



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und
Kommunikation UVEK

Bundesamt für Energie BFE
Sektion Cleantech

Schlussbericht vom 15 Dezember 2016

Neubau Hauptsitz HKG Engineering Aarau

Ein Bürogebäude mit umschaltbaren Gebäude-
automations-Energieeffizienzklassen



© HKG 2014



hkg.ch
BERATENDE INGENIEURE SIA

Lucerne University of
Applied Sciences and Arts

**HOCHSCHULE
LUZERN**

Technik & Architektur
Zentrum für Integrale Gebäudetechnik

Datum: 15.12.2016

Ort: Aarau

Subventionsgeberin:

Schweizerische Eidgenossenschaft, handelnd durch das
Bundesamt für Energie BFE
Pilot-, Demonstrations- und Leuchtturmprogramm
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Subventionsempfänger:

HKG Engineering AG
Mühlemattstrasse 16
CH-5001 Aarau
www.hkg.ch

Hochschule Luzern – Technik & Architektur
Zentrum für Integrale Gebäudetechnik
Technikumstrasse 21
CH-6048 Horw
www.hslu.ch

Autoren:

Dominic Jurt, Hochschule Luzern, dominic.jurt@hslu.ch
Andrii Zakovorotnyi, Hochschule Luzern, andrii.zakovorotnyi@hslu.ch
Urs-Peter Menti, Hochschule Luzern, urs-peter.menti@hslu.ch
Armin Jungo, HKG Consulting, a.jungo@hkg.ch
Roger Neuhaus, HKG Consulting, r.neuhaus@hkg.ch
Volker Wouters, HKG Engineering, v.wouters@hkg.ch

BFE-Programmleitung: Yasmine Calisesi, yasmine.calisesi@bfe.admin.ch
BFE-Projektbegleitung: Marc Köhli, koehli@enerconom.ch
BFE-Vertragsnummer: SI/501011-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

Bundesamt für Energie BFE

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen; Postadresse: CH-3003 Bern
Tel. +41 58 462 56 11 · Fax +41 58 463 25 00 · contact@bfe.admin.ch · www.bfe.admin.ch

1. Zusammenfassung

Die im Bereich Gebäudeautomation und Energieeffizienz massgebende, von der Schweiz übernommene, europäische Norm SIA 386.110 (EN 15232) beschreibt vier verschiedenen Effizienzklassen für die Gebäudeautomation. Im Büroneubau der Herzog Kull Group in Aarau wurde ein Gebäudeautomationssystem installiert, welches diese vier unterschiedlichen Klassen emulieren kann und zusätzlich den Energieverbrauch aufzeichnet. Dadurch konnte erstmalig der Einfluss der Klassen auf ein und dasselbe Gebäude respektive die gebäudetechnischen Anlagen während mehr als einem Kalenderjahr untersucht werden. Es zeigte sich, dass die Klasse A im Mittel erwartungsgemäss einen tieferen Verbrauch aufweist als Klasse D. Die Einsparungen von Klasse A zu D lagen für die relevanten elektrischen Verbraucher im Bereich von -1% bis 28%, für den Kühlenergieverbrauch bei -19% bis 77% und der Heizenergieverbrauch bei 4% bis 56%. Die mittleren Einsparungen lagen dabei unter den in der Norm angegebenen Faktoren. Zusätzlich zu den Messungen des Energieverbrauchs wurden die Nutzenden über die Zufriedenheit in Abhängigkeit des jeweiligen des GA-Systems befragt. Es zeigten sich keine signifikanten Unterschiede bei der Zufriedenheit zwischen den verschiedenen Effizienzklassen. Die Nutzenden wünschten jedoch immer eine hohe Selbstbestimmung über die Anlagen und Systeme.

Résumé

La norme européenne adoptée par la Suisse SIA 386.110 (EN 15232), référence en matière d'automatisation du bâtiment et d'efficacité énergétique, décrit quatre classes d'efficacité différentes pour l'automatisation des bâtiments. Dans le nouveau bureau du Herzog Kull Group à Aarau, un système d'automatisation du bâtiment a été installé afin d'émuler ces quatre classes différentes et d'enregistrer la consommation d'énergie. Pour la première fois, l'influence de la classe énergétique sur les installations techniques a pu être analysée sur un seul et même bâtiment pendant plus d'une année. Il a été démontré que la classe A présentait, comme prévu, une consommation moyenne inférieure à la classe D. Les économies de la classe A à D se situaient dans une plage entre -1% et 28% pour la consommation électrique, entre -19% et 77% pour la consommation d'énergie de refroidissement et 4% et 56% pour l'énergie de chauffage. Les économies moyennes se situaient en dessous des facteurs fournis par la norme. Outre les mesures de consommation d'énergie, les utilisateurs ont été interrogés sur leur satisfaction selon le système d'automatisation du bâtiment. À ce niveau-là, il n'y a pas de différence significative de satisfaction entre les différentes classes d'efficacité énergétiques. Par contre, les utilisateurs souhaitent en tous les cas avoir un contrôle prépondérant sur l'équipement et les systèmes.

Abstract

The European standard EN 15232 in the field of building automation and energy efficiency, which has been adopted by Switzerland as SIA 386.110 (EN 15232), describes four different efficiency classes for building automation. A building automation system was installed in the new office building of the Herzog Kull Group in Aarau, which can emulate these four different classes as well as record the energy consumption. This is the first time that the influence of the classes on one and the same building and its technical installations could be examined during more than one calendar year. Class A has been shown to have on average a lower consumption than Class D. The savings from Class A to D for the relevant electrical consumers ranged from -1% to 28%, the cooling energy consumption from -19% to 77% and the heating energy consumption from 4% to 56%. The average savings were below the factors stated in the standard. In addition to the measurements on energy consumption, the users were questioned about their satisfaction with respect to the building automation system. There were no significant differences in terms of satisfaction between the different efficiency classes. However, the users always wanted a high self-determination about the systems.



Inhaltsverzeichnis

1. Zusammenfassung	3
Inhaltsverzeichnis	4
2. Abkürzungsverzeichnis	6
3. Ausgangslage.....	7
3.1. Projektorganisation	8
4. Ziel des Projekts.....	9
5. Grundlagen	10
5.1. GA-Effizienzklassen	10
5.2. Implementierung der Klassen	10
5.3. Vergleich der Klassen	14
5.4. Zielgrößen.....	14
6. Konzept – Anlagenbeschrieb.....	15
6.1. Arbeitspakete	15
6.2. Gebäude.....	15
6.3. Gewerke	17
6.4. Systembeschreibung GA	19
6.5. Messkonzept	21
7. Vorgehen / Methode.....	22
7.1. Inbetriebnahme der Anlage.....	22
7.2. Auswertung	22
8. Ergebnisse	26
8.1. Inbetriebnahme	26
8.2. Messwerte elektrischer Energieverbrauch	26
8.3. Hochrechnung elektr. Energieverbrauch Beleuchtung	38
8.4. Messwerte thermischer Energieverbrauch	40
8.5. Hochrechnung thermischer Energieverbrauch	43
8.6. Raumtemperaturen	45
8.7. Nutzendenbefragung.....	47
9. Diskussion	54
9.1. Inbetriebnahme	54
9.2. Messungen.....	54
9.3. Befragung.....	57
10. Schlussfolgerungen.....	58
10.1. Effizienz der GA-Klassen	58



10.2. Nutzendenzufriedenheit	58
10.3. Allgemeine Energieeinsparmassnahmen	58
11. Ausblick, nächste Schritte nach Projektabschluss.....	59
12. Anhang.....	60
12.1. Literaturverzeichnis	60
12.2. Abbildungsverzeichnis	60
12.3. Tabellenverzeichnis	61
12.4. Modulare Darstellung der HLKS	62
12.5. Modulare Darstellung der Elektrotechnik	63
12.6. Messkonzept	64
12.7. Fragebogen Nutzerbefragung	66



2. Abkürzungsverzeichnis

- BACnet Building Automation and Control Networks
- BFE Bundesamt für Energie
- DALI Digital Addressable Lighting Interface
- DIN Deutsches Institut für Normung
- DP Datenpunkt
- EEK Energieeffizienzklasse
- GA Gebäudeautomation
- HKG Herzog Kull Group
- HLKS Heizung, Lüftung, Klima, Sanitär
- IBA Industrielle Betriebe Aarau
- ICT Informations- und Kommunikationstechnik
- KNX Konnex
- KW Kalenderwoche
- M-Bus Meter-Bus
- MP-Bus Multi-Point-Bus
- MSRL Mess-, Steuer-, Regel-, Leittechnik
- P+D Pilot- und Demonstrationsprojekt
- SIA Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein
- SMI Standard Motor Interface
- SN EN Schweizer Norm, Europäische Norm
- ZIG Zentrum für Integrale Gebäudetechnik

3. Ausgangslage

Die massgebende, von der Schweiz übernommene, europäische Norm SIA 386.110 (SN 15232) [1] beschreibt vier verschiedenen Effizienzklassen für die Gebäudeautomation. Bis dato gibt es keine detaillierte Studie, ob die darin beschriebenen Einsparpotentiale in der Realität auch umgesetzt werden können. Im Rahmen des Büroneubaus der Firma Herzog Kull Group in Aarau mit 850 m² Nutzfläche ergab sich die einmalige Gelegenheit ein Gebäudeautomationssystem zu installieren, welches die unterschiedlichen GA-Klassen emulieren kann. Der Grundgedanke des Projektes, welches durch das Bundesamt für Energie im Rahmen des P+D Programm unterstützt wurde, ist den Energieverbrauch und die Nutzendenzufriedenheit über mindestens ein Jahr aufzuzeichnen, während die die GA die unterschiedlichen Klassen emuliert.

Dank der offenen und flexiblen Konfiguration der Gebäudeautomation können für die einzelnen Gewerke die Auswirkungen unterschiedlicher Automatisationsgrade (Energieeffizienzklassen) auf die elektrische Leistung, die Volllaststunden und vor allem auf die elektrischen Energieverbräuche aufgezeigt werden. Die durch die Gebäudeautomation beeinflusste Gebäudetechnik sowie die Betriebsmittel und Verbraucher werden derart realisiert, dass quasi eine Umschaltung zwischen den verschiedenen GA Effizienzklassen nach SIA 386.110 (SN 15232) [1] möglich ist.

Die untersuchten Thesen lauten wie folgt:

- Die Gebäudeautomations-Effizienzklasse A verbraucht weniger thermische und elektrische Energie als die Klasse D.
- Die Gebäudeautomations-Effizienzklasse A führt zu einer besseren Nutzendenzufriedenheit als die Klasse D.

Durch die Umschaltung im laufenden Betrieb können zusätzlich Aussagen über die Wirksamkeit der verschiedenen GA Effizienzklassen zu unterschiedlichen Jahreszeiten, wie auch mit unterschiedlicher personeller Belegung demonstriert werden. So zum Beispiel über die Weihnachtstage, wo praktisch keine Nutzenden anwesend sind.

Ein direkter Vergleich der verschiedenen Gebäudeautomations-Energieeffizienzklassen in der Praxis in der gleichbleibenden Nutzung ist bis heute einmalig. Zur Anwendung kommt der aktuelle Stand der Technik. Die quantitative Konkretisierung der Einsparpotentiale hilft bei der Integration und Akzeptanz am Markt.

3.1. Projektorganisation

In Abbildung 1 ist die Projektorganisation aufgezeigt.

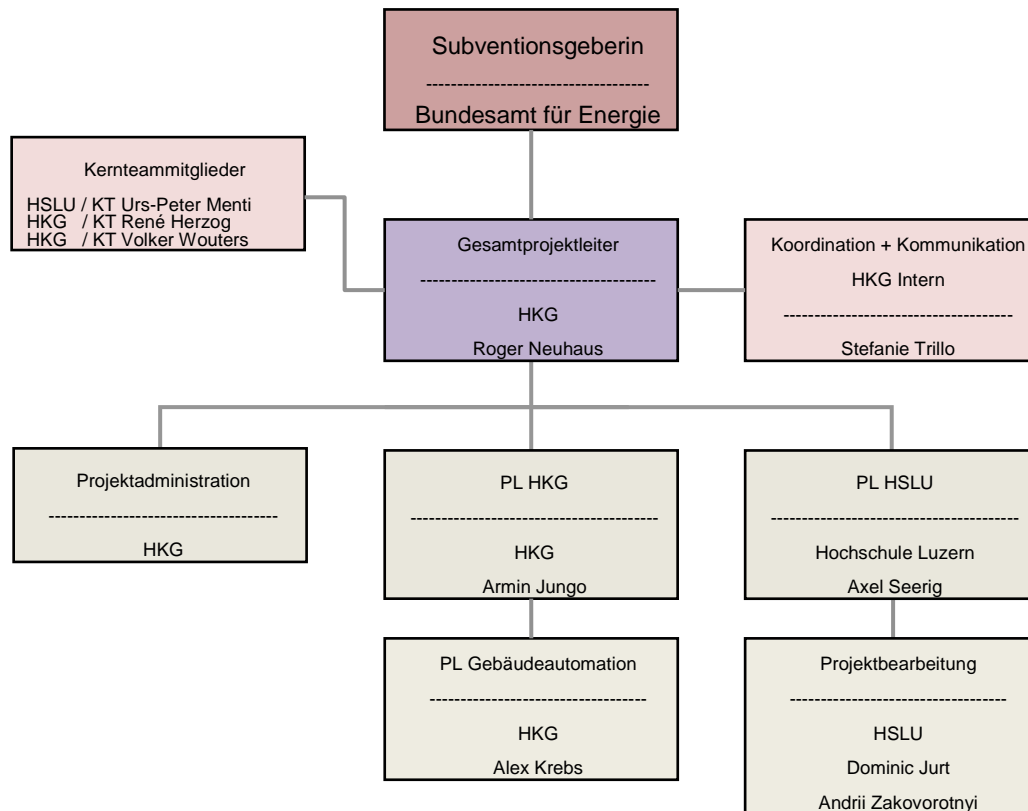


Abbildung 1: Projektgliederung

Die HKG Aarau ist eines der führenden Engineering-Büros in der Gebäudeelektrotechnik und bringt die Fachkompetenz für Gebäudeelektrotechnik und Gebäudeautomation ins Projekt mit ein. Das Zentrum für Integrale Gebäudetechnik (ZIG) der Hochschule Luzern führt die Auswertungen der Energiemessungen und die Nutzendenbefragungen durch – womit die Unabhängigkeit der Studie gewährleistet ist. Die Projekterarbeitung erfolgt in einer engen Zusammenarbeit zwischen HKG und dem ZIG.

4. Ziel des Projekts

Mit dem P+D-Projekt „Ein Bürogebäude mit umschaltbaren Gebäudeautomations-Energieeffizienzklassen“ werden folgende Ziele verfolgt:

- Quantifizieren des Energieverbrauchs des Gebäudes in Abhängigkeit verschiedener Effizienzklassen der Gebäudeautomation, differenzierte Energieverbrauchsauswertung (elektr.) nach Verbraucherkategorien (gemäss SIA 380/4)
- Ermitteln der realisierbaren Einsparpotentiale unterschiedlicher Effizienzklassen der Gebäudeautomation
- Auswirkungen von Werktagen und Wochenenden sowie der Jahreszeiten auf die Energieeinsparungen bei den verschiedenen Gebäudeautomations-Effizienzklassen
- Auswirkungen verschiedener Gebäudeautomations-Energieeffizienzklassen auf die Nutzendenzufriedenheit



5. Grundlagen

5.1. GA-Effizienzklassen

Es sind vier verschiedene GA-Effizienzklassen (A, B, C, D) der Funktionen sowohl für Nicht-Wohngebäude als auch für Wohngebäude definiert. In dieser Studie werden nur die Funktionen für Nichtwohngebäude betrachtet. Die vier Klassen werden wie folgt unterschieden:

- GA-Effizienzkategorie A: Hoch-energieeffiziente GA- und technische Gebäudemanagement (TGM) Systeme
- GA-Effizienzkategorie B: erweiterte GA-Systeme und einige spezielle TGM-Funktionen
- GA-Effizienzkategorie C: Standard-GA-Systeme
- GA-Effizienzkategorie D: Nicht energieeffiziente GA-Systeme, Gebäude mit derartigen Systemen sind zu modernisieren. Neue Gebäude dürfen nicht mit derartigen Systemen gebaut werden

5.2. Implementierung der Klassen

Normalerweise wird ein Gebäude mit einem Gebäudeautomationssystem ausgestattet, dass sich anhand dessen Funktionalität in eine der beschriebenen Klassen einteilen lässt. Vergleicht man verschiedene Gebäude mit unterschiedlich klassifizierten GA Systemen kann man die Effizienz einer Klasse nur schwierig beurteilen, da sich die Gebäude und somit auch die automatisierten Gewerke immer unterscheiden. In diesem Projekt wurde nun erstmals die Software der GA so implementiert, dass man per Knopfdruck die Funktionalität einer Klasse auswählen kann. Somit kann die Effizienz der verschiedenen Klassen an ein und demselben Gebäude und dessen Gewerken untersucht werden. Während der Messperiode kam es an der Anlage zu einigen kleineren Anpassungen von Parametern und Funktionen. Diese sind jedoch nicht im Detail bekannt und werden deshalb als unbekannte Störgrösse mitgenommen.

In Tabelle 1 sind die von der SIA 386.110 geforderten Funktionen pro Klasse aufgelistet. Die letzte Spalte gibt darüber Auskunft, welche Funktionen in der GA des untersuchten Objektes in welcher Klasse implementiert wurden.



Energieeffizienzklasse der Gebäudeautomation nach SIA 386.110 bzw. EN 15232	D	C	B	A	realisiert
Regelung des Heizbetriebes					
Regelung der Übergabe					
0 Keine automatische Regelung					D
1 Zentrale automatische Regelung (<i>Vorlauftemperatur - Regelung</i>)					C/B
2 Einzelraumregelung					
3 Einzelraumregelung mit Komm. (<i>Zonenregelung mit Zonen-Temp. realisiert</i>)					A
4 Einzelraumregelung mit Kommunikation und präsenzabhängiger Regelung					
Regelung der Warmwassertemperatur im Verteilungsnetz (Vor- oder Rücklauf)					
0 Keine automatische Regelung					D
1 Witterungsgeführte Regelung (<i>nach Aussentemperatur geschoben</i>)					C/B/A
2 Bedarfsabhängige (<i>nach Zeitplan</i>)					B/A
Regelung der Umwälzpumpen im Netz					
0 Keine automatische Regelung					
1 Ein- / Aus- Regelung					
2 Mehrstufenregelung					
3 Regelung der variablen Pumpendrehzahl (<i>Proportionaldruckregelung</i>)					D/C/B/A
Regelung des Wärmeerzeugers für Verbrennungs- und Fernheizungen					
0 Konstante Temperaturregelung					
1 Von der Aussentemperatur abhängige variable Temperaturregelung (<i>Fremdgesteuert</i>)					D/C/B/A
2 Von der Last abhängige variable Temperaturregelung					
Regelung des Kühlbetriebs					
Regelung der Übergabe					
0 Keine automatische Regelung					D
1 Zentrale automatische Regelung (<i>Vorlauftemperatur - Regelung</i>)					C/B
2 Einzelraumregelung					
3 Einzelraumregelung mit Komm. (<i>Zonenregelung mit Zonen-Temp. realisiert</i>)					A
4 Einzelraumregelung mit Kommunikation und präsenzabhängiger Regelung					
Regelung der Kaltwassertemperatur im Verteilungsnetz (Vor- oder Rücklauf)					
0 Keine automatische Regelung					D
1 Witterungsgeführte Regelung (<i>nach Aussentemperatur geschoben</i>)					C/B/A
2 Bedarfsabhängige (<i>nach Zeitplan</i>)					B/A
Regelung der Umwälzpumpen im Netz					
0 Keine automatische Regelung					
1 Ein- / Aus- Regelung					
2 Mehrstufenregelung					
3 Regelung der variablen Pumpendrehzahl (<i>Proportionaldruckregelung</i>)					D/C/B/A
Regelung des Kälteerzeugers für Fernkälte					
0 Konstante Temperaturregelung					
1 Von der Aussentemperatur abhängige variable Temperaturregelung (<i>Fremdgesteuert</i>)					D/C/B/A
2 Von der Last abhängige variable Temperaturregelung					
Verriegelung zwischen heizungs- und kühlungsseitiger Regelung der Übergabe					
0 Keine Verriegelung					D
1 Teilverriegelung (von HLK-System abhängig)					C/B
2 Vollständige Verriegelung					A

**REGELUNG DER LÜFTUNG UND DES KLIMAS****Regelung des Luftvolumenstromes auf Raumebene**

0 Keine automatische Regelung					D
1 Zeitabhängige Regelung					C
2 Anwesenheitsabhängige Regelung					B
3 Bedarfsabhängige Regelung					A

Regelung des Luftvolumenstromes oder Drucks auf der Ebene der Luftbehandlungsanlage

0 Keine automatische Regelung					D
1 Zeitabhängige Ein / Aus-Regelung					C
2 Mehrstufenregelung (ZUL Druckregelung)					B
3 Automatische Durchflussregelung (nach Position der VAV)					A

Regelung der Wärmerückgewinnung mit abluftseitigem Vereisungsschutz

0 ohne Regelung der Abtauvorgänge					D/C/B/A
1 Mit Regelung der Abtauvorgänge					

Regelung der Wärmerückgewinnung (Schutz gegen Überheizen)

0 Ohne Überheizregelung					D
1 Mit Überheizregelung					C/B/A

Freie maschinelle Kühlung

0 Keine automatische Regelung					D
1 Nachtkühlbetrieb					C/B
2 Freie Kühlung					A

Regelung der Zulufttemperatur

0 Keine automatische Regelung					D
1 Konstanter Sollwert					C
2 Variabler Sollwert von der Aussentemperatur abhängiger Anpassung					B
3 Variabler Sollwert mit Anpassung in Abhängigkeit von der Last					A

Regelung der beweglichen Sonnenschutzeinrichtungen

0 Manueller Betrieb					
1 Motorbetrieben mit manueller Regelung					D/C
2 Motorbetrieben mit automatischer Regelung					B/A
3 Kombinierte Regelung der Beleuchtung/der Blenden/der HLK-Anlagen					

Regelung der Beleuchtung

0 Manuell zu betätigender Ein / Aus - Schalter					D
1 Manuell zu betätigender Ein / Aus - Schalter + zusätzliches autom. Ausschaltsignal					C
2 Automatische Erkennung					B/A

Regelung des Tageslichteinfalls

0 Manuell					D/C
1 Automatisch					B/A

Technisches Haus- und Gebäudemanagement**Feststellung von Fehlern bei haus- und gebäudetechnischen Anlagen**

0 Nein					
1 Ja					Ja

Angabe von Informationen zum Energieverbrauch, zu den

0 Nein					
1 Ja					Ja

Tabelle 1: Umgesetzte Funktionalität pro Energieeffizienzklasse

Es ist ersichtlich, dass es gewisse Unterschiede zwischen der Norm und der Implementierung gibt. Diese werden nachfolgend erklärt:

- Die Regelung der Drehzahl der Umwälzpumpen für den Kühl- und Heizbetrieb erfolgt für alle Klassen mittels einer Proportionaldruckregelung. Da die Parameter für die Regelung direkt auf der Pumpe implementiert sind können sie nicht dynamisch anhand der GA Klasse umgeschaltet werden.
- Eine Einzelraum oder Zonenregelung für die Wärme- und Kälteübergabe an den Raum wurde für die Klassen B und C nicht realisiert weil, der HLK-Planer die Gebäudemasse als zu träge deklarierte.
- Die Regelung des Wärme- und Kälteerzeugers erfolgt durch die IBA, den Betreiber des Fernwärme- und Fernkältenetzes. Die GA kann somit keinen Einfluss auf die Temperatur der Erzeuger nehmen.
- Die Regelung der Warm- und Kaltwassertemperatur im Verteilnetz erfolgt durch einen Regler, welcher durch die IBA geliefert wurde. Da dieser nicht frei konfigurierbar ist, kann die Witterungsgeführte Regelung für die Klassen B und A nicht ausgeschaltet werden. Im Gegensatz zu Klasse C verfügen diese beiden Klassen aber noch über eine Zeitsteuerung, welche die Vorlauftemperatur in der Nacht und am Sonntag absenkt.
- Ein abluftseitiger Vereisungsschutz wurde nicht implementiert, da die Anlage über einen Rotationswärmeübertrager verfügt. Durch dessen Bauart ist eine Vereisung fast ausgeschlossen.
- Die Regelung der Trinkwarmwassererwärmung wurde nicht realisiert, da deren Energieverbrauch auch nicht ausgewertet wird. Der Anteil der Energie dafür wäre nach Abschätzungen im Verhältnis zur Heizenergie vernachlässigbar klein und würde den Aufwand für eine Regelung mit Umschaltung nach GA Klassen nicht rechtfertigen.

Die Abbildung 2 beschreibt grob für welche Klasse welche Funktionalität pro Gewerk im Neubau HKG realisiert worden ist. Die Funktionen des technischen Gebäudemanagementsystems sind darin nicht aufgeführt. Die Beleuchtung wird beispielsweise in der Klasse A anhand der Anwesenheit der Nutzenden und einer Konstantlichtregelung angesteuert. In Klasse D hingegen müssen die Nutzenden die Beleuchtung komplett manuell durch Schalter betätigen.

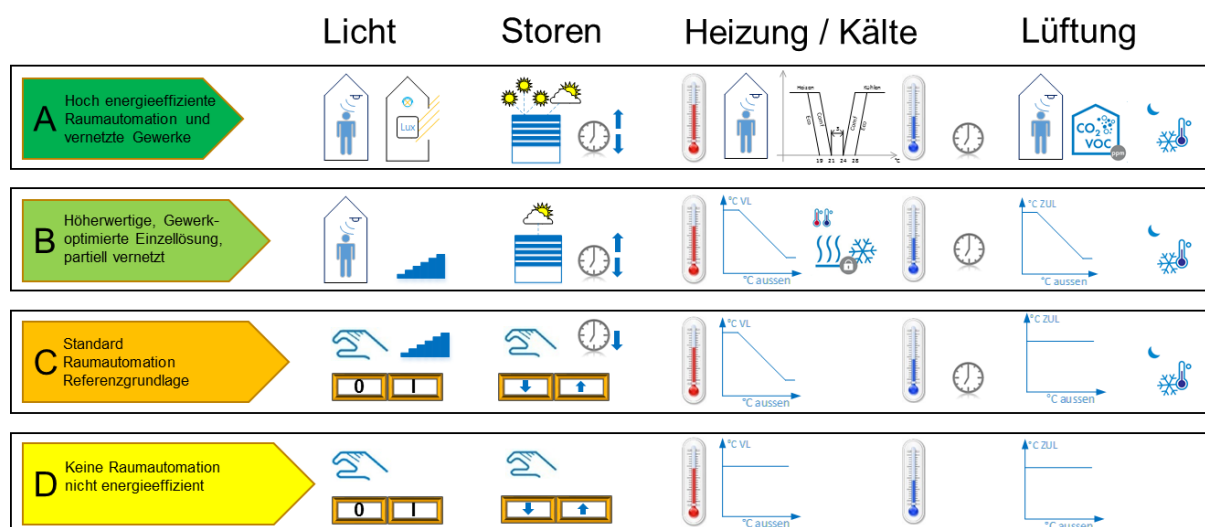


Abbildung 2: Gebäudeautomations-Energieeffizienzklassen im Neubau HKG

5.3. Vergleich der Klassen

Die Umstellung der Effizienzklasse erfolgt periodisch alle zwei Wochen, jeweils an einem Montag (Abbildung 3). Diese Periodizität erlaubt das wiederholte Vermessen jeder Klasse während der Projektlaufzeit. So kann das Verhalten einer Klasse unter unterschiedlichen Randbedingungen (Klima, Nutzung) untersucht werden. Zusätzlich wurde nach jeder Umstellung ein Fragebogen an die Nutzenden verschickt, um deren Befinden während der letzten Periode abzufragen.

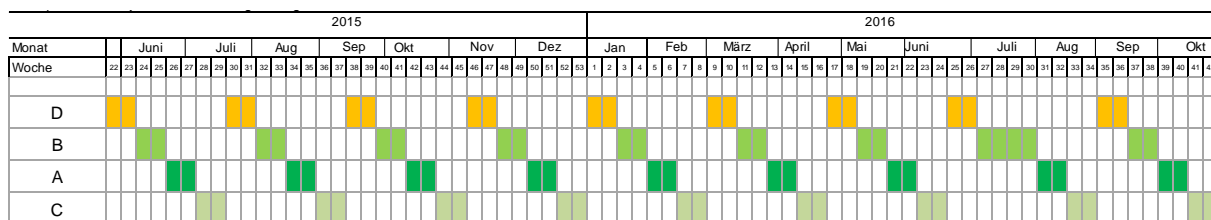


Abbildung 3: Terminplan der Umschaltung der Klassen

5.4. Zielgrössen

Die Effizient der Klassen wird bezüglich des thermisch und elektrischen Energieverbrauchs ausgewertet. Thermisch wird der Wärme- und Kälteverbrauch ab dem Fernwärmenetz für das Erdgeschoss betrachtet. Der elektrische Verbrauch des Erdgeschosses umfasst neben den üblichen Bezügern eines Büros auch einige Server. Da diese den Verbrauch massgeblich beeinflussen und grundsätzlich nicht von den GA Klassen abhängig sind, werden sie in der Auswertung ausgeklammert.

Das Konzept für die umschaltbare Gebäudeautomation sowie die dazugehörige Messinfrastruktur sowie die Visualisierungsmöglichkeiten werden durch die HKG Consulting entwickelt und umgesetzt. Zur Qualitätssicherung und Sicherstellung der Auswertung gemäss Projektbeschreibung wird die Umsetzung durch das Zentrum für Integrale Gebäudetechnik begleitet. Nach erfolgter, baulicher Umsetzung erfolgen die Inbetriebsetzung der umschaltbaren Gebäudeautomation, sowie die Testphase im Betrieb. Hierzu werden die Bedürfnisse des Forschungspartners erfasst und im Projekt berücksichtigt. Nach erfolgreicher und abgeschlossener Testphase werden die verschiedenen Testszenarien und Settings der Gebäudeautomation in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern definiert, so dass sichergestellt werden kann, dass die gewünschten Erkenntnisse gewonnen werden können. Der Ablaufplan für die verschiedenen GA Settings erfolgt auch unter Einbezug des zuständigen BFE Programmleiters, damit dessen Erwartungen ausreichend Rechnung getragen wird.

6. Konzept – Anlagenbeschrieb

6.1. Arbeitspakete

Das Projekt wurde in die Arbeitspakete gemäss Tabelle 2 aufgeteilt. Die Pakete Vorstudie bis Durchführung wurden von HKG bearbeitet. Die Erfolgskontrolle wurde im Rahmen einer Bachelor Diplom Arbeit (BDA) von Studentinnen der Hochschule Luzern durchgeführt. Die Auswertung und Verifizierung erfolgte, dann vom ZIG.

Aktivität	Anfang	Ende	Meilenstein
Vorstudie	Dez 2013	Dez 2013	Entscheid Grobkonzept
Planung	Jan 2014	März 2014	Umsetzung GA-Konzept
Bau / Durchführung	Apr 2014	Sept 2014	Projektrevue HKG
Erfolgskontrolle	Okt 2014	Juni 2015	Abgeschlossene Inbetriebnahme
Messperiode	Juli 2015	Juni 2016	Abschluss Messperiode
Technologietransfer	Juli 2016	Sept 2016	Auswertung Messergebnisse
Kommunikation	Okt 2016	Nov 2016	Verifizierung Messergebnisse
Schlussbericht	Okt 2016	Jan 2017	

Tabelle 2: Arbeitsablauf und Termine

6.2. Gebäude

Das Gebäude an der Mühlemattstrasse 16 in 5001 Aarau wurde von 2013 bis März 2014 erstellt. Die HKG Räumlichkeiten befinden sich im Erdgeschoss dieses 3-geschossigen Gebäudes. Das Gebäude ist nach dem Minergie–Standard erstellt jedoch nicht zertifiziert. Die Fassade besteht aus einer vorgehängten Holzbekleidung mit Hinterlüftung und Wärmedämmung. In Abbildung 4 ist die räumliche Situation, um das Gebäude dargestellt. Man sieht, dass südseitig der angrenzenden Strasse weitere Gebäude stehen, die das untersuchte Objekt teilweise verschatten.



Abbildung 4: Luftbild des Gebäudes [Quelle: SWISSIMAGE über www.map.geo.admin.ch]

Das Erdgeschoss gemäss Abbildung 5 setzt sich aus Flächen für folgende Nutzungen zusammen:

Beschreibung	Fläche
Einzelbüro	175 m2
Grossraumbüro	350 m2
ICT Raum	13 m2
Korridore	110 m2
Cafeteria	34 m2
Lobby/Besprechung	70 m2
Nebenräume	100 m2
Total Nutzfläche	852 m2

Tabelle 3: Flächenanteile des Erdgeschosses

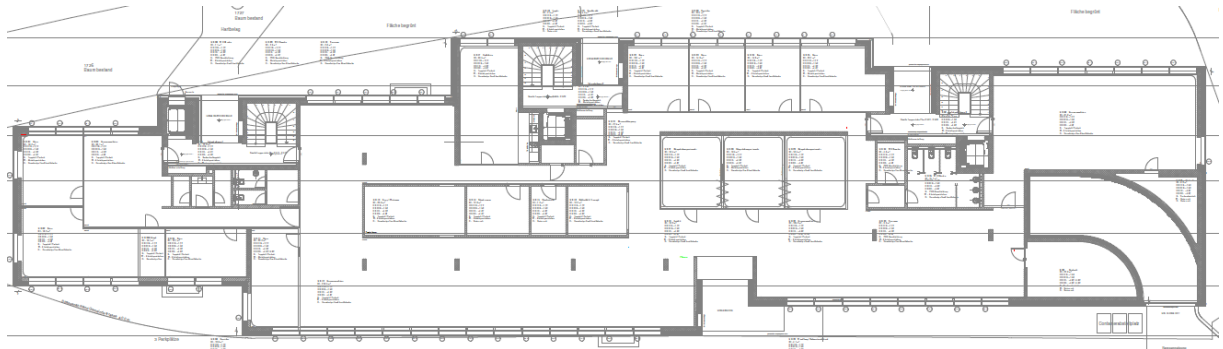


Abbildung 5: Grundriss des Erdgeschosses

6.3. Gewerke

6.3.1. Energieversorgung

Das Gebäude ist über ein Fernnetz an der Wärme- und Kälteversorgung der IBA Wärme AG Aarau angeschlossen. Der Anschlusswert der Heizung beträgt max. 86 kW für das ganze Gebäude, derjenige der Kälte max. 49 kW für das ganze Gebäude. Die Energieverteilung innerhalb des Gebäudes ist im Anhang 12.4 für die thermische Energie und in Anhang 12.5 für die elektrische Energie Mithilfe der modularen Darstellung nach SIA 411 dargestellt.

6.3.2. Heizung – Kühlung der Bürofläche im EG

Das Heizen oder Kühlen erfolgt über die Bodenrohre unter dem Unterlagsboden und Teppich. Die Verrohrung ist im Change-Over System realisiert. Über Unterverteiler ist die Fläche in 7 Zonen gemäss Abbildung 6 aufgeteilt.



Abbildung 6: Grundriss mit den Zonen der Fussbodenheizung

6.3.3. Lüftung

Die Bürofläche des Erdgeschosses ist mit einer Hygienelüftung ausgerüstet. Wie in Abbildung 7 dargestellt sind die Räume für die Belüftung in 13 Zonen eingeteilt:



Abbildung 7: Grundriss mit den Zonen der Lüftung

Der Monoblock (Abbildung 8) hat eine maximale Zu- und Abluftleistung von $4600 \text{ m}^3/\text{Std.}$. Die Ventilator-drehzahl wurde aber von Seiten der Ansteuerung auf maximal 60% begrenzt, weil der maximale Volumenstrom zu hoher Geräuscentwicklung in den Zu- und -und Abluftkanälen führte. Die Luftmengen werden über variable Volumenstromregler auf die einzelnen Räume aufgeteilt. Die Wärmerückgewinnung erfolgt über einen Rotationswärmetauscher mit einem Wirkungsgrad von 73%.

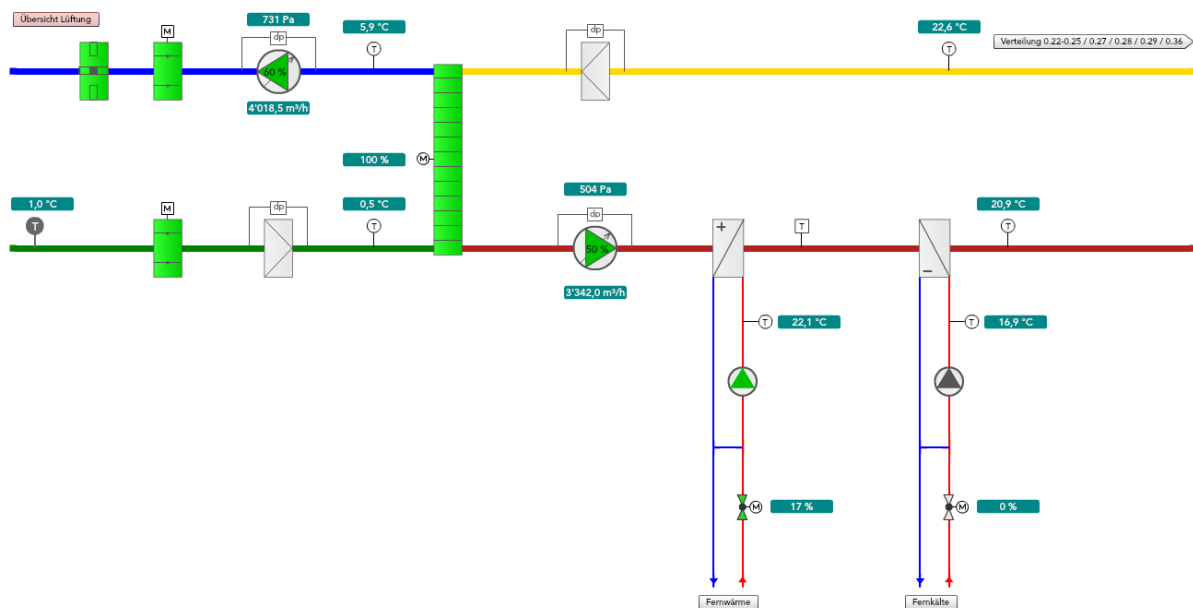


Abbildung 8: Schema des Lüftungsmonoblocks

6.3.4. Beleuchtung

Die Beleuchtung der Büroräume, Korridore und Besprechungszimmer ist mit LED ausgeführt. Das Beleuchtungskonzept sieht die folgenden Punkte vor:

- Grundbeleuchtung der Arbeitsplätze über Deckenleuchten

- Individuelle Arbeitsleuchte am Arbeitsplatz
- Lichtbänder für die Korridorbeleuchtung

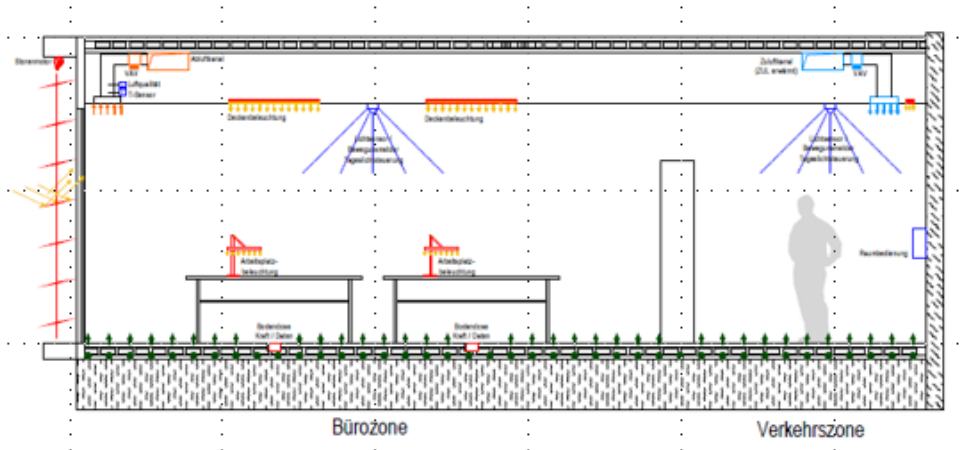


Abbildung 9: Büro Querschnitt mit dem Beleuchtungs- und Lüftungs- Prinzip

6.3.5. Sonnenschutz

Alle Fensterflächen im EG sind mit Lammellenstoren ausgerüstet, welche über SMI Technologie angesteuert werden. Die Steuerung erfolgt unterschiedlich je nach GA Klasse gemäss Tabelle 4. Es sind Zentralbefehle implementiert, welche zum Schutz vor Einbruch die Storen zu Zeiten nach schliessen: Montag bis Freitag 19:00 -06:00 Uhr sowie Samstag und Sonntag.

Beschreibung der Steuerelemente	A	B	C	D	Bemerkungen
Handtaster Edizio (rechts Auf links Ab)	X	X	X	X	
EnOcean Funktaster (2 Taster Auf/Ab)	X	X	X	X	
Storen Auf/Ab nach Grenzwert Helligkeit und Sonnenrichtung	X	X			Aufteilung in 5 Zonen Ost1,Süd1, Süd2, West1, West2
Nachführung der Lamellenposition nach Sonnenstand	X				Lamellen Position von 30 – 100% zu
Storen zentral Auf	X	X			
Storen zentral Ab	X	X	X	X	

Tabelle 4: Funktionen der Sonnenschutzsteuerung

6.4. Systembeschreibung GA

6.4.1. Aufbau

Der Systemaufbau wurde so definiert, dass mehrere Bus-Systeme, die heute in der Gebäudetechnik Stand der Technik sind, zur Anwendung kommen. Es sind dies:

- BACnet: Building Automation and Control Networks für die Gebäudeautomation

- KNX: Feldbus für die Gebäudeautomation
- DALI: Digital Addressable Lighting Interface ist ein Protokoll zur Steuerung von lichttechnischen Betriebsgeräten
- SMI: Standard Motor Interface zum Ansteuern von elektronischen Antrieben
- M-BUS: Meter-Bus zum Erfassen von Messdaten
- MP-Bus: Bussystem von Belimo für Klappen-, Ventil-, VAV-Antriebe
- EnOcean: Standard für batterielose Funk Sensorik

Das System der Steuerung und Visualisierung besteht aus zwei Steuerungscontroller (WAGO 750-831). Einer wird zur Steuerung der Beleuchtung und Storen eingesetzt, der andere für die Steuerung für die Heizung, Kühlung und Lüftung. Die Controller haben je vier Programme gemäss den vier GA Klassen mit den dazu angepassten Parametern. Über einen Taster wird das gewünschte Programm angewählt.



Abbildung 10: Taster zur Umschaltung des GA Programmes

Die Datenerfassung der Energiedaten und Zustände erfolgt Vorort mit einer lokalen Datenbox (Beetle von Alcedo). Die Kommunikation zu den Controllern erfolgt über das Protokoll BACnet. Die Datenbox dient als lokaler Datenkonzentrator und Zwischenspeicher. Die Daten auf der Datenbox werden von einem Alcedo Cloud Server ausgelesen und im Datacenter der Cloud archiviert. Weiter stellt das Alcedo folgende Funktionen zur Verfügung:

- Erstellen von Diagrammen der Daten (Linien-, Balken-, Blasen-Diagramm) mit der Auflösung auf der Zeitachse in Tag, Woche, Monat, Quartal und Jahr
- Visualisierung von Anlagenschemas inklusive deren Bedienung
- Eigene Datenpunkte berechnen für Energiebilanzen
- Alarmverwaltung der angeschlossenen Anlagen

Die Abbildung 11 gibt einen Überblick wie die verschiedenen Bus Systeme und Controller zusammengeschaltet sind.

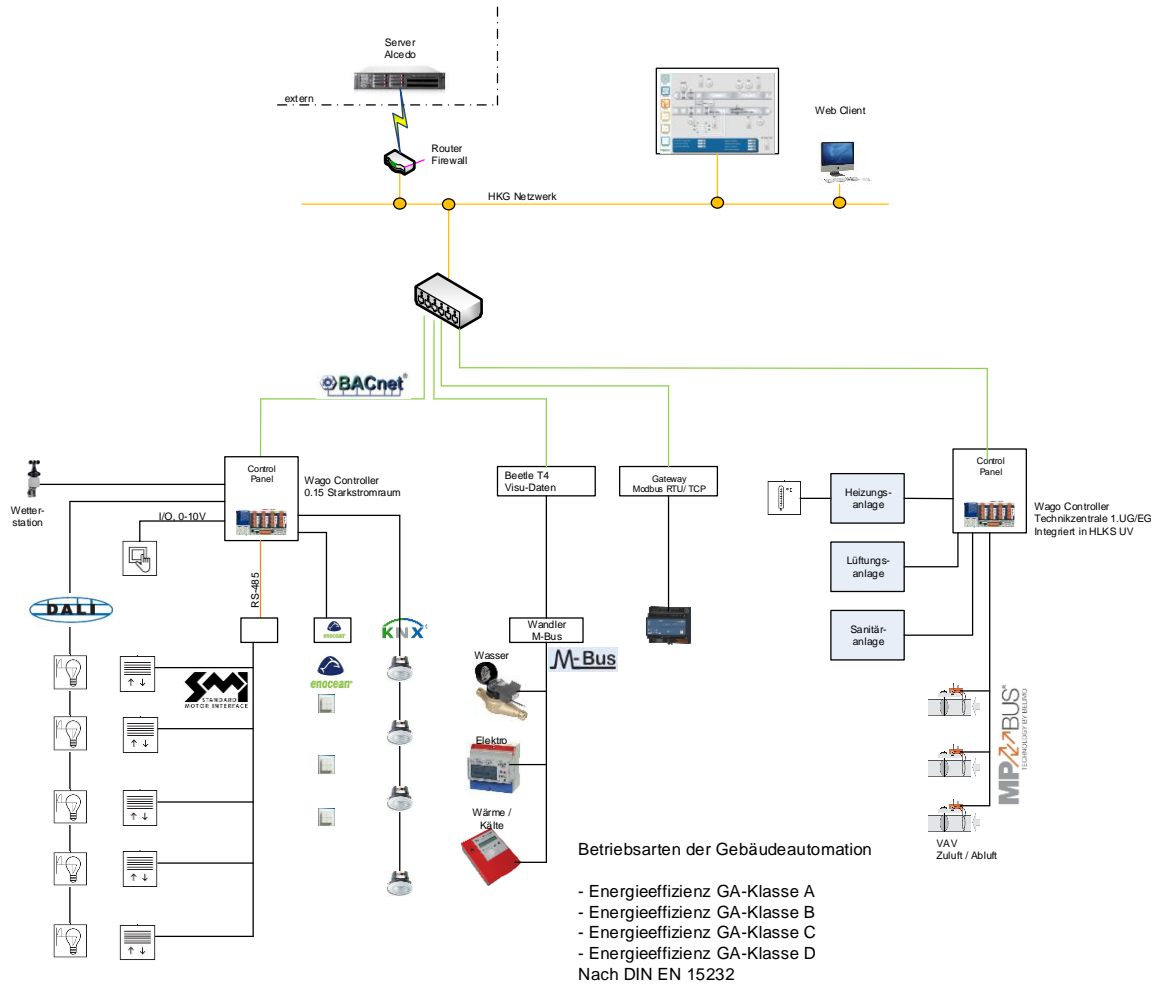


Abbildung 11: Übersicht des GA Systemaufbaus

6.5. Messkonzept

Zur Erfassung der Energiewerte wurden folgende Einrichtungen installiert:

- Elektromessungen mit kWh-Zählern über M-Bus oder Mod-Bus
- Wassermessungen mit Ultraschall Kompaktwärmehzähler über M-Bus

Das detaillierte Messkonzept mit der Bezeichnung der Geräte findet sich im Anhang 12.6.



7. Vorgehen / Methode

7.1. Inbetriebnahme der Anlage

Bevor die Messungen gestartet werden konnten, musste sichergestellt werden, dass die Anlage gemäss den Vorgaben funktioniert. Dies passierte vor allem im Rahmen einer Bachelor Diplomarbeit [2] an der Hochschule Luzern. In dieser Arbeit wurden die Ergebnisse von ersten Testmessungen untersucht und auf ihre Plausibilität hin überprüft. Dank dieser Arbeit konnten die vorhandenen Mängel am System entdeckt und behoben werden

7.2. Auswertung

7.2.1. Messungen

Die Gebäudetechnikanlage ist mit verschiedensten Zählern zur Messung des Energieverbrauchs ausgestattet. Die Verbraucher lassen sich dabei in Gruppen ordnen und die Zähler den Gruppen zuteilen (Tabelle 5). Die Auswertung der Messergebnisse wurde auf der Basis dieser Gruppen vorgenommen. Die Energiemessungen werden auf der Alcedo Plattform zu Tagessummen aggregiert, wobei in Tag jeweils 12.00 Uhr mittags startet und endet.

Bezeichnung	Systemname
Thermische Zähler	
Kältezähler Fussbodenkühlung Büro EG	H_00_SX02_R14_R001_XXXX_ME01
Kältezähler Kühlregister Lüftung Büro EG	H_00_SX02_R13_R001_XXXX_ME01
Kältezähler ULK / Nachkühlung	H_00_SX02_R15_R001_XXXX_ME01
Wärmezähler Fussbodenheizung Büro EG	H_00_SX02_R11_R001_XXXX_ME01
Wärmezähler Heizregister Lüftung Büro EG	H_00_SX02_R12_R001_XXXX_ME01
Licht	
L1 Grossraumbüro+Consulting Licht	H_00_SE01_X02_B001_250U2_ME01
L2 Grossraumbüro+Consulting Licht	H_00_SE01_X02_B001_250U2_ME02
L3 Grossraumbüro+Consulting Licht	H_00_SE01_X02_B001_250U2_ME03
L1 Einzelbüro Nord+Management Licht	H_00_SE01_X02_B001_250U2_ME04
L2 Einzelbüro Nord+Management Licht	H_00_SE01_X02_B001_250U2_ME05
L3 Einzelbüro Nord+Management Licht	H_00_SE01_X02_B001_250U2_ME06
Sitzungszimmer Licht	H_00_SE01_X02_B001_250U2_ME10
Plotterraum Lager Garderobe Licht	H_00_SE01_X02_B001_250U2_ME09
Administration Licht Steckdosen	H_00_SE01_X02_B001_250U2_ME12
Nasszellen Grossraumbüro Licht	H_00_SE01_X02_B001_250U2_ME08
Nasszellen Management Licht	H_00_SE01_X02_B001_250U2_ME07
Korridore Licht	H_00_SE01_X02_B001_250U2_ME16

Empfang Lounge Licht	H_00_SE01_X02_B001_250U2_ME15
Cafeteria Licht	H_00_SE01_X02_B001_250U2_ME13
Storen	
Elektrozähler Storen	H_00_SE01_R01_R001_258U2_ME01
Eigenverbrauch GA	
Elektrozähler Eigenbezug GA Licht + Storen	H_00_SX01_R01_R001_60P3_ME01
Lüftung	
Elektrozähler Gesamtmessung Lüftungsanlage	H_00_SX02_R02_R001_60P3_ME01
Pumpen	
Elektrozähler Gesamtmessung Heizungsanlage	H_00_SX02_R01_R001_62P3_ME01
Betriebseinrichtungen	
Elektrozähler Kraft Gesamt	H_00_SE01_R02_R001_252U2_ME01
Garderoben WC UG	H_00_SE01_X02_B001_250U2_ME14
Sitzungszimmer Steckdosen	H_00_SE01_X02_B001_250U2_ME11
Elektrozähler Betriebseinrichtungen Cafeteria	H_00_SE01_R04_R001_256U2_ME01
Server	
Elektrozähler ICT (Betriebseinrichtungen Server)	H_00_SE01_R03_R001_256U2_ME01

Tabelle 5: Datenpunktliste Energiezähler

Hinweis: Unter Betriebseinrichtungen fallen alle mobilen Geräte welche über Steckdosen angeschlossen sind, wie beispielsweise Computer und Drucker sowie die Geräte der Cafeteria und Garderoben.

Eine saubere Aufteilung zwischen den Gruppen ist nicht in ganz allen Fällen möglich, da die Zähler Werte aus mehreren Gruppen erfassen. Dies betrifft die folgenden Punkte:

1. *Kältezähler ULK / Nachkühlung* erfasst auch Kühlleistung für Server
2. Elektrozähler *Gesamtmessung Heizungsanlage* beinhaltet auch Pumpen, welche die Heizung der Wohnungen im Obergeschoss bewirtschaften.
3. Elektrozähler *Garderobe WC UG* beinhaltet Licht und Betriebseinrichtungen
4. *Elektrozähler ICT* beinhaltet auch den Ventilator des Umluftkühlgerätes

Diese Abgrenzungsfehler wurden in der Auswertung auf folgende Art und Weise berücksichtigt:

1. Die Kühlenergie des Umluftkühlgerätes ist eine GA unabhängige Bandlast und muss deshalb exkludiert werden. Es wurde angenommen, dass die gesamte elektrische Energie der Server in Wärme umgesetzt wird, welche über das Umluftkühlgerät abgeführt werden muss. Es wurde deshalb diese elektrische Energie vom Zähler der Nachkühler auf Basis der täglichen Summen abgezogen.
2. Die betroffenen Pumpen sind an einer vom GA-System unabhängigen Steuerung angehängt, welche aber auch die Pumpen der Wärmeversorgung des EGs beinhaltet. Eine Differenzierung ist somit nicht möglich und der Wert wird für die Auswertung nicht korrigiert.



3. Dieser Zähler gehört zur Gruppe der Betriebseinrichtungen, welche unabhängig von den GA-Klassen ist. Der Anteil der Beleuchtung an diesem Zähler wird also in der Auswertung auch als unabhängig von den GA-Klassen betrachtet.
4. Der elektrische Verbrauch des Umluftkühlgerätes für den Ventilator ist eine GA-unabhängige Bandlast. Da die Server auch als GA unabhängig betrachtet werden, muss keine Anpassung vorgenommen werden.

7.2.2. Messperiode

Die Resultate stammen wenn nicht anders erwähnt aus der Messperiode vom 01.07.2015 bis am 23.10.2016. In dieser Zeit wurde gemäss Abbildung 3 zwischen den verschiedenen GA Klassen umgeschaltet. Die folgenden Kalendertage wurden aus der Auswertung entfernt:

Datum	Begründung
03.07.2015	Maienzug
01.08.2015	Nationalfeiertag
24.12.2015 – 03.01.2016	Weihnachtsferien
25.03.2016	Karfreitag
28.03.2016	Ostermontag
05.05.2016	Auffahrt
16.05.2016	Pfingstmontag
01.07.2016	Maienzug
01.08.2016	Nationalfeiertag

Tabelle 6: Ausgeschlossene Kalendertage

7.2.3. Hochrechnung

Da nicht für jede GA-Klasse die exakt gleichen externen Randbedingungen (Aussentemperatur, Globalstrahlung, etc.) herrschten, kann man nur anhand der Messwerte keine Aussage über den jährlichen Energieverbrauch pro GA-Klasse machen. Diejenigen Messgrössen, welche eine solche Abhängigkeit von äusseren Randbedingungen zeigen, müssen also anhand des Jahresverlaufes der Randbedingungen hochgerechnet werden.

Dazu wird in einem ersten Schritt ein statistisches Modell erstellt, welches separat für jede GA-Klasse den Einfluss der Randbedingung auf die Messgrösse beschreibt, welche innerhalb der Messperiode auftrat. Da sich zeigt, dass die Beziehungen meistens linear sind, wird ein lineares Trendmodell verwendet. Einzige Ausnahmen bildet die Beleuchtungsenergie an Werktagen bei welcher ein logarithmisches Modell angewendet wird. Die Basis dieser Hochrechnungen bilden tägliche Mittelwerte aller Grössen.

Die Trendmodelle werden dann innerhalb ihres Definitionsbereiches auf den gesamten Jahresverlauf vom 06.07.2015 bis und mit 05.07.2016 angewendet. Es wurden mit den Modellen keine Extrapolationen vorgenommen. Besonders bei der Heiz- und Kühlenergie ist Beschränkung auf den Definitionsbereich nötig, da die Modelle nur aus einem Teilbereich der Messwerte abgeleitet wurden. Es wird somit

verhindert, dass das Modell bei Aussentemperaturen über 14°C ein Heizenergieverbrauch ausgibt, respektive bei tieferen Aussentemperaturen einen Kühlenergieverbrauch.

Man erhält als Resultat so pro Tag den berechneten Energieverbrauch und kann durch Summation über die gesamte Periode den Jahresenergieverbrauch bestimmen.

Für die Beleuchtungsenergie wurde je ein separates Trendmodell für die Werktage und die Wochenenden erstellt. Für die Hochrechnung wurden diese Modelle auch nur auf die jeweiligen Wochentage angewendet, am Schluss aber die jährliche Gesamtsumme gebildet.

Der Fehler der Hochrechnung wurde zur besseren Einschätzung der Unsicherheit der Berechnung ebenfalls abgeleitet. Dazu wurde pro GA-Klasse der mittlere quadratische Fehler zwischen den Messwerten und den berechneten Werten aus dem Trendmodell gebildet. Der jährliche Fehler ergibt sich dann aus der Multiplikation des mittleren täglichen Fehlers mit der Anzahl Tage, welche für die Hochrechnung benutzt wurde. Der reale Fehler kann nicht bestimmt werden, da es aufgrund der Umschaltung der Klassen nicht für jeden hochgerechneten Tag auch einen Messwert gibt.

7.2.4. Befragung

Zusätzlich zur quantitativen Datenerfassung wurde mittels einer Befragung der Nutzerinnen und Nutzer eine qualitative Datenerhebung durchgeführt. Alle zwei Wochen, jeweils am Ende einer Messperiode, erhielten die Nutzerinnen und Nutzer einen online Fragebogen. Dieser beinhaltete Fragen zur Zufriedenheit und zum subjektiven Eindruck zum Verhalten des GA-Systems. Die Fragen basierten auf [3]. Es wurde jedoch nur eine Auswahl von 23 der dort erarbeiteten 64 Fragen verwendet.

Die Nutzenden wurden in einem ersten Schritt noch zum Standort ihres Arbeitsplatzes befragt. Die initiale Idee war die Resultate standortbezogen auszuwerten. Da die Personen und Arbeitsplatzbelegung aber im Laufe der Messperiode häufig änderten, wäre dieser Aufwand zu gross gewesen. Es wurde deshalb nur eine Auswertung aufgeteilt nach GA-Klassen vorgenommen.

Die Nutzenden sind über die Umstellung der Klassen informiert was Vor- und Nachteile hat: Auf der einen Seite würde die Unkenntnis der jeweiligen Klasse zu einem neutraleren Umfrageergebnis führen. Andererseits würde man ohne Informationen an die Nutzenden die Akzeptanz der Studie gefährden. Die Nutzenden wären noch mehr verunsichert, weil sich das System und dadurch ihr notwendiges Verhalten unvorhersehbar verändern. Insbesondere bei der Beleuchtung sind Unterschiede in der Bedienung zwischen den Klassen markant und vom den Nutzenden gut erkennbar.

Da die Stichprobengrösse für statistische Aussagen aber generell zu klein ist, muss man die Ergebnisse der Befragung kritisch betrachten, es sind einzig Tendenzen ermittelbar.



8. Ergebnisse

8.1. Inbetriebnahme

Während rund acht Wochen nach Bezug des Gebäudes untersuchen zwei Studierende der Hochschule Luzern die Messwerte, um die Funktion der Anlage zu überprüfen. Sie stellten unter anderem die folgenden Punkte fest (sinngemäss aus [2]):

8.1.1. Leistungsstufe der Lüftung

Um die Klassen vergleichen zu können, muss eine Obergrenze der Leistungsstufe festgelegt werden. In Klasse D und C soll die Lüftung auf dieser Grenze betrieben werden. In Klasse A und B kann die Leistung zwischen Null und dieser Grenze variieren. Da die Mitarbeitenden der HKG ab 70% Leistung des Lüftungsmonoblocks die Strömungsgeräusche und Vibrationen der Lüftungsanlage als störend empfanden, wurde in Klasse D und C die Lüftung auf 40% ihrer Leistung betrieben. In Klasse A war die Grenze anfangs bei 70%, nach drei Tagen wurde diese aber auf 60% reduziert. Diese Veränderungen der Einstellungen im Betrieb haben einen korrekten Vergleich der Klassen unmöglich gemacht.

8.1.2. Nachtauskühlung und Freecooling

Da in Klasse A bis C die Parameter der Temperatur-Regelung der Lüftungsanlage noch nicht optimal eingestellt waren, wurde beispielsweise die Nachtkühlung jeweils zum falschen Zeitpunkt eingeschalten. Diese Parameter sind zwingend im Auge zu behalten und bei Bedarf weiter zu optimieren.

8.1.3. Zeitplan Lüftung

In Klasse C sollte die Lüftung gemäss Funktionsbeschreibung von 06.00 - 19.00 Uhr freigegeben sein. In der ersten Woche der Inbetriebnahme war noch kein Zeitplan hinterlegt, was dazu führte, dass die Lüftung 24 Stunden durchgehend in Betrieb war. In der zweiten Woche wurden die Zeiten auf 05.00 - 19.00 Uhr angepasst, da die ersten Personen früher als angenommen am Morgen eintrafen.

8.2. Messwerte elektrischer Energieverbrauch

Die Daten in diesem Abschnitt sind Messwerte auf Tagesbasis. In den gestapelten Säulendiagrammen sind die Werte jeweils der Durchschnitt über alle Tage in der Messperiode, in welcher die entsprechende GA Klasse aufgeschaltet war.

In den Säulendiagrammen die sich auf nur eine Verbrauchergruppe beschränken, beziehen sich die Prozentangaben in der Säule auf die Referenzklasse C (gemäss SIA 386.11). Der horizontale Strich in der Säule und die Beschriftung bezeichnen den Durchschnitt über alle Tage der jeweiligen Klassen. Der heller gefärbte Teil der Säule visualisiert ausgehend vom Mittelwert, die Standardabweichung innerhalb einer Klasse.

8.2.1. elektrischer Gesamtenergieverbrauch

Der elektrische Gesamtenergieverbrauch ist in Abbildung 12 aufgeschlüsselt nach Verbrauchergruppen und GA Klasse dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die Betriebseinrichtungen und der Server fast keine Unterschiede zwischen den verschiedenen GA-Klassen zeigen, jedoch etwas mehr als die Hälfte des Gesamtverbrauches ausmachen. Diese beiden Verbrauchergruppen werden durch die GA-Klasse nicht beeinflusst, was nachvollziehbar ist. Der tägliche Mittelwert des Verbrauchs der Betriebseinrichtungen liegt an Wochenenden bei ca. 11 kWh/d, an Wochentagen höher bei 33kWh/d. Die Server hingegen zeigen keine Unterschiede zwischen Wochenenden und Werktagen.

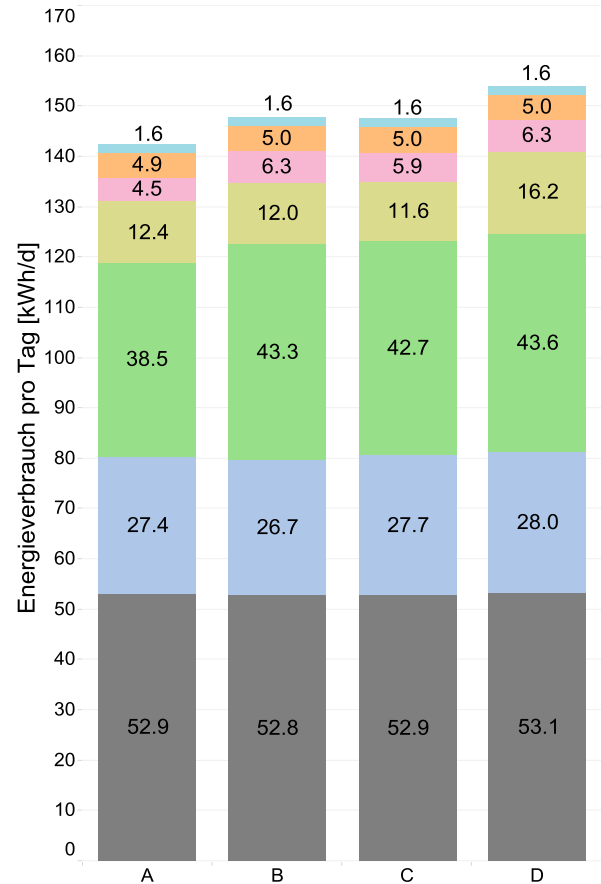
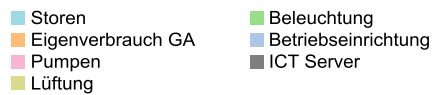


Abbildung 12: elektrischer Gesamtenergieverbrauch

Bezieht man den durchschnittlichen Gesamtverbrauch auf die Nutzfläche aus Tabelle 3 ergeben sich die Werte in Tabelle 7.

GA Klasse	A	B	C	D
Mittlerer elektrischer Gesamtverbrauch pro Tag und Fläche [Wh/d/m ²]	167	173	173	181

Tabelle 7: Durchschnittlicher spezifischer elektrischer Gesamtenergieverbrauch

8.2.2. Eigenenergieverbrauch der Gebäudeautomation

Der Eigenenergieverbrauch der GA wurde als klassenunabhängig betrachtet, da für alle Klassen, auch D, jeweils alle Geräte in Betrieb sind, auch wenn mit einem anderen Verhalten. Die Messwerte und die sehr geringe Standardabweichung von maximal 2% des Mittelwertes in Abbildung 13 belegen dies. Die kleinen Unterschiede zwischen den Klassen kommen durch den variierenden Verbrauch der VAV Klappen und Ventile zustande. Aufgrund des Messkonzeptes kann der Verbrauch dieser Geräte jedoch nicht separat erfasst werden und ist in der Gruppe Eigenenergieverbrauch GA enthalten.

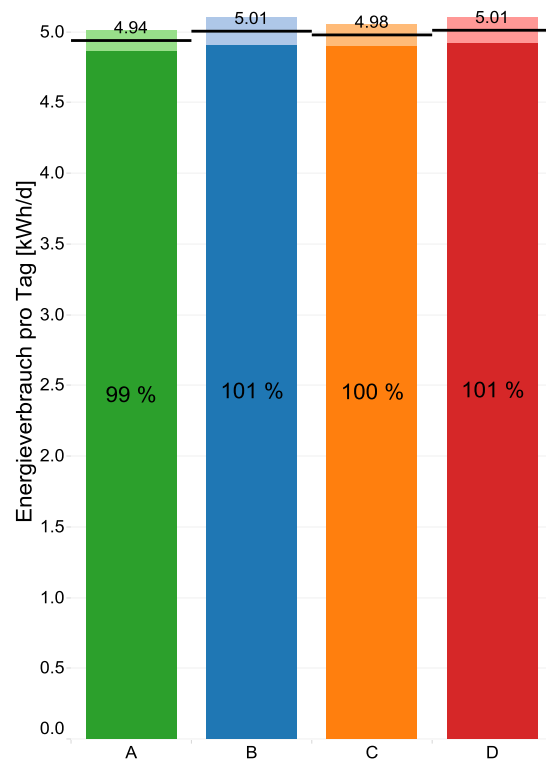


Abbildung 13: elektrischer Eigenverbrauch der GA

8.2.3. GA-Klassen-abhängige Verbraucher

In Abbildung 14 sind nur diejenigen Verbrauchergruppen dargestellt, welche auch durch die GA-Klasse beeinflusst werden. Man sieht, dass die dominierende Gruppe die Beleuchtung ist, gefolgt von der Lüftung. Die elektrischen Verbraucher der Lüftung sind die Ventilatoren und der Motor für den Rotationswärmeübertrager. Die Unterschiede zwischen den GA-Klassen sind hier deutlicher sichtbar. Klasse A zeigt die tiefsten Verbrauchswerte, Klasse D die höchsten Werte, wie gemäss SIA 386.110 zu erwarten war. Dazwischen ist das Bild jedoch unklar.

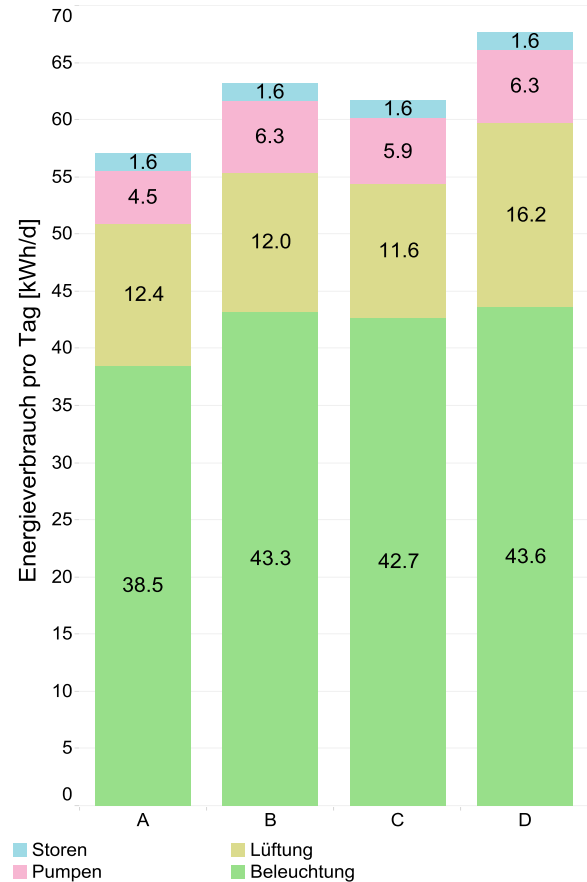


Abbildung 14: elektr. Energieverbrauch der von der GA-Klasse-abhängigen Verbrauchergruppen

Bezieht man den durchschnittlichen Gesamtverbrauch auf die Nutzfläche aus Tabelle 3 ergeben sich die Werte in Tabelle 8

GA Klasse	A	B	C	D
Mittlerer elektrischer GA-Klasse-abhängiger Verbrauch pro Tag und Fläche [Wh/d/m ²]	73	80	78	85

Tabelle 8: Durchschnittlicher spezifischer elektrischer GA-Klasse-abhängigen Verbrauch

Da die Gebäudetechnik im Sommer und Winter unterschiedliche Voraussetzungen bewältigen muss, wurde der elektrische Energieverbrauch auf diese zwei Perioden aufgeteilt ausgewertet (Abbildung 15). Die Winterperiode umfasst dabei die Monate Oktober bis und mit März, die Sommerperiode die Monate April bis und mit September. Das qualitative Bild des Gesamtverbrauchs ändert sich im Vergleich zur Auswertung über das ganze Jahr nicht.

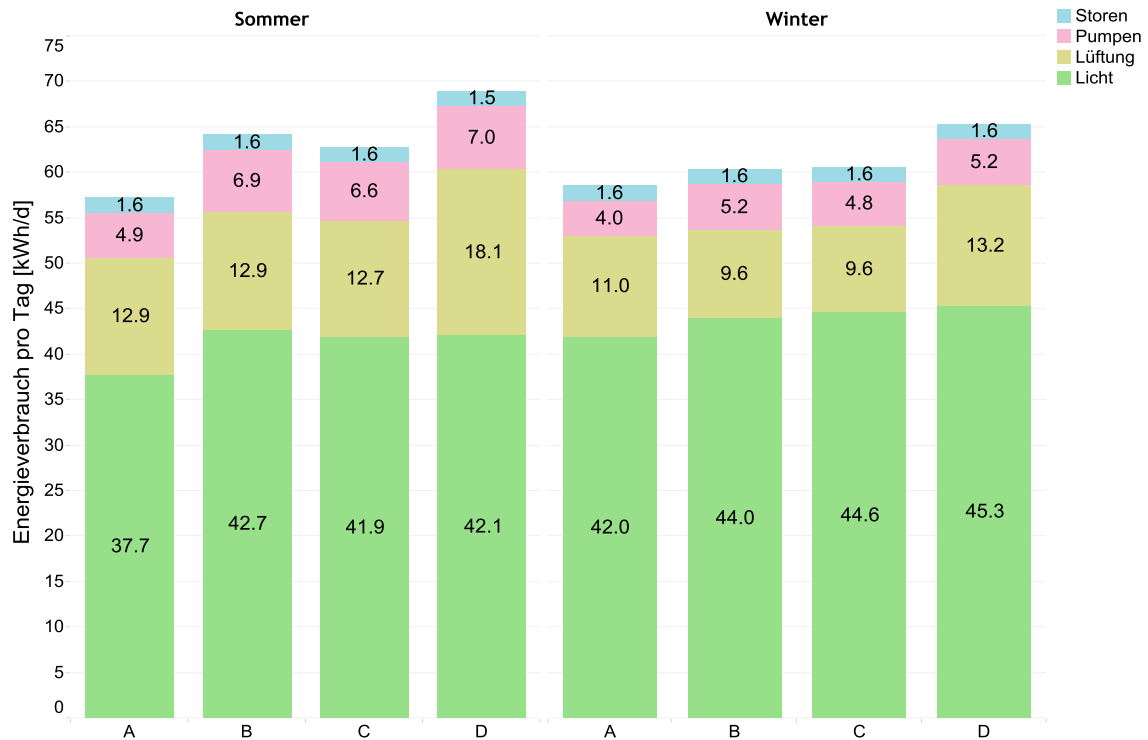


Abbildung 15: elektr. Energieverbrauch der von der GA-Klasse-abhängigen nach Jahreszeiten

8.2.4. Beleuchtung

In Abbildung 16 ist der Verbrauch der gesamten Beleuchtung nach Klassen aufgeschlüsselt. Da die Messwerte sehr stark von der Nutzung abhängen, wurde jeweils noch zwischen Arbeitstagen und Wochenenden unterschieden. Betrachtet man nur die Arbeitstage, zeigt sich eine Abstufung des Verbrauchs nach Klasse, so wie man es erwarten würde. Aufgrund der Unsicherheit von ca. 16%, kann man aber von keinem signifikanten Unterschied zwischen den Klassen ausgehen. Die Wochenenden zeigen ein anderes Bild. Das kommt dadurch zustande, dass an gewissen Wochenenden wahrscheinlich Personen anwesend waren und sich die Beleuchtung dadurch eingeschaltet hat. Da die meisten dieser Tage in Klasse B lagen, zeigt diese Klasse eine extreme Streuung von über 100% um den Mittelwert. Die Standardabweichung wird durch die hohen Messwerte an Tagen mit Belegung übermässig vergrössert, da der Unterschied zwischen normalen Wochenenden und diesen Tagen sehr gross ist. Auch an den Wochenenden kann man also keinen klaren Unterschied zwischen den Klassen feststellen.

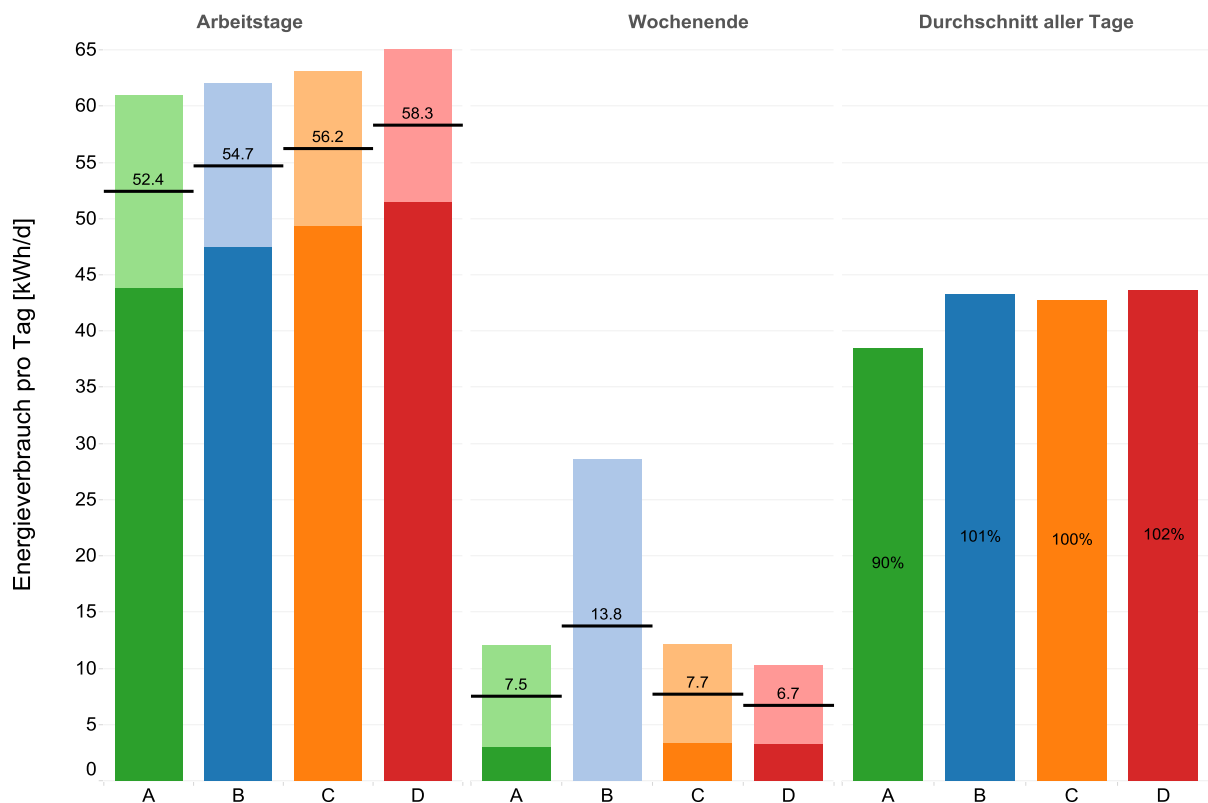


Abbildung 16: elektrischer Energieverbrauch der Beleuchtung

Die Beleuchtung ist nicht nur von den Nutzenden abhängig, sondern auch von der Stärke des Tageslichtes. In Abbildung 17 ist deshalb der Energieverbrauch für die Wochentage über der mittleren täglichen Globalstrahlung aufgetragen und farblich in die Klassen aufgeschlüsselt. Da das Gebäude über kein Pyranometer verfügt, wurden die Messwerte der nächstgelegenen Station von MeteoSchweiz (Buchs Aarau) verwendet. Es wurde zudem pro Klasse eine logarithmische Trendlinie eingefügt. Für tiefe Beleuchtungsstärken lassen sich zwischen den Klassen keine Unterschiede feststellen. Ab ca. 100 W/m^2 ist jedoch ein deutlicher Unterschied der Klassen A gegenüber den anderen zu sehen. Der Unterschied wird mit zunehmender mittlerer täglicher Globalstrahlung deutlicher.

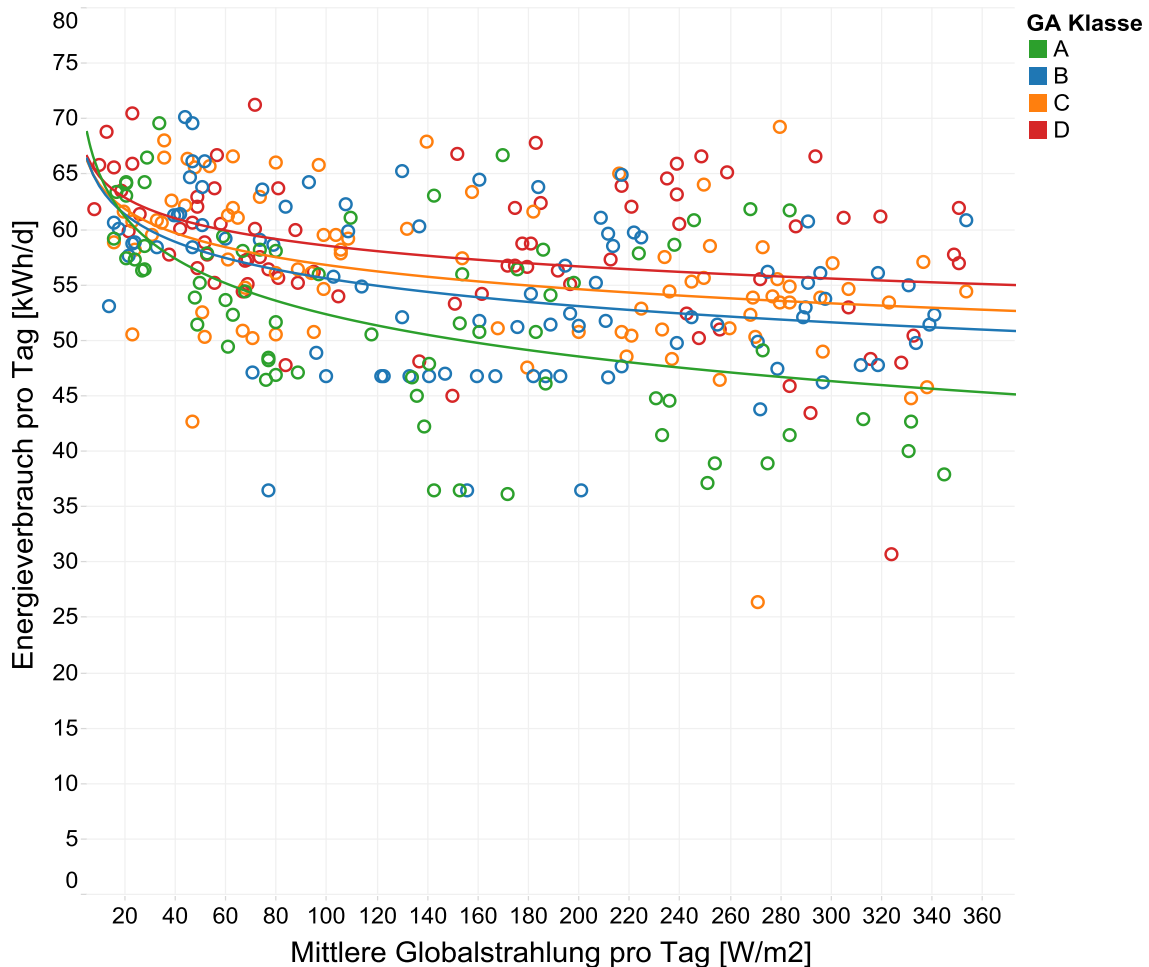


Abbildung 17: Energieverbrauch der Beleuchtung an Werktagen in Relation zu Globalstrahlung

In Abbildung 18 werden die Wochenenden auf dieselbe Weise wie oben betrachtet, jedoch mit einem linearen Fit. Die Klassen lassen sich kaum unterscheiden und zeigen auch fast keine Abhängigkeit zur mittleren täglichen Globalstrahlung. Klasse B hat aus den beschriebenen Gründen einen höheren mittleren Verbrauch, jedoch auch seine sehr grosse Streuung. Sehr schön sind hier die einzelnen Wochenenden zu sehen, an welchen der Verbrauch ähnlich hoch war wie an den Werktagen. Die folgenden Daten sind die Wochenenden mit hohem Verbrauch: 26/27.03.2016, 24/25.09.2016, 01/02.10.2016.

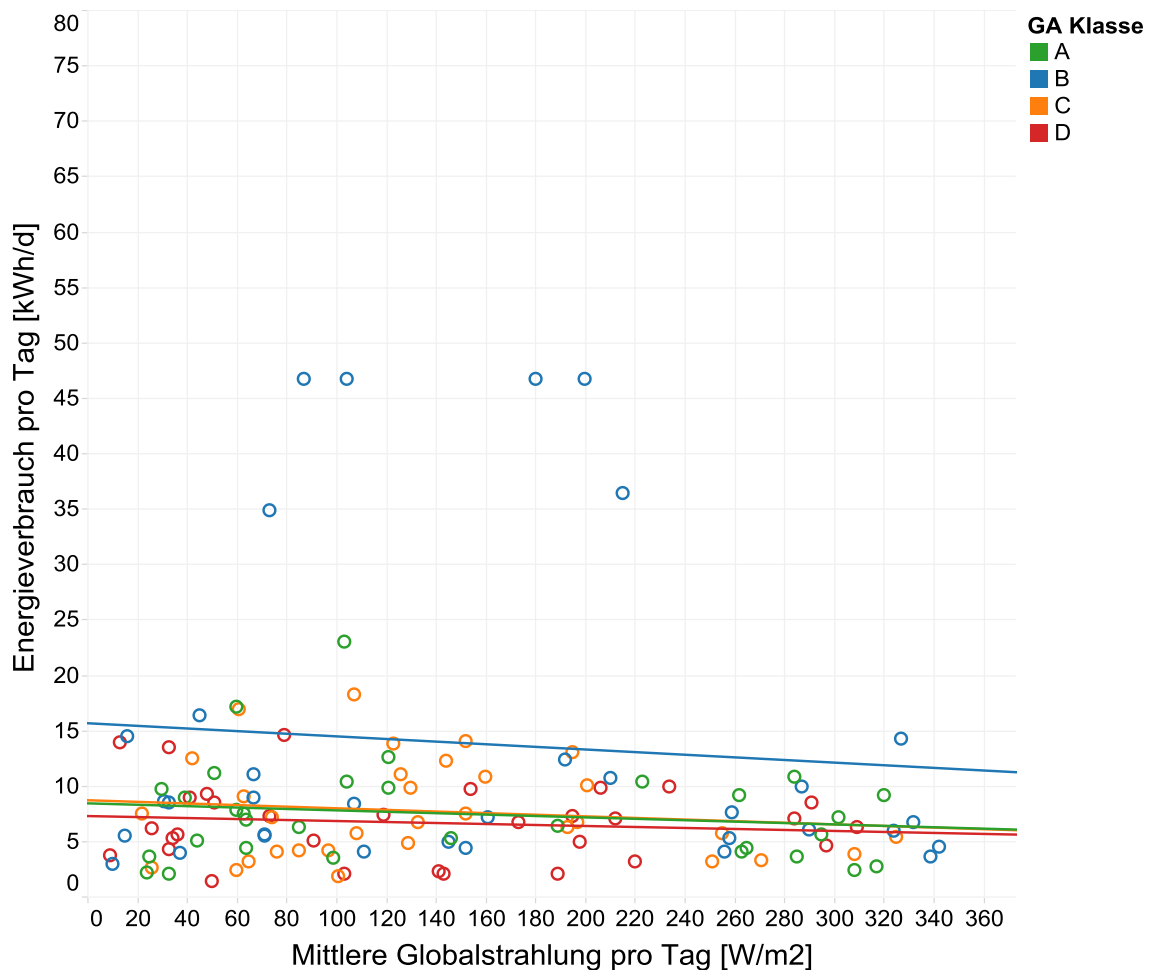


Abbildung 18: Energieverbrauch der Beleuchtung an Wochenenden in Relation zu Globalstrahlung

8.2.5. Lüftung

Der elektrische Energieverbrauch der Lüftung (Abbildung 19) lässt sich zwischen den Klassen aufgrund der grossen Unsicherheit (Standardabweichung 43-49% des Mittelwertes) nicht voneinander unterscheiden. Klasse D zeigt einen höheren täglichen Verbrauch, jedoch nicht signifikant höher. In dieser Klasse ist die Steuerung merklich mehr Volllaststunden der Lüftungsanlage vor als in den anderen Klassen, was zu einem deutlich höheren Energieverbrauch führen dürfte.

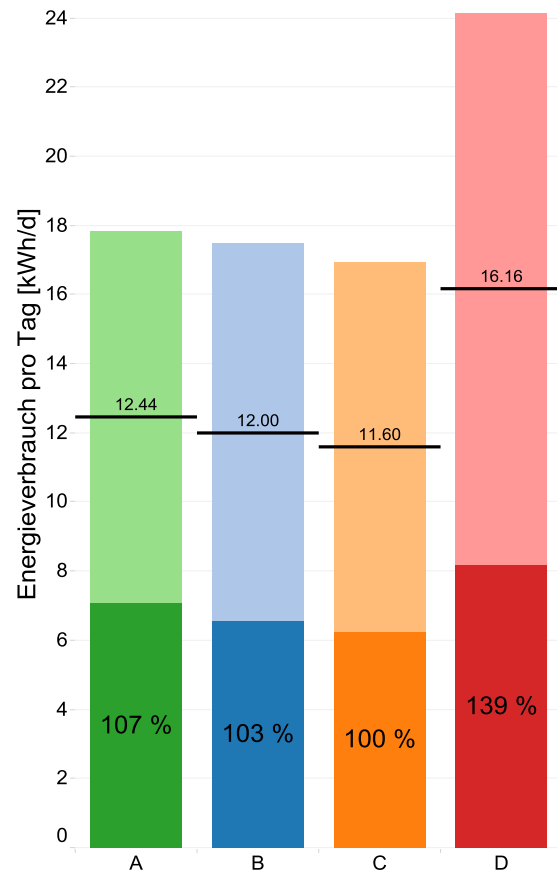


Abbildung 19: elektrischer Energieverbrauch der Lüftung

8.2.6. Pumpen

Der elektrische Energieverbrauch der Pumpen (Abbildung 20) zwischen den Klassen B, C und D lässt sich aufgrund der Unsicherheit (Standardabweichung 21 - 24% des Mittelwertes) nicht klar voneinander unterscheiden. Klasse A hingegen zeigt im Vergleich einen etwas tieferen Verbrauch, wenn auch nicht signifikant. Da die Pumpen in allen Klassen mit einer Drehzahlregelung auf einem konstanten Druck betrieben werden, ergeben sich die Unterschiede im Energieverbrauch nur aus den unterschiedlichen Betriebszeiten. Diese wiederum stehen in engem Zusammenhang mit dem thermischen Energieverbrauch (siehe Abschnitt 8.4). Die Abbildung 20 ist daher qualitativ sehr ähnlich wie die Abbildung 28 mit dem hochgerechneten Heizenergieverbrauch. Daraus kann man schliessen, dass der Verbrauch der Pumpen von der Heizung dominiert wird.

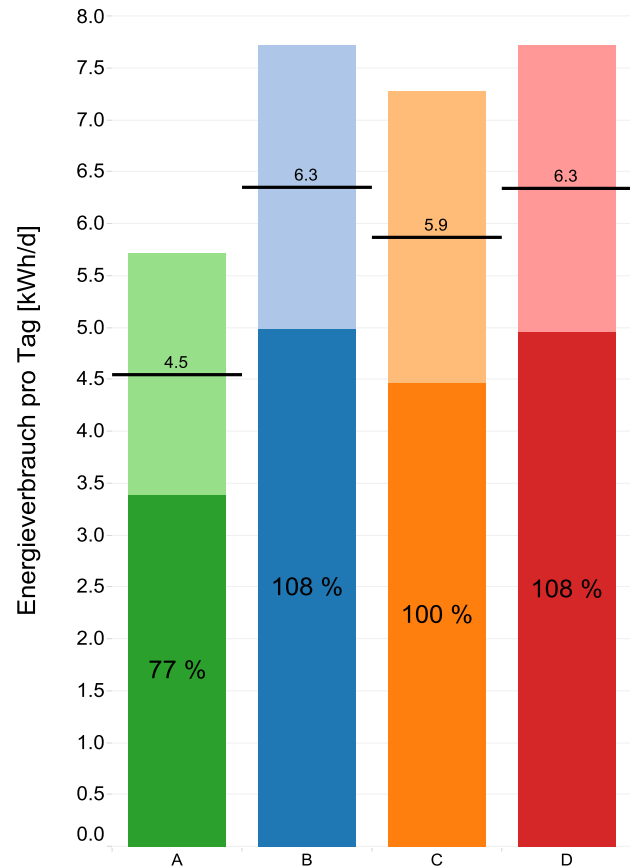


Abbildung 20: elektrischer Energieverbrauch der Pumpen

8.2.7. Storen

In Abbildung 21 ist der Verbrauch der Storenantriebe nach den-GA Klassen aufgeschlüsselt. Die Klassen A und B zeigen die gleichen Verbrauchswerte, zwischen Klasse C und D bestehen ebenfalls keine Unterschiede. Da die Standardabweichungen aber zwischen 16% und 26% liegen, darf diesem Unterschied – der nur 4% beträgt – zwischen den Klassen A/B und den Klassen C/D nicht zu grosses Gewicht beigemessen werden. Der Grund dürfte darin liegen, dass für A und B dieselbe automatische Regelung implementiert wurde. Klasse C und D verwenden hingegen keine Steuerung sondern nur den manuellen Betrieb.

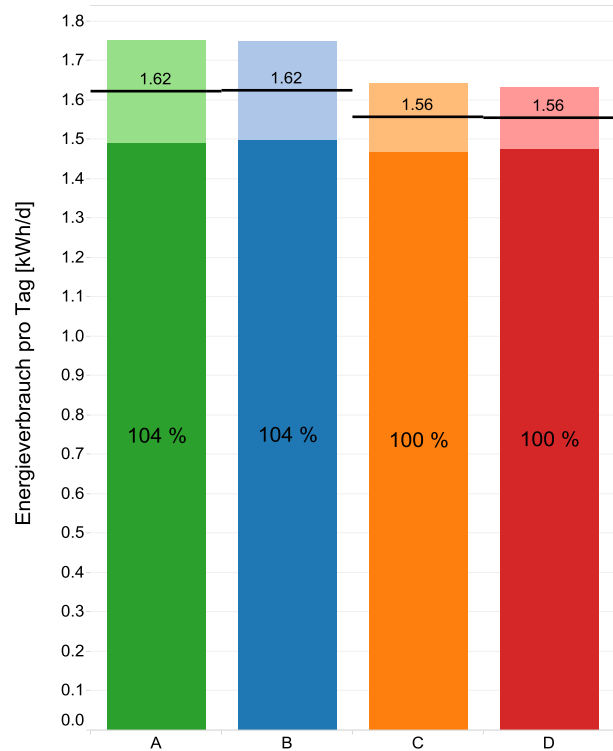


Abbildung 21: elektrischer Energieverbrauch der Storen

Betrachtet man den Tagesverlauf des Energieverbrauchs im Zeitraum vom 01.06. bis 19.07.2016 (Abbildung 22) detaillierter, zeigt sich deutlich, dass in Klasse A während des Tages mehr Storenbewegungen stattfinden als in den anderen Klassen. Die Bandlast dürfte sich aus dem Ruheverbrauch der SMI-Aktoren ergeben.

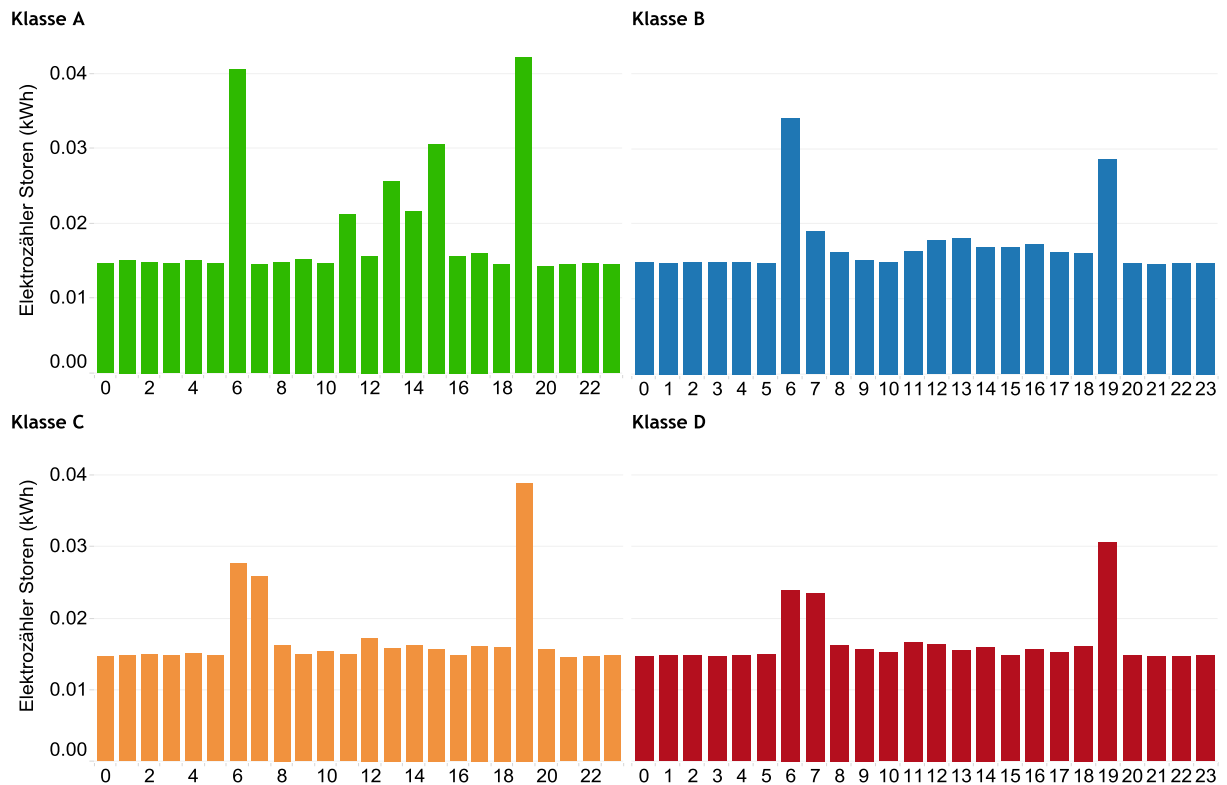


Abbildung 22: stündlicher elektrischer Energieverbrauch der Storen

8.3. Hochrechnung elektr. Energieverbrauch Beleuchtung

Für die Beleuchtungsenergie wurde auf Basis der Trendmodelle eine jahresbezogene Hochrechnung durchgeführt (siehe Abschnitt 7.2.3). Die Trendmodelle sind durch die folgenden Kenngrößen charakterisiert. Der p-Wert liegt für alle Koeffizienten deutlich unter der Schwelle von 0.05. Die Modelle können also im statistischen Sinne als signifikant bezeichnet werden. Das Bestimmtheitsmass dieser Modelle ist jedoch eher tief, was sich negativ auf den Modellfehler auswirkt.

Das logarithmische Trendmodell für die Wochentage basiert auf 318 Beobachtungen.

GA Klasse	Freiheitsgrad	Begriff	Wert	StdFehler	t-Wert	p-Wert
D	76	log(Globalstrahlung (W/m ²))	-2.69891	0.758309	-3.55911	0.0006454
		Achsenabschnitt	70.96	3.63635	19.5141	< 0.0001
C	81	log(Globalstrahlung (W/m ²))	-3.14859	0.835693	-3.76764	0.0003114
		Achsenabschnitt	71.2886	4.05842	17.5656	< 0.0001
B	86	log(Globalstrahlung (W/m ²))	-3.60323	0.878452	-4.10179	< 0.0001
		Achsenabschnitt	72.1691	4.32113	16.7015	< 0.0001
A	67	log(Globalstrahlung (W/m ²))	-5.48662	0.982907	-5.58203	< 0.0001
		Achsenabschnitt	77.6031	4.59954	16.8719	< 0.0001

Tabelle 9: Modell-Kenngrößen für das Trendmodell der Beleuchtung an Wochentagen

Das lineare Trendmodell für die Wochenenden basiert auf 128 Beobachtungen.

GA Klasse	Freiheitsgrad	Begriff	Wert	StdFehler	t-Wert	p-Wert
D	29	Globalstrahlung (W/m ²)	-0.00448	0.0067886	-0.659938	0.0006454
		Achsenabschnitt	7.30548	1.09446	6.67498	< 0.0001
C	30	Globalstrahlung (W/m ²)	-0.0072559	0.0100343	-0.723107	0.0003114
		Achsenabschnitt	8.73199	1.59729	5.46676	< 0.0001
B	32	Globalstrahlung (W/m ²)	-0.0118457	0.0228543	-0.518314	< 0.0001
		Achsenabschnitt	15.6806	4.40288	3.56143	0.001179
A	29	Globalstrahlung (W/m ²)	-0.0063444	0.0077083	-0.823057	< 0.0001
		Achsenabschnitt	8.45201	1.41797	5.96064	< 0.0001

Tabelle 10: Modell-Kenngrößen für das Trendmodell der Beleuchtung an Wochenenden

In Abbildung 23 ist der entsprechende Jahresenergieverbrauch nach Klassen aufgeschlüsselt. Die grosse Unsicherheit im Bereich von $\pm 14\%$ bis $\pm 35\%$ des Mittelwertes lässt eine eindeutige Unterscheidung der Klassen nicht zu. Der Grund dieser grossen Unsicherheit liegt in der grossen Streuung der Messwerte, insbesondere an den Wochenenden. Vergleicht man den hochgerechneten Durchschnitt über alle Klassen von 15.7 MWh mit dem gemessenen Verbrauch in dieser Periode von 14.0 MWh, kann man die Hochrechnung aufgrund des grossen Unsicherheitsbandes die Hochrechnung als plausibel betrachten.

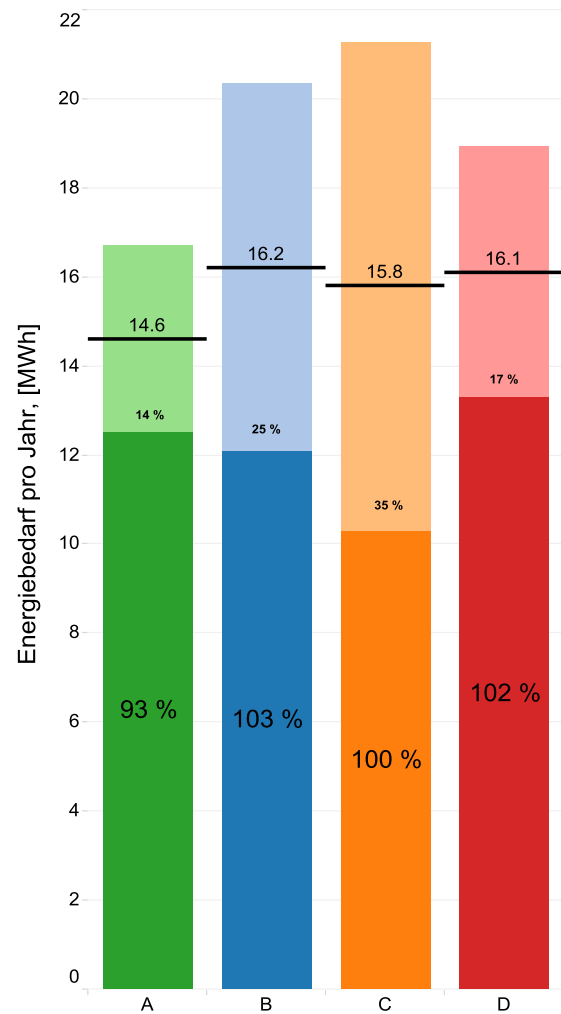


Abbildung 23: hochgerechneter Jahresenergieverbrauch der Beleuchtung

8.4. Messwerte thermischer Energieverbrauch

Der thermische Energieverbrauch ist im Gegensatz zum elektrischen Energieverbrauch nicht hauptsächlich von der GA abhängig. Er wird massgeblich von den Witterungsbedingungen, insbesondere der Aussentemperatur, bestimmt. Es ist deshalb notwendig, den jeweiligen Energieverbrauch in Relation zur Aussentemperatur zu setzen.

8.4.1. Heizenergie

In Abbildung 24 ist der tägliche Heizenergieverbrauch über der mittleren täglichen Aussentemperatur aufgetragen und nach Klassen aufgeschlüsselt. Es werden dabei nur Werte für Aussentemperaturen kleiner oder gleich 14°C (Heizgrenze) betrachtet. Pro Klasse wurde eine lineare Trendlinie darübergerlegt. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind deren Unsicherheitsbereiche in der Grafik nicht dargestellt. Klasse A zeigt dabei einen tieferen Energieverbrauch als die anderen Klassen. Die anderen Klassen lassen sich nicht eindeutig voneinander unterscheiden, da die Konfidenzintervalle der Trendmodelle sich gegenseitig stark überschneiden. Aus demselben Grund kann man die Trendkurve der Klasse D für Aussentemperaturen unter 3°C auch nicht als tiefer als diejenigen der Klasse B und C bezeichnen.

Die Erklärung für das bessere Abschneiden der Klasse A ist, dass Klasse A als einzige eine Zonenregelung implementiert hat. Diese sorgt dafür, dass die Zonenventile in jeder Zone den Massenstrom unabhängig voneinander nach der Raumlufttemperatur der Zone regeln. Klasse B zeigt im Vergleich einige hohe Tagesverbräuche bei tieferen Aussentemperaturen. Eine mögliche Erklärung wäre, dass an diesem Tagen die WRG nicht optimal lief und somit das Heizregister mehr Energie bezog.

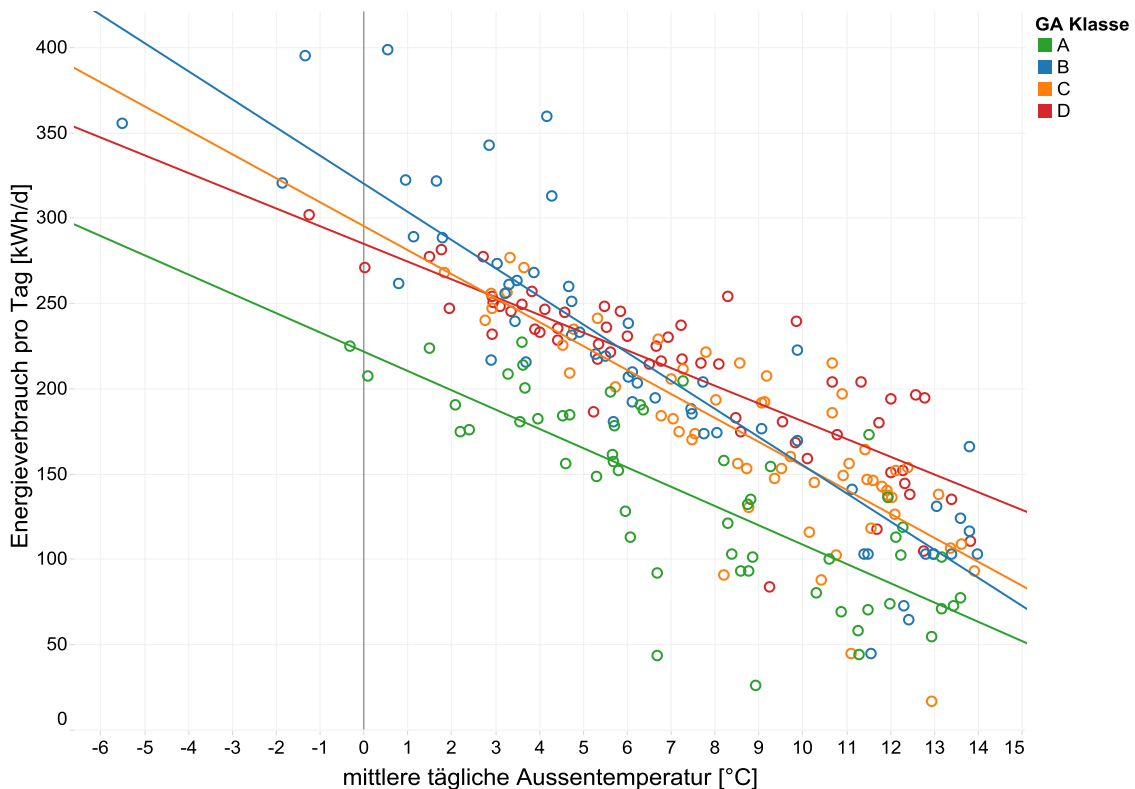


Abbildung 24: Heizenergie in Relation zur Aussentemperatur

8.4.2. Vorlauftemperatur Heizung

Für den Zeitraum vom 01.02.2016-30.04.2016 ist die Vorlauftemperatur der Fussbodenheizung über der Aussentemperatur aufgetragen. Punkte mit einer Aussentemperatur über 14°C (Heizgrenze) wurden weggelassen. Alle Klassen ausser D zeigen erwartungsgemäss eine leichte Abnahme der Vorlauftemperatur mit Zunahme der Aussentemperatur. Die Vorlauftemperatur in Klasse D scheint mehr oder weniger unabhängig der Aussentemperatur zu sein. Dies lässt sich mit der Steuerung erklären, welche für Klasse D eine konstante Vorlauftemperatur vorgibt. Die anderen Klassen sind witterungsgeführt, A und B noch kombiniert mit einer Nacht- und Sonntagsabsenkung. Diese Absenkung ist in den Messdaten dieser Periode jedoch nicht erkennbar.

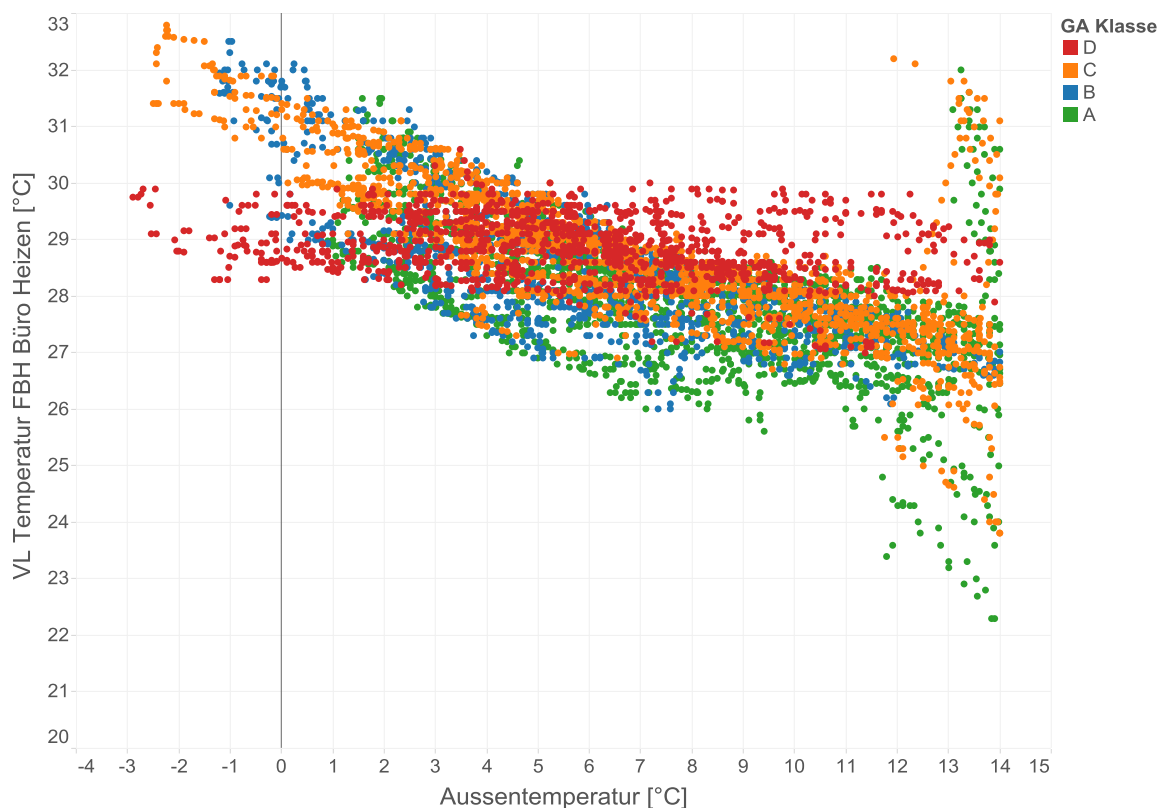


Abbildung 25: Verhältnis Vorlauftemperatur Fussbodenheizung zur Aussentemperatur

8.4.3. Kühlenergie

Wie für die Heizenergie wurde auch der tägliche Kühlenergiebedarf (Abbildung 26) über der mittleren täglichen Aussentemperatur aufgetragen und eine lineare Trendlinie pro Klasse angepasst. Die Kühlenergie setzt sich aus der über die Bodenheizung, das Lüftungsgerät und die Nachkühler der Sitzungszimmer abgegebenen Energie zusammen.

Klasse A zeigt den tiefsten Verbrauch, die Klassen B und C liegen in der Mitte sehr nahe zusammen und Klasse D hat deutlich den höchsten Verbrauch. Klasse A dürfte, wie schon bei der Heizenergie, aufgrund der Einzelraumregelung die tiefsten Messwerte aufweisen. Klasse D hat als einzige Klasse keine natürliche Nachtauskühlung implementiert, wodurch sich der Kälteenergieverbrauch erhöht.

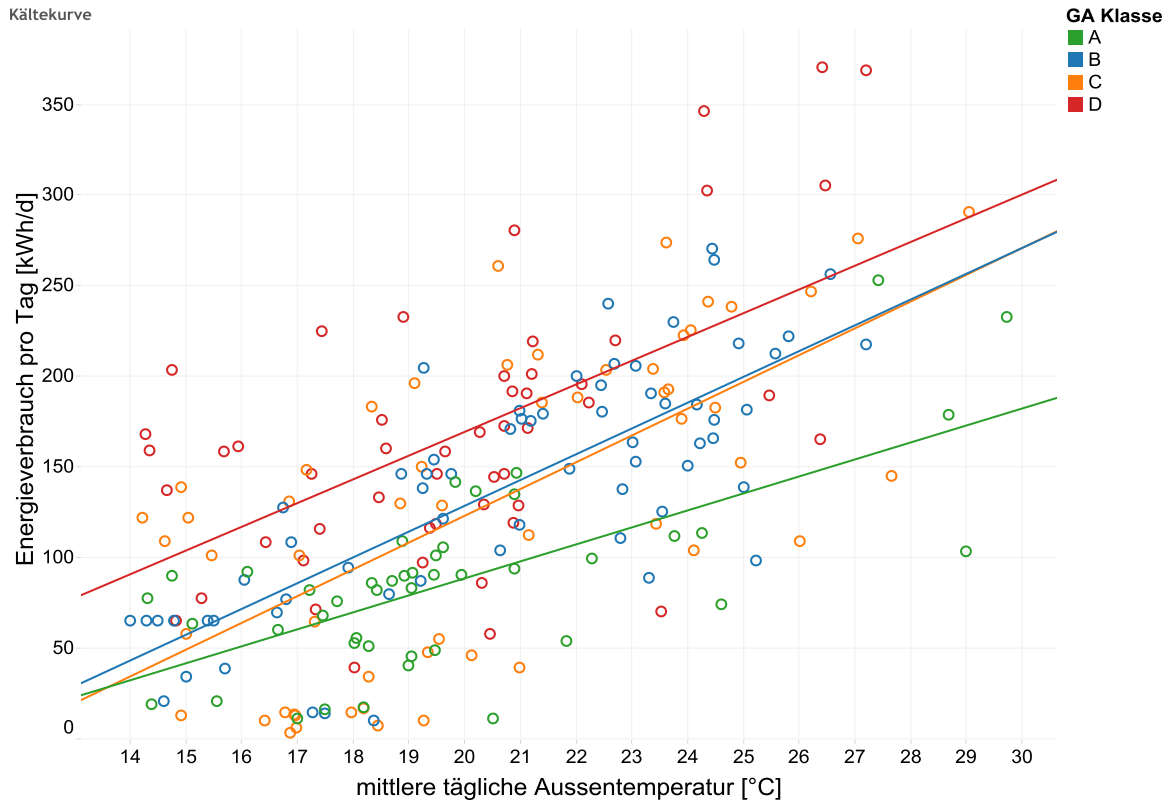


Abbildung 26: Kühlenergie in Relation zur Aussentemperatur

In Abbildung 27 sind die Zu- und Ablufttemperaturen im Monoblock für Mai bis Juli 2016 dargestellt. Die grossen Buchstaben beschreiben die jeweils aufgeschaltete GA-Klasse. Es ist ersichtlich, dass in den Zeitabschnitten, in welcher die Steuerung mit GA-Klasse D lief, die minimalen Zulufttemperaturen deutlich höher waren als bei den anderen Klassen. Die Zuluft dürfte also mittels WRG und Heizregister in Klasse D über den ganzen Tagesverlauf konditioniert werden, womit keine natürliche Nachtauskühlung stattfindet.

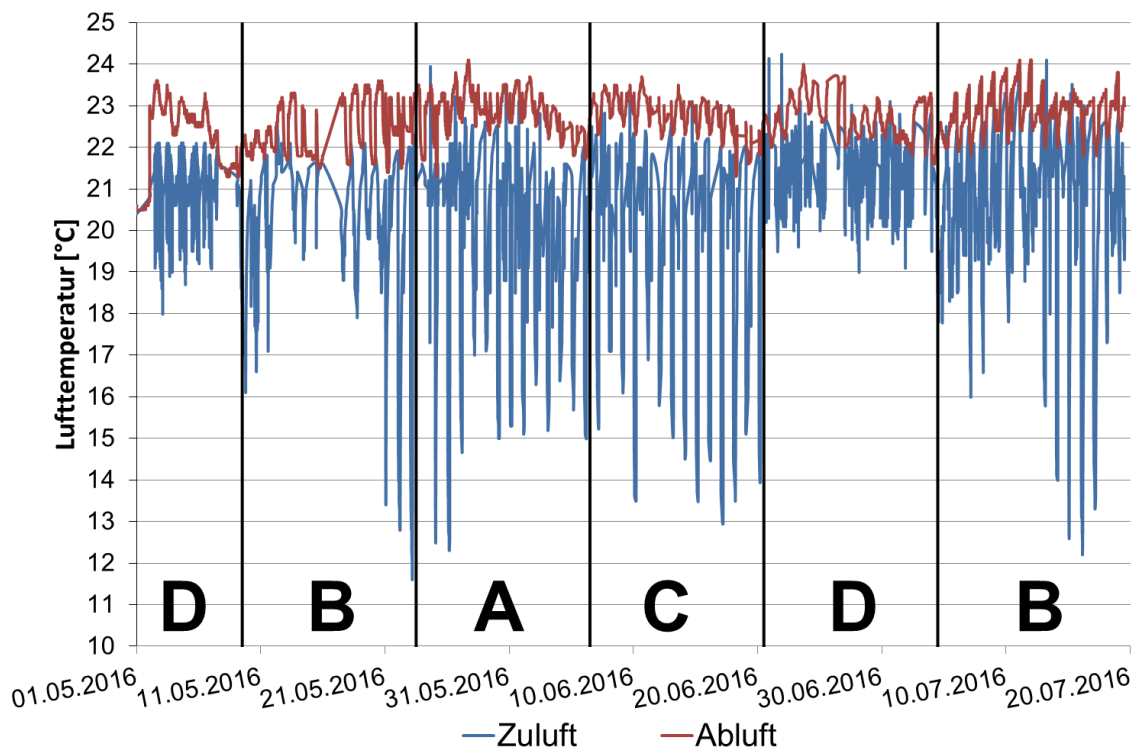


Abbildung 27: Temperaturen im Lüftungsmonoblock

8.5. Hochrechnung thermischer Energieverbrauch

Für die thermische Energie wurde auf Basis der Trendmodelle eine jahresbezogenen Hochrechnung durchgeführt (siehe Abschnitt 7.2.3). Die Trendmodelle sind durch die untenstehenden Kenngrößen charakterisiert. Der p-Wert liegt für alle Koeffizienten deutlich unter der Schwelle von 0.05, ausser für den Achsenabschnitt der Klasse D. Die Modelle können also im statistischen Sinne als signifikant bezeichnet werden. Das Bestimmtheitsmass dieser Modelle ist jedoch eher tief, was negativ auf den Modellfehler auswirkt.

Das Trendmodell für die Heizenergie basiert auf 228 Beobachtungen.

GA Klasse	Freiheitsgrad	Begriff	Wert	StdFehler	t-Wert	p-Wert
D	56	Aussentemperatur (°C)	-10.3925	0.90827	-11.4421	< 0.0001
		Achsenabschnitt	284.904	7.3378	38.8269	< 0.0001
C	57	Aussentemperatur (°C)	-14.0488	1.35928	-10.3354	< 0.0001
		Achsenabschnitt	-14.0488	1.35928	-10.3354	< 0.0001
B	54	Aussentemperatur (°C)	-16.4918	1.08019	-15.2675	< 0.0001
		Achsenabschnitt	320.14	8.67053	36.9228	< 0.0001
A	53	Aussentemperatur (°C)	-11.3049	1.26858	-8.91149	< 0.0001
		Achsenabschnitt	221.73	10.651	20.8178	< 0.0001

Tabelle 11: Modell-Kenngrößen für das Trendmodell der Wärmeenergie

Das Trendmodell für die Kühlenergie basiert auf 217 Beobachtungen.

GA Klasse	Freiheitsgrad	Begriff	Wert	StdFehler	t-Wert	p-Wert
D	49	Aussentemperatur (°C)	13.094	2.66754	4.90865	< 0.0001
		Achsenabschnitt	-92.521	53.8741	-1.71735	0.0922294
C	54	Aussentemperatur (°C)	14.7739	2.30344	6.41382	< 0.0001
		Achsenabschnitt	-172.416	47.6481	-3.61852	0.0006533
B	63	Aussentemperatur (°C)	14.2248	1.44192	9.86518	< 0.0001
		Achsenabschnitt	-155.922	30.4051	-5.12815	< 0.0001
A	43	Aussentemperatur (°C)	9.37109	1.55585	6.02312	< 0.0001
		Achsenabschnitt	-98.8781	31.2456	-3.16454	0.0028512

Tabelle 12: Modell-Kenngrößen für das Trendmodell der Kälteenergie

In Abbildung 28 ist der hochgerechnete Jahresverbrauch nach Klasse dargestellt. Der Heizenergieverbrauch lässt sich nur zwischen Klasse A und D unterscheiden. Eine Erklärung dürfte die in Klasse A umgesetzte Einzelraumregelung der Raumlufttemperatur sein. Betrachtet man den real gemessenen Heizenergieverbrauch derselben Periode von 40.4 MWh, liegt dieser doch sehr nahe am Durchschnitt über alle Klassen des hochgerechneten Verbrauchs von 41.5 MWh. Das zeigt, dass die Hochrechnung plausibel sein dürfte. Interessant ist, dass die Grafik qualitativ sehr ähnlich ist, wie die Abbildung 20 (elektrischer Energieverbrauch der Pumpen). Dies plausibilisiert die Hochrechnung zusätzlich. Klasse B zeigt einen höheren Mittelwert als Klasse C. Diese dürfte auf die hohen Tagesverbräuche der Klasse B bei tieferen Aussentemperaturen zurückzuführen sein.

Der berechnete Kühlenergieverbrauch zeigt aufgrund der sehr grossen Unsicherheiten keine klaren Unterschiede zwischen den Klassen. Betrachtet man auch hier den real gemessenen Kühlenergieverbrauch derselben Periode (22 MWh), liegt dieser ca. einen Viertel höher als der Durchschnitt über alle Klassen des hochgerechneten Verbrauchs von 17.5 MWh. Die Hochrechnung erscheint also nicht sehr plausibel zu sein. Einen Hinweis auf unpassende Trendmodelle geben die hohen Standardfehler in Tabelle 12, welche auf eine grosse Streuung der Messdaten schliessen lassen.

Die Frage die sich nun stellt, ist, woher diese grosse Streuung kommt. Der Hauptgrund könnte sein, dass die Aussentemperatur nicht die einzige Einflussgrösse auf den Kühlenergieverbrauchs ist, sondern anderen Faktoren wie solare Einträge oder interne Lasten ebenfalls einen grossen Einfluss haben. Beide dieser Einflussfaktoren wurden jedoch nicht direkt gemessen und können so auch nicht in der Auswertung verwendet werden.

Ein weiterer Grund für die grosse Streuung sind möglicherweise Änderungen an der Anlage.

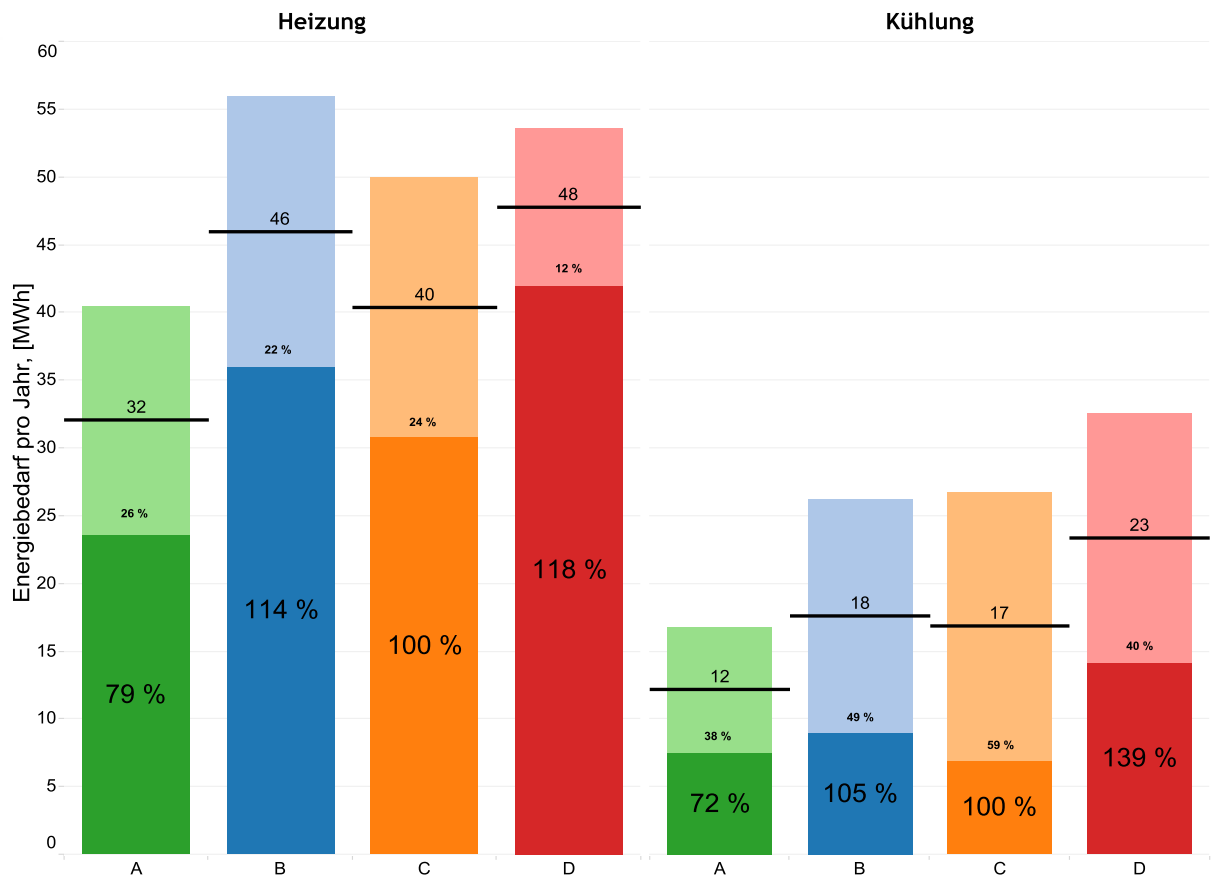


Abbildung 28: hochgerechneter thermischer Jahresenergieverbrauch

8.6. Raumtemperaturen

In Abbildung 29 sind die täglichen mittleren Raumlufthtemperaturen über der täglichen mittleren Aussentemperatur aufgetragen und farblich nach Klasse aufgeschlüsselt. Die schwarzen Kurven sind die Grenzkurven nach SIA 382/1 (2014). Die oberste Grafik zeigt jeweils den wärmsten aller Räume an einem Tag, die mittlere Grafik den Mittelwert über alle Räume und die unterste den kältesten Raum. Betrachtet man nur den Mittelwert liegen alle Punkte innerhalb der Grenzkurve, die thermischen Komfortbedingungen dürften also erfüllt sein. Die wärmsten Räume liegen jedoch für Aussentemperaturen unter 14°C mehrheitlich oberhalb der Grenzkurve. Es kann also angenommen, dass in einzelnen zu viel geheizt wird.

Es zeigt sich, dass für alle GA-Klassen die Raumlufthtemperaturen im Bereich der Aussentemperaturen von 0 bis 15°C zum Teil über der Grenzkurve liegen. Dies bedeutet, dass man durch eine tiefere Raumtemperatur noch Heizenergie einsparen könnte. Im Gegenzug zeigen sich die Raumtemperaturen bei Aussentemperaturen im Bereich über ca. 18°C teilweise als zu tief. Ob dies aufgrund der Nachtauskühlung oder einer zu tiefen Konditionierung der Zuluft zustande kommt, ist nicht ersichtlich.

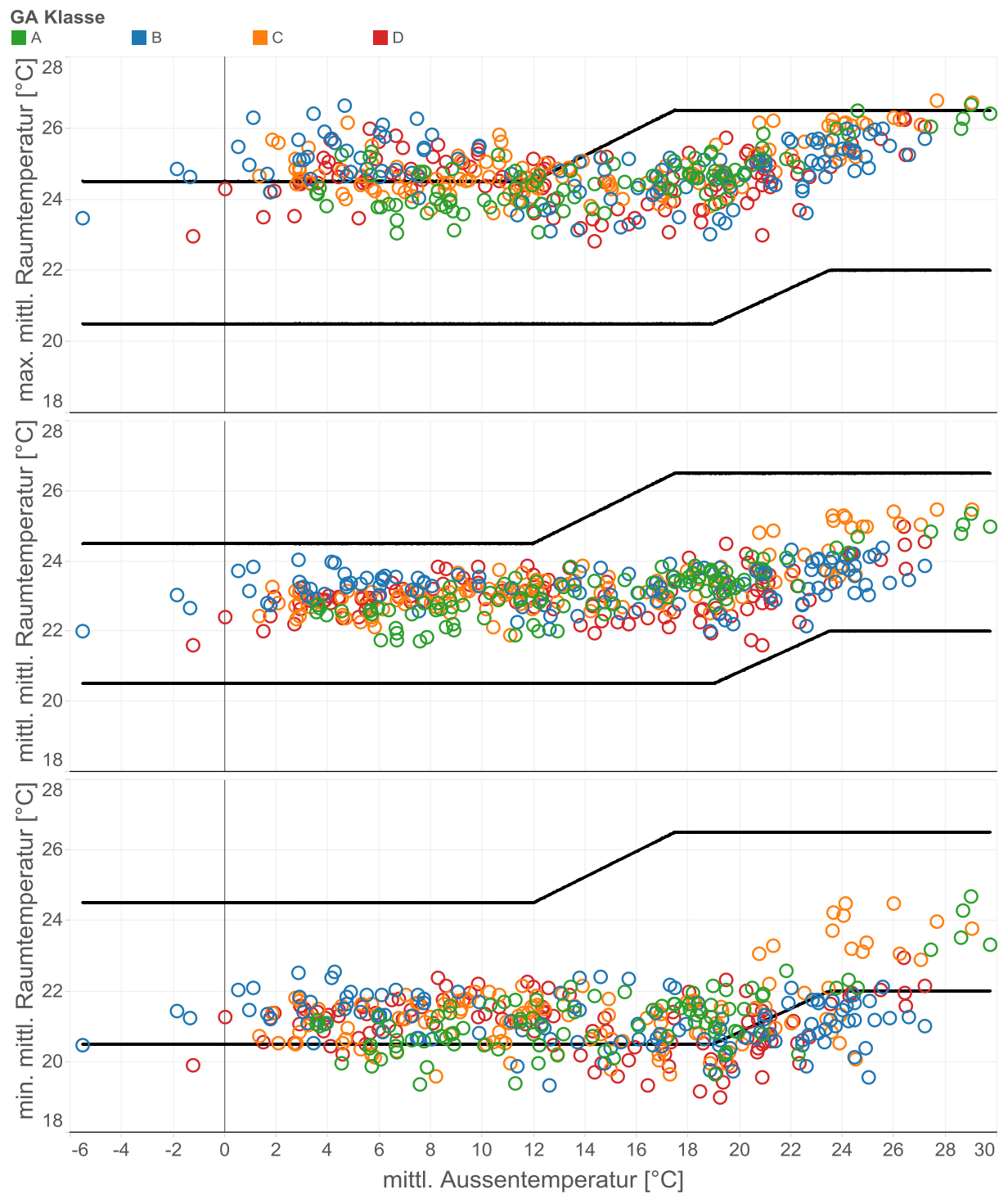


Abbildung 29: Raumlufttemperaturen in Abhängigkeit der Aussentemperaturen

8.7. Nutzendenbefragung

Die Nutzendenbefragung sollte ergänzend zu den Auswertungen des Energieverbrauchs zeigen, bei welchem Automatisierungsgrad sich die Nutzenden am wohlsten fühlten, sei dies weil eine gute Behaglichkeit gegeben war bzw. weil sie das richtige Mass an Selbstbestimmung / an Eingriffsmöglichkeiten hatten.

Die Nutzendenbefragung wurde für den Zeitraum vom 06.07.2016 bis 22.06.2016 ausgewertet. Pro Periode wurden jeweils sehr unterschiedlich viele Fragebögen ausgefüllt, in manchen Perioden auch gar keine. Im Verlaufe der Studie wurden deshalb erfolgreich Massnahmen ergriffen, um den Rücklauf zu erhöhen. Abbildung 30 stellt die Anzahl der ausgewerteten Fragebögen, aufgeschlüsselt nach den GA-Klassen dar. Durchschnittlich wurden 22 Fragebögen versandt, der Rücklauf betrug somit im Durchschnitt 35%

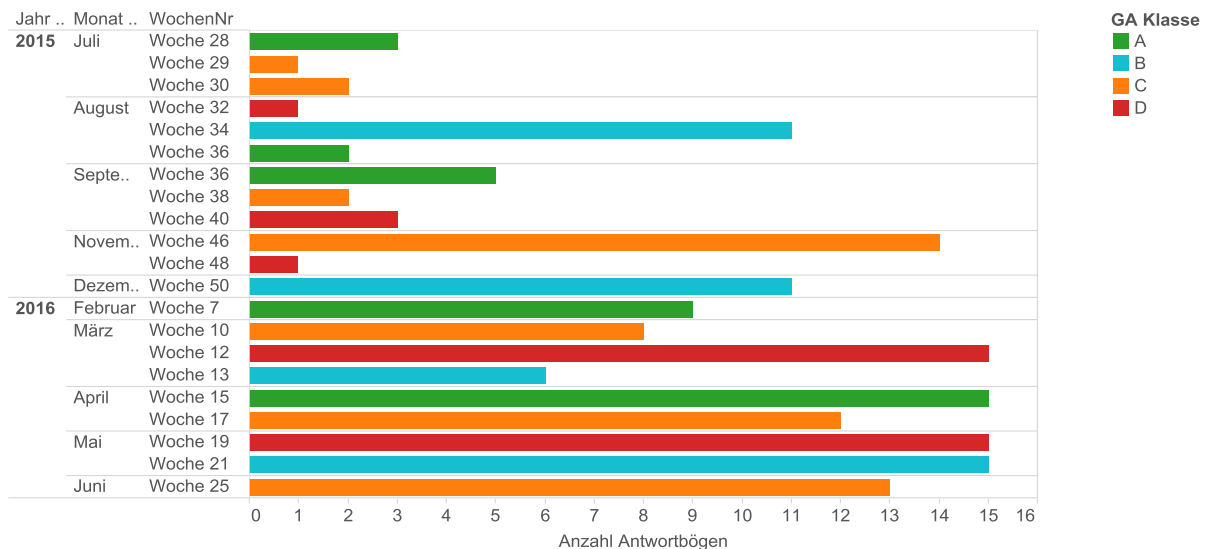


Abbildung 30: Rücklauf der Nutzendenbefragung

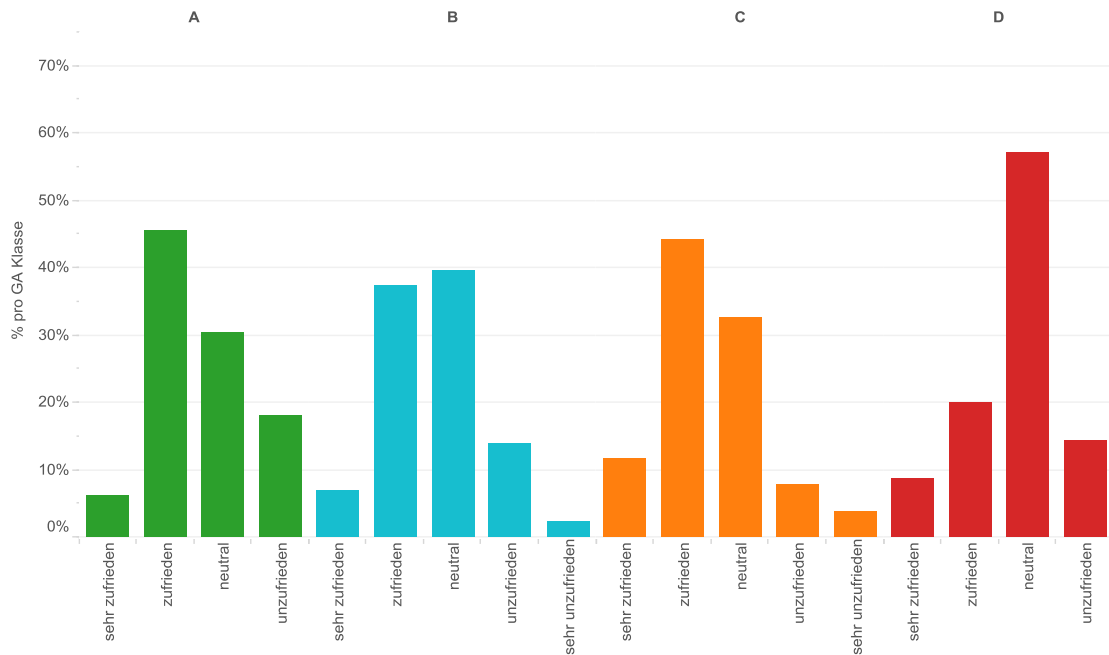
Die folgenden Grafiken der Auswertung der Nutzendenbefragung sind wie folgt aufgebaut. Über die gesamte Befragungsperiode wurden die eingegangenen Antworten nach GA-Klasse aufgeteilt. Pro GA Klasse wurde dann der relative Anteil jeder Antwortmöglichkeit bestimmt. Auf diese Weise ist es möglich die verschiedenen Klassen trotz einer unterschiedlichen Anzahl an Antworten zu vergleichen. Die Frage, welche den Nutzenden gestellt wurde, ist aus den Titeln der Grafiken ersichtlich. Der komplette Fragebogen befindet sich im Anhang (Abschnitt 12.7).



8.7.1. Storen

Die Zufriedenheit der Nutzenden mit der Verschattung wurde betreffend Wirksamkeit und Bedienbarkeit abgefragt. Die Wirksamkeit wurde mit *neutral* bis *zufrieden* beurteilt. Bezüglich der Bedienbarkeit zeigt sich ein ähnliches Bild mit Werten im leicht positiven Bereich. Die Ergebnisse nach GA-Klasse können in beiden Fällen nicht signifikant unterschieden werden.

Wie zufrieden waren Sie mit der Verschattung in den letzten zwei Wochen (bezüglich der Wirksamkeit)?



Wie zufrieden waren Sie mit der Verschattung in den letzten zwei Wochen (bez. der Bedienbarkeit)?

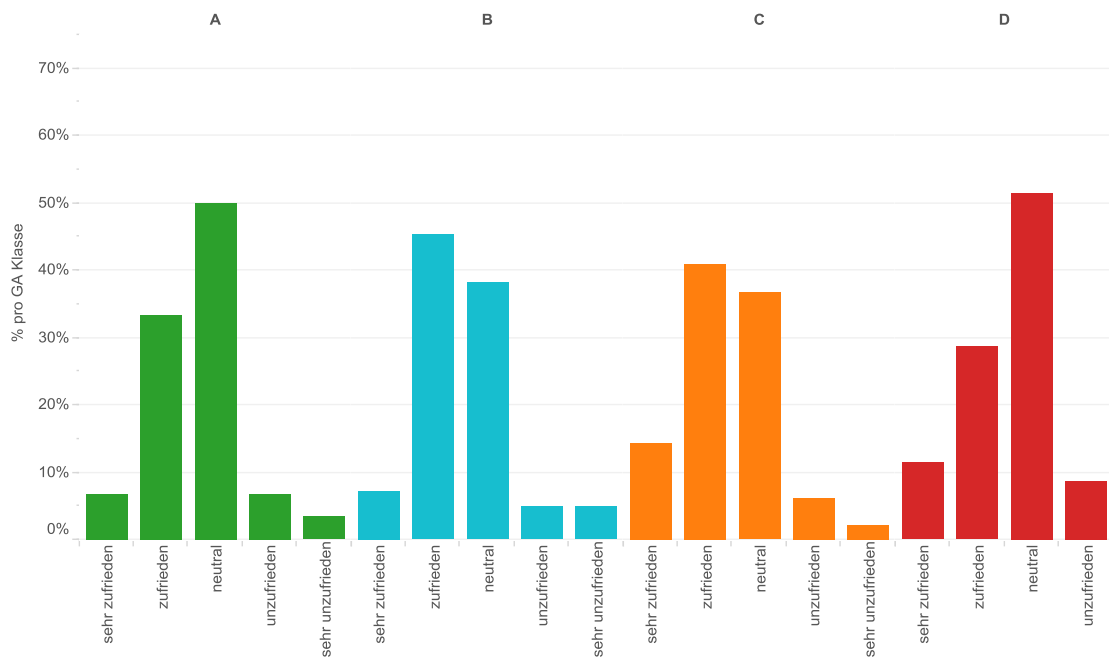
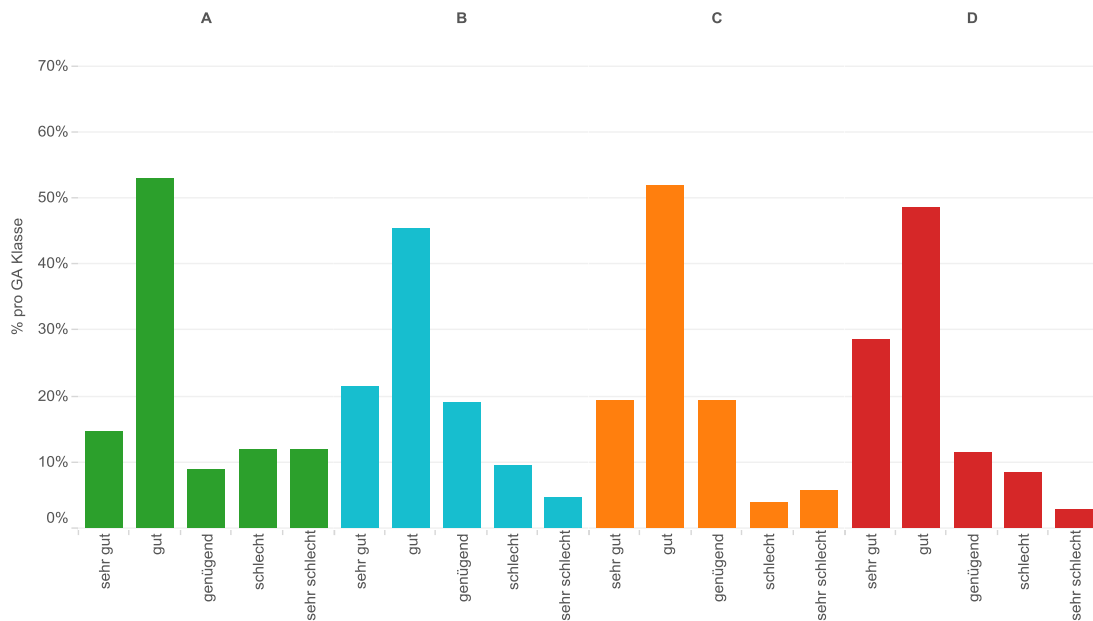


Abbildung 31: Antworten der Nutzenden zur Wirksamkeit und Bedienbarkeit der Verschattung

8.7.2. Beleuchtung

Für die Befragung betreffend Belichtung der Arbeitsplätze wurden verschiedene Situationen unterschieden: Mit und ohne geschlossener Verschattung, künstliche Beleuchtung. Die Antworten liegen jedoch für alle Fälle zwischen *genügend* und *gut*. Die Klassen lassen sich dabei nicht signifikant unterscheiden.

Wie beurteilen Sie rückblickend auf die vergangenen zwei Wochen die Belichtung Ihres Arbeitsplatzes (ohne Verschattung)?



Wie beurteilen Sie rückblickend auf die vergangenen zwei Wochen die Belichtung Ihres Arbeitsplatzes (mit Verschattung)?

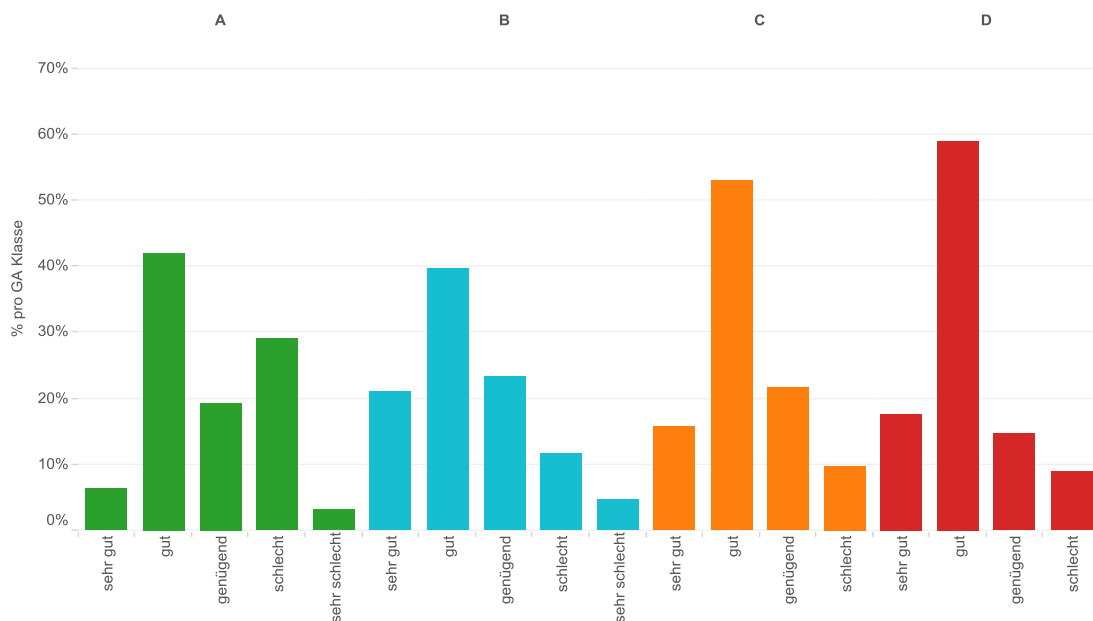


Abbildung 32: Antworten der Befragung zur Beleuchtung unter Einfluss der Verschattung

Das Kunstlicht wird als *gut* beurteilt. Eine Unterscheidung der Klassen ist auch hier nicht signifikant, wobei Klasse C tendenziell etwas besser beurteilt wird. In den Kommentaren vermerkten die Nutzenden aber, dass es eher zu dunkel sei. Auch wurde vermerkt, dass die Reflektionen der vor dem Gebäude parkierten Autos störend sein können. Dieser Effekt hat einen Einfluss auf die Antworten der Nutzenden, obwohl es in keiner Weise von der GA abhängt. Dies zeigt, dass die Resultate der Umfrage keine eindeutigen Schlüsse bezüglich den GA-Klassen ziehen lassen.

Wie beurteilen Sie ganz allgemein die Beleuchtung Ihres Arbeitsplatzes durch Kunstlicht?

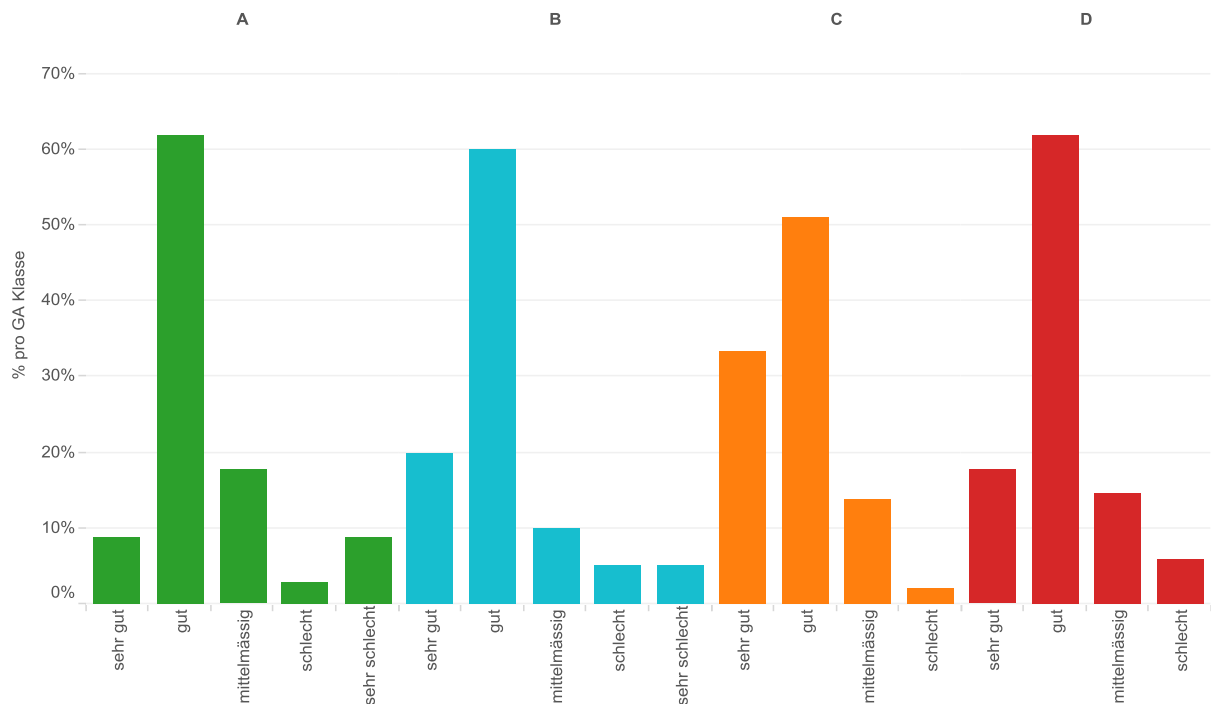
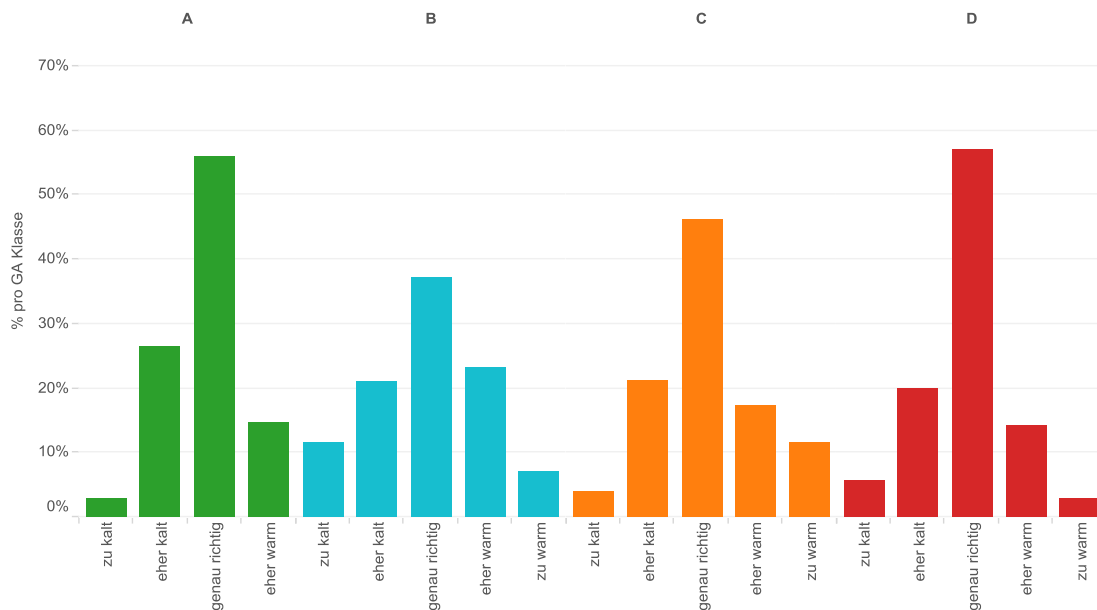


Abbildung 33: Antworten der Befragung zur Beleuchtung

8.7.3. Temperaturen

Das Temperaturempfinden wurde separat für Vor- und Nachmittag abgefragt. Am Vormittag wird die Temperatur als etwas kühler empfunden als am Nachmittag. Am Vormittag liegen die Temperaturen im Bereich von *genau richtig*, im Nachmittag etwas näher bei *eher warm*. Auch hier lassen sich die Klassen nicht signifikant voneinander unterscheiden.

Wenn Sie an die letzten zwei Wochen zurück denken, wie waren die Temperaturen an Ihrem Arbeitsplatz vormittags?



Wenn Sie an die letzten zwei Wochen zurück denken, wie waren die Temperaturen an Ihrem Arbeitsplatz nachmittags?

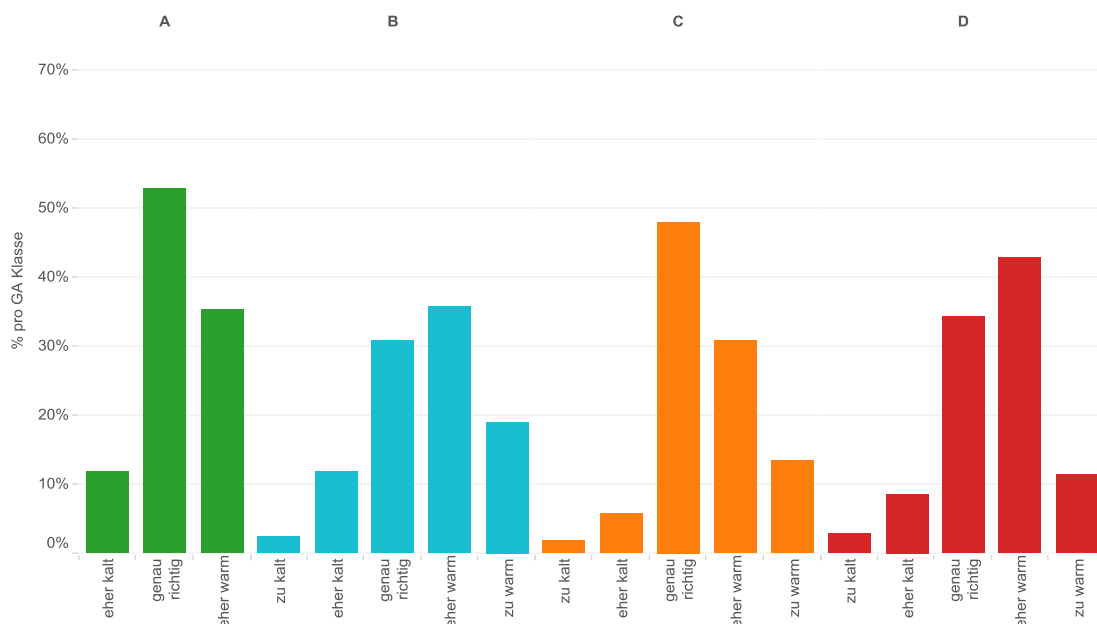


Abbildung 34: Antworten zur Befragung der Temperatur

8.7.4. Zugluft

Die Nutzenden meldeten *nie* bis *selten* Zugluft. Ein signifikanter Unterschied zwischen den Klassen kann nicht festgestellt werden. Die Nutzenden vermuteten gemäss den Kommentaren die Ursache für die Zugluft in der Lüftungsanlage und bei offenstehenden Fenstern.

Haben Sie in den vergangenen zwei Wochen Zuglufterscheinungen an Ihrem Arbeitsplatz verspürt?

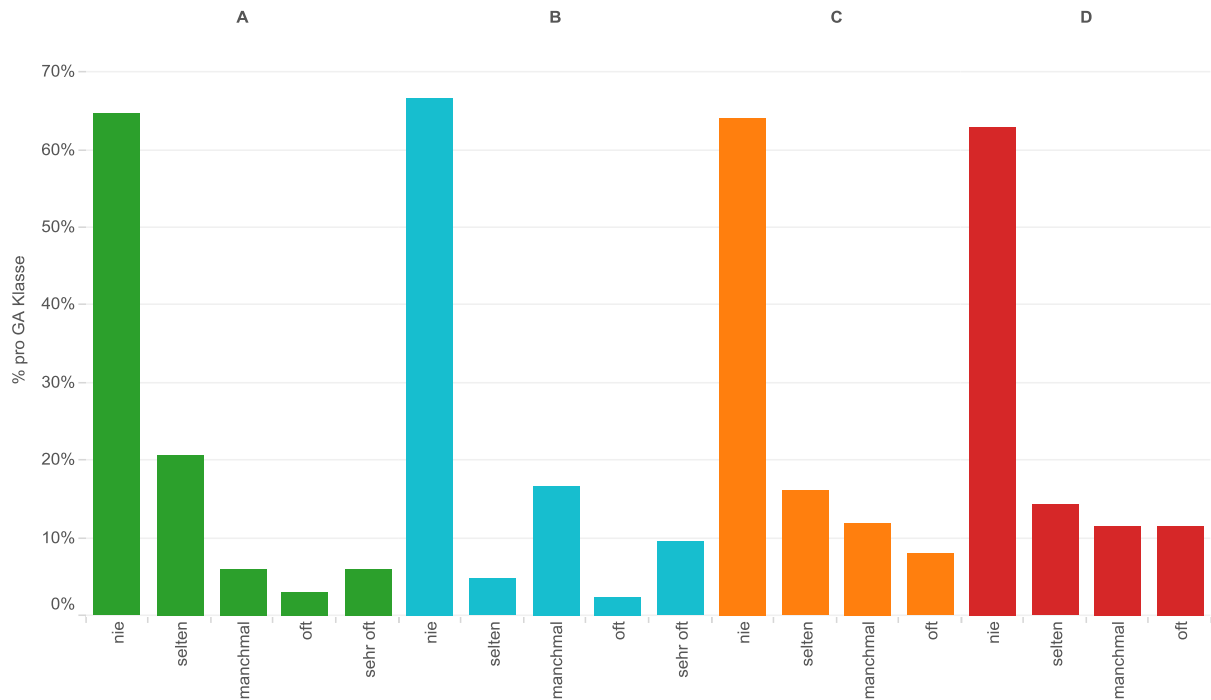


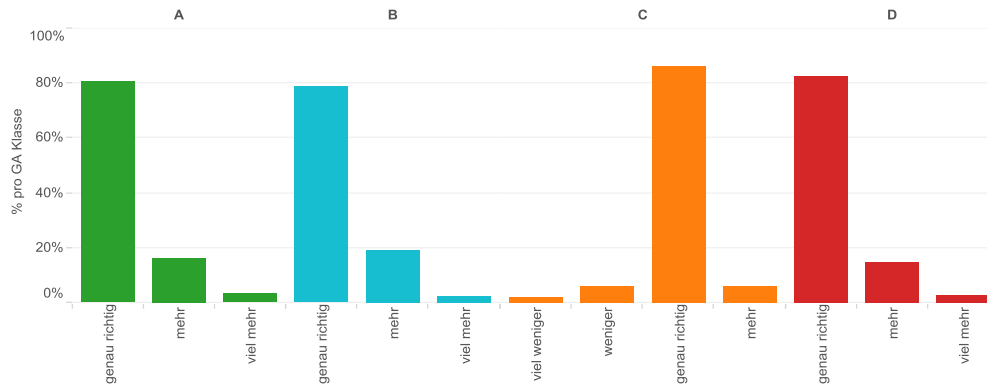
Abbildung 35: Antworten zur Befragung nach Zugluft

8.7.5. Einflussmöglichkeiten der Nutzenden

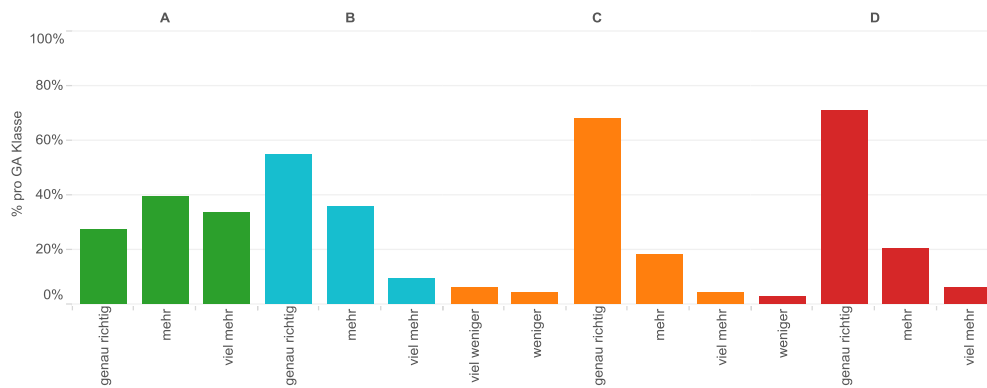
Die Frage an die Nutzenden lautete: *Wünschten Sie sich in den letzten zwei Wochen mehr oder weniger....* Der Rest der Frage ist jeweils im Titel der Grafik vermerkt.

Die Einflussmöglichkeiten auf Sonnen- und Blendschutz wurden über alle Klassen als *genau richtig* beurteilt. Klasse C zeigt Ausreisser gegen unten. Die Klassen lassen sich abgesehen davon nicht signifikant unterscheiden. Die Einflussmöglichkeiten auf das Kunstlicht wurden als *genau richtig* bis *mehr* beurteilt. In Klasse A wird mehr Einfluss gewünscht, in Klasse C sind die die Einflussmöglichkeiten genau richtig. Einzelne Nutzende wünschen jedoch *viel weniger* Einflussmöglichkeiten in Klasse C. Die Einflussmöglichkeiten auf die Raumtemperatur wurden zwischen *genau richtig* und *mehr* beurteilt. Ein signifikanter Unterschied zwischen den Klassen liegt nicht vor. Die Einflussmöglichkeiten auf die Lüftung werden mit *mehr* beurteilt, wobei die Klassen keinen signifikanten Unterschied zeigen. Interessant ist, dass sich die Nutzenden sogar in Klasse D sich mehr Einfluss auf alle Gewerke wünschen, obwohl sie ja eigentlich schon die volle Kontrolle haben. Ebenfalls interessant ist die Tatsache, dass einzig in Klasse C einzelne Nutzende bis zu *viel weniger* Einflussnahme auf das Kunstlicht und die Lüftung wünschen.

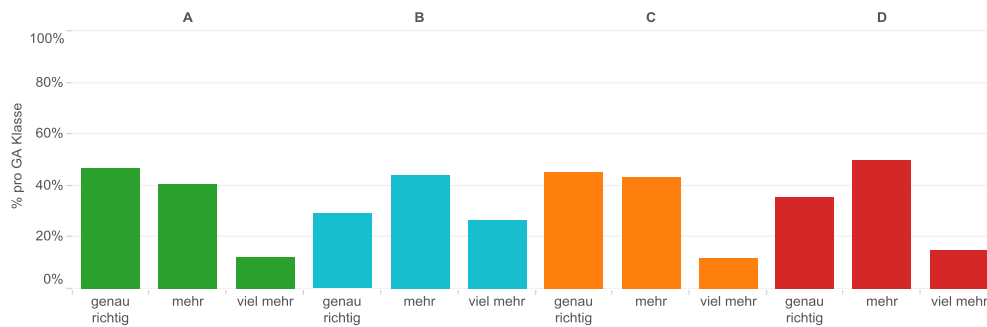
Einflussmöglichkeit auf die Betätigung des Sonnen-/Blendschutzes?



Einflussmöglichkeit auf das Ein-/Ausschalten des Kunstlichtes?



Einflussmöglichkeit auf die Einstellung der Raumtemperatur?



Einflussmöglichkeit auf die Lüftung des Büros?

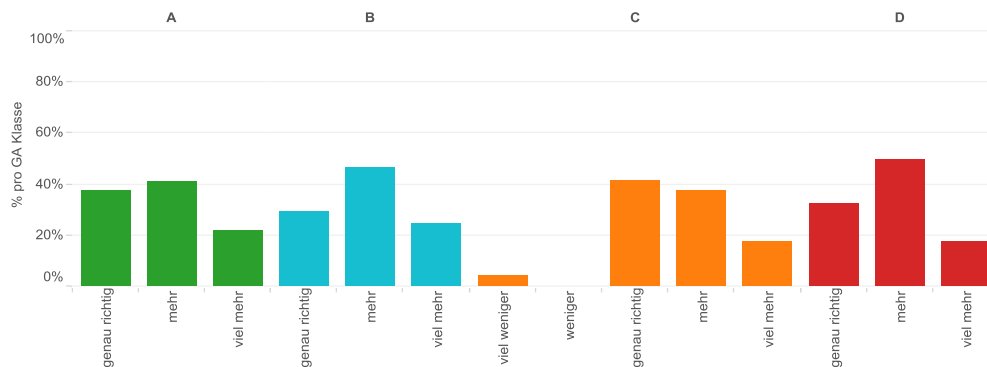


Abbildung 36: Antworten zur Befragung nach Einflussmöglichkeiten der Nutzenden

9. Diskussion

9.1. Inbetriebnahme

Diese Phase der Inbetriebnahme birgt vermutlich bei vielen Gebäuden ein sehr hohes Potential an Energieeinsparungen. Am Objekt dieses Projektes zeigte sich, dass man Mithilfe der Analyse von Messdaten die Funktionsweise detaillierter überprüfen kann. Ineffizientes Verhalten der Anlage kann so schon am Anfang des Lebenszyklus erkannt werden. Durch die kontinuierlichen Messungen ist eine laufende Betriebsoptimierung möglich, um die Anlage auf das ganze Spektrum der Randbedingungen abzustimmen. Der Betreiber des Gebäudes hat zudem die Möglichkeit auch schneller einen Defekt seiner Anlage festzustellen.

9.2. Messungen

Die Einflüsse auf die Messgrößen über ein ganzes Jahr sind sehr vielfältig (Aussenbedingungen, Nutzung, Einstellungen an den Anlagen etc.). Dies führte dazu, dass die Messwerte sehr stark streuen, die genauen Ursachen für diese Streuung aber nicht mit letzter Konsequenz ermittelt werden können. Die Messresultate sind somit mit entsprechenden Unsicherheiten belastet.

9.2.1. Elektrisch

Der dominierende Teil des elektrischen Energieverbrauches sind die Betriebseinrichtungen und die Server. Zusammen machen diese beiden Verbrauchergruppen etwas mehr als die Hälfte des Energieverbrauchs aus. Sie werden nicht durch die GA beeinflusst und zeigen somit auch keine Abhängigkeiten von den GA-Klassen. Der Eigenverbrauch der GA wird ebenfalls als von der jeweiligen Klasse unabhängig betrachtet, da für alle Klassen dieselbe Steuerungshardware verwendet wird. Die Verbraucher, welche man aufgrund der implementierten Steuerungsfunktionen als abhängig von den GA annehmen kann, sind somit Licht, Lüftung, Pumpen und Storenantriebe.

Möchte man den Energieverbrauch insgesamt reduzieren, dürfte es sich lohnen die Server zu optimieren. Diese verbrauchen gesamthaft gesehen etwa einen Drittel des Stromes. Der Verbrauch ist zudem an Wochenenden gleich hoch wie an Wochentagen, obwohl an Wochenenden kaum Nutzende anwesend sind.

Beleuchtung

Etwa zwei Drittel des Verbrauchs der GA abhängigen Verbrauchsgruppen entfällt auf die Beleuchtung. Der Verbrauch der Beleuchtung zeigt erwartungsgemäss grosse Unterschiede zwischen den Werktagen (55 kWh/d) und den Wochenenden (9 kWh/d). Die Wochenenden zeigen jedoch eine sehr grosse Streuung, da sehr wahrscheinlich an gewissen Samstagen Nutzenden anwesend waren. Auch die Streuung der Werte an Werktagen ist eher gross. Dadurch lassen sich in beiden Fällen die Mittelwerte pro Klasse nicht signifikant unterscheiden. An den Werktagen ist eine Abstufung der Werte von A nach D, wie man es anhand der GA-Klassen erwarten würde, ersichtlich. Jedoch sind die Unterschiede zu klein um signifikante Aussagen dazu zu machen.

Setzt man die täglichen Mittelwerte des Verbrauchs in Relation zur mittleren täglichen Globalstrahlung, zeigt Klasse A ab ca. 100 W/m^2 einen signifikant tieferen Verbrauch als die anderen Klassen (ca.

10%). Die Abhängigkeit von der Globalstrahlung ist jedoch sehr gering. Es kann also davon ausgegangen werden, dass aufgrund der Bauweise oder der Verschattung wenig natürliches Licht in das Gebäude gelangt und so die Beleuchtung während der Arbeitszeiten sehr häufig eingeschaltet sein dürfte. An den Wochenenden verhält es sich ähnlich. Der Verbrauch ist unabhängig von der Globalstrahlung und liegt bei ca. 15% des Verbrauchs an Werktagen. Das bedeutet wiederum, dass auch an Wochenenden, wenn fast keine Nutzenden anwesend sind, ein Tagesverbrauch von ca. 7kWh/d vorhanden ist. Die Hochrechnung anhand der Globalstrahlung auf den Jahresbedarf ergab aufgrund der grossen Unsicherheit keine signifikanten Unterschiede zwischen den Klassen.

Lüftung

Die Lüftung hat einen Anteil von ca. 20% am Verbrauch der GA-abhängigen Verbraucher. Die Streuungen sind jedoch sehr gross mit einer Standardabweichung von 45% des Mittelwertes. Eine signifikante Unterscheidung zwischen den Klassen ist so nicht möglich. Dennoch zeigt Klasse D einen fast um 40% höheren Mittelwert des Verbrauchs als die anderen Klassen. Die Ursache dafür ist, dass in Klasse D die Steuerung einen konstanten Volumenstrom implementiert hat.

Pumpen

Die Pumpen haben einen Anteil von knapp 10% am Verbrauch der GA-abhängigen Verbraucher. Nur Klasse A zeigt hier gegenüber den anderen Klassen ein etwas tieferen Verbrauch. Der Grund dafür dürften die geringeren Laufzeiten der Pumpen aufgrund des tieferen Heizwärmeverbrauchs in Klasse A sein. Da die eingebauten Pumpen in allen Klassen automatisch auf einen konstanten Druck regeln, können die Pumpen nicht für alle Klassen so betrieben werden wie in der SIA 384.110 eigentlich vorgesehen ist.

Storen

Die Storen haben einen Anteil von ca. 3% am Verbrauch der GA-abhängigen Verbraucher, was somit fast vernachlässigbar ist. Obwohl die Unsicherheiten vergleichsweise tief sind, lassen sich die Klassen nicht signifikant voneinander unterscheiden. Betrachtet man einzelne Tagesprofile, zeigt Klasse A gegenüber den andern Klassen in den Mittagsstunden einen etwas höheren Verbrauch. Man kann davon ausgehen, dass also die Steuerung in Klasse A aufgrund der grösseren solaren Einstrahlung auch automatisch die Storen runterfährt. Es zeigte sich jedoch, dass der Standby-Verbrauch der Aktoren der dominierende Anteil am Verbrauch sein dürfte.

9.2.2. elektrische Effizienz der GA-Klassen

Die SIA 386.110 gibt mittels des GA-Effizienzfaktors $f_{BACS,el}$ für Büros die Einsparpotentiale bezogen auf die Klasse C an. Anhand der Mittelwerte des gemessenen täglichen Verbrauchs (Abschnitt 8.2.3) wurden für die GA-Abhängigen elektrischen Verbraucher ebenfalls diese Faktoren berechnet. Zusätzlich wurde Mithilfe des 95% Konfidenzintervalls der Mittelwerte jeweils der beste und schlechteste Faktor pro Klasse berechnet. Daraus ergibt sich eine Bandbreite, welche die Unsicherheit angibt. Tabelle 13 zeigt die Faktoren im Vergleich. Die Werte aus der Norm liegen alle innerhalb des Unsicherheitsbandes, die Mittelwerte auf Basis der Messung sind zeigen jedoch weniger Einsparpotential als die Norm.

Klasse	$f_{BACS,el}$ nach [1]	Schlechtester Fall	Mittelwert	Bester Fall
D	1.10	0.92	1.10	1.28
C	1	-	1	-
B	0.93	1.19	1.02	0.87
A	0.87	1.09	0.93	0.79

Tabelle 13: Vergleich der Effizienzfaktoren der elektrischen Verbraucher

Abgesehen von den GA-abhängigen Verbrauchern haben die Server ein sehr grosses Einsparpotential der elektrischen Energie. Reduziert man den Verbrauch der Server um 10% erhält man dieselbe elektrische Einsparung, wie im Mittel von der Klasse C zu A. Ebenfalls gleich gross wäre eine Reduktion des Verbrauchs der Betriebseinrichtungen um 20%, wobei diese aufgrund der grossen Anzahl an Geräten schwieriger umzusetzen sein dürfte.

9.2.3. Thermisch

Der thermische Energieverbrauch hängt zu einem grossen Teil von der Aussentemperatur ab und wurde deshalb in Relation zu dieser betrachtet.

Heizenergie

Der Heizenergiebedarf zeigt erwartungsgemäss einen klaren Trend zu tiefen Werten bei höherer Aussentemperatur. Die Klasse A zeigt dabei über den gesamten Bereich tiefere Werte als die anderen Klassen. Der Grund liegt in der umgesetzten Zonenregelung anhand der Raumlufttemperatur, welche den Verbrauch besser auf den tatsächlich benötigten Bedarf abstimmt. Obwohl Klasse D nur eine konstante Vorlauftemperatur der Heizung implementiert hat, zeigt sie keinen signifikant höheren Verbrauch gegenüber Klasse B und C. Da Klasse B verhältnismässig viele Tage mit tiefer Aussentemperatur aufweist, dürfte der Verbrauch dieser Klasse insgesamt auch etwas höher liegen.

Die Hochrechnung anhand der Aussentemperatur auf den Jahresbedarf, bestätigt dieses Bild. Jedoch kann man höchstens bei Klasse A von einem signifikant tieferen Verbrauch in der Grössenordnung von 20% sprechen.

Kühlenergie

Die Kühlenergie zeigt den erwarteten Trend zu höheren Werten bei höherer Aussentemperatur. Klasse A liegt dabei etwas tiefer als die anderen, Klasse D etwas höher. Auch hier dürfte die Zonenregelung in Klasse A für dieses Verhalten verantwortlich sein. Die Steuerung in Klasse D verwendet als einzige keine Nachtauskühlung, was der Grund für den höheren Verbrauch an Kühlenergie in dieser Klasse sein dürfte. Die Hochrechnung auf den Jahresbedarf anhand der Aussentemperatur bestätigt dieses Bild. Ein signifikanter Unterschied der Klassen kann jedoch nicht festgestellt werden.

9.2.1. thermische Effizienz der GA-Klassen

Die SIA 386.110 gibt mittels des GA-Effizienzfaktors f_{BACS} für Heizen und Kühlen von Büros die Einsparpotentiale bezogen auf die Klasse C an. Anhand der Hochrechnung auf Jahresbasis (Abschnitt 8.5) wurden für den Heiz- und Kühlenergieverbrauch ebenfalls diese Faktoren berechnet. Zusätzlich wurde anhand des Unsicherheitsbandes aus der Hochrechnung der beste und schlechteste Faktor pro Klasse berechnet.

Heizung

In Tabelle 14 sind die Faktoren zur Heizenergie dargestellt. Die Faktoren gemäss der Norm liegen alle zwischen dem besten und schlechtesten Fall anhand der Hochrechnung. Die Mittelwerte zeigen jedoch geringere Einsparpotentiale als die Norm.

Klasse	$f_{BACS,H}$ nach [1]	Schlechtester Fall	Mittelwert	Bester Fall
D	1.44	0.84	1.18	1.74
C	1	-	1	-
B	0.79	1.82	1.14	0.72
A	0.7	1.31	0.79	0.47

Tabelle 14: Vergleich der Effizienzfaktoren der Heizenergie

Kühlung

In Tabelle 15 sind die Faktoren zur Kühlenergie dargestellt. Die Faktoren gemäss der Norm liegen alle zwischen dem besten und schlechtesten Fall anhand der Hochrechnung. Die Mittelwerte zeigen jedoch geringere Einsparpotentiale als die Norm. Die Spannweite zwischen dem besten und schlechtesten Fall ist jedoch sehr hoch, was die grosse Unsicherheit der Hochrechnung widerspiegelt.

Klasse	$f_{BACS,C}$ nach [1]	Schlechtester Fall	Mittelwert	Bester Fall
D	1.57	0.53	1.39	4.72
C	1	-	1	-
B	0.8	3.80	1.05	0.34
A	0.57	2.43	0.72	0.28

Tabelle 15: Vergleich der Effizienzfaktoren der Kühlenergie

9.3. Befragung

Die Befragung lässt keinen signifikanten Unterschied bei der Zufriedenheit zwischen den verschiedenen GA-Klassen zu. Trotzdem lassen sich gewisse Tendenzen erkennen. Die Antworten liegen bei fast allen Fragen in der Mitte des Spektrums mit einer ganz leichten Tendenz ins Positive. Die Temperaturen werden mehrheitlich als passend beurteilt, Zugluft trat fast nie auf.

Die Nutzer wünschen sich jedoch grundsätzlich in allen Klassen mehr Einfluss auf die verschiedenen Gewerke. Sogar in Klasse D, wo die Nutzer schon die volle Selbstbestimmung haben, wird dieser Wunsch geäussert. Einzig in Klasse C gab es Stimmen die sich beim Kunstlicht und bei der Lüftung weniger Einfluss wünschten.

10. Schlussfolgerungen

10.1. Effizienz der GA-Klassen

Es konnte gezeigt werden, dass der elektrische und thermische Energieverbrauch der die GA-Klasse A jeweils niedriger ist als derjenige der Klasse D. Aufgrund der Unsicherheit der Messwerte sind diese Unterschiede jedoch nicht in jedem Falle gleich deutlich. Dasselbe gilt für den Unterschied von Klasse C zu A. Die Unterschiede zwischen den Klassen B und C sind noch weniger ausgeprägt, teilweise zeigt B sogar einen höheren Verbrauch als C. Die Aussagen sind nur auf die beschriebene Anlage gültig, welche nicht für jede Klasse die Funktionen der SIA 386.110 umgesetzt hat. Insbesondere für den thermische Energieverbrauch der Klassen B und C gibt es grössere Diskrepanzen.

Es lässt sich aus den Unsicherheiten der Messwerte schliessen, dass die GA-Klassen nicht der alleinige Faktor für den Verbrauch sind. Weitere Faktoren sind Änderungen an den Anlagen, Witterungseinflüsse, Schwankungen der internen Lasten und Verhalten der Nutzenden. Besonders in Klasse D, in welcher die Nutzenden eine höhere Selbstbestimmung haben, ist deren Verhalten ausschlaggebend für den Verbrauch gewisser Energiebezüge.

10.2. Nutzendenzufriedenheit

Zwischen der Zufriedenheit der Nutzenden und den GA-Klassen liess sich kein Zusammenhang erkennen. Die Antworten der Nutzenden fielen generell neutral aus. Einzig bei dem Mass an Selbstbestimmung über die Gewerke wünschten sich die Nutzer mehr Einfluss. Dies ebenfalls unabhängig der GA-Klasse, also auch in Klasse D.

Die SIA 386.110 gibt bezüglich der Zufriedenheit oder des Komforts auch keine Auskunft über Unterschiede zwischen den GA-Klassen, sondern fokussiert sich auf die Energieeffizienz. Es wird jedoch erwähnt, dass geeignete Anlagen behagliche Bedingungen sicherstellen sollen.

10.3. Allgemeine Energieeinsparmassnahmen

Abgesehen von den klassenspezifischen Erkenntnissen zeigte sich an diesem Objekt, dass gewisse Funktionen oder Massnahmen zu einem tieferen Verbrauch führen. Diese Ergebnisse sind nicht neu, sondern bestätigen nur allgemein bekannte Tatsachen.

- Der Energiebezug der Server sollte möglichst tief gehalten werden, da diese die ganze Zeit im Betrieb sind.
- Die Beleuchtung ist in Zeiten wo keine Nutzenden anwesend, wie den Wochenende, konsequent auszuschalten.
- Der Luftvolumenstrom sollte nicht konstant gehalten, sondern auf Bedarf abgestimmt werden.
- Der Verbrauch der Storen ist am Gesamtverbrauch verhältnismässig klein, jedoch sollten Aktoren mit einem tiefen Ruhestrombedarf eingesetzt werden.
- Eine Einzelregelung der Zonenventile für Heizung- und Kühlung anhand der Raumlufttemperatur führt zu einem tieferen thermischen Verbrauch.
- Eine Nachtauskühlung über die Lüftung führt zu einem etwas tieferen Kühlenergieverbrauch.

11. Ausblick, nächste Schritte nach Projektabschluss

Durch die Einmaligkeit der erstellten Anlage, könnte diese Grundlage für weiteres Untersuchen sein. Diese müssten natürlich in jedem Fall in Zusammenarbeit mit dem Betreiber erfolgen. Punkte welche man untersuchen könnte, welche aber durch diese Studie nicht abgedeckt wurden oder sich aus der Schlussfolgerungen ergeben sind nachfolgend aufgelistet:

- Der Vergleich mit Benchmarks der elektrischen Leistung und Energie zum Beispiel nach SIA 2024 bzw. der SIA 380/4.
- Ein Quantifizieren von Einsparmassnahmen durch Mitarbeiterinstruktion unter Einfluss der GA Klassen. Insbesondere für Klasse D wäre dies sehr interessant.
- Erprobung von neuen Gerätetechnologien zur Erfüllung von bestimmten Schlüsselfunktionen einer GA Klasse.
- Quantifizieren des Energieverbrauchs des Betriebs ausserhalb der Nutzungszeit (BAN).

Neben Forschungsaspekten könnte das Objekt auch in der Ausbildung von Gebäudetechnik Ingenieuren im Rahmen von Diplom- und Semesterarbeiten interessant sein.



12. Anhang

12.1. Literaturverzeichnis

- [1] SIA, 386.110 - *Energieeffizienz von Gebäuden - Einfluss von Gebäudeautomation und Gebäudemanagement*, Zürich: Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, 2012.
- [2] S. Strebel und C. Gubler, «Bürogebäude mit umschaltbarer Gebäudeautomations-Energieeffizienzklasse,» Hochschule Luzern – Technik & Architektur, Horw, 2015.
- [3] E. Gossauer, *Nutzerzufriedenheit in Bürogebäuden - Eine Feldstudie*, Karlsruhe: Fakultät für Architektur der Universität Karlsruhe, 2008.

12.2. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Projektgliederung	8
Abbildung 2: Gebäudeautomations-Energieeffizienzklassen im Neubau HKG	13
Abbildung 3: Terminplan der Umschaltung der Klassen	14
Abbildung 4: Luftbild des Gebäudes [Quelle: SWISSIMAGE über www.map.geo.admin.ch]	16
Abbildung 5: Grundriss des Erdgeschosses	17
Abbildung 6: Grundriss mit den Zonen der Fussbodenheizung	17
Abbildung 7: Grundriss mit den Zonen der Lüftung	18
Abbildung 8: Schema des Lüftungsmonoblocks	18
Abbildung 9: Büro Querschnitt mit dem Beleuchtungs- und Lüftungs- Prinzip	19
Abbildung 10: Taster zur Umschaltung des GA Programmes	20
Abbildung 11: Übersicht des GA Systemaufbaus	21
Abbildung 12: elektrischer Gesamtenergieverbrauch	27
Abbildung 13: elektrischer Eigenverbrauch der GA	28
Abbildung 14: elektr. Energieverbrauch der von der GA-Klasse-abhängigen Verbraucherguppen	29
Abbildung 15: elektr. Energieverbrauch der von der GA-Klasse-abhängigen nach Jahreszeiten	30
Abbildung 16: elektrischer Energieverbrauch der Beleuchtung	31
Abbildung 17: Energieverbrauch der Beleuchtung an Werktagen in Relation zu Globalstrahlung	32
Abbildung 18: Energieverbrauch der Beleuchtung an Wochenenden in Relation zu Globalstrahlung .	33
Abbildung 19: elektrischer Energieverbrauch der Lüftung	34
Abbildung 20: elektrischer Energieverbrauch der Pumpen	35
Abbildung 21: elektrischer Energieverbrauch der Storen	36

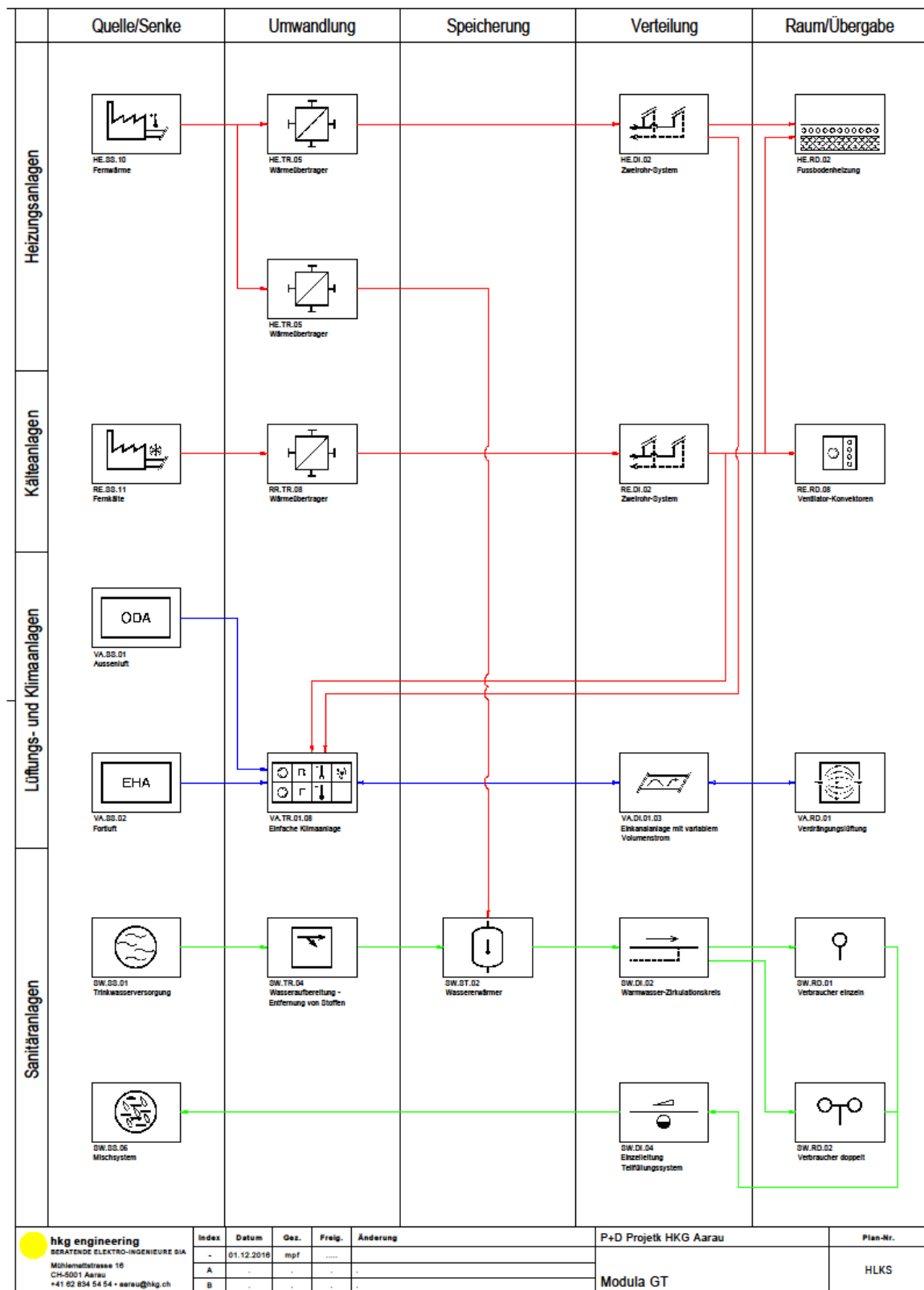
Abbildung 22: stündlicher elektrischer Energieverbrauch der Storen	37
Abbildung 23: hochgerechneter Jahresenergieverbrauch der Beleuchtung	39
Abbildung 24: Heizenergie in Relation zur Aussentemperatur	40
Abbildung 25: Verhältnis Vorlauftemperatur Fussbodenheizung zur Aussentemperatur	41
Abbildung 26: Kühlenergie in Relation zur Aussentemperatur	42
Abbildung 27: Temperaturen im Lüftungsmonoblock.....	43
Abbildung 28: hochgerechneter thermischer Jahresenergieverbrauch	45
Abbildung 29: Raumlufttemperaturen in Abhängigkeit der Aussentemperaturen	46
Abbildung 30: Rücklauf der Nutzendenbefragung	47
Abbildung 31: Antworten der Nutzenden zur Wirksamkeit und Bedienbarkeit der Verschattung	48
Abbildung 32: Antworten der Befragung zur Beleuchtung unter Einfluss der Verschattung	49
Abbildung 33: Antworten der Befragung zur Beleuchtung	50
Abbildung 34: Antworten zur Befragung der Temperatur	51
Abbildung 35: Antworten zur Befragung nach Zugluft.....	52
Abbildung 36: Antworten zur Befragung nach Einflussmöglichkeiten der Nutzenden	53

12.3. Tabellenverzeichnis

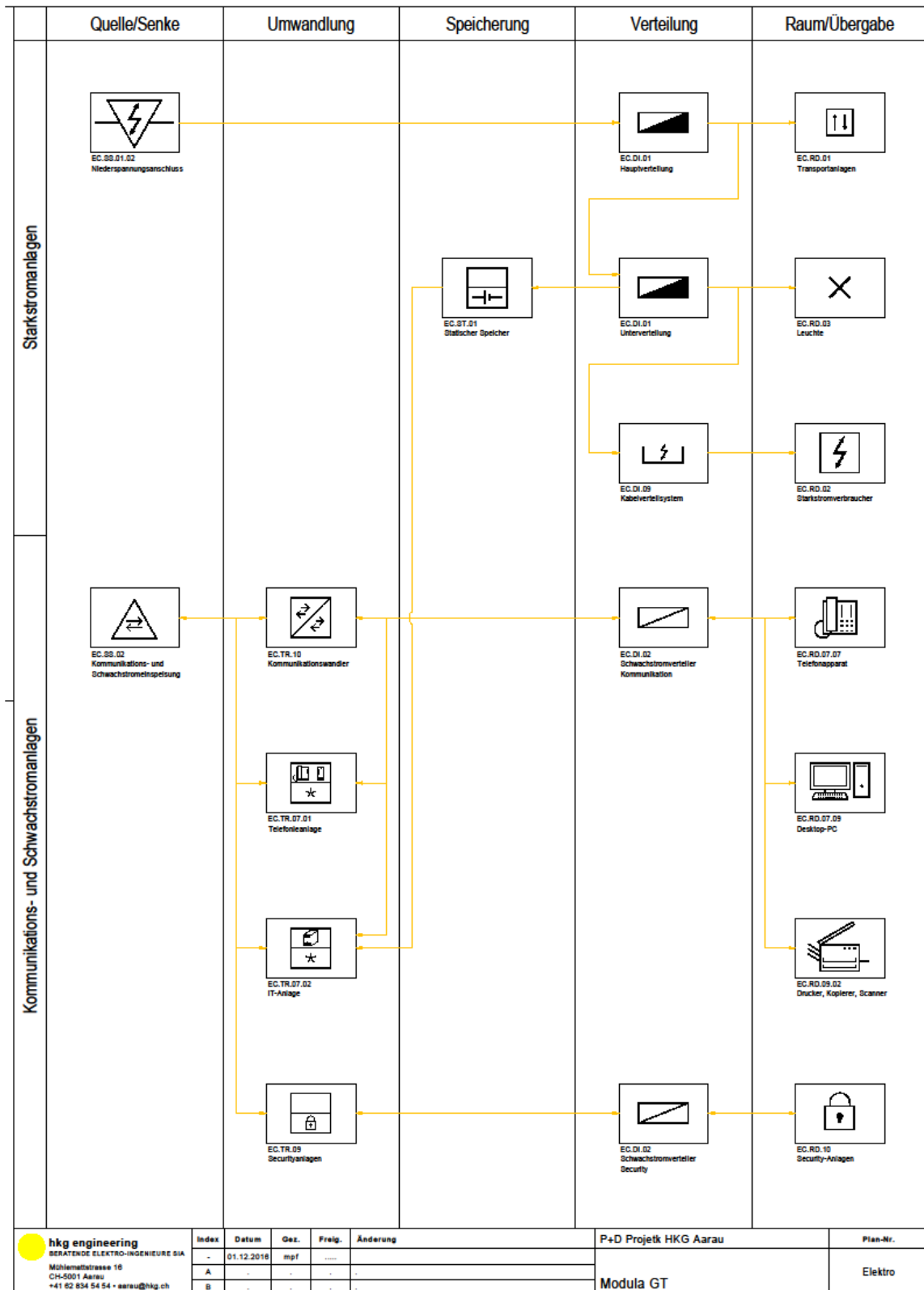
Tabelle 1: Umgesetzte Funktionalität pro Energieeffizienzklasse.....	12
Tabelle 2: Arbeitsablauf und Termine	15
Tabelle 3: Flächenanteile des Erdgeschosses.....	16
Tabelle 4: Funktionen der Sonnenschutzsteuerung.....	19
Tabelle 5: Datenpunktliste Energiezähler	23
Tabelle 6: Ausgeschlossene Kalendertage	24
Tabelle 7: Durchschnittlicher spezifischer elektrischer Gesamtenergieverbrauch	27
Tabelle 8: Durchschnittlicher spezifischer elektrischer GA-Klasse-abhängigen Verbrauch	29
Tabelle 9: Modell-Kenngrößen für das Trendmodell der Beleuchtung an Wochentagen.....	38
Tabelle 10: Modell-Kenngrößen für das Trendmodell der Beleuchtung an Wochenenden.....	38
Tabelle 11: Modell-Kenngrößen für das Trendmodell der Wärmeenergie	43
Tabelle 12: Modell-Kenngrößen für das Trendmodell der Kälteenergie	44
Tabelle 13: Vergleich der Effizienzfaktoren der elektrischen Verbraucher	56
Tabelle 14: Vergleich der Effizienzfaktoren der Heizenergie	57
Tabelle 15: Vergleich der Effizienzfaktoren der Kühlenergie	57



12.4. Modulare Darstellung der HLKS



12.5. Modulare Darstellung der Elektrotechnik



12.6. Messkonzept

[illegible]

65/70



12.7. Fragebogen Nutzerbefragung

EvaSys	Fragebogen 2	
Claudia Bless		

Markieren Sie so: ☐ ☒ ☐ ☐ Bitte verwenden Sie einen Kugelschreiber oder nicht zu starken Filzstift. Dieser Fragebogen wird maschinell erfasst.
Korrektur: ☐ ☒ ☐ ☐ Bitte beachten Sie im Interesse einer optimalen Datenerfassung die links gegebenen Hinweise beim Ausfüllen.

Einfluss der Energieeffizienz auf die Behaglichkeit in Bürogebäuden

Um die Ergebnisse der Umfragen, die alle zwei Wochen durchgeführt werden, vergleichen zu können, ist es wichtig, dass die Fragebogen einander zugeordnet werden können. Dazu werden Sie gebeten den folgenden, vierstelligen Code jeweils auf Ihren Umfragebögen zu vermerken.

Mein persönlicher Code:

1. _____ erster Buchstabe des Geburtsortes
2. _____ zweiter Buchstabe des Vornamens der Mutter
3. _____ zweiter Buchstabe des eigenen Vornamens
4. _____ erster Buchstabe des Vornamens des Vaters

Code:

.....

0. Hat sich Ihr Arbeitsplatz seit der letzten Befragung geändert?

☐ ja ☐ nein

Falls Sie die Frage mit 'ja' beantwortet haben, bitten wir Sie den Arbeitsplatzfragebogen erneut auszufüllen.

1. War der Sonnenschutz in den letzten zwei Wochen meistens vollständig oder teilweise heruntergefahren?

☐ gar nicht ☐ teilweise ☐ vollständig, gekippt
☐ vollständig, geschlossen

2. Wie zufrieden waren Sie mit der Verschattungsvorrichtung in den letzten zwei Wochen?

	sehr zufrieden	zufrieden	neutral	unzufrieden	sehr unzufrieden
Wirksamkeit:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Bedienbarkeit:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

3. Wie und wie oft haben Sie auf die Lichtverhältnisse in Ihrem Raum Einfluss genommen?

	nie	manchmal selten	oft	sehr oft
Sonnenschutz hoch/runter fahren	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Kunstlicht ein-/ausgeschaltet	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

4. Schalten Sie das Licht ein, wenn die Fenster verschattet sind?



EvaSys	Fragebogen 2	Electric Paper
--------	--------------	----------------

Einfluss der Energieeffizienz auf die Behaglichkeit in Bürogebäuden [Fortsetzung]

manchmal
selten
nie
☐ ☐ ☐

immer
oft
☐ ☐

5. Wie beurteilen Sie rückblickend auf die vergangenen zwei Wochen die Belichtung Ihres Arbeitsplatzes?

ohne Verschattung
mit Verschattung

sehr gut
☐ ☐

gut
☐ ☐

genügend
☐ ☐

schlecht
☐ ☐

sehr schlecht
☐ ☐

6. Wie lange hatten Sie in den letzten zwei Wochen während Ihrer Arbeit das Kunstlicht pro Tag eingeschaltet?

1-3 Stunden
nie
☐ ☐

4-7 Stunden
☐

>7 Stunden
☐

7. Wie beurteilen Sie ganz allgemein die Beleuchtung Ihres Arbeitsplatzes durch Kunstlicht?

sehr gut
☐

gut
☐

mittelmässig
☐

schlecht
☐

sehr schlecht
☐

Falls Sie 'mittelmässig' bis 'sehr schlecht' angekreuzt haben, bitte hier begründen (z.B. Helligkeit, Positionierung, Farbe, etc.):

8. Wie empfinden Sie im Moment die Temperatur an Ihrem Arbeitsplatz?

genau richtig
eher kalt
zu kalt
☐ ☐ ☐

eher warm
zu warm
☐ ☐

9. Wenn Sie an die letzten zwei Wochen zurück denken, wie waren die Temperaturen an Ihrem Arbeitsplatz?

genau richtig
eher kalt
zu kalt
☐ ☐ ☐

eher warm
zu warm
☐ ☐

**Einfluss der Energieeffizienz auf die Behaglichkeit in Bürogebäuden [Fortsetzung]**

vormittags	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
nachmittags	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

10. Wie stark empfanden Sie in den letzten zwei Wochen unangenehme Temperaturschwankungen im Tagesverlauf?

gar nicht	mittelmässig schwach	stark	sehr stark	
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

11. Wie und wie oft nehmen Sie Einfluss auf die Temperatur in Ihrem Raum?

	nie	selten	manchmal	oft	sehr oft
Lüften (Fenster)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Lüftungsanlage	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

12. Wie zufrieden waren Sie mit der Wirksamkeit der Temperaturänderung in den letzten zwei Wochen?

sehr zufrieden	zufrieden	neutral	unzufrieden	sehr unzufrieden
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

13. Wie zufrieden waren Sie die vergangen zwei Wochen insgesamt mit der Temperatur an Ihrem Arbeitsplatz?

sehr zufrieden	zufrieden	neutral	unzufrieden	sehr unzufrieden
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

14. Haben Sie in den vergangenen zwei Wochen Zuglufterscheinungen an Ihrem Arbeitsplatz verspürt?

nie	selten	manchmal	oft	sehr oft
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Bitte nennen Sie die (vermutete) Ursache der Zugluft:



EvaSys	Fragebogen 2	Electric Paper ELEKTROGRAPHEN
--------	--------------	----------------------------------

Einfluss der Energieeffizienz auf die Behaglichkeit in Bürogebäuden [Fortsetzung]

15. Wie stark empfanden Sie in den vergangenen zwei Wochen folgende Gerüche an Ihrem Arbeitsplatz?

	gar nicht	schwach	mittelmässig	stark	sehr stark
Gerüche von Teppich/Möbel	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Gemisch aus Gerüchen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Sonstiges:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

16. Wie standen in den vergangenen zwei Wochen in Ihrem Raum die Fenster in der Regel offen?

	nie	selten	manchmal	oft	immer
morgens	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
vormittags	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
mittags	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
nachmittags	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

17. Wann hatten Sie in den letzten zwei Wochen die Fenster hauptsächlich geöffnet?

- ☐ wenn es zu warm war ☐ wenn die Luft verbraucht war ☐ wenn es zu viele Gerüche hatte
☐ in der Nacht ☐ Sonstiges (bitte Grund unten angeben)
-

18. Wie hatten Sie in den letzten zwei Wochen die Fenster hauptsächlich geöffnet?

- ☐ gar nicht ☐ Kippstellung ☐ leicht geöffnet
☐ maximaler Öffnungswinkel

19. Gab es Konflikte/Diskussionen zwischen Ihren Kollegen bezüglich der Stellung der Fenster in Ihrem Büro?


	nie	selten	manchmal	oft	immer
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

20. Wie viele Stunden schätzen sie, waren in den vergangenen zwei Wochen die Fenster in Ihrem Büro durchschnittlich am Tag geöffnet?

- ☐ <1 Stunde ☐ 1-3 Stunden ☐ >3 Stunden

21. Bei welchen der folgenden Punkte wünschten Sie sich in den letzten zwei Wochen mehr oder weniger Einflussmöglichkeit?



EvaSys	Fragebogen 2	
--------	--------------	---

Einfluss der Energieeffizienz auf die Behaglichkeit in Bürogebäuden [Fortsetzung]

	<i>viel weniger</i>	<i>weniger</i>	<i>genau richtig</i>	<i>mehr</i>	<i>viel mehr</i>
Betätigung des Sonne-/Blendschutzes	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ein-/Ausschalten des Kunstlichtes	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Einstellung der Raumtemperatur	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Lüftung des Büros	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Sonstiges:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

22. Haben Sie an Ihrem Arbeitsplatz bzw. in Ihrem Büroraum in den letzten zwei Wochen Massnahmen zur Veränderung der Behaglichkeit vorgenommen? (z.B. Blendschutz, Ventilator, Tischleuchte)

☐ ja ☐ nein

Wenn 'ja', welche?

23. Welche Energieklasse hatte Ihrer Meinung nach das Gebäude während den letzten zwei Wochen?

☐ A ☐ B ☐ C ☐ D

Besten Dank für das Ausfüllen des Fragebogens.