

Flexibler Einsatz von KWK, BHKW und Biogas-Anlagen durch Informations- und Kommunikationstechnik

Kraft-Wärme-Kopplungs(KWK)-Anlagen, Blockheizkraftwerke (BHKW) und Biogasanlagen können neben der bisher vorherrschenden konstanten Fahrweise auch flexibel betrieben werden und damit wichtige integrierende Funktionen in einem künftig weitgehend auf erneuerbaren Energien (EE) basierenden Energiesystem übernehmen.

Die Systemdienstleistungen umfassen die Regenergiebereitstellung und das Angebot einer erhöhten Residuallastdeckung in Zeiten, in denen die fluktuierenden Energien wie Photovoltaik (PV) und Windenergie nicht ausreichend verfügbar sind. Auf den Energiemärkten kann flexibel eingesetzte Bioenergie dadurch höhere Strommarkterlöse erzielen. Zudem können innovative KWK-Anlagen (iKWK) eine optimierte Wärmebereitstellung mit einer stabilisierenden Stromversorgung auch bei sehr hohen Anteilen an EE verbinden.

Um diese Ziele zu realisieren, erfordert die Flexibilisierung das Vorhalten von entsprechenden Kapazitäten zur Stromerzeugung, eine fernwirktechnische Regelbarkeit der Bioenergieanlage über netzwerk-basierte Kommunikation und intelligente Regelungskonzepte auch aus dem Bereich der künstlichen Intelligenz.

Die Leistungsfähigkeit der Flexibilisierung von KWK, BHKW und Biogasanlagen wird durch die folgenden Dimensionen beschrieben, welche aggregat-spezifisch bestimmbar sind [1]:

- Ramp (anlagenspezifische Lastrampen)
- Range (Amplitude bzw. Regelbereich zwischen maximaler und minimaler Anlagenleistung) und
- Duration (maximales Verbleiben in einem bestimmten Lastzustand)

In einem „äußeren“ Regelkreis, siehe ► [Abbildung 1](#), werden externe Informationen aus dem übergeordneten Netzverbund (z. B. Verfügbarkeit anderer EE, Netzauslastung und Energiemarktinformationen) mit internen Anlageninformation (z. B. Lastsituation, Füllstand des biogenen Brennstoffs und Prozessparameter) digital verarbeitet, um über einen „inneren“ Regelkreis den Betriebszustand der Anlage entlang der Dimensionen Ramp, Range und Duration den aktuellen Bedarfsanforderungen flexibel anzupassen.

Bioenergieanlagen können hierbei vor allem längerfristige Ausgleichsbedarfe (Fluktuationen innerhalb von 24 h bis hin zu saisonalen Schwankungen) bedienen, da sie den Brennstoff als chemischen Energiespeicher nutzen können, um Strom und Wärme bedarfsgerecht zu liefern.

An die zugehörige Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) werden vielfältige Anforderungen gestellt, von der netzwerk-basierten Kommunikation über standardisierte Schnittstellen bis hin zur dezentralen und zentralen Informationsverarbeitung, um die Flexibilisierung der Anlage optimal zu regeln. Die zentrale Datenhaltung und Informationsverarbeitung kann dabei durch abgesicherte Cloud-Dienste über das Internet erfolgen.

Die Herangehensweisen und der Einsatz von IKT unterscheiden sich in den unterschiedlichen Anwendungsbereichen:

Bei Biogasanlagen kann Flexibilität beispielsweise mit unterschiedlicher Qualität und damit auch mit unterschiedlich großer Auswirkung auf den Prozess realisiert werden. Während die Bereitstellung von Regelenergie mit kürzeren Phasen der Laständerung des BHKW bei relativ geringem Eingriff in den Betrieb angeboten werden kann, sind für eine prognose-basierte Reaktion auf Preissignale am Markt oder beim Netzauslastungsmanagement weitreichende Eingriffe in den Prozess notwendig. Dabei ist zum einen eine Prognose des Bedarfs nötig, um daraus den Fahrplan zu generieren. Zum anderen muss die Leistungsfähigkeit der Gesamtanlage modellbasiert beschrieben werden, um dies mit dem gewünschten Fahrplan abzugleichen. Die Anlagenregelung muss dann die Komponenten Gasspeicher, biologischen Prozess und ggf. den existierenden Wärmebedarf (Anlage selbst und extern) dynamisch abbilden (► [Abbildung 2](#)). Technische Restriktionen ergeben sich u. a. aus der abrufbaren BHKW-Leistung, realisierbaren Rampen und maximalen Amplituden der Teilprozesse und Transportlimitierungen (z. B. Fütterungsmengen). Externe Einflüsse wie beispielsweise das Wetter (dynamischer Einfluss auf die Gasspeichermenge) müssen ebenso berücksichtigt werden. Die Qualität und der Detaillierungsgrad der Regelung haben großen Einfluss auf den Grad der möglichen Flexibilisierung und auf die resultierenden Umweltwirkungen.



DBFZ

Prof. Dr. Daniela Thraen
daniela.thraen@dbfz.de

Dr. Volker Lenz
volker.lenz@dbfz.de

Dr. Jan Liebetrau
jan.liebetrau@dbfz.de

Fraunhofer IEE

Dr. Bernd Krautkremer
bernd.krautkremer@
iee.fraunhofer.de

Dr. Tanja Kneiske
tanja.kneiske@iee.fraunhofer.de

Alexander Dreher
alexander.dreher@
iee.fraunhofer.de

Fraunhofer ISE

Dr. Bernhard Wille-Haußmann
bernhard.wille-haussmann@
ise.fraunhofer.de

FZ Jülich

Dr. Manuel Dahmen
m.dahmen@fz-juelich.de

David Yang Shu
d.shu@fz-juelich.de

Dr. Uwe Bau
u.bau@fz-juelich.de

KIT

Prof. Dr. Thomas Kolb
thomas.kolb@kit.edu

Dr. Frank Graf
graf@dvgw-ebi.de

Wolfgang Köppel
koepfel@dvgw-ebi.de

UFZ

Dr. Reinhold Lehneis
reinhold.lehneis@ufz.de

Abbildung 1
Systemelemente und Wirkungslüsse für die Flexibilisierung von Bioenergieanlagen mittels moderner IKT
 (Quelle: DBFZ/UFZ)

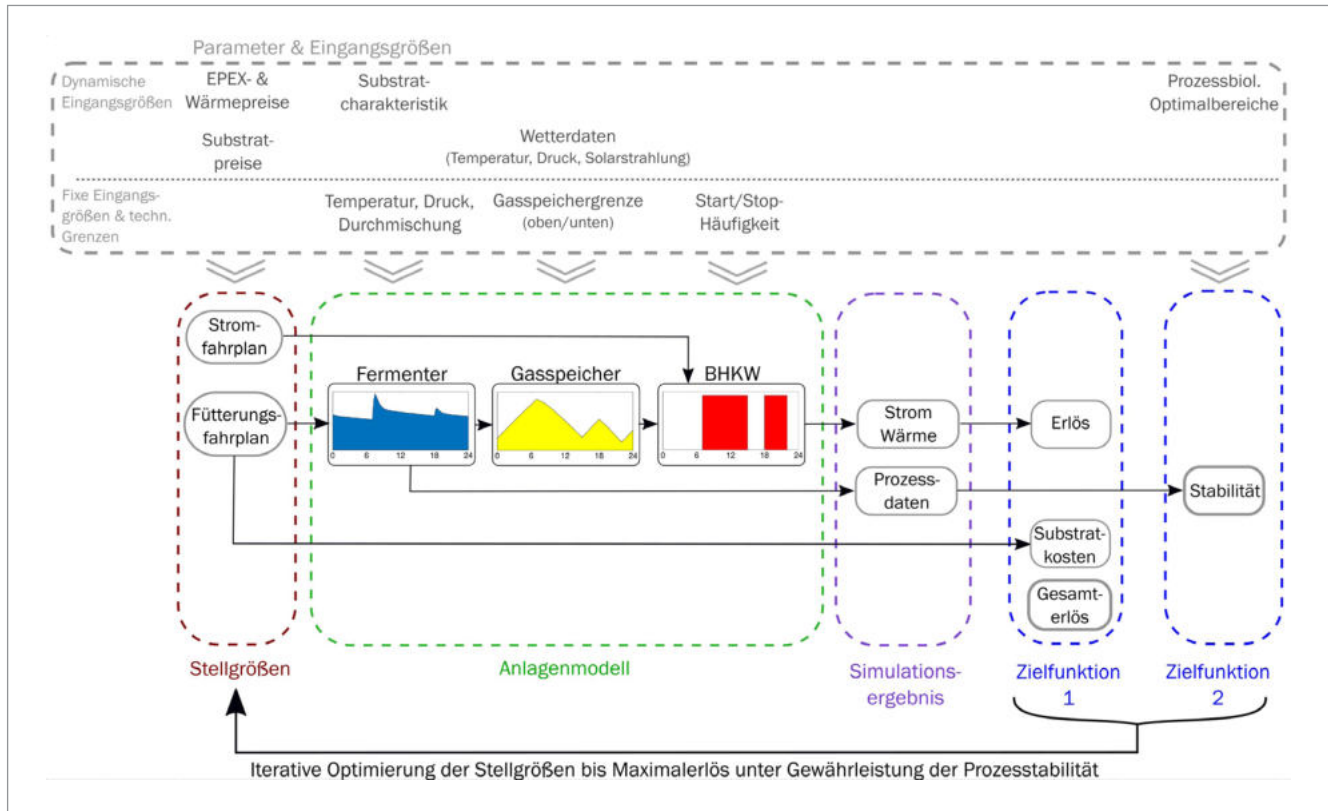
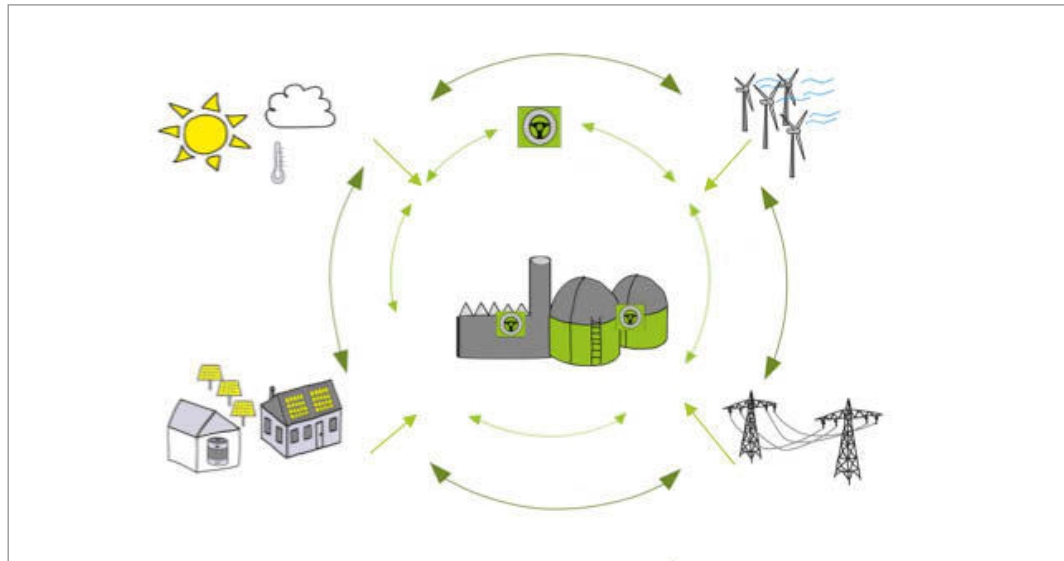


Abbildung 2
Komponenten einer Prozessregelung für Biogasanlagen aus dem Vorhaben „GAZELLE“
 (Quelle: DBFZ)

Flexibilisierung bedeutet im Gebäude- und Quartiersbereich, dass IKT-basierte Regelungen von KWK-Anlagen (insbesondere bei kleinen BHKW mit Leistungen von 2 bis 10 kW) helfen, nicht nur Betriebskosten für den Endkunden zu senken, sondern auch die CO₂-Emissionen von Strom-Wärme-Systemen zu reduzieren [2]. Dies wurde im Projekt „INE-VES“ für ein optimiertes PV-KWK-Speichersystem nachgewiesen (► [Abbildung 3](#)).

Betriebskosten (blau) und CO₂-Emission (grün) pro Tag für ein optimiertes PV-KWK-Speichersystem sind aufgeteilt nach einem typischen Tag im Winter, Sommer und in der Übergangszeit. Der Vergleich wurde mit einem konventionellen System (orange) bestehend aus Netzstrombezug und einer Gasheizung durchgeführt (Quelle: Fraunhofer IEE). Es zeigt sich, dass beide Optimierungen (Kosten und CO₂) zu akzeptablen Ergebnissen führen, die größtenteils unterhalb der konventionellen Werte liegen.

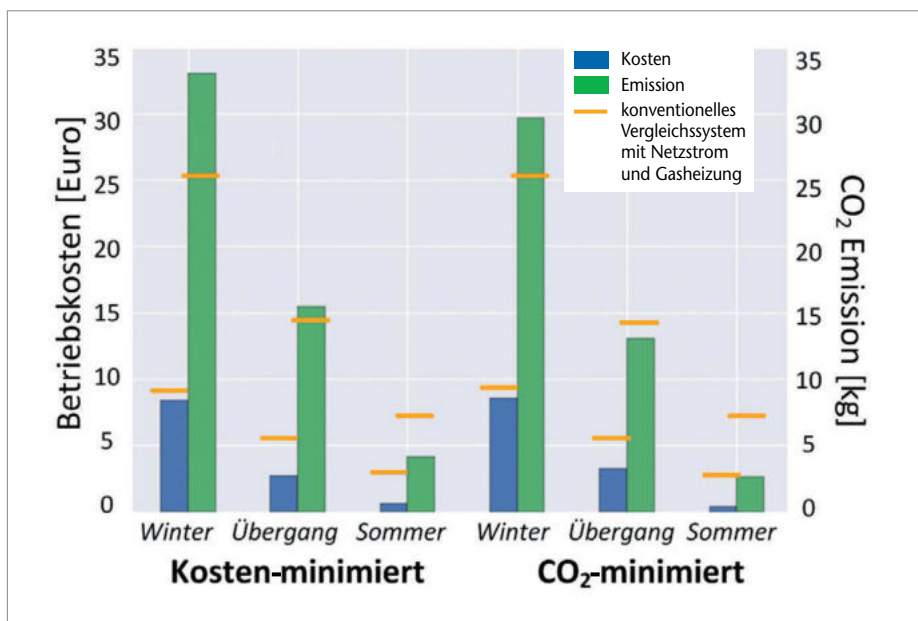


Abbildung 3

Flexibilisierung für ein optimiertes PV-KWK-Speichersystem hinsichtlich der Zielgrößen **Betriebskosten (blau)** bzw. **CO₂-Emission (grün)** im Vergleich zu einem **konventionellem System (orange)**

(Quelle: Fraunhofer IEE)

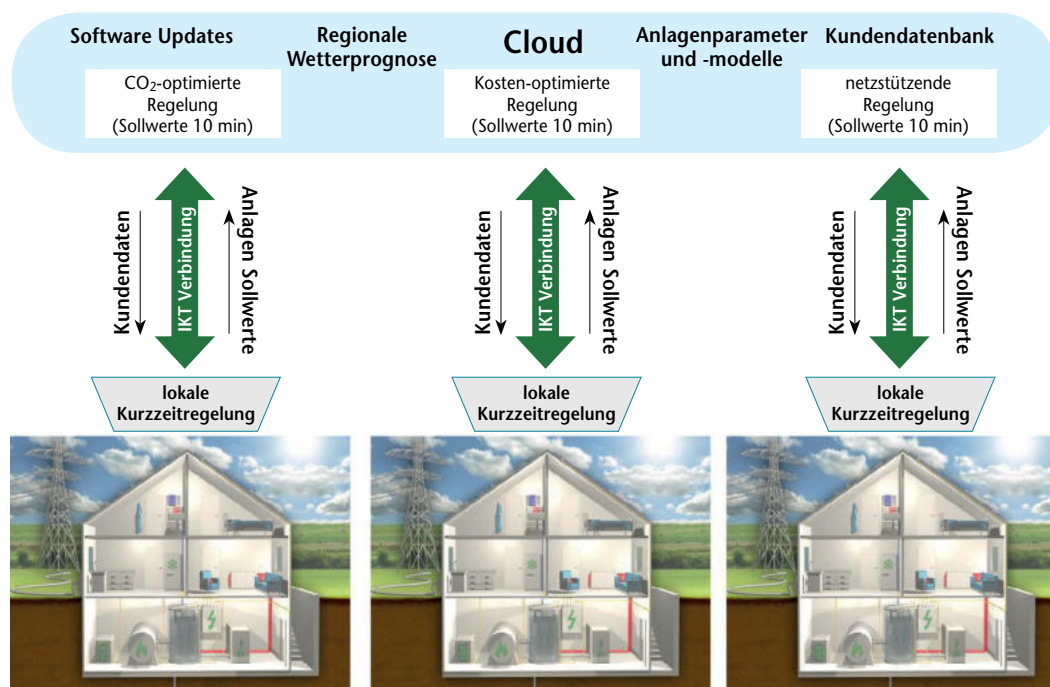


Abbildung 4

Schema eines cloud-basierten, zweistufigen Regelungskonzeptes für BHKW in Gebäuden

(Quelle: Fraunhofer IEE)

Die Mehremission in der Heizperiode wird durch längere Laufzeiten des BHKW gegenüber der Laufzeit einer Gasheizung verursacht. Bei Nutzung eines BHKW wird allerdings zusätzlich überproduzierter Strom ins Stromnetz eingespeist. Der zusätzlich positive Effekt, dass der eingespeiste PV- und BHKW-Strom den Emissionskoeffizienten des Stromnetzes reduziert, ist hier noch nicht berücksichtigt bzw. abgebildet.

► **Abbildung 4** zeigt das Schema eines cloudbasierten, zweistufigen Regelungskonzeptes für BHKW in Gebäuden. Hier wurde ein prognosebasiertes Konzept gewählt, das nicht nur den Einfluss des Wetters, sondern auch das Nutzerverhalten und damit den individuellen Strom-, Warmwasser- und Heizbedarf vorausschauend in eine optimierte Anlagenregelung einbindet. Das analysierte Energiesystem bestand aus einem BHKW und einer PV-Anlage im Zusammenspiel mit Wärme- und Stromspeichern.

Berechnet wurden Betriebskosten, CO₂-Emissionen, Eigenverbrauchsrate, Autarkiegrad und weitere spezifische Parameter zur Bewertung des Betriebsverhaltens unter Nutzung verschiedener Zielfunktionen. Diese innovativen Regelungskonzepte müssen dabei nicht lokal beim Endkunden installiert und gewartet werden, sondern können mit Hilfe moderner IKT bei einem Cloud-Dienstleister implementiert werden. Eine entsprechende Pilotanlage wurde im Labor installiert und mit der neuen Regelung erfolgreich betrieben [3,4]. Entstehende Abweichungen der echten Strom- und Wärmebedarfe von den prognostizierten Werten können außerdem durch lokale Kurzzeitregelungen ausgeglichen werden. So kann zu jedem Zeitpunkt eine zuverlässige Energieversorgung beim Endkunden gewährleistet werden [5].

Voraussetzung für solche Systeme ist es, entweder zu einheitlichen Schnittstellen-Standards zu kommen, sodass die Einzelkomponenten der zunehmend komplexen Systeme auch miteinander kommunizieren können. Oder kostengünstige Transfermodule zu entwickeln, die auch bei bestehenden Anlagen leicht nachzurüsten sind und dadurch eine Kommunikation der Komponenten untereinander erlauben. Beispielsweise werden im Projekt „Autobus“ des DBFZ, gefördert durch die Sächsische Aufbaubank mit Mitteln des Europäischen Strukturfonds, kostengünstige Adapter entwickelt, die an die verschiedensten

Energieerzeuger, Verbraucher, Regler und Sensoren angeschlossen werden können und dann eine einheitliche Kommunikation auch für kleine Objekte wie Ein- und Zweifamilienhäuser erlauben, ohne dass hardwareseitige Verbindungen gelegt werden müssen.

Auch im industriellen Bereich ermöglicht moderne IKT eine weitere Senkung des Primärenergieverbrauchs und der CO₂-Emissionen. Industrielle Energiesysteme stellen verschiedene Energieformen wie Elektrizität, Wärme und Kälte für den Produktionsprozess zur Verfügung. Aufgrund der Vielzahl miteinander verbundener Komponenten weisen diese Systeme typischerweise eine hohe Komplexität auf. Methoden und Werkzeuge der mathematischen Optimierung erlauben es, solch komplexe Systeme im Hinblick auf verschiedene, teils konkurrierende Ziele (z. B. Minimierung von Kosten oder von Umwelteinflüssen) optimal zu betreiben [6]. Dazu muss zunächst ein mathematisches Modell des industriellen Energiesystems geschaffen werden. Bei der Modellierung sind insbesondere die Einschränkungen der Betriebsfreiheitsgrade und die regulatorischen Nebenbedingungen entsprechend zu berücksichtigen. Die Zielfunktion des Betriebsoptimierungsproblems beschreibt beispielsweise die Betriebskosten, den Primärenergieverbrauch oder die CO₂-Emissionen. In der klassischen Offline-Betriebsoptimierung werden Zeitreihen für Energie-

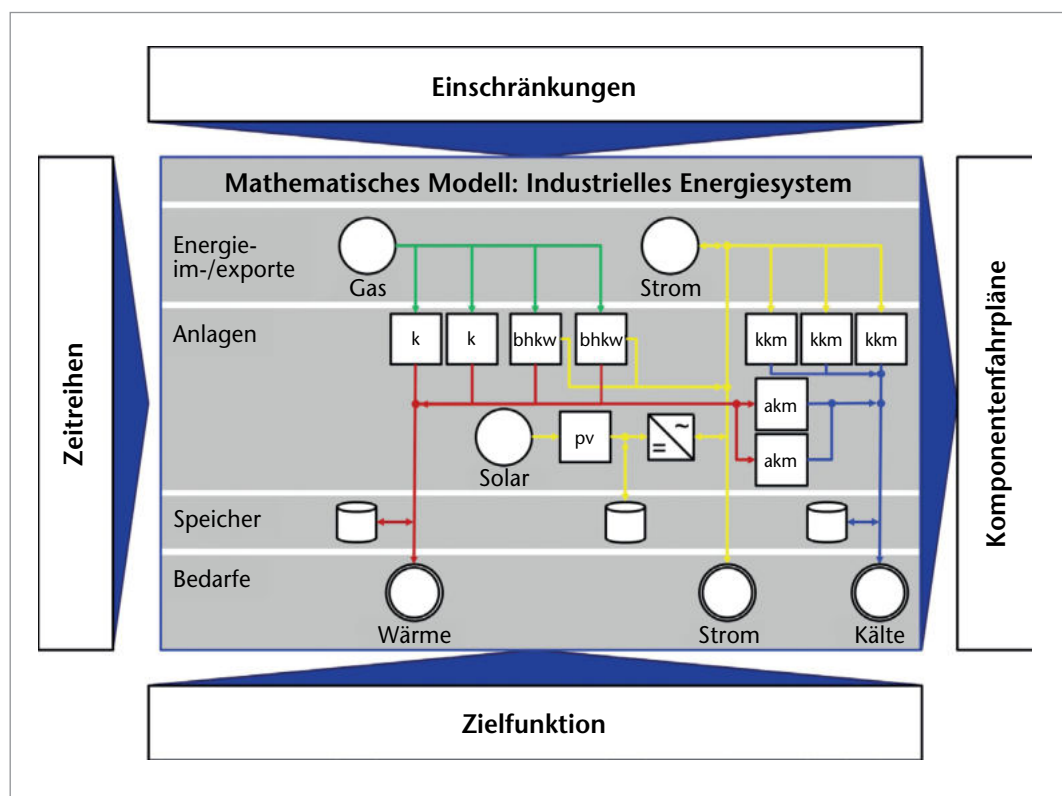
Abbildung 5

Das industrielle Energiesystem als mathematisches Modell:

Berücksichtigt werden Zeitreihen, Einschränkungen und Zielfunktion, um einen optimalen Komponentenfahrplan zu berechnen.

Abgebildet sind Anlagenzusammenhänge eines beispielhaften Energiesystems mit Kesseln (k), Blockheizkraftwerken (bhkw), Kompressionskältemaschinen (kkm), Absorptionskältemaschinen (akm) und Photovoltaikanlagen (pv)

(Quelle: FZI)



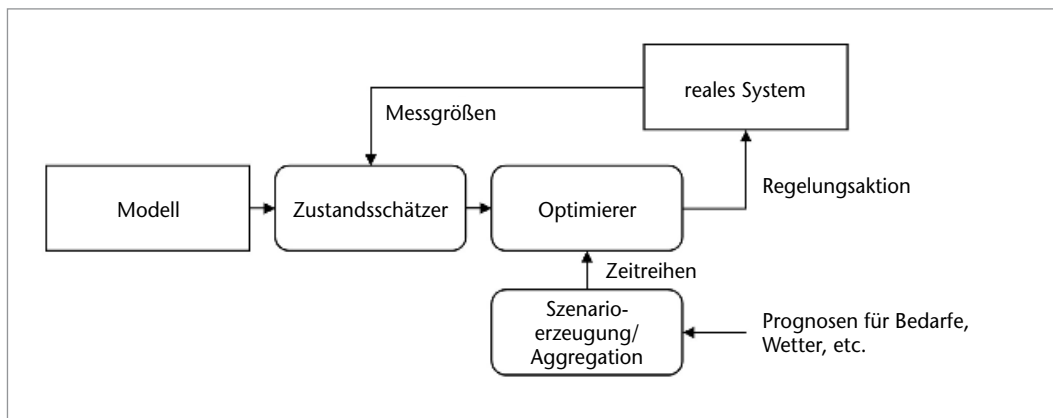


Abbildung 6

Prinzipische Skizze zur modellprädiktiven Regelung:

Auf Basis von aktuellen Messgrößen und Prognosen berechnet der Optimierer in kurzen Abständen neue Regelungsaktionen.

(Quelle: FZ)

bedarfe, Preise und Verfügbarkeiten von EE vorgegeben [7]. Die Optimierung liefert auf dieser Basis optimale Fahrpläne für alle Komponenten im System (► [Abbildung 5](#)).

Für die Echtzeitregelung von Energiesystemen hingegen, siehe ► [Abbildung 6](#), kommt die sogenannte Online-Betriebsoptimierung oder modellprädiktive Regelung [8] in Frage. Unter Einsatz moderner IKT werden dabei laufend Messgrößen des realen Systems erfasst, um die Zustände eines mitlaufenden Modells zu schätzen. Ausgehend vom geschätzten Ist-Zustand des Energiesystems und aktueller Prognosen erlaubt der modellprädiktive Regler die Ableitung von Regelungsaktionen. Diese Regelungsaktionen werden mittels IKT wieder an das reale System übergeben. Das Konzept der Online-Betriebsoptimierung beschreibt also einen iterativen Zyklus zwischen realem System und „digitalem Zwilling“. Damit ist es möglich, unmittelbar auf Störungen oder Änderungen in den Prognosen zu reagieren.

Auch die explizite Berücksichtigung von Prognoseunsicherheiten, etwa in Form von Szenarien, ist denkbar. Mittels Aggregationsmethoden kann eine Reduktion der Datenmenge in der Online-Betriebsoptimierung und der damit verbundenen Rechenlast erreicht werden [9].

Die genannten Effekte moderner IKT lassen sich auch auf die regionale Ebene übertragen und dort in ihrer Wirkung noch verstärken. Eine wesentliche Herausforderung der zukünftigen Versorgung mit EE liegt in der sehr viel größeren Anzahl an Anlagen mit unterschiedlichen zeitlichen Anforderungen bezüglich der Strom- und Wärmebereitstellung. Dadurch stoßen zentrale Regelungs- und Kommunikationsansätze, wie sie heute aus der bestehenden, größtenteils noch streng hierarchischen Stromversorgung bekannt sind, an ihre Grenzen. Insbesondere wenn KWK-Anlagen eingebunden werden sollen, die im Rahmen der Sektorenkopplung nennenswerte

Beiträge zur Absicherung der Energieversorgung leisten sollen oder aufgrund ihrer Betriebscharakteristik nicht beliebig schnell und häufig an- und abgefahren werden können.

Zukünftig gilt es sich daher auf alternative Ansätze einzustellen. Zum einen sind hier Schwarm-Konzepte denkbar, in denen eine Regelanforderung des Netzes zwischen den einzelnen Anlagen nach eingehendem Informationsaustausch untereinander bestmöglich aufgeteilt wird. Damit ist aber auch ein hoher und vor allem schneller Kommunikationsaufwand verbunden und es besteht die Gefahr, dass Regelanforderungen nicht vollständig oder nicht schnell genug erfüllt werden. Mit sich selbst optimierenden Clustern innerhalb des Schwarms bzw. der Energiezelle könnte der Datenaustausch parallelisiert und somit beschleunigt werden.

Alternativ wären auch Lösungen denkbar, in denen jede Anlage für sich das Netz überwacht und ihr Verhalten automatisch im Sinne der Netzdienlichkeit anpasst, was aber auch zu nicht geregelten Konkurrenzsituationen und somit zu einem nicht energieoptimierten Gesamtsystem führen kann.

In Verbindung mit moderner IKT ist jedoch ein einzeloptimiertes Verhalten für die Anlage und die Netzstabilität denkbar. Im Sinne eines ökonomischen Betriebs müssten die marktwirtschaftlichen Anreize ausreichend hoch sein, damit der notwendige Regelbedarf erreicht wird.

Die hier aufgezeigten Beispiele moderner IKT bilden in Anlehnung an Industrie 4.0 die Basis für eine Entwicklung hin zu KWK 4.0 und fungieren gleichzeitig auch als „Enabler“ für den flexiblen Einsatz von KWK, BHKW und Biogasanlagen in neuen Netzstrukturen über Smart Demand.

Moderne IKT für einen flexiblen Einsatz von Bioenergie umfasst neben der Etablierung

geeigneter Schnittstellen und Datenverbindungen für vorhandene oder zukünftige digitale Netzwerke (Stichwort 5G-Mobilfunk-Standard) auch modellprädiktive Regelungen für Erzeugungsanlagen vom Einzelabnehmer bis hin zu ganzen Regionen. Modellprädiktive Regelungen werden derzeit auf allen Ebenen entwickelt und ermöglichen parallel zum Betrieb modellhafte Szenarien von Anlagenzuständen zur Ableitung einer optimalen Systemsteuerung. Für die Systemsteuerung werden hierbei sowohl hierarchische als auch autonome Entscheidungskonzepte erprobt.

Literatur

- [1] M. Dotzauer, D. Pfeiffer, M. Lauer, M. Pohl, E. Mauky, K. Bär, M. Sonnleitner, W. Zörner, J. Hudde, B. Schwarz, B. Faßauer, M. Dahmen, C. Rieke, J. Herbert, D. Thrän "How to measure flexibility – performance indicators for demand driven power generation from biogas plants", *Renewable Energy*, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.10.021>.
- [2] T.M. Kneiske, „Reduktion von CO₂-Emission durch eine kombinierte Regelungsstrategie für PV-KWK Hybridsysteme“, Konferenzbeitrag auf der 10. IEWT 2017, Wien, 2017.
- [3] T.M. Kneiske, M. Braun, "Flexibility potentials of a combined use of heat storages and batteries in PV-CHP hybrid systems", *Energy Procedia*, 135, 482-495, 2017.
- [4] Abschlussbericht Projekt „INE-VES Innovative Energiespeicher in vernetzten PV-Hybrid-systemen“.
- [5] T.M. Kneiske, M. Braun, D.I. Hidalgo-Rodriguez, "A new combined control algorithm for PV-CHP hybrid systems", *Applied Energy*, 210, 964-973, 2018.
- [6] A.N. Ünal, S. Ercan, G. Kayakutlu, "Optimisation studies on tri-generation: a review", *International Journal of Energy Research*, 39, 1311-1334, 2015.
- [7] P. Voll, C. Klaffke, M. Hennen, A. Bardow, "Automated superstructure-based synthesis and optimization of distributed energy supply systems", *Energy*, 50, 374-88, 2013.
- [8] A. Parisio, E. Rikos, G. Tzamalís, L. Glielmo, "Use of model predictive control for experimental microgrid optimization", *Applied Energy*, 115, 37-46, 2014.
- [9] B. Bahl, T. Söhler, M. Hennen, A. Bardow, "Typical Periods for Two-Stage Synthesis by Time-Series Aggregation with Bounded Error in Objective Function", *Frontiers in Energy Research*, 5, 2018.