



ÖKO-OPT-QUART
Leitfaden

*Richtlinien, Methoden und Hinweise zur Vorgehensweise bei der
Planung und Implementierung von modellprädiktiven Regelungen für
komplexe vernetzte Energiesystemen in zukünftigen Stadtquartieren*



28. Jänner 2019

Andreas Moser
Daniel Muschick
Markus Göllles

Impressum

Herausgeber

BIOENERGY 2020+ GmbH
Inffeldgasse 21b, 8010 Graz

Ansprechperson

Dipl.-Ing. Dr. Markus Gölles
E-Mail: markus.goelles@bioenergy2020.eu

Zielpublikum

Der vorliegende Leitfaden ist im Zuge des Stadt der Zukunft¹ Forschungsprojekts ÖKO-OPT-QUART² entstanden und richtet sich insbesondere an österreichische KMUs im Bereich der Automatisierungstechnik, aber auch an interessierte Energiedienstleister, Investoren und Planern von Stadtquartieren. Er enthält Richtlinien, Methoden und Hinweise zur Vorgehensweise, bei der Planung und Implementierung von modellprädiktiven Regelungen für komplexe vernetzte Energiesysteme in zukünftigen Stadtquartieren.

Projektpartner

Das Projekt ÖKO-OPT-QUART wurde gemeinsam mit dem Institut für Wärmetechnik der TU Graz, der AEE INTEC – Institut für nachhaltige Technologien, der TB-Starchel Ingenieurbüro GmbH, der PMC-GmbH projekt management creative und der ISWAT GmbH Industriesoftware & Automatisierung durchgeführt.

 **TB – STARCHEL** **iswat**
Industriesoftware &
Automatisierung **TU**
Graz **AEE INTEC** **PMC**
projekt
management
creative

¹ Stadt der Zukunft ist ein Forschungs- und Technologieprogramm des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie. Es wird im Auftrag des BMVIT von der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft gemeinsam mit der Austria Wirtschaftsservice Gesellschaft mbH und der Österreichischen Gesellschaft für Umwelt und Technik ÖGUT abgewickelt.

² https://www.bioenergy2020.eu/de/kompetenzbereiche/alle_projekte/view/513

Einleitung

Aktuell lebt etwas mehr als die Hälfte der Weltbevölkerung in urbanen Gebieten bzw. Großstädten. Ein Anteil, der laut aktuellen Studien der UN, bis 2050 auf rund 70 Prozent ansteigen wird [1]. Der zukünftige weltweite Energiebedarf wird daher immer stärker durch den Energiebedarf des urbanen Lebensraums dominiert sein, was die effiziente Energieversorgung von zukünftigen Stadtquartieren zu einer immer wichtiger werdenden Herausforderung macht.

Die bewusste Integration von erneuerbaren Energien, wie z.B. Wind und Sonne, soll neben der Effizienz auch die Erfüllung der gesetzten Klimaziele sicherstellen. Die daraus resultierenden Energiesysteme weisen jedoch eine stark erhöhte Komplexität auf, sodass derzeit eingesetzte regelungstechnische Methoden nicht in der Lage sind solche Systeme ökonomisch und ökologisch optimal zu betreiben.

Abhilfe kann hier ein Energiemanagementsystem (EMS) z.B. in der Form einer modellprädiktiven Regelung (MPC) schaffen. Das Einsparungspotential einer MPC bzw. eines EMS wurde bereits mehrfach in Studien untersucht (siehe z.B. [2]) und kann bis zu 15 Prozent der Gesamtkosten betragen.

Bei der tatsächlichen Umsetzung einer solchen MPC in der Praxis sind jedoch einige Schritte zu beachten, welche - speziell bei Erstkontakt mit dem Thema - oft nicht immer eindeutig sind. Der vorliegende Leitfaden soll helfen genau diese Lücke zu schließen, in dem er eine eindeutige Vorgehensweise (siehe Abbildung 1) für die Umsetzung einer MPC für die optimale Energieversorgung von zukünftigen Stadtquartieren vorschlägt.

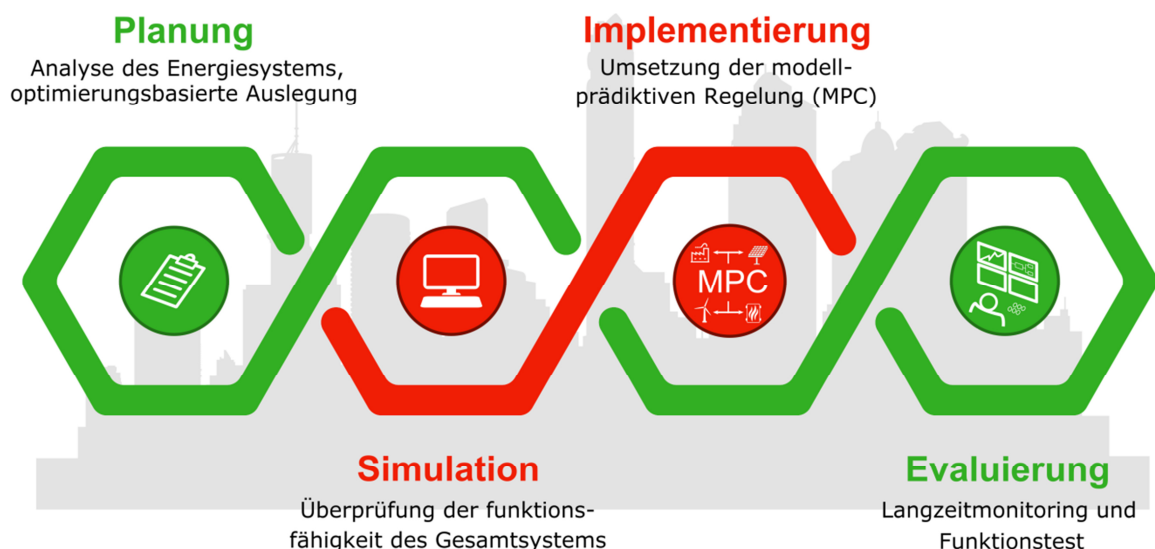


Abbildung 1: Vorschlag für die Vorgehensweise bei der Umsetzung einer modellprädiktiven Regelung (MPC) für die optimale Energieversorgung von zukünftigen Stadtquartieren.

In den nachfolgenden Abschnitten werden die Schritte Planung, Simulation, Implementierung und Evaluierung genauer besprochen.



Planung

Vor dem Einsatz einer modellprädiktiven Regelung (MPC) muss in einem ersten Schritt festgestellt werden, ob überhaupt ein Optimierungspotential vorliegt. Hier muss grundsätzlich zwischen bereits bestehenden (bzw. möglicherweise erweiterbaren) und neuen Energiesystemen unterschieden werden, welche nachfolgend getrennt voneinander betrachtet werden.

Bestehende Energiesysteme

Das tatsächliche Einsparungspotential einer MPC bei bestehenden Energiesystemen hängt immer sehr stark von den konkret vorliegenden Rahmenbedingungen ab. Pauschale Aussagen über die tatsächlich zu erwartenden Einsparungen können ohne Details über das betrachtende Energiesystem nicht getätigt werden. Sehr wohl können jedoch Systeme identifiziert werden, in denen erfahrungsgemäß Einsparungen zu erwarten sind (siehe Tabelle 1).

Tabelle 1: Übersicht über Energiesysteme, bei denen eine MPC sinnvoll bzw. nicht sinnvoll ist.

MPC sinnvoll wenn/bei ...	MPC nicht sinnvoll wenn/bei ...
... Speicher vorhanden sind (thermisch, elektrisch, etc.)	... es keine Möglichkeit gibt Lasten zu verschieben
... variablen Import- und Exportpreisen (Nachttarif, Teilnahme am Spotmarkt, etc.)	... fixen Import- und Exportpreisen
... volatile Erzeugungseinheiten vorhanden sind (Solarthermie, Photovoltaik, etc.)	... Anlage(n) nur auf eine Art und Weise sinnvoll betrieben werden kann(können)
... langsam agierenden bzw. komplexen Systemen (Biomassefeuerung, etc.)	... nur eine Erzeugungsanlage vorhanden ist oder diese sehr flexible sind
... komplexer Sektorkopplung (KWK-Anlage, etc.)	... Wissen über die Zukunft das Systemverhalten gar nicht verbessern kann

Grundsätzlich kann davon ausgegangen werden, dass eine MPC bei Energiesystemen, bei denen zumindest ein Punkt für eine MPC spricht, Einsparungen erzielt bzw. dass das Einsparungspotential mit der Anzahl der dafürsprechenden Punkte steigt.

Neue Energiesysteme

Für den Fall eines neu zu planenden Energiesystems bietet sich die Nutzung eines optimierungsbasierten Planungstools an. Solche Tools können den Betrieb von Energieerzeugungsanlagen durch eine modellprädiktive Regelung bereits in der Planung berücksichtigen, um so ein optimal abgestimmtes System auszulegen. Siehe z.B. [3] für ein frei zugängliches optimierungsbasiertes Planungstool, welches mithilfe von aktuellen Marktpreisen für Erzeugungsanlagen und typischen Lastprofilen für unterschiedliche Gebäudetypen ein technologieneutrales Investmentportfolio für die benötigte Energieversorgung vorschlägt. Sollte das resultierende Portfolio ein hohes initiales Investment, jedoch geringe Betriebskosten aufweisen, muss ein Geschäftsmodell zum Einsatz kommen (z.B. *Contracting*), welches die Interessen von Investoren und späteren Betreibern/Bewohnern gleichermaßen berücksichtigt.



Simulation

Nach Abschluss der Planungsphase ist es sinnvoll das geplante Energiekonzept mithilfe von computergestützten Simulationen vor der Umsetzung zu evaluieren (siehe Abschnitt zur Evaluierung). In manchen Fällen können Erkenntnisse aus den Simulationsstudien zur Anpassung der Planung des Gesamtkonzepts führen.

Je nach Anwendungsfall können sehr einfache, aber auch sehr komplexe Simulationen sinnvoll sein, wobei mit steigendem Komplexitätsgrad das Einsparungspotential immer besser bestimmt werden kann. Solche Simulationen sind dann aber auch mit höheren Kosten- bzw. höherem Zeitaufwand verbunden. Die nachfolgende Tabelle soll als Entscheidungshilfe für die Auswahl der korrekten Simulation dienen und deren Vor- und Nachteile kurz diskutieren.

Tabelle 2: Entscheidungshilfe für die Auswahl der korrekten Simulation und deren Vor- und Nachteile.

	Nur MPC	Anlagensimulation	Co-Simulation
Beschreibung	Einfache Simulation der MPC; Experte bewertet Betriebsstrategie	Simulation der MPC und der geplanten Energieerzeugungsanlagen	Simulation der MPC, der Erzeugungsanlagen und der Gebäude im Stadtquartier
Vorteile	Geringer Aufwand; keine spezielle Expertise im Umgang mit Simulationstools nötig	Besseres Verständnis für die Interaktion von MPC und den Erzeugungsanlagen	Umfassender Einblick in das Verhalten des gesamten Stadtquartiers
Nachteile	Wenig Einblicke in die tatsächlichen physikalischen Gegebenheiten	Experten im Bereich der Anlagensimulation benötigt; mittlerer Zeit/Kostenaufwand	Experten im Bereich der Anlagen-, Gebäude- und Co-Simulation benötigt; hoher Zeit/Kostenaufwand
Einsatzgebiet	Praktische Erfahrung mit ähnlichen Systemen bereits vorhanden	Umsetzung einer MPC für neue/unbekannte Anlagen bzw. Energiekonfigurationen	Analyse von innovativen Regelungskonzepten, die das Gebäude miteinbeziehen

Innerhalb des Projekts ÖKO-OPT-QUART wurde die Methode der Co-Simulation gewählt, um einen möglichst detaillierten Einblick in das Verhalten des gesamten Stadtquartiers zu gewinnen und um den Einsatz bzw. das Einsparungspotential der entwickelten modularen modellprädiktiven Regelung möglichst realitätsnah bewerten zu können. Dafür wurden mittels der Co-Simulationsplattform BCVTB³ die Simulationsprogramme TRNSYS (Anlagensimulation), IDA ICE (Gebäudesimulation) und MATLAB (Regelung) zu einem Gesamtmodell verkoppelt.

Vor allem mithilfe der Anlagensimulation konnte das Verhalten der unterlagerten Regelkreise der Anlagen in Zusammenhang mit der modellprädiktiven Regelung detailliert untersucht und verbessert werden.

³ <https://simulationresearch.lbl.gov/bcvtb/>



Implementierung

Um die für die Implementierung einer MPC notwendigen Schritte besser nachvollziehen zu können ist es sinnvoll, zuvor deren Funktionsweise zu betrachten. Im Projekt ÖKO-OPT-QUART wurde eine modulare modellprädiktive Regelung (MPC) entwickelt, welche auf Basis vereinfachter mathematischer Modelle der energieerzeugenden Anlagen und adaptiver Last- und Ertragsprognosen sowie einer Spezifikation der Energiekonfiguration automatisiert ein mathematisches Optimierungsproblem formuliert, welches in regelmäßigen Abständen (15 Minuten) gelöst wird und die optimale Betriebsstrategie für die nächsten 48 Stunden bereitstellt. Dazu werden die zukünftigen Sollwerte der Anlagen solange variiert, bis ein Optimum (z.B. minimale Betriebskosten) erreicht wird (siehe Abbildung 2).

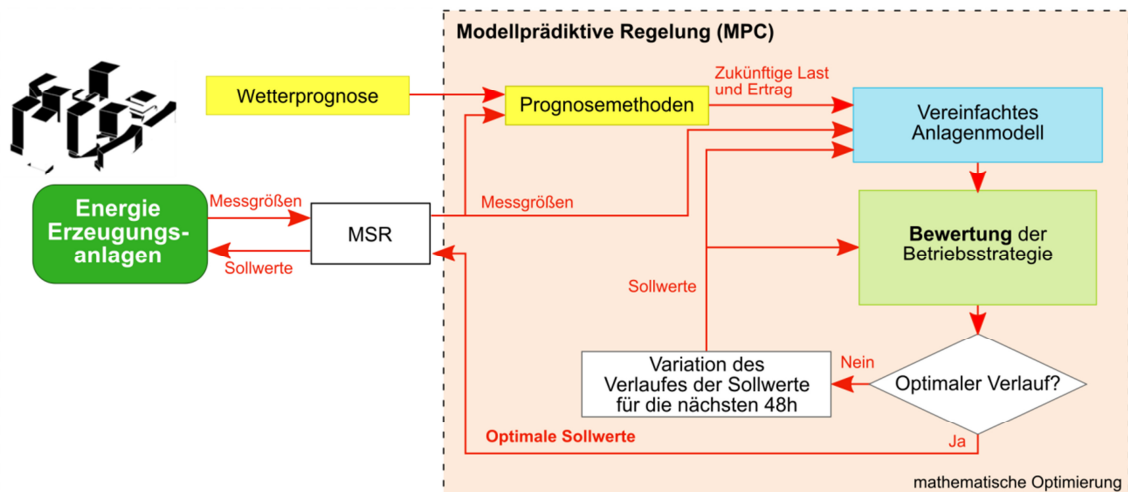


Abbildung 2: Schema der im Projekt ÖKO-OPT-QUART entwickelten modularen modellprädiktiven Regelung; die zukünftigen Sollwerte der Anlagen werden solange variiert, bis ein Optimum (z.B. minimale Betriebskosten) erreicht wird. Dies geschieht über die Formulierung der Aufgabe als mathematisches Optimierungsproblem und den Einsatz moderner Programme (Solver).

Für die Implementierung der MPC werden daher einerseits Messdaten von aktuellen und vergangenen Lasten und Erträgen (Leistungswerte), eine Kommunikationsmöglichkeit zur Sollwertvorgabe an die Anlagen, eine Wetterprognose und ein Rechner, auf dem die mathematische Optimierung durchgeführt werden kann, benötigt.

In vielen Energiesystemen sind die benötigten Messeinrichtungen in bestehenden Monitoringssystemen bereits vorhanden, die meisten Anlagen verfügen über eine Schnittstelle zur Sollwertvorgabe (z.B. Modbus-TCP) und Wetterprognosen können - teilweise kostenfrei - aus dem Internet bezogen werden.

Die Hauptaufgabe der Implementierung besteht daher in der Nachrüstung des Rechners für die MPC und in der Implementierung der benötigten Schnittstellen zu den Messeinrichtungen, zu den Anlagen für die Sollwertvorgabe und zur Wetterprognose. Neue Spezifikationen wie die IEEE 2030.7 [4] helfen dabei, diese Schnittstellen zu standardisieren.



Evaluierung

Nach der Implementierung (bzw. nach der Simulation) der MPC ist eine Evaluierung der tatsächlichen Betriebsweise durchzuführen um die korrekte Funktionsweise des Systems zu überprüfen bzw. die tatsächliche Effizienz und die tatsächlich erzielte Einsparung zu beziffern. Generell kann man zwischen einer automatischen und einer manuellen Evaluierung unterscheiden, welche im Folgenden genauer beschrieben werden.

Automatische Evaluierung

Die automatische Evaluierung ist Teil des Energiemanagementsystems (EMS) und stellt fest, ob es größere Abweichungen zwischen den Parametern der vereinfachten Modelle der MPC und der Realität gibt. Systematische Fehler (z.B. dass die maximale Produktionsleistung niedriger als von der MPC angenommen ist) können so automatisch erkannt und behoben werden (Online-Parameteridentifikation) bzw. kann der komplette Ausfall von Anlagen erkannt, gemeldet und kompensiert werden (automatische Umformulierung des Optimierungsproblems).

Da die automatische Evaluierung ein Teil des EMS ist, erfordert diese keinen zusätzlichen Aufwand für den Betreiber/Nutzer des Energiesystems.

Manuelle Evaluierung

Eine manuelle Evaluierung ist speziell nach der Inbetriebnahme des Gesamtsystems sinnvoll. Hier muss überprüft werden, ob die Sollwerte der MPC für die Anlagen korrekt umgesetzt werden können (Leistungsvorgabe) bzw. ob diese korrekt von der Anlage empfangen werden. Des Weiteren ist zu prüfen ob, sich die Anlagen tatsächlich so verhalten wie in der Modellierung angenommen. Parameterabweichungen werden zwar automatisch vom EMS ausgeglichen, dies kann aber nur dann korrekt erfolgen, wenn die Modelle der MPC korrekt gewählt wurden.

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Analyse des Verhaltens der modellprädiktiven Regelung. Im Projekt ÖKO-OPT-QUART haben sich z.B. durch die Analyse des Verhaltens der MPC vier typische MPC-Strategien ableiten lassen: 1) Verwendung des thermischen Speichers zur Abdeckung von Spitzenlasten, 2) Verwendung der Batterie für die Photovoltaikanlage, 3) Verwendung der Batterie und des thermischen Speichers zur Ausnützung variabler Strompreise und 4) Verwendung des thermischen Speichers zur Rückkühlung für die Wärmepumpe.

In ÖKO-OPT-QUART konnte besonders durch die 4. Strategie (thermischer Speicher zur Rückkühlung) erkannt werden, dass bei korrekter Speicherauslegung die vorhandenen Kühltürme, welche zur Rückkühlung der Wärmepumpe im Sommer eingesetzt werden, kleiner ausgelegt werden könnten, was zu einer Reduktion der Investitionskosten führen würde. Des Weiteren können aus den MPC-Strategien auch einfache Regeln für die Betriebsführung abgeleitet werden, welche bei sehr einfachen Systemen auch ohne MPC umgesetzt werden könnten.

Zusammenfassung

Der stark steigende Energiebedarf des urbanen Raums macht die ökonomisch und ökologisch effiziente Energieversorgung zukünftiger Stadtquartiere zu einer immer wichtiger werdenden Herausforderung. Abhilfe kann der Einsatz von modernen Energiemanagement-systemen (EMS) schaffen, welcher z.B. in Form einer modellprädiktiven Regelung (MPC) die optimale Einsatzsteuerung bzw. Regelung verschiedenster Energieerzeugungseinheiten sicherstellt.

Die in diesem Leitfaden vorgeschlagenen Schritte sollen österreichischen KMUs im Bereich der Automatisierungstechnik, aber auch interessierten Energiedienstleistern, Investoren und Planern von Stadtquartieren dabei helfen, solche Systeme effizient in der Praxis umzusetzen.

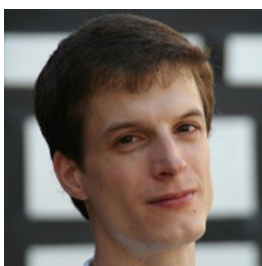
Für weitere Informationen und Details zu der im Projekt ÖKO-OPT-QUART entwickelten modularen MPC, der entwickelten Gebäude- und Anlagensimulation bzw. dem entwickelten ökonomischen Analysemodell sei an dieser Stelle auf den Endbericht des Projekts verwiesen, der unter https://www.bioenergy2020.eu/de/kompetenzbereiche/alle_projekte/view/513 zum Download zur Verfügung steht.

Über die Autoren



Dipl.-Ing. **Andreas Moser** ist Researcher am Kompetenzzentrum BIOENERGY 2020+ GmbH und Dissertant an der *Doctoral School of Electrical Engineering* der Technischen Universität Graz.

In seiner Dissertation, welche den Arbeitstitel „Modellprädiktive Regelungsmethoden für hybride Energiesysteme“ trägt, beschäftigt er sich mit der übergeordneten Regelung von komplexen, sektorgekoppelten Energiesystemen.



Dipl.-Ing. Dr. **Daniel Muschick** ist Senior Researcher am Kompetenzzentrum BIOENERGY 2020+ GmbH und Leiter der Themenfeldgruppe Energiemanagementsysteme, welche sich mit wissenschaftlichen und praktischen Fragestellungen aus diesem Bereich auseinandersetzt.



Dipl.-Ing. Dr. **Markus Gölles** ist Area Manager der Area 5.3 für Regelungs- und Automatisierungstechnik am Kompetenzzentrum BIOENERGY 2020+ GmbH. Die Area beschäftigt sich im Wesentlichen mit der Modellierung und Regelung von thermochemischen, wärmetechnischen und biotechnologischen Prozessen und Systemen sowie dem sektorübergreifenden Energie- und Ressourcenmanagement.

Literaturverzeichnis

- [1] *68% of the world population projected to live in urban areas by 2050, says UN*, in <https://www.un.org/development/desa/en/news/population/2018-revision-of-world-urbanization-prospects.html> (zuletzt aufgerufen am 28. Jänner 2019), 2018
- [2] A. Moser et al., *Co-Simulation of an Energy Management System for Future City District Energy Systems*, International Conference on Innovative Applied Energy (IAPE), 2019
- [3] M. Stadler et al., *Optimizing Distributed Energy Resources and building retrofits with the strategic DER-CAModel*, in Applied Energy, Volume 132, S. 557-567, 2014
- [4] *IEEE Standard for the Specification of Microgrid Controllers*, in IEEE Std 2030.7-2017, S. 1-43, 2018