

Vergleichswerte des Energieverbrauchs von Laborgebäuden der chemisch- pharmazeutischen Industrie

Studie des Arbeitskreises Gebäudekostenbenchmarking
der chemisch-pharmazeutischen Industrie

Prof. Dr. Fritz Runge
Dipl.-Ing. Frank Emmrich



Die Studie wurde erarbeitet unter Mitwirkung aller ständigen Mitglieder des Arbeitskreises.
An der diskursiven Entwicklung und Umsetzung des Analysekonzeptes zur Ermittlung
der Energieverbrauchs-Vergleichswerte wirkten vor allem mit:

Dipl.-Ing. Frank Emmrich, BAUAKADEMIE
Dipl.-Kfm. Frank Hattenbauer, Bayer Schering Pharma AG
Dr. Dietmar Kohn, Boehringer Ingelheim Pharma GmbH & Co. KG
Dipl.-Ing. Jochen Kranz, Currenta GmbH & Co. OHG
Dipl.-Wirt.-Ing. Ingmar Neuber, Infracerv GmbH & Co. Höchst KG
Dipl.-Ing. Jörg Petri, Bayer Schering Pharma AG
Prof. Dr. Fritz Runge, BAUAKADEMIE

Juni 2008

Inhalt

1	Der Arbeitskreis	3
2	Hintergrund der Untersuchungen	4
3	Energetische Besonderheiten von Laborgebäuden	6
4	Untersuchungsgegenstand und Grundlagen der Kennzahlenbildung	8
4.1	Untersuchungsgegenstand	8
4.2	Verbrauchswerte	8
4.3	Bezugsgrößen	9
4.4	Bildung merkmals homogener Gruppen	12
5	Darstellung und Kommentierung der Ergebnisse	14
5.1	Ergebnisse ohne Clusterung der Datenbasis	14
5.1.1	Vergleichswert Gesamtenergie für alle Gebäude	14
5.1.2	Vergleichswert Gesamtenergie für Gebäude mit hoher Gesamtluftwechselrate	15
5.2	Ergebnisse mit Clusterung der Datenbasis	16
5.2.1	Clusterung der Gebäude nach Gebäudegröße – Bezugsgröße NGF	16
5.2.2	Clusterung der Gebäude nach Gebäudegröße – Bezugsgröße Abluftmenge	17
5.2.3	Clusterung der Gebäude nach Volllast-Verrechnungstunden – Bezugsgröße NGF	18
5.2.4	Clusterung der Gebäude nach Volllast-Verrechnungstunden – Bezugsgröße Abluftmenge	19
5.2.5	Clusterung der Gebäude nach Wärmerückgewinnung – Bezugsgröße NGF	20
5.2.6	Clusterung der Gebäude nach Wärmerückgewinnung – Bezugsgröße Abluftmenge	21
5.2.7	Clusterung der Gebäude nach Luftwechselrate LWR – Bezugsgröße NGF	22
5.2.8	Clusterung der Gebäude nach Luftwechselrate LWR – Bezugsgröße Abluftmenge	23
5.2.9	Clusterung der Gebäude nach Luftwechselrate LWR – Gesamtenergie	24
5.2.10	Clusterung der Gebäude nach NGF – Gesamtenergie	25
5.2.11	Clusterung der Gebäude nach LWR_{max} , Bezugsgröße max. Abluftmenge– Gesamtenergie	26
5.2.12	Tabellarische Zusammenfassung der Untersuchungen zu den möglichen Clustern	27
6	Schlussfolgerungen aus den Auswertungsergebnissen	28
6.1	Grundsätzliches	28
6.2	Bildung von Clustern	28
6.3	Abluft als zusätzliche Bezugsgröße	28
6.4	Ermitteln der Koeffizienten	30
7	Bestimmen der Vergleichswerte	33
8	Beispiel zur Berechnung der Vergleichswerte für ein Laborgebäude	34
9	Anhang: Mitglieder des Arbeitskreises	35

1 Der Arbeitskreis

Die nachfolgend dargestellten Untersuchungsergebnisse sind im Rahmen der mehrjährigen Tätigkeit des Arbeitskreises „Gebäudekostenbenchmarking - Chemie & Life Science“ entstanden.

In diesem Arbeitskreis haben sich 22 Experten für Planung, Betrieb und Bewirtschaftung von Laborgebäuden in der Bundesrepublik Deutschland aus insgesamt zwölf Unternehmen der chemisch-pharmazeutischen Industrie auf freiwilliger Basis zusammengeschlossen. Der Arbeitskreis ist ein geschlossener Benchmarking-Kreis mit anonymisierter Datenhaltung und -analyse. Mit der neutralen Moderation, wissenschaftlichen Begleitung und organisatorischen Unterstützung sowie der Datenaufbereitung und -analyse ist die BAUAKADEMIE Gesellschaft für Forschung, Entwicklung und Bildung mbH betraut. Sie stellt auch die IT-Tools für die Dateneingabe und -auswertung bereit.

Die turnusmäßigen Arbeitstreffen finden in halbjährlichen Abständen statt. Zur vertiefenden Diskussion der Analyseergebnisse und zur Identifizierung von Best-Practices führt der Arbeitskreis darüber hinaus seit 2004 jährlich zwei weitere Workshops zu Schwerpunktthemen des Gebäudebetriebes in der chemisch-pharmazeutischen Industrie durch.

Neben der Erörterung und Interpretation der Datenanalysen dienen die Workshops vor allem dem Abgleich der methodischen Herangehensweise bei der Datenerhebung sowie der kontinuierlichen Verbesserung von Methodik und IT-Tools. Im Ergebnis dieser mehrjährigen Zusammenarbeit der Experten aus den zwölf Unternehmen ist ein weitgehend ausgereiftes System für die Analyse und den Vergleich der Bewirtschaftungseffizienz von Büro- und Laborgebäuden der chemisch-pharmazeutischen Industrie entstanden.

Wegen der Sensibilität der Unternehmensdaten unterliegen die Analyseergebnisse der strengen Vertraulichkeit. Die Mitglieder des Arbeitskreises entscheiden auf Konsensbasis fallweise, für welchen Zweck und in welchem Umfang die internen vertraulichen Daten an Dritte weitergegeben werden können. Aus eigenem Interesse legt der Arbeitskreis großen Wert auf möglichst vollständige und korrekte Datenermittlung und -auswertung.

Ein besonderes Interesse der Vertreter der teilnehmenden Unternehmen gilt der Betrachtung und Verbesserung der Energieeffizienz von Laborgebäuden. Deshalb war diese Thematik bereits Gegenstand mehrerer Best-Practice-Workshops.

Darüber hinaus ist seit Oktober 2007 eine Unterarbeitsgruppe des Arbeitskreises mit der Ermittlung von Vergleichswerten für den Energieverbrauch von Laborgebäuden befasst. Die Arbeit dieser Gruppe geht zurück auf eine Anregung der ARGE Benchmark, die vom Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) mit der Erhebung von Energieverbrauchswerten für Nichtwohngebäude beauftragt ist. Mit der ARGE Benchmark ist vereinbart, dass der Arbeitskreis „Gebäudekostenbenchmarking - Chemie & Life Science“ die im Rahmen des Arbeitskreises ermittelten Energieverbrauchswerte zur Verfügung stellt. Der Arbeitskreis ist vom Verband der Chemischen Industrie e.V. (VCI) autorisiert, die Ergebnisse der Untersuchungen dem Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung zur Entscheidung über ihre Aufnahme in die Liste der Vergleichswerte für die Gebäudekategorie Laborgebäude zu überlassen.

2 Hintergrund der Untersuchungen

Mit der Energieeinsparverordnung EnEV 2007 ist, neben anderen auf die Verbesserung der Energieeffizienz von Gebäuden gerichteten Erweiterungen, das Ausstellen von Energieausweisen neu geregelt. Energieausweise sind unter den in der Verordnung genannten Bedingungen nunmehr auch für Nichtwohngebäude und für bestehende Gebäude und Anlagen auszustellen. Die Ausstellung der Energieausweise kann entweder auf der Grundlage

- des Energiebedarfes oder
- des Energieverbrauchs

erfolgen.

In der vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) ergänzend zur EnEV herausgegebenen „Bekanntmachung der Regeln für Energieverbrauchskennwerte und der Vergleichswerte im Nichtwohngebäudebestand“ vom 26. Juli 2007 ist geregelt, dass der Energieverbrauch für Heizung, Warmwasserbereitung, Kühlung, Lüftung und eingebaute Beleuchtung zu ermitteln und in Kilowattstunden pro Jahr und Quadratmeter Nettogrundfläche anzugeben ist.

Der Verbrauch ist auf einen Heizenergieverbrauchs- und einen Stromverbrauchskennwert aufzuteilen. Dabei soll der Heizenergieverbrauchskennwert den witterungsbereinigten Energieverbrauchsanteil für Heizung (auch dann, wenn dafür als Energieträger Strom eingesetzt wird) sowie ggf. den Energieverbrauchsanteil für zentrale Wasserbereitung bei verbundenen Anlagen umfassen. Der Stromverbrauchskennwert soll mindestens die Stromverbrauchsanteile für Kühlung, Lüftung, eingebaute Beleuchtung und elektrische Hilfsenergie für Heizung und zentrale Wasserbereitung enthalten.

Der Verbrauchsermittlung sind nach o.g. Bekanntmachung mindestens die drei vorhergehenden Kalender- oder Abrechnungsjahre zugrunde zu legen.

Die EnEV sieht weiterhin vor, dass die zur Ausstellung von Energieausweisen für ein Gebäude ermittelten *Energieverbrauchskennwerte* den vom BMVBS bekannt gemachten *Vergleichswerten* gegenübergestellt werden. Des Weiteren ist in der EnEV geregelt, dass die Vergleichswerte nach der Nutzung differenziert werden. Der für ein Gebäude ermittelte Energieverbrauchskennwert ist dann dem zu seiner Nutzung passenden Vergleichswert zuzuordnen.

Die o.g. Bekanntmachung des BMVBS enthält eine Anlage, in der Vergleichswerte für 80 Gebäudekategorien gemäß Bauwerkszuordnungskatalog (BWZK) der Arbeitsgemeinschaft der für Städtebau, Bau- und Wohnungswesen zuständigen Minister und Senatoren der Länder (ARGEBAU) ausgewiesen sind. Eine weitere Anlage enthält Vergleichswerte für weitere 36 Gebäudenutzungsarten, die nicht nach dem BWZK kategorisiert sind.

Als Beispiele für die in den beiden oben genannten Listen ausgewiesenen Vergleichswerte seien in der folgenden Tabelle Maximal-, Minimal- und Mittelwerte für Heizung und Warmwasser, Strom und die Gesamtwerte für einige Gebäudekategorien angegeben:

	Heizung und WW [kWh/m ² _{NGF} a]	Gebäudekategorie
Niedrigster Vergleichswert	85	Kaufhäuser, Warenhäuser, Einkaufszentren über 2000 m ²
Höchster Vergleichswert	1100	Gebäude für Freibadeanlagen einschl. Außenanlagen
Mittelwert	180	

	Strom [kWh/m ² _{NGF} a]	Gebäudekategorie
Niedrigster Vergleichswert	15	Schulen, THW-Höfe
Höchster Vergleichswert	410	Handel Food bis 2000 m ²
Mittelwert	75	

	Heizung + Strom [kWh/m ² _{NGF} a]	Gebäudekategorie
Niedrigster Vergleichswert	110	THW-Höfe
Höchster Vergleichswert	1380	Gebäude für Freibadeanlagen einschl. Außenanlagen
Mittelwert	255	

Tabelle 1: Vergleichswerte für Heizung/Warmwasser, Strom und Gesamtwerte nach „Bekanntmachung der Regeln für Energieverbrauchskennwerte und der Vergleichswerte im Nichtwohngebäudebestand“ vom 26. Juli 2007

Hervorzuheben ist, dass in der „Bekanntmachung der Regeln für Energieverbrauchskennwerte und der Vergleichswerte im Nichtwohngebäudebestand“ die Nutzungsart Labor nicht ausgewiesen ist. Deshalb können der Bekanntmachung z. Z. auch keine Vergleichswerte für Laborgebäude entnommen werden.

Da Laborgebäude bekanntlich zu den Gebäuden mit in der Regel aufgabenbedingt hohem Energieverbrauch zu zählen sind, ist für die Betreiber von Laborgebäuden die Ermittlung von spezifischen Vergleichswerten für diese Gebäudekategorie von großem Interesse.

3 Energetische Besonderheiten von Laborgebäuden

Durch die in chemisch-pharmazeutischen Laboren durchzuführenden Arbeiten besteht für die dort Beschäftigten i.A. ein hohes Gefährdungspotential, unter anderem durch in die Luft freisetzbare toxische Substanzen. Zur Vermeidung von Personengefährdungen ist es daher erforderlich, eine Reihe lüftungstechnischer Sicherheitsmaßnahmen in Laboratorien zu treffen. So ist z. B. in den Laborbereichen zur Vermeidung der Akkumulation von unerkannten (geringen) Freisetzungen ein Luftwechsel erforderlich, der gemäß Laborrichtlinien¹ in Laboren für Forschungseinrichtungen mindestens 25 m³/m²/h betragen soll.

Daraus ergibt sich, dass die Lüftungstechnik für Labore in der Regel so ausgelegt und betrieben werden muss, dass sich bei einer effektiven Raumhöhe von ca. 3 m mindestens acht Luftwechsel pro Stunde einstellen können.



Bild 1: Laborraum mit typischen Be- und Entlüftungssystemen

In den chemisch-pharmazeutischen Laboren beträgt die tatsächliche Luftwechselrate häufig ein Vielfaches von acht, weil neben den allgemeinen Raumlüftungsanforderungen auch die (Abluft-)Anforderungen der vielen (aus Gründen der Sicherheit) notwendigen ablufttechnischen Einrichtungen in einem Labor zu berücksichtigen sind.

¹ BGR 120 / TRGS526

Dazu zählen u. a. Laborabzüge, Sicherheitswerkbänke, abgesaugte Arbeitsplätze, Gefahrstoffschränke, etc., deren aufsummierter Abluftbedarf pro Labor zu einem deutlich höheren Luftwechsel führen kann.

Neben den sicherheitstechnisch erforderlichen Lüftungsanforderungen können weitere Anforderungen zu erhöhtem Abluftbedarf führen – etwa die Abfuhr thermischer Lasten z.B. der



Bild 2: Blick in die Gebäudetechnikzentrale eines Laborgebäudes

elektrischen Verlustleistung großer Analysegeräte.

Daraus folgt, dass der energetische Aufwand für die Be- und Entlüftung von Laborgebäuden wesentlich höher sein muss, als dies bei Wohn- oder Bürogebäuden im Allgemeinen der Fall ist. Bei Laborgebäuden treten deshalb

i.A. wesentlich höhere Energieverbrauchswerte auf, welche weniger gebäude- als vielmehr nutzungsinduziert sind. In der chemisch-pharmazeutischen Industrie werden Laborgebäude betrieben, bei denen die von den Be- und Entlüftungssystemen verursachten Verbrauchswerte 80 bis 90 Prozent des Gesamtenergieverbrauches des Gebäudes ausmachen.

Mit der EnEV 2007 und der darin festgelegten Ausstellung von Energieausweisen wird das Ziel verfolgt, Energieeinsparpotentiale zu erkennen und erforderlichenfalls Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz



Bild 3: Arbeitssicherheit im Labor bestimmt den Betrieb der Lüftungsanlage

von Gebäuden abzuleiten. Wegen des hohen Anteils des für die Be- und Entlüftung erforderlichen Energieverbrauchs ist offenkundig, dass sich Energieeinsparmaßnahmen bei Laboren zuallererst auf die Lüftungsanlage beziehen müssen. Mit den sonst bei Wohn- und Bürogebäuden üblichen Maßnahmen wie etwa Fassadendämmung kann bei Laborgebäuden nur eine relativ geringe Wirkung erzielt werden. Auch ist der Einsatz von Umluftsystemen in Laboren gewöhnlich aus Sicherheitsgründen ausgeschlossen. Die Maßnahmen zur Erhöhung der Energieeffizienz von Laborgebäuden sind deshalb vor allem auf die Lüftungssys-

teme zu konzentrieren. Derartige Maßnahmen können sich sowohl auf die anforderungsadäquate Auslegung und Dimensionierung als auch auf die Betriebsführung der Lüftungsanlage beziehen².

Die Kennzahlen der Be- und Entlüftung in Laboren sind die entscheidenden Führungsgrößen, um die Ausgewogenheit zwischen Laborsicherheit und Energieeffizienz zu sichern. Dabei muss berücksichtigt werden, dass die Art der Betriebsführung der Lüftungsanlage eines Laborgebäudes stets aus den Anforderungen der Arbeits- und Laborprozesssicherheit abzuleiten ist. Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz, die sich auf die Betriebsführung einer vorhandenen Lüftungsanlage eines Laborgebäudes beziehen, sind deshalb nur in Verbindung mit exakten Gefährdungsanalysen für die in den Laboren auszuführenden Arbeiten möglich.

4 Untersuchungsgegenstand und Grundlagen der Kennzahlenbildung

4.1 Untersuchungsgegenstand

Die Erfassung der hier ausgewerteten Gebäude- und Verbrauchsdaten erfolgte im Rahmen des Benchmarking-Jahreszyklus 2007 unter zusätzlicher Einbeziehung der für die Untersuchungen relevanten Daten der beiden Vorjahre 2005 und 2006. In das gesamte Benchmarking des Arbeitskreises einbezogen sind gegenwärtig ca. 200 Gebäude, wovon etwa die Hälfte für industrielle Laborzwecke genutzt werden. In die Untersuchungen zur Ermittlung von Vergleichswerten des Energieverbrauchs wurden 85 Laborgebäude einbezogen. Alle betrachteten Gebäude verfügen über einen Laborflächenanteil von mehr als 30% (Laborfläche/(Bürofläche+Laborfläche)). Als Laborfläche wurde dabei die Summe der Flächenarten NF3.3, NF3.4, NF3.5 und NF3.6 gemäß DIN 277 herangezogen.

4.2 Verbrauchswerte

Nach EnEV 2007 sind die Energieverbrauchskennwerte getrennt für den Heizenergieverbrauch und für Strom zu erfassen. Wird elektrisch geheizt, ist der dafür notwendige Strom nicht dem Stromverbrauchskennwert zuzurechnen, sondern dem Heizenergiekennwert. Dem Stromverbrauchskennwert zuzurechnen ist nach EnEV 2007 der Energieverbrauch der Lüftung, Kühlung und Beleuchtung sowie der Hilfsenergie für Heizung, Warmwasserbereitung und für elektrische Ergänzungsheizungen in RLT-Anlagen.

² Unabhängig davon können nutzungsbedingte Maßnahmen zur Senkung des Luftaustauschbedarfes ebenfalls zur Senkung des Energieverbrauches beitragen. Diese Maßnahmen zur energetischen Bedarfsoptimierung beziehen sich jedoch auf die Labornutzungsprozesse selbst und sind nicht der energetischen Gebäudesanierung zuzuordnen.

Die mit der EnEV 2007 vorgegebene Einteilung in Verbrauchskennwerte für Heizung und Strom ist in Bezug auf die Lüftung in Laborgebäuden nicht ohne Weiteres möglich, da insbesondere die Lüftungsanlage gewöhnlich nicht nur die Be- und Entlüftung, sondern meist auch die Raumheizung übernimmt. Zur Zuluftaufbereitung für Labore gehören weiterhin Kühlung und Befeuchtung. Die damit verbundene relativ hohe Aufbereitungsintensität der Zuluft ist nicht allein aus Komfortgründen erforderlich, sondern dient der Prozesssicherheit, wie z.B. dem Produktschutz, der Lagerstabilität etc.

Bei der Ermittlung des Energieanteils für die Kälteversorgung ist zu beachten, dass diese in den Unternehmen teilweise durch dezentral installierte Kompressionskältemaschinen und teilweise mit Fernkälte erfolgt. Um für den letzteren Fall Konformität mit der EnEV herzustellen, wurde für die Ermittlung der Vergleichswerte die Kälteenergie mit einem mittleren COP-Wert³ von 2,5 in Elektroenergie umgerechnet.

Die Werte für den Energieverbrauch sind gemäß EnEV 2007 in Kilowattstunden angegeben. Um bei der Ermittlung der Vergleichswerte eine weitgehende Korrespondenz zur Ermittlung der Energieverbrauchskennwerte nach EnEV herzustellen, wurden auch für die Vergleichswerte die Verbrauchsdaten der drei zurückliegenden Jahre herangezogen und eine Witterungsbereinigung in Abhängigkeit vom Standort des Laborgebäudes vorgenommen.

4.3 Bezugsgrößen

Nach EnEV 2007 und gemäß „Bekanntmachung der Regeln für Energieverbrauchskennwerte und der Vergleichswerte im Nichtwohngebäudebestand“ sind die Energieverbrauchswerte zur sog. „Energiebezugsfläche“ in Beziehung zu setzen. Als Energiebezugsfläche ist nach § 19 EnEV bei Nichtwohngebäuden die Nettogrundfläche NGF gem. DIN 277 heranzuziehen.

Sofern die in einem Gebäude vorhandenen Nutzungen derart sind, dass eine eindeutige Abhängigkeit (Proportionalität) zwischen Gebäudeflächengröße und Energieverbrauch besteht, ist der alleinige Bezug auf die Nettogrundfläche, insbesondere mit Blick auf den Erfassungsaufwand, eine durchaus berechtigte Vereinfachung. Insofern ist die Nettogrundfläche als Bezugsgröße zur energetischen Bewertung von Wohn- und Verwaltungsgebäuden vertretbar.

Es gibt aber Gebäude, bei denen auf Grund der speziellen Nutzung ein solcher „eindimensionaler“ Bezug auf die Fläche zur energetischen Bewertung nicht geeignet ist.

³ COP-Wert: Coefficient of Performance, Verhältnis der Nutzenergie (hier: Kälteleistung) zur eingesetzten Energiemenge (hier: Elektroenergie)

Dies wird z.B. bei Betrachtung der Energievergleichswerte für die BWZK-Gebäudekategorie Schwimmhallen deutlich. Nach o.g. Bekanntmachung des BMVBS sind die darin ausgewiesenen Vergleichswerte für Heizung mit $775 \text{ kWh/m}^2_{\text{NGFA}}$ und für Strom mit $220 \text{ kWh/m}^2_{\text{NGFA}}$ um ein Vielfaches höher als der Durchschnitt der Vergleichswerte für alle anderen Gebäudekategorien (siehe Tabelle 1). Es liegt die Vermutung nahe, dass mit der spezifischen Nutzungsart „Baden“ die dafür zur Verfügung stehenden Gebäude in energetischer Hinsicht anders als die Übrigen zu bewerten sind. Offensichtlich ist der auf Quadratmeter NGF bezogene Energieverbrauch nicht ausreichend, um die Energieeffizienz eines Schwimmbades zu bewerten.

Auf diese generelle Problematik wird z.B. in der VDI 3807⁴ hingewiesen, nämlich „*dass es in bestimmten Fällen zweckmäßig sein kann, andere Bezugsgrößen zu verwenden*“. Insbesondere wird in VDI 3807 empfohlen, für Hallen- und Freibäder als Bezugsgröße die Wasseroberfläche der beheizten Becken zu verwenden. Ähnlich verhält es sich bei Produktionsgebäuden der Industrie. So findet sich in einem Beitrag von Voss u.a. zum energieoptimierten Bauen in der Zeitschrift HLH⁵ vom Juli 2007 folgender Hinweis: "*Bei den Produktionsgebäuden ist der Flächenbezug auf die NGF wegen nutzungsbedingt größeren Geschoßhöhen als einziges Vergleichskriterium nicht Ziel führend.*"

Generell lässt sich sagen, dass für alle Arten von Gebäuden, bei denen die Nutzungsprozesse den entscheidenden Ausschlag für die Höhe des Energieverbrauches geben, der alleinige Quadratmeterbezug für eine Bewertung der energetischen Effizienz des Gebäudes nicht ausreichend ist. Dies trifft auch für Laborgebäude zu. Bei Laborgebäuden ist es nicht zielführend im Sinne der Erschließung von Potentialen zur Verbesserung der Energieeffizienz, die Nettogrundfläche, wie in der EnEV 2007 gefordert, als alleinige Bezugsgröße für den Energieverbrauch zu verwenden.

Die wesentliche Einflussgröße für den Energieverbrauch eines Laborgebäudes ist die Menge der ausgetauschten Raumlufte. Diese jedem Laborbetreiber aus der Praxis bekannte Tatsache wurde bereits bei den ersten Auswertungen des Arbeitskreises deutlich. So hängt die Signifikanz der Aussagen aus den statistisch ermittelten Werten für den Energieverbrauch sehr stark von der verwendeten Bezugsgröße ab. Werden die Energiewerte für Gebäude auf Quadratmeter bezogen, so ist die Signifikanz wegen der starken Streuung der Ergebnisse für Gebäude mit einer relativ hohen Luftwechselrate nicht mehr gegeben (Grafik 1). Anders verhält es sich, wenn die Jahresabluftmenge als Bezugsgröße herangezogen wird (Grafik 2).

⁴ VDI 3807, Blatt1 Energie- und Wasserverbrauchskennwerte für Gebäude - Grundlagen (2007-03)

⁵ HLH Lüftung/Klima - Heizung/Sanitär – Gebäudetechnik, 58 (2007) Nr. 7 – Juli, S.25,
Hrsg.: VDI Verein Deutscher Ingenieure

Zur Bewertung der Energieeffizienz von Laborgebäuden ist es deshalb erforderlich, die Jahresabluftmengen zu erfassen und als Bezugsgröße für den Energieverbrauch heranzuziehen.

Dies erfolgte im Rahmen dieser Studie sowohl durch Erfassung der absoluten Werte als auch durch Ermittlung relativer Werte in Form der mittleren Luftwechselrate.

Da zur Messung der tatsächlichen Jahresabluftmenge i.A. keine geeignete Messtechnik zur Verfügung steht, wurde pro Gebäude ein Näherungswert wie folgt gebildet:

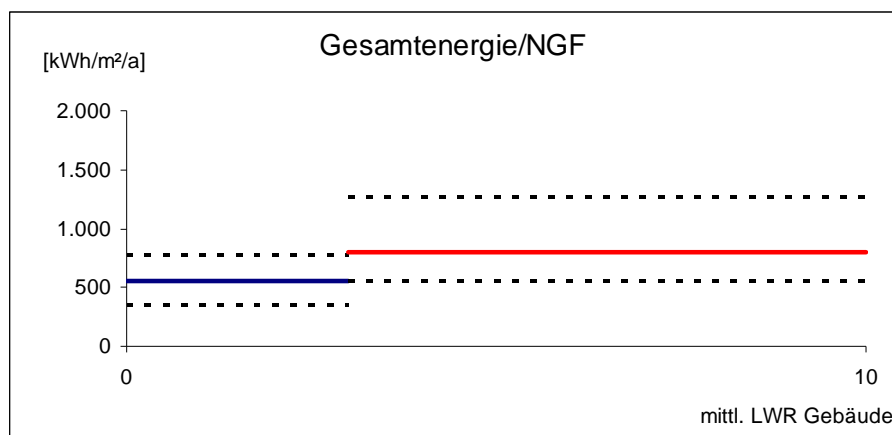
$$V_{ab} = L_{Nenn} * h_{VL}$$

mit

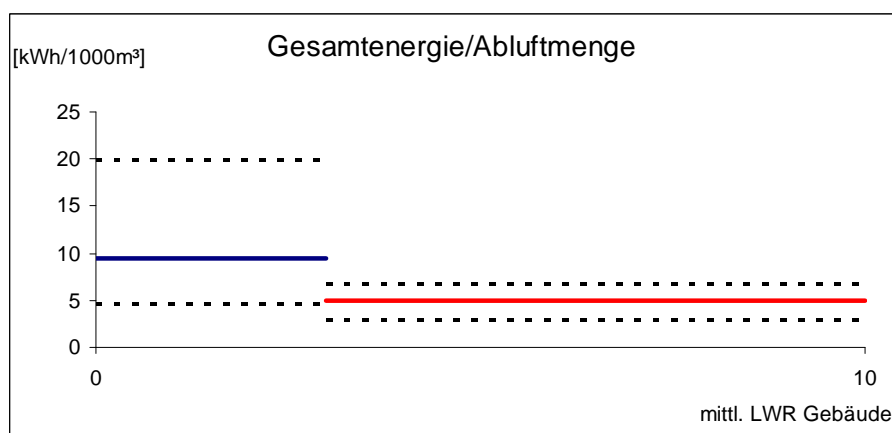
V_{ab} : Jahresabluftmenge [m³/a]

L_{Nenn} : Summe der Nennleistungen aller Lüftungsanlagen [m³/h]

h_{VL} : Summe der Volllast-Verrechnungsstunden der RLT-Anlagen [h/a]



Grafik 1: Bezugsgröße NGF - starke Streuung bei großen LWR (gepunktete Linien kennzeichnen die 25%- bzw. 75%-Quantile, durchgezogene Linien den Mittelwert)



Grafik 2: Bezugsgröße Abluftmenge - geringe Streuung bei großen LWR

Zur Ermittlung der Volllast-Verrechnungsstunden wurden Teillaststunden der RLT-Anlagen in Volllast-Verrechnungsstunden umgerechnet. Neben der Jahressabluftmenge ist für Laborgebäude zur Charakterisierung auch die mittlere Luftwechselrate sinnvoll. Um die exakte mittlere Luftwechselrate für ein Gebäude zu ermitteln, wäre es wegen der unterschiedlichen Luftwechselraten einzelner Labore eigentlich erforderlich, das gesamte Regime der Be- und Ent-

lüftung, nach Tagen und tageszeitlich aufgeschlüsselt für jeden einzelnen Raum und jede Anlage über das ganze Jahr hinweg zu erfassen. Da dies nicht möglich ist, wurde auch für die mittlere Luftwechselrate ein Näherungswert gebildet:

$$LWR_m = V_{ab} / (NGF * GH_m * h_{Nenn})$$

mit

LWR_m : mittlere Luftwechselrate des Gebäudes [1/h]

V_{ab} : Jahresabluftmenge [m^3/a]

NGF : Nettogrundfläche gem. DIN 277 [m^2]

GH_m : angenommene mittlere Geschosshöhe [m] (hier = 3,5 m)

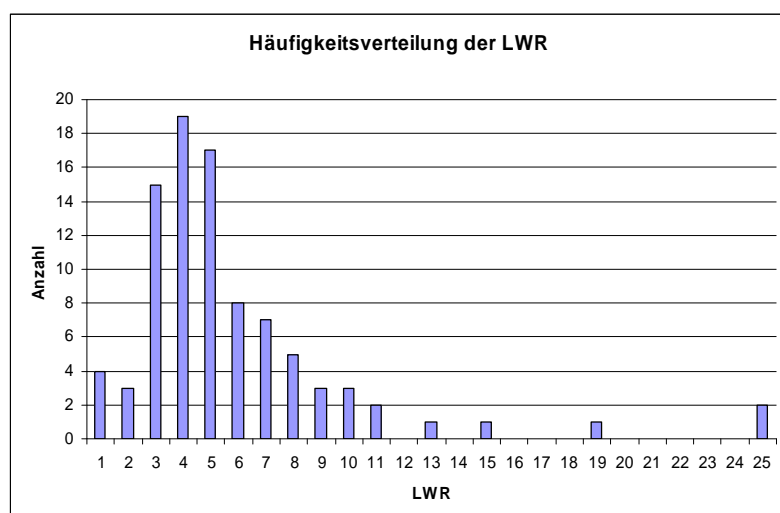
h_{Nenn} : Anzahl der Jahres-Nennstunden [h/a] (= 8760)

4.4 Bildung merkmals homogener Gruppen

Um die zu ermittelnden Vergleichswerte ggf. nach merkmals homogenen Gruppen in geeignete Cluster einteilen zu können, wurden neben den Energieverbrauchswerten und den Bezugsgrößen weitere zur Bildung von Clustern erforderliche Daten erfasst. Dazu gehören:

- die Gebäudegröße in m^2 NGF,
- die Anzahl der Vollast-Verrechnungstunden zur Berücksichtigung unterschiedlicher Nutzungsintensitäten der Gebäude,
- das Vorhandensein einer Wärmerückgewinnungsanlage und
- die mittlere Luftwechselrate.

Die in die Untersuchung einbezogenen Laborgebäude variieren in ihrer Größe zwischen 842 und 42.505 m^2 NGF. Bei den Vollast-Verrechnungstunden ist eine Spanne von 2.753 bis 8.760 h zu verzeichnen. Die Luftwechselraten der Gebäude variieren zwischen 1,6 und 24,6 m^3/m^2 NGF⁶.



Grafik 3: Verteilung der Gebäude nach Luftwechselrate

⁶ Bei einer angenommenen mittleren Raumhöhe von 3,5 m.

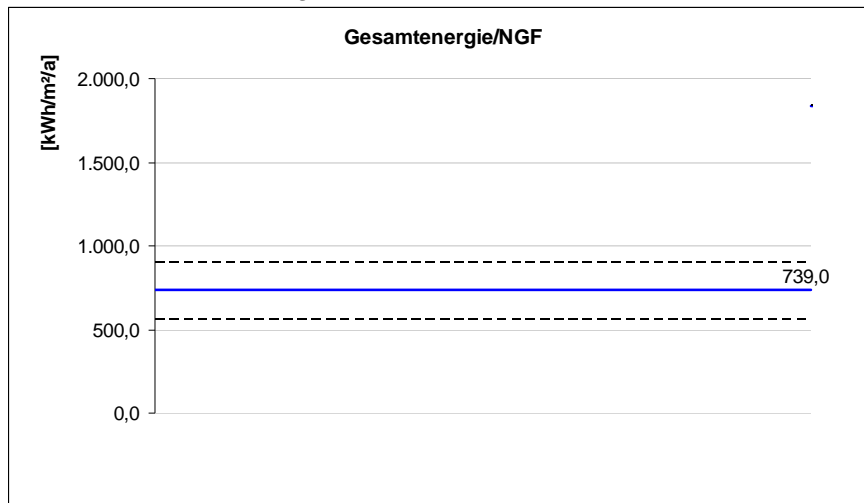
Ein wesentliches Ergebnis der Untersuchung zur möglichen Bildung von Clustern ist, dass es zur energetischen Beurteilung von Laborgebäuden nicht auf ihre Einteilung in verschiedene Laborarten (chemische, mikrobiologische, analytische etc.) ankommt. Es stellt sich vielmehr heraus, dass die mittlere Rate des Luftwechsels (gemittelt über das gesamte Gebäude) als objektives Clustermerkmal sehr gut geeignet ist. Da Energieverbrauch, Luftwechsel und Laborsicherheit stets in ihrer wechselseitigen Verflechtung zu betrachten sind, steht die Clusterrangung nach Luftwechselrate auch im Einklang mit den Sicherheitsanforderungen, die in Laboren den entscheidenden Ausschlag für die spezifische Abluftmenge pro Quadratmeter Laborfläche geben.

5 Darstellung und Kommentierung der Ergebnisse

5.1 Ergebnisse ohne Clusterung der Datenbasis

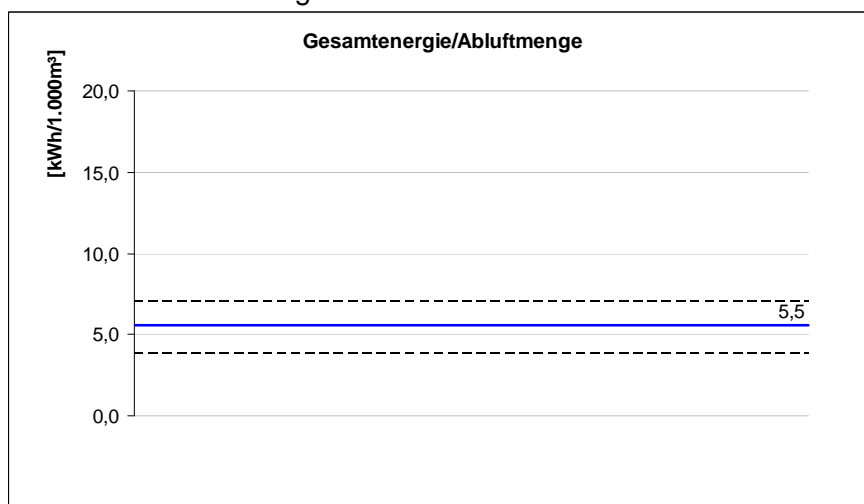
5.1.1 Vergleichswert Gesamtenergie für alle Gebäude

- Bezugsgröße NGF
 - Mittelwert⁷: 739,0 kWh/m²_{NGF}/a
 - Relative Streuung⁸: 46%



Grafik 4: Gesamtenergie in kWh/m²_{NGF}/a

- Bezugsgröße Abluftmenge
 - Mittelwert: 5,5 kWh/1000 m³ Abluft
 - Relative Streuung: 57%



Grafik 5: Gesamtenergie in kWh/1000m³ Abluft

Kommentar: Die verhältnismäßig hohen Werte für die relativen Streuungen für beide Bezugsgrößen stützen die Vermutung, dass die Betrachtung der Gesamtenergie ohne Differenzierung in geeignete Cluster nicht zielführend ist.

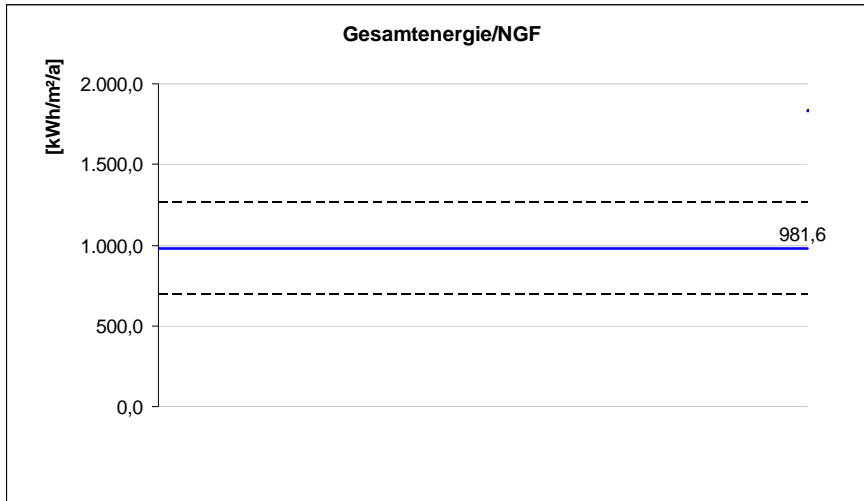
⁷ 25%-gestutztes Mittel

⁸ Quartilabstand / 25%-gestutztes Mittel ($|Q_{.25}-Q_{.75}|/X_{.25}$)

5.1.2 Vergleichswert Gesamtenergie für Gebäude mit hoher Gesamtluftwechselrate

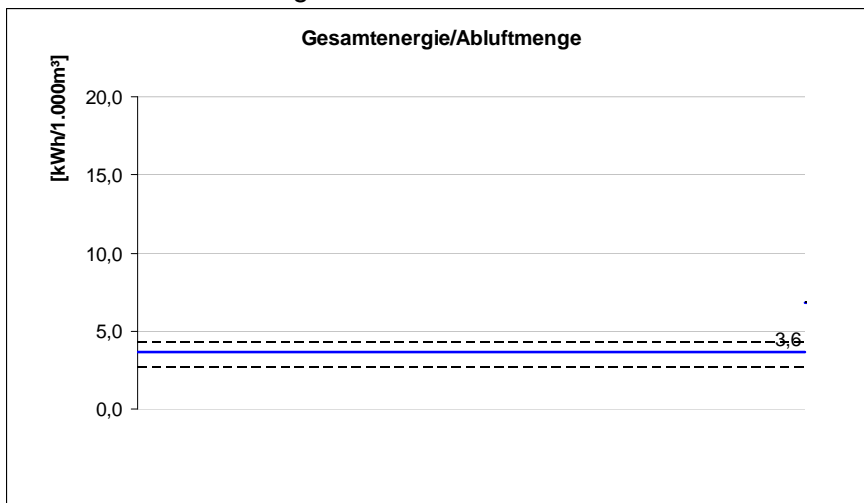
In Auswertung der erfassten Daten von den betrachteten 33 Gebäuden mit einer Luftwechselrate für das Gesamtgebäude größer als 5,5 wurden folgende Ergebnisse ermittelt:

- **Bezugsgröße NGF**
 - Mittelwert: 981,6 kWh/m²_{NGF}/a
 - Relative Streuung: 58%



Grafik 6: Gesamtenergie in kWh/m²_{NGF} /a

- **Bezugsgröße Abluftmenge**
 - Mittelwert: 3,6 kWh/1000 m³ Abluft
 - Relative Streuung: 44%



Grafik 7: Gesamtenergie in kWh/1000m³ Abluft

Kommentar: Aus den Grafiken Grafik 4 bis Grafik 7 ist ersichtlich, dass Gebäude mit hoher Luftwechselrate erwartungsgemäß einen wesentlich höheren spezifischen Energieverbrauch pro m² NGF haben. Zieht man jedoch die Abluftmenge als Bezugsgröße heran, verringert sich der spezifische Energieverbrauch mit steigender Luftwechselrate. Andererseits ist erkennbar, dass sich für diese Gebäude die relative Streuung der Energiewerte bei der Bezugsgröße NGF gegenüber der Betrachtung aller Gebäude erheblich erhöht und bei der Bezugsgröße Abluft erheblich verringert hat. Dieses Ergebnis stützt die These, wonach für Laborgebäude mit hoher Luftwechselrate die Bezugsgröße Abluftmenge wesentlich besser geeignet ist als die NGF.

5.2 Ergebnisse mit Clusterung der Datenbasis

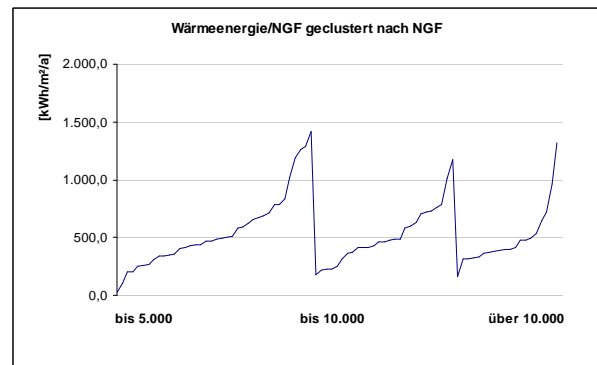
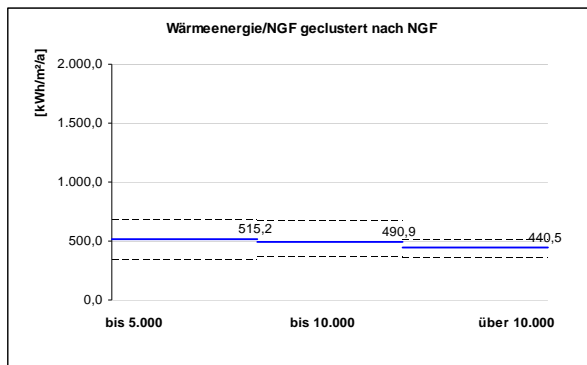
In den folgenden Darstellungen sind zur Verdeutlichung der Signifikanz der durch die Clusterung erhaltenen Differenzen zwischen den Mittelwerten der Cluster im rechten Teil der Grafik jeweils die Kurvenverläufe aufgezeigt. Als ein Maß dafür, inwieweit sich die Energie-Wertebereiche bei verschiedenen Clustern überschneiden, wurde das Überdeckungsmaß⁹ eingeführt.

5.2.1 Clusterung der Gebäude nach Gebäudegröße – Bezugsgröße NGF

Cluster 1: bis zu 5000 m² NGF

Cluster 2: mehr als 5000 bis 10000 m² NGF

Cluster 3: mehr als 10000 m² NGF



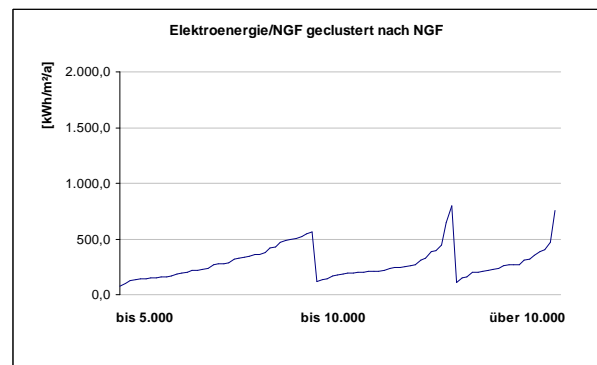
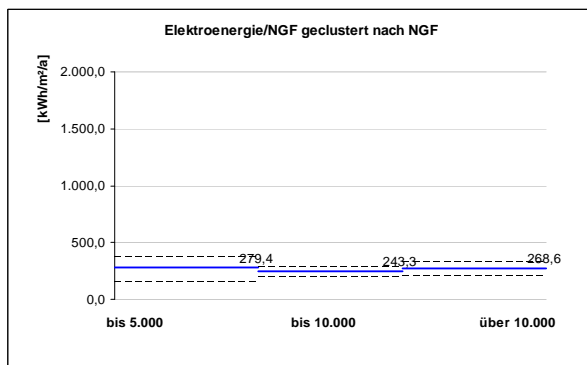
Grafik 8: Wärmeenergie in kWh/m²_{NGF}/a, geclustert nach Gebäudegröße

Überdeckungsmaße⁹:

Cluster1-2: 88%

Cluster2-3: 45%

=> Clusterung nicht signifikant



Grafik 9: Elektroenergie in kWh/m²_{NGF}/a, geclustert nach Gebäudegröße

Überdeckungsmaße:

Cluster1-2: 44%

Cluster2-3: 60%

=> Clusterung nicht signifikant

Kommentar: Aus den rechts stehenden Kurvenverläufen der verschiedenen Cluster ist eine hohe Überdeckung der zugehörigen Energiewertebereiche ersichtlich. Folglich kann die Signifikanz einer Clusterung des auf NGF bezogenen Energieverbrauchs nach der Gebäudegröße weder für die Wärme- noch für die Elektroenergie begründet werden.

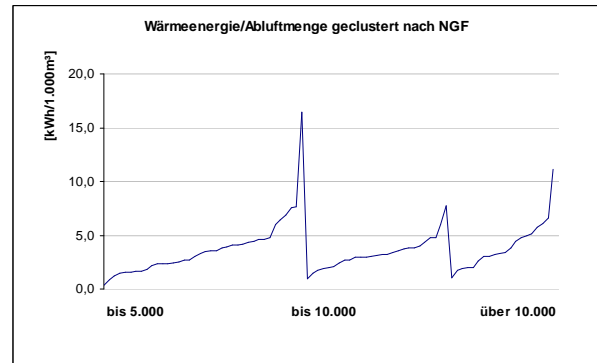
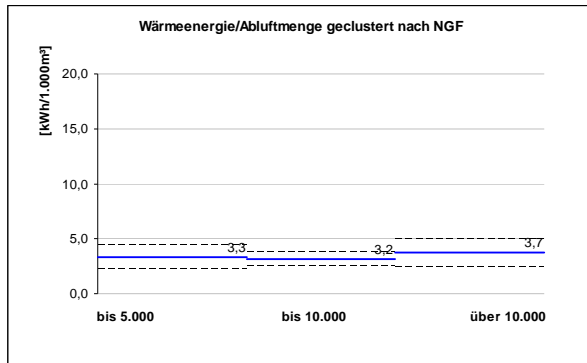
⁹ Das Überdeckungsmaß ist ein Maß dafür, wie weit sich die Quartilbereiche (Q₂₅ bis Q₇₅) zweier Cluster überschneiden. Je kleiner das Überdeckungsmaß, desto weniger überschneiden sich die Energie-Wertebereiche der Cluster, desto signifikanter ist die Clusterung.

5.2.2 Clusterung der Gebäude nach Gebäudegröße – Bezugsgröße Abluftmenge

Cluster 1: bis zu 5000 m² NGF

Cluster 2: mehr als 5000 bis 10000 m² NGF

Cluster 3: mehr als 10000 m² NGF



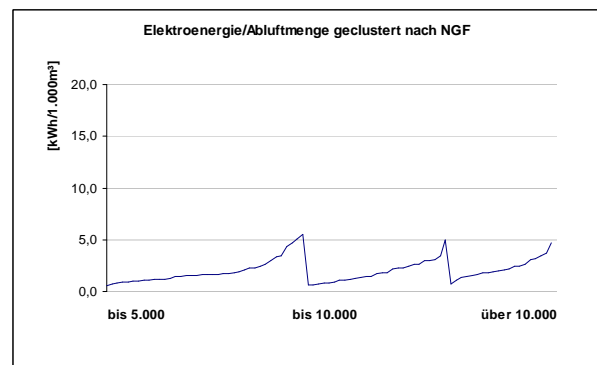
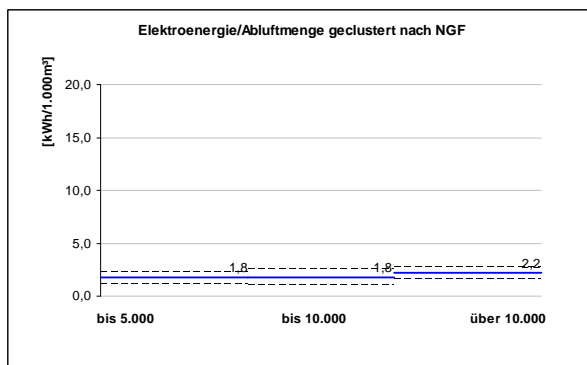
Grafik 10: Wärmeenergie in kWh/1000m³ Abluft, geclustert nach Gebäudegröße

Überdeckungsmaße:

Cluster1-2: 56%

Cluster2-3: 48%

=> Clusterung nicht signifikant



Grafik 11: Elektroenergie in kWh/1000m³ Abluft, geclustert nach Gebäudegröße

Überdeckungsmaße:

Cluster1-2: 78%

Cluster2-3: 55%

=> Clusterung nicht signifikant

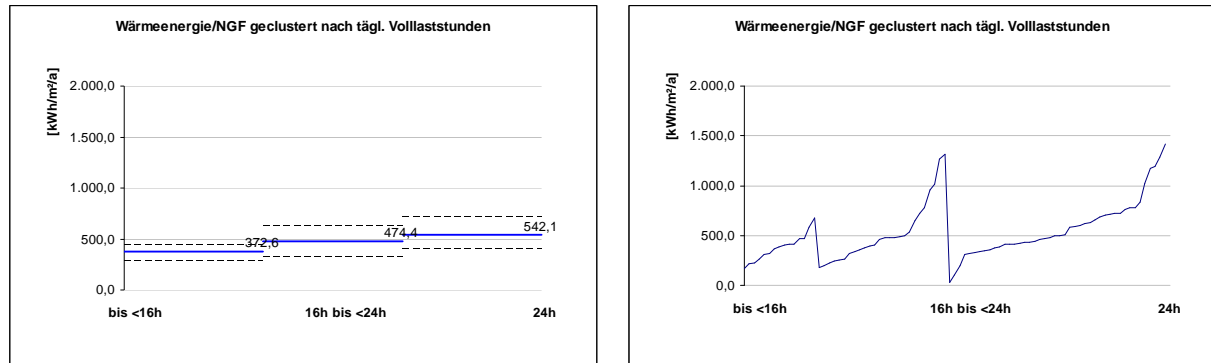
Kommentar: Aus den rechts stehenden Kurvenverläufen der verschiedenen Cluster ist eine hohe Überdeckung der zugehörigen Energiewertebereiche ersichtlich. Folglich kann die Signifikanz einer Clusterung des auf Abluftmenge bezogenen Energieverbrauchs nach der Gebäudegröße weder für die Wärme- noch für die Elektroenergie begründet werden.

5.2.3 Clusterung der Gebäude nach Volllast-Verrechnungstunden – Bezugsgröße NGF

Cluster 1: durchschnittlich bis zu 16 Volllast-Verrechnungstunden pro Tag

Cluster 2: durchschnittlich zwischen 16 und 24 Volllast-Verrechnungstunden pro Tag

Cluster 3: durchschnittlich 24 Volllast-Verrechnungstunden pro Tag



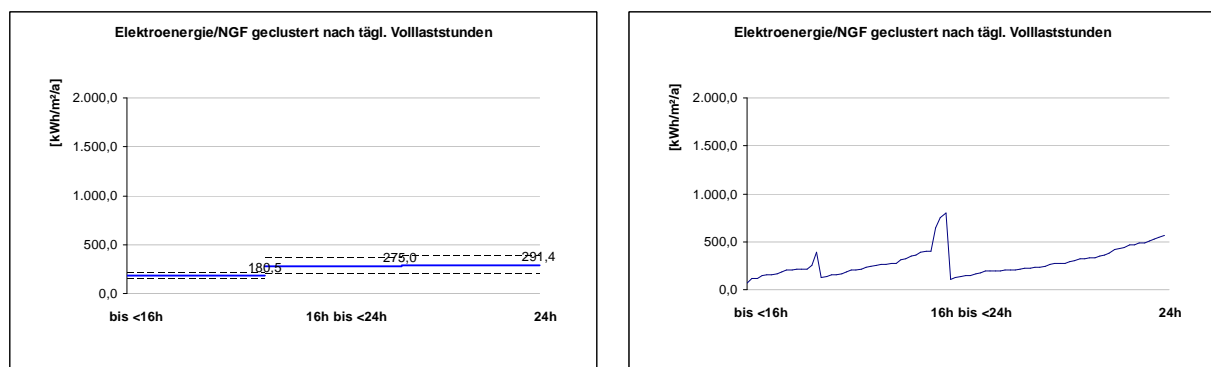
Grafik 12: Wärmeenergie in kWh/m²_{NGF}/a, geclustert nach Volllast-Verrechnungstunden

Überdeckungsmaße:

Cluster1-2: 36%

Cluster2-3: 55%

=> Clusterung nicht signifikant



Grafik 13: Elektroenergie in kWh/m²_{NGF}/a, geclustert nach Volllast-Verrechnungstunden

Überdeckungsmaße:

Cluster1-2: 4%

Cluster2-3: 84%

=> Clusterung nicht signifikant

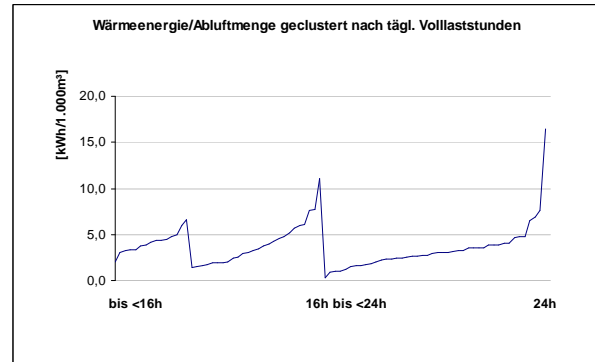
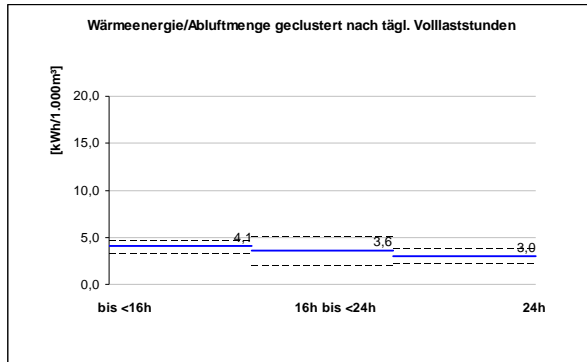
Kommentar: Aus den rechts stehenden Kurvenverläufen der verschiedenen Cluster ist eine hohe Überdeckung der zugehörigen Energiewertebereiche ersichtlich. Folglich kann die Signifikanz einer Clusterung des auf NGF bezogenen Energieverbrauchs nach den Volllastverrechnungstunden weder für die Wärme- noch für die Elektroenergie begründet werden.

5.2.4 Clusterung der Gebäude nach Volllast-Verrechnungsstunden – Bezugsgröße Abluftmenge

Cluster 1: durchschnittlich bis zu 16 Volllast-Verrechnungsstunden pro Tag

Cluster 2: durchschnittlich zwischen 16 und 24 Volllast-Verrechnungsstunden pro Tag

Cluster 3: durchschnittlich 24 Volllast-Verrechnungsstunden pro Tag

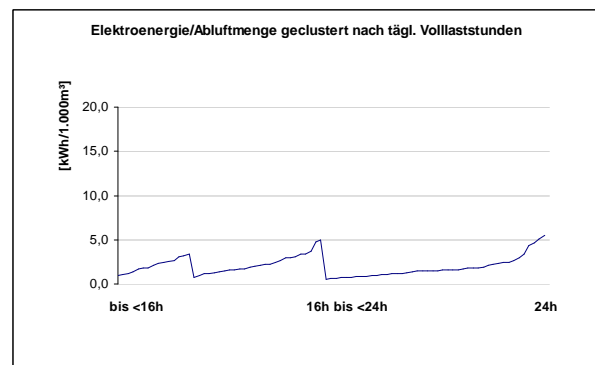
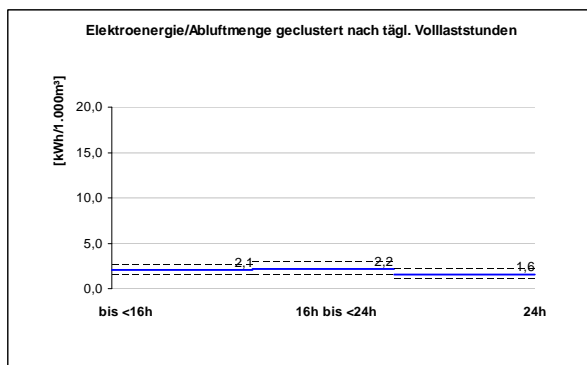


Grafik 14: Wärmeenergie in kWh/1000m³ Abluft, geclustert nach Volllast-Verrechnungsstunden

Überdeckungsmaße:

Cluster1-2: 42%

Cluster2-3: 54% => Clusterung nicht signifikant



Grafik 15: Elektroenergie in kWh/1000m³ Abluft, geclustert nach Volllast-Verrechnungsstunden

Überdeckungsmaße:

Cluster1-2: 72%

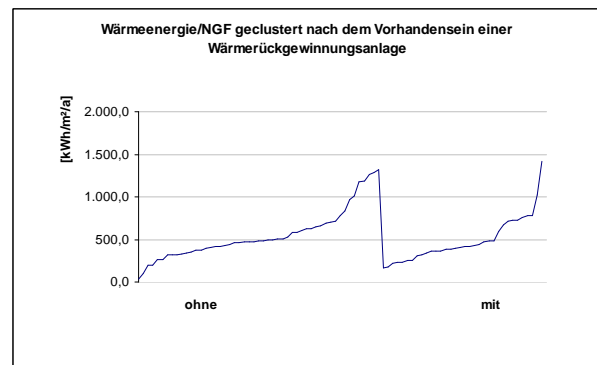
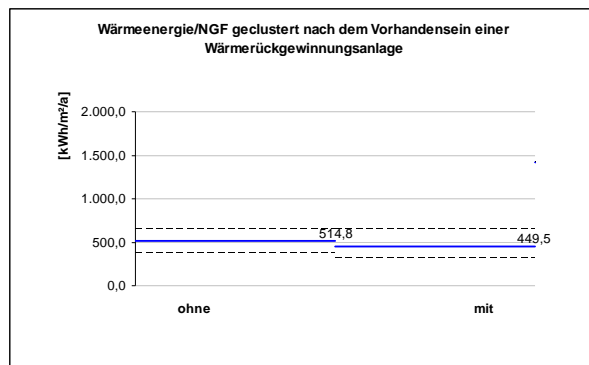
Cluster2-3: 32% => Clusterung nicht signifikant

Kommentar: Aus den rechts stehenden Kurvenverläufen der verschiedenen Cluster ist eine hohe Überdeckung der zugehörigen Energiewertebereiche ersichtlich. Folglich kann die Signifikanz einer Clusterung des auf Abluftmenge bezogenen Energieverbrauchs nach den Volllastverrechnungsstunden weder für die Wärme- noch für die Elektroenergie begründet werden.

5.2.5 Clusterung der Gebäude nach Wärmerückgewinnung – Bezugsgröße NGF

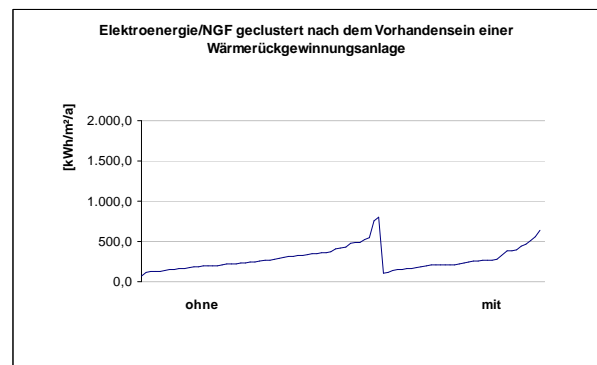
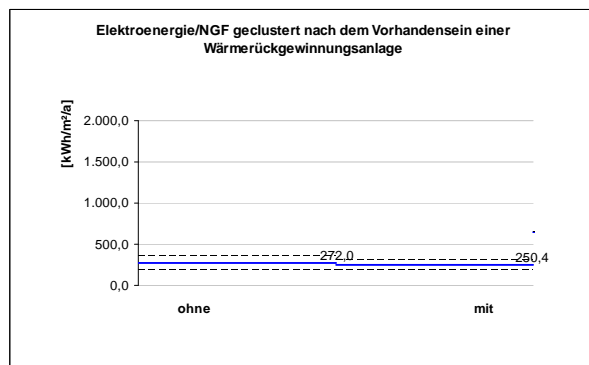
Cluster 1: ohne Wärmerückgewinnung

Cluster 2: mit Wärmerückgewinnung

Grafik 16: Wärmeenergie in kWh/m²_{NGF}/a, geclustert nach Wärmerückgewinnung

Überdeckungsmaße:

Cluster1-2: 84% => Clusterung nicht signifikant

Grafik 17: Elektroenergie in kWh/m²_{NGF}/a, geclustert nach Wärmerückgewinnung

Überdeckungsmaße:

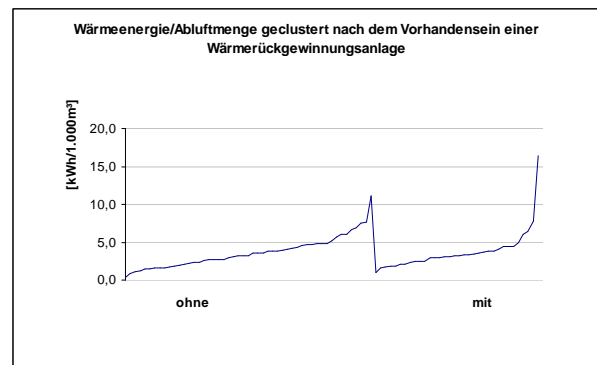
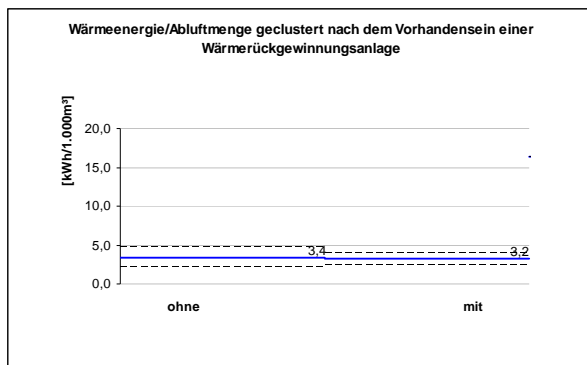
Cluster1-2: 72% => Clusterung nicht signifikant

Kommentar: Aus den rechts stehenden Kurvenverläufen der verschiedenen Cluster ist eine hohe Überdeckung der zugehörigen Energiewertebereiche ersichtlich. Folglich kann die Signifikanz einer Clusterung des auf NGF bezogenen Energieverbrauchs nach dem Vorhandensein einer Wärmerückgewinnung weder für die Wärme- noch für die Elektroenergie begründet werden.

5.2.6 Clusterung der Gebäude nach Wärmerückgewinnung – Bezugsgröße Abluftmenge

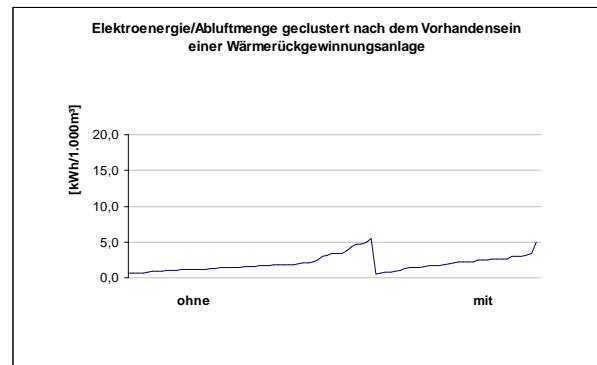
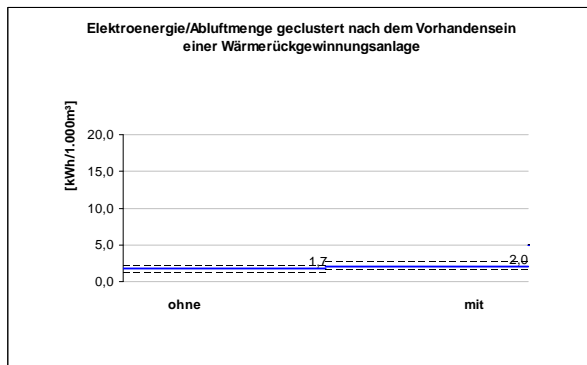
Cluster 1: ohne Wärmerückgewinnung

Cluster 2: mit Wärmerückgewinnung

Grafik 18: Wärmeenergie in kWh/1000m³ Abluft, geclustert nach Wärmerückgewinnung

Überdeckungsmaße:

Cluster1-2: 62% => Clusterung nicht signifikant

Grafik 19: Elektroenergie in kWh/1000m³ Abluft, geclustert nach Wärmerückgewinnung

Überdeckungsmaße:

Cluster1-2: 49% => Clusterung nicht signifikant

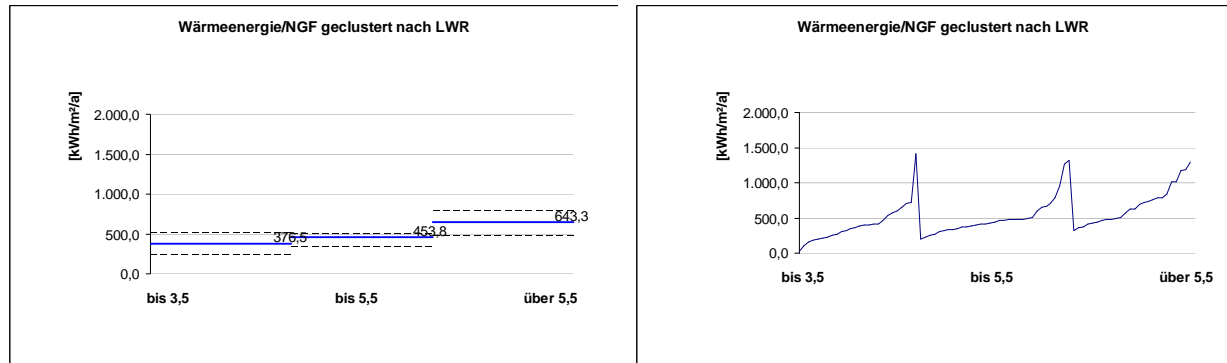
Kommentar: Aus den rechts stehenden Kurvenverläufen der verschiedenen Cluster ist eine hohe Überdeckung der zugehörigen Energiewertebereiche ersichtlich. Folglich kann die Signifikanz einer Clusterung des auf Abluftmenge bezogenen Energieverbrauchs nach dem Vorhandensein einer Wärmerückgewinnung weder für die Wärme- noch für die Elektroenergie begründet werden.

5.2.7 Clusterung der Gebäude nach Luftwechselrate LWR – Bezugsgröße NGF

Cluster 1: LWR bis 3,5

Cluster 2: LWR über 3,5 bis 5,5

Cluster 3: LWR über 5,5

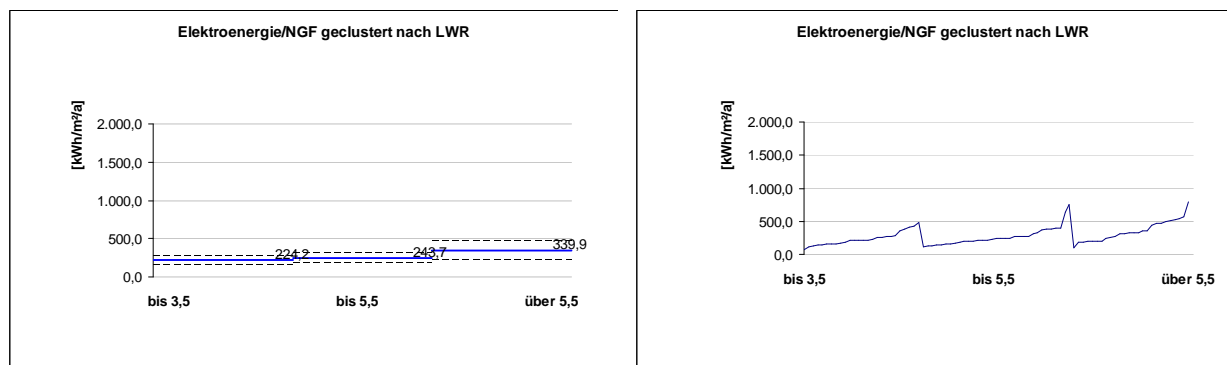
Grafik 20: Wärmeenergie in kWh/m²NGF/a, geclustert nach LWR

Überdeckungsmaße:

Cluster1-2: 58%

Cluster2-3: 8%

=> Clusterung bei hoher LWR signifikant

Grafik 21: Elektroenergie in kWh/m²NGF/a, geclustert nach LWR

Überdeckungsmaße:

Cluster1-2: 64%

Cluster2-3: 32%

=> Clusterung nicht signifikant

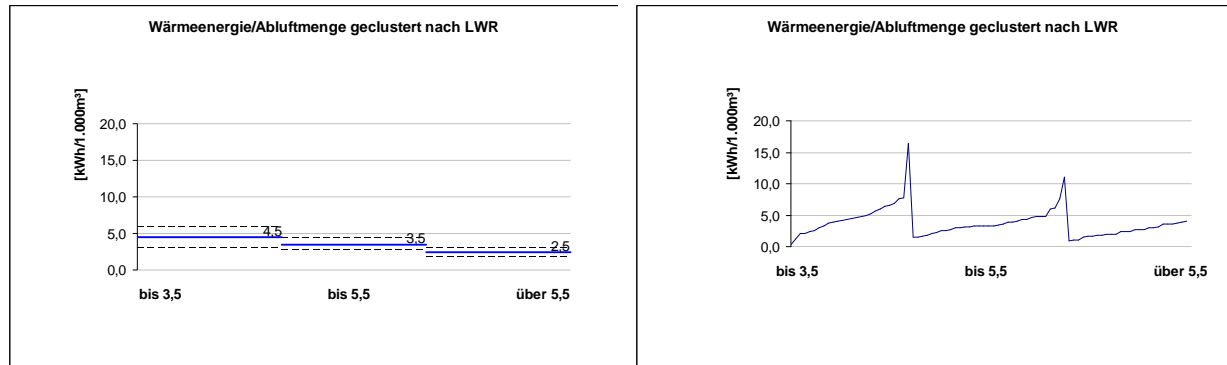
Kommentar: Aus den rechts stehenden Kurvenverläufen der verschiedenen Cluster in Grafik 20 ist bei höheren Luftwechselraten nur eine relativ geringe Überdeckung der zugehörigen Energiewertebereiche ersichtlich. Folglich kann für die Wärmeenergie bei Gebäuden mit hoher Luftwechselrate die Signifikanz einer Clusterung des auf NGF bezogenen Energieverbrauchs nach der Luftwechselrate begründet werden. Dies trifft für die Elektroenergie jedoch nicht zu. Grafik 21 weist auch für hohe Luftwechselraten ein relativ hohes Überdeckungsmaß aus, so dass eine Clusterung nicht begründet werden kann.

5.2.8 Clusterung der Gebäude nach Luftwechselrate LWR – Bezugsgröße Abluftmenge

Cluster 1: LWR bis 3,5

Cluster 2: LWR über 3,5 bis 5,5

Cluster 3: LWR über 5,5



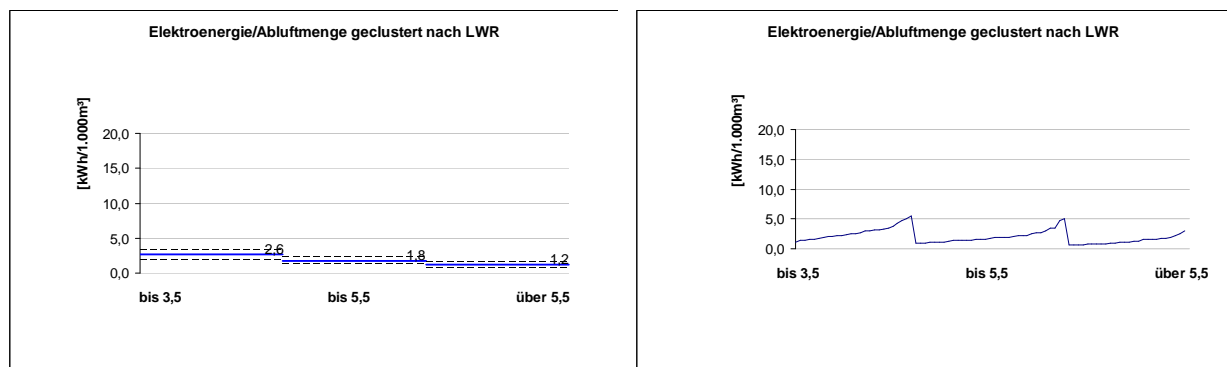
Grafik 22: Wärmeenergie in kWh/1000m³ Abluft, geclustert nach LWR

Überdeckungsmaße:

Cluster1-2: 40%

Cluster2-3: 14%

=> Clusterung bei hohen LWR signifikant



Grafik 23: Elektroenergie in kWh/1000m³ Abluft, geclustert nach LWR

Überdeckungsmaße:

Cluster1-2: 18%

Cluster2-3: 15%

=> Clusterung signifikant

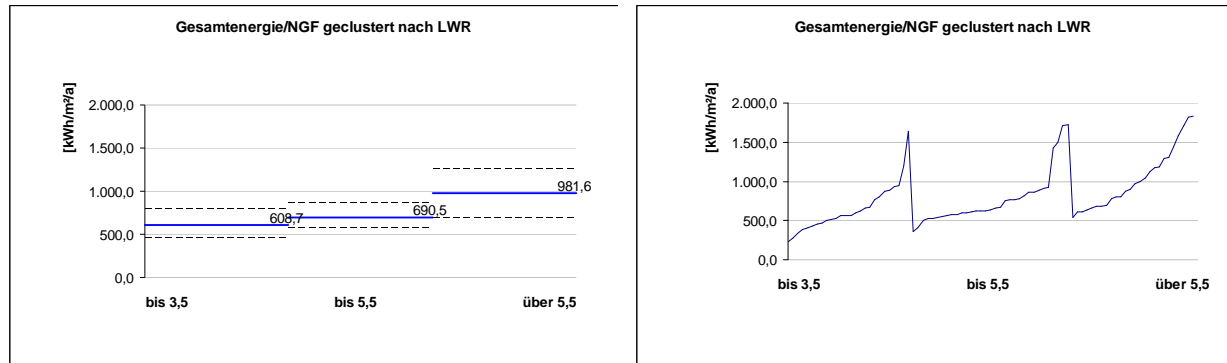
Kommentar: Aus den rechts stehenden Kurvenverläufen der verschiedenen Cluster in Grafik 22 ist bei höheren Luftwechselraten nur eine relativ geringe Überdeckung der zugehörigen Energiewertebereiche ersichtlich. Folglich kann für die Wärmeenergie bei Gebäuden mit hoher Luftwechselrate die Signifikanz einer Clusterung des auf Abluftmenge bezogenen Energieverbrauchs nach der Luftwechselrate begründet werden. Aus Grafik 23 lässt sich erkennen, dass die Signifikanz einer derartigen Clusterung für die Elektroenergie auch für geringere Luftwechselraten begründet werden kann.

5.2.9 Clusterung der Gebäude nach Luftwechselrate LWR – Gesamtenergie

Cluster 1: LWR bis 3,5

Cluster 2: LWR über 3,5 bis 5,5

Cluster 3: LWR über 5,5



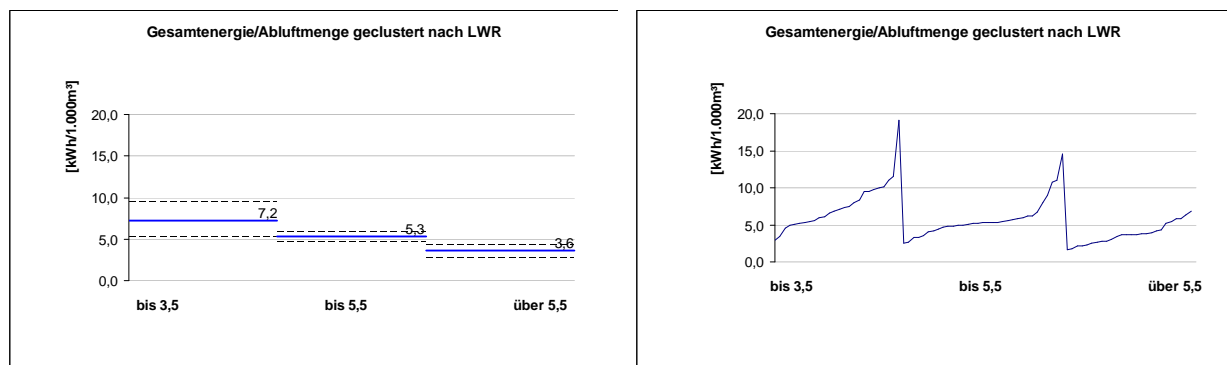
Grafik 24: Gesamtenergie in kWh/m²_{NGF}/a, geclustert nach LWR Bezugsgröße NGF

Überdeckungsmaße:

Cluster1-2: 55%

Cluster2-3: 25%

=> Clusterung nicht signifikant



Grafik 25: Gesamtenergie in kWh/1000m³ Abluft, geclustert nach LWR Bezugsgröße Abluftmenge

Überdeckungsmaße:

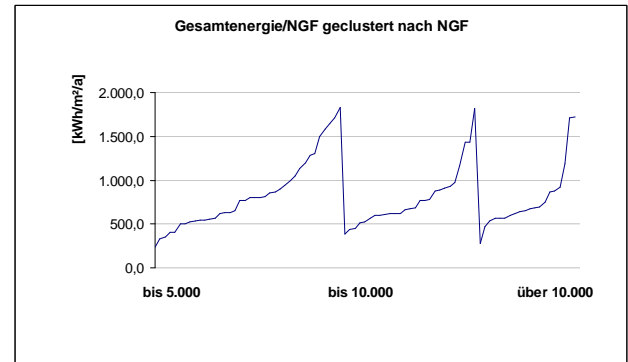
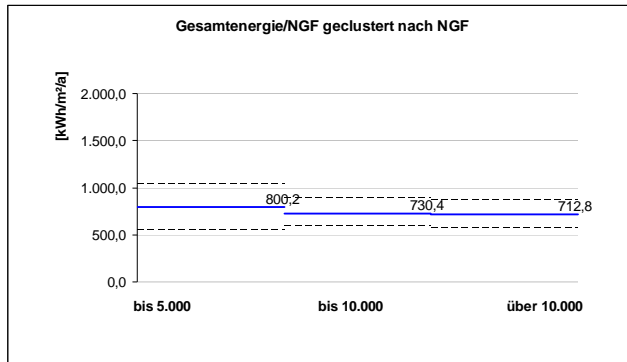
Cluster1-2: 12%

Cluster2-3: 0%

=> Clusterung signifikant

Kommentar: In Grafik 24 und Grafik 25 sind die Clusterungen für die Bezugsgrößen NGF (Grafik 24) und Abluftmenge (Grafik 25) für die Gesamtenergie gegenübergestellt. Grafik 24 (NGF) zeigt eine hohe und Grafik 25 (Abluftmenge) zeigt eine geringe Überdeckung der zugehörigen Energiewertebereiche für die rechts stehenden Kurvenverläufe der verschiedenen Cluster. Folglich kann die Signifikanz einer Clusterung des auf NGF bezogenen Energieverbrauchs nach der Luftwechselrate für die Gesamtenergie nicht begründet werden. Wird demgegenüber die Abluftmenge als Bezugsgröße gewählt, ergibt sich eine signifikante Clusterung.

5.2.10 Clusterung der Gebäude nach NGF – Gesamtenergie

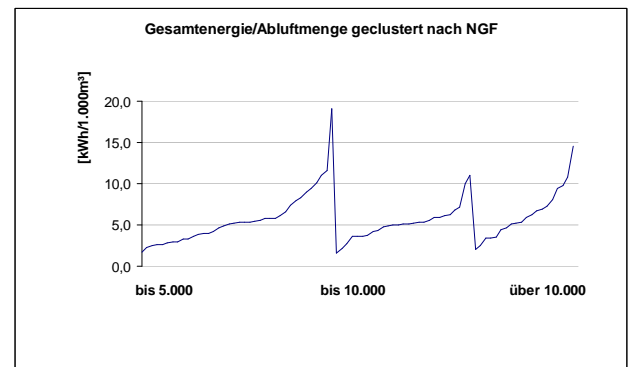
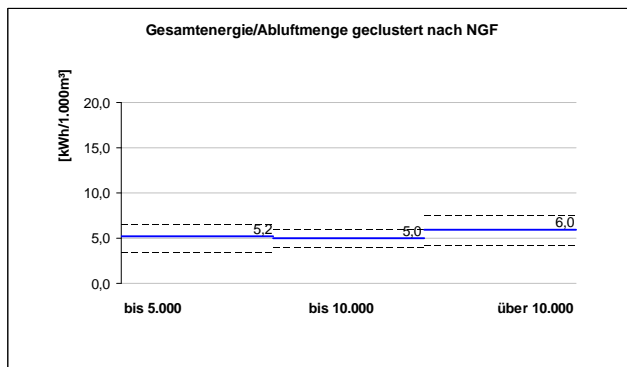
Cluster 1: bis zu 5000 m² NGFCluster 2: mehr als 5000 bis 10000 m² NGFCluster 3: mehr als 10000 m² NGFGrafik 26: Gesamtenergie in kWh/m²NGF/a, geclustert nach NGF Bezugsgröße NGF

Überdeckungsmaße:

Cluster1-2: 61%

Cluster2-3: 84%

=> Clusterung nicht signifikant

Grafik 27: Gesamtenergie in kWh/1000m³ Abluft, geclustert nach NGF Bezugsgröße Abluftmenge

Überdeckungsmaße:

Cluster1-2: 61%

Cluster2-3: 49%

=> Clusterung nicht signifikant

Kommentar: In Grafik 26 und Grafik 27 sind die Clusterungen für die Bezugsgrößen NGF (Grafik 26) und Abluftmenge (Grafik 27) für die Gesamtenergie gegenübergestellt. Beide Grafiken (NGF und Abluftmenge) zeigen hohe Überdeckungen der zugehörigen Energiewertebereiche für die rechts stehenden Kurvenverläufe der verschiedenen Cluster. Folglich kann die Signifikanz der betrachteten Clusterungen nicht begründet werden.

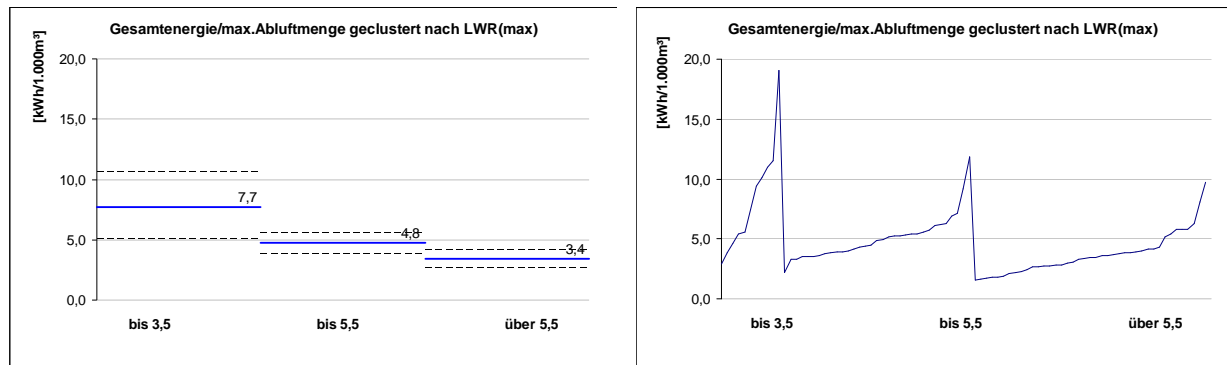
5.2.11 Clusterung der Gebäude nach LWR_{max} , Bezugsgröße max. Abluftmenge– Gesamtenergie

Bei der folgenden Betrachtung wird von den konkreten Nutzungszeiten abgesehen. Die gebäudekonkrete Anzahl der Vollast-Verrechnungstunden der RLT-Anlagen (h_{VL}) bleibt unberücksichtigt und wird durch die maximale Anzahl (8670 h/a) ersetzt. Dadurch ergibt sich eine maximale Abluftmenge und eine maximale gebäudebezogene Luftwechselrate (LWR_{max}).

Cluster 1: LWR bis 3,5

Cluster 2: LWR über 3,5 bis 5,5

Cluster 3: LWR über 5,5



Grafik 28: Gesamtenergie in kWh/m²_{NGF/a}, geclustert nach LWR_{max} Bezugsgröße max. Abluftmenge

Überdeckungsmaße:

Cluster1-2: 7%

Cluster2-3: 10%

=> Clusterung signifikant

Kommentar: Grafik 28 zeigt die Ergebnisse bei einer Clusterung der Gesamtenergie nach maximaler Luftwechselrate für die Bezugsgröße maximale Abluftmenge. Die Grafik zeigt eine relativ geringe Überdeckung der zugehörigen Energiewertebereiche für die rechts stehenden Kurvenverläufe der verschiedenen Cluster. Folglich kann eine derartige Clusterung als signifikant betrachtet werden.

5.2.12 Tabellarische Zusammenfassung der Untersuchungen zu den möglichen Clustern

Zeile	Energie	Bezugsgröße	Clustering	Mittelwert Cluster 1	Mittelwert Cluster 2	Mittelwert Cluster 3	Überdeckungsmaß Cluster 1-2	Überdeckungsmaß Cluster 2-3	Mittelwert der Überdeckungsmaße
1	Wärme	NGF	NGF	515,2	490,9	440,5	88%	45%	66%
2	Elektro	NGF	NGF	279,4	243,3	268,6	44%	60%	52%
3	Wärme	Abluft	NGF	3,3	3,2	3,7	56%	48%	52%
4	Elektro	Abluft	NGF	1,8	1,8	2,2	78%	55%	66%
5	Wärme	NGF	h_{VL}^{10}	372,6	474,4	542,1	36%	55%	45%
6	Elektro	NGF	h_{VL}	180,5	275,0	291,4	4%	84%	44%
7	Wärme	Abluft	h_{VL}	4,1	3,6	3,0	42%	54%	48%
8	Elektro	Abluft	h_{VL}	2,1	2,2	1,6	72%	32%	52%
9	Wärme	NGF	WR ¹¹	514,8	449,5		84%		84%
10	Elektro	NGF	WR	272,0	250,4		72%		72%
11	Wärme	Abluft	WR	3,4	3,2		62%		62%
12	Elektro	Abluft	WR	1,7	2,0		49%		49%
13	Wärme	NGF	LWR	376,5	453,8	643,3	58%	8%	33%
14	Elektro	NGF	LWR	224,2	243,7	339,9	64%	32%	48%
15	Wärme	Abluft	LWR	4,5	3,5	2,5	40%	14%	27%
16	Elektro	Abluft	LWR	2,6	1,8	1,2	18%	15%	17%
17	Gesamt	NGF	LWR	608,7	690,5	981,6	55%	25%	40%
18	Gesamt	Abluft	LWR	7,2	5,3	3,6	12%	0%	6%
19	Gesamte	NGF	NGF	800,2	730,4	712,8	61%	84%	72%
20	Gesamt	Abluft	NGF	5,2	5,0	6,0	61%	49%	55%
21	Gesamt	max. Abluft	LWR _{max}	7,7	4,8	3,4	7%	10%	9%

Tabelle 2: Zusammenfassung der Clusterungsversuche (grün: Clustering signifikant; rot: Clustering nicht signifikant)

Die Clusterungen mit der höchsten Signifikanz (geringere Überdeckungsmaße) sind die Clusterungen nach LWR mit der Bezugsgröße Abluftmenge. Die Clusterungen mit der geringsten Signifikanz (höhere Überdeckungsmaße) sind die Clusterungen nach NGF mit der Bezugsgröße NGF.

¹⁰ Anzahl der Vollast-Verrechnungsstunden der RLT-Anlagen [h/a]¹¹ Wärmerückgewinnungsanlage vorhanden/nicht vorhanden

6 Schlussfolgerungen aus den Auswertungsergebnissen

6.1 Grundsätzliches

Aus der Nutzungsspezifität von Laborgebäuden und den damit verbundenen Wechselbeziehungen zwischen Energieverbrauch und Laborsicherheit ergibt sich, dass die energetische Bewertung von Laborgebäuden unter Nutzung des verbrauchsbezogenen Energieausweises nicht in gleicher Weise erfolgen kann, wie dies z.B. für Wohn-, und Verwaltungsgebäude möglich ist. Insbesondere ist bei der Ermittlung und Veröffentlichung von Vergleichswerten für den Energieverbrauch von Laborgebäuden zu beachten, dass damit die für den Energieverbrauch dieser Gebäudekategorie wesentlichen Einflüsse hervorgehoben werden. Nur dann ist es möglich, die tatsächlichen Potentiale für die Energieeinsparung und die Verringerung der CO₂-Emissionen zu erkennen und durch geeignete Maßnahmen zu erschließen.

6.2 Bildung von Clustern

Ein weiteres Ergebnis der Untersuchungen des Arbeitskreises bezieht sich auf die zweckmäßige Bildung merkmals homogener Gruppen. Zur energetischen Beurteilung von Laborgebäuden ist eine Einteilung der Laborgebäude in verschiedene Laborarten (chemische, mikrobiologische, analytische etc.) nicht erforderlich. Allein die mittlere Luftwechselrate ist als objektives Clustermerkmal sehr gut geeignet. Da Energieverbrauch, Luftwechsel und Laborsicherheit stets in ihrer wechselseitigen Verflechtung zu betrachten sind, steht die Clusterung nach Luftwechselrate auch im Einklang mit den Sicherheitsanforderungen, die in Laboren den entscheidenden Ausschlag für die erforderliche Abluftmenge geben. Sofern die Bezugsgröße Jahres-Abluftmenge herangezogen wird, kann eine Clusterung in drei Luftwechselbereiche vorgenommen werden.

6.3 Abluft als zusätzliche Bezugsgröße

Es hat sich deutlich gezeigt, dass die alleinige Bezugnahme der Energieverbrauchswerte auf die Gebäudefläche für Laborgebäude nicht zielführend im Sinne der energetischen Gebäudeoptimierung ist. Deshalb wird empfohlen, bei der Ermittlung von Energieverbrauchskennwerten für Laborgebäude die Abluftmenge zusätzlich zur Nettogrundfläche in geeigneter Weise heranzuziehen. Das Einbeziehen der tatsächlichen Abluftmenge erfordert jedoch die Berücksichtigung der Nutzungszeiten der Lüftungsanlagen. Sofern dies aus Gründen des hohen Erfassungsaufwandes nicht möglich ist, kann zunächst darauf verzichtet werden und

vorerst die maximal mögliche Abluftmenge, die durch die Auslegung der Lüftungsanlagen gegeben ist, herangezogen werden.

Des Weiteren ist zu berücksichtigen, dass die Vergleichswerte des Energieverbrauchs in der „Bekanntmachung der Regeln für Energieverbrauchskennwerte und der Vergleichswerte im Nichtwohngebäudebestand“ vom 26. Juli 2007 als Zahlenwerte in kWh/m² NGF angegeben sind. Sofern bei Laborgebäuden die Abluftmenge berücksichtigt werden soll, ist die Angabe von je einem Zahlenwert für Wärme und Strom mit der Bezugsgröße Nettogrundfläche nicht möglich. Soll die Abluftmenge eines Laborgebäudes als gebäudespezifischer Parameter in die Ermittlung der Vergleichswerte eingehen, muss für jedes Laborgebäude der Vergleichswert einzeln unter Berücksichtigung der Abluftmenge ermittelt werden. Die kann auf folgende Weise erfolgen:

Offensichtlich hängt der Energieverbrauch eines Laborgebäudes einerseits von seiner Größe ab. Das heißt, ein Teil des Vergleichswertes für ein Laborgebäude ist von der Fläche abhängig.

EV_f : flächenabhängiger Energie-Verbrauchswert [kWh/m²NGF]

Ein weiterer Teil des Vergleichswertes für ein Laborgebäude ist abhängig von der Abluftmenge:

EV_{ab} : abluftabhängiger Energie-Verbrauchswert [kWh/m³Abluft]

Der Gesamtenergieverbrauch lässt sich als Summe beider Anteile darstellen:

$$E = E_f \cdot NGF + E_{ab} \cdot V_{ab}$$

mit

E : Jahres-Energieverbrauch [kWh/a]

E_f : flächenabhängiger Verbrauchswert [kWh/m²NGF]

NGF : Nettogrundfläche des Gebäudes [m²NGF]

E_{ab} : abluftabhängiger Verbrauchswert [kWh/m³Abluft]

V_{ab} : Jahres-Abluftmenge [1000m³/a]

Für die mittlere Luftwechselrate des gesamten Gebäudes gilt unter Berücksichtigung der o.g. Vereinfachungen die Näherung:

$$LWR_m = V_{ab} / (NGF \cdot k) \quad \text{bzw.} \quad LWR_m \cdot k = V_{ab} / NGF$$

mit

$k = 3,5 \cdot 365 \cdot 24$ [m³/h/a]

Folglich gilt für den spezifischen Jahres-Energieverbrauch pro m³ Abluft:

$$E / V_{ab} = (E_f \cdot NGF) / V_{ab} + E_{ab} = E_f / (LWR_m \cdot k) + E_{ab}$$

Stellt man die Abhängigkeit des spezifischen Energieverbrauches (pro m³ Abluft) von der Luftwechselrate dar, hat diese Gleichung die allgemeine Form

$$y = a / (x+b) + c,$$

wobei

y den spezifischen Energieverbrauch E/V_{ab} in kWh/m³Abluft,

x die mittlere Luftwechselrate des Gebäudes in 1/h,

a den flächenabhängigen Energie-Verbrauchswert E_f in kWh/m²NGF und

c den abluftabhängigen Energie-Verbrauchswert E_{ab} in kWh/m³Abluft repräsentiert¹².

6.4 Ermitteln der Koeffizienten

Unter Bezugnahme auf Punkt 5.2.8, Grafik 22 und Grafik 23, ergeben sich folgende Clusterwerte für den Energieverbrauch unter Bezugnahme auf die Abluftmenge:

	Bezugsgröße	Verbrauchswert Wärmeenergie Mittelwert unterer Wert (Q _{.25}) oberer Wert (Q _{.75})	Verbrauchswert Elektroenergie Mittelwert unterer Wert (Q _{.25}) oberer Wert (Q _{.75})	Verbrauchswert Gesamtenergie Mittelwert unterer Wert (Q _{.25}) oberer Wert (Q _{.75})	Maßeinheit
1	2	3	4	5	6
Cluster 1: Gebäude mit $LWR_m \leq 3,5$	Abluft	4,5 3,1 5,9	2,6 1,9 3,3	7,2 5,3 9,4	kWh/1000 m ³ Abluft
Cluster 2: Gebäude mit $3,5 < LWR_m \leq 5,5$	Abluft	3,5 2,7 4,4	1,8 1,4 2,3	5,3 4,7 5,9	kWh/1000 m ³ Abluft
Cluster 3: Gebäude mit $LWR_m > 5,5$	Abluft	2,5 1,8 3,1	1,2 0,8 1,6	3,6 2,7 4,3	kWh/1000 m ³ Abluft

Tabelle 3: Energie-Verbrauchswerte für Laborgebäude unter Bezugnahme auf die Abluftmenge

¹² Der Parameter b dient der Erhöhung der Allgemeingültigkeit des funktionellen Zusammenhangs

Um die Koeffizienten a, b und c der Gleichung $y = a / (x+b) + c$ zu ermitteln, werden die mittleren Werte der Cluster als Interpolations-Stützwerte herangezogen.

Als Koeffizienten für den Verbrauchswert Wärmeenergie ergeben sich:

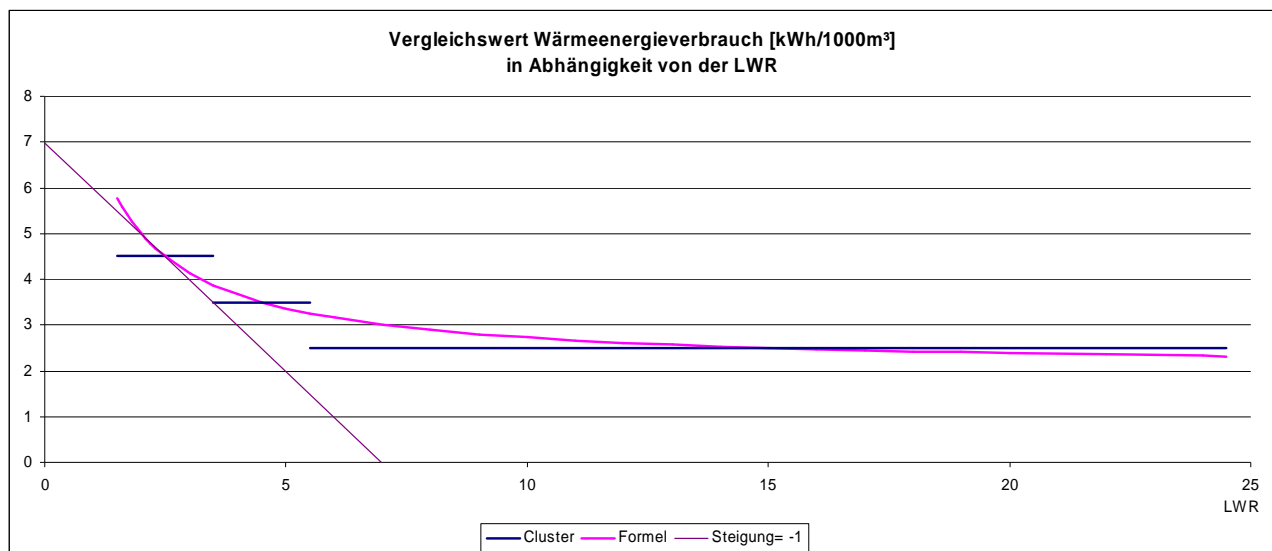
$$a = 7,266, b = 0,441, c = 2,029.$$

Somit kann der Zusammenhang zwischen Wärmeverbrauch in Abhängigkeit von der Luftwechselrate mittels

$$E_{ab} = 7,266 / (LWR_m + 0,441) + 2,029$$

dargestellt werden.

Der Graph der Funktion erhält damit folgende Form:



Grafik 29: Wärmeverbrauch in kWh/1000m³ Abluft in Abhängigkeit von der Luftwechselrate

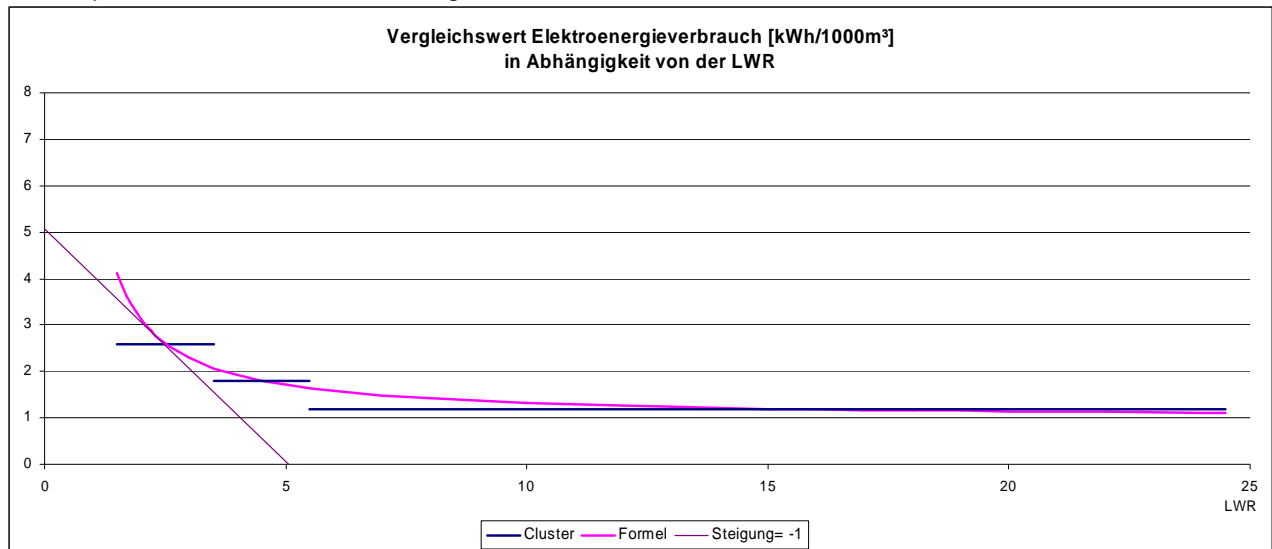
Entsprechend ergeben sich für den Zusammenhang zwischen Elektroenergieverbrauch in Abhängigkeit von der Luftwechselrate die Koeffizienten

$$a = 3,403, b = -0,417, c = 0,967$$

und somit

$$E_{ab} = 3,403 / (LWR_m - 0,417) + 0,967.$$

Als Graph der Funktion erhält man folgende Form:



Grafik 30: Elektroenergieverbrauch in kWh/1000m³Abluft in Abhängigkeit von der Luftwechselrate

Um die Robustheit des Zusammenhanges zu überprüfen, wurden Berechnungen mit verschiedenen Clusterungen durchgeführt. Daraus ergab sich, dass in einem Bereich der mittleren Luftwechselrate bis ca. 2,5 der Zusammenhang sehr instabil ist. Folglich sollte die Anwendung dieses Terms erst für Laborgebäude mit einer mittleren Luftwechselrate ab 2,5 erfolgen.

Im Bereich zwischen 2,5 und 4,0 gibt es zwar geringe, aber durchaus noch vertretbare Abweichungen. Sehr gute Überdeckungen der Kurven für verschiedene Clustereinteilungen ergeben sich ab Luftwechselrate 4.

Generell muss angemerkt werden, dass die hier dargestellten Untersuchungen unter Vernachlässigung weiterer Differenzierungen zwischen den Laborgebäuden hinsichtlich ihrer Lüftungstechnischen Besonderheiten wie Klimatisierungsgrad, Befeuchtung etc. durchgeführt wurden. Insofern sind die nach dem beschriebenen Verfahren ermittelten Vergleichswerte als Näherungen zu verstehen, die bei weiterer Differenzierung der Gebäudekategorien nach ihren Lüftungstechnischen Besonderheiten ggf. noch präzisiert werden können.

7 Bestimmen der Vergleichswerte

Die Energieverbrauchs-Vergleichswerte für ein konkretes Laborgebäude werden unter Anwendung der oben beschriebenen Methode wie folgt ermittelt¹³.

Vergleichswert Heizung:

$$E_H = [7,266 / (LWR_m + 0,441) + 2,029] * V_{ab} / NGF \quad [kWh/m^2NGF/a]$$

mit

$$LWR = V_{ab} / (NGF * k) \text{ und} \\ k = 3,5 * 365 * 24$$

so dass sich ergibt:

$$E_H = 222,77 * LWR_m / (LWR_m + 0,44) + 62,21 * LWR_m \quad [kWh/m^2NGF/a]$$

mit

- E_H : Vergleichswert Heizung [kWh/m² NGF/a]
- LWR_m : mittlere Luftwechselrate Gebäude [1/h]
- V_{ab} : Jahresablufmenge [1000 m³/a]
- NGF : Nettogrundfläche [m² NGF]

Vergleichswert Strom:

$$E_S = [3,403 / (LWR_m - 0,417) + 0,967] * V_{ab} / NGF \quad [kWh/m^2NGF/a]$$

wobei

$$LWR = V_{ab} / (NGF * k) \text{ und} \\ k = 3,5 * 365 * 24$$

so dass sich ergibt:

$$E_S = 104,34 * LWR_m / (LWR_m - 0,42) + 29,65 * LWR_m \quad [kWh/m^2NGF/a]$$

mit

- E_S : Vergleichswert Strom [kWh/m² NGF/a]
- LWR_m : mittlere Luftwechselrate Gebäude [1/h]
- V_{ab} : Jahresablufmenge [1000 m³/a]
- NGF : Nettogrundfläche [m² NGF]

¹³ Die Anwendung dieser Methode ist für Gebäude ab einer mittleren Luftwechselrate von 2,5 geeignet.

8 Beispiel zur Berechnung der Vergleichswerte für ein Laborgebäude

Basisangaben zum Beispielgebäude:

Nettogrundfläche Laborgebäude:	2.600 [m ²]
Durchschnittliche Volllast-Verrechnungstunden pro Tag:	12 [h/d]
Summe der Nennleistungen der Lüftungsanlagen:	105.000 [m ³ /h]

Gemessene Verbrauchswerte:

Jahres-Stromverbrauch:	463.911 [kWh/a]
Jahres-Wärmeenergie (klimabereinigt):	1.646.710 [kWh/a]
Jahres-Kälteenergie (elektrisch):	37.363 [kWh/a]

1. Ermitteln der Vergleichswerte zum Beispielgebäude:

Anzahl der Volllast-Verrechnungstunden pro Jahr:

$$h_{VL} = 12 \text{ [h/d]} * 365 \text{ [d/a]} = 4.380 \text{ [h/a]}$$

Jahresabluftmenge:

$$V_{ab} = 105.000 \text{ [m}^3\text{/h]} * 4.380 \text{ [h/a]} = 459.900.000 \text{ [m}^3\text{/a]}$$

Mittlere Luftwechselrate:

$$LWR_m = 459.900.000 \text{ [m}^3\text{/a]} / (2.600 \text{ [m}^2\text{]} * 3,5 \text{ [m]} * 8.760 \text{ [h/a]}) = 5,77 \text{ [1/h]}$$

Vergleichswert Heizung:

$$E_H = 222,77 * 5,77 / (5,77 + 0,44) + 62,21 * 5,77 = 563,43 \text{ [kWh/m}^2\text{NGF/a]}$$

Vergleichswert Strom:

$$E_S = 104,34 * 5,77 / (5,77 - 0,42) + 29,65 * 5,77 = 283,61 \text{ [kWh/m}^2\text{NGF/a]}$$

2. Ermitteln der Verbrauchswerte des Beispielgebäudes:

Verbrauchswert Heizung:

$$E_{VbrH} = 1.646.710 \text{ [kWh/a]} / 2.600 \text{ [m}^2\text{]} = 633,35 \text{ [kWh/m}^2\text{NGF/a]}$$

Verbrauchswert Strom:

$$E_{VbrS} = (463.911 \text{ [kWh/a]} + 37.363 \text{ [kWh/a]}) / 2.600 \text{ [m}^2\text{]} = 192,80 \text{ [kWh/m}^2\text{NGF/a]}$$

9 Anhang: Mitglieder des Arbeitskreises

Dieter Apel, Leiter Bürogebäude Leverkusen, CURRENTA GmbH & Co. OHG

Dipl.-Ing. Dieter Borniger, Gruppenleiter Gebäude + Infrastruktureinrichtungen, Boehringer Ingelheim Pharma GmbH & Co. KG

Dipl.-Ing. Frank Emmrich, Projektleiter, BAUAKADEMIE

Dipl.-Ing. Mario Günther, MBA, Funktionsleiter Gebäudemanagement Laborgebäude + Equipment, Boehringer Ingelheim Pharma GmbH & Co. KG

Dipl.-Kfm. Frank Hattenbauer, Leiter Business Support, Bayer Schering Pharma AG

Dr. Dietmar Kohn, Leiter Gruppe Site Utilities, Boehringer Ingelheim Pharma GmbH & Co. KG

Dipl.-Ing. Jochen Kranz, Leiter Laborgebäude Leverkusen, CURRENTA GmbH & Co. OHG

Dipl.-Betriebswirt (BA) Andreas Kühne, Leiter Asset Management, Infracore GmbH & Co. Höchst KG

Dipl.-Ing. Hansjörg Messing, Leiter Facility Management, Boehringer Ingelheim Pharma GmbH & Co. KG

Dipl.-Ing. Volkmar Metzler, Abteilungsleiter Fachstruktur, Merck KGaA

Dipl.-Ing. Harald Münch, Betriebsleiter Property Management, BASF SE

Dipl.-Wirt.-Ing. Ingmar Neuber, Leiter Immobilienverwaltung und -abrechnung, Infracore GmbH & Co. Höchst KG

Dipl.-Ing. (FH) Markus Öttl, Leiter Facility Management, Roche Diagnostics GmbH

Dipl.-Ing. Jörg Petri, Leiter Facility Management, Bayer Schering Pharma AG

Dipl.-Ing. Michael Pitzer, Leiter Baumanagement, Industriepark Wolfgang GmbH

Thomas Reese, Facilities-Immobilienmanagement, Pharmaserv GmbH

Prof. Dr. Fritz Runge, Geschäftsführer, BAUAKADEMIE

Dipl.-Ing. Johannes Schöllhorn, Abteilungsleiter, CURRENTA GmbH & Co. OHG

Dipl.-Ing. Uwe Schönfelder, Leiter Property Management, BASF SE

Dr. Gottfried Trautmann, Abteilungsleiter Facility Management, Merck KGaA

Dipl.-Ing. Berthold Ufermann, Bereichsingenieur, Bayer HealthCare AG

Dipl.-Betriebswirtin Konstanze Weber-Gehri, Leiterin Kaufmännisches Facility Management, Industriepark Wolfgang GmbH

Dipl.-Ing. Jochen Wendeler, Gebäudemanager, Roche Diagnostics GmbH

Architekt, Dipl.-Ing. (FH) Roland Wölfle, Leiter Technik, Merckle GmbH, Ein Unternehmen der ratiopharm Gruppe

Leitung des Arbeitskreises: Dipl.-Betriebswirt (BA) Andreas Kühne

Moderation und wissenschaftliche Begleitung: Prof. Dr. Fritz Runge

Datenmanagement und Datenanalyse: Dipl.-Ing. Frank Emmrich