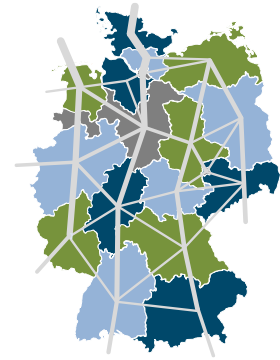


# Kostenminimale Dekarbonisierung – Deutschlands Energiesystem der Zukunft



## 1 PROJEKTZIEL UND PROJEKTPARTNER

Wie muss das **zukünftige Energiesystem Deutschlands** ausgestaltet sein, um die **vollständige Dekarbonisierung** zu den nachhaltig günstigsten Kosten zu erreichen? Und wie kann dabei - trotz des stark fluktuierenden Charakters der Energiequellen Wind-, Sonnen- und Wasserkraft - die Versorgungssicherheit eines Industrielandes wie Deutschland gewährleistet werden?

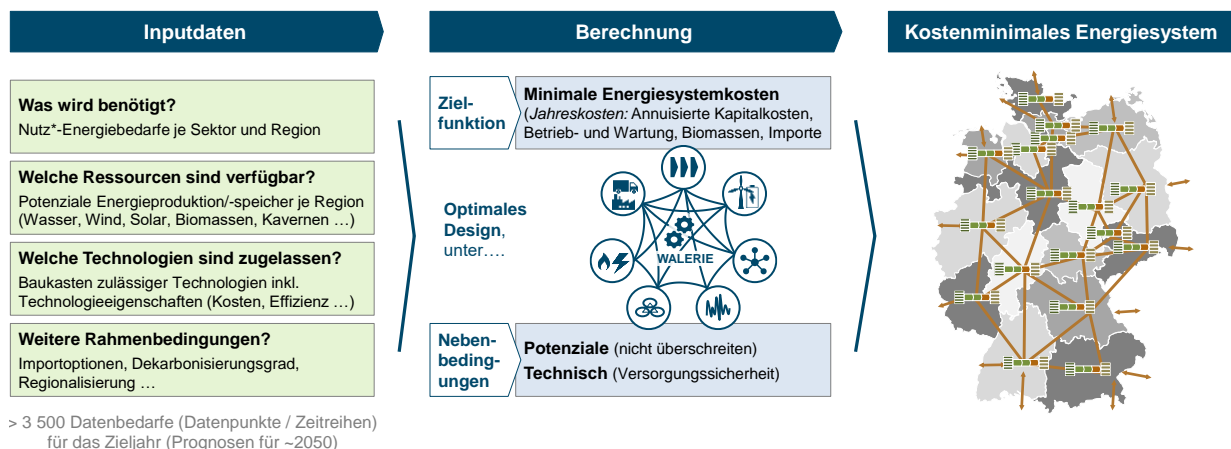
Um diese Fragen ergebnisoffen zu beantworten, haben sechs führende Unternehmen der **deutschen Energiewirtschaft** bzw. **Automobilindustrie** entschieden, mit WECOM eine Studie auf Basis eines neuartigen, sektorübergreifenden Ansatzes durchzuführen und die Ergebnisse einer öffentlichen Diskussion zu stellen.

Die nun vorliegende Studie liefert **erstmalig, in feiner regionaler Auflösung**, Ergebnisse zu einem **vollständig wirtschaftlich optimierten Energiesystem Deutschlands**. Warum erstmalig? Viele Studien enthalten teilloptimierte Ergebnisse, aber die vorliegende Studie ist die erste, die unter Berücksichtigung regionaler Unterschiede bereits in der Berechnung, alle Segmente des Energiesystems optimiert (d.h. auch Endverbrauchstechnologien und Netze) und diese Optimierung aller Segmente simultan in einem geschlossenen Modell durchführt, d.h. nicht in verschiedenen, nur den jeweiligen Teilbereich überblickenden Sektor-Modulen. Die Ergebnisse geben Anlass zu einem **rationalen, faktenbasierten Dialog** über aktuelle politische Rahmenbedingungen, insbesondere vor dem Hintergrund der aktuellen Diskussionen über die Abhängigkeit von bestimmten Energieträgern.

## 2 METHODIK – SIMULTANE OPTIMIERUNG ALLER SEGMENTE DES ENERGIESYSTEMS

Die Ermittlung des kostengünstigsten 100% erneuerbaren, machbaren und versorgungssicheren Energiesystems erfolgte vollständig durch **mathematische Optimierung ohne Ergebnisvorgaben durch die teilnehmenden Unternehmen**. Für über 150 modellierte Technologien entlang der gesamten Energiewertschöpfungskette wurde also berechnet, welche Kapazität je Region optimal ist – ohne Prognosen über ihren Einsatz oder Nicht-Einsatz zu benötigen.

Diese Berechnung (> 4 Mio. Entscheidungen) erfolgte mit WECOMs Planungswerkzeug **WALERIE**, das im Rahmen von vier internationalen Projekten und unter Mitwirkung von mehr als 35 Unternehmen der Energiewirtschaft entwickelt wurde. Die Parametrierung von WALERIE für Deutschland basiert auf dem besten Stand des **Wissens aus mehr als 250 externen Studien**.



\* Den Energieverbrauchern zur Verfügung stehende Energie nach der finalen Umwandlung z.B. von Gas (Endenergie) in Raumwärme (Nutzenergie)

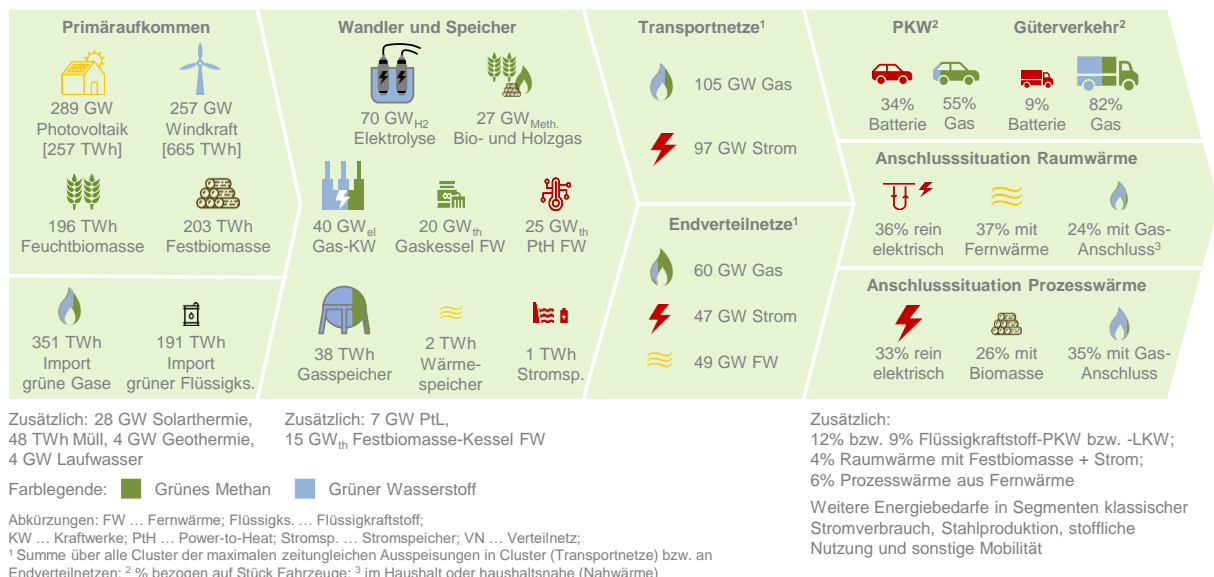
Abbildung 2-1: Datengetriebene Berechnung des kostenminimalen Energiesystems mit WALERIE

Die **Rahmenbedingungen** für die Modellierung umfassten unter anderem:

- **100% erneuerbare Energieträger:** Vollständige Dekarbonisierung unter Verzicht auf Technologien zur Kohlenstoffabscheidung aus fossilen Energieträgern und auf Nuklearenergie
- **Machbarkeit:** Berücksichtigung limitierter Ressourcenpotenziale auf Basis vorhandener Studien
- **Versorgungssicherheit:** Gesicherte Deckung der Energiebedarfe in jeder Region zu jedem Zeitpunkt, auch bei Ausfall einzelner Anlagen
- **Nachhaltig geringste Kosten („Greenfield-Ansatz“):** Bewusste Ausblendung von Kostenvorteilen bestehender Assets, um eine Verzerrung der Optimierung durch zeitlich begrenzte Lock-in-Effekte zu vermeiden
- **Berücksichtigung von Prognoserisiken (ResilOpt-WALERIE):** Vermeidung von Scheingenauigkeiten und Kippeffekten durch Integration von Prognoseunsicherheiten in der Kostenminimierung

### 3 ERGEBNISSE DER TECHNOLOGIEOFFENEN OPTIMIERUNG

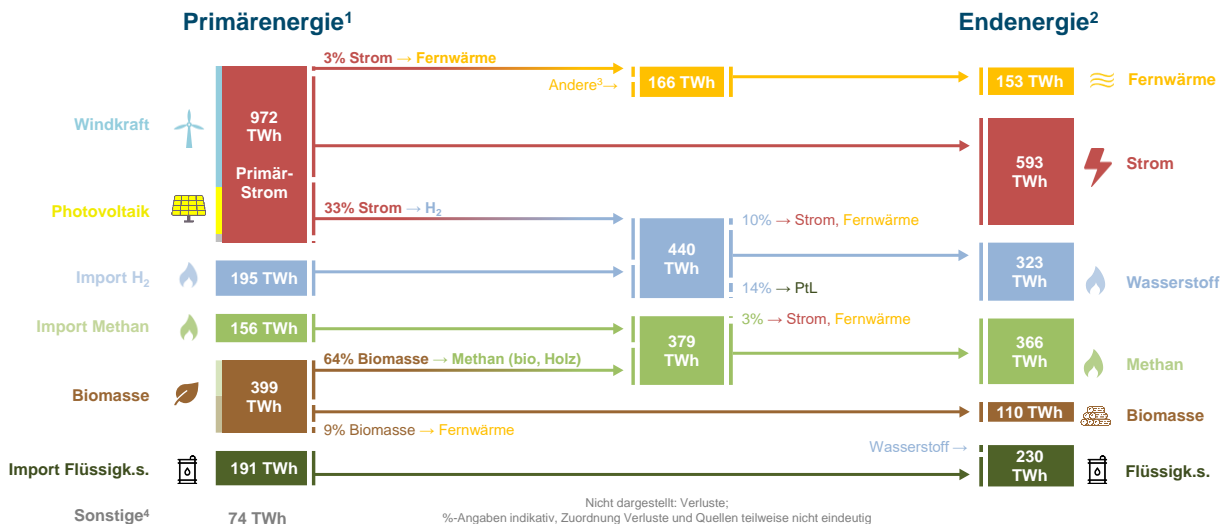
Um die künftigen, je Segment und Region stark unterschiedlichen Versorgungsaufgaben kostenoptimal und ohne fossile Energiequellen zu erfüllen, wird eine **hohe Vielfalt an Technologien und Energieträgern eingesetzt**. Das wirtschaftlich optimierte Energiesystem ist **viel effizienter als das heutige, viel weniger importabhängig** und aufgrund der **hohen Diversifikation** auch **resilient gegenüber Veränderungen der technischen, wirtschaftlichen und politischen Rahmenbedingungen**.



**Abbildung 3-1: Wesentliche Kennzahlen des kostengünstigsten dekarbonisierten Energiesystems für Deutschland im Szenario "Technologieoffen"**

- Die **Energieaufbringung** erfolgt zu **rund drei Viertel im Inland**, die Importabhängigkeit ist daher im Vergleich zu heute massiv reduziert (-80% Energieimporte).
- **Inländische Potenziale zur Primärstromerzeugung** werden **stark ausgelastet**, Ausbaupfade für Windkraft und Photovoltaik müssen beschleunigt werden.
- Die **Flexibilisierung des Stromsystems** und die Bereitstellung notwendiger Speicherkapazität erfolgt wesentlich über erneuerbare Gase: **33% des Primärstroms** werden in **Elektrolysen** (rd. 3 500 Volllaststunden) eingesetzt; **Gaskraftwerke** werden ausgebaut und Wasserstoff-fähig, setzen im Jahresverlauf jedoch viel weniger Gas als heute ein.
- Neben heimischem Wasserstoff wird auch **Biomethan** in **bedeutendem Umfang in Deutschland produziert**. Die landwirtschaftlichen **Flächenbedarfe** zur Produktion von Energie-Biomassen verbleiben dabei **auf heutigem Niveau**.
- Im **Personenverkehr** sind **Batterie- und Verbrennerfahrzeuge** (insb. betrieben mit erneuerbarem Methan) wirtschaftlich auf Augenhöhe – ein Technologiemix ist daher möglich. Im **Güterverkehr** sind zusätzlich Wasserstoff-Brennstoffzellen wettbewerbsfähig.

- **Netzbedarfe für Strom und Fernwärme steigen.** Durch die volkswirtschaftlich optimale Dezentralisierung des Energiesystems ist der Ausbaubedarf der Stromtransportnetze beschränkt, der Netzbedarf für die regionale Aufnahme erneuerbarer Stromproduktion ist hingegen im Vergleich zu heute stark erhöht. Im Bereich der **Gasnetze** stellen großvolumige **dezentrale Einspeisungen** und die Umstellung bestimmter Teile der Infrastruktur auf **Wasserstofftauglichkeit neue Herausforderungen** dar.



**Abbildung 3-2: Bedeutendste Energieumwandlungen zwischen Primärenergie und Endenergie im kostengünstigsten dekarbonisierten Energiesystem für Deutschland im Szenario "Technologieoffen"**

## 4 ERKENNTNISSE SZENARIO-ANALYSEN

WALERIE kann durch Variation von Rahmenbedingungen und/oder Inputdaten effizient und transparent Szenarien für die Energiezukunft berechnen.

Im Projekt wurde u.a. ein **Szenario** berechnet, in dem **Verbrenner-Fahrzeuge in Personen- und Güterverkehr gesperrt** werden. Die gesperrten Verbrenner-Fahrzeuge werden im dann (bedingt) kostenoptimalen Energiesystem durch einen Mix an Batterie- und Brennstoffzellen-Kfz ersetzt. Der daraus resultierende stark erhöhte Strombedarf wird u.a. durch mehr Photovoltaikanlagen und mehr Methan-Kraftwerke bereitgestellt. Die volkswirtschaftlichen Kosten des Energiesystems steigen in diesem Szenario um 11 Mrd. EUR/a bzw. 5%.

Als weiteres **Szenario** wurde ein nochmals **stark erhöhtes Windkraftpotenzial** (+17% onshore, +34% offshore) getestet. Dieses führt im Wesentlichen zum Verdrängen von Wasserstoff-Importen durch heimische Elektrolyse-Erzeugung auf Basis des zusätzlichen Windstroms. Die volkswirtschaftlichen Kosten des Energiesystems sinken in diesem Szenario um 2 Mrd. EUR/a bzw. 1%.

## 5 AUSBLICK

Die vorliegenden Berechnungen zeigen ein nach ausschließlich wirtschaftlichen und technischen Bedingungen optimiertes Energiesystem, das 100% erneuerbare Energien, Versorgungssicherheit und Resilienz gegenüber Versorgungsengpässen und disruptiven Einflüssen in sich vereint.

Auf dieser Grundlage können weitere (industrielle-)politische Rahmenbedingungen, alternative Konzepte, Akzeptanzüberlegungen etc. integriert und transparent auf Ihre Konsequenzen untersucht werden – als Basis für rationalen, faktenbasierten Diskurs über das künftige Energiesystem Deutschlands.

Ein umfassender Studienbericht ist unter <https://energiezukunft-optimiert.de/> verfügbar. Regionale Ergebnisse für Bundesländer und lokale Versorgungsgebiete sind auf Anfrage bei WECOM erhältlich.

Bildquellen aller Icons: (licensed by Creative Commons BY 3.0): Created by Dave Gandy, Ctrlstudio, DinosoftLabs, Freepik, Hand Drawn Goods, Iconnice, OCHA, Pixel perfect, Smashicons – Flaticon.com