

Zeitschrift: bulletin.ch / Electrosuisse
Herausgeber: Electrosuisse
Band: 112 (2021)
Heft: 3

Artikel: Wegweiser aus dem Energie-Trilemma
Autor: Sulzer, Matthias
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-977537>

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: 13.01.2026

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



Wegweiser aus dem Energie-Trilemma

Energieplanung mit Algorithmen | Der Wandel zu einem erneuerbaren Energiesystem eröffnet einen schnell expandierenden Lösungsraum. Fachpersonen müssen aus vielen Möglichkeiten die geeignetste Lösung finden. Dabei braucht es eine Güterabwägung zwischen Zuverlässigkeit, Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit. Diese Arbeit wird mit umfassenden Daten und Algorithmen unterstützt.

MATTHIAS SULZER ET AL.

Um das Klimaziel netto null Treibhausgas-Emissionen im Jahr 2050 zu erreichen [1], muss prioritär das heutige Energiesystem umgebaut werden. Werden die heutigen Energieverbraucher ausschliesslich mit CO₂-freier Energie versorgt, ist die Voraussetzung geschaffen, damit sämtliche Wirtschaftszweige klimagerecht produzieren und Private sich klimagerecht verhalten können. Eine solche Transformation geht einher mit der Steigerung der Energieeffizienz und dem Erschliessen erneuerbarer Energiequellen wie Sonne, Wind, Biomasse, Geothermie, Gewässer etc.[2]

Der Technologiemix eines Energiesystems, welches vollständig durch erneuerbare Energien betrieben wird,

ist vielfältiger als das heutige, öl- und gas-dominierte Energiesystem. Um die mannigfachen Energiequellen zu nutzen, aber auch, um deren Einsatz dem Bedarf anzupassen, braucht es diverse technische Lösungen, wie Solaranlagen, Erdwärmesonden, Speichersysteme, Wärmepumpen, Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen (WKK) und Fernwärmesysteme. Zusätzlich garantieren interagierende Energiemanagement-Systeme einen sicheren und effizienten Betrieb.

Eine weitere Entwicklung ist in der Struktur und Organisation des Energiesystems zu erkennen. Erneuerbare Energiequellen sind von Natur aus kleinskalig und treten verteilt im urbanen und ländlichen Raum auf. Die

lokale und regionale Nutzung solcher Energiequellen bringt wirtschaftliche Vorteile und steigert die Energieeffizienz. Dezentrale Energiesysteme¹⁾ sind Konzepte, welche die Transformation des Energiesystems vorantreiben.[3]

Definiert werden sie als ein Zusammenschluss von mehreren Gebäuden in einem Quartier oder Areal, welche vorwiegend erneuerbare Energien sowie verschiedene Umwandlungs- und Speichertechnologien gemeinsam nutzen (Bild 1).

Das Konzept der dezentralen Energieversorgung brachte und bringt eine Grosszahl an neuen Produkten und Dienstleistungen hervor. Diese Zunahme der Innovationstätigkeit im Energiesektor ist entscheidend, um

Bild: hpgruesen/pixabay

das Netto-null-Ziel zu erreichen. Auf dem Weg zu diesem ehrgeizigen, aber realistischen Ziel muss eine Vielzahl von Entscheidungen getroffen werden. Hervorgerufen durch neue Produkte und Dienstleistungen²⁾ erweitert sich die Auswahl an möglichen Lösungen kontinuierlich (**Bild 2**). Die Frage stellt sich: Wie kann ein Energieplaner in einem schnell expandierenden Lösungsraum die wirkungsvollste Lösung für sein Projekt finden?

Energieversorgungs-Trilemma

Um sich im immer grösser werdenden Lösungsraum zurechtzufinden, braucht es Orientierungshilfen. Damit können Energieplaner die verschiedensten Produkte und Dienstleistungen vergleichen und die am besten geeignete Lösung für ihr Energieversorgungsprojekt auswählen. In den letzten Jahren haben sich drei Beurteilungskriterien als Orientierungshilfen hervorgerufen: Zuverlässigkeit, Wirtschaftlichkeit und Umweltverträglichkeit des Energiesystems. Diese drei Kriterien gilt es zu maximieren, um die beste Lösung für das jeweilige Projekt zu erhalten. Wie so oft stehen die Kriterien in einer Wechselwirkung. Wird beispielsweise die Nachhaltigkeit verbessert, verschlechtert sich die Wirtschaftlichkeit und umgekehrt. Zwischen den drei Kriterien muss eine Güterabwägung stattfinden, oder eben: Das Energieversorgungs-Trilemma muss bewältigt werden (**Bild 3**).

Der Energieplaner muss Hunderte, wenn nicht Tausende von möglichen Technologien und Technologiekombinationen in diesem Trilemma beurteilen und die beste respektive die optimale Lösung mittels Güterabwägung für sein Projekt finden. Es ist unschwer erkennbar, dass mit den herkömmlichen Planungsinstrumenten – vornehmlich excel-basierte Berechnungs-Tools – das Finden von optimalen Lösungen im Trilemma sehr zeitaufwendig und zum Teil nur mit kritischen Vereinfachungen möglich ist. Die Digitalisierung unterstützt Energieplaner heute bei der Suche nach der optimalen Lösung.

Digitalisierung schafft Klarheit im Trilemma

Die Datenerfassung im urbanen Gebiet wird immer umfassender. Mit Satellitendaten und Luftaufnahmen können digitale 3D-Modelle von Städten, Dör-

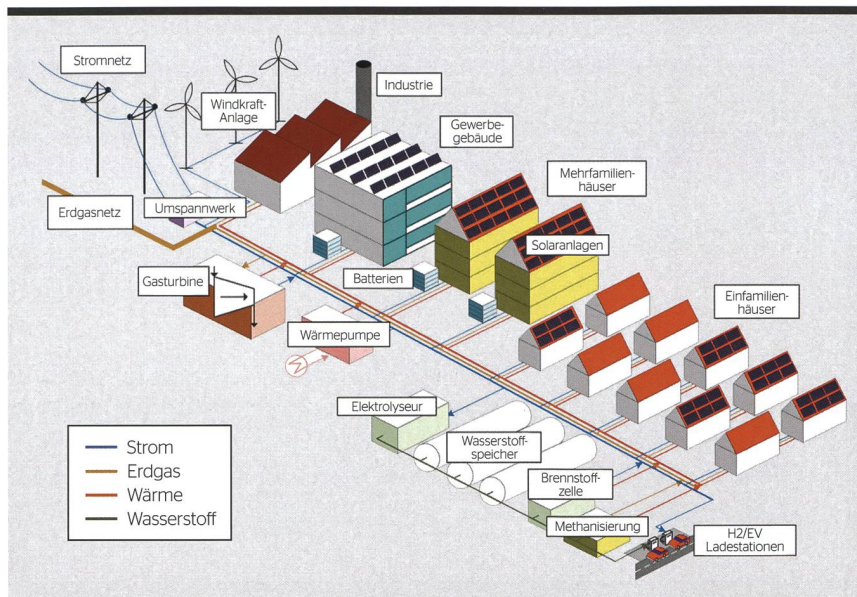


Bild 1 Technologien und Infrastrukturen für urbane, dezentrale Energiesysteme.

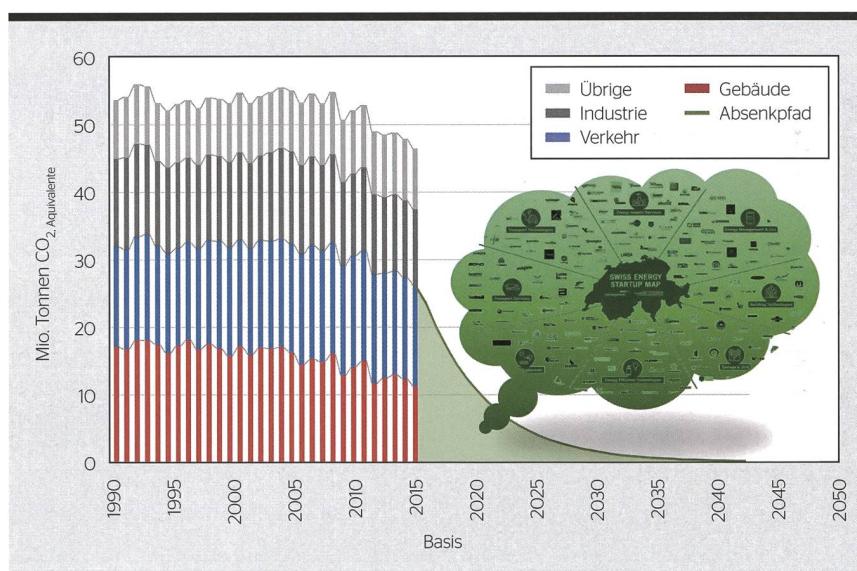


Bild 2 Treibhausgasemissionen der verschiedenen Sektoren gemäss CO₂-Monitoring des Bafu (www.bafu.admin.ch/co2-statistik). [9] Der expandierende Lösungsraum (grüne Wolke), welcher neue Technologien bereitstellt, beeinflusst den Absenkpfad (grüne Linie, 15% jährliche Reduktion).

fern und Quartieren erstellt werden. Bestehende und neue Infrastrukturen werden mittels GIS- und BIM-Daten erfasst und ermöglichen die Anfertigung von geo-referenzierten, digitalen Modellen für den Hoch- und Tiefbau. Aufzeichnungen anonymer Bewegungsprofile von Menschen in Städten nutzen einerseits Technologieunternehmen wie zum Beispiel Google für kundenspezifische Werbung, andererseits können statistisch relevante Nutzungsprofile für Restaurants, Läden oder Büros erstellt werden. Die daraus

resultierenden Lastprofile können die Planung und den Betrieb von Energiesystemen verbessern, indem zum Beispiel die Dimensionierung der technischen Anlagen und der Betrieb auf die fluktuierenden Energiequellen wie Sonne und Wind abgestimmt werden. [4]

Dies sind nur ein paar einzelne Beispiele, wie aus der «Datenquelle Stadt» ein Nutzen für Energiesysteme gewonnen werden kann. Die Datenbasis ermöglicht nicht nur, aktuelle Informationen über den Zustand der Energie-

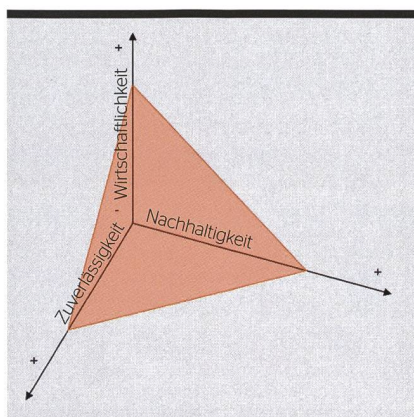


Bild 3 Grafische Darstellung des Trilemmas der Energieversorgung.

versorgung bereitzustellen, sondern erlaubt auch, Szenarien für das zukünftige Energiesystem zu entwickeln. Ob eine Wärme-Kraft-Kopplung mit synthetischem Gas im Quartier X in der Stadt Y sinnvoll ist, kann dank Daten und Algorithmen simuliert und optimiert werden. Die Resultate können zur Beurteilung der drei Kriterien Zuverlässigkeit, Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit herangezogen werden. Die Wirkung kann im Trilemma dargestellt werden und hilft Energieplanern, zum Beispiel die WKK-Lösung im Vergleich mit anderen Versorgungsvarianten zu beurteilen.

Muss nicht nur eine Technologie untersucht, sondern verschiedenste etablierte und neue Technologien sowie deren Kombination beurteilt werden, braucht es leistungsfähige

Computer und Algorithmen (siehe auch Machine Learning³⁾). Aus diesem und vielen weiteren Bedürfnissen⁴⁾ zur Nutzung von urbanen Daten ist die Disziplin «Urban Informatics» (UI) entstanden. Das Ziel von UI ist, grosse, vielfältige Datensätze zu analysieren und zu verstehen.[5-7] Im vorliegenden Fall wird damit Klarheit im Trilemma geschaffen, um fundierte Entscheidungen treffen zu können.

Optimale Lösungen finden und anbieten

Aus dem Bereich UI sind leistungsstarke Instrumente für die Planung und den Betrieb von komplexen Systemen – wie dezentralen Energiesystemen – hervorgegangen. An der Empa und der ETH Zürich sowie im Rahmen des SCCER-FEEB&D⁵⁾ wurden in den letzten sieben Jahren Algorithmen entwickelt, welche die Planung und den Betrieb von dezentralen Energiesystemen unterstützen.[8] Basierend auf verschiedenen Datenquellen können digitale Modelle von heutigen und zukünftigen Energiesystemen erstellt werden. Anhand dieser Modelle werden Energieströme simuliert und Energiesysteme optimiert.

Das Ziel ist dabei, alle optimalen Lösungen eines Projektes im Energie-Trilemma zu finden und diese dem Energieplaner verständlich darzustellen. Planer können aus den Resultaten die geeignetste Lösung mittels Güterabwägung wählen. Dabei haben sie die Sicherheit, dass jede wählbare Lösung

immer eine optimale Lösung ist, das heisst maximale Sicherheit und Nachhaltigkeit bei gewählter Wirtschaftlichkeit.

Die Bewertung der drei Kriterien im Trilemma berechnet das Empa-Spin-off Symphony beispielsweise wie folgt:

- **Zuverlässigkeit:** Die Energiebilanzen werden für jede Stunde im Jahr erstellt, wobei 15-Minuten-Bilanzen möglich sind. Diese stündlichen Energiebilanzen müssen jederzeit vollständig ausgeglichen sein, das heisst, dass bei der Versorgungssicherheit keine Güterabwägung erlaubt ist und eine 100-Prozent-Erfüllung dieses Kriteriums berücksichtigt wird. Die Dimensionierung der optimalen Technologien erfolgt anhand der Bilanzen.
- **Wirtschaftlichkeit:** Ausgangslage sind zwei Beurteilungsgrössen. Die **Lebenszykluskosten** berücksichtigen die Amortisationskosten über die Lebensdauer der gewählten Technologie plus die jährlichen Betriebskosten (Unterhalt, Wartung und Energie). Die **Ertragsrechnung** berücksichtigt neben den Lebenszykluskosten auch die Verkaufskosten (Tarife) und berechnet Wirtschaftlichkeitsindikatoren (NPV, IRR).
- **Nachhaltigkeit:** Als Beurteilungsgrösse wird der jährliche CO₂-Ausstoss mittels stündlicher Bilanzen berechnet. Dabei können die CO₂-Emissionen für die Erstellung, den Betrieb und den Rückbau der gewählten Technologien berücksichtigt werden. Die CO₂-Lebenszyklusanalyse erlaubt die Beurteilung der Energieströme nicht nur nach der Quantität (Energieintensität), sondern auch nach der Qualität (CO₂-Intensität).

Mit leistungsfähigen Cloud-Rechnern wird der immense Lösungsraum aller möglichen Energiesysteme durchsucht. Die jeweils optimalen Lösungen werden schliesslich in einer Pareto-Front dargestellt (**Bild 4**). Das Kriterium Zuverlässigkeit wird in der Pareto-Front nicht dargestellt, da es immer zu 100 % erfüllt ist. Der Energieplaner kann anhand der einfachen, zweidimensionalen Pareto-Front die geeignetste Lösung für seinen Kunden wählen. Jede Lösung entspricht einer spezifischen Kombination von Technologien, welche im Detail visualisiert und weiter analysiert werden kann.

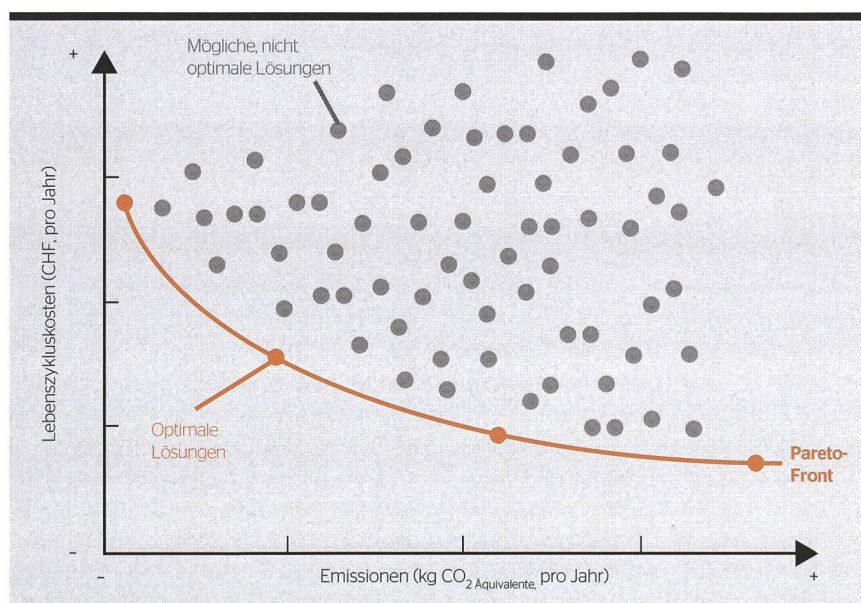


Bild 4 Lösungsraum (graue Lösungen) mit Pareto-Front (orange, optimale Lösungen).

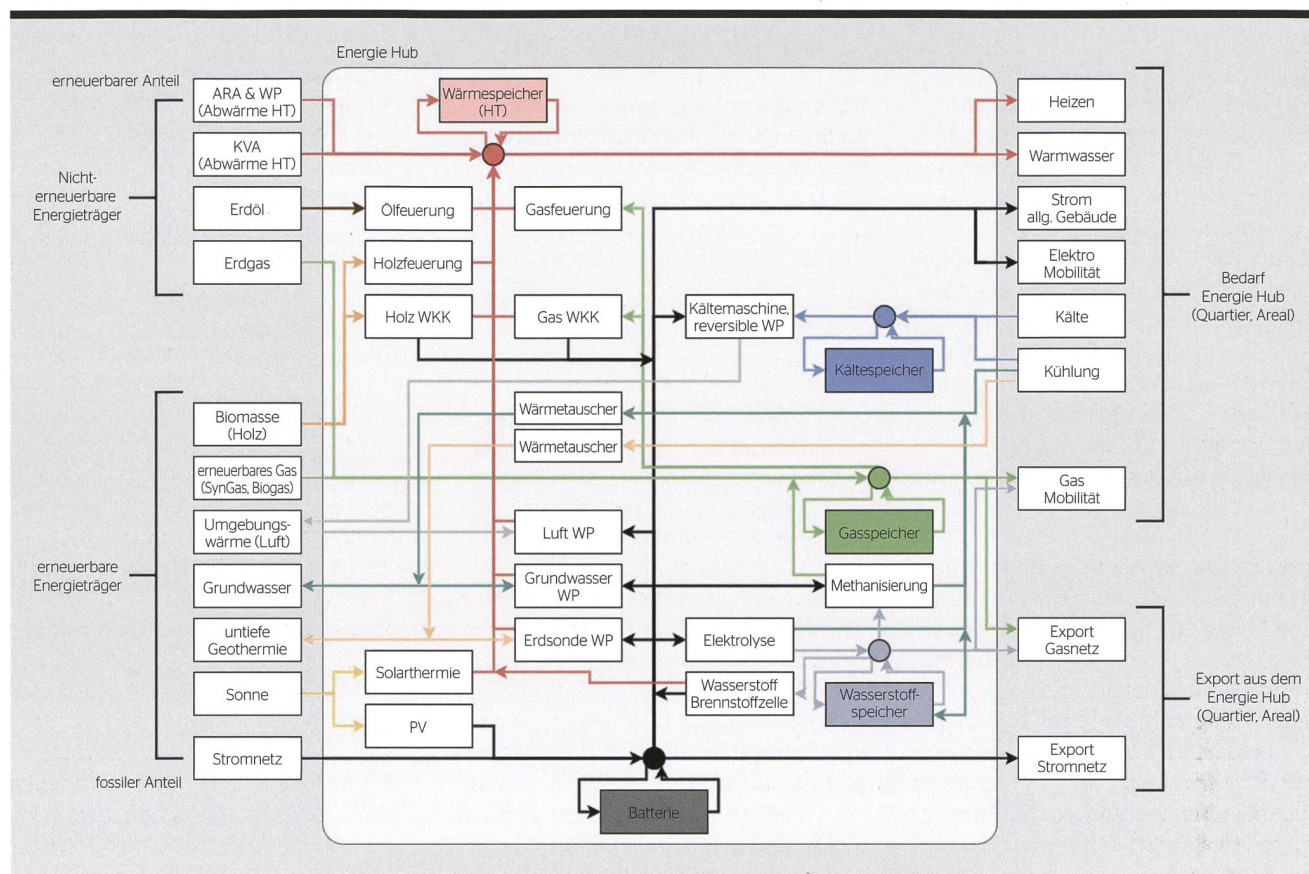


Bild 5 Energy Hub Modell für die Stadt Chur. Lösungen daraus kann die IBC für ihre Quartierkonzepte nutzen.

Energieplaner, welche bisher mit viel Aufwand und wenig Präzision ihre Konzepte mit umfangreichen Excel-Tabellen erstellt haben, können mit solchen neuen Planungsinstrumenten umfassende und optimierte Konzepte mit wenig Aufwand für ihre Kunden entwickeln. Die Planer erhalten anstelle zeitraubender Datenverarbeitung mehr Zeit für kreative Arbeit, wie zum Beispiel Sensitivitätsanalysen, um robuste Lösungen zu planen. Solche Instrumente sind als Werkzeuge zu verstehen. Sie ersetzen also nicht die Fachperson, sondern erleichtern ihr die Arbeit.

Ein Beispiel aus der Praxis

Die IBC Energie Wasser Chur hat sich zum Ziel gesetzt, bis 2040 kein CO₂ in ihrem Versorgungsgebiet zu emittieren. Um den optimalen Technologiemix für die Energieversorgung zu finden, wurde für die Stadt Chur ein digitales Modell (**Bild 5**) erstellt. Anhand dieses Modells wurden die Pareto-Fronten für 2018, 2035 und 2050 berechnet (**Bild 6**). Jeder Punkt auf der Pareto-Front repräsentiert ein optima-

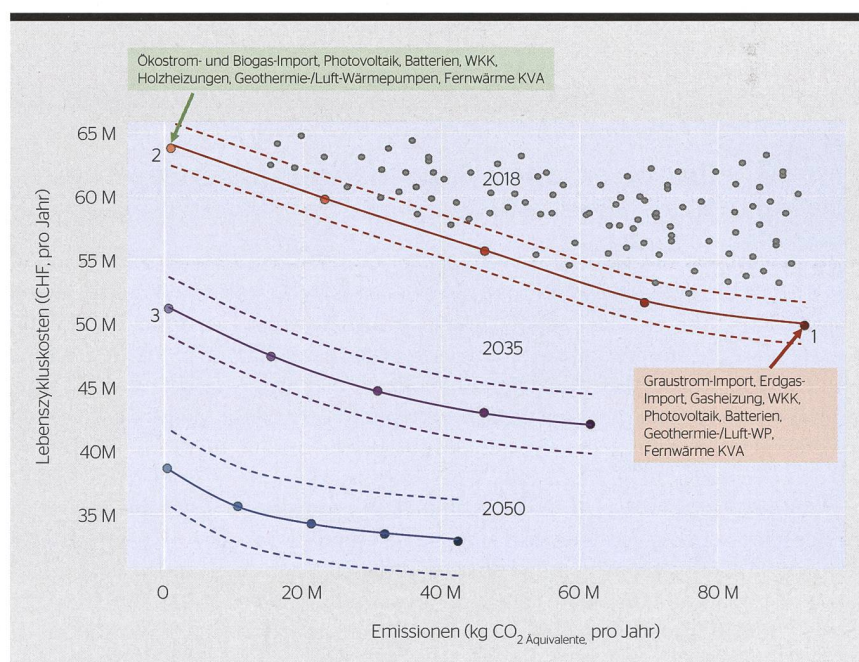


Bild 6 Pareto-Fronten der Energieversorgung der Stadt Chur für die Jahre 2018, 2035 und 2050. Graue Punkte zeigen mögliche Lösungen für 2018, welche jedoch nicht optimal sind. Farbig sind die optimalen Lösungen, die Pareto-Fronten und deren Unsicherheiten (gestrichelte Linien) dargestellt. Pareto-Punkt 1 zeigt die kosten-minimale Lösung und Pareto-Punkt 2 zeigt die nachhaltigsten Lösungen für 2018. Pareto-Punkt 3 zeigt die nachhaltigste Lösung (Netto-null-Szenario) 2035, welche in etwa die gleichen Kosten verursacht wie die Ist-Situation 2018.

les Energiekonzept. Auf der Pareto-Front 2035 und 2050 kann die Lösung gewählt werden, mit welcher die Stadt Chur ihre CO₂-Ziele von <3 kg CO₂/m²EFB⁶⁾ beziehungsweise null CO₂-Emissionen bei minimalen Kosten erreicht. In den Detailanalysen der jeweiligen Lösungen werden die Massnahmen für den Umbau des Energiesystems ersichtlich. Interessant war dabei, zu erkennen, dass das heutige Energiesystem (**rechts von Pareto-Punkt 1 in Bild 6⁷⁾**) in ein nahezu CO₂-freies Energiesystem (Pareto-Punkt 3) umgebaut werden kann, ohne die Wirtschaftlichkeit, das heisst die Lebenszykluskosten, zu erhöhen. Zu beachten gilt, dass der Umbau hohe Investitionen benötigt, welche jedoch die Wirtschaftlichkeit gegenüber heute nicht verschlechtern.

Im Weiteren kann die IBC einen agilen Transformationsprozess umsetzen. Nach jedem Umbauschritt können die Möglichkeiten für die nächsten Umbauschritte unter Berücksichtigung neuer Technologien und/oder Rahmenbedingungen neu berechnet und in einer angepassten Pareto-Front dargestellt werden. Die IBC ist damit in der Lage, jeden Ausbauschritt anhand aktuellster Informationen zu bestimmen. Damit wird das Risiko für den Umbau

des Energiesystems minimiert. Die IBC nutzt die neusten Erkenntnisse der algorithmen-unterstützten Planung, um das Netto-null-Ziel mit minimalem Risiko zu erreichen, das heisst mit optimalen Lösungen.

Referenzen

- [1] «Totalrevision des CO₂-Gesetzes nach 2020», «Abkommen zwischen der Schweiz und der EU über die Verknüpfung der Emissionshandelssysteme», Bafu, 2020, in Vernehmlassung.
- [2] «Energiesysteme 2050 Monitoring-Bericht 2018 Langfassung», BFE, 2018, S. 17-19.
- [3] M. Sulzer, K. Orehoung, A. Bollinger, «Komplexität ist die neue Einfachheit», Aqua & Gas, 9/2020.
- [4] C. Walbel, R. Evins, J. Carmeliet, «Co-simulation and optimization of building geometry and multi-energy systems: Interdependencies in energy supply, energy demand and solar potentials», Applied Energy, Nummer 242, 2019, S. 1661-1682.
- [5] F. Radulovic, M. Poveda-Villalón, D. Vila-Suero, V. Rodríguez-Doncel, R. García-Castro, A. Gómez-Pérez, «Guidelines for Linked Data generation and publication: An example in building energy consumption», Automation in Construction, Nummer 57, 2015, Seiten 178-187.
- [6] F. Orlandi, A. Meehan, M. Hossari, S. Dev, D. O'Sullivan, T. AlSkaf, «Interlinking Heterogeneous Data for Smart Energy Systems», Proc. International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST), 2019.
- [7] M. Zekić-Sušac, S. Mitrović, A. Has, «Machine learning based system for managing energy efficiency of public sector as an approach towards smart cities», International Journal of Information Management, 2020, 102074.
- [8] F. Bünnig, B. Huber, P. Heer, A. Aboudonia, J. Lygeros, «Experimental demonstration of data predictive control for energy optimization and thermal comfort in buildings», Energy and Buildings 211, 10979.
- [9] www.bafu.admin.ch/co2-statistik.

Link
www.sympheny.com

Autoren

Prof. **Matthias Sulzer** ist Wissenschaftler in der Abteilung Urban Energy Systems der Empa
→ empa, 8600 Dübendorf
→ matthias.sulzer@empa.ch

Dr. **Kristina Orehoung** ist Abteilungsleiterin Urban Energy Systems an der Empa.
→ kristina.orehoung@empa.ch

Dr. **Andrew Bollinger** ist Wissenschaftler in der Abteilung Urban Energy Systems der Empa
→ andrew.bollinger@empa.ch

¹⁾ Es sind verschiedene Ausdrücke für dezentrale Energiesysteme in Gebrauch (nicht abschliessende Aufzählung): Multi-Energiesysteme, lokale Energiesysteme, oder im Englischen: Energy Hubs, distributed energy systems. Hier wird der Begriff «dezentrales Energiesystem» für technische Systeme und Infrastrukturen auf Stufe Quartier, Areal und Stadtteil verwendet.

²⁾ Siehe Swiss Environment and Energy Innovation Monitor, wie zum Beispiel Insolight, Green-Y, Exnaton, Cowa, Aliunid, Clemap etc.

³⁾ Maschinelles Lernen ist ein Unterbereich der künstlichen Intelligenz und bezieht sich auf den Prozess des automatischen Lernens von Computeralgorithmen durch Erfahrung (Umgang mit grossen Datensätzen).

⁴⁾ Unsicherheit und die daraus resultierenden Risiken sind weitere Aspekte, welche in der Entscheidungsfindung berücksichtigt werden müssen. Algorithmen und Konzepte aus dem Versicherungssektor werden genutzt und auf den Energiesektor angepasst.

⁵⁾ Das Interuniversitär vernetzte Kompetenzzentrum für Energieforschung im Bereich Gebäude und Areale ist seit 2014 operativ und ist Teil der koordinierten Energieforschung der Schweiz.

⁶⁾ Energiebezugsfläche: Summe aller ober- und unterirdischen Geschossflächen, für deren Nutzung ein Beheizen oder Klimatisieren notwendig ist.

⁷⁾ Das heutige Energiesystem ist nicht optimal, das heisst die Lebenszykluskosten sind in etwa gleich gross wie Pareto-Punkt 1. Der CO₂-Ausstoss ist aufgrund der Ölheizungen, welche durch ein gleichwertiges Heizsystem mit weniger CO₂-Emissionen ersetzt werden könnten, höher.

RÉSUMÉ

Une orientation dans le trilemme énergétique

Planification énergétique au moyen d'algorithmes

Afin d'atteindre l'objectif climatique de zéro émission nette de gaz à effet de serre d'ici à 2050, il faut en priorité restructurer le système énergétique actuel. Les sources d'énergie renouvelables qui doivent permettre de réaliser un approvisionnement en énergie exempt de CO₂ sont, par nature, disponibles à petite échelle et se répartissent entre l'espace urbain et l'espace rural. De ce fait, le système énergétique devient décentralisé. Combiné à de nouveaux produits et services, le choix de solutions envisageables s'étend en permanence. La question suivante se pose : dans un paysage de solutions en rapide expansion, comment un planificateur en énergie peut-il trouver la solution la plus efficace pour son projet ?

Pour pouvoir comparer les produits et services les plus divers et choisir la solution la plus appropriée à leur projet d'approvisionnement en énergie, les planificateurs en énergie ont besoin de points de repère. Ces dernières années, trois critères d'appréciation se sont distingués comme tels :

la fiabilité, la rentabilité et la durabilité du système énergétique. Il s'agit de maximiser ces trois critères afin d'obtenir la meilleure solution pour le projet en question. Le planificateur en énergie doit évaluer des centaines, voire des milliers de technologies et de combinaisons de technologies possibles dans ce trilemme, et trouver pour son projet la meilleure solution, ou la solution optimale, grâce à une pesée des intérêts.

L'Empa et l'EPF de Zurich, mais aussi un projet dans le cadre du SCCER FEEB&D, ont développé ces sept dernières années des algorithmes qui soutiennent la planification et l'exploitation de systèmes énergétiques décentralisés. Grâce à ces nouveaux instruments de planification, les planificateurs en énergie qui, jusqu'à présent, élaboraient leurs concepts au moyen de volumineux tableaux Excel, au prix de beaucoup d'efforts et de peu de précision, peuvent désormais développer facilement des concepts optimisés et de grande ampleur pour leurs clients.

MR

Lebe frei von Energie- kosten.

Unser Hauskraftwerk ist einzigartig in der solaren Not- und Ersatzstromversorgung. Investiere jetzt in eine sichere und autarke Zukunft mit einem Batteriespeicher.

e3dc.com/ch



ENERGY STORAGE
E3DC

Ein Unternehmen der Hager Group