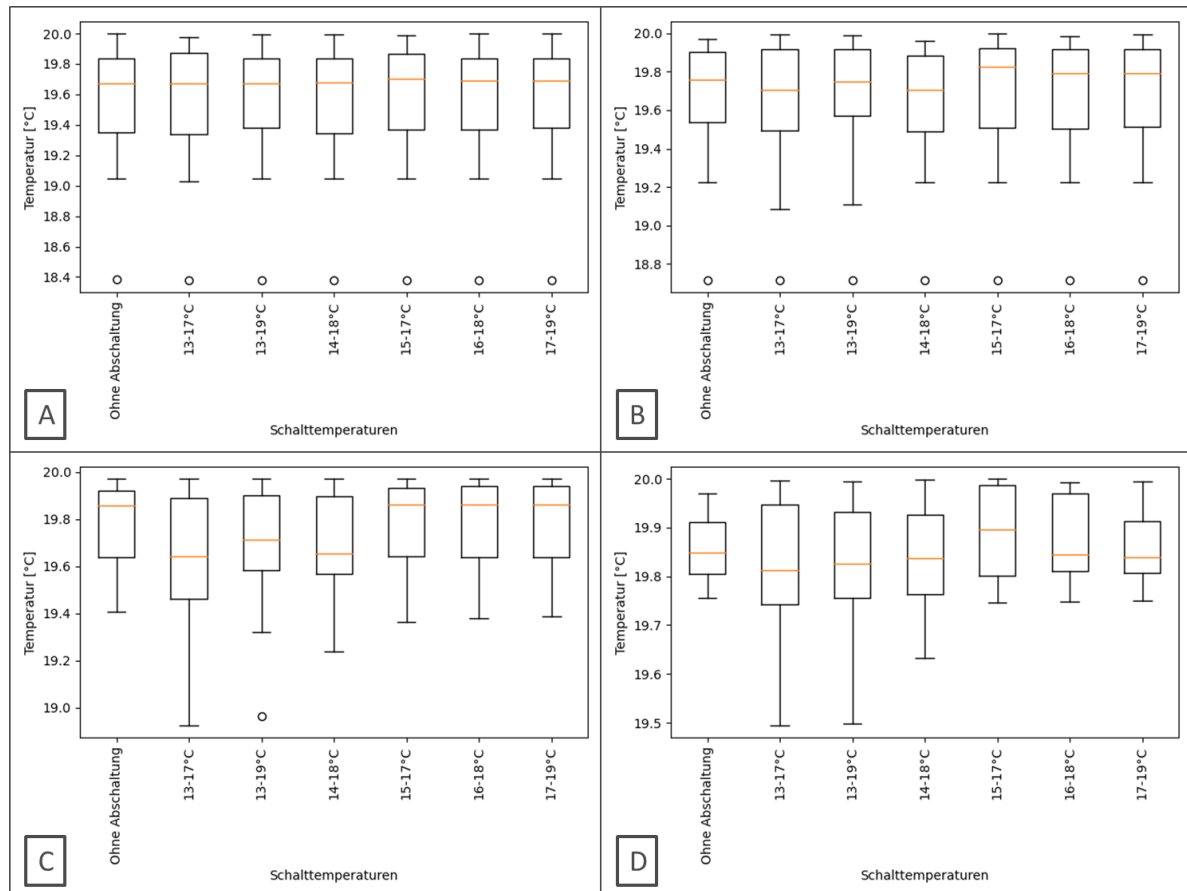


Abbildung 23 Raumtemperatur um 6:00 Uhr bei Unterschreiten von 20 °C (A - Klassenzimmer 21, B- Klassenzimmer 22, C – Kunstzimmer, D: Lehrerzimmer)

3.3.2 Energieeinsparung

Da im vorherigen Abschnitt die Auswirkungen einer dynamisch, temperaturabhängigen Abschaltung der Umwälzpumpe beleuchtet wurden, werden in diesem Kapitel die potentiellen Energieeinsparungen untersucht. Abbildung 24 zeigt das Potential der Wärmeeinsparung durch diese Maßnahme in Abhängigkeit der unterschiedlichen Räume und Schalttemperaturen. Es ist zu erkennen, dass eine besonders niedrige Wiedereinschalttemperatur und entsprechend hohe Ausschalttemperatur, wie z.B. bei Variante 13 °C - 17 °C, ein Wärmeeinsparpotential in den entsprechenden Räumen zwischen 3,8 % bis zu 5,3 % ermöglicht. Aber auch konservativere Schaltungen erzielen bereits Einsparungen des Wärmebedarfs von ca. 2 - 3 %.

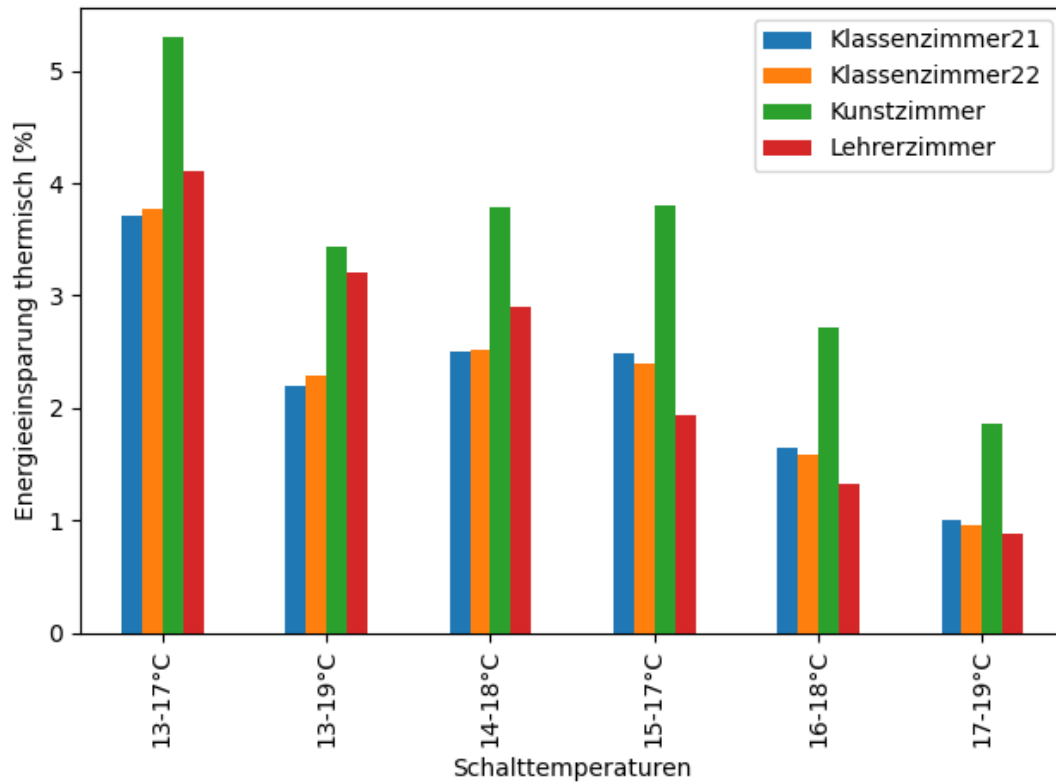


Abbildung 24 Einsparung Wärme für den Umwälzpumpenbetrieb in Abhängigkeit der Abschalttheizkurve

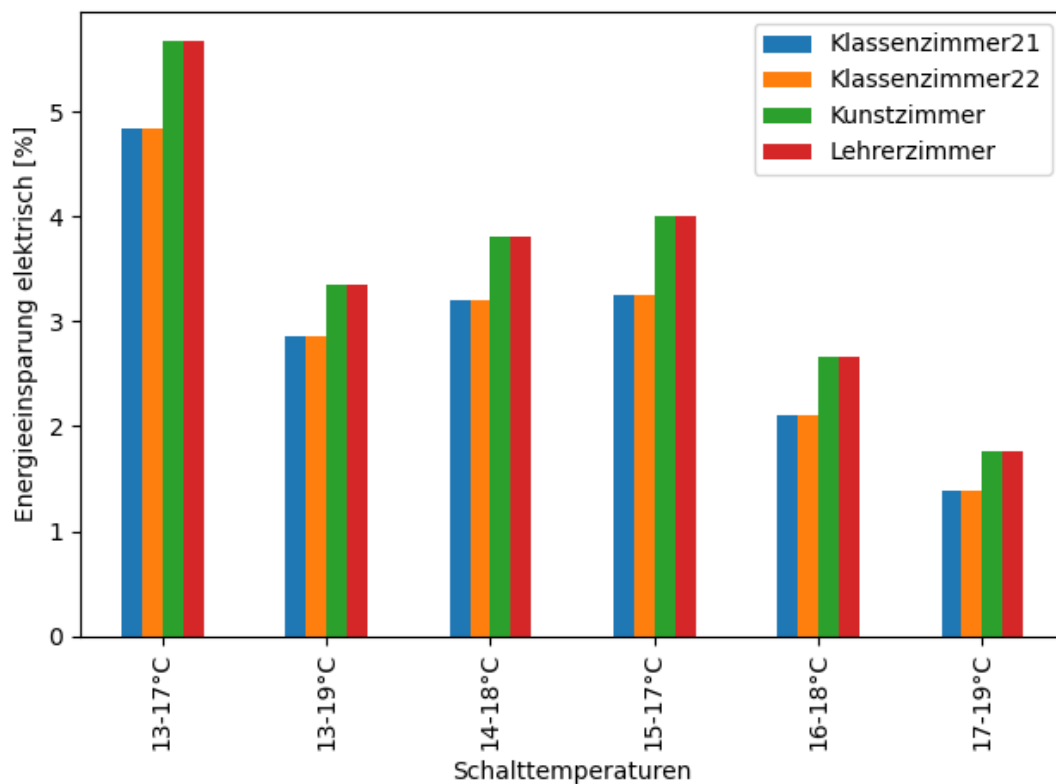


Abbildung 25 Einsparung elektrische Energie für den Umwälzpumpenbetrieb in Abhängigkeit der Abschalttheizkurve

In Abbildung 25 ist das elektrische Energieeinsparpotential der unterschiedlichen Varianten dargestellt. Auch hier ist bei einer niedrigeren Ausschalttemperatur ein höheres Einsparpotential vorhanden. Bei der elektrischen Energie handelt es sich um ein Einsparpotential von bis zu 5 %. Im Vergleich zum thermischen Einsparpotential sind die konservativeren Szenarien sogar noch effektiver. Es können durchschnittlich ca. 3 % eingespart werden.

Im Vergleich zu einer starren saisonalen Abschaltung der Heizungsumwälzpumpe konnten sowohl höhere Energieeinsparungen erzielt werden, zum anderen konnten auch die Raumtemperaturen besser die Mindestanforderungen von 20 °C erfüllen. Auch bei dieser Saisonalen Abschaltung sind im Vergleich zu einer nächtlichen Abschaltung nur niedrige einstellige Prozente an Energie einsparbar. Jedoch ist auch hier das Argument der Skalierbarkeit und damit der Energieeinsparung durch viele Schulen mit den gleichen Maßnahmen wirksam. Auch kann diese Maßnahme mit einer nächtlichen Pumpenabschaltung kombiniert werden.

4 Fazit

Zur weiteren Optimierung der Heizungsanlage der 102. Grundschule „Johanna“ in der Dresdner Johannstadt wurden anhand von Raummodellen, welche mit realen Messdaten validiert wurden, unterschiedliche Maßnahmen bewertet. Hierbei ging es darum die Betriebszeiten der Pumpen zu minimieren und somit Energie einzusparen. Als erste Maßnahme wurde die Abschaltung der Pumpen während der Nacht betrachtet. Dazu wurden die Pumpen ab 20:00 Uhr abgeschaltet und dann für unterschiedliche Wiedereinschaltzeitpunkte analysiert, wie sich die Raumtemperatur 6:00 Uhr verhält und ob mindestens eine Temperatur von 20°C um diese Uhrzeit eingehalten wird. Dabei hat sich ergeben, dass die Raumtemperatur in den Klassenzimmern stärker absinkt und somit häufiger die Temperatur um 6:00 Uhr unterhalb der Solltemperatur liegt. Teilweise lag die Temperatur bei 16 °C um diese Uhrzeit, wenn die Pumpe erst um 5:30 Uhr wieder eingeschaltet wurde. Eine Wiedereinschaltung der Pumpe um 4:00 Uhr sollte jedoch ausreichen, um die Räume bis 6:00 Uhr wieder aufzuheizen, weswegen diese Wiedereinschaltzeit für die prototypische Umsetzung in der 102. Grundschule empfohlen wird. Aufgrund anderer Aktivitätsgrade und physischer Merkmale der Schüler kann eine solche Einstellung für weiterführende Schulen (z.B. Gymnasium, Realschule, Oberschule) differieren. Eine erneute Simulationsuntersuchung mit angepassten Parametern wird für diese Schultypen daher ebenfalls vorgeschlagen.

Tabelle 2: Bewertungskriterien für die Pumpenabschaltung über Nacht mit Wiedereinschalten um 4:00 Uhr

Endenergieeinsparung Schule (ohne Turnhalle) Heizwärme Gesamt	22,8 MWh/a (14,2 %)
Endenergieeinsparung Schule (ohne Turnhalle) Elektroenergie Gesamt	0,4 MWh/a (1,4 %)
Primärenergieeinsparung Schule (ohne Turnhalle) Gesamt	5,9 MWh/a
CO ₂ -Emissionenseinsparung Schule (ohne Turnhalle) Gesamt	1,2 t/a
Kostenersparnis Betrieb Schule (ohne Turnhalle) Gesamt	1.500 €/a

Tabelle 2 zeigt die anhand des gewählten Wiedereinschaltenszenarios (04:00 Uhr) aus den Simulationsergebnissen der 4 Räume hochgerechneten Einsparpotentiale der untersuchten Methodik der nächtlichen Pumpenabschaltung. Für die Berechnung der einzelnen Bewertungskriterien kamen Standardwerte des Energieversorgers DREWAG (2019 Daten – MAtchUp-Projektreferenz) zum Einsatz

- Primärenergiefaktor: Fernwärme: 0,23 Elektroenergie: 1,8
- CO₂-Emissionsfaktor: Fernwärme: 0,0454 kg/kWh Elektroenergie: 0,435 kg/kWh

- Betriebskosten: Fernwärme: 0,06037 €/kWh Elektroenergie: 0,2752 €/kWh

Die zweite analysierte Maßnahme betrachtet eine saisonale Abschaltung der Umwälzpumpe. Diese kann zum einen statisch anhand von Kalendermonaten stattfinden, zum anderen ist es auch möglich, diese anhand der Außentemperaturen ab- und wieder einzuschalten. In Tabelle 3 wird das Potential einer statischen saisonalen Pumpenabschaltung zwischen Juni und September exemplarisch dargelegt. Die Maßnahme erreicht im Vergleich zu einer nächtlichen aber ganzjährigen Pumpenabschaltung ca. 10 % des Einsparpotentials. Es können mit dieser Maßnahme knapp 1 MWh/a an Primärenergie eingespart werden.

Tabelle 3: Bewertungskriterien für die statische saisonale Pumpenabschaltung zwischen Juni und September

Endenergieeinsparung Schule (ohne Turnhalle) Heizwärme Gesamt	3,9 MWh/a (2,43 %)
Endenergieeinsparung Schule (ohne Turnhalle) Elektroenergie Gesamt	0,027 MWh/a (0,09 %)
Primärenergieeinsparung Schule (ohne Turnhalle) Gesamt	0,95 MWh/a
CO ₂ -Emissionenseinsparung Schule (ohne Turnhalle) Gesamt	0,2 t/a
Kostenersparnis Betrieb Schule (ohne Turnhalle) Gesamt	240 €/a

Tabelle 4: Bewertungskriterien für die dynamische saisonale Pumpenabschaltung bei 18 °C und ein Wiedereinschaltung bei 14 °C Außentemperatur

Endenergieeinsparung Schule (ohne Turnhalle) Heizwärme Gesamt	0,47 MWh/a (2,9 %)
Endenergieeinsparung Schule (ohne Turnhalle) Elektroenergie Gesamt	0,04 MWh/a (0,14 %)
Primärenergieeinsparung Schule (ohne Turnhalle) Gesamt	1,16 MWh/a
CO ₂ -Emissionenseinsparung Schule (ohne Turnhalle) Gesamt	0,23 t/a
Kostenersparnis Betrieb Schule (ohne Turnhalle) Gesamt	295 €/a

Tabelle 4 zeigt die Ergebnisse für das Gesamtgebäude bei der Umsetzung einer dynamischen, saisonalen Pumpenabschaltung ab 18 °C Ausschalttemperatur bzw. 14 °C Wiedereinschalttemperatur. Auch hier kann nicht annähernd das Potential einer nächtlichen Pum-

penabschaltung erreicht werden. Im Vergleich zu einer statischen saisonalen Pumpenabschaltung sind die Einsparpotenziale jedoch tendenziell höher. Es können 1,16 MWh Primärenergie jährlich eingespart werden, was zu einer Kostenreduktion von ca. 300 € und einer CO₂ Reduktion von 230 kg jährlich führt.

Das dargestellte Einsparungspotential stellt aufgrund der getroffenen Annahmen ein mögliches Grenzpotential dar. Der Einfluss auf den Gesamtelektroenergiebedarf ist dabei vergleichbar gering, da die Umwälzpumpe bereits modernisiert (d.h. differenzdruckgeregelter Hocheffizienzpumpe) wurde und somit nur einen geringen Anteil am o.g. Gesamtelektroenergiebedarf hat.

Aufgrund der Mitauskühleffekte benachbarter Räume, die mittels des gewählten Einzelraumsimulationsansatzes nicht detailliert betrachtet wurde, ist davon auszugehen, dass die Wiedereinschaltzeit ggf. ein wenig früher anzusetzen ist, und damit teilweise das Grenzpotential der Einsparungen nicht gehoben werden kann. Dem entgegen entstehen jedoch mögliche zusätzliche Wärmegewinne durch eine detailliertere Abbildung der Beleuchtung und zusätzlicher innere Wärmegewinne durch Elektroenergieverbraucher. Auch ist im Rahmen der Umsetzung eine Anpassung des Absenkbetriebs der Vorlauftemperatur zu untersuchen.

Das größte Einsparpotential liegt bei einer nächtlichen Abschaltung der Umwälzpumpen. Daher wird alles in allem die prototypische Umsetzung einer Nachtabschaltung der Umwälzpumpe des Heizsystems empfohlen. Eine fortwährende Überprüfung des Raum- und Systemverhaltens mittels weiterer Monitoring-Berichte ist jedoch in der Folge obligatorisch.

Eine saisonale Abschaltung der Umwälzpumpen wird lediglich in Kombination zur nächtlichen Abschaltung empfohlen. Aus energetischer Sicht ist dabei eine dynamische Abschaltung ratsam. Da der Unterschied zu einer statischen Abschaltung jedoch gering ausfällt, sind hier im besonderen Maße Kosten und Aufwand zusätzlich abzuschätzen. Da eine solche Abschaltung jedoch im Rahmen der Gebäudeleitzentrale erfolgen sollte, ist von lediglich geringfügigem Mehraufwand zwischen den beiden saisonalen Abschaltvarianten auszugehen.^a