



## Stromnetz mit starker DNA

Mit einem Computerprogramm zeigen Forscher, wie die Stromversorgung im Jahr 2050 möglichst günstig sein kann



*Das Stromnetz ist dynamisch und träge zugleich. Einerseits verteilt es den Strom bei sehr schnell schwankenden Lasten. Bauliche Veränderungen benötigen hingegen lange, bis sie geplant und durchgeführt werden. Das hat neben technischen auch gesellschaftliche Gründe. Darum ist es wichtig, mit Simulationen künftige Szenarien zu bewerten. Das ermöglichen Wissenschaftler der RWTH Aachen mit ihrem Programm GENESYS.*

Das Ziel von GENESYS ist es, ein Stromsystem zu simulieren und es auf möglichst geringe Gesamtkosten zu optimieren. Der Name steht für Genetische Optimierung eines europäischen Energieversorgungssystems. „Das Programm dient vor allem der weiteren Forschung. Zum Beispiel für Wissenschaftler, die ähnliche Vorhaben in anderen Gebieten berechnen möchten“, erklärt Projektleiter Christian Bussar. „Außerdem könnten Unternehmen die Prognosen nutzen, um zukünftige Strategien zu entwickeln.“ Der Einsatz und die Anwender unterscheiden sich, das Ziel bleibt: Kosten sparen.

Für ein Basisszenario gaben die Entwickler dem Programm vor, eine europäische Energieversorgung ausschließlich aus Wind- und Sonnenenergie zu gestalten. Die günstigsten Gesamtkosten erreichte ein Verhältnis der installierten Leistung von 40 % Wind- zu 60 % Sonnenenergie. Der Preis für eine Kilowattstunde lag bei weniger als 10 Cent. Aufgrund der Preisentwicklung nahmen die Entwickler Investitionskosten von 1.000 Euro für Windenergie- und 600 Euro für Photovoltaikanlagen pro Kilowatt installierter Leistung an. Die Abschreibedauer beträgt 18 (Wind) beziehungsweise 30 Jahre (Sonne), die jährlichen Wartungskosten liegen bei zwei Prozent der Investitionssumme. Diese Zahlen lehnen sich an Ergebnisse vorheriger Studien an.

---

Dieses Forschungsprojekt wird gefördert vom

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi)

---

Wenn Europas Stromversorgung aus Wind- und Sonnenenergie besteht, sind neben dem Ausbau der Energieerzeuger zwei Punkte unverzichtbar: ein gut ausgebautes Übertragungsnetz und marktfähige Energiespeicher. Das Übertragungsnetz soll in den Simulationen mit Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ) die bestehende Wechselstrom-Technologie überlagern. Zudem werden kurz-, mittel- und langfristige Speicher benötigt. Sie können Energie für kurzfristige Fluktuationen im Netz oder windschwache und bewölkte Tage vorhalten. Mit diesen Daten kann das Programm dann ein Energiesystem errechnen, das den Anforderungen an die Versorgungssicherheit genügt und möglichst preiswert aufzubauen und zu betreiben ist.

### Das Programm reagiert flexibel auf veränderte Rahmenbedingungen

Die Annahmen für ein zukünftiges Stromnetz und die Kosten und Verfügbarkeiten einzelner Technologien kann jeder Anwender anders einschätzen. Darum haben die Entwickler GENESYS als Freeware programmiert. So steht es jedem Interessierten kostenlos zur Verfügung und Nutzer können die Rahmenbedingungen nach ihren Prognosen festlegen. Das besondere an dem Programm ist der Betrachtungszeitraum. Die Berechnungen decken mehrere Jahre in stündlicher Auflösung ab und optimieren daraufhin das Energiesystem auf der obersten Netzebene. Für die eingesetzten Langzeitspeicher ist das sinnvoll. Denn so kann das Programm eine genaue Dimensionierung vorschlagen.

GENESYS betrachtet in der Simulation einzelne Regionen als miteinander verbundene Einheiten. Die HGÜ-Technik ermöglicht es, hohe Leistungen verlustarm über weite Strecken zu transportieren. Einzelne HGÜ-Verbindungen kommen schon heute zum Einsatz. Zum Beispiel bei der Anbindung von Offshore-Windenergieparks. Für eine funktionierende Vernetzung müssen Gleichstromkabel und Konverter weiterentwickelt werden. Dann kann das Overlay-Netz das Verteilnetz speisen. Von dort aus gelangt der Strom wie gewohnt zu den Verbrauchern. Im Szenario hatten die Verbindungen zwischen zwei Regionen eine maximale Kapazität von 50 Gigawatt, die meisten Trassen lagen mit bis zu 15 Gigawatt aber deutlich darunter. Im Projekt nahmen die Forscher Preise von 77 Cent pro Kilometer und Kilowatt für einen HGÜ-Neubau an. Sollten andere Techniken, wie eine großflächige Verlegung mit Erdkabeln, den Vorzug erhalten, würde sich der Preis entsprechend erhöhen. „Der Algorithmus würde auf höhere Installationskosten eingehen und das System anpassen. Das könnte zum Beispiel in einem stärkeren Speicherausbau oder mehr Überkapazitäten resultieren. Um die Flexibilitätsoptionen beizubehalten würde der Netzausbau nicht vollständig gestoppt“, so Christian Bussar. „Ein Preisanstieg wäre aber unvermeidbar.“

Nur wenn der Wind weht und die Sonne scheint, können die eingesetzten Anlagen Energie zur Verfügung stellen. Neben dem überregionalen Ausgleich durch das Übertragungsnetz übernehmen Energiespeicher in Zukunft den zeitlichen Lastausgleich. In GENESYS setzen die Entwickler vor allem auf Gasspeicher. Im Basisszenario errechnete das Programm mit 805 Terawattstunden rund 13 Prozent des jährlichen Gesamtstrombedarfs. „Wenn in der Simulation zusätzlich Geothermie- und Biomassekraftwerke simuliert werden, würde sich der Bedarf an Langzeitspeichern jedoch deutlich reduzieren“,

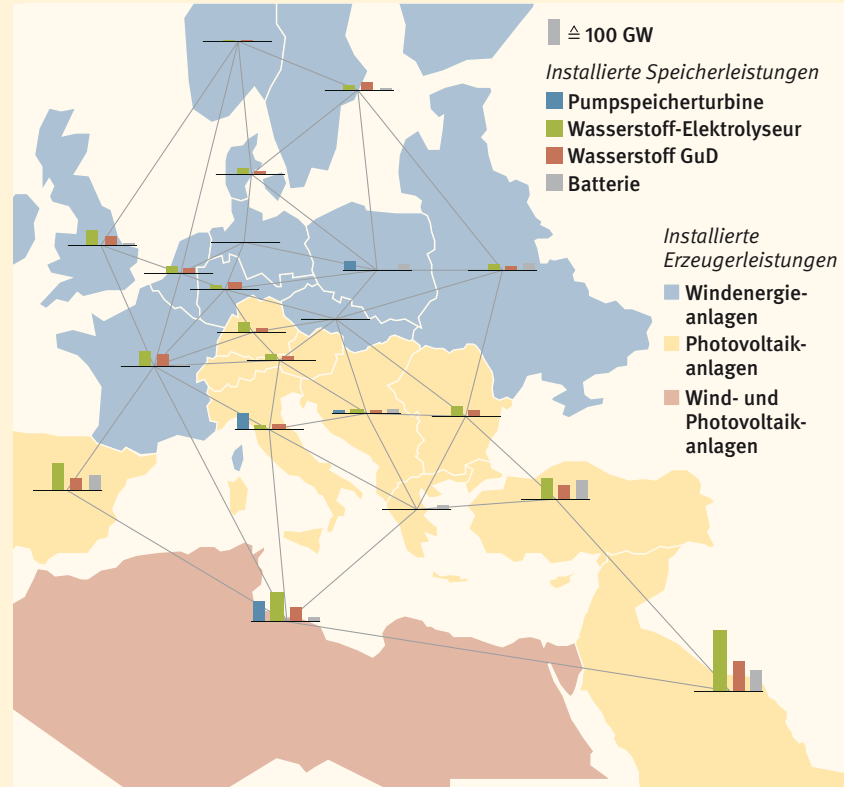


Abb. 1 Die Grafik zeigt eine Übersicht des Basisszenarios. Eine blaue Einfärbung der Regionen steht für den Einsatz von Windenergie, gelb für Photovoltaik. In Nordafrika kommen beide Technologien zum Einsatz.

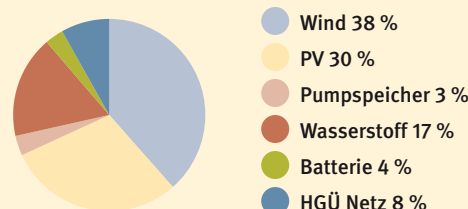


Abb. 2 Zu sehen ist die prozentuale Kostenverteilung im Basisszenario. Die Energieerzeugungskosten werden zu 30 % durch PV-Generation und zu 38 % durch Winderzeugung bestimmt. Speicher machen insgesamt 24 %, Netze 8 % der Kosten aus.

erklärt der Projektleiter. Denn diese Kraftwerke sind regelbar. Dann muss weniger Energie für wetterbedingten Energiemangel vorgehalten werden. In südlichen Regionen mit hohem Anteil von Photovoltaik-Anlagen kommen außerdem Batteriespeicher zum Einsatz. Sie besitzen zwar eine geringe Kapazität, haben aber einen hohen Wirkungsgrad. Dadurch eignen sie sich, die unvermeidbare Tag-Nacht-Schwankung auszugleichen.

Auffällig sind die Zusammenhänge bei der relativen Verteilung von Wind- zu Sonnenenergie. Mit zunehmendem Anteil von Windenergie steigt das Netzmoment (Abb. 3). Das ist das Produkt von Kapazität und Länge aller Verbindungsleitungen. Auf der anderen Seite erhöht sich die Kapazität von Kurz- und Langzeitspeichern bei größerem Photovoltaik-Anteil. Das Netzmoment hingegen sinkt. Erst bei einem extremen Szenario mit 100 Prozent Photovoltaik steigt es wieder leicht an. Es erreicht aber bei weitem nicht den Wert einer reinen Versorgung mit Windenergie. Einfach ausgedrückt: Windkraft erfordert Netz-, Photovoltaik erfordert Speicherausbau.

### Die Biologie als Vorbild für Berechnungen

Um eine günstige Stromversorgung zu entwickeln, griffen die Forscher Ideen der Evolutionstheorie auf. Die verwendeten genetischen und evolutionären

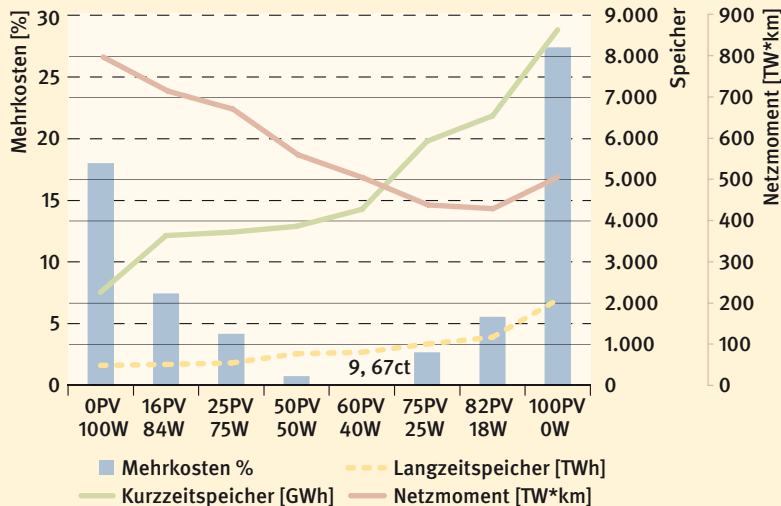


Abb. 3 Ein Blick in eine Variation der relativen Erzeugungsleistung zeigt die Mehrkosten, bezogen auf das Basiszenario, und die Veränderung hinsichtlich Speicherbedarf und Netzmoment.

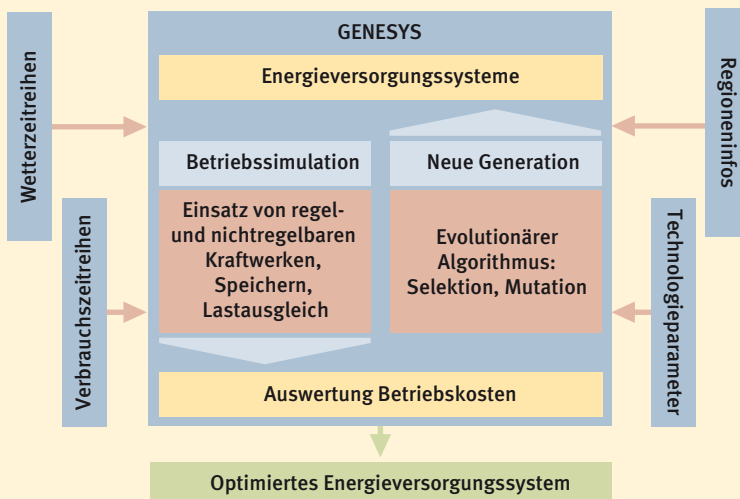


Abb. 4 Das Schaubild erklärt die evolutionäre Systemoptimierung am Beispiel des Programms GENESYS. Die Eingangszeitreihen stehen in stündlicher Auflösung zur Verfügung.

Algorithmen sind im Aufbau an die Fortpflanzung von Erbinformationen angelehnt. Die stärkeren Eigenschaften setzen sich durch, nachfolgende Generationen besitzen bessere Eigenschaften. Die definierten Eingangsdaten bilden das Erbgut des Systems. Das Programm überprüft die Ergebnisse dieser Daten und kategorisiert sie. Dann errechnet es die Kosten pro Kilowattstunde. In den Folgegenerationen werden die zuvor besten, also günstigsten Ergebnisse erneut angepasst. Nach mehreren tausend Durchläufen ergibt sich ein Optimum. Als Referenz diente das Optimierungsprogramm CPLEX. Der Nachteil: Es rechnet linear. Eine Betrachtung über einen Zeitraum von mehreren Jahren würde zu lange dauern, da der Rechenaufwand nicht beherrschbar wäre.

Weiterhin ermöglicht GENESYS den Einsatz von sogenannten Straftermen. Ein Beispiel: Die dauerhafte Lastdeckung ist keine unbedingte Voraussetzung für ein Stromnetz der Zukunft. Sie darf aber auch nicht vernachlässigt werden. Um das zu regulieren, gibt es die Strafterme. Die werten ein Ergebnis – zum Beispiel wenn die Last zu einem Zeitpunkt nicht gedeckt werden kann – gravierend herab. Das Programm wird nicht mehr versuchen, in diese Richtung zu optimieren. Das sorgt nach Aussage des Projektleiters dafür, dass in den resultierenden Szenarien die Stromausfälle genauso selten

## Vom Leben lernen

Anhand der Entwicklung von Lebewesen lassen sich auch technische Probleme lösen. Ein Beispiel dafür sind Berechnungsgrundlagen, wie sie bei evolutionären Algorithmen zum Einsatz kommen. Programmierer benötigen nur wenig Wissen über Systemabläufe und können trotzdem gute Ergebnisse erzielen. Am Anfang erhält eine erste Generation zufällig bestimmte Werte, die das System bewertet und einen sogenannten Fitnesswert zuweist. Diese kombiniert es dann miteinander, sodass neue Werte entstehen. Diese modifiziert der Algorithmus zufällig und erhält veränderte Nachfahren. Ist dieser Prozess abgeschlossen, werden die Ergebnisse selektiert und eine neue Generation bestimmt. Wie im Bild zu sehen, nähern sich die Werte (unten) einem Minimum an. Die Ausreißer nach oben sind so zu erklären, dass der Algorithmus mit noch nicht vorgenommenen Mutationen weiterhin versucht, einen noch niedrigeren Wert zu generieren.

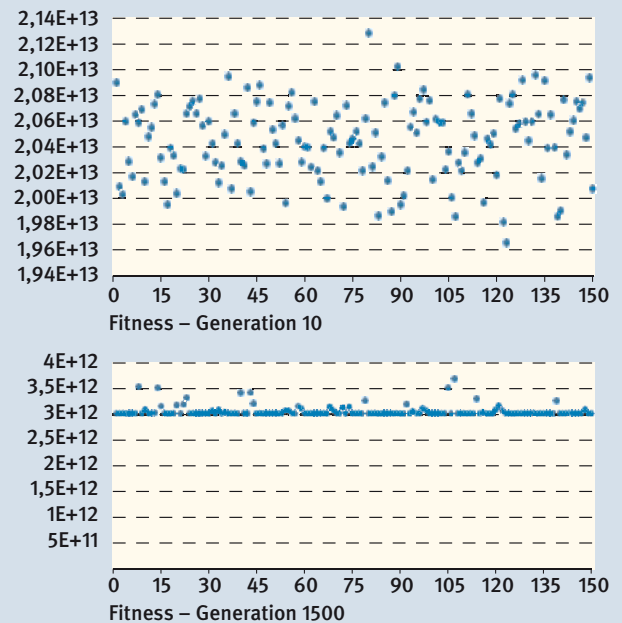


Abb. 5 Die Grafik zeigt die Streuung der Ergebnisse vor (oben) und nach (unten) der Optimierung.

sind wie im heutigen Netz. Im Jahr 2014 waren das nach offiziellen Angaben im Durchschnitt gerade einmal gut zwölf Minuten.

### Folgeprojekt bereits gestartet

Aufgrund der positiven Ergebnisse von GENESYS starteten die Forscher bereits das Folgeprojekt. Im Rahmen der Forschungsinitiative „Zukunftsfähige Stromnetze“ begann im August 2014 GENESYS2. Darin wird das ursprüngliche Programm um weitere Module und Funktionen erweitert. Es kann dann zum Beispiel errechnen, wie sich bestehende Verteilnetze kostengünstig ausbauen lassen. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Transformation des bestehenden Versorgungssystems. GENESYS2 soll die Kosten von unterschiedlichen Entwicklungskorridoren aufzeigen und damit dazu beitragen, bis zum Jahr 2050 ein möglichst ökonomisches System zu gestalten. Das Projekt läuft noch bis Januar 2017, erste Ergebnisse sollen bereits 2016 vorliegen.



## Netzausbau in Deutschland

In GENESYS werden die technisch optimalen Bedingungen für einen Ausbau des Stromnetzes berechnet. Doch der Netzausbau gestaltet sich komplexer. Deutschland und Europa sind dicht besiedelt, Leitungen lassen sich nicht als Geraden quer durch das Land ziehen. Es gibt zum Beispiel aus Umweltschutzgründen Restriktionen beim Leitungsneubau. Um alle Interessensgruppen zufriedenzustellen, gibt es in Deutschland ein fünfstufiges Verfahren für neue Stromleitungen.

### Vom Szenario zum Leitungsbau

Zunächst entwerfen die Übertragungsnetzbetreiber einen Szenariorahmen und stellen ihre Einschätzung zum Stromverbrauch in 10 und 20 Jahren vor. Das prüft die Bundesnetzagentur (BNetzA), die in Deutschland für die Regulierung des Strommarktes zuständig ist.

Die dann folgenden Netzentwicklungspläne sind schon konkreter. Hier schauen die Übertragungsnetzbetreiber, wo Ausbaubedarf besteht. Es spielen vor allem der Neubau beziehungsweise die Stilllegung von Erzeugungskapazitäten eine Rolle. Aber auch gesellschaftliche Aspekte wie strukturelle Entwicklungen und Umweltauswirkungen finden Berücksichtigung.

Im nächsten Schritt ist die Bundesregierung am Zug: Sie entwirft auf Grundlage der Netzentwicklungspläne einen Bundesbedarfsplan. Darin sind die künftigen Hochspannungsleitungen enthalten. Mit Verabschiedung des Bundesbedarfsplans steht zudem fest, dass eine Leitung gebaut wird.

In der Bundesfachplanung wird ein Trassenkorridor samt Alternativen festgelegt. Die Suche nach diesem Vorzugskorridor findet unter öffentlicher Beteiligung statt. Erst im letzten Schritt, der Planfeststellung, werden Details wie der Trassenverlauf und die Übertragungstechnik festgelegt. Die Übertragungsnetzbetreiber stellen einen Antrag, die Bundesnetzagentur (auf Landesebene die zuständige Behörde) prüft ihn auf Umweltauswirkungen, spricht mit beteiligten Interessensgruppen und trifft eine Entscheidung über das Bauvorhaben.

Die Energiewende wird nur mit weiterem Netzausbau gelingen. Um den effektiv zu gestalten, laufen unter anderem im Rahmen der Förderinitiative Zukunfts-fähige Stromnetze Forschungsprojekte zu Netzplanung, -betrieb und -technik. Infos zu den Projekten gibt es auf [www.forschung-stromnetze.info](http://www.forschung-stromnetze.info).

## Impressum

**Projektorganisation**  
Bundesministerium  
für Wirtschaft und Energie (BMWi)  
11019 Berlin

Projekträger Jülich  
Forschungszentrum Jülich GmbH  
Dr. Aleksandar Rakić  
52425 Jülich

**Förderkennzeichen**  
GENESYS 0325366  
GENESYS2 0325692

**ISSN**  
0937 - 8367

**Herausgeber**  
FIZ Karlsruhe · Leibniz-Institut  
für Informationsinfrastruktur GmbH  
Hermann-von-Helmholtz-Platz 1  
76344 Eggenstein-Leopoldshafen

**Autor**  
Andreas Michels

**Urheberrecht**  
Titelbild: rcfotostock – fotolia.com  
alle weiteren Abbildungen:  
ISEA RWTH Aachen,  
Bearbeitung: BINE Informationsdienst

Eine Verwendung von Text und  
Abbildungen aus dieser Publikation ist  
nur mit Zustimmung der BINE-Redaktion  
gestattet. Sprechen Sie uns an.

## Projektbeteiligte

» **Projektleitung:** RWTH Aachen, Christian Bussar, [Christian.Bussar@isea.rwth-aachen.de](mailto:Christian.Bussar@isea.rwth-aachen.de)

## Links und Literatur

- » [www.genesys.rwth-aachen.de](http://www.genesys.rwth-aachen.de) Projekthomepage mit der Möglichkeit, die Software kostenfrei zu bestellen
- » [www.forschung-stromnetze.info](http://www.forschung-stromnetze.info) Forschungsinitiative der Bundesregierung, in der das Nachfolgeprojekt gefördert wird
- » RWTH Aachen University (Hrsg.): Speicher- und Netzausbaubedarf bei Betrachtung des gesamten Europäischen Raums mit hohem Anteil Erneuerbarer Energien. Schlussbericht. FKZ 0325366. 2014

## Mehr vom BINE Informationsdienst

- » Stabiles Netz mit 100 Prozent Ökostrom. BINE-Projektinfo 06/2015
- » Dieses Projektinfo gibt es auch online und in englischer Sprache unter [www.bine.info/Projektinfo\\_15\\_2015](http://www.bine.info/Projektinfo_15_2015)

*BINE Informationsdienst berichtet aus Projekten der Energieforschung in seinen Broschürenreihen und dem Newsletter. Diese erhalten Sie im kostenlosen Abonnement unter [www.bine.info/abo](http://www.bine.info/abo)*

## Kontakt · Info

Fragen zu diesem Projektinfo?  
Wir helfen Ihnen weiter:

**0228 92379-44**  
**[kontakt@bine.info](mailto:kontakt@bine.info)**

**BINE Informationsdienst**  
Energieforschung für die Praxis  
Ein Service von FIZ Karlsruhe

Kaiserstraße 185-197  
53113 Bonn  
[www.bine.info](http://www.bine.info)

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages