

# DUNKELFLAUTEN, FLEXIBILITÄT UND NEGATIVE EMISSIONEN: SYSTEMWIRKUNGEN IN EINEM WETTERABHÄNGIGEN ENERGIESYSTEM

Anna SANDHAAS<sup>1</sup>, Niklas HARTMANN<sup>2</sup>

## Inhalt

Die zunehmende Abhängigkeit stromdominierter Energiesysteme von fluktuierender Wind- und Solarenergie stellt eine hohe Anforderung an die Versorgungssicherheit dar. Insbesondere lang andauernde Dunkelflauten beeinflussen die Auslegung von Speichern und gesicherter Leistung maßgeblich. Gleichzeitig steigen die Anforderungen an negative Emissionen, um verbleibende CO<sub>2</sub>-Restemissionen anderer Sektoren zu kompensieren.

Die Pyrolyse bietet eine selten betrachtete Kombination aus flexibler Stromerzeugung sowie negativen Emissionen durch Pflanzenkohle. Trotz dieses Potenzials ist die Rolle der Pyrolysetechnologie in der Stromsystemtransformation bisher kaum untersucht. Ziel dieser Arbeit ist es, den Einfluss variabler Wetterbedingungen auf die Systemauslegung zu quantifizieren und zu untersuchen, inwiefern Pyrolyse zur Robustheit eines klimaneutralen Elektrizitätssystems beitragen kann.

## Methodik

Die Analyse basiert auf dem Energiesystemmodell MyPyPSA-Ger, das um ein Modul zur Abbildung flexibler Pyrolysetechnologien ergänzt wurde. Das Modell optimiert Kapazitätserweiterungen und stündlichen Kraftwerkseinsatz in Deutschland mit 37 Clustern auf NUTS-2-Ebene und myopischen jährlichen Investitionsentscheidungen von 2020 bis 2050. Berücksichtigt werden PV, Onshore- und Offshore-Wind, Laufwasserkraft, Biomasse- und Gaskraftwerke sowie Speichertechnologien wie Pumpspeicher, Reservoir- und Speicherkraftwerke, Batterien und Wasserstoffspeicherketten. Kernenergie und internationaler Stromhandel sind nicht enthalten. Die Ausgangskonfiguration entspricht dem Stromsystem 2019, während Nachfrage, CO<sub>2</sub>-Grenzwerte und Kostenpfade bis 2050 fortgeschrieben werden.

Pyrolyse wird als flexible Umwandlungstechnologie modelliert, die feste Biomasse in Strom und negative Emissionen überführt. Grundlage bildet das Potenzial von Waldholz- und Strohresten mit rund 116 TWh Energieinhalt pro Jahr. Daraus ergeben sich etwa 15 TWh potenzielle Stromerzeugung und rund 12,6 Mio. t CO<sub>2</sub>-Senkenpotenzial. Der Ausbau erfolgt endogen und ist wachstumsbegrenzt; andere Technologien unterliegen zusätzlichen Ausbaulimits und Standortrestriktionen.

Zur Abbildung der Wetterunsicherheit werden stündliche Solar- und Windkapazitätsfaktoren für 40 historische Wetterjahre (1980–2019) genutzt. Darauf basieren 40 Overnight-Optimierungen für das Jahr 2045 zur Quantifizierung der Auswirkungen interannueller Wettervariabilität auf Kosten und Speicherbedarf. Ergänzend werden Flauten-, Dunkelflauten- und Residuallastanalysen durchgeführt, um meteorologische Extremjahre systematisch zu charakterisieren. Das jeweils günstigste und ungünstigste Wetterjahr dient anschließend als konstantes Wind- und Solarprofil in myopischen Szenarien von 2020 bis 2050, die jeweils ohne und mit Pyrolyse berechnet werden. So entstehen vier Szenarien, die den Einfluss der Technologie unter besonders vorteilhaften und herausfordernden Wetterbedingungen abbilden.

## Ergebnisse

Die Auswertung von 40 Overnight-Szenarien zeigt, dass unterschiedliche historische Wetterjahre erhebliche Auswirkungen auf Kosten und Systemlayout haben. Die jährlichen Gesamtsystemkosten

---

<sup>1</sup> Hochschule Offenburg, Badstr.24, 77656 Offenburg, Deutschland, +49 781/2505-4673,  
anna.sandhaas@hs-offenburg.de

<sup>2</sup> Hochschule Offenburg, Badstr.24, 77656 Offenburg, Deutschland, +49 781/2505-4645,  
niklas.hartmann@hs-offenburg.de

variieren zwischen 63 und 86 Milliarden Euro. Besonders stark betroffen sind die Wasserstoffsysteme: Der Bedarf an Langzeitspeichern reicht je nach Wetterjahr von etwa 12 TWh bis 31 TWh, während die notwendige Brennstoffzellenleistung zwischen rund 73 GW und 153 GW schwankt. Die Wetterjahrwahl ist damit ein zentraler Treiber für Ausbaupfade und Flexibilitätsbedarf.

Die Analyse der Wetterindikatoren zeigt, dass vor allem die Dauer der längsten Dunkelflaute die Systemauslegung bestimmt. Mit zunehmender Dunkelflautendauer steigt der Wasserstoffspeicherbedarf nahezu linear an; selbst in günstigen Jahren bleibt ein saisonales Mindestvolumen erforderlich. Ein extremes Wetterjahr mit rund 24 aufeinanderfolgenden Tagen sehr niedriger Wind- und Solarerträge benötigt etwa dreimal so viel Wasserstoffspeicher wie ein günstiges Jahr. Diese beiden Jahre bilden daher die Basis für die myopischen Langfristszenarien.

In den myopischen Szenarien ohne Pyrolyse markieren das günstige Wetterjahr und das herausfordernde „Dunkelflauge“-Jahr die unteren und oberen Grenzen langfristiger Flexibilitätsbedarfe. Gaskraftwerke bleiben zwar technisch verfügbar, können aufgrund strenger Emissionsgrenzen jedoch ab 2045 nicht genutzt werden und tragen praktisch nicht zur Deckung von Knappheitsperioden bei.

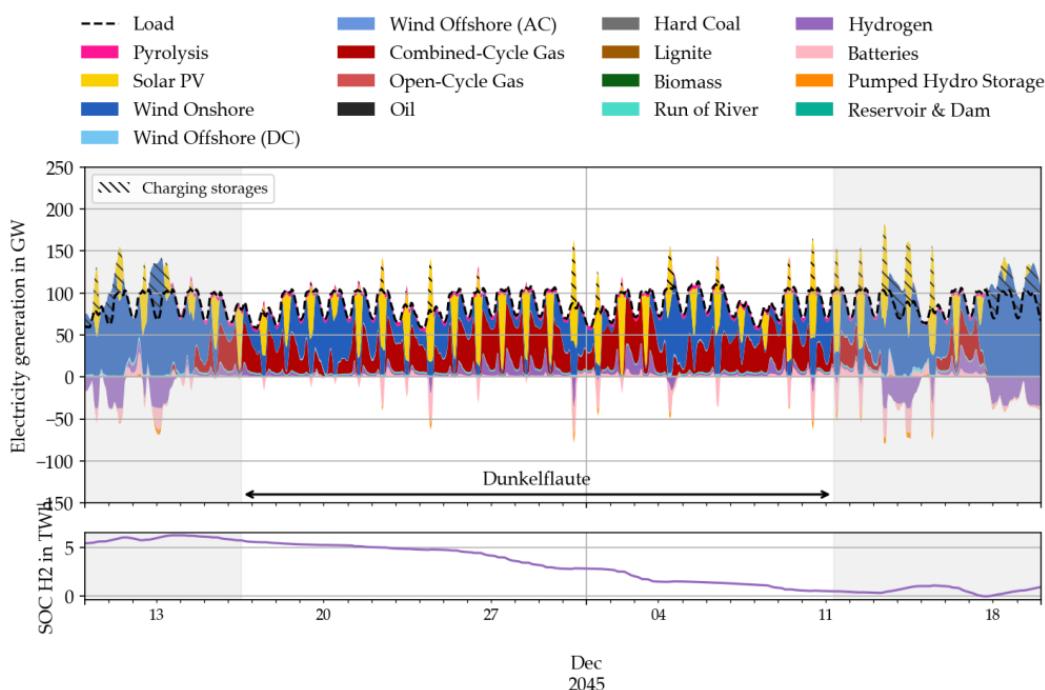


Abbildung 1: Stromerzeugungsprofil während der Dunkelflauge für das Jahr 2045 für eine Netto-null-Emissionsszenario (Szenario: Längste Dunkelflauge mit Pyrolyse als Strom- und Negativemissionstechnologie)

Mit Pyrolyse verändert sich die Systemstruktur deutlich. Die verfügbare Biomasse wird bis Mitte der 2030er Jahre vollständig erschlossen, sodass bis 2045 rund 4,2 GW bis 4,4 GW elektrische Pyrolyseleistung installiert sind und jährlich etwa 12,6 Mio. t langlebiger CO<sub>2</sub>-Speicherung entstehen. Diese negativen Emissionen erlauben den punktuellen Einsatz vorhandener Gaskraftwerke zur Abdeckung kurzer, systemkritischer Residualastspitzen (Abbildung 1), ohne zusätzlichen Gaskraftwerkezubau. Gas verbleibt damit eine selten genutzte Sicherheitsoption mit niedrigen Vollaststunden von 990 Stunden.

Durch den kombinierten Beitrag von Pyrolysegas, negativen Emissionen und begrenztem Gaseinsatz müssen Wasserstoffspeicher nicht mehr auf extreme Ereignisse dimensioniert werden. Besonders im Dunkelflauge-Jahr sinkt der erforderliche Wasserstoffspeicher auf etwa 20 % des Bedarfs ohne Pyrolyse und bleibt sogar unter der Hälfte des Bedarfs des günstigen Wetterjahrs ohne Pyrolyse. Wasserstoffspeicher dienen dann primär der Feinbalance, während seltene Engpässe durch steuerbare Erzeugung abgefedert werden.

Insgesamt verringert Pyrolyse die Wetterabhängigkeit des Systems deutlich, reduziert den massiven Überbau an Langzeitspeichern und ergänzt das System um eine flexible, negative-Emissionen-basierte Option. Damit entsteht ein robusteres und kosteneffizienteres klimaneutrales Elektrizitätssystem.