

EINFACHE BERECHNUNG DES NETZDIENLICHKEITSPOTENTIALS VON GEBÄUDEN – CASE STUDY AM BEISPIEL EINES LABORNEUBAUS

L. Frison¹, B. Köhler¹, P. Engelmann¹ und S. Herkel¹

¹Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Freiburg, Deutschland

KURZFASSUNG

Das Lastverschiebungspotential der Kälteversorgung eines Laborneubaus wird bezüglich verschiedener Netzreferenzgrößen analysiert. Das Ziel ist die Realisierung eines netzdienlichen Gebäudebetriebs, in dem der elektrische Energieverbrauch für die Klimatisierung anhand der Anforderungen des Stromnetzes geregelt wird. Dessen exakte Bewertung und die Entwicklung einer netzdienlichen Regelung erfordert ein ausreichend detailliertes, aber gleichzeitig optimierfähiges Modell der Kälteversorgung. Um diese Notwendigkeit zu umgehen, wird ein einfacher heuristischer Lastverschiebungsalgorithmus auf den Betrieb mehrerer Kälteversorger und mehrerer gleichermaßen wichtige Zielkriterien erweitert. Damit kann eine netzdienliche Regelung mit Kosten- und CO₂-Emissionseinsparungen gefunden werden, die nur einen geringen Mehrverbrauch bezüglich des berechneten effizienzoptimierten Betriebs und des messdatenbasierten Realbetriebs aufweist.

ABSTRACT

The load shifting potential of the cold supply of a new laboratory building is analyzed with regard to various grid reference signals. The aim is the realization of a grid-supportive building operation, in which the electricity consumption for the cold supply is regulated based on requirements of the electricity grid. The exact assessment of the grid flexibility and the development of a grid-supportive control strategy require a sufficiently detailed, but also optimizable model of the cold supply. To avoid this, a heuristic load shifting algorithm is extended to the operation of several cooling plants and several target criteria. This way, a grid-supportive building operation with high cost and CO₂ emission savings is found that has little additional energy consumption compared to the computed energy efficient operation and the real operation based on measurement data.

EINLEITUNG

Der Ausbau dezentraler, auf erneuerbaren Energien basierender Generatoren führt zu starken zeitlichen Schwankungen in der Stromproduktion, gleichzeitig wird zum Erreichen der Klimaschutzziele eine zunehmende Elektrifizierung der Bereiche Wärme- und Kälteversorgung (z.B. Wärmepumpen) und Mobilität (Elektrofahrzeuge) erwartet. Dies stellt

erhöhte Anforderungen an die Stabilität der Stromnetze, da Erzeugung und Last zu jedem Zeitpunkt im Gleichgewicht sein müssen. Alternativ zu traditionellen Lastmanagement-Maßnahmen (regelbare Backup-Kraftwerke, Abschaltung erneuerbarer Energieerzeuger) besteht die Möglichkeit, flexible Stromverbraucher derart zu regeln, dass sie ihren Verbrauch zeitlich an die Bedürfnisse des Stromnetzes anpassen (Demand-Side-Management). Gebäude mit strombasierter Wärme- und Kälteversorgung können so durch Lastglättung und Lastverschiebung in Zukunft aktiv eine netzdienliche Rolle spielen. Durch die Ausnutzung von Umweltenergie und der Bereitstellung von Wärme auf niedrigem Temperaturniveau, bzw. Kälte auf hohem Temperaturniveau, weisen Wärmepumpen und Kältemaschinen ein hohes Effizienzpotential auf und in Verbindung mit thermischen Speichern zusätzlich ein hohes Lastverschiebepotential. Idealerweise erfolgt die Wärme- und Kälteübergabe mit Niedrigexergiesystemen bei niedrigen Vorlauftemperaturen im Heizbetrieb bzw. hohen Vorlauftemperaturen im Kühlbetrieb, was das Potential einer Lastverschiebung zusätzlich vergrößert. Insbesondere im größeren Leistungsbereich – etwa für die Versorgung von Büro- und Gewerbegebäuden – kann durch Interaktion mit dem elektrischen Versorgungsnetz eine Lastverschiebung durch das effiziente Erzeugen und Zwischenspeichern von Wärme und Kälte ermöglicht werden. Dieser Artikel stellt eine Erweiterung bereits vorhandener Studien über das Netzdienlichkeitspotential einzelner Gebäude (Klein et al. 2016, Klein et al. 2017, Bachseitz & Koenigsdorff 2018) dar.

Das Hauptanliegen dieses Artikels ist die Vorstellung eines Verfahrens zur Bewertung des Netzdienlichkeitspotentials, das ein Gebäude mit strombasierter Wärme- oder Kälteversorgung leisten kann. Beispielhaft wird die Potentialanalyse für ein modernes Laborgebäude mit Mischnutzung durchgeführt. Aufgrund der Möglichkeit zur Nutzung mehrerer Kältequellen, der hohen thermischen Speicherkapazität und der ganzjährigen Kältelast durch Labor- und EDV- Nutzung bietet das Gebäude ein großes Netzdienlichkeitspotential. Dessen exakte Bewertung und die Entwicklung einer netzdienlichen Regelung erfordert ein ausreichend detailliertes, aber

gleichzeitig optimierfähiges Modell der Kälteversorgungsanlagen. Um diese Notwendigkeit zu umgehen, wird ein einfacher, bereits vorhandener heuristischer Lastverschiebungsalgorithmus angewandt, der keine detaillierten Modelle benötigt. Dazu wird der bereits veröffentlichte Algorithmus (Klein et al. 2017) einerseits mittels einfacher Modelle auf den Betrieb mehrerer Kälteversorger und andererseits auf mehrere gleichermaßen wichtige Zielkriterien erweitert. Ein Nachteil der Nutzung der Flexibilitätsoptionen für einen netzdienlichen Betrieb ist der oftmals resultierende Mehrverbrauch elektrischer Energie im Vergleich zu einem effizienzoptimierten Betriebs. Mit dem vorgestellten Verfahren kann dagegen eine gleichzeitig effizienzoptimierte und netzdienliche Regelung mit hohen Kosten- und CO₂-Emissionseinsparungen gefunden werden, die nur einen geringeren Mehrverbrauch bezüglich des effizienzoptimierten Betriebs aufweist.

Im Folgenden wird zuerst das verwendete Bewertungskriterium und die Methodik zur Bestimmung netzdienlicher Betriebsführungsstrategien vorgestellt. Durch den Vergleich der netzdienlichen Betriebsstrategien mit dem auf Messdaten basierenden Realbetrieb und dem simulierten effizienzoptimierten Betrieb wird näherungsweise auf das theoretisch erreichbare Netzdienlichkeitspotential des betrachteten Gebäudes geschlossen.

BEWERTUNG NETZDIENLICHKEIT

Eine Flexibilisierung des Strombezugs von Gebäuden, Demand-Response genannt, kann durch unterschiedliche Zielstellungen motiviert werden:

- Maximierung der Eigenbedarfsnutzung von lokal erzeugtem Strom (z.B. PV), ggf. unter Berücksichtigung zusätzlicher bedingt regelbarer Verbraucher (z.B. Elektrofahrzeuge)
- Anpassung des Strombezugs an Bedürfnisse des Stromnetzes, z.B. in Form zeitvariabler Elektrizitätspreise, Anreiz-/Strafzahlungen oder Sperrzeiten

Wir betrachten die zweite Zielstellung einer hohen zeitlichen Übereinstimmung von (lokaler) Stromerzeugung und (lokalem) Stromverbrauch. Die relative Stromnachfrage kann durch ein Stromnetzreferenzsignal ausgedrückt werden. Der Begriff „Netz“ wird im erweiterten Sinne gebraucht und steht stellvertretend für das vorgelagerte Energiesystem bzw. den Energiemarkt. Die tatsächliche elektrotechnische Auslastung der Übertragungs- und Verteilnetze wird nicht berücksichtigt.

Referenzgrößen Netzdienlichkeit

Zur Beschreibung der aktuellen Situation im Netz werden die vier zeitvariablen Referenzgrößen (Netzsignale genannt) betrachtet, die eine Bewertung der Netzdienlichkeit hinsichtlich verschiedener Kriterien ermöglichen:

- European Energy Exchange Day-Ahead-Strompreis als Börsenstrompreis
- Residuallast
- Anteil der fluktuierenden erneuerbaren Stromerzeuger am Strommix
- Dynamischer CO₂-Emissionsfaktor

Der EEX-Börsenstrompreis ist ein wirtschaftlicher Indikator, der den Marktwert von Strom widerspiegelt (EPEX 2019). Die Residuallast ist definiert als Differenz zwischen aktuellem, nationalem Strombedarf und dem Anteil der fluktuierenden Einspeisung der erneuerbaren Stromerzeuger, d.h. aus nicht steuerbaren Kraftwerken. Sie ist eine technische Größe, die den Bedarf an konventionell erzeugtem Strom aus regelbaren Kraftwerken für die aktuelle Stunde quantifiziert. Je kleiner die Residuallast, desto größer ist der Anteil der Erneuerbaren Energien bezogen auf den Gesamtstrombedarf. Der Verlauf folgt dem des EEX-Preises. Dies ist darauf zurückzuführen, dass in Zeiten mit hoher Residuallast die hohen Stromgestehungskosten konventioneller Kraftwerke die Grenzkosten der Stromerzeugung steigen lassen. Dadurch steigt auch der an Einsatzreihenfolge der Kraftwerke gebundene EEX-Preis.

Der Anteil der fluktuierenden erneuerbaren Stromerzeuger am deutschen Strommix, d.h. Wind und PV, repräsentiert die energiepolitische Sichtweise der Netzdienlichkeit. Aufgrund des hohen Anteils von PV-Anlagen zeigt der Verlauf Parallelen zum Verlauf der Globalstrahlung mit einem Tagesmaximum in der Mittagszeit und einem jahreszeitlichen Trend zu geringeren Spitzenwerten im Herbst und Winter. Der dynamische CO₂-Emissionsfaktor ist abhängig von den stündlichen Anteilen verschiedener Energieträger an der Stromproduktion und beinhaltet damit neben den Primärenergiefaktoren den Anteil Wind/PV im Netz. Mithilfe des CO₂-Emissionsfaktors kann der CO₂-Ausstoß des Betriebs annähernd berechnet werden.

Die in Abbildung 1 und Abbildung 2 gezeigten mittleren Tagesgänge der Netzsignale für die Jahre 2015 und 2019 basieren auf den Daten der Bundesnetzagentur (2018). Die Kurven zeigen sowohl den Einfluss der Jahreszeit als auch der Tageszeit. Verglichen mit dem Jahr 2015 verringert sich der CO₂-Ausstoß und die Residuallast, was eine Konsequenz des gestiegenen Anteils der erneuerbaren Energien am Energiemix ist. Ein netzdienliches Verbrauchsprofil bezüglich des EEX-Preises oder der Residuallast verschiebt den Stromverbrauch in die Frühmorgen- und Mittagsstunden, während es einen Bezug am

Morgen und Abend vermeidet. Bezüglich des Anteils der erneuerbaren Energien oder des dynamischen CO₂-Emissionsfaktors verbraucht ein netzdienlich agierendes Gebäude Strom hauptsächlich zur Mittagszeit.

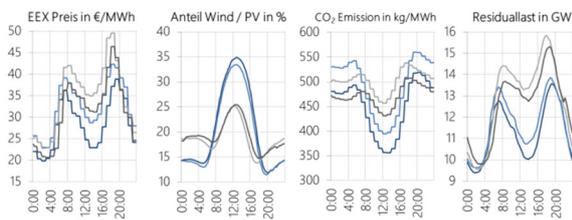


Abbildung 1: Mittlerer Tagesgang der Netzsignale im Frühling (dunkelblau), Sommer (hellblau), Herbst (hellgrau), Winter (dunkelgrau) für das Jahr 2015

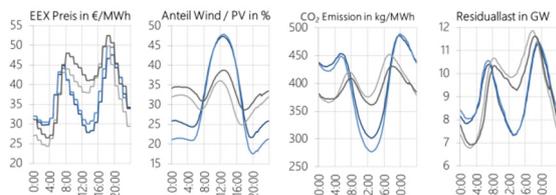


Abbildung 2: Mittlerer Tagesgang der Netzsignale im Frühling (dunkelblau), Sommer (hellblau), Herbst (hellgrau), Winter (dunkelgrau) für das Jahr 2019

Bewertungskriterium

Aus energieökonomischer Sicht kann ein netzdienlicher Betrieb durch Kosten- bzw. CO₂-Einsparungen quantifiziert werden. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt weist der Strompreis einen hohen Fixkostenanteil auf, so dass der Einfluss des variablen Börsenstrompreises jedoch zu gering ausfällt, um die dynamische Nachfragesituation widerzuspiegeln. Als ein über ökonomische Gesichtspunkte hinausgehender Bewertungsmaßstab für die zeitliche Übereinstimmung von lokaler Stromerzeugung und -verbrauch wurde deswegen der „Grid Support Coefficient“ (GSC) (Klein et al. 2016) ausgewählt. Der GSC bewertet das zeitaufgelöste Stromverhaltensverhalten von Gebäuden bezogen auf den Netzsignalverlauf und ist wie folgt definiert:

$$GSC_{abs}(G) := \frac{\sum_{i=1}^n (W_{el}^i \cdot G^i)}{W_{el} \cdot \bar{G}}$$

wobei W_{el}^i und G^i die zeitaufgelösten Werte des Stromverbrauchs bzw. Netzsignals sind, $W_{el} := \sum_{i=1}^n W_{el}^i$ der Gesamtstromverbrauch und $\bar{G} := \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n G^i$ der Durchschnittswert des Netzsignals. In anderen Worten, der Mittelwert des Netzsignals, bei dem das Gebäude Strom bezieht, wird mit dem absoluten (Jahres-)Mittelwert des Netzsignals verglichen. Für eine einheitliche Interpretation wird das Netzsignal so skaliert, dass ein günstiger Strombezug einem geringen Wert entspricht. Ein netzdienlicher Verbraucher, der seinen Strom zu Zeiten mit geringem Netzsignalwert bezieht,

entspricht einer Kennzahl $GSC_{abs}(G) < 1$. Ein netzadverser Verbraucher resultiert in $GSC_{abs}(G) > 1$, während der netzneutrale Bezug zum mittleren Netzsignalwert einem Wert von $GSC_{abs}(G) = 1$ entspricht.

BESTIMMUNG EINER NETZDIENLICHEN BETRIEBSWEISE

Im Folgenden wird eine einfache Methode beschrieben, eine annähernd optimale, netzdienliche Betriebsstrategie für die Kälte- bzw. Wärmeversorgung eines Gebäudes bestehend aus einer oder mehrerer Anlagen zur Kälte- bzw. Wärmeerzeugung und thermischen Speichern zu bestimmen. Die Berechnung erfolgt ausgehend von einem vorhandenen Lastprofil für den Kälte- bzw. Wärmebedarf des Gebäudes. Nach der Bestimmung einer netzdienlichen Strategie und Bewertung mit einem Bewertungskriterium kann eine Aussage über das Netzdienlichkeitspotential der Anlage getroffen werden. Ein detaillierter Regelungsentwurf, der Einsatz von Simulationssoftware und eine exakte Modellierung des thermischen Verhaltens der Erzeuger sind nicht notwendig. Im Folgenden wird vereinfachend nur die Kälteversorgung betrachtet.

Vorgehensbeschreibung

1. Bestimmung eines möglichst netzdienlichen thermischen Bezugsverhaltens

Durch Anwendung eines heuristischen Algorithmus wird der auf das Netzsignal optimierte Jahresgang der thermischen Leistung der Kältebereitstellung wie folgt bestimmt.

a. Modellierung der Speicherbeladung

Um den Speicherfüllstand abzubilden, wird der Kältespeicher als einfaches Ein-Knoten-State-Of-Charge (SOC) Modell basierend auf der Annahme eines ideal durchmischten Speichers modelliert. Durch diese Näherung lässt sich der SOC des Speichers aus der Temperaturdifferenz zwischen Speichertemperatur und Vorlauftemperatur des Kältekreises, der Dichte und Wärmekapazität des Speichermediums und dem Volumen berechnen. Der Speicher ist vollständig entladen ($SOC = 0$), wenn die Speichertemperatur der Vorlauftemperatur des Kältekreises entspricht und komplett beladen ($SOC = SOC_{lim}$) wenn die definierte Grenztemperatur erreicht wird.

b. Bestimmung der thermischen Maximalleistung

Bei der Betrachtung mehrerer Kälteerzeuger oder Kälteerzeuger mit modulierbarer Leistung muss beachtet werden, dass die Kälteerzeuger abhängig von der Umgebungstemperatur und dem aktuellen Kältebedarf möglichst nahe an der jeweils optimalen thermischen Leistung betrieben werden. Die entsprechenden Regeln – z.B. welcher Erzeuger mit welcher maximalen thermischen Leistung bei welcher

Umgebungstemperatur bevorzugt eingesetzt werden – müssen zuvor aufgestellt werden.

c. Lastverschiebungsalgorithmus

Der in Klein et al. (2017) verwendete Greedy Algorithmus berechnet die optimierte Verteilung der Betriebszeiten der Erzeugung bezüglich eines Referenzsignals. Dabei wird der Speicher einerseits gemäß Lastgang entladen und andererseits iterativ bei günstigem Netzsignal gezielt mit der zuvor berechneten maximalen thermischen Leistung beladen, so dass die Anforderungen an den Speicherzustand ($0 < \text{SOC} < \text{SOC}_{\text{lim}}$) in jedem Zeitpunkt erfüllt sind. Das beschriebene Verfahren wird so lange wiederholt, bis der SOC das ganze Jahr über positiv ist, also eine unterbrechungsfreie Kälteversorgung gewährleistet ist. Mathematisch wird diese Methodik als Greedy Algorithmus bezeichnet, da der Algorithmus jeweils nur lokal im sich sukzessive nach hinten verschiebenden Beladeintervall den Zeitschritt mit dem günstigsten Netzsignal sucht, siehe Abbildung 3. Dies stellt keine global optimale netzdienliche Strategie dar, eignet sich aber gut für eine einfache Abschätzung.

Um thermische Verluste zu berücksichtigen, kann die gemessene Zeitreihe der Leistung des Kälteverteilers mit den abgeschätzten thermischen Verlusten beaufschlagt werden.

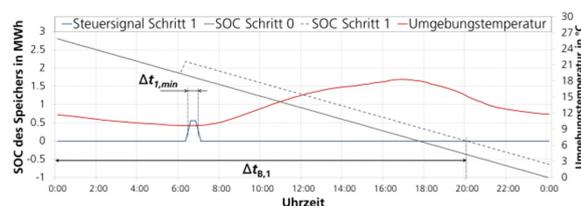


Abbildung 3: Ein Berechnungsschritt des Greedy Algorithmus für temperaturoptimierten Betrieb. Verlauf des SOC des Speichers (grau), Verlauf des SOC nach Beladung im Zeitschritt $\Delta t_{1,min}$, Umgebungstemperatur (rot) und neues Beladeintervall

d. Kombination mehrerer Zielkriterien

Mehrere Zielkriterien, z.B. Netzdienlichkeit hinsichtlich unterschiedlicher Kriterien und gleichzeitig Energieeffizienz, werden durch eine Konvexkombination der Netzsignale in den Lastverschiebungsalgorithmus integriert. Dabei sind unterschiedliche Gewichtungen möglich.

2. Bestimmung des zugehörigen elektrischen Bezugsverhaltens

Das zugehörige elektrische Bezugsverhalten kann vereinfachend mit einem konstanten COP aus dem thermischen Bezugsverhalten bestimmt werden. Da die Effizienz der Kälteversorgungsanlagen von der jeweiligen Temperaturspreizung bzw. Umgebungstemperatur abhängt, erhält man genauere Ergebnisse, wenn diese Abhängigkeit mittels einfacher Modelle berücksichtigt wird. Da aufgrund der hohen Komplexität eine physikalische

Modellbildung ungeeignet ist, wird der empirisch oder aus Herstellerdaten ermittelte Zusammenhang zwischen dem Wirkungsgrad und der Umgebungs-, bzw. Vorlaufumgebungstemperatur der Bildung des Black-Box-Modells zugrunde gelegt, z.B. in Form einer linearen Abschätzung. Diese wird auf das thermische Bezugsverhalten angewandt. Um bei mehreren Kälteerzeugern zu entscheiden, welcher eingesetzt wird, kann wieder auf einen vorhandenen Regelsatz zurückgegriffen werden.

ANWENDUNG AUF DAS DEMONSTRATORGEBÄUDE

Bei dem betrachteten Gebäude auf dem Campus des Fraunhofer ISE in Freiburg handelt es sich um einen 2011 fertig gestellten Laborneubau mit einer Energiebezugsfläche von 3990 m² (Abbildung 4).



Abbildung 4: Demonstrationsgebäude Laborneubau

Vorstellung Kälteversorgungs-konzept

Die in Abbildung 5 schematisch dargestellte niederexergetische Kälteversorgung basiert auf einer luftgekoppelten Kompressionskältemaschine (KKM) und einem hybriden Kühlturm mit einer maximalen Leistung von jeweils 500 kW_{th} und 566 kW_{th}. Die KKM ist stufenlos regelbar durch einen Frequenzumrichter und ermöglicht effiziente Anlaufvorgänge und hohe Wirkungsgrade im Teillastbereich bei einer thermischen Leistung von 100 und 200 kW_{th}. Der Kühlturm dient einerseits zur Abfuhr der Verlustwärme der KKM, andererseits kann er bei geringen Außentemperaturen zur direkten Kühlung genutzt werden. Bei Umgebungstemperaturen unter 11,1°C erfolgt der Wärmeübergang an die Umgebung über freie Konvektion. Durch die Zuschaltung regelbarer Ventilatoren und die Freigabe von Benetzungspumpen zur Verdunstungskühlung ist der Einsatz des Kühlturms für die freie Kühlung laut Herstellerangaben abhängig von der Luftfeuchtigkeit bei Außentemperaturen bis zu 20°C möglich. Diese Möglichkeit wurde im Messzeitraum allerdings nicht umgesetzt.

Die Kälteverteilung mit Vorlaufumgebungstemperatur des Kältekreises von 18°C ist über einen Wärmeträger hydraulisch von den restlichen Komponenten des Systems getrennt. Sie dient zur Versorgung der fünf in Abbildung 5 aufgelisteten

Kältekreise, sowohl für die Klimakälteversorgung des Gebäudes als auch für die Kühlung des Serverraums und zur Prozesskälteversorgung der Labore.

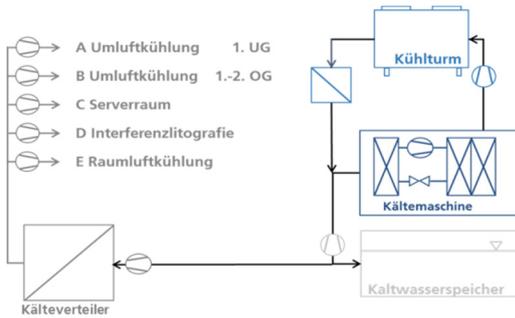


Abbildung 5: Schematische Darstellung der Kälteversorgung des Laborgebäudes

Für die Laborarbeitsvorgänge ist eine unterbrechungsfreie Kälteversorgung unabdingbar. Um diese sensiblen Prozesse nicht zu beeinflussen und Lastschwankungen ausgleichen zu können, wurde ein 500m³ Kaltwasserspeicher als Puffer für die Kälteversorgung konzipiert, der in Form eines abgedichteten Raumes im 2. Untergeschoss des Gebäudes integriert wurde. Dieser groß dimensionierte Speicher bringt energetische und ökonomische Vorteile sowie gewisse regelungstechnische Freiheitsgrade mit sich. Durch intelligentes Energiemanagement könnten beispielsweise Lastspitzen zur Mittagszeit aus dem Speicher gespeist werden, ohne die KKM bei hohen Außentemperaturen und daraus resultierendem niedrigem Wirkungsgrad in Betrieb nehmen zu müssen. Aus der zeitlichen Entkopplung von Kälteabnahme und -bereitstellung ergibt sich ein hohes Lastverschiebungspotential, das sowohl für eine wirkungsgradtechnische Optimierung als auch für einen netzdienlichen Betrieb der Komponenten genutzt werden kann.

Messdatenbasierte Betriebsanalyse

Das Gebäude weist eine Mischnutzung (Labor, Werkstatt, Büro, Konferenz) auf. Abgesehen vom ganzjährig nahezu konstanten Kälteverbrauch des Serverraums sind die Kältelasten wie in Abbildung 6 witterungs- und jahreszeitenabhängig.

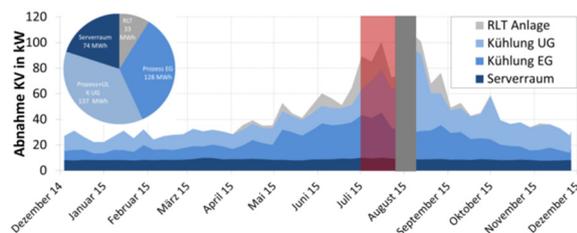


Abbildung 6: Jahresgang des Kälteverteilers gestapelt nach Einzelverbrauchern (rot: Störbetrieb, grau: Ausfall der Messtechnik); Kältemengen der Einzelverbraucher im Kreisdiagramm

Die Betriebsanalyse auf Basis der Messdaten für das Jahr 2015 ergab, dass der gemessene Kälteverbrauch

deutlich unter den in der Auslegungsphase angenommenen Werten liegt. Ein Grund hierfür ist, dass der geplante Anschluss an das Nahkältenetz, dessen Zweck unter anderem die Ausnutzung des Netzdienstleistungspotentials des betrachteten Gebäudes ist, noch nicht erfolgt ist. Auch der für einen höheren Bedarf ausgelegte Kaltwasserspeicher mit Speicherkapazität von ca. 2,8 MWh kann aufgrund des geringen Verbrauchs die mittleren Kältelasten rund zwei (im Sommer) bis vier (im Winter) Tage lang decken. Jahreszeitenabhängig ergeben sich gemessene Speicherverluste von 6,9% bis 9,2%.

Rund ein Drittel der erzeugten Kältemenge entfällt auf die Freie Kühlung, zwei Drittel auf die Kompressionskältemaschine. Die Energieeffizienz der Kältebereitstellung – insbesondere die der Freien Kühlung – hängt, wie in Abbildung 7 zu erkennen, stark von der Umgebungstemperatur ab. Wird die Freie Kühlung im Parallelbetrieb mit der KKM zum Vorkühlen des Fluids genutzt, erhöht sich die Energieeffizienz der KKM, bleibt jedoch unter den Werten der Freien Kühlung.

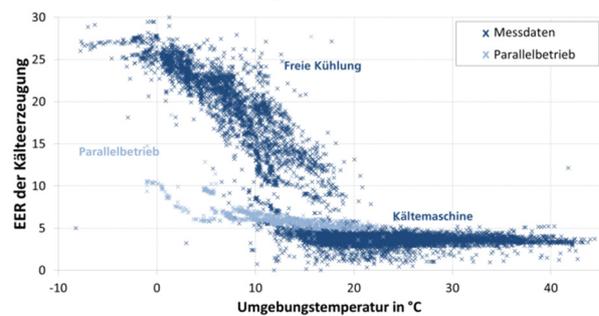


Abbildung 7: Temperaturabhängigkeit des EER der Kälteversorgungsanlagen

Modellbildung

Die thermische Leistung und der EER der Freien Kühlung hängen von der Umgebungstemperatur ab. Für den Temperaturbereich zwischen -3°C und 12°C kann aus der Punktwolke in Abbildung 7 der lineare Zusammenhang als Regressionsgrade empirisch ermittelt werden:

$$EER_{FK}(T_U) = -0,7986 \cdot T_U + 25,873$$

Die Modellgleichungen des Kühlturms resultieren aus der Näherung des EER und der maximalen Leistung:

$$zu: P_{el,FK}(T_U, \dot{Q}_{FK}) = \begin{cases} \frac{\dot{Q}_{FK}}{EER_{FK}(T_U)} & \text{für } T_U < 11,1^\circ C \\ 12,4 \text{ kW} & \text{für } T_U > 11,1^\circ C \end{cases}$$

Bei Temperaturen über 11,1°C läuft der zweipunktgeregelte Kühlturm mit seiner maximalen elektrischen Leistung von 12,4 kW_{el}. Zur Validierung kann der auf Basis der Modellgleichungen berechnete Jahresenergiebedarf der Freien Kühlung mit dem gemessenen Energiebedarf verglichen werden. Es ergibt sich über das Jahr gesehen eine Abweichung von 4,4% zwischen dem gemessenen und berechneten Energiebedarf.

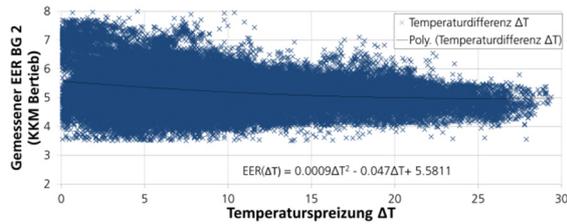


Abbildung 8: Kältemaschinenbetrieb über Temperaturspreizung und Regressionskurve

Das Modell für den Kältemaschinenbetrieb umfasst sowohl die Rückkühlung des Kühlturms als auch die KKM, hier nach dem Bilanzgrenzenverfahren mit BG2 bezeichnet. Es basiert auf dem Zusammenhang zwischen dem EER des Systems und der Temperaturspreizung ΔT zwischen Umgebungs- und Verdampfertemperatur, siehe Abbildung 8. Messwerte sowie die Approximation durch ein Polynom zweiten Grades ergeben die folgende Regressionskurve:

$$EER_{KKM}(\Delta T) = 0,0009 \cdot \Delta T^2 - 0,047 \cdot \Delta T + 5,811$$

Für das Modell ergibt sich über das Jahr gesehen eine Abweichung von 7,5%.

Integration von Freier Kühlung und Kältemaschine

Das Flussdiagramm in Abbildung 9 zeigt das Konzept, nachdem die maximale thermische Leistung berechnet wird, welche später in den Greedy Algorithmus eingebunden wird.

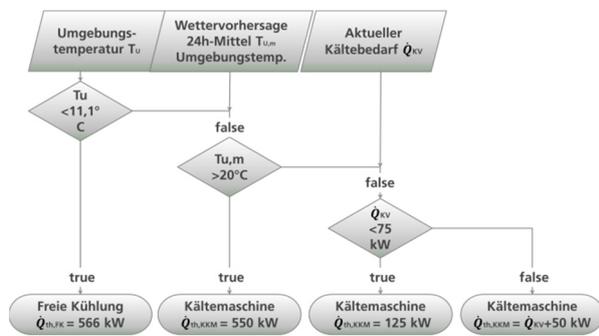


Abbildung 9: Regelschema zur Integration von Freier Kühlung und Kältemaschine

Berechnung Netzdienstlichkeitspotentiale

Um das Netzdienstlichkeitspotential des Laborgebäudes zu bewerten, werden im ersten Schritt die netzdienstlichen Kälteversorgungsstrategien berechnet und anschließend bezüglich verschiedener Kriterien ausgewertet. Aufgrund der Korrelation sowohl zwischen Residuallast (RES) und EEX-Preis als auch zwischen dem Anteil der Erneuerbaren Energien (Anteil EE) und dynamischen CO₂-Emissionsfaktor, wird nur die nach der Residuallast und die nach dem Anteil Erneuerbaren Energien optimierte Strategie berechnet. Als Datenbasis für die Netzsignale wird das Jahr 2019 ausgewählt, dessen Verlauf in Abbildung 2 dargestellt ist. Um die entstehenden Stromkosten für

die Kälteversorgung realistisch abzubilden, wird zusätzlich zum dynamischen EEX-Preis ein invarianter Fixkostenanteil von 20 Cent/kWh_{el} hinzuaddiert. Der energieeffiziente Betrieb wird mit dem gleichen Algorithmus durch Optimierung auf die günstigste Umgebungstemperatur berechnet.

Der berechnete Kälteversorgungsbetrieb für eine Sommer- und eine Frühlingswoche ist in Abbildung 10 und Abbildung 11 dargestellt.

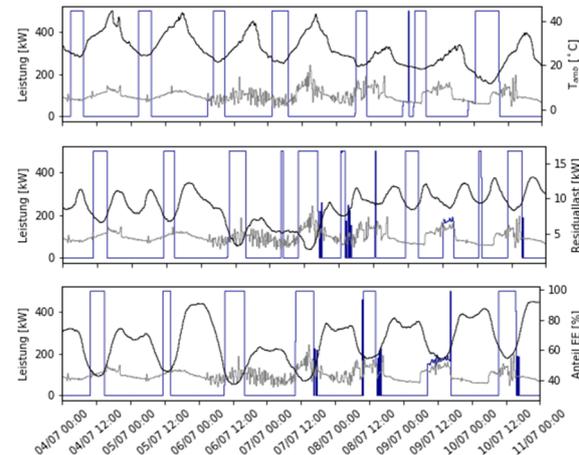


Abbildung 10: Kälteversorgung Sommerwoche optimiert nach Energieeffizienz (oberes Diagramm), RES (mittleres Diagramm) und Anteil EE (unteres Diagramm) mit zugehörigen Netzsignalen

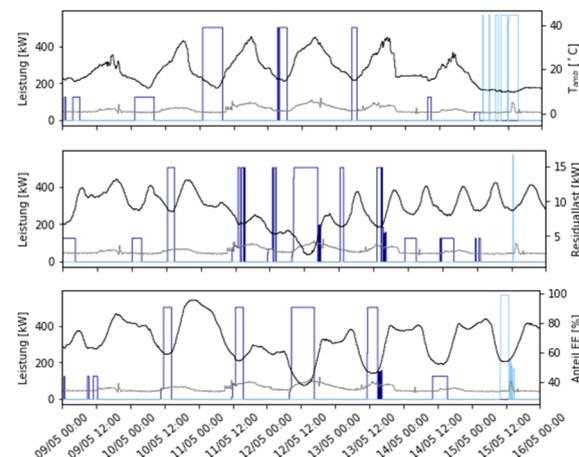


Abbildung 11: Kälteversorgung Frühlingswoche durch KKM (dunkelblau) und Freie Kühlung (hellblau) optimiert nach Energieeffizienz (oberes Diagramm), RES (mittleres Diagramm) und Anteil EE (unteres Diagramm) mit zugehörigen Netzsignalen

Während der energieeffiziente Betrieb den Speicher immer nachts auflädt, geschieht dies im netzdienstlichen Anteil EE-optimierten Betrieb immer mittags. Der netzdienstliche RES-optimierte Betrieb lädt den Speicher vorrangig auch zur Mittagszeit und teilweise nachts. In der kühleren Frühlingswoche setzt die energieeffiziente Betriebsweise die Freie Kühlung wann immer möglich zur Kälteversorgung ein. Bei den netzdienstlichen Strategien ist dies deutlich seltener

der Fall. Die warme Sommerwoche mit hohen Temperaturen nachts verhindert einen alleinigen Kühlturbetrieb da dieser in der Gebäuderegulierung nur bis zu einer Temperatur von 11,1°C umgesetzt wurde.

Die Ergebnisse sind in Tabelle 1 ausgewertet. Der Realbetrieb (Spalte 1) und der energieeffiziente Betrieb (Spalte 2) zeigen ein netzneutrales Bezugsverhalten hinsichtlich aller Referenzgrößen. Die nichtoptimierte Regelung des Realbetriebs setzt die Freie Kühlung nur wenig zur alleinigen Kälteversorgung ein und hat einem hohen Stromverbrauch, Gesamtkosten und CO₂-Ausstoß. Durch eine Optimierung des Bezugsverhaltens auf die Umgebungstemperatur wird im energieeffizienten Betrieb die Freie Kühlung (Spalte 2) möglichst viel eingesetzt um den Speicher nachts zu laden. Dadurch sinken Stromverbrauch, die abgeschätzten Stromkosten und CO₂-Ausstoß signifikant um jeweils 32%, 24% und 16%. Die auf die Netzreferenzgrößen RES (Spalte 3) und Anteil EE (Spalte 4) optimierten netzdienlichen Strategien führen zu Strom- und Kosteneinsparungen von 4-12% gegenüber dem Realbetrieb. Bei den CO₂-Emissionen sparen dagegen die netzdienlichen Betriebsweisen mit ca. 30% fast doppelt so viel wie der energieeffiziente Betrieb gegenüber dem Realbetrieb.

Das Netzdienlichkeitspotential des Gebäudes zeigt sich nach Auswertung des vorgestellten Bewertungskriteriums. Die beiden netzdienlichen Betriebsstrategien können die Netzdienlichkeit des Gebäudes signifikant steigern, je nach Strategie und Netzsignal um ca. 20-30%. Für die netzdienliche RES-optimierte Strategie bedeutet dies z.B., dass der Strom im Mittel zu einem 32% netzdienlicheren Wert der Residuallast als der Durchschnitt bezogen wird ($GSC(RES)=0,68$). Auch hinsichtlich aller anderen Netzsignale verbessert sich die Netzdienlichkeit erheblich.

In der RES-optimierten netzdienlichen Regelung wird gleichzeitig der EEX-Börsenstrompreis minimiert. Der geringe variable Kostenanteil hat durch die hohen Fixkosten allerdings nur wenig Einfluss auf die Gesamtkosten. Ein Vergleich zeigt, dass die netzdienlichen Regelungen (Spalte 3 und 4) im konkreten Fall des untersuchten Objekts einen signifikanten Mehrverbrauch im Vergleich zur effizienzoptimierten Regelung verursachen. Solche Effizienzeinbußen sollten bei der Nutzung von Flexibilitätsoptionen für einen netzdienlichen Betrieb nach Möglichkeit aber nur in geringem Maße auftreten. Die Ziele „Netzdienlichkeit hinsichtlich Residuallast“ und „Energieeffizienz“ sind für eine Kälteversorgung mit luftgekoppelter Kältemaschine und Freier Kühlung jedoch bereits heute gut vereinbar, wie die kombinierte Betriebsstrategie (Spalte 5) zeigt. Dies resultiert daraus, dass der geringste Börsenstrompreis in den Morgenstunden erzielt wird,

in denen auch die stark temperaturabhängigen Erzeuger aufgrund der niedrigen Außenlufttemperaturen ihre maximale Effizienz erreichen. Andere Ziele, wie die Netzdienlichkeit hinsichtlich des Anteils der Erneuerbaren Energien, die den Stromverbrauch in der Mittagszeit erhöhen, gehen mit großen Effizienzeinbußen einher. Aus diesem Grund ist eine solche kombinierte Regelung aus energetischer Sicht nicht ratsam. Eine kombinierte Regelung (Spalte 6) aus allen drei Zielstellungen „Netzdienlichkeit hinsichtlich Residuallast und Anteil der Erneuerbaren Energien“ und „Energieeffizienz“ ist dagegen empfehlenswert, insbesondere da sie für alle Netzreferenzgrößen eine gleichermaßen netzdienlich ist.

FAZIT UND AUSBLICK

In diesem Artikel wurde eine einfache Methode beschrieben, das Netzdienlichkeitspotential der Kälte- bzw. Wärmeversorgung eines Gebäudes zu bestimmen. Ein detaillierter Modell- und Regelungsentwurf ist nicht notwendig. Die Methodik erlaubt sowohl die Betrachtung mehrerer alternativer Wärme- oder Kälteerzeuger als auch die Berücksichtigung mehrerer gleichermaßen wichtiger Zielkriterien. Die Berechnung wurde beispielhaft anhand eines modernen Laborgebäudes mit Mischnutzung gezeigt. Das Demonstrationsgebäude bietet aufgrund der für einen höheren Verbrauch ausgelegten Kälteerzeuger, dem ganzjährigen Kühlbedarf als auch dem großen Wasserspeicher ein großes Effizienzsteigerungs- und Netzdienlichkeitspotential. Die Berechnungen ergaben, dass durch eine gezielte Beeinflussung der Stromlast in Abhängigkeit der Netzreferenzgrößen „Residuallast“ und „Anteil der Erneuerbaren Energien am Strommix“ der Strom im Mittel zu einem 10% bis 30% günstigerem Wert hinsichtlich der Netzsignale bezogen wird. Um einen hohen Mehrverbrauch und Effizienzeinbußen zu verhindern, wurden zwei kombinierte Regelungen berechnet. Gegenüber dem energieeffizienten Betrieb führen diese nur zu einem geringen Mehrverbrauch. Gegenüber dem auf Messdaten basierenden Realbetrieb resultieren sie dagegen in hohe Energie- und CO₂-Emissionseinsparungen. Insbesondere die Ziele „Netzdienlichkeit hinsichtlich Residuallast“ und „Energieeffizienz“ sind für eine Kälteversorgung mit luftgekoppelter Kältemaschine und Freier Kühlung gut vereinbar. Perspektivisch ist der Anschluss des betrachteten Gebäudes an ein intelligentes Nahkältenetz geplant. Mit dem großen ermittelten Lastverschiebepotential soll das Gebäude den netzdienlichen und energieeffizienten Betrieb innerhalb des Labor- und Bürogebäudeverbundes unterstützen.

Tabelle 1: Vergleich Realbetrieb mit simulierten energieeffizienten (EFF) Betrieb mit netzdienlichen Betrieb (optimiert nach Residuallast (RES) und Anteil Erneuerbarer Energien (EE) bzw. Kombination)

	REAL-BETRIEB	EFFIZIENZ OPT.	RES OPT.	Anteil EE OPT.	EFF+RES OPT.	EFF+Anteil EE+RES OPT.
Kälteenergie [MWh_{el}]						
Kältemaschine	290,2	188,5	255,7	270,3	215,1	247,5
Freie Kühlung	124,4	232,6	165,3	150,7	206,0	173,4
Strombezug [MWh_{el}]						
Kältemaschine (BG2)	55,2	35,7	48,7	51,6	40,9	47,2
Freie Kühlung	5,9	10,5	7,9	7,3	9,7	8,2
Gesamt	61,0	46,1	56,6	58,9	50,6	55,4
Vgl. mit Realbetrieb		-32%	-8%	-4%	-21%	-10%
Vgl. mit Effizienzbetrieb	+24%		+19%	+22%	+9%	+17%
JAZ						
Kältemaschine (BG2)	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3
Freie Kühlung	21,3	22,2	21,0	20,6	21,2	21
Gesamt	6,8	9,1	7,4	7,1	8,3	7,9
Netzdienlichkeit						
Gesamtkosten [€]	14481	10956	12737	13436	11432	12544
Vgl. mit Realbetrieb		-24%	-12%	-7%	-21%	-13%
Vgl. mit Effizienzbetrieb	+32%		+16%	+23%	+4%	+14%
CO ₂ -Emission [t]	23902	19958	16536	16174	17071	15311
Vgl. mit Realbetrieb		-16%	-31%	-32%	-28%	-36%
Vgl. mit Effizienzbetrieb	+19%		-18%	-19%	-14%	-24%
GSC _{abs} (RES)	0,99	1,03	0,68	0,74	0,73	0,70
GSC _{abs} (EEX)	0,98	0,99	0,67	0,75	0,69	0,70
GSC _{abs} (Anteil EE)	0,99	1,10	0,82	0,75	0,93	0,77
GSC _{abs} (CO ₂)	0,99	1,08	0,73	0,69	0,85	0,69

DANKSAGUNG

Das Projekt FlexControl wurde unter dem Förderkennzeichen 03ET1359A mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie gefördert.

LITERATUR

Bundesnetzagentur. 2018. SMARD – Strommarktdaten. Online abrufbar unter <https://www.smard.de/page/home/marktdaten/>.

Bachseitz, M., Koenigsdorff, R. 2018. Modellprädiktiver, netzdienlicher Betrieb von Supermärkten, BauSIM.

EPEX SPOT Day-Ahead-Preise. 2019. Online abrufbar unter <http://www.epexspot.com/de/marktdaten/dayaheadauktion>.

Klein, K., Langner, R., Kalz, D., Herkel, S., Henning, H.-M. 2016. Grid support coefficients for electricity-based heating and cooling and field data analysis of present-day installations in Germany, Applied Energy 162: 853-67.

Klein, K., Herkel, S., Henning, H.-M., Felsmann, C. 2017. Load shifting using the heating and cooling system of an office building: quantitative potential evaluation for different flexibility and storage options, Applied Energy 203: 917-37.