



Aufgrund der steigenden Energiepreise und der wachsenden Klimaschutzanforderungen in Deutschland und ganz Europa spielt der Energieverbrauch bei der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der gebäudetechnischen Anlagen eine deutlich zunehmende Rolle. Auch der VDI trägt dieser Entwicklung Rechnung und hat mit der Richtlinie VDI 2083-4.2 das erste Regelwerk zur Energieeffizienz speziell für den Bereich der Reinraumtechnik auf den Weg gebracht. Der Autor dieses Fachartikels ist der Vorsitzende für dieses Richtlinienblatt.

Energieeffizientes Entfeuchten

in Reinraum-Klimaanlagen



Michael Kuhn



Polina Bitsch

Bisher wurden die Entscheidungen über den Anlagenaufbau in der Planungsphase häufig durch den reinen Investitionskostenvergleich getroffen. Die Praxis zeigt dagegen, dass die kumulierten Energiekosten bei großen Industrielüftungsanlagen in manchen Fällen, wie z. B. bei Reinraumtechnischen Anlagen mit einem rund um die Uhr Betrieb, die Investitionskosten in weniger als 10 Jahren überschreiten können. Die Vorhersage der jährlichen Energiekosten der geplanten Anlagen ist auch in der neuen HOAI kein Bestandteil der regulären Planungsleistungen und wird in den seltensten Fällen als besondere Leistung beauftragt.

Anregung für diese Veröffentlichung war eine durchgeführte energetische Inspektion von Klimaanlagen bei einem Pharmaunternehmen. Dabei war aufgefallen, dass eine Vielzahl von Rein-

raum-Klimaanlagen mit Lufttrocknern zur Luftentfeuchtung ausgestattet waren, obwohl keine speziellen Anforderungen an den Wassergehalt der Zuluft ($x_{zul} = 8 \text{ g/kg}$) gestellt wurden. Da dieses Konzept für eine geplante Neuanlage ebenfalls übernommen werden sollte, wurde auf Vorschlag der Autoren ein Variantenvergleich durchgeführt, um den Einfluss auf den Energieverbrauch und die Energiekosten im Vorfeld zu überprüfen. In diesem Zusammenhang sollte auch untersucht werden, ob eine Anlage mit variabler Außenluft (freie Kühlung) Kostenvorteile gegenüber einer Variante mit konstanter (mini-

Istzustand:	Klimaanlage mit Sorptionstrockner und konstantem Außenluftanteil (25 %), siehe Abbildung 1
Variante 1:	Klimaanlage ohne Trockner und konstantem Außenluftanteil (25 %) mit Vorerhitzer und Kühler (Entfeuchtung) im Außenluftkanal, siehe Abbildung 2
Variante 2:	Istzustand mit geregelter Mischkammer (25–100 %), enthalpiegesteuert, Entfeuchtung im Hauptkanal, siehe Abbildung 3
Variante 3:	Istzustand mit geregelter Mischkammer (25–100 %), temperaturgesteuert, Entfeuchtung im Hauptkanal, siehe Abbildung 3

Tabelle 1: Übersicht der analysierten Varianten

maler) Außenluft hat. Weiterhin sollte der Unterschied zwischen enthalpiegesteuerter und temperaturgesteuerter Klappenumschaltung aufgezeigt werden.

Simulation als Basis für die Bewertung

Als effektive Berechnungsmethode für den jährlichen Energiebedarf hat sich die Anlagensimulation mit Hilfe von geeigneten EDV-gestützten Simulationsprogrammen erwiesen. Die Anlagensimulation bedeutet hier die Berechnung des Energieaufwandes für die stündlichen thermodynamischen Luftzustandsänderungen im Luftaufbereitungsgerät auf Basis der Standortwetterdaten. Die mit der Simulation ermittelten jährlichen Energiekosten beinhalten die Kosten für die Luftaufbereitung auf die definierten Raumluftkonditionen und für die Energieumwandlungsverluste bei der Kälte-, Wärme- und Dampferzeugung.

Als Ausgangszustand für die untersuchten Anlagenvarianten diente eine bestehende Klimaanlage mit konstantem Umluftanteil und dem Sorptionstrockner für die Luftentfeuchtung (Istzustand, siehe Tabelle 1). Die Anlage versorgt Produktionsräume mit 25.000 m³/h Zuluft und ist rund um die Uhr im Betrieb. Bei der ersten Variante wurde alternativ die Sorptionstrocknung durch eine mit Kaltwasser-Kühlung realisierte Luftentfeuchtung im Außenluftkanal ersetzt. Die Varianten 2 und 3 stellen die am weitesten verbreitete Klimaanlagevariante mit der Entfeuchtung (Kaltwasser-Kühler) in der Zuluft und mit unterschiedlich geregelter Mischkammer dar. Eine interessante Alternative zu Variante 1, die mit lokaler Umluft (FFUs = Filter-Fan-Units) arbeiten würde, und die häufig zu den niedrigsten Gesamtkosten führt, war im vorliegenden Fall aufgrund der baulichen Randbedingungen nicht realisierbar.

Bei den Berechnungen wurden zur Vereinfachung alle durch die Anlage mit Zuluft versorgten Räume als eine Zone mit konstantem Zuluft- und Abluftvolumenstrom und konstanter Zulufttemperatur betrachtet. Da es sich dabei um innenliegende Reinräume handelt, konnten die Wärmetransmissionsströme und die Strahlungsgewinne bei der Simulation unberücksichtigt bleiben.

Als Nutzenergie-bezogene Arbeitspreise wurden für das Simulationsjahr 49 €/MWh für die Dampfenergie, 102 €/MWh für die elektrische Energie, 51 €/MWh für die Heizenergie und 41 €/MWh für die Kühlenergie angesetzt (Preisstand 2007).

Für die Simulation wurden die Witterungsdaten von Meteotest herangezogen. Alternativ können die Test-Referenzjahr-Daten des Deutschen Wetterdienstes zur Anwendung kommen.

Zuerst wurden die in Tabelle 1 aufgeführten Anlagen mit konstantem Zuluftwassergehalt von 8 g/kg simuliert und die Ergebnisse in den Abbildungen 4 und 5 dargestellt. Danach erfolgte eine Berechnung für den regelungstechnisch optimierten Anlagenbetrieb, bei dem sich der zulässige Bereich der Raumluftfeuchte energetisch ausnützen lässt, d.h. keine Be- bzw. Entfeuchtung, wenn der Aussenluftwassergehalt zwischen 5,2 und 9,8 g/kg liegt (siehe Abbildungen 6 und 7).

Bei den bestehenden Anlagen mit Sorptionstrockner wurde in einer weiteren Untersuchung analysiert, bei welchen Anlagen sich statt Außenluft Fortluft als Regenerationsluft anbieten würde und wo die Nachrüstung einer Wärmerückgewinnung möglich wäre. Weitere Einsparmaßnahmen waren im vorliegenden Beispiel nicht möglich, da die Raumtemperatur konstant bei 22 °C (± 1 K) gehalten werden musste und die Produktion einen Betrieb mit 21 Schichten pro Woche vorgab.

Ergebnisse

Aus der Abbildung 4 geht hervor, dass der gesamte jährliche Energiebedarf je nach untersuchter Anlagenvariante von 570 MWh/a (Variante 2) bis 740 MWh/a (Istzustand) variiert. Der Istzustand weist aufgrund der verwendeten Sorptions-Trocknungstechnik den höchsten Energieaufwand auf. Hierfür ist vor allem der Energiebedarf für die Regeneration des Trockners verantwortlich. Betrachtet man den Istzustand als 100 %, beträgt der Energiebedarf der Variante 1 nur noch 80 %. Die Varianten 2 und 3 liegen ungefähr gleich bei 80 % und 83 %.

Die Varianten 2 und 3 weisen aufgrund der variablen Außenluftbetriebsweise einen deutlich geringeren Kühlenergiebedarf auf. Dafür steigt allerdings der Energiebedarf für die Befeuchtung

an. Beim Gesamtenergiebedarf ergeben sich daher kaum Unterschiede zwischen den Varianten. Der Vorteil der enthalpiegesteuerten Betriebsweise (Variante 2) gegenüber der temperaturgesteuerten Betriebsweise (Variante 3) beträgt ca. 3 %.

Aufgrund der zur Simulation herangezogenen Energiepreise und -umwandlungsfaktoren ist für die Gewährleistung der geforderten Bedingungen in den Reinräumen mit Energiekosten je nach Anlagenart von 31.400 €/a bis 38.400 €/a (siehe Abbildung 5) zu rechnen. Die höchste Energiekosteneinsparung von 18 % gegenüber dem Istzustand ergibt sich bei der Anlage mit der ungeregelten Mischkammer (Variante 1), mit einer Ersparnis von ca. 7.000 €/a entspricht. Der Kostenvorteil der Betriebsweise mit konstantem Außenluftanteil ist in diesem Fall dadurch begründet, dass die spezifischen Kosten für den Dampf höher sind als für die Kühlenergie.

Noch deutlicher werden die Unterschiede zum Istzustand und zwischen den Varianten, wenn man die energieoptimierte Betriebsweise (siehe Abbildungen 6 und 7) betrachtet.

Breibt man die vorhandenen Anlagen mit Sorptionstrocknung energieoptimiert, d.h. mit angepassten Feuchtesollwerten, ergibt sich dadurch am Beispiel der untersuchten Anlage eine Kosteneinsparung von ca. 7.000 €/a. Die höchste Einsparung würde in diesem Fall die Anlage gemäß Variante 2 erzielen. Alleine die beschriebene energieoptimierte Betriebsweise ergibt bei dieser Variante eine Kostenersparnis von ca. 13.000 €/a, was einer Energieeinsparung von ca. 52 % gleichkommt. Die Variante 2 mit variablem Außenluftanteil schneidet bei der energieoptimierten Betriebsweise wesentlich besser ab, als die Variante 1 (konstanter Außenluftanteil). Grund hierfür ist der reduzierte Sollwert, ab dem der Befeuchter freigegeben wird (5,2 g/kg). Die Nutzung der „freien“ Kühlung ist somit nicht an einen höheren Energiebedarf für die Dampf-befeuchtung gekoppelt.

Fazit

Die im Rahmen des beschriebenen Projekts durchgeführten Berechnungen zeigten, dass die Energieeffizienz der Reinraum-Klimaanlagen von der ausgewählten Luftaufbereitungstechnik bzw. vom Regelungskonzept stark beeinflusst wird.

Im vorliegenden Fall war es nicht empfehlenswert die neue Anlage mit Sorptionstrocknung auszustatten. Diese Art der Trocknung ist zu bevorzugen bzw. unumgänglich, wenn sehr geringe Raumluftfeuchten sicherzustellen sind, wie es beispielsweise in der Solidaproduktion oder bei der Kaltabfüllung von Flüssigarzneimitteln der Fall sein kann. Die Sorptionstrocknung kann auch interessant sein, wenn Abwärme auf hohem Temperaturniveau (> 70 °C) zur Verfügung steht.

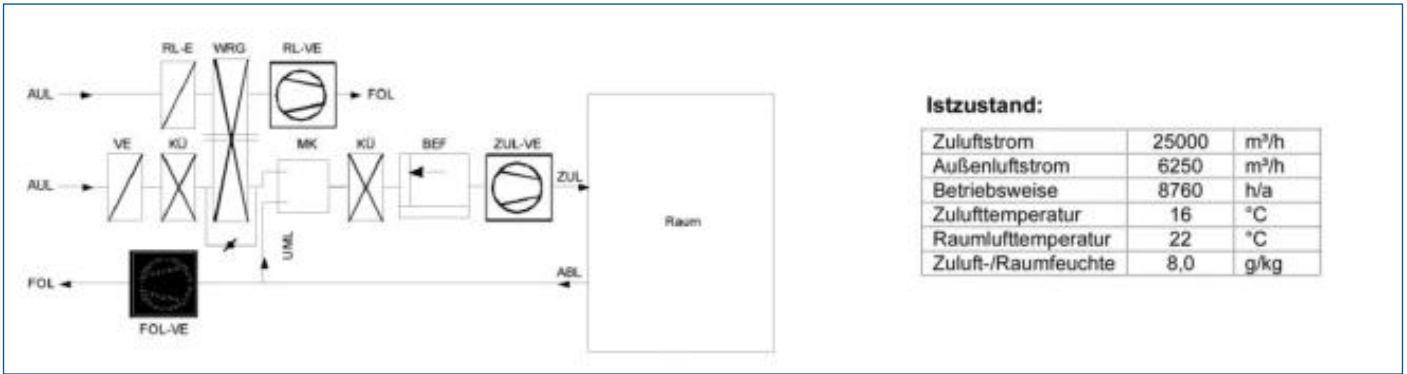


Abb. 1: Lufttechnisches Prinzipschema und wichtige Betriebsdaten der Anlage im Istzustand (RL-E = Regenerationsluftheritzer; WRG = Sorptionsrotor; VE = Vorerhitzer; KÜ = Kühler; BEF = Dampfbefeuchter; MK = Mischkammer)



Abb. 2: Lufttechnisches Prinzipschema und wichtige Betriebsdaten der Anlage gemäß Variante 1



Abb. 3: Lufttechnisches Prinzipschema und wichtige Betriebsdaten der Anlagen gemäß Variante 2 und 3

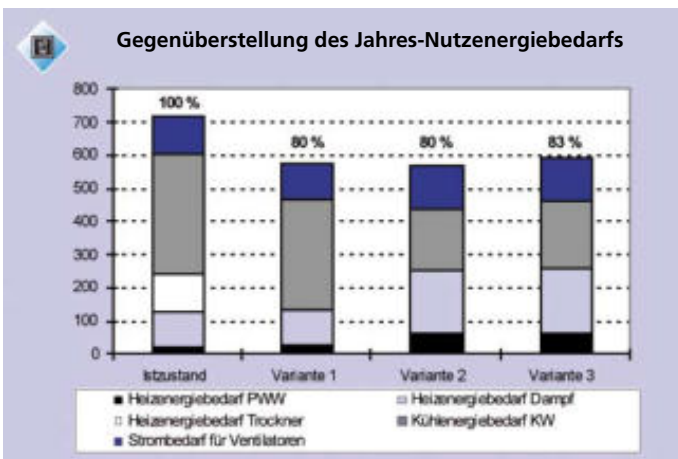


Abb. 4: Simulationsergebnisse des Jahres-Nutzenergiebedarfs der untersuchten Anlagenvarianten mit einem konstanten Zuluftwassergehalt von 8 g/kg.

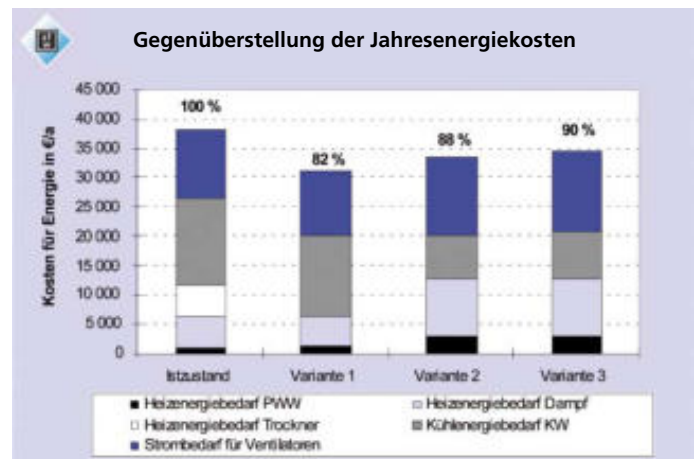


Abb. 5: Simulationsergebnisse der Jahresenergiekosten der untersuchten Anlagenvarianten mit einem konstanten Zuluftwassergehalt von 8 g/kg.

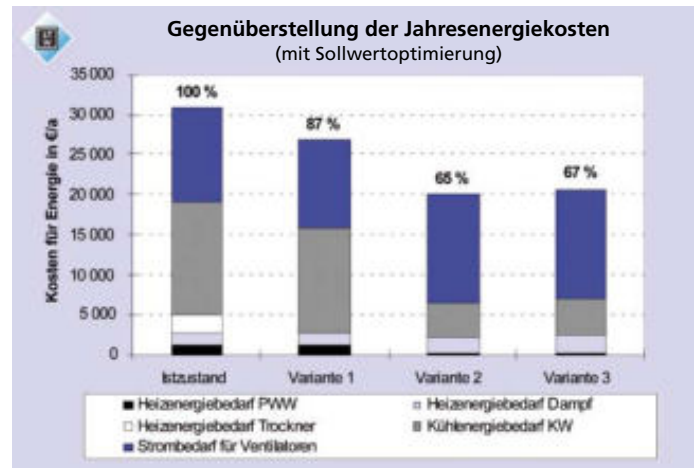
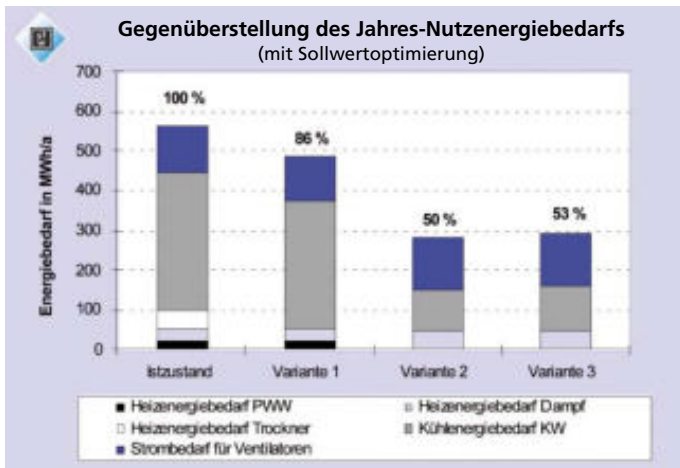


Abb. 6: Simulationsergebnisse des Jahres-Nutzenergiebedarfs der untersuchten Anlagenvarianten bei optimiertem Regelungskonzept (keine Be- bzw. Entfeuchtung bei Aussenluftwassergehalt von 5,2...9,8 g/kg).

Abb. 7: Simulationsergebnisse der Jahresenergiekosten der untersuchten Anlagenvarianten bei optimiertem Regelungskonzept (keine Be- bzw. Entfeuchtung bei Aussenluftwassergehalt von 5,2...9,8 g/kg).

Auch wenn die bestehenden Anlagen nicht mehr auf Kaltwasserkühlung umgebaut werden, kann durch die energieoptimierte Betriebsweise mit angepassten Feuchtesollwerten (im Rahmen der zulässigen Feuchtetoleranzen), bereits eine Energieeinsparung von ca. 21 % mit geringem Kostenaufwand, der für die Programmänderungen in den DDC-Unterstationen anfällt, erzielt werden.

Die vorgestellten Ergebnisse haben gezeigt, dass die energieoptimale Variante von vielen Randbedingungen abhängt (Energiepreise, zulässige Sollwert-Bandbreiten, Betriebsdauer, möglicher Absenkbetrieb, klimatische Verhältnisse, regelungstechnische Betriebsweise), die nur durch Anlagensimulation aussagekräftig zu bewerten sind. Projektbezogene Analysen sind er-

forderlich, weil sich bei jedem Projekt die genannten Randbedingungen unterschiedlich gestalten.

Es wird daher empfohlen die Anlagensimulation als wichtiges Hilfsmittel schon in der Planungsphase einzusetzen, um die optimale Anlagenvariante neben sonstigen Überlegungen auch unter energetischen und betriebswirtschaftlichen Gesichtspunkten auswählen zu können. Zudem wäre es wünschenswert, dass die korrekte Umsetzung der geplanten Energieeinsparmaßnahmen während der Inbetriebnahme überwacht und im Betrieb nachgewiesen werden. Viele Hinweise dazu und darüber hinaus können der neuen VDI-Richtlinie 2083 Blatt 4.2 entnommen werden.

Literaturverzeichnis auf Anfrage von den Autoren erhältlich.

Autoren: Polina Bitsch, Michael Kuhn

KONTAKT

Michael Kuhn
STZ Euro, Offenburg
Tel.: 0781/78352
mkuhn@stz-euro.de
www.stz-euro.de



STZ EURO

STEINBEIS-TRANSFERZENTRUM
ENERGIE-, UMWELT- UND REINRAUMTECHNIK OFFENBURG

Reinraum-Dienstleistungen STZ EURO:

- GMP-gerechte Qualifizierung Ihrer Reinnräume und Anlagen
- Durchführung der Abnahme-/Qualifizierungsmessungen
- Durchführung der Inbetriebnahme oder Qualitätssicherung bei komplexen Anlagen
- Integrale Reinraum- und Energiekonzepte für Um- und Neubauten
- Optimierung von Barriersystemen (Isolatoren, RABS, usw.)
- Schwachstellenanalysen und Optimierung bestehender Anlagen hinsichtlich MSR-Technik, Luftführung, Energieverbrauch, Betriebssicherheit und Hygiene
- Entwicklung und Optimierung von Reinraumkomponenten mit Prüfung der Reinraumtauglichkeit und Strömungsoptimierung von Komponenten, Maschinen und reinen Bereichen
- Controlling für Planungs- und Bauleistungen
- Betreiberschulungen