



Online-Appendix

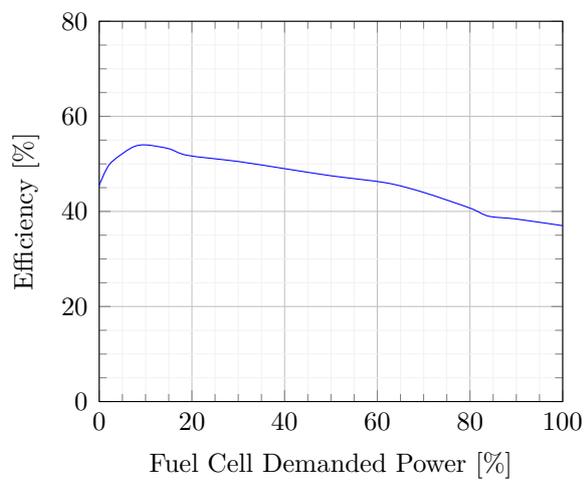
Energy-Aware Production Planning with Renewable Energy Generation Considering Combined Battery- and Hydrogen-Based Energy Storage Systems

Gabriel Benedikt Thomas Adams
Technical University of Berlin

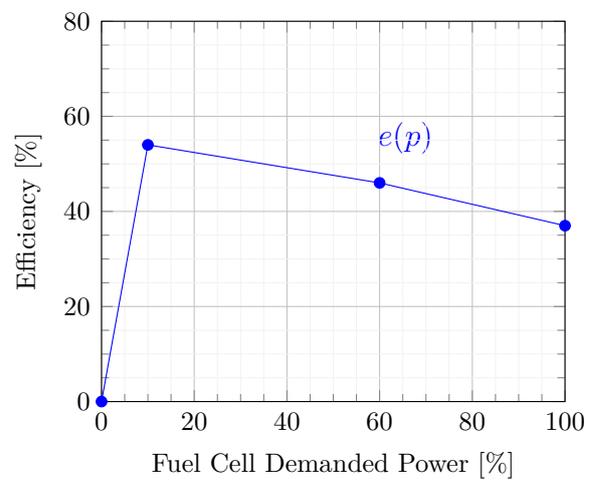
Junior Management Science 10(1) (2025) 267-291

Appendix

1 Fuel cell efficiency curves



(a) Fuel cell efficiency curve of a fuel cell hybrid electric vehicle



(b) Simplified piecewise linear fuel cell efficiency curve in breakpoints for interpolation

Figure A.1: Fuel cell efficiency curves for modeling efficient fuel cell output (based on data from Fletcher and Ebrahimi (2020)).

Mean roundtrip efficiency of hydrogen storage system

$$\eta^h = \eta^{el} \cdot \eta^{fc}$$

$$\eta^h = \eta^{el} \cdot \int_0^{100} e(p) dp$$

$$\eta^h = 0.755 \cdot 0.443$$

$$\eta^h \approx 0.334465$$

2 Loss rate calculation of storage technologies

Loss rate hydrogen tank

$$\begin{aligned}
 H_p \cdot (1 - loss_{hourly}^h)^{24} &= H_p \cdot (1 - loss_{daily}^h)^1 \\
 \Leftrightarrow (1 - loss_{hourly}^h)^{24} &= (1 - loss_{daily}^h)^1 \\
 \Leftrightarrow 1 - loss_{hourly}^h &= \sqrt[24]{1 - loss_{daily}^h} \\
 \Leftrightarrow loss_{hourly}^h &= 1 - \sqrt[24]{1 - loss_{daily}^h}
 \end{aligned}$$

With $loss_{daily}^h = 0.00004$ (Töpler and Lehmann, 2017):

$$\begin{aligned}
 loss_{hourly}^h &= 1 - \sqrt[24]{1 - loss_{daily}^h} \\
 loss_{hourly}^h &= 1 - \sqrt[24]{1 - 0.00004} \\
 loss_{hourly}^h &= 1 - \sqrt[24]{0.99996} \\
 loss_{hourly}^h &\approx 0.0000017
 \end{aligned}$$

Loss rate battery storage

$$\begin{aligned}
 SOC_p \cdot (1 - loss_{hourly}^{bat})^{8736} &= SOC_p \cdot (1 - loss_{yearly}^{bat})^1 \\
 \Leftrightarrow (1 - loss_{hourly}^{bat})^{8736} &= (1 - loss_{yearly}^{bat})^1 \\
 \Leftrightarrow 1 - loss_{hourly}^{bat} &= \sqrt[8736]{1 - loss_{yearly}^{bat}} \\
 \Leftrightarrow loss_{hourly}^{bat} &= 1 - \sqrt[8736]{1 - loss_{yearly}^{bat}}
 \end{aligned}$$

With $loss_{yearly}^{bat} = 0.03$ (Sternner and Stadler, 2019, p. 300):

$$\begin{aligned}
 loss_{hourly}^{bat} &= 1 - \sqrt[8736]{1 - loss_{yearly}^{bat}} \\
 loss_{hourly}^{bat} &= 1 - \sqrt[8736]{1 - 0.03} \\
 loss_{hourly}^{bat} &= 1 - \sqrt[8736]{0.97} \\
 loss_{hourly}^{bat} &\approx 0.0000035
 \end{aligned}$$

3 German summary

In dieser Bachelorarbeit wird ein Modell für eine energiebewusste Produktionsplanung vorgeschlagen. Das betrachtete Produktionssystem enthält eine Produktion (maximaler Leistungsbedarf: 383 kW), eine Windkraftanlage (Leistung: 500 kWp), eine Photovoltaikanlage (Leistung: 400 kWp), eine Batterie (Kapazität: 100 - 1200 kWh) und einen Wasserstoffspeicher (Kapazität: 100 - 400 MWh) mit Elektrolyseur und Brennstoffzelle. Der Handel mit dem Energiemarkt sowohl für den Einkauf als auch Verkauf von Strom ist möglich. Es werden zeitabhängige Einspeisevergütungen und Endkundenpreise für den deutschen Energiemarkt im Jahr 2020 berücksichtigt. Die erneuerbare Energieerzeugung basiert auf dessen durchschnittlichen deutschlandweiten Verfügbarkeiten. Ziel dieser Arbeit ist es, den Einsatz von kombinierten batterie- und wasserstoffbasierten Energiespeichersystemen zu untersuchen. Um dieses Ziel zu erreichen, werden die Charakteristika einer energiebewussten Produktionsplanung mit Fokus auf den europäischen Energiemarkt, die erneuerbare Energieerzeugung am Produktionsstandort und Speichertechnologien beschrieben. Basierend auf einer Literaturanalyse wird die fehlende Berücksichtigung von kombinierten Kurz- und Langzeit-Energiespeichersystemen identifiziert. Auf der Grundlage der identifizierten Problemstellung wird ein formales mathematisches Modell in Form eines gemischt-ganzzahligen linearen Programms formuliert. Besonderheiten des Modells gegenüber verwandter Forschung sind die Abbildung von Energieflüssen zwischen den genannten Systemkomponenten, insbesondere im Austausch mit dem betrachteten kombinierten Energiespeichersystem, und die Berücksichtigung realitätsnaher Technologieeigenschaften. Die mathematische Optimierung des Modells minimiert Arbeits- und Energiekosten. Anschließend wird das Modell auf eine hypothetische numerische Fallstudie angewendet. Es wird der Einfluss der Speicherkapazitäten der betrachteten batterie- und wasserstoffbasierten Speicher auf die Gesamtkosten, die Systemautonomie, den Eigenverbrauch, den Energieüberschuss und die Speichernutzungsgrade analysiert. Dazu werden verschiedene Allokationen von Speicherkapazitäten unter Anwendung des Modells optimiert. Die Ergebnisse zeigen, dass die höchsten Kosteneinsparungen von 29,3% mit einem Verhältnis von erneuerbaren Energien zu Batterie- und Wasserstoffspeicherkapazitäten von 3:4:1000 für das betrachtete Szenario erreicht werden können. Basierend auf den Ergebnissen der numerischen Fallstudie werden Implikationen für eine vorteilhafte Anwendung des vorgeschlagenen energiebewussten Produktionsplanungsansatzes und zur Dimensionierung von Speicherkapazitäten abgeleitet. Darüber hinaus werden die Anwendung des Modells auf andere Fälle vorgeschlagen und mögliche Erweiterungen des Planungsansatzes als Felder für zukünftige Forschung benannt.