

The logo for IWU (Institut für Wirtschaftsinformatik) is mounted on a yellow building facade. It features a stylized icon of a computer monitor with a circular arrow around it, followed by the letters 'IWU' in a bold, sans-serif font.

IWU

Three IWU flags are flying on silver poles in front of the building. Each flag is white with a yellow and green circular graphic and the text 'IWU' and 'www.iwu.de' printed on it.

**IWU-Haus - Monitoring & Betriebsoptimierung**



Behrooz Bagherian  
Margrit Schaede  
Rolf Born  
Stefan Swiderek

Der vorliegende Bericht beschreibt das Monitoring und die Betriebsoptimierung zum Gebäude IWU-Haus. Das Forschungsprojekt ist ein Eigenprojekt des Instituts Wohnen und Umwelt.

Darmstadt, August 2019

Institut Wohnen und Umwelt GmbH,  
Darmstadt  
Rheinstraße 65  
64295 Darmstadt  
Tel +496151 2904-0  
Fax +496151 2904-97  
Internet [www.iwu.de](http://www.iwu.de)

**ISBN 978-3-941140-62-2**

## Inhaltsverzeichnis

1	Kurzfassung .....	13
2	Ausgangslage - IWU-Haus vor der Sanierung .....	16
3	Energiekonzept .....	18
3.1	Baulicher Wärmeschutz.....	18
3.2	Heizung .....	20
3.3	Warmwasser .....	20
3.4	Lüftung.....	20
3.5	Wärmeschutz im Sommer .....	25
3.6	Passive und aktive Kühlung durch Nachtlüftung.....	26
3.7	Beleuchtung.....	28
3.7.1	Tageslicht.....	28
3.7.2	Kunstlicht.....	29
3.8	Serverkühlung.....	29
4	Energie Monitoring .....	33
4.1	Messkonzept.....	33
5	Ergebnisse des Monitorings.....	37
5.1	Energiebilanzen .....	37
5.1.1	Energiebezugsfläche.....	37
5.1.2	gemessener Verbrauch Wärme .....	38
5.1.3	Gemessener Verbrauch elektrischer Energie.....	42
5.1.4	Energiebedarf nach EnEV vs. Energieverbrauch .....	57
5.1.5	Energiebedarf nach PHPP vs. Energieverbrauch.....	62
5.2	Kurzzeitmessung der Serverinfrastruktur.....	65
5.3	Passive Serverkühlung .....	67
5.4	Sommerliche Nachtlüftung.....	71
6	Sommerlicher Wärmeschutz und thermischer Komfort .....	74
6.1	Normative Bestimmung des thermischen Komforts.....	74
6.2	Repräsentativ thermisch kritischer Raum .....	77

7	Nutzerzufriedenheit und Nutzerakzeptanz .....	83
7.1	Raumluftqualität und ihre Einflussfaktoren .....	88
7.2	Temperatur der Raumluft.....	89
7.3	Feuchtegehalt der Raumluft.....	95
7.4	Lichtverhältnisse .....	106
8	Ausblick - Nullenergiehaus und Plusenergiehaus .....	111
8.1	Photovoltaikanlage zur Deckung des Eigenbedarfs an elektr. Energie .....	112
8.2	Abwärmenutzung zur Deckung der thermischen Energie.....	116
8.3	Elektromobilität .....	120
8.4	Kühlkälte mittels Wärmepumpe .....	121
8.5	Wirtschaftlichkeit .....	121
8.6	Akteure, Chancen und Hemmnisse .....	130
9	Literaturverzeichnis .....	133
10	Anhang .....	135
10.1	Fragebogen zur Nutzerzufriedenheit (inklusive grafischer Auswertungen).....	135
10.2	Wichtigste Funktionen der Gebäudeautomation auf einen Blick .....	199
10.3	Funktionsbilder der Anlagentechnik (Planungsphase) .....	201

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: IWU-Haus bildet mit dem rechten und linken Gebäude als einen zusammenhängenden Gebäudekomplex (Foto am Beginn der Sanierung).....	16
Abbildung 2: Links, ein Blick in die Büroräume vor der Sanierung; rechts die beiden Niedertemperatur-Gaskessel mit einer Nennleistung von zusammen einem Megawatt.....	17
Abbildung 3: Befestigung der 30 cm dicken Wärmedämmung aus Neopor an der Fassade .....	18
Abbildung 4: Schnittzeichnung des Gebäudes .....	19
Abbildung 5: Sonnenschutz an der Südfassade .....	25
Abbildung 6: Blendschutz am Fenster.....	25
Abbildung 7: Verschließbare Stange vor dem Fenster im 1. OG als Einbruchschutz bei gekippten Fenstern .....	26
Abbildung 8: Antrieb für die Fensteröffnung .....	27
Abbildung 9: Innenthermographie eines Bürofensters.....	27
Abbildung 10: Mögliche Stellungen der Jalousie .....	29
Abbildung 11: Luftführung Serverkühlung.....	30
Abbildung 12: Erforderlicher rechnerischer Volumenstrom im Abluftbetrieb direkt und indirekt in Abhängigkeit von Serverleistung und jahreszeitlichen Temperaturverhältnissen .....	32
Abbildung 13: Grafische Darstellung des Messkonzeptes .....	33
Abbildung 14: Lage der installierten Messsensoren zur Erfassung der Temperatur, Luftfeucht, VOC sowie der Energiemengen für Wärme und Strom .....	35
Abbildung 15: Monatlicher Wärmeverbrauch im Jahr 2013.....	39
Abbildung 16: Monatlicher Wärmeverbrauch im Jahr 2014.....	39
Abbildung 17: Heizgradtage für das Jahr 2012 bis 2014 (basierend auf eine Heizgrenztemperatur von 10 °C) ..	40
Abbildung 18: Vergleich des klimabereinigten Heizwärmeverbrauchs .....	41
Abbildung 19: Spez. Wärmeverbrauch vor und nach der Sanierung .....	42
Abbildung 20: Monatlicher Stromverbrauch im Jahr 2013.....	43
Abbildung 21: Monatlicher Stromverbrauch im Jahr 2014.....	43
Abbildung 22: Jahresverbrauch der elektrischen Energie Beleuchtung und Sonstiges für das Jahr 2013 und 2014 .....	45
Abbildung 23: Spez. Verbrauch elektrischer Energie vor und nach der Sanierung.....	46
Abbildung 24: Dauerlinie der gemittelten Leistung in Abhängigkeit der relativen Laufzeit im Jahr 2013 (Stundenmittelwerte) .....	47
Abbildung 25: Tagesstromverbrauch der Beleuchtung in Abhängigkeit von der Globalstrahlung (Tagesmittelwerte) .....	49
Abbildung 26: Lastgangprofil der Beleuchtung für eine Woche im Winter (47. KW in 2013) .....	50
Abbildung 27: Lastgangprofil der Beleuchtung für eine Woche im Sommer (31. KW in 2013) .....	50
Abbildung 28: Dauerlinie der gemittelten Leistung für sonstige Stromverbräuche in Abhängigkeit der Geschosse (Stundenwerte).....	51
Abbildung 29: Wochenlastgang der sonstigen elektrischen Verbräuche (Winterfall: 5. Kalenderwoche 2013) ..	52
Abbildung 30: Wochenlastgang der sonstigen elektrischen Verbräuche (Sommerfall: 35. Kalenderwoche 2013) .....	53
Abbildung 31: Dauerlinie der gemittelten Stundenwerte der Leistung der Lüftungsanlage. Differenziert nach Arbeitszeiten und Nicht-Arbeitszeiten 2013 .....	54
Abbildung 32: Dauerlinie der gemittelten Stundenwerte des Luftvolumenstroms der Lüftungsanlage. Differenziert nach Arbeitszeiten und Nicht-Arbeitszeiten 2013.....	55

Abbildung 33: Wochenprofil von gemittelten Stundenwerten des Luftvolumenstroms der Lüftungsanlage im Winter für die 4. Kalenderwoche .....	56
Abbildung 34: Wochenprofil von gemittelten Stundenwerten des Luftvolumenstroms der Lüftungsanlage im Sommer für die 26. Kalenderwoche .....	56
Abbildung 35: Verlauf der spez. Leistung und der Leistung der Lüftungsanlage bezogen zum Volumenstrom am 12.02.2013 .....	57
Abbildung 36: Energiekennwerte des IWU-Hauses nach Energieeinsparverordnung (EnEV) .....	58
Abbildung 37: Unterschreitung der EnEV-Anforderungen.....	59
Abbildung 38: Nutzwärmebedarf und Wärmeverluste zur Bestimmung des Endenergiebedarfs Wärme.....	60
Abbildung 39: Vergleich der Energiebedarfskennwerte mit den gemessenen Energieverbrauchskennwerten....	61
Abbildung 40: relative Häufigkeit der Leistungsaufnahme des elektr. Warmwasserspeichers im EG.....	62
Abbildung 41: Abhängigkeit des Wärmebedarfes von der angesetzten Innentemperatur in der Heizzeit (Berechnet mit dem PHPP) .....	63
Abbildung 42: Die berechnete Wärmbrücke am Kellerdeckenaufleger mit einem $\Psi$ -Wert von 0,3462 W/(mK)	64
Abbildung 43: In der Realität unterbrechen Lichtschachtwände in regelmäßigen Abständen die Perimeterdämmung .....	64
Abbildung 44: Leistungsaufnahme des Servers im Wochenprofil aus den Daten vom 09.01. bis 24.01.2015 (2 Wochen) ermittelt. ....	66
Abbildung 45: Täglicher Stromverbrauch in kWh/Tag des Servers über den Zeitraum von zwei Wochen .....	67
Abbildung 46: Temperaturen Serverraum und -schrank in einer Woche im Frühjahr .....	68
Abbildung 47: Temperaturen Serverraum und -schrank in einer Woche im Sommer .....	69
Abbildung 48: Temperaturen Serverlüftung Sommer 2018.....	70
Abbildung 49: Temperaturverlauf Server Oben zu Server Boden (Linke Y-Achse) und daraus resultieren Temperaturdifferenz (Rechte Y-Achse) .....	71
Abbildung 50: Effekt der Nachtlüftung anhand der Ablufttemperatur der Lüftungsanlage.....	72
Abbildung 51: Temperaturverlauf Büros 1. und 2. OG im Sommer (Nachtabkühlung) .....	73
Abbildung 52: Abhängigkeit der Raumtemperatur von der Außentemperatur. Messdaten vom 01.06. bis 31.08.2012 für ein Büro im 2. OG auf der Südseite (ungünstigste Lage) .....	78
Abbildung 53: Abhängigkeit der Raumtemperatur von der Außentemperatur. Messdaten vom 01.05. bis 30.09.2015 für ein Büro im 2. OG auf der Südseite.....	79
Abbildung 54: Dauerlinie der Stundenmittelwerte der Raumtemperatur eines Büros im 2. Obergeschoss auf der Südseite. Messdaten vom 01.06. bis 31.08. für das Jahr 2012 und 2015.....	80
Abbildung 55: Komfortbewertung nach dem adaptiven Komfortmodell gemäß DIN EN 15251 für das Jahr 2012. Die gemessene Raumlufttemperatur dargestellt als Funktion des exponentiell gewichteten gleitenden Mittelwertes der Außentemperatur.....	81
Abbildung 56: Komfortbewertung nach dem adaptiven Komfortmodell gemäß DIN EN 15251 für das Jahr 2015. Die gemessene Raumlufttemperatur dargestellt als Funktion des exponentiell gewichteten gleitenden Mittelwertes der Außentemperatur.....	82
Abbildung 57: 30-Minuten Werte der Außenlufttemperatur von Darmstadt vor und während der Befragung (19.01 bis 15.02.2015) .....	84
Abbildung 58: Historische Tagesmittelwerte der Außentemperatur von Darmstadt vom Jahr 2003 bis 2015 ....	85
Abbildung 59: Statistische Angaben zu den befragten Personen sowie Lage und Orientierung der Büros .....	86
Abbildung 60: Zufriedenheit der Gebäudenutzer insgesamt mit dem Arbeitsplatz .....	87
Abbildung 61: Auswertung der Einflussfaktoren auf die Leistungsfähigkeit in den letzten 2 Wochen vor der Befragung .....	88
Abbildung 62: Einflussfaktor „Raumluftqualität“ auf die Leistungsfähigkeit der Befragten in Abhängigkeit von der Lage des Büros.....	89
Abbildung 63: Gemessene Lufttemperaturen (5-Minuten-Werte) in Abluftkanälen während und vor der Befragung (19.01.2015 bis 15.02.2015).....	90

Abbildung 64: Gemessene Raumlufttemperatur (5-Minuten-Werte) einiger Räume im IWU-Haus während und vor der Befragung (19.01.2015 bis 15.02.2015) .....	91
Abbildung 65: Einflussfaktor auf die Leistungsfähigkeit der Befragten in Folge der Raumtemperatur in den letzten zwei Wochen vor der Befragung .....	92
Abbildung 66: Einflussfaktor auf die Leistungsfähigkeit der Befragten in Folge der Raumtemperatur und in Abhängigkeit von Geschlecht (oben links), Alter (oben rechts), Orientierung der Büros (unten links) sowie vom jeweiligen Stockwerk (unten rechts).....	92
Abbildung 67: Auswertung der Raumtemperatur (vormittags) der letzten zwei Wochen von der Befragung in Abhängigkeit vom Geschlecht (oben links), von der Altersverteilung der Befragten (oben rechts), von der Orientierung der Büros (unten links) und von der Lage der Büros (unten rechts).....	93
Abbildung 68: Auswertung der Raumtemperatur (nachmittags) der letzten zwei Wochen von der Befragung in Abhängigkeit vom Geschlecht (oben links), von der Altersverteilung der Befragten (oben rechts), von der Orientierung der Büros (unten links) und von der Lage der Büros (unten rechts).....	94
Abbildung 69: Einflussfaktor auf die Leistungsfähigkeit der Befragten in Folge der Luftfeuchte in den letzten zwei Wochen vor der Befragung .....	95
Abbildung 70: Gemessene relative Luftfeuchtigkeit in fünf repräsentativen Räumen im IWU-Haus für den Zeitraum zwischen 19.01.2015 und 15.02.2015.....	96
Abbildung 71: Gemessene Raumlufttemperatur in fünf repräsentativen Räumen im IWU-Haus für den Zeitraum zwischen 19.01.2015 und 15.02.2015 .....	96
Abbildung 72: Gemessene relative Raumluftfeuchte der repräsentativen Büros im IWU-Haus für den Zeitraum zwischen Januar 2014 und April 2015 .....	97
Abbildung 73: Gemessene relative Raumluftfeuchte der repräsentativen Büros im IWU-Haus für den Zeitraum zwischen November 2014 und April 2015.....	98
Abbildung 74: Gemessene relative Raumluftfeuchte der repräsentativen Büros im IWU-Haus für den Zeitraum zwischen Oktober 2012 und März 2013 .....	99
Abbildung 75: Gemessene relative Raumluftfeuchte der repräsentativen Büros im IWU-Haus für den Zeitraum zwischen Oktober 2013 und März 2014.....	99
Abbildung 76: Behaglichkeitsdiagramm für die repräsentativen Büros im IWU-Haus nach Leusden und Freymark für die Messdaten zwischen November 2014 und April 2015.....	101
Abbildung 77: Behaglichkeitsdiagramm für das IWU-Haus nach Leusden und Freymark basierend auf die Messdaten der Abluftkanal im Zeitraum zwischen November 2014 und April 2015.....	102
Abbildung 78: Prozentuale Häufigkeitsverteilung der relativen Raumluftfeuchtigkeit der repräsentativen Büros im IWU-Haus für den Zeitraum zwischen 19.01.2015 und 15.02.2015.....	103
Abbildung 79: Die von Gebäudenutzern subjektiv empfundene Raumluftfeuchte am Arbeitsplatz in den letzten zwei Wochen vor der Befragung .....	104
Abbildung 80: Auswertung der Frage in Bezug auf die gesundheitliche Beeinträchtigung in den vergangenen zwei Wochen (vor der Befragung) während der Arbeitszeit .....	104
Abbildung 81: Auswertung der relativen Raumluftfeuchte am Arbeitsplatz in Bezug auf die trockene Nase (oberes Diagramm), auf die trockene Haut (mittleres Diagramm) sowie die trockenen Augen (unteres Diagramm).....	105
Abbildung 82: Beleuchtungssituation beim Tageslicht mit oder ohne Benutzung der Sonnenschutzvorrichtungen .....	107
Abbildung 83: Dauer und die Form der Inanspruchnahme des Kunstlichtes.....	109
Abbildung 84: Zufriedenheit der Gebäudenutzer mit der Funktionalität der Deckenleuchten.....	110
Abbildung 85: Gegenüberstellung des gemessenen Elektro-Endenergieverbrauchs und berechneten Solarstroms zur Deckung des Eigenbedarfs ohne Berücksichtigung des Serverstroms .....	114
Abbildung 86: Gegenüberstellung des gemessenen Elektro-Endenergieverbrauchs und berechneten Solarstroms zur Deckung des Eigenbedarfs unter Berücksichtigung des Serverstroms.....	115

Abbildung 87: Bilanzielle Darstellung des Solarstroms (Eigenbedarf, Netzeinspeisung) bzw. des Strombezugs aus dem Netz (links) sowie ihre Deckungsanteile in Prozent (rechts) .....	116
Abbildung 88: Abschätzung der freiwerdenden Abwärmemenge des Rechenzentrums im Nachbargebäude in Abhängigkeit von verschiedenen Temperaturdifferenzen zwischen dem Abwärmemedium und der Umgebung (oben) bzw. von diversen Volumenströmen der Abwärmequelle (unten).....	118
Abbildung 89: Energiebedarfsberechnung zur Deckung der thermischen Energie des IWU-Hauses gemäß EnEV nach der Modernisierung des Heizsystems unter Einsatz einer Abluft-Wärmepumpe und die Erschließung der Abwärme des Rechenzentrums als Abwärmequelle der Wärmepumpe.....	119
Abbildung 90: Gegenüberstellung des Endenergiebedarfs der thermischen und elektrischen Energie und hierzu ermittelten Solarstroms .....	120
Abbildung 91: Spezifische Energiekennwerte der betrachteten Modernisierungsvarianten des IWU-Hauses..	124
Abbildung 92: THG-Emissionen der betrachteten Modernisierungsvarianten für das IWU-Haus unter Berücksichtigung der Einspeisung des Solarstromüberschusses in das öffentliche Netz.....	125
Abbildung 93: Gegenüberstellung der Gesamtkosten der betrachteten Modernisierungsvarianten für das IWU-Haus ohne Berücksichtigung der externen Kosten (CO <sub>2</sub> -Abgabe = 0 €) .....	126
Abbildung 94: Gegenüberstellung der Kapitalwerte der betrachteten Modernisierungsvarianten (Energiepreissteigerung von 3 %, Kalkulationszinssatz von 2 %).....	127
Abbildung 95: Gegenüberstellung der Gesamtkosten der betrachteten Modernisierungsvarianten für das IWU-Haus unter Berücksichtigung der externen Kosten (CO <sub>2</sub> -Abgabe = 50 € pro Tonne CO <sub>2</sub> ) .....	128
Abbildung 96: Gegenüberstellung der Kapitalwerte der betrachteten Modernisierungsvarianten (Energiepreissteigerung von 3 %, Kalkulationszinssatz von 2 %, CO <sub>2</sub> -Abgabe von 50 €/t).....	129
Abbildung 97: Gegenüberstellung der Kapitalwerte der betrachteten Modernisierungsvarianten (Energiepreissteigerung von 4 %, Kalkulationszinssatz von 1 %, CO <sub>2</sub> -Abgabe von 50 €/t).....	130
Abbildung 98: Gegenüberstellung der Kapitalwerte der betrachteten Modernisierungsvarianten (Energiepreissteigerung von 2 %, Kalkulationszinssatz von 3 %, CO <sub>2</sub> -Abgabe von 50 €/t).....	130

## Abbildungsverzeichnis - Fragebogen

Abb.-Frage 1: Wohin ist Dein Büro orientiert?.....	137
Abb.-Frage 2: In welchem Geschoss befindet sich Dein Büro? .....	137
Abb.-Frage 3: Wie beeinflussten folgende Faktoren in den letzten zwei Wochen Deine Leistungsfähigkeit am Arbeitsplatz? .....	141
Abb.-Frage 4: Wie beurteilst Du die Größe der gesamten Fensterfläche im Raum? .....	142
Abb.-Frage 5: Wie ist Dein Bildschirm im Raum ausgerichtet? .....	143
Abb.-Frage 6: Empfindest Du an sonnigen Wintertagen eine Blendung durch Tageslicht auf den folgenden Flächen? .....	146
Abb.-Frage 7: Wenn Du an sonnigen Wintertagen eine Blendung empfindest: Benutzt du dann die Jalousie oder den Blendschutz? .....	147
Abb.-Frage 8: Nutzt Du den Blendschutz auch als Sichtschutz? .....	148
Abb.-Frage 9: Wie zufrieden bist Du mit der Wirksamkeit der Verschattungsvorrichtungen gegen Blendung? .....	150
Abb.-Frage 10: Wie zufrieden bist Du mit der Bedienbarkeit der Verschattungsvorrichtungen? .....	152
Abb.-Frage 11: Nur Südseite: Wie zufrieden bist Du mit der automatischen Regelung der Jalousie? .....	153
Abb.-Frage 12: Schaltest Du das Licht ein, wenn die Fenster verschattet sind? .....	153
Abb.-Frage 13: Wie wichtig sind Dir im Winter...? .....	155
Abb.-Frage 14: Insgesamt betrachtet: Wie bewertest Du an sonnigen Wintertagen die Beleuchtungssituation beim Tageslicht...? .....	159
Abb.-Frage 15: Wie lange täglich hattest Du – bezogen auf die letzten zwei Wochen – während Deiner Arbeit das Kunstlicht eingeschaltet? .....	161
Abb.-Frage 16: Wie zufrieden bist Du mit der Funktionalität der Deckenleuchten? .....	163
Abb.-Frage 17: Wie empfindest Du im Moment die Temperatur an Deinem Arbeitsplatz? .....	164
Abb.-Frage 18: Wenn Du an die letzten zwei Wochen zurückdenkst: War Dir an Deinem Arbeitsplatz (zu kalt ... zu warm)? .....	167
Abb.-Frage 19: War Dir die Luft in Deinem Raum in den vergangenen zwei Wochen...? .....	168
Abb.-Frage 20: Wie stark empfundest Du in den letzten zwei Wochen unangenehme Temperaturschwankungen im Tagesverlauf? .....	169
Abb.-Frage 21: Welche Möglichkeiten nutzt Du überwiegend, um die Temperatur im Büro zu verändern? ....	170
Abb.-Frage 22: Wie oft hast Du in den vergangenen 2 Wochen versucht, etwas an der Temperatur in Deinem Büro zu verändern? .....	172
Abb.-Frage 23: Wenn Du die Temperatur verändert hast, wie zufrieden warst Du mit der Wirksamkeit der Temperaturänderung? .....	173
Abb.-Frage 24: Wie zufrieden warst Du die vergangenen zwei Wochen insgesamt mit der Temperatur am Arbeitsplatz? .....	174
Abb.-Frage 25: Hast Du in den vergangenen zwei Wochen Zuglufterscheinungen an Deinem Arbeitsplatz verspürt? .....	175
Abb.-Frage 26: Wie stark empfundest Du in den vergangenen zwei Wochen folgende Gerüche an Deinem Arbeitsplatz? .....	177
Abb.-Frage 27: Wie hattest Du in den letzten zwei Wochen die Fenster hauptsächlich geöffnet? .....	177
Abb.-Frage 28: Ist die Tür Deines Büroraumes (zum Flur hin) normalerweise offen oder geschlossen, wenn Du den Raum benutzt? .....	179
Abb.-Frage 29: Wie lange steht die Tür Deines Büroraumes (zum Flur hin) an einem normalen Arbeitstag etwa offen, wenn Du den Raum benutzt? .....	180
Abb.-Frage 30: Wie oft steht die Tür Deines Büroraumes (zum Flur hin) nachts offen? .....	180

Abb.-Frage 31: Wie zufrieden warst Du in den letzten zwei Wochen insgesamt mit der Luftqualität in Deinem Büro? .....	181
Abb.-Frage 32: Arbeitest Du in einem Einzelbüro, Zweierbüro oder in der Bibliothek?.....	182
Abb.-Frage 33: Wie zufrieden bist Du insgesamt mit der Einrichtung Deines Büros? .....	182
Abb.-Frage 34: Fühltest Du Dich an Deinem Arbeitsplatz in den letzten 2 Wochen durch folgende Geräusche gestört oder nicht? .....	186
Abb.-Frage 35: Wie zufrieden bist Du mit der Akustik (Sprachverständlichkeit, Halligkeit etc.) in Deinem Büro? .....	187
Abb.-Frage 36: Wie zufrieden bist Du in den vergangenen zwei Wochen insgesamt mit dem Geräuschpegel in Deinem Büro? .....	188
Abb.-Frage 37: Wie häufig littest Du in den vergangenen zwei Wochen während Deiner Arbeitszeit an folgenden gesundheitlichen Beeinträchtigungen?.....	194
Abb.-Frage 38: Wie zufrieden bist Du alles in allem mit Deinem Arbeitsplatz (einschließlich allen abgefragten Faktoren wie Beleuchtung, Luftqualität, räumliche Gegebenheiten etc.)?.....	195
Abb.-Frage 39: Waren die vergangenen zwei Wochen Deiner Meinung nach von den Witterungs-verhältnissen und der Raumklimasituation in Deinem Büro repräsentativ für einen Winter in Darmstadt? ....	195
Abb.-Frage 40: Bist Du weiblich oder männlich? .....	196
Abb.-Frage 41: Wie alt bist Du? .....	197
Abb.-Frage 42: Wie viele Stunden arbeitest Du im Durchschnitt in der Woche? .....	197

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Wärmedurchgangskoeffizient der Bauteile nach der Sanierung .....	19
Tabelle 2: Erster Planungsansatz der Lüftungsanlage die dazu gehörenden Luftmengen .....	23
Tabelle 3: Betriebszustände Lüftungsanlage .....	24
Tabelle 4: Flächenermittlung: Nettogrund- und Energiebezugsflächen .....	38
Tabelle 5: Anzahl Leuchtmittel, Installierte Leistung für die Beleuchtung und Nettogrundrissfläche auf jeder Etage im IWU .....	47
Tabelle 6: Gewichteter Mittelwert ermittelt für Ziel- und Grenzwerte der spezifischen installierten Leistung für Beleuchtung im IWU-Gebäude nach VDI 3807-4.....	48
Tabelle 7: Anzahl Rechner und die dazu gehörende verbrauchte Leistung auf verschiedene Geschosse.....	52
Tabelle 8: Änderungen im PHPP bei der Anpassungsrechnung .....	65
Tabelle 9: PMV- und PPD-Wert gemäß DIN EN ISO 7730 [2] .....	75
Tabelle 10: Klassifizierung des Innenraumklimas gemäß DIN EN 15251 [3] .....	76
Tabelle 11: Grenzwerte der operativen Temperatur nach DIN EN ISO 7730.....	76
Tabelle 12: Randbedingungen der Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen .....	123

Bildrechte:

Die Abbildungen 4

## 1 Kurzfassung

Das heutige IWU-Haus in Darmstadt fungiert seit 2010, nach einer umfassenden energetischen Modernisierung, als Bürogebäude des Instituts Wohnen und Umwelt (IWU). Es besitzt drei Vollgeschosse mit Flachdach und ein Kellergeschoss. Die thermische Gebäudehülle wurde rundum mit passivhaustauglichen Komponenten (Abschnitt 3.1) saniert. Zudem wurde eine zentrale Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung (80 %) eingebaut (Abschnitt 3.4). Des Weiteren sollen u. a. die folglich genannten Energiekonzepte zur Reduktion der Energieverbräuche bzw. Treibhausgas-Emissionen (THG-Emissionen) sowie zu besserer Behaglichkeit im Gebäude und am Arbeitsplatz beitragen:

- Wärmeschutz im Sommer (Abschnitt 3.5)
- Passive und aktive Kühlung durch Nachtlüftung (Abschnitt 3.6)
- Beleuchtungskonzept zum Tages- und Kunstlicht (Abschnitt 3.7)
- Passive Serverkühlung (Abschnitt 3.8)

Um bei der Sanierung Kosten zu sparen, wurden bedauerlicherweise das gesamte Heizsystem und die Heizkörper nicht modernisiert.

Um die Effekte und Erfolge der einzelnen Sanierungskonzepte zu erforschen, wurde zudem ein Messkonzept zum Energie-Monitoring im Zuge der Sanierung erarbeitet (Kapitel 4) und umgesetzt.

Gegenstand des vorliegenden Forschungsberichts ist die Beschreibung und Beurteilung der vorgenannten Energiekonzepte des IWU-Hauses anhand der vorhandenen Ergebnisse aus dem Energie-Monitoring (Kapitel 5) und der Nutzerbefragung (Kapitel 7).

Aus der Auswertung der Nutzerbefragung geht hervor, dass die Befragten überwiegend mit Lichtverhältnissen, Raumklima und Luftqualität am Arbeitsplatz zufrieden sind (81 %). Daher kann im Allgemeinen von einem sehr gelungenen Sanierungskonzept im IWU-Haus aus Sicht der Gebäudenutzer ausgegangen werden. Demnach sind 35 % (13 Personen) der Befragten sehr zufrieden und 46 % (17 Personen) zufrieden mit ihrem Arbeitsplatz. Nur 5 % (zwei Personen) waren sehr unzufrieden und 14 % (5 Personen) hatten eine mittelmäßige Meinung.

Werden die Antworten der unzufriedenen Personen mit bereits gemessenen Daten in Verbindung gebracht, lassen sich bezüglich der Lage und der Orientierung der Büros keine Rückschlüsse auf das Empfinden des thermischen Komforts im Winter ziehen. Die Unterschiede sind hierbei eher angesichts des Geschlechts und Alters der Befragten feststellbar. Übereinstimmend liegen die Messdaten mit den negativen Antworten der Befragten hauptsächlich in Bezug auf die Raumluftfeuchte. Hierzu zeigen sowohl die Messdaten als auch die Befragung, dass in diesem Bereich Handlungsbedarf besteht. Die niedrige Bandbreite der rel. Luft-

feuchtigkeit im Winter ist jedoch nicht nur für das IWU-Haus charakteristisch. Tatsächlich findet man nicht selten niedrige rel. Luftfeuchtigkeit während der Wintermonate in luftdicht ausgeführten und gut gedämmten Gebäuden in Abhängigkeit von der ansteigenden Innenraumtemperatur. In Abschnitt 7.3 sind die Hintergründe bzw. möglichen Lösungen dargestellt und diskutiert.

Durch die Sanierung nach dem Passivhaus-Standard mit den mittleren Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) von 0,11 W/(m<sup>2</sup> K) für die opaken bzw. 0,85 W/(m<sup>2</sup> K) für die transparenten Bauteile wurde nicht nur der Energieverbrauch (Wärme um 83 % und Strom um 73 %) sowie THG-Emissionen (um ca. 80 %) des IWU-Hauses enorm reduziert, sondern zudem aufgrund der genannten Sanierungskonzepte ohne Klimatisierung ein ausgezeichnetes sommerliches Raumklima (Kapitel 6) erreicht.

Gemäß den Anforderungen der DIN 15251 zum Innenraumklima kann das IWU-Haus der Kategorie I zugeordnet werden. Kategorie I wird für Räume empfohlen, in welchen sich sehr empfindliche und anfällige Personen mit besonderen Bedürfnissen aufhalten, z. B. Personen mit Behinderungen, kranke Personen, sehr kleine Kinder und ältere Personen. Beispielsweise betragen die Übertemperaturgradstunden im thermisch ungünstigen Büro des IWU (2. Südseite im Obergeschoss) lediglich 11 Stunden für das Jahr 2015 (Grenzwert liegt bei 500 Kh/a<sup>1</sup>), davon nur 7 Stunden innerhalb der Arbeitszeit (vgl. Kapitel 6).

Der bei der Planung berechnete bzw. geforderte Zielwert des Heizwärmebedarfs (Nutzwärme) von 25 kWh/m<sup>2</sup>a konnte jedoch nicht erreicht werden. Die Hauptursache liegt hierzu in den durchschnittlich hohen Innenraumtemperaturen (ca. 2,5 Kelvin über der Raumsolltemperatur von 20 °C) aufgrund der schlecht regelbaren Heizwärmezufuhr (ungewollte Wärmeverluste der Heizwärmeverteilung<sup>2</sup>) bzw. den Komfortwünschen der Gebäudenutzer (gewollte Heizwärmezufuhr).

In Kapitel 8 wird des Weiteren aufgezeigt, wie die einmalige Chance bei einer ohnehin bevorstehenden Modernisierung der Anlagentechnik aufgegriffen werden kann, um über die Mängelbeseitigung des Gebäudes hinaus durch innovative Maßnahmen ein Konzept für ein Nullemissionsgebäude oder ggf. ein Plusenergiegebäude zu entwerfen. Hierzu wird u. a. angesichts der Besonderheit des Standorts des IWU-Hauses der Einsatz einer Wärmepumpe untersucht, wobei die Abwärme des benachbarten Rechenzentrums als Wärmequelle verwendet wird. Die Untersuchungen zeigen, dass dadurch rund 77 % der erforderlichen Erzeugernutzenergie durch Umweltenergie und Abwärmenutzung abgedeckt werden können.

Soll das IWU-Haus zudem das Niveau eines Nullemissionsgebäudes erreichen, muss der noch verbleibende erforderliche Elektro-Endenergiebedarf des Gebäudes beispielsweise durch

---

<sup>1</sup> Gemäß DIN 4108-2:2013-02 liegt der Grenzwert der Übertemperaturgradstunden bei 500 Kh/a (bei Temperaturen über 27 °C für die Klimaregion von Darmstadt)

<sup>2</sup> Bei der Sanierung wurden die Heizkörper und Heizungsrohre aus Wirtschaftlichkeitsgründen nicht erneuert!

Strom aus einer Photovoltaikanlage (PV-Anlage) kompensiert werden. Hierzu wird eine PV-Anlage mit einer installierten Leistung von  $72 \text{ kW}_{\text{peak}}$  benötigt. Um diese Anlagengröße zu realisieren, müssen ca. 82 % der verfügbaren Dachflächen ( $425 \text{ m}^2$ ) mit PV-Modulen ausgestattet werden (vgl. Abschnitt 8.2).

Die Ergebnisse in Abschnitt 8.5 zeigen darüber hinaus, dass die vorgeschlagenen Modernisierungsmaßnahmen nicht nur zu einem emissionsfreien Gebäude beitragen, sondern dass sie auch wirtschaftlich vertretbar sind. Zu ihrer Realisierung sollten jedoch die eventuellen Hemmnisse berücksichtigt und beseitigt werden (Abschnitt 8.6).

## 2 Ausgangslage - IWU-Haus vor der Sanierung

Das heutige IWU-Haus in Darmstadt war der ehemalige Standort der Verwaltung des Landkreises Darmstadt-Dieburg. Das Grundstück liegt auf der nördlichen Seite der Rheinstraße zwischen Steubenplatz und Feldbergstraße. Auf dem Grundstück befindet sich ein Gebäudekomplex mit drei Baukörpern, die durch Treppenhäuser verbunden sind. Das älteste Gebäude (Baujahr 1951) liegt entlang des Steubenplatzes und der Mittelbau aus dem Jahr 1962 sowie das später im Jahr 1977 errichtete Westturm-Gebäude liegen entlang der Rheinstraße. Der Mittelbau fungiert seit 2010, nach einer umfassenden energetischen Modernisierung, als neues Domizil des Instituts Wohnen und Umwelt. Der Eigentümer des Gebäudes ist die bauverein AG, die Baugesellschaft der Stadt Darmstadt.



Abbildung 1: IWU-Haus bildet mit dem rechten und linken Gebäude als einen zusammenhängenden Gebäudekomplex (Foto am Beginn der Sanierung)

Das IWU-Haus besitzt drei Vollgeschosse mit Flachdach und ein Kellergeschoss. Im Kellergeschoss befinden sich Räume für Heiztechnik, Gasübergabestation, Wasser- und Niederspannungshauptverteilungen sowie Archiv-, Abstellräume und der Serverraum.

Als Verwaltungsgebäude waren die Büros zellenförmig in Erd- und Obergeschossen mit langen Fluren angeordnet. Die Büros waren zudem vor der Sanierung durch Zwischentüren miteinander verbunden. Des Weiteren befindet sich im 2. OG ein ca. 210 m<sup>2</sup> großer Versammlungssaal. Vor der Sanierung verfügte nur der Saal über eine Lüftungsanlage. Der Rest des Gebäudes wurde über Fensterlüftung mit Frischluft versorgt.



Abbildung 2: Links, ein Blick in die Büroräume vor der Sanierung; rechts die beiden Niedertemperatur-Gaskessel mit einer Nennleistung von zusammen einem Megawatt.

Zwei Niedertemperatur-Gaskessel (464–522 kW) mit einer Brennerleistung von 250-650 kW stellten für das gesamte Gebäudeensemble Wärme für Heizung und Warmwasser bereit. Abgesehen von einer Erneuerung der Wärmeversorgung im Jahr 1991 erfuhr der mittlere Gebäudetrakt seit seiner Erbauung keine wesentlichen Instandhaltungsarbeiten.

## 3 Energiekonzept

Seit der Gründung des Instituts Wohnen und Umwelt im Jahr 1971 residierte das IWU in der historischen Merck-Villa (Baujahr 1897) in Darmstadt. Die wachsenden personellen und strukturellen Anforderungen sowie der sanierungsbedürftige Zustand der Villa veranlasste das Institut nach anderen Räumlichkeiten zu suchen.

Gemeinsam mit Planungsgruppe DREI und bauverein AG beschloss das IWU das mittlerweile freistehende Verwaltungsgebäude in der Rheinstraße energetisch auf nahezu Passivhaus-Standard zu modernisieren und als zukünftigen Sitz zu nutzen.

### 3.1 Baulicher Wärmeschutz

Die thermische Gebäudehülle wurde rundum mit passivhaustauglichen Komponenten saniert. Fenster mit 3-Scheiben-Wärmeschutzverglasung und hochwärmegedämmten Rahmen wurden vor die Bestandsfassade gesetzt und mit Dichtband an den Innenputz angeschlossen. Die Wände des Baukörpers (Stahlbetonskelett mit Ausmauerungen aus Lochziegeln) erhielten eine 25 bis 30 cm dicke Wärmedämmung aus expandiertem Polystyrol (EPS) mit einer Wärmeleitfähigkeit von 0,32 W/mK (WLG 032). Eine Perimeterdämmung mit 30 cm EPS (WLG 035) wurde ab Oberkante Kellerdecke ca. 80 cm nach unten fortgesetzt und in das Erdreich eingelassen.



Abbildung 3: Befestigung der 30 cm dicken Wärmedämmung aus Neopor an der Fassade

Das Flachdach ist mit einer Gefälledämmung von 36 bis 54 cm EPS versehen worden, und die Kellerdecke wurde mit 12 cm Mineralfaserplatten gedämmt. Die Wärmebrücken wurden soweit möglich – unter Wahrung der Proportionen in der äußeren Erscheinung des Gebäudes – optimiert. In Tabelle 1 sind die resultierenden U-Werte der Bauteile aufgelistet, und Abbildung 4 zeigt eine Schnittdarstellung des Gebäudes inklusive der eingesetzten Dämmung.

Tabelle 1: Wärmedurchgangskoeffizient der Bauteile nach der Sanierung

Bauteil	U-Wert nach Sanierung [W/(m²K)]
Dach	0,085
Wand	0,11
Perimeter	0,12
Kellerdecke	0,23
Fenster	0,70

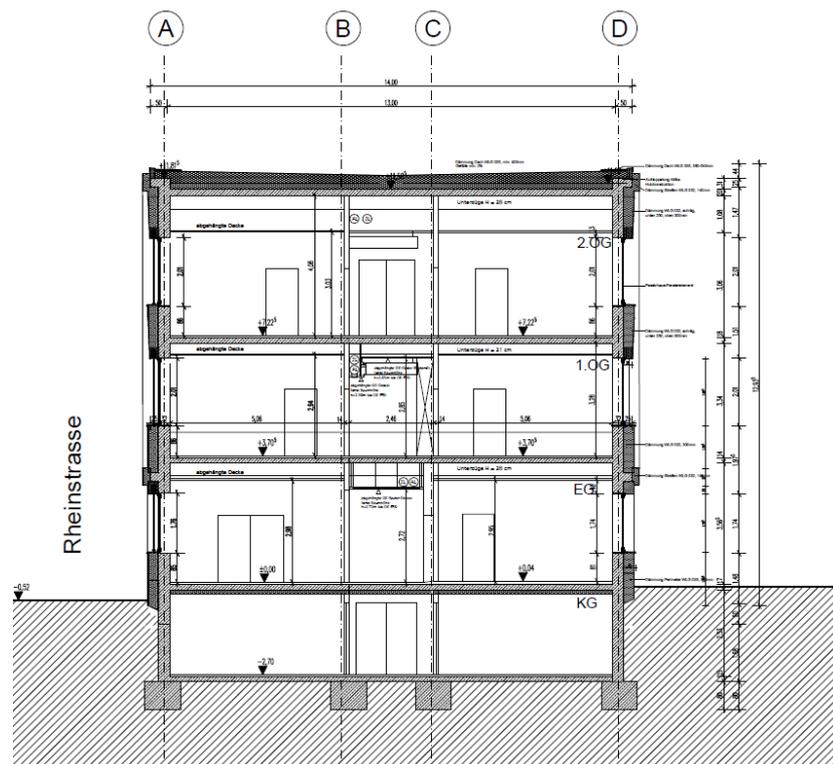


Abbildung 4: Schnittzeichnung des Gebäudes (Quelle: planungsgruppe Drei)

Eine luftdichte Ausführung wurde, insbesondere beim Einbau der Fenster, durch eine vorgezogene Blower-Door-Messung und thermografische Kontrolle sichergestellt. Bei der Abnahmemessung konnte so eine volumenbezogene Luftwechselrate bei 50 Pascal Druckdifferenz von  $n_{50} = 0,59 \text{ h}^{-1}$  nachgewiesen werden. Der Grenzwert für Passivhäuser von  $0,6 \text{ h}^{-1}$  wurde damit erreicht.

### 3.2 Heizung

Um bei der Sanierung Kosten zu sparen, wurde das gesamte Heizsystem aus zwei Nieder-temperatur-Gaskesseln (Gas-NTK) mit je 500 kW Leistung und Heizkörpern unter allen Fenstern im Zuge der Sanierung nicht entfernt bzw. ausgetauscht. Auch die bestehende Regelung, wurde nicht umprogrammiert, da das Heizsystem auch die verbliebenen unsanierten Gebäudeteile mit versorgt. Die Vorlauftemperaturen liegen in der Heizzeit im Bereich von 50 °C bis 70 °C. Dadurch ist die dem Gebäudeteil des IWU zur Verfügung stehende Heizleistung um mindestens den Faktor 10 zu hoch. Die einzig wirksame Regeleinrichtung sind die Thermostatventile an den Heizkörpern. Das wiederum hat zur Konsequenz, dass die Nutzer nahezu beliebige Raumtemperaturen wählen können. In einzelnen Büros werden durchgängig bis zu 25 °C erreicht. Im Gegensatz zur sonst bei Passivhausgebäuden üblichen Luftheizung wird in diesem Gebäude die Luft von einem Heizregister in der Lüftungsanlage nur erwärmt, falls die Zulufttemperatur trotz Wärmerückgewinnung unter 20,5 °C (Planungswert 18 °C) sinkt.

Aus den eben genannten Gründen ist die Betriebsführung der Anlage besonders relevant. Um Überwärmungen und unnötige Verluste in der Verteilung zu vermeiden, werden die Heizungspumpen für den Nord- und den Südstrang der Anlage manuell erst eingeschaltet, wenn Mitarbeiter zu geringe Temperaturen in ihren Büros melden. Ansonsten bleiben die Umwälzpumpen abgeschaltet.

### 3.3 Warmwasser

Im Hinblick auf die geringe und seltene Entnahme von warmem Wasser im Bürogebäude wurde für die beiden Teeküchen eine dezentrale direktelektrische Versorgung mit Unterschichtspeichern mit 5 Litern im 1. Obergeschoss und 10 Litern im Erdgeschoss gewählt. Durch separate Stromzähler (Zwischenstecker) wurde der Verbrauch elektrischer Energie durch die beiden Speicher exemplarisch gemessen. Bei den relativ niedrig eingestellten Temperaturen (33 °C bzw. 45 °C) wurden ohne Zapfungen mittlere Leistungen von ca. 3 W im 1. OG und ca. 9 W im EG gemessen. Leitungen einer zentralen Versorgung würden ungleich höhere Verluste verursachen.

An den Handwaschbecken in den Toiletten ist auf eine Warmwasserversorgung verzichtet worden.

### 3.4 Lüftung

In das Gebäude wurde eine zentrale Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung eingebaut. Der Wärmerückgewinnungsgrad der Anlage liegt bei 80 % und die maximale Leistung der Anlage bei 5.000 m<sup>3</sup>/h, wovon für die Büros während der Arbeitszeit nur 1.950 m<sup>3</sup>/h benötigt werden. Die restliche Kapazität steht dem Sitzungssaal und als Bedarfsreserve zur Verfügung. Die Montage des Zentralgerätes war nur durch eine Öffnung im Dach mittels Autokran möglich. Dafür wurde eine Toilette im 2. OG „geopfert“.

Die zentrale Lüftungsanlage im 2. OG versorgt den Bereich „IWU“ und den mit zur Liegenschaft gehörenden „Saal“ im 2. OG (gehört nicht zum IWU). Die Lüftungsanlage sorgt für eine kontrollierte Be- und Entlüftung mit Wärmerückgewinnung. Eine Kühlung/Klimatisierung ist nicht vorgesehen. Zur Einhaltung einer Mindest-Zulufttemperatur wurde ein Heizregister im Lüftungsgerät integriert. Die Mindest-Zulufttemperatur beträgt 20,5 °C (Planungswert 18 °C). Im Sommer ist eine Nachtlüftung über die Lüftungsanlage und als natürliche Lüftung über gekippte Fensterflügel vorgesehen, die in den Abschnitten 3.5 und 3.6 genauer beschrieben ist.

Volumenstromregelung der Lüftungsanlage:

Die Zu- und Abluftvolumenströme werden in der Lüftungszentrale mit motorgetriebenen elektronischen Volumenstromreglern für Saal und Büro/IWU aufgeteilt.

#### Regelungen im Bereich Saal:

Die Lüftungsnutzzeiten im Saal werden für die Grundlüftung und Bedarfslüftung wie folgt definiert:

- **Grundlüftung**, Mo.-Fr. 6-8 Uhr
- **Bedarfslüftung**, Mo.-So. 0-24 Uhr

Der Saal wird in den Wochentagen Montag bis Freitag jeden Morgen von 6:00 – 8:00 Uhr (seit 18.2.14 nur noch 6:00 – 7:00 Uhr) mit einem Volumenstrom von 1.900 m<sup>3</sup>/h (Grundlüftung) belüftet.

Über das im Saal eingebaute „Bediengerät“ kann der Nutzer die Saallüftung außerhalb der Grundlüftungszeiten aktivieren. Nach Aktivierung wird der Saal zunächst mit kleinster Lüftungsstufe, d. h. Grundlüftung (1.900 m<sup>3</sup>/h) be- und entlüftet. In Abhängigkeit der Luftgüte, welche mittels VOC-Sensor in der Abluft bemessen wird, wird der Luftaustausch bis auf den Maximalwert (Bedarfsbetrieb) in die Höhe von 3.000 m<sup>3</sup>/h gesteigert (siehe Tabelle 3).

Sollwert und Steilheit der Luftmengenveränderung sind parametrierbar. Wenn der Saal nicht genutzt wird, wird die Luftmenge auf „Null“ reduziert.

Die Soll-Raumtemperatur kann auch über das Bediengerät um +/-3 °C verändert werden. Dabei wirkt die Regelgröße auf das separate Zuluft-Heizregister für den Saal, um diesen schneller aufzuheizen.

#### Regelungen im IWU sind:

Die Luftmengensteuerung der Gruppen- und Seminarräume erfolgt über stufenlos ansteuerbare Volumenstromregler im Rohrkanalsystem.

Während der Nutzungszeit im IWU wird die Lüftungsanlage auf „Nennlüftung“ betrieben, welche einen Luftaustausch in Höhe von  $1.950 \text{ m}^3/\text{h}$  bewirkt. „Grundlüftung“ bedeutet die reduzierte Lüftung außerhalb der Kernarbeitszeit. Die Luftverteilung stellt sich entsprechend den Druckverlusten im Leitungsnetz etwa zu gleichen Anteilen wie bei „Nennlüftung“ ein. Am Wochenende (Sa. - So.) wird die Lüftungsanlage komplett ausgeschaltet.

Die Lüftungsnutzungszeiten im IWU werden für die Grundlüftung und Nennlüftung wie folgt definiert:

- **Grundlüftung** (reduzierte Lüftung), werktags 0-7 Uhr, 17-24 Uhr
- **Nennlüftung** (Nennbetrieb), werktags 7-17 Uhr
- **Lüftung aus**, Sa. –So. 0-24 Uhr

Im IWU ist eine Bedarfslüftung in besonderen Räumen möglich und wird durch manuelle Schaltung bei entsprechenden Veranstaltungen aktiviert.

Eine bedarfsabhängige Luftmengenveränderung wurde im Erdgeschoss für die Bibliothek, den kleinen Besprechungsraum und den großen Besprechungsraum vorgesehen. Mögliche Einstellungen für die oben genannten Räume sind wie folgt:

- Bibliothek: Nennlüftung ( $80 \text{ m}^3/\text{h}$ ), Bedarfsanforderung ( $300 \text{ m}^3/\text{h}$ )
- Kleiner Besprechungsraum: Nennlüftung ( $54 \text{ m}^3/\text{h}$ ), Bedarfsanforderung ( $160 \text{ m}^3/\text{h}$ )
- Großer Besprechungsraum: Nennlüftung ( $140 \text{ m}^3/\text{h}$ ), Bedarfsanforderung 1. Stufe ( $360 \text{ m}^3/\text{h}$ ), Bedarfsanforderung 2. Stufe ( $450 \text{ m}^3/\text{h}$ )

Die Bedarfsanforderungen werden über einen bzw. zwei Taster mit Kontrollleuchte aktiviert. Die Anforderung bleibt für 120 min oder bis zum manuellen Deaktivieren aktiv. Über die Bedarfsanforderungen kann auch am Wochenende die Lüftungsanlage aktiviert werden.

Um im Sommer einer Aufheizung des Gebäudes entgegenzuwirken, gibt es eine sommerliche Nachtlüftung die mit  $3.000 \text{ m}^3/\text{h}$ , abhängig von der Innen- bzw. Außenlufttemperatur, zugeschaltet wird. Die Regelung der Nachtlüftung wird in den Abschnitten 3.5 und 3.6 genauer erläutert.

Für die Einzelbüroräume werden  $30 \text{ m}^3/\text{h}$  Luftmenge durch die Lüftungsanlage zur Verfügung gestellt, die Doppelbüros erhalten  $60 \text{ m}^3/\text{h}$ .

Um die Entwicklung der Lüftungsplanung aufzuzeigen, sind in Tabelle 2 die Volumenstromregelungen aus der ersten Planungsphase zusammengefasst dargestellt, die sich so nicht umsetzen ließen.

Tabelle 2: Erster Planungsansatz der Lüftungsanlage die dazu gehörenden Luftmengen

Nr.	Luftmenge (m <sup>3</sup> /h)	IWU	Saal
1	0	aus	aus
2	500	aus	Grundlüftung
3	800	Grundlüftung	aus
4	500+800= 1300	Grundlüftung	Grundlüftung
5	1.580	Normallüftung	aus
6	2.150	Bedarfslüftung	aus
7	2.080	Normallüftung	Grundlüftung
8	2.650	Bedarfslüftung	Grundlüftung
9	3.000	Aus	Nennlüftung
10	5.150	Bedarfslüftung	Nennlüftung

In Tabelle 3 sind die aus der Fach-Detailplanung daraus resultieren Volumenströme illustriert. Es wird deutlich, dass der zeitgleiche Betrieb beider Lüftungsbereiche in der Regel durch das Lüftungsgerät sichergestellt werden kann. In beiden Bereichen sind bedarfsabhängige Lüftungsmengen vorgesehen, die jedoch im Normalfall nicht gleichzeitig in höchster Stufe angefordert werden. Daher wurde das Lüftungsgerät auf einen maximalen Gesamt-Luftvolumenstrom von 5.000 m<sup>3</sup>/h ausgelegt. Sollte der Saal oder der große Besprechungsraum einmal von mehr als der ausgelegten Personenanzahl genutzt werden, muss die Belüftung durch manuelle Fensterlüftung unterstützt werden.

Tabelle 3: Betriebszustände Lüftungsanlage

Nr.	IWU		Saal		Gesamt
	Luftmenge (m <sup>3</sup> /h)	Betriebszustand (Betriebszeit)	Luftmenge (m <sup>3</sup> /h)	Betriebszustand (Betriebszeit)	Luftmenge (m <sup>3</sup> /h)
1	0	Aus	0	Aus	0
2	1.000	Grundlüftung Mo – Fr (17:00 – 7:00 Uhr)	0	Aus	1.000
3	0	Aus Sa – So (00:00 – 24:00 Uhr)	1.900	Grundlüftung Mo - Fr (6:00 -7:00 Uhr)	1.900
4	1.000	Grundlüftung Mo – Fr (17:00 – 7:00 Uhr)	1.900	min. Bedarfslüftung VOC gesteuert	2.900
5	1.000	Grundlüftung Mo – Fr (17:00 – 7:00 Uhr)	3.000	max. Bedarfslüftung VOC gesteuert	4.000
6	1.950	Nennlüftung Mo – Fr (7:00 – 17:00)	1.900 – 3.000	Bedarfslüftung VOC gesteuert	3.850 – 4.950
7	2.170	Bedarfslüftung Bibliothek (+ 220 m <sup>3</sup> /h)	1.900 – 3.000	Bedarfslüftung VOC gesteuert	4.070 - 5170
8	2.170	Bedarfslüftung Gr. Besp.-Raum (1. Stufe + 220)	1.900 – 3.000	Bedarfslüftung VOC gesteuert	4.070 – 5.170
9	2.260	Bedarfslüftung Gr. Besp.-Raum (2. Stufe + 310)	1.900 – 3.000	Bedarfslüftung VOC gesteuert	4.160 – 5.260
10	2.056	Bedarfslüftung Kl. Besp.-Raum (+ 106 m <sup>3</sup> /h)	1.900 – 3.000	Bedarfslüftung VOC gesteuert	3.956 – 5.056
11	2.586	Bedarfslüftung max. (+ 310 + 220 + 106)	1.900 – 3.000	Bedarfslüftung VOC gesteuert	4.486 - 5.586
12	3.000	Sommerliche Nachtlüftung (22.00 – 7:00 Uhr)	0	Aus	3.000

### 3.5 Wärmeschutz im Sommer

Bürogebäude neigen bei heutiger Ausstattung mit Bürogeräten im Sommer zur Überhitzung. Das ist keine Besonderheit von Passivhäusern, auch "nur" nach EnEV errichtete Gebäude haben dieses Problem. Der formelle Nachweis des sommerlichen Wärmeschutzes ist dabei keine Garantie gegen unbehagliche Raumluftzustände an deutlich mehr als 10 % der Nutzungsstunden pro Jahr, wie thermische Gebäudesimulationen in der Planungsphase bestätigten. Deshalb wurde dem sommerlichen Wärmeschutz besondere Bedeutung beigemessen und ein für Büronutzung angemessenes Konzept entwickelt.

Wichtigstes Element sind hochwertige, außen liegende Lamellen-Jalousien auf der Südseite des Gebäudes. Entscheidend ist die automatische Steuerung in Abhängigkeit von der Einstrahlung, um auch außerhalb der normalen Nutzungszeiten des Gebäudes eine zuverlässige Verschattung zu gewährleisten.



Abbildung 5: Sonnenschutz an der Südfassade

Ist ein Raum nicht belegt, schließt sich der Sonnenschutz im Sommer bei Sonneneinstrahlung automatisch; sind Personen anwesend, geht die Jalousie in Cut-Off-Position, lässt also noch eine Sichtverbindung nach draußen zu. Im oberen Drittel drehen sich die Lamellen in lichtlenkende Position und leiten das Tageslicht in die Räume (vgl. Abbildung 5). So wird vermieden, dass bei geschlossenem Sonnenschutz das Licht eingeschaltet werden muss.

Im Winter dagegen bleibt der Sonnenschutz offen, um die solare Einstrahlung zu „ernten“. Ein innen liegender Blendschutz (vgl. Abbildung 6) für blendfreies Arbeiten



Abbildung 6: Blendschutz am Fenster

an Bildschirmen wurde daher zusätzlich installiert. Die thermische Trägheit des Gebäudes mit massiven Innenwänden – nur eingeschränkt durch abgehängte Decken – sorgt zudem für den stabilen sommerlichen Temperaturkomfort. Die Räume auf der Nordseite sind nur mit Blendschutz ausgestattet, da hier keine direkte Sonneneinstrahlung möglich ist.

Eine weitere Maßnahme besteht aus der Reduzierung der internen Lasten infolge der Abwärme der EDV-Ausstattung in den Büros. Daher wird bei der zukünftigen Anschaffung der Gerätschaften auf den Energieverbrauch als wichtiges Kriterium Wert gelegt. Hierzu wird das Prinzip zur „Begrenzung der mittleren Leistung der EDV-Ausstattung auf 50 W pro Arbeitsplatz“ verfolgt.

Um einer Überhitzung vorzubeugen, wird der Bypass der Lüftungsanlage abhängig von der Innen- und Außentemperatur gesteuert, so dass im Sommer bei hohen Außentemperaturen (ab einer Außentemperatur von einem Grad unter der Innentemperatur) die Wärmerückgewinnung genutzt wird, um die in das Gebäude transportierte Außenluft abzukühlen. Liegt die Außentemperatur zwischen 15 °C und 22 °C, und ist es drinnen über 22 °C warm, wird der Bypass des Wärmetauschers geöffnet, um überschüssige Wärme abzuführen.

### 3.6 Passive und aktive Kühlung durch Nachtlüftung

Es wurde für die Büros ein innovatives Konzept zur nächtlichen Kühlung durch motorisch geöffnete Fenster im ersten und zweiten OG und einen erhöhten Volumenstrom der Lüftungsanlage gewählt.



#### Passive Nachtkühlung:

In jedem Büro der Obergeschosse wurde ein Fenstergriff durch einen von der Lüftungsanlage ferngesteuerten Antrieb ersetzt. Zum Schutz gegen Einbruch wurde im 1. OG eine Sicherung der Fensterflügel gegen Aufhebeln im gekippten Zustand montiert (vgl. Abbildung 7), was von der Gebäudesachversicherung gefordert wurde. Dadurch ist es gelungen, ganz auf den Einsatz aktiver Kühlgeräte verzichten zu können und trotzdem die sommerlichen Innentemperaturen fast durchgängig unter 24 °C zu halten.

Abbildung 7: Verschiebbare Stange vor dem Fenster im 1. OG als Einbruchschutz bei gekippten Fenstern

### Funktionsbeschreibung der Nachtlüftung:

Bei Temperaturen (Flur 1. und 2. OG) über 23 °C (Planungswert 24 °C) werden die Fenster nachts geöffnet (gekippt), und die Lüftungsanlage fährt auf 3.000 m<sup>3</sup>/h hoch, wenn eine Temperaturdifferenz zur Außenluft von mindestens 1 K (Planungswert 4 K) vorhanden ist. Die Fenster schließen, wenn die Innentemperatur unter 22 °C fällt. Die Nachtlüftung ist in den Sommermonaten zwischen 22:00 Uhr und 07:00 Uhr aktiv. Bei Regen oder Wind werden die Fenster geschlossen, die Lüftungsanlage bleibt aber aktiv.

Der Vorteil der hier verwendeten Antriebe gegenüber anderen Systemen zur motorischen Fensteröffnung liegt darin, dass die für das Passivhauskonzept und den Schallschutz nötige vollständige Dichtigkeit der großen Fenster (180 x 90 cm) gewährleistet bleibt. Der Antrieb verriegelt alle um den Umfang verteilten 10 Pilzzapfen. Das sorgt dafür, dass die Dichtungen gut angepresst werden. Das System hat sich grundsätzlich bewährt. Allerdings ist für die Größe der Fenster der Antrieb etwas zu schwach. Es ist für die Fensterbauer bei jeder



Abbildung 8: Antrieb für die Fensteröffnung

Wartung eine mühsame Einstellarbeit einerseits den Antrieb nicht zu überfordern und andererseits eine vollständige Verriegelung sicherzustellen. Da in den ersten Monaten nach dem Bezug des Gebäudes Undichtigkeiten an den Fenstern aufgefallen sind, wurden im ersten Winter raumseitige Thermografieaufnahmen von allen Fenstern erstellt. Dabei sind schwerpunktmäßig an den Scharnierseiten der motorisch zu öffnenden Fenster undichte Stellen gefunden worden (vgl. Abbildung 9). Um dem Fensterantrieb nicht ein zu hohes Drehmoment abzufordern, sind die Verriegelungen zu locker eingestellt worden. Durch exakteres Einstellen und auch eine wachsende Erfahrung der Fensterbaufirma konnten diese Probleme weitgehend behoben werden.

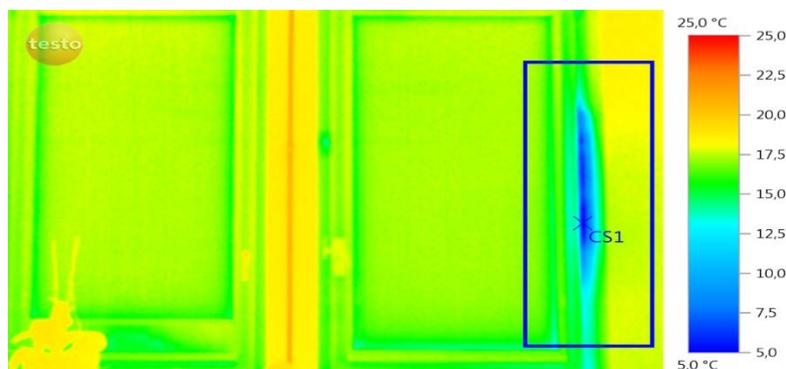


Abbildung 9: Innenthermographie eines Bürofensters

Das System der passiven Nachtlüftung weist aber folgende „Grenzen“ auf, die jedoch tolerabel sind:

- In Tropennächten, wenn die Außentemperatur nicht unter 20 °C sinkt, ist die Wirkung naturgemäß gering.
- Bei absoluter Windstille ist die Thermik der einzige Antrieb für den Luftaustausch. Das 1. OG kühlt dann stärker aus als das 2. OG.
- Voraussetzung: Alle Innentüren müssen geöffnet sein (Querlüftung). Das ist z. B. ein Problem bei Büros, die aus Datenschutz-Sicherheitsgründen geschlossen bleiben müssen.

#### Aktive Nachtkühlung:

Die Lüftungsanlage unterstützt die Nachtkühlung. Da im Erdgeschoss aus sicherheitstechnischen Gründen keine Fenster geöffnet werden dürfen, muss hier die Lüftungsanlage die kühlere Außenluft in die Räume transportieren. Gleichzeitig zum Öffnen der Fenster zur passiven Nachtkühlung schaltet die Lüftungsanlage ein, um auch die Erdgeschossräume durchzulüften. Der Volumenstrom der sommerlichen Nachtlüftung beträgt 3.000 m<sup>3</sup>/h.

## **3.7 Beleuchtung**

### **3.7.1 Tageslicht**

Die hohen Fenster der Büros gewährleisten tagsüber im Normalfall eine ausreichende Beleuchtung der Arbeitsplätze. Auf der Südseite wurde es durch automatische Jalousien möglich, die unerwünschten Wärmeeinträge zu vermindern und trotzdem die Zimmer mit Tageslicht zu beleuchten. Die Präsenzmelder der Beleuchtungssteuerung unterscheiden dabei zwischen genutzten und nicht genutzten Räumen. Wird ein Raum benutzt, fährt die Steuerung die Jalousien selbsttätig auf eine Stellung, die Licht in den Raum lässt, jedoch direkte Sonneneinstrahlung verhindert. Wird der Raum verlassen, schließen sich die Jalousien nach einer Weile vollständig. In Abbildung 10 sind die verschiedenen Stellungen der Jalousien dargestellt.

### Verschattung durch Jalousien

- ▶ Bei Abwesenheit: komplett geschlossen
- ▶ Bei Anwesenheit: Lichtlenkung zur Beleuchtung der Räume und Cut-Off für Blickkontakt nach außen

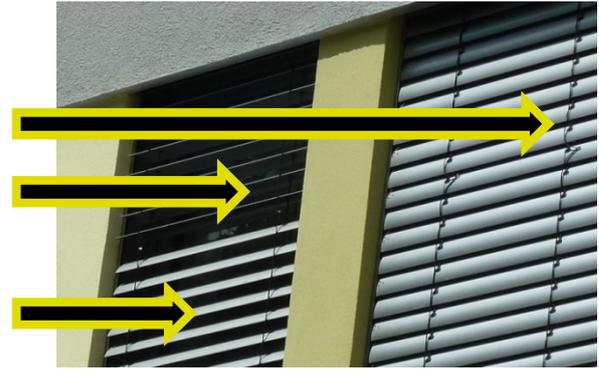


Abbildung 10: Mögliche Stellungen der Jalousie

### 3.7.2 Kunstlicht

Reicht das Tageslicht nicht aus, können manuell zwei Leuchtstofflampen mit je 2x35 W zugeschaltet werden. Damit wird eine Beleuchtung der Arbeitsplätze mit mindestens 500 Lux gewährleistet. Die Präsenzmelder schalten ab, wenn 10 Minuten lang keine Anwesenheit detektiert wurde.

Die Schaltung der Beleuchtung der Verkehrsflächen und in den Sanitärräumen erfolgt ausschließlich über Dämmerungsschalter und Bewegungsmelder. Wird ca. 2 Minuten lang keine Personenbewegung erfasst, schaltet die Beleuchtung ab. Im Flur des 2. OG wurden die vor der Sanierung eingebauten Leuchtstofflampen mit konventionellem Vorschaltgerät belassen. Es stellte sich jedoch heraus, dass diese Bauart den häufigen Schaltungen durch die Präsenzmelder nicht standhielt. Auch eine Umrüstung mit elektronischen Startern brachte keinen Erfolg. Die Leuchten fielen häufig aus. Deshalb wurden schließlich LED-Leuchten installiert, die keinerlei Probleme mit häufigen Schaltvorgängen haben.

Wie in den Büros werden alle Schaltbefehle über einen EIB-Bus übertragen. So ist ein Zusammenwirken von Jalousien, Wetterstation und Beleuchtungssteuerung möglich. Nachteilig an diesem System ist die mangelnde Rückmeldung an den Gebäudenutzer. Nicht immer ist ersichtlich, warum eine Aktion gerade ausgeführt wird. Zum Beispiel kann trotz Sonnenschein die Jalousie hochfahren, weil der Windsensor eine zu hohe Luftgeschwindigkeit gemessen hat. Trotz einer notwendigen Aktion der Anlage fühlt sich der Nutzer ggf. bevorzundet.

## 3.8 Serverkühlung

Auch die Kühlung des Serverraums mit einer Dauer-Wärmelast von ca. 1 kW wird ohne aktive Kühlung gewährleistet. Zur überwiegenden Zeit des Jahres machen die Außentemperaturen die Wärmeabfuhr mit Außenluft möglich. Ansonsten bietet der zum Erdreich hin unge-

dämmte Keller, der sich außerhalb der thermischen Hülle befindet, gute Voraussetzungen zur Aufnahme bzw. Abgabe der Wärme an das Erdreich. Die Serverraumlüftung hat dementsprechend 3 Betriebsmodi (vgl. Abbildung 11).

- Betrieb mit Außenluft direkt bei Außentemperaturen  $T_{\text{(außen)}} \leq 22 \text{ °C}$ :  
Außenluft wird direkt in den Raum eingebracht, strömt von unten in den Serverschrank und wird oben im Serverschrank abgesaugt.
- Betrieb mit Außenluft indirekt bei Außentemperaturen  $22 \text{ °C} < T_{\text{(außen)}} \leq 30 \text{ °C}$  und einer relativen Raumluftfeuchte  $\varphi \leq 75 \%$ :  
Die Außenluft durchströmt drei unbeheizte und ungedämmte Kellerräume und wird dadurch abgekühlt bevor sie in den Serverraum strömt.
- Umluftbetrieb bei  $T_{\text{(außen)}} > 30 \text{ °C}$  oder  $\varphi > 75 \%$ :  
Die Kühlung des Serverschranks erfolgt im Umluftbetrieb durch die Kellerräume. Die überschüssige Wärme wird an die Kellerwände und den Fußboden der drei durchströmten Räume abgegeben.

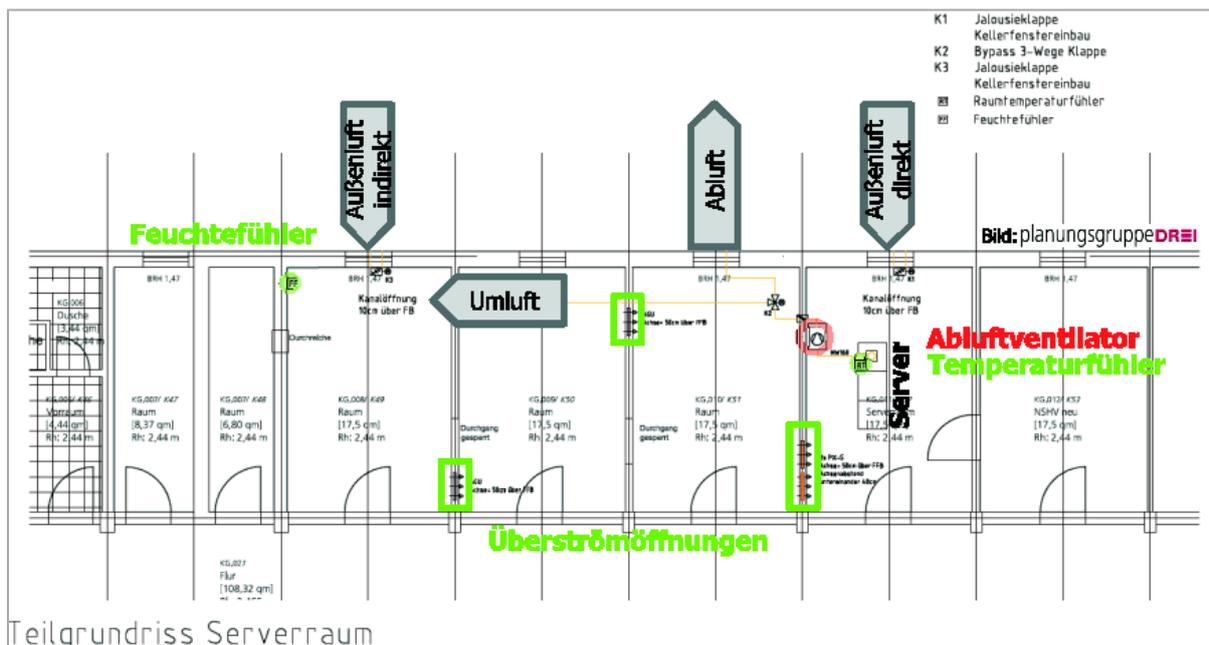


Abbildung 11: Luftführung Serverkühlung (Quelle: planungsgruppe Drei, bearbeitet IWU)

Ziel ist es, die Temperatur im Serverschrank (Schrank Mitte) auf ca.  $28 \text{ °C}$  zu begrenzen. Dieser Wert wurde mit dem Hersteller abgestimmt.

Das ursprüngliche Konzept besaß nur einen aktiven Abluftventilator, der die warme Luft aus dem Serverschrank absaugte und je nach Betriebsmodus nach außen oder in den Keller leitete. Die Außenluftzufuhr erfolgte rein passiv über Nachstromöffnungen, die mit einer motorischen Lüftungsklappe geöffnet bzw. verschlossen wurden. Die Abluftanlage hat eine gemessene elektrische Leistungsaufnahme von lediglich  $40 \text{ W}$ .

Voraussetzung für einen funktionierenden Abluftbetrieb ist eine Ansaugung der Außenluft durch die Außenluftöffnung im Serverraum direkt bzw. durch den Keller indirekt. Der abgesaugte Volumenstrom aus dem Serverschrank lag bei  $140 \text{ m}^3/\text{h}$ , der Volumenstrom der angesaugten Außenluft ohne Filter in der Außenluftöffnung bei  $40 \text{ m}^3/\text{h}$ , mit Filter nur bei  $20 \text{ m}^3/\text{h}$ . Aufgrund der Undichtigkeiten des Serverraumes zu den Nachbarräumen und zum Kellerflur wurde somit mehr Luft aus den Nachbarräumen angesaugt als von außen. Die Druckverluste der Filter waren deutlich höher als der durch die Undichtigkeiten der Keller Räume. Auch nachträgliche Abdichtungen der z. T. 3 cm hohen Türspalte ergaben nicht die gewünschte Verbesserung beim angesaugten Außenluftvolumenstrom.

Aus diesem Grund wurde zusätzlich je ein Ventilator in die Außenluftöffnungen eingebaut. Die Ventilatoren stellen einen Außenluftvolumenstrom von rund  $215 \text{ m}^3/\text{h}$  (gemessen) sicher. Diese Kombination funktionierte bis zur Erweiterung der IT im Serverraum sehr zuverlässig.

Im Herbst 2017 wurde die IT-Hardware im IWU erweitert, was zu einer Erhöhung der Leistung im Serverraum um ca. 500 W führte. Die neuen Komponenten erlauben überwiegend Temperaturen bis  $40 \text{ }^\circ\text{C}$ , allerdings konnte nicht bei allen eine Spezifizierung über  $35 \text{ }^\circ\text{C}$  Maximaltemperatur gefunden werden. Demzufolge muss der Volumenstrom erhöht werden, um die zusätzliche Wärme abzuführen. Zudem ist die Temperaturverteilung im Serverschrank sehr unterschiedlich. Zum einen steigt die Temperatur von unten nach oben kontinuierlich je nach Wärmeabgabe der eingebauten Komponenten an. Zum anderen saugen viele Geräte die Luft zum Kühlen auf der Vorderseite an und geben diese erwärmte Luft an der Rückseite wieder ab. Dadurch variiert die Temperatur je nach Einbausituation im Serverschrank stark, und die reale Umgebungstemperatur der Komponenten ist schwer zu bestimmen.

Abbildung 12 zeigt in Abhängigkeit der Serverleistung den errechneten erforderlichen Volumenstrom für verschiedene jahreszeitlich abhängige Betriebstemperaturen. Bei kleiner werdenden Temperaturdifferenzen im Sommer muss der nötige Volumenstrom zur Abfuhr der Wärme entsprechend ansteigen.

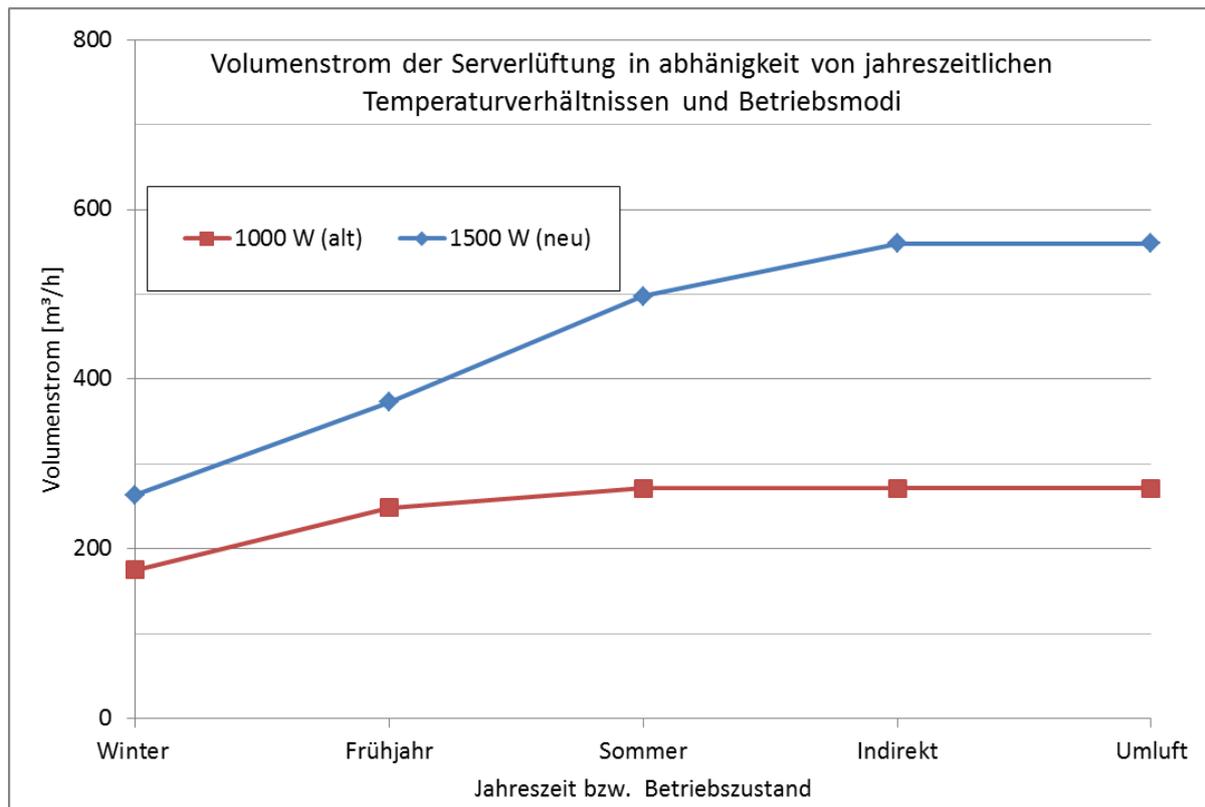


Abbildung 12: Erforderlicher rechnerischer Volumenstrom im Abluftbetrieb direkt und indirekt in Abhängigkeit von Serverleistung und jahreszeitlichen Temperaturverhältnissen

Um die neuen Anforderungen zu erfüllen und auch auf zukünftige Erweiterungen des Servers vorbereitet zu sein, wurde das Kühlkonzept leicht überarbeitet.

Schon in der Umbauphase wurde der Abluftvolumenstrom des Serverschranks auf der maximalen Einstellung des Abluftlüfters von 290 m<sup>3</sup>/h betrieben. Zudem wurden alle Außenluftgitter, die nicht ohne Teilmontage der Anlagen zugänglich sind, gereinigt und da sie sich stark zugesetzt hatten gegen grobmaschigere Gitter ausgetauscht. Der Außenluftventilator für die indirekte Belüftung wurde auf Stufe 2 umgestellt, so dass ein höherer Volumenstrom durch den Keller gewährleistet wurde.

Das überarbeitete Lüftungskonzept sieht einen deutlich leistungsfähigeren Abluftlüfter für den Serverschrank vor. Der neue Lüfter hat eine max. Luftleistung von 800 m<sup>3</sup>/h (freiblassend) und wird über einen Temperatursensor im Serverschrank stufenlos angesteuert. Der Außenluftlüfter im Serverraum hat einen Zweistufenschalter erhalten. Ab einer festgelegten Raumtemperatur im Serverraum (ca. 23 °C) wird der Außenluftventilator auf Stufe 2 geschaltet. Dies soll dazu beitragen den Serverraum im Sommer nachts schneller wieder abzukühlen, wenn die Außenlufttemperaturen entsprechend gesunken sind. Zudem wurde die Anzahl der Überstromöffnungen zwischen den Kellerräumen verdoppelt, um eine bessere Durchströmung zu gewährleisten. Das Ungleichgewicht von Abluft- zu Außenluftvolumenstrom wurde bewusst mit eingeplant. Der zusätzliche Volumenstrom wird durch die undich-

ten Kellertüren und dichtungslosen Kellerfenster mit Überströmraum Kellerflur bereitgestellt. Da die Temperatur des Kellerflurs im Jahresverlauf zwischen 20 °C im Winter und 23 °C im Sommer schwankt und der Abluftlüfter bedarfsgerecht betrieben wird, stellt dieser sozusagen den Notfallpuffer dar.

Durch Verzögerungen in der Genehmigung und Umsetzungsphase erfolgte die Umrüstung erst im Herbst 2018 nach dem sehr heißen Sommer. Auch im Sommer 2018 lief der Server bei maximalen Ablufttemperaturen aus dem Serverraum von bis zu 38 °C problemlos durch.

## 4 Energie Monitoring

Die Sanierung eines alten Bürogebäudes mit Passivhauskomponenten ist ein bisher sehr selten praktiziertes Konzept. Deshalb sollte im Detail überprüft werden, ob alle theoretisch berechneten Einsparungen auch in der Praxis realisiert werden können, und falls sich Abweichungen ergeben, wodurch diese verursacht sind.

### 4.1 Messkonzept

Abbildung 13 stellt das realisierte Messkonzept im IWU-Haus dar.

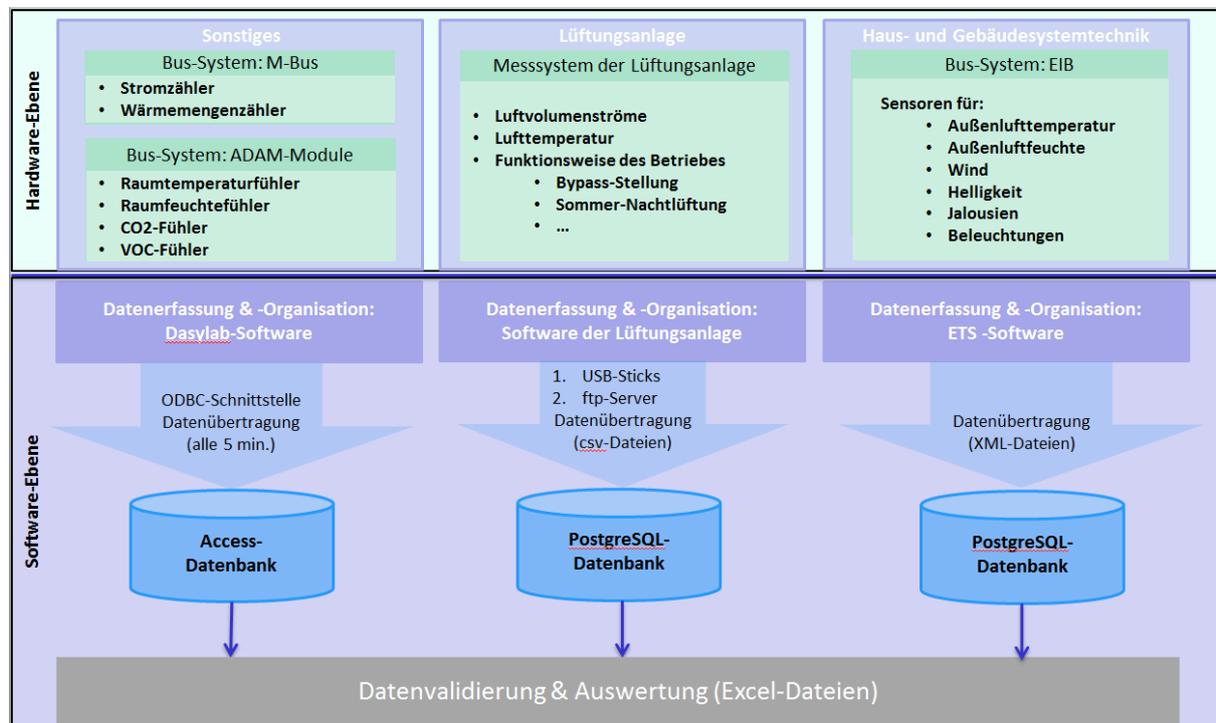
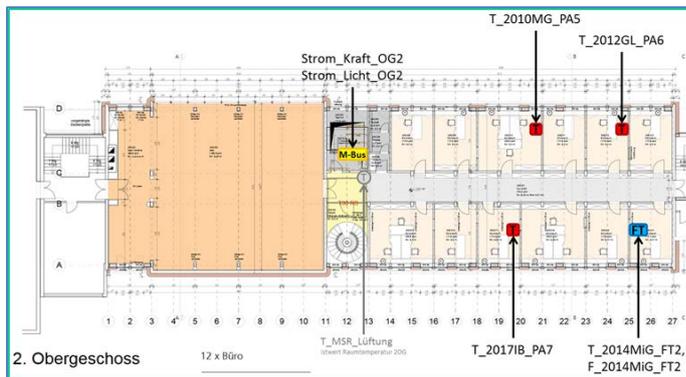


Abbildung 13: Grafische Darstellung des Messkonzeptes

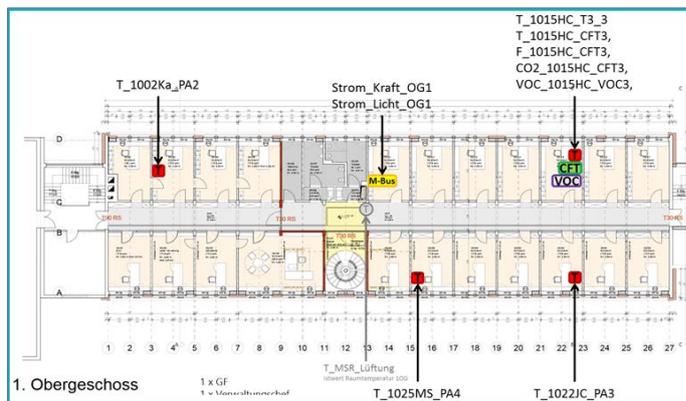
Die Grafik verdeutlicht, dass die Messtechnik den von den Lieferfirmen der haustechnischen Komponenten verwendeten Systemen angepasst werden musste, weshalb eine Messtechnik „aus einem Guss“ nicht realisiert werden konnte. Während die Beleuchtungssteuerung und die Wetterstation den EIB-Bus verwenden, nutzt der Hersteller der Lüftungsanlage seine

Regelung mit eigener Software und einer Datensicherung auf USB-Speichersticks. Die Zähler für Strom und Wärmemengen nutzen den M-Bus, und für die Erfassung von Ist-Werten im Gebäude (Temperatur, Luftfeucht und VOC) wird das Bus-System des Computernetzwerkes im Haus verwendet. Über das Programm DASYLAB können diese Werte aktuell eingesehen und für die Betriebsführung genutzt werden. In Abbildung 14 sind die Sensoren inkl. Lage aufgeführt, die über den M-Bus ausgelesen werden. Alle Messdaten werden in Datenbanken gesammelt und nach Bedarf in EXCEL ausgewertet.



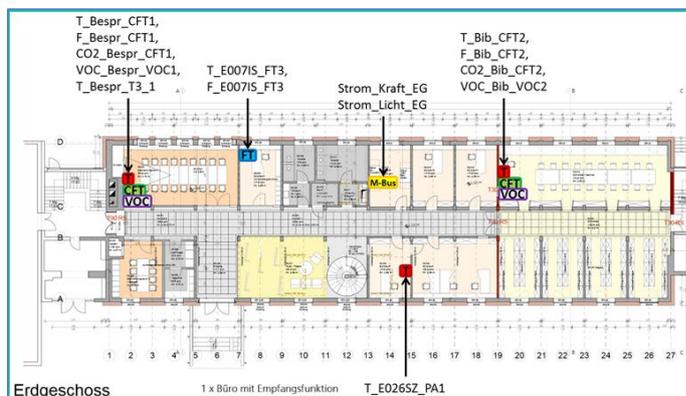
2. Obergeschoss (8 Sensoren):

- 5 Temperaturfühler
- 1 Feuchtefühler
- 2 CO<sub>2</sub>-Fühler
- 2 VOC-Fühler
- 1 Stromzähler für Beleuchtung
- 1 Stromzähler für Sonstiges



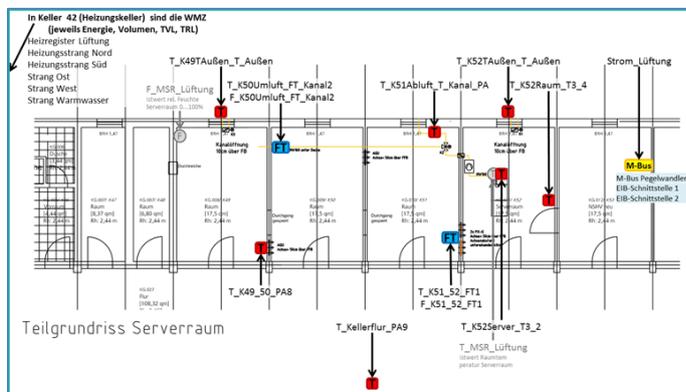
1. Obergeschoss (11 Sensoren):

- 6 Temperaturfühler
- 1 Feuchtefühler
- 1 CO<sub>2</sub>-Fühler
- 1 VOC-Fühler
- 1 Stromzähler für Beleuchtung
- 1 Stromzähler für Sonstiges



Erdgeschoss (15 Sensoren):

- 6 Temperaturfühler
- 3 Feuchtefühler
- 2 CO<sub>2</sub>-Fühler
- 2 VOC-Fühler
- 1 Stromzähler für Beleuchtung
- 1 Stromzähler für Sonstiges



Kellergeschoss (18 Sensoren):

- 9 Temperaturfühler
- 2 Feuchtefühler
- 1 Stromzähler für Lüftung
- 6 WMZ für Heizung
- 1 WMZ Heizregister Lüftung
- 2 WMZ Nord- & Süd-Strang
- 2 WMZ Ost- und West-Strang
- 1 WMZ Warmwasser

Abbildung 14: Lage der installierten Messsensoren zur Erfassung der Temperatur, Luftfeucht, VOC sowie der Energiemengen für Wärme und Strom (Quelle: planungsgruppe Drei, bearbeitet IWU)

### Messdatenerfassung Heizung

Die oben beschriebene Heizanlage versorgt den von IWU genutzten Gebäudeteil über einen Nord- und einen Südstrang, an welchen die Bestandsheizkörper angeschlossen sind. Neu eingebaut wurde ein weiterer Strang für die Versorgung des Heizregisters in der Lüftungsanlage. In allen drei Strängen wurde ein Wärmemengenzähler eingebaut, welcher eine Aufteilung des Gesamtverbrauchs auf Teilbereiche ermöglicht.

### Lüftung

Schaltzustände, Volumenströme und Temperaturen werden von der Regelung der Lüftungsanlage protokolliert und als 5-Minuten-Mittelwert abgespeichert. Die passive Nachtlüftung über die gekippten Fenster wird ebenfalls von dieser Regelung geschaltet und protokolliert. Manuelle Fensteröffnungszeiten können dagegen nicht erfasst werden.

### Kühlung

Die Kühlung des Servers mit Kellerluft wird gleichfalls von der Regelung der Lüftungsanlage gesteuert und protokolliert. Zudem werden Temperaturen in den durchströmten Kellerräumen, in den Lüftungskanälen, den Ansaugöffnungen in den Lichtschächten sowie die Luftfeuchte im Keller durch zusätzliche Fühler gemessen, die über die ADAM-Module ausgelesen werden. Der Stromverbrauch der Lüfter ist in dem Wert des Unterzählers für die Lüftungsanlage enthalten.

### Beleuchtung und sonstige Stromverbraucher

Über elektrische Unterzähler in den Verteilschränken der Stockwerke werden die Energiemengen für die Anwendungen „Licht“ und „Steckdosen“ getrennt gemessen und über den M-Bus als 5-Minuten-Mittelwert in der Datenbank abgelegt.

## 5 Ergebnisse des Monitorings

Zielsetzung des Energie-Monitorings ist zu zeigen, dass die geplanten Energieeinsparungen bzw. vorgegeben Grenzwerte bei der Umsetzung des Energiekonzepts in der Tat erreicht wurden. Das Modernisierungsvorhaben des IWU-Hauses wurde im Rahmen des Förderprogramms „*Förderung der energetisch optimierten Modernisierung von kommunalen Wohngebäuden sowie von ausgewählten Nichtwohngebäuden (Verwaltungsgebäude, Schulen, Kindergärten und -tagesstätten, Sporthallen in Verbindung mit Schulen) mit passivhaustauglichen Komponenten*“<sup>3</sup> gefördert.

Voraussetzung für eine Förderung nach diesem Programm ist, dass die Investitionsmaßnahmen geeignet sind, einen jährlichen Heizwärmebedarf des Gebäudes von maximal 25 kWh pro Quadratmeter (Energiebezugsfläche<sup>4</sup>) zu erreichen.

### 5.1 Energiebilanzen

#### 5.1.1 Energiebezugsfläche

Bevor die Ergebnisse der Energiebilanzen, die im Rahmen der Gebäudemodernisierung aufgestellt sind, gezeigt und diskutiert werden, werden vorerst die hierzu unterschiedlich ermittelten Energiebezugsflächen (Nettogrundflächen) des Gebäudes anhand von Tabelle 4 dargestellt.

Nach Tabelle 4 wird bei der Energiebilanzberechnung nach dem Passivhaus-Projektierungspaket (PHPP) als Energiebezugsfläche 1.552 m<sup>2</sup> und nach EnEV-Berechnung 1.690 m<sup>2</sup> verwendet. Die Differenz resultiert aus der anteiligen Berücksichtigung der Verkehrsflächen bzw. Technikräume innerhalb der thermischen Hülle gemäß PHPP.

Für die Ergebnisse im Rahmen des Energie-Monitorings wurde jedoch 1.500 m<sup>2</sup> zugrunde gelegt<sup>5</sup>. Um die Ergebnisse der vorgenannten Bilanzberechnungen mit den gemessenen Energieverbräuchen vergleichen zu können, werden die Umrechnungsfaktoren nach Tabelle 4 herangezogen.

---

<sup>3</sup> nach Teil II der Richtlinien des Landes Hessen zur Förderung nach §§ 4 bis 8 des Hessischen Energiegesetzes

<sup>4</sup> Wenn explizit keine Energiebezugsfläche zur Bildung der Energiekennwerte im Rahmen des vorliegenden Forschungsberichts angegeben wird, wird hierzu eine Nettogrundfläche von 1.500 m<sup>2</sup> zugrunde gelegt (siehe Tabelle 4).

<sup>5</sup> Der Unterschied besteht aus ursprünglich geplanten Verkehrsflächen im 2. OG, die mittlerweile als ein Teil des Saals fungieren. Zudem wird das Treppenhaus innerhalb der thermischen Hülle nicht berücksichtigt.

Tabelle 4: Flächenermittlung: Nettogrund- und Energiebezugsflächen

Energiebezugsflächen (EBF), in m <sup>2</sup>				
Geschoss- Bezeichnung	gemäß EnEV		gemäß PHPP	
	verwendet für Energiepass gemäß EnEV	ohne Berücksichtigung des Saals im 2. OG	verwendet für Energiepass gemäß PHPP	verwendet für Energie- Monitoring
Untergeschoss	0,00	0,00	0,00	0,00
Erdgeschoss	556	556	508	491
1. Obergeschoss	566	566	521	503
2. Obergeschoss	568	360	523	506
<b>SUMME</b>	<b>1.690</b>	<b>1.482</b>	<b>1.552</b>	<b>1.500</b>
Umrechnungsfaktor	1,13	0,99	1,03	<b>1,00</b>

### 5.1.2 gemessener Verbrauch Wärme

Abbildung 15 und Abbildung 16 stellen die monatlichen Verbräuche für Wärme in den Jahren 2013 und 2014 dar. Aus den Abbildungen geht hervor, dass die Südseite weniger Heizwärme als die Nordseite benötigt.

Die Gründe hierfür sind einerseits, dass der Nordstrang der Wärmeverteilung einen größeren Bereich des Gebäudes (insbesondere den ca. 210 m<sup>2</sup> großen Saal) mit Wärme versorgt. Zudem ist in dem auf der Südseite vorhandenen Treppenhaus (etwa 50 m<sup>2</sup>) kein Heizkörper installiert.

Des Weiteren werden die Heizkörper in einem großen Bereich des Erdgeschosses wie dem Foyer (56 m<sup>2</sup>) und der Bibliothek (etwa 70 m<sup>2</sup>), die sich ebenfalls auf der Südseite befinden und nur gelegentlich benutzt werden, selten aufgedreht.

Ein wichtiger Grund besteht zudem darin, dass in der Heizperiode die Steuerung der Jalousien (Südseite) auf manuell umgeschaltet wird, um die solaren Einstrahlungen für die Beheizung des Gebäudes optimal verwenden zu können. Daher werden die Heizkörper in den auf der Südseite befindlichen Büros kaum angestellt.

Aus Abbildung 15 und Abbildung 16 ist weiterhin zu entnehmen, dass der Wärmeverbrauch für die Heizregister der Lüftungsanlage vergleichsweise sehr gering ausfällt.

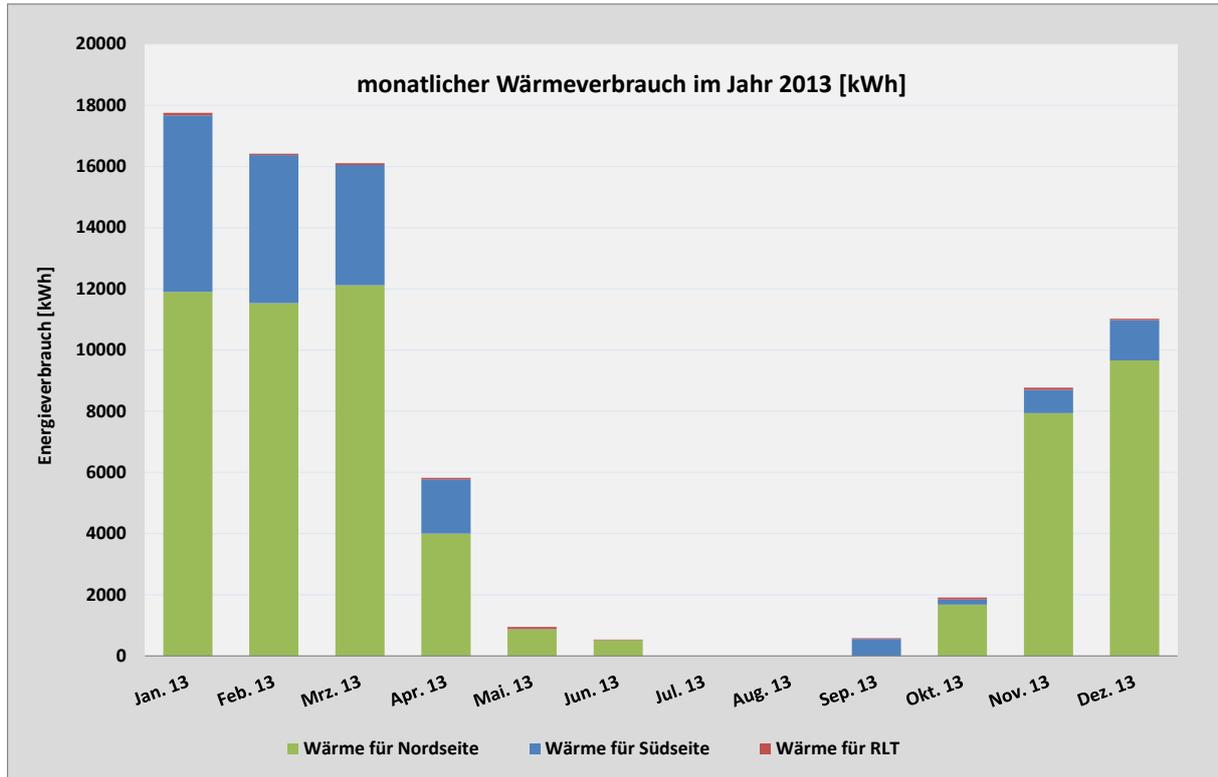


Abbildung 15: Monatlicher Wärmeverbrauch im Jahr 2013

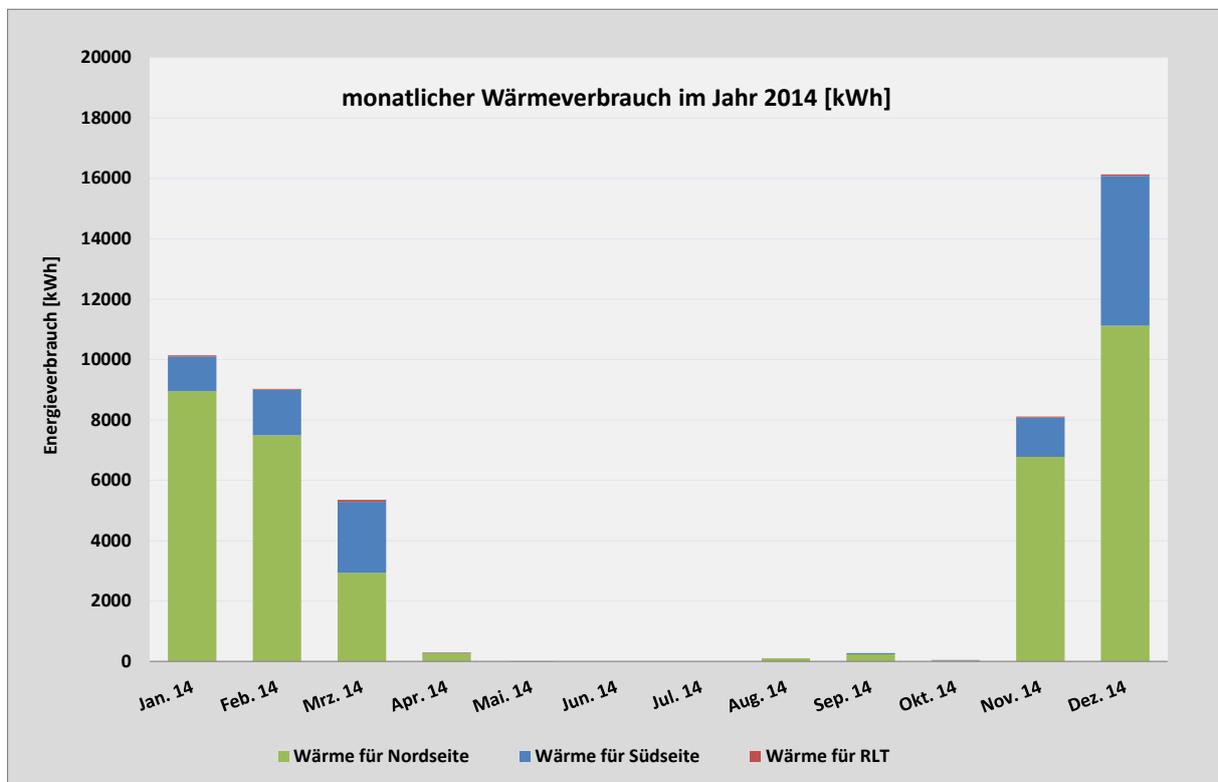


Abbildung 16: Monatlicher Wärmeverbrauch im Jahr 2014

Sollen die Wärmeverbräuche von 2013 und 2014 miteinander verglichen werden, müssen die Messdaten vorerst von Klima- und Witterungseinflüssen bereinigt werden.

Zu diesem Zweck können die Heizgradtage (G) nach VDI 3807 verwendet werden. Sie spiegeln die Heizlast eines konkreten Gebäudes wider und berücksichtigen die Wärmedämmung des Gebäudes sowie Wärmezuflüsse aus anderen Quellen als der Heizung.

Abbildung 17 stellt die Heizgradtage für das Jahr 2012 bis 2014 sowie die langjährigen Heizgradtage von 1970 bis 2014 als Durchschnittsjahr dar. Es ist ersichtlich, dass das Jahr 2014 im Vergleich zum Jahr 2013 ein sehr mildes Jahr war. Aus diesem Grund folgen die gemessenen monatlichen Wärmeverbräuche nach Abbildung 15 und Abbildung 16 diesem Trend.

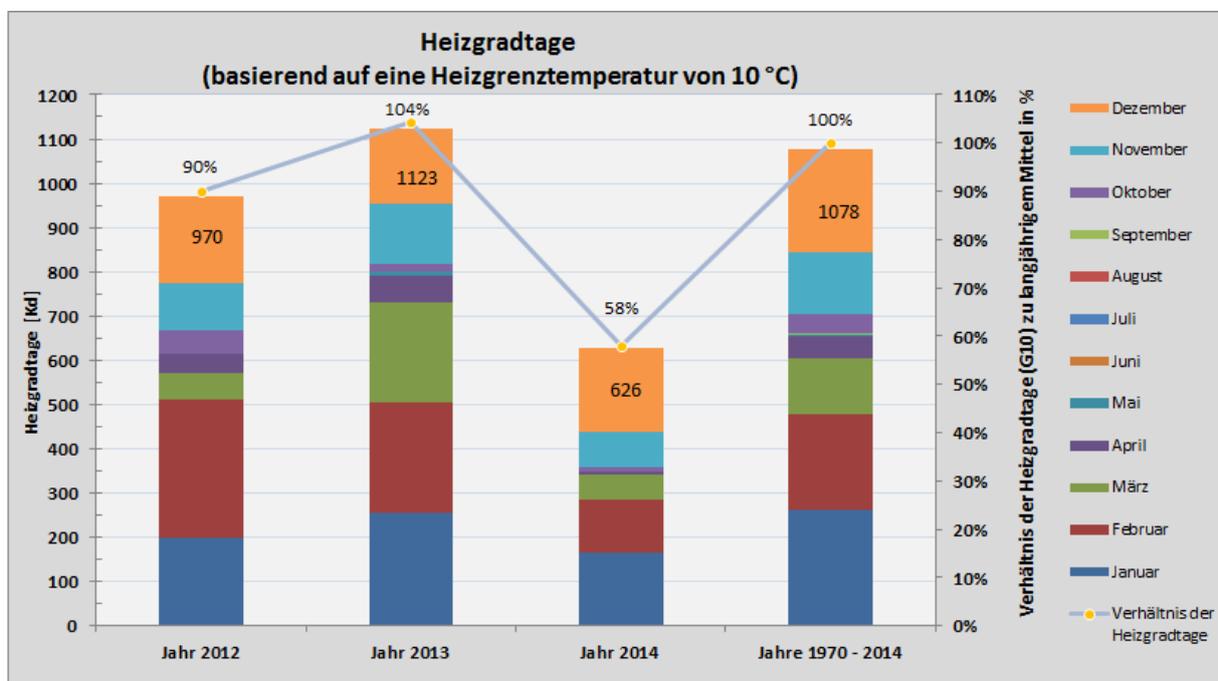


Abbildung 17: Heizgradtage für das Jahr 2012 bis 2014 (basierend auf einer Heizgrenztemperatur von 10 °C)

Bezogen auf die gesamte Energiebezugsfläche des Gebäudes (1.500 m<sup>2</sup>) zeigt Abbildung 18 schließlich den klimabereinigten spez. Jahresverbrauch an Heizwärme für das Jahr 2013 (57,5 kWh/m<sup>2</sup>a) und 2014 (45,23 kWh/m<sup>2</sup>a).

Im Vergleich zum Jahr 2013 wurde der Wärmeverbrauch im Jahr 2014 um 21 % reduziert. Als Grund hierfür kann u. a. Folgendes genannt werden:

- höhere solare Gewinne im Winter 2014,
- energiebewusstes Verhalten der Gebäudenutzer wie ausgefeilte Handhabung mit der Steuerung der Jalousien bzw. Heizungsthermostate,

- die u. a. im Jahr 2014 stattgefundenen Betriebsoptimierungen:
  - Absenkung der unkontrollierten Wärmeverluste von alten und nicht gedämmten Steigrohren durch das Schließen der Strangregulierventile zum Absperren einzelner Leitungsabschnitte zum Entlüftungsstrang<sup>6</sup>,
  - Nachjustierung der Luftdichtheit der Fenster sowie
  - manuelle Ein- und Ausschaltung der Umwälzpumpen der Heizungsstränge Nord und Süd in der Übergangszeit im Herbst und Frühjahr nach Bedarf, um die Wärmeverluste der Verteilung zu reduzieren.

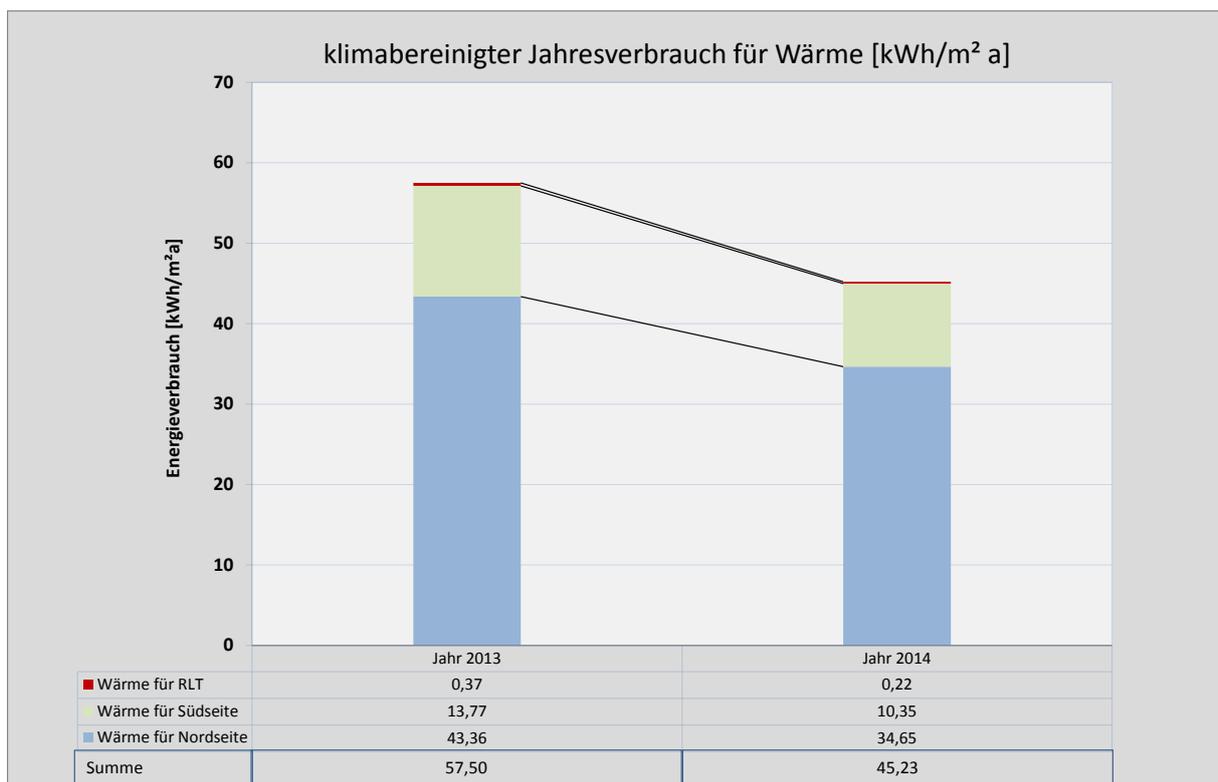


Abbildung 18: Vergleich des klimabereinigten Heizwärmeverbrauchs

Werden abschließend die Energieverbräuche vor und nach der Sanierung miteinander verglichen, kann festgestellt werden, dass aufgrund der Sanierungsmaßnahmen der Wärmeverbrauch des Gebäudes durchschnittlich um ca. 83 % (von 299 auf 51 kWh/m<sup>2</sup>a) reduziert wurde (vgl. Abbildung 19). Dies entspricht einer Reduktion der Treibhausgas-Emissionen um 86 % (von 108 auf 16 t/a) infolge der Verbrennung des Erdgases<sup>7</sup>.

<sup>6</sup> Der Entlüftungsstrang erstreckt sich vom Nachbargebäude durch das IWU-Haus zum Heizungsraum im Keller. Im Zuge der Sanierung wurde leider der Zugang zu einigen Ventilen gesperrt. Sie liegen teilweise in den Zwischenwänden.

<sup>7</sup> 240 Gramm CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro 1 kWh Erdgas (gemäß DIN V 18599-1:2018-09)

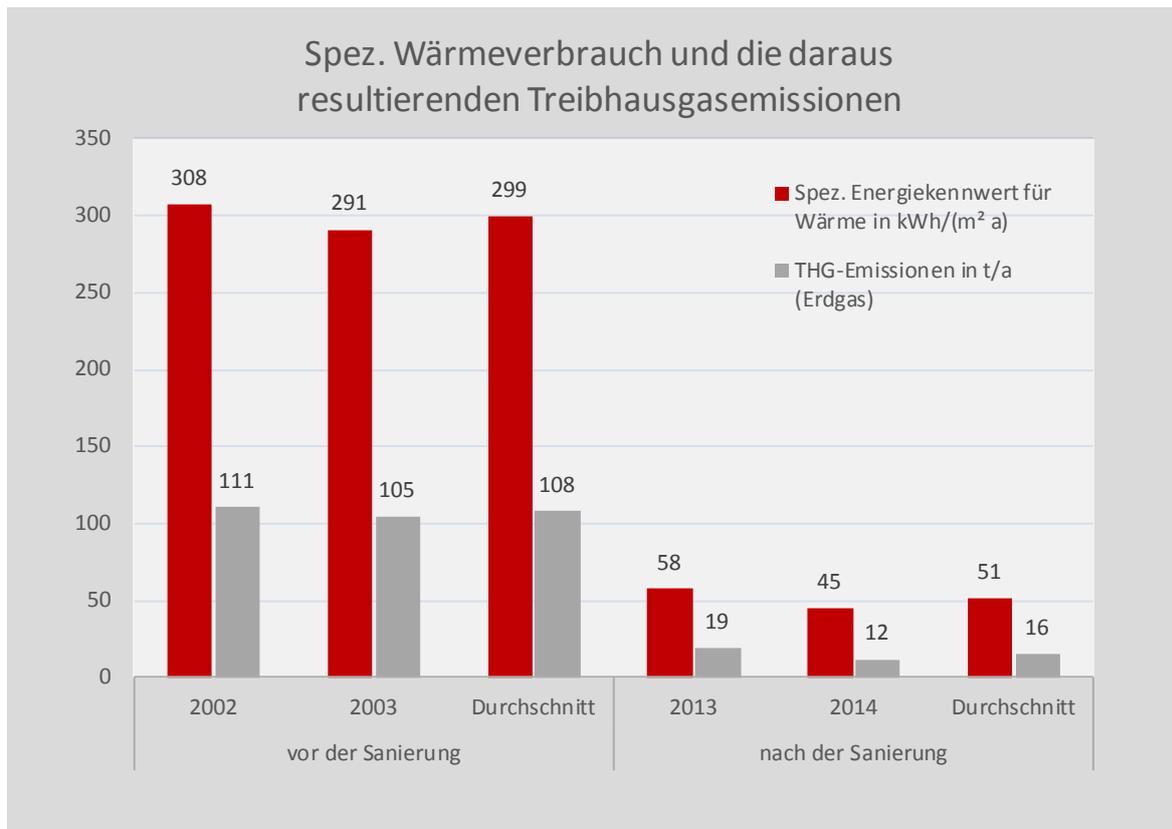


Abbildung 19: Spez. Wärmeverbrauch vor und nach der Sanierung

### 5.1.3 Gemessener Verbrauch elektrischer Energie

Abbildung 20 und Abbildung 21 stellen die monatlichen Verbräuche für elektrische Energie in den Jahren 2013 und 2014 dar.

Für jedes Stockwerk wird die elektrische Energie für Beleuchtung und Sonstiges getrennt gemessen. Unter Sonstiges fällt vor allem der Energieverbrauch für Bürogeräte wie z. B. Computer, Monitore, Drucker etc. Der Stromverbrauch der Lüftungsanlage wird separat erfasst.

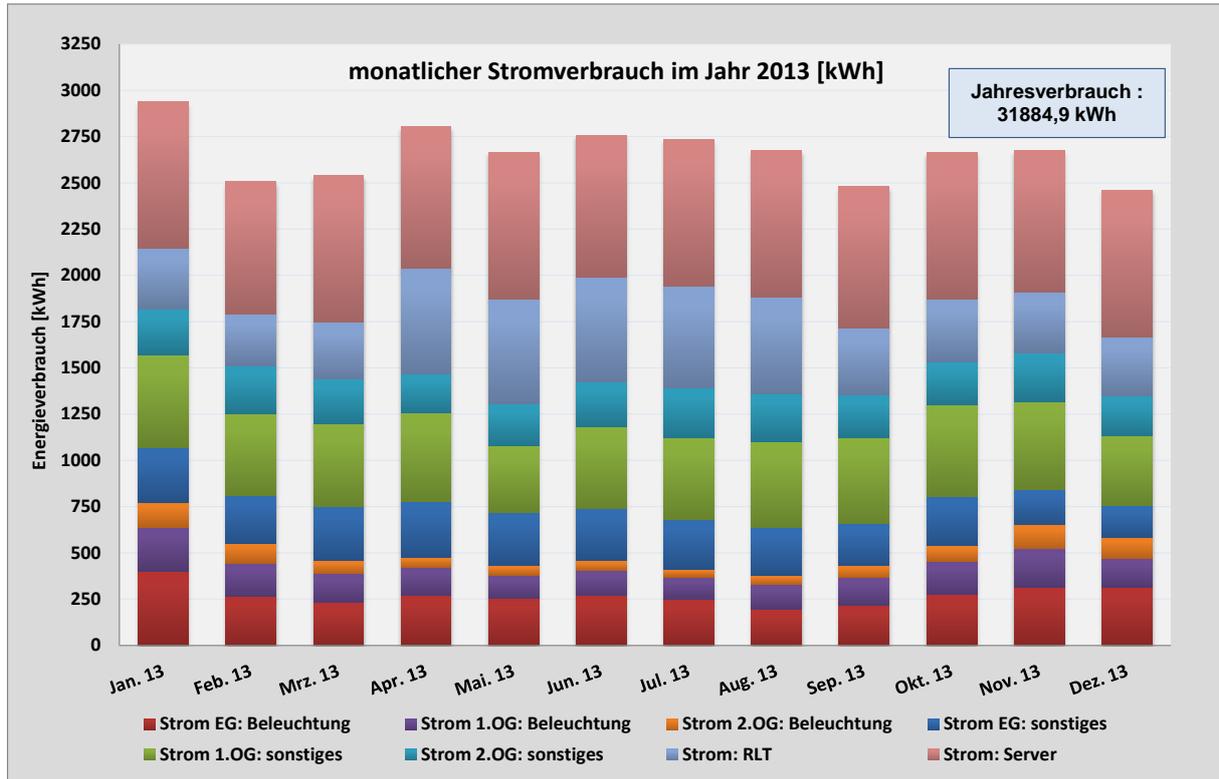


Abbildung 20: Monatlicher Stromverbrauch im Jahr 2013

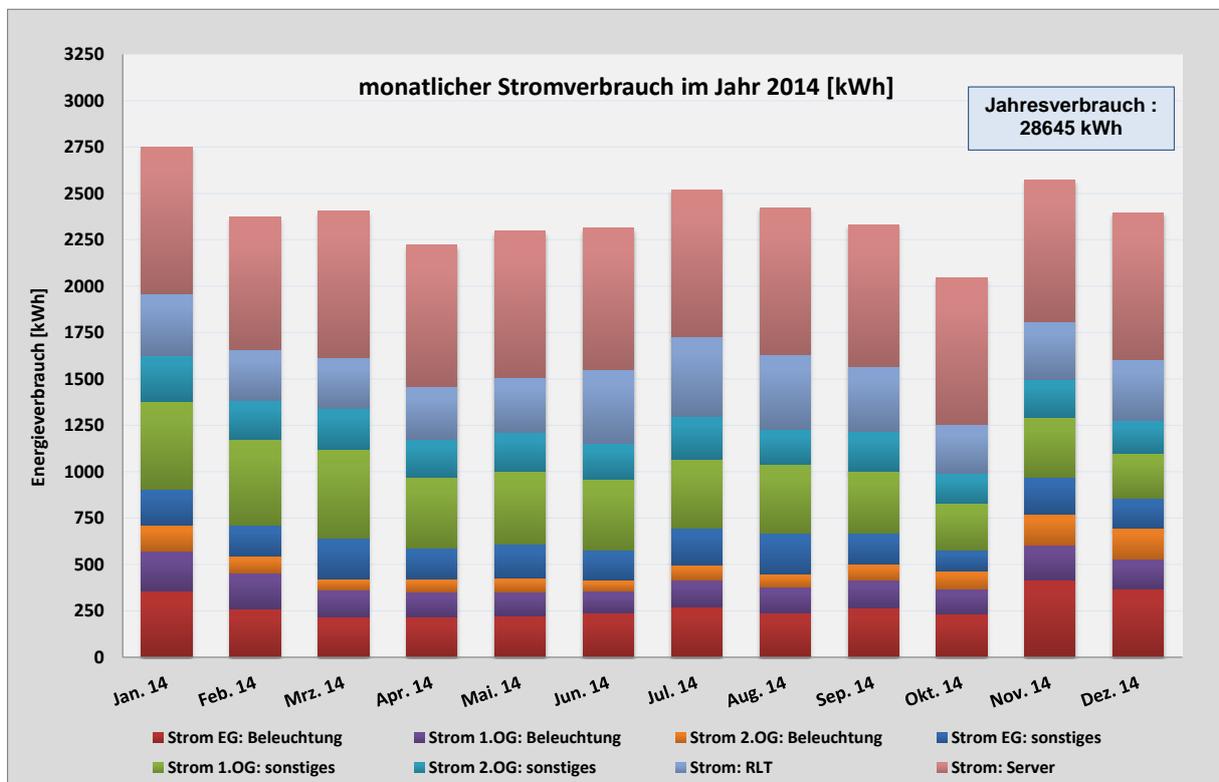


Abbildung 21: Monatlicher Stromverbrauch im Jahr 2014

Der Stromverbrauch der Servereinheiten wurde zudem für eine kurze Zeit gemessen (vgl. Abschnitt 5.2) und auf ein Jahr aggregiert. Er ist über das ganze Jahr relativ konstant und im Vergleich zu den anderen elektrischen Verbräuchen dominant.

Der elektrische Energieverbrauch der Beleuchtung liegt für das Erdgeschoss höher als der der Obergeschosse, obwohl sich im Erdgeschoss wenige Büros befinden. Das liegt daran, dass in den Bereichen Foyer und Bibliothek viele Leuchten installiert sind. In der Bibliothek sind häufig viele Leuchten an, obgleich nur wenige Personen anwesend sind. Trotz der Unterteilung in Schaltgruppen ist die Beleuchtung des Foyers am Tag aufgrund des hohen Personenaufkommens oft aktiviert.

Mit einem spezifischen Verbrauch von 4,2 kWh/(m<sup>2</sup>a) (2014) ist der Stromeinsatz für die Beleuchtung im Gebäude erfreulich gering.

Abbildung 22 stellt den Stromverbrauch für Beleuchtung und Sonstiges aufgeschlüsselt nach Geschossen, dem Stromverbrauch der Server und der Lüftungstechnik im Jahr 2013 und 2014 gegenüber. Aus Abbildung 22 ist ersichtlich, dass sich der Stromverbrauch von „Sonstiges“ vom Jahr 2013 auf 2014 reduziert hat. Als Grund hierfür kann der Austausch von IT Hardware durch energieeffizientere PCs, Monitore sowie Notebooks genannt werden. Der Stromverbrauch der Server bleibt konstant, da dieser nicht kontinuierlich gemessen sondern über eine Kurzzeitmessung, die in Abschnitt 5.2 beschrieben wird, hochgerechnet wurde.

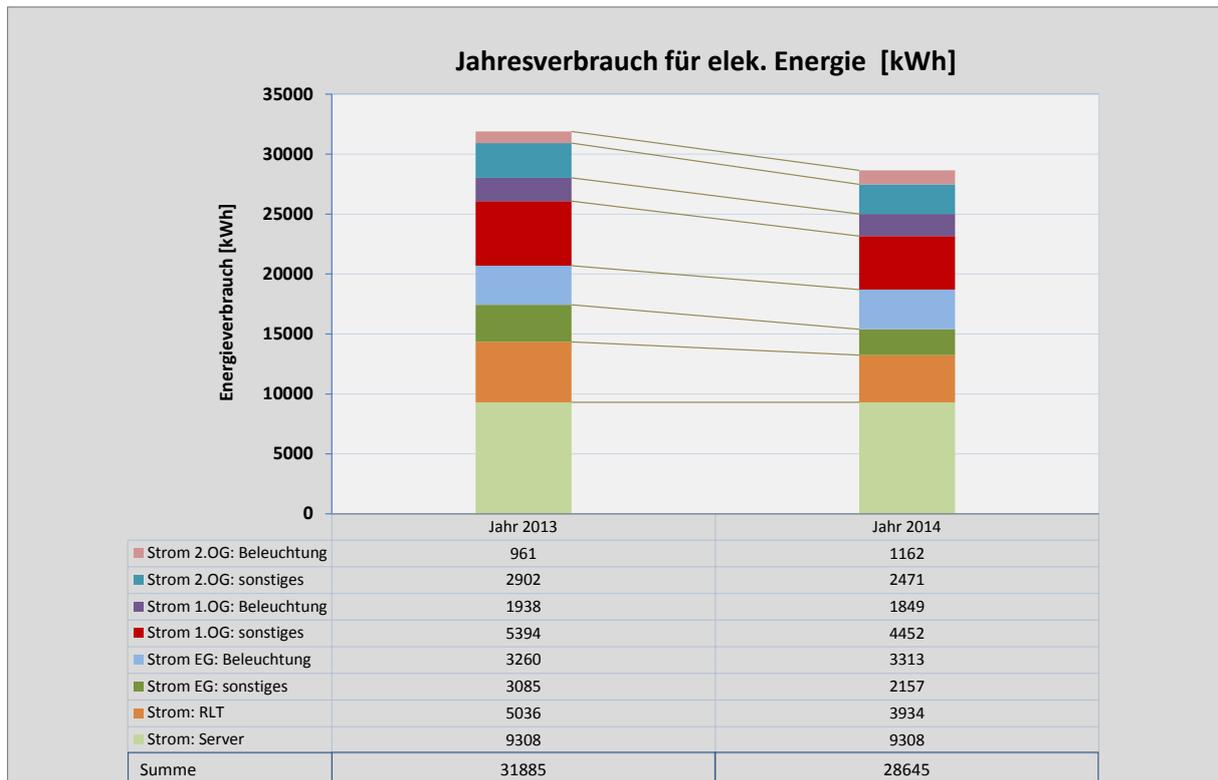


Abbildung 22: Jahresverbrauch der elektrischen Energie Beleuchtung und Sonstiges für das Jahr 2013 und 2014

In Abbildung 23 werden die Energieverbräuche vor und nach der Sanierung miteinander verglichen. Demnach wurde der Stromverbrauch des Gebäudes aufgrund der Sanierungsmaßnahmen durchschnittlich um ca. 73 % (von 73 auf 20 kWh/m<sup>2</sup>a) reduziert. Dies entspricht zudem einer Reduktion der durchschnittlichen Treibhausgas-Emissionen um 73 % (von 61 auf 17 t/a) infolge elektrischer Energie.<sup>8</sup>

<sup>8</sup> 550 Gramm CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro 1 kWh elek. Energie (gemäß DIN V 18599-1:2018-09)

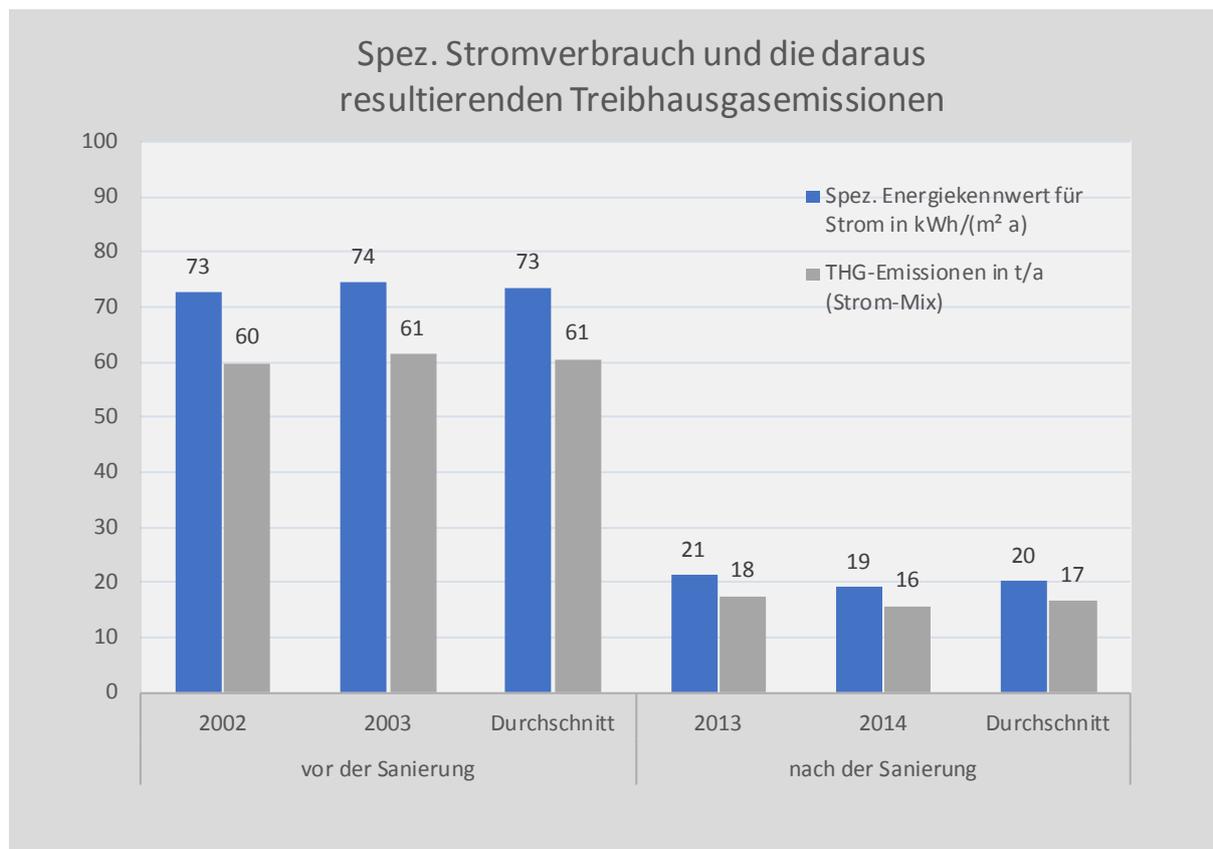


Abbildung 23: Spez. Verbrauch elektrischer Energie vor und nach der Sanierung

### 5.1.3.1 Leistung elektrischer Energie für Beleuchtung

Die nachfolgenden Diagramme beziehen sich auf den Zeitraum vom 01.01.2013 bis 31.12.2013. Dabei wurden die Leistungs- und Verbrauchswerte stündlich und die Klimawerte halbstündlich ermittelt.

Die durchschnittliche Arbeitszeit im IWU wird montags bis donnerstags zwischen 8 bis 18 Uhr abgeschätzt. Freitags sind die Nutzungszeiten schätzungsweise um zwei Stunden kürzer (bis 16 Uhr). Daraus ergeben sich wöchentlich 48 Stunden als Nutzungszeit der Beleuchtungsanlagen. Die restliche Zeit in der Woche kann als Standby gekennzeichnet werden.

Abbildung 24 beschreibt die Dauerlinie der gemittelten Beleuchtungsleistung in Relation zu betrachteter Laufzeit (in %) für die Bereiche Erdgeschoss, 1. Obergeschoss, 2. Obergeschoss sowie als kumulierte Leistung für das gesamte Gebäude. Dabei zeigt das Erdgeschoss den höchsten Stromverbrauch mit 3.260 kWh/a, gefolgt von 1. OG mit 1.938 kWh/a und vom 2. OG mit 961 kWh/a.

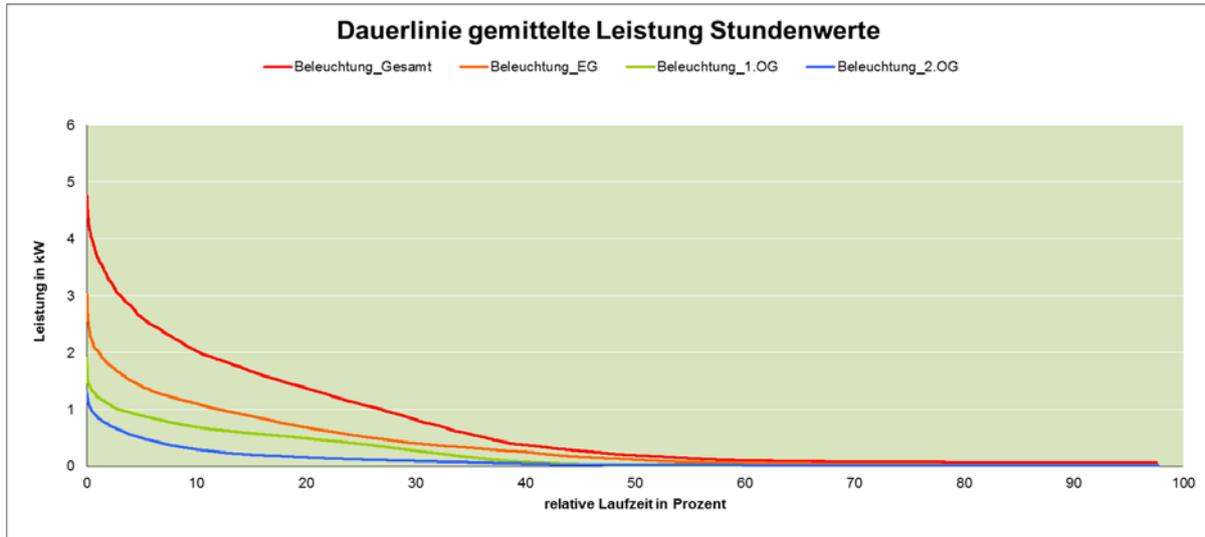


Abbildung 24: Dauerlinie der gemittelten Leistung in Abhängigkeit der relativen Laufzeit im Jahr 2013 (Stundenmittelwerte)

Der höhere Stromverbrauch im EG kann durch die Verschattung des Gebäudes durch die hohen Bäume auf der Südseite und den dadurch geringeren Tageslichteintrag sowie die häufige Beleuchtung des recht großen Foyerbereichs, der bei jeder Durchschreitung aktiviert wird, erklärt werden. Zudem wird die Außenbeleuchtung, die IWU-Logos mit rund 30 W (Schaltung 6:00 Uhr bis 24:00 Uhr mit Dämmerungsschalter) und die Beleuchtung der Eingangsüberdachung mit rund 280 W (Schaltung 5:45 Uhr bis 21:45 Uhr mit Dämmerungsschalter) über den EG-Stromkreis mit abgedeckt.

Trotz höherer Anschlussleistung kann der geringe Stromverbrauch im 1. OG durch die indirekte Flurbeleuchtung in diesem Geschoss erklärt werden. Durch die Voutenbeleuchtung werden viele Leuchtmittel benötigt, was zu einer hohen Anschlussleistung führt (vgl. Tabelle 5). Gleichzeitig werden die Leuchten immer nur kurzzeitig über die Bewegungsmelder aktiviert und sind zudem noch sequenziell geschaltet, was den Verbrauch im Verhältnis gering hält.

Tabelle 5: Anzahl Leuchtmittel, Installierte Leistung für die Beleuchtung und Nettogrundrissfläche auf jeder Etage im IWU

Geschoss-Bezeichnung	Nettogrundrissfläche (ohne Saal im 2. OG)	Anzahl Leuchtmittel	Ermittelte Leistung	Spezifische Leistung
-	m <sup>2</sup>	-	W	W/m <sup>2</sup>
Erdgeschoss	556	128	4.079	7,3
1. Obergeschoss	566	126	5.226	9,2
2. Obergeschoss	360	72	3.009	8,4
Summe	1.482	326	12.314	-
Gewichteter Mittelwert	-	-	-	8,3

In Tabelle 5 ist die spezifische Leistung für die Beleuchtung in den jeweiligen Geschossen dargestellt. Der gewichtete Mittelwert der spezifischen Leistung im IWU-Gebäude wurde dabei mittels installierter Leistung und gesamter Nettogrundfläche<sup>9</sup> berechnet. Der ermittelte Wert in Höhe von 8,3 W/m<sup>2</sup> stellt eine Abschätzung der installierten Beleuchtungsleistung pro Quadratmeter im Gebäude dar.

Tabelle 6: Gewichteter Mittelwert ermittelt für Ziel- und Grenzwerte der spezifischen installierten Leistung für Beleuchtung im IWU-Gebäude nach VDI 3807-4

Zonen- Bezeichnung	Nettogrundrissfläche (ohne Saal im 2. OG)	spezifische Leistung (gemäß VDI 3807-4:2008)	
		Grenzwert	Zielwert
-	m <sup>2</sup>	W/m <sup>2</sup>	
Einzel- und Gruppenbüro	771	12	8
Besprechungsraum <sup>10</sup>	255	12	8
Verkehrsflächen	368	4	2
WC und Sanitärräume	65	7	4
Lager, Technik, Archiv	23	7	2
Summe	1.482	-	-
Gewichteter Mittelwert	-	9,7	6,2

Dieser Wert liegt zwischen den Ziel- und Grenzwerten für die spezifische installierte Beleuchtungsleistung für Bundesbauten nach VDI 3807-4:2008 (siehe Tabelle 6).

Die aus den Messwerten ermittelte maximale und mittlere spezifische Leistung der Beleuchtungsanlagen ermöglicht eine weitere Abschätzung der bezogenen Leistung im Jahr 2013. Die maximal gemessene spezifische Leistung liegt bei 3,27 W/m<sup>2</sup>, und die im Mittel gemessene spezifische Leistung beläuft sich auf 0,5 W/m<sup>2</sup>. Somit stellen die maximale und mittlere gemessene spezifische Leistung im Vergleich zu Ziel- und Grenzwerten von VDI 3807-4 viel niedrigere Werte dar als der theoretisch berechnete Wert.

Die bezogene Leistung in den Nutzungszeiten, welche 28 % des gesamten betrachteten Zeitraums betragen, beläuft sich auf 65,7 % der gesamten Leistung. Das bedeutet, dass restliche 34,3 % außerhalb der definierten Nutzungszeiten (Stand-by-Modus) bezogen wurden. Dies kann an dem Verbrauch von den installierten Präsenzmeldern im Flur und besonders im Eingangsbereich liegen. Zudem arbeiten manche Mitarbeiter außerhalb der hier definierten Arbeitszeit.

<sup>9</sup> Der Saal im 2. OG wurde ausgeschlossen, da die Beleuchtungsanlage des Saals hier nicht mitberücksichtigt wurde (der Saal gehört nicht zum IWU-Haus).

<sup>10</sup> Inklusive Bibliothek

Anhand Abbildung 25 wird aufgezeigt, wie sich die Sonneneinstrahlung auf den Verbrauch von elektrischer Energie im Gebäude auswirkt. Für die Darstellung von Abbildung 25 wurden zunächst die Daten der Globalstrahlung für den Ort Riedstadt<sup>11</sup> aus dem Jahre 2013 aufbereitet, da dieser den nächstgelegenen Messstandort dieser Art darstellt.

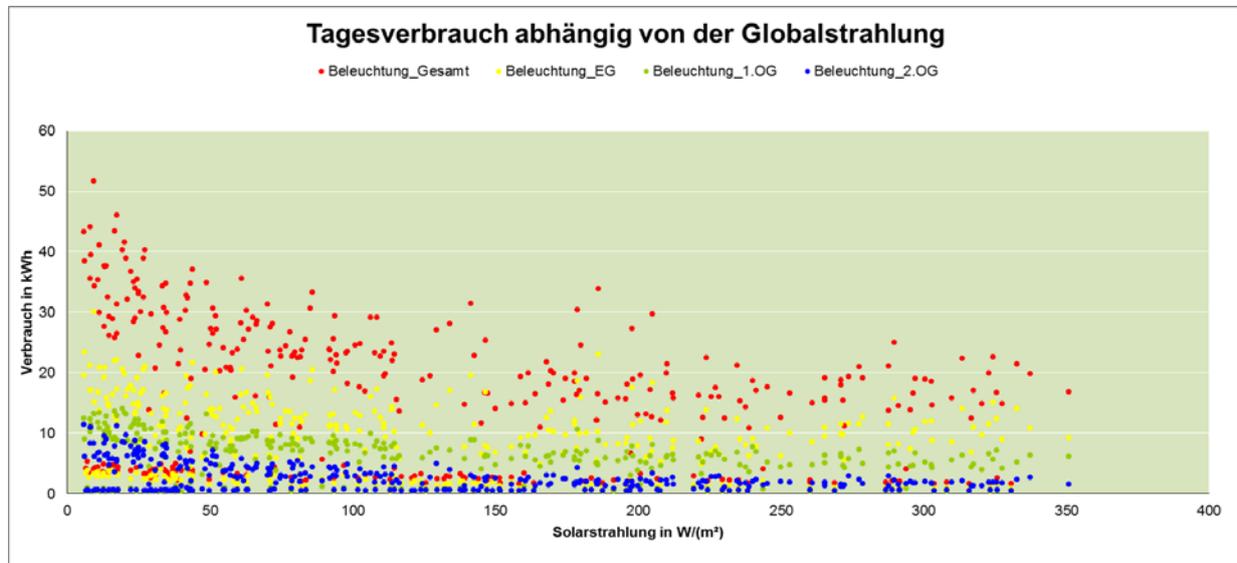


Abbildung 25: Tagesstromverbrauch der Beleuchtung in Abhängigkeit von der Globalstrahlung (Tagesmittelwerte)

Durch die unterschiedliche Farbgebung der Datenpunkte in Abbildung 25 wurden die dazugehörigen Daten der einzelnen Gebäudestockwerke hervorgehoben.

Generell ist in Abbildung 25 ein abnehmender Verbrauch von elektrischer Energie bei höherer Solarstrahlung zu verzeichnen. Zudem lässt sich bei höherer Geschossebene eine Verringerung des Verbrauchs festhalten. Ein möglicher Grund liegt in der Tatsache, dass durch die geringere Verschattung in oberen Ebenen zu einem höheren Lichteinfall führt und eine zusätzliche Beleuchtung somit schon bei geringerer Einstrahlung nicht mehr notwendig ist. Gut zu erkennen ist, dass der Stromverbrauch ab einer Solarstrahlung von etwa  $150 \text{ W/m}^2$  nicht weiter abnimmt. Der verbleibende Stromverbrauch kann der Flur- und Treppenhausbeleuchtung zugeschrieben werden, da diese Bereiche, wenn die Jalousien runtergefahren sind, nicht mehr ausreichend mit dem Tageslicht versorgt werden.

Abbildung 26 und Abbildung 27 veranschaulichen zwei Lastgangprofile der Beleuchtungsanlage. Abbildung 26 zeigt die Leistung im Wochenprofil für eine Woche im Winter (KW 47) und Abbildung 27 die für eine Sommerwoche (KW31).

In den Diagrammen sind die Wochenprofile des Kalenderjahrs 2013 dargestellt. Die Kurven „Maximal, Minimal und Mittelwert aller Daten“ beziehen sich auf die Auswertung des kompletten Jahres. In Schwarz ist der Verlauf der ausgewählten Kalenderwoche abgebildet.

<sup>11</sup> Datenquelle: Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie

Die maximale Leistung für die Beleuchtung in Höhe von 4,9 kW tritt in den Winterwochen auf. In den Sommerwochen sinkt die Leistungsaufnahme der Beleuchtung auf nur noch bis zu 2 kW ab. Dadurch wird der jahreszeitliche Einfluss auf die elektrische Leistung der Beleuchtung deutlich. Dies ist vor allem auf die „kürzere“ Sonnenscheindauer und die allgemein geringere Solarstrahlung im Winter zurückzuführen.

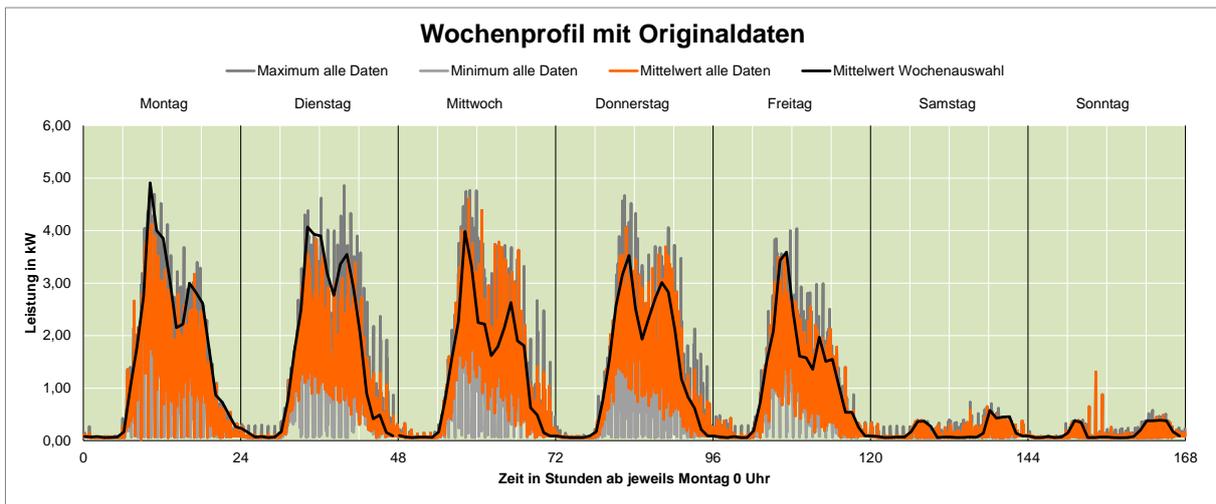


Abbildung 26: Lastgangprofil der Beleuchtung für eine Woche im Winter (47. KW in 2013)

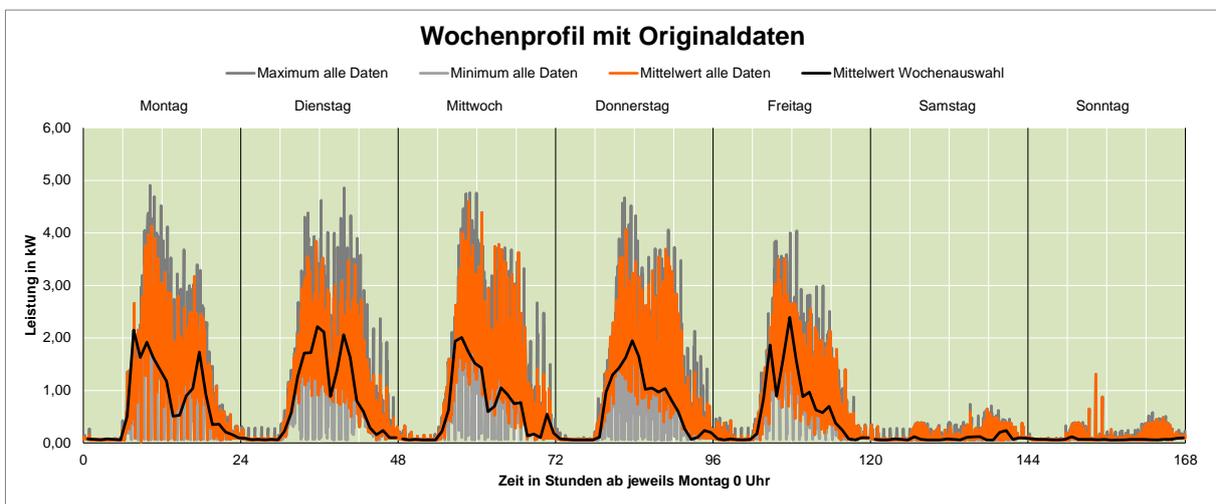


Abbildung 27: Lastgangprofil der Beleuchtung für eine Woche im Sommer (31. KW in 2013)

Des Weiteren ist eine klare Tendenz hinsichtlich der Leistungsverteilung innerhalb der Woche erkennbar: Während der Arbeitszeit (ab 8 Uhr) steigt die Leistung, wobei am Wochenende ein deutlicher Rückgang zu verzeichnen ist (Stand-by-Modus). Aus Abbildung 26 ist zudem die Leistung der Außenbeleuchtung, die am Wochenende der 47. KW bezogen wurde, gut erkennbar. Die Außenbeleuchtung wird über Zeitschaltuhr und Helligkeitssensor gesteuert.

### 5.1.3.2 Leistung elektrischer Energie für sonstige Verbraucher

Im Folgenden wird die benötigte elektrische Energie, die von den Steckdosen im Gebäude bezogen wurde (außer Servereinheiten und RLT-Anlage), dargestellt. Der betrachtete Zeitraum ist von 01.01.2013 bis 31.12.2013. Die elektrische Leistung wird separat je Geschoss erfasst.

Abbildung 28 stellt die gemittelte stündliche Leistungsaufnahme relativ zur Laufzeit (in %) für die Bereiche Erdgeschoss, 1. Obergeschoss, 2. Obergeschoss sowie die kumulierte Leistung für das gesamte Gebäude dar. Die maximale elektrische Leistungsaufnahme für diesen Bereich des Gebäudes lag 2013 bei 6,5 kW. Sie tritt nur sehr selten auf. Rund 65 % des gesamten Stromverbrauchs erfolgt innerhalb der Arbeitszeit, die ca. 30 % der Gesamtzeit des Jahres ausmacht. Außerhalb der Nutzungszeiten (Stand-By-Verbrauch) liegt die mittlere Leistungsaufnahme unter 0,5 kW.

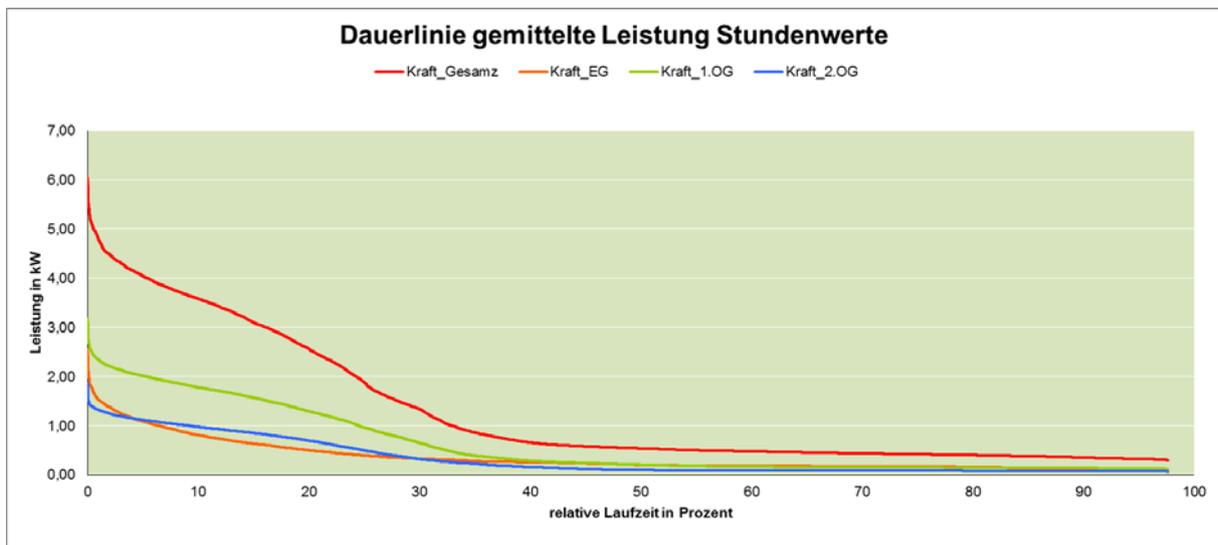


Abbildung 28: Dauerlinie der gemittelten Leistung für sonstige Stromverbräuche in Abhängigkeit der Geschosse (Stundenwerte)

Generell hat das 1. OG den höchsten Leistungsbedarf aufgrund der höheren Anzahl von Büroräumen und dementsprechend zur Verfügung stehenden IT-Ausstattung sowie der Kaffeeküche und beträgt maximal 3,4 kW. Im 2. OG liegt die maximale Leistung bei 1,9 kW, da hier keine Küche vorhanden ist. Im Erdgeschoss ist eine Küchennutzung vorhanden und die maximale Leistung liegt bei 3,0 kW.

Die benötigte elektrische Leistung der elektrischen Geräte wird am meisten durch die Arbeitszeiten und Anzahl der zu Verfügung stehenden elektrischen Betriebsmittel, welche sich etagenweise variiert, beeinflusst. Eine Übersicht der vorhandenen IT Hardware kann Tabelle 7 entnommen werden. Die Rechner im Erdgeschoss gehören zum einen zu studentischen Hilfskräften, die nur stundenweise arbeiten und zum anderen zum Verwaltungsteam, welches nicht Vollzeit im Haus ist. Die Besprechungsräume im Erdgeschoss werden auch nur

gelegentlich benutzt. Aufgrund dessen ist der Leistungsbedarf im 2. OG trotz geringerer Nutzfläche und gleiche Anzahl von Rechnern zu gut 20 Prozent der Zeit höher als der Leistungsbedarf im Erdgeschoss.

Tabelle 7: Anzahl Rechner und die dazu gehörende verbrauchte Leistung auf verschiedene Geschosse

Geschoss- Bezeichnung	Anzahl Rechner		installierte Leistung (W)	Betriebs- Zeit [Uhr]	Netto- Grundrissfläche <sup>12</sup> [m <sup>2</sup> ]
	PC + Monitor (P <sub>ges.</sub> = 60 W)	Notebook + Mon. (P <sub>ges.</sub> = 40 W)			
Erdgeschoss	13	0	780	8-16	556
1. Obergeschoss	22	4	1.480	8-18	566
2. Obergeschoss	14	3	960	8-18	360
Insgesamt	49	7	3.220	8-18	1.482

In den nachfolgenden Abbildungen sind die Lastgänge auf Stundenbasis je eine Woche im Winter und Sommer dargestellt. Die schwarze Linie bezeichnet die mittlere stündliche Leistungsaufnahme in der ausgewählten Woche. Bei dem Vergleich der Winter- und Sommerwoche ist nur ein geringer jahreszeitlicher Unterschied der Lastgänge zu erkennen. Im Winter (5. KW) ist die Leistungsaufnahme etwas höher als im Sommer (35. KW). Die 35. KW liegt nach den hessischen Sommerferien, damit nicht nur die geringere Anwesenheit der Mitarbeiter aus den Daten zu erkennen ist.

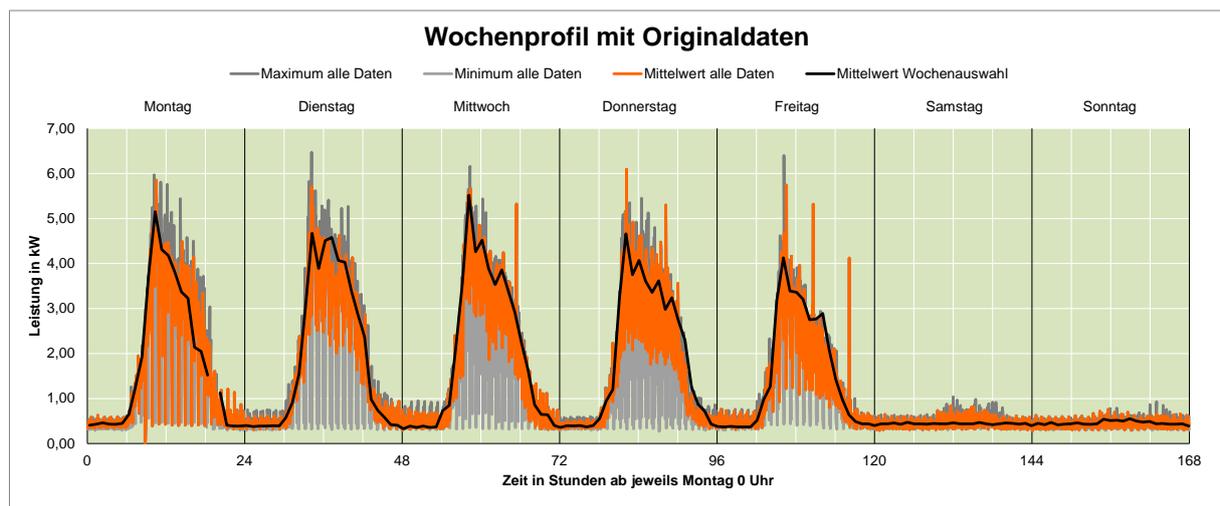


Abbildung 29: Wochenlastgang der sonstigen elektrischen Verbräuche (Winterfall: 5. Kalenderwoche 2013)

<sup>12</sup> Ohne Saal im 2. OG

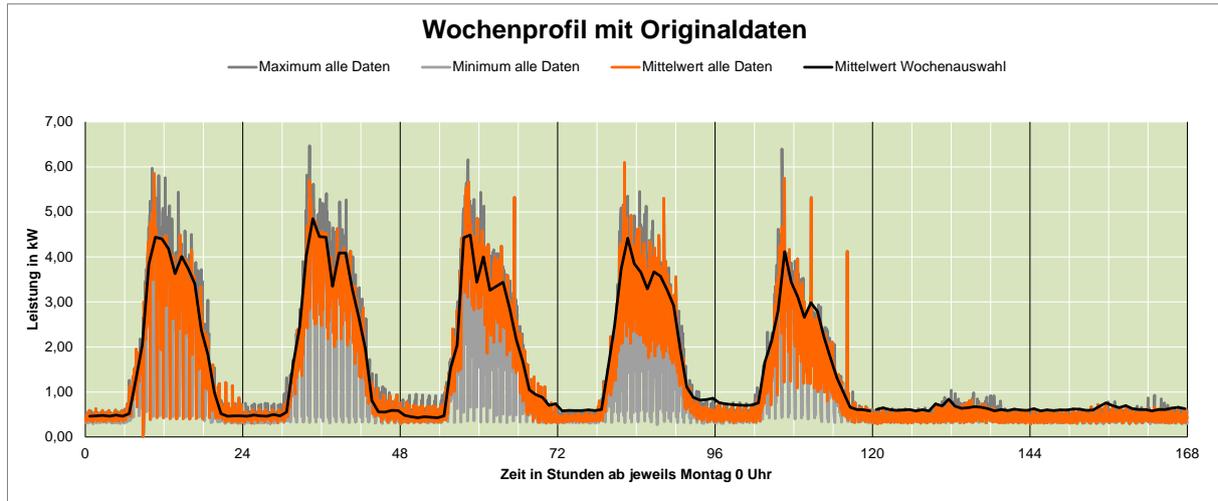


Abbildung 30: Wochenlastgang der sonstigen elektrischen Verbräuche (Sommerfall: 35. Kalenderwoche 2013)

### 5.1.3.3 Leistung elektrischer Energie für mechanische Lüftung

Zur Auswertung der aufgezeichneten elektrischen Leistung für die mechanische Lüftung im IWU-Haus wurden zunächst Stundenmittelwerte von Leistung und Luftvolumenstrom gebildet und diese Zeiten innerhalb bzw. außerhalb der Arbeitszeit zugeordnet.

Abbildung 31 zeigt die Dauerlinien der gemittelten Leistung über die relative Laufzeit (in %) der Lüftungsanlage für die Bereiche IWU und Saal für das gesamte Jahr (rot) sowie differenziert nach Arbeitszeiten (orange) und Nicht-Arbeitszeiten (grün). Dabei arbeitet die Lüftungsanlage wie folgt:

- In nur 1 - 2 Prozent der Laufzeit mit einer Leistung von 1,5 - 3,5 kW,
- in etwa 12 - 14 Prozent des Zeitraums mit der Leistung von ca. 1,5 kW,
- in 30 Prozent der Laufzeit mit der Leistung zwischen 0,5 und 1,0 kW,
- in weniger als 30 Prozent der Zeit mit der Leistung zwischen 0,5 und 0,2 kW.

In den restlichen 25 Prozent der Laufzeit ist nur ein Verbrauch von unter 0,2 kW zu verzeichnen. Der Stromverbrauch in dieser Zeit wird von der Regelungstechnik und der Serverlüftung verursacht, die über die Lüftungsanlage mit versorgt wird.

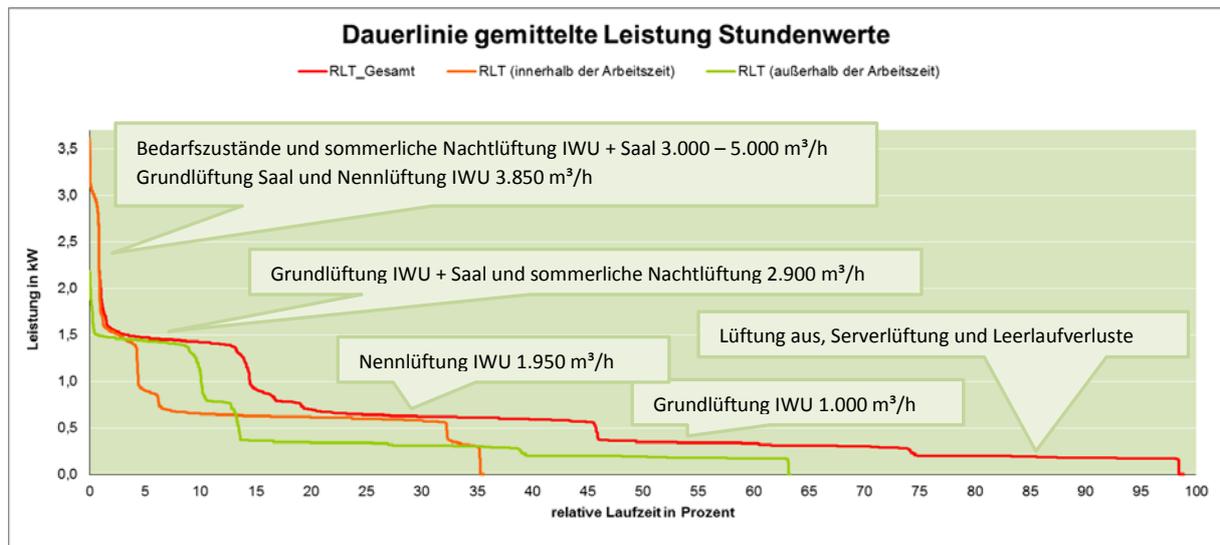


Abbildung 31: Dauerlinie der gemittelten Stundenwerte der Leistung der Lüftungsanlage. Differenziert nach Arbeitszeiten und Nicht-Arbeitszeiten 2013

In Abbildung 32 stellt die Dauerlinie die relative Laufzeit (in %) des gemittelten Luftvolumenstroms der Lüftungsanlage für die Bereiche IWU und Saal dar. Abweichungen der Verhältnisse und Laufzeiten von Abbildung 31 zu Abbildung 32 liegen in der unterschiedlichen Datenverfügbarkeit der Messwerte, da die Daten von verschiedenen Systemen aufgezeichnet wurden. Die rote Linie steht für den gesamten Luftvolumenstrom, die grüne Linie für den Volumenstrom außerhalb der Arbeitszeit und die orangene Linie für den Volumenstrom während der Arbeitszeiten im Jahr 2013. Aus Abbildung 32 ist ersichtlich, dass die Lüftungsanlage innerhalb der Arbeitszeit mehr im Bereich der Normallüftung bzw. außerhalb der Arbeitszeit eher im Bereich der Grundlüftung in Betrieb war. Die mittels Sensoren erfasste maximale Luftmenge ergibt sich aus der Bedarfslüftung im IWU und der Nennlüftung im Saal und beläuft sich auf ca. 5.400 m<sup>3</sup>/h im Mai 2013. Dies liegt vermutlich an den gleichzeitig in höchster Stufe angeforderten Luftmengen in beiden Bereichen IWU und Saal.

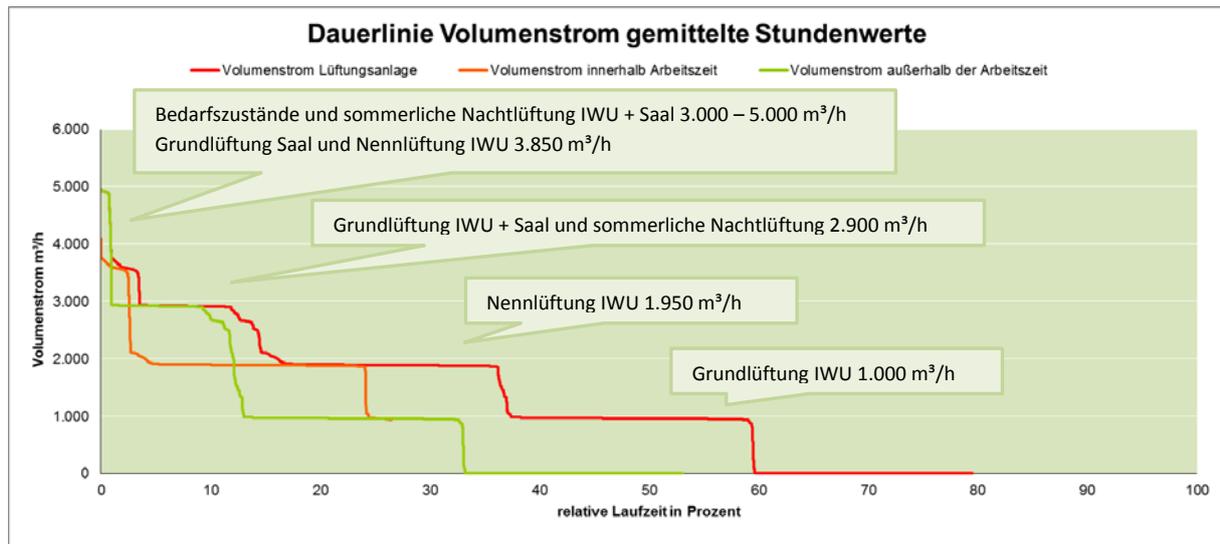


Abbildung 32: Dauerlinie der gemittelten Stundenwerte des Luftvolumenstroms der Lüftungsanlage. Differenziert nach Arbeitszeiten und Nicht-Arbeitszeiten 2013

Die beiden nachfolgenden Abbildungen zeigen den Luftvolumenstrom im Wochenprofil für eine Woche im Winter (Abbildung 33) bzw. im Sommer (Abbildung 34).

Es wird ein jahreszeitlicher Einfluss auf den Verbrauch der Lüftungsanlage deutlich, wobei im Winter nachts ein Drittel der Luftmenge weniger benötigt wird als gelegentlich im Sommer. Dies ist auf die „Nachtlüftung zwischen 22 Uhr und 6 Uhr“ im Sommer zurückzuführen. Im Sommer werden bei Innenraumtemperaturen über 22 °C und einer Temperaturdifferenz zur Außenluft von mindestens 1 K die Fenster durch einen von der Lüftungsanlage ferngesteuerten Antrieb geöffnet und die Lüftungsanlage fährt auf 3.000 m<sup>3</sup>/h hoch. Im Winter hingegen versorgt die Lüftungsanlage das Gebäude zwischen 18 Uhr nachmittags und 6 Uhr morgens mit der Grundlüftung. Zudem ist im Laufe des Tages zwischen 6 Uhr und 8 Uhr in den meisten Fällen ein Peak zu sehen, der im Sommer bis ca. 5.000 m<sup>3</sup>/h steigt. Dieser Peak ist die tägliche Frischluftspülung für den Saal die von 6 - 7 Uhr eingestellt ist. Zwischen 8 Uhr und 17 Uhr bleibt in der Regel die Lüftung bei 1.900 bis ungefähr 2.200 m<sup>3</sup>/h. Gut bilden sich auch die gelegentlichen Bedarfsanforderungen der Besprechungsräume im Erdgeschoss ab. Am Wochenende geht die Lüftungsanlagen in der Regel in den Stand-By-Modus, der im Sommer von der sommerlichen Nachtlüftung unterbrochen wird.

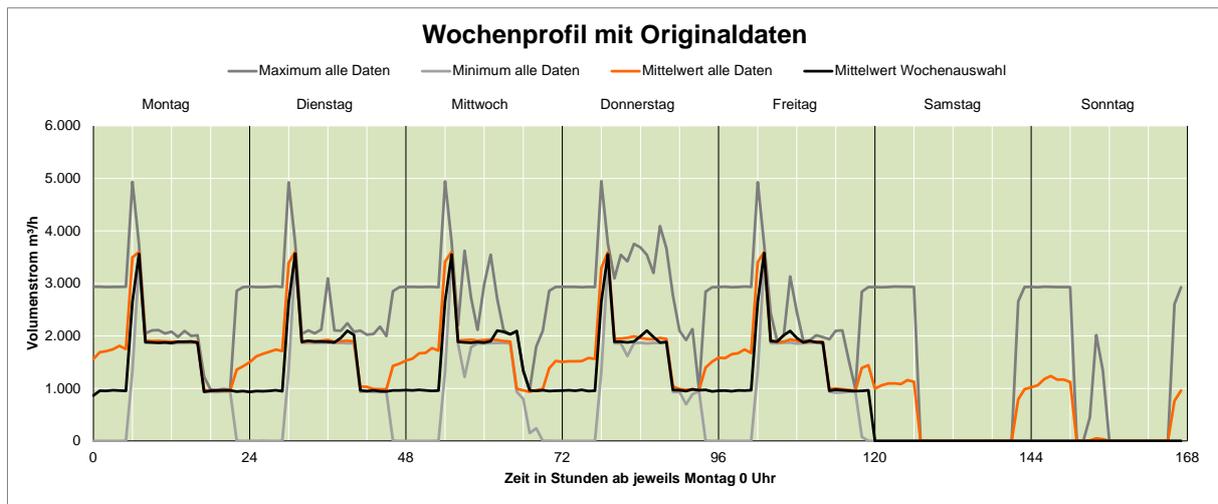


Abbildung 33: Wochenprofil von gemittelten Stundenwerten des Luftvolumenstroms der Lüftungsanlage im Winter für die 4. Kalenderwoche

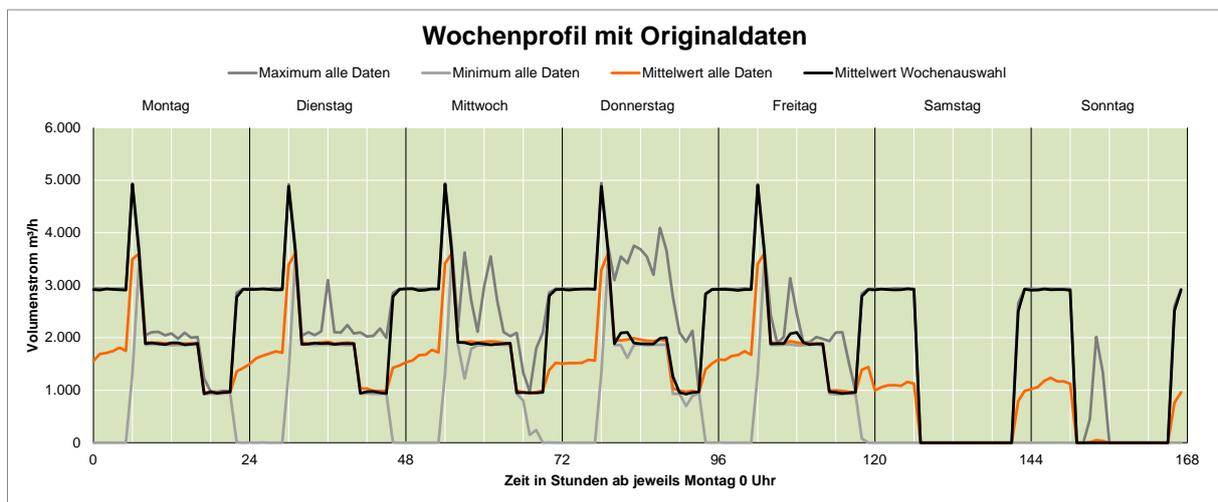


Abbildung 34: Wochenprofil von gemittelten Stundenwerten des Luftvolumenstroms der Lüftungsanlage im Sommer für die 26. Kalenderwoche

Dadurch, dass die Lüftung überwiegend im Teillastbereich betrieben wird, ist das Verhältnis von Stromeinsatz zu transportierter Luftmenge besonders günstig. Der flächenspezifische Stromverbrauch für die Luftförderung liegt bei gemessenen  $2,6 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$  bzw. bei Nennlüftung von  $1.950 \text{ m}^3/\text{h}$  bei einer volumenspezifischen Leistung von  $0,33 \text{ W}/\text{m}^3$  (siehe Abbildung 35).

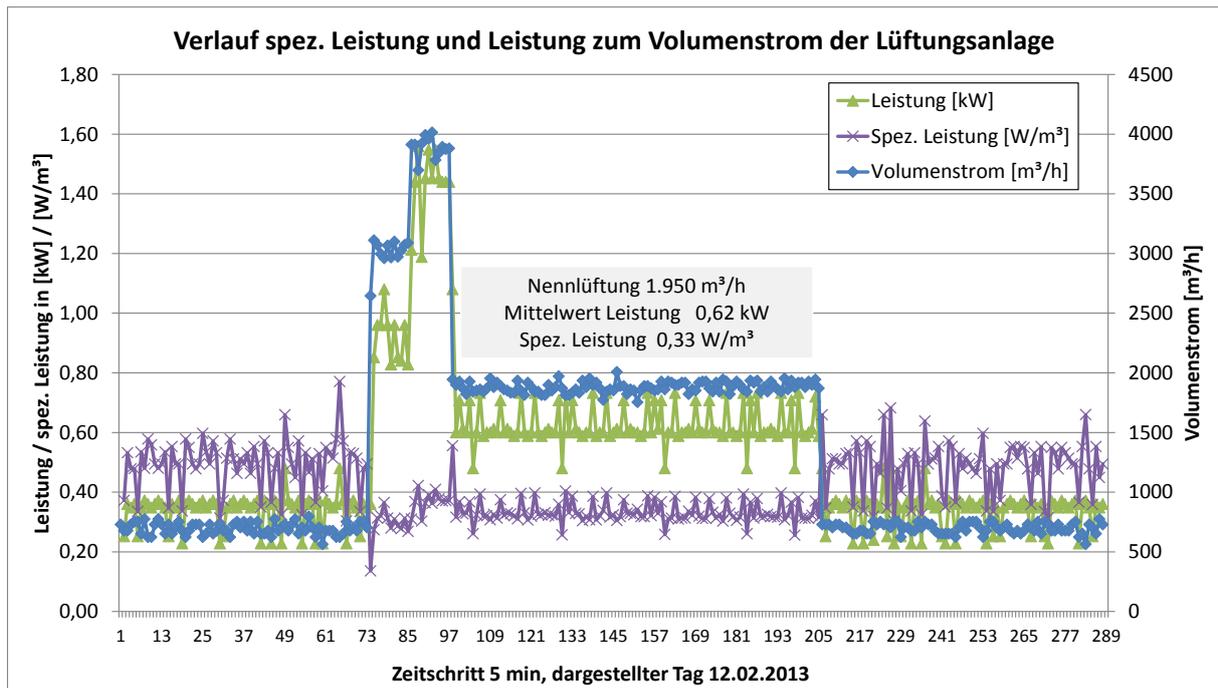


Abbildung 35: Verlauf der spez. Leistung und der Leistung der Lüftungsanlage bezogen zum Volumenstrom am 12.02.2013

### 5.1.4 Energiebedarf nach EnEV vs. Energieverbrauch

Im Rahmen der Modernisierung des IWU-Hauses ist ein Energieausweis nach EnEV 2009 für das geplante Energiekonzept erstellt worden. Abbildung 36 zeigt die Energiebedarfskennwerte gemäß EnEV. Demnach unterschreitet der Primärenergiebedarf des Gebäudes (110 kWh/m<sup>2</sup>a) die Anforderungen der EnEV 2009 (163 kWh/m<sup>2</sup>a) um ca. ein Drittel.

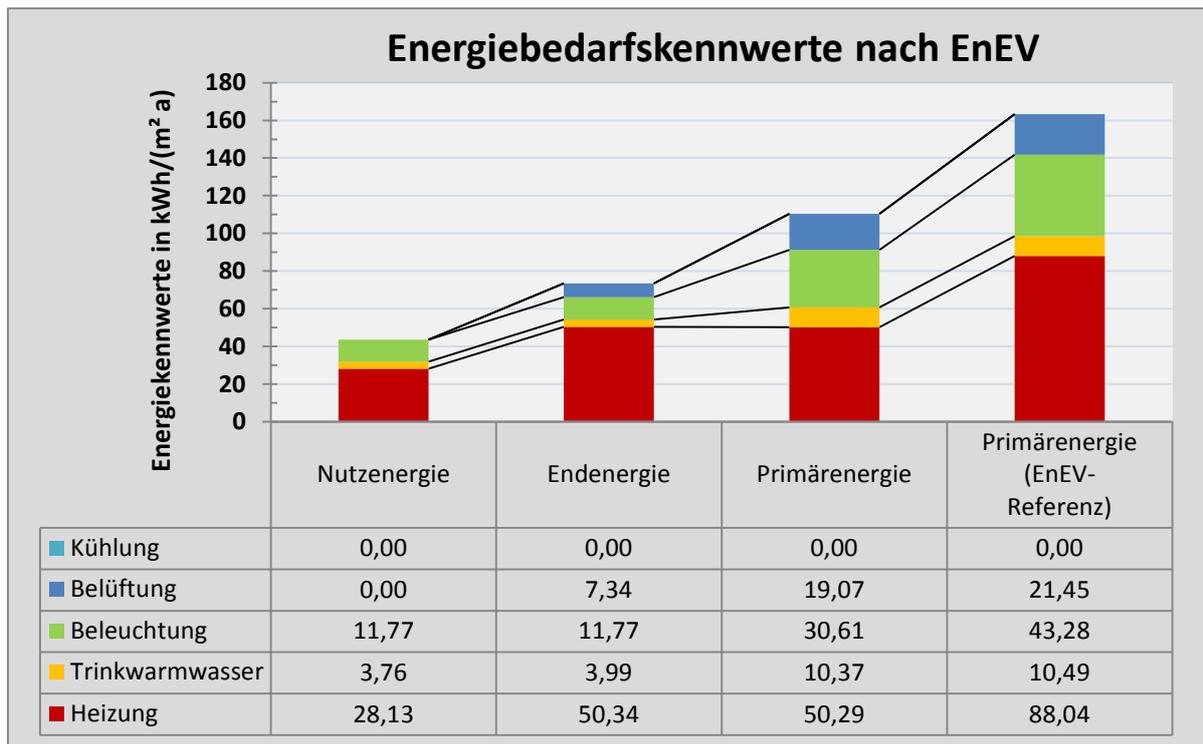


Abbildung 36: Energiekennwerte des IWU-Hauses nach Energieeinsparverordnung (EnEV)

Die Nebenanforderungen der EnEV beziehen sich auf die mittleren Wärmedurchgangskoeffizienten von opaken bzw. transparenten Bauteilen. Abbildung 37 verdeutlicht die prozentualen Verbesserungen der mittleren Wärmedurchgangskoeffizienten für das realisierte IWU-Haus im Vergleich zu nach EnEV geforderten Werten für das Referenzgebäude. Hierzu wurde eine Verbesserung des Wärmeschutzes um 70 % bei den opaken bzw. 55 % bei den transparenten Bauteilen erreicht.

Um auf der Gebäudeebene den rechnerisch ermittelten Energiebedarf nach EnEV mit den Energieverbräuchen über mehrere Jahre vergleichen zu können, müssen in erstem Schritt die Verbräuche klimabereinigt werden (vgl. Abbildung 17), um die unterschiedlichen Klimaverhältnisse auszugleichen. Zudem sollen die Energiebezugsflächen identisch sein. Des Weiteren müssen alle gemessenen Energieaufwendungen für Bürogeräte (PCs, Monitore, Drucker, Server etc.) sowie Haushaltsgeräte (Kaffeemaschinen, Mikrowellen, Kühlschränke etc.) abgezogen werden.

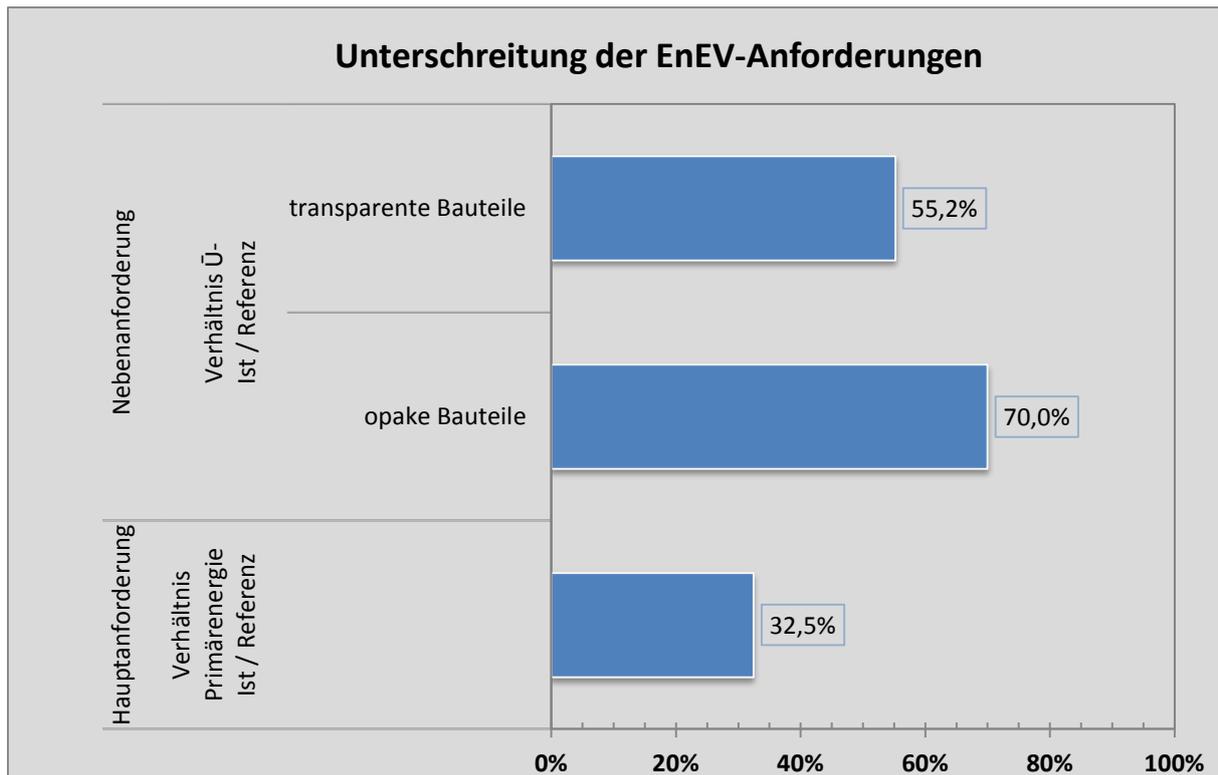


Abbildung 37: Unterschreitung der EnEV-Anforderungen

Abbildung 38 zeigt die im Rahmen der Energiebilanz nach EnEV ermittelten Wärmeverluste bzw. den Nutzwärmebedarf zur Bestimmung des Endenergiebedarfs Wärme (Nutzwärmebedarf plus in Abbildung 38 dargestellte Verluste). Die berechneten Verluste infolge der Wärmeerzeugung mit  $14 \text{ kWh/m}^2\text{a}$  aufgrund der veralteten (Baujahr 1991) und überdimensionierten Wärmeerzeuger sind erwartungsgemäß am größten. Die Speicherverluste sind gleich null, da kein Wärmespeicher existiert.

Die Sanierung des IWU-Hauses wurde gemäß den Richtlinien des Landes Hessen (§3 des Hessischen Energiegesetzes) zur Förderung der Energieeffizienz und Nutzung erneuerbarer Energien in den Kommunen gefördert<sup>13</sup>. Hierbei ist ein jährlicher Heizwärmebedarf des Gebäudes von maximal  $25 \text{ kWh}$  pro Quadratmeter als Zielwert der energetischen Anforderung nach Durchführung der Maßnahmen festgelegt. Die zugrunde gelegte Energiebezugsfläche ist dabei für Nichtwohngebäude die Nutzfläche nach DIN 277-2 zu 100 Prozent und die innerhalb der thermischen Hülle gelegenen Verkehrsflächen und technischen Funktionsflächen zu jeweils 60 Prozent. Dies entspricht einer Energiebezugsfläche von  $1.552 \text{ m}^2$  (vgl. Tabelle 4). Wird die geforderte Anforderung auf die Energiebezugsfläche von  $1.690 \text{ m}^2$  (gemäß EnEV) bezogen, ergibt sich einen max. Heizwärmebedarf von rund  $23 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ .

Der geforderte Zielwert des Heizwärmebedarfs (Nutzwärme) von  $23 \text{ kWh/m}^2\text{a}$  wurde jedoch nach EnEV-Berechnung nicht erreicht ( $28,13 \text{ kWh/m}^2\text{a}$  nach Abbildung 38). Der Zielwert wurde um ca. 22 % überschritten.

<sup>13</sup> Modernisierung zum Passivhaus im Bestand

Wegen der Lage<sup>14</sup> der installierten Wärmemengenzähler und aufgrund der fehlenden Angaben des Gasverbrauchs für die Wärmebereitstellung können die Wärmeverluste durch den Wärmeerzeuger nicht messtechnisch erfasst werden. Die Messungen erfassen daher lediglich die Erzeugernutzenergie<sup>15</sup>. Geht man davon aus, dass die Wärmebereitstellung in Form von Fern- bzw. Nahwärme für die drei angeschlossenen Gebäude durch die zwei installierten Gas-Kessel zur Verfügung gestellt wird, kann die berechnete Erzeugernutzenergie als Endenergie mit den gemessenen Verbrauchsdaten verglichen werden.

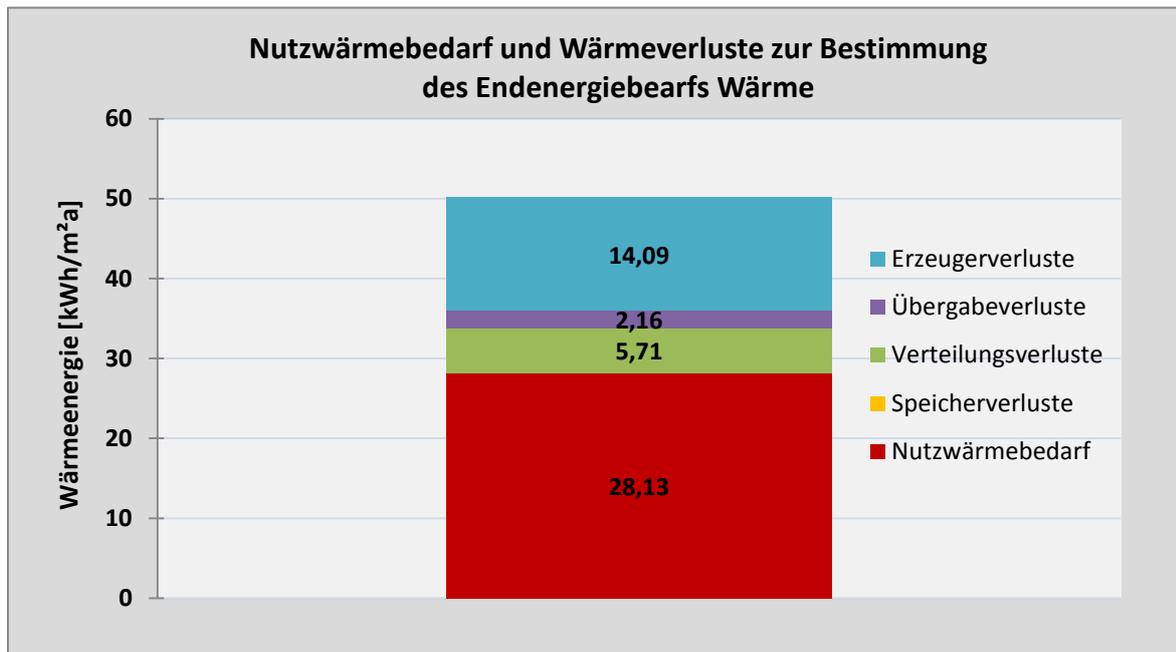


Abbildung 38: Nutzwärmebedarf und Wärmeverluste zur Bestimmung des Endenergiebedarfs Wärme

Abbildung 39 veranschaulicht die klimabereinigten Wärme- bzw. Stromverbräuche für das Jahr 2013 und 2014. Für die Bildung der Energieverbrauchskennwerte wurde eine Energiebezugsfläche von 1.690 m<sup>2</sup> nach EnEV verwendet. Abbildung 39 zeigt zudem, dass der Wärmeverbrauch im Jahr 2013 (ca. 51 kWh/m<sup>2</sup>a) um etwa 40 % und im Jahr 2014 (ca. 40 kWh/m<sup>2</sup>a) um etwa 11 % höher als der berechnete Bedarf (36 kWh/m<sup>2</sup>a) liegt.

Da die Verluste infolge der Wärmeverteilung bzw. -übergabe nicht messtechnisch erfasst werden konnten, werden zur überschlägigen Abschätzung des Heizwärmeverbrauchs die ermittelten Verluste der Wärmeverteilung bzw. -übergabe von etwa 8 kWh/m<sup>2</sup>a (vgl. Abbildung 38) von den gemessenen Wärmeverbräuchen (vgl. Abbildung 39) abgezogen.

Hieraus ergibt sich ein Heizwärmeverbrauch für das Jahr 2013 von etwa 43 kWh/m<sup>2</sup>a und für das Jahr 2014 von ca. 32 kWh/m<sup>2</sup>a. Diese Werte liegen etwa 87 % für das Jahr 2013 und 39 % für das Jahr 2014 über der Zielsetzung von 23 kWh/m<sup>2</sup>a (Bei einer A<sub>EBF</sub> von 1.552 m<sup>2</sup>).

<sup>14</sup> Im Output-Bereich des Wärmeerzeugers

<sup>15</sup> Endenergie ohne Berücksichtigung der Erzeugerverluste und nach dem Abzug der eingesetzten regenerativen Energien

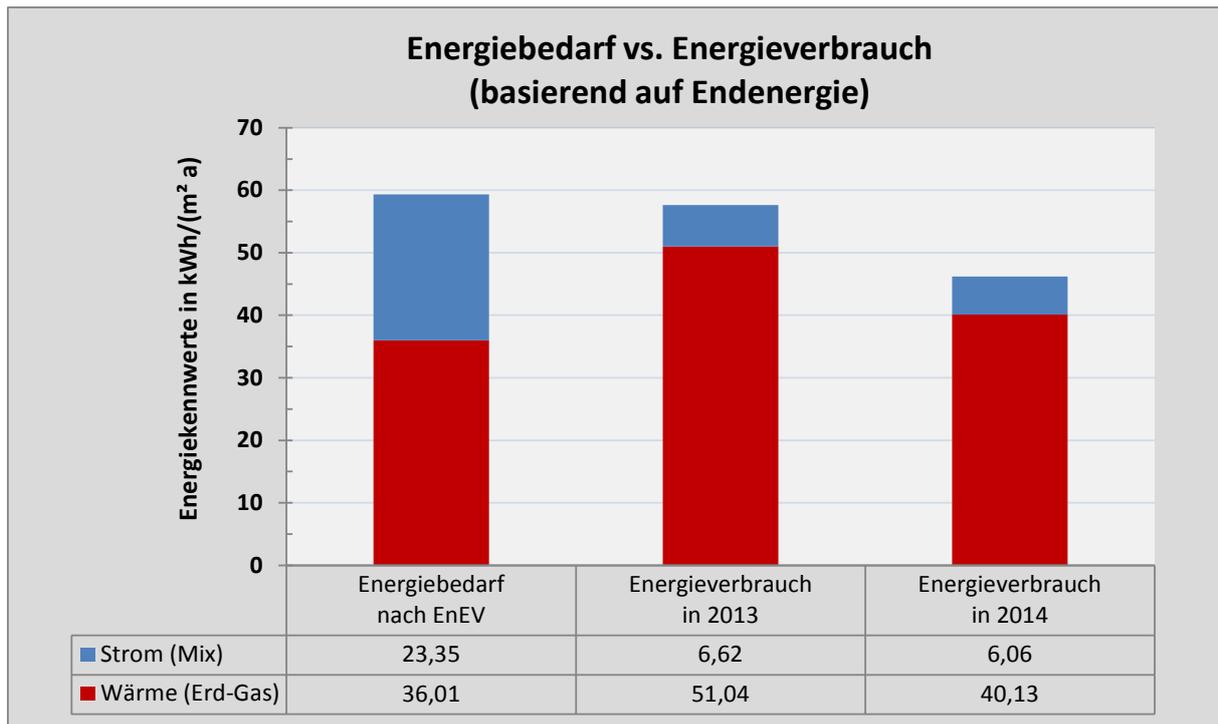


Abbildung 39: Vergleich der Energiebedarfskennwerte mit den gemessenen Energieverbrauchskennwerten

Die Hauptursache der erhöhten Heizwärmeverbräuche sind die hohen Raumtemperaturen während der Heizperioden. Der Mehraufwand des Heizwärmebedarfs aus einer Überschreitung des Raumtemperatursollwertes um 1 K lässt sich theoretisch mit etwa 6 % bis 10 % abschätzen<sup>16</sup>. Bei einer durchschnittlich gemessenen Raumtemperatur von 22,5 °C im IWU-Haus bedeutet das einen Mehraufwand von etwa 15 % bis 25 % (mittlerer Wert 20 %).

Würde die mittlere Raumtemperatur im IWU-Haus um 2,5 °C sinken, würde sich der oben abgeschätzte Heizwärmeverbrauch von 32 kWh/m<sup>2</sup>a (für das Jahr 2014) um 20 % reduzieren. Hierdurch würde sich ein Heizwärmeverbrauch von ca. 25,5 kWh/m<sup>2</sup>a (nur eine Überschreitung von rund 11 % des geforderten Zielwerts von 23 kWh/m<sup>2</sup>a) ergeben. Weitere mögliche Ursachen der erhöhten Heizwärmeverbräuche werden in Abschnitt 5.1.5 dargelegt.

Auffällig ist in Abbildung 39 weiterhin der geringe Verbrauch an elektrischer Energie. Der elektrische Energiebedarf des Gebäudes (23,35 kWh/m<sup>2</sup> a) wird hierbei um das ca. 3,5-Fache im Jahr 2013 (6,62 kWh/m<sup>2</sup> a) und um ca. das 4,0-Fache im Jahr 2014 (6,06 kWh/m<sup>2</sup> a) überschätzt. Die Differenzen resultieren meist infolge der festgelegten Annahmen bei den Energiebedarfsberechnungen.

Beispielsweise wurden bei der EnEV-Bilanz ca. 4 kWh/m<sup>2</sup>a für Warmwasserbereitung (vgl. Abbildung 36) ausgewiesen. Geht man überschlägig von einer mittleren Leistung von 30 W für die zwei elektrisch beheizten Warmwasserspeicher im Jahr aus, ergibt sich ein Warmwas-

<sup>16</sup> Vgl. DIN 18599-5:2011-12, Anhang D

serenergiebedarf von  $8.760 \text{ h/a} * 0,030 \text{ kW} / 1.690 \text{ m}^2 = 0,16 \text{ kWh/m}^2\text{a}$  (vgl. Abschnitt 3.3), der deutlich niedriger ist als der nach EnEV berechnete Wert.

Dies illustriert die Abbildung 40 anhand der relativen Häufigkeit der gemessenen Leistungsaufnahme des elektrischen Warmwasserspeichers im Erdgeschoss während einer Arbeitswoche. Demnach sind in 99 % der Messdauer keine Leistung bzw. Strom von dem Speicher bezogen worden (Messintervall eine Minute).

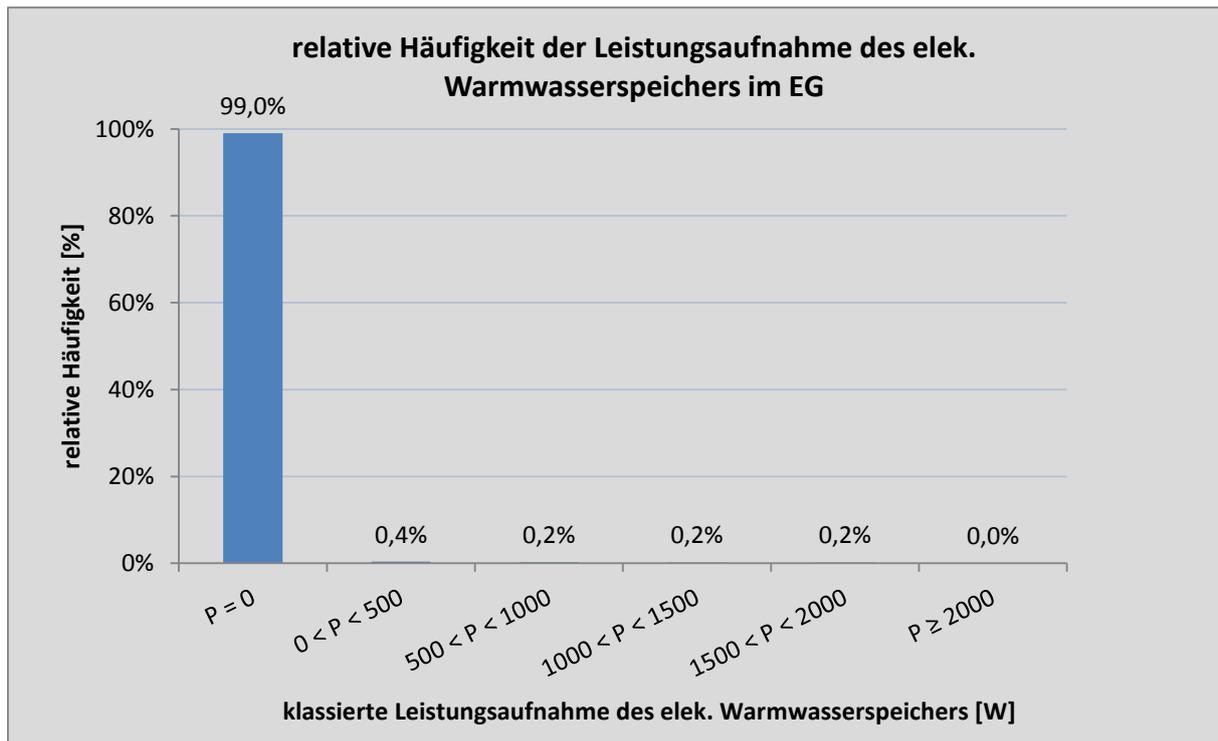


Abbildung 40: relative Häufigkeit der Leistungsaufnahme des elektr. Warmwasserspeichers im EG

### 5.1.5 Energiebedarf nach PHPP vs. Energieverbrauch

Für das Gebäude wurde eine Energiebilanzrechnung mit dem Passivhaus-Projektierungspaket (PHPP) in der Version 1.5 (Stand 2009) erstellt. Der Wärmebedarf des Gebäudes wurde mit einem Wert von  $28,7 \text{ kWh/(m}^2\text{a)}$  ( $16,2 \text{ kWh/m}^2\text{a}$  Heizwärmebedarf plus  $12,5 \text{ kWh/m}^2\text{a}$  Verteilverlust) bilanziert. Eine besondere Schwierigkeit lag darin, die Verluste der alten Zentralheizung plausibel abzuschätzen. Des Weiteren wurde zu Beginn der Planungsphase bei der Berechnung davon ausgegangen, dass die thermische Hülle des gesamten Gebäudekomplexes in einem Zug saniert würde. Deshalb wurden zu den angrenzenden Gebäudeteilen (Treppenhäuser Ost + West) keine Wärmeströme angesetzt. Gemessen wurde 2014 ein klimabereinigter Wärmeverbrauch von  $45,2 \text{ kWh/(m}^2\text{a)}$ . Bei detaillierter Betrachtung aller Messdaten werden die Gründe für diese Differenz deutlich:

### 1) Geringere interne Gewinne durch Stromsparen

Der Stromverbrauch inkl. Beleuchtung und Arbeitshilfen liegt im Bürobereich bei 13,7 kWh/(m<sup>2</sup>a). Im Nachweis wurde er seinerseits mit 32 kWh/(m<sup>2</sup>a) abgeschätzt, was natürlich größere interne Gewinne bedeutet hätte, denn ca. ein Drittel der Differenz fällt in die Heizzeit und würde zur Verringerung des Heizwärmebedarfes beitragen.

### 2) Höhere Innentemperaturen

Durch die schlecht regelbare Heizwärmezufuhr und auch durch die Komfortwünsche der Mitarbeiter liegen die gemessenen Innentemperaturen mit ca. 22,5 °C deutlich über dem in der Bilanzrechnung angesetzten Wert von 19,4 °C. Wird dieser Wert in die Bilanzrechnung eingesetzt, ergibt sich ein rechnerischer Bedarf von 25 kWh/(m<sup>2</sup>a).

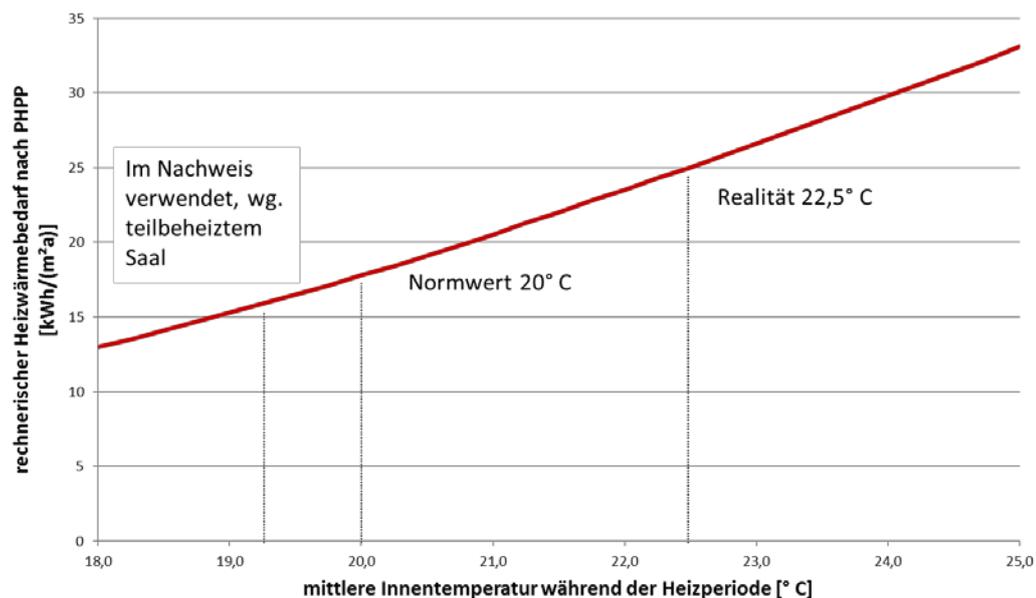


Abbildung 41: Abhängigkeit des Wärmebedarfes von der angesetzten Innentemperatur in der Heizzeit (Berechnet mit dem PHPP)

### 3) Die gegenwärtigen Verbrauchswerte markieren kein Endergebnis sondern einen Zwischenstand

In der Wärmebilanzrechnung wurde davon ausgegangen, dass zu den angrenzenden Gebäudeteilen kein Wärmetransport stattfindet. Das IWU-Haus grenzt an zwei Treppenhäuser, von welchen nur das auf der Ostseite in die sanierte thermische Hülle mit einbezogen wurde. Das sechs Stockwerke hohe Treppenhaus auf der Westseite ist unsaniert und auf der Nordseite vollständig verglast. Es handelt sich dabei um Zweischiebenglas mit einem U-Wert von ca. 2,6 W/(m<sup>2</sup>K). Werden die Wärmeverluste zu diesem Treppenhaus in die Bilanz einbezogen, wobei die mittlere Temperatur im

Treppenhaus nur geschätzt werden kann, vergrößert sich der Wärmebedarf um etwa  $2,9 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ . Werden in der Zukunft auch andere Gebäudeteile und die Heizanlage saniert, werden sich Verbrauch und Bedarf annähern.

4) **Das Modell mit dem gerechnet wurde ist an einigen Stellen grob vereinfacht**  
Für die Energiebilanz wurden alle linearen Wärmebrücken berechnet und mit einbezogen. Alle eher punktförmigen Wärmebrücken wurden dagegen vernachlässigt. Im Einzelnen sind damit gemeint:

- Die anbetonierte Eingangstreppe (Breite ca. 5 m),
- das Vordach über dem Eingang (eine in die Außenwand einbindende Stahlkonstruktion),
- die durchgehenden Betondecken in das kalte Treppenhaus auf der Westseite, die auf Höhe der Kellerdecke anbetonierte Lichtschächte der Kellerfenster.

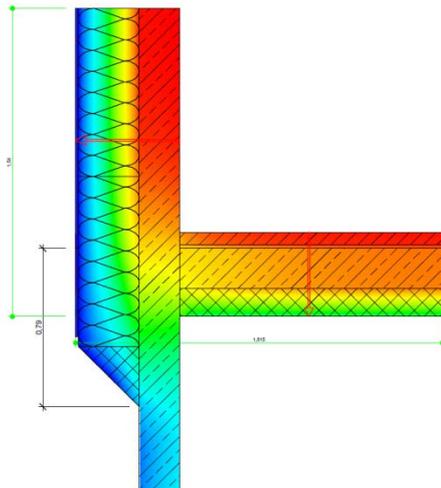


Abbildung 42: Die berechnete Wärmebrücke am Kellerdeckenaufleger mit einem  $\Psi$ -Wert von  $0,3462 \text{ W}/(\text{mK})$



Abbildung 43: In der Realität unterbrechen Lichtschachtwände in regelmäßigen Abständen die Perimeterdämmung

Dass diese Wärmebrücken nicht detailliert berechnet wurden, ist nachvollziehbar. Es wäre dazu die Eingabe in ein 3-D-Wärmebrückenprogramm nötig gewesen, wobei auch die zu verwendenden Randbedingungen nicht eindeutig sind. So ist die Frage, ob für die Temperatur in dem schmalen, mit vier Seiten an das Erdreich grenzenden Lichtschacht, näher bei Außenluft oder Erdreichtemperaturen liegen, schwer zu entscheiden. Auf der anderen Seite hätte die Abtrennung dieser Wärmebrücken Kosten verursacht, die das vorhandene Budget deutlich überschritten hätten. Eine grobe Abschätzung anhand der Werte aus Wärmebrückenatlanten ergab eine Erhöhung des Wärmebedarfs um ca.  $1,6 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ . Was in der

Praxis noch fehlt, sind einfach zu handhabende Zuschlagswerte für Standardwärmebrücken wie z. B. Lichtschächte, auskragende Betonplatten und anbetonierte Treppenaufgänge an hochwertig sanierten Gebäuden mit Dämmstärken > 20 cm.

Durch eine Anpassungsrechnung im PHPP konnte mit realistischen Eingangsgrößen der tatsächliche Bedarf nachvollzogen werden. Die folgende Tabelle zeigt die vorgenommenen Änderungen und die Auswirkung auf den berechneten Wärmebedarf.

Tabelle 8: Änderungen im PHPP bei der Anpassungsrechnung

Eingabegröße	Annahmen bei der Planung	momentane Situation	Begründung	Delta beim Kennwert Heizwärme kWh/(m <sup>2</sup> a)
mittlere Raumtemperatur in der Heizzeit	19,4 °C	22,5 °C	Komfortbedürfnis der Mitarbeiter	8,8
Fläche gegen Nachbargebäude	frei	Fläche der Treppenhäuser	Nachbargebäude noch nicht saniert	2,9
Wärmebrücken (WB) Eingangsbereich	frei	1 W/(mK)	Abschätzung aus WB-Atlanten	1,6
Wärmebrücken Lichtschächte	frei	0,7 W/(mK)	Abschätzung aus WB-Atlanten	
Heizungsverteilung	0,19 W/(mK)	0,25 W/(mK)	die Dämmung der Verteilung ist wirklich schlecht!	2,0
Heizungsverteilung	160 m	280 m	Länge der Verteilung zu gering geschätzt	
interne Gewinne Strom	Standard	Objektspezifisch	Standardwerte für Stromverbrauch zu hoch	2,5
<b>Summe</b>				<b>17,8</b>

## 5.2 Kurzzeitmessung der Serverinfrastruktur

Zur Ermittlung des mittleren Stromverbrauchs der Serverinfrastruktur wurde in der Zeit vom 09.01.2015 bis zum 24.01.2015 eine Kurzzeitmessung durchgeführt.

Abbildung 44 veranschaulicht den zeitlichen Verlauf der abgenommenen elektrischen Leistung der Serverinfrastruktur über den gemessenen Zeitraum in Form eines Wochenprofils. Hierbei ist gut zu erkennen, dass durchgehend eine Grundlast von 1.040 W abgenommen wird. Leistungsspitzen bis zu 1.110 W können jedoch in Spitzenzeiten zwischen 10:30 bis 11:30 Uhr erreicht werden. Weitere Leistungsspitzen treten sowohl in der Woche zwischen 21:30 und 12:00 Uhr als auch an Wochenenden zwischen 21:30 und 8:30 Uhr aufgrund von Sicherungsvorgängen auf.

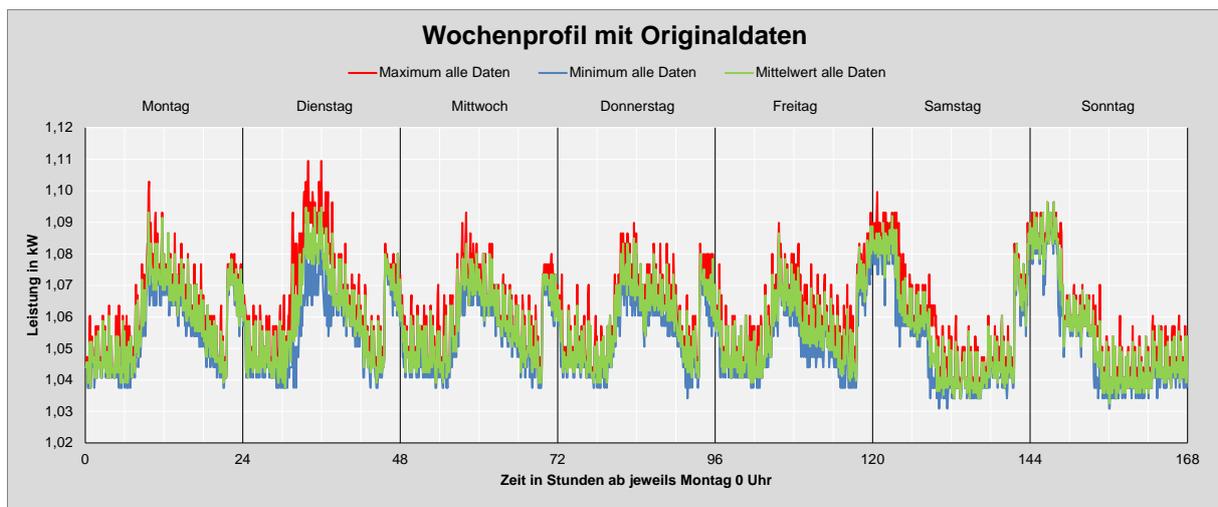


Abbildung 44: Leistungsaufnahme des Servers im Wochenprofil aus den Daten vom 09.01. bis 24.01.2015 (2 Wochen) ermittelt.

Des Weiteren zeigt Abbildung 45 den Tagesverbrauch des Servers über den gemessenen Zeitraum. Hierbei ist ersichtlich, dass über die gesamte Messdauer ein durchschnittlich konstanter Tagesbedarf an elektrischer Energie von ca. 25,5 kWh/Tag verbraucht wird.

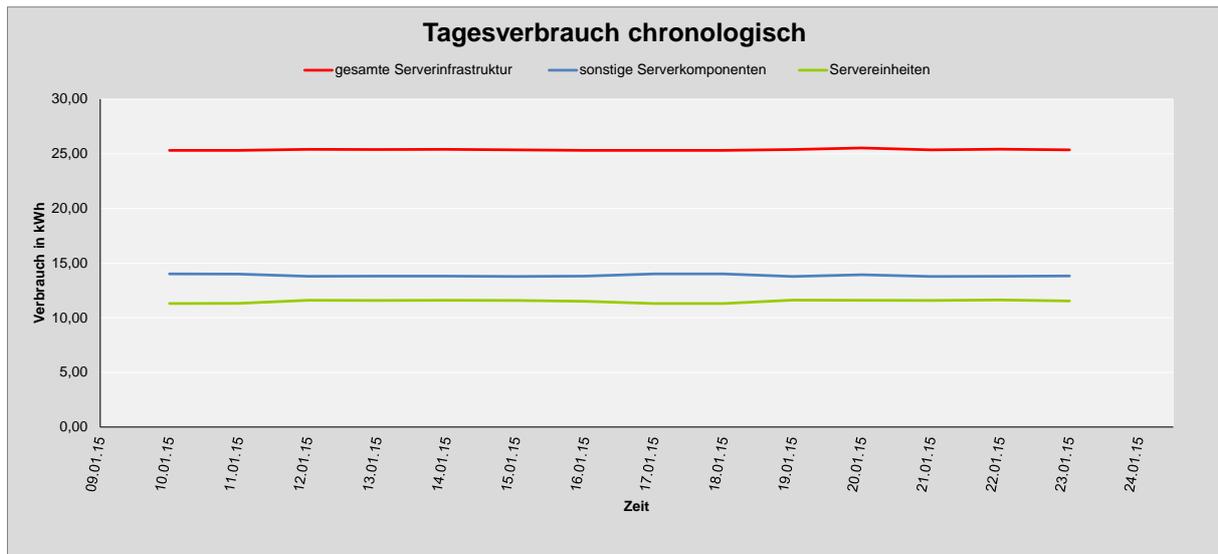


Abbildung 45: Täglicher Stromverbrauch in kWh/Tag des Servers über den Zeitraum von zwei Wochen

### 5.3 Passive Serverkühlung

Wie schon in Abschnitt 3.8 beschrieben, arbeitet die Serverkühlung nur mit Außen- und Kellerluft, lediglich angetrieben von Ventilatoren. Auf eine aktive Kühlung mittels einer Kältemaschine/Klimaanlage wurde bewusst verzichtet.

Im Winter regelt die Lüftungssteuerung die Servertemperatur (Mitte Serverschrank) auf ca. 28 °C. Durch Takten des Ventilators überschwingt die Regelung, sodass sich ein Temperaturband von ca. +/- 1 K ergibt (grüne Kurve in Abbildung 46), innerhalb dessen die Servertemperatur schwankt. Der Mittelwert der Servertemperatur (T\_K52Server\_T3\_2) in Abbildung 46 liegt bei 27,8 °C. Die Solltemperatur von 28 °C wird somit im Winterhalbjahr sehr gut eingehalten. Für Server werden von den Herstellern nicht nur maximale Temperaturen angegeben sondern auch Temperaturänderungsgeschwindigkeiten. Diese liegen bei 10 - 20 K/h. Dieser Wert wird bei der Regelung hier deutlich unterschritten, sodass alle Anforderungen an einen Serverbetrieb eingehalten sind.

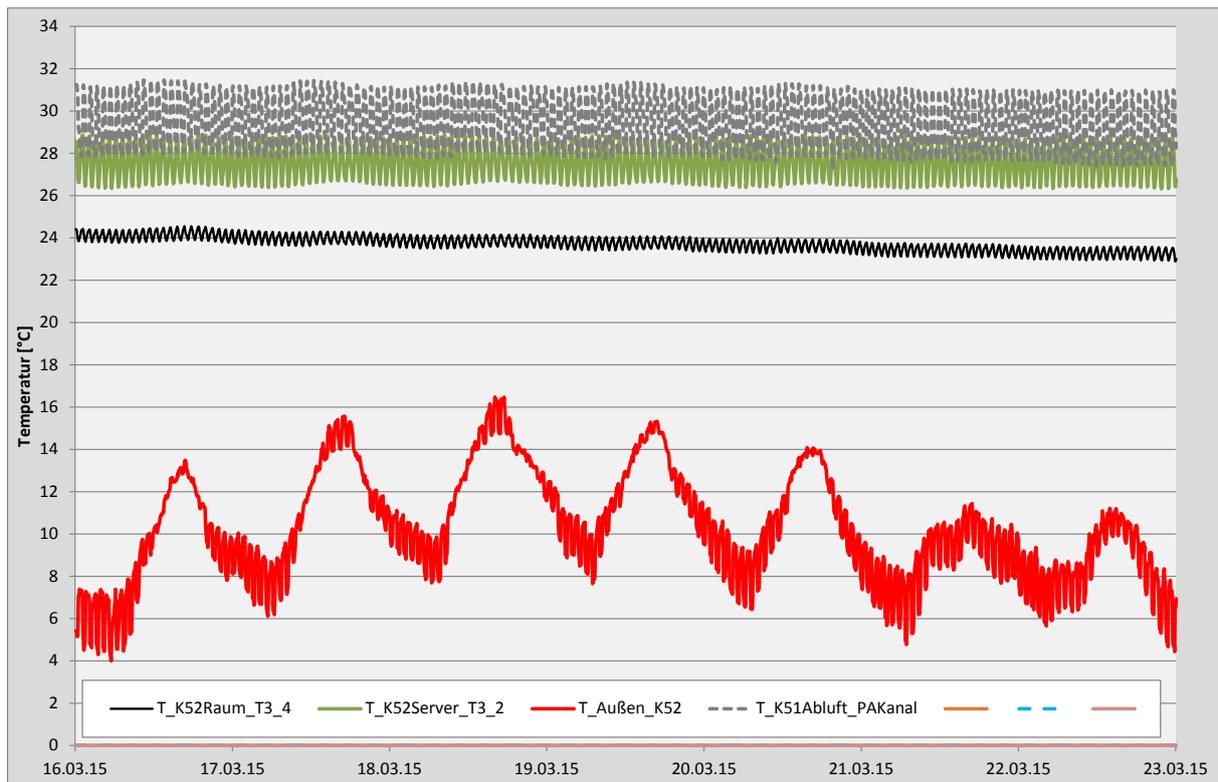


Abbildung 46: Temperaturen Serverraum und -schrank in einer Woche im Frühjahr

In der in Abbildung 47 dargestellten Sommerwoche mit Außentemperaturen von über 24,5 °C im Mittel ist zu erkennen, dass die Serverregelung von Abluftbetrieb auf Abluft indirekt umschaltet, da die Außentemperatur immer über 20 °C liegt. Demzufolge schwankt die Raumtemperatur im entfernten Raum (K49/50 Zulufttraum indirekt) leicht mit der Außentemperatur. Die Temperatur im Umluftkanal (K50Umluft) ist jedoch niedrig. Steigt die Außentemperatur über ca. 24 °C an, wird auf Umluftbetrieb geschaltet und die Temperatur „K50Umluft“ liegt in der Nähe der Temperatur „K51Abluft-Kanal“. Von dieser Betriebsweise wird bei Außentemperaturen unter der Schaltschwelle wieder auf Abluft indirekt umgeschaltet.

Die mittlere Servertemperatur liegt im gezeigten Zeitraum bei 28,3 °C im Mittel, der Maximalwert bei 28,9 °C. Somit ist die passive Kühlung auch in warmen Sommerwochen ohne deutliche nächtliche Auskühlung in der Lage die Servertemperatur annähernd im Sollbereich zu halten.

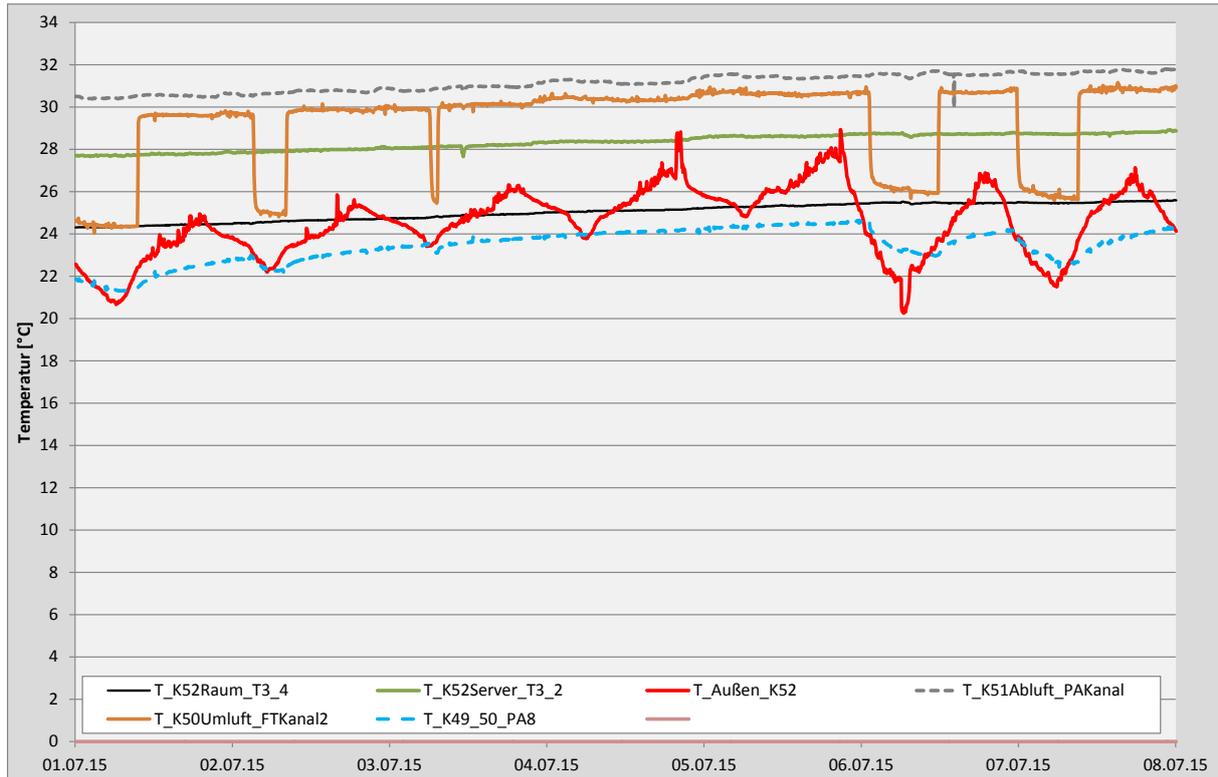


Abbildung 47: Temperaturen Serverraum und -schrank in einer Woche im Sommer

Im Jahr 2015 lag die Servertemperatur im Mittel bei 27,7 °C, die Raumtemperatur im Serverraum bei 24,3 °C.

Im Jahr 2018 nach dem Serverumbau, jedoch noch mit der alten Serverkühlung, lag bis Mitte Mai die mittlere Servertemperatur bei 27,6 °C. Die Temperaturen lagen somit noch im Sollbereich trotz höherer Wärmelast. Leider fehlen die Daten vom Sommer aufgrund eines Datenausfalls für diesen Sensor. Die Raumtemperatur im Serverraum lag im selben Zeitraum im Mittel bei 25,7 °C und somit etwas höher als im Jahr 2015. Im Sommer stieg die Temperatur im Server jedoch weiter an, wie in Abbildung 48 gut zu erkennen ist.

Aufgrund der dauerhaften hohen Außentemperaturen von über 30 °C tagsüber und nur kurzzeitigen Temperaturen unter 20 °C in der Nacht wurden in der Zeit zwischen 18.07. und 13.08.2018 die Türen des Serverschranks geöffnet (einmalige Notmaßnahme). Dadurch hat sich die Abwärme im kompletten Serverraum verteilt und die Ablufttemperatur ist um rund 3 - 4 °C gesunken, da jetzt natürlich auch Raumluft mit abgezogen wurde (vgl. Abbildung 48). Durch das Öffnen der Serverschränke konnte sich die Wärme im Raum verteilen und das Kühlpotenzial von Kellerboden und Kellerwänden genutzt werden.

Erst am 13.8.2018 wurden nach einer etwas kühleren Periode die Servertüren wieder geschlossen, was sich gut im Ansteigen der Ablufttemperatur und im Absinken der Raumtemperatur abbildet.

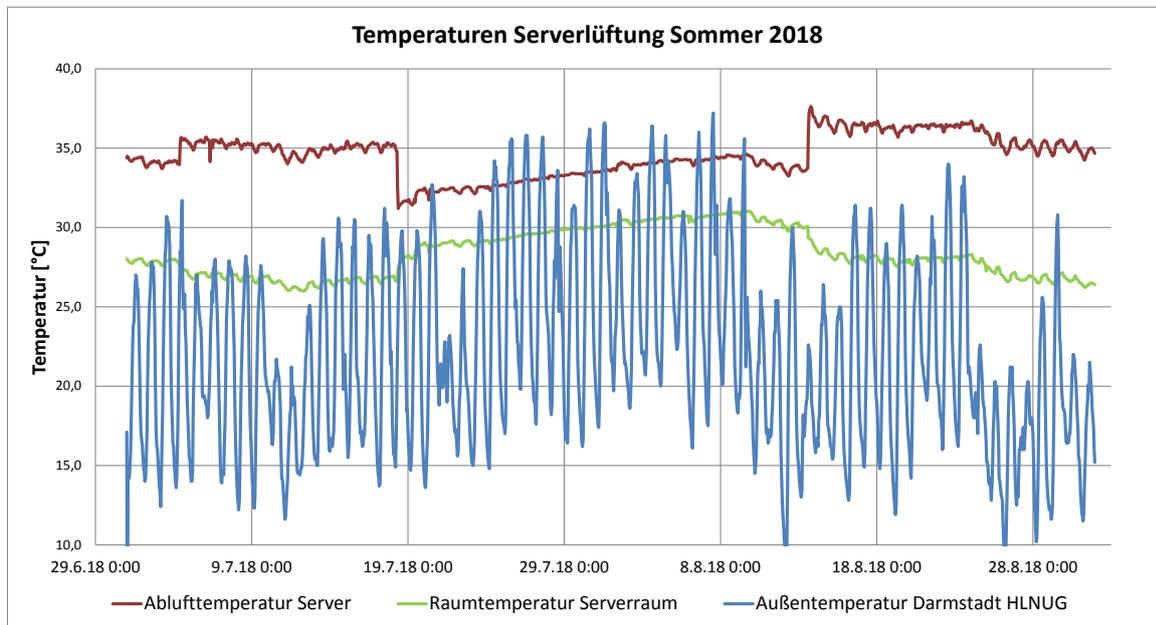


Abbildung 48: Temperaturen Serverlüftung Sommer 2018

Zusätzliche Kurzzeitmessungen (Abbildung 49) mit Temperaturloggern zeigten im Sommer 2018, dass im Tagesverlauf die Temperaturdifferenz von Serverabluft zu Serverzuluft lediglich zwischen 8,8 und 10,2 K schwankt. Die Ablufttemperatur des Serverschranks liegt in diesem Zeitraum um die 35,2 °C mit nur geringen Schwankungen. Die Zulufttemperatur am Boden unter dem Server liegt im Mittel bei 25,9 °C und schwankt um rund 1 K. Gut bildet sich der Verlauf der verschiedenen Betriebsmodi in Abbildung 49 ab. Nachts, wenn die Außenluft direkt in den Serverraum in Bodenhöhe eingeblasen wird, sinkt die Temperatur entsprechend mit der Außentemperatur. Tagsüber im indirekten Betrieb erfolgt die Luftzufuhr durch die vorgeschalteten Kellerräume. Dadurch wird der Temperaturverlauf stark geglättet, was sich in den Plateaus bei rund 26,3 °C widerspiegelt. Aus den Temperaturverläufen ist gut zu erkennen, wie sich die indirekte Serverraumbelüftung auf die Serverkühlung auswirkt. Die Zulufttemperatur im indirekten Betrieb steigt nur sehr langsam im Laufe des Tages an und regeneriert sich in den Nachtzeiten, solange die Außenluft wieder direkt in den Serverraum eingeblasen wird. Das Funktionsprinzip hat sich auch im Sommer 2018 bei extremen Außentemperaturen und höherer Serverleistung bewährt.

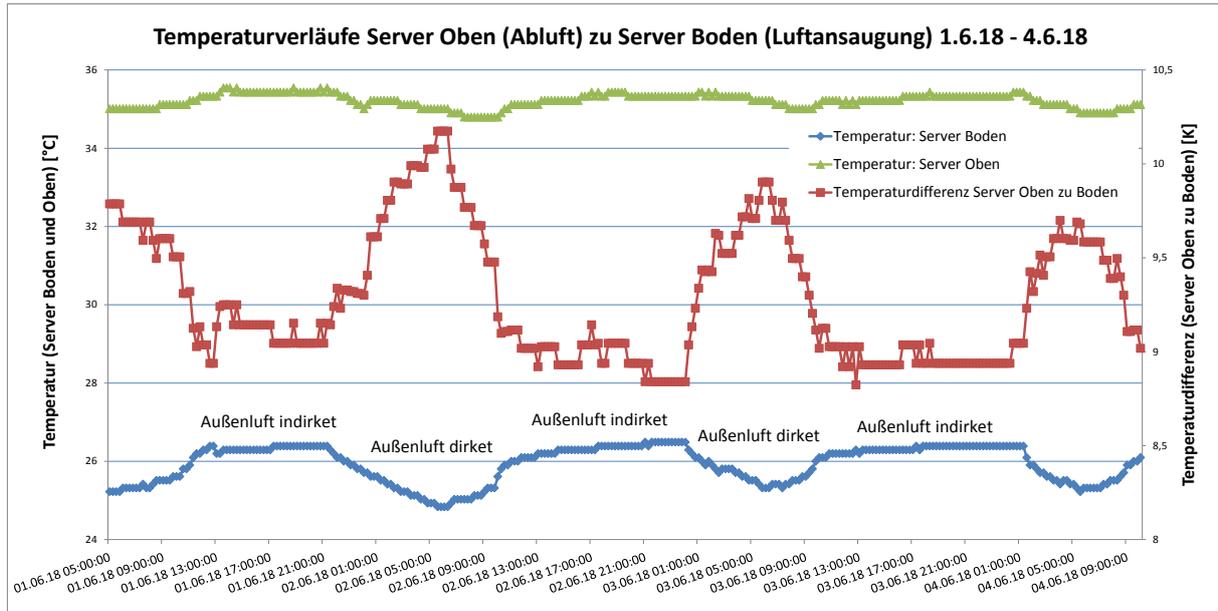


Abbildung 49: Temperaturverlauf Server Oben zu Server Boden (Linke Y-Achse) und daraus resultierenden Temperaturdifferenz (Rechte Y-Achse)

## 5.4 Sommerliche Nachtlüftung

Um den Effekt der sommerlichen Nachtlüftung zu bewerten, kann zum einen der Temperaturverlauf der Abluft der Lüftungsanlage herangezogen werden. Die Temperaturen der Abluft können vereinfacht als mittlere Raumtemperatur des Gebäudes betrachtet werden. Es werden somit die Effekte der automatisch gekippten Fenster, als auch der Lüftungsanlage überlagert abgebildet. Zum anderen kann der Einfluss der gekippten Fenster in den einzelnen Büroräumen dargestellt werden.

In Abbildung 50 ist der Temperaturverlauf der Abluft in der ersten Juniwoche 2015 dargestellt. Zusätzlich ist die Außentemperatur und das Schaltsignal der Fensterantriebe mit aufgetragen. In der Nacht zum 01.06. wurden die Fenster öfter aufgrund von Wind oder Regen geschaltet. In der Nacht zum 06.06. hat es bis in die Nacht hinein geregnet, sodass die Fenster sich erst gegen 2:30 Uhr öffneten. Gut zu erkennen ist zudem die Reduzierung der Ablufttemperatur von rund 1 K über die Nachtstunden. Auch der Einfluss der Außentemperatur ist gut abzulesen: In der kühlen Nacht zum 04.06. ist die Ablufttemperatur um 1,3 K und in der warmen Nacht zum 03.06. nur um 0,9 K gesunken. Von Temperaturen abgesehen spielt der Wind eine wesentliche Rolle beim Abkühleffekt. Ist der Wind zu stark, werden die Fenster automatisch geschlossen. Ist kein Wind vorhanden, wird der Luftwechsel nur von der Thermik im Gebäude angetrieben, und die Büroräume im 2. Obergeschoss kühlen dann erst ab, wenn die Räume im 1. Obergeschoss schon etwas abgekühlt sind.

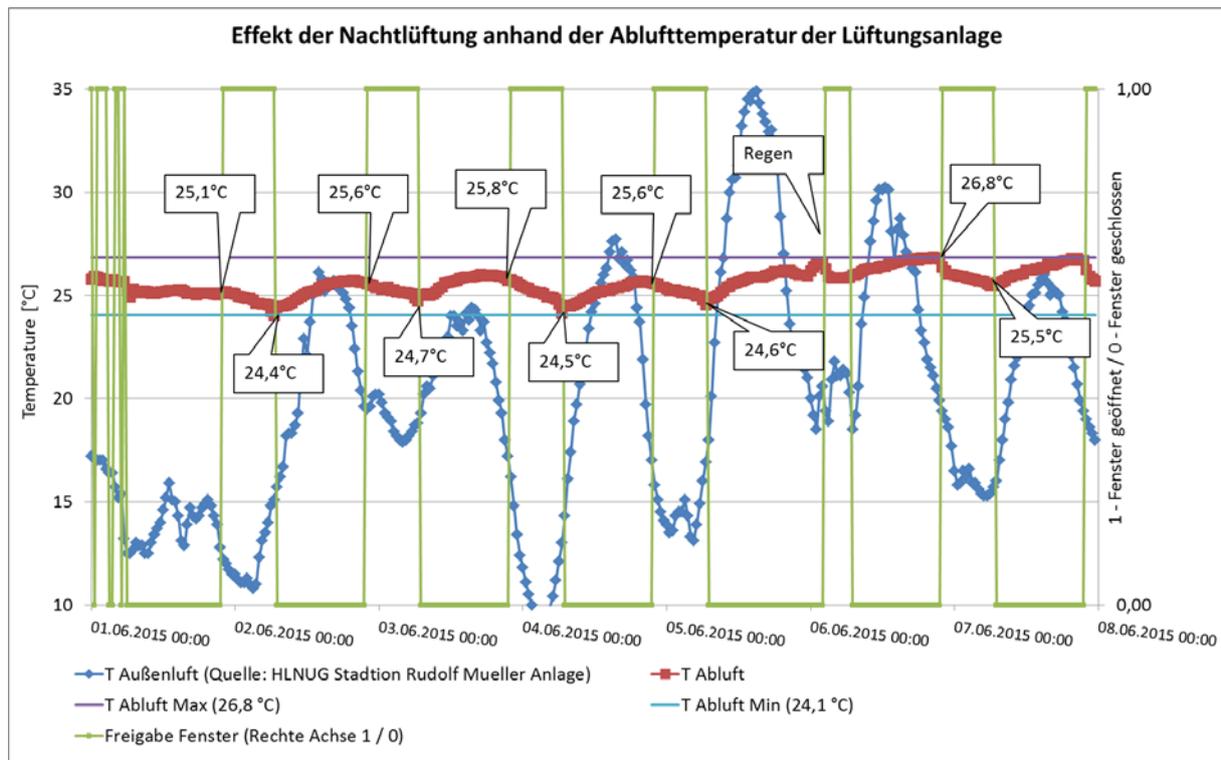


Abbildung 50: Effekt der Nachtlüftung anhand der Ablufttemperatur der Lüftungsanlage

Die Auswirkung der Nachtlüftung der einzelnen Büroräume lässt sich gut in Abbildung 51 erkennen. Das Bild ist ein Screenshot der Messdatendarstellung aus DasyLab und zeigt die Raumtemperaturen der Büros im 1. und 2. Obergeschoss, die mit Temperatursensoren ausgestattet sind. Die Lage der Sensoren ist in Abbildung 14 (Abschnitt 4.1 Messkonzept) dargestellt. Daraus ist ersichtlich, dass der Temperaturhub in den Räumen deutlich ausgeprägter als in der Abluft, wie aus Abbildung 50 ersichtlich ist. Im Büro 1.002 sinkt beispielsweise die Temperatur von 0:00 bis 7:00 von 25 °C auf 21,6 °C ab. Zudem ist der Einfluss der Speicher-masse des Gebäudes am sofortigen Anstieg der Temperaturen, nachdem die Fenster wieder geschlossen wurden, gut abgebildet. In Raum 2.010 wurde das Fenster vormittags noch eine Zeitlang vom Nutzer manuell geöffnet. Die Temperaturen an den Sensoren in den Einzelbüros werden stark von der Lage der Sensoren beeinflusst. Ist der Sensor dicht am automatisch gekippten Fenster montiert, ist der Temperaturhub stark ausgeprägt. Ist der Sensor weit entfernt montiert, ist der Temperaturhub deutlich geringer. Daher muss die Beurteilung der Kurvenschar unter Berücksichtigung dieses Effekts erfolgen.

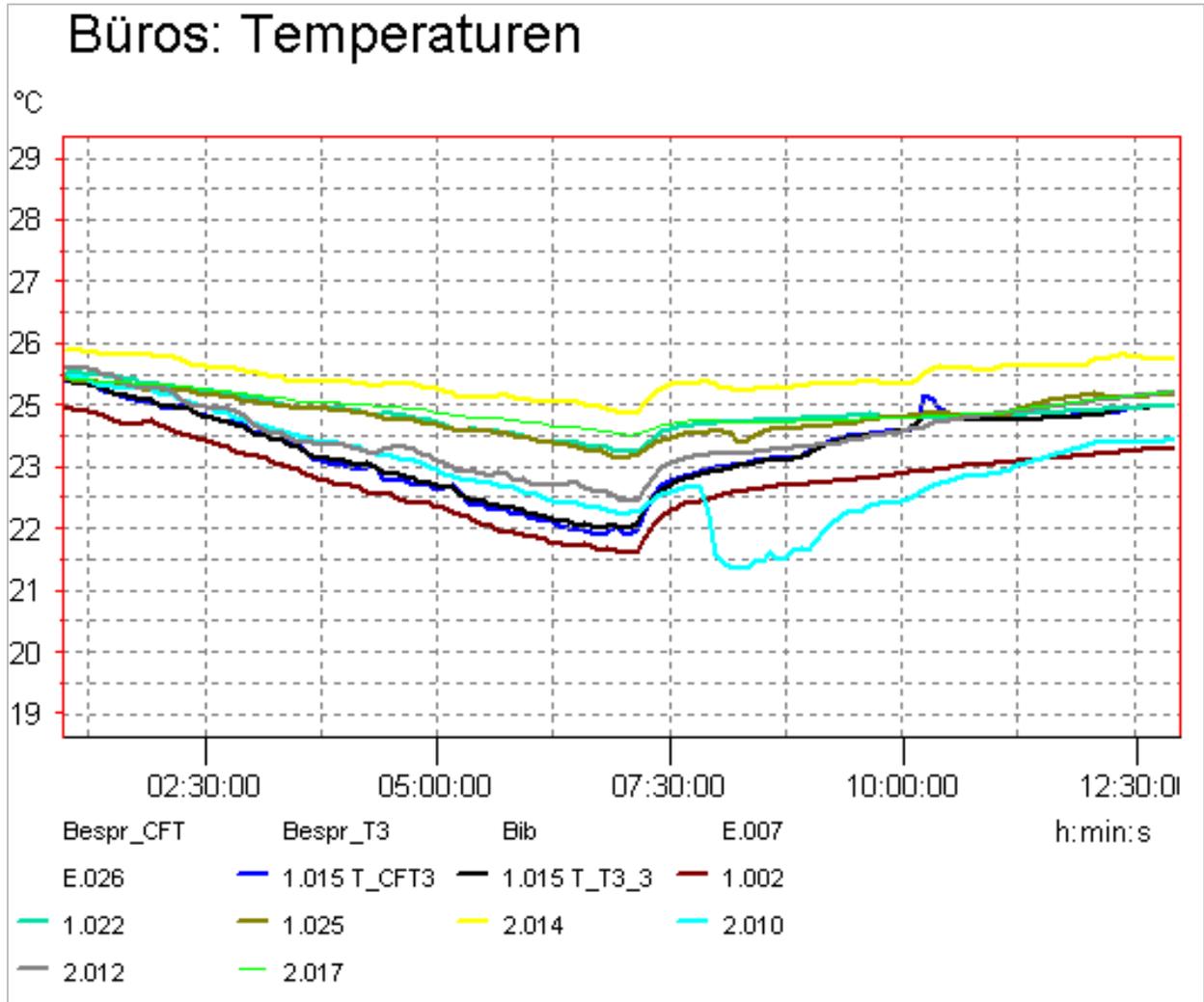


Abbildung 51: Temperaturverlauf Büros 1. und 2. OG im Sommer (Nachtabkühlung)

Durch die sommerliche Nachtlüftung wird die Temperatur im Gebäude nachts in der Regel auch in heißen Wetterperioden wieder soweit abgekühlt, dass der Bürobetrieb ohne Klimatisierung gut möglich ist. Im nächsten Kapitel wird der thermische Komfort des Gebäudes detailliert untersucht und bewertet.

## 6 Sommerlicher Wärmeschutz und thermischer Komfort

Der sommerliche Wärmeschutz hängt im Wesentlichen vom Gesamtenergiedurchlassgrad der transparenten Außenbauteile, ihrer Orientierung und Neigung, ihrem Flächenanteil an den Außenbauteilen, der Lüftung in den Räumen sowie von den Wärmeleiteigenschaften der opaken Bauteile ab [1]. Die Anforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz werden in Teil 2 der DIN 4108 geregelt.

Zur Bewertung der thermischen Behaglichkeit in Innenräumen werden in der vorgenannten DIN – in Abhängigkeit von den drei festgelegten Sommer-Klimaregionen (A, B, C) in Deutschland – Bezugswerte der operativen Innentemperaturen angegeben. Beispielsweise liegt die Stadt Darmstadt in der Sommerklimaregion C mit einem Bezugswert der operativen Innentemperaturen bei 27 °C.

In kritischen Räumen eines zu bewertenden Gebäudes darf die (operative) Raumtemperatur nur eine bestimmte Anzahl von Stunden (Übertemperaturgradstunden) im Jahr den angegebenen Bezugswert der operativen Innentemperatur überschreiten. Die DIN 4108 legt 500 [Kh] pro Jahr als Anforderungswert der Übertemperaturgradstunden für Nichtwohngebäude – mit einer Bezugszeit von Montag bis Freitag 7 Uhr bis 18 Uhr – fest.

### 6.1 Normative Bestimmung des thermischen Komforts

Die Bewertung des thermischen Komforts für ein Gebäude kann mit zwei verschiedenen Verfahren erfolgen. Für die maschinell gekühlten Räume gelten die Anforderungen nach DIN EN ISO 7730. Für Räume, deren Temperatur sich ausschließlich durch Fensteröffnen und -schließen ergibt, kann das adaptive Modell nach DIN EN 15251 angewandt werden. Eine maschinelle Lüftung im Sommer kann jedoch bei dem letztgenannten Verfahren zum Einsatz kommen.

Zum besseren Verständnis der Ergebnisse wird vorerst die Grundlage beider Verfahren kurz beschrieben. Die Beschreibungen basieren auf den oben genannten Normungen.

Die thermische Behaglichkeit wird u. a. durch folgende Faktoren beeinflusst:

- Aktivität (abhängig von der Art der Tätigkeit)
- Kleidung (Dämmwirkung der Kleidung)
- Lufttemperatur
- Strahlungstemperatur
- Luftgeschwindigkeit und
- Feuchtigkeit

Wenn der Mensch weder eine höhere noch eine niedrigere Umgebungstemperatur vorzieht, befindet er sich mit seiner Umgebung in einem thermischen Gleichgewichtszustand. DIN EN ISO 7730 fasst in einem Verfahren die oben genannten Faktoren zu einem Wert (PMV-Wert: das vorhergesagte mittlere Votum) auf einer Sieben-Punkte-Skala gemäß Tabelle 9 zusammen:

Tabelle 9: PMV- und PPD-Wert gemäß DIN EN ISO 7730 [2]

PMV-Wert (vorhergesagtes mittleres Votum)	Bedeutung	PPD-Wert (Anteil unzufriedener Personen)
+3	heiß	90 %
+2	warm	75 %
+1	etwas warm	25 %
0	neutral	5 %
-1	etwas kühl	25 %
-2	kühl	75 %
-3	kalt	90 %

Die Qualität des thermischen Raumklimas kann auch als der vorhergesagte Prozentsatz unzufriedener Personen (PPD-Wert) im Raum ausgedrückt werden (vgl. Tabelle 9).

Nach DIN 15251 werden die Anforderungen an Innenraumklima u. a. in Abhängigkeit von PMV- und PPD-Wert (siehe Tabelle 10) in vier Kategorien wie folgt unterteilt:

- Kategorie I bedeutet ein hohes Maß an Erwartungen und wird empfohlen für Räume, in welchen sich sehr empfindliche und anfällige Personen mit besonderen Bedürfnissen aufhalten, z. B. Personen mit Behinderungen, kranke Personen, sehr kleine Kinder und ältere Personen.
- Kategorie II entspricht einem normalen Maß an Erwartungen und wird empfohlen für neue und renovierte Gebäude.
- Kategorie III entspricht einem annehmbaren, moderaten Maß an Erwartungen und kann bei bestehenden Gebäuden angewendet werden.
- Kategorie IV beinhaltet Werte außerhalb der oben genannten Kategorien. Diese Kategorie sollte nur für einen begrenzten Teil des Jahres angewendet werden.

Tabelle 10: Klassifizierung des Innenraumklimas gemäß DIN EN 15251 [3]

Kategorie	Wärmezustand des Körpers als Ganzes	
	PPD (Anteil unzufriedener Personen)	PMV (vorhergesagtes mittleres Vo- tum)
I	< 6 %	-0,2 < PMV < +0,2
II	< 10 %	-0,5 < PMV < +0,5
III	< 15 %	-0,7 < PMV < +0,7
IV	> 15 %	PMV < -0,7 oder +0,7 < PMV

Die Anforderungen können zudem als operative Temperatur angegeben werden. Die operative Temperatur setzt sich aus der Lufttemperatur und der Temperatur der Raumumschließungsflächen zusammen. In vielen Gebäuden und Räumen mit mäßigen Heiz- und Kühllasten sind jedoch die operative Temperatur und die Raumlufttemperatur fast identisch.

In Tabelle 11 werden diese Anforderungen gemäß DIN 7730 in Form von Grenzwerten der operativen Temperatur u. a. in Abhängigkeit von Aktivität von Gebäudenutzer und Gebäudetyp für die Kühlungs- und Heizperiode dargestellt. Die Kategorie A bis C entspricht den Kategorien I bis III der DIN 15251.

Tabelle 11: Grenzwerte der operativen Temperatur nach DIN EN ISO 7730

Gebäude-/ Raumtyp	Aktivität [W/m <sup>2</sup> ]	Kategorie	Operative Temperatur [°C]	
			Sommer (Kühlungsperiode)	Winter (Heizperiode)
Einzel- u. Großraumbüro, Konferenzraum, Cafeteria/ Restaurant, Klassenraum ...	70	A ( I )	24,5 ± 1,0	22,0 ± 1,0
		B ( II )	24,5 ± 1,5	22,0 ± 2,0
		C ( III )	24,5 ± 2,5	22,0 ± 3,0
Kindergarten	81	A ( I )	23,5 ± 1,0	22,0 ± 1,0
		B ( II )	23,5 ± 2,0	23,0 ± 2,5
		C ( III )	23,5 ± 2,5	23,0 ± 3,5

Für natürlich belüftete Gebäude oder Räume wurde in DIN 15251 ein adaptives Komfortmodell entwickelt, das vom gleitenden Mittelwert der Außentemperatur abhängt. Das ist der exponentiell gewichtete Mittelwert des Tagesmittelwertes der Außenlufttemperatur. Der berechnete gleitende Mittelwert der Außenlufttemperatur für den aktuellen Tag nach DIN 15251 erlaubt die Berücksichtigung der Tagesmittelwerte der Außentemperaturen der vergangenen sieben Tage vor dem aktuellen Tag.

Das Verfahren darf angewandt werden, wenn der Raum nicht maschinell gekühlt wird. Eine maschinelle Lüftung im Sommer kann jedoch zum Einsatz kommen. Es wird zudem vorausgesetzt, dass die Fenster zur Regelung des Raumklimas bevorzugt werden, die Gebäudenutzer sitzende Tätigkeit ausüben und im Gebäude keine strengen Bekleidungs Vorschriften gelten.

Da die vorgenannten Voraussetzungen im IWU-Haus gegeben sind, wird nachfolgend das adaptive Verfahren nach DIN 15251 an einem repräsentativ thermisch kritischen Raum des IWU zur Beurteilung des thermischen Komforts im Sommer angewandt und die Ergebnisse anschließend diskutiert.

## 6.2 Repräsentativ thermisch kritischer Raum

Anhand von gemessenen Raumtemperaturen des Büros im 2. Obergeschoss wird zuerst die thermische Behaglichkeit des Raumes untersucht. Hierzu werden die Messdaten in den Jahren 2012 und 2015 herangezogen.

Der Deutsche Wetterdienst (DWD) beschreibt in seiner Pressemitteilung den Sommer 2012 und 2015 wie folgt: „Der insgesamt durchschnittliche Sommer 2012 war bis Ende Juli von einer recht wechselhaften Witterung geprägt und endete mit einem sehr warmen, trockenen und sonnenscheinreichen August“ [4]. „Der Sommer 2015 erreichte eine Durchschnittstemperatur von 18,5 Grad Celsius (°C). Mit einer Abweichung von 2,2 Grad über dem Mittel der international gültigen Referenzperiode 1961 bis 1990 geht er am Ende wahrscheinlich als drittwärmster Sommer in die meteorologischen Geschichtsbücher ein“ [5]. Diese Aussagen sollen durch die nächsten zwei Abbildungen anhand der Außentemperatur<sup>17</sup> für Darmstadt nachvollzogen werden.

Aus Abbildung 52 und Abbildung 53 ist nach Aussagen des DWD zu entnehmen, dass das Jahr 2012 ein normales und das Jahr 2015 eher ein extremes Jahr bezüglich der Außentemperaturen in Darmstadt repräsentiert. Die Abbildungen stellen zudem die Abhängigkeit der gemessenen Raumtemperatur von der Außentemperatur im Sommer 2012 bzw. 2015 dar. Die Raumtemperaturen veranschaulichen hierbei die Messdaten vom 01.06. bis 31.08.2012 bzw. 01.05. bis 30.09.2015 eines auf der Südseite befindlichen Büros im 2. Obergeschoss.

---

<sup>17</sup> Die Messdaten der Außentemperatur von Darmstadt wurden aus der Internetseite des Hessischen Landesamts für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) bezogen.

Aus Abbildung 52 ist ersichtlich, dass die extremen Temperaturschwankungen der Außenluft von 7 °C bis 36 °C die Raumtemperaturen – u. a. aufgrund des guten Wärmeschutzes der Außenbauteile (mittlerer Wärmedurchgangskoeffizient  $\bar{U}_{(\text{opak})} = 0,10 \text{ W/m}^2\text{K}$  bzw.  $\bar{U}_{(\text{transparent})} = 0,85 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) sowie des gut funktionierenden Sonnenschutzes – nur moderat beeinflussen (mittlere Raumtemperatur von 23,5 °C über die gesamte Messzeit bzw. maximale Raumtemperatur von ca. 27 °C bei 36 °C Außentemperatur).

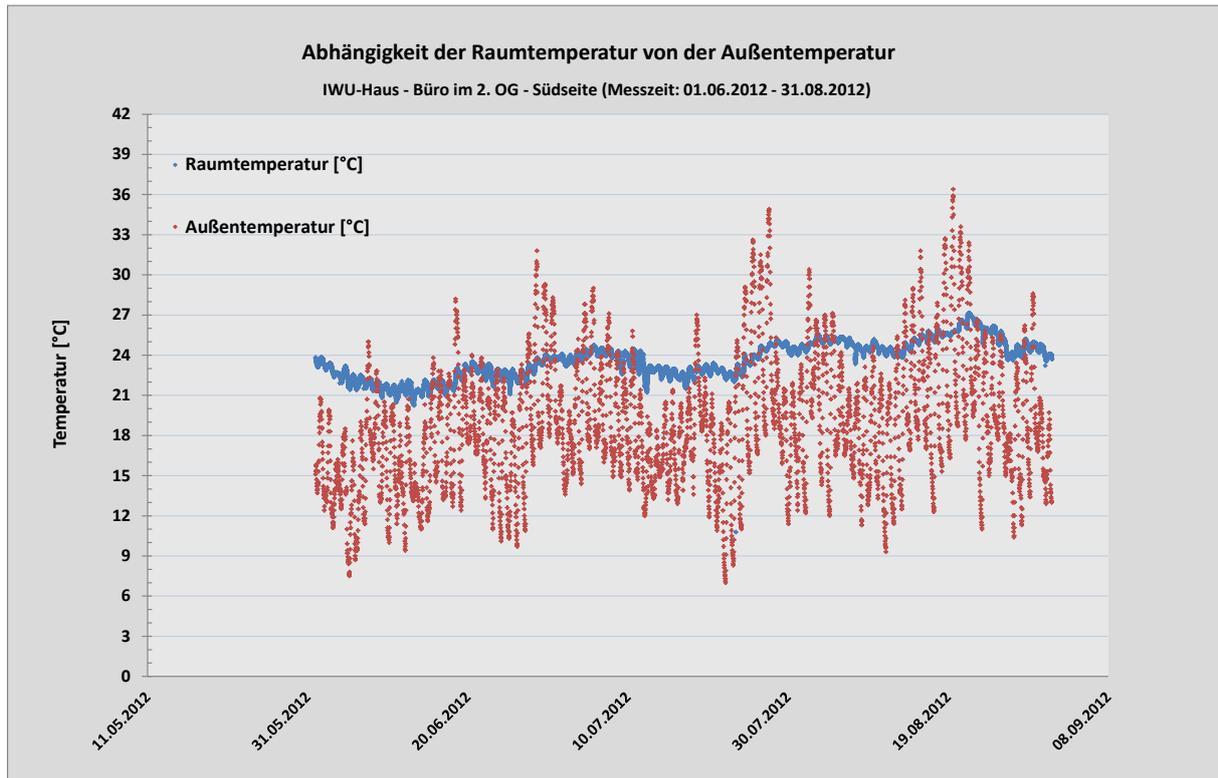


Abbildung 52: Abhängigkeit der Raumtemperatur von der Außentemperatur. Messdaten vom 01.06. bis 31.08.2012 für ein Büro im 2. OG auf der Südseite (ungünstigste Lage)

Auch die extremen Wetterverhältnisse im Jahr 2015 mit ungewöhnlich wenigen Niederschlägen bei zeitgleich hohen Temperaturen (maximale Außentemperatur von 39,6 °C) konnten die Raumtemperaturen nur kurzfristig (während drei Stunden maximal gemessener Raumtemperaturen von 27,5 °C bis 28 °C) um ca. ein Grad im Vergleich zum Jahr 2012 anheben (siehe Abbildung 52 und Abbildung 53). Bezüglich des sommerlichen Wärmeschutzes haben hierbei die Büros auf der Südseite bzw. im 2. Obergeschoss eher eine ungünstigere Lage als die auf der Nordseite bzw. im 1. Obergeschoss und Erdgeschoss.

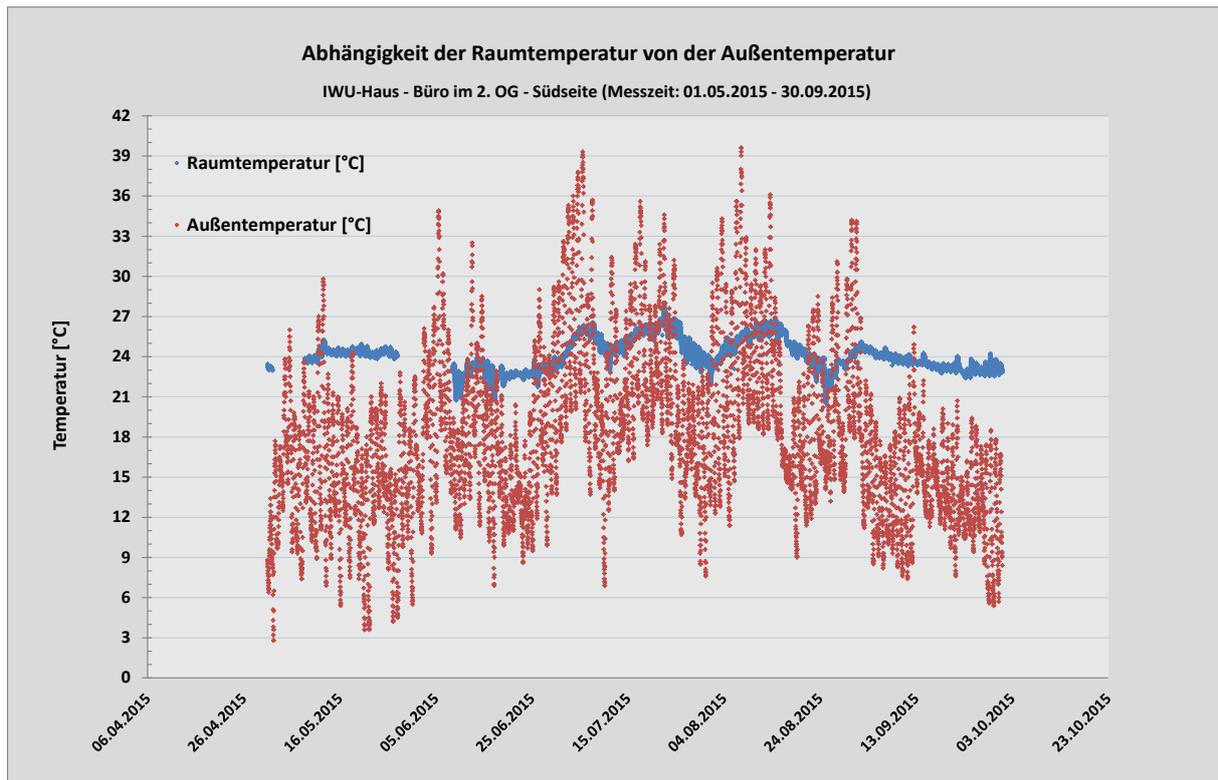


Abbildung 53: Abhängigkeit der Raumtemperatur von der Außentemperatur. Messdaten vom 01.05. bis 30.09.2015 für ein Büro im 2. OG auf der Südseite

Als ein Indikator zur Bewertung des thermischen Komforts kann die Unterschreitung des Grenzwertes der Übertemperaturgradstunden von 500 Kh/a – bei thermischen Simulationen zur normativen Bewertung des sommerlichen Wärmeschutzes für Nichtwohngebäude nach DIN 4108-2:2013-02 – herangezogen werden. Als Bezugswert der (operativen) Innentemperatur<sup>18</sup> legt die genannte DIN-Norm 27 °C für die Stadt Darmstadt (Sommerklimaerion C) fest.

Abbildung 54 zeigt die Dauerlinien der gemessenen Raumtemperaturen (sortierte Stundenmittelwerte) im Sommer 2012 und 2015. Demnach betragen die Übertemperaturgradstunden des Raumes (Temperaturen über 27 °C) nur 7 Stunden während der drei Sommermonate für das Jahr 2012. Diese Übertemperaturgradstunden gelten zudem für das ganze Jahr (ca. 0,3 % der Nutzungsdauer). Erst bei einer Herabsetzung des Bezugswerts auf 24,6 °C würden sich die Übertemperaturgradstunden des Raumes (468 Stunden, davon 313 Stunden innerhalb der Arbeitszeit) dem Grenzwert von 500 Kh/a gemäß DIN 4108-2 annähern. Selbst für das Jahr 2015 betragen die Übertemperaturgradstunden lediglich 11 Stunden, davon 7 Stunden innerhalb der Arbeitszeit. Bei einem Bezugswert von 25,6 °C würde dann der Grenzwert

<sup>18</sup> Die empfundene Raumtemperatur wird als operative Temperatur bezeichnet und ist der Mittelwert aus Raumlufttemperatur und der flächenanteilig gemittelten Oberflächentemperatur der raumumschließenden Flächen (DIN 4108-2:2013-02). Da die Temperaturdifferenz zwischen der Raumluft und der Innenoberflächentemperatur der raumumschließenden Flächen aufgrund der gut gedämmten Außenbauteile (30 cm Dämmung) abnimmt, verringert sich der Einfluss der Oberflächentemperatur entsprechend.

von 500 kh/a für 2015 erreicht werden. Dies verdeutlicht die ausgezeichnete thermische Qualität des Raumklimas im Sommer.

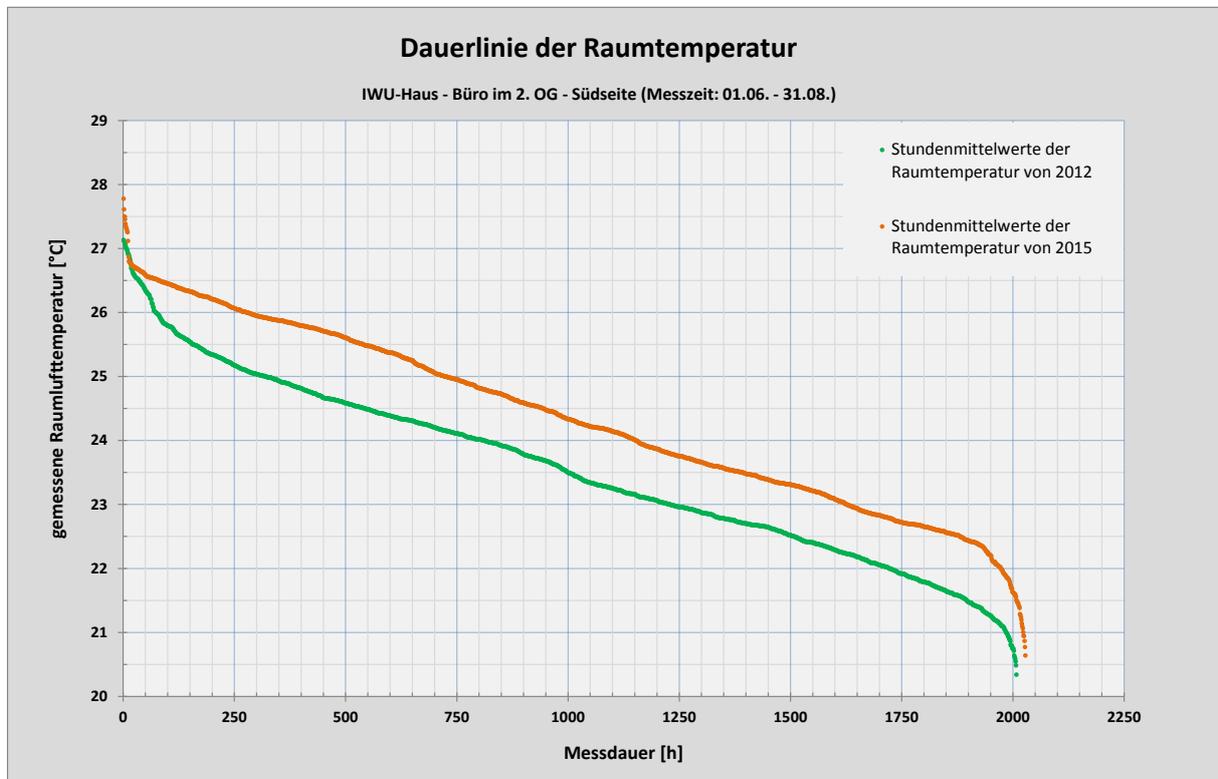


Abbildung 54: Dauerlinie der Stundenmittelwerte der Raumtemperatur eines Büros im 2. Obergeschoss auf der Südseite. Messdaten vom 01.06. bis 31.08. für das Jahr 2012 und 2015

Schließlich repräsentieren Abbildung 55 (für 2012) und Abbildung 56 (für 2015) die Komfortbewertung nach dem adaptiven Komfortmodell gemäß DIN EN 15251. Die Innentemperatur (die gemessenen 5-Minuten-Werte der Raumlufttemperatur) wird hierbei als Funktion des exponentiell gewichteten gleitenden Mittelwertes der Außentemperatur dargestellt. Die Messdaten werden nach Temperaturen innerhalb bzw. außerhalb der Arbeitszeit unterschieden. Des Weiteren sind untere bzw. obere Grenzwerte der operativen Innentemperatur nach DIN EN 15251 durch blaue und rote Linien gekennzeichnet (siehe Tabelle 11).

Nach Abbildung 55 und Abbildung 56 unterschreitet der repräsentative Raum (2. OG Südseite) sogar die Anforderungen der Kategorie I (siehe rote Linie). Die Kategorie I bedeutet nach DIN EN 15251 ein hohes Maß an Erwartungen und wird empfohlen für Räume, in denen sich sehr empfindliche und anfällige Personen mit besonderen Bedürfnissen aufhalten, z. B. Personen mit Behinderungen, kranke Personen, sehr kleine Kinder und ältere Personen. Kategorie I bedeutet zudem, dass (theoretisch) weniger als 6 % der Gebäudenutzer mit der Qualität des thermischen Raumklimas unzufrieden sind (vgl. PMV-PPD-Index nach Tabelle 10).

Für die Analyse der Temperaturunterschreitungen im Sommer kann – gemäß den Kriterien des Bewertungssystems Nachhaltigen Bauen (BNB) zur Bewertung des thermischen Raum-

klimas – unabhängig von der Klassifizierung generell die zulässige Untergrenze der Kategorie III nach DIN EN 15251 (siehe Tabelle 10) für Büroräume angesetzt werden (siehe blaue Linien in Abbildung 55 und Abbildung 56).

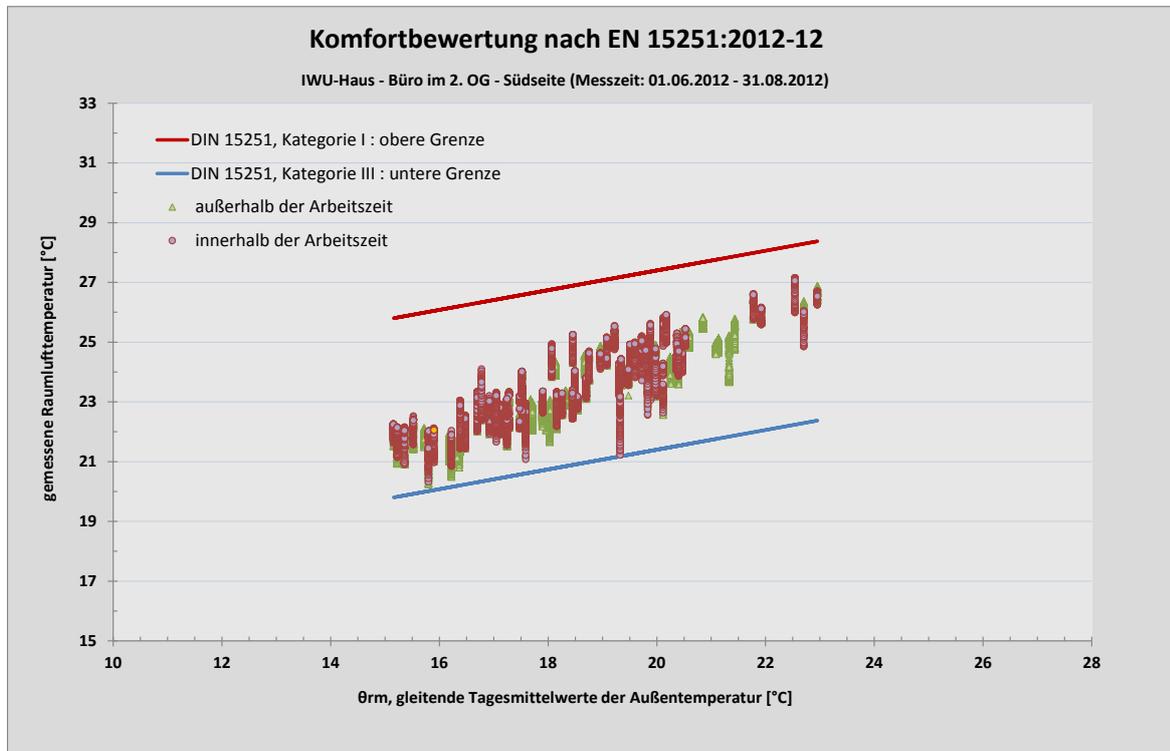


Abbildung 55: Komfortbewertung nach dem adaptiven Komfortmodell gemäß DIN EN 15251 für das Jahr 2012. Die gemessene Raumlufttemperatur dargestellt als Funktion des exponentiell gewichteten gleitenden Mittelwertes der Außentemperatur

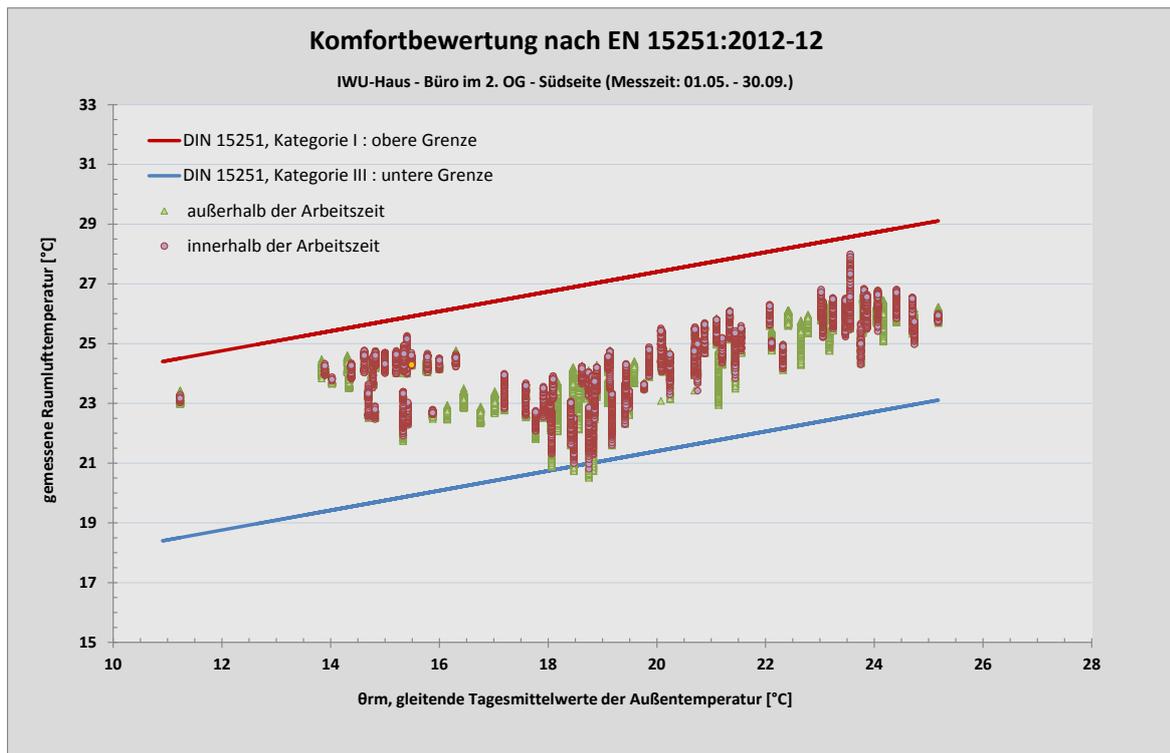


Abbildung 56: Komfortbewertung nach dem adaptiven Komfortmodell gemäß DIN EN 15251 für das Jahr 2015. Die gemessene Raumlufttemperatur dargestellt als Funktion des exponentiell gewichteten gleitenden Mittelwertes der Außentemperatur

Im IWU-Haus wurde die Untergrenze in den gemessenen Zeiträumen innerhalb der Arbeitszeit praktisch kaum unterschritten. Aufgrund dessen ist auch keine Unterkühlung des Gebäudes im Sommer aufgetreten (vgl. Abbildung 55 und Abbildung 56).

Durch die Sanierung nach dem Passivhaus-Standard wurden nicht nur der Energieverbrauch sowie THG-Emissionen des Bürogebäudes enorm reduziert, sondern zudem ohne Klimatisierung ein ausgezeichnetes sommerliches Raumklima erreicht.

## 7 Nutzerzufriedenheit und Nutzerakzeptanz

Mit zunehmender Energieeffizienz infolge der baulichen und insbesondere anlagentechnischen Maßnahmen erhöht sich unmittelbar die Technisierung, wie beispielsweise Steuerung und Regelung der Anlagentechnik, in Gebäuden. Einerseits wirkt sich der hierbei bereitgestellte Komfort auf das Wohlbefinden der Gebäudenutzer aus. Andererseits beeinflusst er das Verhalten der Gebäudenutzer. Dabei spielt die Nutzerzufriedenheit eine entscheidende Rolle für die Akzeptanz der Energieeffizienzmaßnahmen.

Um die baulichen und technischen Ausstattungen des IWU-Hauses aus Sicht der Gebäudenutzer zu beurteilen sowie ihre Akzeptanz bezüglich der technischen Maßnahmen feststellen zu können, wurde eine Umfrage zur Nutzerzufriedenheit im Winter 2015 in der Zeit von 2. bis zum 15. Februar im IWU durchgeführt.

Zu diesem Zweck wurde ein Fragebogen aus einer Feldstudie zur Nutzerzufriedenheit in Bürogebäuden<sup>19</sup> herangezogen und an die Gegebenheiten des IWU-Hauses angepasst. Der Fragebogen beinhaltet Umfragen zu den folgenden Themen:

- a) Umfrage zur allgemeinen Befindlichkeit und zum Gebäude
- b) Umfrage zu den Lichtverhältnissen am Arbeitsplatz
- c) Umfrage zur künstlichen Beleuchtung
- d) Umfrage über das Raumklima am Arbeitsplatz
- e) Umfrage zu Belüftungsmöglichkeit und Luftqualität im Büro
- f) Umfrage zur Gestaltung der Büros
- g) Umfrage zum Thema Umgebungsgeräusche
- h) Umfrage zum Thema gesundheitliche Beschwerden am Arbeitsplatz

Aufgrund des weitreichenden Umfangs der Befragung kann im Rahmen dieser Studie nicht auf die einzelnen Fragen eingegangen werden. Vielmehr wird in diesem Kapitel den relevanten Fragen nachgegangen, die im Zusammenhang mit den Messdaten stehen und Hinweise zur Qualität des umgesetzten Energiekonzepts bzw. zu den Schwachstellen des Gebäudes aus Sicht der Gebäudenutzer liefern.

Die unkommentierte Auswertung aller Fragen des Fragebogens kann jedoch dem Anhang (Abschnitt 10.1) entnommen werden.

Vor der Behandlung der relevanten Fragen werden vorerst die Außenlufttemperaturen während der Befragung sowie zwei Wochen vor der Befragung dargestellt, um die Relation der Antworten der Befragten zu den Wetterverhältnissen während der Befragung besser nachvollziehen bzw. beurteilen zu können.

---

<sup>19</sup> Gossauer, Elke: Nutzerzufriedenheit in Bürogebäuden - Eine Feldstudie; Dissertation; Freiburg; 24.01.2008

Aus Abbildung 57 ist ersichtlich, dass die Außenlufttemperatur in den zwei Wochen vor und während der Befragung hauptsächlich zwischen  $-5\text{ °C}$  bis  $5\text{ °C}$  lag<sup>20</sup>.

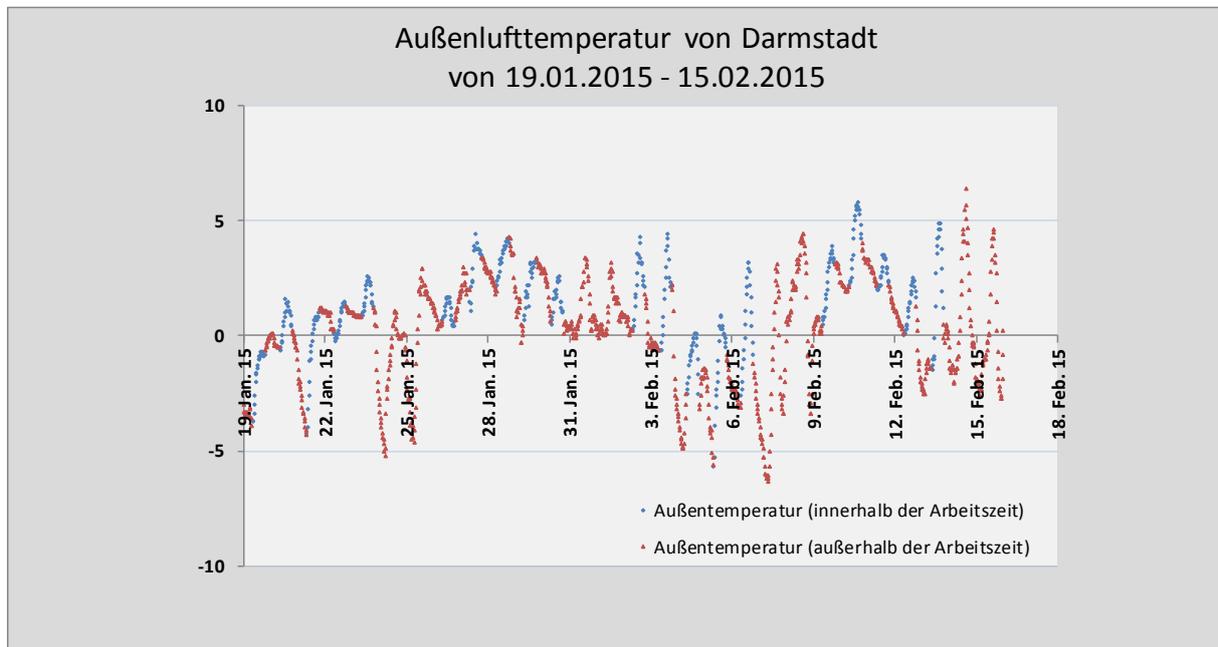


Abbildung 57: 30-Minuten Werte der Außenlufttemperatur von Darmstadt vor und während der Befragung (19.01 bis 15.02.2015)

Des Weiteren veranschaulicht Abbildung 58 die historischen Tagesmittelwerte der Außentemperatur vom Jahr 2003 bis 2015. Die Extremwerte im Winter liegen in den letzten 12 Jahren in den meisten Fällen zwischen  $-5\text{ °C}$  und  $10\text{ °C}$ . Daher kann in der Zeit der Befragung von typischen Wintertagen in Darmstadt ausgegangen werden.

<sup>20</sup> In Abbildung 57 wird die Außenlufttemperatur innerhalb und außerhalb der Arbeitszeiten (durchschnittlich von Mo. bis Fr. von 8:00 bis 18:00 Uhr) differenziert dargestellt.

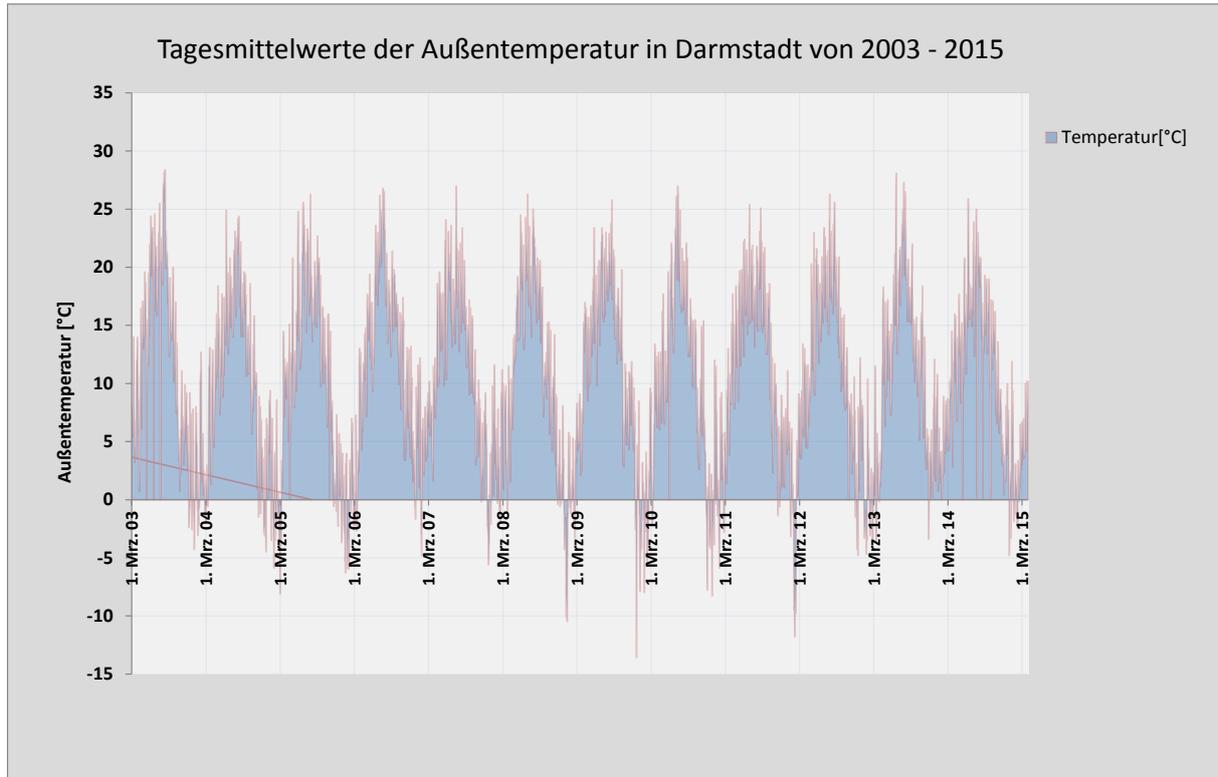


Abbildung 58: Historische Tagesmittelwerte der Außentemperatur von Darmstadt vom Jahr 2003 bis 2015

Insgesamt wurden 43 Fragebögen ausgeteilt, von denen 37 Fragebögen von den Gebäudenutzern ausgefüllt und zurückgegeben wurden. Dies entspricht einer Rücklaufquote von 86 %.

Die Aufteilung der befragten Personen in Geschlechter sowie ihre Altersverteilung und ihre durchschnittlichen Arbeitsstunden liefert Abbildung 59. Zudem können die Lage und die Orientierung der Büros der Befragten aus Abbildung 59 entnommen werden.

Demnach sind:

- ca. 60 % der Befragten männlich und 40 % weiblich,
- 87 % der Befragten arbeiten durchschnittlich 5 Tage in der Woche,
- 51 % der Büros der Befragten befinden sich im 1. OG und 35 % im 2. OG und
- 51 % der Büros sind nach Süden und 49 % nach Norden ausgerichtet.

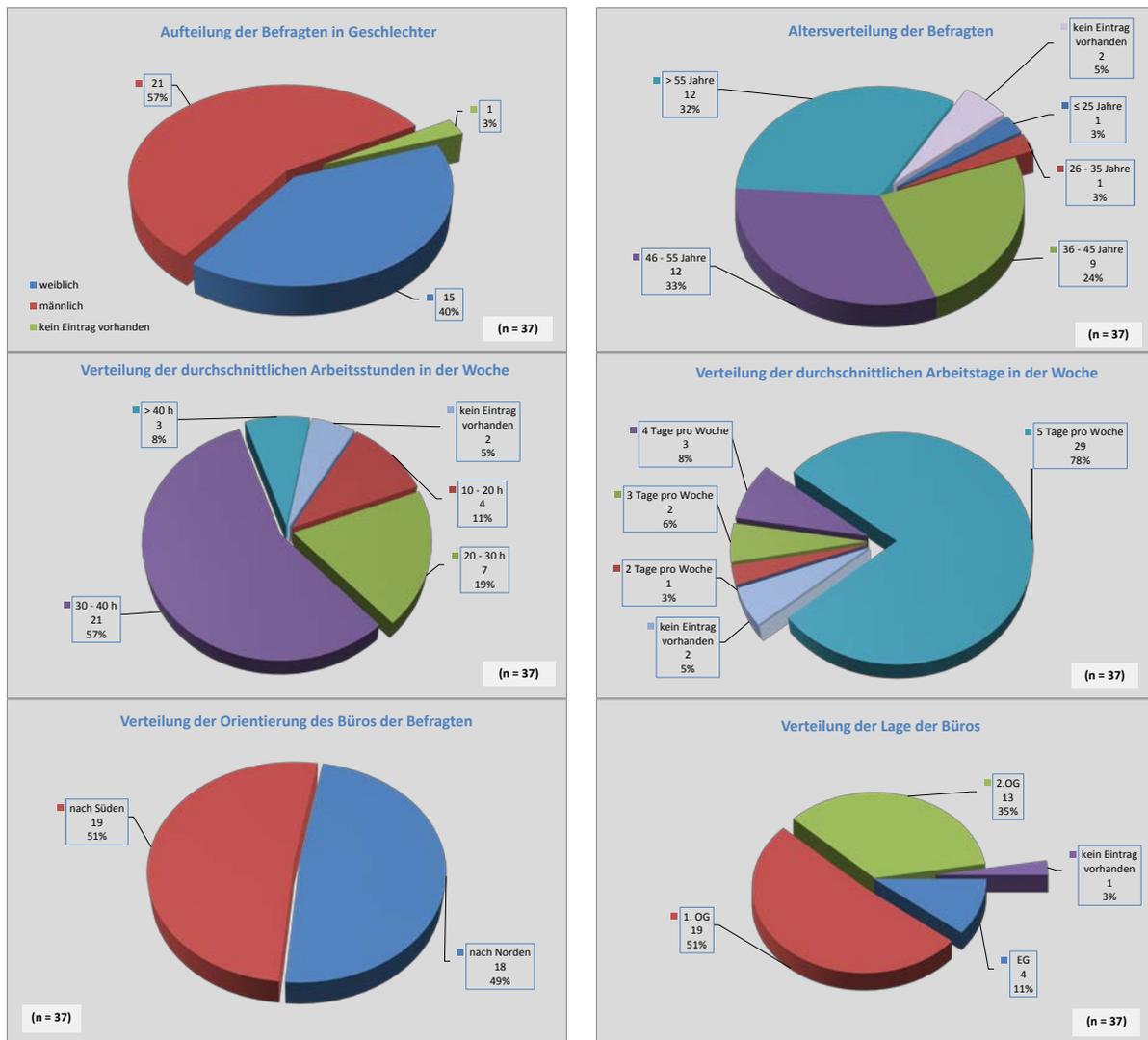


Abbildung 59: Statistische Angaben zu den befragten Personen sowie Lage und Orientierung der Büros

Abbildung 60 veranschaulicht die Zufriedenheit der Befragten insgesamt am Arbeitsplatz. Die Frage bezieht sich somit auf alle abgefragten Faktoren in der Befragung.

Demnach sind 35 % (13 Personen) der Befragten sehr zufrieden und 46 % (17 Personen) zufrieden mit ihrem Arbeitsplatz. Nur 5 % (zwei Personen) waren sehr unzufrieden und 14 % (5 Personen) hatten eine mittelmäßige Meinung.

Das ist ein Indiz dafür, dass die Mehrheit der Befragten (81 %) u. a. mit Lichtverhältnissen, Raumklima und Luftqualität am Arbeitsplatz zufrieden sind. Somit kann im Allgemeinen von einem sehr gelungenen Sanierungskonzept im IWU-Haus ausgegangen werden.

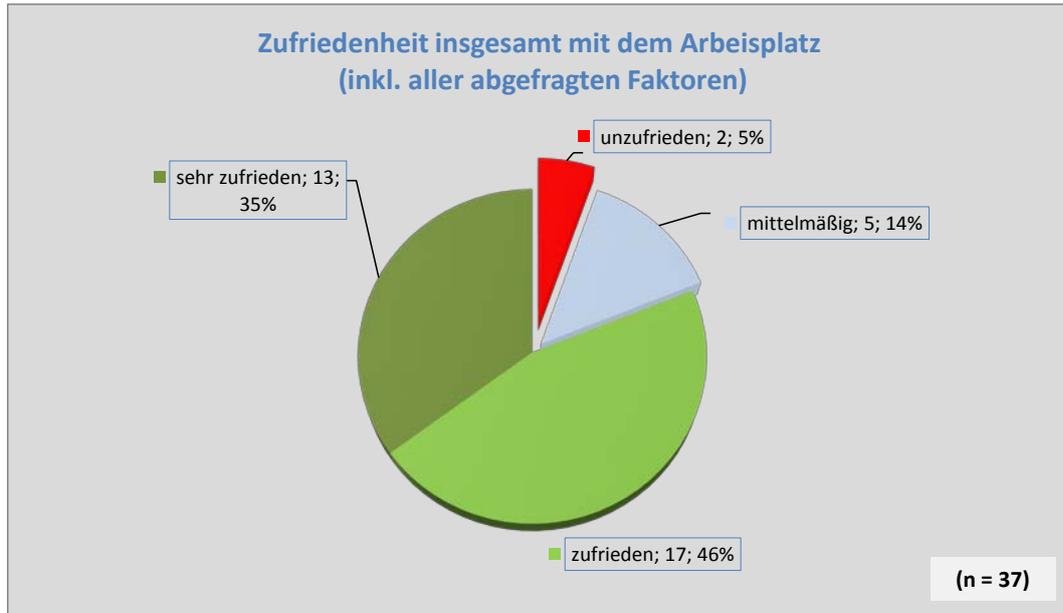


Abbildung 60: Zufriedenheit der Gebäudenutzer insgesamt mit dem Arbeitsplatz

Jedoch sollte der Frage nachgegangen werden, warum nicht alle Befragten zufrieden sind und welche Faktoren hierzu beigetragen haben.

Aus diesem Grund veranschaulicht Abbildung 61 die Auswertung der relevanten Einflussgrößen in Bezug auf die Leistungsfähigkeit der Befragten im Rahmen der folgenden Frage:

*Frage 3: „Wie beeinflusste der folgende Faktor in den letzten zwei Wochen Deine Leistungsfähigkeit am Arbeitsplatz?“*

Offensichtlich empfindet die Mehrheit der Befragten keine Beeinträchtigung ihrer Leistungsfähigkeit durch die genannten Einflussfaktoren (Antwort: gar nicht). Jedoch sind beispielsweise 11 % der Befragten der Meinung, dass die Raumluftqualität ihres Büros (in den vergangenen zwei Wochen vor der Befragung) einen „sehr negativen“ Einfluss auf ihre Leistungsfähigkeit hatte. Demgegenüber haben aber 5 % der Befragten die Raumluftqualität bereits als „sehr positiv“ in Bezug ihrer Leistungsfähigkeit empfunden. An zweiter Stelle spielen die Geräusche (24 % negativer bzw. 3 % sehr negativer Einfluss), gefolgt von der Raumtemperatur (19 % negativer bzw. 5 % sehr negativer Einfluss) und der Beleuchtung eine wesentliche Rolle für die Leistungsfähigkeit der Befragten.

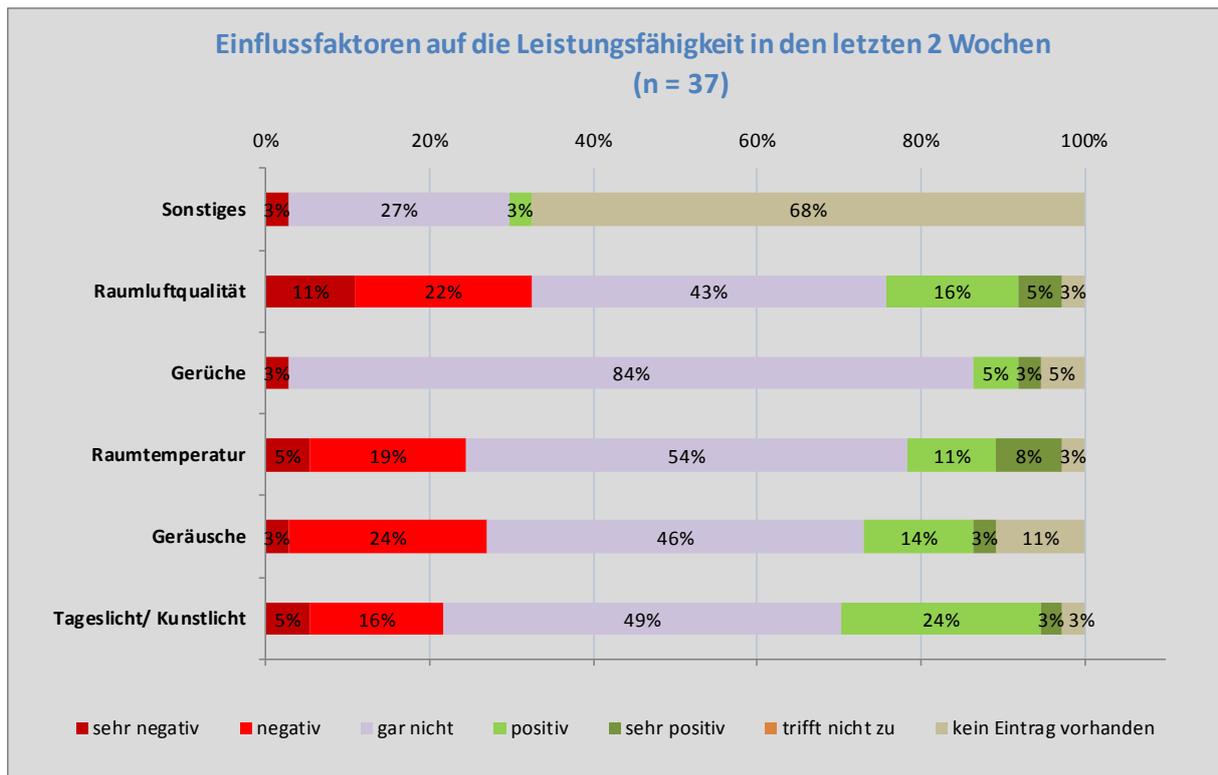


Abbildung 61: Auswertung der Einflussfaktoren auf die Leistungsfähigkeit in den letzten 2 Wochen vor der Befragung

Bei den angegebenen sonstigen Einflussfaktoren auf die Leistungsfähigkeit der Befragten fällt eine Stimme mit „sehr negativ“ besonders auf. Als Grund wurde die Luftfeuchte erwähnt. Hierbei wird davon ausgegangen, dass eine eher trockene Luft als feuchte Luft gemeint ist.

Um die negativen Stimmen detaillierter zu betrachten, werden nachfolgend die signifikanten Einflussfaktoren auf die Leistungsfähigkeit in Abhängigkeit von weiteren Kriterien wie die Lage des Büros der Befragten untersucht. Die Faktoren „Gerüche“ und „Sonstiges“ werden jedoch aufgrund überwiegend positiver Beurteilung der Befragten nicht weiter betrachtet.

## 7.1 Raumluftqualität und ihre Einflussfaktoren

Die Raumluftqualität umfasst alle nichtthermischen Wirkungen der Raumluft, die Einfluss auf das Wohlbefinden und die Gesundheit des Menschen haben. Die Raumnutzer haben zwei Forderungen an die Raumluft: Erstens soll die Luft als frisch und angenehm und nicht als abgestanden und muffig empfunden werden, und zweitens darf das Einatmen der Luft kein Gesundheitsrisiko darstellen [6]. Die Raumluftqualität kann daher subjektiv durch die Befragung der Raumnutzer oder objektiv durch Messungen einiger Bestandteile der Raumluft, wie z. B. CO<sub>2</sub>-Konzentrationen, flüchtige organische Verbindungen (VOC) oder Partikel bestimmt

werden. Zudem gibt es weitere Einflussfaktoren wie beispielsweise die Temperatur oder Feuchte der eingeatmeten Luft, welche die empfundene Luftqualität stark beeinflussen.

Abbildung 62 zeigt die Ergebnisse der Befragung in Bezug auf die subjektive Raumlufqualität und ihren Einfluss auf die Leistungsfähigkeit der Befragten in den jeweiligen Stockwerken. Auffallend ist hierbei, dass rund 50 % der 19 Befragten im 1. Obergeschoss der Meinung sind, dass ihre Leistungsfähigkeit aufgrund der Raumlufqualität negativ (7 Personen) oder sogar sehr negativ (3 Personen) beeinflusst wurde. Die Gründe hierfür sollen nachfolgend anhand der Einflussfaktoren der Raumluf näher betrachtet werden.

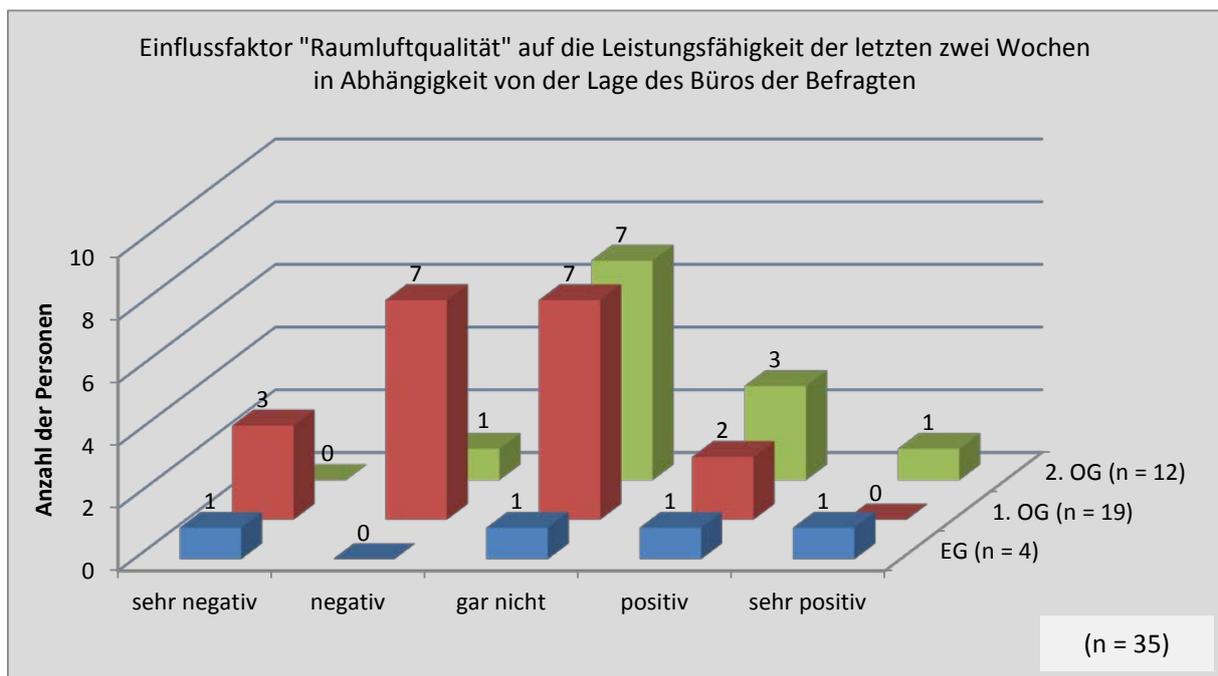


Abbildung 62: Einflussfaktor „Raumlufqualität“ auf die Leistungsfähigkeit der Befragten in Abhängigkeit von der Lage des Büros

## 7.2 Temperatur der Raumluf

Die Raumlufemperatur spielt als Einflussgröße auf die Leistungsfähigkeit der Gebäudenutzer eine wesentliche Rolle. Sie wird von Gebäudenutzern durch die eingeatmete Raumluf als indirekter Indikator der Raumlufqualität wahrgenommen.

Da die Raumtemperatur zudem einen signifikanten Einfluss auf den Energieverbrauch des Gebäudes hat, wurden in diesem Zusammenhang mehrere Fragen in der Befragung an den Gebäudenutzer/-in gestellt. Die Ergebnisse der Befragung in Hinblick auf die Raumtemperatur werden daher folgend in Abhängigkeit von Geschlecht, Alter der Befragten sowie in Bezug auf Lage und Orientierung der Büros betrachtet und den Messwerten gegenübergestellt.

Repräsentativ messen 12 Temperatursensoren alle 5 Minuten die Raumtemperaturen im IWU-Haus. Im ersten und zweiten Geschoss, in dem sich die meisten Büros befinden, sind die Temperaturfühler gleichmäßig nach Nord- bzw. Süd-Ausrichtung der Büros verteilt. Im Erdgeschoss erfolgt die Verteilung der Sensoren eher nach Nutzung der Räume. Zudem sind in den Abluftkanälen drei weitere Sensoren installiert worden. Die hier zu repräsentierenden Messdaten wurden auf Plausibilität geprüft. Hierbei wurden die Ausreißer (z. B. extreme Temperatursprünge innerhalb der 5-Minuten-Werte, Ausfall der Messsensoren etc.) ausgeschlossen.

Abbildung 63 stellt die Temperaturmesswerte der Abluftkanäle vom 19. Januar bis zum 15. Februar 2015 dar. Dieser Zeitraum illustriert den groben thermischen Zustand des Gebäudes von zwei Wochen vor bis zum Ende der Befragung (insgesamt vier Wochen). Da die Lüftungsanlage an Wochenenden abgeschaltet wird, fällt die Temperatur in den Abluftkanälen abrupt ab. Aufgrund dessen geben die entsprechenden Messwerte nicht die tatsächliche Temperatur in den Nichtwerktagen wieder. In den Werktagen bilden sie jedoch grob lokalisierte Innentemperaturen (im Mittel 22 °C) des IWU-Hauses im Befragungszeitraum ab. Die wiederkehrenden Temperaturabfälle um ein Grad in den Morgenstunden der ersten zwei Wochen deuten auf eine Fensterlüftung hin. Sie tauchen über die gesamte Heizperiode selten auf.

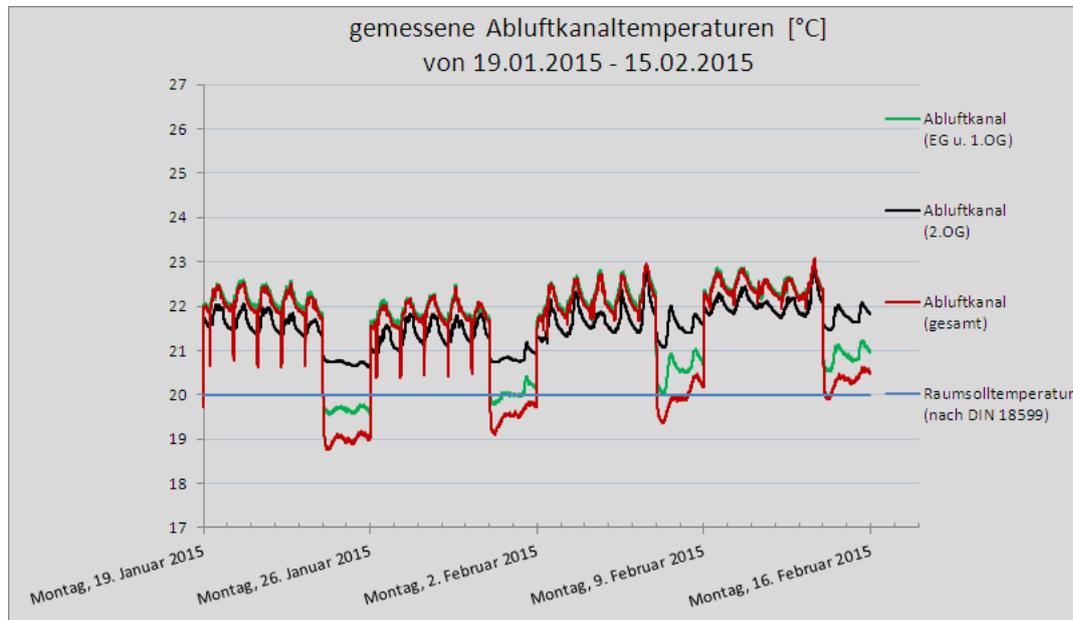


Abbildung 63: Gemessene Lufttemperaturen (5-Minuten-Werte) in Abluftkanälen während und vor der Befragung (19.01.2015 bis 15.02.2015)

Abbildung 64 stellt hingegen die Temperaturen der konkreten Räume im vorgenannten Zeitraum dar. Die rotfarbigen Linien repräsentieren die Temperaturen der Räume im Erdgeschoss, die blaufarbigen die vom ersten und die grünfarbigen die vom 2. Obergeschoss.

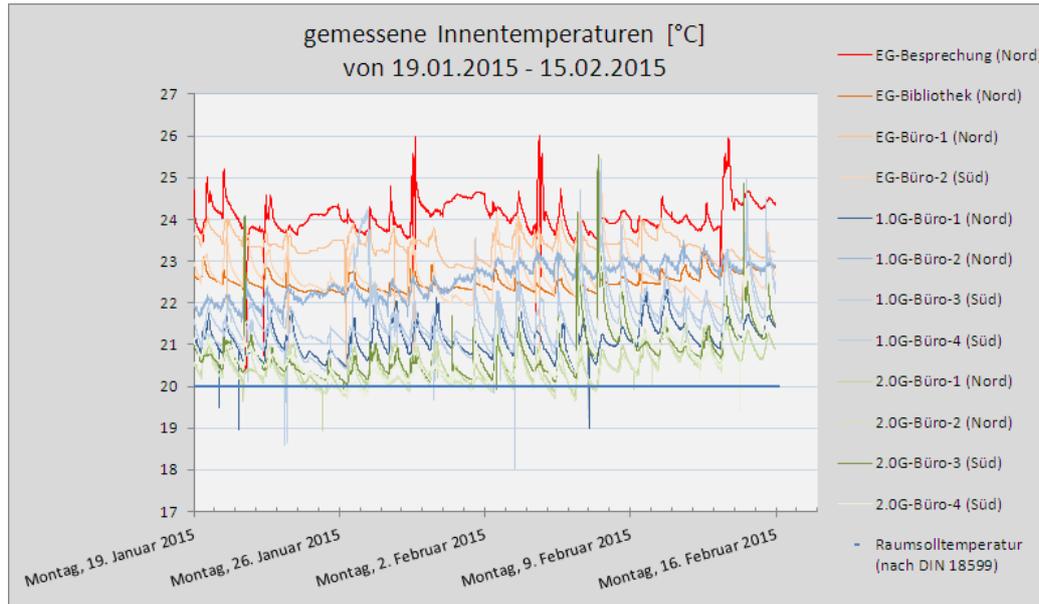


Abbildung 64: Gemessene Raumlufttemperatur (5-Minuten-Werte) einiger Räume im IWU-Haus während und vor der Befragung (19.01.2015 bis 15.02.2015)

Alle Messwerte zeigen tendenziell eine erhöhte Raumtemperatur oberhalb der in DIN 18599 für Bürogebäude festgelegten Raumsolltemperatur von 20 °C. Besonders auffällig ist hierbei die Raumtemperatur des Besprechungsraumes im Erdgeschoss mit einer mittleren Temperatur von 24 °C. Die Spitzenwerte bis einschließlich 26 °C deuten auf Veranstaltungen mit hohen internen Lasten hin.

Da sich im Keller unterhalb des Besprechungsraumes die Heizungszentrale (vom IWU-Haus und zwei benachbarten Gebäuden) befindet und die Kellerdecke in diesem Bereich nicht ausreichend gedämmt ist, erfährt der Besprechungsraum zwischenzeitlich erhöhte Raumtemperaturen infolge der unregelmäßigen Wärmeeinträge. Dieser Umstand sollte bei der Erneuerung der veralteten Heizungsanlage und ausreichender Dämmung der Decke der Heizzentrale in naher Zukunft behoben werden.

Vom Besprechungsraum abgesehen, ist aus Abbildung 64 erkennbar, dass die gemessenen Raumtemperaturen im Erdgeschoss (im Mittel 22,8 °C) um ca. einen Grad höher liegen als die im ersten Obergeschoss (im Mittel 21,7 °C) bzw. fast zwei Grad höher als die im zweiten Obergeschoss (im Mittel 20,6 °C). Hierbei spielt die Ausrichtung der Büros nach Norden bzw. Süden mit einer Temperaturdifferenz um ca.  $\pm 0,3$  Kelvin (im Mittel innerhalb einer Etage) eher keine entscheidende Rolle.

Abbildung 65 zeigt die subjektiven Empfindungen der Gebäudenutzer in Bezug auf die Frage:

*Wie beeinflusste der Faktor "Raumtemperatur" in den letzten zwei Wochen Deine Leistungsfähigkeit am Arbeitsplatz?*

Demnach geben ca. drei Viertel (73 %) der Befragten an, dass die Raumtemperatur entweder keinen Einfluss (54 %) oder einen positiven (11 %) oder sogar sehr positiven (8 %) Einfluss

auf ihre Leistungsfähigkeit in den letzten zwei Wochen hatte. Nur knapp ein Viertel (24 %) der Befragten hatten das Gefühl, dass die Raumtemperatur ihrer Büros negative (19 %) oder sehr negative (5 %) Auswirkungen hatten.

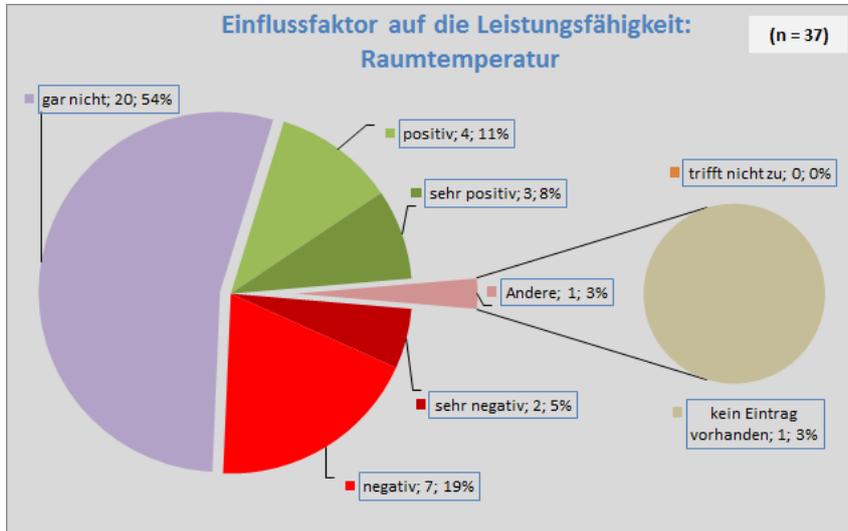


Abbildung 65: Einflussfaktor auf die Leistungsfähigkeit der Befragten in Folge der Raumtemperatur in den letzten zwei Wochen vor der Befragung

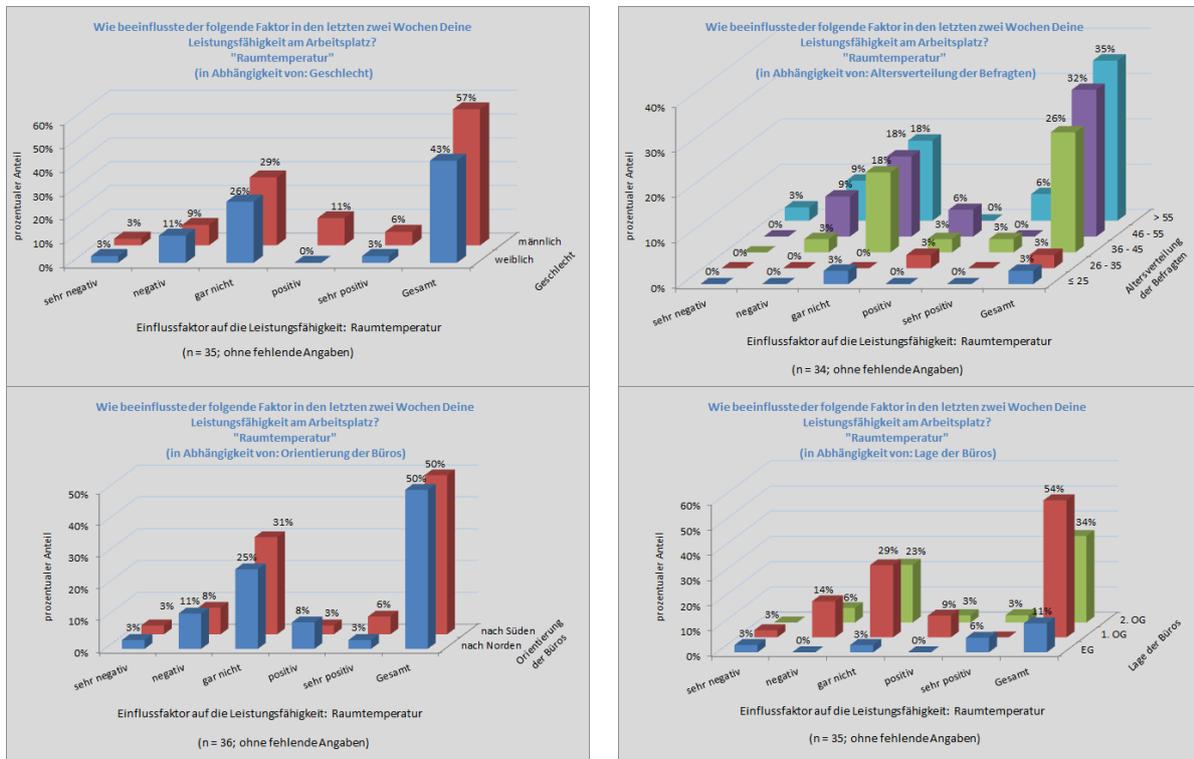


Abbildung 66: Einflussfaktor auf die Leistungsfähigkeit der Befragten in Folge der Raumtemperatur und in Abhängigkeit von Geschlecht (oben links), Alter (oben rechts), Orientierung der Büros (unten links) sowie vom jeweiligen Stockwerk (unten rechts)

Die negativen Stimmen verteilen sich sowohl in Hinblick auf die Geschlechter (siehe Abbildung 66 oben links) als auch auf die Orientierung der Büros (vgl. Abbildung 66 unten links) gleichmäßig. Sie sind jedoch im ersten Obergeschoss (Abbildung 66 unten rechts) deutlich höher (14 %) als in den anderen Stockwerken. Zudem ist aus Abbildung 66 (oben rechts) ersichtlich, dass die negative Auswirkung der Raumtemperatur auf die Leistungsfähigkeit hauptsächlich aus Antworten der Beschäftigten eines Alters über 45 Jahren (21 %) hervorgeht.

In nachfolgender Abbildung 67 und Abbildung 68 ist die Auswertung der Befragung im Rahmen der Raumtemperatur vormittags und nachmittags in Abhängigkeit von dem Geschlecht, der Altersverteilung der Befragten sowie von der Orientierung und der Lage der Büros dargestellt.

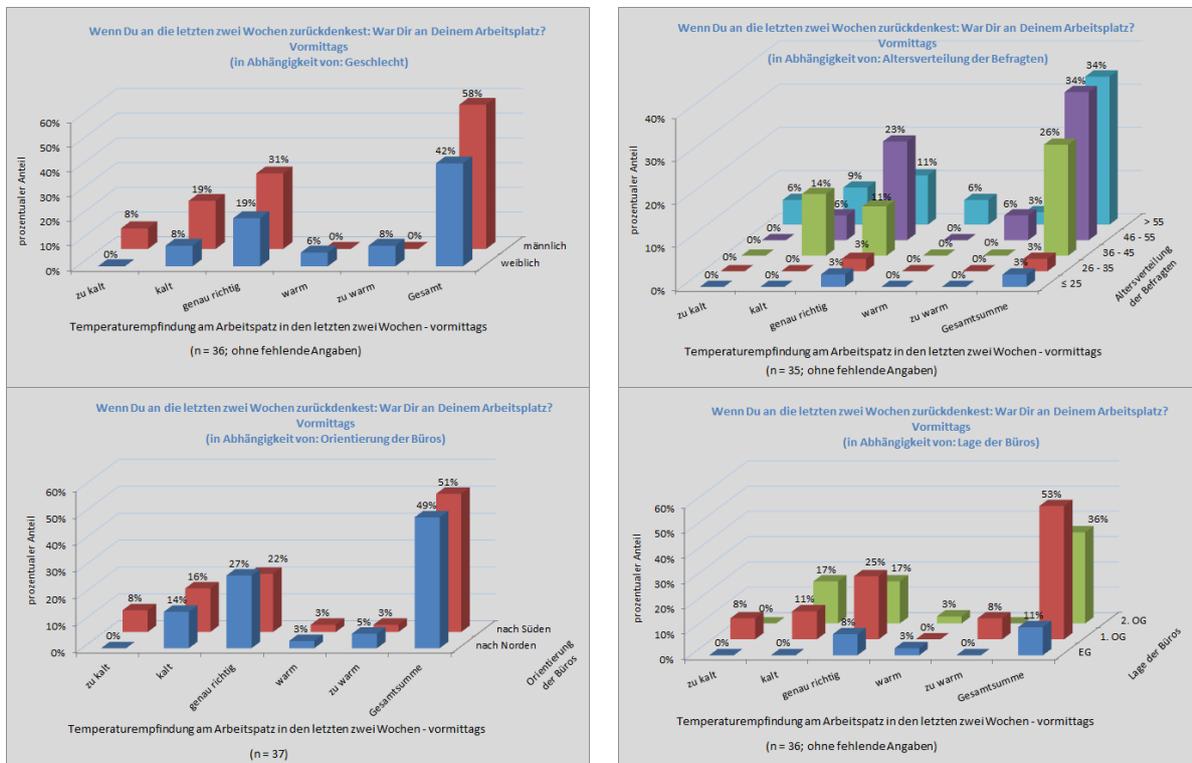


Abbildung 67: Auswertung der Raumtemperatur (vormittags) der letzten zwei Wochen von der Befragung in Abhängigkeit vom Geschlecht (oben links), von der Altersverteilung der Befragten (oben rechts), von der Orientierung der Büros (unten links) und von der Lage der Büros (unten rechts)

Bezüglich der Lage und der Orientierung der Büros (vgl. Abbildung 67) ist festzustellen, dass keine Rückschlüsse auf das Empfinden der Raumtemperatur zu ziehen sind. Darüber hinaus sind Unterschiede angesichts des Geschlechts festzustellen. Frauen empfinden die Raumtemperatur im Schnitt wärmer (6 % warm, 9 % zu warm) als die Männer (12 % kalt, 6 % zu kalt). Zudem ist aus Abbildung 67 erkennbar, dass die älteren Personen eher sensibel in Bezug auf die Raumtemperatur reagieren als die jüngeren.

Tendenziell ist gemäß Abbildung 64 die Raumtemperatur im 1. Obergeschoss sowie im Erdgeschoss wärmer als im 2. Obergeschoss. Dies stimmt jedoch nicht mit den Empfindungen aus Abbildung 67 und Abbildung 68 überein. Daraus lässt sich schließen, dass die Wahrnehmung der Raumtemperatur unterschiedlich subjektiver Herkunft (z. B. Geschlecht, Alter) entspringt und nicht mit den ausgewerteten Temperaturdaten übereinstimmt bzw. zu belegen ist.

Des Weiteren ist anzumerken, dass an der West- und Ostseite des Gebäudes die Raumtemperatur eher kälter empfunden wird. Dies könnte ein Indiz für eine Strahlungsasymmetrie<sup>21</sup> aufgrund der fehlenden Dämmung der Außenwände zu den Treppenhäusern sein, da die gemessenen Raumtemperaturen in diesen Bereichen (durchschnittlich über 20 °C) keine Auffälligkeiten zeigen (vgl. Abbildung 64).

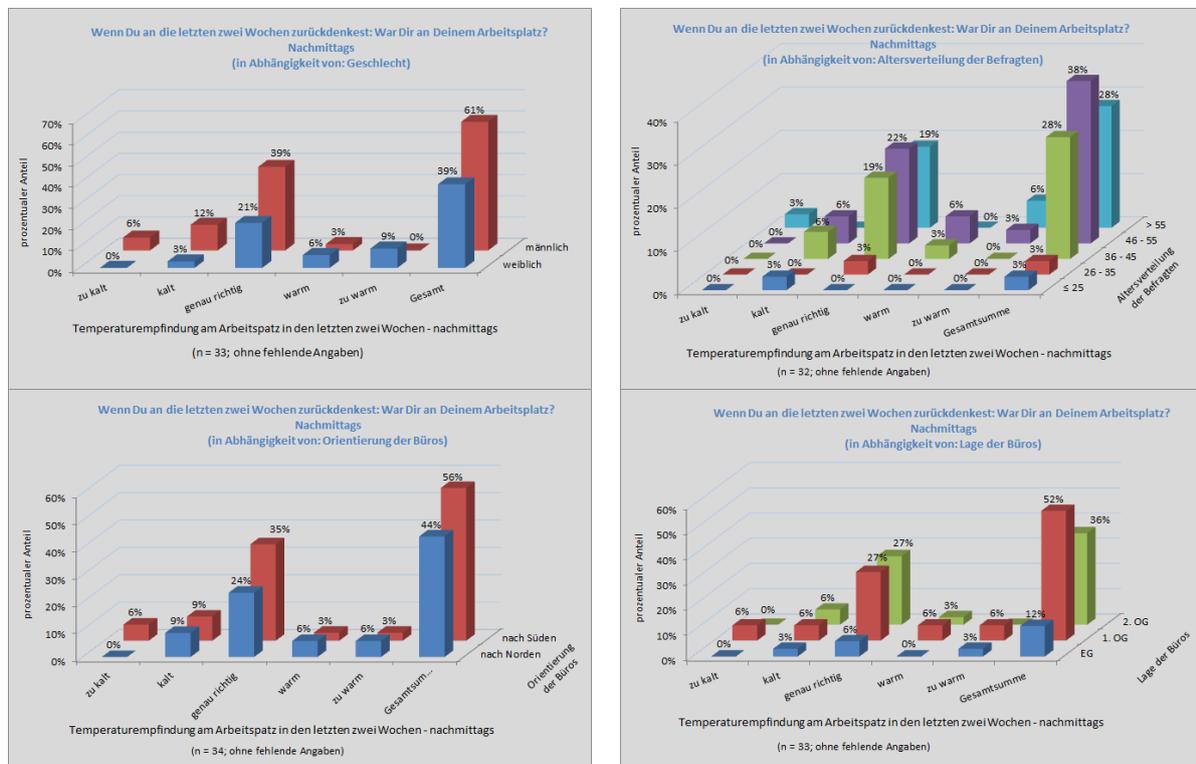


Abbildung 68: Auswertung der Raumtemperatur (nachmittags) der letzten zwei Wochen von der Befragung in Abhängigkeit vom Geschlecht (oben links), von der Altersverteilung der Befragten (oben rechts), von der Orientierung der Büros (unten links) und von der Lage der Büros (unten rechts)

<sup>21</sup> Unter Strahlungsasymmetrie versteht man eine Umgebung, deren Oberflächen unterschiedliche Temperaturen oder Emissionskoeffizienten aufweisen, so dass die betreffende Person an ihren Körperteilen unterschiedliche Strahlungstemperaturen wahrnimmt.

### 7.3 Feuchtegehalt der Raumluft

Abbildung 69 veranschaulicht die Raumluftqualität in Hinblick auf den Feuchtegehalt. Rund ein Drittel der Befragten gibt an, dass der Feuchtegehalt der Raumluft „genau richtig“ ist. Ein weiteres Drittel der Befragten empfindet die Raumluft „trocken“ und für das restliche Drittel erscheint die Luft sogar „zu trocken“. Acht Personen vom zuletzt genannten Drittel geben weiterhin an, dass die Raumluft in den vergangenen zwei Wochen (vor der Befragung) ihre Leistungsfähigkeit „negativ“ beeinträchtigte. Weitere vier Personen geben sogar eine „sehr negative“ Beeinträchtigung an.

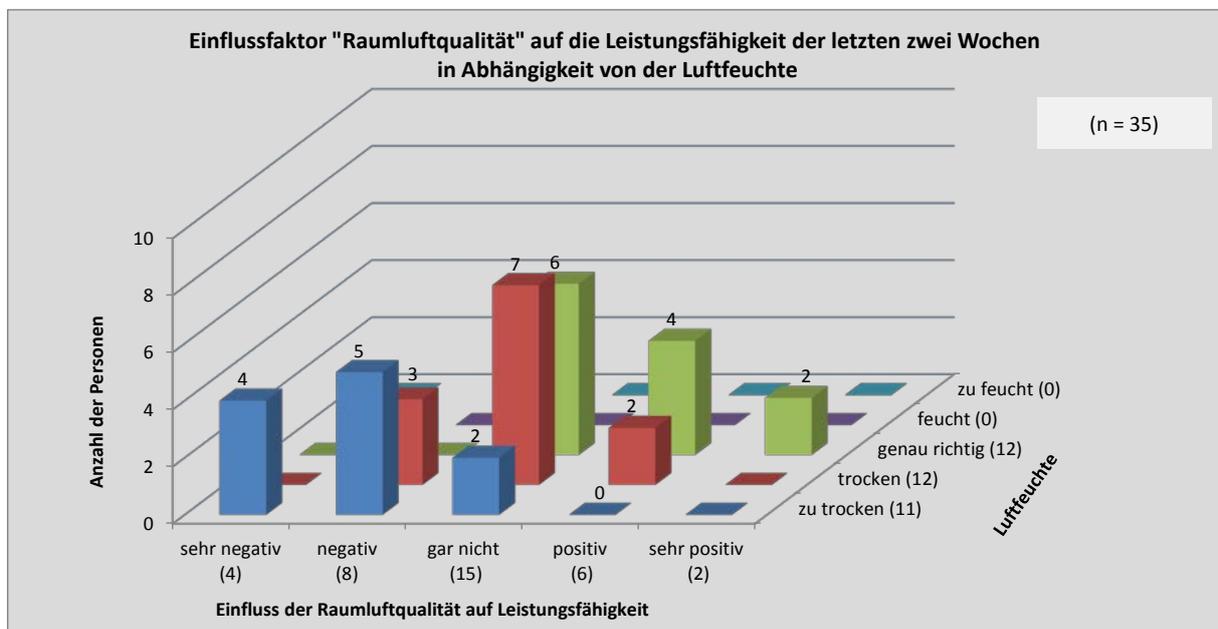


Abbildung 69: Einflussfaktor auf die Leistungsfähigkeit der Befragten in Folge der Luftfeuchte in den letzten zwei Wochen vor der Befragung

Wie hoch die relative Luftfeuchte in den Räumen ist, zeigt Abbildung 70 anhand der gemessenen relativen Luftfeuchtigkeit in fünf repräsentativen Räumen im IWU-Haus. Zudem ist in Abbildung 70 der empfohlene Grenzbereich der relativen Luftfeuchte von 40 % bis 50 % dargestellt. Es ist ersichtlich, dass in allen gemessenen Räumen die rel. Luftfeuchte unterhalb der zu erwartenden Grenzwerte liegt.

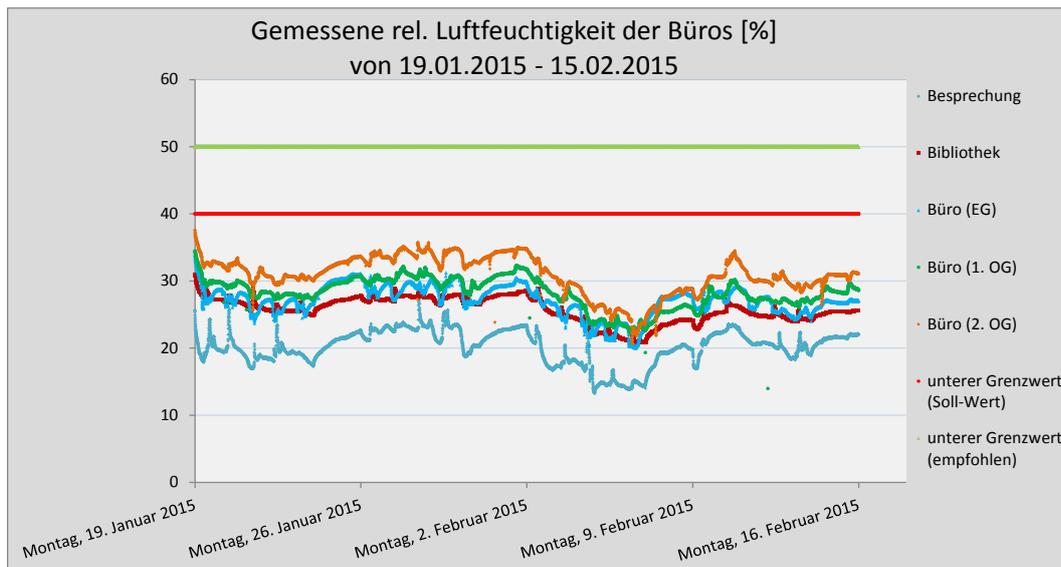


Abbildung 70: Gemessene relative Luftfeuchtigkeit in fünf repräsentativen Räumen im IWU-Haus für den Zeitraum zwischen 19.01.2015 und 15.02.2015

Da die rel. Raumluftfeuchte jedoch von der Raumlufttemperatur – warme Luft kann mehr Feuchtigkeit aufnehmen als kühle Luft – abhängt, werden die entsprechenden gemessenen Raumtemperaturen der oben illustrierten Räume in Abbildung 71 dargestellt, um die relativ niedrige Luftfeuchtigkeit der Räume besser erklären zu können.

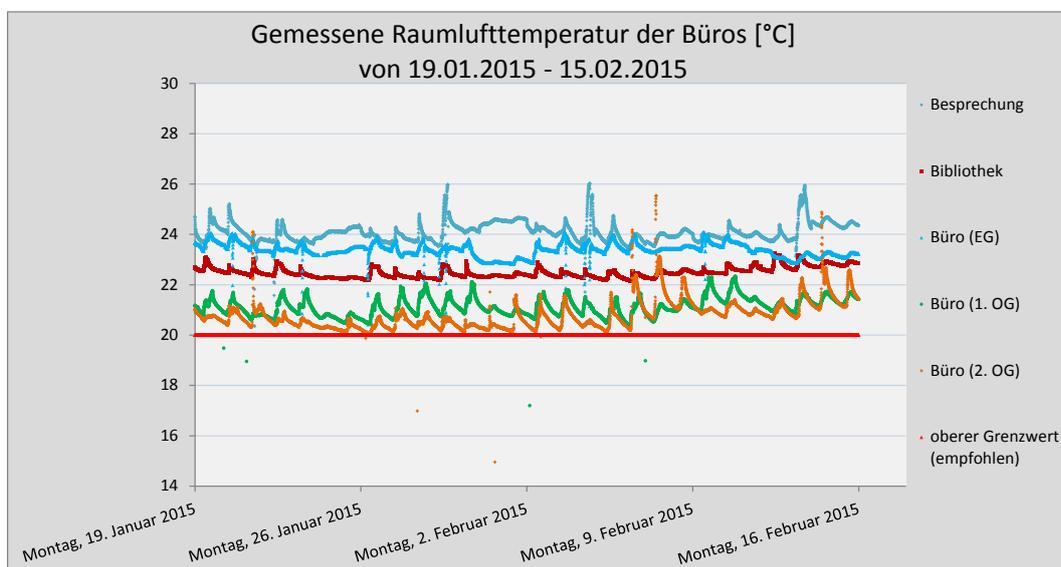


Abbildung 71: Gemessene Raumlufttemperatur in fünf repräsentativen Räumen im IWU-Haus für den Zeitraum zwischen 19.01.2015 und 15.02.2015

Aus den letzten oberen Abbildungen ist gut zu erkennen, dass beispielsweise die Raumtemperatur im Besprechungsraum im Mittel bei 24 °C und seine durchschnittliche rel. Luftfeuchtigkeit bei ca. 20 % liegt. In derselben Zeit betragen die durchschnittlichen Raumtemperaturen der Büros im 2. Obergeschoss ca. 21 °C, und die rel. Luftfeuchtigkeit liegt bei ca. 31 %.

Von Bedeutung ist auch der Jahresgang der rel. Feuchtigkeit (siehe Abbildung 72) in den genannten Räumen, weil sie im Laufe eines Jahres in Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur variiert. Abbildung 72 illustriert die gemessene rel. Raumluftfeuchte der Büros in der Zeit von Januar 2014 bis April 2015. Zudem wurden die empfohlenen Wintermindestwerte sowie Sommerhöchstwerte der rel. Raumluftfeuchte nach DIN EN 13779<sup>22</sup> grafisch dargestellt.

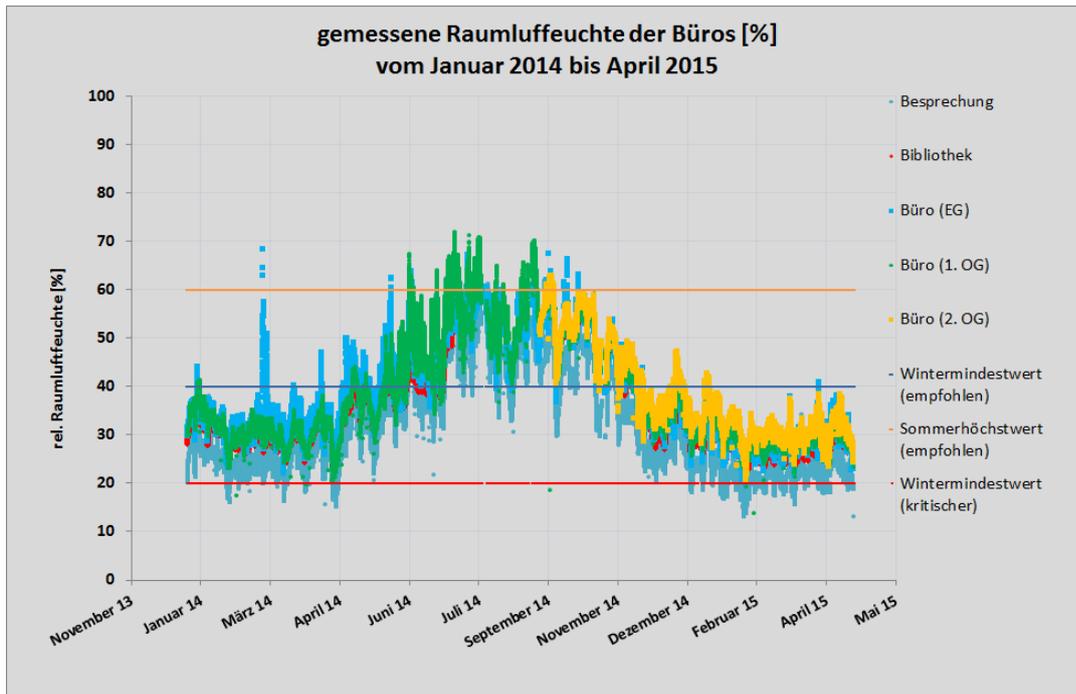


Abbildung 72: Gemessene relative Raumluftfeuchte der repräsentativen Büros im IWU-Haus für den Zeitraum zwischen Januar 2014 und April 2015

Abbildung 73 veranschaulicht außerdem den Verlauf der rel. Feuchtigkeit nur in kalten Monaten in den Jahren 2014 und 2015 (November bis April).

<sup>22</sup> Lüftung von Nichtwohngebäuden – Allgemeine Grundlagen und Anforderungen für Lüftungs- und Klimaanlage und Raumkühlsysteme; Deutsche Fassung EN 13779:2007

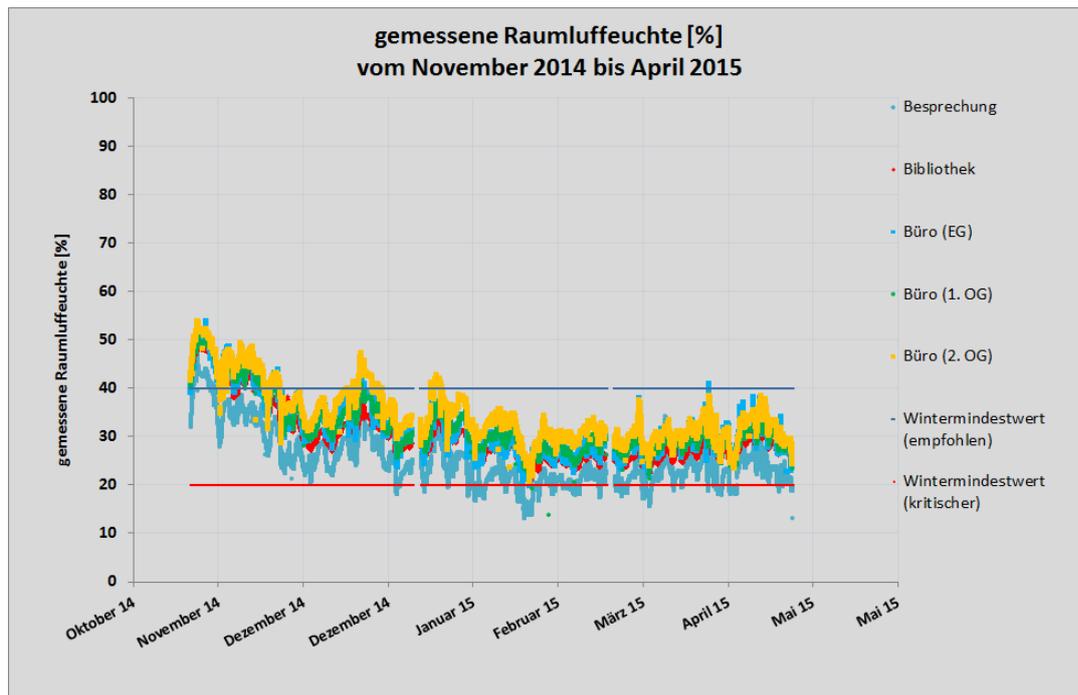


Abbildung 73: Gemessene relative Raumlufteuchte der repräsentativen Büros im IWU-Haus für den Zeitraum zwischen November 2014 und April 2015

Aus Abbildung 72 und Abbildung 73 ist ersichtlich, dass in den kalten Jahreszeiten (Oktober bis April) die rel. Raumlufteuchtigkeit der Büros hauptsächlich zwischen 20 % bis 40 % variiert. Auch in den Jahren 2012 und 2013 waren die Verhältnisse nicht anders gewesen (siehe Abbildung 74 und Abbildung 75).

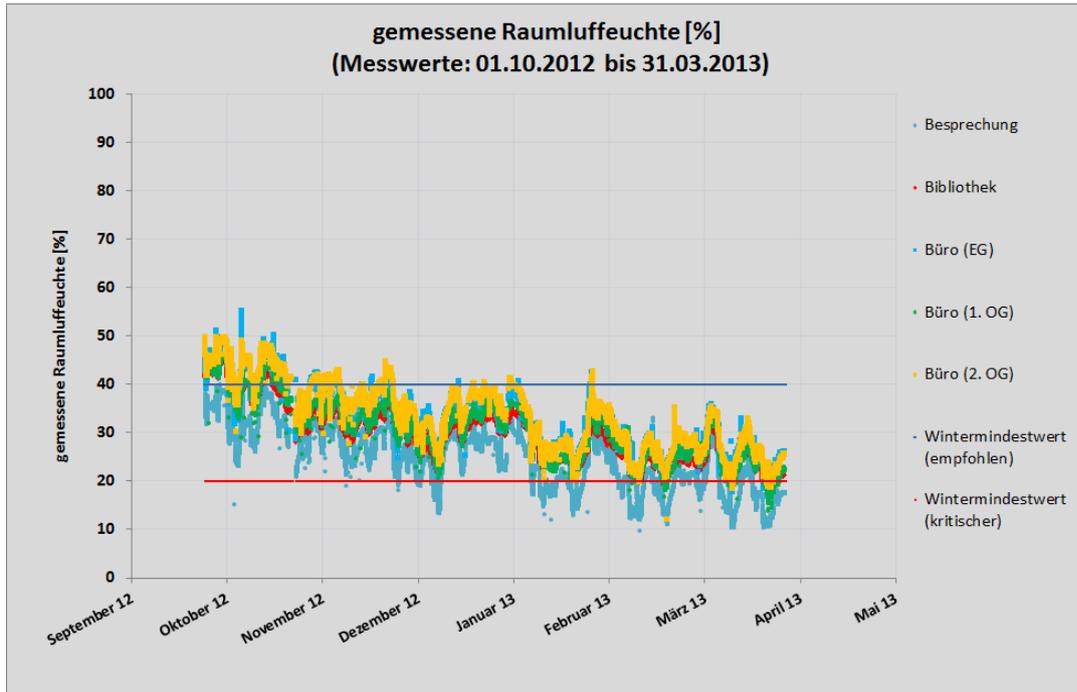


Abbildung 74: Gemessene relative Raumluffeuchte der repräsentativen Büros im IWU-Haus für den Zeitraum zwischen Oktober 2012 und März 2013

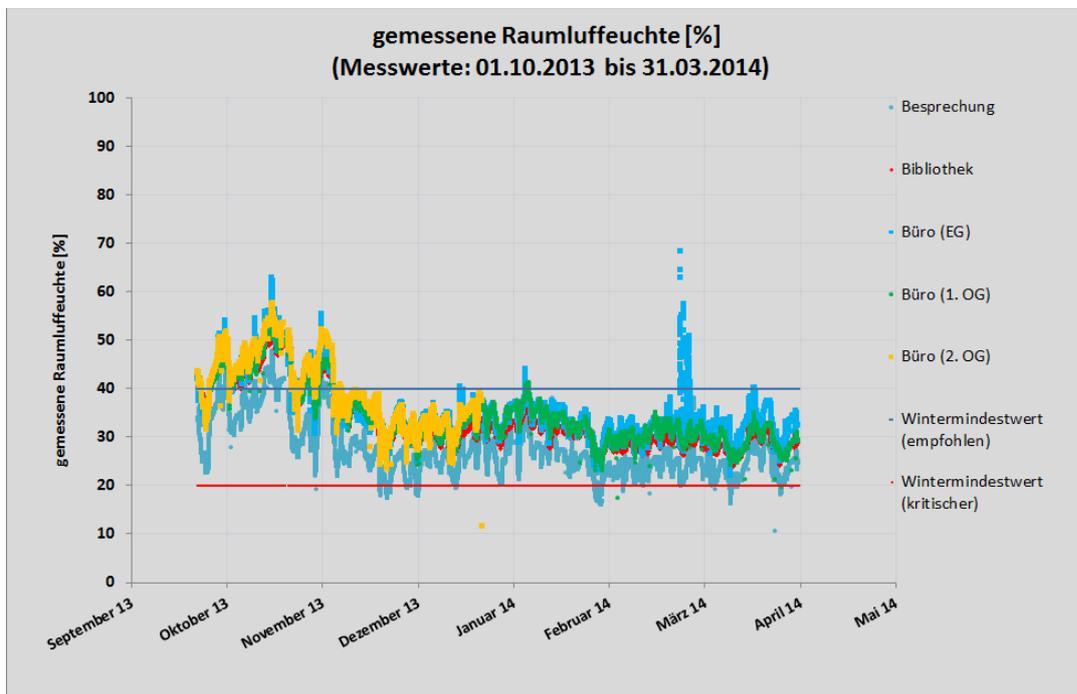


Abbildung 75: Gemessene relative Raumluffeuchte der repräsentativen Büros im IWU-Haus für den Zeitraum zwischen Oktober 2013 und März 2014

Die niedrige Bandbreite der rel. Feuchtigkeit im Winter ist nicht nur für das IWU-Haus charakteristisch. Tatsächlich findet man nicht selten Werte unter 20 Prozent während der Wintermonate in luftdicht ausgeführten und gut gedämmten Gebäuden in Abhängigkeit von der ansteigenden Innenraumtemperatur.

Ist ein Raum von der Außenluft luftdicht abgeschlossen, hat er eine konstante absolute Luftfeuchtigkeit: Wasser kann weder aus der Umgebung aufgenommen noch an diese abgegeben werden. Erhöht sich die Innenraumtemperatur durch Heizen, sinkt die relative Feuchte, weil die erwärmte Heizungsluft mehr Wasserdampf aufnehmen könnte als der verschlossene Raum zur Verfügung hat. Wenn im Winter Fenster oder Türen zum Lüften geöffnet werden, wird die Innenluft noch trockener als vorher. Durch den höheren Dampfdruck der warmen, trockenen Innenluft entweicht die verbliebene Restfeuchtigkeit nach draußen [7].

Wird die kalte Außenluft durch eine Lüftungsanlage erwärmt, transportiert sie aufgrund physikalischer Gegebenheiten wenig Feuchtigkeit in den Raum. Es sei denn, die erwärmte Außenluft wird durch den Einsatz von Luftbefeuchtern oder den Einsatz von Feuchterückgewinnungsgeräten zusätzlich reguliert. Des Weiteren besteht die Möglichkeit, in den kalten Jahreszeiten die Luftwechselrate auf das hygienisch notwendige Maß zu reduzieren.

Um die gemessene Raumluftfeuchte in repräsentativen Räumen des IWU-Hauses methodisch beurteilen zu können, wird das Diagramm nach „Leusden/Freymark“<sup>23</sup> verwendet. Hierzu werden die gemessenen rel. Feuchten in Abhängigkeit der Raumtemperatur in zwei vordefinierten Behaglichkeitsbereichen, in denen die Gebäudenutzer sich bei üblichen Tätigkeiten wohlfühlen, eingetragen.

---

<sup>23</sup> Im Jahr 1951 veröffentlichten Pels Leusden und Freymark ein Diagramm, mit dessen Hilfe eine einfache praxisnahe Beurteilung eines gegebenen Raumklimas möglich ist. Demnach existiert ein Bereich von Lufttemperatur und -feuchtigkeit, der von allen Menschen als „behaglich“ empfunden wird. Die Werte hängen allerdings von Alter, Geschlecht und der Raumnutzung (körperliche Betätigung, Bekleidung) ab. Der Bereich liegt grob zwischen 20 und 24 °C und 40 und 65 % rF [8].

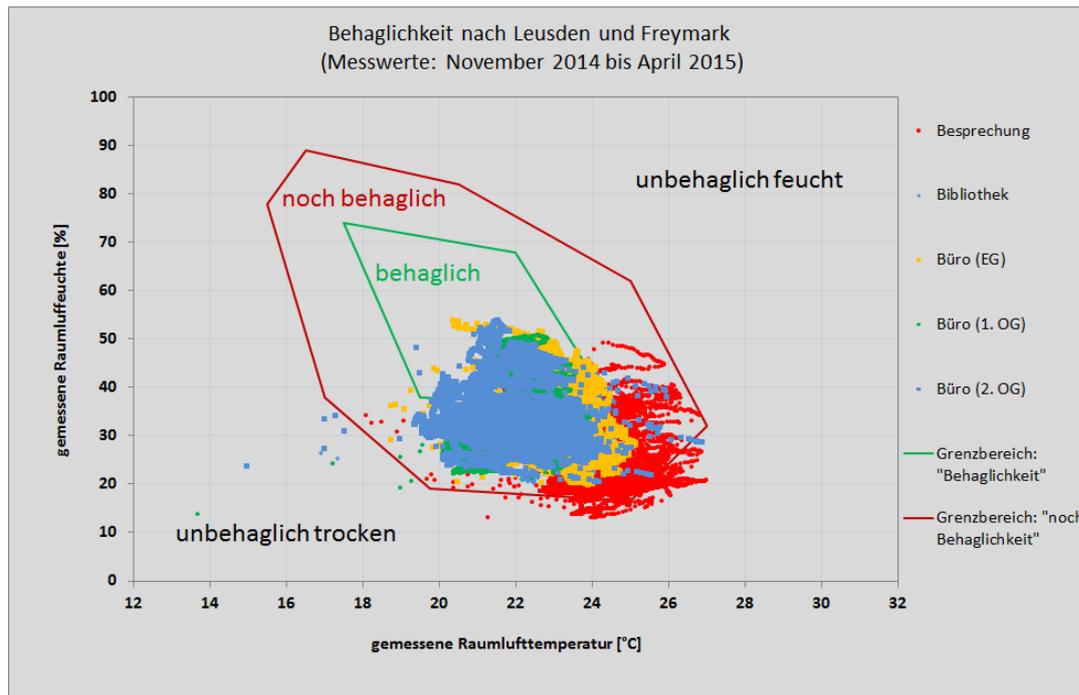


Abbildung 76: Behaglichkeitsdiagramm für die repräsentativen Büros im IWU-Haus nach Leusden und Freyemark für die Messdaten zwischen November 2014 und April 2015

Abbildung 76 zeigt die Behaglichkeitsfelder sowie gemessenen Daten der Raumfeuchte und -temperatur für November 2014 bis April 2015. Danach fallen die meisten Messpunkte entweder in den Bereich „behaglich“ oder „noch behaglich“.

Liegen Temperatur und Feuchte in dem „noch behaglichen“ Bereich, muss der Körper bereits vermehrt Arbeit leisten, um die Temperatur auszugleichen. Dies geschieht unbewusst und bleibt bei rund 85 % der Personen unbemerkt [8].

Der Besprechungsraum (rot markierte Punkte) nimmt hierbei eine Sonderstellung ein, da der Raum während der Arbeitszeit zum Teil leer steht und aufgrund des darunter befindlichen Heizungsraumes und der nicht gedämmten Kellerdecke hohe Raumtemperaturen (ungeregelte Wärmeeinträge) im Winter erfahren kann. Daher befinden sich einige Messpunkte im „unbehaglich trocken“ Bereich.

Da nicht für alle Büros Messwerte vorliegen, kann keine Aussage über die Behaglichkeit der einzelnen Räume vorgenommen werden. Abbildung 77 verdeutlicht jedoch die gemessene Feuchte und Temperatur in den Abluftkanälen der Lüftungsanlage für November 2014 bis April 2015. Abbildung 77 lässt vermuten, dass die Behaglichkeit des Gebäudes im Winter weitgehend in den Bereichen „behaglich“ und „noch behaglich“ liegt.

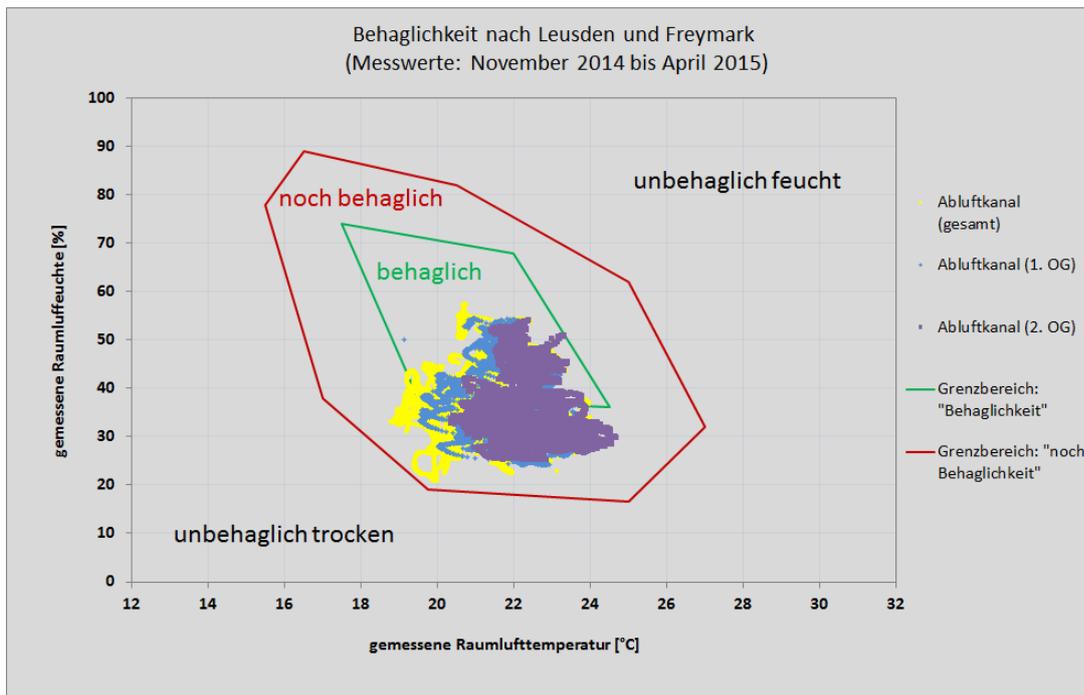


Abbildung 77: Behaglichkeitsdiagramm für das IWU-Haus nach Leusden und Freymark basierend auf die Messdaten der Abluftkanal im Zeitraum zwischen November 2014 und April 2015

Die hohe Raumtemperatur und geringe Luftfeuchtigkeit über längere Zeit können nicht nur Auswirkungen auf das Wohlbefinden haben, sondern auch zu gesundheitlichen Beeinträchtigungen der Gebäudenutzer/-innen führen. Bei der Nutzerbefragung im Winter wurden die Beschäftigten nach den „folgenden gesundheitlichen Beeinträchtigungen in den vergangenen zwei Wochen während der Arbeitszeit“ befragt:

- trockene Nase
- trockene Augen
- trockene Haut/ Kopfhaut
- Halsschmerzen

Zudem wurden sie nach der „Luftfeuchte am Arbeitsplatz in den letzten zwei Wochen während der Arbeitszeit“ gefragt. In einer Zeitspanne von zwei Wochen vor bis zum Ende der Befragung wurde in den repräsentativen Räumen und in den Abluftkanälen die rel. Feuchte gemessen.

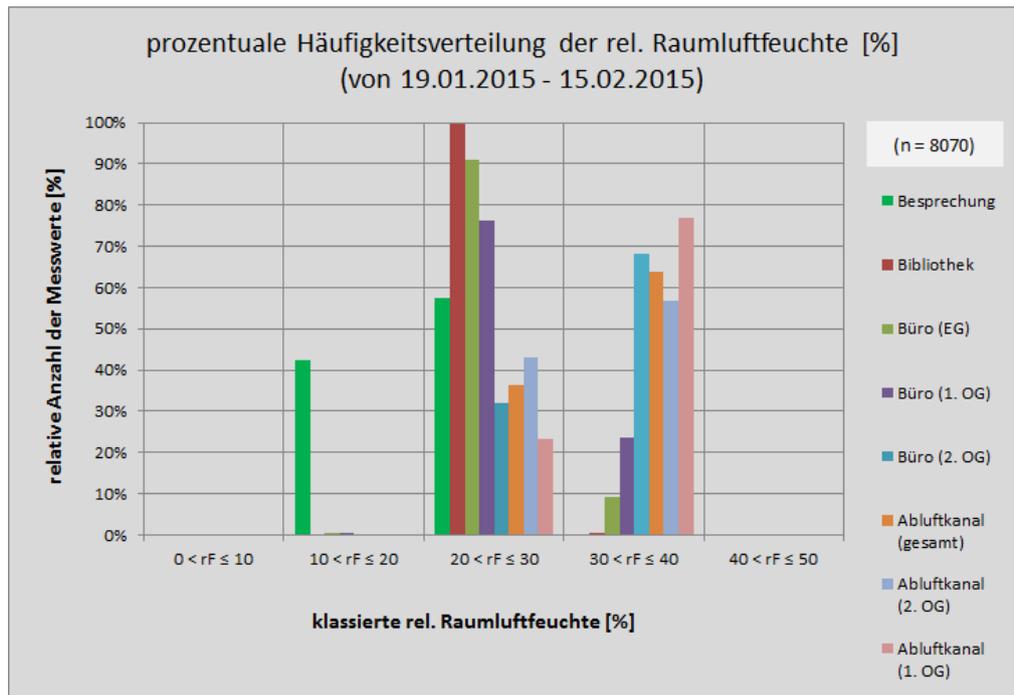


Abbildung 78: Prozentuale Häufigkeitsverteilung der relativen Raumlufffeuchtigkeit der repräsentativen Büros im IWU-Haus für den Zeitraum zwischen 19.01.2015 und 15.02.2015

Abbildung 78 zeigt, wie häufig die Messwerte in den klassierten Raumlufffeuchten für die genannte Zeitspanne vorkommen. Hierbei liegen beispielsweise fast alle Messwerte in der Bibliothek zwischen 20 und 30 Prozent.

Abbildung 79 veranschaulicht die Auswertungen in Bezug auf die Feuchtesituation am Arbeitsplatz und Abbildung 80 zeigt die Auswertungen in Bezug auf die gesundheitlichen Beeinträchtigungen. Abbildung 79 zufolge geben 32 % der Befragten an, dass die Luft an ihrem Arbeitsplatz „trocken“ ist. 30 % finden sie sogar „zu trocken“. Knapp mehr als ein Drittel finden die Feuchte der Raumluff jedoch „genau richtig“.

8 % der Beschäftigten haben „oft“ eine trockene Nase, 14 % trockene Augen und 5 % trockene Haut. Zudem haben 14 % der Befragten „immer“ eine trockene Nase und Augen sowie 8 % „immer“ trockene Haut (siehe Abbildung 80).

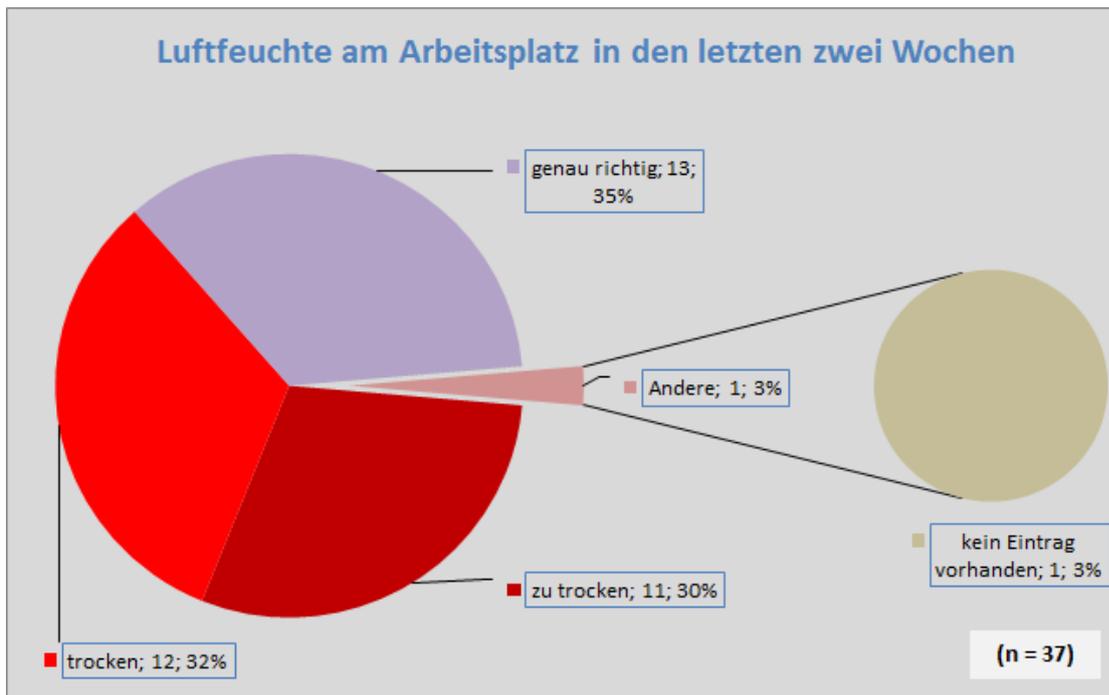


Abbildung 79: Die von Gebäudenutzern subjektiv empfundene Raumluftfeuchte am Arbeitsplatz in den letzten zwei Wochen vor der Befragung

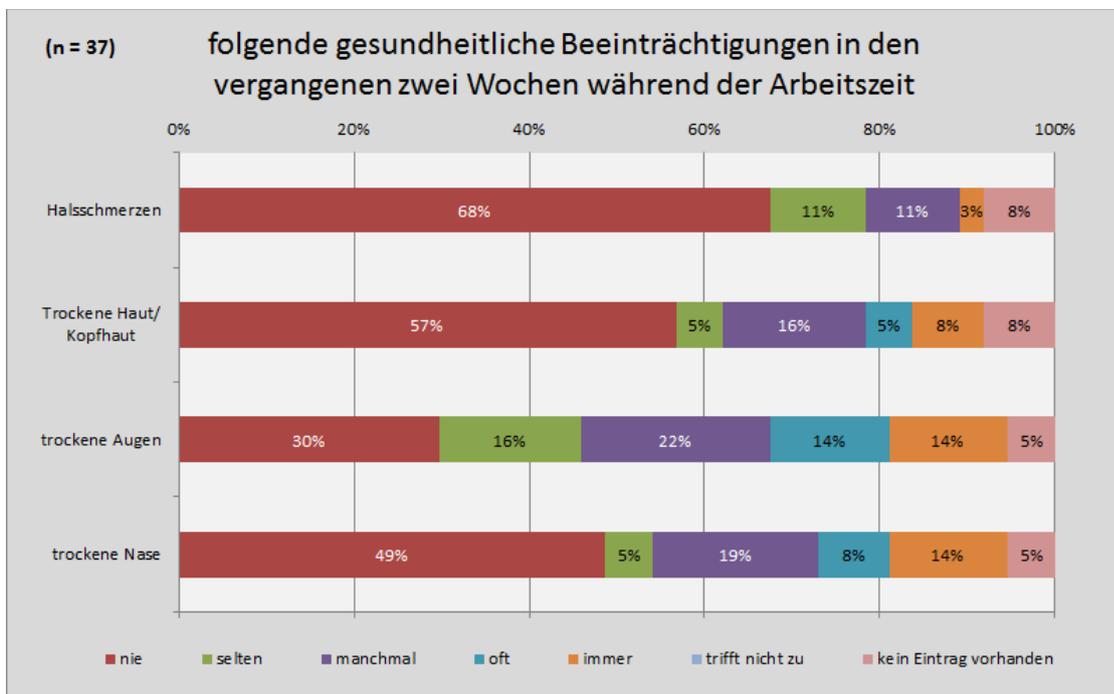


Abbildung 80: Auswertung der Frage in Bezug auf die gesundheitliche Beeinträchtigung in den vergangenen zwei Wochen (vor der Befragung) während der Arbeitszeit

Um die angegebenen gesundheitlichen Beeinträchtigungen in Bezug auf die rel. Raumluftfeuchtigkeit zu beleuchten, werden in Abbildung 81 die Antworten auf die gestellten Fragen „Qualität der Raumluftfeuchtigkeit“ und „gesundheitlichen Beeinträchtigungen während der Arbeitszeit“ gegenübergestellt.

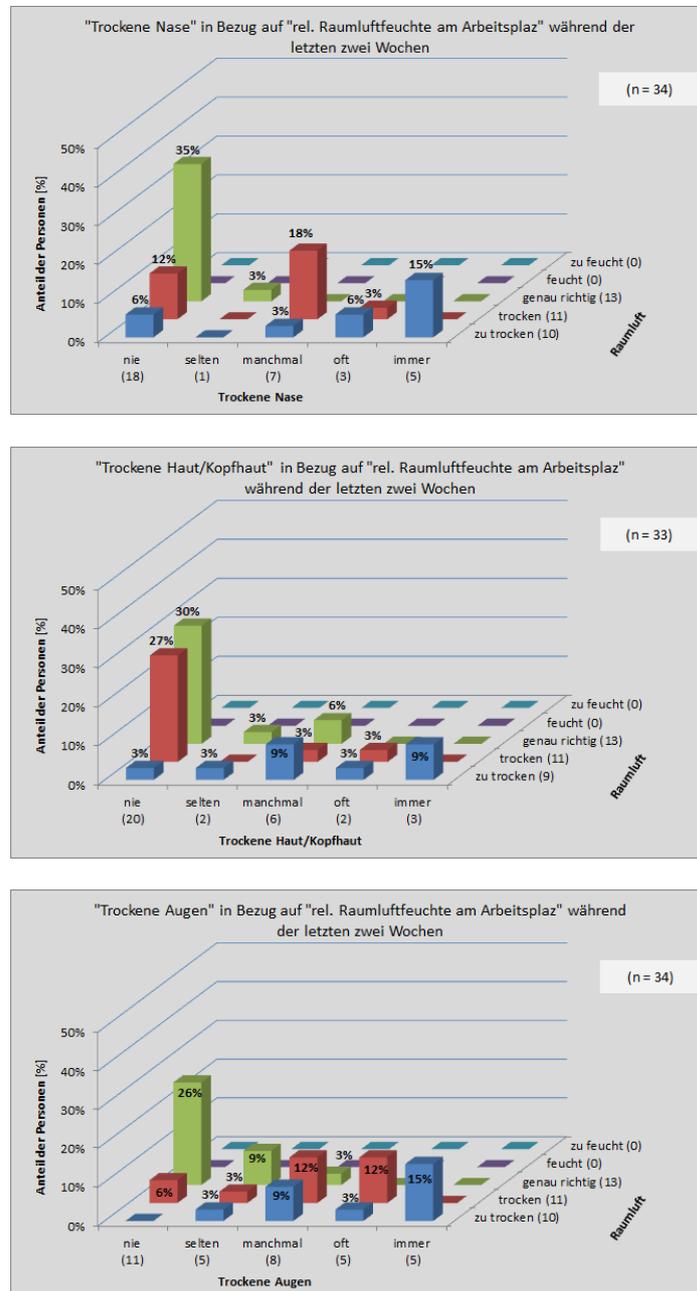


Abbildung 81: Auswertung der relativen Raumluftfeuchte am Arbeitsplatz in Bezug auf die trockene Nase (oberes Diagramm), auf die trockene Haut (mittleres Diagramm) sowie die trockenen Augen (unteres Diagramm)

15 % der Beschäftigten geben an, dass die Raumluft „zu trocken“ ist und sie „immer“ eine trockene Nase und Augen haben (oberes Diagramm in Abbildung 81). Zudem haben 9 % „immer“ eine trockene Haut (mittleres Diagramm in Abbildung 81).

24 % der Befragten deuten außerdem an, dass die Raumluft „trocken“ ist und sie „oft“ (12 %) oder „manchmal“ (12 %) unter den trockenen Augen leiden (unteres Diagramm in Abbildung 81).

Hingegen findet ca. ein Drittel der Gebäudenutzer/-innen, dass die Feuchteverhältnisse in ihrem Büro „genau richtig“ sind und dass sie keine Beschwerden in Bezug auf eine trockene Nase, Augen oder Haut während der Arbeitszeit spüren.

Um die Feuchteregelung in den Büroräumen und hiermit verbundene Behaglichkeit der Gebäudenutzer/-innen im Winter zu verbessern, wurden folgende Maßnahmen mit den IWU-Beschäftigten kommuniziert:

- Verzicht auf ein übermäßiges Heizen der Räume, da warme Luft mehr als kühle Luft Feuchtigkeit aufnehmen kann. Steigt die Temperatur im Innenraum, sinkt die relative Feuchte und die Luft wird trocken. Die Raumluft sollte daher zwischen 20 bis 22 °C betragen.
- In den Wintermonaten sollten Fenster nur kurz aber dafür weit geöffnet werden (Stoßlüftung). Durch den höheren Dampfdruck der warmen, trockenen Innenluft entweicht die verbliebene Restfeuchtigkeit nach draußen.
- Das einfachste Mittel den Feuchtigkeitsgehalt der Luft zu erhöhen, besteht im Aufstellen von Zimmerpflanzen. Pflanzen, die viel Wasser benötigen, geben auch viel Wasserdampf an die Raumluft ab. Besonders geeignet sind Zyperngras oder Papyrus-Pflanzen. Aber auch die Grünsillie oder die Zimmerlinde spenden der Raumluft Feuchtigkeit [9].
- Des Weiteren kann durch den Einbau von Luftbefeuchtungssystemen (zentral oder dezentral) die Feuchtigkeit von Räumen aktiv geregelt werden. Dies ist jedoch bei kleinen Bürogebäuden unüblich. Hierzu sollten außerdem Anschaffungs-, Betriebskosten sowie der Wartungsaufwand bei der Entscheidung berücksichtigt werden.

Der Erfolg der Umsetzung der Maßnahmen sollte in den folgenden Jahren beobachtet und evaluiert werden.

## 7.4 Lichtverhältnisse

### Tageslicht

Bezüglich der Lichtverhältnisse im Rahmen von Tageslicht sind Jalousien und der integrierte Blendschutz an den Fenstern von Bedeutung.

Die Jalousien sind im Winter immer oben bzw. werden so gut wie gar nicht verwendet, um die solare Einstrahlung zu nutzen. Es konnten demnach keine Auswirkungen der Jalousien

auf die Tageslichtverhältnisse festgestellt werden, da die Umfrage im Winter stattfand. Aufgrund dessen wäre die Nutzung der Jalousien eher im Sommer relevant.

Die Nutzung des Blendschutzes bei der Blendung an sonnigen Wintertagen trifft nur auf 3 % (5 Personen) der Befragten zu. 38 % (14 Personen) nutzen den Blendschutz teilweise. Bei fast gleichem Anteil von 32 % (12 Personen) der Befragten trifft keine Nutzung zu (Anhang 10.1).

In Abbildung 82 ist die Beleuchtungssituation bei Tageslicht ohne Nutzung sowie mit Nutzung der Sonnenschutzvorrichtungen (Blendschutz und Jalousie) am Arbeitsplatz, im gesamten Raum und am Computer grafisch dargestellt.

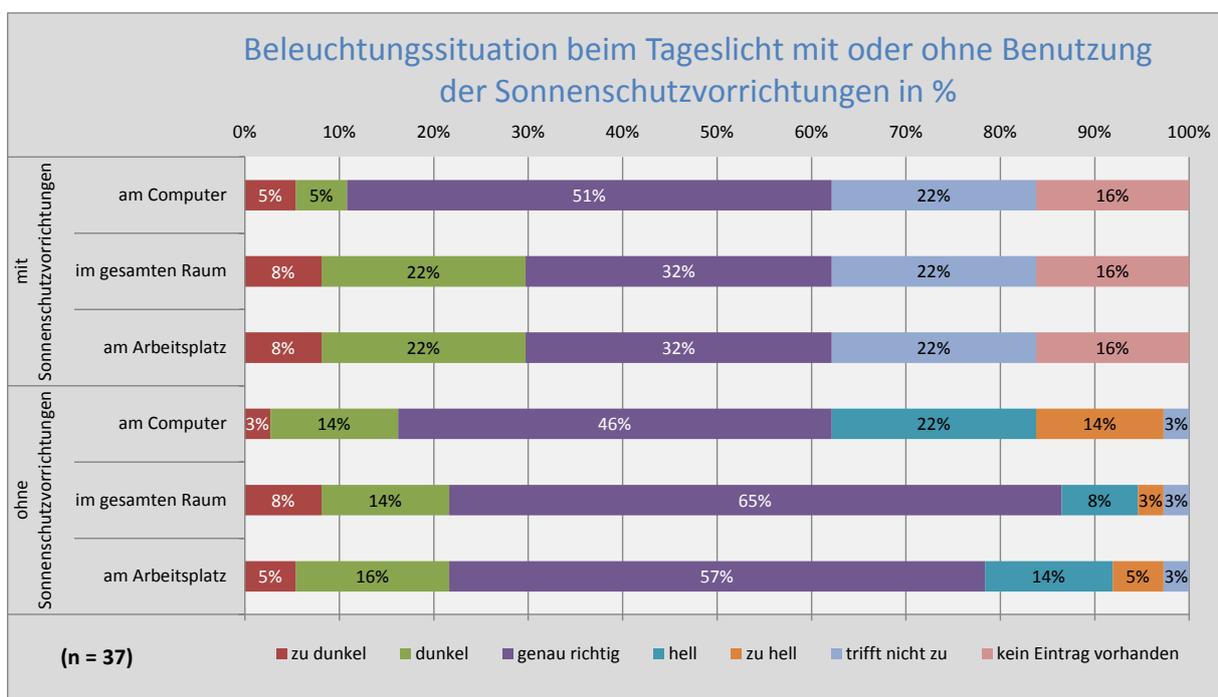


Abbildung 82: Beleuchtungssituation beim Tageslicht mit oder ohne Benutzung der Sonnenschutzvorrichtungen

Die Beleuchtungssituation bei Tageslicht ohne Benutzung der Sonnenschutzvorrichtungen im gesamten Raum wird zu 65 % als „genau richtig“ empfunden. Weitere 8 % empfinden die Tageslichtsituation als „zu dunkel“ und 14 % als „dunkel“. Im Gegensatz dazu werden von 8 % der Befragten die Tageslichtverhältnisse im gesamten Raum als „hell“ und als „zu hell“ (3 %) wahrgenommen. Am Arbeitsplatz wird die Beleuchtungssituation bei Tageslicht ohne Benutzung der Sonnenschutzvorrichtungen ähnlich empfunden wie im gesamten Raum. Nur um eine Prozentsteigerung von rund 6 % wird diese heller empfunden. In Hinblick der Beleuchtungssituation bei Tageslicht am Computer, ebenfalls ohne Benutzung der Sonnenschutzvorrichtungen, empfinden 46 % der Befragten diese „genau richtig“. 13 % nehmen diese Tageslichtsituation als „dunkel“ und 3 % sogar „zu dunkel“ wahr. Darüber hinaus wird die Beleuchtungssituation zu 22 % als „hell“ und zu 14 % als „zu hell“ empfunden.

Unter Nutzung der Sonnenschutzvorrichtung geht aus Abbildung 82 hervor, dass die Beleuchtungssituation im gesamten Raum sowie am Arbeitsplatz unter Berücksichtigung, dass „Trifft nicht zu“ dem Empfinden von „Genau richtig“ entspricht, ähnlich empfunden wird wie ohne Nutzung der Sonnenschutzvorrichtung. Nichtsdestotrotz wird die Beleuchtungssituation um 22 % dunkler und zu 0 % als nicht hell empfunden. Am Computer scheint die Beleuchtungssituation unter Nutzung der Sonnenschutzvorrichtung um einiges besser zu sein. Auch hier wird diese nicht hell oder zu hell empfunden.

Zusammenfassend lässt sich gemäß Abbildung 82 sagen, dass die Sonnenschutzvorrichtungen in Bezug auf den gesamten Raum und am Arbeitsplatz wenig Einfluss auf die Lichtverhältnisse bei Tageslicht haben. Jedoch ist am Computer eine größere Auswirkung der Sonnenschutzvorrichtungen festzustellen. Bei Nutzung der Sonnenschutzvorrichtungen am Computer wird die Beleuchtungssituation bei Tageslicht besser empfunden als ohne Sonnenschutzvorrichtungen. Demzufolge herrscht ein größerer Bedarf an der Sonnenschutzvorrichtung am Computer als im gesamten Raum oder am Arbeitsplatz.

Des Weiteren ist festzustellen inwiefern diese Aussage mit der Lage der Büros (Süd- und Nordseite) in Verbindung steht. Unabhängig von der Nutzung der Sonnenschutzvorrichtung ist das Empfinden der Beleuchtungssituation an der Nordseite des Gebäudes dunkler als an der Südseite.

### **Kunstlicht**

In der nachfolgenden Abbildung 83 ist die tägliche Einschaltdauer der Kunstlichter während der Arbeitszeit aus Sicht der Befragten dargestellt. Es wird unterschieden zwischen der Deckenleuchte an der Flurseite und an der Fensterseite sowie in sonstige Kunstlichtquellen (z. B. Tischlampen).

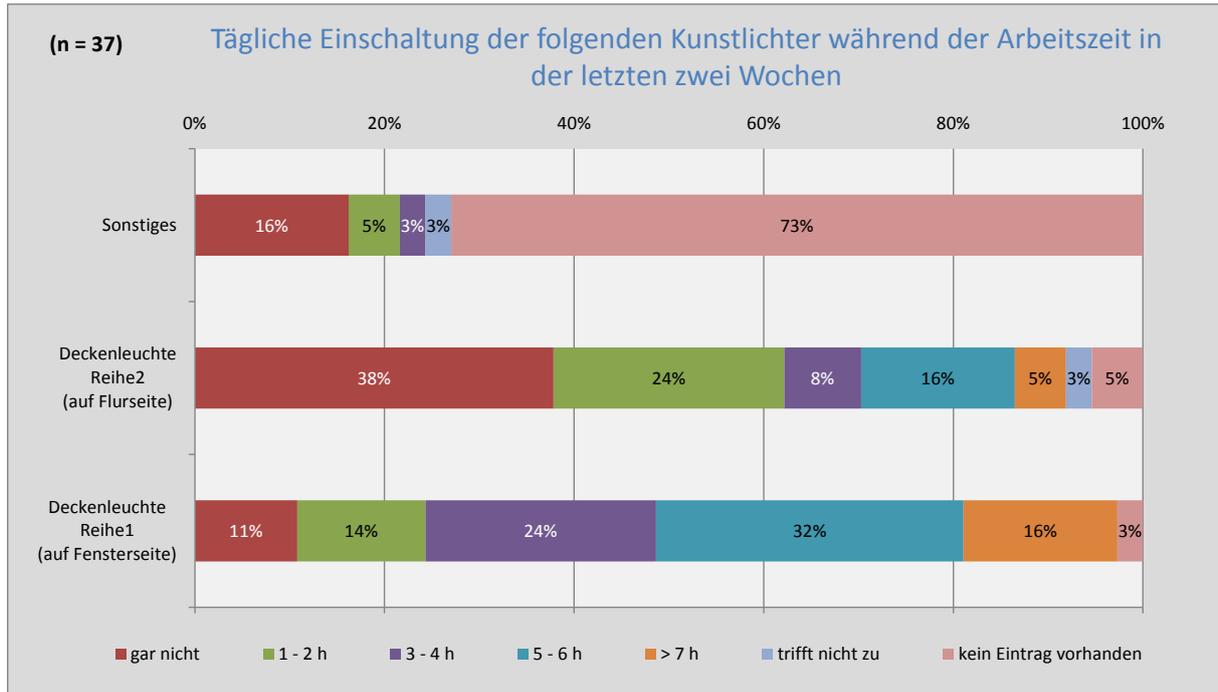


Abbildung 83: Dauer und die Form der Inanspruchnahme des Kunstlichtes

Bezüglich der sonstigen Kunstlichtquellen geht aus der Befragung hervor, dass die Mehrheit der Befragten diese nicht nutzen unter Annahme, dass nicht vorhandene Einträge der täglichen Einschaltung „gar nicht“ entspricht, da ggf. solche Quellen in ihrem Büro nicht existieren. Demzufolge schalten 89 % der Befragten sonstige Kunstlichter täglich „gar nicht“ ein.

Die Deckenleuchte an der Flurseite wird zu 38 % gar nicht genutzt. 24 % der Befragten nutzen diese 1 - 2 h pro Tag. Ein weitaus geringerer Anteil der Befragten (8 %) nutzt die Deckenleuchte an der Flurseite 3 - 4 h. Während 5 - 6 h der Arbeitszeit haben 16 % der Befragten die Deckenleuchte an der Flurseite eingeschaltet.

Die Deckenleuchte an der Fensterseite wird nur von 11 % der Befragten gar nicht genutzt. Dem zu Folge haben 14 % der Befragten die Deckenleuchte 1 - 2 h, 24 % der Befragten 3 - 4 h, 32 % der Befragten 5 - 6 h sowie 16 % der Befragten länger als 7 h die Deckenleuchte an der Fensterseite während der Arbeitszeit eingeschaltet.

Aus diesem genannten Nutzungsverhältnis geht hervor, dass die Deckenleuchte an der Flurseite im Schnitt weniger genutzt wird als die Deckenleuchte an der Fensterseite. Die Begründung liegt vermutlich darin, dass die Arbeitsplätze näher an den Fenstern liegen und hier mehr Licht benötigt wird. Ein weiterer Aspekt ist, dass im Winter weniger Helligkeit durch die Fenster vorhanden ist.

In Abbildung 84 ist die Zufriedenheit der Deckenleuchten bezüglich der automatischen Regelung, Lichtfarbe und Helligkeit aufgezeigt.

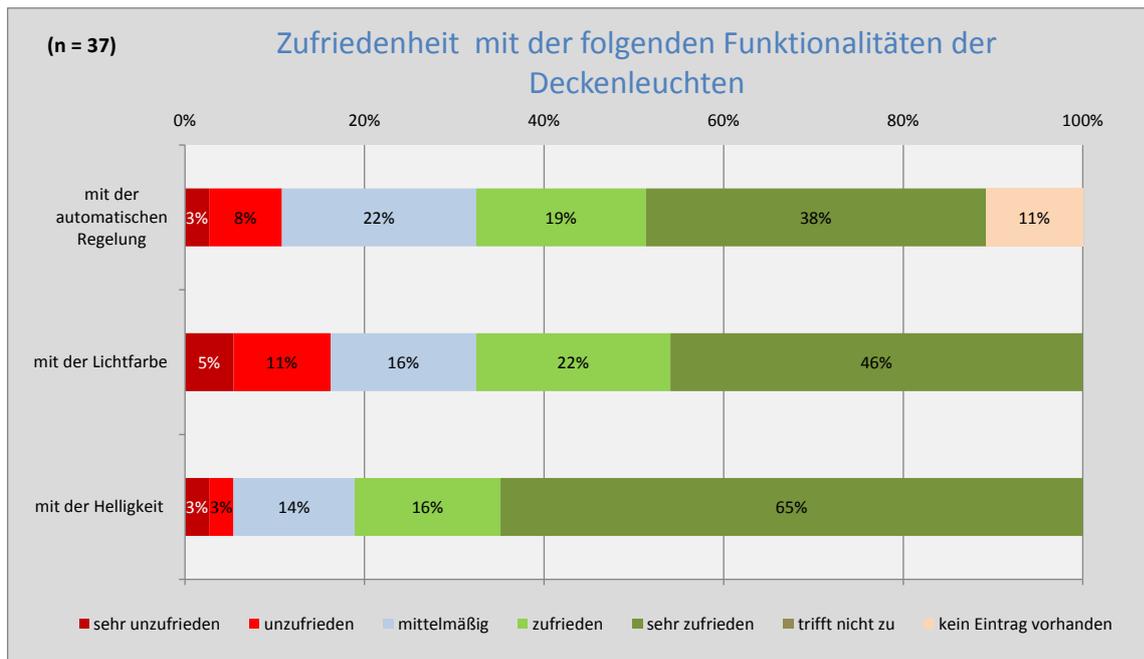


Abbildung 84: Zufriedenheit der Gebäudenutzer mit der Funktionalität der Deckenleuchten

Im Allgemeinen geht aus Abbildung 84 hervor, dass durchschnittlich die Mehrheit (rund 70 %) der Gebäudenutzer/-innen mit der Funktionalität der Deckenleuchten zufrieden (20 %) bzw. sehr zufrieden (50 %) ist. Im Durchschnitt waren nur ca. 11 % unzufrieden.

Angesichts der automatischen Regelung der Deckenleuchte ist die Mehrheit (57 %) der Befragten zufrieden (19 %) oder sogar zu 38 % sehr zufrieden. Nur 3 % der Befragten sind mit der automatischen Regelung sehr unzufrieden bzw. 8 % unzufrieden und 22 % empfinden diese mittelmäßig. Als Grund der Unzufriedenheit wurden die kurzen Ausschaltzeiten bei bewegungsarmen Tätigkeiten am Schreibtisch sowie teilweise nicht Ausschalten des Kunstlichtes bei Sonnenschein genannt. Hierzu besteht eventuell Verbesserungsbedarf der automatischen Regelung der Deckenleuchte.

Ähnlich sieht es mit der Lichtfarbe aus. Nur 5 % der Befragten sind sehr unzufrieden, 11 % unzufrieden und 16 % empfinden die Lichtfarbe mittelmäßig. Weitaus über die Hälfte (68 %) der Befragten ist mit der Lichtfarbe zufrieden (22 %) oder sehr zufrieden (46 %). Mit der Helligkeit der Deckenleuchte sind 65 % der Befragten sehr zufrieden und 16 % zufrieden. 14 % der Befragten empfinden die Helligkeit mittelmäßig und jeweils 3 % sind mit der Helligkeit unzufrieden oder sehr unzufrieden.

Die Unzufriedenheit bezüglich der Lichtfarbe ist nach Angaben der Befragten auf die kalte Lichtfarbe der installierten Leuchtstofflampen zurückzuführen. Demzufolge könnte die Lichtfarbe etwas wärmer (gelblicher) sein.

## 8 Ausblick - Nullenergiehaus und Plusenergiehaus

Im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojekts konnte anhand der Messdaten und Nutzerbefragung gezeigt werden, dass durch die Sanierung des IWU-Hauses nach dem Passivhaus-Standard nicht nur der Energieverbrauch (Wärme um 83 % und Strom um 73 %) sowie THG-Emissionen (um ca. 80 %) enorm reduziert wurde (vgl. Kapitel 5), sondern zudem aufgrund der weiteren energetischen Sanierungskonzepte (Wärmeschutz im Sommer, Nachtlüftung etc.) ohne Klimatisierung ein ausgezeichnetes sommerliches Raumklima erreicht werden konnte.

Der bei der Planung geforderte Zielwert des Heizwärmebedarfs (Nutzwärme) von 25 kWh/m<sup>2</sup>a konnte jedoch nicht erreicht werden. Die Hauptursachen sind hierzu die messtechnisch erfassten hohen Innenraumtemperaturen (durchschnittlich ca. 2,5 Kelvin über der Raumsolltemperatur von 20 °C bei der Berechnung) aufgrund der schlecht regelbaren Heizwärmezufuhr (ungewollte Wärmeverluste der Heizwärmeverteilung) bzw. der Komfortwünsche der Gebäudenutzer.

In diesem Kapitel wird des Weiteren aufgezeigt, wie die einmalige Chance bei einer ohnehin bevorstehenden Modernisierung der Anlagentechnik aufgegriffen werden kann, um über die Mängelbeseitigung des Gebäudes hinaus durch innovative Maßnahmen ein Konzept für ein Nullenergiehaus oder ggf. ein Plusenergiehaus für das IWU-Gebäude zu entwerfen.

Per Definition kann ein Nullenergiehaus erreicht werden, wenn der externe Energiebezug des Gebäudes im Jahresmittel durch den eigenen Energiegewinn (z. B. durch Solaranlagen etc.) aufgewogen wird. Wird mehr Energie erzeugt als das Gebäude selbst verbraucht, spricht man von einem Plusenergiehaus<sup>24</sup>.

Die Hauptvoraussetzungen sind hierzu die Minimierung der Transmissionswärmeverluste durch einen überdurchschnittlichen Wärmeschutz der Gebäudehülle sowie Minimierung der Lüftungswärmeverluste beispielsweise durch eine Zu- und Abluftanlage mit hocheffizienter Wärmerückgewinnung. Zudem begünstigt ein niedriger Stromverbrauch infolge der effizienten Anlagentechnik (Lüftungs- und Beleuchtungsanlagen etc.) bzw. Nutzerstrom die mögliche Realisierung eines Nullenergie- bzw. Nullemissionshauses<sup>25</sup>.

Da all diese Voraussetzungen bereits im IWU-Haus gegeben sind, können weitere Maßnahmen zur Senkung bzw. Abdeckung des Energieverbrauchs aus regenerativen Energien identifiziert und ggf. umgesetzt werden.

<sup>24</sup> <https://de.wikipedia.org/wiki/Nullenergiehaus>

<sup>25</sup> Im Rahmen dieser Studie wird unter einem Nullemissionsgebäude ein Gebäude im Jahresdurchschnitt (unter Einsatz EE) mit höchstens Null THG-Emissionen infolge des gesamten Endenergieverbrauchs (thermisch und elektrisch) inklusiver Nutzerstrom verstanden. Die graue Energie wird hierbei nicht mitberücksichtigt.

Hinsichtlich der Effizienz und energetischen Qualität können als größtes Defizit des IWU-Hauses das veraltete Heizungssystem mit seiner überdimensionierten Wärmeleistung der Wärmeerzeuger (zwei Niedertemperatur-Gaskessel mit je 500 kW für alle drei Baukörper des Gebäudekomplexes) sowie die teilweise ungedämmten Heizungsleitungen genannt werden, die bedauerlicherweise bei der Sanierung aus Wirtschaftlichkeitsüberlegungen nicht saniert bzw. erneuert wurden.

Zur Senkung des Energieverbrauchs und hin zu einem Nullenergiehaus ist daher zwingend erforderlich, das Heizungssystem unter Einsatz einer effizienten Wärmeerzeugung zu modernisieren. Da die Erneuerung der veralteten Heizkessel (Baujahr 1991) ohnehin ansteht, sollten hierbei die Rohrleitungen (zumindest die zugängigen) hinreichend gedämmt werden.

In Bezug auf die elektrische Energie (vgl. Abschnitt 5.1.3) ist das IWU-Haus sehr sparsam. Es macht daher vorerst Sinn, den Einsatz einer Photovoltaikanlage (PV-Anlage) zur Deckung des Stromverbrauchs zu diskutieren, um den Stromverbrauch vollständig nachhaltig abzudecken, bevor ein geeignetes Heizsystem für das IWU-Haus vorgeschlagen wird.

## 8.1 Photovoltaikanlage zur Deckung des Eigenbedarfs an elektr. Energie

Vorerst werden zur Deckung der elektrischen Energie (nicht zu Heizzwecken) durch Solarstrom zwei Szenarien untersucht:

- a) PV-Anlage deckt den Strombedarf des IWU-Hauses außer dem Serverstrom ab
- b) PV-Anlage deckt den gesamten Eigenbedarf (inkl. Serverstrom) an Elektroenergie ab

Als ein einfaches System sollte hierbei kein Stromspeicher eingesetzt werden. Der Überschuss des produzierten Solarstroms wird in das Stromnetz eingespeist, wobei der Überschuss aus Wirtschaftlichkeitsgründen (Kosten-Nutzen-Verhältnis) minimiert werden sollte. Hierzu stehen ca. 350 m<sup>2</sup> Dachfläche<sup>26</sup> zur Verfügung.

Die Berechnung der solaren Stromerzeugung erfolgt analog zum in DIN V 18599-9:2018-09 (Monatsbilanzverfahren<sup>27</sup>) vorgeschrieben Bilanzverfahren. Für die Bilanz wurden folgenden Daten bzw. Überlegungen zu Grunde gelegt:

- Die verwendeten Elektroenergien basieren auf den gemittelten monatlichen Messdaten (Endenergieverbräuchen) des IWU-Hauses aus den Jahren 2014, 2016 und 2018<sup>28</sup>.

---

<sup>26</sup> Nicht berücksichtigt ist hierbei die Dachfläche des Saals.

<sup>27</sup> Es ist aus zahlreichen Untersuchungen bereits bekannt, dass die berechneten Erträge für die PV-Anlagen auf Basis des Monatsbilanzverfahrens möglicherweise höher als die tatsächlichen ausfallen. Für die erste Abschätzung ist das Verfahren an der Stelle ausreichend genau.

- Die Monatswerte für den Serverstrom wurden aus der Leistung der Servereinheiten (1500 W) geschätzt. Sie berücksichtigen somit die Servererweiterungen ab dem Jahr 2019.
- Die Monatsdaten der solaren Einstrahlung stammen aus der DIN V 18599-10:2018-09 für die Region Mannheim<sup>29</sup>.
- Für eine effiziente PV-Anlage sollten alle PV-Module einen flächenbezogenen Peakleistungskoeffizient von  $K_{pk}=0,17 \text{ kW}_p/\text{m}^2_{\text{Modul}}$  aufweisen.
- Bei der Ermittlung des Energieertrags der PV-Anlage wurde mit einem Faktor von 0,9 unter Berücksichtigung der Degradation gerechnet.

Zudem sind die PV-Ausrichtung, Modul-Neigung sowie Modul-Flächen der vorgenannten Szenarien wie folgt berücksichtigt:

#### Szenario a) Ohne Berücksichtigung des Serverstroms

- Neigung von 30°
- Ausrichtung nach Süden
- Modulfläche 135 m<sup>2</sup> (das ist ca. 39 % der Dachfläche des IWU-Hauses)

#### Szenario b) Unter Berücksichtigung des Serverstroms

- Neigung von 30°
- Hälfte der Module nach Osten und die andere Hälfte nach Westen
- Modulfläche 270 m<sup>2</sup> (das ist rund 77 % der Dachfläche des IWU-Hauses)

Abbildung 85 stellt die Jahresbilanz des Solarstroms zur Abdeckung des Eigenbedarfs infolge der Elektro-Endenergie des IWU-Hauses ohne Berücksichtigung des Serverstroms dar.

---

<sup>28</sup> Monatswerte für das Jahr 2015 bzw. 2017 weisen Lücken auf, daher konnten sie hier nicht verwendet werden.

<sup>29</sup> Die für die Berechnung zu verwendenden Monatsdaten der solaren Einstrahlung der Stadt Darmstadt stehen momentan nicht zur Verfügung. Für die erste Abschätzung des zu produzierenden Solarstroms ist die Verwendung der solaren Einstrahlung der Region Mannheim ausreichend genau.

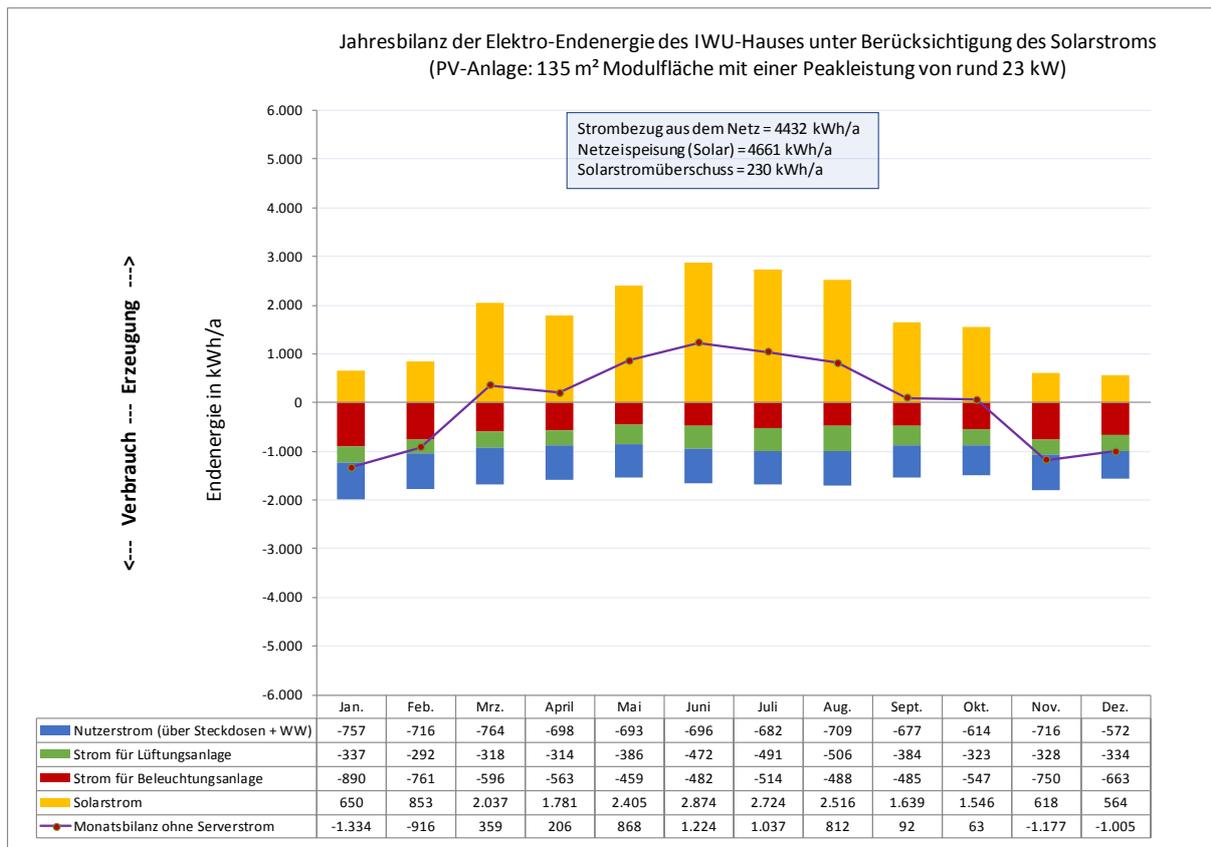


Abbildung 85: Gegenüberstellung des gemessenen Elektro-Endenergieverbrauchs und berechneten Solarstroms zur Deckung des Eigenbedarfs ohne Berücksichtigung des Serverstroms

Zudem zeigt Abbildung 86 die Jahresbilanz des Solarstroms unter Berücksichtigung des Serverstroms. Demzufolge ist eine PV-Anlage mit einer installierten Leistung von 23 kW<sub>Peak</sub> für den Fall a (ohne Berücksichtigung des Serverstroms) bzw. eine mit einer Leistung von 46 kW<sub>Peak</sub> für den Fall b (unter Berücksichtigung des Serverstroms) erforderlich.

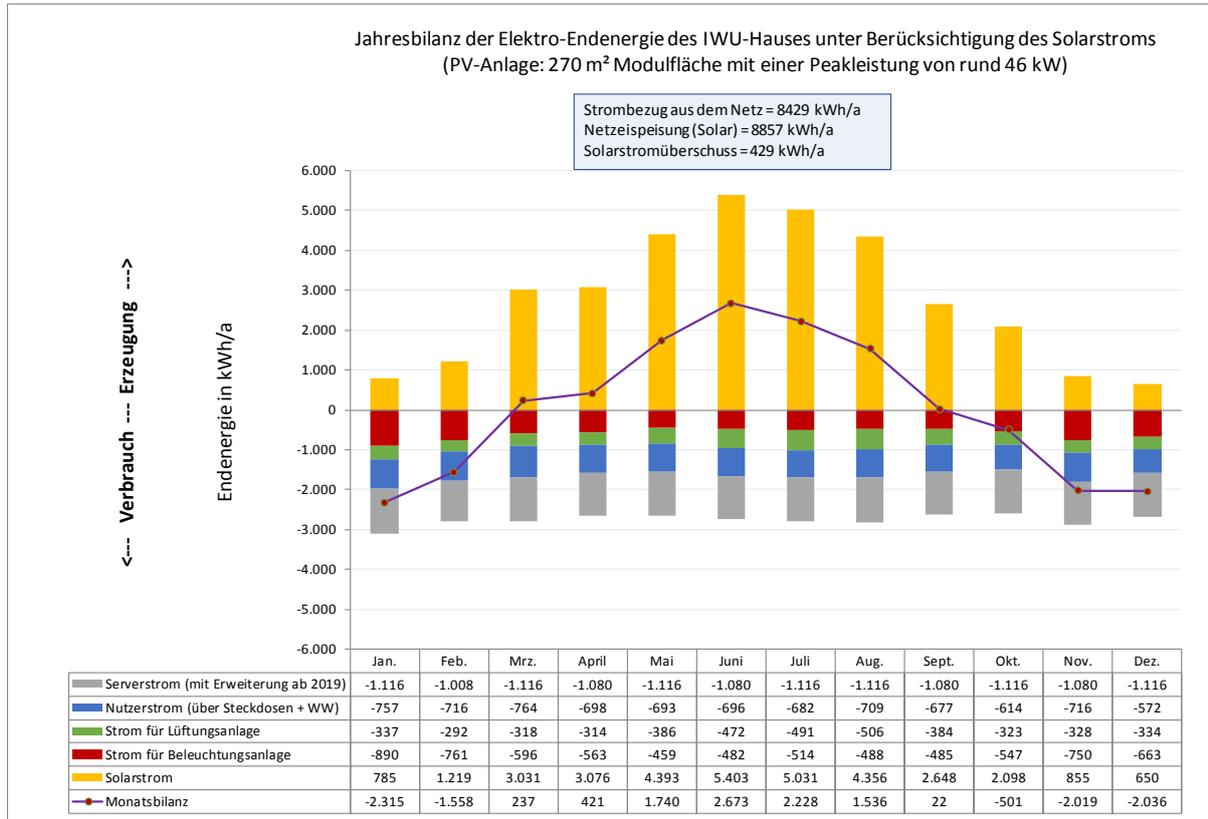


Abbildung 86: Gegenüberstellung des gemessenen Elektro-Endenergieverbrauchs und berechneten Solarstroms zur Deckung des Eigenbedarfs unter Berücksichtigung des Serverstroms

Aus Abbildung 87 kann zudem entnommen werden, dass sich in beiden Fällen aufgrund der Annahmen bzw. Messdaten ein knapper Überschuss des Solarstroms (1,1 % bis 1,3 %) ergibt. Es ist darüber hinaus ersichtlich, dass zur Deckung des Serverstroms eine Verdoppelung der Modulfläche der PV-Anlage notwendig wird.

Aus Verschattungsgründen können die Module bei Szenario b) nicht nach Süden ausgerichtet werden, da ansonsten hierfür nicht genügend Dachfläche zur Verfügung steht. Die Leistungsverluste der PV-Anlage müssen jedoch in diesem Fall zu Gunsten der höheren PV-Flächen in Kauf genommen werden.

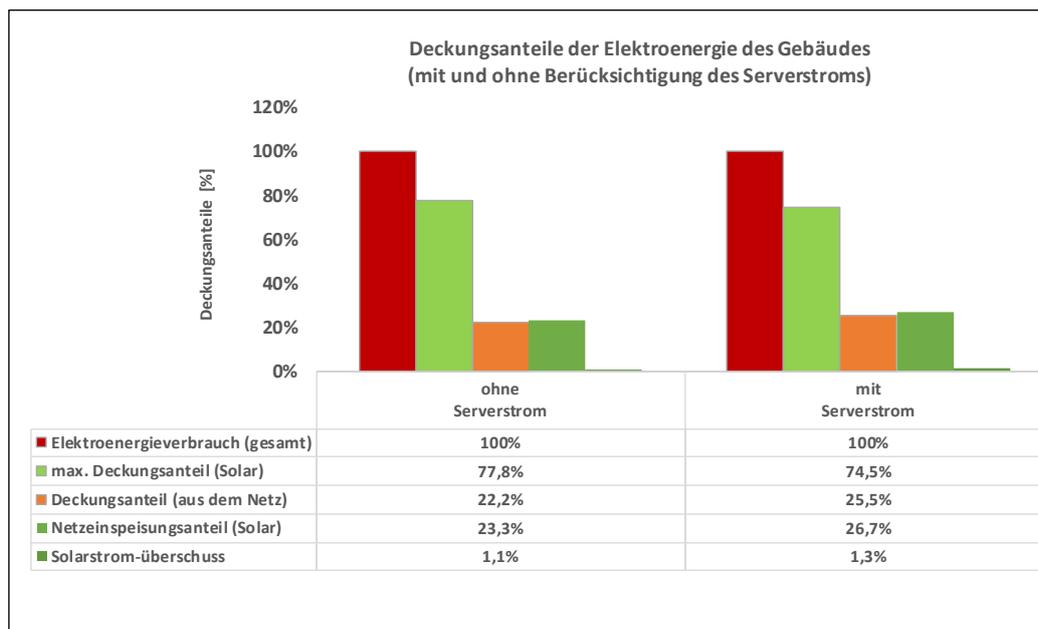
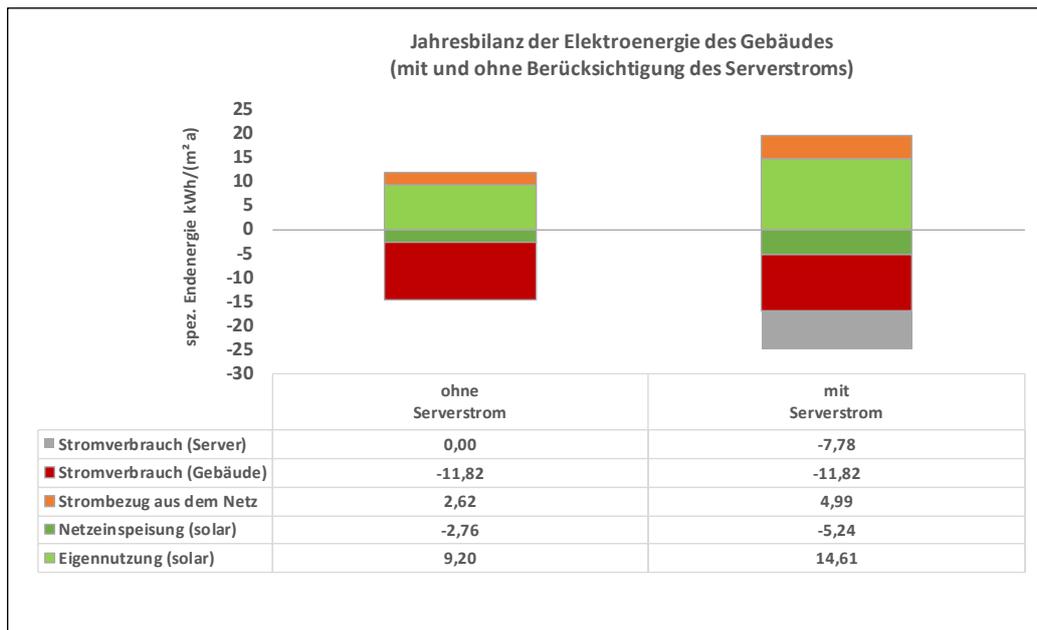


Abbildung 87: Bilanzielle Darstellung des Solarstroms (Eigenbedarf, Netzeinspeisung) bzw. des Strombezugs aus dem Netz (links) sowie ihre Deckungsanteile in Prozent (rechts)

## 8.2 Abwärmenutzung zur Deckung der thermischen Energie

Aufgrund des gemeinsam genutzten Heizsystems zur Bereitstellung des Wärmebedarfs des gesamten Gebäudekomplexes (drei Gebäudeteile) ist eine Entscheidung zur Auswahl eines künftig geeigneten Heizsystems nicht so einfach, da die Gebäudeteile unterschiedliches Wärmeschutzniveau bzw. differenzierte Gebäudenutzung aufweisen.

Vor diesem Hintergrund ist denkbar, für das IWU-Haus (der mittlere Gebäudeteil) einen separaten Wärmeerzeuger zur Deckung des im Vergleich zu den anderen Gebäudeteilen geringfügigen Wärmebedarfs zu installieren. Hierzu können verschiedene Heizsysteme mit regenerativen Energieträgern (u. a. wie Wärmepumpen zur Nutzung der Umweltwärme oder Pelletheizung zur Verbrennung der Biomasse in Form von Restholz) infrage kommen.

Angesichts einer Besonderheit des Standorts des IWU-Hauses wird hier der Einsatz einer Wärmepumpe untersucht, wobei Abwärme als Wärmequelle verwendet werden sollte.

Ein Teil des Nachbargebäudes (Teil des Gebäudekomplexes) beheimatet ein Rechenzentrum, das durchgehend über das ganze Jahr eine konstante Menge an Abwärme produziert. Die Server werden aktiv gekühlt und die überschüssige Wärme mittels ventilatorgestützten Kühlern mit niedrigem Temperaturniveau an die Außenluft abgegeben. Wird diese Abwärme als Wärmequelle einer Wärmepumpe erschlossen, können einerseits die THG-Emissionen des Rechenzentrums reduziert werden, andererseits kann dies zur Erhöhung der Energieeffizienz (Erhöhung der Jahresarbeitszahl) der Wärmepumpe und somit zur Reduktion ihrer einzusetzenden elektrischen Energie beitragen.

Da das Abwärmepotenzial des Rechenzentrums messtechnisch momentan nicht bekannt ist, wird ein Wertebereich mittels vereinfachter Annahmen wie folgt prognostiziert:

- a) In Abhängigkeit von verschiedenen Temperaturdifferenzen zwischen dem Abwärmemedium und der Umgebung (Abbildung 88 links)<sup>30</sup> bzw.
- b) in Abhängigkeit von diversen Volumenströmen der Abwärmequelle (Abbildung 88 rechts)<sup>31</sup>.

Abbildung 88 stellt die Wertebereiche der Abwärmemenge des Rechenzentrums sowie die THG-Emissionen<sup>32</sup> infolge der freigesetzten Abwärmemenge grafisch dar.

<sup>30</sup> Mit einem durchschnittlichen Volumenstrom der Abwärmequelle von 3000 m<sup>3</sup>/h

<sup>31</sup> Mit einer durchschnittl. Temperaturdifferenz zwischen dem Abwärmemedium und der Umgebung von 8 K

<sup>32</sup> 40 Gramm CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro 1 kWh produzierte Abwärme (gemäß DIN V 18599-1:2018-09)

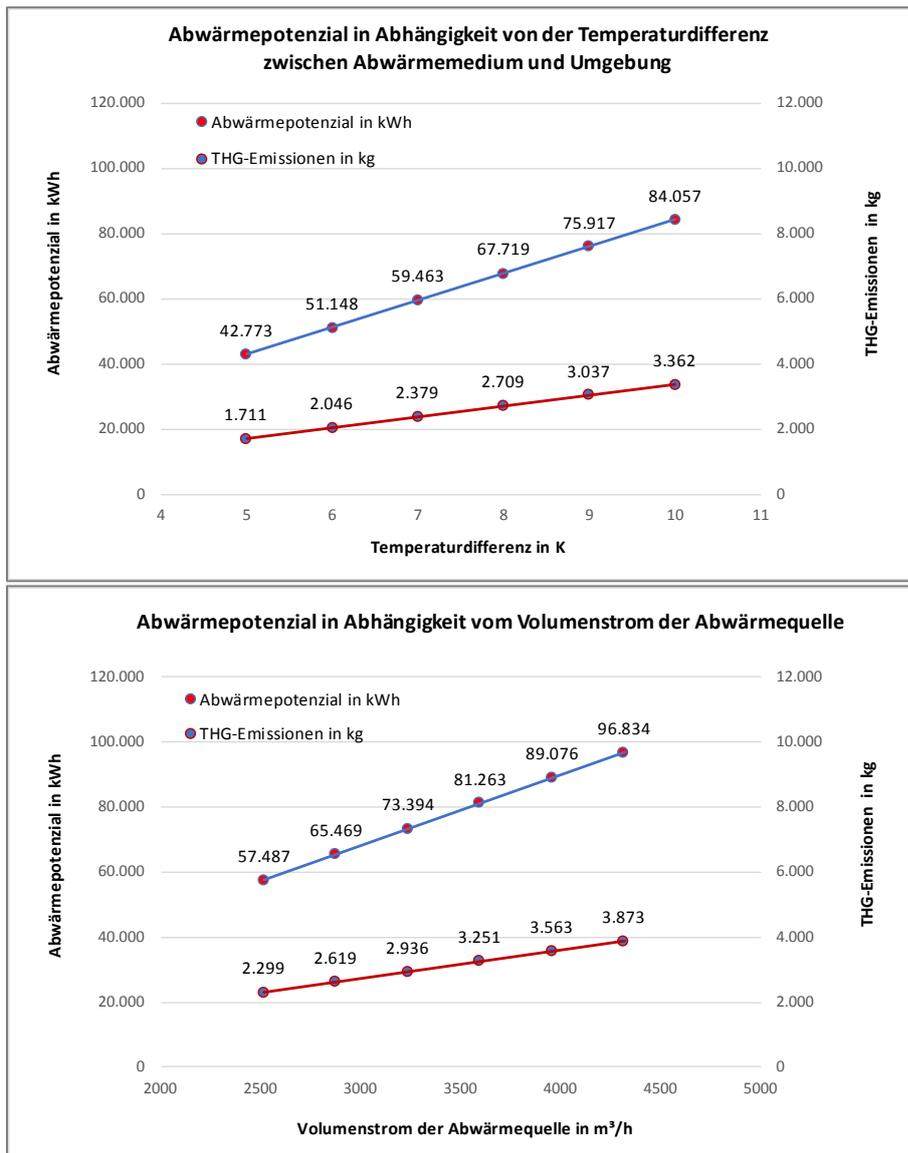


Abbildung 88: Abschätzung der freiwerdenden Abwärmemenge des Rechenzentrums im Nachbargebäude in Abhängigkeit von verschiedenen Temperaturdifferenzen zwischen dem Abwärmemedium und der Umgebung (oben) bzw. von diversen Volumenströmen der Abwärmequelle (unten)

Aus Abbildung 88 ist ersichtlich, dass je nach Höhe der Temperaturdifferenz bzw. des Volumenstroms der Wärmequelle durchaus ein Abwärmepotenzial zwischen 50 bis 100 MWh/a zur Verfügung steht. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass das Potenzial weitaus höher liegt. Zur Erschließung des Abwärmepotenzials zur Beheizung des IWU-Hauses muss jedoch das Temperaturniveau der Abwärme aus dem Rechenzentrum mittels einer Wärmepumpe angehoben werden.

Abbildung 89 stellt tabellarisch die erforderliche Erzeugernutzenergie infolge der Modernisierung des Heizsystems des IWU-Hauses unter Einsatz einer Abluft-Wärmepumpe und die Erschließung der Abwärme des Rechenzentrums als Abwärmequelle gemäß EnEV dar.

<b>Wärmeerzeuger: Abluft-Wärmepumpe (Ablufttemperatur 24 °C)</b>	Wärmeenergie [kWh/a]		Hilfsenergie [kWh/a]	
	für statische Systeme	für RLT-Anlagen	für statische Systeme	für RLT-Anlagen
Zu deckender Nutzenergiebedarf	56.976,18	3.605,94		
+ Verluste durch Speicherung	0,00	0,00	0,00	0,00
+ Verluste durch Verteilung	0,00	0,00	0,00	7,99
+ Verluste durch Übergabe	8.513,68	0,00	0,00	0,00
<b>= erforderliche Erzeugernutzenergie</b>	<b>65.489,86</b>	<b>3.605,94</b>	<b>0,00</b>	<b>7,99</b>
– regenerativer Anteil	50.462,39	2.639,56	0	0
+ Verluste durch Erzeugung	0,00	0,00	1.539,03	453,53
<b>= Endenergiebedarf</b>	<b>15.027,47</b>	<b>966,38</b>	<b>1.539,03</b>	<b>461,52</b>

Abbildung 89: Energiebedarfsberechnung zur Deckung der thermischen Energie des IWU-Hauses gemäß EnEV nach der Modernisierung des Heizsystems unter Einsatz einer Abluft-Wärmepumpe und die Erschließung der Abwärme des Rechenzentrums als Abwärmequelle der Wärmepumpe

Demnach können rund 77 % ( $53.102 = 50.462 + 2.640$  kWh/a) der erforderlichen Erzeugernutzenergie ( $69.096 = 65.490 + 3.606$  kWh/a) durch regenerative Energie (hier Umwelte-nergie) und Abwärmenutzung abgedeckt werden. Der restliche Endenergiebedarf des Gebäudes (rund 17.995 kWh/a bzw.  $10,65$  kWh/m<sup>2</sup>a) muss jedoch durch den Einsatz des Energieträgers Strom von der Anlagentechnik (Wärmepumpe, Lüftungsanlage, Umwälzpumpen etc.) bereitgestellt werden.

Sollte das IWU-Haus bilanziell das Niveau eines Nullenergiegebäudes erreichen, muss der zu den Heizzwecken zusätzlich erforderliche Elektro-Endenergiebedarf des Gebäudes durch beispielsweise Solarstrom kompensiert werden. Da bekanntlich das Angebot von Solarenergie nicht deckungsgleich mit dem Heizwärmebedarf in der Heizperiode ist, sollte in der Jahresbilanz die solare Stromerzeugung über dem Strombezug aus dem Netz liegen.

Abbildung 90 stellt den Endenergiebedarf der thermischen und elektrischen Energie des IWU-Hauses dem hierzu erforderlichen Solarstrom gegenüber. Die verwendeten Elektroenergien basieren hierbei auf den gemittelten monatlichen Messdaten (Endenergieverbräuchen) des IWU-Hauses aus den Jahren 2014, 2016 und 2018. Nur der Strombedarf der Wärmepumpe zur Deckung der thermischen Energie wurde aus den Energiebedarfsberechnungen gemäß EnEV (vgl. Abbildung 89) übernommen.

Demzufolge reicht eine PV-Anlage mit einer installierten Leistung von  $72$  kW<sub>peak</sub> aus, um den Endenergiebedarf des Gebäudes mittels Solarstrom gerade noch zu kompensieren ( $617$  kWh/a Solarstromüberschuss). Hierzu sind rund  $425$  m<sup>2</sup> PV-Modulfläche (Ost-West-Ausrichtung und mit einer Neigung von 30 %) notwendig. Davon sind ca.  $155$  m<sup>2</sup> zur Kompensation des Strombezugs aus dem Netz zur Abdeckung des Heizwärmebedarfs vonnöten. Insgesamt stehen rund  $520$  m<sup>2</sup> Dachfläche (IWU + Saal) zur Verfügung. Infolgedessen müssen

ca. 82 % der Dachfläche mit PV-Modulen ausgestattet werden (möglicherweise gerade noch realisierbar).

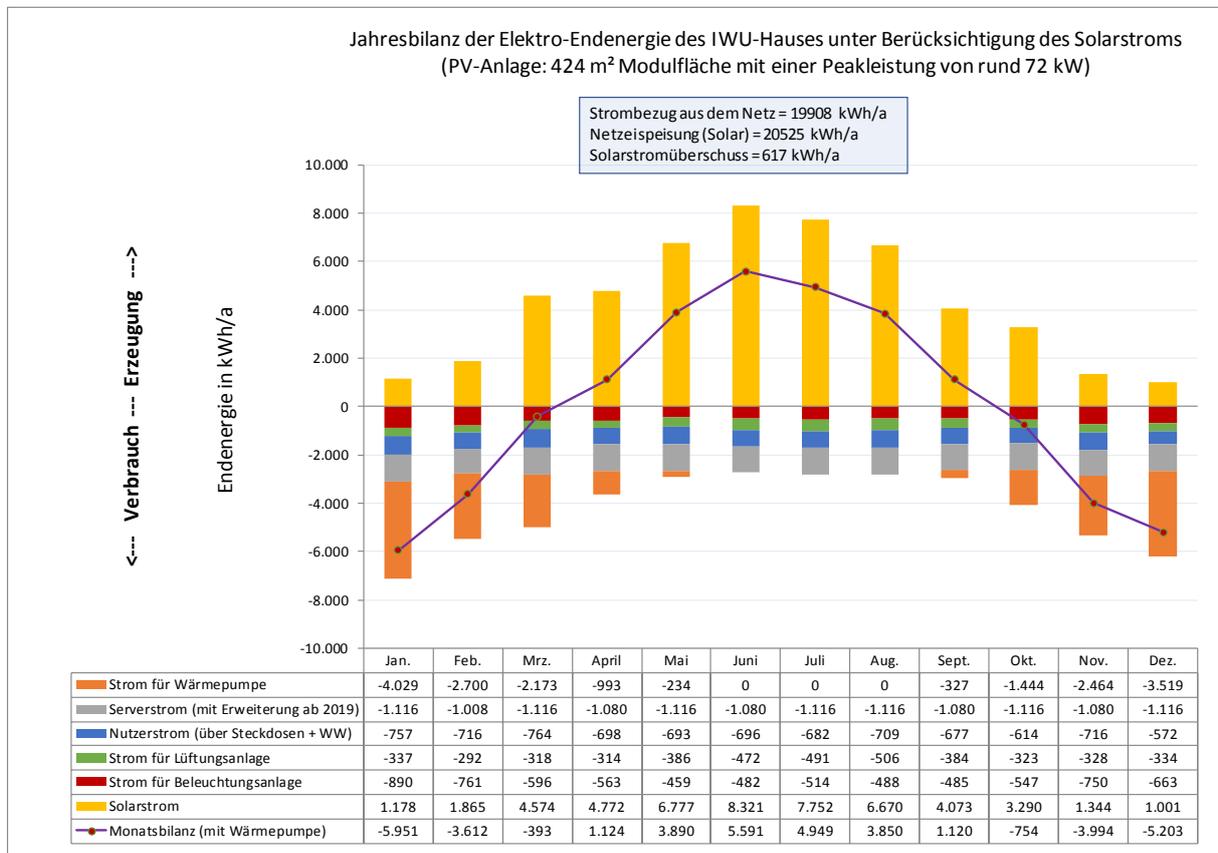


Abbildung 90: Gegenüberstellung des Endenergiebedarfs der thermischen und elektrischen Energie und hierzu ermittelten Solarstroms

### 8.3 Elektromobilität

Werden darüber hinaus die noch verfügbaren 880 m<sup>2</sup> Dachfläche (der rechten und linken Gebäudeteile) des Gebäudekomplexes zur Erzeugung des Solarstroms herangezogen, kann dies zusätzlich zur Reduktion der THG-Emissionen des Gebäudekomplexes beigetragen.

Eine weitere interessante Möglichkeit hierzu besteht beispielsweise im Zusammenhang mit der Elektromobilität. Durch Initiative der Geschäftsführung des IWU stehen meist zwei Carsharing-Autos vor dem IWU-Haus zur Verfügung, die u. a. von den Mitarbeitern bei Bedarf für Dienstreisen verwendet werden können. Sollte eine solare Ladestation am Standort installiert werden, könnte das Carsharingunternehmen zwei Elektroautos, die mit lokal erzeugtem Solarstrom beladen werden, anbieten. Hierzu ist jedoch die Installation von Stromspeichern notwendig, um den Anteil der Eigennutzung des selbsterzeugten Solarstroms zu erhöhen.

Bei einer PV-Belegung von 75 % der noch verfügbaren Dachfläche von 880 m<sup>2</sup> und unter Berücksichtigung eines Systemwirkungsgrads von 80 % stehen insgesamt ca. 62 MW produzierter Solarstrom im Jahr zur Verfügung. Für eine 100-Kilometer-Fahrt benötigt ein Elektroauto durchschnittlich 15 kWh<sup>33</sup>. Theoretisch kann pro Jahr eine Wegstrecke von rund 410.000 km bzw. rund 1.100 km/Tag elektrisch zurückgelegt werden.

#### 8.4 Kühlkälte mittels Wärmepumpe

Bei reversiblen Wärmepumpen besteht zudem die Möglichkeit, ein Gebäude oder einen Teil eines Gebäudes je nach Bedarf zu beheizen oder zu kühlen. Im Kühlfall funktioniert der Kältekreislauf der Wärmepumpe umgekehrt, und die Richtung des Kältemittels ändert sich.

Diese Betriebsweise der reversiblen Wärmepumpen kann für die Betreiber von Rechenzentren und Gebäuden interessant sein. So könnte eine Wärmepumpe, die im Winter zu Heizzwecken für die Gebäude genutzt wird, im Sommer dem Rechenzentrum zur Verfügung gestellt werden, um den dann höheren Kühlbedarf abzudecken. Wärme- und Kälteanforderung von Gebäude und Rechenzentrum ergänzen sich jahreszeitlich sehr gut. Zudem fällt der höchste Kühlbedarf mit den höchsten monatlichen Erträgen der Photovoltaik-Anlage im Sommer zusammen.

Von einer detaillierten Darlegung dieser Maßnahme wird in Rahmen dieser Studie Abstand genommen, da hierfür mehr Informationen über die Struktur, installierte Anlagentechnik bzw. den Kühlkältebedarf des Rechenzentrums notwendig wären. Dennoch könnten solche Lösungen dazu beitragen, den Energieverbrauch bzw. die THG-Emissionen des Rechenzentrums zu reduzieren (eine Win-Win-Lösung für das Rechenzentrum und IWU-Haus durch die Abwärmenutzung).

Als weitere Anwendungen diesbezüglich kann zudem die Kühlung des Serverraums des IWU oder eine Gebäudeklimatisierung (beispielsweise die Klimatisierung des Saals) an sehr heißen Sommertagen genannt werden. Diese Fälle wären jedoch nur an sehr wenigen Tagen im Jahr notwendig. In der Regel reichen die im IWU-Haus umgesetzten passiven Kühlmaßnahmen aus, um Server und Büroräume ausreichend zu kühlen.

#### 8.5 Wirtschaftlichkeit

Im Folgenden werden unterschiedliche Modernisierungsvarianten (Kombinationen aus PV-Anlagen unterschiedlicher Größe mit einem Gasbrennwertkessel (BWK) bzw. mit einer Abluftwärmepumpe (WP) bei gegebenem Passivhaus-Wärmeschutz) auf ihre Wirtschaftlichkeit untersucht. Die hier untersuchten Modernisierungsvarianten lauten:

---

<sup>33</sup> BMW i3 benötigt beispielsweise durchschnittlich 12,9 kWh/100 km, Herstellerangabe im Jahr 2019

Mod. 0 → WSN:PH (BWK): Wärmeschutzniveau: Passivhausstandard (WSN:PH) + Gasbrennwertkessel (BWK)

Mod. 1 → WSN:PH (BWK + PV 135m<sup>2</sup>): WSN:PH + BWK + 135 m<sup>2</sup> PV-Anlage zur Deckung der Elektro-Energie des IWU-Hauses (exklusiver Serverstrom)

Mod. 2 → WSN:PH (BWK + PV 270m<sup>2</sup>): WSN:PH + BWK + 270 m<sup>2</sup> PV-Anlage zur Deckung der Elektro-Energie des IWU-Hauses (inklusive Serverstrom)

Mod. 3 → WSN:PH (WP + PV 425m<sup>2</sup>): WSN:PH + Abluft-Wärmepumpe + 425 m<sup>2</sup> PV-Anlage zur Deckung der elektrischen und thermischen Energie des IWU-Hauses

Mod. 4 → WSN:PH (WP + PV 270m<sup>2</sup>): WSN:PH + Abluft-Wärmepumpe + 270 m<sup>2</sup> PV-Anlage als Vergleichsvariante zu Mod. 2

Mod. 5 → WSN:PH (WP + PV 135m<sup>2</sup>): WSN:PH + Abluft-Wärmepumpe + 135 m<sup>2</sup> PV-Anlage als Vergleichsvariante zu Mod. 1

Mod. 6 → WSN:PH (WP): WSN:PH + Abluft-Wärmepumpe als Vergleichsvariante zu Mod.0

Basis der Wirtschaftlichkeitsberechnungen ist die Kapitalwertmethode.

*„Die Kapitalwertmethode beinhaltet die Diskontierung der Ein- und Auszahlungen über den Betrachtungszeitpunkt auf einen gemeinsamen Bezugszeitpunkt (den Beginn des Betrachtungszeitraums):*

- *Der Kapitalwert KW einer Investition ist die Summe aller mit dem Kalkulationszinssatz  $i$  auf den Zeitpunkt  $t=0$  diskontierten Investitionszahlungen (Jahresüberschüsse)  $\ddot{u}_t$ :*

$$KW = \sum_{t=0}^n \ddot{u}_t * (1 + i)^{-t}$$

- *Das resultierende Wirtschaftlichkeitskriterium ist der Kapitalwert. Ist der Kapitalwert größer als Null, ist eine Variante absolut gesehen wirtschaftlich. Beim Vergleich mehrerer Varianten ist die Modernisierungsvariante mit dem größten Kapitalwert die wirtschaftlich optimale Variante.*
- *Der Kapitalwert wird hier im Rahmen einer Vollkostenrechnung ermittelt. Dazu werden die barwertigen Gesamtkosten (Energiekosten + Investitionskosten + Wartungskosten) einer Modernisierungsvariante von den barwertigen Gesamtkosten einer Bezugsvariante (Mod. 0) abgezogen. „ [10]*

Die Randbedingungen der Wirtschaftlichkeitsberechnungen sind in Tabelle 12 zusammengestellt.

Tabelle 12: Randbedingungen der Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen

Parameter	Annahme
Amortisationszeitraum (Betrachtungszeitraum)	20 Jahre
Kalkulationszinssatz	2,0 Prozent (nominal)
Energiepreissteigerung	3,0 Prozent pro Jahr (nominal)
Inflationsrate	1,0 Prozent pro Jahr (nominal)
Jährliche Wartungs- und Instandhaltungskosten der Anlagentechnik	2,0 Prozent der Anfangsinvestition
Lebensdauer (zur Berücksichtigung von Ersatzinvestitionen und Restwerten)	20 Jahre
Energiepreise (brutto)	6,5 Cent pro kWh Erdgas 23,0 Cent pro kWh Strom
CO <sub>2</sub> -Abgabe (als zukünftige externe Ausgaben)	50,0 € pro Tonne CO <sub>2</sub> -Emissionen

Des Weiteren wird im Rahmen der Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen davon ausgegangen,

- dass eingespeister Solarstrom durchschnittlich mit 8 Cent/kWh vergütet wird und
- dass für selbstgenutzten Solarstrom (im Vergleich zur Variante ohne PV-Anlage, hier Bezugsvariante: Mod. 0) Einsparungen basierend auf dem allgemeinen Preis für Strom (23 Cent/kWh) erzielt werden können.

Die Investitionskosten der Anlagentechnik werden zudem wie folgt berücksichtigt:

- Für die PV-Anlage (Zellen, Wechselrichter, Unterkonstruktion und Montage) werden die Kosten mit 1.500 € pro kW<sub>peak</sub> (brutto) veranschlagt.
- Die Investitionskosten der Gasbrennwertkessel bzw. Abluftwärmepumpe werden über die Kostenfunktionen in Anlehnung an die Publikation [11] ermittelt.

Abbildung 91 und Abbildung 92 zeigen die jährlichen spezifischen Endenergiekennwerte bzw. die jährlichen THG-Emissionen der oben genannten Modernisierungsvarianten. Der in

das öffentliche Netz eingespeiste Solarstrom wird in Abbildung 91 negativ dargestellt, um zwischen eingespeistem und selbstgenutztem Solarstrom zu differenzieren.

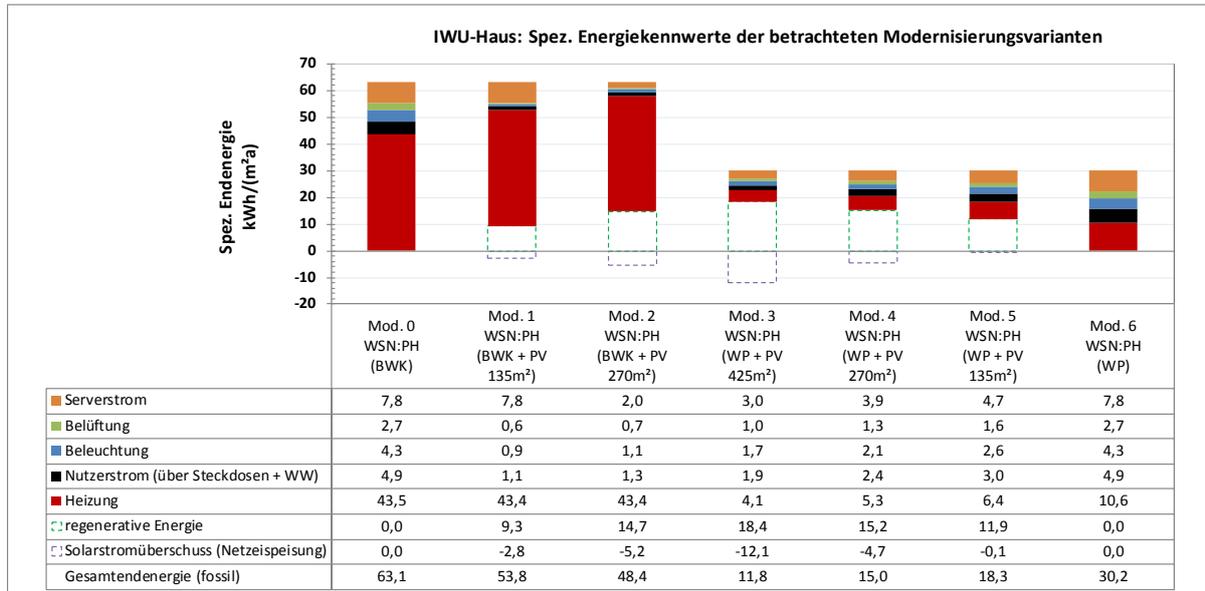


Abbildung 91: Spezifische Energiekennwerte der betrachteten Modernisierungsvarianten des IWU-Hauses

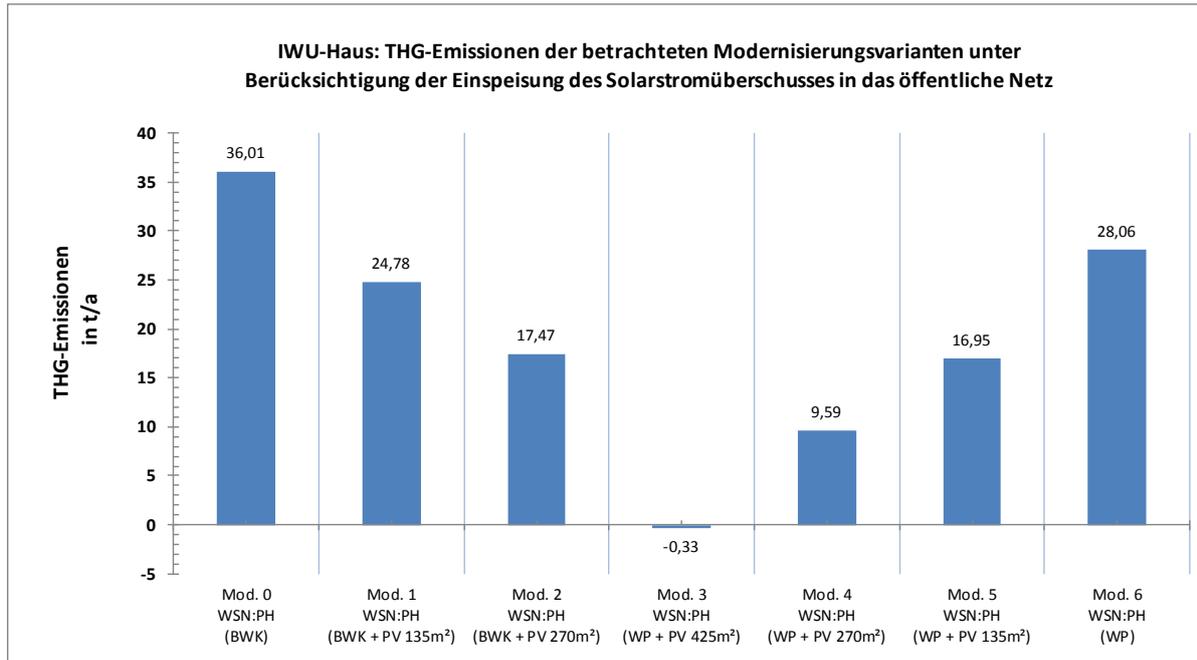


Abbildung 92: THG-Emissionen der betrachteten Modernisierungsvarianten für das IWU-Haus unter Berücksichtigung der Einspeisung des Solarstromüberschusses in das öffentliche Netz

Aus den obigen Abbildungen ist ersichtlich, dass bei der Variante „Mod. 3“ die geringste Menge fossiler Energie eingesetzt wird, um den gesamten Energiebedarf des Gebäudes abzudecken. Durch die Einspeisung des überschüssigen Solarstroms wird damit im Prinzip ein Nullemissionsgebäude realisiert. Die größte Umweltbelastung weist die Variante „Mod. 0“ (Gasbrennwertkessel ohne PV-Anlage) mit rund 36 Tonnen THG-Emissionen pro Jahr auf. Unter Einsatz einer Abluftwärmepumpe „Mod. 6“ kann der Energiebedarf zur Raumheizung von 43,5 auf rund 10,5 kWh/m<sup>2</sup>a reduziert werden. Obwohl diese Variante allein nicht zur Verwirklichung eines Nullemissionsgebäudes führt, ist sie jedoch die wesentliche Voraussetzung, um in Kombination mit einer PV-Anlage den auf ein Minimum reduzierten restlichen Wärmebedarf abzudecken bzw. zu kompensieren.

Die Ergebnisse (Gesamt- bzw. Einzelkosten) der Wirtschaftlichkeitsberechnungen für die Modernisierungsvarianten können aus Abbildung 93 entnommen werden. Es zeigt sich, dass die Investitions- (68 €/m<sup>2</sup>) und Wartungskosten (27 €/m<sup>2</sup>) bei der Variante „Mod. 3“ am größten sind. Diese werden jedoch durch die sehr geringen Energiekosten (39 €/m<sup>2</sup>) aufgrund des niedrigen Energiebedarfes kompensiert. Im Ergebnis weist „Mod. 3“ im Vergleich zu den anderen Modernisierungsvarianten – neben „Mod. 2“ – die niedrigsten Gesamtkosten (133 €/m<sup>2</sup>) auf.

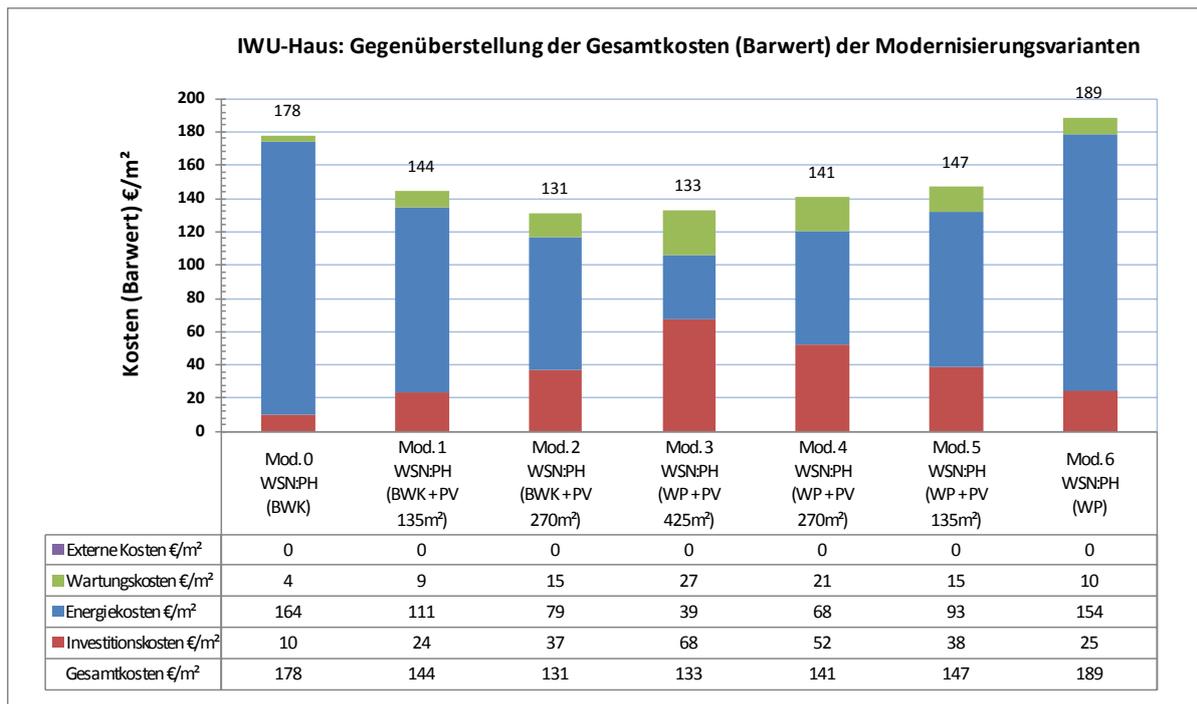


Abbildung 93: Gegenüberstellung der Gesamtkosten der betrachteten Modernisierungsvarianten für das IWU-Haus ohne Berücksichtigung der externen Kosten ( $\text{CO}_2$ -Abgabe = 0 €)

Werden die Varianten „Mod. 1“ mit der „Mod. 5“ und „Mod. 2“ mit der „Mod. 4“ verglichen, fällt auf, dass die zwei Varianten mit Gasbrennwertkesseln (Mod. 1 und 2) aufgrund der geringeren Investitions- und Wartungskosten günstiger sind als die Varianten mit Abluftwärmepumpen (Mod. 4 und 5).

Werden die Gesamtkosten der Modernisierungsvarianten von den Gesamtkosten der Bezugsvariante (Mod. 0) abgezogen, ergeben sich die Kapitalwerte der einzelnen Varianten. Die Bezugsvariante stellt die reine Instandsetzungsvariante für die Anlagentechnik dar. Je höher der Kapitalwert einer Modernisierungsvariante ist, desto wirtschaftlicher bzw. rentabler ist ihre Realisierung. Bei einem negativen Kapitalwert ist demzufolge eine wirtschaftliche Umsetzung nicht möglich.

Abbildung 94 zeigt die Kapitalwerte in Bezug auf „Mod. 0“. Hierbei wurde mit einer Energiepreissteigerung von 3 % und einem Kalkulationszinssatz von 2 % gerechnet (gemäß Tabelle 12). Demnach sind alle Modernisierungsvarianten außer „Mod. 6“ wirtschaftlich zu realisieren. Die höchste Rentabilität weist aber die Variante „Mod. 2“ mit einem Kapitalwert von 46 €/m<sup>2</sup><sub>NGF</sub> auf.

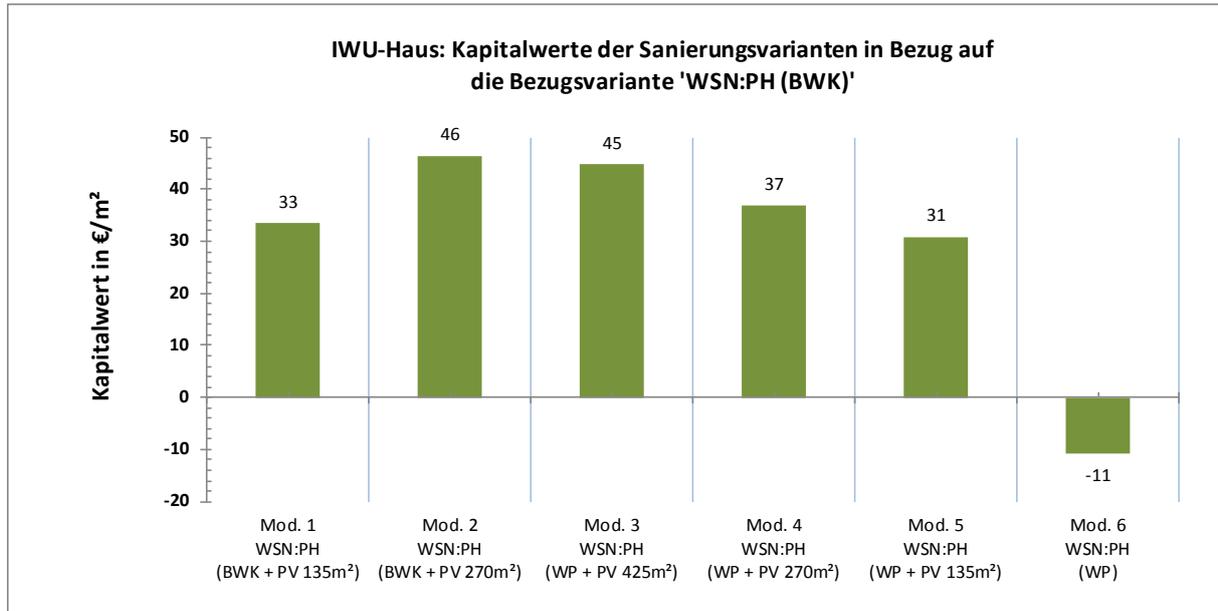


Abbildung 94: Gegenüberstellung der Kapitalwerte der betrachteten Modernisierungsvarianten (Energiepreissteigerung von 3 %, Kalkulationszinssatz von 2 %)

In der aktuellen politischen Diskussion zur Erreichung der Klimaschutzziele kann eine Tendenz zu einer CO<sub>2</sub>-Steuer bzw. -Abgabe auf fossilen Brennstoffen festgestellt werden. In der Schweiz wird momentan (Juni 2019) bereits ein „...Abgabesatz von 96,- CHF pro Tonne CO<sub>2</sub>“<sup>34</sup> (rund 85,- €/t) verwendet. Werden die Umweltbelastungen der Varianten monetär mittels einer CO<sub>2</sub>-Abgabe (hier als externe Kosten bezeichnet) bewertet und in die Berechnungen einbezogen, ergeben sich die Gesamtkosten aus Abbildung 95. Hierzu werden externe Kosten in Höhe 50 € pro Tonne CO<sub>2</sub> in den Berechnungen berücksichtigt.

<sup>34</sup> Quelle: [www.ezv.admin.ch/ezv/de/home/information-firmen/steuern-und-abgaben/einfuhr-in-die-schweiz/lenkungsabgabe-auf-co.html](http://www.ezv.admin.ch/ezv/de/home/information-firmen/steuern-und-abgaben/einfuhr-in-die-schweiz/lenkungsabgabe-auf-co.html)

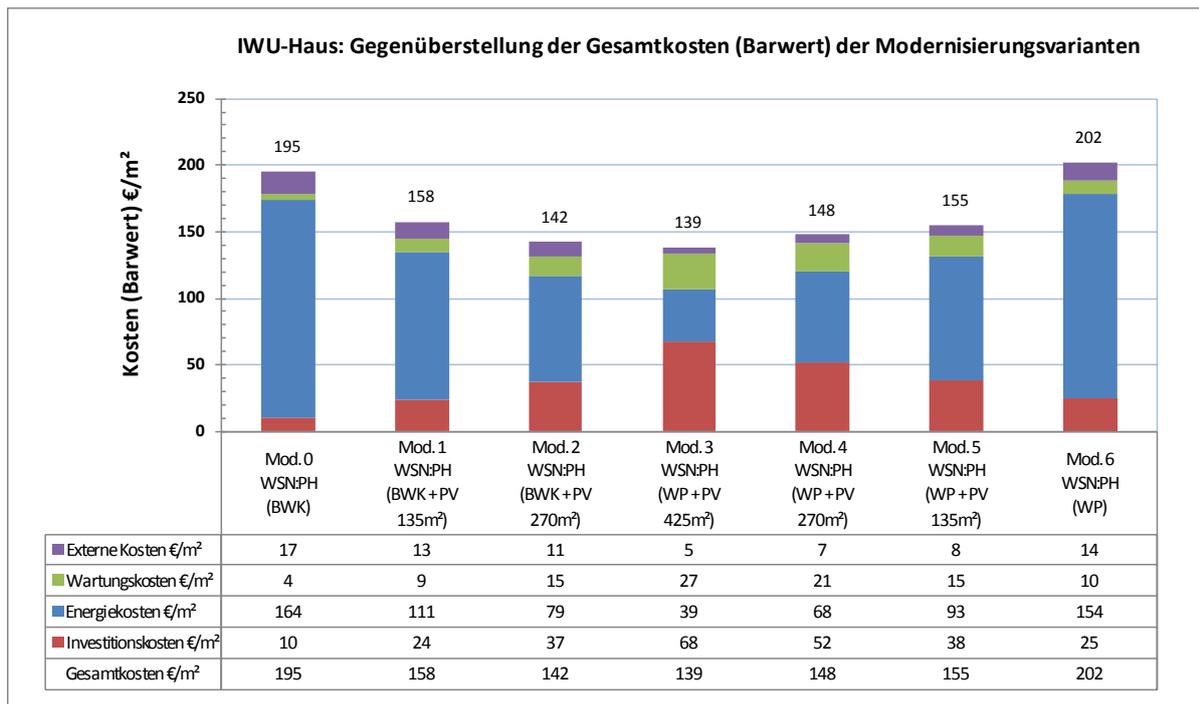


Abbildung 95: Gegenüberstellung der Gesamtkosten der betrachteten Modernisierungsvarianten für das IWU-Haus unter Berücksichtigung der externen Kosten ( $\text{CO}_2$ -Abgabe = 50 € pro Tonne  $\text{CO}_2$ )

Unter Berücksichtigung einer  $\text{CO}_2$ -Abgabe von 50 € pro Tonne würden sich dann die Varianten „Mod. 4“ und „Mod. 5“ wirtschaftlicher darstellen als „Mod. 1“ (Abbildung 95). Die Variante „Mod. 3“ ist jetzt die wirtschaftlichste Variante mit den niedrigsten Gesamtkosten. Die Variante „Mod. 6“ (Abluftwärmepumpe ohne PV-Anlage) weist angesichts des hohen Bedarfs an Elektroenergie weiterhin die höchsten Gesamtkosten auf.

Abbildung 96 illustriert die Kapitalwerte in Bezug auf „Mod. 0“. Hierbei wurde mit einer Energiepreissteigerung von 3 %, einem Kalkulationszinssatz von 2 % und einer  $\text{CO}_2$ -Abgabe von 50 €/t gerechnet (gemäß Tabelle 12). Unter diesen Prämissen sind alle Modernisierungsvarianten außer „Mod. 6“ wirtschaftlich zu realisieren<sup>35</sup>. Die höchste Rentabilität weist jedoch die Variante „Mod. 3“ mit einem Kapitalwert von 57 €/m<sup>2</sup><sub>NGF</sub> auf. Sie ist hier zudem die einzige Berechnungsvariante zur Realisierung eines Nullemissionsgebäudes.

<sup>35</sup> Würde statt mit 20 mit 30 Jahren Lebensdauer für die Anlagentechnik gerechnet, würde sich nahezu auch „Mod. 6“ rentieren.

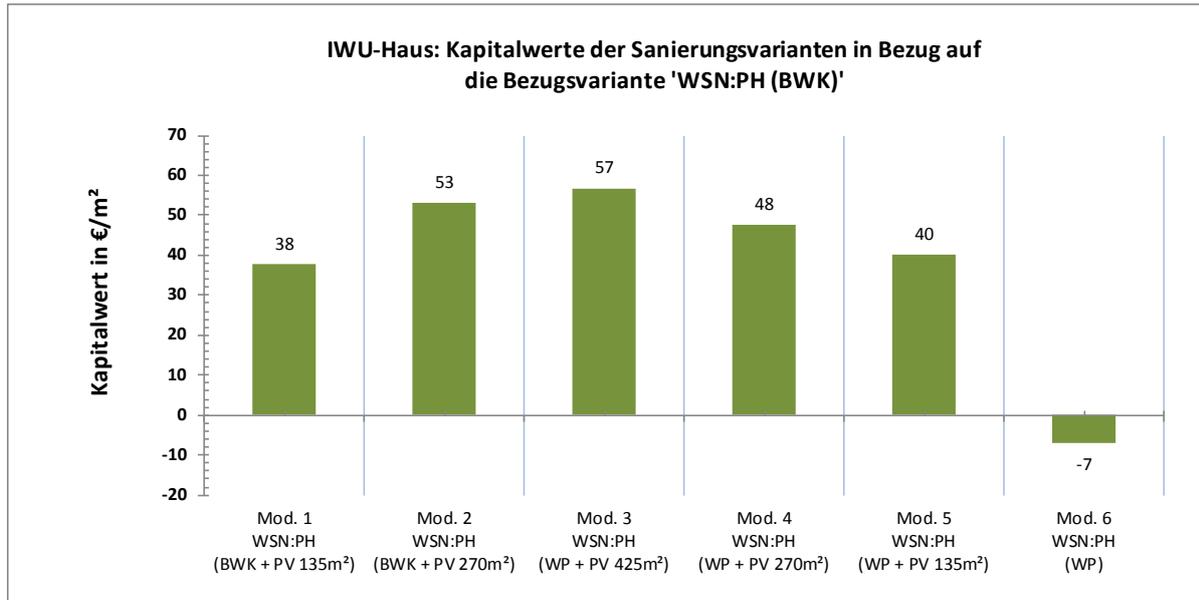


Abbildung 96: Gegenüberstellung der Kapitalwerte der betrachteten Modernisierungsvarianten (Energiepreissteigerung von 3 %, Kalkulationszinssatz von 2 %, CO<sub>2</sub>-Abgabe von 50 €/t)

Da die Festlegung der Randbedingungen, insbesondere für die Entwicklung der künftigen Energiepreissteigerungen bzw. des Kalkulationszinssatzes, mit Unsicherheit verbunden ist, werden die Kapitalwerte zudem einmal mit eher günstigen Randbedingungen (Abbildung 97: Energiepreissteigerung von 4 % und einem Kalkulationszinssatz von 1 %) und einmal mit eher ungünstigen Randbedingungen (in Abbildung 98: Energiepreissteigerung von 2 % und einem Kalkulationszinssatz von 3 %) berechnet.

Aus Abbildung 98 ist ersichtlich, dass auch unter eher ungünstigen Randbedingungen alle Berechnungsvarianten (außer Mod. 6) positive Kapitalwerte aufweisen. Unter diesen Prämissen ist jedoch „Mod. 3“ mit einem Kapitalwert von 35 €/m<sup>2</sup><sub>NGF</sub> nicht mehr die wirtschaftlichste Variante.

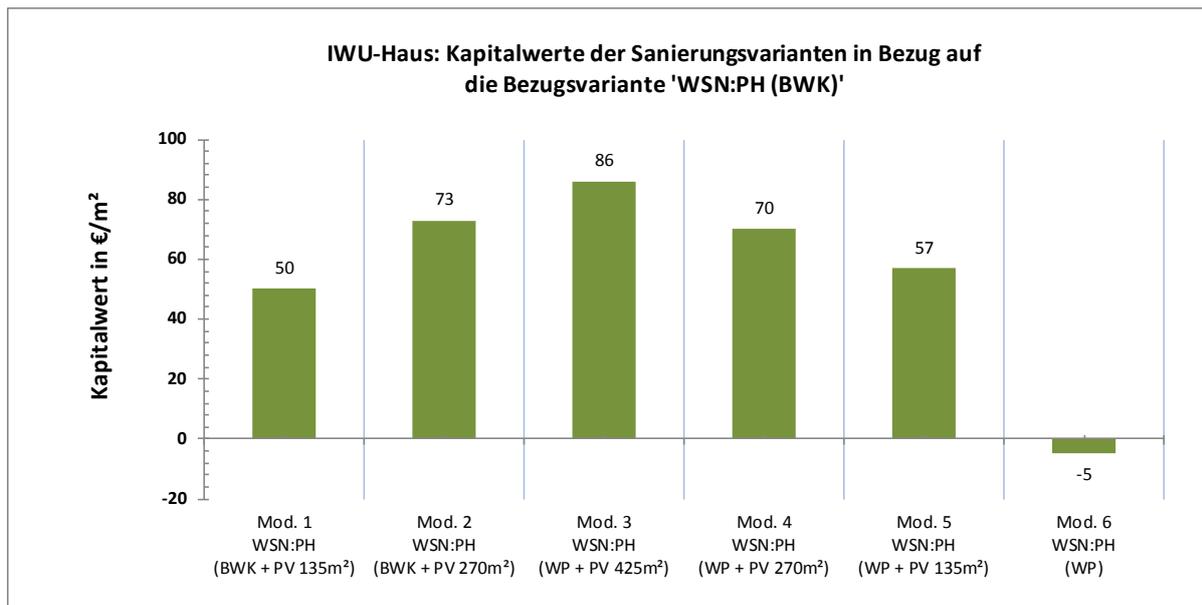


Abbildung 97: Gegenüberstellung der Kapitalwerte der betrachteten Modernisierungsvarianten (Energiepreissteigerung von 4 %, Kalkulationszinssatz von 1 %, CO<sub>2</sub>-Abgabe von 50 €/t)

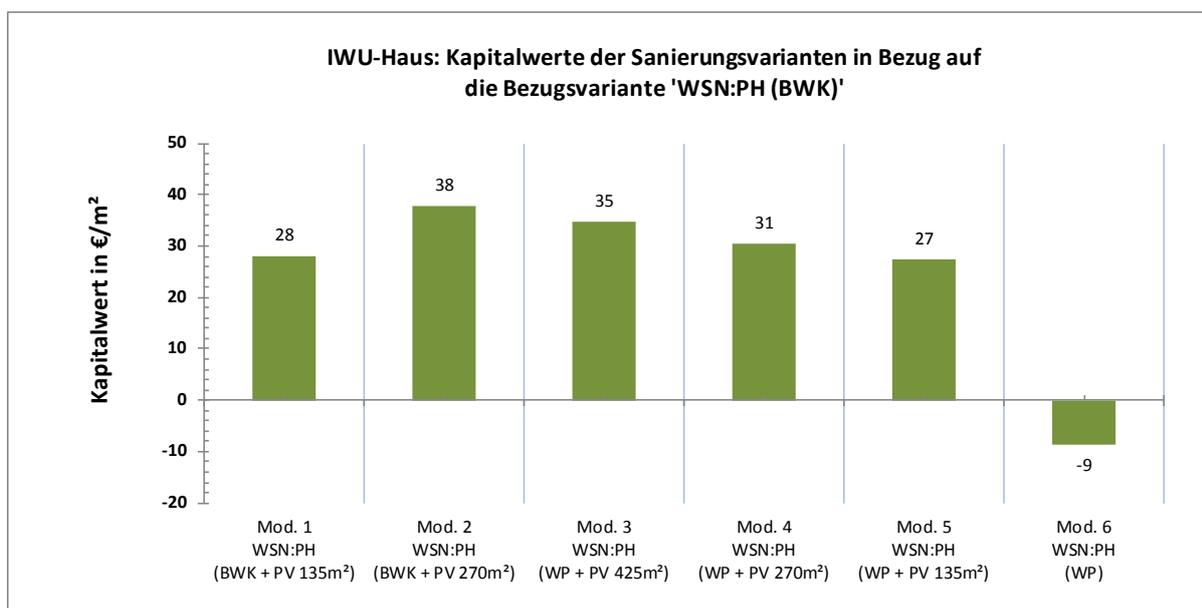


Abbildung 98: Gegenüberstellung der Kapitalwerte der betrachteten Modernisierungsvarianten (Energiepreissteigerung von 2 %, Kalkulationszinssatz von 3 %, CO<sub>2</sub>-Abgabe von 50 €/t)

## 8.6 Akteure, Chancen und Hemmnisse

Sollte die einmalige Chance bei der ohnehin bevorstehenden Modernisierung der Anlagentechnik des IWU-Hauses aufgegriffen werden, um die in diesem Kapitel vorgeschlagenen

Modernisierungsinitiativen zur Realisierung eines Nullemissions- oder ggf. Plusenergiegebäudes umzusetzen, müssen hierbei verschiedene Interessen der beteiligten Akteure berücksichtigt und die eventuelle Hemmnisse beseitigt werden. Folgende Akteure können hierbei eine wesentliche Rolle spielen:

- Eigentümer des Gebäudekomplexes (bauverein AG Darmstadt)
- Betreiber des Rechenzentrums
- Carsharing-Unternehmen (book-n-drive Darmstadt)
- Betreiber der Solaranlage
- Mieter des Gebäudes (z. B. Institut Wohnen und Umwelt)

Als größtes Hemmnis könnte die Zustimmung des Betreibers des Rechenzentrums zur Bereitstellung oder zumindest die Art der Bereitstellung der Abwärme aus dem Rechenzentrum gesehen werden. Da die Rechenzentren über das ganze Jahr und rund um die Uhr betrieben werden, müssen von vorneherein die vorzuschlagenden technischen Lösungen zur Bereitstellung der Abwärme einen störungsfreien Betrieb der Server garantieren. Infolgedessen sollten im Vorfeld ausreichende Informationen zur Struktur und bereits installierten Anlagentechnik bereitstehen. Hierzu ist die Zustimmung des Betreibers und insbesondere seine Zusammenarbeit die Voraussetzung.

Als weiteres relevantes Hemmnis zur Abwärmenutzung kann die Versorgungssicherheit genannt werden. Aufgrund der Sicherstellung der Wärmeversorgung eines Gebäudes sollte vorausschauend berücksichtigt werden, ob künftig die Bereitstellung der Abwärme bzw. ihre erforderliche Menge gewährleistet ist (worst case: Standortwechsel des Rechenzentrums). Das künftige Wärmeversorgungssystem des Gebäudes sollte daher auch ohne Abwärmenutzung auskommen. Im Falle des IWU-Hauses könnte beispielsweise das Heizsystem des Gebäudekomplexes als Backup-System in der Planung berücksichtigt werden, da diesbezüglich bereits eine Infrastruktur (derzeitige Situation) vorhanden ist.

Bei der Initiative stehen jedoch dem Betreiber des Rechenzentrums ggf. folgende Win-Win-Strategien zur Verfügung:

- Selektive Abdeckung des Strombedarfs des Rechenzentrums über den Solarstrom
- Selektive Abdeckung des Kühlkältebedarfs des Rechenzentrums mittels reversibler Wärmepumpe
- Reduktion der THG-Emissionen des Rechenzentrums sowie
- Gewinn an Image und Reputation durch Klimaschutz.

Für den Eigentümer ist das im Jahr 2011 sanierte IWU-Haus bereits ein Vorzeigeobjekt für ein gelungenes Sanierungskonzept eines Bürogebäudes aus den 60er-Jahren. Eine innovative Modernisierung der Wärmeversorgung des Gebäudes zur Realisierung eines emissionsfreien Bürogebäudes kann zudem für das Unternehmen u. a. aus den Umweltschutz-, Prestige- und vor allem Wirtschaftlichkeitsgründen (siehe Abschnitt 8.5) sehr lukrativ sein. Dass der Aus-

tausch der veralteten Wärmeversorger des Gebäudes ohnehin bevorsteht, ist ein weiterer Motivationsgrund.

Als einziges Hemmnis könnten hierzu die erhöhten anfänglichen Investitionskosten genannt werden. Dem stehen jedoch die Vorteile, wie die gegenwärtigen niedrigen Zinssätze, diverse Förderprogramme zur Finanzierung der Leuchtturmprojekte etc., gegenüber.

Die bisherigen Modernisierungsvorschläge bezogen sich lediglich auf die Modernisierung des IWU-Hauses (das mittlere Gebäude). Sollte darüber hinaus die Sanierung des linken Nachbargebäudes aufgrund des schlechten Wärmeschutzes mitberücksichtigt werden, müsste zudem untersucht werden, wie die bereits vorgeschlagene Wärmeversorgung diesbezüglich erweitert werden kann.

Sollte das IWU-Haus des Weiteren als ein Plusenergiegebäude modernisiert werden, sollten die überschüssigen regenerativ erzeugten Energien eher dezentral in der Gebäudeumgebung eingesetzt werden. In diesem Zusammenhang wurde die Elektromobilität als eine Möglichkeit in Abschnitt 8.3 vorgeschlagen. Hierzu kann die Carsharing-Firma in Darmstadt als ein möglicher Akteur genannt werden. Sie besitzt bereits seit 2016 eine Elektro-Fahrzeugflotte. Ihren Angaben zufolge wird ihr Bestand von Elektromobilität jährlich ausgebaut<sup>36</sup>. Der Ausbau der Ladestationen für Elektroautos in Darmstadt kann daher für das Unternehmen von Bedeutung sein (evtl. Finanzierungsbeteiligung).

Des Weiteren sollte klargestellt werden, ob der Gebäudeeigentümer bereit ist, die Solaranlage selbst zu installieren und zu betreiben. Ansonsten müsste ein weiterer Akteur diese Rolle übernehmen. Als möglicher Kandidat kann ENTEGA Energie GmbH in Darmstadt oder eine lokale Energiegenossenschaft genannt werden.

Darüber hinaus kann das Institut Wohnen und Umwelt die beteiligten Akteure bei der Planung und Umsetzung des Vorhabens wissenschaftlich begleiten und die hierbei gewonnenen Erkenntnisse für weitere Projekte bzw. die interessierte Öffentlichkeit zur Verfügung stellen.

---

<sup>36</sup> <https://www.book-n-drive.de/go/book-und-drive-und-der-blaue-engel/>

## 9 Literaturverzeichnis

- [1] „DIN 4108 - Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz,“ Beuth Verlag GmbH, Februar 2013.
- [2] „DIN EN ISO 7730 - Ergonomie der thermischen Umgebung - Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit; Deutsche Fassung EN ISO 7730,“ Beuth Verlag GmbH, Mai 2006.
- [3] „DIN EN 15251 - Eingangsparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden - Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik; Deutsche Fassung EN 15251:2007,“ Beuth Verlag GmbH, Dezember 2012.
- [4] Deutscher Wetterdienst, „ Sommer 2012: Nach wechselhafter Witterung doch noch warm und trocken,“ 07.09.2012.
- [5] Deutscher Wetterdienst, „Pressemitteilung: Deutschlandwetter im Sommer 2015,“ 2015.
- [6] Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik, München: Oldenbourg Industrieverlag GmbH, 2011.
- [7] Deutsches Netzwerk Büro e. V., „[www.deutsches-netzwerk-buero.de](http://www.deutsches-netzwerk-buero.de),“ [Online]. [Zugriff am 10. Mai 2015].
- [8] G. Dr. Ostendorp und B. Dr. Heinzow, „Raumluftuntersuchungen in öffentlichen Gebäuden in Schleswig; Teil 5: Messungen in Alten- und Pflegeeinrichtungen,“ Ministerium für Soziales, Gesundheit, Familie und Gleichstellung des Landes Schleswig-Holstein, November 2013.
- [9] luftfeuchtigkeit-raumklima.de, „[www.luftfeuchtigkeit-raumklima.de](http://www.luftfeuchtigkeit-raumklima.de),“ [Online]. [Zugriff am 10. Mai 2015].
- [10] B. Bagherian und A. Dr. Enseling, „Wirtschaftlichkeitsuntersuchung zur Fortschreibung des EnEV-Erlasses bzgl. der energetischen Vorbildfunktion von neu zu errichtenden Bundesbauten,“ Darmstadt, 09.12.2015.
- [11] Ecofys Germany GmbH, Köln, „Begleituntersuchung zur europäischen Berichterstattung „Cost-Optimal-Level“ – Modellrechnungen,“ Bundesministerium für Verkehr, Bau und

Stadtentwicklung (BMVBS), Berlin, Dezember 2013.

## 10 Anhang

### 10.1 Fragebogen zur Nutzerzufriedenheit (inklusive grafischer Auswertungen)

Um die baulichen und technischen Ausstattungen des IWU-Hauses aus Sicht der Gebäudenutzer zu beurteilen sowie ihre Akzeptanz bezüglich der technischen Maßnahmen feststellen zu können, wurde eine Umfrage zur Nutzerzufriedenheit im Winter 2015 in der Zeit von 02. bis zum 15. Februar im IWU durchgeführt.

Zu diesem Zweck wurde einen Fragebogen aus einer Feldstudie zur Nutzerzufriedenheit in Bürogebäuden<sup>37</sup> herangezogen und an die Gegebenheiten des IWU-Hauses angepasst. Der modifizierte Fragebogen mit den zugehörigen Antworten der Gebäudenutzer in Form von unkommentierten Diagrammen ist nachfolgend abgebildet.

---

<sup>37</sup> Gossauer, Elke: Nutzerzufriedenheit in Bürogebäuden - Eine Feldstudie; Dissertation; Freiburg; 24.01.2008

## Umfrage zur Zufriedenheit mit dem IWU-Haus im Winter

Liebe Kollegin, lieber Kollege,

wir arbeiten in einem Gebäude, bei dem im Vergleich zu herkömmlichen Gebäuden auf energiesparende Maßnahmen geachtet wurde. Das Gebäudekonzept beabsichtigt außerdem, uns einen hohen Komfort zu bieten.

Im Rahmen des internen Forschungsvorhabens „Monitoring & Betriebsoptimierung“ wird das IWU-Haus messtechnisch begleitet. Ziel ist es zu erfahren, ob die geplanten Funktionen erfüllt werden. Zudem sollen die identifizierten Fehlfunktionen beseitigt und der Betrieb des Gebäudes energetisch optimiert werden. Des Weiteren soll festgestellt werden, inwieweit das Gebäude in seiner Gesamtheit von uns Nutzern angenommen wird.

Diese Umfrage soll daher **Deine Meinung** zum Gebäude und dessen technischer Ausstattung erfassen. Da sich die Büros hinsichtlich ihrer raumklimatischen Bedingungen (Temperatur, Luftfeuchte), Lichtverhältnisse usw. unterscheiden, wäre es gut zu wissen, wer den jeweiligen Fragebogen ausgefüllt hat. Dies ist außerdem notwendig, wenn es um die Beseitigung von eventuell störenden Aspekten oder Fehlfunktionen geht. Wer dennoch lieber anonym bleiben möchte, kann dies natürlich tun. In diesem Fall wäre es jedoch besonders wichtig, dass der persönliche Code (siehe unten) ausgefüllt wird, da eine weitere Befragung im Sommer erfolgen soll, um den unterschiedlichen Witterungsbedingungen Rechnung zu tragen. Beide Befragungen sollen dann sinnvollerweise zu einem Gesamtbild zusammengefügt werden.

Die Beantwortung des Bogens dauert ca. 15 Minuten. Deine Mitarbeit ist natürlich freiwillig. Für die Auswertung ist es jedoch äußerst wichtig, dass möglichst **alle** Kolleginnen und Kollegen den Fragebogen ausfüllen!

---

### [Ab hier bitte ausfüllen!]

Mein Namenskürzel: \_\_\_\_\_

Mein persönlicher Code (wenn anonym):

1. \_\_\_ erster Buchstabe des Geburtsortes
2. \_\_\_ zweiter Buchstabe des Vornamens der Mutter
3. \_\_\_ zweiter Buchstabe der Straße, in der ich wohne
4. \_\_\_ erster Buchstabe des Vornamens des Vaters

Allgemeine Fragen zu Deiner **Befindlichkeit** und zum **Gebäude**

1. Wohin ist Dein Büro orientiert?

nach Norden

nach Süden

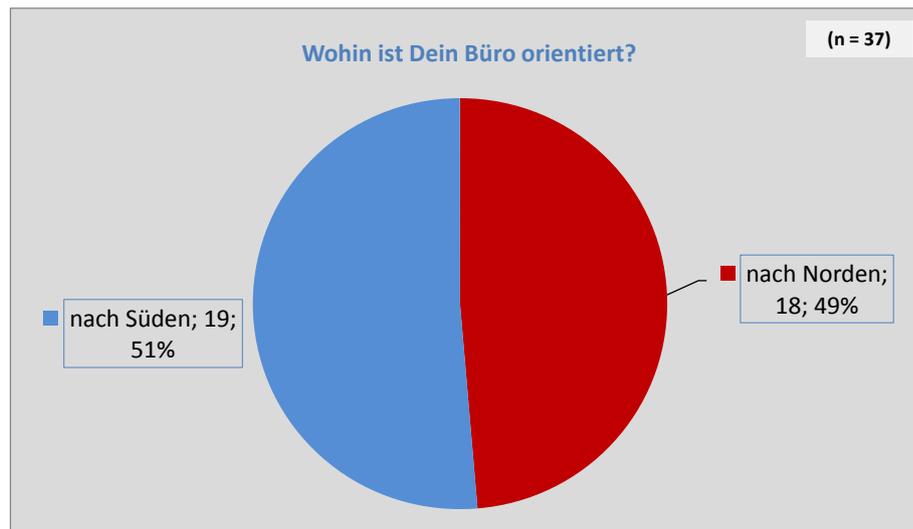


Abb.-Frage 1: Wohin ist Dein Büro orientiert?

2. In welchem Geschoss befindet sich Dein Büro?

EG

1. OG

2.OG

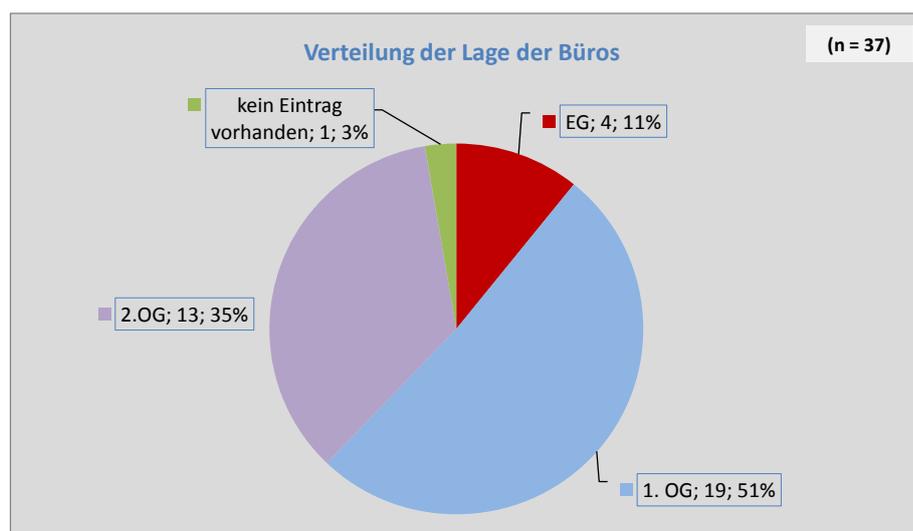


Abb.-Frage 2: In welchem Geschoss befindet sich Dein Büro?

3. Wie beeinflussten folgende Faktoren in den letzten zwei Wochen Deine Leistungsfähigkeit am Arbeitsplatz? (Bitte jeden Fall ankreuzen)

	sehr positiv	positiv	gar nicht	negativ	sehr negativ
Beleuchtung/ Lichtverhältnisse (Tageslicht/ Kunstlicht)	<input type="checkbox"/>				
Geräusche	<input type="checkbox"/>				
Raumtemperatur	<input type="checkbox"/>				
Gerüche	<input type="checkbox"/>				
Raumluftqualität	<input type="checkbox"/>				
Sonstiges (z.B. Mängel an):	<input type="checkbox"/>				

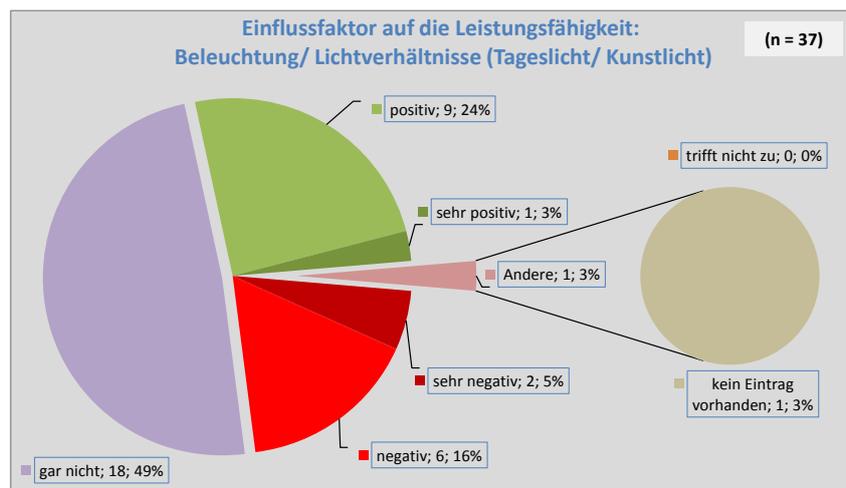


Abb.-Frage 3 a) Beleuchtung/ Lichtverhältnisse (Tageslicht/ Kunstlicht)

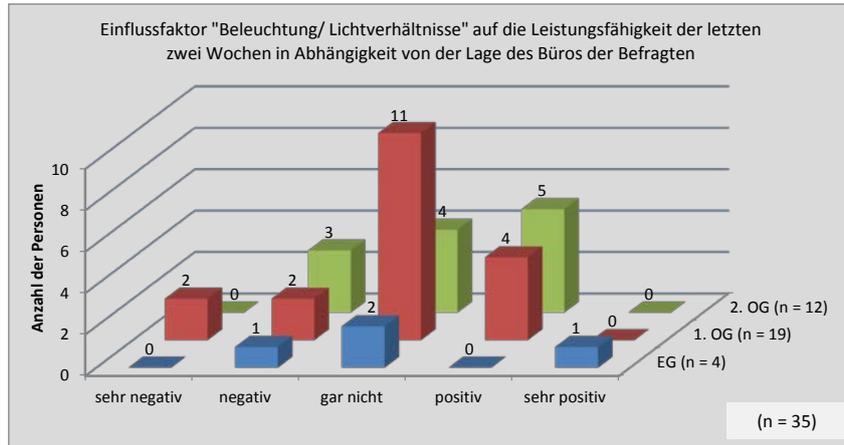


Abb.-Frage 3 a) Auswertung - Beleuchtung/ Lichtverhältnisse (Tageslicht/Kunstlicht) in Abhängigkeit von der Lage der Büros

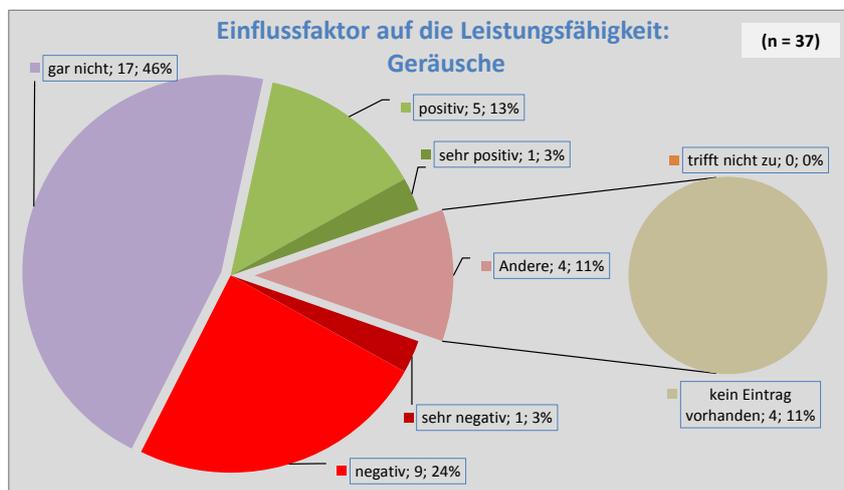


Abb.-Frage 3 b) Geräusche

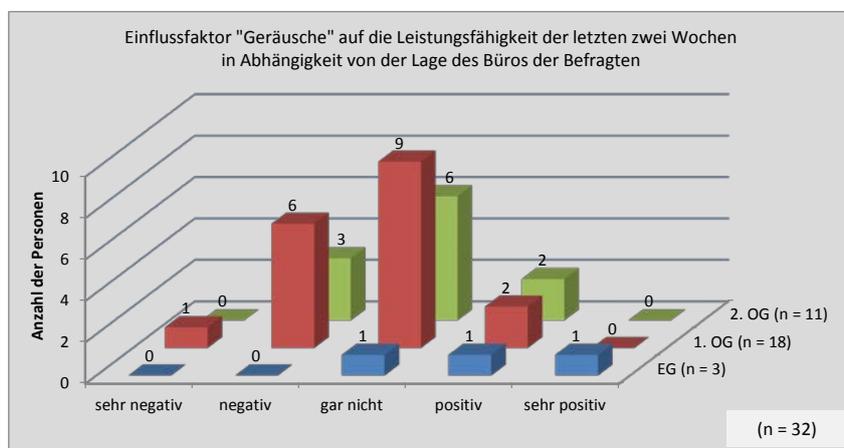


Abb.-Frage 3 b) Geräusche in Abhängigkeit von der Lage der Büros

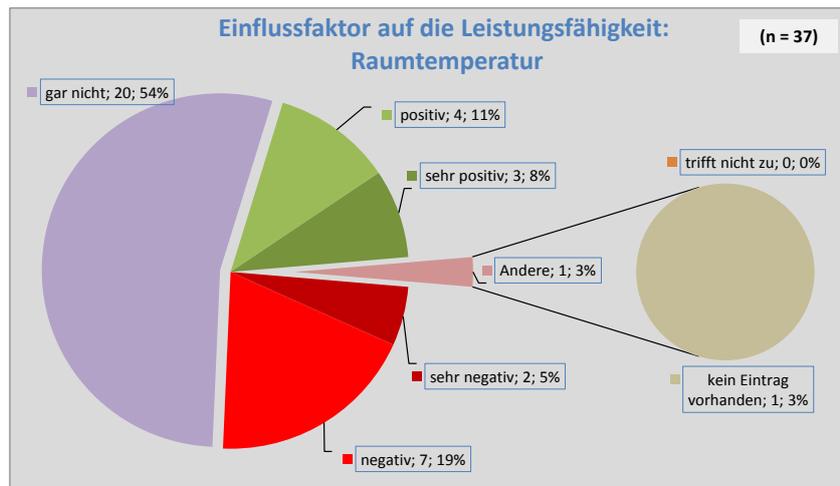


Abb.-Frage 3 c) Raumtemperatur

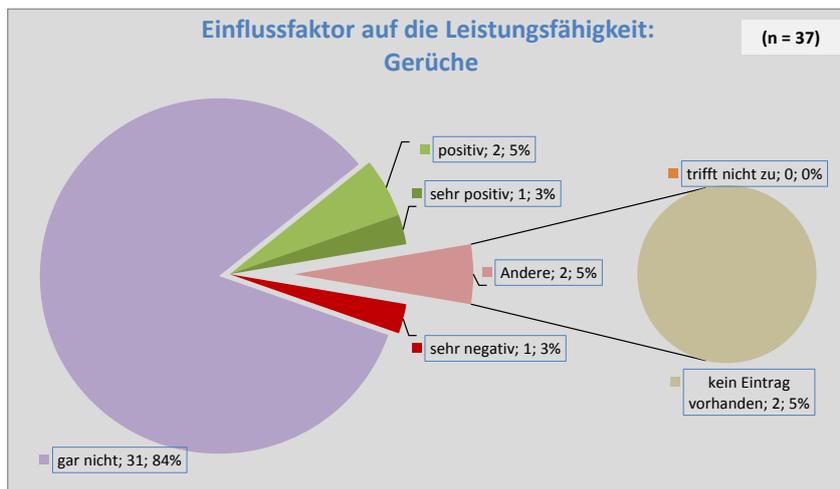


Abb.-Frage 3 d) Gerüche

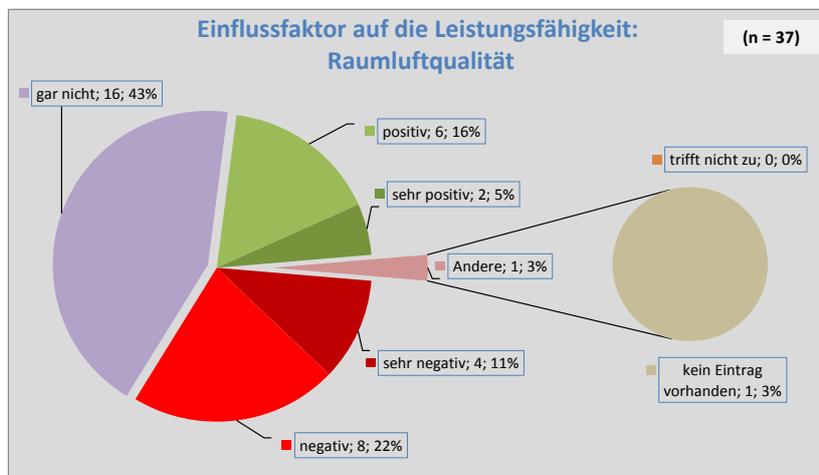


Abb.-Frage 3 e) Raumluftqualität

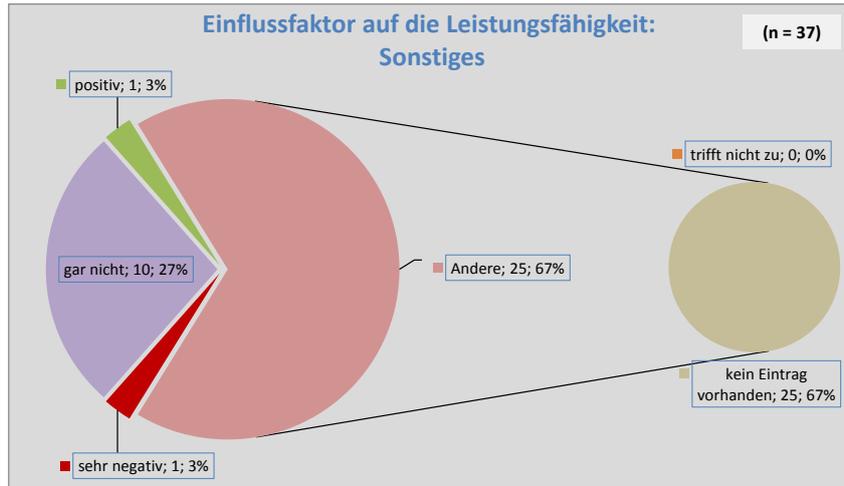


Abb.-Frage 3 f) Sonstiges

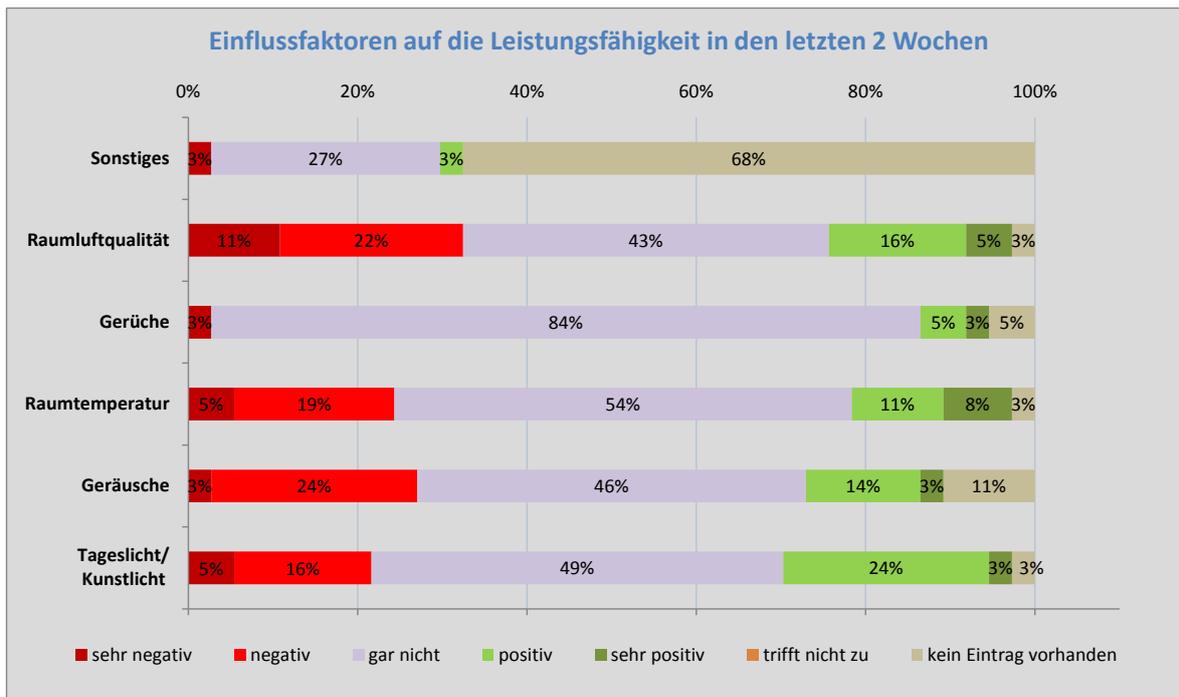


Abb.-Frage 3: Wie beeinflussten folgende Faktoren in den letzten zwei Wochen Deine Leistungsfähigkeit am Arbeitsplatz?

Beantworte nun bitte einige Fragen zu den **Lichtverhältnissen** an Deinem Arbeitsplatz.

4. Wie beurteilst Du die **Größe der gesamten Fensterfläche** im Raum?

zu klein            genau richtig            zu groß

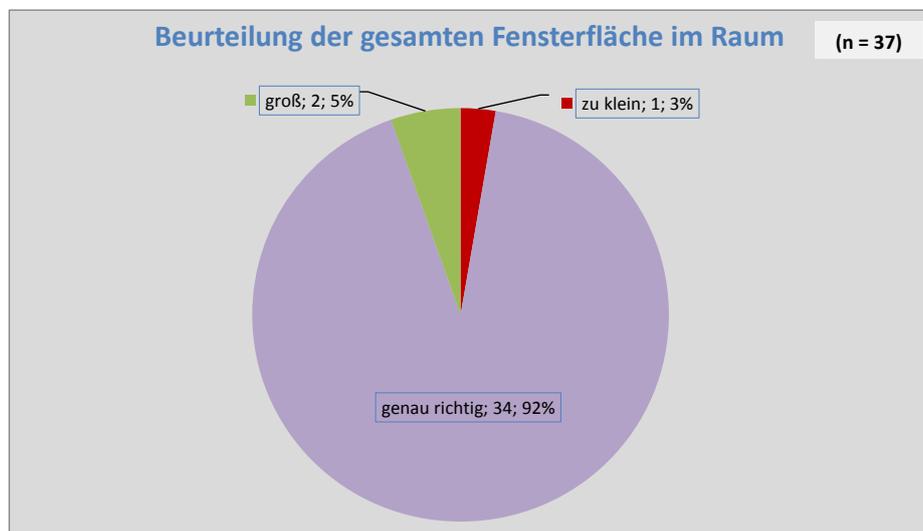


Abb.-Frage 4: Wie beurteilst Du die Größe der gesamten Fensterfläche im Raum?

5. Wie ist Dein **Bildschirm** im Raum ausgerichtet?

- Der Bildschirm steht **parallel** zur Außenwand. **Ich blicke Richtung Außenwand.**
- Der Bildschirm steht **parallel** zur Außenwand. Die **Außenwand ist hinter mir.**
- Der Bildschirm steht in einem Winkel von etwa \_\_\_° zur Außenwand.

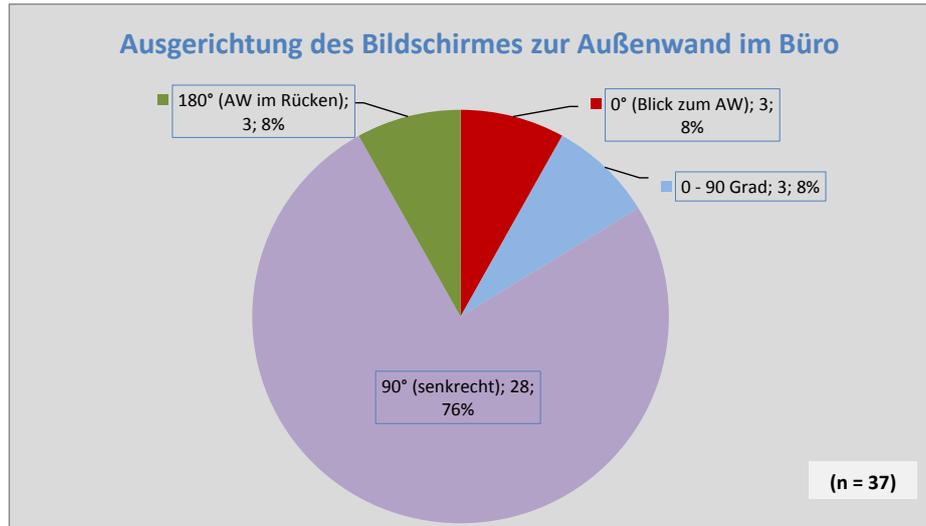


Abb.-Frage 5: Wie ist Dein Bildschirm im Raum ausgerichtet?

6. Empfindest Du an sonnigen Wintertagen eine Blendung durch Tageslicht auf den folgenden Flächen? *(bitte jeden Fall ankreuzen)*

	nie		manchmal		immer
auf der Tischfläche...	<input type="checkbox"/>				
auf dem Bildschirm...	<input type="checkbox"/>				
auf den Wänden...	<input type="checkbox"/>				
auf dem Fußboden...	<input type="checkbox"/>				
durch das Fenster direkt auf Dein Gesicht	<input type="checkbox"/>				

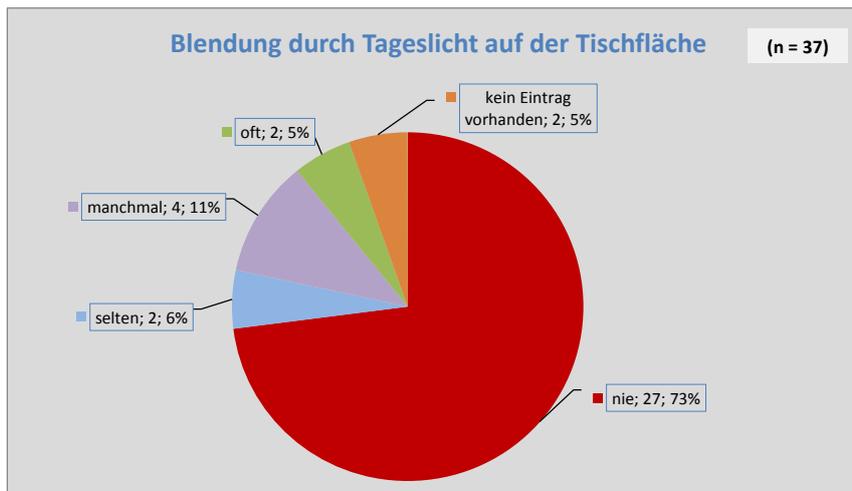


Abb.-Frage 6 a) auf der Tischfläche...

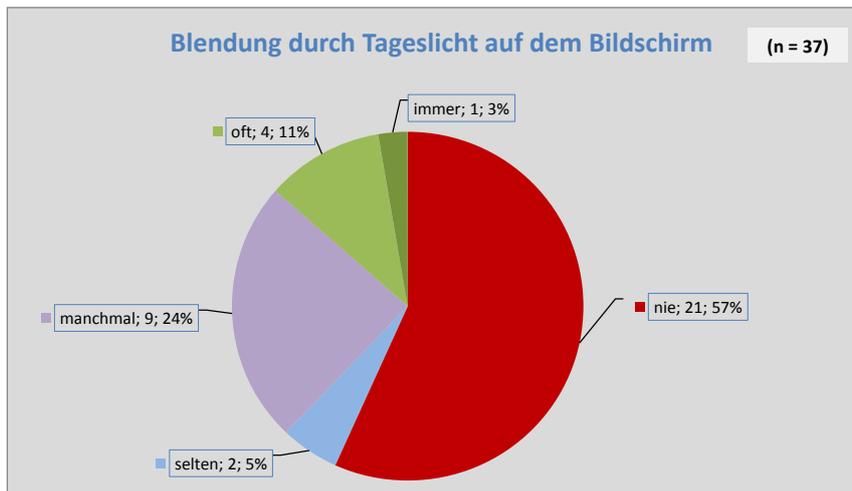


Abb.-Frage 6 b) auf dem Bildschirm...

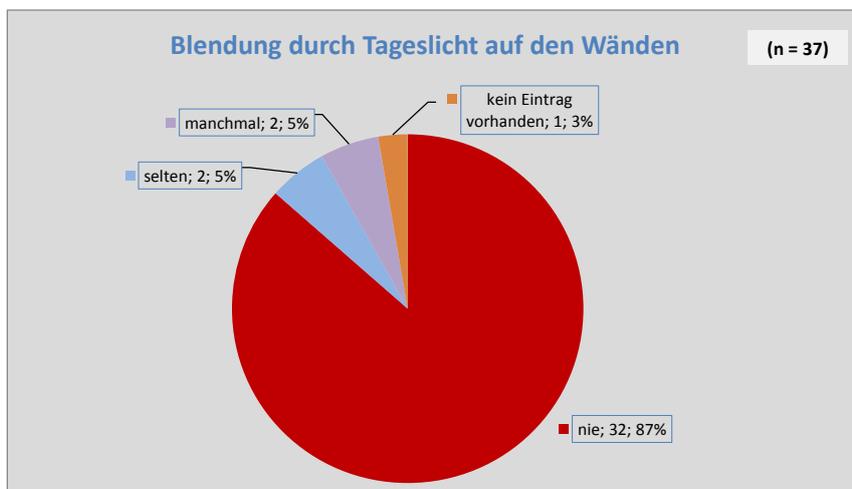


Abb.-Frage 6 c) auf den Wänden...

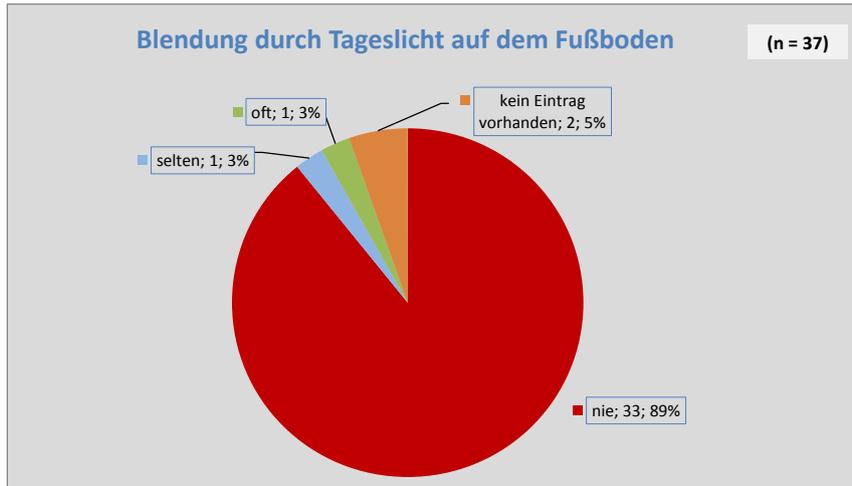


Abb.-Frage 6 d) auf dem Fußboden...

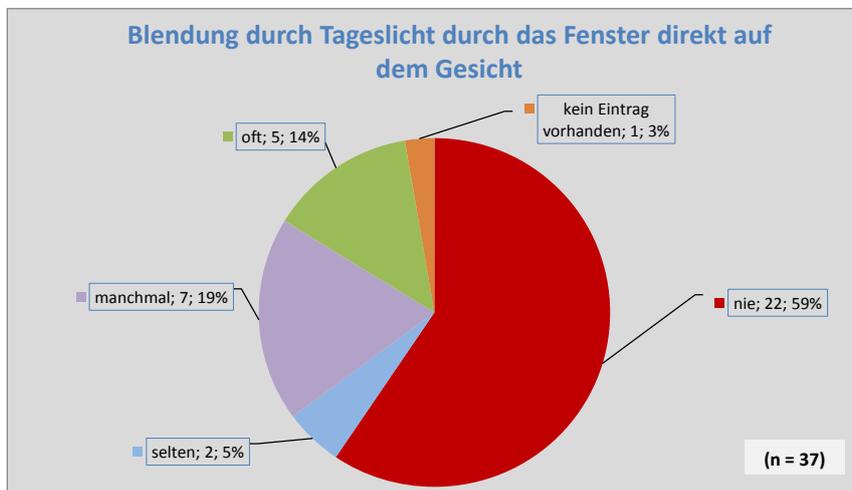


Abb.-Frage 6 e) durch das Fenster direkt auf Dein Gesicht

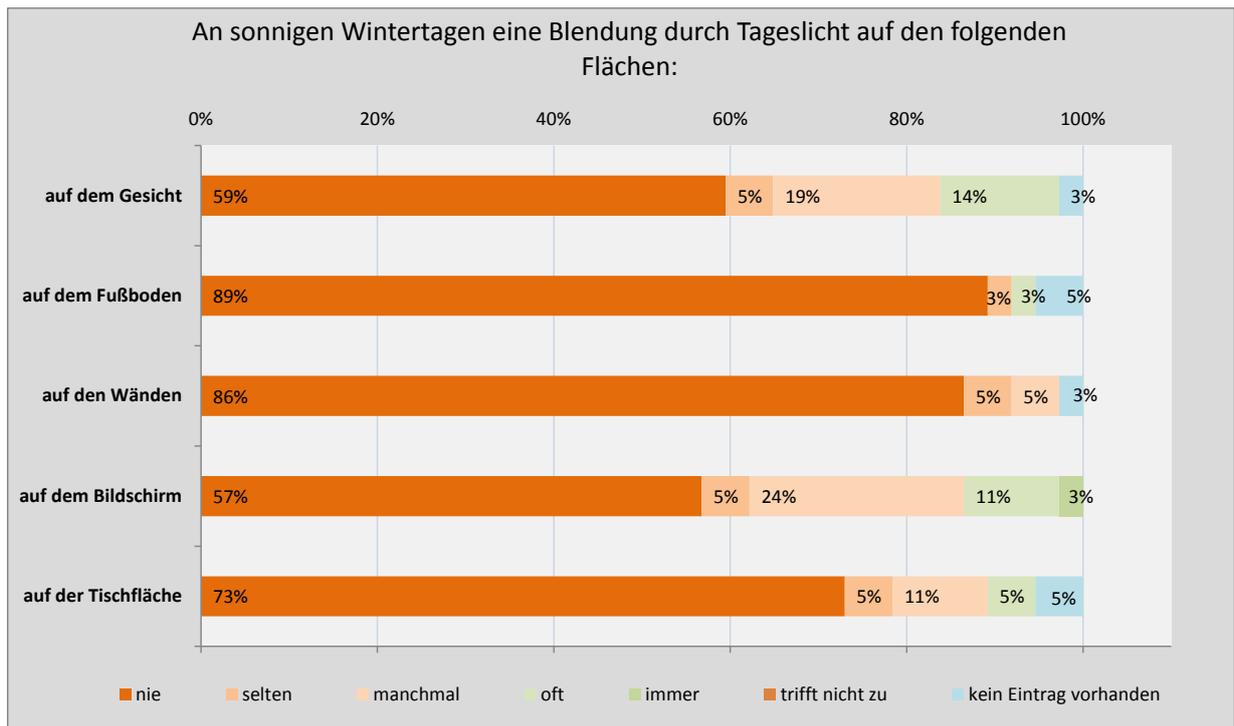


Abb.-Frage 6: Empfindest Du an sonnigen Wintertagen eine Blendung durch Tageslicht auf den folgenden Flächen?

7. **Wenn Du an sonnigen Wintertagen eine Blendung empfindest: Benutzt du dann die Jalousie oder den Blendschutz?**

a) Die Jalousie (nur Südseite)

- nein
- ja, teilweise
- ja, vollständig

b) Den Blendschutz

- nein
- ja, teilweise
- ja, vollständig

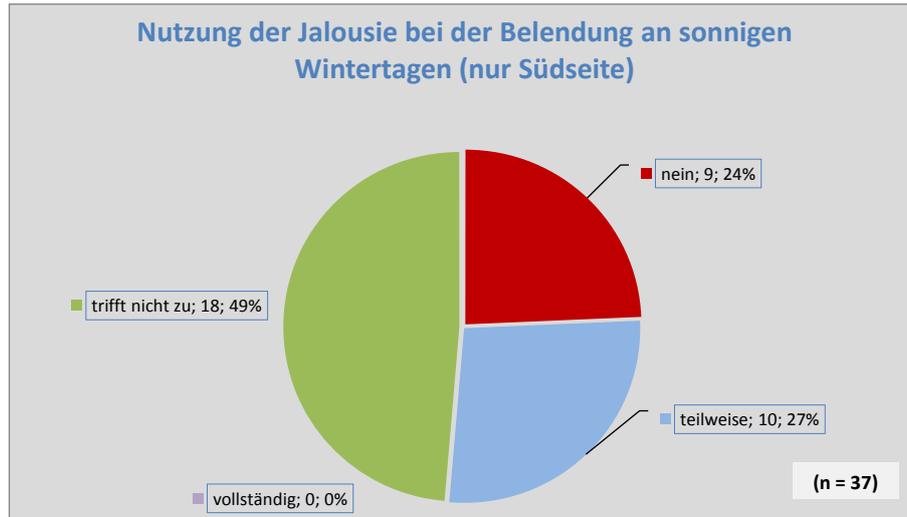


Abb.-Frage 7 a) Jalousie (nur Südseite)

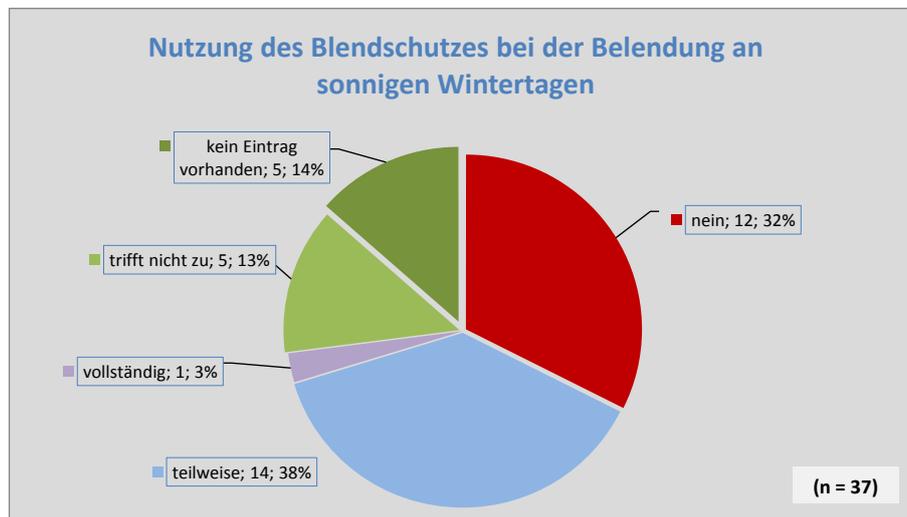


Abb.-Frage 7 b) Blendschutz

Abb.-Frage 7: Wenn Du an sonnigen Wintertagen eine Blendung empfindest: Benutzt du dann die Jalousie oder den Blendschutz?

8. Nutzt Du den **Blendschutz** auch als **Sichtschutz**?

nein

ja

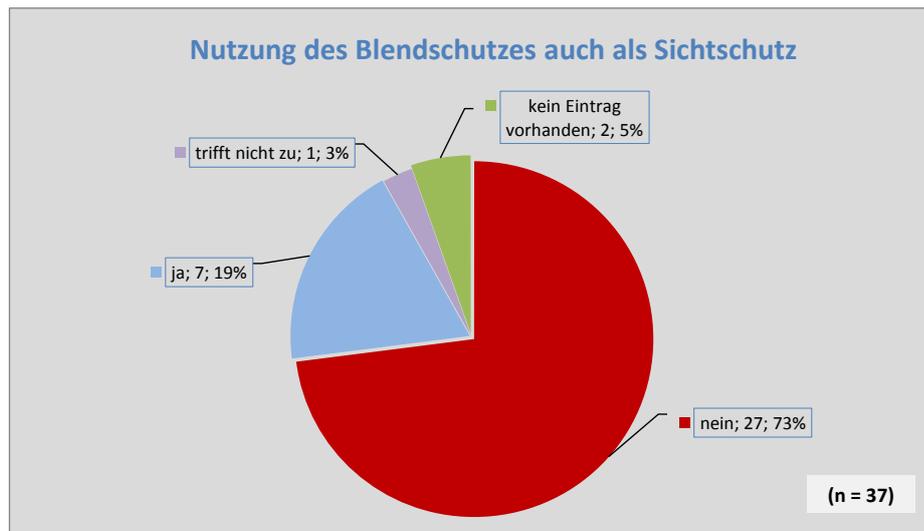


Abb.-Frage 8: Nutzt Du den Blendschutz auch als Sichtschutz?

9. Wie zufrieden bist Du mit der Wirksamkeit der Verschattungsvorrichtungen gegen Blendung?

	Sehr zufrieden	mittelmäßig	Sehr unzufrieden
mit Jalousie (nur Südseite)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
mit Blendschutz	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Wenn Du nicht zufrieden bist, was stört Dich?

---



---

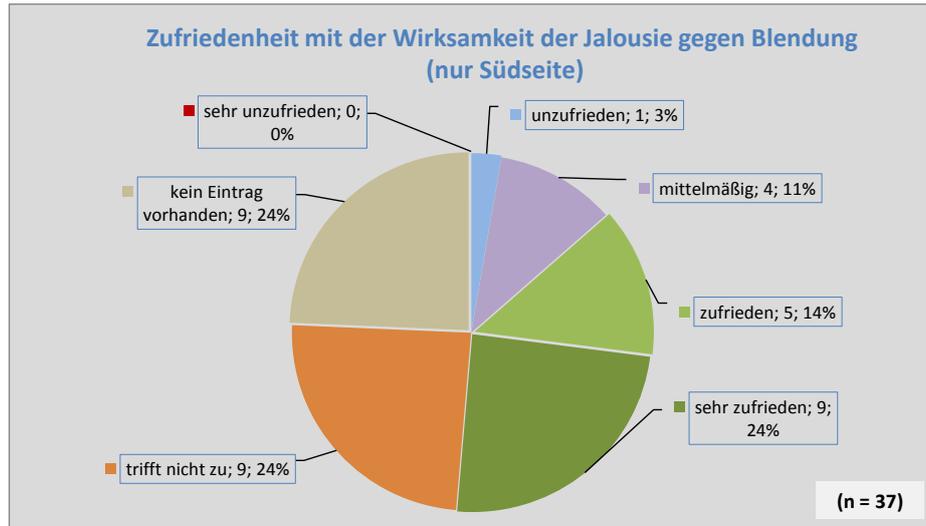


Abb.-Frage 9 a) mit Jalousie (nur Südseite)

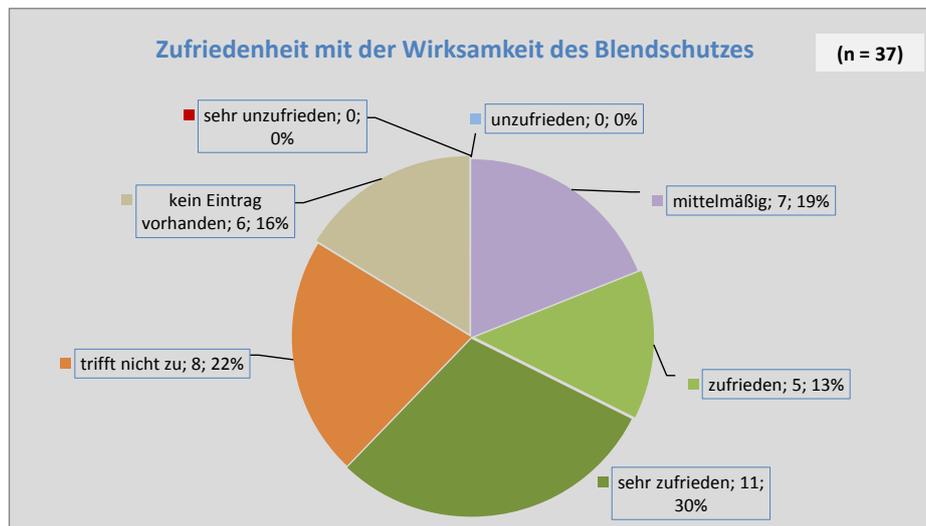


Abb.-Frage 9 b) mit Blendschutz

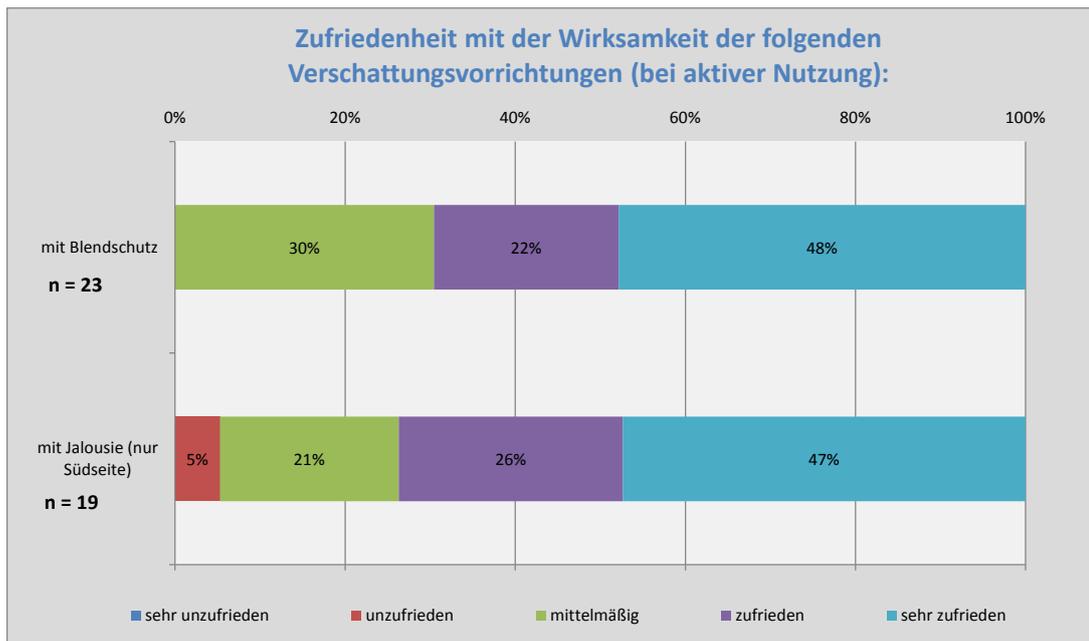


Abb.-Frage 9: Wie zufrieden bist Du mit der Wirksamkeit der Verschattungsvorrichtungen gegen Blendung?

10. **Wie zufrieden** bist Du mit der **Bedienbarkeit** der Verschattungsvorrichtungen?

	Sehr unzufrieden	zufrieden	mittelmäßig	zufrieden	Sehr unzufrieden
mit Jalousie (nur Südseite)	<input type="checkbox"/>				
mit Blendschutz	<input type="checkbox"/>				

Wenn Du nicht zufrieden bist, was stört Dich?

---



---

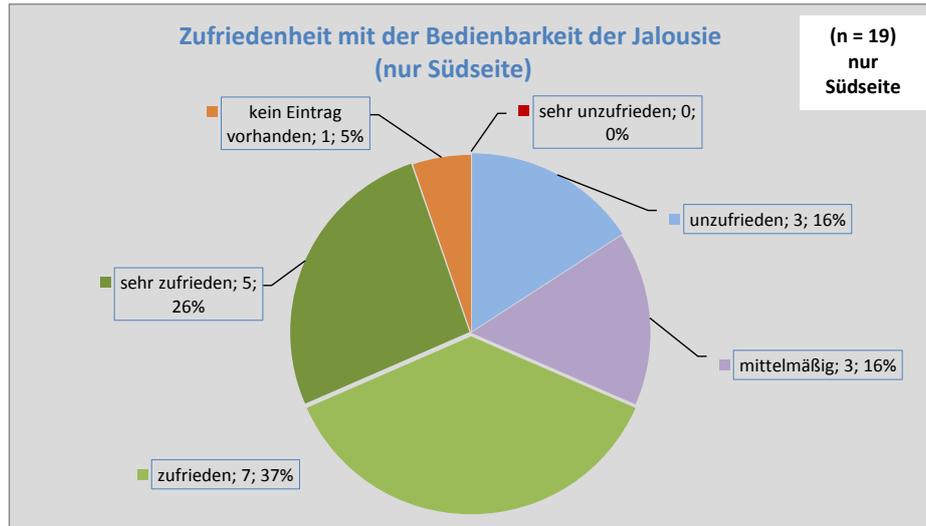


Abb.-Frage 10 a) mit Jalousie (nur Südseite)

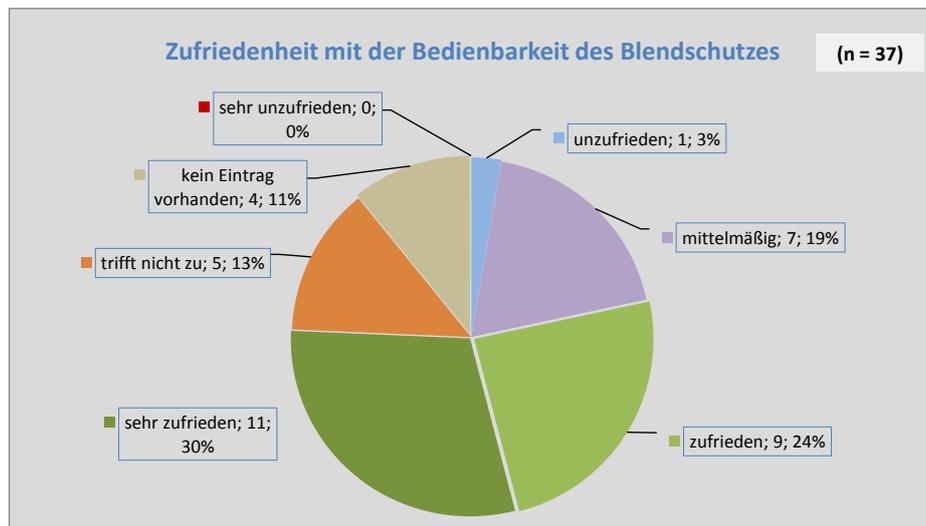


Abb.-Frage 10 b) mit Blendschutz

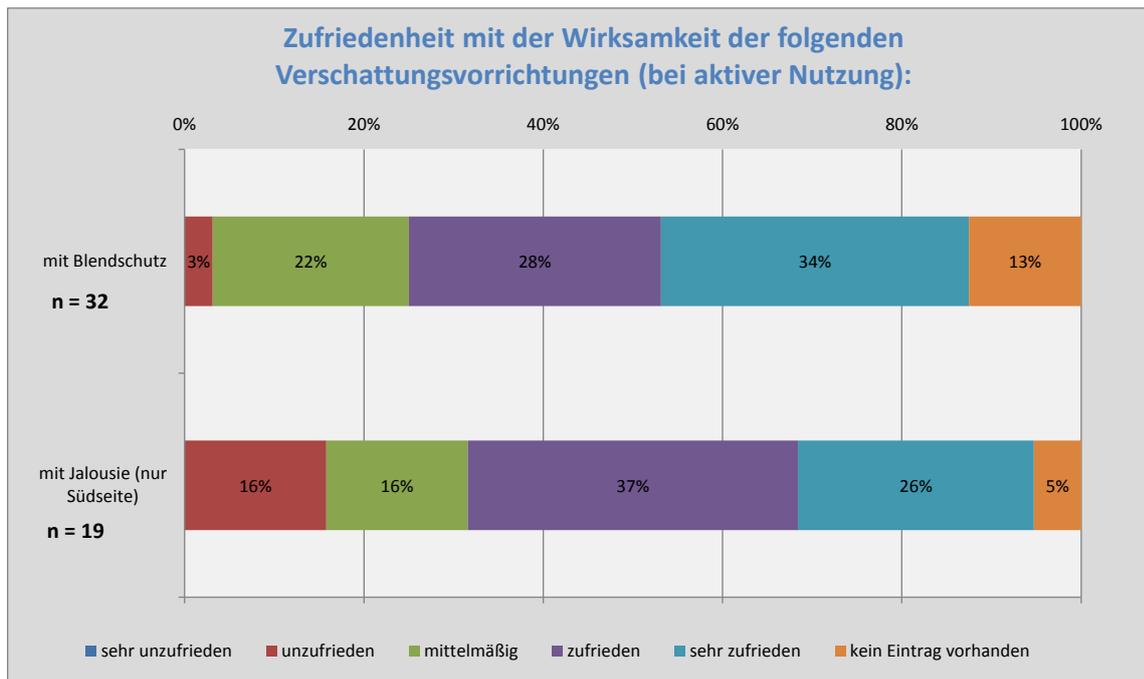


Abb.-Frage 10: Wie zufrieden bist Du mit der Bedienbarkeit der Verschattungsvorrichtungen?

**11. Nur Südseite: Wie zufrieden bist Du mit der automatischen Regelung der Jalousie?**

mittelmäßig

Sehr zu-  
frieden






Sehr unzu-  
frieden

Wenn Du nicht zufrieden bist, was stört Dich?

---



---

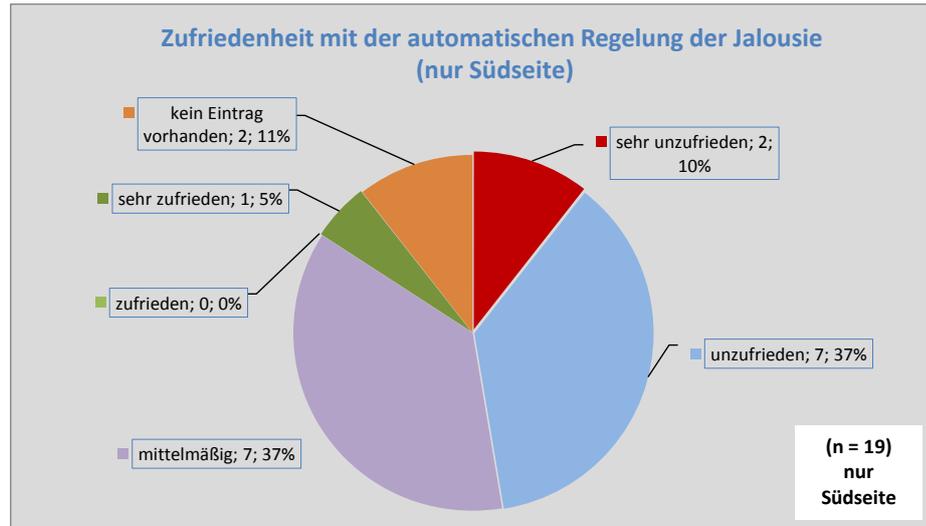


Abb.-Frage 11: Nur Südseite: Wie zufrieden bist Du mit der automatischen Regelung der Jalousie?

12. Schaltest Du das Licht ein, wenn die Fenster verschattet sind?

manchmal

nie                        immer

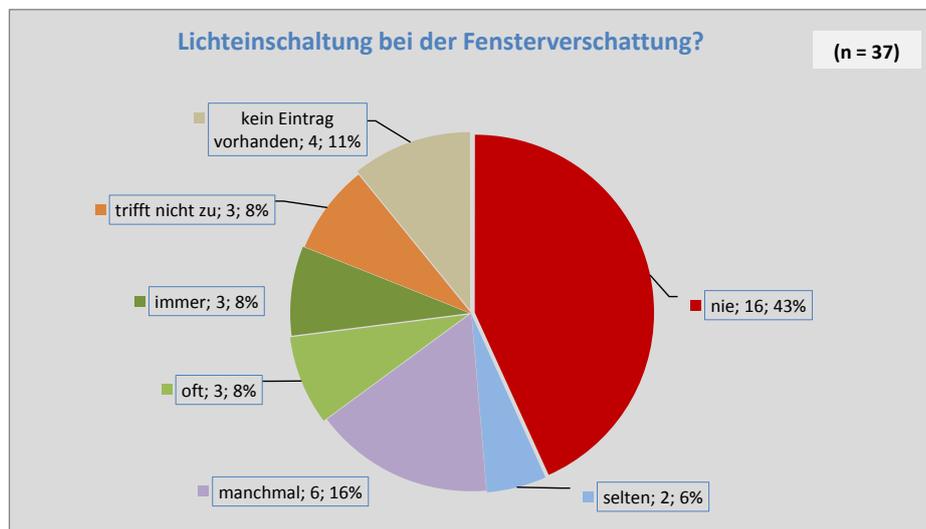


Abb.-Frage 12: Schaltest Du das Licht ein, wenn die Fenster verschattet sind?

13. Wie wichtig sind Dir im Winter...?

	gar nicht		mittelmäßig		sehr wichtig
Blendschutz bzw. Jalousie	<input type="checkbox"/>				
der Ausblick nach draußen	<input type="checkbox"/>				
das Wahrnehmen von Wetter/ Tageszeit	<input type="checkbox"/>				

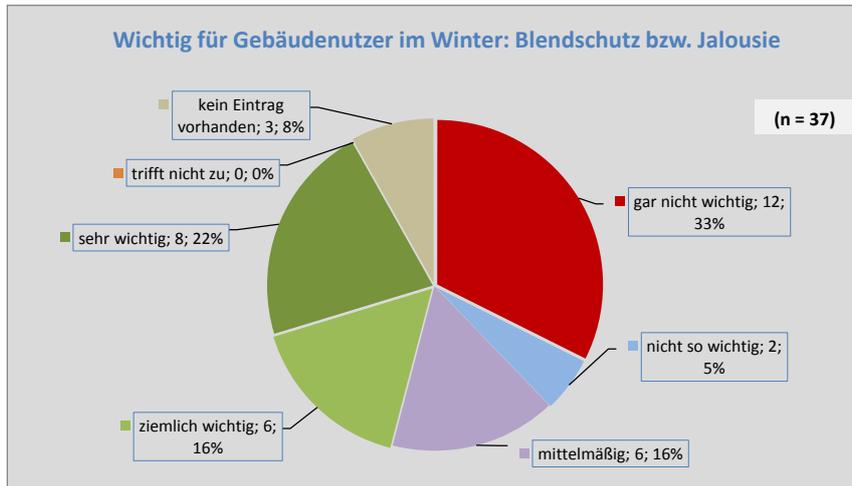


Abb.-Frage 13 a) Blendschutz bzw. Jalousie

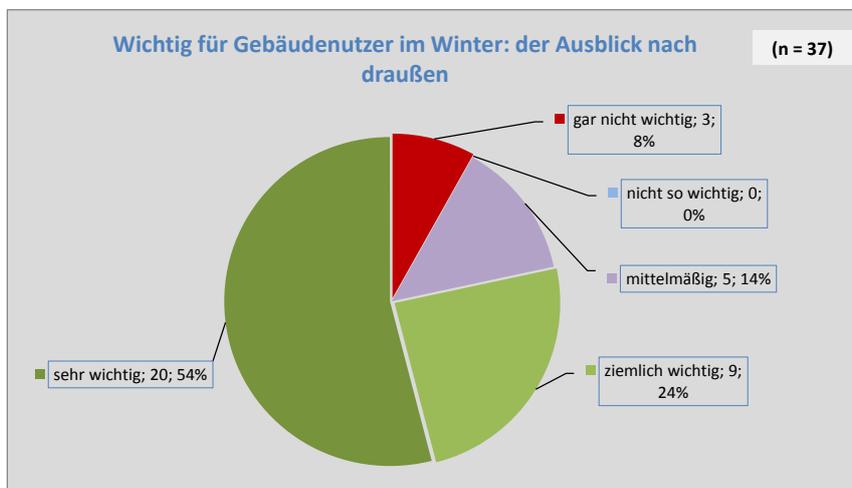


Abb.-Frage 13 b) der Ausblick nach draußen

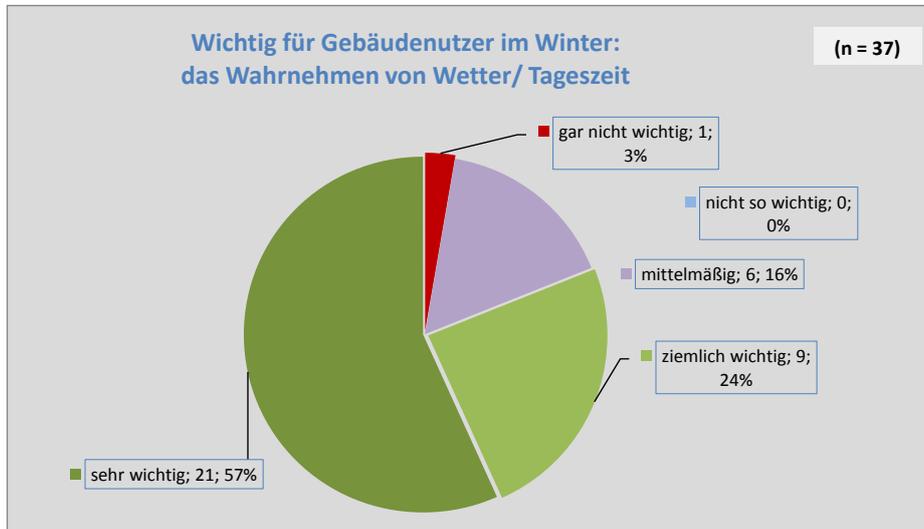


Abb.-Frage 13 c) das Wahrnehmen von Wetter/ Tageszeit

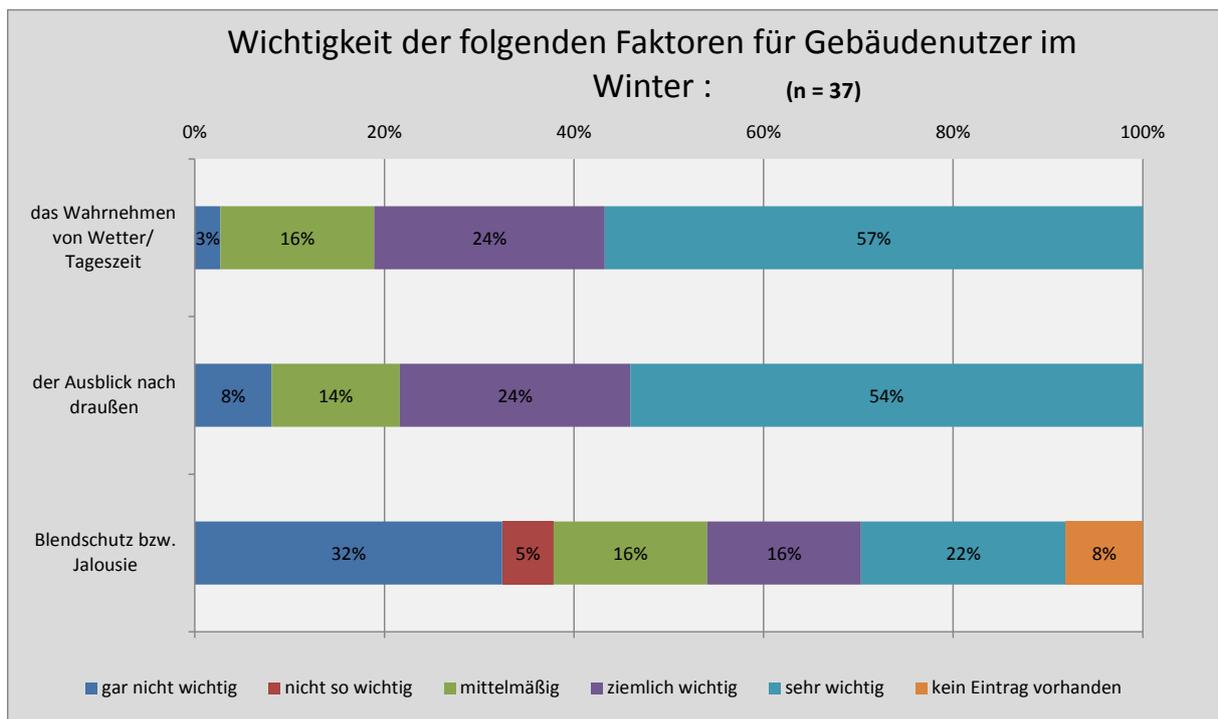


Abb.-Frage 13: Wie wichtig sind Dir im Winter...?

14. Insgesamt betrachtet: Wie bewertest Du an sonnigen Wintertagen die **Beleuchtungssituation** beim **Tageslicht**...? *(bitte jeden Fall ankreuzen)*

a) Ohne Benutzung von **Blendschutz** oder **Jalousie**

	zu dunkel		genau richtig		zu hell
an Deinem Arbeitsplatz...	<input type="checkbox"/>				
im gesamten Raum...	<input type="checkbox"/>				
am Computer...	<input type="checkbox"/>				

b) Mit Benutzung von **Blendschutz** oder **Jalousie**

	zu dunkel		genau richtig		zu hell
an Deinem Arbeitsplatz...	<input type="checkbox"/>				
im gesamten Raum...	<input type="checkbox"/>				
am Computer...	<input type="checkbox"/>				

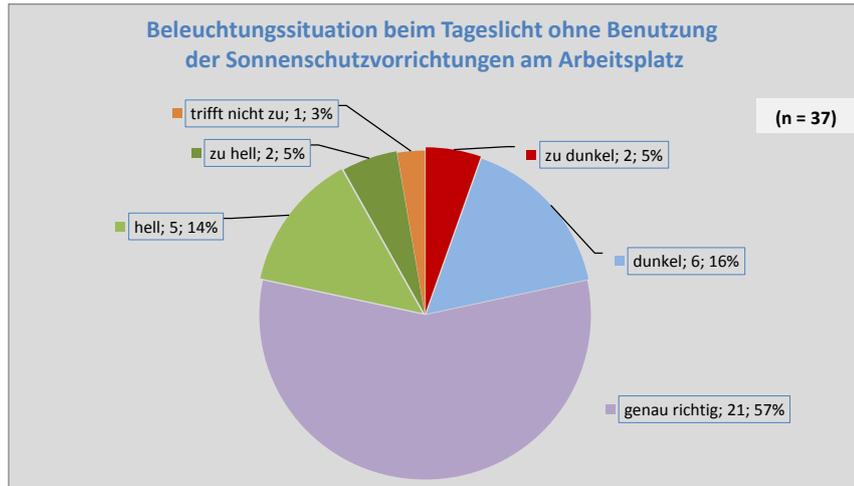


Abb.-Frage 14 a1) an Deinem Arbeitsplatz

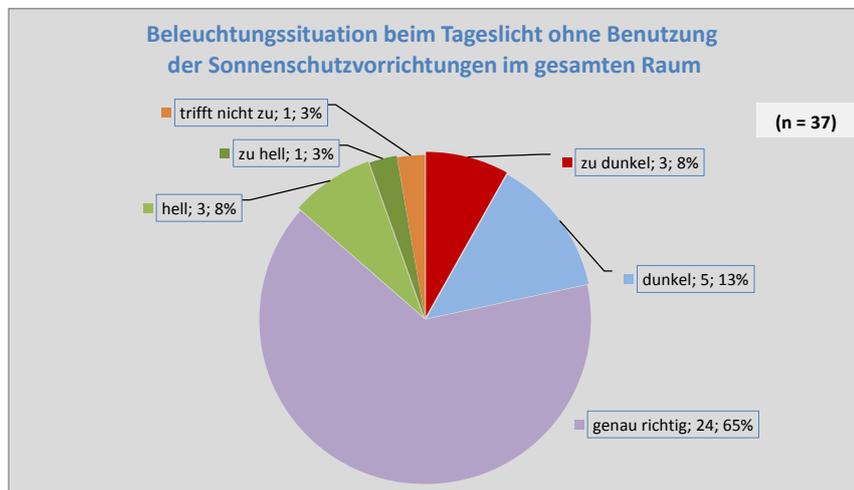


Abb.-Frage 14 a2) im gesamten Raum

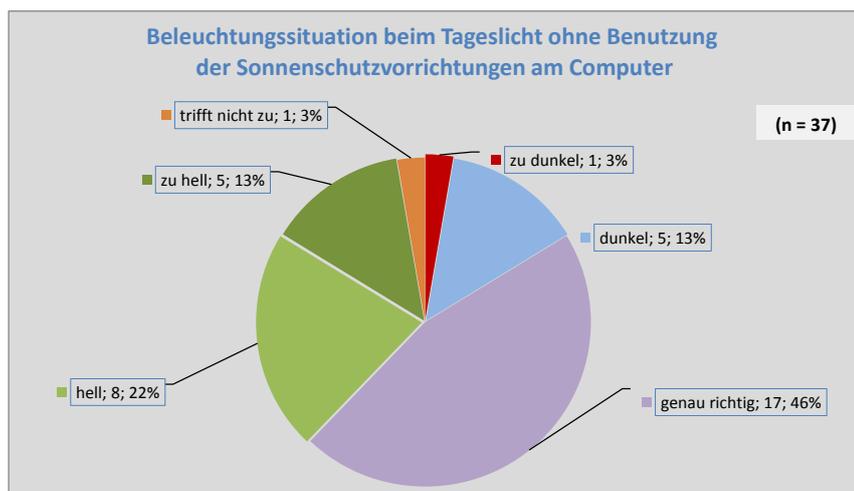


Abb.-Frage 14 a3) am Computer

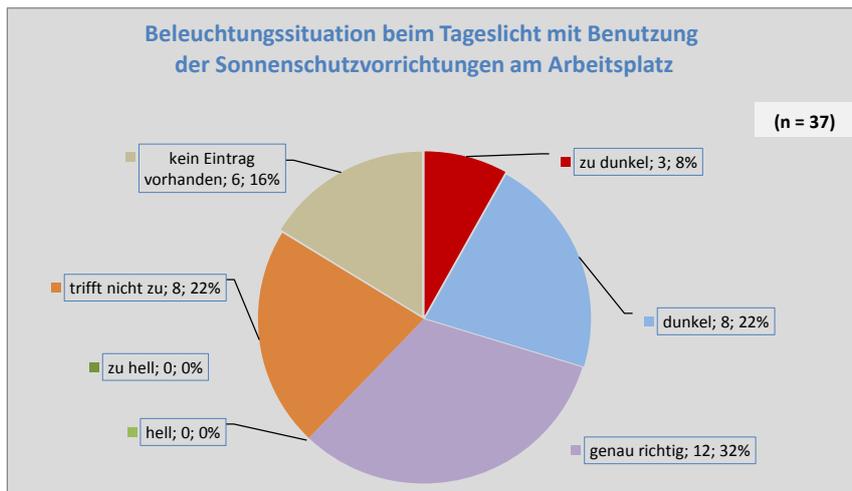


Abb.-Frage 14 b1) an Deinem Arbeitsplatz

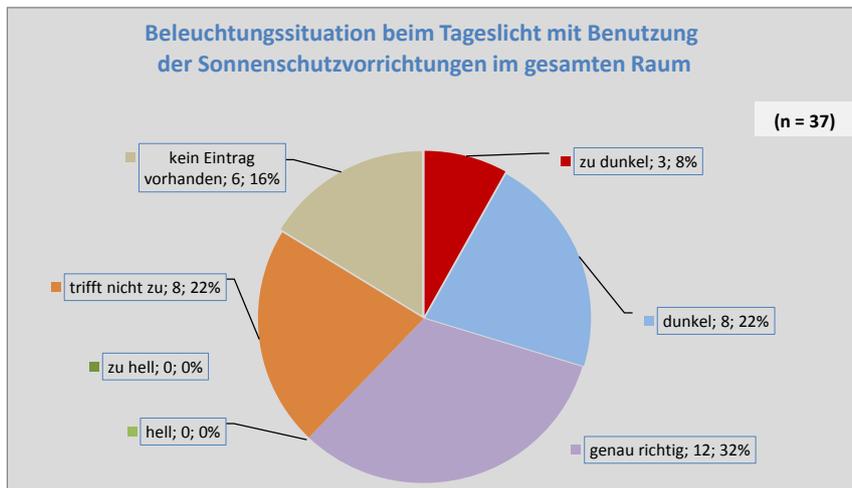


Abb.-Frage 14 b2) im gesamten Raum

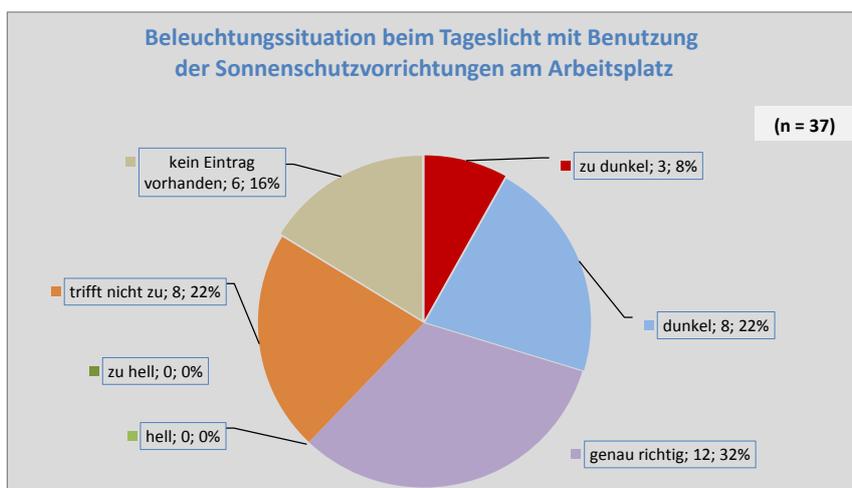


Abb.-Frage 14 b3) am Computer

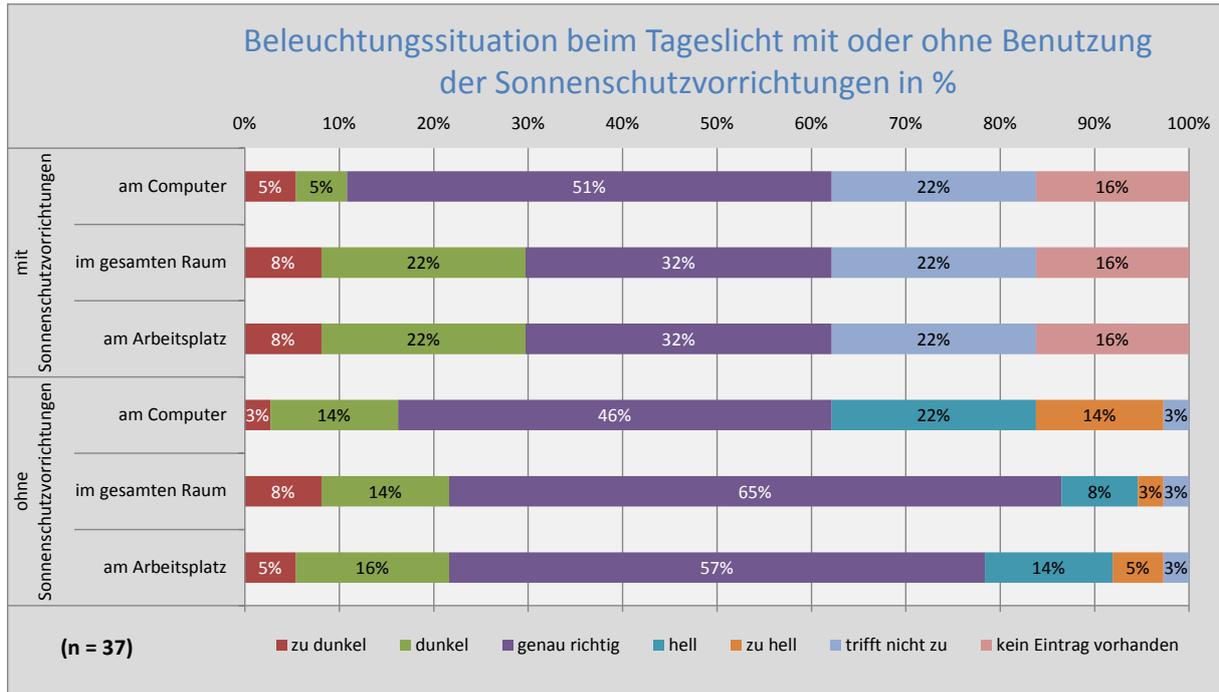


Abb.-Frage 14: Insgesamt betrachtet: Wie bewertest Du an sonnigen Wintertagen die Beleuchtungssituation beim Tageslicht...?

Bitte beantworte als nächstes ein paar Fragen zur **künstlichen Beleuchtung**.

15. Wie lange täglich hattest Du – **bezogen auf die letzten zwei Wochen** – während Deiner Arbeit das **Kunstlicht** eingeschaltet? *(bitte jeden Fall ankreuzen)*

	gar nicht	1-2 h	3-4 h	5-6 h	>7 h
Deckenleuchte Reihe1 (auf Fensterseite)	<input type="checkbox"/>				
Deckenleuchte Reihe 2 (auf Flurseite)	<input type="checkbox"/>				
Sonstiges, und zwar	<input type="checkbox"/>				

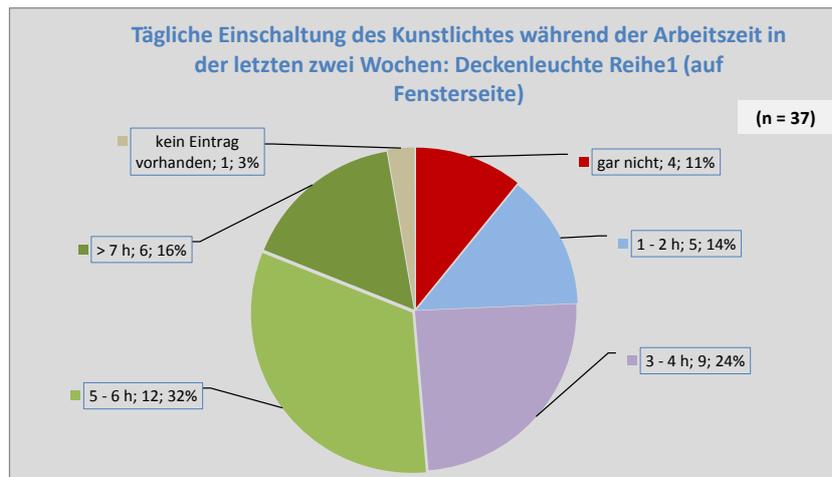


Abb.-Frage 15a) Deckenleuchte Reihe1 (auf Fensterseite)

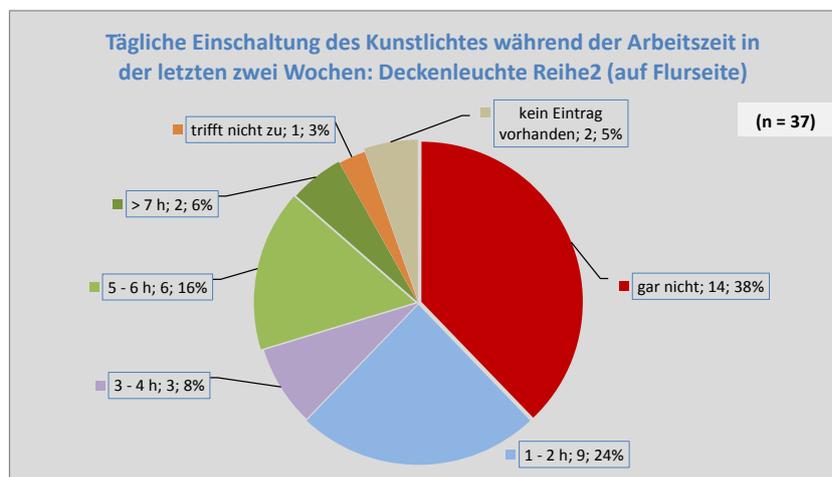


Abb.-Frage 15b) Deckenleuchte Reihe 2 (auf Flurseite)

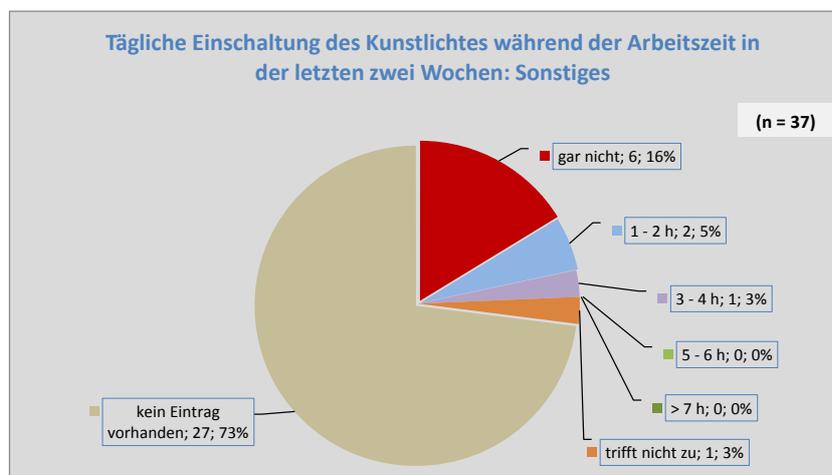


Abb.-Frage 15c) Sonstiges

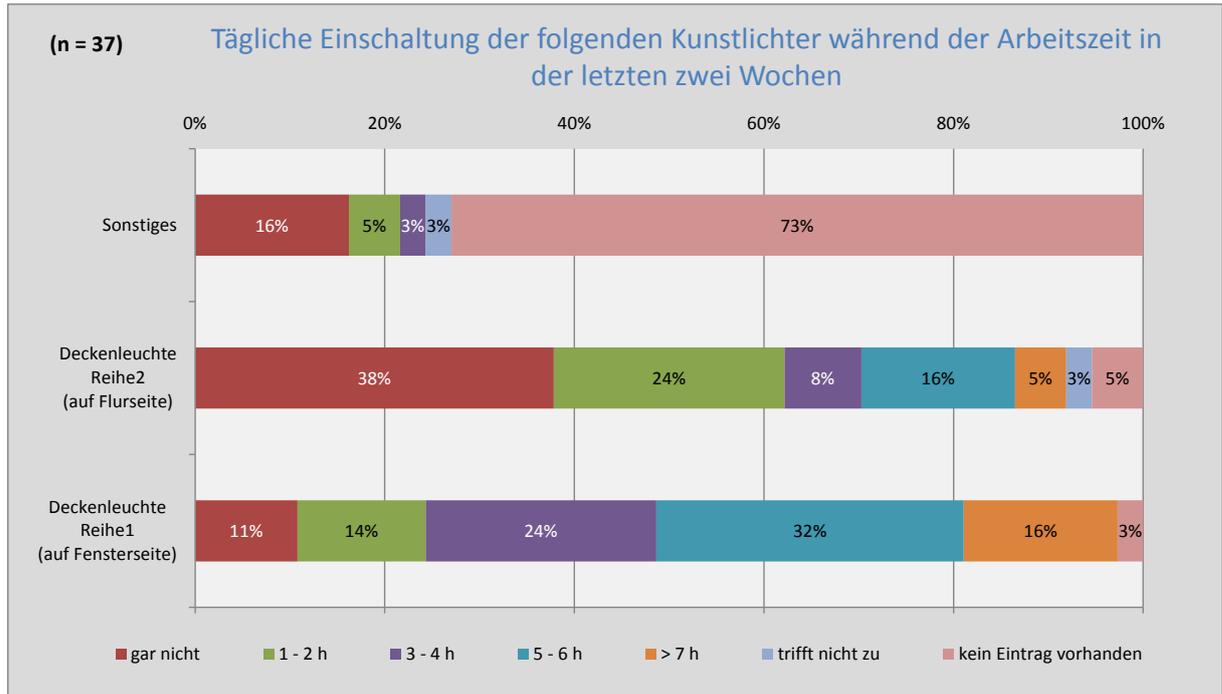


Abb.-Frage 15: Wie lange täglich hattest Du – bezogen auf die letzten zwei Wochen – während Deiner Arbeit das Kunstlicht eingeschaltet?

16. Wie zufrieden bist Du mit der **Funktionalität der Deckenleuchten?**

	Sehr zufriede-		mittelmäßig		Sehr unzu-
	den				frieden
Helligkeit	<input type="checkbox"/>				
Lichtfarbe	<input type="checkbox"/>				
Automatische Regelung	<input type="checkbox"/>				

Wenn Du nicht zufrieden bist, was stört Dich?

---



---

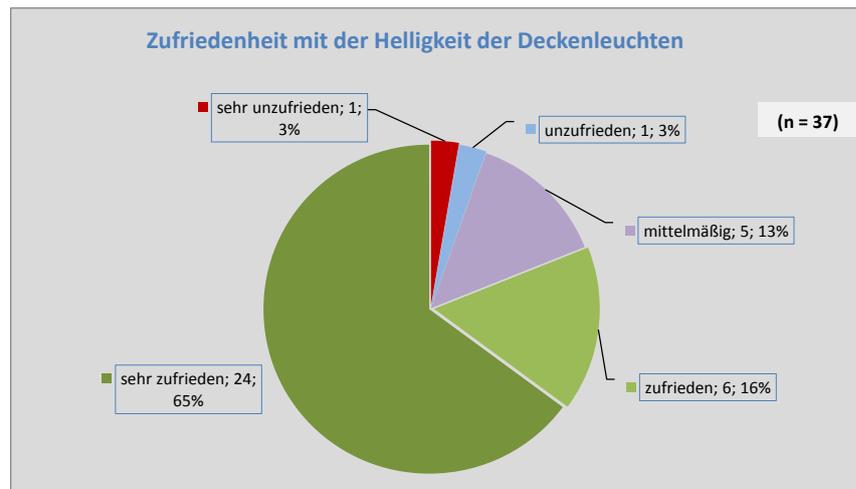


Abb.-Frage 16a) Helligkeit

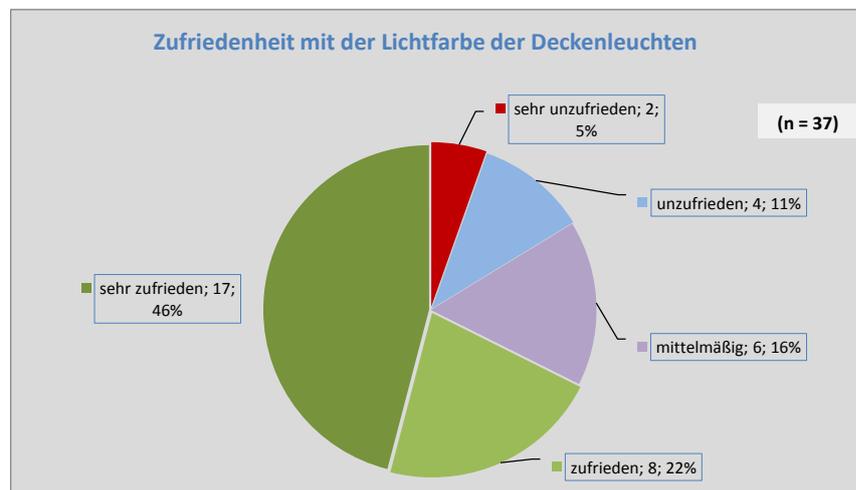


Abb.-Frage 16b) Lichtfarbe

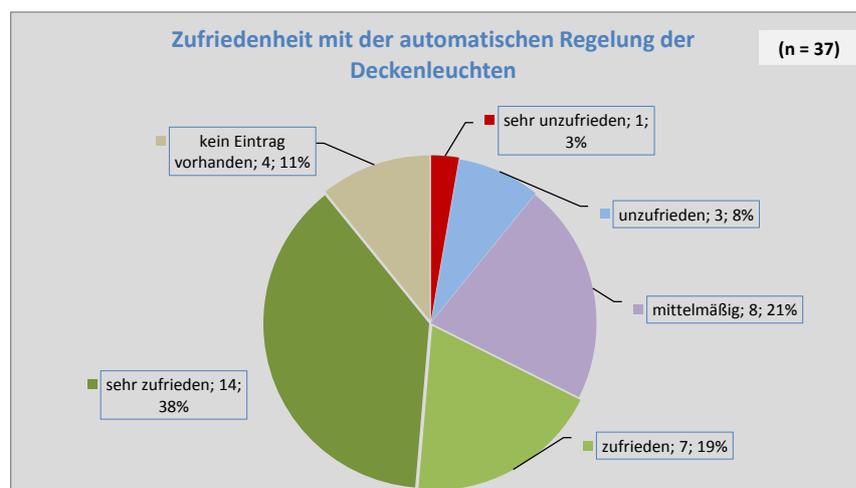


Abb.-Frage 16c) Automatische Regelung

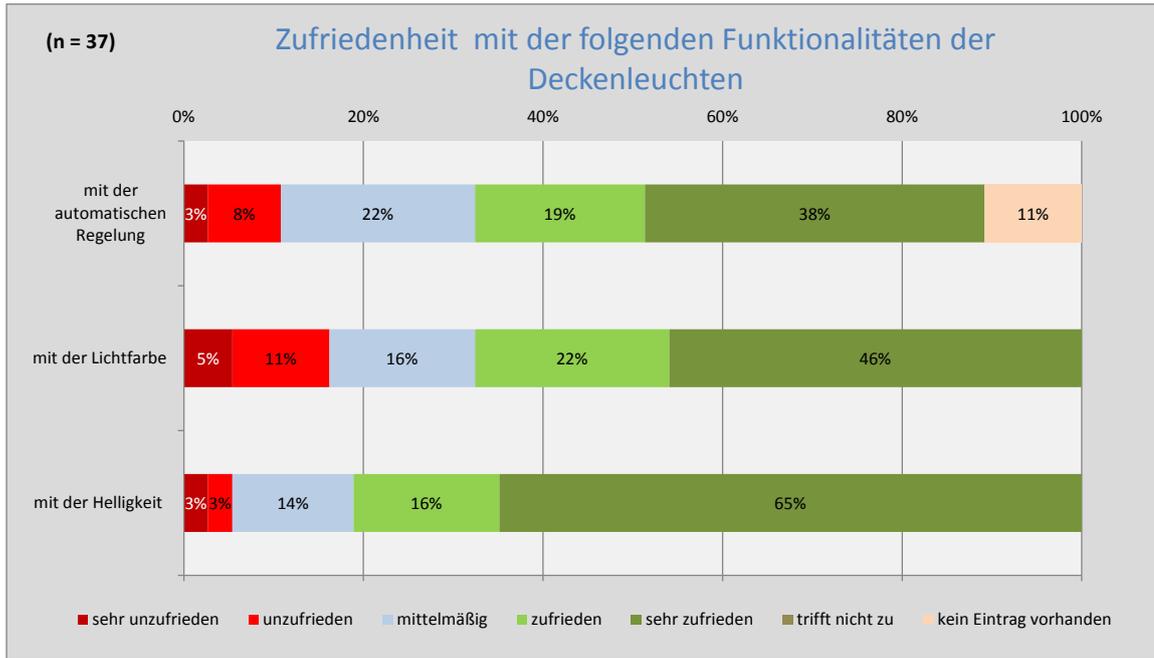


Abb.-Frage 16: Wie zufrieden bist Du mit der Funktionalität der Deckenleuchten?

Beantworte nun bitte ein paar Fragen über das **Raumklima** an Deinem Arbeitsplatz.

17. Wie empfindest Du im Moment die Temperatur an Deinem Arbeitsplatz?

genau richtig

zu kalt                        zu warm

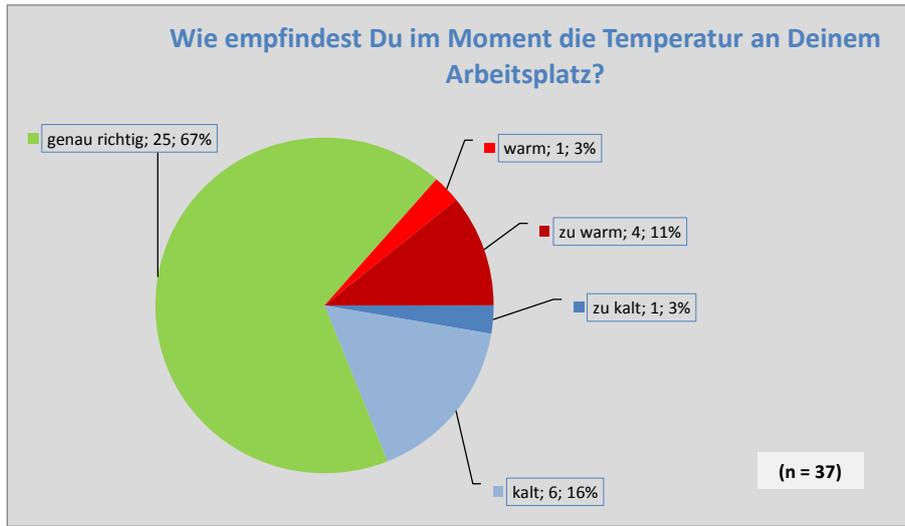


Abb.-Frage 17: Wie empfindest Du im Moment die Temperatur an Deinem Arbeitsplatz?

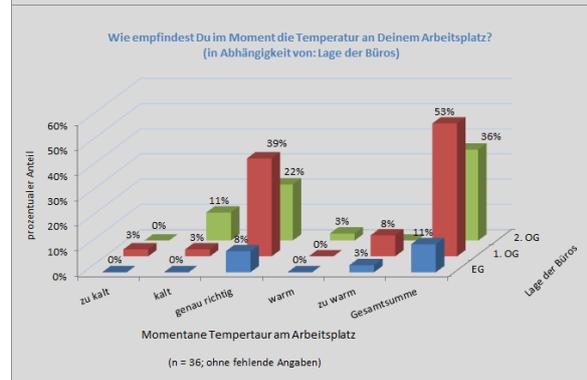
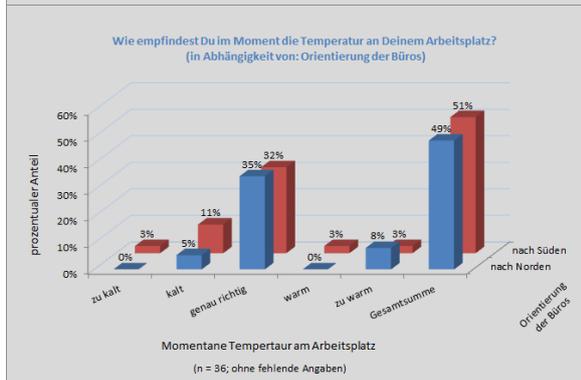
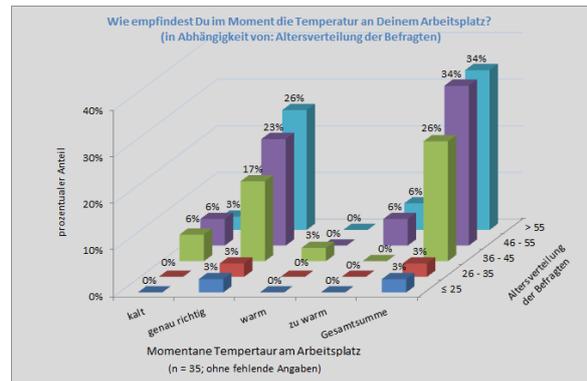
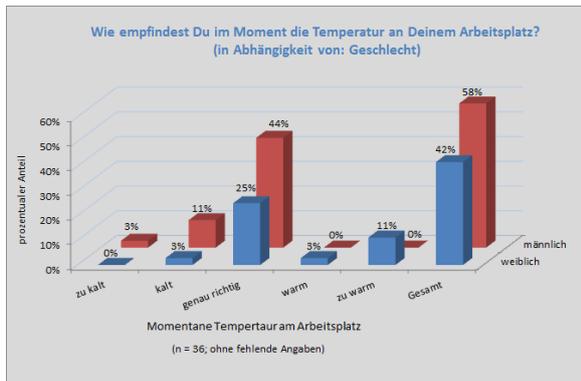


Abb.-Frage 17: Auswertung - Wie empfindest Du im Moment die Temperatur an Deinem Arbeitsplatz in Abhängigkeit vom Geschlecht (oben links), von der Altersverteilung der Befragten (oben rechts), von der Orientierung der Büros (unten links) und von der Lage der Büros (unten rechts)

18. Wenn Du an die letzten zwei Wochen zurückdenkest: War Dir an Deinem Arbeitsplatz...?

	zu kalt		genau richtig		zu warm
vormittags	<input type="checkbox"/>				
nachmittags	<input type="checkbox"/>				

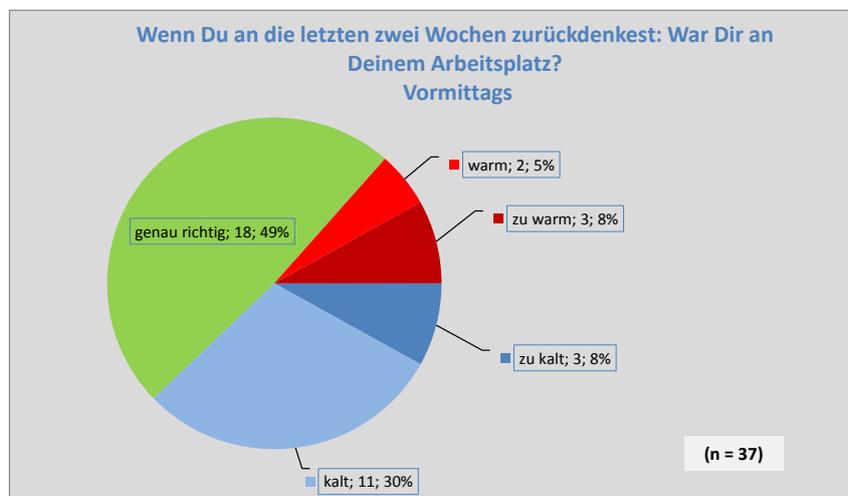


Abb.-Frage 18a: Raumtemperatur der letzten zwei Wochen vor der Befragung: Vormittags

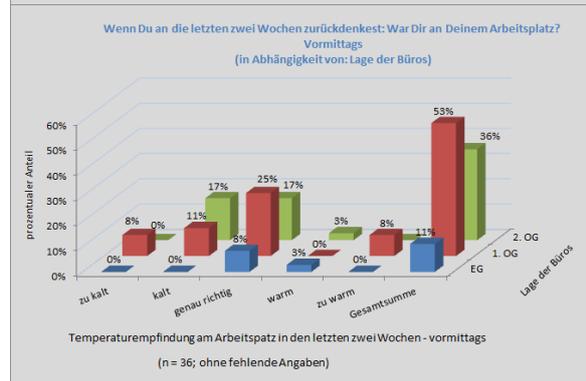
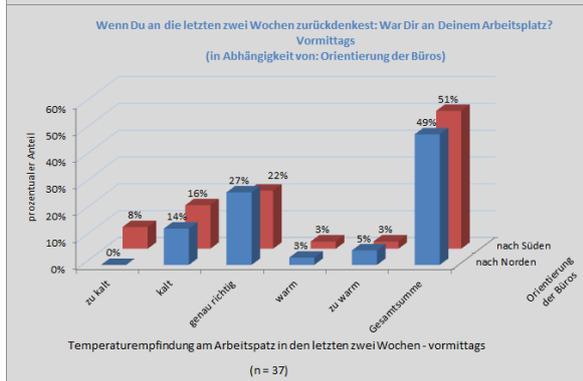
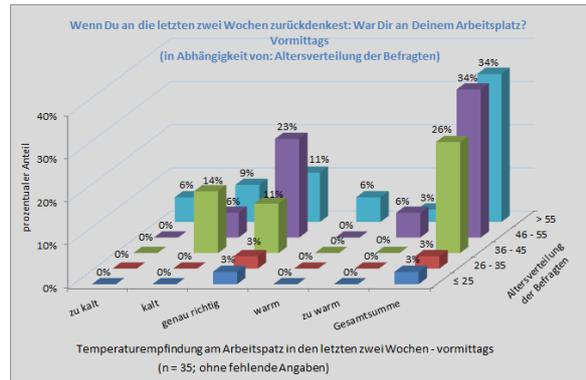
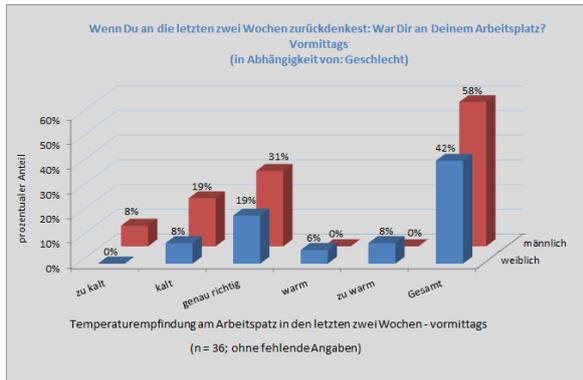


Abb.-Frage 18a: Auswertung der Raumtemperatur (vormittags) der letzten zwei Wochen vor der Befragung in Abhängigkeit vom Geschlecht (oben links), von der Altersverteilung der Befragten (oben rechts), von der Orientierung der Büros (unten links) und von der Lage der Büros (unten rechts)

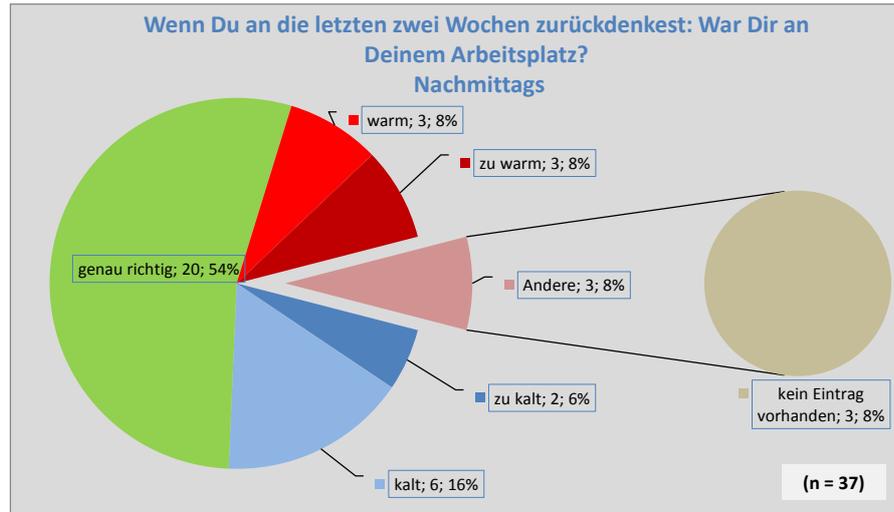


Abb.-Frage 18b: Raumtemperatur der letzten zwei Wochen vor Befragung: Nachmittags

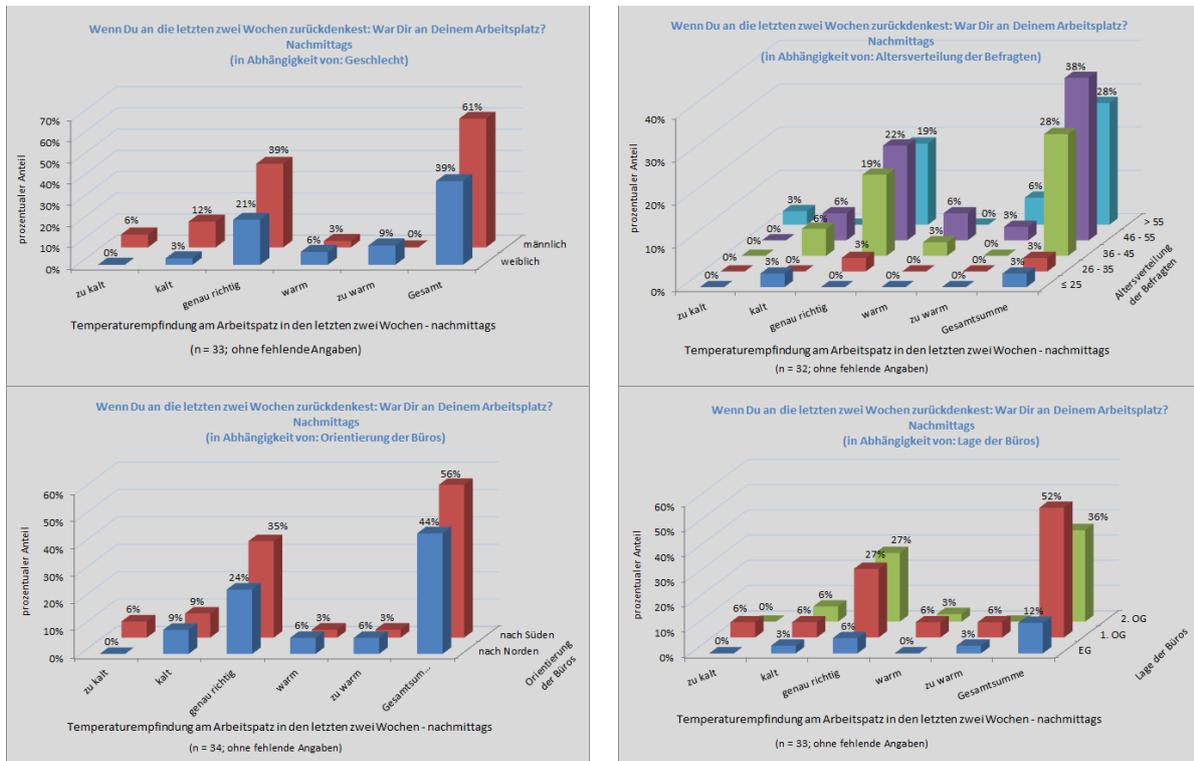


Abb.-Frage 18b: Auswertung der Raumtemperatur (nachmittags) der letzten zwei Wochen vor der Befragung in Abhängigkeit vom Geschlecht (oben links), von der Altersverteilung der Befragten (oben rechts), von der Orientierung der Büros (unten links) und von der Lage der Büros (unten rechts)

Abb.-Frage 18: Wenn Du an die letzten zwei Wochen zurückdenkst: War Dir an Deinem Arbeitsplatz (zu kalt ... zu warm)?

19. War Dir die Luft in Deinem Raum in den vergangenen zwei Wochen...?

genau richtig

tig

zu trocken                        zu feucht

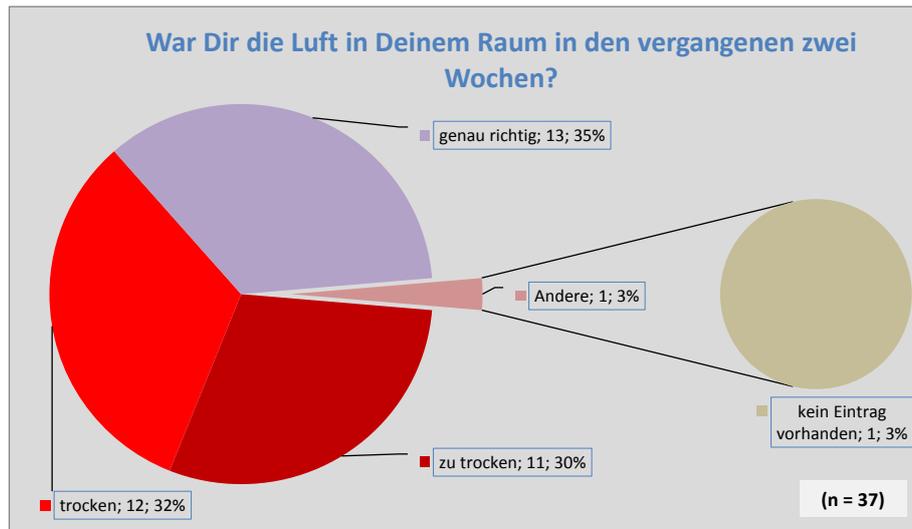


Abb.-Frage 19: War Dir die Luft in Deinem Raum in den vergangenen zwei Wochen...?

20. Wie stark empfandest Du in den letzten zwei Wochen **unangenehme Temperaturschwankungen** im Tagesverlauf?

mittelmäßig

gar nicht                        sehr

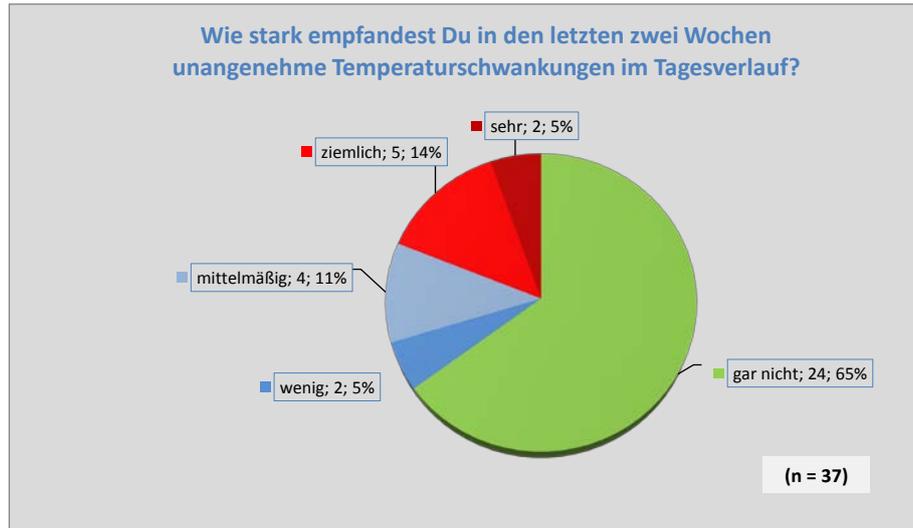


Abb.-Frage 20: Wie stark empfandst Du in den letzten zwei Wochen unangenehme Temperaturschwankungen im Tagesverlauf?

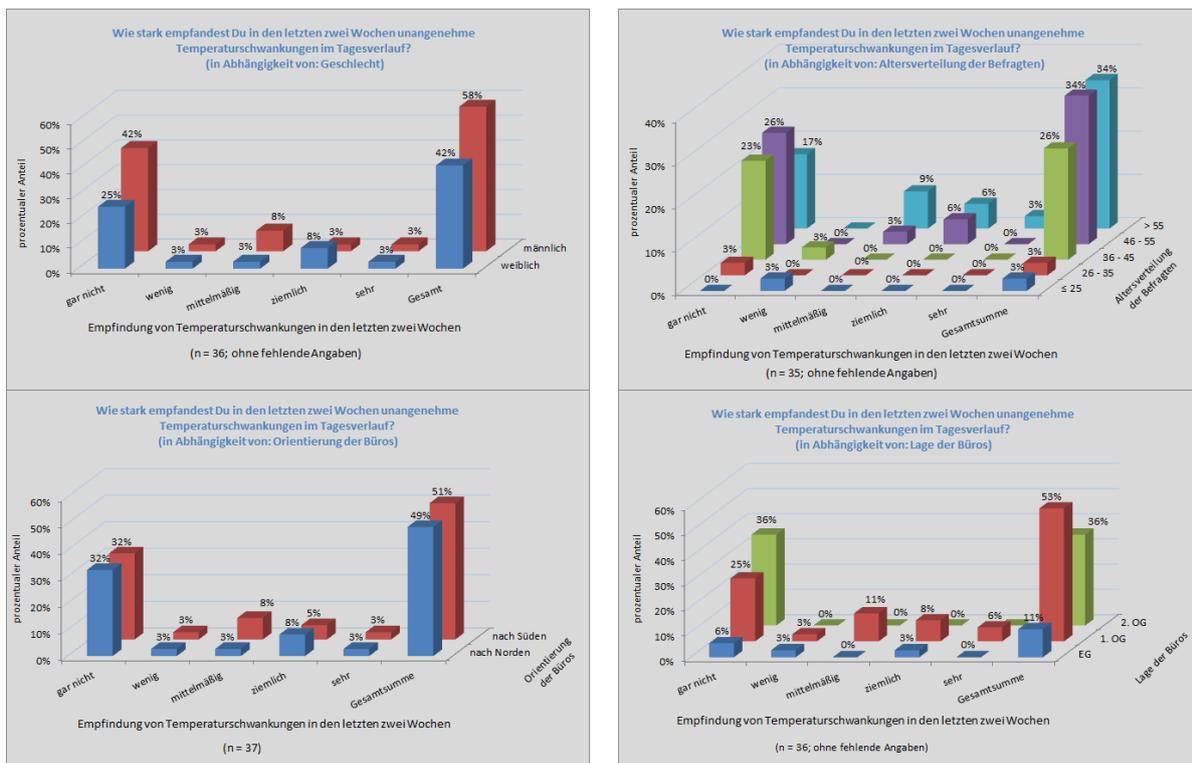


Abb.-Frage 20: Auswertung - Wie stark empfandst Du in den letzten zwei Wochen unangenehme Temperaturschwankungen im Tagesverlauf? In Abhängigkeit vom Geschlecht (oben links), von der Altersverteilung der Befragten (oben rechts), von der Orientierung der Büros (unten links) und von der Lage der Büros (unten rechts)

21. Welche Möglichkeiten nutzt Du überwiegend, um die Temperatur im Büro zu verändern?

- gar keine, die Temperatur ist in der Regel angenehm
- Lüften
- Thermostatventil an der Heizung
- Heizlüfter
- Sonstiges, und zwar: \_\_\_\_\_

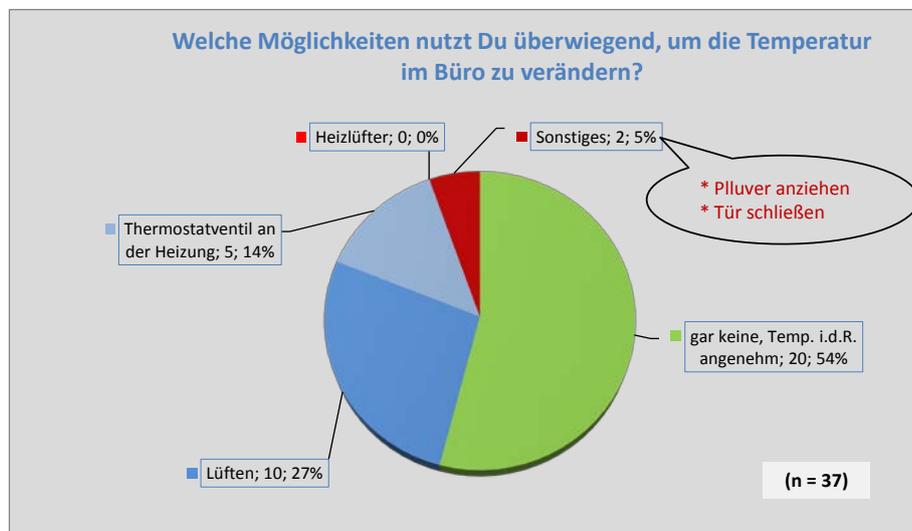


Abb.-Frage 21: Welche Möglichkeiten nutzt Du überwiegend, um die Temperatur im Büro zu verändern?

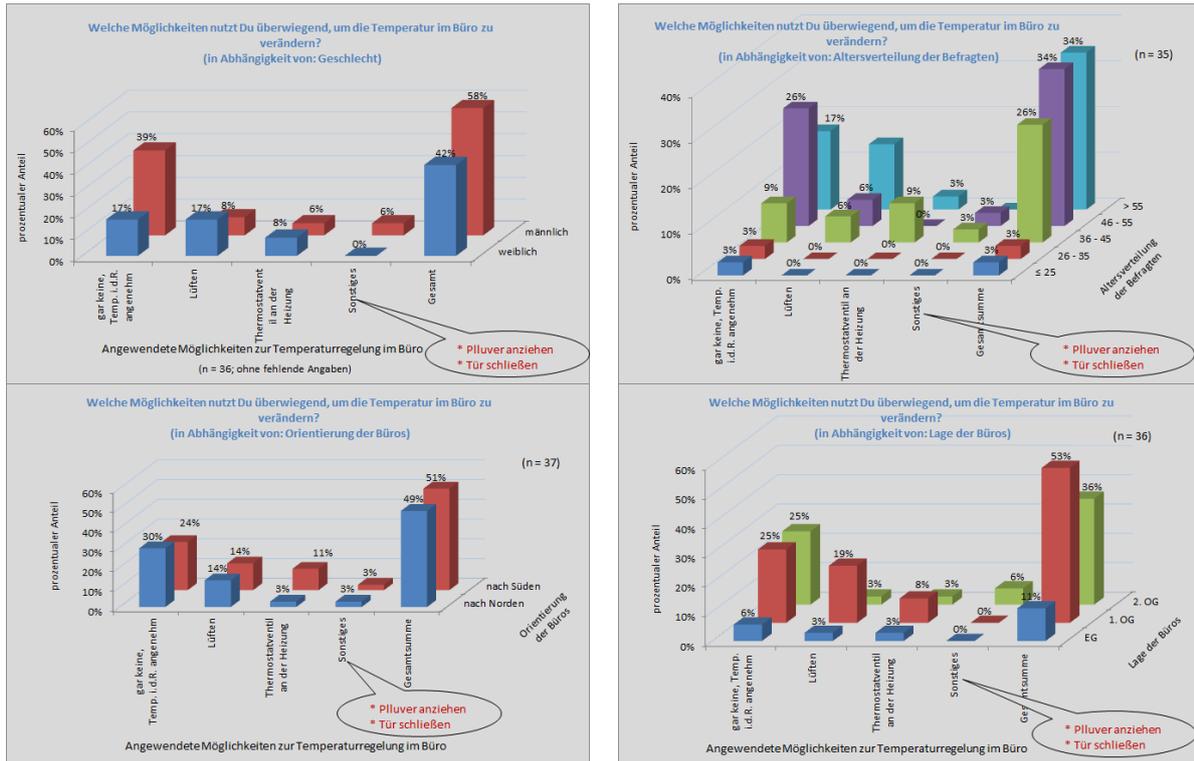


Abb.-Frage 21: Auswertung - Welche Möglichkeiten nutzt Du überwiegend, um die Temperatur im Büro zu verändern? In Abhängigkeit vom Geschlecht (oben links), von der Altersverteilung der Befragten (oben rechts), von der Orientierung der Büros (unten links) und von der Lage der Büros (unten rechts)

22. **Wie oft** hast Du in den vergangenen 2 Wochen versucht, etwas an der Temperatur in Deinem Büro zu **verändern**?

~ 1x/Tag      ~ 2x/Tag      ~ 3x/Tag

gar nicht                                                                > 3x/Tag

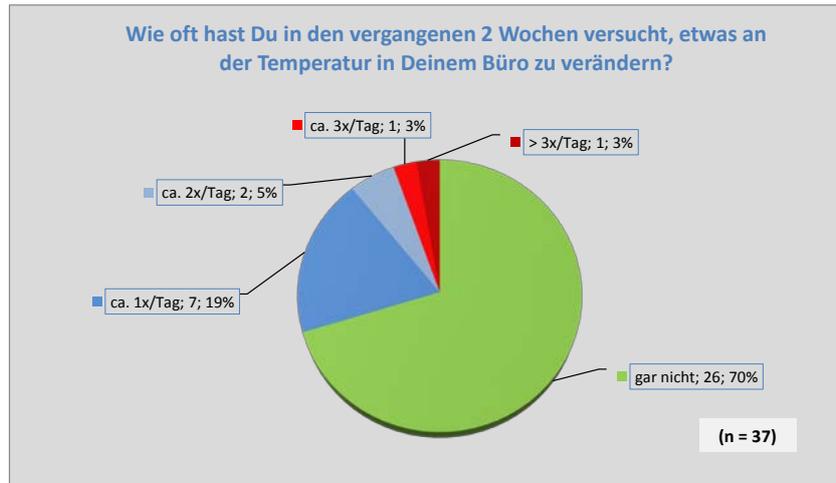


Abb.-Frage 22: Wie oft hast Du in den vergangenen 2 Wochen versucht, etwas an der Temperatur in Deinem Büro zu verändern?

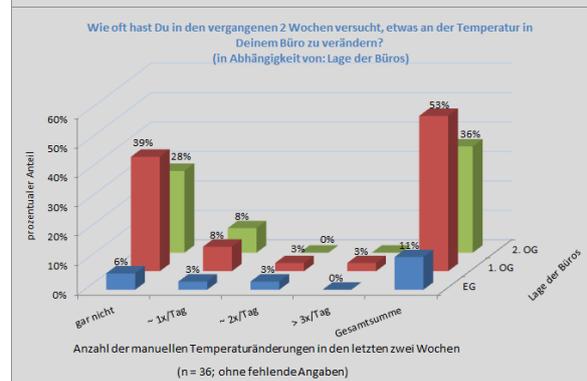
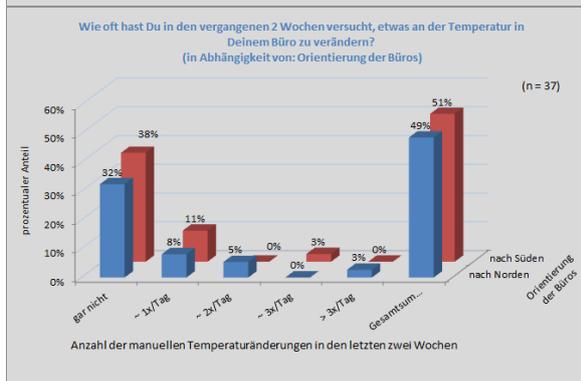
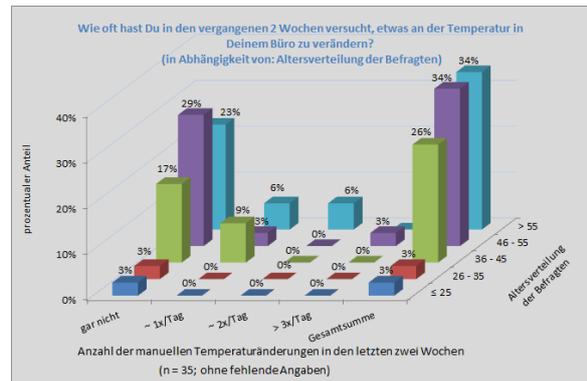
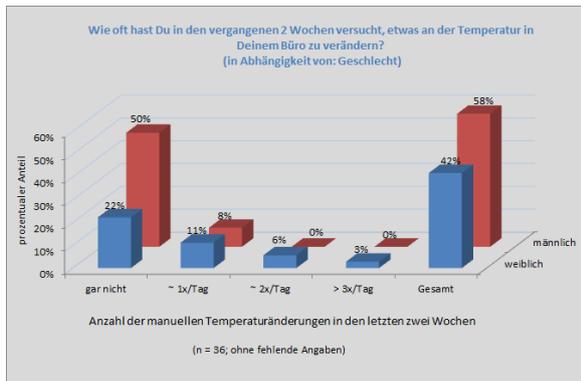


Abb.-Frage 22: Auswertung - Wie oft hast Du in den vergangenen 2 Wochen versucht, etwas an der Temperatur in Deinem Büro zu verändern? In Abhängigkeit vom Geschlecht (oben links), von der Altersverteilung der Befragten (oben rechts), von der Orientierung der Büros (unten links) und von der Lage der Büros (unten rechts)

23. Wenn Du die Temperatur verändert hast, wie zufrieden warst Du mit der Wirksamkeit der Temperaturänderung?

mittelmäßig

Sehr zu-  
frieden



Sehr unzu-  
frieden

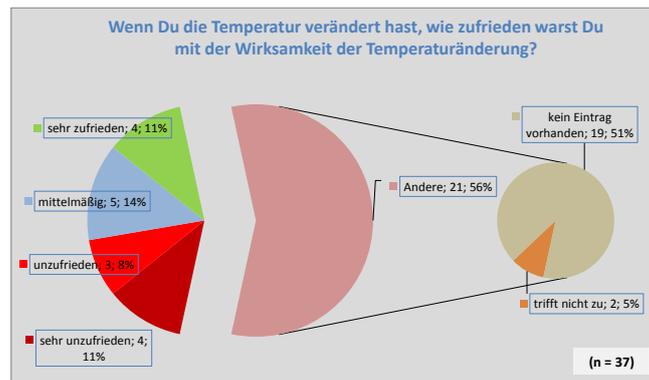


Abb.-Frage 23: Wenn Du die Temperatur verändert hast, wie zufrieden warst Du mit der Wirksamkeit der Temperaturänderung?

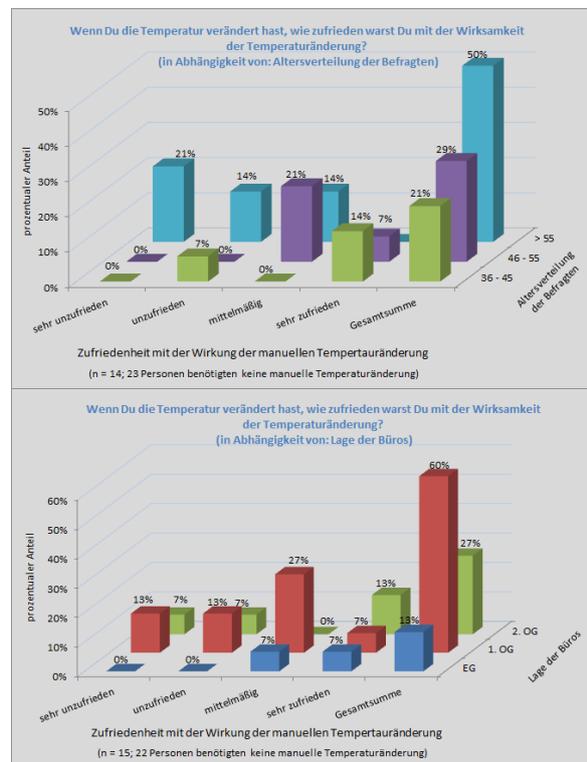
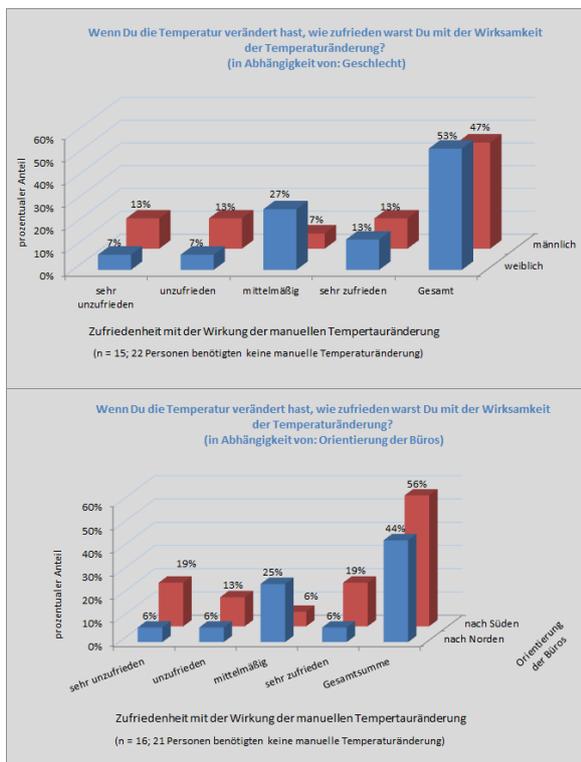


Abb.-Frage 23: Auswertung - Wenn Du die Temperatur verändert hast, wie zufrieden warst Du mit der Wirksamkeit der Temperaturänderung? In Abhängigkeit vom Geschlecht (oben links), von der Altersverteilung der Befragten (oben rechts), von der Orientierung der Büros (unten links) und von der Lage der Büros (unten rechts)

24. Wie zufrieden warst Du die vergangenen zwei Wochen insgesamt mit der Temperatur am Arbeitsplatz?

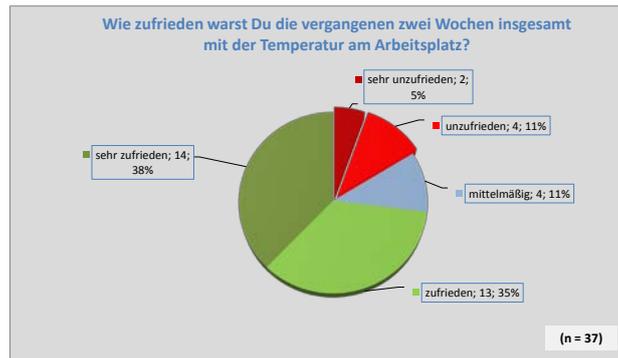


Abb.-Frage 24: Wie zufrieden warst Du die vergangenen zwei Wochen insgesamt mit der Temperatur am Arbeitsplatz?

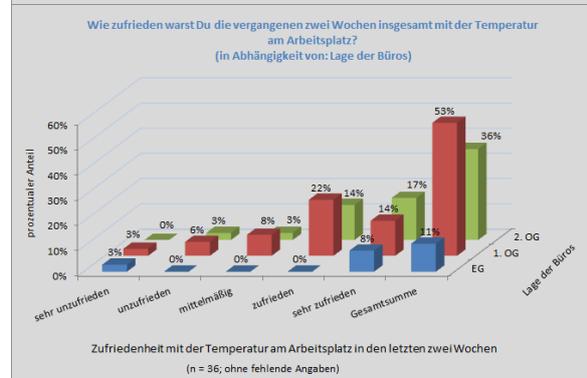
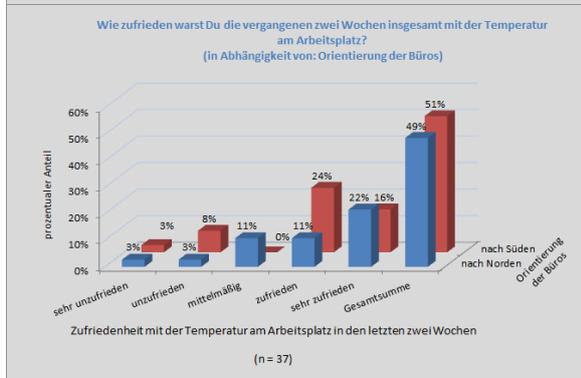
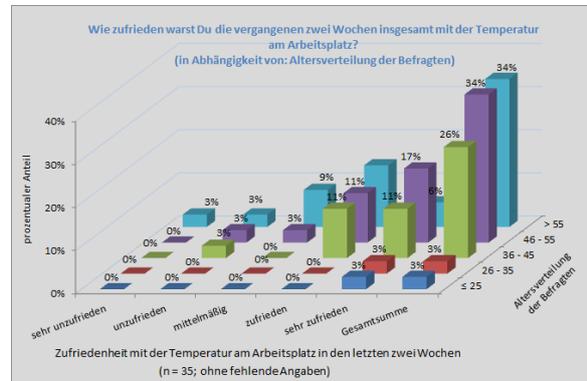
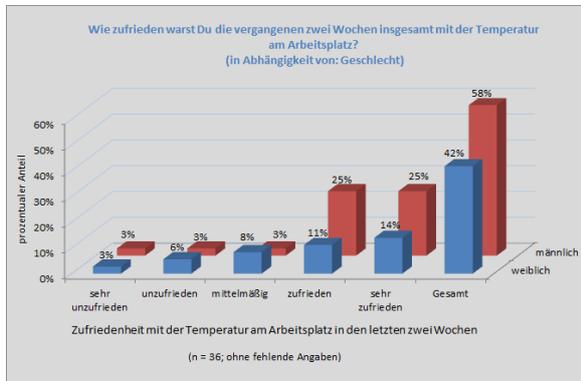


Abb.-Frage 24: Auswertung: Wie zufrieden warst Du die vergangenen zwei Wochen insgesamt mit der Temperatur am Arbeitsplatz in Abhängigkeit vom Geschlecht (oben links), von der Altersverteilung der Befragten (oben rechts), von der Orientierung der Büros (unten links) und von der Lage der Büros (unten rechts)

Im Folgenden geht es um die **Belüftungsmöglichkeit und Luftqualität** in Deinem Büro

25. Hast Du in den vergangenen zwei Wochen Zuglufterscheinungen an Deinem Arbeitsplatz verspürt?

manchmal

nie                        immer

Falls ja: Bitte benenne die (vermutete) Ursache der Zugluft:

\_\_\_\_\_

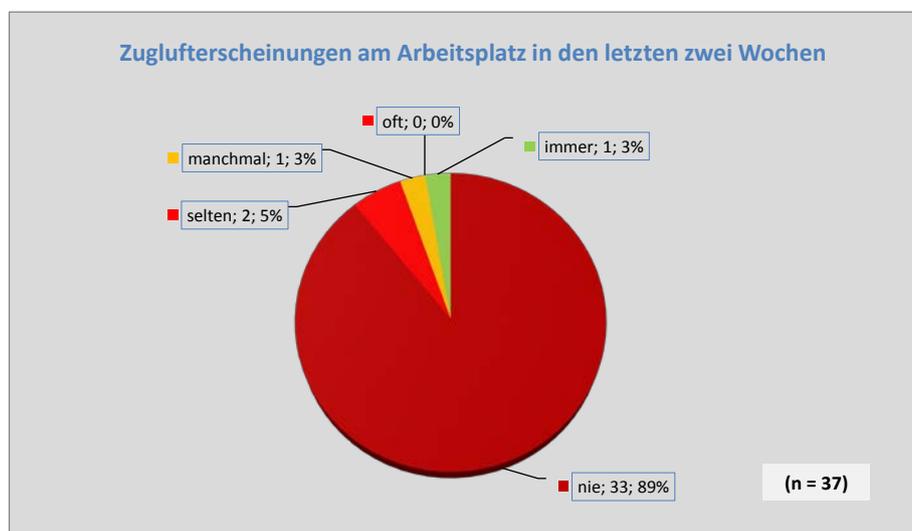


Abb.-Frage 25: Hast Du in den vergangenen zwei Wochen Zuglufterscheinungen an Deinem Arbeitsplatz verspürt?

26. Wie stark empfandst Du in den vergangenen zwei Wochen folgende Gerüche an Deinem Arbeitsplatz? *(Bitte für jeden Fall ankreuzen)*

	gar nicht		mittelmäßig		stark
Gerüche von Teppich/ Möbel	<input type="checkbox"/>				
Ein Gemisch aus Gerüchen	<input type="checkbox"/>				
Sonstiges (z.B. Personen, Essen), nämlich:	<input type="checkbox"/>				



Abb.-Frage 26a) Gerüche von Teppich/ Möbel

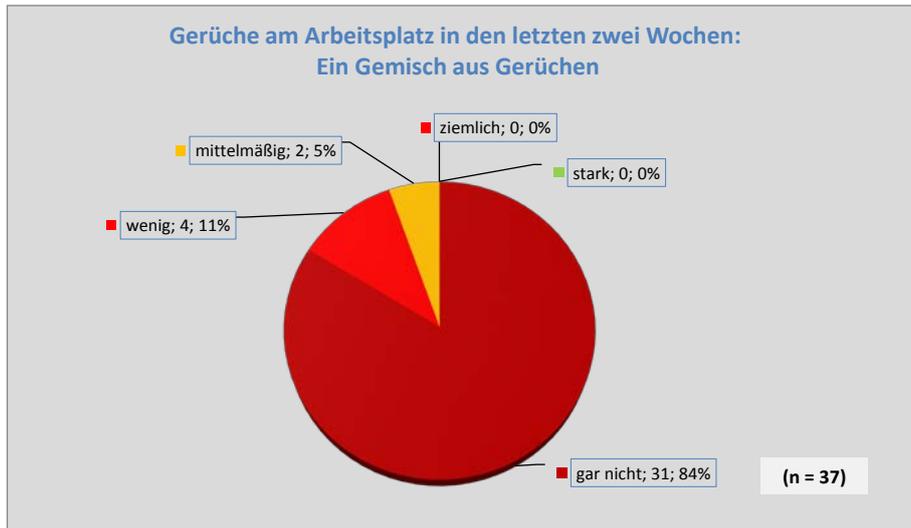


Abb.-Frage 26b) Ein Gemisch aus Gerüchen

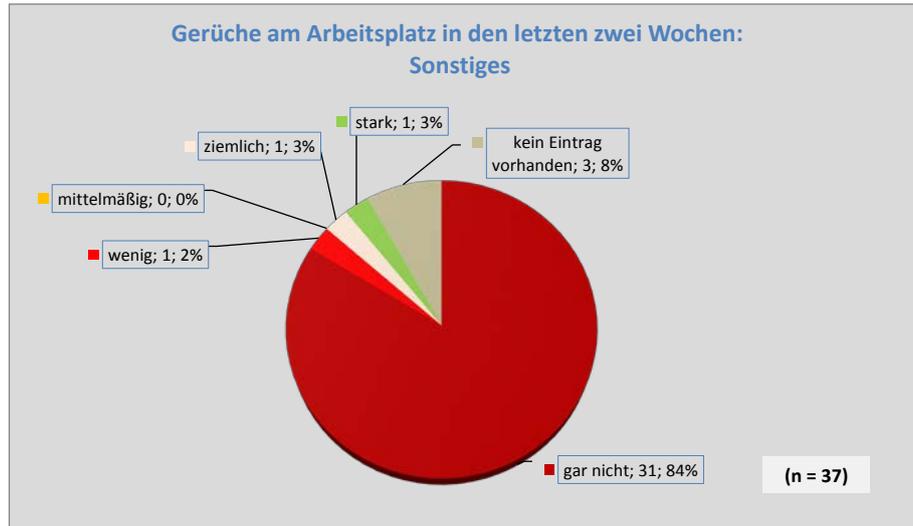


Abb.-Frage 26c) Sonstiges (z.B. Personen, Essen)

Abb.-Frage 26: Wie stark empfandst Du in den vergangenen zwei Wochen folgende Gerüche an Deinem Arbeitsplatz?

27. **Wie** hattest Du in den letzten zwei Wochen die Fenster **hauptsächlich geöffnet**?

- gar nicht     
  auf Kippstellung     
  maximaler Öffnungswinkel

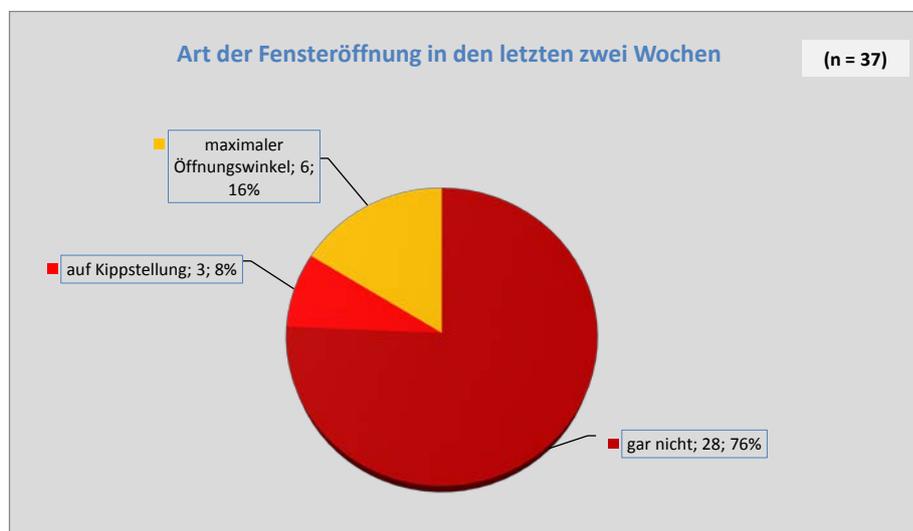


Abb.-Frage 27: Wie hattest Du in den letzten zwei Wochen die Fenster hauptsächlich geöffnet?

**Wenn Du die Fenster geöffnet hattest:**

a) **Warum** hattest Du die Fenster **hauptsächlich geöffnet**?

- Weil mir zu warm war.
- Weil die Luft verbraucht war.

Sonstiges (z.B. morgens beim Betreten des Raumes), nämlich:

\_\_\_\_\_

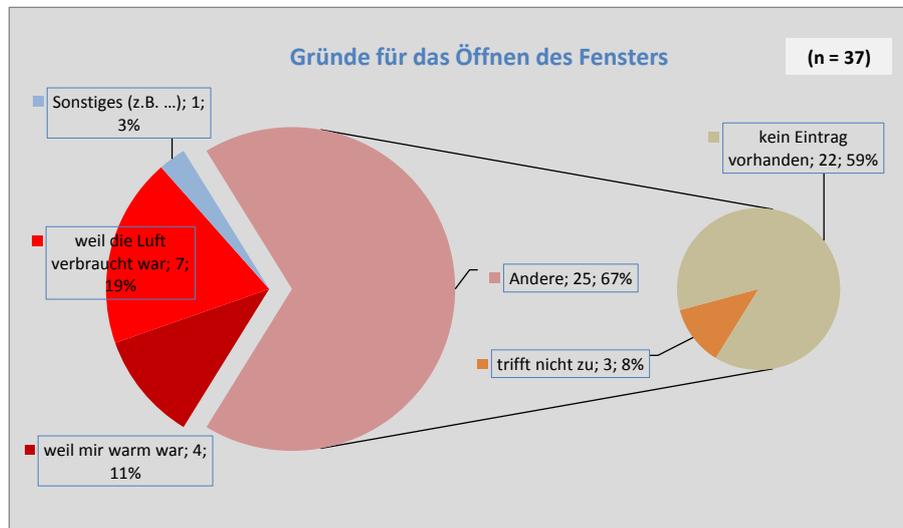


Abb.-Frage 27a) Warum hattest Du die Fenster hauptsächlich geöffnet?

b) Geschätzt wie viele Stunden waren die Fenster dann in Deinem Büro **durchschnittlich am Tag geöffnet**?

< 0,5 h      0,5 – 1 h      1 – 3 h      3 – 5 h      > 5 h

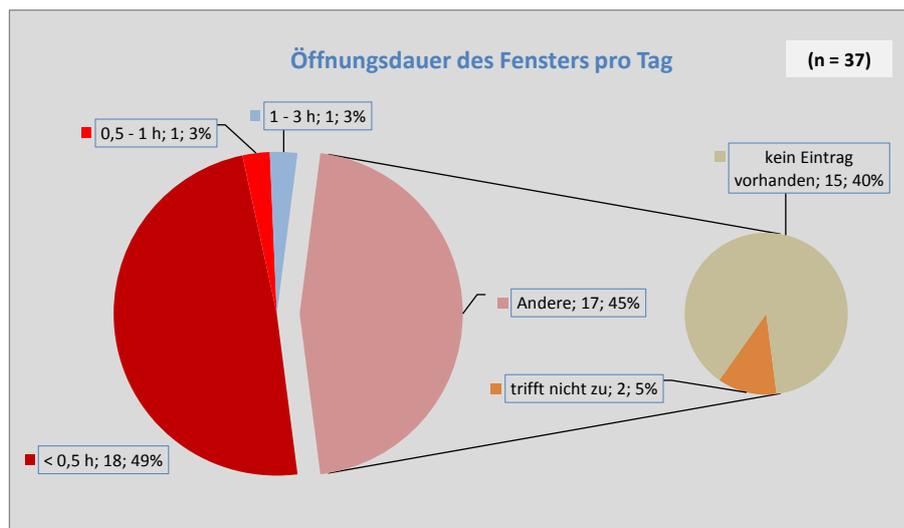


Abb.-Frage 27b) Geschätzt wie viele Stunden waren die Fenster dann in Deinem Büro durchschnittlich am Tag geöffnet?

28. Ist die Tür Deines Büroraums (zum Flur hin) normalerweise **offen oder geschlossen**, wenn Du den Raum benutzt?

(eher) geschlossen

(eher) offen

Bitte gib den Grund für geschlossene oder geöffnete Tür an (z.B. Ungestörtheit, Lüftung des Raumes):

---

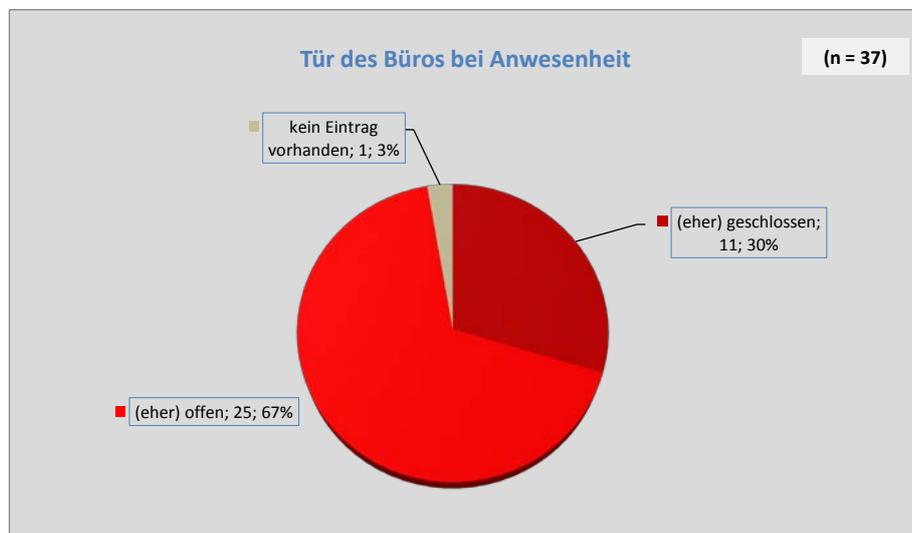


Abb.-Frage 28: Ist die Tür Deines Büroraums (zum Flur hin) normalerweise offen oder geschlossen, wenn Du den Raum benutzt?

29. Wie lange steht die Tür Deines Büroraumes (zum Flur hin) an einem normalen Arbeitstag etwa offen, wenn Du den Raum benutzt?

nie     
  1 – 2 h     
  3 – 4 h     
  5 – 6 h     
  > 7 h

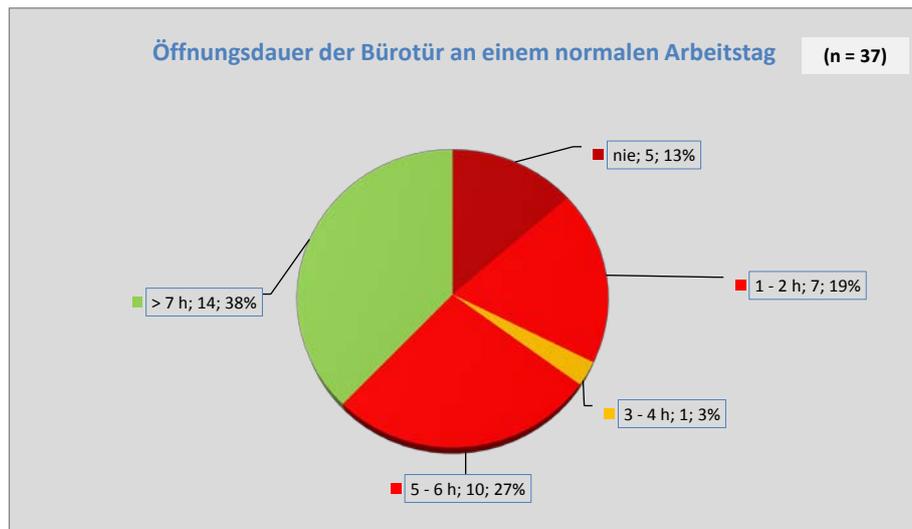


Abb.-Frage 29: Wie lange steht die Tür Deines Büroraumes (zum Flur hin) an einem normalen Arbeitstag etwa offen, wenn Du den Raum benutzt?

30. Wie oft steht die Tür Deines Büroraumes (zum Flur hin) nachts offen?

~ 1x/ Woche

nie      immer

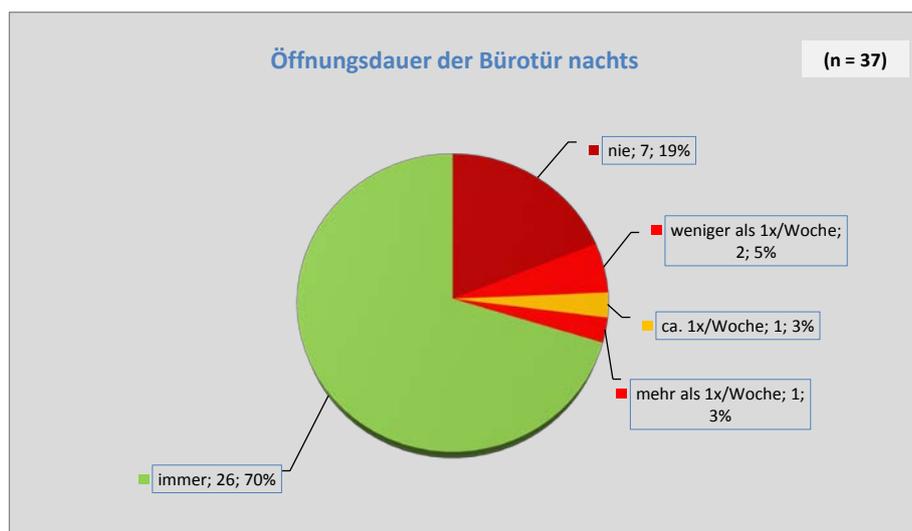


Abb.-Frage 30: Wie oft steht die Tür Deines Büroraumes (zum Flur hin) nachts offen?



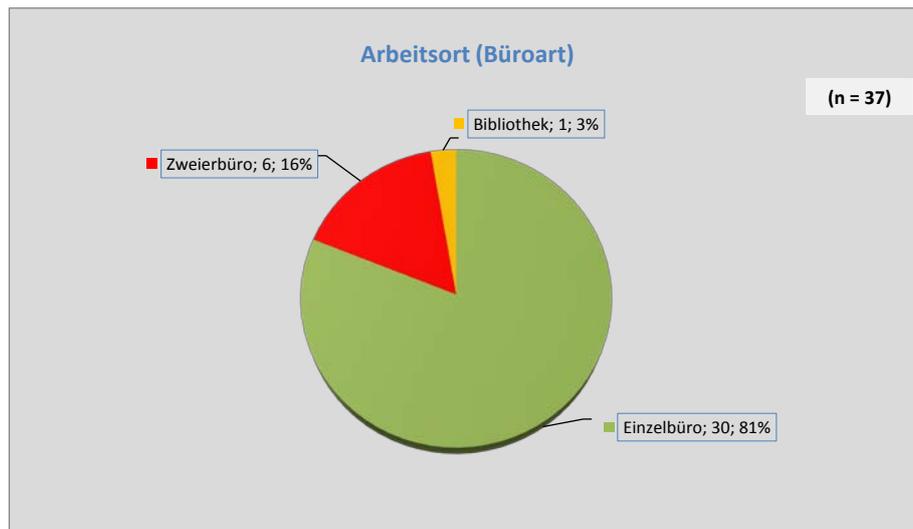


Abb.-Frage 32: Arbeitest Du in einem Einzelbüro, Zweierbüro oder in der Bibliothek?

33. Wie zufrieden bist Du insgesamt mit der Einrichtung Deines Büros?

mittelmäßig

Sehr zu-  
frieden






Sehr unzu-  
frieden

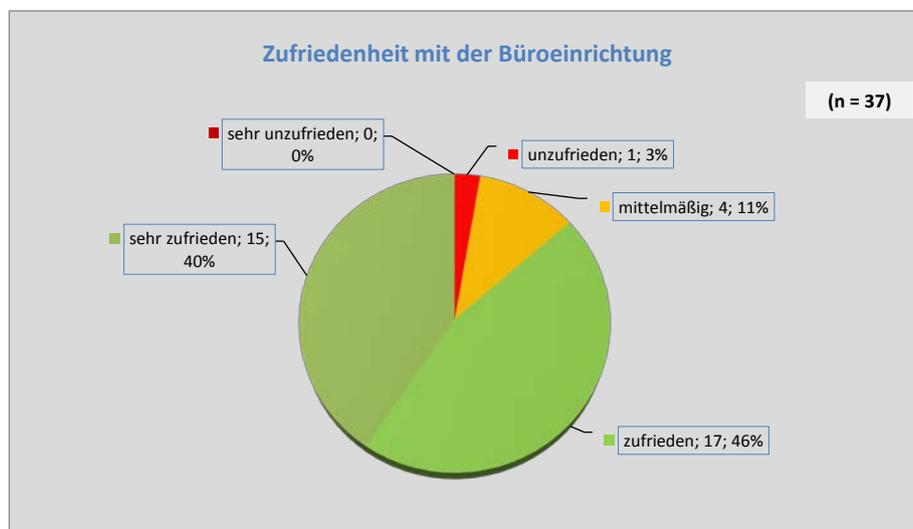


Abb.-Frage 33: Wie zufrieden bist Du insgesamt mit der Einrichtung Deines Büros?

Bitte beantworte nun einige Fragen zum Thema **Umgebungsgeräusche**.

34. Fühltest Du Dich an Deinem Arbeitsplatz in den letzten 2 Wochen durch folgende Geräusche gestört oder nicht?

	gar nicht			den ganzen Tag	
Allgemeine Geräusche (z.B. Telefonate)	<input type="checkbox"/>				
Computerlüfter	<input type="checkbox"/>				
Heizung	<input type="checkbox"/>				
Lüftung	<input type="checkbox"/>				
Geräusche von draußen bei <b>geschlossenem</b> Fenster	<input type="checkbox"/>				
Geräusche von draußen bei <b>offenem</b> Fenster	<input type="checkbox"/>				
Sonstiges (z.B. Radio):	<input type="checkbox"/>				
Und	zwar:				

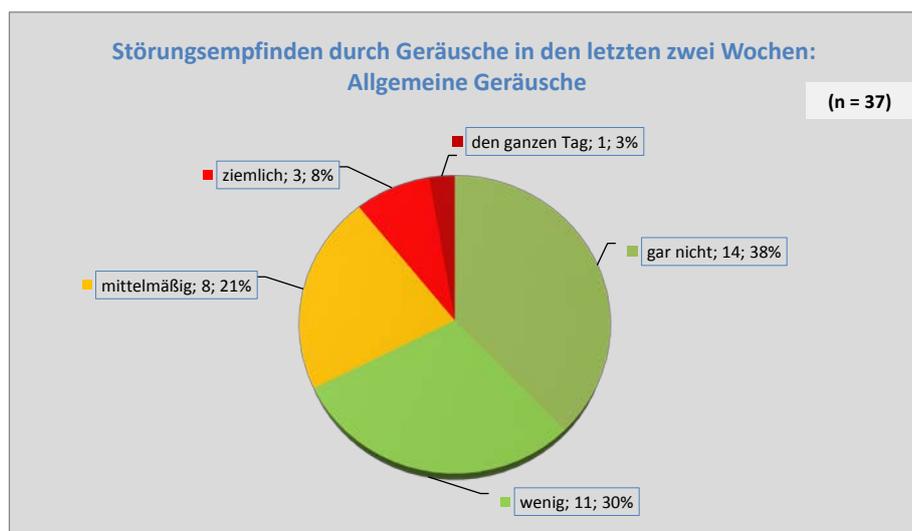


Abb.-Frage 34a) Allgemeine Geräusche (z.B. Telefonate)

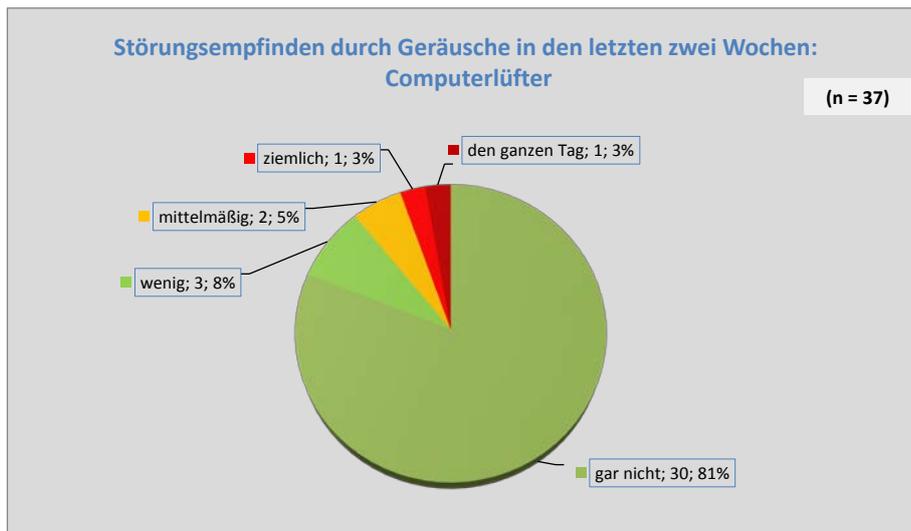


Abb.-Frage 34b) Computerlüfter

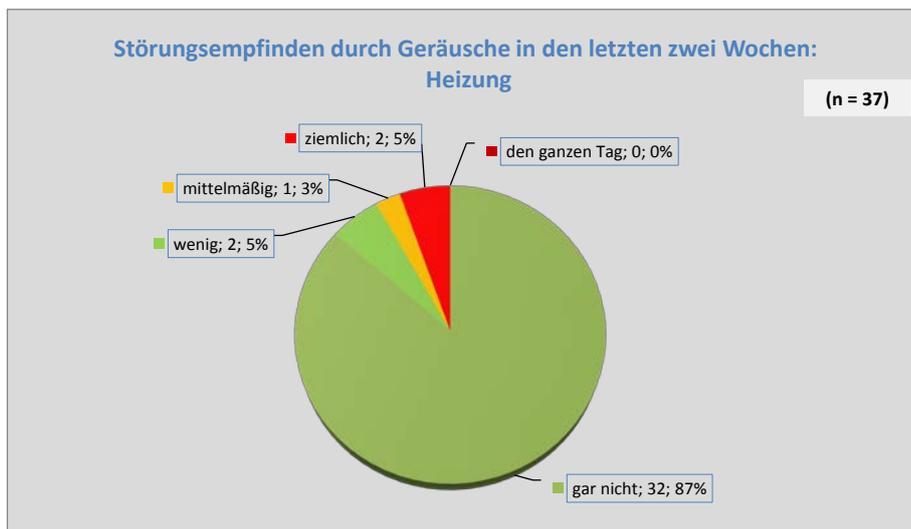


Abb.-Frage 34c) Heizung

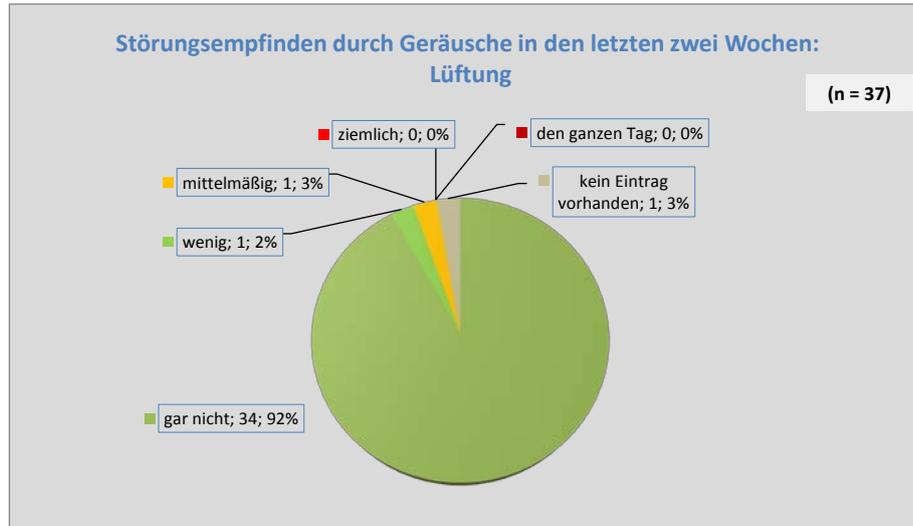


Abb.-Frage 34d) Lüftung

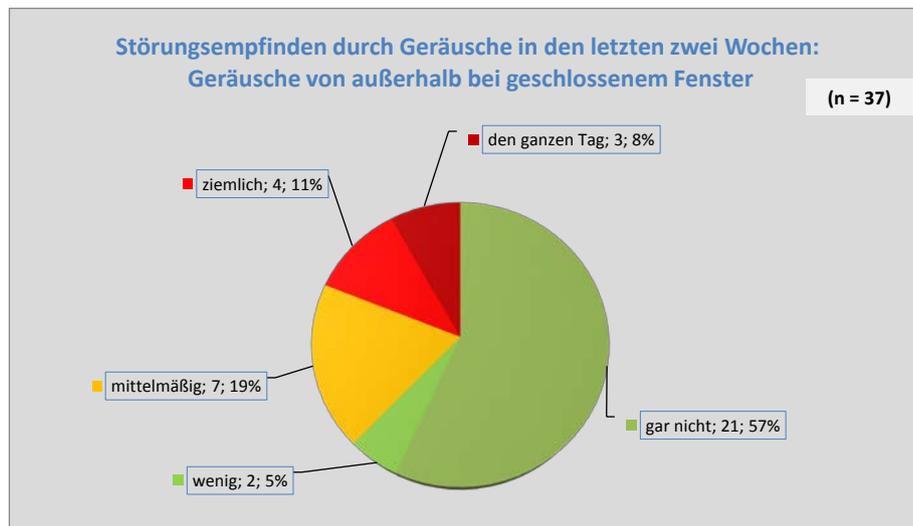


Abb.-Frage 34e) Geräusche von draußen bei geschlossenem Fenster

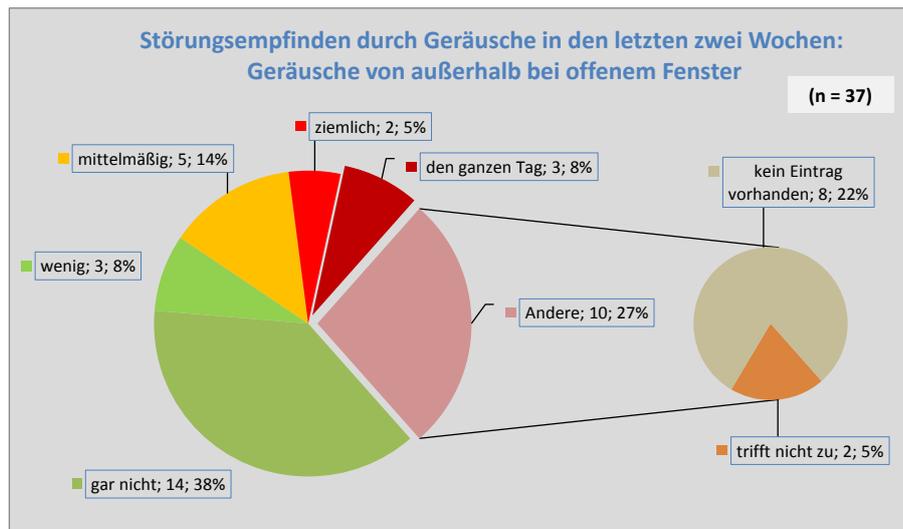


Abb.-Frage 34f) Geräusche von draußen bei offenem Fenster

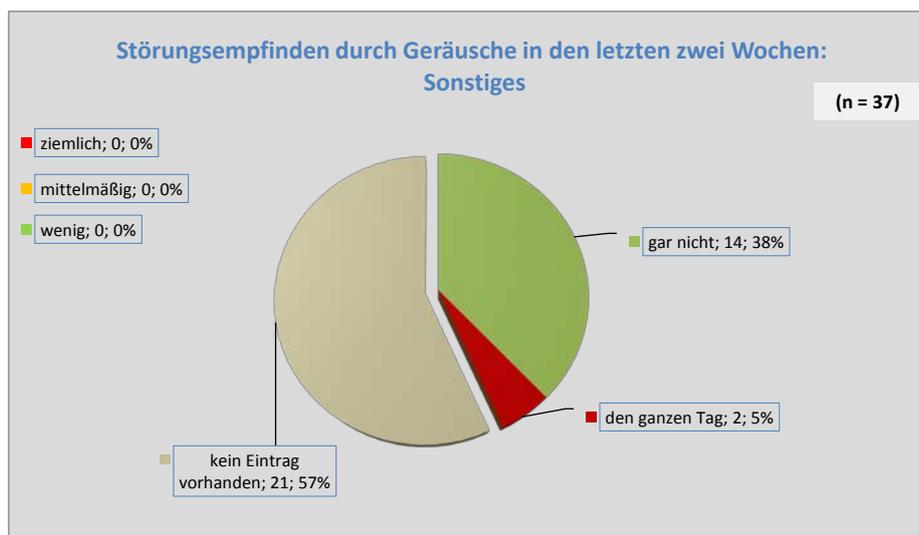


Abb.-Frage 34g) Sonstiges

Abb.-Frage 34: Fühltest Du Dich an Deinem Arbeitsplatz in den letzten 2 Wochen durch folgende Geräusche gestört oder nicht?

35. Wie zufrieden bist Du mit der **Akustik** (Sprachverständlichkeit, Halligkeit etc.) in Deinem Büro?

mittelmäßig

Sehr zu-       Sehr unzu-  
frieden  frieden

Wenn Du nicht zufrieden bist, was stört Dich?

---



---

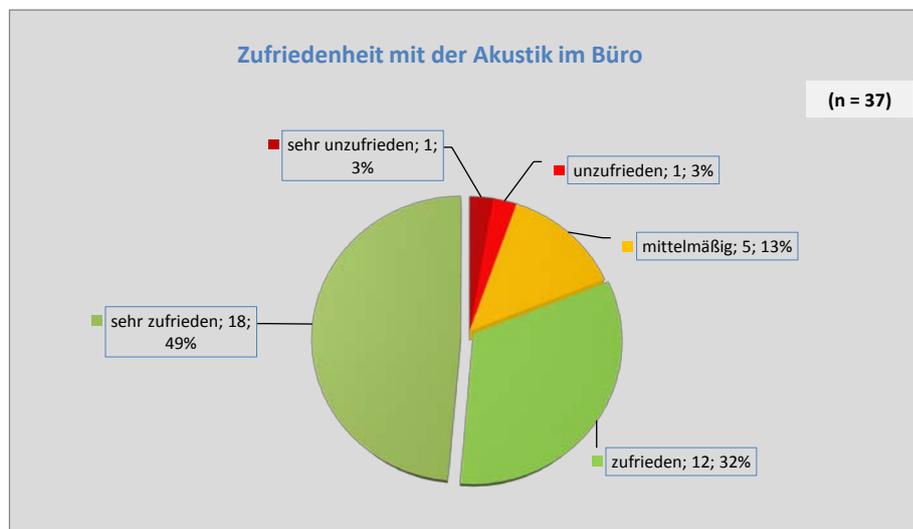


Abb.-Frage 35: Wie zufrieden bist Du mit der Akustik (Sprachverständlichkeit, Halligkeit etc.) in Deinem Büro?

36. Wie zufrieden bist Du in den vergangenen zwei Wochen **insgesamt** mit dem **Geräuschpegel** in Deinem Büro?

mittelmäßig

Sehr zu-       Sehr unzu-  
frieden  frieden

Wenn Du nicht zufrieden bist, was stört Dich am meisten?

---

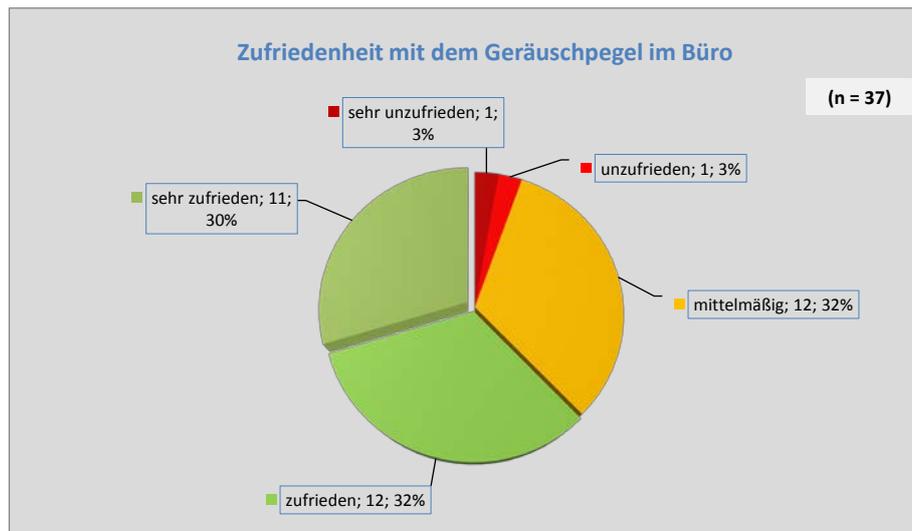


Abb.-Frage 36: Wie zufrieden bist Du in den vergangenen zwei Wochen insgesamt mit dem Geräuschpegel in Deinem Büro?

Bitte beantworte uns nun einige Fragen zum Thema **gesundheitliche Beschwerden** am Arbeitsplatz.

37. Wie häufig littest Du in den vergangenen zwei Wochen während Deiner Arbeitszeit an folgenden gesundheitlichen Beeinträchtigungen? (bitte alle Fälle ankreuzen)

	nie		manchmal		immer
Rasche Ermüdung	<input type="checkbox"/>				
Kopfschmerzen	<input type="checkbox"/>				
Trockene Nase	<input type="checkbox"/>				
Trockene Augen	<input type="checkbox"/>				
Trockene Haut/ Kopfhaut	<input type="checkbox"/>				
Halsschmerzen	<input type="checkbox"/>				
Laufende Nase	<input type="checkbox"/>				

Tränende Augen		<input type="checkbox"/>				
Verspannungen:	wo?	<input type="checkbox"/>				
<hr/>						
Generelles Unwohlsein		<input type="checkbox"/>				
Konzentrationschwäche		<input type="checkbox"/>				
Allergie:	welche?	<input type="checkbox"/>				
<hr/>						
Sonstiges:		<input type="checkbox"/>				
<hr/>						

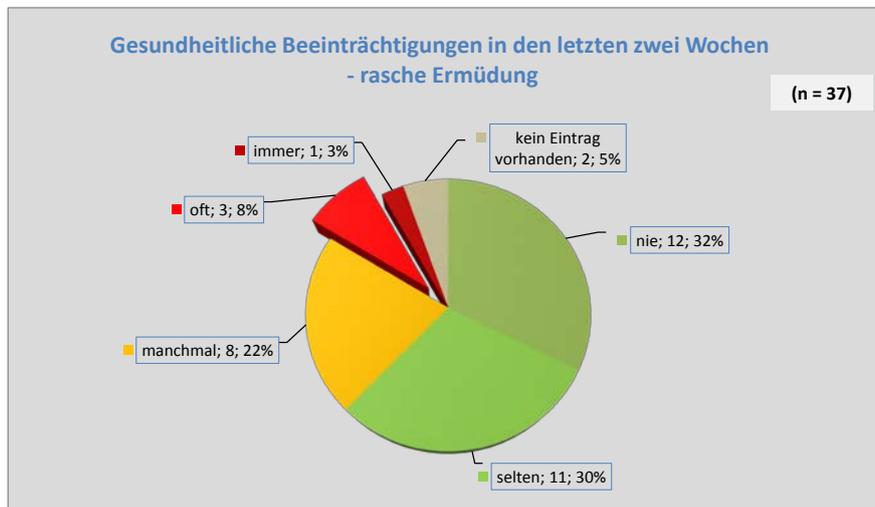


Abb.-Frage 37a) Rasche Ermüdung

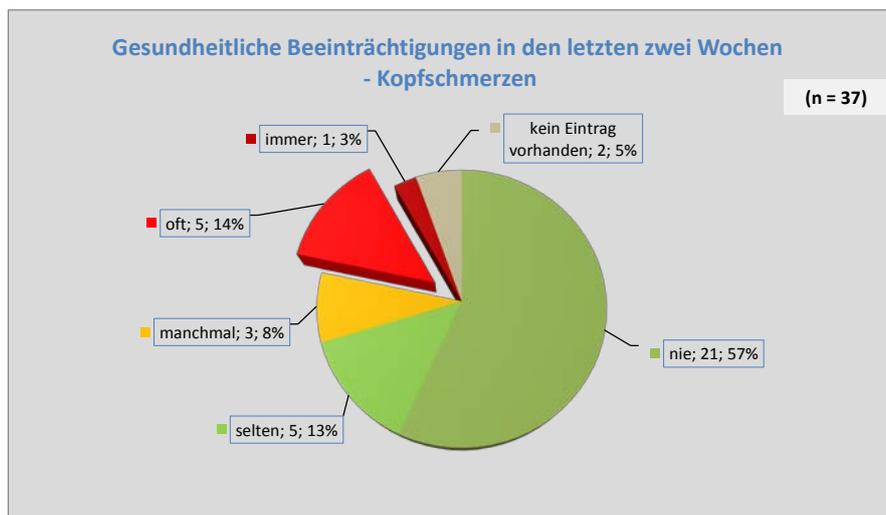


Abb.-Frage 37b) Kopfschmerzen

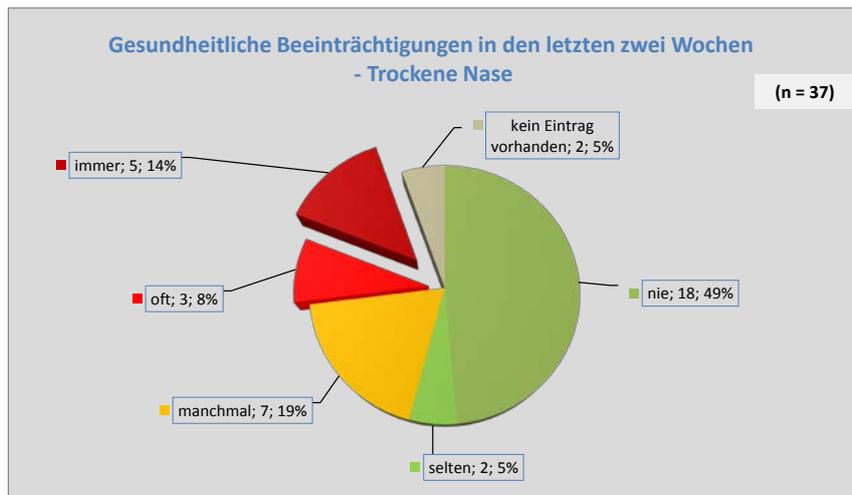


Abb.-Frage 37c) Trockene Nase

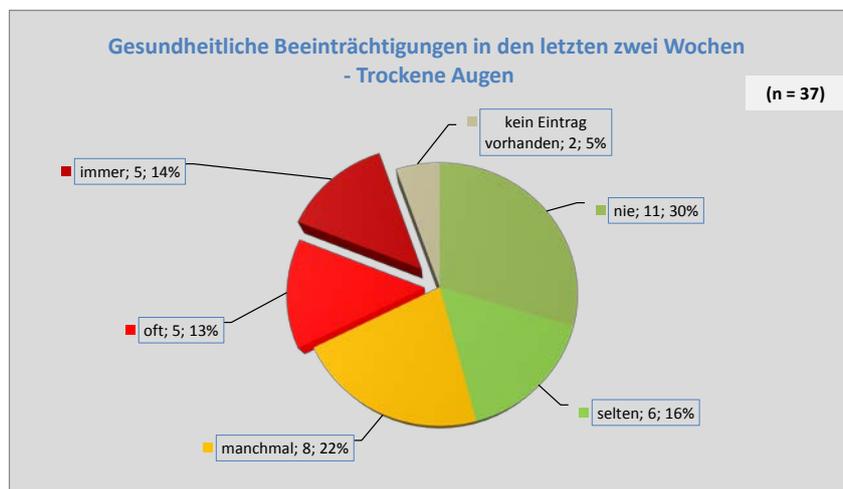


Abb.-Frage 37d) Trockene Augen

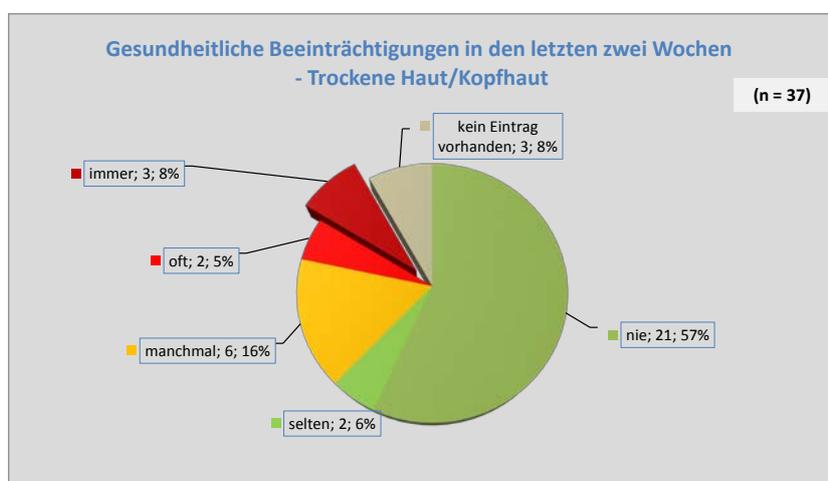


Abb.-Frage 37e) Trockene Haut/ Kopfhaut

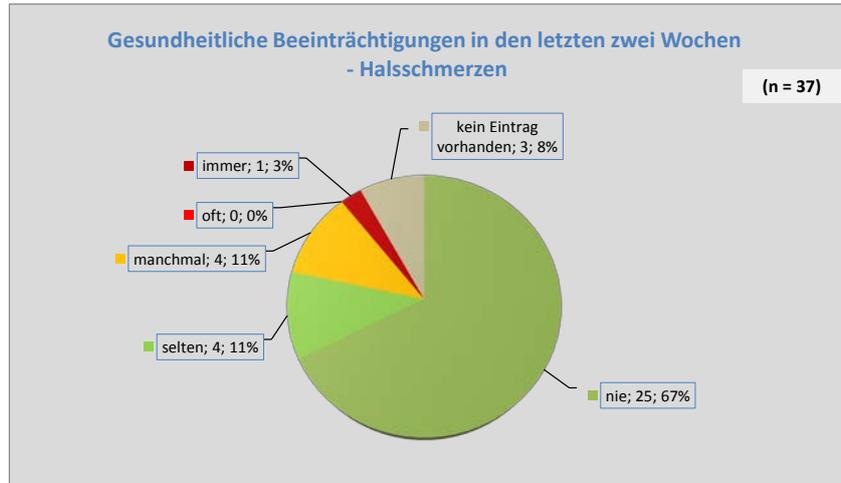


Abb.-Frage 37f) Halsschmerzen

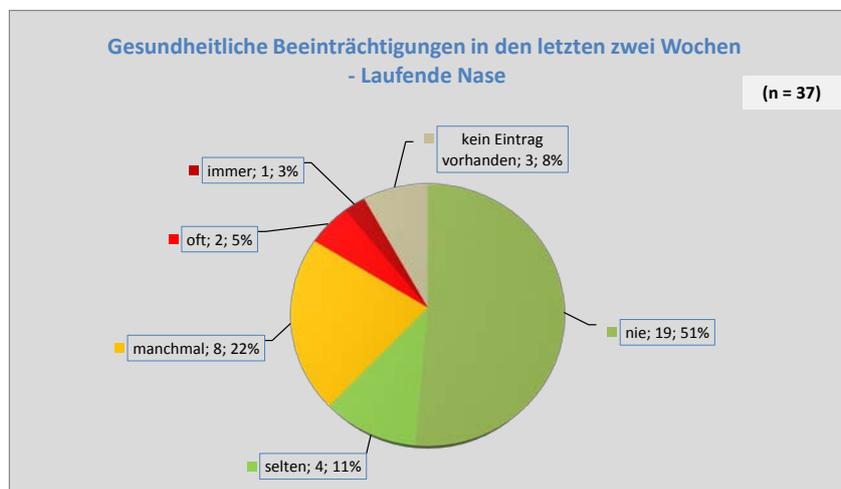


Abb.-Frage 37g) Laufende Nase

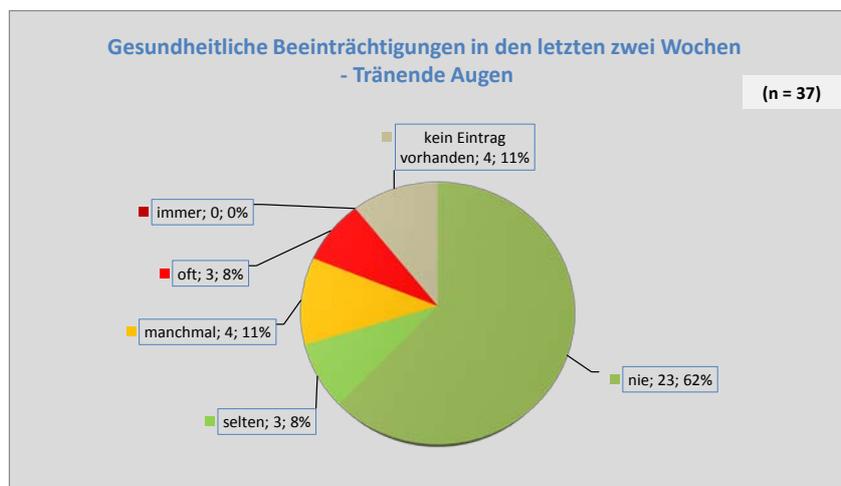


Abb.-Frage 37h) Tränende Augen

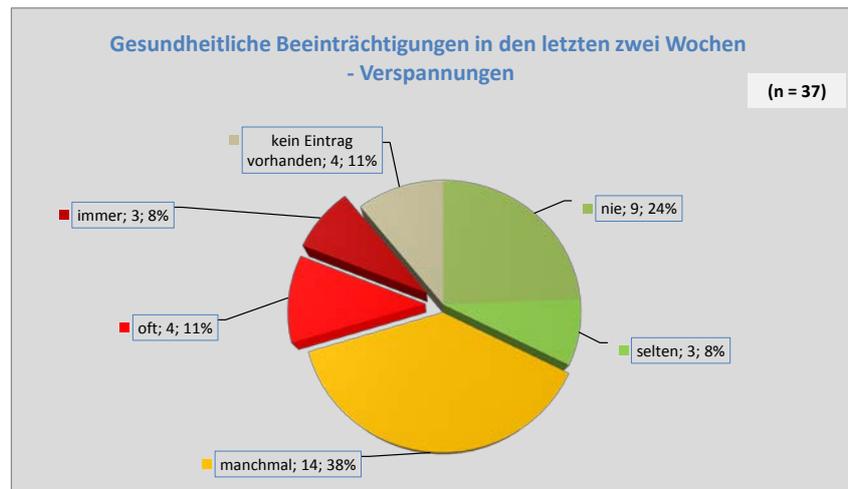


Abb.-Frage 37i) Verspannungen

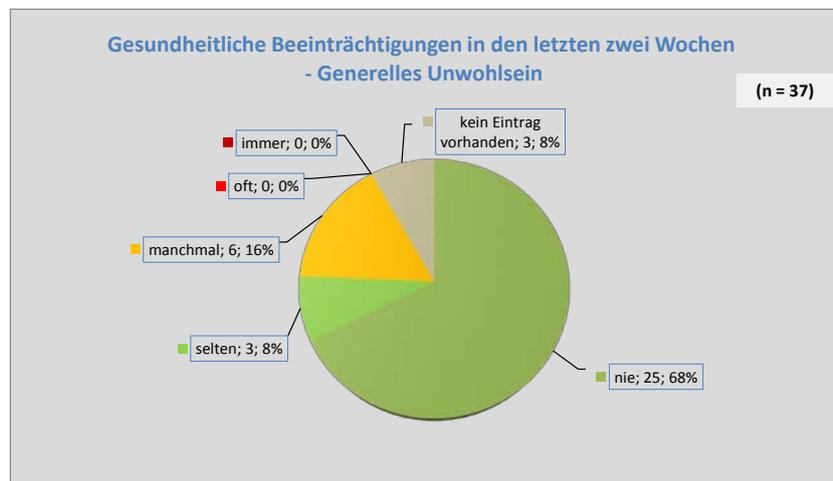


Abb.-Frage 37j) Generelles Unwohlsein

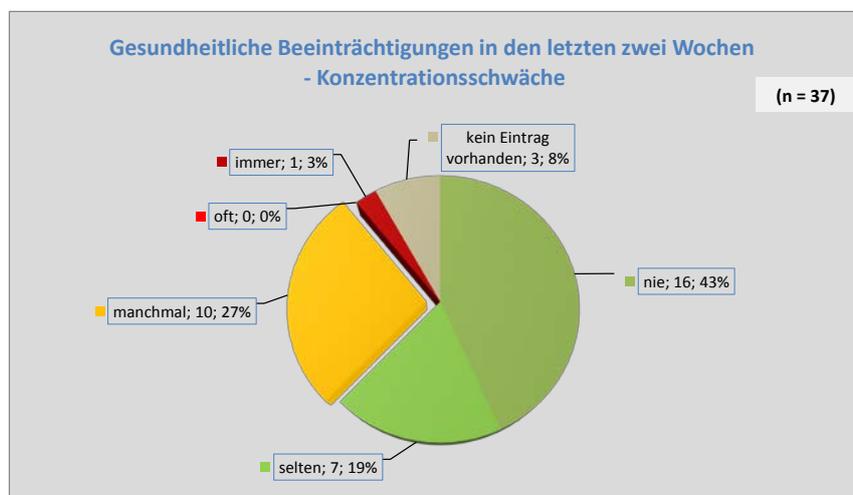


Abb.-Frage 37k) Konzentrationsschwäche

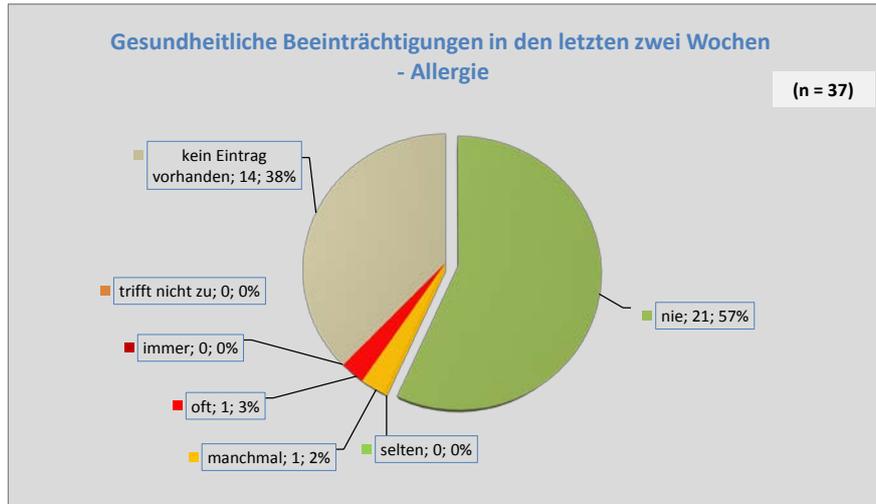


Abb.-Frage 37l) Allergie

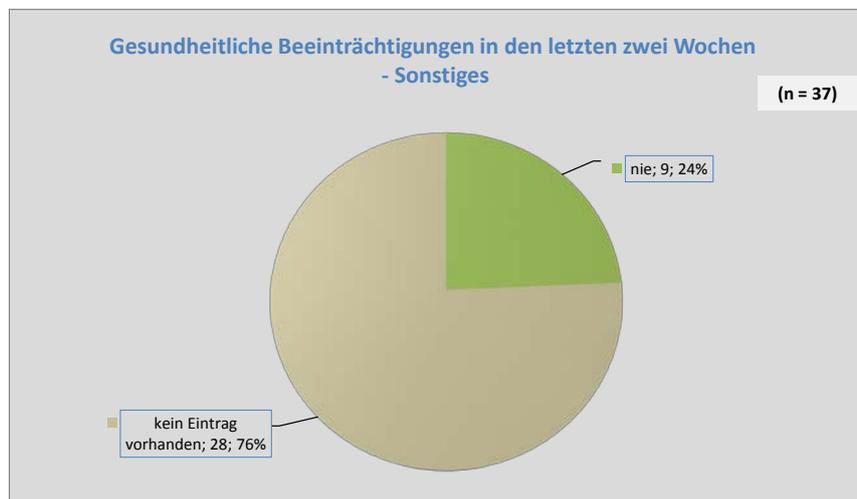


Abb.-Frage 37m) Sonstiges

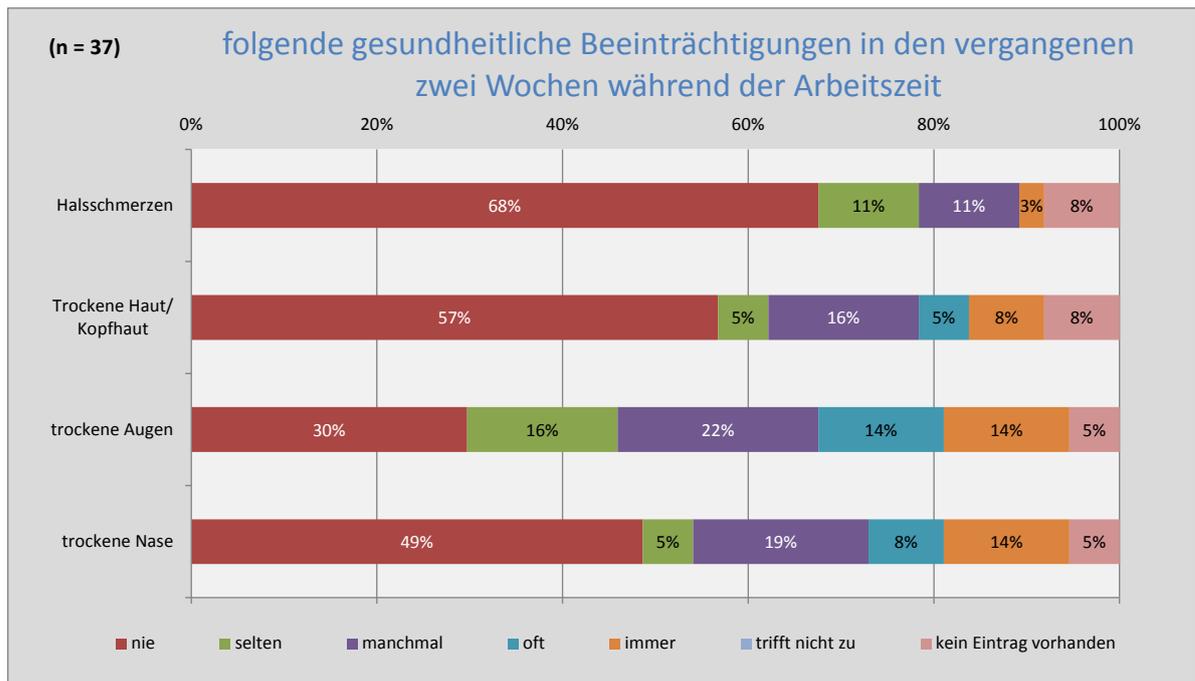


Abb.-Frage 37: Wie häufig littest Du in den vergangenen zwei Wochen während Deiner Arbeitszeit an folgenden gesundheitlichen Beeinträchtigungen?

38. Wie zufrieden bist Du **alles in allem** mit Deinem **Arbeitsplatz** (einschließlich allen abgefragten Faktoren wie Beleuchtung, Luftqualität, räumliche Gegebenheiten etc. ...)?

mittelmäßig

Sehr zu-  
frieden






Sehr unzu-  
frieden

Wenn Du nicht zufrieden bist, was stört Dich am meisten?

---



---

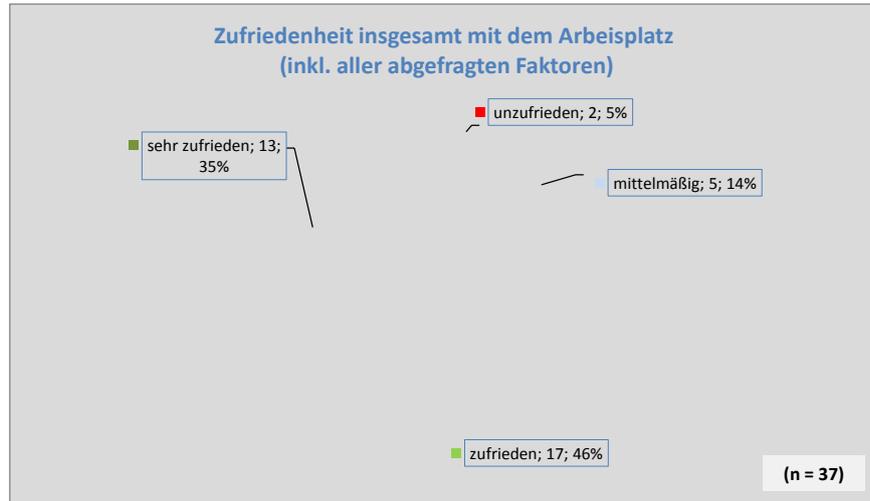


Abb.-Frage 38: Wie zufrieden bist Du alles in allem mit Deinem Arbeitsplatz (einschließlich allen abgefragten Faktoren wie Beleuchtung, Luftqualität, räumliche Gegebenheiten etc.)?

39. Waren die vergangenen zwei Wochen Deiner Meinung nach von den Witterungsverhältnissen und der Raumklimasituation in Deinem Büro repräsentativ für einen Winter in Darmstadt?

- Ja
- Nein



Abb.-Frage 39: Waren die vergangenen zwei Wochen Deiner Meinung nach von den Witterungsverhältnissen und der Raumklimasituation in Deinem Büro repräsentativ für einen Winter in Darmstadt?

Zum Abschluss bitten wir Dich noch um ein paar **statistische Angaben**.

40. Bist Du...?

weiblich

männlich

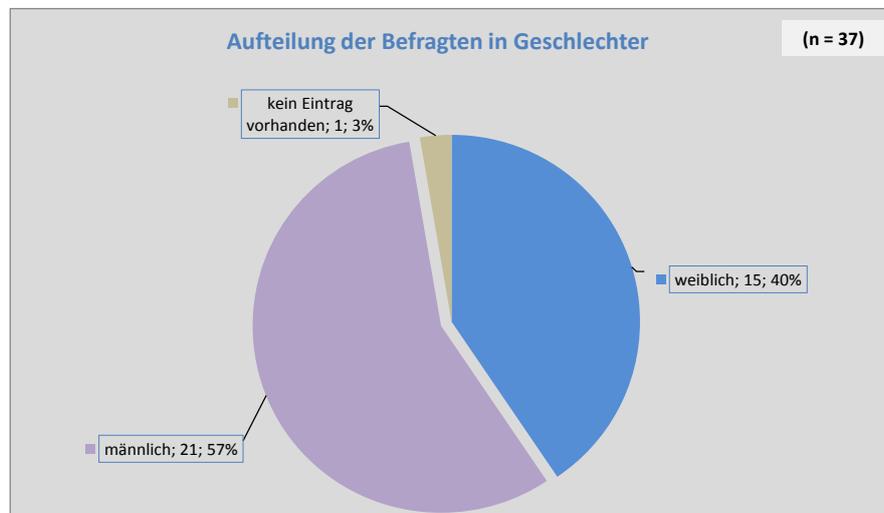


Abb.-Frage 40: Bist Du weiblich oder männlich?

41. Wie alt bist Du?

≤ 25

26 - 35

36 - 45

46 - 55

> 55

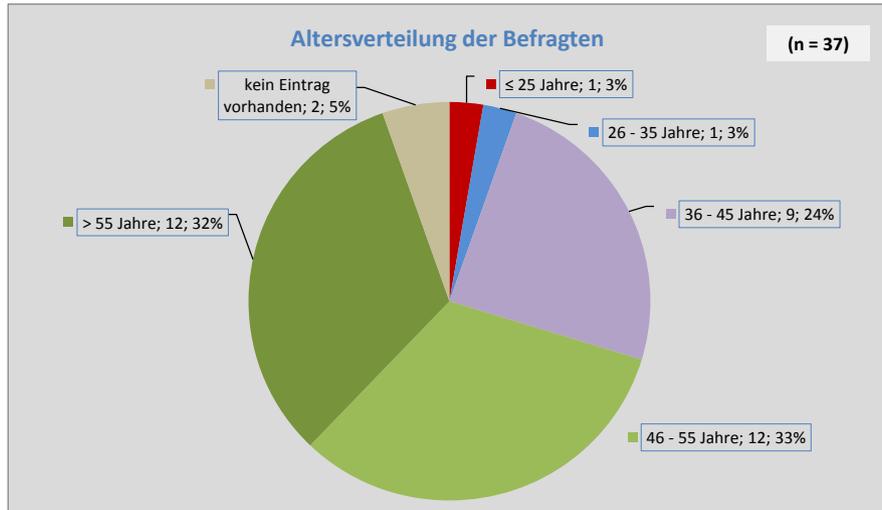


Abb.-Frage 41: Wie alt bist Du?

42. Wie viele Stunden arbeitest Du im Durchschnitt in der Woche?

\_\_\_ Stunden an \_\_\_ Tagen/Woche

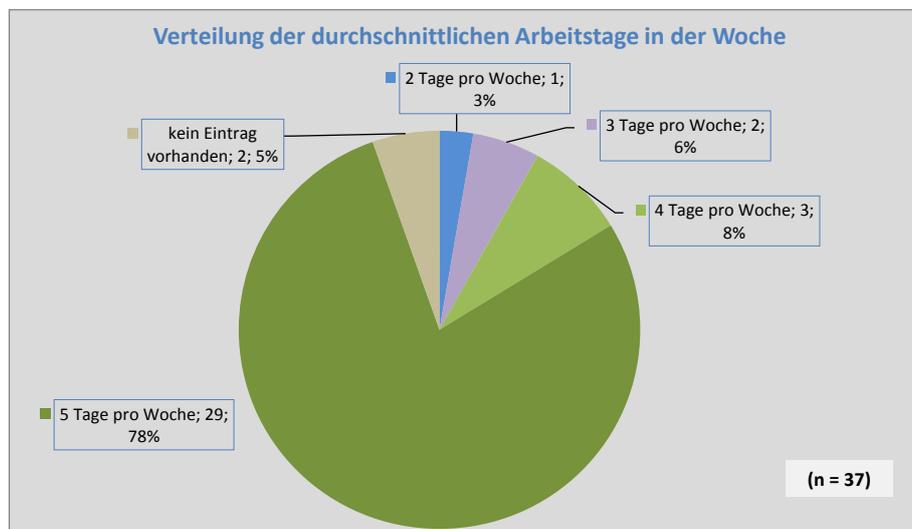


Abb.-Frage 42: Wie viele Stunden arbeitest Du im Durchschnitt in der Woche?

Wenn Du uns noch irgendetwas über Deinen Arbeitsplatz oder diesen Fragebogen mitteilen möchtest, kannst Du dies hier tun:

Mängel im Gebäude:

Positive Anmerkungen zum Gebäude:

Sonstiges (z.B. Kommentare zum Fragebogen):

Da es bei der Bewertung der Raumtemperatur einen Unterschied machen kann, wann der Fragebogen ausgefüllt wurde, trag hier doch bitte das **Datum** und die **Uhrzeit** ein, wann Du den Bogen ausgefüllt hast.

**Datum:** \_\_\_\_\_ **Uhrzeit** \_\_\_\_\_

## 10.2 Wichtigste Funktionen der Gebäudeautomation auf einen Blick

	Zielsetzung	Automatikfunktion	Manuelle Anpassungsmöglichkeit	Einflussgrößen der Regelung	Wichtige Randbedingungen
Beleuchtung Büro	Optimale Tageslichtnutzung und Energieeinsparung durch Abschaltung der Beleuchtung bei zu langer Abwesenheit und bei genügend Tageslichteinfall.	Abschaltung der Beleuchtung bei Abwesenheit >10 min und Überschreitung der eingestellten Helligkeit	Das Licht wird ausschließlich manuell eingeschaltet. Die Ausschaltung erfolgt aufgrund der beschriebenen Automatik oder kann manuell vorgenommen werden.	Bewegungsmelder misst Anwesenheit und Helligkeit im Raum	Der Sensor misst die Helligkeit am Arbeitsplatz.
Beleuchtung Flur, Toiletten, Küche	Optimale Tageslichtnutzung und Energieeinsparung durch präsenzgesteuerte Ein- und Ausschaltung der Beleuchtung	Einschaltung bei ungenügender Helligkeit und Anwesenheit, Abschaltung nach wenigen Minuten Abwesenheit	Keine	Analog Beleuchtung Büro	
Blendschutz	Vermeidung von Blendung am Bildschirmarbeitsplatz unabhängig vom außen liegenden Sonnenschutz.	Keine Nutzung der außen liegenden Jalousien im Winter, um möglichst hohe Solarenergieeinträge zu realisieren.	Der innen liegende Blendschutz wird ausschließlich manuell betätigt.	Keine	Sollte trotzdem Blendung auftreten, können die außen liegenden Jalousien manuell betätigt werden.
Jalousien	Schutz des Gebäudes gegen Überhitzung im Sommer. Bei Anwesenheit während der Verschattung Tageslichtlenkung in die Räume. Nur auf der Südseite vorhanden.	Im Sommer bei hoher Einstrahlung werden die Jalousien heruntergefahren, Einstellung der Lamellenstellung zur Lichtlenkung erfolgt nur bei Anwesenheit, Aktualisierung der Lamellenstellung stündlich entsprechend des aktuellen Sonnenstandes.	Die manuelle Betätigung der Jalousien schaltet die Automatik sowie die Nachführung der Lamellenstellung aus. Eine manuelle Zurückstellung auf automatisierten Betrieb ist nicht möglich.	Außentemperatur Einstrahlung Anwesenheit Windgeschwindigkeit Niederschlag	Der automatisierte Betrieb wird um 12:00 Uhr sowie 16:00 Uhr und bei Abwesenheit von länger als 30 min wieder aufgenommen. Bei zu starkem Wind fahren die Jalousien automatisch hoch und sind nicht mehr manuell steuerbar.

Fenster	Hoher Schallschutz, sommerliche Nachtlüftung zur Kühlung des Gebäudes	Sommerliche Nachtlüftung: automatisches Öffnen und Schließen eines Fensters in den Büros. Im Sommer sollten die Bürotüren offen sein.	Manuelle Öffnung des Fensters ist immer möglich, ist aber zu Lüftungszwecken nicht erforderlich.	Außentemperatur Innentemperatur Windgeschwindigkeit Niederschlag	
Lüftung	Kontrollierte Lüftung mit hoher Wärmerückgewinnung zur Verringerung des Energieverbrauchs bei hoher Luftqualität	Zeitabhängige Regelung: Hygienisch notwendiger Mindestluftwechsel während der regulären Arbeitszeit, Grundlüftung nachts und am Wochenende	Manuelle Erhöhung des Luftvolumenstromes ist in den Besprechungsräumen und im großen Saal auf Tastendruck möglich. Rückstellung automatisch nach 2 Stunden.	Zeitabhängige Regelung	

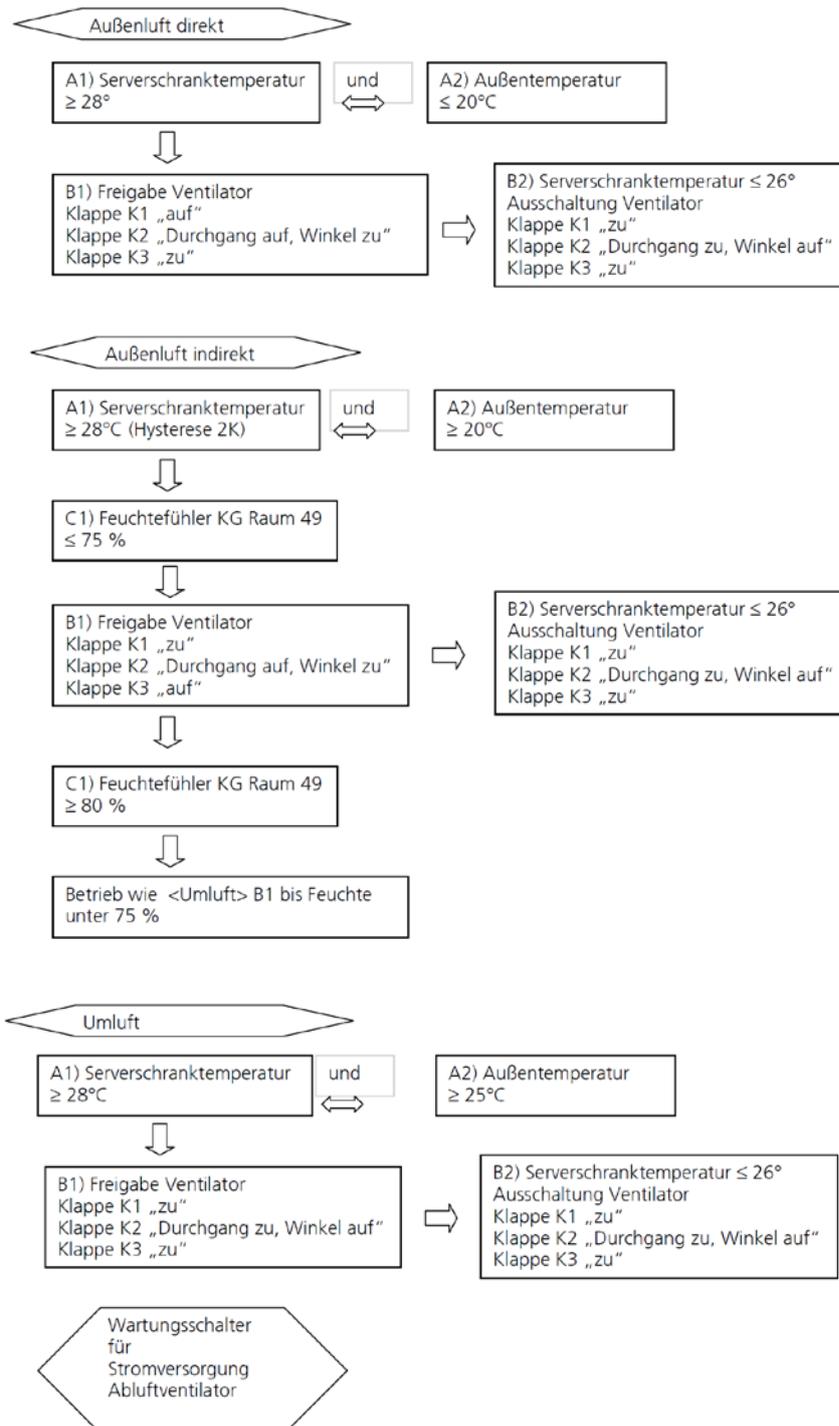
### 10.3 Funktionsbilder der Anlagentechnik (Planungsphase)

Funktionsbild für die Steuerung der Server-Lüftung (Quelle: planungsgruppe Drei)

planungsgruppe **DREI**  
Architekten + Ingenieure

Rheinstraße 65

Funktionsbild Steuerung Serverraum-Lüftung (Stand 22.12.2010)

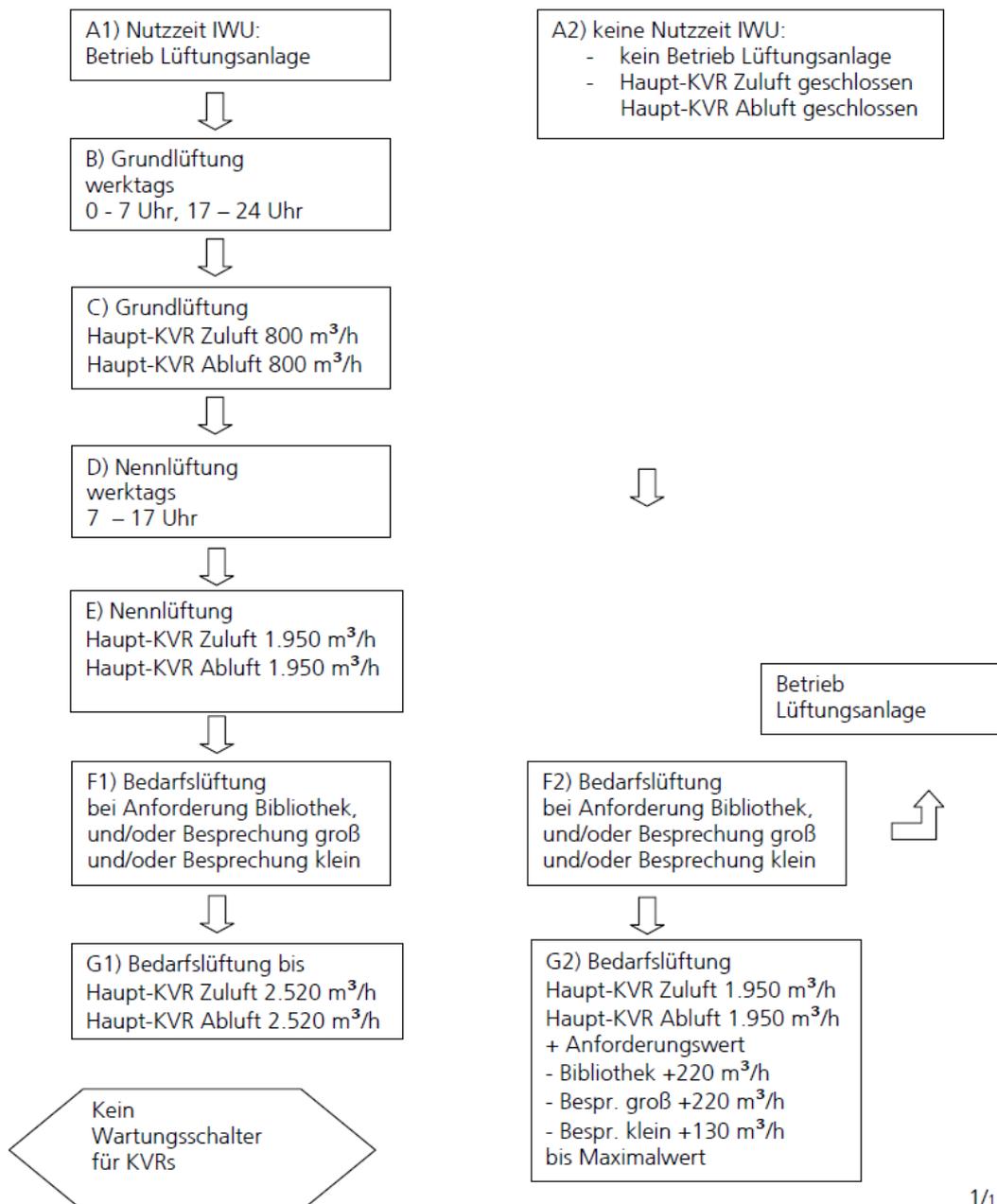


## Funktionsbild der Lüftungsanlage im Bereich IWU (Quelle: planungsgruppe Drei)

planungsgruppe **DREI**  
Architekten + Ingenieure

BV Rheinstraße 65

Funktionsbild Bereich IWU (Stand 22.12.2010)



Funktionsbild für die Steuerung der Sommer-Nachtlüftung (Quelle: planungsgruppe Drei)

planungsgruppe **DREI**  
Architekten + Ingenieure

BV Rheinstraße 65

Funktionsbild Steuerung Sommer-Nachtlüftung (Stand 22.12.2010)

