

## Digitale Zwillinge industrieller Energiesysteme

# Vom situativen Lastmanagement zum prognosebasierten Fahrplanmanagement

Flexible Eigenerzeugungs- und Verbrauchsanlagen ergänzt durch Speichersysteme bieten ein hohes Potenzial zur Reduktion von Kosten und Treibhausgasemissionen produzierender Unternehmen. Um die Potenziale ausschöpfen zu können, ist eine intelligente Steuerung des Anlagenverbunds erforderlich. Die Autoren beschreiben die Vorteile eines prognosebasierten Fahrplanmanagementsystems gegenüber einem situativen Lastmanagement und stellen die Umsetzung in der Green Factory in Ungerhausen vor.

Immer mehr produzierende Unternehmen setzen am eigenen Standort auf die dezentrale Eigenerzeugung von elektrischer Energie durch erneuerbare Energien, meist in Form von Photovoltaik-(PV)-Dachanlagen. Treibende Kraft hinter dieser Entwicklung ist vor allem das Bestreben, die Energiekosten nachhaltig zu senken. Angesichts steigender gewerblicher Stromtarife von 20 bis 30 ct/kWh und Stromgestehungskosten für PV-Dachanlagen von 5 bis 10 ct/kWh amortisieren sich Investitionen in eigene Energieerzeugungsanlagen häufig bereits innerhalb weniger Jahre. Weiterhin steigern sie die Unabhängigkeit vom Stromnetzbezug mit schwer planbaren langfristigen Preisschwankungen, und sie reduzieren die Treibhausgasemissionen im Vergleich zu konventionellen Kraftwerken erheblich [1].

## Die Möglichkeiten nehmen zu – die Komplexität auch

Bei einer entsprechend dimensionierten Auslegung von Eigenerzeugungsanlagen wie PV-Dachanlagen und Blockheizkraftwerken (BHKW), künftig gegebenenfalls auch Brennstoffzellen, können große Teile des Strombedarfs von Produktionsanlagen und der technischen Gebäudeausrüstung selbst erzeugt werden. Weiterhin besteht die Möglichkeit, nicht nur den Strombedarf zu decken, sondern im Sinne der Sektorenkopplung und Elektrifizierung auch die Bereitstellung thermischer Energie mittels Wärmepumpen und elektrischer Heizelemente sowie die Versorgung des Fuhrparks mit Elektrofahrzeugen und eigenen Ladestationen zu übernehmen. Strommengen, die in einem bestimmten Zeitraum nicht selbst verbraucht werden können, lassen sich mittels Batteriespeichersysteme für verbrauchsstarke Zeitfenster speichern [2]. Weiterhin be-

### Exemplarische LMS-Regeln

| Vorgang          | Regelgröße                             | Ausprägung |
|------------------|----------------------------------------|------------|
| schaltet ein     | Netzverknüpfungspunkt                  | > 0 kW     |
|                  | und Anzahl bisheriger täglicher Starts | < 5        |
| schaltet ab      | Netzverknüpfungspunkt                  | < -200 kW  |
| oder schaltet ab | Temperatur Wärmespeicher               | > 70 °C    |

Tabelle 1. Vereinfachte exemplarische LMS-Regeln eines BHKW

steht die Möglichkeit, den Betrieb flexibler Produktionsanlagen an der momentan verfügbaren eigenerzeugten Energie auszurichten. Auch Anlagen der technischen Gebäudeausrüstung wie Lüftungssysteme, Druckluftkompressoren und Kühlanlagen eignen sich zur Lastverschiebung im Sinne einer Erhöhung der Eigenversorgung [3].

Jede dieser regelbaren Erzeugungsanlagen, flexiblen Verbrauchsanlagen und Energiespeicher benötigt ein Betriebskonzept, mit dem mehrere Ziele des Gesamtsystems adressiert werden:

- Erreichung einer hohen Eigenverbrauchsquote, um Stromnetzbezug zu vermeiden
- Reduzierung der Spitzenlast, zur Senkung von Netzentgelten
- Reduktion von Treibhausgasemissionen, unter anderem durch möglichst geringen Einsatz von fossilen Spitzenlastkraftwerken.

## Lastmanagementsysteme stoßen an ihre Grenzen

Die Basis für die Ansätze zur Anlagensteuerung bildet ein digitales Energiemonitoringsystem, das Energieverbräuche und Energieerzeugung erfasst und

so eine Datengrundlage für Anwendungen der Visualisierung, Analyse und vor allem der Automatisierung schafft [4]. Letztere ist derzeit in den meisten produzierenden Unternehmen über Lastmanagementsysteme (LMS) realisiert, die auf starren Regeln basieren. Gängig sind beispielsweise Priorisierungslisten zur Abschaltung von Anlagen beim Erreichen festgelegter Schwellenwerte des Stromnetzbezugs. Diese dienen in erster Linie der Vermeidung von Lastspitzen und betrachten die Bezugsleistung des Netzanschlusses als Regelungsgröße. Daneben existieren thermische LMS, die beispielsweise in Abhängigkeit von der Temperatur des Wärmespeichers Heizanlagen zu- oder abschalten. Diese elektrischen und thermischen Regelgrößen können bei Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen kombiniert sein. Tabelle 1 stellt diesen Fall am Beispiel eines BHKW der Green Factory mit exemplarischen und vereinfachten Regeln dar.

Statische regelbasierte Ansätze eignen sich für einfache Ein- und Abschaltkaskaden mit klar festgesetzten Zielgrößen und kleinen, homogenen Anlagenverbünden. Die beschriebenen heterogenen Anlagenparks mit unterschiedlichen Wechselwirkungen und mehreren

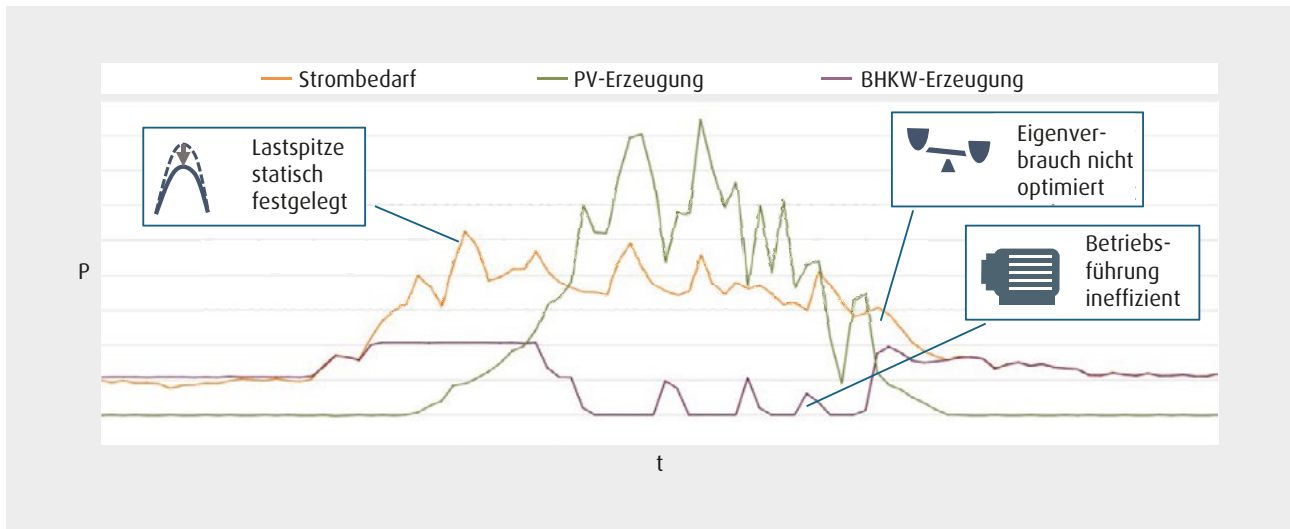


Bild 1. Lastgänge eines LMS-geregelten Energiesystems mit Verbesserungspotenzial

Zielsetzungen bringen zwei wesentliche Herausforderungen für regelbasierte LMS hervor:

1. Bei der Einbindung neuer Anlagen lassen sich komplexe Zusammenhänge und Zielvorgaben nicht mehr hinreichend genau modellieren.
2. Im Betrieb kann das LMS nur situativ auf gemessene Werte reagieren und festgelegte Schwellenwerte einhalten, ohne ein mögliches Optimum der teils konträren Zielgrößen zu erreichen.

Bild 1 zeigt anhand eines Diagramms mit den Lastgängen der PV- und BHKW-Erzeugung sowie des Werksverbrauchs exemplarische Verbesserungspotenziale

eines LMS-geregelten Energiesystems. Statt einer Minimierung der Lastspitze wird eine statisch festgelegte Lastspitze unterschritten. Der Anteil des Eigenverbrauchs resultiert aus den Auswirkungen der Priorisierungsliste statt auf einer Maximierung der eigentlichen Zielgröße, und die Betriebsführung des BHKW weist Schwächen auf (kurzzeitige Verschattung der PV-Anlage führt zu häufigen An- und Ausschaltvorgängen).

#### Passend ausgelegte Anlagen optimal betreiben

Der Begriff des Fahrplanmanagements entstammt der Energiewirtschaft und umfasst die Planung von Anlagenbe-

triebsweisen in der Zukunft zum Ausgleich von Bilanzkreisen. Übertragen auf industrielle Energiesysteme ist ein prognosebasiertes Fahrplanmanagementsystem somit die Umgebung zur Entwicklung von Fahrplänen für flexible Anlagen zur Erreichung lokaler energiewirtschaftlicher Ziele des Produktionsstandorts. Den Kern eines Fahrplanmanagementsystems bildet ein digitales Modell aller relevanten Erzeugungs- und Verbrauchsanlagen sowie Speichersysteme, das deren statische Anlagendaten und Wechselwirkungen untereinander abbildet. Dieses Modell ist vergleichbar mit jenen, die zur simulationsbasierten Auslegung industrieller Energiekonzepte eingesetzt werden (für eine Übersicht

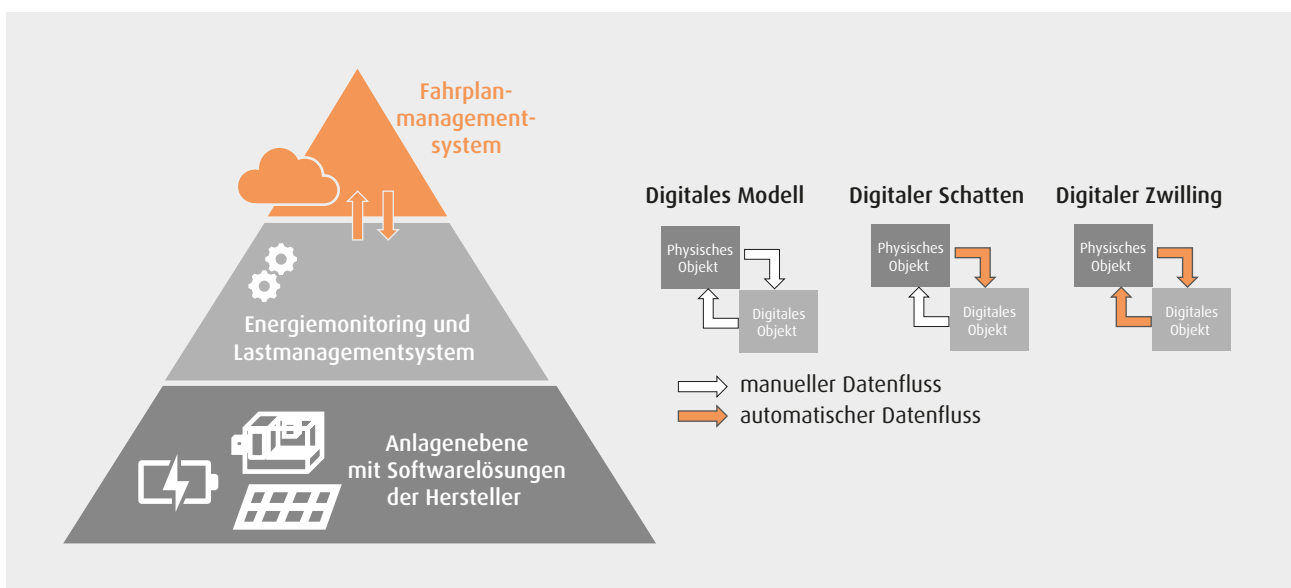


Bild 2. Einordnung des Fahrplanmanagementsystems in die Automatisierungspyramide mit Entwicklungsstufen des digitalen Zwillings (letzte nach [6,7])



Bild 3. Energiezentrale mit BHKW, Spitzenlastkessel, Pelletkessel (oben links) elektrische Heizelemente im Warmwasserspeicher (rechts) und neue Energiezentrale für Großwärmepumpen mit Batteriespeicher im Vordergrund (unten links)

vgl. [5]). Wird dieses digitale Modell nicht mehr manuell durch Anwender parametrisiert, sondern über einen automatisierten Datenfluss zur Integration von Messwerten und Prognosedaten, kön-

nen über die Algorithmen der Softwarelösung optimierte Fahrpläne erstellt werden. Da hierbei neben Energiedaten in kW und kWh auch monetäre Kennzahlen wie die resultierenden Kosten für

den Brennstoffbedarf, die entstehende Lastspitze oder den Stromnetzbezug in die Fahrplanerstellung einfließen, lassen sich konträre Zielgrößen gegeneinander abwägen und ein Gesamtkostenoptimum ermitteln. Im Zuge dessen lassen sich auch kalkulatorische Kosten einbinden, beispielsweise zusätzliche CO<sub>2</sub>-Kosten für den Einsatz fossiler Brennstoffe.

Die ermittelten Fahrpläne können zunächst visualisiert und bei Eignung manuell durch das Personal nachgefahren (digitaler Schatten) oder an das lokale Lastmanagement übergeben und automatisiert umgesetzt werden (digitaler Zwilling). Bild 2 stellt diese Anbindungsschritte vom digitalen Modell zum digitalen Zwilling dar und erläutert die Integration des meist cloudbasierten Fahrplanmanagements anhand einer vereinfachten Automatisierungspyramide.

### Umsetzung in der Green Factory Ungerhausen

In der Green Factory der Alois Müller GmbH in Ungerhausen werden Lüftungskanäle, versorgungstechnische Komponenten des Anlagenbaus sowie Energiemodulsysteme und Energiezentralen hergestellt. Ein modernes

| Nr. | Komponente         | Datenpunkt              | Register   | Einheit |
|-----|--------------------|-------------------------|------------|---------|
| 1   | BHKW               | Ist Leistung elektrisch | lesend     | kW      |
| 2   | BHKW               | Ist Leistung thermisch  | lesend     | kW      |
| 3   | BHKW               | Störmeldung             | lesend     | 0/1     |
| 4   | BHKW               | Leistung elektrisch     | schreibend | kW      |
| 5   | Pelletsessel       | Ist Leistung thermisch  | lesend     | kW      |
| 6   | Pelletsessel       | Leistung thermisch      | schreibend | kW      |
| 7   | Gaskessel          | Ist Leistung thermisch  | lesend     | kW      |
| 8   | Wärmepumpe         | Ist Leistung thermisch  | lesend     | kW      |
| 9   | Wärmepumpe         | Ist Leistung elektrisch | lesend     | kW      |
| 10  | Wärmepumpe         | COP                     | lesend     | COP     |
| 11  | Wärmepumpe         | Störmeldung             | lesend     | kW      |
| 12  | Wärmepumpe         | Leistung elektrisch     | schreibend | kW      |
| 13  | Power-to-Heat      | Ist Leistung elektrisch | lesend     | kW      |
| 14  | Power-to-Heat      | Ist Leistung thermisch  | lesend     | kW      |
| 15  | Power-to-Heat      | Leistung elektrisch     | schreibend | kW      |
| 16  | Pufferspeicher 1   | Temperaturfühler 1      | lesend     | °K      |
| 17  | Pufferspeicher 1   | Temperaturfühler 2      | lesend     | °K      |
| 18  | Pufferspeicher 1   | Temperaturfühler 3      | lesend     | °K      |
| 19  | Pufferspeicher 1   | Temperaturfühler X      | lesend     | °K      |
| 20  | Pufferspeicher 2   | Temperaturfühler 1      | lesend     | °K      |
| 21  | Pufferspeicher 2   | Temperaturfühler 2      | lesend     | °K      |
| 22  | Pufferspeicher 2   | Temperaturfühler 3      | lesend     | °K      |
| 23  | Pufferspeicher 2   | Temperaturfühler X      | lesend     | °K      |
| 24  | Warmernetz         | Ist Leistung thermisch  | lesend     | kW      |
| 25  | Kältenetz          | Ist Leistung thermisch  | lesend     | kW      |
| 26  | PV 1               | Ist Leistung elektrisch | lesend     | kW      |
| 27  | PV 2               | Ist Leistung elektrisch | lesend     | kW      |
| 28  | Netzanschluss      | Ist Leistung elektrisch | lesend     | kW      |
| 29  | Batteriespeicher 1 | Ist Leistung elektrisch | lesend     | kW      |
| 30  | Batteriespeicher 1 | SOC                     | lesend     | SOC     |
| 31  | Batteriespeicher 1 | Störmeldung             | lesend     | 0/1     |
| 32  | Batteriespeicher 1 | Leistung elektrisch     | schreibend | kW      |
| 33  | Batteriespeicher 2 | Ist Leistung elektrisch | lesend     | kW      |
| 34  | Batteriespeicher 2 | SOC                     | lesend     | SOC     |
| 35  | Batteriespeicher 2 | Störmeldung             | lesend     | 0/1     |
| 36  | Batteriespeicher 2 | Ist Leistung elektrisch | schreibend | kW      |
| 37  | Ladepark           | Ist Leistung elektrisch | lesend     | kW      |
| 38  | Ladepark           | Leistung elektrisch     | schreibend | kW      |

Bild 4. Controller zur Anbindung des Cloud-Services und Auszug aus der Datenpunktliste

Energiesystem (Bild 3) mit einer PV-Dachanlage (Leistung rund 2,2 MWp), einem mit Ökogas betriebenen BHKW mit 250 kW thermischer Leistung und 220 kW elektrischer Leistung und Spitzenlastkessel, Holzpelletskessel sowie elektrischen Heizelementen mit 600 kW elektrischer Leistung steht zur Wärme- und Stromversorgung zur Verfügung. Das innovative Energiesystem wird ergänzt mit Wärmerückgewinnungsanlagen, einer Stickstoffherstellungsanlage, zwei Batteriespeichern mit 1 500 kWh beziehungsweise 160 kWh sowie einer Ladesäuleninfrastruktur [8, 9].

Um die Potenziale zur Senkung von Kosten und Treibhausgasemissionen des heterogenen Anlagenparks weiter heben zu können und um auf Erweiterungen wie Großwärmepumpen und Elektrodenkessel automatisierungstechnisch vorbereitet zu sein, wurde in den vergangenen Monaten das beschriebene prognosebasierte Fahrplanmanagementsystem eingeführt. Hierzu wurden nach einer technisch-wirtschaftlichen Potenzialanalyse alle relevanten Anlagen mit lesenden (Aufnahme Ist-Werte) und schreibenden (Übergabe Soll-Werte) Datenpunkten zusammengeführt und ein Controller zur Datenanbindung in das lokale Bussystem des LMS integriert (Bild 4). Der Controller bildet das physische Bindeglied zwischen lokalem LMS und dem cloudbasierten Fahrplanmanagementsystem, das von einem Dienstleister bereitgestellt wird.

Zu Beginn der Einführung sind alle lesenden Schnittstellen an das Fahrplanmanagementsystem angebunden und das Modell des Energiesystems für das Fahrplanmanagementsystem aufgebaut worden. Hierzu sind statische Anlagendaten erforderlich, zum Beispiel Nennleistungen, technische Restriktionen wie maximale Betriebsstunden sowie Preisdaten wie Strombezugs- und Brennstoffkosten. Nach etwa zwei Wochen lagen dem Modell ausreichend historische Daten vor, um zuverlässige Prognosen des Strom- und Wärmebedarfs sowie der PV-Anlage zu erstellen. Im Anschluss konnten erste Fahrpläne erstellt werden, die zunächst in der Visualisierungsoberfläche des Last- und Fahrplanmanagementsystems dargestellt und manuell auf Plausibilität geprüft wurden. Mit dem derzeitigen Stand der Implementierung werden die Fahrpläne für das BHKW und das große Batteriespeichersystem erzeugt und über das LMS ausgeführt. Die situativen Regeleingriffe bleiben weiterhin aktiv, sodass beim Ausfall des Cloud-Ser-

vice oder bei starken Abweichungen der Ist-Werte von den Prognosen eine Rückfalllösung bestehen bleibt. Bild 5 zeigt Screenshots des angepassten LMS sowie Visualisierungen des BHKW-Fahrplans und der Strombedarfsprognose aus dem Fahrplanmanagementsystem.

### Fazit und Ausblick

Das prognosebasierte Fahrplanmanagementsystem der Green Factory in Ungershausen stellt die konsequente Weiterentwicklung des bisherigen situativen LMS dar. Das Fahrplanmanagementsystem konnte erfolgreich auf das BHKW und einen Batteriespeicher angewendet werden und soll in den kommenden Monaten auf weitere flexible Anlagen wie Ladesäulengruppen und Wärmepumpen erweitert werden. Simulationen im digitalen Modell des Fahrplanmanagementsystems zum Gesamtbetrieb mit integrierter Großwärmepumpe und allen Ladesäulengruppen ergaben eine potenzielle Senkung der Strom- und Wärmebereitstellungskosten von bis zu 50 % gegenüber dem LMS-Betrieb. Diese sind durch eine Senkung der Jahreshöchstlast auf ein Drittel sowie die Erhöhung des Autarkiegrads um rund 15 Prozentpunkte begründet. Durch die damit verbundenen vermiedenen fossilen Brennstoffe über Stromnetz- und Erdgasbezug werden laut den Simulationen die Treibhausgasemissionen um rund 30 % gegenüber dem Referenzszenario mit LMS-Betrieb gesenkt.

Die Einbindung produktionstechnischer Anlagen ist zunächst über den Zwischenschritt des digitalen Schattens vorgesehen, also über Fahrplanvorschläge zur manuellen Umsetzung. Mit den zunehmenden Freiheitsgraden, die dem Fahrplanmanagementsystem zur Verfügung stehen, werden monetäre Vorteile durch die strategische Senkung von Lastspitzen und die verbesserte Nutzung der eigenerzeugten Energie erwartet. Letztere dient zudem der Reduktion von Treibhausgasemissionen durch die Vermeidung von Stromnetzbezug und den Einsatz fossiler Brennstoffe.

Das Fahrplanmanagementsystem kann darüber hinaus auch als Investition in die Zukunft verstanden werden, denn dessen Aufbau schafft die Voraussetzung zur Nutzung perspektivischer Anwendungsfälle:

- Anpassung an dynamische Stromtarife, zu deren Angebot die Stromlieferanten seit Anfang 2025 gesetzlich verpflichtet sind [10]



**Der Branchen-Newsletter  
für die Automatisierungs-  
und Elektrotechnik**



**Jetzt kostenfrei registrieren unter:  
[www.etz.de/newsletter](http://www.etz.de/newsletter)**

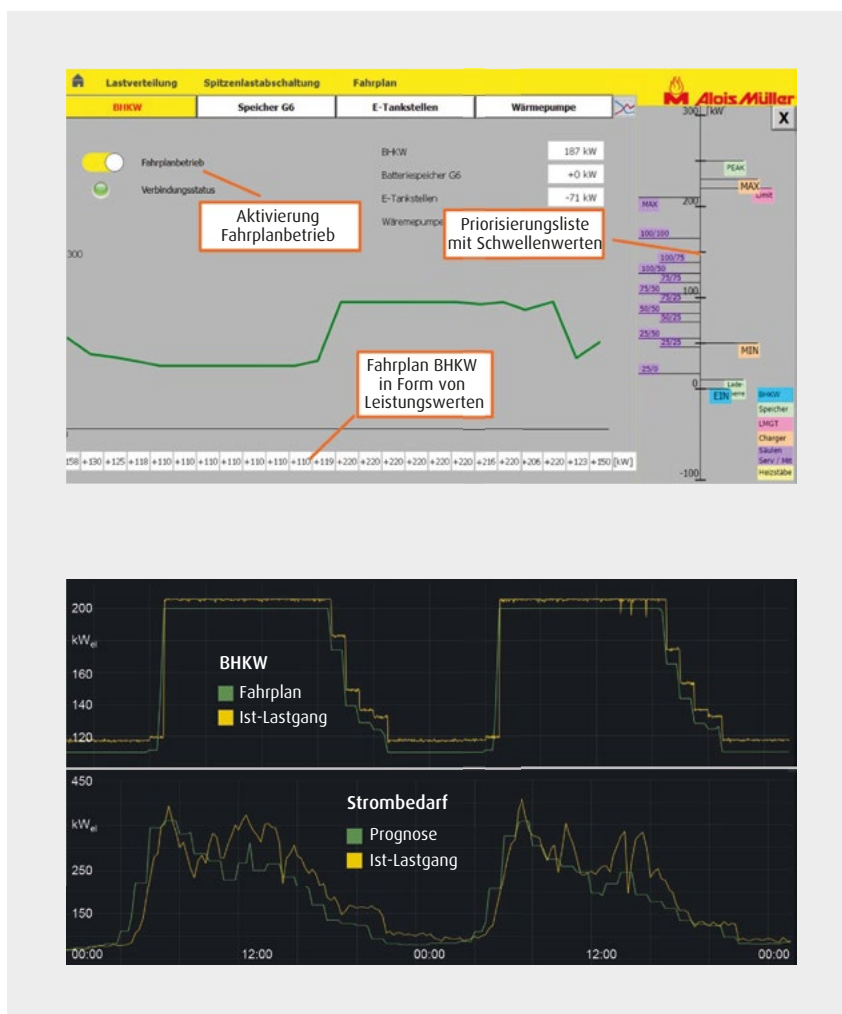


Bild 5. Screenshot aus dem angepassten Lastmanagementsystem (oben) und Visualisierungen des Fahrplanmanagementsystems (unten)

- Ermittlung der Zeitfenster zur Vermarktung der Restkapazitäten von Batteriespeichern neben der lokalen Optimierung
- Einbindung energieflexibler Produktionsanlagen zum Aufbau einer energieorientierten Produktionsplanung
- Nutzung der Anlagendaten für weiterführende Softwareservices wie zustandsbasierte Instandhaltung (Predictive Maintenance).

### Danksagung

Die Autoren bedanken sich beim Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR) für die Förderung und beim Projektträger Jülich (PTJ) für die Betreuung im Rahmen des Kopernikus-Projekts SynErgie (FKZ 03SFK3L3-3). Weiterer Dank gilt den engagierten Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Alois Müller GmbH sowie

der ECONTEC MSR GmbH, der ConsoInno Energy GmbH und der Smart Q Energy Solutions GmbH für die Zusammenarbeit bei der Implementierung und Weiterentwicklung des Fahrplanmanagementsystems.

### Literatur

- [1] Wirth, H.: Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland. [www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/aktuelle-fakten-zur-photovoltaik-in-deutschland.pdf](http://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/aktuelle-fakten-zur-photovoltaik-in-deutschland.pdf)
- [2] Senkpiel, C. et al.: Transformationspfade der Industrie: Energiesysteme, Flexibilität und Akteure. [www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/downloads/pdf/Ergebnisbericht\\_Ind-E.pdf](http://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/downloads/pdf/Ergebnisbericht_Ind-E.pdf)
- [3] VDI 5207-1: Energieflexible Fabrik, Blatt 1 – Grundlagen. Berlin, Beuth Verlag, 2020.
- [4] Roth, S.; Kalchschmid, V.; Wörle, M.: Digitales Energiemonitoring: Energiekos-

ten und Treibhausgasemissionen in der Produktion senken. Mittelstand-Digital Magazin: Wissenschaft trifft Praxis, Ausgabe 21 – Klimaneutralität (2024) S. 48–55.

- [5] Kalchschmid, V.; Erhart, V.; Angerer, K.; Roth, S.; Hohmann, A.: Decentral Production of Green Hydrogen for Energy Systems: An Economically and Environmentally Viable Solution for Surplus Self-Generated Energy in Manufacturing Companies? Sustainability (2023) 15, 2994. <https://doi.org/10.3390/su15042994>
- [6] Kritzinger, W. et al.: Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. IFAC-PapersOnLine, 51 (2018) 11, S. 1016–1022.
- [7] Brinkmann, J. et al.: Vom Energiedatenmanagement zum digitalen Zwilling. Industrie 4.0 Management 39 (2023) 5, S. 33–36.
- [8] Alois-Müller-Gruppe. Nachhaltigkeitsbericht 2025. <https://aloes-mueller.com/nachhaltigkeitsbericht>
- [9] van Stiphoudt, C.; Potenciano Menci, S.; Kaymakci, C., et al.: The Energy Synchronization Platform concept in the model region Augsburg to enable and streamline automated industrial demand response. Applied Energy 388 (2025) S. 125–455, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.125455>.
- [10] Agora Energiewende: Die Energiewende in Deutschland: Stand der Dinge 2024. Rückblick auf wesentliche Entwicklungen sowie Ausblick auf 2025. [www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2025/2024-18\\_DE\\_JAW24/A-EW\\_351\\_JAW24\\_WEB.pdf](http://www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2025/2024-18_DE_JAW24/A-EW_351_JAW24_WEB.pdf)



**Dr. Stefan Roth,**  
Leiter ESG und Projektleiter  
Energiemanagement,  
e-con AG, Memmingen



**Dr. Dennis Bauer,**  
Niederlassungsleiter,  
e-con AG, Stuttgart



**Bruno Blöchl,**  
Stellvertretender  
Abteilungsleiter  
Automatisierungs- und  
Elektrotechnik,  
Alois Müller GmbH,  
Ungerhausen

- >> [stefan.roth@econ-ag.com](mailto:stefan.roth@econ-ag.com)  
[dennis.bauer@econ-ag.com](mailto:dennis.bauer@econ-ag.com)  
[bruno.bloechl@aloes-mueller.com](mailto:bruno.bloechl@aloes-mueller.com)
- >> [www.econ-ag.com](http://www.econ-ag.com)  
[www.aloes-mueller.com](http://www.aloes-mueller.com)