

Bedarfsgerechte Regelung

Energiekostenreduzierung bei der Klimatisierung von Produktionshallen

Die Auswahl von Luftauslässen für Industriebauhallen erfolgt bisher häufig unter rein planerischen Gesichtspunkten. Hier stehen Luftführung, Platzbedarf, Leistungsanforderungen oder Investitionskosten, um nur einige zu nennen, im Vordergrund. Zudem wird sehr häufig mit verallgemeinerten Aussagen über das „günstigste“ Lüftungssystem für Industriebauhallen gearbeitet.

Die anfallenden Betriebskosten werden dabei insofern vernachlässigt, dass im konkreten Einzelfall keine detaillierten Systemvergleiche mit einer ausreichend genauen Berechnung des Energiebedarfs durchgeführt werden. Zur zuverlässigen Bestimmung des Jahresenergiebedarfs und zur Ausschöpfung der vorhandenen z. T. erheblichen Energieeinsparpotentiale sind auf Grund der Komplexität dynamische Gebäude- und Anlagensimulationen notwendig. Diese müssen für den jeweiligen Einzelfall mit konkreten Randbedingungen durchgeführt werden. Im Rahmen dieses Artikels soll mittels der dynamischen Gebäude- und Anlagensimulation beispielhaft für die Belüftung von Industriebauhallen gezeigt werden, welche Ein-

sparpotentiale sich durch eine bedarfsgerechte Parametrierung der Regelung von Lüftungsanlagen ergeben. Aufgrund der Komplexität wird im Rahmen dieses Vortrags nur der Heizenergiebedarf betrachtet. Auf strömungstechnische Fragestellungen sowie die Betrachtung des Kühlfalls wird bewusst verzichtet.

Die dynamische Gebäudesimulation als Analysetool

Mit Hilfe der dynamischen Gebäudesimulation wird der Ist-Zustand aller Energieströme einer Liegenschaft detailliert abgebildet. Im Allgemeinen wird dabei zunächst die Geometrie des untersuchten Gebäudes mit allen relevanten bauphysikalischen Daten in ein Simulationsprogramm eingegeben. Es wird ein dreidimensionales Modell des Gebäudes erstellt, sodass auch Eigenverschattungen und Fremdverschattungen durch Randbebauungen berücksichtigt werden können. In Abhängigkeit von der Nutzung erfolgt dann eine Zonierung des Gebäudes, wobei für jede Zone separat Randbedingungen definiert werden und die

Wechselwirkungen zwischen den Zonen beschrieben werden.

Für das erstellte Gebäudemodell einer bestehenden Produktionshalle plus deren Erweiterung werden unter Berücksichtigung von stündlichen Wetterdaten, dem zu Grunde liegenden Arbeitszeitmodell mit den entsprechenden inneren Wärmelasten sowie der Regelungsstrategie, den Leistungen aller Komponenten und dem Teillastverhalten der technischen Gebäudeausrüstung Energiebilanzen für jede Stunde des Jahres errechnet und aufsummiert. Das Ergebnis ist der zeitliche Verlauf sämtlicher Energieströme über ein Jahr.

In vielen Anwendungsfällen, insbesondere bei Produktionshallen, kommt den inneren Wärmelasten eine besondere Bedeutung zu. In Bild 1 ist daher beispielhaft für die bereits bestehende Halle der Strombedarf für Geräte, Beleuchtung und die Ventilatoren an einem typischen Wochentag dargestellt, aus dem dann die inneren Wärmelasten ermittelt werden können. Hierzu ist insbesondere zu prüfen, welcher Anteil des Strombedarfs der Ventilatoren in den betrachteten Zonen als innere Wärmelast wirksam wird. Darüber hinaus ist im Einzelfall zu prüfen, ob prozessbedingte Wärmelasten, die nicht durch die Umwandlung des Strombedarfs verursacht werden, in dem Modell zu berücksichtigen sind.

Die Validierung des Modells erfolgt sowohl anhand von monatlichen als auch von stündlichen Messwerten für verschiedene Medien. In Bild 2 ist beispielhaft der Vergleich mit Monatsverbrauchswerten für den Heizwärmeverbrauch dargestellt. Die darin dargestellte Witterungsbereinigung der gemessenen Verbrauchsdaten erfolgte mit dem Gradtagzahlverfahren nach VDI 2067 [1]. Für die Abweichungen, die in Bild 2 zwischen den Simulationsergebnissen und dem witterungsbereinigten Verbrauch zu erkennen sind, ergeben sich eine Reihe

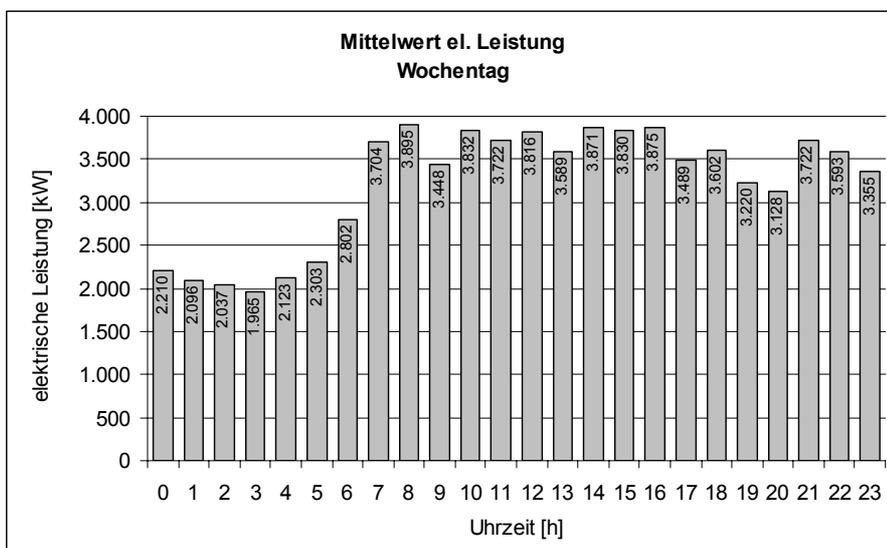


Bild 1: Ermittlung der inneren Wärmelasten aus dem Strombedarf

von Erklärungsansätzen. So ist beispielsweise das Nutzerverhalten beim Öffnen der Tore und Dachsheds nur unzureichend bekannt. Darüber hinaus sind verschiedene der insgesamt 22 Lüftungsanlagen in diesem Gebäudekomplex auf Wunsch der Nutzer temporär mit geänderten Regelungsparametern betrieben worden, die nur unvollständig dokumentiert wurden.

Insgesamt ergibt sich für dieses sehr komplexe Gebäudemodell eine ausreichende Genauigkeit für die weiteren Betrachtungen, da die erarbeiteten Verbesserungsvorschläge immer in Relation zum Gesamtmodell betrachtet werden und damit der prozentuale Fehler sehr klein wird. Somit kann nach erfolgter Validierung des Simulationsmodells der abgebildete Ist-Zustand durch sehr verschiedene Betrachtungsweisen analysiert werden.

Da die Erweiterung mit gleichen Produktionsanlagen ausgestattet wird wie der Bestand, ist es zudem zulässig, die erfolgte Validierung des Bestandsmodells auf das Simulationsmodell der Erweiterung zu übertragen. In Bild 3 sind daher beispielhaft für die Erweiterung die ermittelten stündlichen Raumluftzustände für ein ganzes Jahr innerhalb der Betriebszeit dargestellt. Die dazugehörigen Randbedingungen sind in Tabelle I aufgelistet. Die einzelnen Betriebszustände in Bild 3 sind in Punktform aufgeführt. Darüber hinaus ist das Behaglichkeitskennfeld nach DIN 1946 [2] farbig hinterlegt. Aus dieser Darstellung kann beispielsweise abgelesen werden, dass spätestens ab einer Außenlufttemperatur von etwa 12 °C kein Heizwärmebedarf mehr gegeben ist.

In Bild 4 ist darüber hinaus die Bilanz der Wärmeströme für die Erweiterung der betrachteten Produktionshalle für einen Zeitpunkt im Winter bei einer Außenlufttemperatur von etwa -9°C dargestellt. Aus dieser Bilanz geht hervor, dass der Transmissionswärmebedarf und der Lüftungswärmebedarf für die Infiltration vollständig durch die inneren Wärmelasten gedeckt werden. Die solaren Gewinne tragen mit ca. 1 % nur äußerst geringfügig zur Deckung der gesamten Wärmeverluste bei. Der gesamte Heizwärmebedarf der Halle resultiert demnach nur aus der Vorwärmung der Außenluft auf die gewünschte Zulufttemperatur.

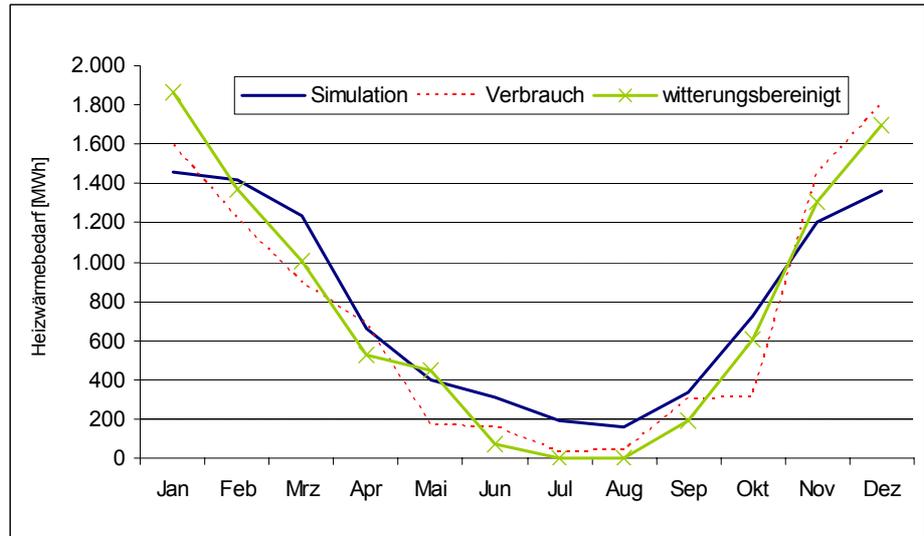


Bild 2: Vergleich der Simulation mit Messwerten

Aufzeigen von Einsparpotentialen mittels Simulation

Es wurde eben ansatzweise gezeigt, welche Analysemöglichkeiten durch die Erstellung von Simulationsmodellen für den Energiebedarf einer Industriehalle gegeben sind. Auf der Basis dieser Analysen ist es nun möglich, zielgerichtete Verbesserungsvorschläge zu erarbeiten und zu quantifizieren.

Im Weiteren sollen beispielhaft die Möglichkeiten diskutiert werden, die sich durch eine bedarfsgerechte Parametrierung der Zulufttemperatur ergeben. In Bild 5 ist die Zulufttemperaturregelung für den definierten Basisfall der Erweiterung, dessen Ergebnisse eben vorgestellt wurden, schematisch dargestellt. Dieser Basisfall entspricht dem Planungsstand, nachdem die Erweiterung errichtet wurde.

Die durchgezogene Linie stellt darin die Zulufttemperaturregelung für die angenommene Lüftung dar. Die maximale Zulufttemperatur T_1 von 26 °C wird demnach bei Erreichen einer unteren Raumlufttemperaturgrenze T_3 von 19 °C innerhalb eines Temperaturbandes von 1 K (bis T_4) auf die untere Zulufttemperaturgrenze T_2 von 20 °C abgesenkt. Wie bereits gezeigt wurde, passiert das im konkreten Fall durch die hohen inneren Wärmelasten bereits oberhalb einer Außenlufttemperatur von etwa -9 °C. Es stellt sich nun die Frage, welchen Einfluss die Größen T_1 bis T_4 auf den Jahresheizenergiebedarf haben. Mittels einer Sensitivitätsanalyse werden die möglichen Einsparpotentiale aufgezeigt. Die dazugehörigen Randbedingungen für diese durchgeführten Sensitivitätsanalysen sind in Tabelle I aufgelistet.

- 2-Schicht Betrieb an Wochentagen (8 - 22 Uhr)
- I-Schicht Betrieb an Samstagen (8 - 14 Uhr)
- Kein Betrieb an Sonntagen
- Innere Wärmelasten 46 W/m²
- Außerhalb der Produktionszeit: Innere Wärmelasten jeweils ca. 60 %
- Beheizung vollständig über Lüftungsanlage
- Nachtabsenkung auf 17 °C Raumlufttemperatur
- Wärmerückgewinnung mit einem Rückgewinnungsfaktor von 60 %
- Lieferrate: 16,2 m³/(h m²) entspricht 560000 m³/h
- Druckverlust 750 Pa (Zuluft) und 600 Pa (Abluft)

Tabelle I: Randbedingungen für die Simulation

Klimatisierung von Produktionshallen

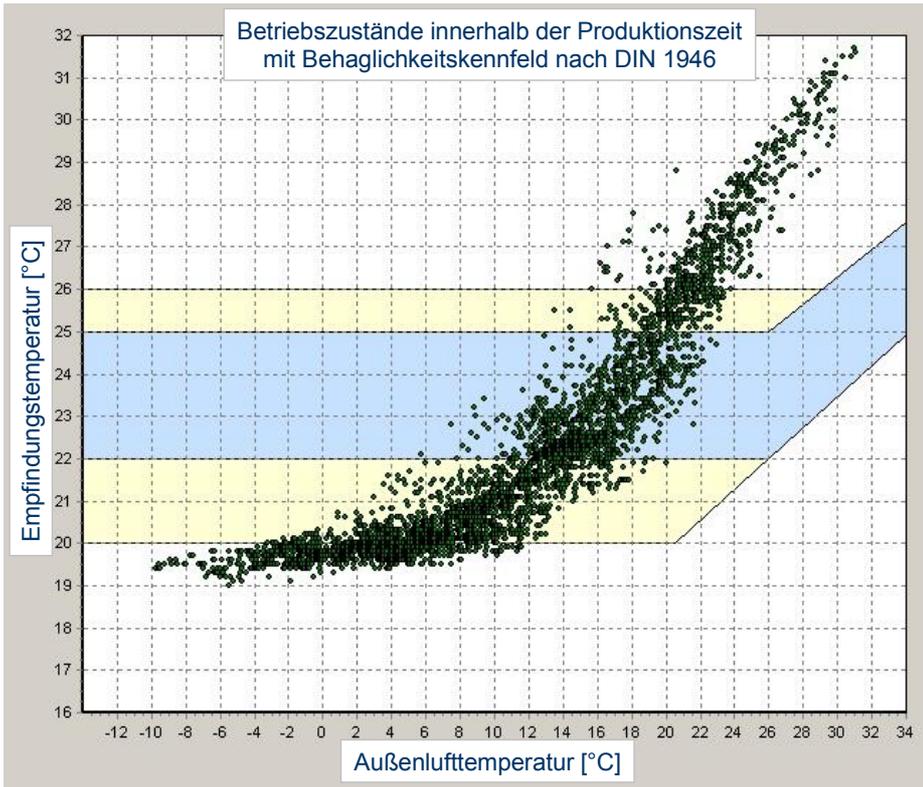


Bild 3: Betriebszustände innerhalb der Produktionszeit mit Behaglichkeitskennfeld nach DIN 1946

Zunächst wird der Einfluss der Größen T3 und T4 untersucht. Die maximale Zulufttemperatur beträgt dabei jeweils 26 °C und die minimale Zulufttemperatur ist mit 20 °C in allen Fällen konstant gehalten worden. In Bild 6 ist für verschiedene innere Wärmelasten dargestellt, welchen Einfluss die Größen T3 und T4 haben. Die Einsparungen beziehen sich dabei auf die Ausgangsbasis mit einer Temperatur T3 von 19 °C und einer Temperatur T4 von 20 °C.

Es wird deutlich, dass nur bei geringen inneren Wärmelasten überhaupt ein nennenswertes Einsparpotential von ca. 5 bis 6 % durch Absenken der Raumlufttemperaturgrenzen gegeben ist. Dieser Umstand ist dadurch zu begründen, dass sich bei niedrigeren inneren Wärmelasten die Anzahl der Betriebsstunden erhöht, an denen eine Temperaturerhöhung der Zuluft zur Deckung der Wärmeverluste erforderlich ist. Bei höheren inneren Wärmelasten ist

die Außenlufttemperaturgrenze, bei der eine Übertemperatur der Zuluft erforderlich wird, so gering, dass es nur wenige Stunden im Jahr betrifft (bei 30 W/m² beispielsweise für den Bestand nur die Stunden unterhalb von -5 °C).

Aus dem gleichen Grund ist der Einfluss der Größe TI auf den Jahresheizwärmebedarf völlig untergeordnet. Die Wahl dieses Parameters kann uneingeschränkt aus einer Leistungsbilanz der erforderlichen Heizleistung und den strömungstechnischen Randbedingungen ermittelt werden. Im Folgenden wird nun der Einfluss der unteren Zulufttemperatur T2 auf den Jahresheizwärmebedarf untersucht. Die Raumlufttemperaturgrenzen liegen bei 19/20 °C und die maximale Zulufttemperatur beträgt 26 °C.

Die Ergebnisse gemäß Bild 7 machen deutlich, dass der Einfluss der Größe T2 auf den Jahresheizwärmebedarf erheblich ist. In Abhängigkeit von den inneren Wärmelasten ergeben sich Einsparungen in Höhe von ca. 10 bis 50 %.

Mit den erzielten Ergebnissen wird im Folgenden für den Bereich der Erweiterung der Produktionshalle die Zulufttemperaturregelung optimiert.

Im vorliegenden Fall ergibt sich durch die Tatsache, dass ab einer Außenlufttemperatur von etwa 12 °C keine Heizwärme mehr benötigt wird, ein konkreter Vorschlag für die Optimierung der Zulufttemperaturregelung. In Bild 8 ist die bisherige Zulufttemperaturregelung sowie der Verbesserungsvorschlag (gestrichelt) dargestellt. Bei einer Absenkung der unteren Zulufttemperaturgrenze von 20 °C um 6 K auf 14 °C gemäß Bild 8 ergibt sich im konkreten Fall mit sehr hohen inneren Wärmelasten von ca. 46 W/m² ein Einsparpotential in Höhe von ca. 1175 MWh für den Jahresheizwärmebedarf, was ca. 59 % ausmacht. Dieses Potential gilt unter den getroffenen Annahmen, die u. a. ein Wärmerückgewinnungssystem in der Lüftung mit einem Temperaturwirkungsgrad von 60 % beinhalten. Ein solches Wärmerückgewinnungssystem führt dazu, dass die Eintrittstemperatur in das Heizregister im Mittel über die Heizperiode zwischen 8 und 10 °C liegt. Dadurch halbiert sich bei einer unteren Zulufttemperatur von 14 °C die notwendige

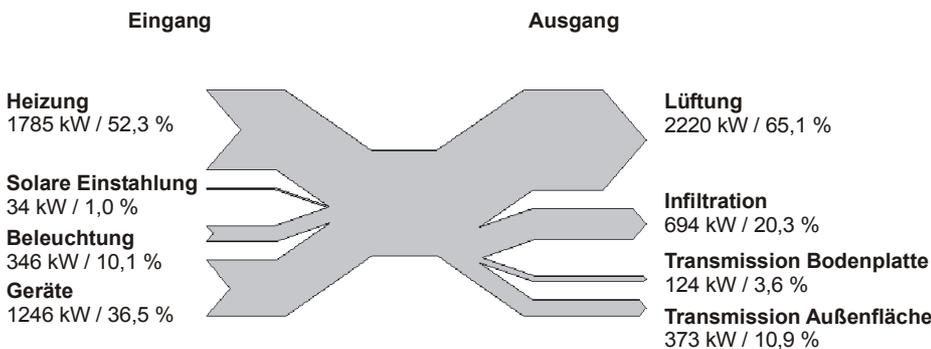


Bild 4: Bilanz der Wärmeströme für eine Außenlufttemperatur von -9 °C

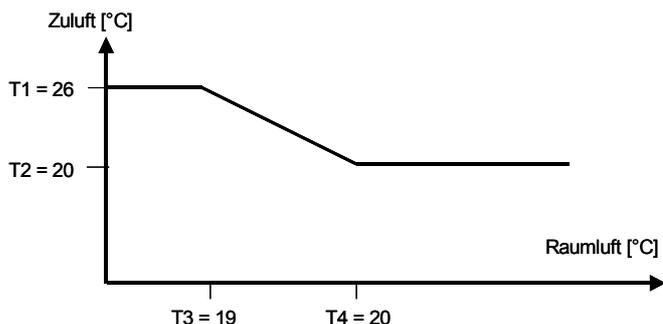


Bild 5: Regelung der Zulufttemperatur

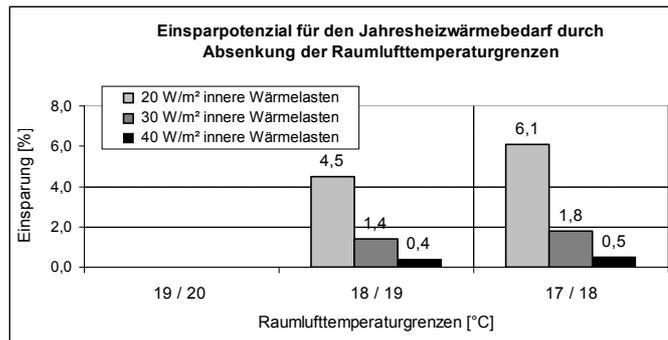


Bild 6: Einfluss der Größen T3 und T4

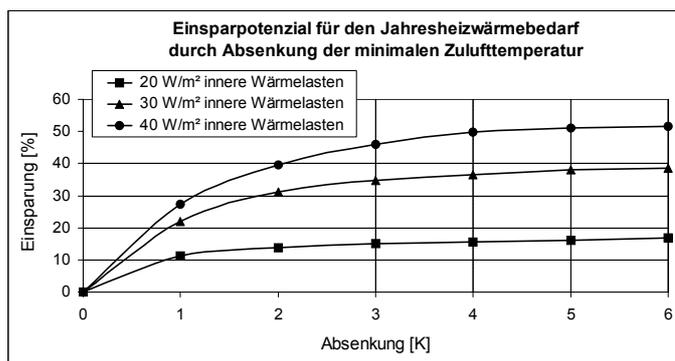


Bild 7: Einfluss der Größe T2

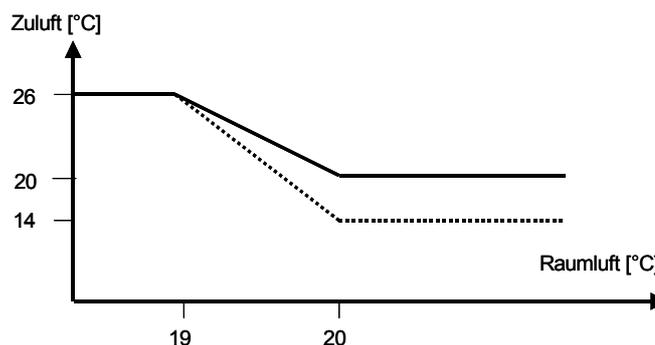


Bild 8: Optimierung der Zulufttemperaturregelung

Heizleistung zur Erwärmung der Zuluft gegenüber dem Basisfall mit einer unteren Zulufttemperatur von 20 °C.

Zusammenfassung

Durch eine bedarfsgerechte Parametrierung der Regelung von Lüftungsanlagen ergeben sich große Einsparpotentiale. Zum Ausschöpfen dieser Einsparpotentiale ist jedoch eine dynamische Gebäude- und Anlagensimulation für jedes Einzelobjekt notwendig.

Die Untersuchungen haben ergeben, dass bei einem Mischluftsystem die minimale Zulufttemperatur die entscheidende Größe der Regelkaskade für den Jahresheizwärmebedarf ist. Durch Absenkung dieser Temperatur von 20 auf 14 °C ist je nach Höhe der inneren Wärmelasten ein Einsparpotential von etwa 15 bis 60 % gegeben. Der Einfluss der alleinigen Absenkung der Raumlufttemperaturen liegt dagegen deutlich unter 10 %. Diese Ergebnisse belegen, dass der bisher wenig beachteten Größe der unteren Zulufttemperaturgrenze ein wesentlich höherer Stellenwert zukommen sollte.

An einem konkreten Beispiel einer Produktionshalle mit sehr hohen inneren Wärmelasten von ca. 46 W/m² konnten durch eine bedarfsgerechte Parametrierung der Regelung der Lüftungsanlagen Einsparpotentiale beim Jahresheizwärmebedarf in Höhe von ca. 59 % realisiert werden. Für die Umsetzung ist je SPS lediglich eine geänderte Parametrierung notwendig, wodurch sich sehr geringe Investitionskosten ergeben.

Michael Zens, Dr. Stella Schraps,

perpendo Energie- und Verfahrenstechnik GmbH
52068 Aachen

Literatur

- [1] N. N.: VDI 2067, Blatt I (Entwurf), Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen, Grundlagen und Kostenberechnung. Verein Deutscher Ingenieure, Februar 1999.
- [2] N.N.: DIN 1946, Teil 2, Raumlufttechnik, Gesundheitstechnische Anforderungen. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, 1994.