

Hochschule Merseburg (FH)  
University of Applied Sciences  
Fachbereich: Informatik und Kommunikationssysteme



## **Bachelorarbeit**

Untersuchungen zur Optimierung raumluftechnischer Anlagen  
im Universitätsklinikum Halle (Saale)

Vorgelegt von:	Marcus Dölz
Vorgelegt am:	22.09.2016
Matrikelnummer:	21796
Studiengang:	Elektro- und Informationstechnik
Spezialisierung:	Industrie- und Gebäudeautomation
Betreuer:	Prof. Dr.-Ing. Peter Helm (Hochschule Merseburg) Dipl.-Ing Marc Neumann (Universitätsklinikum Halle)

## **Selbständigkeitserklärung**

Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und keine anderen, als die im Literaturverzeichnis angegebenen Quellen verwendet habe.

Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten oder noch nicht veröffentlichten Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Die Zeichnungen oder Abbildungen in dieser Arbeit sind von mir selbst erstellt oder mit einem entsprechenden Quellennachweis versehen. Diese Arbeit ist in gleicher oder ähnlicher Form noch bei keiner anderen Prüfungsbehörde eingereicht worden.

Merseburg, den

.....  
Marcus Dölz

## **Danksagung**

An dieser Stelle möchte ich mich bei den Personen bedanken, die mich beim Schreiben meiner Bachelorarbeit unterstützt haben und mir mit Rat und Tat zur Seite standen.

Mein ausdrücklicher Dank gilt den beiden Betreuern und Gutachtern dieser Arbeit, Prof. Dr.-Ing. Peter Helm und Dipl.-Ing. Marc Neumann. Weiterhin möchte ich mich bei den Mitarbeitern des Universitätsklinikum Halle für die fachliche Beratung bedanken. Abschließend danke ich meiner langjährigen Freundin Katharina Wolf für die alltägliche Unterstützung während des gesamten Studiums.

## Inhaltsverzeichnis

<b>Selbständigkeitserklärung .....</b>	<b>I</b>
<b>Danksagung .....</b>	<b>II</b>
<b>Inhaltsverzeichnis.....</b>	<b>III</b>
<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>V</b>
<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>VI</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis.....</b>	<b>VII</b>
<b>Formelzeichenverzeichnis .....</b>	<b>VIII</b>
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>11</b>
1.1 Das Universitätsklinikum Halle (Saale).....	11
1.2 Technische Betriebsanlagen.....	12
1.3 Projektbeschreibung .....	12
<b>2 Raumluftechnische Anlagen.....</b>	<b>13</b>
2.1 Einleitung.....	13
2.2 Aufbau .....	13
2.2.1 Gesamtanlage .....	13
2.2.2 Ventilator .....	13
2.2.3 Heiz- und Kühlregister .....	14
2.2.4 Wärmerückgewinnung .....	14
2.2.5 Luftbefeuchter.....	14
2.2.6 Luftfilter.....	15
2.2.7 Klappen .....	15
<b>3 Bestandsaufnahme.....</b>	<b>16</b>
3.1 Überblick.....	16
3.2 Aufbau der Dachzentralen .....	16
3.3 Zentrale Luftaufbereitungen .....	17
3.3.1 Allgemeines .....	17
3.3.2 Wärme- und Kälterückgewinnung .....	18
3.3.3 Adiabatische Fortluftkühlung.....	20
3.4 Nachgeschaltete RLT-Anlagen .....	22

3.5	Vorhandene RLT-Anlagen .....	24
<b>4</b>	<b>Verbrauchsermittlung.....</b>	<b>26</b>
4.1	Überblick.....	26
4.2	Erläuterung zur Preisbildung.....	26
4.3	Elektroenergie.....	29
4.4	Modell zur Verbrauchsermittlung.....	30
4.4.1	Erläuterung.....	31
4.4.2	Herangehensweise .....	31
4.4.3	Kühlleistung ZLA.....	32
4.4.4	Heizleistung ZLA.....	39
4.4.5	Zusätzliche Heizleistung ZLA.....	40
4.4.6	Bedarf nachgeschaltete RLT-Anlagen .....	41
4.4.7	Gesamtergebnis der Heiz- und Kühlleistung .....	42
4.4.8	Energieverbrauchskennzahlen laut Modell.....	43
4.4.9	Wasserverbrauch.....	44
4.4.10	Validierung des Modells.....	45
<b>5</b>	<b>Optimierungspotenzial .....</b>	<b>48</b>
5.1	Allgemeine Hinweise.....	48
5.2	Temperaturanpassung ZLA .....	48
5.3	Absenkbetrieb.....	50
5.4	Filterwechsel in RLT-Anlagen .....	55
5.5	Demontage eines Wärmetauschers .....	62
5.6	Aktivkohlefilter.....	63
5.7	Regenwassernutzung .....	65
5.8	Wirkungsgrad der AFLK.....	71
5.9	Temperaturanpassung im FG 1 .....	75
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>77</b>
6.1	Überblick.....	77
6.2	Bisherige Verbrauchskennzahlen.....	77
6.3	Optimierte Verbrauchskennzahlen .....	79
6.4	Ausblick .....	82
<b>7</b>	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>83</b>
<b>8</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>85</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Luftaufnahme des UKH .....	11
Abbildung 2: Aufbau der Dachzentralen .....	17
Abbildung 3: Übersichtschema einer ZLA .....	18
Abbildung 4: WRG und AFLK in ZLAen .....	19
Abbildung 5: Temperaturverlauf mit Heiz- und Kühlleistung im FG 2.....	21
Abbildung 6: Nachgeschaltete RLT-Anlage.....	23
Abbildung 7: Genutzte Kühlleistung FG 2.....	36
Abbildung 8: Abgerufene Heiz- und Kühlleistung nach Außentemperatur im FG 2.....	42
Abbildung 9: Jahresverteilung des Wärmeenergieverbrauchs FG 2.....	43
Abbildung 10: Validierung der Simulationstemperatur.....	45
Abbildung 11: Wärme und Kälteenergieverbrauch als Funktion der Solltemperatur der ZLA.....	49
Abbildung 12: vorher/nachher Vergleich der Wärmeenergieverteilung auf die Tageszeiten .....	52
Abbildung 13: Volumenstrom als Funktion des dynamischen Drucks.....	53
Abbildung 14: Differenzdruckentwicklung ZLA 30 bei halbjährlichen FW .....	57
Abbildung 15: Differenzdruckentwicklung RLT 26 Abluft bei 2 jährigen FW.....	60
Abbildung 16: Demontierter Wärmetauscher.....	63
Abbildung 17: Demontierte Aktivkohlefilter .....	64
Abbildung 18: Jahresverteilung des Wasserverbrauchs der AFLK .....	68
Abbildung 19: Detailansicht Regenwasser Monat Juni 2016 .....	69
Abbildung 20: Wirkungsgradvergleich der 4 AFLKen .....	71
Abbildung 21: Wirkungsgradsteigerung AFLK FG 3 .....	72
Abbildung 22: Wirkungsgradsteigerung AFLK FG 2 .....	73
Abbildung 23: Mögliche Zulufttemperatur im FG 2 bei höherer Wassermenge.....	74
Abbildung 24: Heiz- und Kühlleistungsverteilung im FG 1 .....	75
Abbildung 25: Kostenverteilung ermittelter Verbräuche.....	79
Abbildung 26: Kostenverteilung optimiert .....	81

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht wesentlicher Daten der RLT-Anlagen .....	25
Tabelle 2: Versorgungskosten.....	27
Tabelle 3: Elektroenergieverbrauch Lüfter.....	30
Tabelle 4: Wärme- und Kälteenergieverbrauch .....	44
Tabelle 5: Berechnete Wasserverbräuche der AFLK.....	44
Tabelle 6: Validierung Wärmemengen .....	46
Tabelle 7: vorher/nachher Vergleich Temperaturanpassung ZLA.....	49
Tabelle 8: Öffnungszeiten der absenkbaren Bereiche .....	51
Tabelle 9: Übersicht der Absenkwerte.....	54
Tabelle 10: vorher/nachher Vergleich Absenkbetrieb .....	54
Tabelle 11: Differenzdrücke Zu- und Abluftfilter.....	56
Tabelle 12: Rentabilität halbjährlicher FW in der Zuluft .....	59
Tabelle 13: Rentabilität 2 jähriger FW in der Abluft .....	61
Tabelle 14: Potenziale ohne Aktivkohlepatronen.....	65
Tabelle 15: Elektroenergieverbrauchsrückgang ohne Aktivkohlefilter .....	65
Tabelle 16: Verschnittwasserreduzierung.....	70
Tabelle 17: Temperaturanpassung RLT 20 .....	76
Tabelle 18: Verbrauchskennzahlen 7/2015 bis 6/2016 .....	78
Tabelle 19: Einkaufs- bzw. Erzeugungspreise.....	78
Tabelle 20: Gesamtergebnis .....	81

## Abkürzungsverzeichnis

ADP	Advanced Data Processing
AFLK	Adiabate Fortluftkühlung
FW	Filterwechsel
GLT	Gebäudeleittechnik
KVS	Kreislaufverbundsystem
MLU	Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg
PDM	Prozess Daten Manager
RLT	Raumlufttechnik
UKH	Universitätsklinikum Halle (Saale)
VE	voll entsalzt
WRG	Wärmerückgewinnung
ZLA	zentrale Luftaufbereitungsanlage

## Formelzeichenverzeichnis

$A$	Querschnittsfläche Lüftungskanal	[m <sup>2</sup> ]
$A_{AF}$	Ausbeutefaktor	[]
$c_{pD}$	spezifische Wärmekapazität Wasserdampf	[kJ/kg K]
	$c_{pD} = konstant = 1,86 \frac{kJ}{kg \cdot K}$	
$c_{pL}$	spezifische Wärmekapazität trockener Luft	[kJ/kg K]
	$c_{pL} = konstant = 1,006 \frac{kJ}{kg \cdot K}$	
$h_{AU}$	Enthalpie der Außenluft	[kJ/kg]
$h_f$	Enthalpie feuchter Luft	[kJ/kg]
$h_{vW}$	Verdampfungsenthalpie von Wasser	[kJ/kg]
$h_{vws}$	Verdampfungsenthalpie Wasser am Siedepunkt	[kJ/kg]
	$h_{vws} = 2255 \text{ kJ/kg}$	
$h_{ZU}$	Enthalpie der Zuluft	[kJ/kg]
$K_S$	Salzzusatzkosten	[€/m <sup>3</sup> ]
$K_{TW}$	Trinkwasserkosten	[€/m <sup>3</sup> ]
$K_V$	Verschnittwasserkosten	[€/m <sup>3</sup> ]
$K_W$	Wartungskosten Wasseraufbereitung	[€/m <sup>3</sup> ]
$\dot{m}_{ZU}$	Zuluftmassenstrom	[kg/h]
$\dot{m}_{AB}$	Abluftmassenstrom	[kg/h]
$p$	Normaldruck	[bar]
	$p = 1,013 \text{ bar}$	
$p_d$	dynamischer Druck Lüftungskanal	[Pa]
$\Delta P_{FW26AB}$	Leistungsreduzierung durch FW RLT 26 Abluft	[kW]
	$\Delta P_{FW26AB} = 0,05 \text{ kW}$	
$\Delta p_{FW26AB}$	Differenzdrucksenkung über Filter RLT 26 Abluft	[Pa]
	$\Delta p_{FW26AB} = 10 \text{ Pa}$	
$p_{s_{Au}}$	Wasserdampfdruck der Außenluft bei Sättigung	[bar]
$P_{\text{tats. } ZU_i}$	Leistungsmittelwert tatsächlich RLT 19-41	[W]

$\Delta P_{ZLA30}$	Leistungsreduzierung durch FW ZLA 30 $\Delta p_{ZLA30} = 2,7 \text{ kW}$	[kW]
$\Delta p_{ZLA30}$	Differenzdrucksenkung über Filter ZLA 30 $\Delta p_{ZLA30} = 55 \text{ Pa}$	[Pa]
$\dot{Q}_{AFLK}$	Kühlleistung adiabate Fortluftkühlung	[kW]
$\dot{Q}_{Ei}$	Heizleistung der entsprechenden Anlage	[kW]
$\dot{Q}_K$	Kühlleistung AFLK berechnet	[kW]
$\dot{Q}_{Ki}$	Kühlleistung der entsprechenden Anlage	[kW]
$\dot{Q}_{ZLA}$	Heizleistung Zusatzerhitzer	[kW]
$R_D$	Gaskonstante für Wasserdampf $R_D = konstant = 461,5 \frac{\text{J}}{\text{kg}} \text{K}$	[J/kg K]
$R_L$	Gaskonstante für Luft $R_L = konstant = 287,2 \frac{\text{J}}{\text{kg}} \text{K}$	[J/kg K]
$T$	Temperatur	[K]
$T_{AU}$	Außenlufttemperatur	[K]
$T_{krit}$	kritische Temperatur Wasser $T_{krit} = 647,1 \text{ K}$	[K]
$T_{sp}$	Siedetemperatur Wasser $T_{sp} = 373,15 \text{ K}$	[K]
$\Delta t_{Jahr}$	Jahresbetriebsstunden	[h]
$t_{Jahr}$	Tage pro Jahr	[d]
$t_{Tag}$	Stunden pro Tag	[h]
$\dot{V}$	Volumenstrom	[m <sup>3</sup> /h]
$\dot{V}_{ZU}$	Volumenstrom Zuluft	[m <sup>3</sup> /h]
$\dot{V}_{ZUi}$	Volumenstrom der entsprechenden Anlage	[m <sup>3</sup> /h]
$\Delta W_{FWZLA30}$	Elektroenergieeinsparung durch FW ZLA 30	[kWh]
$W_{Jahr}$	Jahresenergieverbrauch gesamt RLT 19-41	[kWh]
$W_{Jahr_i}$	Jahresenergieverbrauch einzeln RLT 19-41	[kWh]
$x$	Feuchtegehalt	[g/kg]
$x_{AU}$	Feuchtegehalt Außenluft	[g/kg]
$\vartheta$	Temperatur	[°C]

$\vartheta_{ABa}$	angenommene Ablufttemperatur	[°C]
$\vartheta_{AU}$	Außenlufttemperatur	[°C]
$\Delta\vartheta_{Erh}$	Temperaturerhöhung Zusatzheizung	[°C]
$\vartheta_{FK}$	Feuchtkugelttemperatur	[°C]
$\vartheta_{ZU}$	gemessene Zulufttemperatur	[°C]
$\vartheta_{ZUs}$	simulierte Zulufttemperatur der ZLA	[°C]
$\vartheta_{ZUw}$	Sollwert der Zulufttemperatur	[°C]
$\vartheta_{ZUwi}$	Sollzulufttemperatur der entsprechenden Anlage	[°C]
$\vartheta_{ZUWRG1}$	erreichbare Zulufttemperatur AFLK	[°C]
$\vartheta_{ZUWRG2}$	Zulufttemperatur über WRG im Heizfall	[°C]
$\vartheta_{ZUü}$	Zulufttemperatur ohne WRG und AFLK	[°C]
$\eta_{AFLK}$	Wirkungsgrad der AFLK	[%]
$\rho_{AU}$	Dichte feuchter Außenluft	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_{AUe}$	ermittelte Dichte der Außenluft	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_f$	Dichte feuchter Luft bei 20°C	[kg/m <sup>3</sup> ]
	$\rho_f = 1,2 \frac{kg}{m^3}$	
$\rho_{ZUs}$	Dichte der Zuluft aus der ZLA	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\varphi_{ABm}$	mittlere relative Abluftfeuchte	[%]
	$\varphi_{ABm} \cong 51 \%$	
$\Phi_{AU}$	Rückwärmezahl bezogen auf die Außenluft laut Datenblatt	[]
$\Phi_{AUt}$	tatsächliche Rückwärmezahl bezogen auf die Außenluft	[]
$\varphi_{AU}$	relative Feuchte der Außenluft	[%]
$\varphi_{geo}$	mittlere relative Außenluftfeuchte	[%]
	$\varphi_{geo} = 66,65 \%$	

## 1 Einleitung

### 1.1 Das Universitätsklinikum Halle (Saale)

Die Stadt Halle (Saale) verfügt über mehrere Krankenhäuser. Das mit Abstand größte von Ihnen ist das Universitätsklinikum Halle (Saale) (UKH), welches seit dem Jahr 1998, mit kleineren Unterbrechungen, ständig erweitert wurde.

Heute besteht es aus 10 modernen Funktionsgebäuden, zwei 10 geschossige Bettenhäuser und einigen weiteren Gebäuden und bietet Arbeitsplätze für ca. 3000 Mitarbeiter und ca. 500 Auszubildende. Jährlich lassen sich ca. 159.000 Patienten behandeln, davon 39.000 stationär. Das ausgebaute Krankenhaus verfügt außerdem über 24 Operationssäle, zahlreiche Kliniken aus unterschiedlichen medizinischen Bereichen und Einrichtungen für Forschung und Lehre.<sup>1</sup> Abbildung 1 zeigt eine Luftaufnahme des UKH.



**Abbildung 1: Luftaufnahme des UKH**

Quelle: [www.medizin.uni-halle.de](http://www.medizin.uni-halle.de)

---

<sup>1</sup> in Anlehnung an [17]

## 1.2 Technische Betriebsanlagen

Das UKH ist mit einer Vielzahl technischer Betriebsanlagen ausgerüstet, welche über eine moderne Gebäudeleittechnik (GLT) automatisiert betrieben werden. Zu dieser gebäudetechnischen Ausrüstung zählen Anlagen der Heizungs-, Lüftungs- und Klimatechnik, sowie Anlagen zur Elektroenergieversorgung.

Die vorhandenen technischen Versorgungsanlagen der Heizungs-, Lüftungs- und Klimatechnik, der GLT und deren Zusammenwirken wurde im Praktikumsbericht mit dem Thema: "Vorstellung der technischen Versorgungsanlagen im Universitätsklinikum Halle (Saale)" einleitend beschrieben, aus diesem Grund wird an dieser Stelle auf den Bericht verwiesen.

## 1.3 Projektbeschreibung

Die Energiepreise sind in den letzten Jahren stark gestiegen und es ist zu erwarten, dass diese auch zukünftig weiter ansteigen. Deshalb werden immer häufiger Energieeinsparmaßnahmen getroffen und technische Betriebsanlagen hinsichtlich ihres Energieverbrauchs weiterentwickelt.

Zur Gewährleistung einer höheren energetischen Effizienz, Ausfallsicherheit und Zufriedenstellung von Nutzerbedürfnisse, werden Systeme der Raumluftechnik (RLT) ebenfalls stets verbessert und weiterentwickelt. Die Erneuerung bestehender Altanlagen ist demzufolge eine interessante Option. Nur leider ist diese Variante mit sehr hohen Neuanschaffungskosten verbunden und wird deshalb nur sehr selten umgesetzt. Aus diesem Grund ist die ständige Optimierung und Anpassung vorhandener Technik ein wichtiges Instrument, um nicht getätigten Investitionen entgegenzuwirken. Zur Aufgabe steht deshalb die Optimierung der raumluftechnischen Anlagen im UKH. Hauptaugenmerk soll dabei der Betrieb der RLT-Anlagen im Bereich der Dachzentralen des Neubaus im Funktionsgebäude 1 bis 4 sein. Energieeinsparmaßnahmen, sowie der optimale Betrieb der vorhandenen Technik und die damit verbundene Kostenreduzierung sind zu prüfen.

## **2 Raumluftechnische Anlagen**

### **2.1 Einleitung**

RLT-Anlagen dienen in erster Linie der Be- und Entlüftung verschiedener Bereiche. Die Anforderungen an die vorhandenen Lüftungsgeräte sind sehr unterschiedlich. In manchen Fällen reicht eine einfache Belüftung mit gefilterter und vorgeheizter Luft aus. Häufig sind aber wesentlich mehr Luftbehandlungsschritte erforderlich, um den Anforderungen an die Raumluf gerecht zu werden. Im Folgenden sollen an Hand des Aufbaus von RLT-Anlagen die wichtigsten Bauteile vorgestellt werden, wie sie im UKH zum Einsatz kommen. Insbesondere wird dabei auf die vorhandene Anlagentechnik der Gebäude entlang der Ernst-Grube-Straße eingegangen.

### **2.2 Aufbau**

#### **2.2.1 Gesamtanlage**

RLT-Anlagen werden heutzutage hauptsächlich als Zentralgeräte betrieben. Das bedeutet, dass sämtliche Luftbehandlungselemente räumlich betrachtet kurz hintereinander angeordnet sind und die Anlagen so ihre typische Blockform erhalten. Teilweise ist diese Bauform aus Platzgründen nicht immer möglich, dann müssen die einzelnen Elemente räumlich getrennt aufgestellt werden. Grundsätzlich kann man Lüftungsgeräte in Zu- und Abluftanlagen unterteilen, wobei der Zuluftteil der Belüftung und der Abluftteil der Entlüftung dienen.

#### **2.2.2 Ventilator**

Der Ventilator ist erforderlich, um innerhalb der Lüftungsanlage die Luft bei einem bestimmten Volumenstrom zu fördern. Dabei entsteht ein Überdruck an der Ausgangsseite, welcher ausreicht den Strömungswiderstand aller übrigen Anlagenteile zu überwinden. Zumeist werden sie mit Hilfe von frequenzumrichterregerten Motoren angetrieben. So wird ermöglicht, dass die vorgegebene Luftmenge oder ein Sollruck auch bei veränderten Luftwiderständen erreicht wird. Ventilatoren sind in unterschiedlichen Ausführungen erhältlich.

## 2.2.3 Heiz- und Kühlregister

Zur Variation der Lufttemperatur werden Wärmetauscher eingesetzt. Diese bestehen zumeist aus mehreren mit Aluminiumlamellen versehenen und quer zur Luftströmungsrichtung angeordneten Kupferrohren. Solche Einrichtungen zur Temperaturübertragung werden mit flüssigen Heiz- bzw. Kühlmedien betrieben. Kühler sorgen für eine Temperaturabsenkung der Luft und können beim Unterschreiten des Taupunktes auch entfeuchten. Heizregister dienen der Erhöhung der Lufttemperatur bei konstanter Wasserbeladung. Hier verändert sich also nur die relative Feuchte. Zur Regelung der Energieübertragung kommen Regelventile zum Einsatz, deren Ventilstellung mit Stellantrieben eingestellt wird. Je nach Anforderungen sollten spezielle hydraulische Schaltungen zum Anschluss der Versorgungsmedien verwendet werden.

## 2.2.4 Wärmerückgewinnung

An kühleren Tagen wird über die Wärmerückgewinnung (WRG) die Wärmeenergie, welche in der Abluft enthalten ist, zur Aufheizung der kühlen Außenluft genutzt. Für diese Wärmerückkopplung gibt es unterschiedliche Verfahren, jedoch soll an dieser Stelle nur das Kreislaufverbundsystem (KVS) beschrieben werden, wie es bei den in dieser Arbeit zu untersuchenden Anlagen Anwendung findet. Bei dieser Variante wird in der Abluftanlage ein Wärmetauscher als Luftkühler verwendet, welcher die Abluftwärme aufnimmt und somit die Fortluft abkühlt. In der Zuluftanlage befindet sich ebenfalls ein Wärmüberträger, der allerdings als Erhitzer arbeitet. Beide Register sind über einen Glykol/Wasser-Kreislauf miteinander verbunden, so dass die vom Kühler aufgenommene Wärmeenergie den Erhitzer in der Zuluft versorgen kann, um die Außenluft zu erwärmen. Auf diese Art und Weise wird die energetische Effizienz von RLT-Anlagen deutlich erhöht.

## 2.2.5 Luftbefeuchter

Befeuchter erhöhen den Feuchtegehalt der Luft unter Verwendung von Wasser oder Wasserdampf. Hier wird zwischen Sprüh- und Dampfbefeuchtern unterschieden. Sprühbefeuchter sprühen Wasser mit Hilfe von Sprühdüsen und Pumpen zur Druckerhöhung als Sprühnebel in die Lüftungsanlage. Die zur Verdampfung des Sprühwassers erforderliche Energie wird der Luft entzogen, welche sich dadurch abkühlt. Dampfbefeuchter hingegen werden mit Wasserdampf aus einem Dampferzeuger versorgt und leiten diesen über Dampfplantzen in den zu befeuchtenden Luftstrom. Bei dieser Art der Befeuchtung wird die Luft nicht abgekühlt. Aus hygienischen

Gründen haben Anlagen mit Befeuchtern einen höheren Wartungsaufwand. Sie müssen häufiger gereinigt werden, damit die Vermehrung von gesundheitsschädlichen Mikroorganismen innerhalb der Anlage unterbunden wird.

## 2.2.6 Luftfilter

Je nach Anforderung an die Luftqualität werden verschiedene Luftfilter zur Reinigung oder Befreiung von Gerüchen eingesetzt. Es gibt beispielsweise Grob-, Fein- und spezielle Feinstaubfilter zur Filterung von Schmutzpartikeln unterschiedlicher Größe und Aktivkohlefilter zur Bindung von Geruchsstoffen. Solche Luftfilter setzen sich im Laufe der Zeit zu. Somit erhöht sich ihr Strömungswiderstand, was einen erhöhten Energieverbrauch beim Aufrechterhalten der zu fördernden Luftmengen zur Folge hat. Deshalb müssen verschmutzte Filter ab einem bestimmten Differenzdruck zwischen Ein- und Ausgangsseites des Filters erneuert werden. In der Regel verfügen RLT-Anlagen über automatische Filterüberwachungen, die ab einem gewissen Verschmutzungsgrad einen erforderlichen Filterwechsel (FW) melden. Informationen über entsprechende Filterklassen können im Anhang A1 entnommen werden.

Zur Bestimmung der weiteren Verwendbarkeit, also der noch verfügbaren Aufnahmefähigkeit, von Aktivkohlefiltern sollten diese bei der Installation einzeln gewogen werden und in regelmäßigen Abständen durch erneutes Abwiegen überprüft werden. Die Massezunahme entspricht dabei den aufgenommenen gasförmigen Luftverunreinigungen. Ab einem vom Hersteller vorgegebenen Gewichtszuwachs ist die Aufnahmefähigkeit der Filter erschöpft, es wird also erforderlich, die nicht weiter verwendbaren Aktivkohlepatronen durch neue zu ersetzen. In Fachbüchern wird eine Benutzungsdauer von ca. einem Jahr beschrieben.<sup>2</sup>

## 2.2.7 Klappen

Jalousieklappen werden zur luftdichten Absperrung von Lüftungsgeräten verwendet und befinden sich in der Regel am Außen- und Ablufteingang, sowie am Zu- und Fortluftausgang der Anlagen. Sie können nur die Stellungen offen oder geschlossen einnehmen. Diese Klappen öffnen bei eingeschalteter Anlage und schließen selbsttätig ohne Hilfsenergie beim Ausschalten oder Ausfall der RLT-Geräte.

---

<sup>2</sup> [12] Seite 1048

## **3 Bestandsaufnahme**

### **3.1 Überblick**

In den Funktionsgebäuden (FG) 1 bis 4 sind zahlreiche Anlagen der Raumluftechnik installiert und nahezu ständig in Betrieb. Dieses Kapitel enthält eine Übersicht der zu untersuchenden RLT-Anlagen.

Die beschriebenen RLT-Anlagen befinden sich jeweils in den obersten Etagen der FG und sind somit zentral aufgestellt. Dies ermöglicht eine einfachere Versorgung mit Wärme, Strom und Kälte. Sie wurden in dem unter Abschnitt 1.1 erwähnten Praktikumsbericht einleitend beschrieben und sollen im Folgenden etwas genauer betrachtet werden.

### **3.2 Aufbau der Dachzentralen**

Der Aufbau der Lüftungszentralen ist in allen 4 FG ähnlich. In jedem dieser Betriebsräume ist eine zentrale Luftaufbereitungsanlage (ZLA) aufgestellt, welche aus einer Zu- und Abluftaufbereitungsanlage besteht. Die ZLA versorgt alle nachgeschalteten Lüftungsgeräte mit vorkonditionierter Außenluft. Ein Umluftbetrieb wurde innerhalb dieser Konzepte nicht vorgesehen. Innerhalb der nachgeschalteten Lüftungsanlagen erfolgt eine speziell auf den entsprechenden Versorgungsbereich angepasste Nachbehandlung der Luftmengen, bevor die Zuluft anschließend über das Lüftungskanalnetz in die zu belüftenden Etagen geleitet wird.

Die einzelnen Abluftanlagen saugen die Abluft aus den zu entlüftenden Bereichen und leiten diese in den Abluftteil der ZLA, über welchen die Abluft letztendlich als Fortluft aus dem Gebäude geleitet wird.

Dieser Aufbau ist in Abbildung 2 schemenhaft dargestellt. Die be- und entlüfteten Bereiche der einzelnen nachgeschalteten RLT-Geräte befinden sich in den meisten Fällen auf unterschiedlichen Etagen.

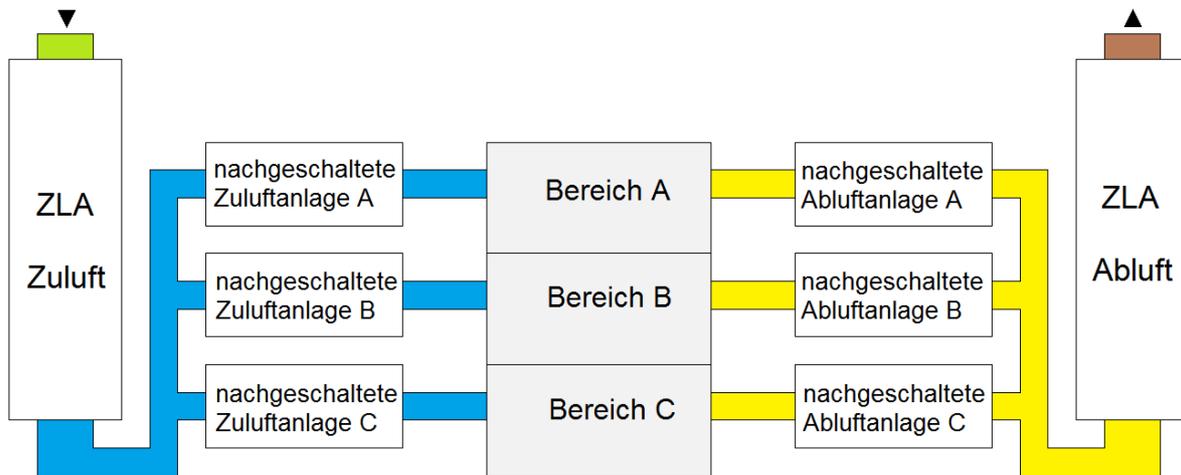


Abbildung 2: Aufbau der Dachzentralen

### 3.3 Zentrale Luftaufbereitungen

#### 3.3.1 Allgemeines

Die ZLAen übernehmen die Aufgabe der Außenluftvorkonditionierung. Sie verfügen jeweils über 2 Ventilatoren, welche den Zuluftdruck im Verteilerkanal auf einen über die GLT eingestellten Wert regeln. Diese doppelte Ausführung gewährleistet beim Ausfall eines der Ventilatoren den weiteren Betrieb der Zentralgeräte. Leider können die Anlagen in solch einem Fall nur mit reduzierten Luftmengen gefahren werden, fallen jedoch nicht komplett aus. Jalousieklappen vor und nach den Lüftern sorgen für eine Abschottung des defekten Bauteils, so kann das Wartungspersonal die defekte Baugruppe bei laufendem Betrieb der restlichen Anlage sicher instandsetzen.

Im Zuluftteil befindet sich direkt nach den Außenluftklappen die erste Filterstufe mit Luftfiltern der Klasse F7 zur Vorfilterung der mit Staub und anderen Schmutzpartikeln behafteten Außenluft. Außerdem verfügen die Anlagen unmittelbar vor den Zuluftklappen über Aktivkohlepatronen. Mit Hilfe dieser speziellen Luftfilter werden unerwünschte gas- und dampfförmige Verunreinigungen adsorbiert, welche unter Umständen vom Nutzer als unangenehmer Geruch wahrgenommen werden könnten.<sup>3</sup> Adsorption bedeutet in diesem Fall, dass die unerwünschten Verunreinigungen an der feinporigen Oberfläche des Kohlegranulats angelagert werden.<sup>4</sup>

<sup>3</sup> in Anlehnung an [12] Seite 1047

Abbildung 3 zeigt den prinzipiellen Aufbau einer ZLA, wie sie in der Visualisierung auf der GLT dargestellt wird. Darin ist zu erkennen, dass diese über eine WRG und eine adiabatische Fortluftkühlung (AFLK) verfügt.

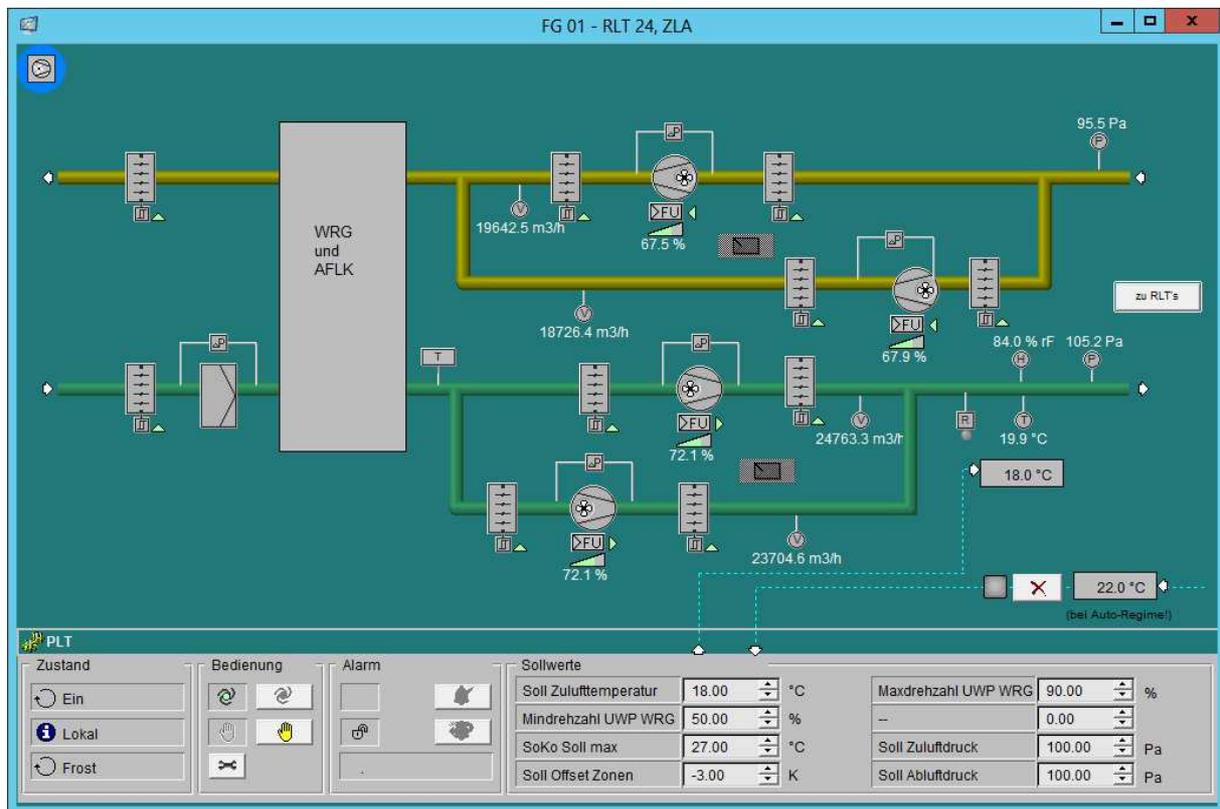


Abbildung 3: Übersichtsdiagramm einer ZLA

### 3.3.2 Wärme- und Kälterückgewinnung

Die Funktionsweise einer WRG in RLT-Anlagen wurde im Abschnitt 2.2.4 bereits einleitend beschrieben. In Abbildung 4 kann man die speziell in den Luftaufbereitungsanlagen verwendete hydraulische Verschaltung der Zu- und Abluftregister erkennen. Zwei Umwälzpumpen erzeugen den benötigten Volumenstrom im KVS, welches nach dem Gegenstromprinzip arbeitet. In den Übergangszeiten kann bedingt durch mäßige Außenlufttemperaturen mehr Heizleistung über die WRG bereitgestellt werden, als zur Temperaturregelung der Zuluft auf einen Sollwert von 18 °C erforderlich ist. Für diesen Fall wurde zur Regelung eine, über ein Dreiwegeventil betriebene, Kurzschlussstrecke vorgesehen. Mit Hilfe dieses Bypasses wird die Leistung der WRG

<sup>4</sup> in Anlehnung an [12] Seite 1073

geregelt und begrenzt. Die Besonderheit dieses KVS in den ZLAen ist ein zusätzlicher Plattenwärmetauscher, welcher bei sehr niedrigen Außentemperaturen, bei denen die Heizleistung der WRG nicht mehr ausreicht, separat als indirekter Nacherhitzer zugeschaltet werden kann.

Die Funktion dieser WRG kann durch gestörte Betriebsmittel beeinträchtigt werden. Im Winter droht dann Frostgefahr für die mit Wasser betriebenen Heiz- und Kühlregister der nachgeschalteten RLT-Anlagen. Zur Vermeidung von Frostschäden wird die Zulufttemperatur direkt hinter der WRG mit einem Frostschutzthermostats überwacht. Falls diese Temperatur unter 5 °C sinkt, müssen sämtliche RLT-Anlagen automatisch abschalten und der indirekte Nacherhitzer in Notbetrieb genommen werden, um die Register der WRG mit voller Heizleistung zu durchspülen.

Außerdem ist mit dem KVS der WRG eine Kälterückgewinnung möglich. Diese geht in Betrieb, sobald die Temperatur der Zuluft wärmer ist als der vorgegebene Sollwert und die Abluft 3 K kühler ist als die Außenluft. Somit kann der unter Umständen kühlere Abluftstrom genutzt werden, um die Zuluft etwas zu kühlen.

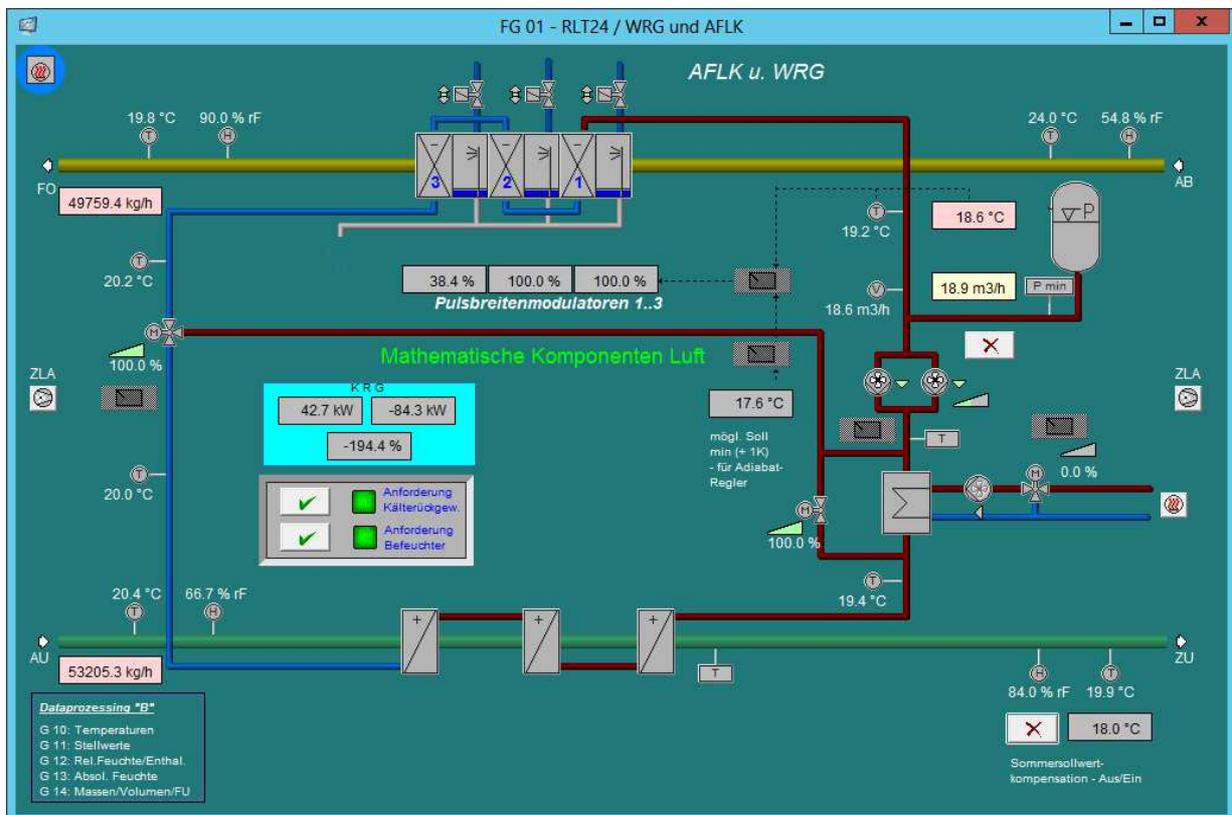


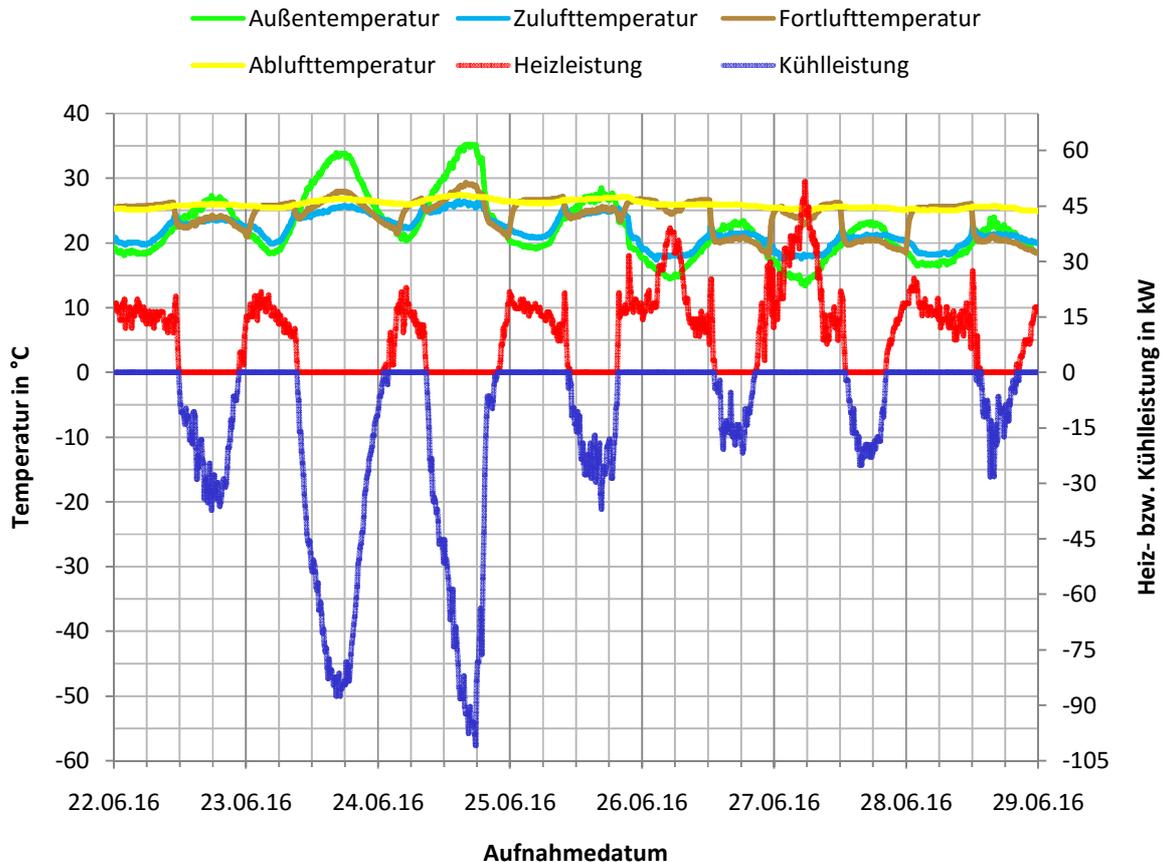
Abbildung 4: WRG und AFLK in ZLAen

### 3.3.3 Adiabatische Fortluftkühlung

Die ZLAen verfügen nicht über einen eigenen Hauskälteanschluss und werden zur effizienten Kühlung mit Kälte aus der AFLK versorgt. Im Betriebsfall der AFLK arbeiten die Wärmeüberträger in der Zuluft als Kühler, denen die aus der Verdunstungskühlung erzeugte Kälteenergie über das KVS zugeführt wird. Die Temperaturregelung der Zuluft arbeitet nach dem gleichen Prinzip, wie im Heizfall.

Bei dieser Art der Kälteerzeugung werden die Register der Abluftaufbereitung, unter Ausnutzung des Effektes der Verdunstungskühlung, gleichmäßig mit aufbereitetem Wasser besprüht. Dank der Vielzahl der Aluminiumlamellen auf den Wärmetauschern ergibt sich eine sehr große Kontaktfläche zwischen dem aufgesprühten Wasser und der vorbeiströmenden Abluft. Latente Wärme, welche zum Verdampfen des Wassers benötigt wird, kann so großflächig dem Glykol/Wasser-Gemisch in den Rohrleitungen der Wärmetauscher entzogen werden. Der Kühleffekt wird durch die dreistufige Anordnung der nun als Kontaktbefeuchter arbeitenden WRG-Register verstärkt.

Die relative Abluftfeuchte liegt im Sommer durchschnittlich bei ca. 60% und wird durch diese Befeuchtung auf bis zu 93 % erhöht. Je niedriger der Wassergehalt der Abluft ist, desto mehr Wasserdampf kann ihr zugeführt werden und umso höher wird auch die erzeugbare Kälteleistung. Messungen und Trendaufnahmen haben ergeben, dass die erzeugbare Kühlleistung beim Anstieg der Außentemperaturen deutlich höher ist. Dieses Phänomen lässt sich unter anderem mit der steigenden Temperaturspreizung zwischen Außenluft und Abluft begründen, wobei die Ablufttemperatur keine starken Schwankungen aufweist, wie man in Abbildung 5 erkennen kann.



**Abbildung 5: Temperaturverlauf mit Heiz- und Kühlleistung im FG 2**

Eine permanente Befeuchtung der Abluft über die Sprühdüsen verbessert den Kühleffekt nur sehr unwesentlich, demzufolge müssen diese nicht dauernd Wasser auf die Abluftregister sprühen. Sie werden sequenziell über Magnetventile innerhalb der Zuleitungen in einem bestimmten Taktverhältnis zugeschaltet. Das eingesetzte Sprühwasser besteht aus einem Gemisch aus voll entsalztem (VE) Wasser und normalem Trinkwasser. Der in diesem Wasser gelöste Kalk führt bei hohen Betriebsstundenzahlen zu Kalkablagerungen auf den Lamellen der Wärmeüberträger. Was wiederum einen schlechteren Kühleffekt und auch einen höheren Luftwiderstand der Register zur Folge hat. Deshalb ist eine sparsame Besprühung wesentlich sinnvoller, um ein frühzeitiges Verschmutzen der Lamellen zu vermeiden.

Die AFLK schaltet sich ein, wenn die Kälterückgewinnung in Betrieb ist und die Feuchtkugeltemperatur der Abluft 3 K unter der Abluftlufttemperatur ist. Sie hat eine Ausschalthysterese von 2 K.

## 3.4 Nachgeschaltete RLT-Anlagen

Jede ZLA versorgt mehrere nachgeschaltete Lüftungsanlagen. Diese RLT-Anlagen verfügen über weitere Luftbehandlungselemente, um die vorkonditionierte Luft auf individuelle Anforderungen für den zu versorgenden Bereich anzupassen, wie ebenfalls bereits im unter Abschnitt 1.2 erwähntem Praktikumsbericht grundlegend beschrieben wurde. An dieser Stelle soll auf die Funktion dieser Anlagen noch etwas genauer eingegangen werden.

Alle Lüftungsgeräte der Luftnachbehandlung besitzen jeweils einen Zu- und Abluftventilator. Deren Drehzahl wird von Frequenzumrichtern in Abhängigkeit des Zu- bzw. Abluftdrucks geregelt. Somit werden die mit zunehmender Luftfilterverschmutzung steigenden Druckverluste über die entsprechenden Luftfilter ausgeglichen. Leider können die geförderten Luftmengen auf diese Weise nicht immer konstant gehalten werden. Die Ursache dafür ist zumeist mit einer Erhöhung des Luftwiderstandes im Luftverteilungssystem zu begründen. In versorgten Bereichen mit Reinraumanforderungen befinden sich unmittelbar vor dem Zuluftauslässen endständige Schwebstofffilter, welche mit zunehmenden Verschmutzungsgrad höhere Differenzdrücke aufweisen. Zur Vermeidung der Ablagerung von groben Schmutzpartikeln in Abluftkanälen, verfügen die Abluftauslässe über Flusengitter. Auch diese Flusengitter setzen sich im Laufe der Zeit durch Ablagerungen zu. Somit wird es erforderlich, die Solldrücke entsprechend anzupassen, um die geforderten Luftmengen aufrecht zu erhalten oder die Luftfilter und -auslässe zu erneuern bzw. zu reinigen.

Zur Anpassung der Zulufttemperatur verfügen die RLT-Geräte über Heiz- und Kühlregister, welche an die technischen Versorgungsanlagen der Wärme- und Kälteversorgung angeschlossen sind.

Eine Regelung der Luftfeuchte ist nur in sehr wenigen Anlagen möglich und wird wie folgt umgesetzt. Wichtigster Bestandteil der Entfeuchtung ist ein Luftkühler. Dieser kann, sofern er über genug Kühlleistung verfügt, die durchströmende Luft so stark abkühlen, dass sich Tauwasser bildet. Dieses Tauwasser entsteht beim Überschreiten einer relativen Luftfeuchte von 100 %. Da Luft bei bestimmten Temperaturen nur eine feste Menge an Wasserdampf aufnehmen kann, wird der überschüssige Wassergehalt als Kondensat an den Lamellen des Kühlregisters abgeschieden und über einen, speziell an die Luftdruckverhältnisse der Anlage angepassten, Siphon aus der Anlage abgeleitet. Um eine bestimmte absolute Luftfeuchtigkeit zu erhalten wurde der

Luftstrom also gekühlt und hat nach dem Kühlregister eine relative Feuchte von 100 %. Die nun meistens zu kühle Luft wird über den Nacherhitzer so stark erwärmt, dass sich die Solltemperatur einstellt. Dabei sinkt die relative Feuchte. Abbildung 6 zeigt eine RLT-Anlage die sich im Entfeuchtungsbetrieb befindet.

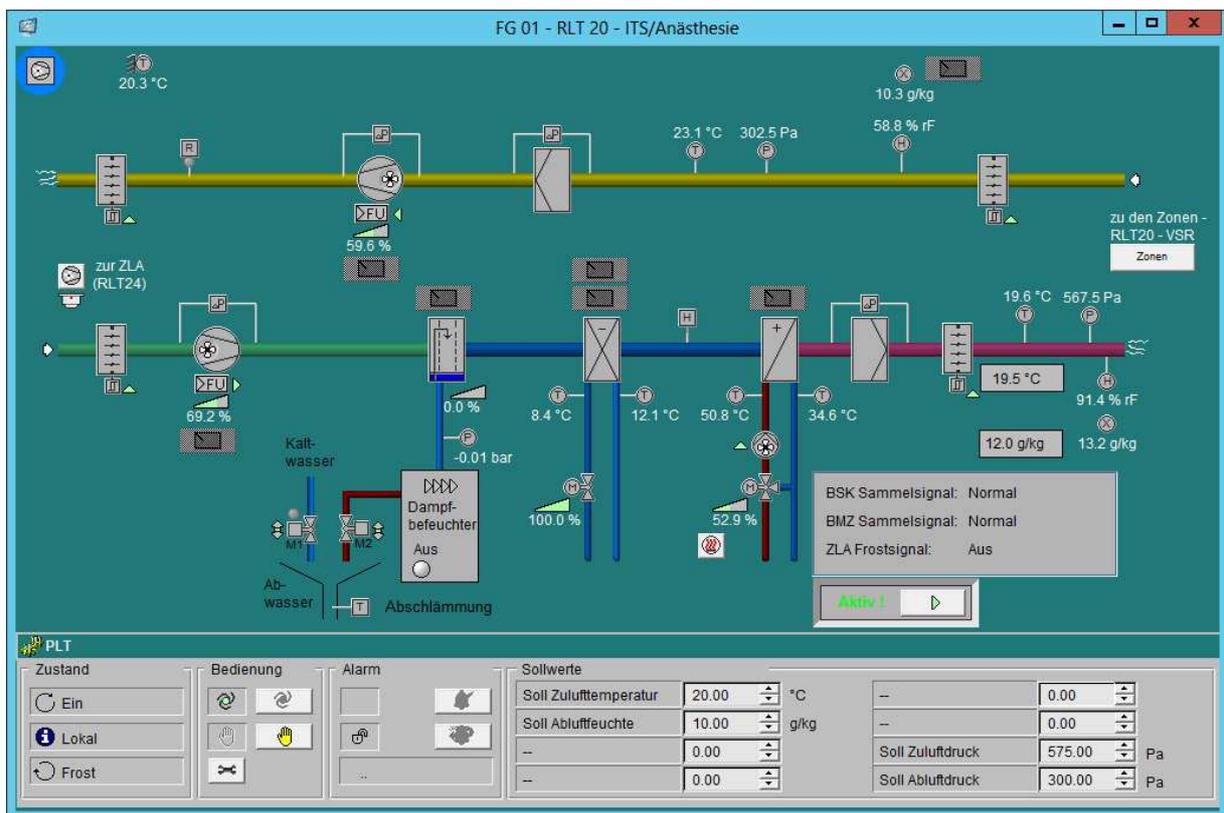


Abbildung 6: Nachgeschaltete RLT-Anlage

Aber nicht jede Lüftungsanlage hat derart viele Luftbehandlungselemente in der Zuluft. In manchen Geräten ist lediglich ein Lüfter mit Nacherhitzer und Zuluftfilter installiert. Dieser Nacherhitzer dient der Erfüllung der Mindestanforderungen zur Zulufttemperierung.

Die Befeuchtung wurde, zur Vermeidung hygienischer Probleme, in sämtlichen Geräten abgeschaltet. Die vorhandene Technik ist jedoch betriebsbereit und kann je nach Bedarf innerhalb kurzer Zeit eingeschaltet werden. Da die Luftbefeuchter kaum Anwendung finden, wird auf eine genaue Beschreibung dieser Luftbehandlungsstufe innerhalb dieser Arbeit verzichtet.

## 3.5 Vorhandene RLT-Anlagen

Die zu untersuchenden RLT-Anlagen in den Gebäuden FG 1-4 besitzen unterschiedliche Kennzahlen. Zur Übersichtlichkeit werden hier lediglich die Luftmengen und Leistungen der Ventilatorantriebe beschrieben. Alle weiteren Informationen sind im Anhang A2 zu entnehmen. Angaben tatsächlicher Daten wurden jeweils mit Hilfe von Messeinrichtungen ermittelt und konnten an entsprechenden Frequenzumrichtern abgelesen werden. Diese erfassen die Luftmengen über eine spezielle Differenzdruckmessung, welche teilweise beschädigt ist oder durch Arbeitspunktabweichungen stark verfälschte Volumenstromwerte ausgibt, die so nicht verwendbar sind.

Somit musste der Volumenstrom für jede Anlage einzeln gemessen werden. Für diese Messungen wurde ein Anemometer der Firma Testo verwendet und an vorgesehen Messpunkten die Strömungsgeschwindigkeiten in den Lüftungskanälen gemessen. Durch einfache Multiplikation der erhaltenen Durchschnittsmesswerte mit den zugehörigen Querschnittsflächen der Lüftungskanäle ergeben sich so die tatsächlichen Volumenströme.

Alle Volumenströme und Motorleistungen sind vom Luftwiderstand der Anlagenkomponenten abhängig und können mit der Zeit variieren. Die aufgeführten Momentanwerte dienen als Grundlage für alle weiteren Betrachtungen in dieser Arbeit. Die Luftmengen der ZLAen wurden als Summe der Volumenströme entsprechend nachgeschalteter Anlagen berechnet. Abweichungen von Vorgabewerten bei den Volumenströmen ergeben sich durch anstehende Filterwechsel endständiger Luftfilter, teilweise verschmutzte Abluft und bedarfsgemäße Anpassung über die GLT im Laufe der Betriebszeit.

In Tabelle 1 wurden alle hier erwähnten Werte aufgenommen. Die jeweils mit aufgelisteten Vorgabewerte für die Luftmengen und Motorleistungen konnten direkt an Typenschildern der entsprechenden RLT-Anlagen abgelesen werden.

**Tabelle 1: Übersicht wesentlicher Daten der RLT-Anlagen**

Funktionsgebäude	Anlage	Bereich	Zuluft				Abluft			
			Luftmenge		Motorleistung		Luftmenge		Motorleistung	
			Vorgabe in m³/h	tatsächlich in m³/h	Typenschild in kW	tatsächlich in kW	Vorgabe in m³/h	tatsächlich in m³/h	Typenschild in kW	tatsächlich in kW
FG 1	19	E04 Urologie	5.800	6.400	3	2,1	6.000	5.200	3	1,3
	20	E02/E03 ITS Urologie	17.750	14.200	15	6,1	15.450	13.600	7,5	1,9
	21	E02/E03 ITS Urologie NR	16.500	11.850	7,5	4,7	19.500	15.600	11	3,9
	22	E01 Notaufnahme	8.700	6.850	5,5	2,8	8.700	7.200	4	1,9
	23	E01 Cafeteria	3.000	2.800	2,2	0,9	3.000	2.000	1,5	0,7
	24	ZLA	52.000	42.100	15	2x6,4	54.000	43.600	15	2x5,1
FG 2	25	E04 Transfusionsmedizin	4.300	4.050	2,2	1,3	4.600	3.300	2,2	1,1
	26	E03 ITS-Nebenräume	7.500	7.750	4	1,1	8.920	5.250	4	0,8
	27	E03 ITS-Bettzimmer	10.500	8.500	7,5	4,2	9.400	9.200	4	2
	28	E02 Kinderchirurgie	4.700	4.500	2,2	0,8	4.700	4.650	2,2	0,5
	29	E01 Neurochirurgie	4.350	4.550	2,2	1,4	4.550	3.700	2,2	1
	30	ZLA	33.000	29.350	11	2x3,8	34.000	25.600	7,5	2x2,5
FG 3	31	E04 Transfusionsmedizin	13.000	11.800	5,5	4,1	10.040	10.500	4	2,3
	32	E03 Kinderkardiologie	3.695	2.800	2,2	0,7	3.795	3.000	2,2	0,7
	33	E02 Kinderkardiologie	4.700	4.500	2,2	1,3	4.850	3.400	2,2	0,8
	34	E01 Augenheilkunde	7.330	6.800	4	1,6	7.430	6.100	3	0,7
	35	ZLA	24.285	25.900	7,5	2x3,6	24.115	23.000	5,5	2x3,1
FG 4	36	E03 Kinderhämatologie	4.200	3.700	2,2	0,5	4.600	3.100	2,2	0,9
	37	E02 Kinderheilkunde	4.500	4.600	2,2	1,4	4.600	4.200	2,2	1,7
	38	E01 HNO	6.200	5.200	4	1,1	6.300	5.900	3	1,3
	39	U01 ITS Anästhesie	10.700	9.100	7,5	2,8	9.300	5.800	4	0,6
	40	U01 ITS Anästhesie NR	8.300	6.600	4	1,2	8.800	6.700	4	1,5
	41	ZLA	35.000	29.200	11	2x4,9	35.000	25.700	11	2x2,8

## **4 Verbrauchsermittlung**

### **4.1 Überblick**

Zur Versorgung der RLT-Anlagen wird Energie in Form von Wärme und Strom benötigt. Wobei Wärmeenergie vorzeichenbehaftet zu betrachten wäre, da negative Wärmeenergie für Kühlzwecke genutzt wird. Diese allgemeine Festlegung soll in allen nachfolgenden Diagrammen und Berechnungsgleichungen beibehalten werden. Jedoch wird zur besseren Übersichtlichkeit genutzte Kälteenergie in allen Energieverbrauchsaufstellungen positiv aufgelistet.

Aber auch Wasser wird in großen Mengen für den Betrieb der AFLK verbraucht. Leider verfügt keine der Dachzentralen über eigene Zähleinrichtung zur genauen Ermittlung der einzelnen Verbräuche. Somit liegen keine Verbrauchskennzahlen der einzelnen Gebäude vor und müssen auf anderem Wege ermittelt werden.

### **4.2 Erläuterung zur Preisbildung**

Das Versorgungsentgelt für verbrauchte Energie und Wasser kann für unterschiedliche Abnahmemengen variieren. Aus diesem Grund ergeben sich für die hier betrachteten Jahre 2015 und 2016 unterschiedliche Einkaufspreise. Da sich die Preiszusammensetzung aus mehreren Faktoren ergibt und für Untersuchungen zur Optimierung von RLT-Anlagen eine untergeordnete Rolle einnimmt, sollen an dieser Stelle nur die durchschnittlichen Kosten pro Mengeneinheit verwendet werden.

Die Kosten für die Elektroenergie- und Wärmeversorgung werden im Allgemeinen in Euro pro Kilowattstunde angegeben, die für verbrauchtes Trinkwasser in Euro pro Kubikmeter. Zu erwähnen wäre hier, dass keine Gebühren für die Ableitung von Regenwasser anfallen und nur auf 85 % des genutzten Trinkwassers Abwassergebühren fällig sind, die Preisangaben beziehen sich auf die zusammengefassten Gebühren für Trinkwasser und Abwasser. Für Elektroenergie wird dank Kompensationsanlagen nur die eingespeiste Wirkleistung berechnet. Die für die Untersuchungen verwendeten durchschnittlichen Einkaufspreise ergeben sich wie in Tabelle 2 angegeben.

**Tabelle 2: Versorgungskosten<sup>5</sup>**

	<b>Kosten 2015</b>	<b>Kosten 2016</b>	<b>Durchschnittliche Kosten</b>
<b>Elektroenergie</b>	0,1816 €/kWh	0,1836 €/kWh	0,1826 €/kWh
<b>Fernwärme</b>	0,0925 €/kWh	0,08899 €/kWh	0,0907 €/kWh
<b>Trinkwasser</b>	5,414 €/m <sup>3</sup>	5,435 €/m <sup>3</sup>	5,4245 €/m <sup>3</sup>

Weiterhin wird für den Betrieb der Anlagentechnik aufbereitetes Wasser und Kälteenergie benötigt. Aufbereitetes Wasser wird mittels spezieller Wasseraufbereitungsanlagen selbst produziert und Kälteenergie über Kompressionskältemaschinen bzw. freie Kühlung erzeugt.

Zur Bestimmung der Produktionskosten des aufbereiteten Wassers wurden sämtliche zugänglichen Daten zur Wasseraufbereitungsanlage, wie sie im UKH im FG 3 im Untergeschoss 2 installiert ist, zusammengetragen und ausgewertet. Die Gesamtanlage besteht aus zwei Enthärtungsanlage mit jeweils zwei Ionenaustauschern, zwei Umkehrosmoseanlagen und einer UV-Desinfektionsanlage. Das über diese Technik entsalzte und damit sehr reine Wasser wird als Permeat bezeichnet. Auf die genaue Beschreibung des Aufbereitungsverfahrens soll an dieser Stelle verzichtet werden.

Die Anlage ist seit mehreren Jahren in Betrieb und wird regelmäßig gewartet. Um die resultierenden Wartungskosten bestimmen zu können, werden die durchschnittlichen Ausgaben der letzten 9 Jahre zu jährlich 5680,70 €<sup>6</sup> verwendet. Zur Enthärtung und den dafür notwendigen Ionenaustausch ist die Zuführung von Salztabletten in einen Vorratsbehälter erforderlich. Dieses Salz geht in eine wässrige Lösung über und wird genutzt, um die Ionenaustauscher zu regenerieren. Dabei wird eine Salzmenge von jeweils 16,2 kg benötigt<sup>7</sup>, um 300 m<sup>3</sup> Trinkwasser zu enthärten, wobei 25 kg Salz im Einkauf 6,80 € kosten, was insgesamt Salzzusatzkosten ( $K_S$ ) in Höhe 0,054 € pro m<sup>3</sup> aufbereitetes Wasser verursacht.

Während des Herstellungsprozesses werden sehr häufig Spülvorgänge innerhalb der einzelnen Anlagenbestandteile ausgelöst, wofür sehr viel Trinkwasser verwendet wird, welches anschließend als Abwasser abgeleitet wird. Entsprechende Wasserverbräuche wurden am Display der Anlagen abgelesen. Somit ergibt sich eine Permeatausbeute von rund 67,5 % des verwendeten

---

<sup>5</sup> [14]

<sup>6</sup> [14]

<sup>7</sup> [13] Seite 14

Trinkwassers zur Aufbereitung. Was zu der Erkenntnis führt, dass zur Herstellung von 1 m<sup>3</sup> Permeat rund 1,48 m<sup>3</sup> Trinkwasser benötigt werden.

Die erzeugten Wassermengen der Aufbereitungsanlage wurden über den gesamten August 2016 aufgenommen und mit den Verbrauchswerten der AFLK ins Verhältnis gesetzt. Dabei wurde darauf geachtet, dass das zur Kühlung verwendete Sprühwasser lediglich zu ca. 55,5 % aus aufbereitetem Wasser besteht. Diese Beobachtung ergab eine Nutzung von ca. 21,4 % des hergestellten Permeats für die AFLK. Da die Fortluftkühlung nur in der wärmeren Jahreshälfte genutzt wird und die weiteren mit Permeat versorgten Verbraucher ganzjährig in Betrieb sind, wird diese prozentuale Nutzung halbiert und es ergibt sich ein Nutzungsanteil von ca. 10,7 % zu Befeuchtungszwecken. Dieser Nutzungsanteil wird zur Berechnung der anteiligen Wartungskosten herangezogen. Bei einer jährlichen Abnahmemenge von insgesamt ca. 560 m<sup>3</sup> ergeben sich somit Wartungskosten ( $K_W$ ) in Höhe von ca. 1,0854 € pro m<sup>3</sup> Permeat.

Somit lassen sich etwaige Kosten zur Bereitstellung des Verschnittwassers, unter Berücksichtigung des Mischungsverhältnisses von 5:4, für die AFLK wie folgt bestimmen. Da keine Messung der Leistungsaufnahme möglich ist, können Elektroenergieverbräuche für die entsprechende Anlagentechnik leider nicht einbezogen werden.

$$K_V = (K_S + K_W + K_{TW} \cdot A_{AF}) \cdot \frac{5}{9} + K_{TW} \cdot \frac{4}{9} \quad (1)$$

$$K_V = \left( 0,054 \frac{\text{€}}{\text{m}^3} + 1,0854 \frac{\text{€}}{\text{m}^3} + 5,4245 \frac{\text{€}}{\text{m}^3} \cdot 1,48 \right) \cdot \frac{5}{9} + 5,4245 \frac{\text{€}}{\text{m}^3} \cdot \frac{4}{9}$$

$$K_V \cong \underline{\underline{7,504 \frac{\text{€}}{\text{m}^3}}}$$

$K_V$	Verschnittwasserkosten	[€/m <sup>3</sup> ]
$K_S$	Salzzusatzkosten	[€/m <sup>3</sup> ]
$K_W$	Wartungskosten Wasseraufbereitung	[€/m <sup>3</sup> ]
$K_{TW}$	Trinkwasserkosten	[€/m <sup>3</sup> ]
$A_{AF}$	Ausbeutefaktor	[]

Um Kosten zur Kälteerzeugung bestimmen zu können, sollte die Leistungsaufnahme der Kältemaschinen, Rückkühler und zentraler Versorgungspumpen ausgewertet werden. Leider sind auch hierfür keine einzelnen Messeinrichtungen zur Messwertaufnahme vorhanden. Somit ist die Messung der Leistungsaufnahme nicht möglich und es kann lediglich eine Preisangabe zu Energiekosten nach VDI 2067-1 genutzt werden. Der so angenommene Einheitspreis beträgt 0,04 €/kWh<sup>8</sup> für erzeugte Kälteenergie mittels vorhandener Kompressionskältemaschinen.

## 4.3 Elektroenergie

Der Elektroenergieverbrauch geht hauptsächlich von der Antriebstechnik der Ventilatoren in den Lüftungsgeräten aus. Da alle Anlagen bis auf wenige Ausnahmen bei störungsbedingten Ausfällen oder Wartungsmaßnahmen ständig ohne Absenkung in Betrieb sind, kann der hierfür aufgewendete Energiebedarf ohne die Berücksichtigung von Abschaltungen ermittelt werden. Die elektrische Leistung für diese Berechnung wird Tabelle 1 entnommen. Bei den aufgeführten tatsächlichen Leistungen handelt es sich um Momentanwerte, welche ca. 4 Monate nach der Wartung ermittelt wurden. Auf Grund des zunehmenden Differenzdrucks über die Luftfilter erhöht sich die aufgenommene elektrische Leistung bis zur nächsten Wartung erfahrungsgemäß kontinuierlich. Der Filterwechsel wird jährlich durchgeführt, deshalb können die ermittelten Daten als etwaige Jahresmittelwerte angenommen und zur Verbrauchsberechnung herangezogen werden. Unter Berücksichtigung, dass das betrachtete Jahr 2016 ein Schaltjahr ist, lassen sich die erforderlichen Jahresbetriebsstunden ( $\Delta t_{Jahr}$ ) wie folgt bestimmen:

$$\Delta t_{Jahr} = t_{Jahr} \cdot t_{Tag} \quad (2)$$

$$\Delta t_{Jahr} = (365d + 1d) \cdot 24h$$

$$\Delta t_{Jahr} = \underline{\underline{8784h}}$$

$\Delta t_{Jahr}$	Jahresbetriebsstunden	[h]
$t_{Jahr}$	Tage pro Jahr	[d]
$t_{Tag}$	Stunden pro Tag	[h]

---

<sup>8</sup> [15] Seite 274

Sie werden nun zur rechnerischen Verbrauchermittlung der elektrischen Energie pro Jahr für alle 4 Gebäude wie folgt eingesetzt. Wobei der Index  $i$  als Anlagennummer zu verstehen ist.

$$W_{Jahr} = \sum_{i=19}^{41} W_{Jahr_i} \quad (3)$$

$$W_{Jahr_i} = (P_{tats. ZU_i} + P_{tats. AB_i}) \cdot \Delta t_{Jahr}$$

$$W_{Jahr_{19}} = (2,1 \text{ kW} + 1,3 \text{ kW}) \cdot 8784 \text{ h} = 29.865,6 \text{ kWh}$$

$$W_{Jahr_{20}} = \dots$$

$$W_{Jahr} \cong \underline{\underline{1.143 \text{ MWh}}}$$

$W_{Jahr}$	Jahresenergieverbrauch gesamt RLT 19-41	[kWh]
$W_{Jahr_i}$	Jahresenergieverbrauch einzeln RLT 19-41	[kWh]
$P_{tats. ZU_i}$	Leistungsmittelwert tatsächlich RLT 19-41	[W]

Der gesamte Elektroenergieverbrauch ( $W_{Jahr}$ ) der 4 Gebäude verteilt sich wie in Tabelle 3 aufgelistet wird.

**Tabelle 3: Elektroenergieverbrauch Lüfter**

Gebäude	Energieverbrauch
<b>FG 1</b>	433,051 MWh
<b>FG 2</b>	235,411 MWh
<b>FG 3</b>	224,870 MWh
<b>FG 4</b>	249,466 MWh

Die Ursache für den wesentlich höheren Verbrauchswert im FG 1 sind die größeren Luftmengen, welche dort zur Belüftung genutzt werden.

## 4.4 Modell zur Verbrauchsermittlung

### 4.4.1 Erläuterung

Der Bedarf an Energie zur Erwärmung oder Kühlung kann nicht genau bestimmt werden. Er ändert sich je nach Luftzustand der Außenluft und ist auf Grund der WRG und AFLK auch vom Luftzustand der Abluft abhängig. Um auch hierfür eine nutzbare Grundlage zu schaffen wurde mit Hilfe von Microsoft Excel ein Berechnungsmodell erstellt, welches den Wärmeenergiebedarf in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur und die sich einstellende Zulufttemperatur am Ausgang der ZLA über den Jahresverlauf ermittelt. Die Herangehensweise dafür soll am Beispiel der Dachzentrale im FG 2 näher erklärt werden.

### 4.4.2 Herangehensweise

Um ein theoretisches Modell zur Wärmeenergieverbrauchsermittlung zu erstellen, wurden für die Lüftungszentralen jeweils über einen möglichst langen Zeitraum Messwerte aller relevanten Temperaturen und relativen Feuchtigkeitsgehalte der ZLA mit Hilfe der GLT Desigo Insight im Trendviewer in einem Abtastintervall von 10 Minuten aufgenommen und ausgewertet. An dieser Stelle wurde festgestellt, dass die WRG und die AFLK nicht immer in der Lage sind, die Zuluft auf genau 18 °C zu regeln. Grund dafür ist die zu geringe Kühlleistung, wodurch die Zulufttemperatur oftmals zu hoch war. Außerdem war ersichtlich, dass die Temperaturspreizung zwischen Außen- und Zuluft bei steigender Außentemperatur ebenfalls steigt.

Folgende Messwerte wurden in die Trenaufnahme einbezogen:

- Außenlufttemperatur
- Zulufttemperatur
- Ablufttemperatur
- Fortlufttemperatur
- relative Außenluftfeuchte
- relative Zuluftfeuchte
- relative Abluftfeuchte
- relative Fortluftfeuchte

Leider ist es nicht möglich gewesen die Messperioden parallel laufen zu lassen, da zur Modellbildung alle RLT-Geräte in Normalbetrieb hätten gefahren werden müssen. Diese Bedingung war nicht immer erfüllt. Es wurden teilweise aus unterschiedlichen Gründen Bereiche von der Lüftung abgeschottet, was zu Luftmengentoleranzen geführt hat. Im FG 1 musste die AFLK, auf

Grund von Undichtigkeit und damit einhergehendem Wasseraustritt aus der Sprühkammer, ab dem 1.8.2016 außer Betrieb genommen werden. Somit ergibt sich für diese Lüftungszentrale nur ein relativ kurzer Betrachtungszeitraum. Während der Messwertaufnahme im FG 3 wurde aus einem wichtigen Grund unangekündigt der Desigosever neu gestartet, was zum Verlust der Messdaten von etwa einer Woche führte. Alle Messungen wurden über nachstehend aufgelistete Zeiträume aufgenommen, innerhalb welcher jeweils das Verhalten der Zulufttemperatur untersucht wurde.

- FG 1            19.07. - 01.08.2016
- FG 2            28.05. - 01.07.2016
- FG 3            05.07. - 11.07.2016    und    19.07. - 02.08.2016
- FG 4            19.07. - 17.08.2016

### 4.4.3 Kühlleistung ZLA

Um nun die Kühlleistung bei vorgegebener Außenlufttemperatur bestimmen zu können, wurde wie folgt vorgegangen.

Die Berechnungsformel zur Bestimmung der Kühlleistung ( $\dot{Q}_{AFLK}$ ) lautet:

$$\dot{Q}_{AFLK} = \dot{m}_{ZU} \cdot (h_{ZU} - h_{AU}). \quad (4)^9$$

$\dot{Q}_{AFLK}$	Kühlleistung adiabate Fortluftkühlung	[kW]
$\dot{m}_{ZU}$	Zuluftmassenstrom	[kg/h]
$h_{ZU}$	Enthalpie der Zuluft	[kJ/kg]
$h_{AU}$	Enthalpie der Außenluft	[kJ/kg]

---

<sup>9</sup> in Anlehnung [1] Seite 53

Der erforderliche Massenstrom der Zuluft ( $\dot{m}_{ZU}$ ) lässt sich über folgende Formel bestimmen:

$$\dot{m}_{ZU} = \frac{\dot{V}_{ZU} \cdot \rho_{AU}}{1 + x_{AU}} \quad (5)^{10}$$

$\dot{V}_{ZU}$	Volumenstrom Zuluft	[m <sup>3</sup> /h]
$\rho_{AU}$	Dichte feuchter Außenluft	[kg/m <sup>3</sup> ]
$x_{AU}$	Feuchtegehalt Außenluft	[g/kg]

Dabei wird davon ausgegangen, dass keine Entfeuchtung zwischen Außenluft und Zuluft stattfindet. Die notwendige Dichte der Außenluft ( $\rho_{AU}$ ) ergibt sich aus der Gleichung:

$$\rho_{AU} = \frac{p - \varphi_{AU} \cdot p_{s_{Au}}}{R_L \cdot T_{AU}} + \frac{\varphi_{AU} \cdot p_{s_{Au}}}{R_D \cdot T_{AU}} \quad (6)^{11}$$

$p$	Normaldruck	[bar]
	$p = 1,013 \text{ bar}$	
$\varphi_{AU}$	relative Feuchte der Außenluft	[%]
$p_{s_{Au}}$	Wasserdampfdruck der Außenluft bei Sättigung	[bar]
$R_L$	Gaskonstante für Luft	[J/kg K]
	$R_L = \textit{konstant} = 287,2 \frac{\text{J}}{\text{kg}} \text{K}$	
$R_D$	Gaskonstante für Wasserdampf	[J/kg K]
	$R_D = \textit{konstant} = 461,5 \frac{\text{J}}{\text{kg}} \text{K}$	
$T_{AU}$	Außenlufttemperatur	[K]

---

<sup>10</sup> in Anlehnung an [1] Seite 56

<sup>11</sup> in Anlehnung an [1] Seite 36

Unter Verwendung der folgenden Näherungsformel zur Bestimmung des Wasserdampfdruckes der Außenluft bei Sättigung ( $p_{s_{Au}}$ ):

$$p_{s_{Au}} = \begin{cases} 2,8868 \text{ mbar} \cdot \left(1,098 + \frac{\vartheta_{AU}}{100}\right)^{8,02}, & \vartheta_{AU} > 0^\circ\text{C} \\ 0,04689 \text{ mbar} \cdot \left(1,486 + \frac{\vartheta_{AU}}{100}\right)^{12,3}, & \vartheta_{AU} \leq 0^\circ\text{C}. \end{cases} \quad (7)^{12}$$

$\vartheta_{AU}$                       Außenlufttemperatur                      [ $^\circ\text{C}$ ]

Für Gleichung (5) wird nun noch der Feuchtegehalt der Außenluft ( $x_{AU}$ ) benötigt und ergibt sich aus dem nachstehendem Ausdruck.

$$x_{AU} = 0,622 \cdot \frac{\varphi_{AU} \cdot p_{s_{Au}}}{p - \varphi_{AU} \cdot p_{s_{Au}}} \quad (8)^{13}$$

Um die Kühlleistung zu berechnen wird außerdem die Enthalpie der feuchten Zu- und Außenluft ( $h_f$ ) benötigt. Sie ergibt sich allgemein aus der Beziehung:

$$h_f = c_{pL} \cdot \vartheta + x \cdot (h_{vW} + c_{pD} \cdot \vartheta). \quad (9)^{14}$$

$h_f$	Enthalpie feuchter Luft	[kJ/kg]
$c_{pL}$	spezifische Wärmekapazität trockener Luft	[kJ/kg K]
	$c_{pL} = \textit{konstant} = 1,006 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$	
$c_{pD}$	spezifische Wärmekapazität Wasserdampf	[kJ/kg K]
	$c_{pD} = \textit{konstant} = 1,86 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$	
$x$	Feuchtegehalt	[g/kg]
$\vartheta$	Temperatur	[ $^\circ\text{C}$ ]
$h_{vW}$	Verdampfungsenthalpie von Wasser	[kJ/kg]

---

<sup>12</sup> in Anlehnung an [1] Seite 34

<sup>13</sup> in Anlehnung an [1] Seite 35

<sup>14</sup> in Anlehnung an [1] Seite 40

Wobei zu beachten ist, dass die Verdampfungsenthalpie von Wasser ( $h_{vw}$ ) ebenfalls temperaturabhängig ist und sich wie folgt allgemein überschlägig berechnen lässt.

$$h_{vw} = h_{vws} \left( \frac{1 - \frac{T}{T_{krit}}}{1 - \frac{T_{sp}}{T_{krit}}} \right)^{0,38} \quad (10)^{15}$$

$h_{vws}$	Verdampfungsenthalpie Wasser am Siedepunkt	[kJ/kg]
	$h_{vws} = 2255 \text{ kJ/kg}^{16}$	
$T$	Temperatur	[K]
$T_{krit}$	kritische Temperatur Wasser	[K]
	$T_{krit} = 647,1 \text{ K}^{17}$	
$T_{sp}$	Siedetemperatur Wasser	[K]
	$T_{sp} = 373,15 \text{ K}$	

Letztendlich wird die Außen- ( $h_{AU}$ ). und Zuluftenthalpie ( $h_{ZU}$ ) berechnet und in Gleichung (4) eingesetzt, mit welcher sich somit die Kühlleistung ( $\dot{Q}_{AFLK}$ ) bestimmen lässt. Der noch zusätzlich erforderliche Volumenstrom ( $\dot{V}_{ZU}$ ) wird aus der Tabelle 1 entnommen.

Auf diese Art und Weise wurde die von der AFLK genutzte Kühlleistung mit Hilfe des Tabellenkalkulationsprogrammes in 10-minütigen Schritten berechnet und in einem Diagramm, in Abhängigkeit der Außentemperatur dargestellt. (siehe Abbildung 7)

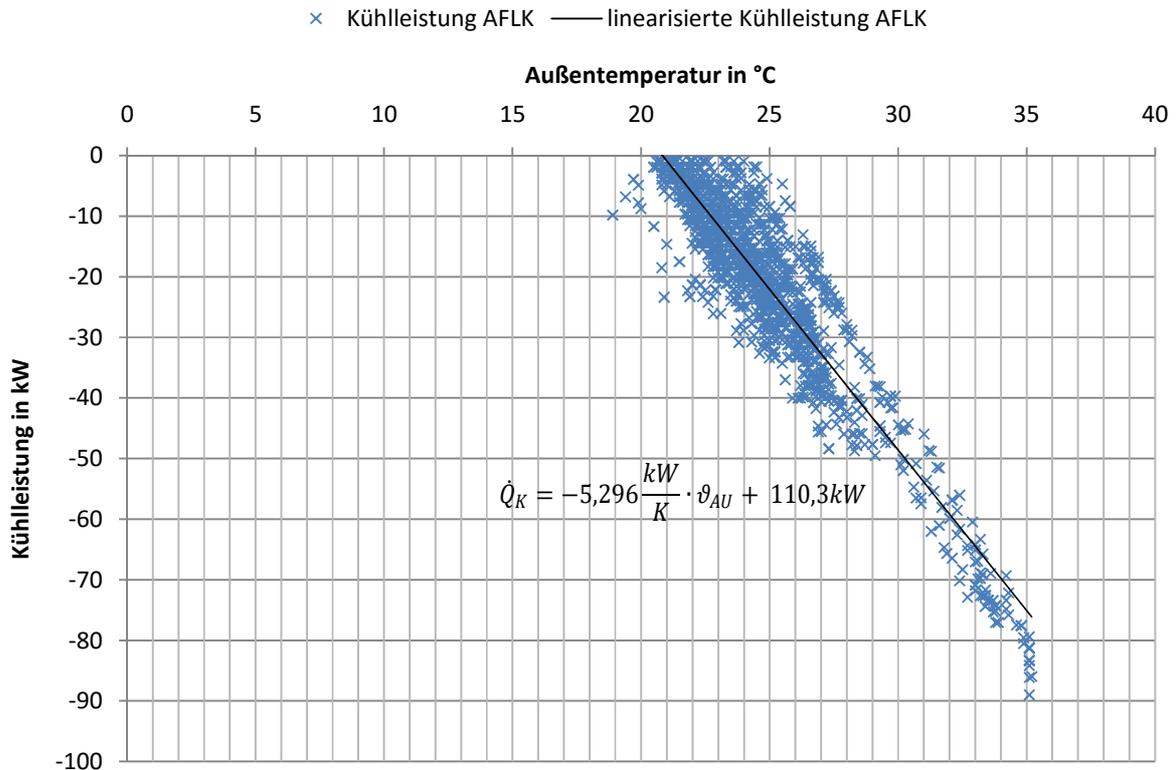
So konnte eine Möglichkeit geschaffen werden, die Kühlleistung als Funktion der Außentemperatur darzustellen und diese zur weiteren Verwendung zu analysieren.

---

<sup>15</sup> in Anlehnung an [2]

<sup>16</sup> [3]

<sup>17</sup> [4]



**Abbildung 7: Genutzte Kühlleistung FG 2**

In dieses Diagramm wurde eine Gerade als Trendlinien eingefügt, deren Funktionsgleichung fortan als Definition der nutzbaren Kühlleistung in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur dienen soll. Die abweichend von dieser Geraden liegenden Punkte ergeben sich durch thermodynamische Vorgänge beim Zu- bzw. Abschalten der Kühlung, sowie die schwankende Abluftfeuchte, welche den Verdunstungskühleffekt ebenfalls beeinflusst. Anzumerken wäre an dieser Stelle, dass die ermittelte Kühlleistung etwas geringer ist, als die eigentlich bereitgestellte, da der Motor inklusive Frequenzumrichter im Lüftungsgerät Wärme an die Zuluft abgeben. Diese Wärmeenergie wird, wegen der fehlenden Messeinrichtungen, in der Simulation nicht berücksichtigt und wäre auf die genutzte Kühlleistung aufzuzaddieren, um die tatsächliche Leistung der AFLK zu erhalten.

Leider sind zur Simulation der Energieverbräuche nur Messdaten der Außenlufttemperatur über den Jahresverlauf verfügbar und somit kann zur genauen Bestimmung keine Feuchtemessung verwendet werden. Aus diesem Grund wird die Nutzung der graphisch ermittelten Kühlleistung

tungsgeraden als ausreichend betrachtet, um in dieser Arbeit weitere Betrachtungen durchführen zu können. Demzufolge ergibt sich zu Kühlleistungsbestimmung folgender Zusammenhang:

$$\dot{Q}_K = \begin{cases} -5,296 \frac{kW}{K} \cdot \vartheta_{AU} + 110,3 kW, & \vartheta_{AU} > \vartheta_{AB} + 1 K \cup \vartheta_{AU} < 35 \text{ }^\circ C \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \quad (11)$$

$\dot{Q}_K$                       Kühlleistung AFLK berechnet                      [kW]

Mit Hilfe dieser Kühlleistung kann die Zulufttemperatur für den Fall der AFLK je nach Außenluft bestimmt werden. Die unter Abschnitt 3.3.3 beschriebene Hystereseffunktion wurde in der Simulation beachtet, wird aber in allen Formelausdrücken lediglich mit dem unterem Grenzwert, also dem Ausschaltwert betrachtet. Die mit AFLK erreichbare Zulufttemperatur ( $\vartheta_{ZUWRG1}$ ) ergibt sich zu:

$$\vartheta_{ZUWRG1} = \begin{cases} \frac{\dot{Q}_K}{\dot{V}_{ZU} \cdot \rho_{AUe} \cdot c_{pL}} + \vartheta_{AU}, & \vartheta_{AU} > \vartheta_{FK} + 1 K \\ 0, & \text{sonst.} \end{cases} \quad (12)^{18}$$

$\vartheta_{ZUWRG1}$               erreichbare Zulufttemperatur AFLK                      [°C]  
 $\vartheta_{FK}$                       Feuchtkugelttemperatur                      [°C]  
 $\rho_{AUe}$                       ermittelte Dichte der Außenluft                      [kg/m<sup>3</sup>]

Die erforderlichen Feuchtkugelttemperatur ( $\vartheta_{FK}$ ) lässt sich über die Temperatur ( $\vartheta_{AB\alpha}$ ) und Feuchte der Abluft ( $\varphi_{ABm}$ ) näherungsweise bestimmen:

$$\vartheta_{FK} = -5,809 + 0,058 \cdot \varphi_{ABm} + 0,697 \cdot \vartheta_{AB\alpha} + 0,003 \cdot \varphi_{ABm} \cdot \vartheta_{AB\alpha}. \quad (13)^{19}$$

$\vartheta_{AB\alpha}$                       angenommene Ablufttemperatur                      [°C]  
 $\varphi_{ABm}$                       mittlere relative Abluftfeuchte                      [%]  
 $\varphi_{ABm} \cong 51 \%$

---

<sup>18</sup> in Anlehnung an [1] Seite 56

<sup>19</sup> in Anlehnung an [5]

Eine genaue Ablufttemperatur als Funktion der Außentemperatur kann leider nicht ermittelt werden. Somit wird diese mit Erfahrungswerten bestimmt. Die niedrigste Ablufttemperatur stellt sich erfahrungsgemäß ab 0 °C Außenlufttemperatur auf 23 °C ein. Dieser hohe Wert ergibt sich durch Heizkörper, Geräte und aufhaltende Personen in den entlüfteten Bereichen, welche die Raumtemperatur zusätzlich erwärmen. Mit steigender Außenlufttemperatur steigt auch die Ablufttemperatur, sie wurde bei 30 °C warmer Außenluft mit durchschnittlich 26 °C gemessen. Damit wird die Abhängigkeit der Ablufttemperatur ( $\vartheta_{ABa}$ ) von der Außentemperatur mit folgender Näherungsformel angenommen:

$$\vartheta_{ABa} = \begin{cases} 0,1 \cdot \vartheta_{AU} + 23 \text{ °C}, & \vartheta_{AU} \geq 0 \text{ °C} \\ 23 \text{ °C}, & \vartheta_{AU} < 0 \text{ °C}. \end{cases} \quad (14)$$

Die mittlere relative Abluftfeuchte stellt den Mittelwert der gemessenen Abluftfeuchtwerte dar, welche innerhalb der am Anfang dieses Abschnittes erwähnten Messreihe ermittelt wurden. Dieser Wert wird genutzt, weil sich keine Aussage über die Feuchte im Bezug auf die anderen gemessenen Größen treffen lässt. Ähnlich ist es mit der angenommenen relativen Feuchte der Außenluft, welche als Mittelwert der vom geologischen Institut in unmittelbarer Nähe zum UKH gemessenen Feuchtwerte der letzten 6 Monate gebildet wurde. Über dieser Luftfeuchte ( $\varphi_{geo}$ ) lässt sich die ohnehin geringfügig von ihr abhängige Dichte der Außenluft ( $\rho_{AUe}$ ) ermitteln:

$$\rho_{AUe} = \frac{p - \varphi_{geo} \cdot p_{sAu}}{R_L \cdot T_{AU}} + \frac{\varphi_{geo} \cdot p_{sAu}}{R_D \cdot T_{AU}}. \quad (15)^{20}$$

$\varphi_{geo}$                       mittlere relative Außenluftfeuchte                      [%]

$$\varphi_{geo} = 66,65 \%$$

Der Kühleffekt der Kälterückgewinnung ohne Befeuchtung der Abluft wird im Modell nicht betrachtet, da er keinen wesentlichen Einfluss auf die Zulufttemperatur hat.

---

<sup>20</sup> in Anlehnung [16] Seite 54

#### 4.4.4 Heizleistung ZLA

Zur Heizleistungsermittlung der WRG müssten die Rückwärmezahlen aus entsprechenden Datenblättern verwendet werden. Diese Kennzahlen beziehen sich allerdings auf ein Volumenstromverhältnis von 1 zwischen Zu- und Abluft. Da sich dieses innerhalb der Anlagenbetriebszeit von über 10 Jahren geändert hat, sind die Rückwärmezahlen mit folgender empirischen Gleichung anzupassen:

$$\Phi_{AUt} = \Phi_{AU} \cdot \left( \frac{\dot{m}_{AB}}{\dot{m}_{ZU}} \right)^{0,4} \quad \forall \quad 0,67 \geq \frac{\dot{m}_{AB}}{\dot{m}_{ZU}} \leq 1,25 \cup \Phi_{AU} \leq 0,8. \quad (16)^{21}$$

$\Phi_{AU}$	Rückwärmezahl bezogen auf die Außenluft laut Datenblatt	[]
$\Phi_{AUt}$	tatsächliche Rückwärmezahl bezogen auf die Außenluft	[]
$\dot{m}_{AB}$	Abluftmassenstrom	[kg/h]

Die gesuchte Rückwärmezahl ( $\Phi_{AUt}$ ) ergibt sich durch Einsetzen der Massenströme in Gleichung (26), welche sich wie folgt berechnen lassen:

$$\dot{m}_{ZU} = \dot{V}_{ZU} \cdot \rho_f \quad (17)$$

$$\dot{m}_{AB} = \dot{V}_{AB} \cdot \rho_f. \quad (18)$$

$\rho_f$	Dichte feuchter Luft bei 20 °C	[kg/m <sup>3</sup> ]
	$\rho_f = 1,2 \frac{kg}{m^3}$	

In diesem Fall wird mit der Dichte feuchter Luft bei 20 °C ( $\rho_f$ ) gerechnet, da diese auch im Datenblatt der RLT-Anlage so verwendet wurde.

<sup>21</sup> in Anlehnung [16] Seite 54

Die resultierende Gleichung ergibt sich zu:

$$\Phi_{AUt} = \Phi_{AU} \cdot \left( \frac{\dot{V}_{AB}}{\dot{V}_{ZU}} \right)^{0,4} \quad (19)$$

Diese Beziehung stellt den Zusammenhang der Rückwärmezahl ( $\Phi_{AUt}$ ) in Abhängigkeit der Volumenströme dar. Mit Hilfe dieser Rückwärmezahl lässt sich nun die über die WRG erreichbare Zulufttemperatur ( $\vartheta_{ZUWRG2}$ ) berechnen. Hierbei ist darauf zu achten, dass entsprechende Motorabwärme von 1 K<sup>23</sup> hinzugerechnet wird, welche sich bei sehr niedrigen Außenlufttemperaturen positiv auf die Energiebilanz auswirkt.

$$\vartheta_{ZUWRG2} = \begin{cases} 0, & \vartheta_{ZUWRG2} > \vartheta_{ZUw} \\ \vartheta_{ZUw}, & \vartheta_{ZUw} - 1 K \leq \vartheta_{ZUWRG2} \leq \vartheta_{ZUw} \\ \vartheta_{AU} + \Phi_{AUt} \cdot (\vartheta_{ABa} - \vartheta_{AU}) + 1 K, & \vartheta_{ZUWRG2} < \vartheta_{ZUw} - 1 K \end{cases} \quad (20)$$

$\vartheta_{ZUw}$	Sollwert der Zulufttemperatur	[°C]
$\vartheta_{ZUWRG2}$	Zulufttemperatur über WRG im Heizfall	[°C]

Für den Fall, dass keine AFLK oder Erwärmung über die WRG stattfindet, wird die Außenlufttemperatur nur mit der Abwärme des Ventilators beaufschlagt.

$$\vartheta_{ZUü} = \begin{cases} \vartheta_{AU} + 1 K, & \vartheta_{ZUWRG2} = \vartheta_{ZUWRG1} = 0 \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \quad (21)$$

$\vartheta_{ZUü}$	Zulufttemperatur ohne WRG und AFLK	[°C]
-------------------	------------------------------------	------

## 4.4.5 Zusätzliche Heizleistung ZLA

Die WRG der ZLA verfügt über einen Plattenwärmetauscher zur Zuführung von zusätzlicher Wärmeenergie in das KVS, falls die rückgewonnene Heizenergie nicht ausreicht. Für diese Energiezuführungen muss die benötigte Leistung ebenfalls bestimmt werden, sie stellt den eigentlichen Leistungsbedarf der ZLA dar.

---

<sup>23</sup> [1] Seite 56

$$\dot{Q}_{ZLA} = \begin{cases} \dot{V}_{ZU} \cdot \rho_{AU} \cdot c_{pL} \cdot \Delta\vartheta_{Erh}, & \vartheta_{ZUw} > \vartheta_{ZUWRG2} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \quad (22)$$

$$\Delta\vartheta_{Erh} = \vartheta_{ZUw} - \vartheta_{ZUWRG2} \quad (23)$$

$\dot{Q}_{ZLA}$	Heizleistung Zusatzerhitzer	[kW]
$\Delta\vartheta_{Erh}$	Temperaturerhöhung Zusatzerhitzer	[°C]

Somit sind alle erforderlichen Parameter zur Simulation der von der ZLA bereitgestellten Zulufttemperatur bestimmt. Diese ergibt sich aus folgender Summe:

$$\vartheta_{ZUs} = \vartheta_{ZU\ddot{u}} + \vartheta_{ZUWRG2} + \vartheta_{ZUWRG1} + \Delta\vartheta_{Erh}. \quad (24)$$

$\vartheta_{ZUs}$	simulierte Zulufttemperatur der ZLA	[°C]
-------------------	-------------------------------------	------

#### 4.4.6 Bedarf nachgeschaltete RLT-Anlagen

Wie im Abschnitt 3.4 erläutert, besitzen die nachgeschalteten Lüftungsgeräte weitere Erhitzer und Kühler, um die von der ZLA bereitgestellte Luft nachzubehandeln. An welcher Anlage entsprechende Elemente installiert sind, kann der Tabelle im Anhang A2 entnommen werden. Um die jeweils abgeforderte Heiz- und Kühlleistung zu berechnen, werden nachstehende Formeln verwendet:

$$\dot{Q}_{Ei} = \begin{cases} \dot{V}_{ZUi} \cdot \rho_{ZUs} \cdot c_{pL} \cdot (\vartheta_{ZUs} - \vartheta_{ZUwi}), & \vartheta_{ZUs} < \vartheta_{ZUwi} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \quad (25)$$

$\dot{Q}_{Ei}$	Heizleistung der entsprechenden Anlage	[kW]
$\vartheta_{ZUwi}$	Sollzulufttemperatur der entsprechenden Anlage	[°C]
$\dot{V}_{ZUi}$	Volumenstrom der entsprechenden Anlage	[m³/h]
$\rho_{ZUs}$	Dichte der Zuluft aus der ZLA	[kg/m³]

$$\dot{Q}_{Ki} = \begin{cases} \dot{V}_{ZUwi} \cdot \rho_{ZUS} \cdot c_{pL} \cdot (\vartheta_{ZUS} - \vartheta_{ZUwi}), & \vartheta_{ZUS} > \vartheta_{ZUwi} \\ 0, & \text{sonst.} \end{cases} \quad (26)$$

$\dot{Q}_{Ki}$                       Kühlleistung der entsprechenden Anlage                      [kW]

Auf Grund der angenommenen Feuchtwerte kann leider keine Ermittlung der zusätzlichen Energiemengen zur Entfeuchtung erfolgen. Zur Berechnung der aufzubringenden Wärme- und Kälteenergie sind genaue Außenluftfeuchtwerte über den gesamten Betrachtungszeitraum erforderlich, welche eine stündliche Erfassung voraussetzen.

#### 4.4.7 Gesamtergebnis der Heiz- und Kühlleistung

Dank der beschriebenen Berechnungsmethoden konnten innerhalb des Microsoft Excel Modells die erforderlichen Leistungen bei unterschiedlichen Außenlufttemperaturen ermittelt werden, wie sie in Abbildung 8 dargestellt sind. Hierfür wurden beispielhaft Werte vom FG 2 verwendet. Es ist sehr deutlich zu erkennen, dass die WRG und die AFLK den größten Beitrag zur Wärme- und Kälteversorgung leisten.

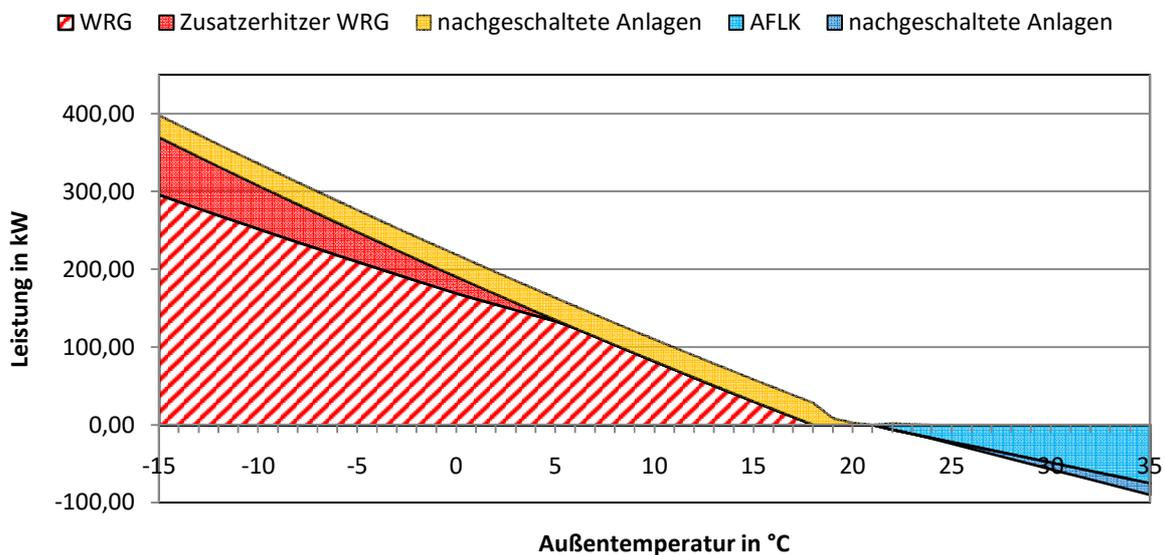


Abbildung 8: Abgerufene Heiz- und Kühlleistung nach Außentemperatur im FG 2

#### 4.4.8 Energieverbrauchskennzahlen laut Modell

Die mit Hilfe des Modells ermittelbaren Daten spiegeln nicht den wirklichen Energieverbrauch der RLT-Anlagen wieder, sondern sollen lediglich zur Veranschaulichung etwaiger Kennzahlen dienen. Für eine genaue Ermittlung sind Wärmemengenzähler erforderlich.

Alle Energieverbräuche wurden über die Außenlufttemperatur berechnet. Dafür verwendete Messwerte stammen aus einer Datenbank des Prozess Daten Managers (PDM), ein Programm zur Auswertung von Messdaten, welches über die Bearbeitungsplattform Advanced Data Processing (ADP) zur Implementierung der Daten in Microsoft Excel verfügt. Die aufgenommenen Temperaturen wurden in einem stündlichen Intervall hinterlegt und auch in dieser Auflösung verwendet. Somit konnte für jede Stunde vom 1.7.2015 bis 30.6.2016 die Wärmeleistung diskret berechnet werden, was die Energieverbrauchsermittlung durch einfaches Aufsummieren der einzelnen Leistungen ermöglicht. Abbildung 9 zeigt den Verlauf des Wärmeenergieverbrauchs über den ausgewerteten Zeitraum. Zu erkennen ist, dass auch im Sommer noch Heizenergie benötigt wird und der Kälteenergieverbrauch im Gegensatz zur Heizenergie sehr gering ist.

#### Jahresverteilung des Wärmeenergieverbrauchs

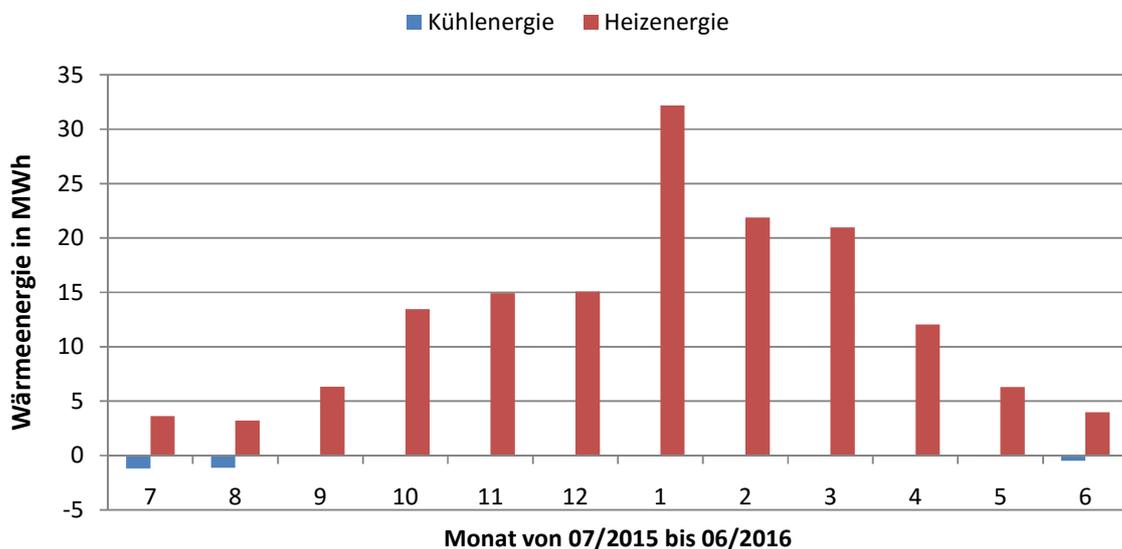


Abbildung 9: Jahresverteilung des Wärmeenergieverbrauchs FG 2

Der gesamte Wärmeenergieverbrauch der RLT-Anlagen in den Dachzentralen der 4 Gebäude verteilt sich wie er in Tabelle 4 aufgelistet wird. Diese Energieverbräuche wurden mit Hilfe des beschriebenen Modells ermittelt. Im FG 3 wird keine Kälteenergie verbraucht, da dort keine RLT-Anlage über einen Kälteanschluss verfügt.

**Tabelle 4: Wärme- und Kälteenergieverbrauch**

Gebäude	Wärmeenergieverbrauch in MWh	Kälteenergieverbrauch in MWh
<b>FG 1</b>	127,797	110,039
<b>FG 2</b>	227,971	2,935
<b>FG 3</b>	238,241	0,000
<b>FG 4</b>	179,642	9,886

## 4.4.9 Wasserverbrauch

Das aufbereitete Wasser für die Sprühbefeuchtung der AFLK wird aus einem Gemisch aus Permeat und normalen Trinkwasser mit einem Mischungsverhältnis von 5:4 bereitgestellt. Dadurch ergibt sich eine Gesamthärte von 1,5 °dH, was sehr weichem Wasser entspricht und ein frühzeitiges Verkalken der Wärmetauscherlamellen in den Anlagen vermeidet.

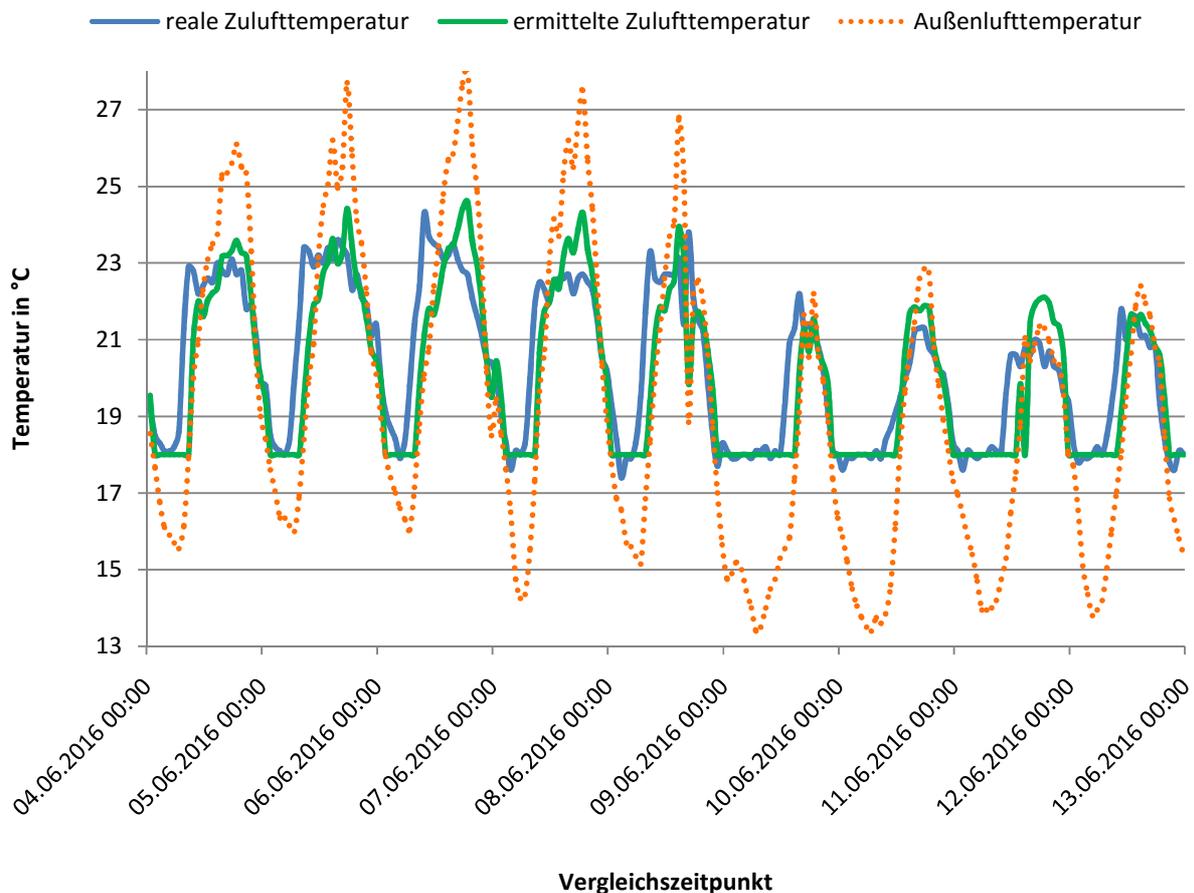
Die Abluftbefeuchter in den 4 FG benötigen unterschiedliche Wassermengen. Sie verfügen jeweils über 3 Befeuchtungsstufen, welche sich je nach Anforderung zuschalten. Da beim Einschalten der AFLK meistens innerhalb kurzer Zeit alle 3 Stufen in Betrieb gehen, wird zur Ermittlung der Wasserverbrauchswerte die Annahme getroffen, dass die Befeuchter gleichzeitig zu- und abschalten. Die sich so ergebenden Wassermengen weichen nur in einem geringen Maß ab und konnten mit Hilfe der Simulation für den betrachteten Zeitraum bestimmt werden. Diese sind in Tabelle 5 aufgelistet. Ebenfalls wurden Wassermengen angegeben, welche sich bei eingeschalteter Kühlung stündlich ergeben.

**Tabelle 5: Berechnete Wasserverbräuche der AFLK**

Gebäude	Wasserverbrauch in m³/a			Wasserverbrauch im Betrieb in l/h
	VE-Wasser	Brauchwasser	gesamt	
<b>FG 1</b>	150,52	120,41	270,93	293,54
<b>FG 2</b>	141,44	113,15	254,59	204,00
<b>FG 3</b>	112,73	90,19	202,92	172,70
<b>FG 4</b>	155,24	124,20	279,44	227,05

#### 4.4.10 Validierung des Modells

Beim Vergleich der erreichten realen Zulufttemperatur mit den über die Simulation berechneten Temperaturen fällt auf, dass die gemessenen Werte nicht zu 100 % mit denen des Modells übereinstimmen. Innerhalb eines betrachteten Zeitraumes von 10 Tagen, wie in Abbildung 10 dargestellt, ergibt sich überwiegend eine Abweichung von ca. 0,5 K, welche während Ein- und Ausschaltvorgängen der AFLK teilweise etwas stärker abweicht.



**Abbildung 10: Validierung der Simulationstemperatur**

Beim Zu- bzw. Abschalten der Kühlung wird die innerhalb des Wasser-Glykol-Gemisches der jeweiligen Wärmetauscher gespeicherte Wärmeenergie simulationsmäßig nicht betrachtet, wodurch sich die entsprechenden Abweichungen ergeben.

Außerdem ist die Kühlleistung von der Abluffeuchte abhängig. Um so trockener die Abluft ist, desto niedriger ist die erreichbare Feuchtkugeltemperatur. Somit steigt auch das Kühlvermögen der Gesamtanlage. Für diese Abluffeuchte und auch einige andere Größen können im Modell ohne genauere Bestimmung keine Werte berechnet werden, deshalb wurden, wie bereits beschrieben, für jedes Gebäude Mittel- und Annahmewerte über die untersuchten Zeiträume gebildet und zur Modellbildung verwendet.

In Abbildung 7 ist eine relativ breite Streuung der Messwerte zur Kühlleistungsbestimmung der AFLK zu erkennen. Demzufolge liegt auf der Hand, dass sich gewisse Abweichung ergeben.

Im Heizfall, also wenn die WRG und der zusätzliche Erhitzer in Betrieb sind, konnten leider keine Temperaturvergleiche getätigt werden. Für diese Untersuchung waren die Außentemperaturen während der gesamten Untersuchungsphase zu hoch. Demzufolge kann hier nur eine sehr vage Vergleichsmethode herangezogen werden.

Im FG 2 wurde von Anfang Juli 2015 bis Ende Juni 2016 über einen Wärmemengenzähler der Wärmeenergieverbrauch mit Hilfe des ADP aufgezeichnet. Dieser Zähler ist das einzige Messgerät, welches den Wärmeenergieverbrauch der RLT-Anlagen in den Gebäuden FG 1 - 4 und dem in dieser Arbeit nicht betrachteten OP-Lüftungsbereich erfasst. Dieser Energiezähler zeigt einen Gesamtverbrauch von 1872 MWh an. Laut dem erstelltem Modell verbrauchten die Lüftungsanlagen in den Dachzentralen in dieser Zeitspanne insgesamt 773,65 MWh. Die Differenz von 1098,35 MWh müsste also von den nicht untersuchten RLT-Geräten verbraucht worden sein. In Tabelle 6 werden nun vergleichsweise die Verbrauchswerte mit der Luftmengen der Lüftungsgeräte ins Verhältnis gesetzt.

**Tabelle 6: Validierung Wärmemengen**

Lüftungsgeräte	Wärmeenergie in MWh	Luftmengen in m <sup>3</sup> /h	Verhältnis in kWh/(m <sup>3</sup> /h)
Dachzentralen FG 1 - 4	773,65	126.500,00	6,12
nicht betrachtete Anlagen	1.098,35	160.000,00	6,86

Es ergibt sich ein etwas höherer Verhältniswert für die nicht betrachteten Anlagen. Diese Anlagen werden von einer ZLA versorgt, welche nur 2 zuluftseitige Register zur WRG nutzt. Das dritte Register wird im Winter zur Erzeugung von freier Kälte verwendet, demzufolge ist die Rückwärmezahl hier etwas kleiner und es wird mehr Heizenergie verbraucht.

Das Ergebnis dieser vagen Vergleichsweise ist zufriedenstellend, da sich der Mehrverbrauch objektiv begründen lässt. Für eine genauere Einschätzung des Modells ist eine Einzelverbrauchsermittlung der Dachzentralen erforderlich.

Eine Validierung des Kälteverbrauchs ist an dieser Stelle nicht möglich, weil keine Messgeräte zur separaten Erfassung vorhanden sind.

Das Gesamtmodell bietet eine Möglichkeit quantitative Aussagen hinsichtlich der Energieverbräuche zu tätigen. Da leider keine genauen Zählleinrichtungen vorhanden sind, wird das Modell für weitere Betrachtungen als ausreichend eingeschätzt. Alle Angaben zu tendenziell ermittelten Verbrauchswerten sind also mit der Prämisse beschriebener Abweichungen anzusehen.

## 5 Optimierungspotenzial

### 5.1 Allgemeine Hinweise

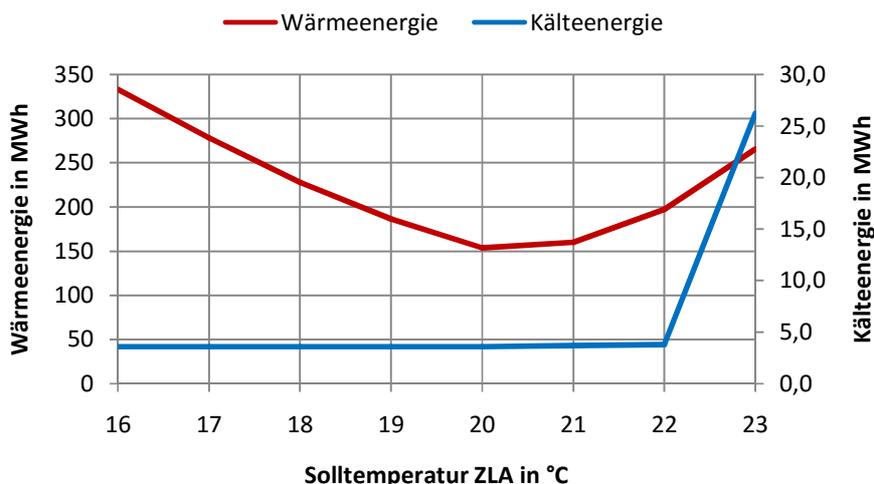
In den zu untersuchenden 4 Gebäuden sind erhebliche Einsparpotenziale vorhanden. Diese wurden mit Hilfe des im letzten Kapitel erläuterten Modells ermittelt und sollten deshalb ebenfalls als modellhafte Annahmekennzahlen dienen. Für eine genauere Erfassung der Verbrauchsreduzierung sind geeichte Zähleinrichtungen an den Versorgungsanlagen erforderlich. Im Folgenden werden die über das Modell erkannten Optimierungspotenziale beschrieben.

Dabei ist darauf zu achten, dass sich je nach Umsetzungsreihenfolge unterschiedliche Werte ergeben. Beispielsweise ergibt sich durch Luftmengenabsenkung ohne vorherige Anpassung der ZLA-Solltemperatur ein höheres Einsparpotenzial für die Absenkung, als wenn bereits zuvor die ZLA-Solltemperatur angepasst wurde. Somit richten sich die angegebenen Werte nach der hier verwendeten Reihenfolge. Bei der Verbrauchsreduzierung des Verschnittwassers gilt ebenfalls die Aussage zur Beachtung der Reihenfolge der Optimierungen. Zur besseren Vergleichbarkeit der Ergebnisse, wurden die übrigen Verbesserungsvorschläge jeweils einzeln, also ohne weitere Maßnahmen erprobt. Das gesamte Einsparpotenzial würde demzufolge, je nach Kombination der Unterpunkte, etwas abweichend von den aufgeführten Resultaten ausfallen.

### 5.2 Temperaturanpassung ZLA

In Abhängigkeit der über die ZLA bereitgestellten Zulufttemperatur müssen die nachgeschalteten Anlagen diese je nach entsprechend eingestellte Solltemperaturen angleichen. Die Vorgabewerte der Nachbehandlungsanlagen differenzieren, deshalb muss für jedes Gebäude separat eine optimale Lufttemperatur bestimmt werden, die über die ZLA an die übrigen Lüftungsgeräte weitergeleitet wird. Bei zu niedriger ZLA-Sollwerteneinstellung müssen die Nachbehandlungseinheiten nachheizen. Da sie nicht über eine WRG verfügen, muss dafür Heizenergie aufgebracht werden. Falls die bereitgestellte Temperatur zu hoch ist, wird eine nachträgliche Kühlung erforderlich. Leider verfügen nur sehr wenige Anlagen zur Nachbehandlung über entsprechende Kühlelemente. Somit ist die Zulufttemperatur der ZLA auf den niedrigsten Sollwert der nachgeschalteten Anlagen ohne Kühlung einzustellen, um die Solltemperaturen einhalten zu können.

In Abbildung 11 ist der Wärme- und Kälteenergieverbrauch für die RLT-Geräte im FG 2 dargestellt. Die momentane Solltemperatur der ZLA beträgt 18 °C, es ist deutlich zu erkennen, dass bei einer Erhöhung auf 20 °C Wärmeenergie eingespart werden kann. Diese Einsparung ergibt sich durch eine besser Ausnutzung der WRG. Für einen höheren Temperaturvorgabewert wäre wieder ein Anstieg der verbrauchten Wärmeenergie zu erwarten, weil dann der zusätzliche Plattenwärmetauscher im KVS nachheizen müsste.



**Abbildung 11: Wärme und Kälteenergieverbrauch als Funktion der Solltemperatur der ZLA**

Diese einfache Temperaturanpassung kann gebäudeweise durchgeführt werden, wobei sich je nach Lüftungsanlagensystem andere Optimaltemperaturen ergeben. Auf Grund der unterschiedlichen Solltemperaturen und Luftmengen der Nachbehandlungsgeräte ergeben sich entsprechende Verbrauchsunterschiede, wie sie in Tabelle 7 aufgeführt sind. Aufgelistet ist auch der reduzierte Wasserverbrauch, welcher durch die erst bei höheren Temperaturen einschaltende AFLK entsteht und die optimale Zuluftsolltemperatur der jeweiligen ZLA.

**Tabelle 7: vorher/nachher Vergleich Temperaturanpassung ZLA**

Gebäude	Wärmeenergie in MWh		Wasserverbrauch in m³/a		Zuluftsolltemperatur der ZLA in °C	
	vorher	nachher	vorher	nachher	vorher	nachher
FG 1	127,797	127,797	270,93	270,93	18	18
FG 2	227,971	153,768	254,59	236,64	18	20
FG 3	238,241	168,470	202,92	172,01	18	21
FG 4	179,642	122,750	279,44	261,50	18	20

## 5.3 Absenkbetrieb

Die nachgeschalteten RLT-Anlagen versorgen unterschiedliche Bereiche von denen manche ständig besetzt sind und somit einen 24 stündigen Normalbetrieb erfordern, andere haben wiederum Öffnungszeiten, außerhalb von denen eine Absenkung der Luftmengen ratsam wäre. Eine Reduzierung der Solltemperaturen wird für den Absenkbetrieb nicht vorgesehen, da auch außerhalb der Öffnungszeiten für Notfalluntersuchungen die Temperaturen konstant gehalten werden sollen.

Bei den genannten Bereichen mit Öffnungszeiten handelt es sich größtenteils um Ambulanzen, diese sind als Untersuchungs- und Behandlungsbereiche einzustufen. Somit ergibt sich in den meisten Fällen eine Zulufrate, welche zu 100 % aus aufbereiteter Außenluft besteht, von 40 m<sup>3</sup>/h je Person in dem entsprechenden Bereich. Für Behandlungsräume mit Narkosegasanwendung sollte eine Frischlufrate von 150 m<sup>3</sup>/h je Patient gegeben sein.<sup>24</sup>

Diese Luftmengen werden während der Betriebszeiten eingehalten, können aber außerhalb der Öffnungszeiten reduziert werden, da sich dann weniger bis keine Personen in den Bereichen aufhalten. Leider ist nicht vorhersehbar, zu welchem Zeitpunkt in den Ambulanzen Notfalluntersuchungen stattfinden. Somit müssen die minimalen Frischlufraten auch während des reduzierten Betriebs eingehalten werden. Ob dies bei einer 50 %igen Luftmengenreduzierung überall möglich ist, sollte mit einem Volumenstrommessgerät, wie beispielsweise einer Volumenstrommesshaube, für einzelne Räume direkt am Luftauslass geprüft werden.

Die Lüftungsanlage für die Cafeteria im FG 1 kann, innerhalb der Zeiten in denen diese geschlossen ist, sogar ganz abgeschaltet werden.

In Tabelle 8 sind alle ermittelten Öffnungszeiten aufgelistet, an welche die Luftmengen entsprechend angepasst werden könnten.

---

<sup>24</sup> in Anlehnung an [8] Seite 14

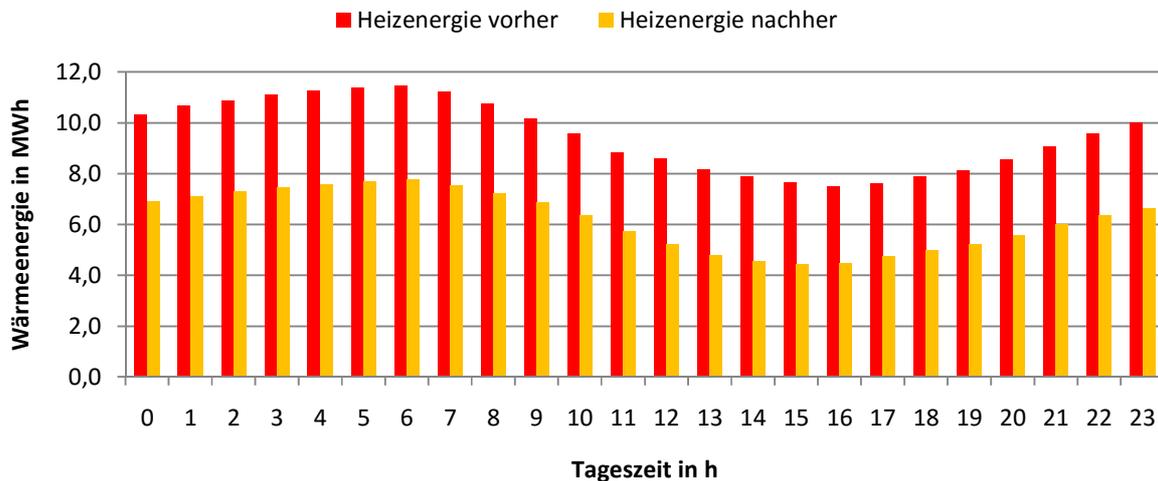
**Tabelle 8: Öffnungszeiten der absenkbaren Bereiche**

Funktionsgebäude	Anlage	Bereich									mögliche Absenkstunden 7/2015 - 6/2016
				Montag	Dienstag	Mittwoch	Donnerstag	Freitag	Samstag	Sonntag/Feiertag	
FG 1	19	E04 Urologie	von	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	-	-	6587 h
	bis		16.00	16.00	16.00	16.00	13.30	-	-		
	23	E01 Cafeteria	von	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	10.00	10.00	4614 h
	bis		20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	
FG 2	25	E04 Transfusionsmedizin	von	7.00	10.00	-	10.00	10.00	9.00	-	7254 h
			bis	11.00	19.00	-	19.00	15.00	12.00	-	
	28	E02 Kinderchirurgie	von	9.00	9.00	14.00	9.00	9.00	-	-	7761 h
			bis	13.00	13.00	17.30	13.00	13.00	-	-	
	29	E01 Neurochirurgie	von	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	-	-	7458 h
			bis	14.00	14.00	18.00	14.00	14.00	-	-	
FG 3	33	E02 Kinderkardiologie	von	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	-	-	6940 h
			bis	16.00	16.00	16.00	16.00	12.00	-	-	
	34	E01 Augenheilkunde	von	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	-	-	6787 h
			bis	16.30	16.30	16.30	16.30	15.00	-	-	
FG 4	38	E01 HNO	von	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	-	-	6744 h
			bis	16.00	16.00	16.00	16.00	16.00	-	-	

Der Absenkbetrieb sorgt für einen weiteren Rückgang der aufgewendeten Energie für die Lüftungsgeräte. Es ergeben sich deutliche Einsparungen an Wärme- und Elektroenergie, da durch die geringeren Luftmengen die Leistung der Lüfterantriebe absinkt und auch weniger Wärmeenergie benötigt wird.

Die Absenkzeiten beziehen sich hauptsächlich auf die Nachtstunden und das Wochenende, aber auch die Feiertage in Sachsen-Anhalt wurden berücksichtigt. Dank der nur zu 50 % reduzierten Luftmenge findet trotz allem eine gewisse Sommernachtkühlung Anwendung und vor allem wird im Winterbetrieb sehr viel Heizenergie eingespart, da vor allem nachts bei niedrigen Außentemperaturen weniger Heizleistung abgerufen werden muss.

Eine Verteilung des tageszeitabhängigen Jahresverbrauchs der Heizenergie ist in Abbildung 12 zum Vergleich mit der optimierten Variante beispielhaft für das FG 2 dargestellt. In diese Darstellung wurde auch die Temperaturanpassung der ZLA einbezogen.



**Abbildung 12: vorher/nachher Vergleich der Wärmeenergieverteilung auf die Tageszeiten**

Dank der Absenkungen kann auch ein enormer Rückgang des Elektroenergieverbrauchs erreicht werden. Dieser wird vor allem durch den nichtlinearen Zusammenhang zwischen Volumenstrom und dem dynamischen Druck deutlich, welcher sich durch folgenden Ausdruck ergibt:

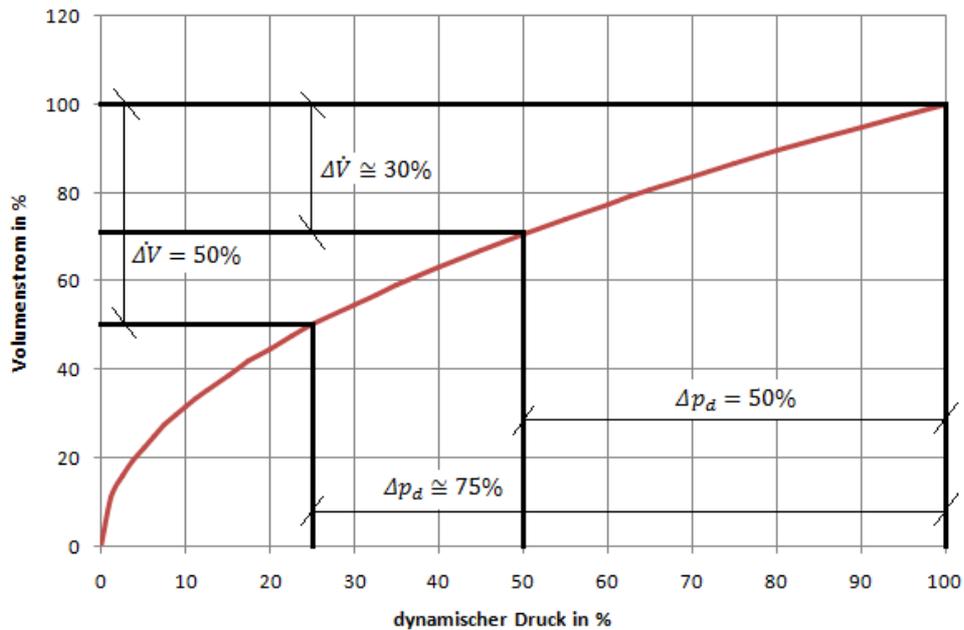
$$\dot{V} = \sqrt{\frac{2 \cdot p_d}{\rho_f}} \cdot A. \quad (27)^{25}$$

$\dot{V}$	Volumenstrom	[m <sup>3</sup> /h]
$p_d$	dynamischer Druck Lüftungskanal	[Pa]
$A$	Querschnittsfläche Lüftungskanal	[m <sup>2</sup> ]

Umso niedriger der Zu- und Abluftsolldruck eingestellt wird, desto weniger Leistung muss der jeweilige Ventilatorantrieb aufnehmen, um den Sollwert zu erreichen.

<sup>25</sup> in Anlehnung an [1] Seite 165

Über die Berechnungsgleichung des Volumenstroms lässt sich das Diagramm mit prozentualen Werten und fiktiv angenommenem Kanalquerschnitt in Abbildung 13 erstellen. Es ist zu erkennen, dass der Solldruck um ca. 75 % zu reduzieren ist, um den Volumenstrom zu halbieren.



**Abbildung 13: Volumenstrom als Funktion des dynamischen Drucks**

Leider kann diese Theorie nicht direkt angewendet werden, da bei einer zu hohen Druckreduzierung Überwachungseinrichtungen, wie z.B. Laufüberwachungen und Strömungswächter auslösen. Aus diesem Grund wurde bei einzelnen Anlagen, welche für den Reduzierbetrieb in Frage kommen, die Solldrücke durch empirisches Herantasten reduziert, bis sich der Volumenstrom auf ein Minimum eingestellt hat. Wie zu erwarten, ist es nicht möglich den Luftstrom bei allen Lüftungsgeräten auf 50 % herabzusetzen. Zum einen durch die bereits erwähnten Überwachungseinrichtungen und zum anderen durch den Druck, welcher an der Eingangsseite der nachgeschalteten RLT-Geräte von der Luftaufbereitung bereitgestellt wird. Dieser dynamische Druck erzeugt auch den Volumenstrom durch die reduziert betriebenen Anlagen. Ein willkommener Nebeneffekt ist, dass durch die nun geringeren Luftmengen auch die Ventilatoren der Luftaufbereitungsanlagen weniger Leistung aufnehmen.

Die empirisch ermittelten Solldrücke für Zu- und Abluftanlagen, welche reduziert betrieben werden könnten sind in Tabelle 9 aufgelistet. Außerdem werden die Leistungsreduzierungen der Lüfter und Volumenstromrückgänge mit aufgeführt, welche sich aus der Differenz zwischen der Leistungsaufnahme im Normal- und Absenkbetrieb ergeben.

**Tabelle 9: Übersicht der Absenkwerte**

Funktionsgebäude	Anlage	Bereich	Zuluftreduzierung			Abluftreduzierung		
			Luftmenge in m³/h	Motorleistung in kW	einzustellender Solldruck in Pa	Luftmenge in m³/h	Motorleistung in kW	einzustellender Solldruck in Pa
FG 1	19	E04 Urologie	2.900	1,4	120	1.700	0,9	110
	23	E01 Cafeteria	3.600	0,9	90	2.000	0,7	90
	24	ZLA	6.500	2,2		3.700	2,0	
FG 2	25	E04 Transfusionsmedizin	950	0,8	90	800	0,8	90
	28	E02 Kinderchirurgie	1.800	0,6	90	2.050	0,4	85
	29	E01 Neurochirurgie	950	0,9	90	1.000	0,8	90
	30	ZLA	3.700	2,2		3.850	1,6	
FG 3	33	E02 Kinderkardiologie	1.800	1,1	85	800	0,7	95
	34	E01 Augenheilkunde	3.100	1,3	100	2.300	0,6	80
	35	ZLA	4.900	1,8		3.100	1,0	
FG 4	38	E01 HNO	1.400	0,8	115	2.500	1,0	130
	41	ZLA	1.400	1,2		2.500	0,4	

Insgesamt konnte bei keiner Anlage die Luftmenge um die Hälfte herabgesenkt werden, ohne dass entsprechende Überwachungseinrichtungen auslösen. Diese müssten für die Dauer der Absenkezeiten außer Betrieb genommen oder zumindest nicht ausgewertet werden, was für eine sichere Anlagenfunktion nicht akzeptabel ist.

Tabelle 10 zeigt, wie sich die Energieverbräuche durch das Absenken der Luftmengen im Absenkbetrieb entwickeln würden. An dieser Stelle besteht ein erhebliches Einsparpotenzial, durch einfache Maßnahmen. Auch Kälteenergie wird eingespart, obwohl keine RLT-Anlage mit Kühlfunktion abgesenkt werden kann. Das lässt sich damit begründen, dass sich durch den verringerten Gesamtzuluftstrom durch die jeweilige ZLA eine etwas niedriger Zulufttemperatur einstellt.

**Tabelle 10: vorher/nachher Vergleich Absenkbetrieb**

Gebäude	Wärmeenergie in MWh		Kälteenergie in		Elektroenergie in MWh	
	vorher	nachher	vorher	nachher	vorher	nachher
FG 1	127,797	92,944	110,039	108,762	433,051	394,901
FG 2	153,768	142,307	2,935	2,260	235,411	173,192
FG 3	168,470	141,436	0,000	0,000	224,870	201,288
FG 4	122,750	128,242	9,886	9,015	249,465	234,628

## 5.4 Filterwechsel in RLT-Anlagen

Möglichkeiten zur Kostenreduzierung durch temporäre Veränderung im Turnus des Luftfilterwechsels können auch ein gewisses Potenzial bieten. Die festgestellten Ergebnisse inklusive der Herangehensweise sollen in diesem Abschnitt vorgestellt werden.

Alle Untersuchungen wurden ohne Berücksichtigung der Luftmengenreduzierung im möglichen Absenkbetrieb vorgenommen, da nur Messergebnisse aus einer Filterwechselperiode verwendet werden konnten, in der keine Absenkungen stattgefunden haben.

Momentan werden sämtliche Luftfilter in den RLT-Anlagen einmal jährlich im Rahmen der Wartung ausgetauscht. Bei endständigen Luftfilter wird ein Filterwechsel nur bedarfsweise, also wenn der entsprechende Maximaldifferenzdruck erreicht ist oder die Luftmenge zu gering ist, durchgeführt. Im Zuge der vorgeschriebenen Inspektionen erfolgt eine Kontrolle, ob diese Feinstaubfilter kleinste Schwebstoffe aus der Zuluft filtern, ehe diese in die Reinraumbereiche geleitet wird. Die erforderliche Prüfung wird mit einem Partikelmonitor umgesetzt.

Jede Filterstufe in den Lüftungsgeräten verfügt über eine Filterüberwachung, diese gibt bei zu hohem Verschmutzungsgrad und dem damit einhergehenden Differenzdruckanstieg eine Meldung für den anstehenden Wechsel ab. Diese Überwachungseinrichtungen messen kontinuierlich den Differenzdruck über die entsprechenden Luftfilter. An genau diesen Messanschlüssen wurden mit Hilfe eines Differenzdruckmessgerätes der Fa. Testo alle Druckdifferenzen vor und nach der Wartung dokumentiert und die zu diesen Zeitpunkten aufgenommene Motorleistung ebenfalls erfasst.

Eine Veränderung der aufgenommenen Motorleistung wird durch die druckgeregelten Frequenzumrichter innerhalb der Lüftungsgeräte erreicht. Ein sauberer Luftfilter erfordert eine geringere Drehzahl der Ventilatoren, um den Solldruck zu erreichen, als ein verschmutzter Luftfilter.

In Tabelle 11 sind die gemessenen Differenzdruckwerte aufgeführt, außerdem sind die entsprechenden Filterklassen mit aufgelistet. Auf die Aufführung von Schwebstofffiltern wurde verzichtet.

**Tabelle 11: Differenzdrücke Zu- und Abluftfilter**

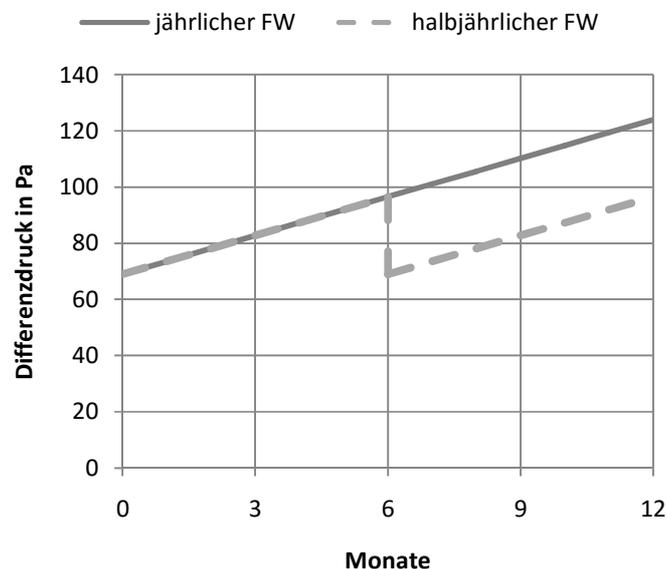
Funktionsgebäude	Anlage	Bereich	Zuluftfilter			Abluftfilter				
			Filterklasse	Differenzdruck in Pa		Filterklasse	Differenzdruck in Pa			
				vor Filterwechsel 2016	nach Filterwechsel 2016		Wartungsbedingte Drucksenkung	vor Filterwechsel 2016	nach Filterwechsel 2016	Wartungsbedingte Drucksenkung
FG 1	19	E04 Urologie	F9	164,0	119,0	45,0	F5	57,0	49,0	8,0
	20	E02/E03 ITS/Urologie	F9	163,0	120,0	43,0	F5	48,0	38,0	10,0
	21	E02/E03 ITS/Urologie NR	F9	137,0	100,0	37,0	F5	65,0	51,0	14,0
	22	E01 Notaufnahme	F9	147,0	105,0	42,0	F5	49,0	47,0	2,0
	23	E01 Cafeteria	F9	95,0	59,0	36,0	F5	50,0	36,0	14,0
	24	ZLA	F7	74,0	35,0	39,0	keine Filterung			
FG 2	25	E04 Transfusionsmedizin	F9	143,0	110,0	33,0	F5	59,0	55,0	4,0
	26	E03 ITS-Nebenräume	F9	128,0	86,0	42,0	F5	55,0	45,0	10,0
	27	E03 ITS-Bettzimmer	F9	140,0	111,0	29,0	F5	46,0	37,0	9,0
	28	E02 Kinderchirurgie	F9	139,0	94,0	45,0	F5	47,0	37,0	10,0
	29	E01 Neurochirurgie	F9	150,0	110,0	40,0	F5	58,0	52,0	6,0
	30	ZLA	F7	124,0	69,0	55,0	keine Filterung			
FG 3	31	E04 Transfusionsmedizin	F9	120,0	Wartung findet erst im Oktober 2016 statt	F5	39,0	Wartung findet erst im Oktober 2016 statt		
	32	E03 Kinderkardiologie	F9	122,0		F5	46,0			
	33	E02 Kinderkardiologie	F9	123,0		F5	38,0			
	34	E01 Augenheilkunde	F9	117,0		F5	35,0			
	35	ZLA	F7	98,0	keine Filterung					
FG 4	36	E03 Kinderhämatologie	F9	156,0	110,0	46,0	F5	60,0	52,0	8,0
	37	E02 Kinderheilkunde	F9	153,0	115,0	38,0	F5	71,0	60,0	11,0
	38	E01 HNO	F9	169,0	125,0	44,0	F5	62,0	56,0	6,0
	39	U01 ITS Anästhesie	F9	147,0	109,0	38,0	F5	44,0	38,0	6,0
	40	U01 ITS Anästhesie NR	F9	151,0	110,0	41,0	F5	54,0	49,0	5,0
	41	ZLA	F7	122,0	71,0	51,0	keine Filterung			

Erwartungsgemäß sinkt die Leistungsaufnahme durch den reduzierten Luftwiderstand nach dem Filterwechsel. Diese reduzierte Leistungsaufnahme soll zur Bestimmung einer optimalen Häufigkeit zur Erneuerung der Luftfilter herangezogen werden. Laut DIN 1946 Teil 4 sollte ein

jährlicher FW für die erste Luftfilterstufe in RLT-Anlagen durchgeführt werden, für die zweite Stufe reicht ein 2 jähriger Turnus aus.<sup>26</sup> Die Methodik zur Prüfung, ob ein halbjähriger Filterwechsel Betriebskosten senken könnte, soll im Folgenden beispielhaft mit Werten der ZLA 30 vorgestellt werden.

$\Delta P_{ZLA30}$	Leistungsreduzierung durch FW ZLA 30	[kW]
	$\Delta p_{ZLA30} = 2,7 \text{ kW}$	
$\Delta p_{ZLA30}$	Differenzdrucksenkung über Filter ZLA 30	[Pa]
	$\Delta p_{ZLA30} = 55 \text{ Pa}$	

Die Differenzdruckentwicklung wird dabei als linear und die reduzierte Leistungsaufnahme als konstant angenommen. In Abbildung 14 wird deutlich, dass bei einem FW nach nur 6 monatiger Filterstandzeit die Druckdifferenz über die nächsten 6 Monate um 27,5 Pa herabgesetzt werden kann, das entspricht der halben Differenzdrucksenkung eines jährlichen FW. Somit muss zur Berechnung auch die Leistungsreduzierung verkleinert werden und wird, da es sich nur um eine geringe Größenänderung handelt, ohne genauere Betrachtungen halbiert.



**Abbildung 14: Differenzdruckentwicklung ZLA 30 bei halbjährlichen FW**

<sup>26</sup> in Anlehnung an [9] Seite 26

Demzufolge ergibt sich die tatsächliche Energieeinsparung des Lüftermotors durch den halbjährlichen FW zu:

$$\Delta W_{FWZLA30} = \frac{\Delta P_{ZLA30}}{2} \cdot \frac{\Delta t_{Jahr}}{2} = \frac{\Delta P_{ZLA30} \cdot \Delta t_{Jahr}}{4} \quad (28)$$

$$\Delta W_{FWZLA30} = \frac{2,7 \text{ kW} \cdot 8760 \text{ h}}{4}$$

$$\Delta W_{FWZLA30} = \underline{\underline{5913 \text{ kWh}}}$$

$$\Delta W_{FWZLA30} \quad \text{Elektroenergieeinsparung durch FW ZLA 30} \quad [\text{kWh}]$$

Diese elektrische Energie muss zur Kostenbestimmung noch mit dem entsprechenden Energiepreis multipliziert werden und zur Rentabilitätseinschätzung mit den Einkaufspreisen für Luftfilter verglichen werden, unberücksichtigt bleibt bei dieser Betrachtung jedoch die Vergütung des Wartungspersonals.

Durch die so häufiger anstehende Entsorgung der Altfilter ist zur Einschätzung des Ersparnisses auch die Berücksichtigung der Entsorgungsgebühr von ca. 120 € notwendig. Diese Kosten für den Abtransport verschmutzter Luftfilter fallen an, sobald der Entsorgungscontainer gefüllt ist. Das ist bisher nach jeder Wartung der Fall. Somit wurden die Ausgaben für die Altfilterentsorgung jeweils gebäudeweise vom Ersparnis abgezogen.

Tabelle 12 zeigt, wie sich ein verkürzter Intervall des zuluftseitigen FW finanziell auswirken würde, wenn die beschriebenen Faktoren berücksichtigt werden.

Tabelle 12: Rentabilität halbjährlicher FW in der Zuluft

Funktionsgebäude	Anlage	Leistungsreduzierung durch jährlichen FW in kW	Energieverbrauchs-rückgang in kWh/a	Reduzierung der Elektroenergiekosten	Mehraufwand Luftfilter <sup>27</sup>	Ersparnis pro Anlage	Ersparnis abzüglich 120€ für Entsorgung
<b>halbjährlicher FW</b>							
<b>FG 1</b>	19	0,2	-438	79,72 €	-80,91 €	-1,19 €	413,35 €
	20	0,3	-657	119,57 €	-208,80 €	-89,23 €	
	21	0,5	-1.095	199,29 €	-208,80 €	-9,51 €	
	22	0,4	-876	159,43 €	-123,54 €	35,89 €	
	23	0,2	-438	79,72 €	-61,77 €	17,95 €	
	24	2,6	-5.694	1.036,31 €	-556,80 €	479,51 €	
<b>FG 2</b>	25	0,2	-438	79,72 €	-61,77 €	17,95 €	1.229,58 €
	26	0,4	-876	159,43 €	-107,88 €	51,55 €	
	27	1	-2.190	398,58 €	-161,24 €	237,34 €	
	28	1,1	-2.409	438,44 €	-80,91 €	357,53 €	
	29	0,2	-438	79,72 €	-61,77 €	17,95 €	
	30	2,7	-5.913	1.076,17 €	-408,90 €	667,27 €	
<b>FG 4</b>	36	0,5	-1.095	199,29 €	-61,77 €	137,52 €	800,04 €
	37	0,2	-438	79,72 €	-61,77 €	17,95 €	
	38	0,4	-876	159,43 €	-80,91 €	78,52 €	
	39	0,7	-1.533	279,01 €	-192,20 €	86,81 €	
	40	0,6	-1.314	239,15 €	-107,88 €	131,27 €	
	41	2,2	-4.818	876,88 €	-408,90 €	467,98 €	

Es ist festzustellen, dass es sich lohnt, in allen Anlagen die Luftfilter zweimal im Jahr zu erneuern. Diese Tatsache wird mit den erhöhten Entsorgungskosten der Altfilter in Höhe von ca. 120 € pro FG kaum beeinflusst. Die Anlagen 19, 20 und 21 wurden in der Spalte 8 nicht einbezogen, da sich hier ein halbjähriger FW nicht rentieren würde. Die größten Potenziale ergeben sich bei den ZLAen. Ein seltenerer FW in der Zuluft würde keine kostenreduzierenden Auswirkungen haben, aus diesem Grund wird auf Ausführungen hierzu verzichtet.

<sup>27</sup> [14]

Da bei den Abluftfiltern wesentlich geringer Differenzdruckänderung nach einem FW festzustellen waren, soll bei diesen Luftfiltern ein seltenerer Austausch untersucht werden. Dafür wird direkt der maximal mögliche 2 jährige Wechselzyklus herangezogen und beispielhaft für Anlage 26 vorgestellt.

$\Delta P_{FW26AB}$  Leistungsreduzierung durch FW RLT 26 Abluft [kW]

$$\Delta P_{FW26AB} = 0,05 \text{ kW}$$

$\Delta p_{FW26AB}$  Differenzdrucksenkung über Filter RLT 26 Abluft [Pa]

$$\Delta p_{FW26AB} = 10 \text{ Pa}$$

Es gelten wieder die gleichen Annahmen für die Differenzdruckentwicklung und reduzierte Leistungsaufnahme wie bei den vorangegangenen Ausführungen zu ZLA 30. In Abbildung 15 wird nun ersichtlich, dass bei doppelter Abluftfilterstandzeit die Druckdifferenz über die nächsten 12 Monate um 10 Pa höher ist, als im vorhergehenden Jahresverlauf. Der gesteigerte Luftwiderstand über den Abluftfilter erzeugt einen energetischen Mehraufwand. Somit muss zur Berechnung der Leistungsaufnahme im zweiten Jahr die ausbleibende Leistungssenkung durch den nicht ausgeführten FW aufaddiert werden.

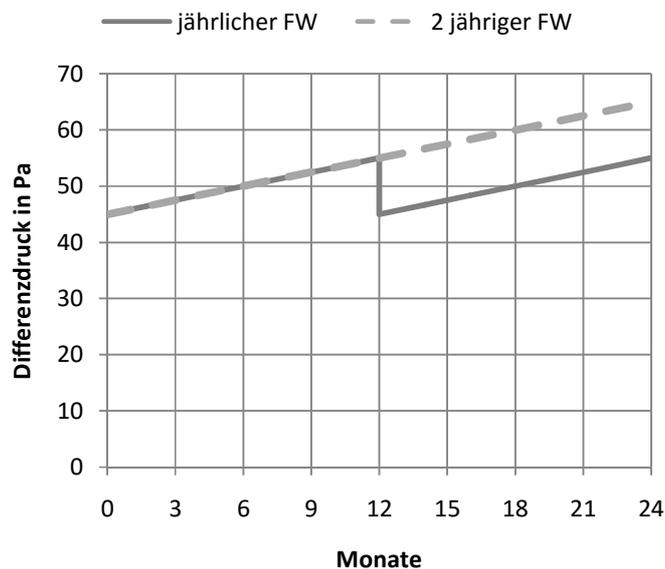


Abbildung 15: Differenzdruckentwicklung RLT 26 Abluft bei 2 jährigen FW

Der Energiemehraufwand durch den verdoppelten Intervall des FW ergibt sich wie folgt:

$$\Delta W_{FW26AB} = \Delta P_{RLT26AB} \cdot \Delta t_{Jahr} \quad (29)$$

$$\Delta W_{FW26AB} = 0,05 \text{ kW} \cdot 8760 \text{ h}$$

$$\Delta W_{FW26AB} = \underline{\underline{219 \text{ kWh}}}$$

$\Delta W_{FW26AB}$  Elektroenergiesteigerung durch FW RLT 26 Abluft [kWh]

Tabelle 13 zeigt, wie sich ein 2 jähriger Intervall des abluftseitigen FW finanziell auswirken würde. Nicht aufgeführt sind die zentralen Abluftanlagen, da diese über keine Luftfilter verfügen.

**Tabelle 13: Rentabilität 2 jähriger FW in der Abluft**

Funktionsgebäude	Anlage	Leistungsreduzierung durch jährlichen FW in kW	Energieverbrauchssteigerung in kWh/a	Steigerung der Elektroenergiekosten	Aufwandseinsparung Luftfilter <sup>28</sup>	Ersparnis	Ersparnis inklusive 120€ für Entsorgung
<b>2 jähriger Wechsel</b>							
<b>FG 1</b>	19	0,1	876	-159,43 €	42,63 €	-116,80 €	-80,15 €
	20	0,05	438	-79,72 €	106,14 €	26,42 €	
	21	0,1	876	-159,43 €	106,14 €	-53,29 €	
	22	0,05	438	-79,72 €	66,12 €	-13,60 €	
	23	0,05	438	-79,72 €	36,83 €	-42,89 €	
<b>FG 2</b>	25	0,02	175	-31,89 €	33,06 €	1,17 €	-76,44 €
	26	0,05	438	-79,72 €	54,52 €	-25,20 €	
	27	0,05	438	-79,72 €	70,76 €	-8,96 €	
	28	0,05	438	-79,72 €	42,63 €	-37,09 €	
	29	0,1	876	-159,43 €	33,06 €	-126,37 €	
<b>FG 4</b>	36	0,05	438	-79,72 €	33,06 €	-46,66 €	-203,98 €
	37	0,1	876	-159,43 €	33,06 €	-126,37 €	
	38	0,05	438	-79,72 €	42,63 €	-37,09 €	
	39	0,1	876	-159,43 €	70,76 €	-88,67 €	
	40	0,05	438	-79,72 €	54,52 €	-25,20 €	

<sup>28</sup> [14]

Es wird ersichtlich, dass sich im Gegensatz zu einem häufigeren Zuluftfilteraustausch der größere zeitliche Abstand der Abluftfiltererneuerung nicht kostenreduzierend bemerkbar macht. Wenn an dieser Stelle auch noch die Einsparungen für die ausbleibende Entsorgung in Höhe von 120 € für jedes FG hinzugerechnet wird, ergibt sich trotzdem kein Einsparpotenzial, solange keine Lohnkosten Berücksichtigung finden.

Diese Betrachtung wurde ebenfalls bei einem häufigeren FW für die Abluft durchgeführt, jedoch würde auch dann keine Einsparung eintreten, somit wird auf die genauere Beschreibung und tabellarische Auflistung zu einem halbjährlichen Abluftfilterwechsel verzichtet.

### **5.5 Demontage eines Wärmetauschers**

In der Abluftaufbereitungsanlage im FG 2 befindet sich ein ungenutztes Register. Dieser Wärmetauscher wurde als Rückkühler für die ebenfalls in der Dachzentrale befindlichen Kleinkälteanlage genutzt. Hinsichtlich des ständig notwendigen Betriebs der angeschlossenen Kühlzellen, ist eine von RLT-Anlagen unabhängige Rückkühlung erforderlich. Es wurden auf der Dachfläche des Gebäudes separate Rückkühlwerke aufgestellt und die Kälteanlage von dem beschriebenen abluftseitigem Register getrennt.

Somit ist der Wärmetauscher nicht weiter erforderlich und erzeugt einen zusätzlichen Luftwiderstand in der Abluftanlage, wodurch wiederum die Leistungsaufnahme der Lüftermotoren erhöht ist. Der überflüssige Differenzdruckabfall über das Register wurde mit 37 Pa gemessen. Dieses Problem kann durch einfache Demontage des nicht verwendeten Bauteils gelöst werden und es wird wesentlich weniger Energie von den entsprechenden Ventilatorantrieben verbraucht.

Der Rückkühler wurde am 23.08.2016 aus der zentralen Abluftanlage entfernt, wodurch die Leistungsaufnahme der beiden Lüftermotoren um jeweils 0,15 kW reduziert werden konnte. Das über ein Jahr aufsummierte Einsparpotenzial an Elektroenergie beträgt 2635,2 kWh, welches sich durch die Multiplikation der Leistungsreduzierung mit den Jahresbetriebsstunden von 8784 h ergibt.

Der demontierte Wärmetauscher ist in Abbildung 16 direkt neben der zentralen Abluftanlage im FG 2 dargestellt.



**Abbildung 16: Demontierter Wärmetauscher**

## 5.6 Aktivkohlefilter

In jeder ZLA der bisher betrachteten Gebäude ist eine Aktivkohlefilterstufe mit mehreren Patronen installiert. Diese speziellen Luftfilter wurden bereits in Abschnitt 2.2.6 einleitend beschrieben. Sie dienen an ihren Einsatzorten der Adsorption von unangenehmen und sogar bedingt gesundheitsschädlichen gasförmigen Verunreinigungen. Ursächlich für die Luftverschmutzung waren als unangenehme Gerüche wahrnehmbare Einflüsse eines Fettabscheiders einer Kantine und Abgase aus Verbrennungsmotoren von Hubschraubern, welche auf dem Landeplatz auf dem Dach des FG 1 landen und vermutlich auch von Kraftfahrzeugen, die den Parkplatz des UKH befahren.

Seit geraumer Zeit ist es den Piloten von Rettungshubschraubern untersagt, die Anflugroute zum Hubschrauberlandeplatz direkt über das Krankenhaus zu nutzen. Sie wurden aufgefordert, diesen aus westlicher Richtung anzufliegen, um die Lärm- und Abgasebelastung zu verringern. Der erwähnte Fettabscheider wurde außer Betrieb genommen, da er nicht mehr genutzt wird.

Die Aktivkohlepatronen in FG 2, 3 und 4 wurden seit der Inbetriebnahme der Lüftungsgeräte im Jahr 2002 nicht erneuert. Im FG 1 hat im Jahr 2014 ein erstmaliger FW stattgefunden. Leider erfolgte bei keinem Filter der 4 Gebäude eine vorherige Gewichtsbestimmung, um nun durch erneutes Abwiegen feststellen zu können, ob diese jetzt bereits gesättigt sind. Die in der Litera-

tur beschriebene Filterstandzeit von einem Jahr ist nun in 3 der 4 Gebäude um fast 15 Jahre überschritten, somit kann davon ausgegangen werden, dass diese keine gasförmigen Verunreinigungen mehr adsorbieren. Da in der DIN 1946 Teil 4 keinerlei Hinweise auf eine verpflichtende Verwendung dieser Filterart erwähnt werden, ursächliche Faktoren verringert wurden und auch bisher keine Geruchsbelästigung in FG 2, 3 oder 4 festzustellen war, wird empfohlen diese Filterstufe in den drei Gebäuden ganz zu entfernen.

Damit ergibt sich wieder Einsparpotenzial im Elektroenergieverbrauch der Lüftermotoren, weil durch den geringeren Luftwiderstand weniger Druck von den entsprechenden Ventilatoren aufgebaut werden muss.

Im FG 2 befinden sich an der ZLA Messanschlüsse, um den Differenzdruck über die Aktivkohlepatronen zu messen. In den anderen 3 Dachzentralen ist auf Grund fehlender Messanschlüsse leider keine Messung möglich. Im FG 4 fand am 23.08.2016 eine Demontage der Aktivkohlefilter statt und es konnte direkt eine Leistungsreduzierung zur Auswertung dokumentiert werden. Da bisher keine längeren Tests ohne diese Filter stattgefunden haben, sollen die gebrauchten Filterpatronen vorläufig zur Reserve aufbewahrt werden, um bei eventuellen Geruchsbelästigungen eine schnellstmögliche Installation zu gewährleisten. Falls, wie zu erwarten ist, keine Beeinträchtigungen festzustellen sind, sollen auch im FG 2 und 3 sämtliche Aktivkohlefilter demontiert werden. Zur Veranschaulichung sind die entnommenen Aktivkohlefilter in Abbildung 17 dargestellt, rechts im Bild ist die Filterkammer mit dem entsprechenden Aufnahmerahmen für die Filter zu erkennen.



**Abbildung 17: Demontierte Aktivkohlefilter**

In Tabelle 14 sind alle ermittelbaren Druckdifferenzwerte und Leistungsaufnahmerückgänge durch Filterdemontage aufgelistet. Die reduzierten Leistungswerte für FG 2 und 3 sind angenommene Werte, welche zu erwarten wären, wenn sich ebenfalls wie im FG 4 eine Reduzierung von rund 14 % ergeben sollte. Im FG 1 wird wegen der Nähe zum Parkplatz und des Hub-schrauberlandeplatzes auf dem Dach von einer Demontage abgesehen.

**Tabelle 14: Potenziale ohne Aktivkohlepatronen**

Gebäude	Auslegungsdruck laut Typenschild in Pa	gemessener Differenzdruck in Pa	Leistungsreduzierung Lüftermotoren in kW
<b>FG 1</b>	141	-	-
<b>FG 2</b>	124	70	1,06
<b>FG 3</b>	118	-	1,01
<b>FG 4</b>	137	-	1,40

So ergeben sich Elektroenergieeinsparmöglichkeiten für die einzelnen Gebäude wie in Tabelle 15 aufgeführt. Zu berücksichtigen wäre, dass es sich bei den Angaben im FG 2 und 3 nur um zu erwartende Rückgänge handelt.

**Tabelle 15: Elektroenergieverbrauchsrückgang ohne Aktivkohlefilter**

Gebäude	Elektroenergieverbrauchsreduzierung in kWh
<b>FG 1</b>	0
<b>FG 2</b>	9.311
<b>FG 3</b>	8.872
<b>FG 4</b>	12.298

## 5.7 Regenwassernutzung

Die AFLK innerhalb der Luftaufbereitungsanlagen benötigen sehr große Wassermengen zur Befeuchtung, woraus jährlich hohe Kosten für Wasser und Abwasser resultieren. Die hierfür anfallenden Ausgaben sind vor allem wegen der VE-Wasserbeimischung zu normalem Kaltwasser enorm. Angaben zum Wasserverbrauch wurden bereits in Tabelle 5 aufgelistet.

Das UKH verfügt über große Dachflächen, von welchen das anfallende Regenwasser über separate Regenwasserleitungen abgeleitet wird. Somit besteht eine generelle Trennung zwischen Regenwasser und Grauwasser bzw. andere Abwässer, was für eine Regenwassernutzung spricht.

Die Ableitung des Regenwassers wird über Sammelleitungen umgesetzt. Diese Leitungen leiten das Dachflächenwasser der Dachzentralen in entsprechende Schächte, innerhalb welcher die Regenwassersammelleitungen bis ins Kellergeschoss verlaufen. Auf dem Weg dorthin wird auch Regenwasser, welches auf Dachflächen unterhalb der Dachzentralen, wie dem Magistralenbereich und der vergrößerten Dachfläche der unteren Geschosse anfällt, in diese Leitungen eingeleitet. Im Kellergeschoss wird das Regenwasser letztendlich in einen externen Regenwasserkanal abgeleitet und fließt über diesen in die Wilde Saale, welche ein Seitenarm der Saale ist.

Um dieses Regenwasser zur Befeuchtung nutzen zu können, ist eine bestimmte Wasserqualität notwendig. Die Beschaffenheit des Befeuchter-Betriebswassers nach VDI 3803, wie sie vom Hersteller laut Wartungsanleitung empfohlen wird, sollte deshalb darin angegebene Grenzwerte nicht überschreiten.<sup>29</sup> Damit sichergestellt werden kann, dass die Regenwasserqualität für die AFLK ausreichend ist, sollte eine Wasseranalyse durchgeführt werden. Solche Untersuchungen werden online mehrfach angeboten und kosten pro Probe für die erforderlichen Prüfwerte unter 100 €. Empfehlenswert wäre hierfür beispielsweise das Prüflabor der Firma INLABO, welche sogar Hygienetests anbietet.

Zur Beurteilung der Regenwasserqualität, wurde an einer Sammelleitung im FG 1 eine Probe entnommen. Diese Probe wurde, unter Verwendung einer Wasserprüfeinrichtung der Firma Grünbeck, einem Schnelltest zur Gesamthärtebestimmung unterzogen. Auf diese Art und Weise kann zumindest als erster Parameter die Gesamthärte von 1,75 °dH für das Regenwasser bestimmt werden. Sie entspricht in etwa der Gesamthärte des momentan genutzten Mischwassers von 1,5 °dH und unterschreitet auch die Herstellervorgabe von maximal 6 °dH. Da kein weiteres Messequipment zu Verfügung steht, kann der Umweg über ein externes Analyselabor jedoch nicht umgangen werden.

Fachgespräche mit Spezialisten für Wasseraufbereitungsanlagen haben ergeben, dass die beschriebenen Grenzwerte mit hoher Wahrscheinlichkeit eingehalten werden könnten.<sup>30</sup> Problematisch ist jedoch die Speicherung des Regenwassers und die damit einhergehende hygienische Verunreinigung durch mikrobielles Wachstum, wodurch die geforderten maximalen Keim-

---

<sup>29</sup> in Anlehnung an [9] Seite 30

<sup>30</sup> [18]

zahlen überschritten werden würden. Somit wäre auch für das Regenwasser eine gewisse Aufbereitung unvermeidbar. Eine solche Wasserbehandlung könnte mit Hilfe einer Ozonanlage, UV-Desinfektion inklusive Filterung oder Biozidbeimischung erfolgen.

Zur Umsetzung der Regenwassernutzung kommen zwei Varianten in Frage. Zum einen könnten Regenwasserspeicher mit separaten Aufbereitungsanlagen innerhalb der Dachzentralen aufgestellt werden. Die zweite Möglichkeit wäre ein zentraler Speichertank für alle 4 Dachzentralen im Kellergeschoss.

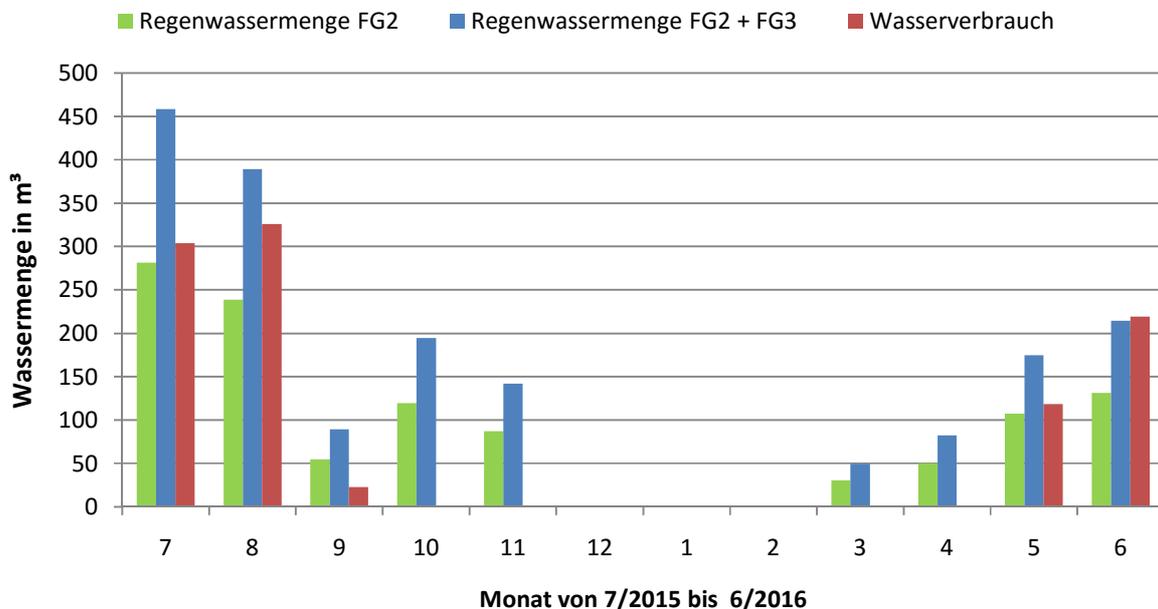
Bei Auswahl der Variante 1 wären relativ kleine Speichertanks ausreichend, jedoch ist so ohne zusätzliche Wasserhebeanlagen lediglich das Regenwasser der Dachflächen über den Lüfterzentralen nutzbar. Die Einleitung in entsprechende Tanks könnte unter Ausnutzung des natürlichen Gefälles stattfinden und für die Entkeimung sollte die preisgünstigere UV-Desinfektion inklusive Filterung favorisiert werden. Für die Versorgung der Befeuchtungsdüsen ist auch eine Druckerhöhungsanlage erforderlich, um einen Wasservordruck von geforderten 2,5 bar an den Sprühbefeuchtern bereitzustellen. Falls die Regenwassertanks wegen ausbleibenden Niederschlägen zeitweilig leer stehen sollten, ist eine automatische Umschaltung auf die bisherige Einspeisung mit Mischwasser notwendig.

Falls eher eine zentrale Regenwasserspeicherung genutzt werden sollte, wäre Variante 2 eine Option. Hier wäre ein wesentlich größerer Speichertank erforderlich, um alle 4 Dachzentralen versorgen zu können. Insgesamt besteht an dieser Stelle auch die Möglichkeit das Regenwasser der gesamten Dachflächen zu nutzen, leider müssten zur Speicherung zusätzlich Sammelleitungen verlegt werden, da das Regenwasser aller Gebäude separat in den äußeren Sammelkanal einleiten wird. Zur Wasseraufbereitung ist bei dieser Variante eine Ozonanlage zu empfehlen, da hier größere Wassermengen keimfrei gehalten werden müssten. Die Versorgung der Dachzentralen könnte beim Aufstellen des Tanks im Untergeschoss 2 des FG 3 oder 2 direkt über eine Umschaltvorrichtung, mit Hilfe der vorhandenen Druckerhöhungsanlage des bisher verwendeten Mischwassers, Anwendung finden. So wäre auch, falls Niederschläge ausbleiben die Versorgung mittels der bisherigen Einspeisung möglich.

Recherchen haben ergeben, dass die Regenwassersammelleitung im Untergeschoss 2 des FG 2 auch Regenwasser von Dachflächen, welche das FG 2 umgeben, ableitet. Somit wurden diese Dachflächen aufsummiert und ergeben insgesamt ca. 2025 m<sup>2</sup>. Im Gegensatz zur Gesamt-

dachfläche der Dachzentralen von 2373 m<sup>2</sup> ist das zwar etwas weniger, aber es bestünde die Möglichkeit des zusätzlichen Verlegens von Sammelleitungen aus dem FG 1 oder FG 3 zu diesem Zentralen Regenwasserspeicherort. Da die gesamte Umsetzung der Regenwassernutzung über Variante 2 am sinnvollsten erscheint, soll diese Version weiter untersucht werden.

In Abbildung 18 wird der Gesamtverbrauch an Mischwasser für die AFLK der 4 Gebäude dargestellt. Zum Vergleich ist die anfallende Regenwassermenge der Sammelleitungen im FG 2 und 3 mit aufgeführt. Zur Bestimmung des anfallenden Regenwassers wurden Niederschlagsdaten der Jahre 2015<sup>31</sup> und 2016<sup>32</sup> genutzt, welche online vom Institut für Geowissenschaften und Geographie der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg (MLU) veröffentlicht sind.



**Abbildung 18: Jahresverteilung des Wasserverbrauchs der AFLK**

Es ist festzustellen, dass die gesamte Regenwassermenge der beiden Gebäude nahezu ausreichen könnte, um den Wasserbedarf zu decken. Das Problem dabei stellt die Speicherung der enormen Wassermengen dar. Deshalb wurde, mit Hilfe von Niederschlagsdaten des Monats

<sup>31</sup> [7]

<sup>32</sup> [6]

Juni 2016 aus dem Geologischen Garten der MLU weitere Auswertungen vorgenommen.<sup>33</sup> Dabei sollen lediglich die speicherbaren Regenwassermengen aus dem FG 2 betrachtet werden, um zu prüfen, ob die zusätzliche Leitungsverlegung überhaupt erforderlich wäre.

Ausgangssituation sollen hierfür 3 Tanks von je 9 m<sup>3</sup> Fassungsvermögen sein, die in unmittelbarer Nähe der Regenwassersammelleitung aufgestellt werden. Das Speichervolumen der Tanks reicht bei starken Regengüssen nicht aus, deshalb ist überflüssiges Regenwasser wie ursprünglich abzuleiten. Wie sich der Behälterfüllstand zwischen den einzelnen Regenphasen entwickeln würde, ist in Abbildung 19 dargestellt, auch die notwendige Mischwassereinspeisung bei geleerten Tanks ist mit aufgeführt. Sie wird zur besseren Übersichtlichkeit mit Negativbalken angezeigt. Es wurde angenommen, dass die Regenwasserbehälter zu Beginn des Betrachtungszeitraumes gefüllt sind.

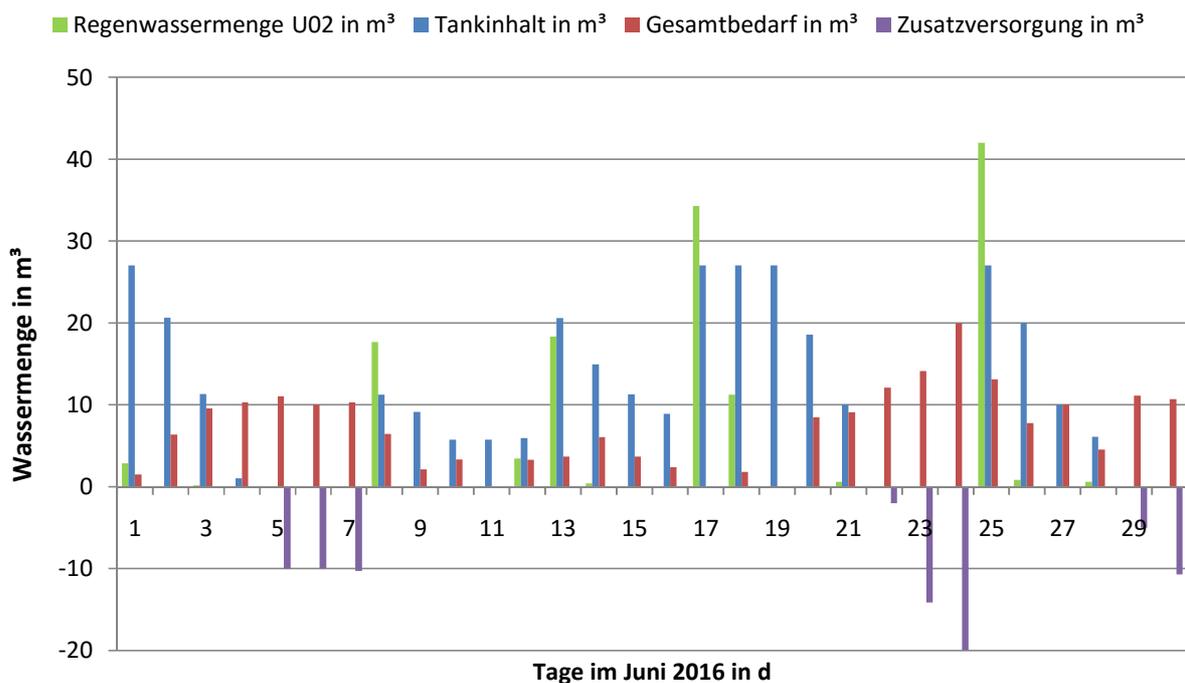


Abbildung 19: Detailansicht Regenwasser Monat Juni 2016

<sup>33</sup> [6]

Es ist ersichtlich, dass trotz der großen Speicherbehälter das gespeicherte Wasser schnell aufgebraucht wird und zusätzliche Mischwassernutzung unverzichtbar wäre. Jedoch werden enorme Wasserengen eingespart.

Insgesamt wäre also eine Nutzung von 130,68 m<sup>3</sup> Regenwasser für 212,83 m<sup>3</sup> Sprühwasser im Juni 2016 möglich gewesen. Das entspricht einem Mischwasserrückgang von 61,4 %. Leider fehlen zur Untersuchung weiterer Monate Niederschlagsdaten, demzufolge wird davon ausgegangen, dass die Einsparungen für die restliche Betriebszeit der AFLK mit gleichwertigen Ergebnissen zu prognostizieren ist.

Die Kosten für die Umsetzung der Regenwassernutzung können ohne konkrete Angebote von externen Auftragnehmern nur geschätzt werden und sollen deshalb unberücksichtigt bleiben. Es wäre erforderlich im entsprechenden Aufstellbereich eine quadratische Revisionsöffnung mittels Kran zu öffnen, um die Tanks zu positionieren. Desweiteren müssen Sammelleitungen mit den Tanks verbunden und eine Versorgungsleitung zur bisherigen Druckerhöhungsanlage installiert werden. Die Strecken für die Leitungen können je nach Aufstellungsort stark variieren. Umschalt- und Überwachungseinrichtungen wären auch erforderlich, sowie eine Aufbereitungsanlage, wie beispielweise die genannte Ozonanlage.

Insgesamt würde sich eine Reduzierung der Verschnittwassermenge ergeben, wie sie in Tabelle 16, im Vergleich zur vorherigen Wassermenge, dargestellt ist. Das eingesparte Verschnittwasser würde durch Regenwasser ersetzt werden. Berücksichtigt wurde dabei die vorherige Temperaturanpassung der ZLA, dank welcher die Sprühwassermenge bereits leicht reduziert werden konnte.

**Tabelle 16: Verschnittwasserreduzierung**

<b>Gesamtwasserverbrauch der AFLK</b>	
<b>vorher</b>	<b>nachher</b>
<b>in m<sup>3</sup></b>	<b>in m<sup>3</sup></b>
941,08	360,43

## 5.8 Wirkungsgrad der AFLK

Zur Beurteilung der Verdunstungskühlung in den Luftaufbereitungsanlagen ist es notwendig einen Wirkungsgrad zu definieren. So kann eine Ausgangssituation für eventuelle Optimierungspotenziale geschaffen werden.

Die niedrigste Temperatur, welche sich über den Verdunstungskühleffekt einstellen kann, ist die Kühlgrenztemperatur, sie wird als Feuchtkugeltemperatur gemessen. Um nun das Verhältnis zwischen genutzter Temperaturspreizung und möglicher Minimalzulufttemperatur zu berechnen soll folgender Ausdruck verwendet werden:

$$\eta_{AFLK} = \frac{\vartheta_{AU} - \vartheta_{ZU}}{\vartheta_{AU} - \vartheta_{FK}} \cdot 100 \% \quad (30)$$

$\eta_{AFLK}$	Wirkungsgrad der AFLK	[%]
$\vartheta_{ZU}$	gemessene Zulufttemperatur	[°C]

Worüber sich letztendlich der Wirkungsgrad ergibt und zur weiteren Betrachtung genutzt werden soll. Untersuchungen der so bestimmaren Wirkung der AFLK erlauben eine Vergleichbarkeit aller 4 Gebäude. Insgesamt lässt sich dieser Vergleich wie in Abbildung 20 darstellen.

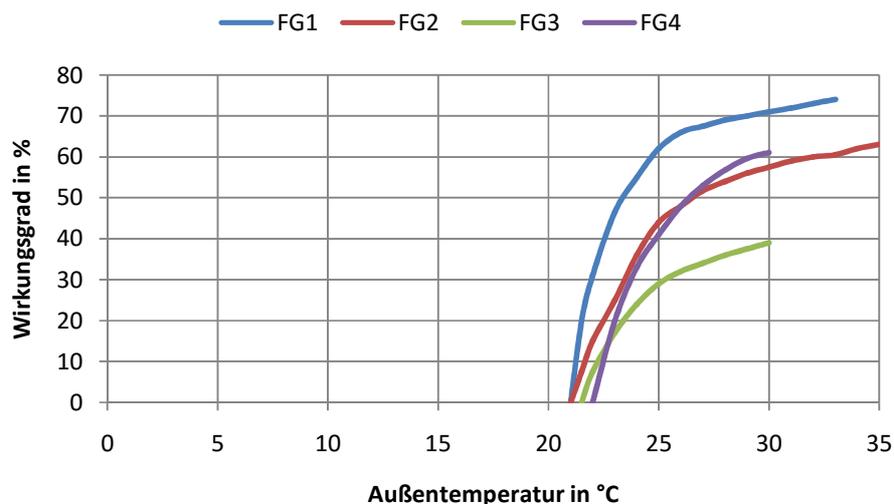
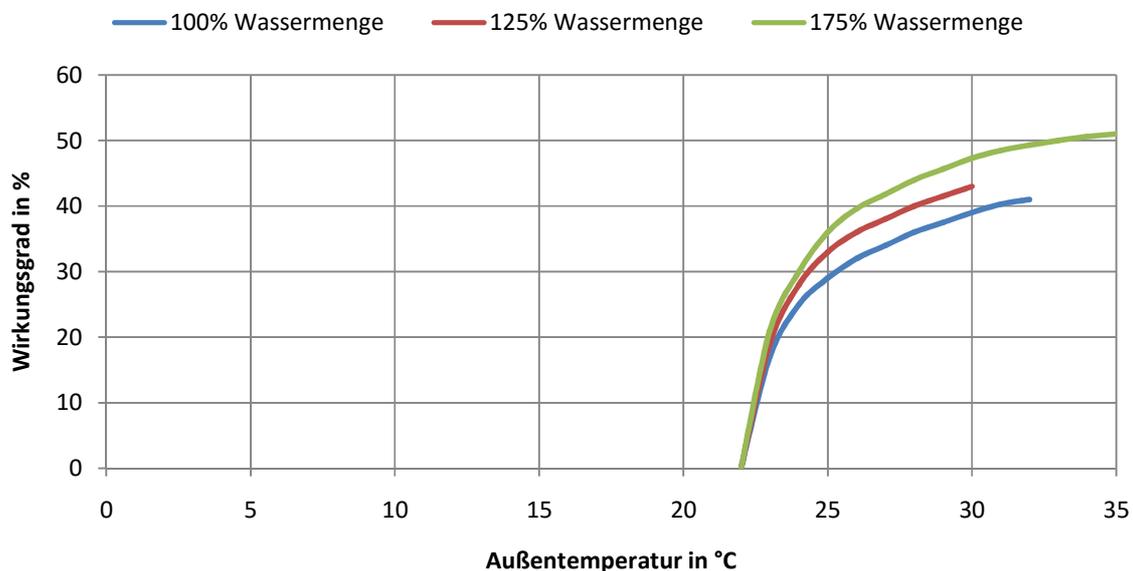


Abbildung 20: Wirkungsgradvergleich der 4 AFLKen

Ersichtlich wird, dass die Verdunstungskühlung im FG 3 am schlechtesten abschneidet. Die Erklärung dafür stellt die noch ausstehende Wartung aller RLT-Anlagen in dieser Dachzentrale dar. Es wäre also empfehlenswert, Wartungsmaßnahmen, wenn auch nur die Kühlung betreffend, bereits vor der Sommerperiode durchzuführen, um den maximal erreichbaren Wirkungsgrad der Fortluftkühlung ausnutzen zu können. Vom Hersteller werden sogar 3-monatige Intervalle für die Wartung nahegelegt.<sup>34</sup>

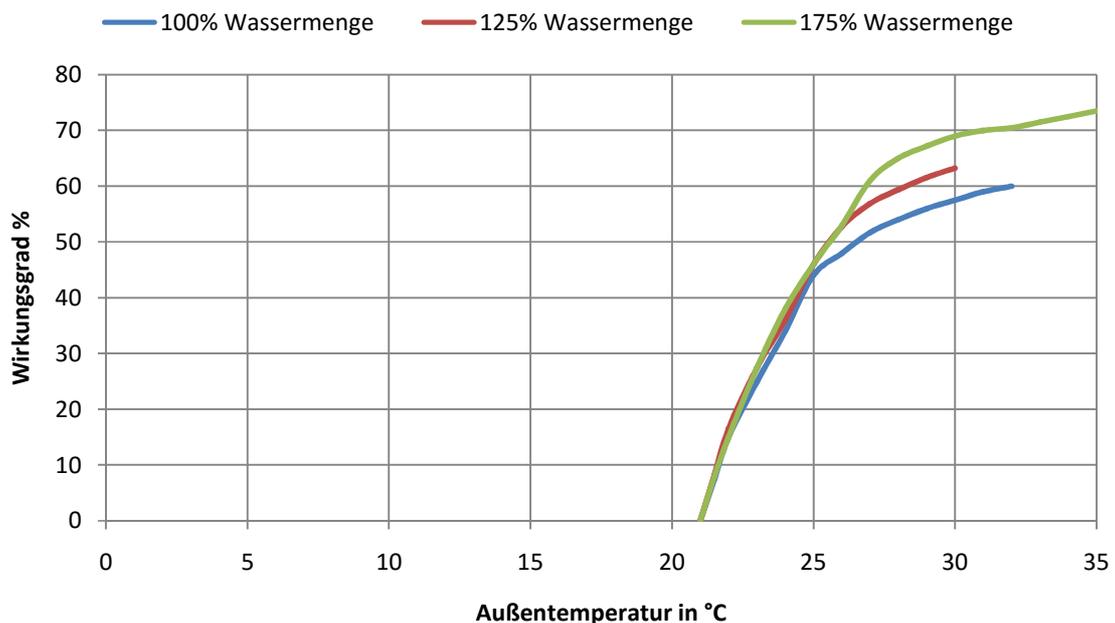
Zur Steigerung des Wirkungsgrades müsste die Wassermenge über eine längere Sprühtakt-dauer der Düsenstränge in der Abluftanlage erhöht werden. Eine solche Vorgehensweise erweist sich als sinnvoll, weil der laut Typenschild der Anlagen angeratene Fortluftbefeuchtungsgrad von 93 % bei keiner Anlage erreicht wird. Aus diesem Grund wurde die Wassermenge im FG 3 versuchsweise auf 125 % und im zweiten Versuch sogar auf 175 % erhöht. Die damit einhergehende Wirkungsgradsteigerung ist Abbildung 21 zu entnehmen. Leider konnten zum Vergleich nur innerhalb des Beobachtungszeitraumes erreichte Außenlufttemperaturen und damit einhergehende Ergebnisse dokumentiert werden. Aus diesem Grund ergeben sich unterschiedlich lange Kennlinien in den nachfolgenden Abbildungen.



**Abbildung 21: Wirkungsgradsteigerung AFLK FG 3**

<sup>34</sup> [16] Seite 58

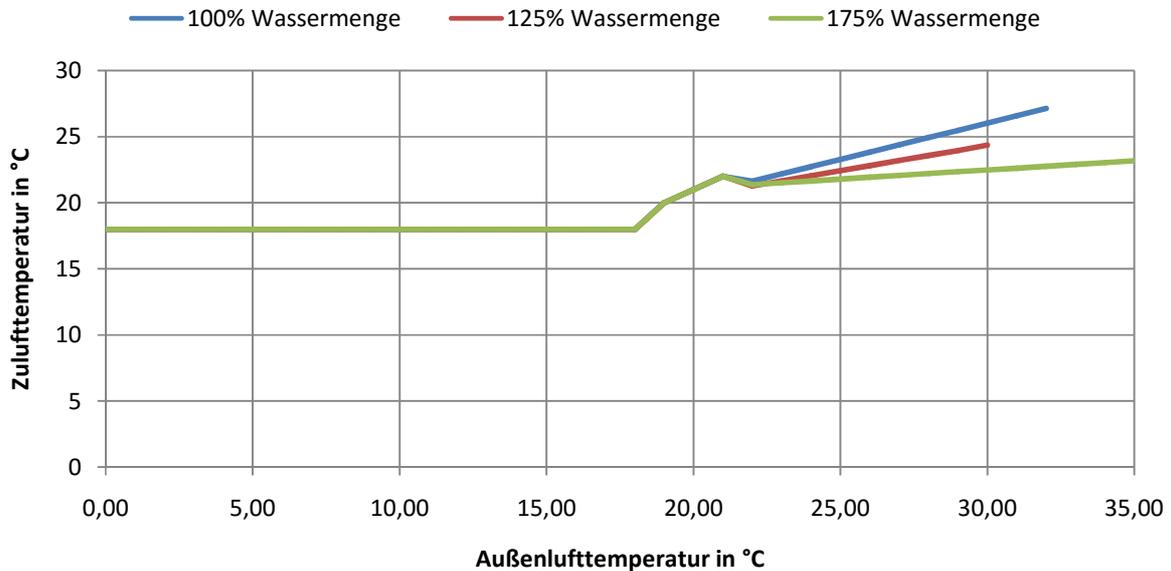
Die Ergebnisse zeigen, dass sich bei einer Erhöhung von der Wassermenge der Wirkungsgrad insgesamt verbessert, dennoch ist durch die Wartung eine wesentlich höhere Steigerung zu erwarten. Um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten, wie sich die Wassermengensteigerung auf den Wirkungsgrad auswirkt, wenn bereits eine Reinigung der Register vorgenommen wurde, wird in Abbildung 22 der simultane Versuch im FG 2 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass auch hier eine Verbesserung möglich ist.



**Abbildung 22: Wirkungsgradsteigerung AFLK FG 2**

Es wird deutlich, dass ab ca. 25 °C eine Steigerung möglich ist, jedoch ist die Änderung bei der ersten Erhöhung der Sprühwassermenge nahezu gleichgroß, wie bei der zweiten. Wenn bei dieser Steigerung beachtet wird, dass im zweiten Versuch die Wassermenge wesentlich mehr gesteigert werden musste, als beim ersten Test, ist festzustellen, dass der Wirkungsgradsteigerung Grenzen gesetzt sind. Würde nun eine weitere Wirkungsgraderhöhung im selben Maße angestrebt werden, müsste das zur Besprühung verwendete Wasservolumen um einen noch größeren Prozentsatz der ursprünglichen Menge vergrößert werden.

Dank der Wirkungsgradsteigerung sinkt die erreichbare Zulufttemperatur der ZLA bei hohen Außentemperaturen beachtlich. Die Auswirkungen der Wassermengenerhöhung auf die Zulufttemperatur sind in Abbildung 23 dargestellt.



**Abbildung 23: Mögliche Zulufttemperatur im FG 2 bei höherer Wassermenge**

Eine Wirkungsgradsteigerung der AFLK würde insgesamt zu einem wesentlich erhöhten Wasserverbrauch führen, die aufzubringende Heizenergie der Nachbehandlungsanlagen steigern, aber auch den Komfort einer niedrigeren Zulufttemperatur an sehr warmen Tagen herstellen. Das Einsparpotenzial beschränkt sich an dieser Stelle lediglich auf die RLT-Geräte, welche zur Nachbehandlung über einen Kühler verfügen. Hier kann somit etwas Kälteenergie eingespart werden. Da im FG 3 keine Kälte genutzt wird und im FG 2 und 4 nur sehr wenig Kälteenergie verbraucht wird, besteht lediglich im FG 1 ein gewisses Potenzial die Kälteenergieverbrauchs-werte zu reduzieren.

Untersuchungen mit Hilfe der Simulation ergeben unter Berücksichtigung einer Wirkungsgradsteigerung im FG 1 und der damit einhergehenden Zulufttemperaturabsenkung mäßige bis keine Einsparerfolge. Da mit dieser Maßnahme zwar der Komfort etwas gesteigert werden könnte, dies aber nur mit einem relativ hohem Wasserverbrauchsanstieg erreichbar wäre, ist die Wirkungsgradsteigerung letztendlich nicht empfehlenswert.

## 5.9 Temperaturanpassung im FG 1

Bei den bisherigen Untersuchungen ist aufgefallen, dass die RLT 20, welche zur Klimatisierung der Bettenzimmer innerhalb der Intensivstationen im FG 1 dient, die mit Abstand niedrigste Zufluftsolltemperatur vorgegeben hat. Im Vergleich dazu haben andere RLT-Geräte für Bettenzimmer in anderen Gebäuden eine um mindestens 2 K höhere Temperaturvorgabe.

Energetisch betrachtet wird, auf Grund dieser niedrigen Einstellung, ganzjährig Kälteenergie benötigt, um die Sollwertvorgaben einzuhalten. Wie sich die erforderliche Heiz- und Kühlleistung in der Dachzentrale vom FG 1 bei unterschiedlichen Außenlufttemperaturen verhält, ist Abbildung 24 zu entnehmen.

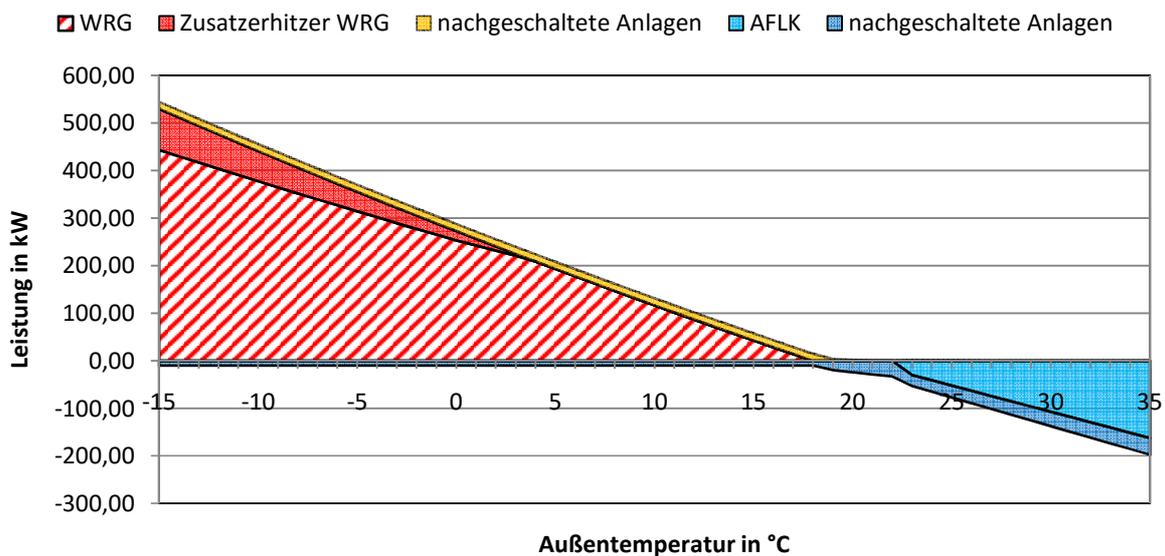


Abbildung 24: Heiz- und Kühlleistungsverteilung im FG 1

Es ist zu erkennen, dass bei jeder Außentemperatur Kälteleistung abgerufen wird. Die Ursache dafür ist die auf 18 °C vorkonditionierte Lufttemperatur der von der ZLA bereitgestellten Zuluft. Eine Reduzierung dieser Temperaturvorgabe würde zwar den Kältebedarf von RLT 20 senken, jedoch würde sich der notwendige Heizenergieverbrauch der übrigen RLT-Geräte dadurch steigern.

Eine Erhöhung der Zulufttemperatur für RLT 20 von 16 °C auf beispielsweise 18 °C, könnte für einen enormen Rückgang des Kälteenergieverbrauchs führen. Mit Hilfe der Simulation kann bei

der vorgeschlagenen Temperaturänderung ein jährliches Einsparpotenzial von rund 83,7MWh Kälteenergie festgestellt werden.

Tabelle 17 zeigt, wie sich der Kälteenergieverbrauch entwickeln könnte, wenn lediglich der Vorgabewerte für die Zulufttemperatur der RLT 20 angepasst werden würde.

**Tabelle 17: Temperaturanpassung RLT 20**

<b>Gebäude</b>	<b>Kälteenergie in MWh</b>	
	<b>vorher</b>	<b>nachher</b>
<b>FG 1</b>	108,762	25,410

Innerhalb der über diese Lüftungsanlage versorgten Bettzimmer konnten im Vergleich zu anderen Stationen der Intensivpflege keine zusätzlichen Wärmequellen festgestellt werden. Die gemessene Ablufttemperatur ist um ca. 1,5 K niedriger, als die der über RLT 39 klimatisierten Intensivstation. Demzufolge wäre die Sollwertsteigerung der Zulufttemperatur eine Option zur Reduzierung aufzubringender Kälteenergie.

## **6 Zusammenfassung**

### **6.1 Überblick**

Insgesamt konnte mit den bisherigen Ausführungen gezeigt werden, dass erhebliche Potenziale zur Energie- und Wassermengenreduktion zum Betreiben der RLT-Anlagen innerhalb der Dachzentralen der FG 1 bis 4 vorhanden sind. Alle Ansätze zur Optimierung können Anwendung finden, ohne auf einen notwendigen Komfort zu verzichten, demzufolge wären keine Behaglichkeitseinbußen zu verzeichnen. Diese Zusammenfassung soll zur übersichtlichen Veranschaulichung der Gesamtergebnisse durchgeführter Untersuchungen dienen. Der Betrachtungszeitraum bezieht sich dabei auf die Zeit zwischen 01.07.2015 bis 30.06.2016.

Innerhalb sämtlicher Untersuchungen konnten Betrachtungen zur Wärme-, Kälte- und Elektroenergie Anwendung finden, auch der Wasserverbrauch wurde eingehend betrachtet. Entstehende Kosten für Wartungsmaßnahmen konnten nur bezugnehmend auf den Luftfilterwechsel einbezogen werden.

### **6.2 Bisherige Verbrauchskennzahlen**

Am Anfang dieser Arbeit stand die Problemstellung, dass kaum genaue Messgeräte zur Verbrauchsermittlung vorhanden sind. Um trotz dieser Ausgangssituation verwendbare Kennzahlen ermitteln zu können, wurde das beschriebene Modell zur Berechnung dieser Kennzahlen entwickelt und die Herangehensweise hierzu ausführlich erklärt.

Somit konnten alle nicht direkt messbaren Größen zumindest näherungsweise bestimmt werden. Die durchgeführte Validierung bestätigt die hinreichende Genauigkeit der darüber simulierbaren Anlagenzuständen und einhergehende Leistungskennzahlen zur Aufsummierung sämtlicher Verbräuche.

Letztendlich konnten über das Berechnungsmodell Verbrauchskennzahlen wie in Tabelle 18 aufgeführt ermittelt werden.

**Tabelle 18: Verbrauchskennzahlen 7/2015 bis 6/2016**

	<b>FG 1</b>	<b>FG 2</b>	<b>FG 3</b>	<b>FG 4</b>	<b>gesamt</b>
<b>Fernwärmeverbrauch in MWh</b>	127,797	227,971	238,241	179,643	773,651
<b>Kälteenergieverbrauch in MWh</b>	110,039	2,935	0,000	9,886	122,860
<b>Elektroenergieverbrauch in MWh</b>	270,937	254,592	202,922	279,440	1.007,880
<b>Mischwasserverbrauch in m<sup>3</sup></b>	433,051	235,411	224,870	249,466	1.142,797

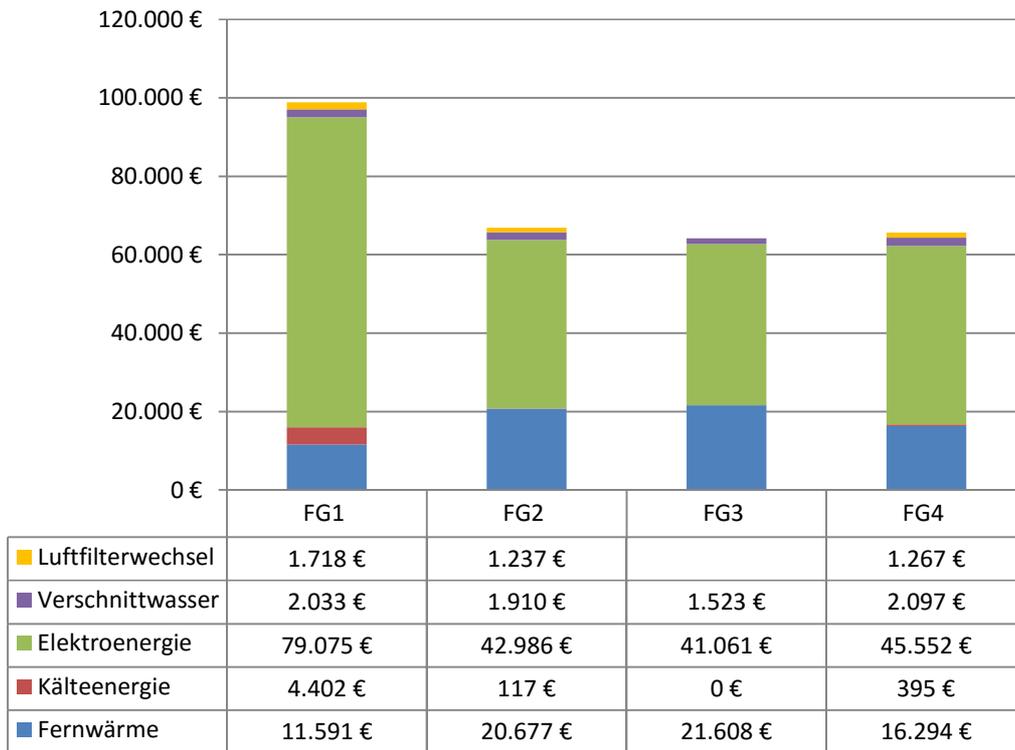
Zur Vergleichbarkeit der aufgeführten Werte ist es notwendig die einzelnen Kosten für den Betrachtungszeitraum auszuwerten. Da die Einkaufspreise für die angegebenen Posten jährlich variieren, wurden Mittelwerte der Preise je Einheit gebildet, welche Tabelle 19 entnommen werden können.

**Tabelle 19: Einkaufs- bzw. Erzeugungspreise**

	<b>Kosten pro Einheit</b>
<b>Fernwärme:</b>	0,0907 €/kWh
<b>Elektroenergie:</b>	0,1826 €/kWh
<b>Kälteenergie:</b>	0,0400 €/kWh
<b>Verschnittwasser:</b>	7,5040 €/m <sup>3</sup>

Für selbst erzeugtes Verschnittwasser konnten etwaige Kostenermittlung über die zugänglichen Kostenfaktoren erfolgen. Leider konnten mittels verfügbarer Messeinrichtungen keine preislichen Angaben zur Kälteenergieerzeugung, welche über vorhandene Kompressionskältemaschinen umgesetzt wird, ermöglicht werden. Somit wurde zur Schätzung der Einheitspreise für Kälteenergie ein Wert nach VDI 2067-1 genutzt.

Die Gesamtverteilung, der über den Betrachtungszeitraum angefallenen Kosten für den Betrieb der Lüftungsgeräte, ergibt sich dank der durchgeführten Untersuchungen, wie in Abbildung 25 dargestellt ist.



**Abbildung 25: Kostenverteilung ermittelter Verbräuche**

Es ist festzustellen, dass die hauptsächlichen Kosten durch den Verbrauch an Fernwärme- und Elektroenergie entstehen. Im FG 1 ist der Kälteenergiebedarf wesentlich höher als in den anderen Gebäuden. Die Ausgaben für Luftfilter und Mischwasser sind verhältnismäßig gering.

## 6.3 Optimierte Verbrauchskennzahlen

Dank der mittels Modell ermittelbaren Auswirkungen von Optimierungsoptionen können die ursprünglichen Verbräuche reduziert werden. Dabei wirken sich verschiedene Vorschläge zur Kosteneinsparung sehr unterschiedlich aus.

Die größten Erfolge sind durch die Anpassung der Zulufttemperaturen der ZLAen und den Absenkbetrieb erreichbar, obwohl es sich hierbei lediglich um Einstellmaßnahme über die GLT handelt, welche sehr einfach umsetzbar sind.

Ein häufigerer Austausch von Zuluftfiltern kann ebenfalls Kosten reduzieren, da somit die Leistungsaufnahme der Lüftermotoren gesenkt werden kann und insgesamt der Elektroenergiever-

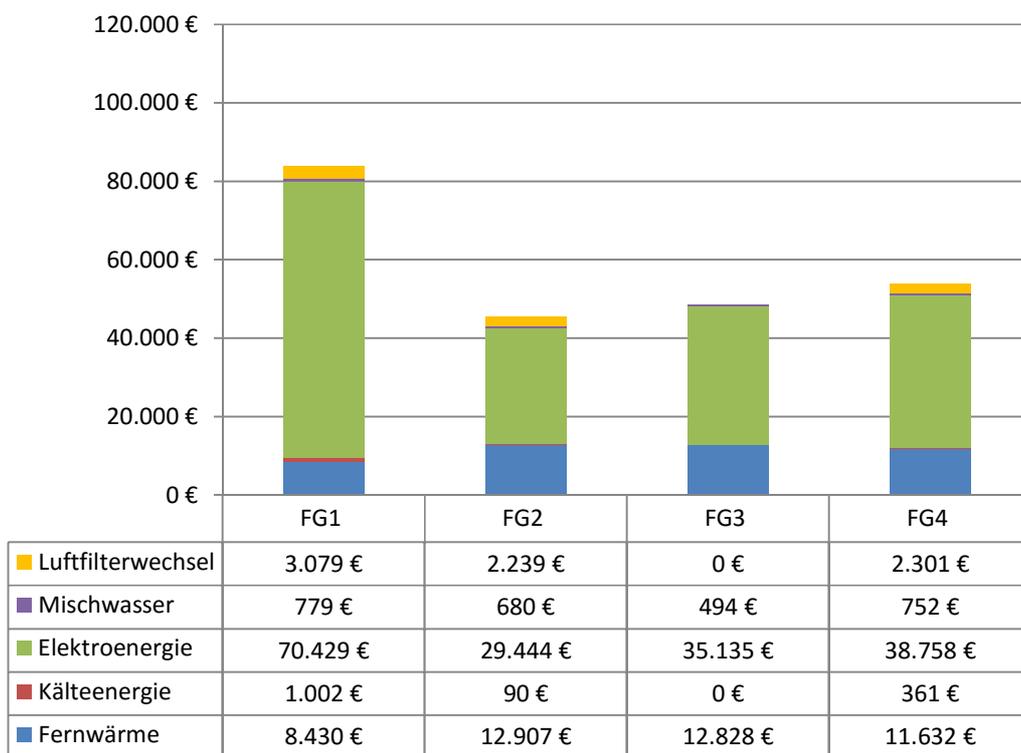
brauch sinkt. Jedoch sind hierfür gewisse Mehrausgaben für Luftfilter notwendig. Insgesamt trägt dieser Vorschlag zum Gesamtverbrauchsrückgang nicht wesentlich bei, aber ist dennoch zu empfehlen.

Ebenfalls wäre die vorgeschlagene Regenwassernutzung eine gute Option um Betriebsausgaben zu reduzieren, an diese Maßnahme sind allerdings Investitionen geknüpft, die im Voraus getätigt werden müssten.

Im FG 2 wurde ein nicht verwendeter Wärmetauscher aus der Abluft entfernt. Durch diese Demontage konnte eine dauerhafte Absenkung der Elektroenergieaufnahme der installierten Ventilatorantriebe hergestellt werden.

Zur weiteren Minimierung des Luftwiderstands innerhalb der Lüftungsgeräte wurden Aktivkohlepatronen versuchsweise im FG 4 demontiert, auch hiermit ist eine Rückgang des Elektroenergieverbrauchs feststellbar. Zur Demontage der Aktivkohlefilter in anderen Gebäuden soll eine gewisse Zeit abgewartet werden, ob sich im FG 4 Beeinträchtigungen ergeben. Falls sich keine Probleme feststellen lassen, soll auch im FG 2 und 3 eine Demontage stattfinden. Im FG 1 wird davon abgesehen, weil sich direkt auf dem Dach der Hubschrauberlandeplatz befindet und Abgase von Verbrennungsmotoren über die Lüftung angesaugt werden könnten.

Im Falle einer Umsetzung der noch nicht getätigten, aber vorgeschlagenen Optimierungsmaßnahmen zur Betriebskostenreduzierung könnten sich die Ausgabenverteilung so entwickeln, wie sie in Abbildung 26 dargestellt ist. Anzumerken ist an dieser Stelle, dass es sich bei den verwendeten Werten um die Summe der einzelnen Maßnahmen handelt. Bei der Kombination einzelner Optimierungsschritte können sich, vor allem bei den Rückgängen der Elektroenergieverbrauchskennzahlen, Abweichungen ergeben. Zur Ermittlung genauer Zahlen müssten sämtliche Einzelvorschläge umgesetzt werden und entsprechende Zähleinrichtungen vorhanden sein.



**Abbildung 26: Kostenverteilung optimiert**

Im FG 2 sind die Einsparungen am größten, was mit der Anzahl an absenkbaren RLT-Anlagen zu begründen ist. Insgesamt konnten die Betriebskosten und Verbräuche wie in aufgelistet gesenkt werden.

**Tabelle 20: Gesamtergebnis**

	vorher		nachher	
	Verbrauch	Ausgaben	Verbrauch	Ausgaben
<b>Fernwärme</b>	773,652 MWh	70.170 €	504,929 MWh	45.797 €
<b>Kälteenergie</b>	122,860 MWh	4.914 €	36,317 MWh	1.453 €
<b>Elektroenergie</b>	1142,798 MWh	208.675 €	951,621 MWh	173.766 €
<b>Mischwasser</b>	1007,891 m <sup>3</sup>	7.563 €	360,434 m <sup>3</sup>	2.705 €
<b>Luftfilterwechsel</b>		4.222 €		7.619 €
<b>Gesamtausgaben</b>		295.545 €		231.339 €

Letztendlich könnten bei gleichen Außenluftparametern, wie im Untersuchungszeitraum jährlich 64.206 € für Betriebskosten der RLT-Anlagen eingespart werden, wenn alle vorgeschlagenen Maßnahmen Anwendung finden würden.

## 6.4 Ausblick

Die in dieser Arbeit vorgestellten Optimierungspotenziale wurden bewusst so gewählt, dass Investitionskosten zu Umsetzung gering gehalten werden können. Weitere Maßnahmen zur Betriebskostenreduzierungen könnten beispielsweise mit einem Blockheizkraftwerk oder Photovoltaikanlagen ermöglicht werden. Diese Anlagen könnten zur Eigenerzeugung von Wärme- und Elektroenergie beitragen, welche die hauptsächlichen Kosten für den Betrieb der Lüftungsgeräte verursachen. Solche Investitionen sind mit hohen Ausgaben verbunden, die sich aber über wenige Jahre amortisieren würden.<sup>35</sup>

Im FG 5 und 6 sind die RLT-Anlagen ähnlich wie in den betrachteten Gebäuden aufgebaut, demzufolge wäre eine Anwendung der vorgeschlagenen Optimierungen dort ebenfalls angebracht. Große Einsparpotenziale sind sicherlich im Bereich der Lüftungsgeräte für die Klimatisierung des Operationsbereiches möglich. Vorreiter für ein derartiges Projekt zur Energieverbrauchsreduzierung ist das Universitätsklinikum Dresden. Laut eines veröffentlichten Berichts werden dort 40 Operationssäle betrieben und deren Lüftungsanlagen während der betriebsfreien Zeit abgeschaltet. Somit können an diesem Standort jährlich 180.000 € Betriebs- und Energiekosten eingespart werden.<sup>36</sup>

Die Schlussfolgerung daraus ist, dass auch im UKH nach wie vor sehr große Optimierungspotenziale im Bezug auf die energetische Effizienz vorhanden sind und auch weitere Kosten für das Betreiben der Anlagentechnik reduziert werden können.

---

<sup>35</sup> in Anlehnung an [19]

<sup>36</sup> in Anlehnung an [11]

## 7 Literaturverzeichnis

- [1] Friedrich Reinmuth (1996): „Raumluftechnik“, 1. Auflage, Würzburg: Vogel
  
- [2] Olaf Babel: „Verdampfungsenthalpie überschlägig berechnen“,  
unter: <http://www.unternehmensberatung-babel.de/industriegase-lexikon/verdampfungsenthalpie-ueberchlaegig-berechnen/> (abgerufen am 02.08.2016)
  
- [3] E. Tiemann: „Physik für Mediziner“,  
unter: <http://www.ubicampus.mh-hannover.de/physik/vorlesung/kap34/kap34.html>  
(abgerufen am 02.08.2016)
  
- [4] Chemie.de: „Tabelle von kritischen Zustandsgrößen“,  
unter: [http://www.chemie.de/lexikon/Kritischer\\_Punkt\\_\(Thermodynamik\).html#Tabelle\\_von\\_kritischen\\_Zustandsgr.C3.B6.C3.9Fen](http://www.chemie.de/lexikon/Kritischer_Punkt_(Thermodynamik).html#Tabelle_von_kritischen_Zustandsgr.C3.B6.C3.9Fen)(abgerufen am 02.08.2016)
  
- [5] Anton Schweizer: “Lüftungstechnik - Feuchte“,  
unter: <http://www.schweizer-fn.de/lueftung/feuchte/feuchte.php>  
(abgerufen am 02.08.2016)
  
- [6] Halle-Saale Watis: „Geologischer Garten“  
unter: <http://paradigmaps.geo.uni-halle.de/adak/graph.php?id=1&width=950&height=768&iframe=true> (abgerufen am 30.06.2016)
  
- [7] Detlef Thuerkow: “Kalenderjahr 2015“,  
unter: <http://klima.geo.uni-halle.de/statistik/campus/2015/> (abgerufen am 20.08.2016)
  
- [8] Deutsches Institut für Normung e.V.(2008): „DIN 1946-4“, Berlin: Beuth Verlag
  
- [9] Howatherm Klimatechnik GmbH (1999): „Betriebs- und Wartungsanleitung“, Atelier Schiller-Krenz Gestaltung

- [10] Reef Analytics (2016): „Wasseranalytik – WA Premium“  
unter: <http://www.reefanalytics.com/Laboruntersuchung/Wasseranalytik-WA-Premium:452.html?XTCsid=ldrmc0g06rl06afkiguh40jes1> (abgerufen am 25.08.2016)
  
- [11] kma Krankenhaustechnik (2013): „Hygiene“,  
unter: <http://www.wkt.com/sixcms/media.php/2335/Nachtabstaltung.3161150.pdf>  
(abgerufen am 30.08.2016)
  
- [12] Ernst-Rudolf Schramek (2013): „Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik“, 76. Auflage, München: Oldenbourg Industrieverlag
  
- [13] Grünbeck Wasseraufbereitung GmbH (2015): „Betriebsanleitung Enthärtungsanlage GENO-mal duo WE-X, GENO-mat duo WE-OSMO-X“
  
- [14] Rechnungsunterlagen, Universitätsklinikum Halle (Saale), Zentraler Dienst 14, Halle (Saale) (2016)
  
- [15] Raymond Kober (2009); „Energieeffiziente Gebäudeklimatisierung Raumluft in A++ Qualität“, 1. Auflage, Karlsruhe: Promotor Verlag
  
- [16] Christoph Kaup (2010): „Energieeffizienz zentraler raumluftechnischer Anlagen“,  
unter: <http://www.bhks.de/almanach/2010/052-059.pdf>(abgerufen am 11.08.2016)
  
- [17] Universitätsklinikum Halle (Saale): „Das Universitätsklinikum Halle (Saale)“,  
unter: <http://www.medizin.uni-halle.de/index.php?id=3> (abgerufen am 10.06.2016)
  
- [18] Armin Wirth (2016): persönliches Gespräch mit Herrn Armin Wirth, Best Water Technology, Kundendienst, Halle (Saale) (am 09.08.2016)
  
- [19] scon-marketing GmbH: „Einführung Blockheizkraftwerk“,  
unter: <https://ihr-bhkw.de/81-technik/einfuehrung-blockheizkraftwerk>  
(abgerufen am 09.09.2016)



**A2 Übersicht der RLT-Anlagendaten**

Gebäude	Anlage	Bereich	Zuluft								Abluft				
			Luftmenge		Motorleistung		Wärme-tauscher		Sollwerte		Luftmenge		Motorleistung		Sollwert
			Vorgabe in m³/h	tatsächlich in m³/h	Typenschild in kW	Tatsächlich in kW	Heizleistung in kW	Kühlleistung in kW	Solltemperatur in °C	Solldruck in Pa	Vorgabe in m³/h	tatsächlich in m³/h	Typenschild in kW	Tatsächlich in kW	Solldruck in Pa
FG 1	19	E04 Urologie	5.800	6.400	3	2,1	17,6		22	470	6.000	5.200	3	1,3	450
	20	E02/E03 ITS Urologie	17.750	14.200	15	6,1	65,9	74,1	16	575	15.450	13.600	7,5	1,9	300
	21	E02/E03 ITS Urologie NR	16.500	11.850	7,5	4,7	50,9		18	400	19.500	15.600	11	3,9	400
	22	E01 Notaufnahme	8.700	6.850	5,5	2,8	26,4		20	500	8.700	7.200	4	1,9	450
	23	E01 Cafeteria	3.000	2.800	2,2	0,9	9,1		20	400	3.000	2.000	1,5	0,7	600
	24	ZLA	52.000	42.100	15	2x6,4	72,5		18	100	54.000	43.600	15	2x5,1	100
FG 2	25	E04 Transfusionsmedizin	4.300	4.050	2,2	1,3	13,1		21	400	4.600	3.300	2,2	1,1	400
	26	E03 ITS-Nebenräume	7.500	7.750	4	1,1	27,9		20	250	8.920	5.250	4	0,8	220
	27	E03 ITS-Bettzimmer	10.500	8.500	7,5	4,2	31,9	43,8	22	670	9.400	9.200	4	2	400
	28	E02 Kinderchirurgie	4.700	4.500	2,2	0,8	17,5		21	250	4.700	4.650	2,2	0,5	220
	29	E01 Neurochirurgie	4.350	4.550	2,2	1,4	13,2		21	400	4.550	3.700	2,2	1	400
	30	ZLA	33.000	29.350	11	2x3,8	72,5		18	100	34.000	25.600	7,5	2x2,5	100
FG 3	31	E04 Transfusionsmedizin	13.000	11.800	5,5	4,1	27,7		22,5	550	10.040	10.500	4	2,3	410
	32	E03 Kinderkardiologie	3.695	2.800	2,2	0,7	11,2		21	200	3.795	3.000	2,2	0,7	400
	33	E02 Kinderkardiologie	4.700	4.500	2,2	1,3	14,3		21	400	4.850	3.400	2,2	0,8	450
	34	E01 Augenheilkunde	7.330	6.800	4	1,6	22,3		20	400	7.430	6.100	3	0,7	250
	35	ZLA	24.285	25.900	7,5	2x3,6	72,5		18	100	24.115	23.000	5,5	2x3,1	200
FG 4	36	E03 Kinderhämatologie	4.200	3.700	2,2	0,5	12,8		21	160	4.600	3.100	2,2	0,9	400
	37	E02 Kinderheilkunde	4.500	4.600	2,2	1,4	13,7		22	450	4.600	4.200	2,2	1,7	450
	38	E01 HNO	6.200	5.200	4	1,1	18,8		20	400	6.300	5.900	3	1,3	600
	39	U01 ITS Anästhesie	10.700	9.100	7,5	2,8	39,7	44,7	20	540	9.300	5.800	4	1,3	230
	40	U01 ITS Anästhesie NR	8.300	6.600	4	1,2	25,1		19	300	8.800	6.700	4	1,3	350
	41	ZLA	35.000	29.200	11	2x4,9	72,5		18	200	35.000	25.700	11	1,3	150