

Energieeinsparungen im Teillastbetrieb von RLT-Anlagen durch zeitgesteuerte Vordruck- und Temperaturregelung

Thomas Kitzberger^{*U30}, Jan Kotik

Department für Materialwissenschaften und Prozesstechnik, Institut für Verfahrens- und Energietechnik (IVET), Universität für Bodenkultur, Peter-Jordan-Straße 82, 1190 Wien,
Tel.: +43 1 47654 89312, jan.kotik@boku.ac.at, <http://www.map.boku.ac.at/ivet/>

Kurzfassung:

In Bezug auf die Energieintensität bzw. den Energieverbrauch spielen raumlufttechnische (RLT-) Anlagen eine Schlüsselrolle bei kommerziellen Dienstleistungsgebäuden bzw. Forschungseinrichtungen. Betrachtet man die Lebenszykluskosten von RLT-Anlagen, so stellt man fest, dass die laufenden Betriebs- und Energiekosten die anfänglichen Investitionskosten – in Abhängigkeit der Anlagenkomplexität – ab einer Betriebslaufzeit von ca. sechs Jahren klar übersteigen. Die vorliegende Arbeit stellt den Nutzen und Aufwand für einen einfachen aber effektiven Ansatz in der Regelung von RLT-Anlagen vor: ein multi-variables Zeitprogramm für die bedarfsgeführte Luft-Regelung. Durch Anpassung der Sollwerte für Vordruck und Zulufttemperatur bzw. -feuchte unter Ausnutzung der Affinitätsgesetze können außerhalb der regulären Betriebszeiten (Nacht-, Feiertags- und Wochenendbetrieb) beachtliche Energieeinsparungen erzielt werden. Bedingt durch den notwendigen organisatorischen und messtechnischen Aufwand bei größeren Forschungsgebäuden mit mehreren Hauptlüftungs- bzw. Vollklimaanlagen ist der erforderliche Zeitrahmen für die Umsetzung dieser einfachen und effektiven Maßnahmen (im laufenden Betrieb) erstaunlich groß. Konkret können dabei jedoch bis zu 55% an elektrischer und 36% an thermischer Energie an einer – im Vorfeld schlecht eingestellten – Hauptlüftungsanlage jährlich eingespart werden. Ein gezieltes Energiemonitoringsystem mit einem an die Gebäudeinfrastruktur angepasstem Zählerkonzept kann die funktionale Analyse des Anlagenbetriebes sowie die Identifikation spezifischer Großverbraucher sehr effektiv unterstützen. Zusammenfassend kann man festhalten, dass durch die Einführung eines Zeitsteuerprogrammes der RLT-Anlagen in öffentlichen Forschungseinrichtungen bzw. Dienstleistungsgebäuden effektive Energieeinsparungen erzielt werden können. Alle zeit- und kostenmäßigen Aufwendungen müssen dabei natürlich im Vorfeld eruiert werden, um belastbare Aussagen zur Rentabilität dieser Optimierungsmaßnahme zu erhalten.

Keywords: Energieeinsparung, HKLS, RLT-Anlage, Multi-State-Betrieb, Affinitätsgesetz, flexible Vordruckregelung, Zeitsteuerung

1 Einleitung

Zahlreiche technologische Fortschritte auf dem Gebiet der Gebäude- bzw. Anlagentechnik sowie die fortschreitende Entwicklung der MSR-Technik beziehungsweise zunehmende Verbreitung der Gebäudeautomatisation haben in den letzten fünfzehn Jahren den Grundstein für einen hohen Raumklimakomfort in Dienstleistungsgebäuden, unter anderem auch in Forschungsbetrieben bzw. öffentlichen Universitäten, gelegt.

Trotz dieser Entwicklungen ist nach bisherigen Erfahrungen der Autoren davon auszugehen, dass in zahlreichen Fällen der geplante bzw. prognostizierte Energieverbrauch für öffentliche Forschungsbetriebe oft signifikant überschritten wird [1,2]. Nach Literaturangaben [3] verbrauchen Wohn- und Dienstleistungsgebäude weltweit jetzt schon mehr Energie als die Wirtschaftssektoren ‚Industrie‘ und ‚Transport‘; nämlich, je nach Quellen, zwischen 20 und 40% des Gesamtenergieverbrauches.

Aufschlussreiche Analysen der Gebäudeperformance sowie ausgewählter Gebäude-Energieverbräuche in Deutschland bzw. kritische Bewertungen von energieeffizienzsteigernden Maßnahmen bei kommerziellen Gebäuden finden sich bei Wagner et al. [4] bzw. bei Rupaathna et al. [5].

Eine IEA-Metastudie [6] mit über 200 analysierten Gebäuden gibt Einblick in die häufigsten Mängel an der Anlagentechnik bzw. im Betrieb während der Inbetriebnahme- bzw. Wiederinbetriebnahmephase:

- falsche (unter- bzw. überdimensionierte) Anlagenauslegung,
- Unzulänglichkeiten bei der Bauausführung bzw. der Anlageninstallation und
- an die ausgeführte Anlagentechnik unangepasste Betriebsweise und unzureichende Wartung der technischen Gebäudeausrüstung.

Folgende Gründe für die – im realen Betrieb beobachtbaren – Abweichungen von den Auslegungsdaten bzw. für mögliche Fehlerquellen können angegeben werden [7,8]:

- fehlerhafte Zeitsteuerprogramme (beispielsweise unnötig lange Laufzeiten der RLTA Anlagen)
- gleichzeitiges Heizen und Kühlen
- fehlerhafte Auslegungsdaten bzw. Betriebsparameter
- falsche oder ungünstige Positionierung von – für den Anlagenbetrieb relevanten – Sensoren
- mangelhaft kalibrierte Messsensoren
- manuell geänderte Betriebsparameter zur Kompensation unzureichender Anlagenfunktion
- falsch installierte Anlagentechnik etc.

In Bezug auf den Energieverbrauch können aus der technischen Gebäudeausrüstung die HKLS-Anlagen herausgegriffen werden, welche (nicht nur) bei Universitäten bzw. öffentlichen Forschungsinstitutionen die energetischen Hauptverbraucher darstellen [3].

Aus diesem Grund ist es bei der oben genannten Art von kommerziellen Gebäuden zielführend, den Betrieb dieser Anlagensysteme (HKLS) kontinuierlich zu überwachen, den

Energieverbrauch im Detail zu messen und Maßnahmen zur Erhöhung der Energieeffizienz bzw. zur Verringerung des Energieverbrauches in diesem Anlagenbereich zu setzen [9].

Bereits einfache, in Relation zur erzielbaren Energiekosteneinsparung, nicht kosten-intensive Maßnahmen bei RLT-Anlagen können und sollten zwecks effektiver Senkung des Energieverbrauches bei kommerziellen Gebäuden angedacht und durchgeführt werden [10].

2 Zielsetzung

Die wahrscheinlich einfachste Möglichkeit, um Energie bei raumluftechnischen Anlagen einzusparen, ist eine Reduktion der Betriebszeiten auf ein nötiges Mindestmaß. In Bürogebäuden ist ein Ausschalten der RLT-Anlagen in den Nacht- und Wochenendstunden weit verbreitet. Bei Laborgebäuden, mit teils unvorhersehbaren Nutzungszeiten, kann ein Ausschalten der RLT-Anlagen durchaus die Sicherheit von Personen beeinträchtigen. Daher kann bei einem reduzierten, sinnvoll angepassten Teillastbetrieb sowohl der Energieverbrauch gesenkt, als auch die Sicherheit gewährleistet werden.

Diese Arbeit bietet Informationen, wie die Energieeffizienz in gewerblichen Gebäuden erhöht werden kann und dabei der Energieverbrauch durch bedarfsgesteuerte RLT-Anlagen reduziert wird. Hierfür wird ein bereits umgesetztes Fallbeispiel der Universität für Bodenkultur genauer vorgestellt. Bei dem Laborgebäude am Standort Wien, Muthgasse wurde mittels Adaption der Gebäudeautomationssoftware die Möglichkeit eines variablen Zeitsteuerprogrammes für einen Teillastbetrieb der RLT-Anlagen geschaffen. Abbildung 1 fasst die drei wesentlichen Punkte für die erfolgreiche Implementierung eines Zeitsteuerprogrammes zusammen. Im weiteren Verlauf werden diese Punkte detailliert beschrieben.

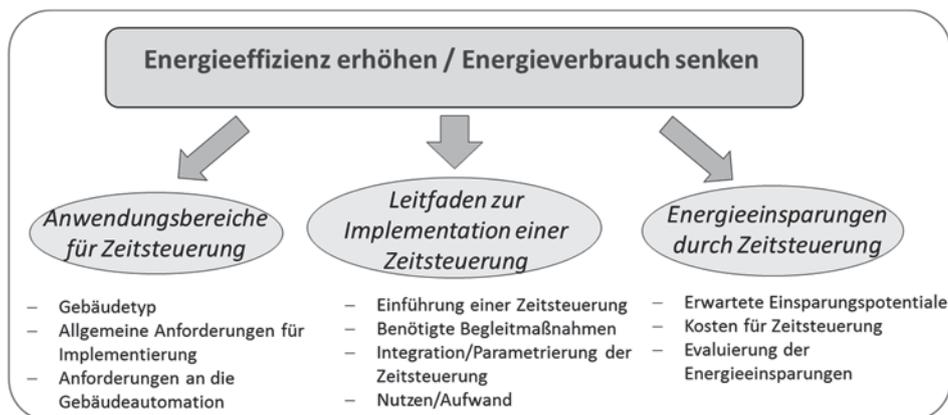


Abbildung 1: Wesentliche Punkte zur erfolgreichen Implementierung einer Zeitsteuerung

Im ersten Schritt wird die Charakteristik des Gebäudes näher definiert. Darunter fallen sowohl der Gebäudetyp, sowie aussagekräftige Kennzahlen und vor allem die technische Gebäudeausrüstung inklusive Gebäudeautomation mit zugehöriger Bedienoberfläche. Prinzipiell ist die Vorgehensweise bei der Implementierung einer Zeitsteuerung für RLT-Anlagen bei allen Gebäudetypen ähnlich und sollte sich in der tatsächlichen Umsetzung von Fall zu Fall wenig unterscheiden. Nachfolgend werden die Schritte für eine erfolgreiche Implementation beschrieben und erwartete Einsparungen evaluiert.

Im präsentierten Fallbeispiel steht vor allem auch der Sicherheitsaspekt im Vordergrund, der ein Mindestmaß an maschineller Belüftung der Laborräume vorschreibt. Eine sehr

energieeffiziente Maßnahme wäre eine Einzelraumregelung durch variable Volumenstromregler, gesteuert mit Präsenzmeldern, die bei Personenanwesenheit den geforderten Luftwechsel sicherstellen. Dies ist in Bestandsgebäuden jedoch mit weitaus höheren Kosten und Aufwand verbunden.

3 Methoden

Im Vorhinein wurde bereits eine detaillierte Energieverbrauchsanalyse des Gebäudes durchgeführt. Dies dient zugleich als Datengrundlage für Energieverbrauchswerte einzelner RLT-Anlagen. Zur Bestimmung der Kennlinien bzw. der konkreten Parameter der untersuchten RLT-Anlagen wurden Messungen am Luftkanalsystem, elektrische Messungen am Schaltschrank, Informationen aus der Gebäudeautomation, sowie technischer Gebäudedokumentation und Berechnungen mit den Affinitätsgesetzen durchgeführt.

Für ein Simulationsmodell zum thermischen Energieverbrauch einer RLT-Anlage wurde mittels Ultraschall-Wärmemengenzähler der Heizenergieverbrauch des Heizregisters über 6 Wochen im 5-Minuten-Intervall bei unterschiedlichen Betriebsmodi erfasst. Die Wetterdaten stammen von der BOKU Wetterstation des Institutes für Meteorologie am Standort Türkenschanze in 1190 Wien.

Abbildung 2 zeigt einen möglichen Ablauf für die Implementierung einer zeitgesteuerten Vordruckregelung.

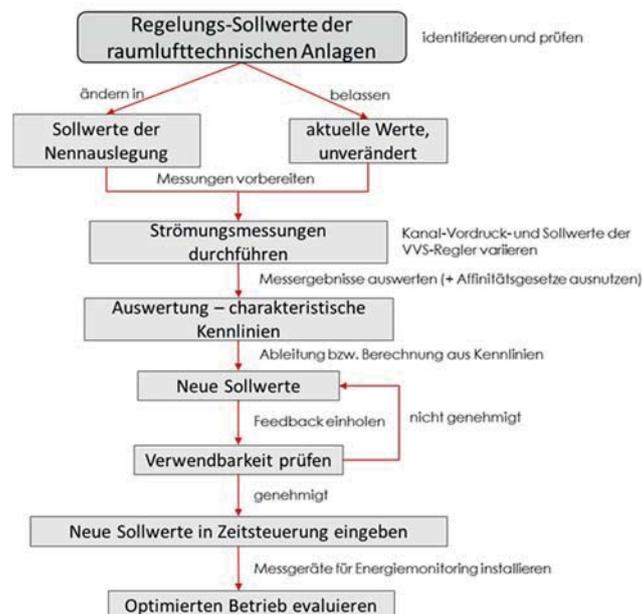


Abbildung 2: Methodik zur Überprüfung aktueller und Festlegung neuer Sollwerte der Lüftungsregelung in der Gebäudeautomation (GA)

Zunächst wurden aktuelle Sollwerte für relevante Regelgrößen im Hauptkanal wie Kanal-Vordruck und Zulufttemperatur sowie Sollwerte der variablen Volumenstrom (VVS)-Einzelraumregler wie Raumtemperatur oder Raumdruck analysiert bzw. für jede Lüftungshauptanlage kritisch hinterfragt. Unrealistische bzw. von der Nennauslegung stark abweichende Setzwerte wurden korrigiert bzw. auf Planungsstand zurückgesetzt. Die darauffolgenden Messungen im Hauptströmungskanal sowie in Lüftungssträngen individueller Räume dienten der Erfassung des charakteristischen hydraulischen Verhaltens der jeweiligen

Lüftungsanlage. Hierbei wurden sowohl die Kanal-Vordrücke als auch die Sollwerte der VVS-Regler variiert, um das Teillastverhalten der Anlagen möglichst gut ausmessen und abbilden zu können.

Im Anschluss daran wurden die Affinitätsgesetze der Strömungsmechanik herangezogen, um die entstandenen Charakteristiken zu inter- bzw. zu extrapolieren und eindeutige Zusammenhänge zwischen Vordruck und Volumenstrom zu erhalten. Aus den finalen Funktionen wurden schließlich gemäß der angepeilten Volumenstromreduktionen, 10%-30% nächtens an Werktagen und 30%+ an Wochenenden, außerhalb der normalen Betriebszeiten neue Sollwerte für die Teillast-Vordrücke in den Lüftungs-Hauptkanälen abgeleitet und in die GA mittels der Mehrstufen-Zeitprogramme implementiert.

Mehrere mobile Messgeräte wurden installiert, um den elektrischen und thermischen Energiebedarf der Lüftungsanlagen zu erfassen und die Auswirkungen der neuen Teillastbetriebe zu analysieren bzw. die neuen Zeitsteuerprogramme zu evaluieren.

4 Fallbeispiel – „Universität für Bodenkultur, Wien“

Im Zuge von internen Projekten zur Energieeffizienz und Energieeinsparungen wurde an der Universität für Bodenkultur eine zeitgesteuerte Vordruckregelung vom Institut für Verfahrens- und Energietechnik umgesetzt und analysiert. Als Fallbeispiel werden die Einsparungen einer RLT-Anlage in einem modernen Laborgebäude angeführt. Bei dem Gebäude handelt es sich um das Simon-Zeisel-Haus mit der Adresse Muthgasse 11 in 1190 Wien. Dieses Gebäude wird hauptsächlich für Forschung und Lehre mit Schwerpunkt Biotechnologie genutzt und ist Teil des „Vienna Institute of Biotechnology“. Die Nutzfläche beträgt ca. 14.300 m² und das Gebäude wurde im Jahr 2009 eröffnet. Insgesamt versorgen sieben Hauptlüftungsanlagen die Räume mit Außenluft. Eine Energieverbrauchsanalyse im Jahr 2013 hat ergeben, dass diese Hauptlüftungsanlagen ca. 41% des elektrischen Energieverbrauches und ca. 67% des Fernwärmeverbrauches aufweisen.

Die Implementierung der zeitgesteuerten Vordruckregelung wurde zu Beginn bei der größten RLT-Anlage mit einem Auslegungsvolumenstrom von 39.490 m³/h evaluiert. Ziel war eine kostengünstige Volumenstromreduktion in der Nacht, am Wochenende und an Feiertagen. Dies geschah mit einer Erweiterung in der Gebäudeautomationssoftware. Die RLT-Anlage versorgt Gänge, Sanitäranlagen, Lagerräume und Technikräume. Durch das Fehlen von steuerbaren VVS-Regler, war bisher ein Teillastbetrieb dieser RLT-Anlage nicht möglich. Dadurch, dass von dieser RLT-Anlagen auch Lagerräume für Chemikalien, als auch technische Räume versorgt werden, ist ein Ausschalten der Anlagen aus Sicherheitsgründen nicht erlaubt.

Zur detaillierten Beurteilung des IST-Zustandes wurden diverse Daten mit Hilfe von Auslegungsunterlagen, Gebäudeautomation, Messungen und Berechnungen erfasst. In Tabelle 1 sind Parameter für unterschiedliche Lastzustände dargestellt. Bedingt durch die allgemein gültigen Affinitätsgesetze (Formel 1) bei Strömungsmaschinen bringt eine geringe Reduktion des Volumenstromes (\dot{V}) bereits deutliche Einsparungen bei der elektrischen Leistungsaufnahme (P_{el}) des Ventilators [11]. Die Auswirkungen des Ventilatorwirkungsgrades (η) auf die Leistungsaufnahme haben dabei einen eher geringeren Einfluss, wie aus Tabelle 1 ersichtlich wird.

$$P_{el,2}/P_{el,1} = \left(\frac{\dot{V}_2}{\dot{V}_1}\right)^3 \frac{\eta_2}{\eta_1}, \quad (1)$$

Tabelle 1: Daten am Zuluftkanal für die Lüftungsanlage L0200

Datum/Zeit	Stat. Vordruck, [Pa]	Druckerhöhung im Ventilator [Pa]	Last [%]	Volumenstrom [m ³ /h]	Ventilator-Leistung, hydr. [kW]	Ventilator-Leistung, elektr. [kW]	Ventilator Wirkungsgrad [%]
<i>Auslegungsdaten</i>	1000	1901	100	39490	21,9	35,5	61,7
30.03.2016/12:10	850	1610	80	32780	14,7	31,0	47,3
30.03.2016/12:15	800	1550	78	32459	14,0	29,4	47,6
30.03.2016/12:20	750	1475	75	31661	13,0	27,5	47,2
30.03.2016/12:25	700	1400	71	30597	11,9	25,4	46,8
30.03.2016/12:30	650	1320	67	29532	10,8	23,3	46,5
30.03.2016/12:35	600	1240	62	28201	9,7	21,1	46,2
30.03.2016/12:40	550	1160	58	27137	8,7	18,9	46,2
30.03.2016/12:45	500	1080	54	26490	7,9	17,3	46,0
30.03.2016/14:15	300	670	29	19230	3,6	7,8	45,9
30.03.2016/15:15	200	450	9	14080	1,8	4,1	42,8
-	0	0	0	0	0,0	0,1	0,0

bei den **fett hervorgehobenen Werten** handelt es sich um Messwerte oder Daten aus der GA, die restlichen Werte wurden über die Affinitätsgesetze ermittelt.

Die Einstellungen der Sollwerte mit den dazugehörigen Luftmengen und der elektrischen Leistungsaufnahme wurde durch Tabelle 1 festgelegt. Für die Einstellwerte in der Abluft wurden eigene Messungen, sowie Berechnungen zur vollständigen Bilanzierung der RLT-Anlage durchgeführt.

4.1 Energieverbrauchsanalyse

Im Simon-Zeisel-Haus weisen die RLT-Anlagen den größten Energieverbrauch aller HKLS-Anlagen auf. Neben elektrischer Energie für die Luftförderung, wird meistens zusätzliche thermische Energie für die Heizung bzw. Kühlung der Luft benötigt. In dem präsentierten Fallbeispiel der RLT-Anlage L0200 handelt es sich um eine Lüftungsanlage mit Heizfunktion. Das bedeutet, dass im Teillastbetrieb sowohl elektrische Energie für die Ventilatoren, als auch thermische Energie für die Lufterwärmung eingespart werden können. Bei Vollklimaanlagen kann bei einer Volumenstromreduktion zusätzlich Energie für Kühlung, Befeuchtung und Entfeuchtung gespart werden. Durch eine gezielte Reduktion des Volumenstromes und der Lufttemperatur kann dabei am besten Energie eingespart werden [12].

4.1.1 Elektrische Energie

Abbildung 3 zeigt die gesamte elektrische Leistungsaufnahme der RLT-Anlage L0200 im Verlauf einer Woche. Bei einem 24h-Dauerbetrieb betrug die durchschnittliche

Leistungsaufnahme ca. 37 kW_{el}. Dies ergibt einen jährlichen elektrischen Energieverbrauch von 324 MWh. Mit der Implementierung der zeitgesteuerten Vordruckregelung wurden im Vorfeld die Einstellwerte der RLT-Anlage aus den Planungsunterlagen recherchiert. Durch das Zurücksetzen des Drucksollwertes im Zu- und Abluftkanal auf die Sollwerte der Dokumentation konnte bei geringer Reduktion des Volumenstromes, eine Reduktion der elektrischen Leistungsaufnahme um 10 kW_{el} und ein ausgewogenes Druckverhältnis zwischen Zu- und Abluft erreicht werden.

Die grüne Lastkurve zeigt, zumindest qualitativ, den Verlauf für das neu implementierte Zeitprogramm. Im Zeitraum von 06:00 bis 8:00 Uhr und 18:00 bis 22:00 Uhr an Arbeitstagen wurde der Drucksollwert soweit angepasst, dass sich ein um 15% reduzierter Luftvolumenstrom ergibt. Die gleichen Einstellungen wurden auch für Samstag, Sonntage und Feiertage untertags vorgenommen. Zusätzlich wurde der konstante Temperatursollwert in der Zuluft um 2°C auf 18°C gesenkt. In den Nachtzeiten wurde der Luftwechsel auf ein Mindestmaß von, in diesem Fall, 50% gedrosselt bei 18°C Temperatursollwert.

Durch die Implementierung der zeitgesteuerten Vordruckregelung konnte der jährliche elektrische Energieverbrauch um 55% reduziert werden. Dies ergibt neuerdings einen jährlichen Stromverbrauch für die RLT-Anlage L0200 mit ca. 146 MWh.

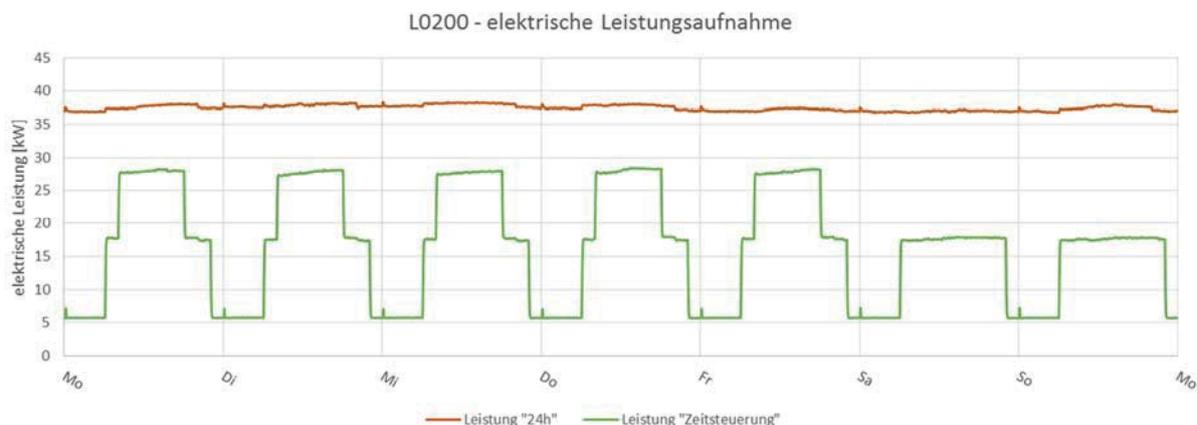


Abbildung 3: Elektrische Leistungsaufnahme der RLT-Anlage L0200 bei Dauerbetrieb und mit Zeitsteuerung

4.1.2 Heizenergie

Einen wesentlichen und auch ständig ändernden Einfluss auf die erforderliche Heizleistung zum Erwärmen der Luft auf Solltemperatur hat die vorherrschende Außentemperatur. Weitere Einflussparameter wie Nutzerverhalten, innere Lasten, Fensterlüftung haben einen geringen Einfluss auf den jährlich fluktuierenden Heizenergiebedarf und können als annähernd konstant angenommen werden. Genauso wie die Gebäudehülle, die Raumheizung (in Form von Radiatoren) und das Wärmeverteilsystem.

In Abbildung 4 ist der Einfluss der Außentemperatur auf die Heizleistung im Heizregister der RLT-Anlage L0200 für die Betriebsmodi „24h-Dauerbetrieb“ und „zeitgesteuerter Teillastbetrieb“ dargestellt. Es ist klar erkenntlich dass, bei steigender Außentemperatur die Heizleistung abnimmt und umgekehrt bei sinkender Außentemperatur die Heizleistung zunimmt. Konkrete jährliche Energieeinsparungen bei Heizenergie lassen sich in Zeitreihen nicht direkt miteinander vergleichen. Eine Möglichkeit zur Vergleichbarkeit wären klimabereinigte Verbrauchswerte. Hierfür würden sich Heizgradtage eignen [13].

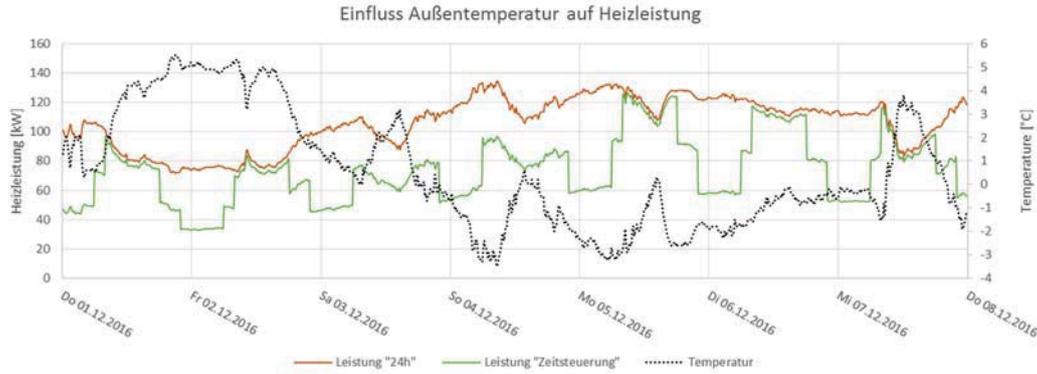


Abbildung 4: Einfluss der Außentemperatur auf die Heizleistung

Im Dezember 2016 und Jänner 2017 wurden Wärmemengenmessungen am Heizregister der RLT-Anlage L0200 durchgeführt. Ziel dieser Messungen war es, den mathematischen Zusammenhang zwischen Betriebsmodi der RLT-Anlage und Außentemperatur zu erhalten. Mit den gewonnenen Daten wurde ein Simulationsmodell für die erforderliche Heizleistung in Abhängigkeit der Außentemperatur und Lüftungseinstellungen entwickelt.

In Abbildung 5 sind die Simulationsergebnisse von drei verschiedenen Betriebsmodi mit den Wetterdaten für Dezember 2016 zusammengefasst. In diesem Diagramm sind die erforderliche Heizleistung und der kumulierte Energieverbrauch ersichtlich. Der Referenzwert mit dem 24h-Dauerbetrieb und konstanter Zulufttemperatur von 20°C ist in „rot“ dargestellt. Der Heizenergiebedarf für Dezember 2016 ergibt ca. 74 MWh. Durch Anpassung der Einstellwerte auf Planungswerte und der Implementierung der vorgestellten zeitgesteuerten Druckregelung, aber konstanter Temperatur von 20°C können beim Heizenergieverbrauch deutliche Einsparungen erreicht werden. Die Leistungskurve (gelb) zeigt deutliche Einsparungen in den Nachtstunden, sowie am Wochenende und an Feiertagen. Der monatliche Heizenergieverbrauch reduziert sich auf 56 MWh. Durch ein zusätzliches Absenken der Zulufttemperatur in den Nachtstunden und am Wochenende/Feiertagen (grün) wird der Heizenergiebedarf für den Dezember 2016 um weitere 5 MWh auf 51 MWh gesenkt.

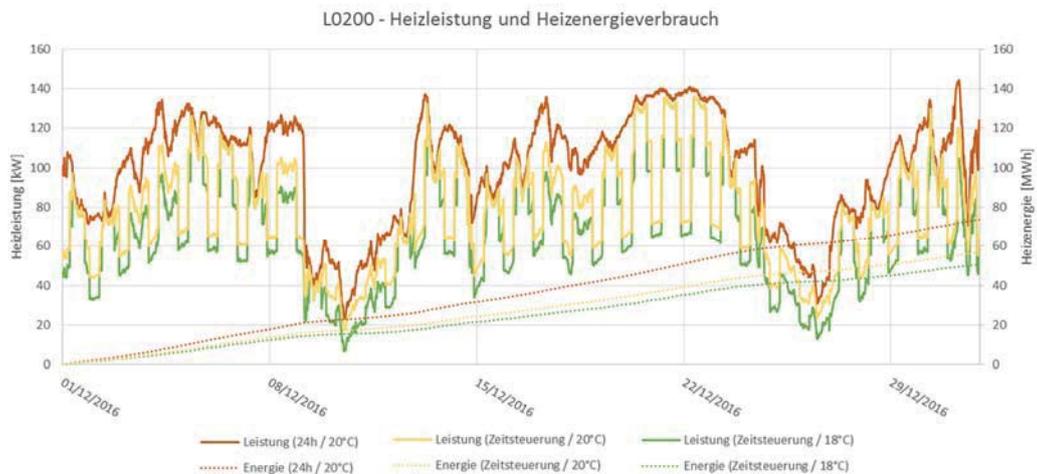


Abbildung 5: Heizleistung und Heizenergieverbrauch L0200 im Dezember 2016 für unterschiedliche Betriebsmodi

4.2 Energieeinsparungen

Für das Jahr 2016 wurden konkrete Energieeinsparungen für die drei vorgestellten Betriebsmodi simuliert. Die Ergebnisse sind in Abbildung 6 zusammengefasst. Der elektrische Energieverbrauch konnte um 55% auf 147 MWh reduziert werden. Der Heizenergieverbrauch konnte für die RLT-Anlage L0200 durch die Implementierung eines Zeitprogrammes und reduzierten Temperatursollwerten auf 244 MWh pro Jahr reduziert werden. Dies entspricht Einsparungen von insgesamt 36%. Die CO₂-Emissionen bei elektrischer Energie und Fernwärme konnten somit um 41,8 t im Jahr 2016 reduziert werden.

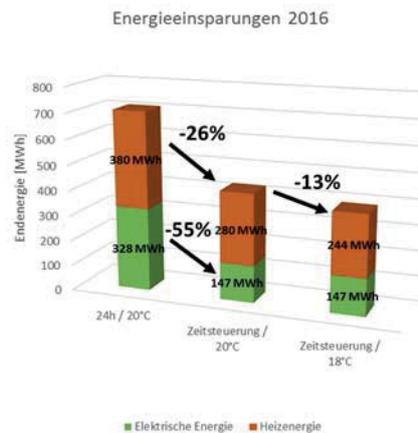


Abbildung 6: Energieeinsparungen nach Implementierung von zeitgesteuerter Vordruckregelung im Jahr 2016

5 Schlussfolgerungen

Im ersten Schritt sollte, wie von *Perez-Lombard et al.* [14] beschrieben, eine detaillierte Energieanalyse des Energieverbrauches von HKLS-Anlagen durchgeführt werden, um ineffiziente Anlagen(teile) und Großverbraucher in einem Gebäude zu erfassen. Informationen aus der Gebäudeautomation und gegebenenfalls aus einem Energiemonitoring helfen bei der gezielten Umsetzung von Energieeffizienzmaßnahmen und bieten eine profunde Beurteilung der gesetzten Maßnahmen [15].

Eine flexible, zeitgesteuerte Vordruckregelung eignet sich vor allem für RLT-Anlage ohne Einzelraumregelung mit VVS-Reglern. Die Implementierung ist mit geringen Kosten für die softwareseitige Erweiterung der Druckregelung in der Gebäudeautomation verbunden. Zeitaufwendig ist hingegen der personelle Aufwand für diverse Messungen an der RLT-Anlage und des Luftkanalsystems zur Kontrolle eines ausreichende Luftwechsels in (kritischen) Räumen. Durch Veränderung des Druckes im Luftkanal kann es vorkommen, dass einzelne Räume nicht mehr ausreichend belüftet werden, da der hydraulische Abgleich nur für den Auslegungs-Vordruck durchgeführt wird.

Besser, wenn auch mit deutlich mehr Investitionsaufwand verbunden, wäre eine Einzelraum bzw. Zonenregelung mit variablen Volumenstromreglern in Kombination mit Präsenzmeldern und variabler Kanaldruckregelung („static pressure reset control“). *Okochi & Yao* [12] geben einen detaillierten Überblick über variable Volumenstromregelung. Weitere Einsparungsmöglichkeiten für RLT-Anlagen mit VVS-Reglern ergeben sich durch variable Kanaldruckregelung, diese werden u.a. von *Tukur & Hallinan* [16], *Rahnama et al.* [17] und *Zhang et al.* [18] beschrieben.

5.1 Anwendbarkeit der Zeitsteuerprogramme

Generell lässt sich festhalten, dass sich jeder Typ eines kommerziellen Nicht-Wohngebäudes, bei dem der Energieverbrauch der HKLS-Technik, insbesondere der RLT-Anlagen, einen übergeordneten Stellenwert im Energieverbrauch des Gebäudes einnimmt, potenziell für den Einsatz eines Mehrstufen-Zeitsteuerprogrammes eignet. Vielfach werden ja bereits sogenannte Absenkbetriebe außerhalb regulärer Arbeitszeiten angefahren, jedoch ist das Teillastverhalten der Lüftungsanlagen vielfach unbefriedigend bzw. unzureichend, da entweder die Anlagen nicht ‚beliebig‘ oder ‚falsch‘ gedrosselt werden oder gar mangels Eingriffs- bzw. Einstellmöglichkeiten in Zeiten reduzierten Bedarfs ganz abgeschaltet werden. Die vollständige Abschaltung der RLT-Anlagen in der Nacht bzw. am Wochenende ist aus Energieverbrauchssicht natürlich am günstigsten, oft ist dies aber aus sicherheits-technischen- oder sonstigen Arbeits- bzw. Produktionsgründen nicht durchführbar.

Der Forschungs- bzw. Laborbetrieb an einer Universität ist durch hohe Anforderungen an das Raumklima gekennzeichnet, welche teilweise auch nächtens bzw. fortwährend sichergestellt werden müssen. Bei diesen Gebäudetypen ist daher ein gezieltes und genau definiertes Teillastverhalten der RLT-Anlagen anzustreben bzw. einzustellen, um Einsparungen im inhärent hohen Energieverbrauch zu erzielen.

Um ein effektives Zeitsteuerprogramm in der GA zu implementieren, sind einige grundsätzliche Anforderungen an die technische Gebäudeausrüstung, hier insbesondere auch an die Gebäudeautomation, zu erfüllen:

- die Motoren der Ventilatoren müssen drehzahl geregelt sein bzw. für einen Frequenzumrichterbetrieb geeignet sein,
- generell müssen alle elektrischen Komponenten des Lüftungsantriebes für einen drehzahlvariablen Betrieb ausgelegt sein, was auch eine geeignete Instrumentierung bzw. die Möglichkeit einer nachträglichen messtechnischen Installation inkludiert.

Darüber hinaus muss man sich darüber im Klaren sein, dass es bei fehlenden Möglichkeiten zur Einzelraumregelung aufgrund der hydraulischen Gegebenheiten vereinzelt zu Unterversorgungen im reduzierten Teillastbetrieb kommen kann. Eine Nachrüstung von VVS- oder Konstantvolumenstrom-Reglern muss also im Bedarfsfall, abhängig von der geplanten Volumenstromreduktion, in Erwägung gezogen werden.

Wenn die anlagentechnischen Voraussetzungen für einen drehzahl- bzw. druckvariablen Lüftungsbetrieb gegeben sind, müssen einige Bedingungen für die Einführung eines mehrstufigen Zeitsteuerprogrammes auch in der Gebäudeautomation erfüllt werden:

- die Ansteuerung des Zu- bzw. Abluftventilators muss durch einen ausreichenden Automatisierungsgrad über eine zentrale Leitstation (GLT) sichergestellt werden und
- es muss die Möglichkeit bestehen, diverse Sollwerte (Druck, Temperatur, Feuchte etc.) in der Regelung der RLT-Anlagen in beliebig vielen, zumindest jedoch in drei bis fünf Stufen im 24h-Zeitfenster zu verändern und
- über eine geeignete Visualisierungsoberfläche auch einzugeben.

5.2 Richtlinien für die Einführung eines Zeitsteuerprogrammes

Wenn die anlagentechnischen sowie die Voraussetzungen in der Gebäudeautomation erfüllt sind, dann steht der Implementierung eines variablen Zeitsteuerprogrammes nichts mehr im Wege.

Die erweiterte Programmierung der Leittechnik-Software zur automatisierten Teillastregelung der RLT-Anlagen sowie die zusätzlichen Visualisierungsoptionen sind generell rasch durchzuführen. Die Kosten sollten sich in den meisten Fällen im Rahmen von 500,- bis 5000,- Eur in Abhängigkeit der Gebäudegröße und Anlagenkomplexität bewegen.

Die grundsätzliche Vorgangsweise zur Einführung eines Teillastbetriebes durch variable Vordruckregelung der RLT-Anlagen ist in Abbildung 2 festgehalten.

Natürlich müssen alle zeit- und kostenmäßigen Aufwendungen im Vorhinein und für jedes individuelle Gebäude einzeln abgewogen werden, um vernünftige Aussagen zu Rentabilität und Amortisationszeit der Optimierungsmaßnahme ‚mehrstufiges Zeitsteuerprogramm‘ generieren zu können.

6 Ausblick

Eine zeitgesteuerte Vordruckregelung wurde in einem weiteren großen Laborgebäude in Tulln erfolgreich umgesetzt. Dabei wurden Energieeinsparungen in Höhe 261 MWh elektrisch und 370 MWh an Fernwärme im Jahr 2016 erzielt. An allen Hauptstandorten der Universität für Bodenkultur wird ein einheitliches Energiemonitoringsystem initialisiert. Bisher ist das Simon-Zeisel-Haus mit elektrischen und thermischen Subzählern nachgerüstet worden. Dies dient vor allem auch als Erfolgskontrolle für bereits umgesetzte Energieeffizienzmaßnahmen und zur Identifikation von weiteren Einsparpotentialen.

Es kann angenommen werden, dass der Energieverbrauch von älteren Dienstleistungsgebäuden in geringer Detailtiefe erfasst wird, ganz zu schweigen von automatisierter Energieverbrauchsdatenerfassung. Dadurch bleiben wichtige Informationen zum Energieverbrauch oft unerkannt und zögern mitunter effiziente Optimierungsmaßnahme hinaus. Dies führt zu hohen Ausgaben für Energie und teils unnötigen Treibhausgasemissionen.

7 Literatur

- [1] D. Majcen, L.C.M. Itard, H. Visscher, Theoretical vs. actual energy consumption of labelled dwellings in the Netherlands: Discrepancies and policy implications, *Energy Policy* 54 (2013), 125-136.
- [2] M. Herrando, D. Cambra, M. Navarro, L. de la Cruz, G. Millan, I. Zabalza, Energy Performance Certification of Faculty Buildings in Spain: The gap between estimated and real energy consumption, *Energy Conversion and Management*, 125 (2016), 141-153.
- [3] L. Perez-Lombard, J. Ortiz, C. Pout, A review on buildings energy consumption information, *Energy and Buildings* 40 (2008), 394-398.
- [4] A. Wagner, T. Lützkendorf, K. Voss, G. Spars, A. Maas, S. Herkel, Performance analysis of commercial buildings – Results and experiences from the German demonstration program ‚Energy Optimized Buildings (EnOB)‘, *Energy and Buildings* 68 (2014), 634-638.

- [5]** R. Ruparathna, K. Hewage, R. Sadiq, Improving the energy efficiency of the existing building stock: A critical review of commercial and institutional buildings, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 53 (2016), 1032-1045.
- [6]** H. Friedman, D. Claridge, D. Choiniere, N. Milesi, Commissioning Cost-Benefit and Persistence of Savings, International Energy Agency (2010).
- [7]** A. Costa, M.M. Keane, J.I. Torrens, E. Corry, Building operation and energy performance: Monitoring, analysis, and optimization toolkit, *Applied Energy* 101 (2013), 310-316.
- [8]** L. Wang, S. Greenberg, J. Fiegel, A. Rubalcava, S. Earni, X. Pang et al., Monitoring-based HVAC commissioning of an existing office building for energy efficiency, *Applied Energy* 102 (2013), 1382-1390.
- [9]** L. Perez-Lombard, J. Ortiz, I.R. Maestre, J.F. Coronel, Constructing HVAC energy efficiency indicators, *Energy and Buildings* 47 (2012), 619-629.
- [10]** G. Escriva-Escriva, Basic actions to improve energy efficiency in commercial buildings in operation, *Energy and Buildings* 43 (2011), 3106-3111.
- [11]** A.A. Sonin, The Physical Basis of Dimensional Analysis, Department of Mechanical Engineering MIT, Cambridge MA 02139 (2001).
- [12]** G.S. Okochi & Y. Yao, A review of recent developments and technological advancements of variable-air-volume (VAV) air-conditioning systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 59 (2016), 784-817.
- [13]** K. Schöngrundner, Heizgradtagbereinigung des Heizenergieeinsatzes, Kommunales Energiekonzept Graz (KEK), KEK-Bericht Nr.29 (2002), Graz.
- [14]** L. Perez-Lombard, J. Ortiz, J.F. Coronel, I.R. Maestre, A review of HVAC systems requirements in building energy regulations, *Energy and Buildings* 43 (2011), 255-268.
- [15]** M.W. Ahmad, M. Mourshed, D. Mundow, M. Sisinni, Building energy metering and environmental monitoring – A state-of-the-art review and directions for future research, *Energy and Buildings* 120 (2016), 85-102.
- [16]** A. Tukur & K.P. Hallinan, Statistically informed static pressure control in multiple-zone VAN systems, *Energy and Buildings* 135 (2017), 244-252.
- [17]** S. Rahnama, A. Afshari, N.C. Bergsøe, S. Sadrizadeh, Experimental study of the pressure reset control strategy for energy-efficient fan operation. Part 1: Variable air volume ventilation system with dampers, *Energy and Buildings* 139 (2017) 72-77.
- [18]** J. Zhang, X. Li, T. Zhao, W. Dai, Experimental study on novel fuzzy control method for static pressure reset based on the maximum damper position feedback, *Energy and Buildings* 105 (2015), 215-222.