

Smart Buildings

Einsatz von ICT in Gebäuden zur Steigerung der Energieeffizienz

Dominik Blunschy
Departement für Informatik, ETH Zürich
bldomini@student.ethz.ch

Zusammenfassung

Im Bereich der Gebäudenutzung besteht heutzutage zweifelsohne grosses Energiesparpotential. Heizung, Belüftung, Kühlvorrichtung sowie viele elektrische Haushaltsapparaturen verbrauchen einen Grossteil der weltweit umgesetzten Energie. Sparpotential besteht einerseits darin, den Energieverbrauch möglichst gering zu halten, wenn sich keine Menschen in den Gebäuden befinden. Andererseits ebenfalls bei der Benutzung, indem auf einen intelligenten Verbund aller Geräte gesetzt wird. ICT¹ ermöglicht hier die Automatisierung und Kontrolle sämtlicher energiekonsumierenden Geräte. Ebenfalls kann die optimale Nutzung der Umgebung und der äusseren Bedingungen eines Gebäudes, zum Beispiel durch Einsatz von Tageslicht, Solar- oder Windkraft, einen grossen Teil der verbrauchten Energie einsparen oder selber produzieren. Dies vermindert auch CO_2 -Emissionen und trägt zum Klimaschutz bei. Vorausschauende Regelung kann hier ebenfalls einen Anteil dazu liefern, mit ICT intelligente, kontrollierte und energieeffiziente Gebäude zu schaffen.

¹Abkürzung für „Information and Communication Technologies“ (Informations- und Kommunikationstechnologien)

1 Einführung

Verschiedenste Formen von Energiekonsum verbinden sich bei der Benutzung von Gebäuden. Sei es in Privathaushalten, in grossen Firmenkomplexen und Fabriken oder Freizeitanlagen - einen grossen Teil seines Lebens verbringt der Mensch in Gebäuden, deren Bewohnung und Benutzung eine grosse Menge an Energie benötigt. Dabei muss man zwischen verschiedenen Formen von verwendeter Energie unterscheiden. Einerseits wird Heizenergie verbraucht, andererseits bildet auch elektrischer Strom eine grosse Teilmenge des Energieverbrauchs.

Diese Ausarbeitung soll aufzeigen, warum eine intelligente Energienutzung vor allem in kommerziellen Gebäuden so eminent wichtig ist. Zudem soll sie einen Überblick über heutige Technologien, realitätsnahe Zukunftsvisionen und Ziele verschaffen und zeigen wie weniger Energie verbraucht oder die verbrauchte Energie umweltschonender und effizienter verwendet werden kann. Gerade dieser Widerspruch zwischen geringerem Energiekonsum und einem umweltschonenderen und effizienteren Einsatz der Energie bildet dabei einen äusserst interessanten Diskussionspunkt.

1.1 Fakten über Gebäude

Dass bei Gebäuden nicht nur enormes Sparpotential hinsichtlich des Energiekonsums, sondern auch bezüglich der Umweltbelastung vorhanden ist, wird von einigen Zahlen verdeutlicht: Rund 40% des weltweiten Energiekonsums werden durch Gebäude verursacht, welche somit für etwa 33% aller globalen CO_2 -Emissionen verantwortlich sind [1].

Dabei verbrauchen vor allem Heizung, Kühlung, Belüftung und elektrisches Licht eine Menge Energie. Und hier kann ICT eine Reihe von innovativen Möglichkeiten bieten, solche Systeme innerhalb von Gebäuden intelligent zu verwalten.

Laut dem „Smart 2020“-Bericht, welcher sich die Entwicklung zu einer emissionsarmen Wirtschaft zum Ziel setzt, wären bis ins Jahr 2020 mit „Smart Building“-Technologien Einsparungen von bis zu 1.68 $GtCO_2e^2$ möglich. Diese Einsparungen entsprächen etwa einem Wert von 340.8 Milliarden US-Dollar. In Nordamerika würde dies schätzungsweise 15% aller Gebäude-Emissionen entsprechen [7].

1.2 Definition von „Smart Buildings“

Der „Smart 2020“-Bericht liefert anhand von 5 Begriffen eine schöne Definition für den Begriff „smart“. Zusammenfassend sollen diese als Hauptaktionen eines intelligenten Einsatzes von ICT in Gebäuden dienen. Werden diese Punkte umgesetzt, kann von intelligenten Gebäuden gesprochen werden [7]:

- „Standardize“: Standardisieren. Es soll für smarte Gebäude festgelegt werden, wie Informationen über Energiekonsum und Emissionen in Produkten und Systemen der ICT eingesetzt werden können.
- „Monitor“: Überprüfen. Die Daten sollen in Echtzeit abrufbar und somit überwachbar sein, um die Energieeffizienz steigern zu können.
- „Accountability“: Verantwortung. Mittels Netzwerk-Diensten soll beispielsweise der gesamte Energiekonsum sowie Emissionen berechnet werden können und der Konsument in Verantwortung gezogen werden.

²steht für Gigatonnen CO_2 -äquivalente Emissionen

- „Rethink“: Überdenken. Durch diese Informationen soll der Konsument sensibilisiert werden und bewusster mit Energie umgehen.
- „Transformation“: Wandlung. Dies soll letztlich zu einem Wandel unseres Umgangs mit Energie im Alltag führen.

1.3 Motivation

Die Rolle von kluger ICT in Gebäuden ist stark von der weiteren Entwicklung des Smart-Grid, staatlichen und internationalen Programmen zur Förderung der Energieeffizienz und der intensiven Forschung in diesem Gebiet abhängig. Sie hat aber in Zukunft potentiell grossen Einfluss in den Bemühungen, der globalen Klimaerwärmung entgegenzuwirken.

Abbildung 1 zeigt den Anteil von verschiedenen Geräten oder Diensten am Gesamtstromverbrauch in kommerziellen Gebäuden in den USA im Jahr 2008. Das Diagramm kann einen Anhaltspunkt liefern, wo wieviel elektrischer Strom in Gebäuden verbraucht wird und eventuell Einsparungen gemacht werden könnten.

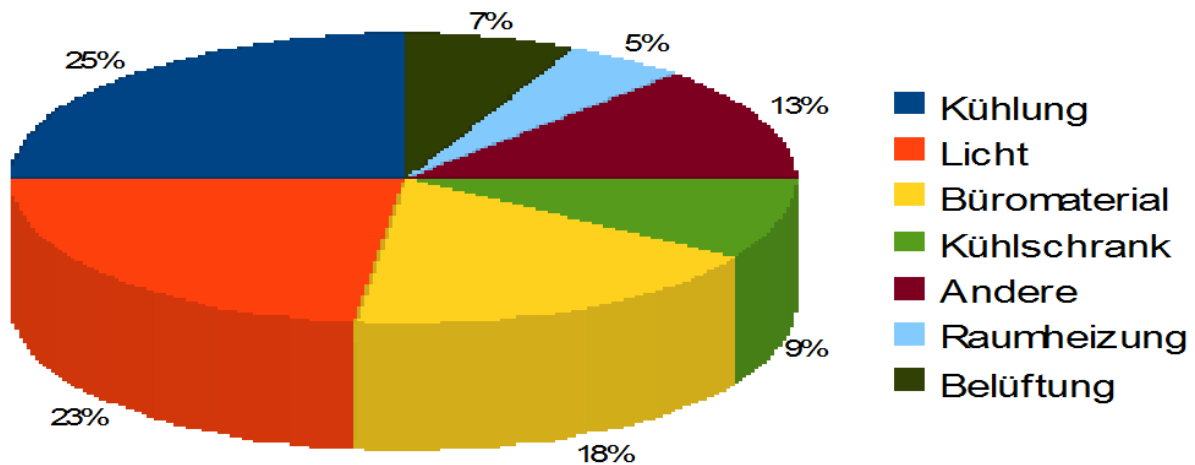


Abbildung 1: Stromverbrauch in kommerziellen Gebäuden [2]

Natürlich bildet der Stromverbrauch nur eine Teilmenge der umgesetzten Energie von Gebäuden. Ebenfalls muss man beachten, dass ein Schnitt über eine solch grosse Region wie die USA einzelne lokale Höchstwerte relativiert. Zum Beispiel sieht es in Kalifornien völlig anders aus als in Alaska. Dennoch bietet die Grafik eine gute Übersicht. Es ist ersichtlich, dass Kühlung und Licht zusammen fast die Hälfte des gesamten Stromverbrauchs von kommerziellen Gebäuden in den USA ausmachen. Ebenfalls ein grosser Teil fliesst in die aufgewendete elektrische Energie für Büromaterial.

2 Die momentane Situation: Gebäudeautomatisierung und -kontrolle

Gebäudeautomatisierungssysteme, welche Kontrolle über die gesamte Umgebung eines Raumes oder eines ganzen Hauses bieten, sind besonders dann interessant, wenn sie zur Einsparung von Energie und somit zur Kostenreduktion beitragen.

Abbildung 2 zeigt einen Überblick über die Funktionalitäten solcher Systeme:

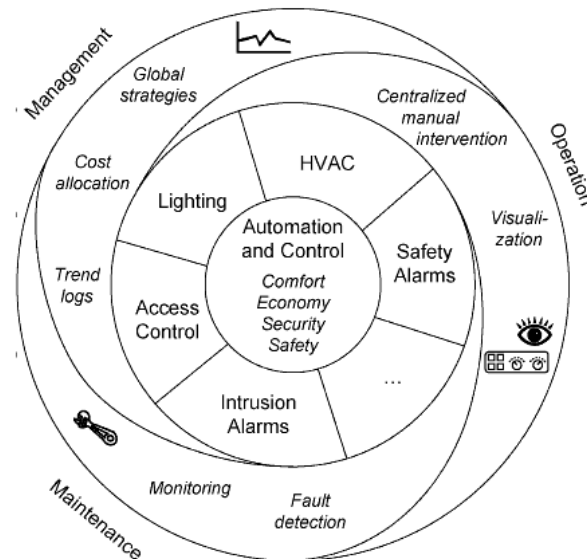


Abbildung 2: Funktionale Aspekte von Gebäudeautomatisierungssystemen [8]

Man sieht welche energiekonsumierenden Geräte überhaupt alles in Gebäuden kontrolliert und automatisiert werden können. Es sind dies Heizung und Kühlung von Gebäuden, aber auch die Belüftung (vor allem in fensterlosen Räumen ist diese sehr wichtig). Weiter kommen die künstlichen Lichtquellen und sämtliche Sicherheitssysteme wie Alarmanlagen dazu. Und schliesslich noch einfach alle Geräte, die über Steckdosen elektrischen Strom beziehen. Wenn wir es schaffen, das Zusammenspiel all dieser Komponenten möglichst effizient zu gestalten, kann viel Energie gespart werden.

Da mit der grossen Vielfalt an solchen Infrastrukturen und Kontrollmechanismen eine gewisse Diversität herrscht, ist es wichtig, einheitliche Standards einzuführen, um die Integration von energiesparenden Systemen zu vereinfachen.

2.1 Relevante Standards

Kastner et al. stellen drei offene Systeme vor, welche weit verbreitet als komplette Systemlösung zur Gebäudeautomatisierung eingesetzt werden [8]:

- BACnet³: Dabei handelt es sich um ein Protokoll, das dafür entwickelt wurde, Gebäudeautomatisierung und Kontrollsysteme verschiedenster Grössen und Arten zu vereinen, um eine möglichst hohe Interoperabilität zu gewährleisten. Heute ist BACnet eine ISO-Norm.

Abbildung 3 zeigt ein Beispiel einer BACnet/IP Konfiguration mit den verschiedenen eingebundenen Energiekonsumenten:

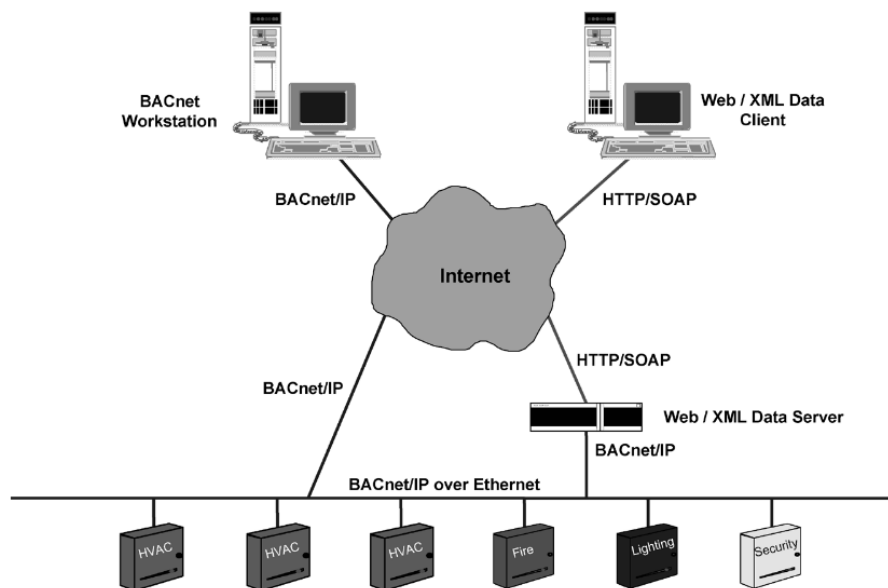


Abbildung 3: Beispiel einer BACnet/IP Konfiguration [8]

Unten sehen wir verschiedene Energiekonsumenten. Geräte oder Verbunde von Geräten wie Alarm- und Sicherheitssysteme, Licht, Heizung und Belüftung. Alle Geräte sind über BACnet/IP mit Arbeitsplätzen, Servern oder Datenbanken verbunden. Klienten wie auch Geräte selber können so direkt gegenseitig auf Geräte zugreifen, Informationen vom Sever beziehen oder Daten zur Synchronisation austauschen.

- LonWorks⁴: Besteht aus dem LonTalk Protokoll, einem Controller und einem Netzwerk-Management-Tool. Es gilt als ANSI/EIA-Standard. Kerngedanke ist die dezentrale Automatisierung, in der Geräte über den Bus miteinander kommunizieren.

³„Building Automation and Control Networking Protocol“

⁴LON steht für „Local Operating Network“, ursprünglich ein Produkt der Firma Echelon

- EIB/KNX⁵: Dies ist ein EN-Standard, der den Verbund von Sensoren und Aktoren in Gebäuden beschreibt, sowie die Kommunikation untereinander. KNX ist der Nachfolger von EIB und ist auch als ISO-Standard definiert. Seine Hauptziele sind mehr Komfort und Flexibilität.

Ein Grossteil des Energieverbrauchs von Gebäuden wird durch Heizung, Belüftung und Klimatechnik, sogenannte HVAC⁶-Systeme gedeckt. Systeme, welche diesen Teil energieeffizient abdecken, die Möglichkeit der Automatisierung und Kontrolle über die gesamte Umgebung eines Raumes oder eines ganzen Hauses bieten und so zur Einsparung von Energie und somit zur Kostenreduktion beitragen, sind besonders interessant. Darum wird der Fokus im weiteren Verlauf dieser Ausarbeitung vorwiegend auf solche HVAC-Systeme gerichtet sein.

3 Exkurs in Model Predictive Control

In der Folge soll in einem kurzen Exkurs auf MPC⁷ eingegangen werden und die grundlegenden Prinzipien nähergebracht werden.

3.1 Was ist MPC?

Unter MPC versteht man eine mathematische Methode, mit der komplexe dynamische Prozesse, wie zum Beispiel die Heizung oder Belüftung eines Hauses, durch Voraussagen von Zuständen geregelt wird. Allgemein formuliert, wird aus den Eingangssignalen auf zukünftige Zustände geschlossen und mittels dieser Prognose werden dann geeignete Eingangssignale für den weiteren Verlauf gewählt. So werden in jedem Zeitschritt mit den vormaligen Eingangssignalen die Eingangssignale für den nächsten Zeitschritt berechnet.

⁵„European Installation Bus“, siehe auch http://de.wikipedia.org/wiki/Europaeischer_Installationsbus

⁶Abkürzung für „Heating, Ventilation and Air-Conditioning“ (Heizung, Belüftung und Klimatechnik)

⁷Abkürzung für „Model Predictive Control“ (Modellprädiktive Regelung, siehe auch http://de.wikipedia.org/wiki/Model_Predictive_Control)

Abbildung 4 zeigt ein einfaches Schema des MPC-Prinzips⁸:

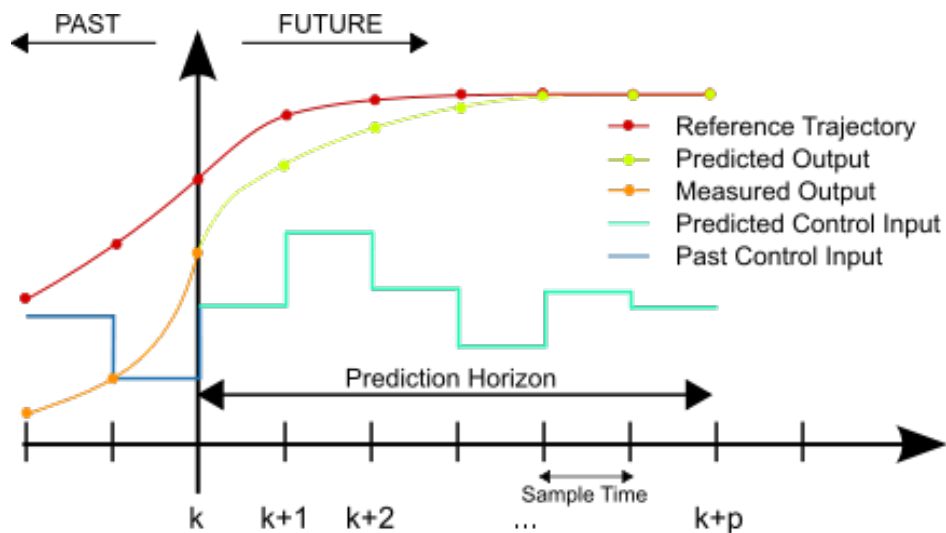


Abbildung 4: Diskretes MPC-Schema

Das Diagramm soll das Prinzip etwas veranschaulichen. Wir befinden uns bei $x = 0$ beim k -ten Schritt der Berechnung. Im negativen x -Bereich sehen wir die vergangenen Ein- und Ausgangssignale. Die blaue Treppenförmige Kurve zeigt uns die vergangenen Eingangssignale an. Gelb ist die Kurve mit den bisherigen gemessenen Ausgangssignalen. Für jeden Zeitschritt führen wir nun die Berechnungen der zukünftigen Zustände aus, das heißt wir optimieren unsere Vorhersage nach jedem Zeitschritt. Von k bis $k+p$ legen wir unseren Voraussagehorizont fest, die Zeitstrecke also, für die wir Zustände vorausberechnen. Im positiven x -Bereich sehen wir jetzt die zukünftigen berechneten Ein- und Ausgabewerte. Die türkise treppenförmige Kurve zeigt die berechneten zukünftigen Eingangssignale für jeden Zeitschritt an. Hellgrün ist die Kurve für die vorausgesagten Ausgangssignale.

Man kann den mathematischen Hintergrund von MPC betrachten. Es handelt sich wie im Diagramm gesehen um eine iterative Methode zur Optimierung innerhalb eines endlichen Zeitintervalls. Es werden numerische Minimierungs-Algorithmen zur Bestimmung der zukünftigen Kontrollstrategie verwendet. Die Berechnung geschieht immer „On-the-fly“, durch Lösen von Euler-Lagrange-Gleichungen. Das Ziel der ganzen Optimierung: Die zukünftigen Kosten sollen minimiert werden.

Es kann nun von der allgemeinen Methode MPC zur Umsetzung von MPC in Smart Buildings geschlossen werden. Dabei stellt sich die Frage, was alles beispielsweise als Eingangssignale verwendet werden könnte. Das könnte beispielsweise die momentane Temperatur innerhalb und ausserhalb des Gebäudes sein, aber auch die Anzahl Personen im Gebäude oder in einem einzelnen Raum. Desweiteren kann auch die Tageszeit in Betracht gezogen werden, sowie die Luftfeuchtigkeit. Als Ausgangssignale kann die Automatisierung und Kontrolle vieler Geräte im Haushalt interpretiert werden. Zum Beispiel kann ein Ausgangssignal die Heizstufe festlegen oder die Stärke der Belüftung eines Raumes. Es kann auch der Zustand der Jalousien kontrolliert werden, ob sie geöffnet oder geschlossen sein sollen. So kann neben der Temperatur auch noch natürliches Licht reguliert werden und vielleicht an künstlichem Licht gespart werden. Auch die Kühlung durch eine Klimaanlage kann so optimiert werden.

⁸siehe http://en.wikipedia.org/wiki/Model_Predictive_Control

Zur Veranschaulichung soll Abbildung 5 als Beispiel eines Schemas eines MPC-Controllers dienen:

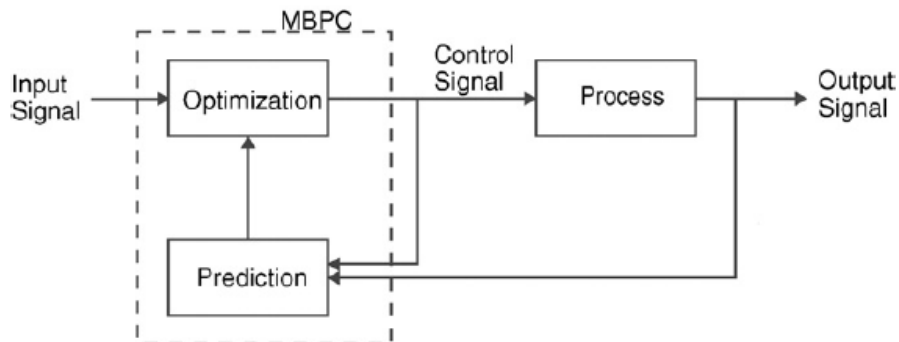


Abbildung 5: Schema eines MPC-Controllers [6]

MBPC steht hier für modellbasierte prädiktive Kontrolle. Der Controller erhält ein Eingangssignal und kommt in den Zustand der Optimierung. Das berechnete Signal, wird in den dem Controller angehängten Prozessen als Kontrollsignal verwendet, zur Steuerung des Geräteverbunds. Daraus entsteht ein Ausgangssignal, welches wiederum zusammen mit dem zuvor berechneten Kontrollsignal, als Eingangssignale für den nächsten Schritt der Voraussage verwendet wird. Das System wechselt wiederum in den Optimierungszustand und so bildet sich ein Kreislauf der konstanten Erneuerung der berechneten Kontrollwerte.

3.2 Herausforderungen und Chancen

Der realen Umsetzung stehen noch einige Herausforderungen im Weg. Einige sollen hier aufgeführt werden [1]:

- **Konservative Industrie:** Die neuen Möglichkeiten werden noch nicht umgesetzt und nur skeptisch in Betracht gezogen.
- **Geringe Erfahrung:** In diesem Bereich kann die Industrie nur auf geringe Erfahrungswerte zurückgreifen.
- **Geteilter Bereich:** Die Diversität aller Möglichkeiten führt zu einer Aufspaltung der eingeschlagenen Wege.
- **Geringe Aufklärung:** Die Methoden sind noch nicht weit bekannt.
- **Erstkosten:** Die Investitionen zur Einführung eines solchen Systems sind sehr hoch.

Zusammengefasst muss aber das grosse Sparpotential noch einmal erwähnt werden. Dies ist jedoch sehr systemabhängig und von Fall zu Fall verschieden hoch. Implementationen und Geräte müssen daher flexible Lösungen präsentieren.

4 Anwendungen von prädiktiven Controllern

Mit Hilfe der MPC-Methode können komplexe HVAC-Systeme energieeffizient reguliert werden. Prädiktive Controller eröffnen die Möglichkeit, automatisiert Begebenheiten der Umgebung in die Kontrolle energiekonsumierender Geräte einfließen zu lassen. Beispiele für Anwendungsbereiche die wir schon genannt haben sind neben den HVAC-Systemen auch die Beleuchtung von Gebäuden, welche reguliert werden kann. Auch sämtliche Sicherheitssysteme wie Feuerschutz und Alarmanlage können so automatisiert gesteuert werden. Freire et al. stellen in ihrer Publikation 5 Algorithmen vor [6]. Die einen basierend auf Raumtemperatur- und Luftfeuchtigkeit-Optimierung, andere Algorithmen benützen verschiedene Indizes zur Berechnung der Ausgangssignale. Als nur einer davon soll der PMV⁹ erwähnt werden. Dieser Index betrachtet Umgebungsvariablen und individuelle Faktoren. Je näher bei 0 der Index ist, desto besser.

In den verschiedenen Fallstudien wurde unter anderem die Leistungsfähigkeit und das Energiesparpotential solcher Controller analysiert. Dabei wurde kein Qualitätsverlust für die Benutzer der Gebäude festgestellt. Ebenso konnte bei allen Algorithmen, teils mehr teils weniger, der Energiekonsum verringert werden.

4.1 Verwendung von Wetterprognosen

Oldewurtel et al. stellen Methoden vor, die mit Hilfe von Wetterprognosen und MPC die Energieeffizienz von Klimakontrollanlagen in Gebäuden verbessern sollen [3]. Das Hauptaugenmerk wurde dabei auf 4 Punkte gelegt:

- MPC-Performance: Welchen Wert bringt MPC der Klimatisierung von Gebäuden
- Wettervorhersagen: Welche Einflüsse haben sie und ihre Qualität
- Robustheits-Analyse: Wie genau muss die Modellierung der Gebäude sein
- Tunability¹⁰: Wie kann MPC helfen, den Komfort zu verbessern

Alles in allem wurde ein grosses Potential an Verbesserungsmöglichkeiten durch den Einsatz von MPC und Wettervorhersagen festgestellt. Doch nicht überall ist die Genauigkeit ausreichend für einen gewinnbringenden Einsatz.

Kleissl et al. präsentieren einen Ansatz, mit dem es möglich sein soll, dass sich Smart Buildings zu ZNEB¹¹ entwickeln, also vollkommen unabhängig von Energie ist, welche aus dem öffentlichen Stromnetz bezogen werden kann [4]. Solche Gebäude sollen also in Zukunft praktisch als Energie-Selbstversorger funktionieren. Das Stromnetz agiert dabei nur noch als eine Art Buffer, um überschüssige Stromproduktion zu speichern.

Ryhaug et al. zeigen auf, wie die Energieeffizienz in der Gebäudeindustrie eben auch fehlschlagen kann [5]. Die etwas skeptische Publikation fasst zusammen, welchen Mehraufwand an Energie die Entwicklung von solchen Smart Buildings verschwendet und wie klein schliesslich doch der Nutzen der Innovationen ist.

⁹Abkürzung für „Predicted Mean Vote“

¹⁰englisch, etwa die Möglichkeit der Verbesserung

¹¹Abkürzung für „Zero-Net Energy Buildings“ (Null-Netz-Energie-Gebäude)

5 Schlussfolgerungen

Gebäude verbrauchen eine gewaltige Menge an Energie. Teils um dem Menschen den gewünschten Komfort zu bieten, teils auch nur weil sie viel zu ineffizient arrangiert sind. Durch den Einsatz von ICT bei der Automatisierung und Kontrolle von HVAC-Systemen beispielweise kann ein bedeutender Anteil dieser Energie gespart werden und so nicht nur Geld gespart, sondern auch die Umwelt geschont werden.

Durch den Einsatz von MPC kann gar der Komfort ausgebaut und gleichzeitig durch intelligente Kontrollsysteme die Energieeffizienz gesteigert werden. Ob die Einführung solcher Modelle und Technologien wirtschaftlich lohnenswert ist, ob sie sich in Zukunft durchsetzen werden, ist unsicher. Noch stehen einige Herausforderungen für Forschung und Entwicklung an, angefangen bei der Industrie, über die Politik bis hin zu den Endverbrauchern.

Doch besteht Hoffnung, denn die vielen Ansätze und Prototypen zeigen, dass in diesem Bereich gewaltiges Potential besteht, und auch in Zukunft weitere Fortschritte zu erwarten sind. Und so nähern wir uns doch in Zukunft intelligenten, selbstversorgenden, umweltschonenden und energieeffizienten Gebäuden, eben Smart Buildings.

Literatur

- [1] D. Gyalistras. Use of MPC for Building Control. *Short Course on Model Predictive Control*, März 2010. Available online at http://www.climate-impacts.ch/_DGTalksPres/Gyal_10_Pres-ShortCourseMPC.pdf.
- [2] EnergyWorks. Smart Buildings. 2008. Available online at <http://www.energyworks.com/index.php?page=smart-buildings>.
- [3] Frauke Oldewurtel, Dimitrios Gyalistras, Markus Gwerder, Colin N. Jones, Alessandra Parisio, Vanessa Stauch, Beat Lehmann und Manfred Morari. Increasing Energy Efficiency in Building Climate Control using Weather Forecasts and Model Predictive Control, 2010.
- [4] Jan Kleissl und Yuvraj Agarwal. Cyber-Physical Energy Systems. *Focus on Smart Buildings*, Juni 2010.
- [5] Marianne Ryhaug und Knut H. Sorensen. How energy efficiency fails in the building industry, 2008.
- [6] Roberto Z. Freire, Gustavo H.C. Oliveira und Nathan Mendes. Predictive controllers for thermal comfort optimization, Dezember 2007.
- [7] The Climate Group. Smart Report 2020. *Enabling the low carbon economy in the information age*, 2008. Available online at <http://www.smart2020.org>.
- [8] Wolfgang Kastner, Georg Neugschwandtner, Stefan Soucek und H. Michael Newman. Communication Systems for Building Automation and Control. *Proceedings of the IEEE*, 93(6), Juni 2005.