

Zeitschrift: bulletin.ch / Electrosuisse
Herausgeber: Electrosuisse
Band: 113 (2022)
Heft: 5

Artikel: Skalierbarer Energie-Optimierer mit KI
Autor: Bünner, Martin / Berthold, Matthias / Carelli, Erich
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1037097>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 02.04.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>



Labor-Setting bei Battery Consult mit Salzbatte-rie.

Skalierbarer Energie-Optimierer mit KI

Energiespeicher optimal bewirtschaften | Energiemärkte zeichnen sich durch eine hohe Volatilität aus. Deshalb beschäftigen Energiekonzerne professionelle Energiehändler und verlassen sich zunehmend auf datenbasierte KI-Werkzeuge, um Kauf- und Verkaufsentscheidungen zu unterstützen. Was zunächst im Finanzsektor Vorteile brachte, kommt nun auch im Energiesektor zum Einsatz.

MARTIN BÜNNER, MATTHIAS BERTHOLD, ERICH CARELLI, CHRISTIAN ZUMBRUNN

Da der liberalisierte Strommarkt aktuell nur für Grosskunden ab einem Jahresenergieverbrauch von 100 MWh zugänglich ist, waren viele Endverbraucher von dieser Volatilität abgeschottet. EVUs bieten Kleinkunden und Haushalten meist fixe Tarifsyste- me an. Durch die Installation von privaten PV-Anlagen kombiniert mit einem Energiespeicher erleben jedoch immer mehr Endverbraucher die Volatilität der Erzeugung und des Verbrauchs.

Im Gegensatz zur Schweiz ist der Energiemarkt in Österreich und Deutschland seit Jahren für alle Kunden liberalisiert. Hier sind bereits flexible, börsenpreisabhängige Tarife für den Erwerb von Strom durch Anbieter wie Tibber oder Awattar verfügbar. Dadurch können für Endkunden auch unerwünschte Konsequenzen entstehen, wenn z. B. bei hohen Energiepreisen viel Energie verbraucht wird.

Will der Endanwender nun von den Schwankungen profitieren oder zu-

mindest keine Verluste erleiden, müsste er täglich Mikro-Entscheidungen über den Kauf bzw. Verkauf von Strom oder das Laden/Entladen der Batterie treffen. Ein Vorgehen, das die wenigsten Anwender wählen werden, da es jeweils nur um wenige Rappen Gewinn geht. Eine mögliche Lösung für den Endanwender kann ein KI-basierter Energiemanager sein, der gemäss der Anwenderpräferenz vollautomatisch optimale Entscheidungen für den Anwender trifft.

Ein solcher Energiemanager, SaliOpt, wurde von Battery Consult in Meiringen, in Kooperation mit den KI-Spezialisten der Ostschweizer Fachhochschule, entwickelt. Battery Consult beschäftigt sich seit Jahrzehnten mit der Weiterentwicklung der Salzbatte-rie mit Fokus auf die Entwicklung ressourcenschonender Fertigungsprozesse und Zelldesigns. Ein grosses Potenzial sieht das Unternehmen in der Bereitstellung einer langlebigen und sicheren Energiespeichertechnologie [1], um die Kosten pro gespeicherte kWh zu minimieren. Eine preisgünstige Speichertechnologie wird helfen, mögliche Netz- und Energieengpässe in der volatilen Welt der erneuerbaren Energien zu bewältigen.

Langlebigkeit und eine optimale Aus-nutzung von Ressourcen können nicht alleine durch die Bereitstellung eines geeigneten Energiespeichers erreicht werden, sondern erfordern auch eine «intelligente» Bewirtschaftung dieses Energiespeichers. Um den inflationären Einsatz der Begriffe «intelligent» und «smart» nicht weiter zu verstärken, verwenden wir hier «optimal» in einem strikt mathematischen Sinn: Optimal sind die bestmöglichen Entscheidungen, die das System überhaupt zulässt.

Die hier vorgestellte Technologie berechnet automatisch optimale Ent-scheidungen auf der Basis von Wettervorhersagen und Einspeise- und Bezugstarifen. Damit bleiben die Vor-teile von KI-basierten Entscheidungssystemen nicht nur Konzernen vorbehalten, sondern können auch in Privathaushalten die Energiekosten reduzieren. Dazu steht SaliOpt als Source-Code zur Verfügung und kann in vorhandene Hardware (z. B. Wechselrichter) oder auf einem PC oder Controller integriert werden, um das haus-eigene Energiesystem zu steuern.

Die Basis für die optimalen Kauf-, Verkaufs-, Lade- und Entlade-Entscheidungen des Energiemanagers bilden die vom Anwender konfigurierten Prä-ferenzen und die aktuellen Vorhersagen für die Stromerzeugung sowie Ein-speise- und Kauftarife. Damit eröffnet sich auch für Verteilnetzbetreiber die Möglichkeit, mittels Preissignalen die Entscheidungen von Tausenden von Endanwendern zu beeinflussen.

Die integrierte KI-Mathematik

Der Kern der exakten Berechnung von optimalen Entscheidungen ist die

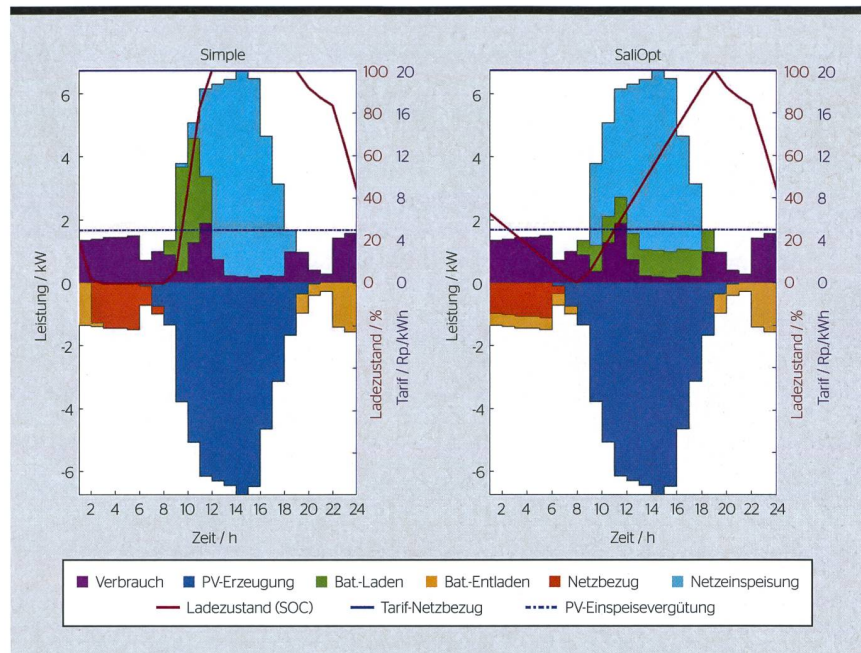


Bild 1 (a) Betrieb mit der Simple-Strategie, **(b)** Betrieb mit optimalen Entscheidungen. Der Lade- und Entladevorgang (grüne und gelbe Flächen) erfolgen mit geringerer Leistung über einen längeren Zeitraum.

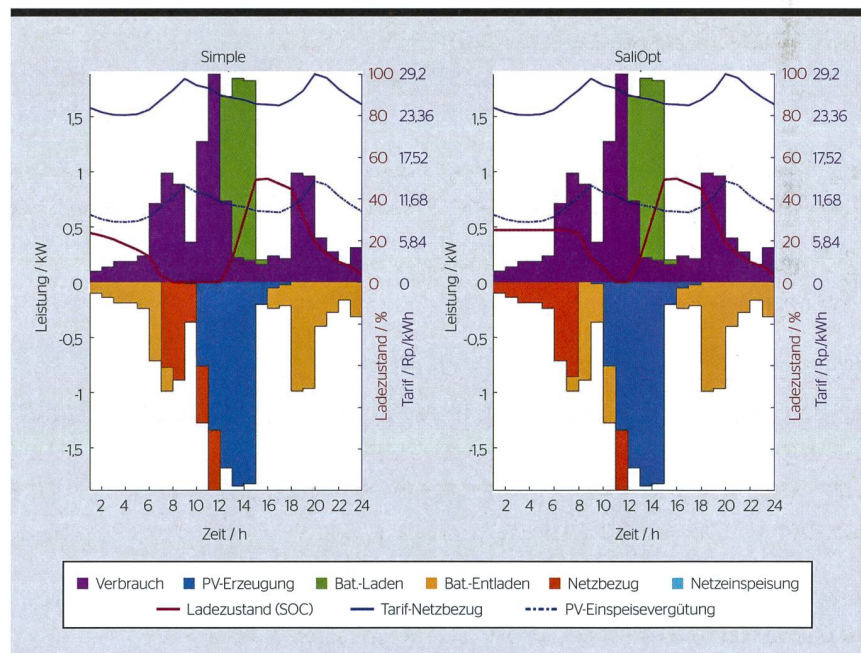


Bild 2 (a) Betrieb mit der Simple-Strategie, **(b)** Betrieb mit optimalen Entscheidungen. Der Akku wird erst bei steigenden Strompreisen ab 6 Uhr entladen (gelbe Fläche).

Mathematik. Die Informatik macht aus den mathematischen Ergebnissen eine ausführbare und damit in der Praxis anwendbare Form. Die mathematische Basis von SaliOpt ist ein Quadratic-Programming-(QP)-Problem mit einer positiv-semidefiniten Hesse-Matrix, dessen Lösung die optimale darstellt. Die Komplexität des QP ist

hoch – je nach konkreter Problemstellung mehrere Hundert reellwertige Design-Variablen und Zehntausende bis Hunderttausende Nebenbedingungen.

Gemäss der Mathematik existieren für diese Klasse von Optimierungsproblemen – anders als bei nicht-linearen Optimierungsproblemen im

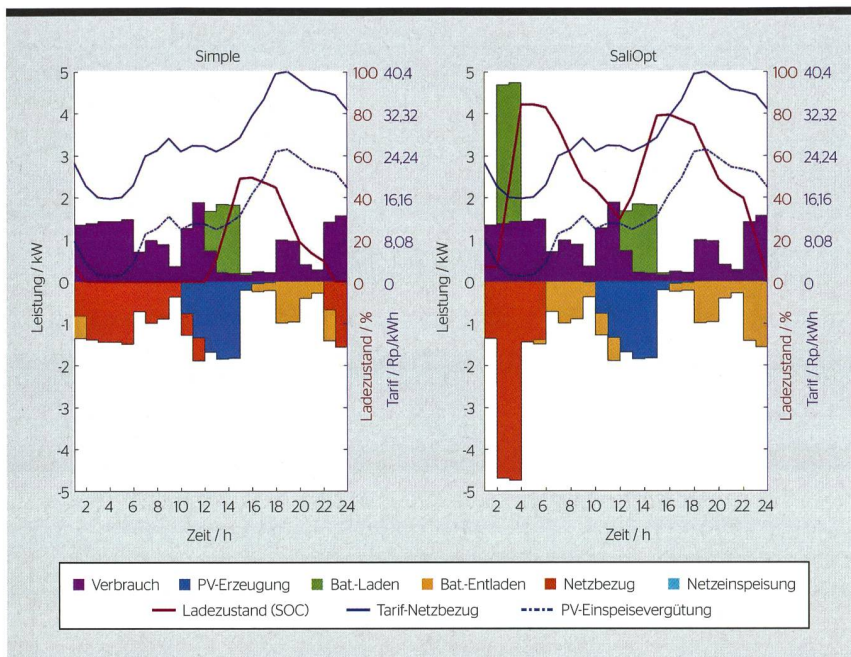


Bild 3 (a) Betrieb mit der Simple-Strategie, (b) Betrieb mit optimalen Entscheidungen. Der Akku wird bei tiefen Strompreisen zwischen 2 und 4 Uhr geladen und bei höheren Strompreisen zwischen 5 und 12 Uhr entladen.

	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
PV-Erzeugung (Nennleistung: 10 kW)	53 kWh (sonniger Sommertag)	7,8 kWh (sonniger Wintertag)	7,8 kWh (sonniger Wintertag)
Haushaltsbedarf (AVG = 4,4 MWh/a)	11,9 kWh	11,9 kWh	11,9 kWh
Elektroauto (ca. 60 km/Tag)	10 kWh	0 kWh	10 kWh
Gesamtverbrauch	21,9 kWh	11,9 kWh	21,9 kWh
Gesamtkosten (VGL Simple = 100 %)	100 %	93 %	78 %
Akkutechnologie	Salzbatterie (stark leistungsabhängige Lebensdauer)	Li-Ionen Speicher (kaum leistungsabhängige Lebensdauer)	Zukünftiger Li-Ionen Speicher (Speicherkosten sehr gering)
Kundentarif	Konstant 20 Rp/kWh Netzbezug, 5 Rp/kWh Netzeinspeisung	Energie dynamisch ¹⁾ , Netz + Steuern konstant	Energie dynamisch ¹⁾ , Netz + Steuern konstant
Vorteile	Lebensdauer, Netzverträglichkeit (Gradient & PV-Peak)	Kostensparnis, Akku wird in der Nacht bei den höchsten Energiepreisen entladen	Kostensparnis (Netz: Laden bei günstigen Preisen, Entladen bei hohen Strompreisen)

Tabelle Auszug einiger Kennwerte der drei Szenarien.

¹⁾ Energiepreise für Netzbezug und Vergütung bei Netzeinspeisung: Day-Ahead-Preise der Epex-Spot vom 17. Januar 2021. Netz und Steuern: Bei Netzbezug fallen Netzgebühren und Steuern an. Deshalb wird auf den variablen Energiepreis ein konstanter Aufschlag von 15 Rp/kWh addiert (Netzgebühren und Steueranteil mit je 7,5 Rp/kWh).

Allgemeinen – keine ko-existierenden lokalen Minima. Deshalb genügt es zur Bestimmung der optimalen Energiemanagement-Strategie, einen einzigen Punkt zu finden, der die KKT-Bedingungen erfüllt.

Um diesen KKT-Punkt schnell und sicher zu finden, verfügt SaliOpt über einen modernen QP-Solver [2], der wichtige Vorteile in sich vereint: Der

Solver ist kompakt, schnell und effizient im Sinne der Numerischen Mathematik und kommt ohne die Integration einer speicherintensiven Mathematik-Bibliothek aus. Deshalb kann dieser Manager selbst in kleinen Microcontrollern integriert werden. Dadurch kann SaliOpt kostengünstig in bereits vorhandene Hardware (z. B. Wechselrichter) integriert werden. Natürlich

kann SaliOpt auch in einem Stand-Alone-System oder einem PC mit geeigneten Schnittstellen integriert werden.

Von daher stellt sich die Frage an Anwender: Warum sich mit «guten» Kauf- und Verkaufs-Entscheidungen sowie Lade- und Entlade-Entscheidungen zufrieden geben, wenn zu jedem Zeitpunkt die bestmöglichen Entscheidungen gefunden werden können.

Der Energiemanager bietet folgende Vorteile:

- **Konfigurierbar** auf verschiedene Speichertechnologien (Li-Ionen, Salzbatterie u. v. m.), bei Photovoltaik auf geografische Lage und Wetterprognose.
- **Anwenderpräferenzen** können berücksichtigt werden, z. B. Energieautarkie, Energiekosten oder System-Lebensdauer.
- **Optimale Entscheidungen** zur Bewirtschaftung einer Batterie: Kauf/Verkauf sowie Lade/Entlade-Entscheidungen.
- **Flexibler und ressourcenschonend:** Source-Code kann in zahlreiche Mikro-Controller integriert werden.
- **Skalierbar:** Kann für Anlagen im kWh- bis zum GWh-Bereich verwendet werden.
- **Netzsteuerung über Preissignale** des Netzbetreibers: schnelle und sichere Umwandlung in optimale lokale Entscheidungen.

Ergebnisse

Die meisten Batterien für PV-Anlagen verwenden ein simples Batteriemangement: Bei PV-Energieüberschuss wird die Batterie mit maximal möglicher Leistung geladen. Sobald der Energiebedarf geringer als der PV-Ertrag ist, wird die Batterie mit maximal möglicher Leistung entladen, bis sie leer ist. Das Limit ist entweder die maximal mögliche Leistung des Wechselrichters (hier 3 kW) oder die verfügbare Überschussleistung. Im Folgenden wird diese Strategie als «Simple Lösung» bezeichnet. Sie wird mit der bestmöglichen Strategie verglichen.

Für möglichst realistische Szenarien werden reale Messdaten einer 10-kW-PV-Anlage in Süd-West-Ausrichtung am Standort Meiringen mit 28° Modulneigung verwendet. Die Verbrauchsdaten wurden, an realistischen Verbrauchsmessungen angelehnt, künstlich erzeugt.

Szenario 1: Längere Lebensdauer bei Salzbatte-rie

An einem sonnigen Werktag im August 2021 liefert die 10-kW-PV-Anlage mit 53 kWh deutlich mehr Energie, als tagsüber verbraucht wird. Überschussenergie wird in einer 7-kWh-Salzbatterie gespeichert. Für die Nacht werden zusätzlich zum Haushaltsbedarf noch 10 kWh für das Laden eines Elektrofahrzeugs benötigt. Das Zeitfenster für das Laden des E-Fahrzeugs ist zwischen 22 Uhr und 6 Uhr frei wählbar. Der Kunde hat einen fixen Tarif: Der Netzbezug beträgt immer 20 Rp/kWh und die Netzeinspeisung stets 5 Rp/kWh.

Simple Lösung: Bild 1a zeigt das Verhalten eines herkömmlichen Energiemanagement-Systems: Die Salzbatte-rie wird am Vormittag mit maximaler Leistung (hier 3 kW wegen dem Batteriekonverter) geladen. Die Batterie ist noch vor der PV-Mittags-spitze komplett geladen und der Lade-vorgang wird abrupt beendet. Dieses Ende vor der Mittagsspitze erzeugt einerseits einen hohen Leistungsgra-dienten im Netz, andererseits wird das Netz mit der maximalen PV-Einspei-seleistung belastet. Nachmittags wird die anfallende Überschussenergie ebenfalls ins Netz eingespeist. Nachts wird der Akkuspeicher mit der möglichen Leistung entladen, der Akku ist um kurz nach 2 Uhr leer.

Optimale Lösung: Bild 1b zeigt das Energiemanagement mit SaliOpt. Die Salzbatte-rie wird tagsüber mit gleich-mässiger, deutlich geringerer Leistung geladen (grüne Fläche). In der Nacht

wird die gleiche Energiemenge entla-den, aber mit geringerer Entladelei-stung (gelbe Fläche).

Durch die intelligente zeitliche Ver-teilung der Lade- und Entlade-Vor-gänge erhöht sich die Lebensdauer der Batterie deutlich. Zudem sind die Ver-luste beim Laden und Entladen beim Akkuspeicher geringer und das Netz wird weniger belastet.

Szenario 2: Reduktion der Energiekosten

An einem sonnigen Wintertag liegt die PV-Erzeugung mit 7,8 kWh unter dem Tagesverbrauch von 11,9 kWh. Das EW bietet variable Tarife für Bezug und Ein-speisung an. In diesem Szenario basiert der Stromtarif auf realen Börsenprei-sen: Der Einspeisetarif entspricht dem Day-Ahead-Börsenpreis, der aufgrund von stark schwankenden Wind- und PV-Erträgen in Europa stark variiert. Der Tarif für den Netzbezug entspricht demselben Day-Ahead-Börsenpreis plus einem Aufschlag von 15 Rp/kWh für die Steuern und Netzegebühren.

Simple Lösung: Bild 2a zeigt das Verhalten mit einem herkömmlichen Energiemanagement, das die variablen Tarife nicht nutzen kann. Der Akku wird gemäss dem Verbrauch über die Nacht auch bei tiefen Energiepreisen entladen und ist somit kurz nach 7 Uhr leer.

Optimale Lösung: Bild 2b zeigt das Energiemanagement mit SaliOpt. Der Akku wird zwischen 0 und 6 Uhr nicht entladen, denn der Bedarf wird kosten-günstig über das Netz gedeckt, da in dieser Zeit der Strom am günstigsten

ist. Der Akku wird erst zwischen der Zeit von 6 und 11 Uhr entladen, da der Strom teurer ist und die PV-Anlage noch nicht ausreichend Energie liefert. So profitiert der Anwender von den tieferen Energiekosten während der Nacht. Zukünftig könnte so der Netzbetreiber auch Spitzen verschieben, indem er mit einem geeigneten Netz-Tarifsystem zeitabhängige Anreize setzt.

Die optimale Lösung zeichnet sich durch geringere Energiekosten aus, da variable Energietarife optimal genutzt werden. Der Netzbetreiber kann eine höhere Netzstabilität erreichen, indem er den Kundenverbrauch und die Kundeneinspeisung mittels Preissignalen zeitlich verschiebt.

Szenario 3: Zukunft

Dieses Szenario weist in die Zukunft, denn es setzt auf eine Batterietechnologie mit sehr geringen Speicherkosten. Gleichzeitig wird künftig von stark dynamischen Tarifsystemen ausgegangen, die zeitabhängige Preissignale für Energie- und/oder Netzkosten ausweisen. In diesen Systemen kann Sali-Opt auch ohne nennenswerte PV-Erträge einen hohen Nutzen erbringen, indem der Akku in Zeiten mit geringem Strompreis geladen und in Zeiten mit hohem Strompreis entladen und somit der Netzbezug reduziert wird. Zukünftig kann damit individuell und automatisiert auf indizierte Preissig-nale eines Energielieferanten oder Netzbetreibers reagiert werden, um sowohl Netz- als auch Energieanfor-derungen berücksichtigen zu können. Bei entsprechender Verbreitung kann

RÉSUMÉ

Un optimiseur énergétique évolutif basé sur l'IA

Gestion optimale des systèmes de stockage d'énergie

Les technologies basées sur l'intelligence artificielle (IA) peuvent être utilisées dans un environnement complexe et dynamique tel que l'approvisionnement en énergie afin de déterminer par calcul des décisions optimales et offrir ainsi des avantages aux utilisateurs. Jusqu'à présent, les obstacles liés à l'exploitation de l'intelligence artificielle étaient toutefois si conséquents que seuls les groupes des secteurs financier ou énergétique pouvaient en profiter.

Dans le projet « SaliOpt », soutenu par Innosuisse, les auteurs ont développé une réalisation concrète d'une technologie basée sur l'IA pour la gestion d'un système de stoc-

kage par batterie à l'échelle domestique. Cette technologie peut désormais être mise à disposition du marché et des utilisateurs.

À l'aide de trois scénarios, l'article montre comment une gestion de l'énergie utilisant l'IA peut prolonger la durée de vie d'une batterie saline, réduire les coûts énergétiques et apporter des avantages importants même en l'absence de rendements photovoltaïques significatifs – et ce, en chargeant la batterie lorsque le prix de l'électricité est faible et en la déchargeant lorsque le prix de l'électricité est élevé, tout en réduisant par la même occasion l'utilisation du réseau.

NO

damit ein substanzieller Beitrag zur Integration erneuerbarer Energien und zur Beseitigung von Netzengpässen geleistet werden.

Simple Lösung: Bild 3a zeigt das Verhalten mit einem herkömmlichen Energiemanagement, welches variable Tarife nicht nutzen kann: Der Akkuspeicher wird tarifunabhängig geladen und entladen. Somit haben die Preisanreize der EVUs oder der Netzbetreiber keinen Einfluss auf das Verbrauchsverhalten.

Optimale Lösung: Bild 3b zeigt das Energiemanagement mit SaliOpt. Die Batterie wird entladen, wenn die Strompreise hoch sind, und geladen, wenn die Strompreise niedrig sind. Dadurch wird der Netzbezug – wie von den Anbietern gewünscht – in Zeiten mit hohem Strompreis reduziert und in Zeiten mit tiefem Strompreis erhöht. Die Strompreise senden ein wichtiges Preissignal: Ist der Strompreis tief, herrscht im Netz ein Energieüberschuss, weshalb die Nachfrage erhöht werden sollte. Ist der Strompreis hoch,

herrscht im Netz tendenziell ein Energiemangel, weshalb die Nachfrage reduziert werden sollte.

Die optimale Lösung reduziert hier die Energiekosten für den Anwender um 22%, da zeitlich variable Netzbezug- und Einspeisetarife optimal genutzt werden können. Zudem könnte der Netzbetreiber die Netzstabilität erhöhen, indem er den lokalen Netzbezug und die Netzeinspeisung seiner Kunden mit variablen Netz-Preissignalen steuert.

Zusammenfassung und Ausblick

KI-Technologien können in einem komplexen, dynamischen Umfeld wie der Energieversorgung optimale Entscheidungen berechnen und damit dem Anwender einen Nutzen bringen. Bisher waren die Hürden für den Einsatz von Künstlicher Intelligenz so hoch, dass vor allem Konzerne in der Finanz- oder Energiebranche davon profitieren konnten. In dem von der Innosuisse (Nr. 37006.1 IP-EE) geförderten Pro-

jekt «SaliOpt» entwickelten die Autoren eine konkrete Realisierung einer solchen KI-Technologie für den Hausgebrauch zur Bewirtschaftung eines Akkuspeichers. Nun kann diese Technologie dem Markt und Anwendern zur Verfügung gestellt werden.

Referenzen

- [1] C.-H. Dustmann, A. Bito, «Safety», Encyclopedia of Electrochemical Power Sources, 2009, S. 324-333.
- [2] B. Stellato, G. Banjac, P. Goulart, A. Bemporad, S. Boyd, «OSQP: An operator splitting solver for quadratic programs», Mathematical Programming Computation, 12 (4), 2020, 637-672.

Autoren

Prof. Dr. **Martin Bünner** ist Dozent für Mathematik und Künstliche Intelligenz an der Ostschweizer Fachhochschule.
→ OST, 9471 Buchs
→ martin.buenner@ost.ch

Dipl. Ing. **Matthias Berthold** ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am IES der Ostschweizer Fachhochschule.
→ matthias.berthold@ost.ch

Dr. **Erich Carelli** ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am ICE der Ostschweizer Fachhochschule.
→ erich.carelli@ost.ch

Christian Zumbrunn ist Hardware-Entwickler bei der Battery Consult AG.
→ Battery Consult AG, 3860 Meiringen
→ christian.zumbrunn@batteryconsult.ch

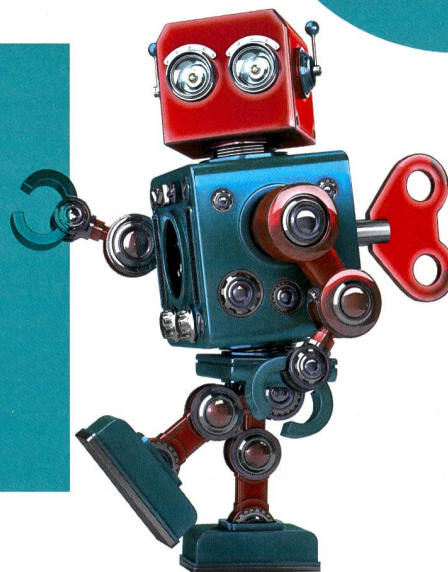
esolva
we make energy easy

Besuche uns an den
Powertagen
vom 17. - 19. Mai 2022
in der Messe Zürich.

Halle 6 / Stand F09

Spielend einfach

den Smart-Meter-Rollout in deinem Versorgungsgebiet planen und umsetzen.



esolva ag Weinfelden Arbon St. Gallen Landquart T +41 58 458 60 00 www.esolva.ch info@esolva.ch