

Abstract white lines resembling a circuit board or data paths, with several small white circles at various points, set against a background with a blue-to-yellow gradient.

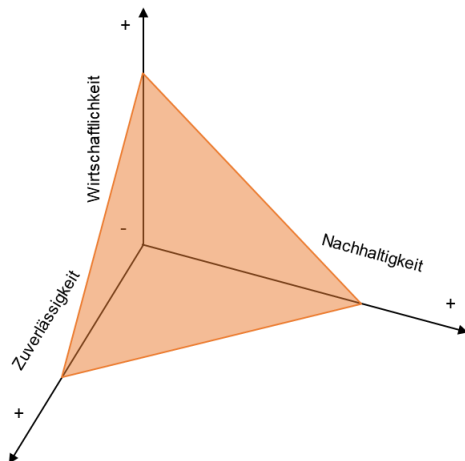
# SPOTLIGHT INTEGRALES ENERGIESYSTEM- MODELL

Matthias Sulzer, Martin Rüdüsüli, Robin Mutschler,  
Christian Opitz  
13. Dezember 2022

2050  
**Energiezukunft**

## Gesamtheitliche Betrachtung des Energiesystems

Um Entwicklungspfade für das heutige Energiesystem hin zu einem wirtschaftlichen, nachhaltigen und zuverlässigen zukünftigen Energiesystem zu evaluieren, ist eine gesamtheitliche Betrachtung unerlässlich. Im heutigen Energiesystem sind die einzelnen Sektoren – insbesondere Energie (Elektrizität, Wärme), Mobilität und Industrie wenig vernetzt. Durch die Elektrifizierung der Wärme (Wärmepumpen) und Mobilität (Elektrofahrzeuge) findet eine Abkehr von den fossilen Energieträgern sowie eine verstärkte Sektorkopplung statt. Diese Kopplung eröffnet einen schnell expandierenden Lösungsraum. Um sich im immer grösser werdenden Lösungsraum zurecht zu finden, braucht es Kriterien, nach welchen man die Lösungen beurteilt, um sich so im Lösungsraum zurecht zu finden. In den letzten Jahren haben sich drei Beurteilungskriterien hervorgerufen: (i) Zuverlässigkeit, (ii) Wirtschaftlichkeit und (iii) Nachhaltigkeit des Energiesystems, wie in der folgenden Abbildung gezeigt. Diese drei Kriterien gilt es zu maximieren, um die beste Lösung für das Energiesystem Schweiz zu erhalten. Wie so oft stehen diese Kriterien in einer Wechselwirkung. Daraus entsteht ein sogenanntes Trilemma: Wird zum Beispiel die Nachhaltigkeit verbessert, verschlechtert sich die Wirtschaftlichkeit und umgekehrt. Zwischen den drei Kriterien muss eine Güterabwägung stattfinden.



Die Auswahl und der Einsatz der zur Verfügung stehenden Technologien führt zu fast endlos möglichen Kombinationen, welche das Energiesystem bilden können. Um zu informierten und optimierten Entscheidungen zu kommen, werden heute bei solch komplexen Fragen mathematische Modelle erstellt. Dies erlaubt das systematische Finden der optimalen Lösung im fast endlosen Lösungsraum.

## VSE-Modell: Simulation der Energiezukunft

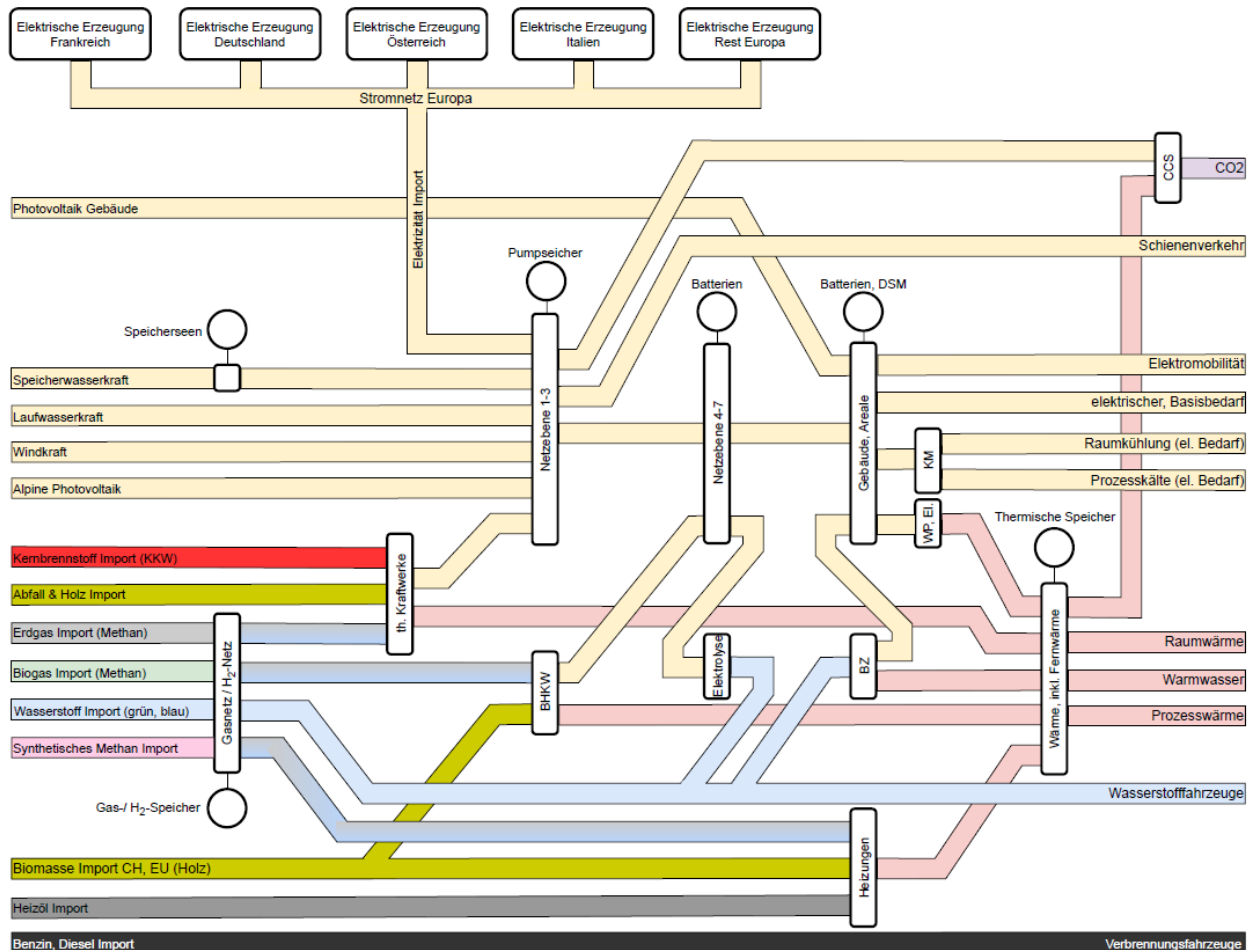
Der VSE hat in Zusammenarbeit mit der Empa ein Modell für das Energiesystem Schweiz unter Berücksichtigung der Energieinfrastruktur der Nachbarländer erstellt. Ein Modell ist eine abstrahierte Abbildung der Realität. Die Herausforderung besteht in der Auswahl der geeigneten Abstraktion einzelner Systemkomponenten, welche die Realität genügend genau abbildet, aber dennoch die Komplexität des Modells nicht unnötig erhöht. Die Modellierung durchläuft die folgenden vier Stufen:

1. Abstraktion der Realität in den Modellkomponenten
2. Parametrisierung der Modellkomponenten
3. Erstellung des Systemmodells aus den Modellkomponenten mit exogen vorgegebenen Randbedingungen
4. Lösung des Modells, d.h. finden der optimalen Lösungen

Insbesondere die Stufen 1 und 2 wurden im VSE-Projekt in enger Zusammenarbeit mit Expertinnen und Experten aus der Branche umgesetzt. Folgende Aspekte werden im VSE-Modell abgebildet:

- Energiebedarf für die Sektoren Gebäude, Mobilität, Dienstleistungen und Industrie, unterteilt in die jeweiligen Energieträger Elektrizität, Wärme (Heizung und Kühlung), Brenn- und Treibstoffe (flüssig und gasförmig)
- Energieressourcen aus inländischen Quellen wie Wasser, Wind, Sonne, Biomasse, Umgebungswärme und Geothermie
- Energieimporte wie Erdölprodukte, Elektrizität, Biomasse und Wasserstoff
- Umwandlungstechnologien wie Turbinen, Wärmepumpen, Kältemaschinen, Photovoltaik, Elektrolyse, Brenner, etc.
- Speichertechnologien wie stationäre Batterien, Batterieelektrische Fahrzeuge (Vehicle-to-Grid), Wärmespeicher, Gasspeicher
- Netzwerktechnologien wie Stromnetze, Gasnetze und Wärmenetze
- Demand-Side-Management (DSM)

Die folgende Abbildung zeigt den schematischen Aufbau des modellierten Energiesystems.

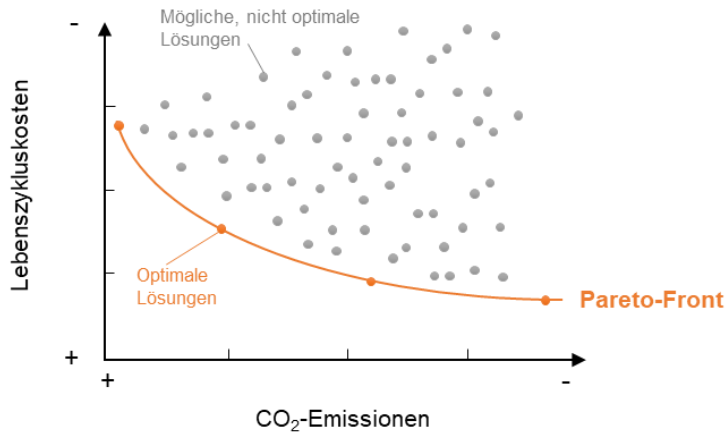


Das integrale VSE-Energiesystemmodell wurde mit einer zeitlichen Auflösung von einer Stunde gebaut. Damit können stundenscharfe Aussagen über die Energieflüsse berechnet und Lastspitzen, Kapazitätsbedarf und dynamische Effekte analysiert werden.

Eine Grundanforderung an die möglichen Lösungen bildet der zwingende Ausgleich jeder Energiebilanz zu jeder Stunde. Damit wird die Beurteilungsgröße 'Zuverlässigkeit' in jeder Lösung zu 100% erfüllt und kann nicht gegenüber den Kriterien 'Wirtschaftlichkeit' oder 'Nachhaltigkeit' abgewogen werden. Gerade in einem elektrischen System ist diese Bedingung zwingend, um die Versorgungssicherheit zu gewährleisten.

Die Aspekte 'Wirtschaftlichkeit' und 'Nachhaltigkeit' können hingegen gegeneinander abgewogen werden. Einige Lösungen überzeugen durch eine hohe Wirtschaftlichkeit, andere durch eine hohe Nachhaltigkeit. Im VSE-Modell wird die Wirtschaftlichkeit anhand der im Lebenszyklus einer Technologie anfallenden Systemkosten (LCC) und die Nachhaltigkeit anhand der direkten, inländischen CO<sub>2</sub>-Emissionen (gemäß Paris Agreement) beurteilt. Die Optimierung sucht minimale Systemkosten bei minimalen CO<sub>2</sub>-Emissionen im Lösungsraum. Werden all diese optimalen Lösungen gefunden, bildet sich eine sogenannte Pareto-Front.

Auf dieser Pareto-Front können die Lösungen gewählt werden, welche entweder die gewünschten Systemkosten oder CO<sub>2</sub>-Emissionen einhalten, wie die folgende Abbildung zeigt.



Um die Auswirkung der Systemkosten und CO<sub>2</sub>-Emissionen zu berechnen, müssen die einzelnen Komponenten im Modell spezifiziert werden. Folgende Parameter wurden berücksichtigt:

- Technologien
  - Lineare, annualisierte Investition auf die Lebensdauer (CAPEX)
  - Betriebskosten, inkl. Energie, Unterhalt, Reparatur (OPEX)
  - Umwandlungseffizienz der jeweils zugeführten Energieträger
  - Speicherverluste, wenn Energie gespeichert wird
  - Übertragungsverluste, wenn Energie transportiert wird
- Energieimporte
  - Importpreise Elektrizität, abhängig vom Technologieeinsatz der EU-Länder
  - Marktpreise und CO<sub>2</sub>-Intensität Erdölprodukte
  - Grenzkapazitäten bei der Elektrizität zu – und von den Nachbarländern (NTC)
  - Gas-Importkapazitäten (Methan, Wasserstoff)
  - Importkapazitäten von Biomasse

Algorithmen durchsuchen den gesamten Lösungsraum. Diese Algorithmen kombinieren, dimensionieren und simulieren verschiedenste Möglichkeiten, bis die Lösungen mit minimalen Systemkosten und CO<sub>2</sub>-Emissionen gefunden wurden. Die Wahl der Lösung auf der Pareto-Front erfolgte bei den VSE-Szenarien anhand eines vorgegebenen CO<sub>2</sub>-Preises und die daraus resultierende Kombination von Technologien, welche minimale Systemkosten aufweisen.

Das VSE-Modell wurde anhand ausgewählter Szenarien und Betrachtungsjahre parametrisiert. Folgende 13 Modelle wurden erstellt und nach minimalen Systemkosten bei gewähltem CO<sub>2</sub>-Preis aufgelöst:

- 4 Szenarien
  - Offensiv-Integriert
  - Offensiv-Isoliert
  - Defensiv-integriert
  - Defensiv-isoliert
- Beurteilungsjahr
  - Referenzjahr (kalibrierter Status des Energiesystems heute)
  - 2030, 4 Szenarien
  - 2040, 4 Szenarien
  - 2050, 4 Szenarien

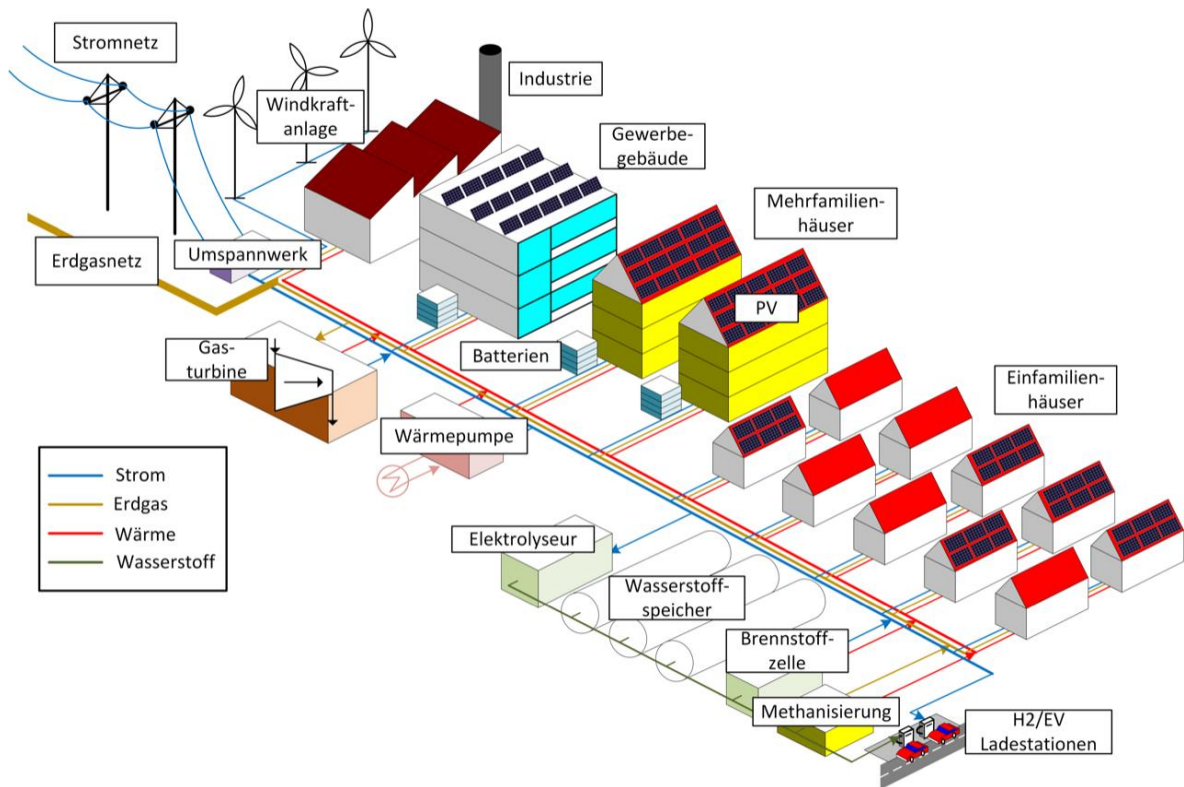
Das Finden der optimalen Lösungen erfolgt ausschliesslich durch Berechnungen, welche auf der Parametrisierung der jeweiligen Szenarien und Betrachtungsjahren basieren. Zubau und Einsatz von bestimmten Technologien und deren Einsatz werden anhand der Kosten, der Effizienz und der CO<sub>2</sub>-Emissionen gewählt, um minimale Systemkosten und CO<sub>2</sub>-Emissionen (im VSE-Modell durch den gesetzten CO<sub>2</sub> Preis) zu erzielen.

Die Auswahl, die Dimensionierung und der Einsatz der Technologien erfolgt technologieneutral nach den gesetzten Parametern, wie z. B. von Kapitalkosten (CAPEX), Betriebskosten (OPEX), Wirkungsgraden und Speicherkapazitäten bestimmt.

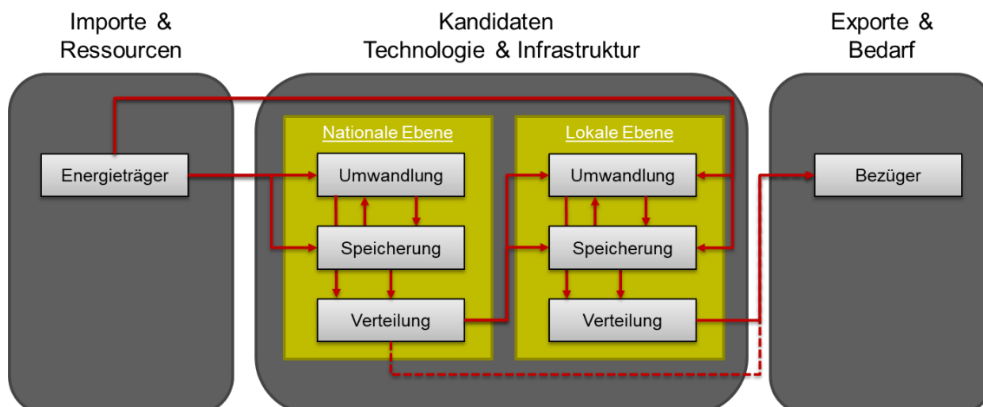
Lösungen, welche das Netto-Null Ziel nicht erreichen, werden in der ex-post Berechnung mit zusätzlichen Negativemissionstechnologien, z.B. Carbon Capture and Storage (CCS), ergänzt. Entsprechend erreichen alle Szenarien das strategische Ziel der EP2050+ von Netto-Null, jedoch mit unterschiedlichem Technologiemitmix und Systemkosten.

### Optimierungsmodell Schweiz

Das Energiemodell berücksichtigt die verschiedensten Energiebezüger, Energieerzeugungs- und Speichertechnologien, sowie Energienetzwerke. Schematisch dargestellt kann die lokale Ebene wie folgt repräsentiert werden:



In einer abstrakten Darstellung kann jede mögliche Technologie als Umwandlung, Speicherung oder Verteilung klassifiziert und in einem mathematischen Modell (Energy Hub Modell) berücksichtigt werden. Zusätzlich können auch die Grosstechnologien auf nationaler Ebene, wie Wasserkraft, Kernkraftwerke, Windkraftanlagen, etc., integriert werden. Beim VSE-Modell wurden über 120 Technologien in das Modell integriert:



### **Optimierungsmodell Europa**

Die Optimierung des Einsatzes von Kraftwerks- und flexiblen Speichertechnologien auf europäischer Ebene erfolgt mit einem zweistufigen Ansatz: Zunächst wird mit einem vereinfachten Modell unter Vernachlässigung gewisser Restriktionen wie Mindestlauf- und Stillstandszeiten der Dispatch auf stündlicher Basis für das Gesamtjahr geplant. Daraus wird für jede Woche die mögliche Entnahme aus den flexiblen Wasserkraftspeichern (Reservoir, Pumpspeicher, Umwälzwerke) ermittelt. In einem zweiten Schritt wird mit einem verfeinerten – aber rechnerisch aufwändigeren – Modell für jede Woche (168 Stunden) nochmals der Einsatz aller Kraftwerke und Speicher nach Grenzkosten und unter Berücksichtigung sämtlicher betrieblicher Restriktionen sowie der zuvor ermittelten zulässigen Nutzung der Wasserkraftspeicher optimiert.

Aus dem hier beschriebenen Marktmodell werden in einem letzten Schritt die stündlichen Kosten und der Einsatz von Kernenergie und Braunkohle in Deutschland und Frankreich sowie die Importe und Exporte der Schweizer Nachbarländer mit dem Rest von Europa ins Schweizer Modell (VSE-Energiesystemmodell) als fixer Input übergeben. Basierend auf diesen Inputs wird in einem anschliessenden Schritt mit dem Schweizer Modell der Stromaustausch (Import/Export) der Schweiz mit ihren unmittelbar angrenzenden Bilanzzonen inklusive eines vereinfachten Moduls für den kostenoptimalen Einsatz (Dispatch) von flexiblen Wasser-, Gas-, Steinkohle- und Ölkraftwerken bei den Nachbarn simultan mit der Modellierung des Schweizer Energiesystems (inklusive Gas, Wärme, Mobilität, etc.) durchgeführt.

### **Zitierung**

Sulzer, M., Rüdüsüli, M., Mutschler, R., & et al. (13.12.2022): Spotlight Integrales Energiesystemmodell. In: Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen VSE (13.12.2022): «*Energiezukunft 2050*». *Wege in die Energie und Klimazukunft der Schweiz*. URL: [www.energiezukunft2050.ch](http://www.energiezukunft2050.ch).