



Photo: by Appollinary Kalashnikova on Unsplash

Kein windiges Geschäft: Nachhaltigkeit der Windenergie

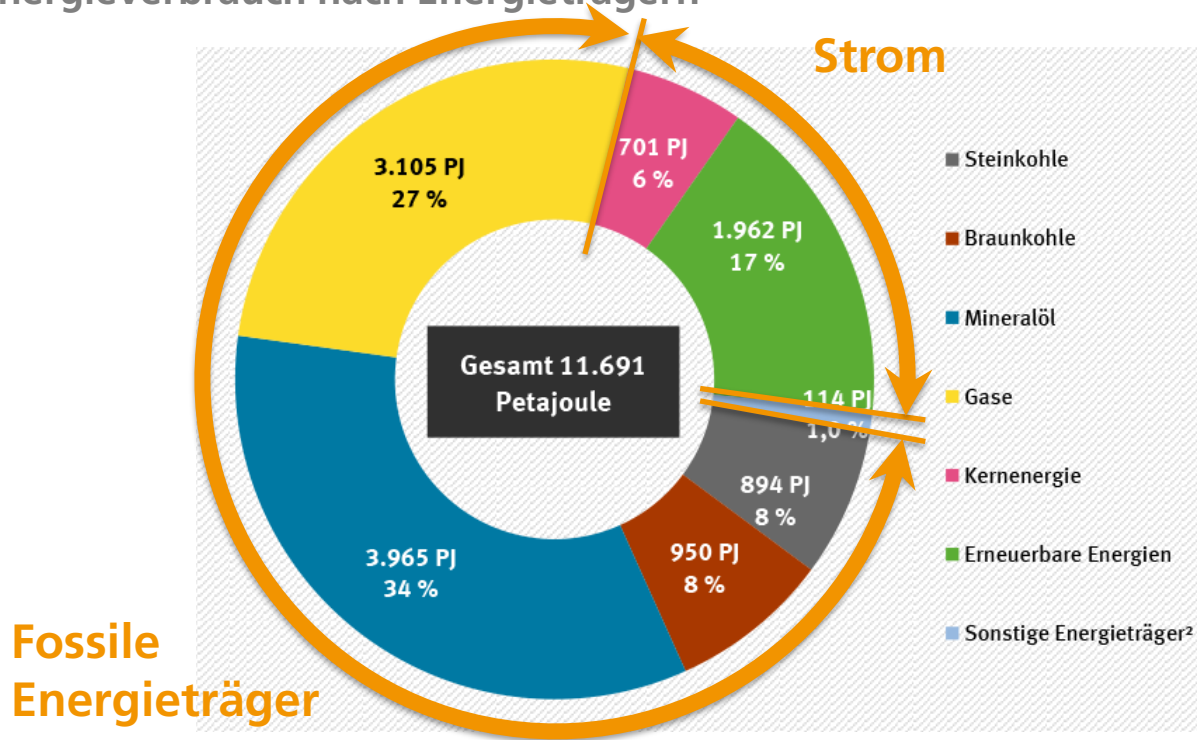
Tobias Meyer
2022-03-24

Wir brauchen Energie!



Unser Energiebedarf

Primärenergieverbrauch nach Energieträgern



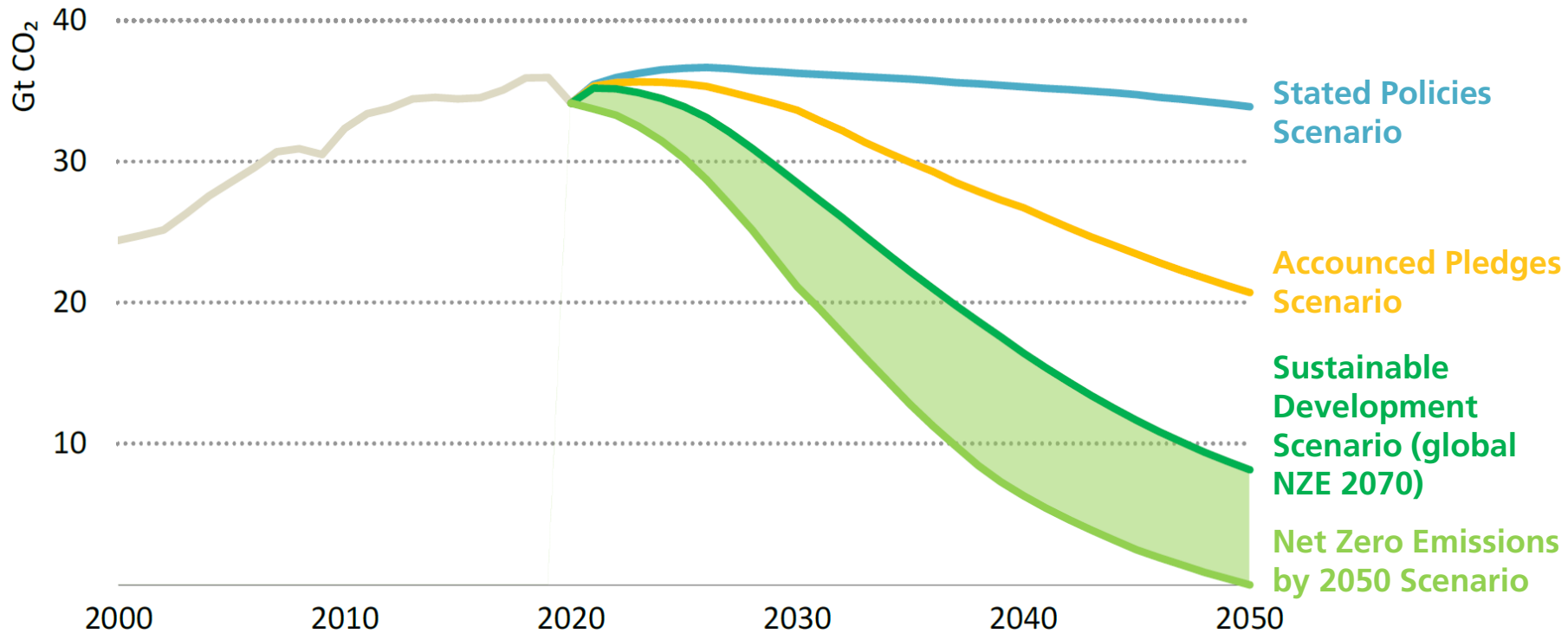
Umweltbundesamt auf Basis AG Energiebilanzen

<https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/primaerenergieverbrauch#primaerenergieverbrauch-nach-energietraegern>

Wie wollen wir unseren Energiebedarf decken?

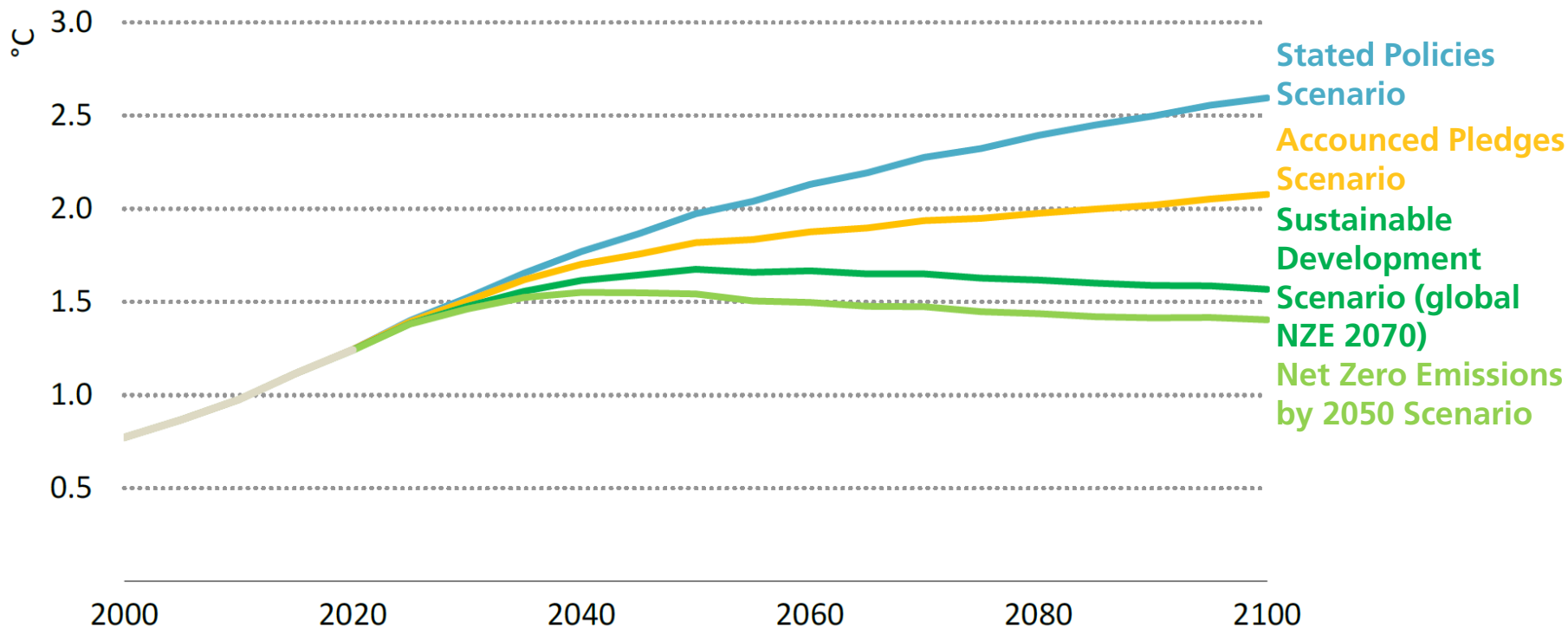


CO₂-Emissionen im künftigen Verlauf



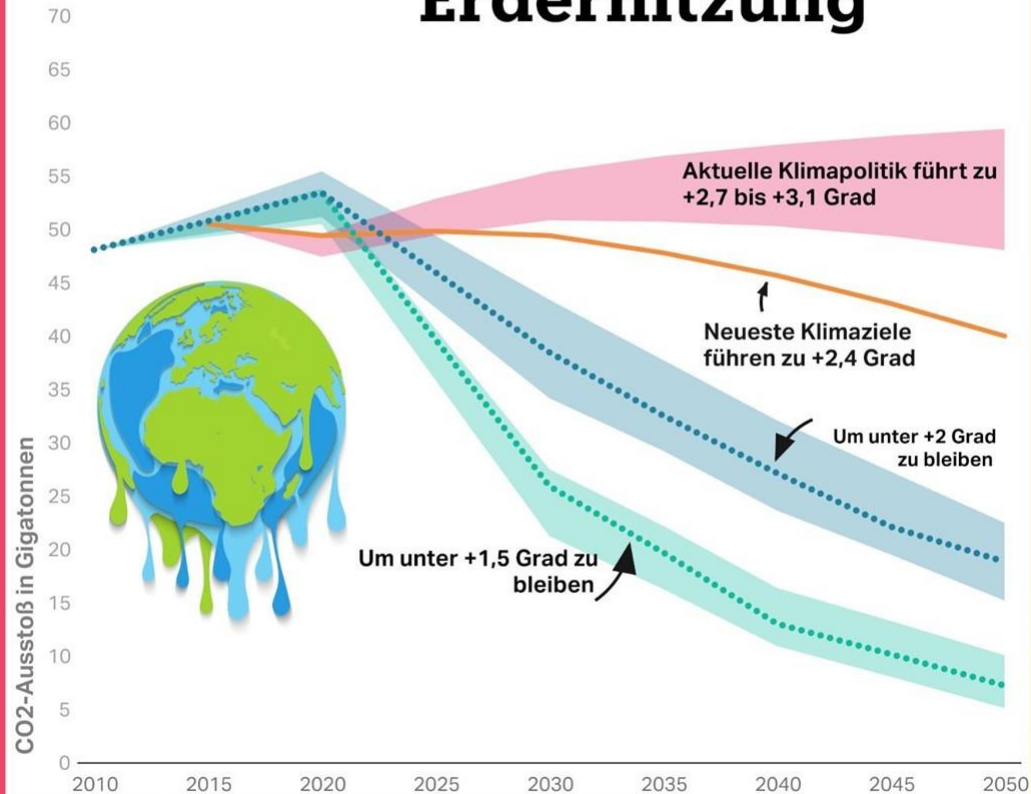
IEA World Energy Outlook, <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021>, Fig. 1.4

Anstieg der mittleren globalen Oberflächentemperatur



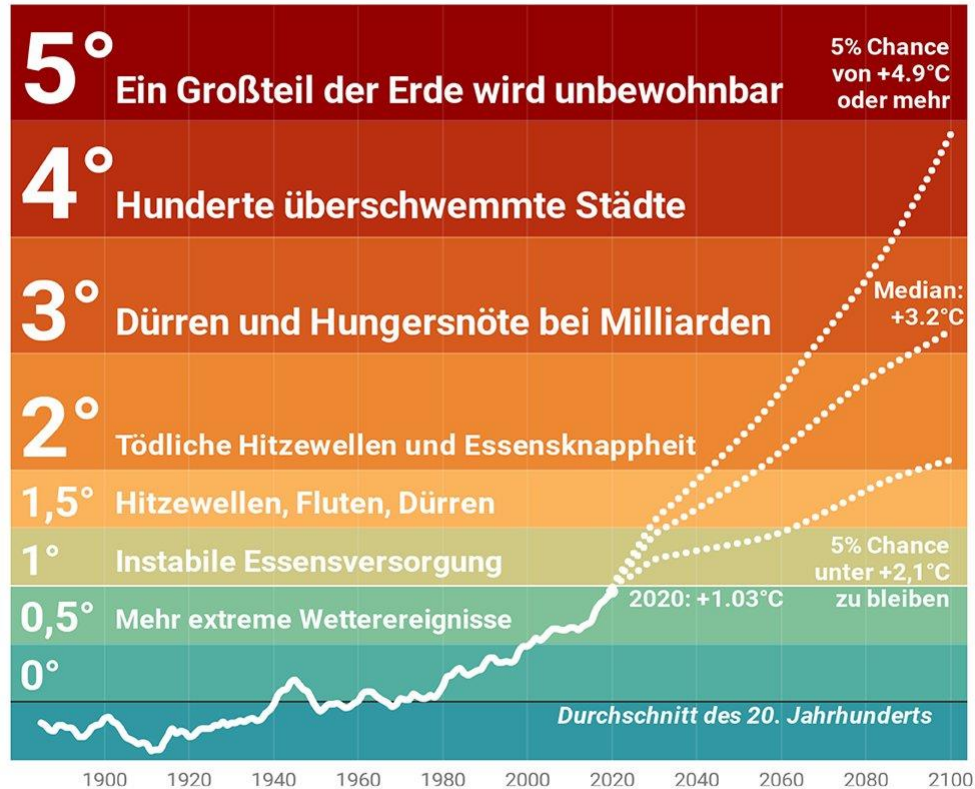
IEA World Energy Outlook, <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021>, Fig. 1.5

Die neuesten Klimaziele führen zu +2,4 Grad Erderhitzung



Wie heiß darf es werden?

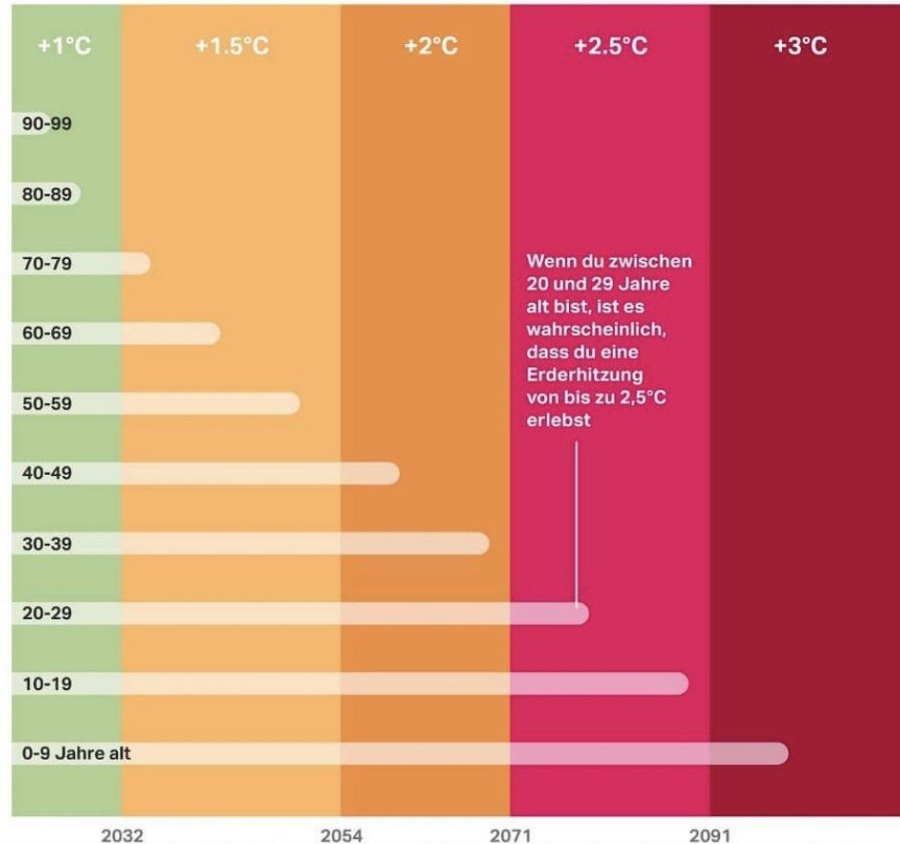
Globale Temperaturabweichung in Celsius



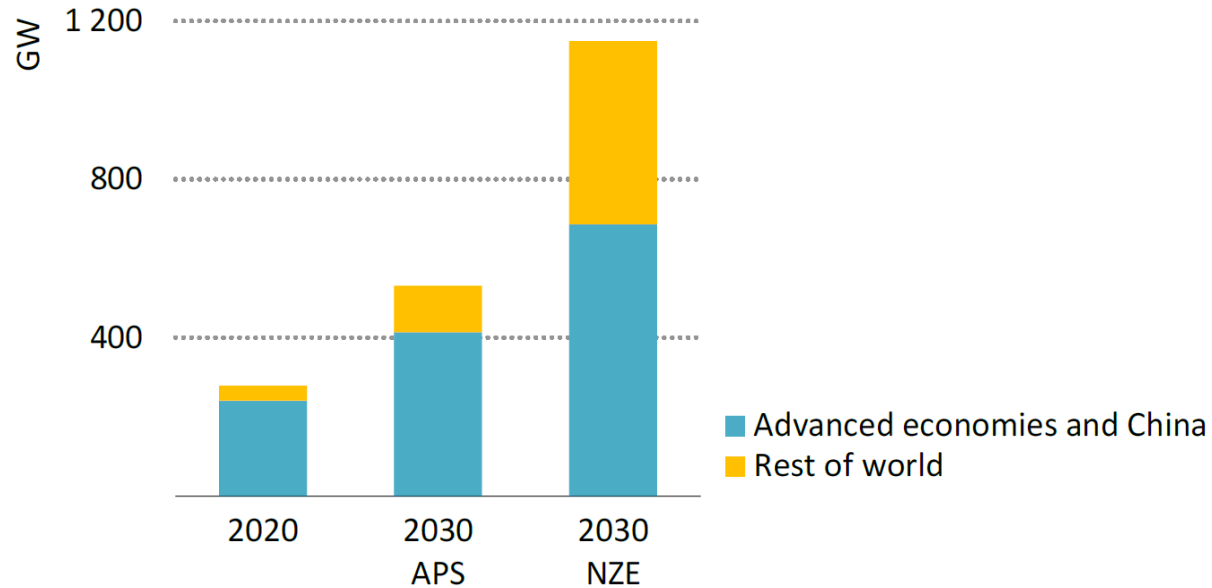
Daten: NOAA/Raftery et al./Gregor Aisch

taz

Wie viel Grad Erderhitzung wirst du noch erleben?



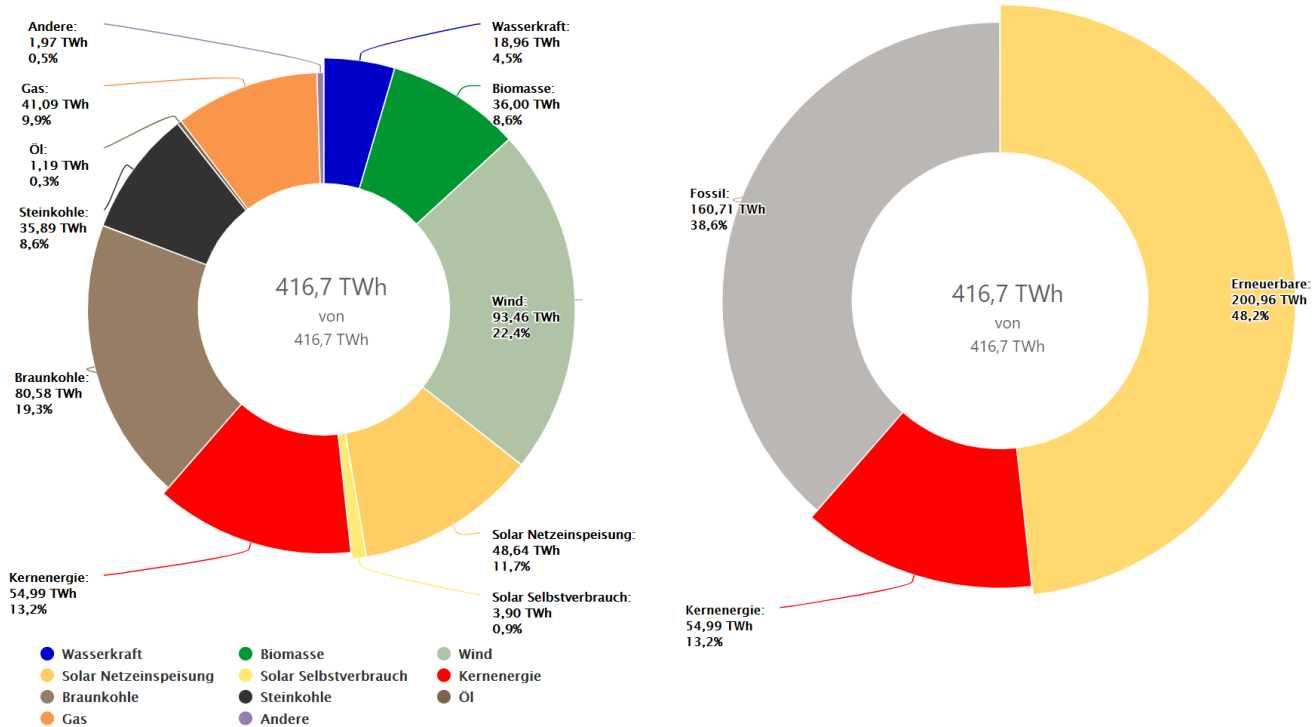
Notwendiger Ausbau der Kapazität erneuerbarer Energien



IEA World Energy Outlook, <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021>, Fig. 1.8

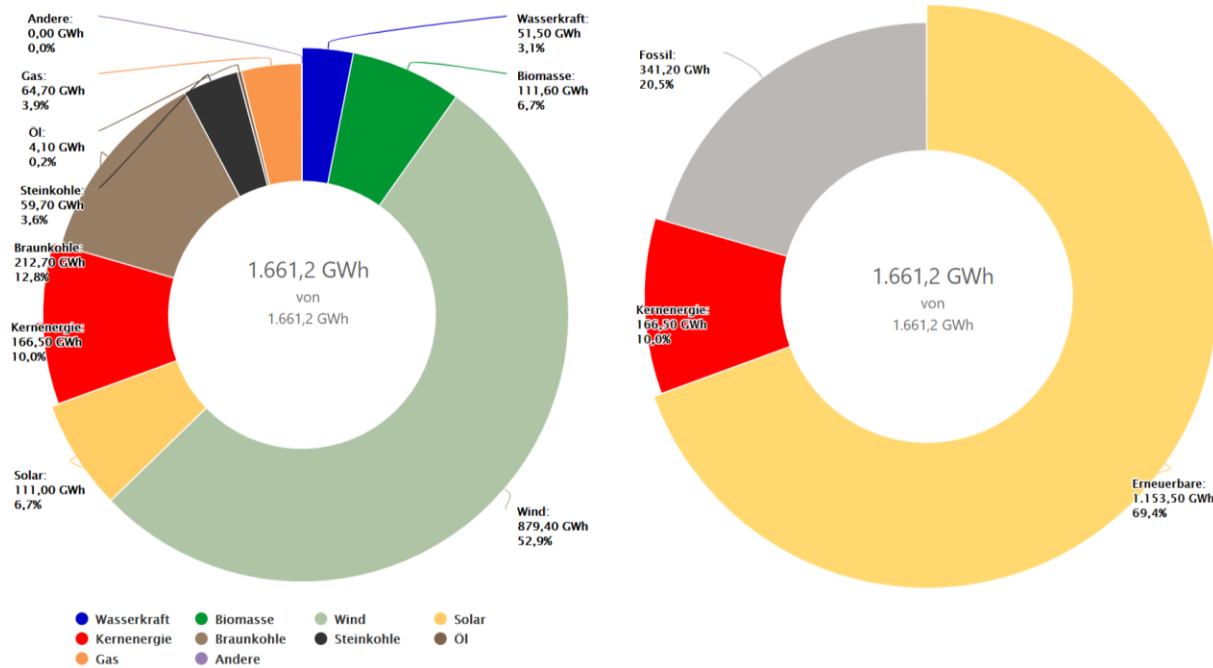
Unser Energiebedarf

Öffentliche Nettostromerzeugung in Deutschland in 2021



Unser Energiebedarf

Öffentliche Nettostromerzeugung in Deutschland am 22. Oktober 2021



...und was ist mit Kernenergie?!



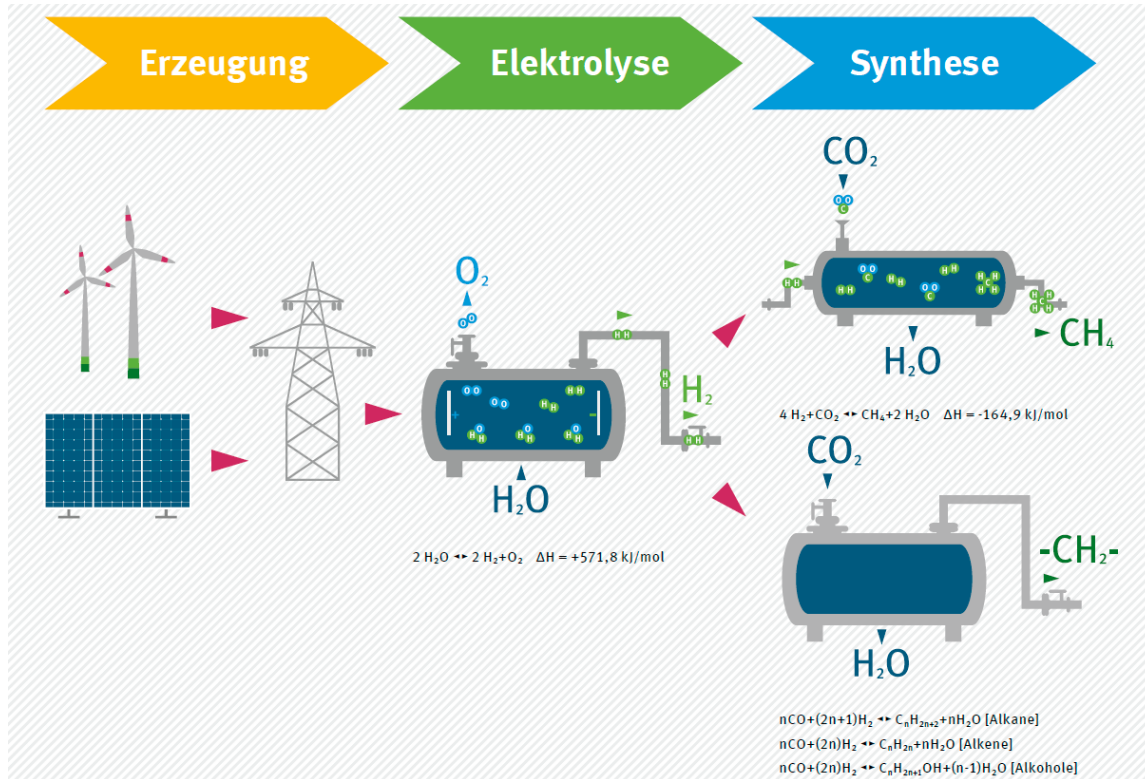
...und was ist mit Kernenergie?!



...und Wasserstoff?



Wind und Wasserstoff



Und das sagt das Umweltbundesamt dazu:
 „[...] Nur dort, wo es technisch nicht möglich ist, erneuerbare Energien und erneuerbaren Strom direkt zu nutzen, sollte[...] Wasserstoff zum Einsatz kommen. [...] Wasserstoff wird künftig also da benötigt, wo keine effizientere Lösung verfügbar ist [...]“

<https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimaschutz-energiepolitik-in-deutschland/wasserstoff-schlüssel-im-kuenftigen-energiesystem>

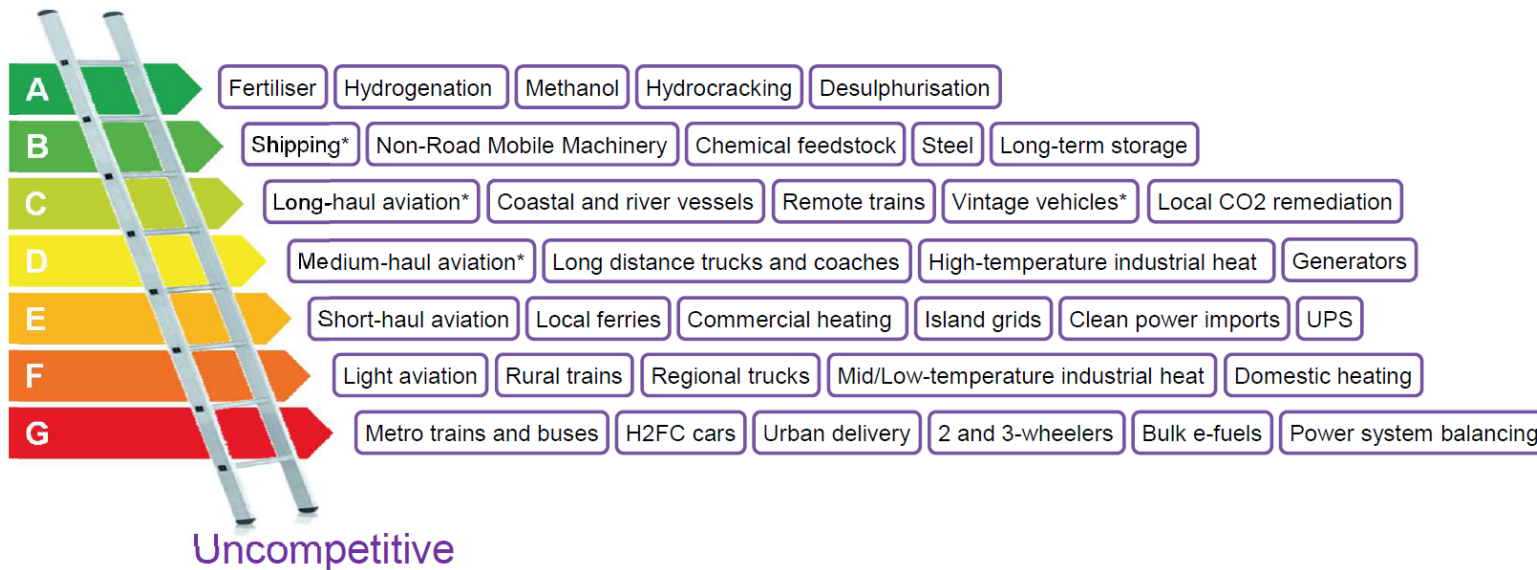
Wind und Wasserstoff

Nutzung regenerativer Strom			Substitution fossiler Bereitstellung				
regenerative Bereitstellung			fossile Einsparung			Substitutions- verhältnis Energie	Vermiedene THG- Emissionen in CO ₂ Äq
Input	Technik	bereitgestellte Energie / Nutzen	Technik	Input			
1 kWh reg. Strom	PtH Wärmepumpe	3,3 kWh Wärme	3,3 kWh Wärme	Brennwertkessel (105%)	3,14 kWh Erdgas	3,14	~ 640
1 kWh reg. Strom	E-Auto (80%)	4,6 km	4,6 km	Verbrennungs- motor (28%)	2,6 kWh fl. Kraftstoff	2,6	~ 690
1 kWh reg. Strom	PtH direktelektrisch	0,95 kWh Wärme	0,95 kWh Wärme	Brennwertkessel (105%)	0,91 kWh Erdgas	0,91	~ 185
1 kWh reg. Strom	PtG – H2 stofflich	0,74 kWh Wasserstoff	0,74 kWh Wasserstoff	Dampfpreforming (85,2%)	0,87 kWh Erdgas	0,87	~ 180
1 kWh reg. Strom	PtG – CH4	0,58 kWh Methan	0,58 kWh Methan		0,58 kWh Erdgas	0,58	~ 120
1 kWh reg. Strom	PtL	0,5 kWh fl. Kraftstoff	0,5 kWh fl. Kraftstoff		0,5 kWh fl. Kraftstoff	0,5	~ 135

<https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimaschutz-energiepolitik-in-deutschland/wasserstoff-schluesel-im-kuenftigen-energiesystem>

Wind und Wasserstoff

Unavoidable



* Most likely via ammonia or e-fuel rather than H2 gas or liquid

Source: Michael Liebreich/Liebreich Associates, *Clean Hydrogen Ladder, Version 4.1, 2021*. Concept credit: Adrian Hiel, Energy Cities. [CC-BY 3.0](https://creativecommons.org/licenses/by/3.0/)

Source: Michael Liebreich/Liebreich Associates, Clean Hydrogen Ladder, Version 4.1, 2021. Concept credit: Adrian Hiel, Energy Cities. CC-BY 3.0
https://drive.google.com/file/d/1X-oH04NH1477eig_BmYjtD9mHyTcoiVc/view

Entwicklung der Windenergie



Entwicklung der Windenergie

- Kurt Bilau (um 1920!): *Ventimotor* – Nutzung von Windmühlen im Nebenerwerb zur Elektrizitätsgewinnung
- Bilau'sche Ventikanten (um 1930, mit Albert Betz)
 - Verbesserte Effizienz durch Nutzung strömungsgünstig geformter Profile aus Aluminium

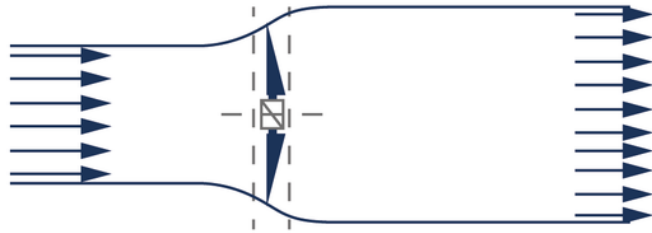


Von Frank Vincentz - Eigenes Werk, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=16254785>
https://de.wikipedia.org/wiki/Kurt_Bilau

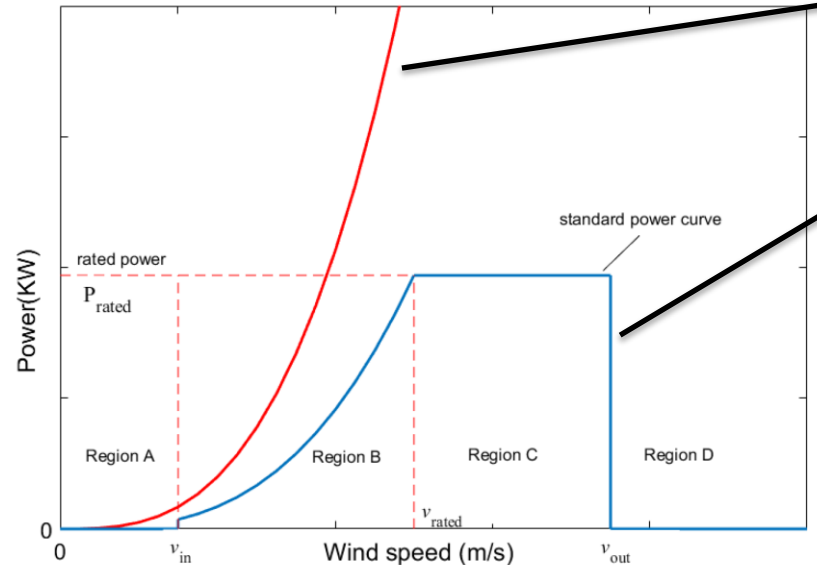
Entwicklung der Windenergie

Leistungskurve und Regelung

- ↳ Betz' limit: höchstens 59.3% der Energie des Windes können entnommen werden



- ↳ Zusätzliche Begrenzung durch Dimensionierung von Triebstrang, Generator, Elektrotechnik,...: Nennleistung

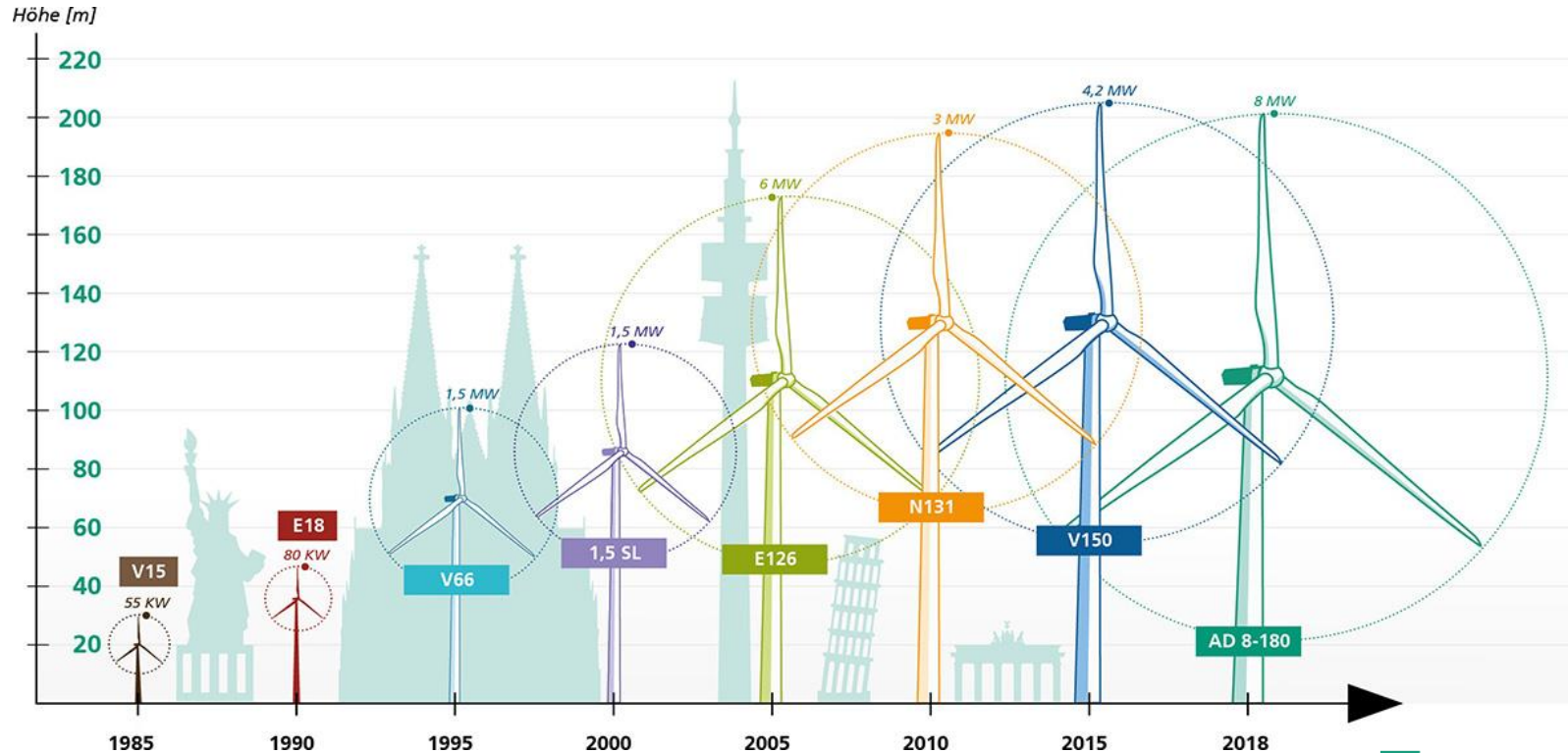


Im Wind verfügbare Leistung

Von der Windenergieanlage umgesetzte Leistung

<https://www.mdpi.com/2076-3417/10/9/3268/htm>
<https://www.wind-energie.de/themen/anlagentechnik/funktionsweise/betz-und-leistungsentnahme/>

Größenentwicklung von Windenergieanlagen



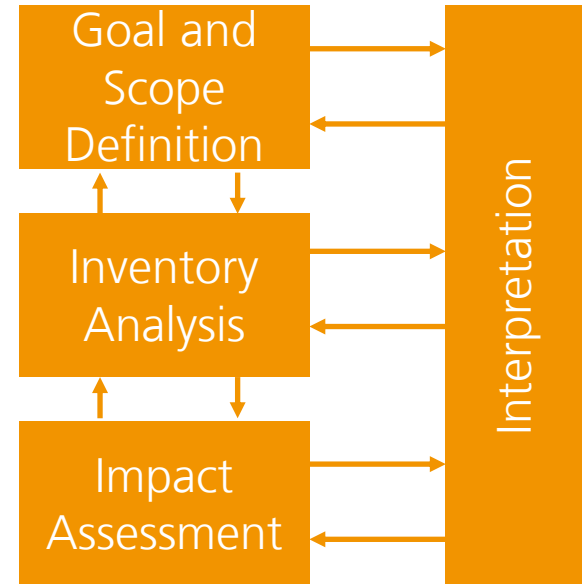
Quantifizierung des Impacts: Life Cycle Assessment



Wie ökologisch ist Windstrom wirklich?

Life Cycle Assessment

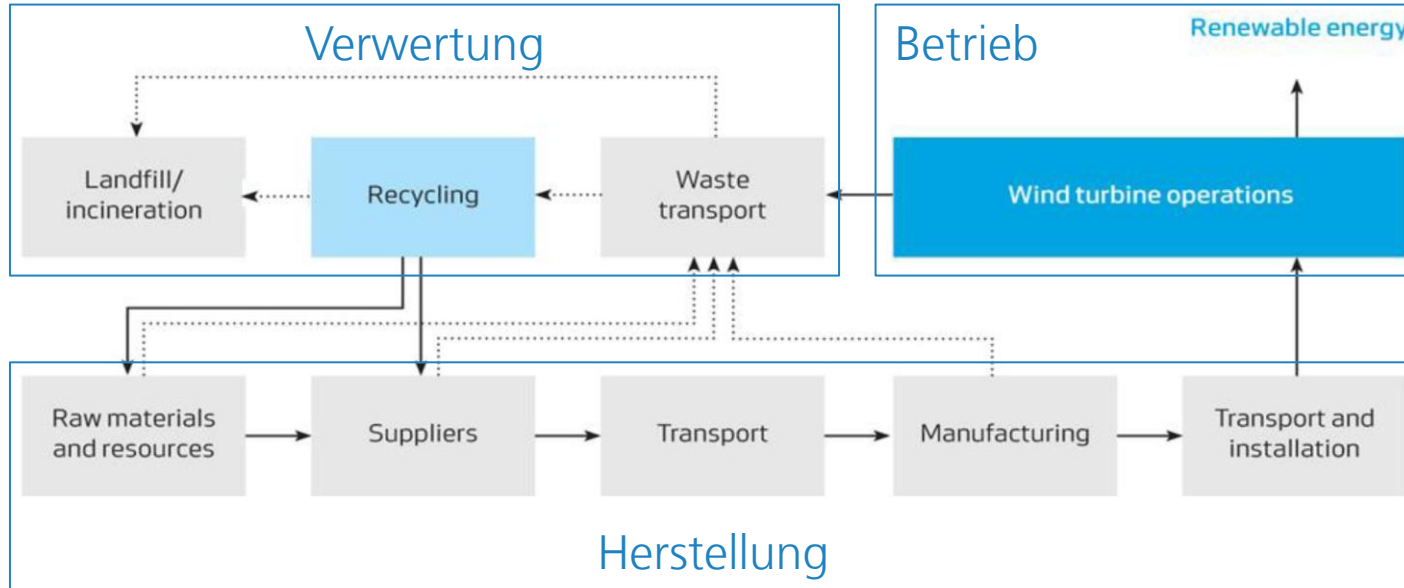
- > Ziel: Quantifizierung des gesamten ökologischen Einflusses eines Produkts
- > Standardisiertes Vorgehen, das Vergleichbarkeit sicherstellt



Nach ISO14040

Wie ökologisch ist Windstrom wirklich?

Life Cycle Assessment: Goal and Scope Definition



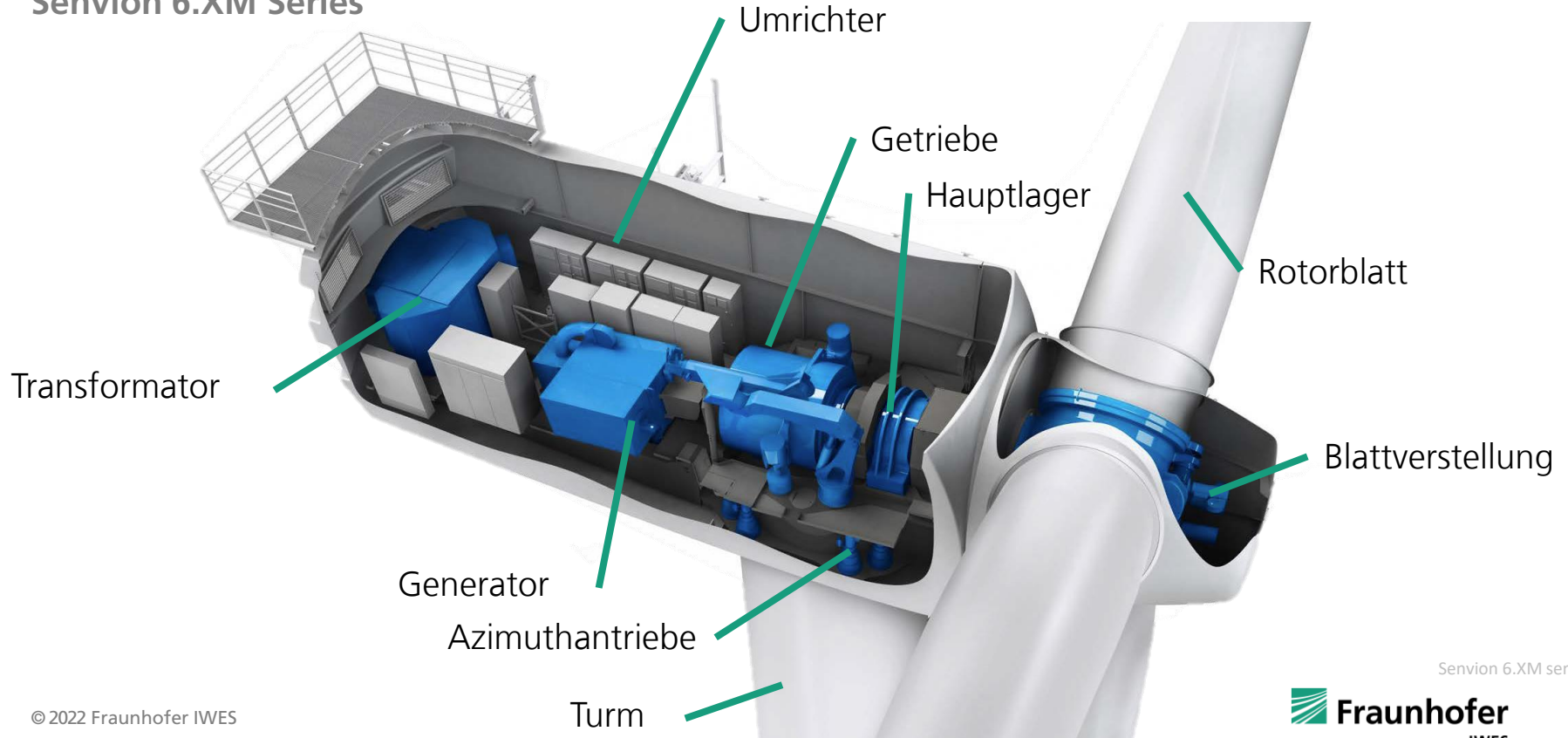
<https://www.vestas.com/content/dam/vestas-com/global/en/sustainability/reports-and-ratings/lcas/LCA%20of%20Electricity%20Production%20from%20an%20onshore%2015042MW%20Wind%20PlantFinal.pdf.coredownload.inline.pdf>

Life Cycle Assessment: Inventory Analysis



Aufbau einer Windenergieanlage

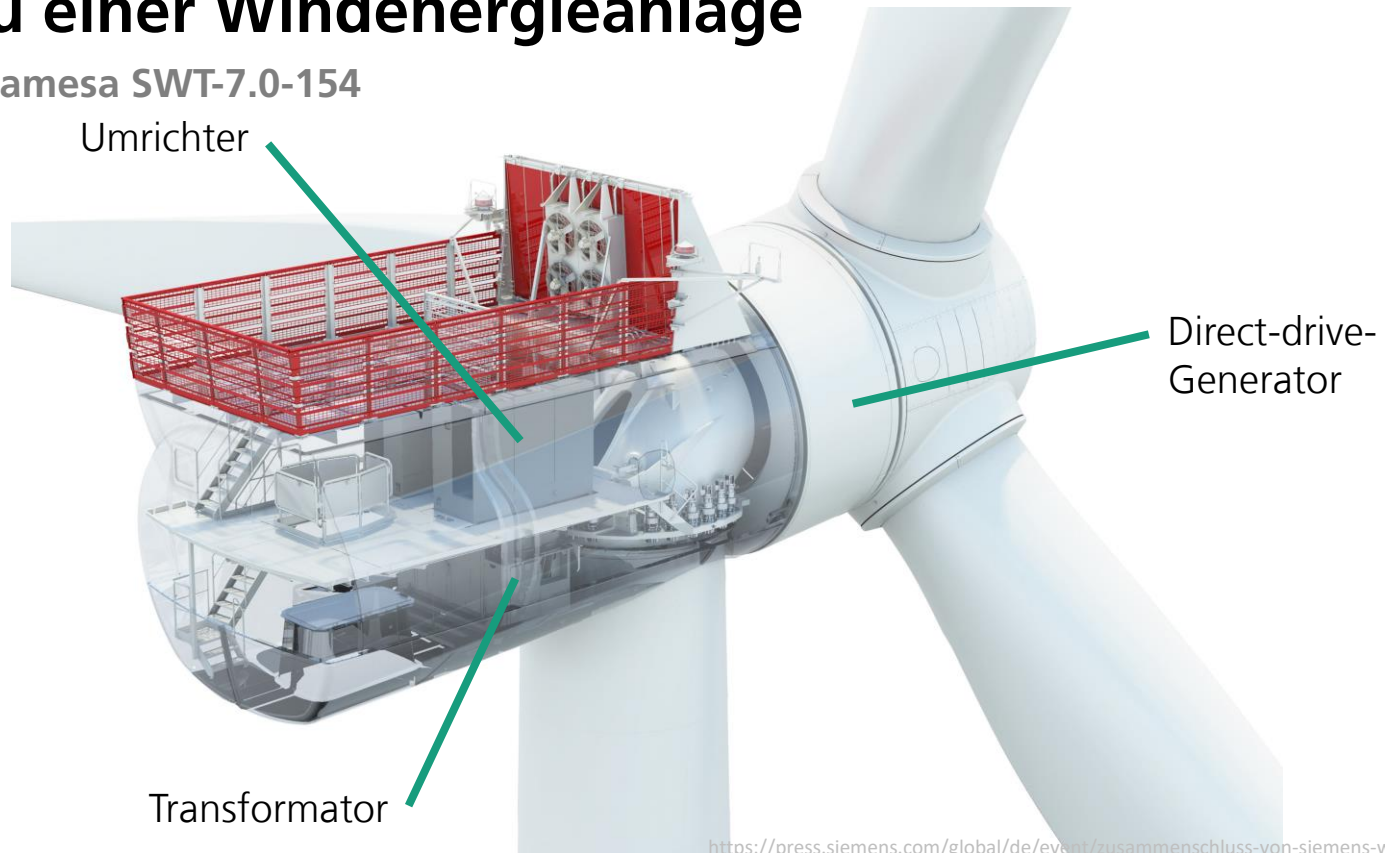
Senvion 6.XM Series



Senvion 6.XM series

Aufbau einer Windenergieanlage

Siemens Gamesa SWT-7.0-154

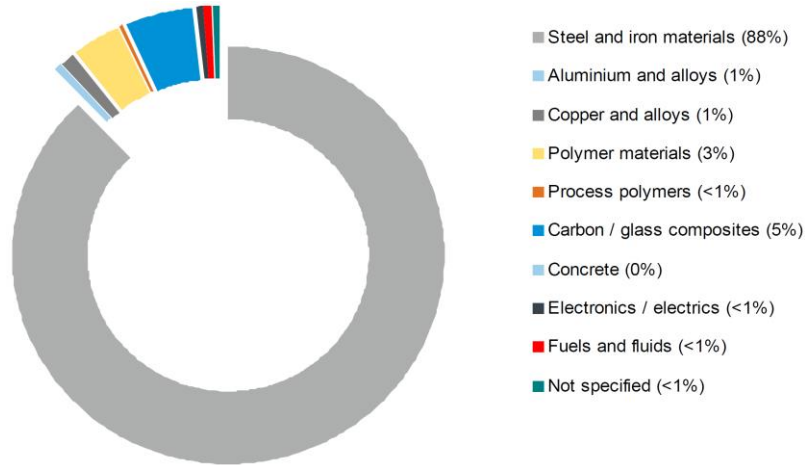


<https://press.siemens.com/global/de/event/zusammenschluss-von-siemens-wind-power-mit-gamesa>

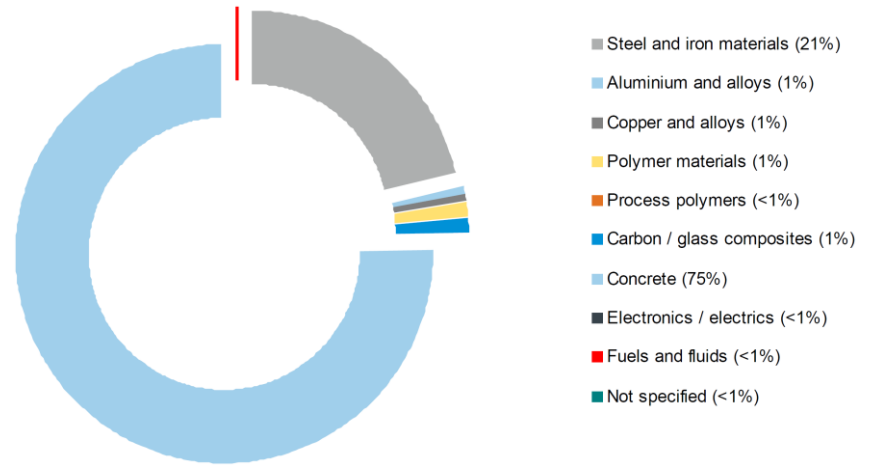
Wie ökologisch ist Windstrom wirklich?

Life Cycle Assessment: Inventory Analysis

Materialzusammensetzung einer Turbine



Materialzusammensetzung eines Windparks



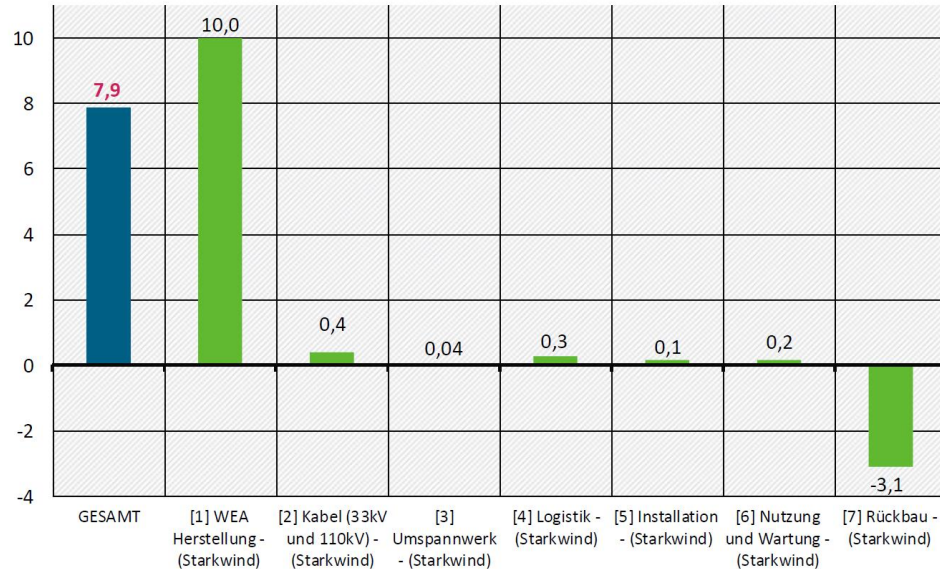
https://www.vestas.com/content/dam/vestas-com/global/en/sustainability/reports-and-ratings/lcas/LCA_V903MW_version_1_1.pdf.coredownload.inline.pdf



https://commons.wikimedia.org/wiki/File:D%C3%BCsseldorf_-_Auf_der_Lausward_08_tes.jpg
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Neodym_3.jpg
Tobias Meyer/IW

Wie ökologisch ist Windstrom wirklich?

DURCHSCHNITT Onshore (Starkwind) - GWP [g CO₂-Äq./kWh] Basisszenario



← Zum Vergleich:

- ← Erdgas 374 g CO₂-Äq./kWh
- ← Steinkohle 815 g CO₂-Äq./kWh
- ← Braunkohle 1142 g CO₂-Äq./kWh

CLIMATE CHANGE Aktualisierung und Bewertung der Ökobilanzen von Windenergie- und Photovoltaikanlagen unter Berücksichtigung aktueller Technologieentwicklungen – Abschlussbericht, Abbildung 82
https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-04-10_cc_10-2019_strommix_2019.pdf, Tabelle 2

Wie ökologisch ist Windstrom wirklich?

Life Cycle Assessment: Impact Assessment: Energetic payback

- “Following the net-energy approach, [...] the breakeven time of the onshore V150-4.2 MW is 7.6 months for low wind.”

Referenzstrommix	Offshore	Onshore (Starkwind)	Onshore (Schwachwind)
Deutscher Strommix	4,5 Monate	2,5 Monate	3,2 Monate
Dänischer Strommix	10,7 Monate	5,9 Monate	7,6 Monate

- Anlagenlebensdauer: 20...25 Jahre!

<https://www.vestas.com/content/dam/vestas-com/global/en/sustainability/reports-and-ratings/lcas/LCA%20of%20Electricity%20Production%20from%20an%20onshore%20V15042MW%20Wind%20PlantFinal.pdf.coredownload.inline.pdf>
<https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/aktualisierung-bewertung-der-oekobilanzen-von>

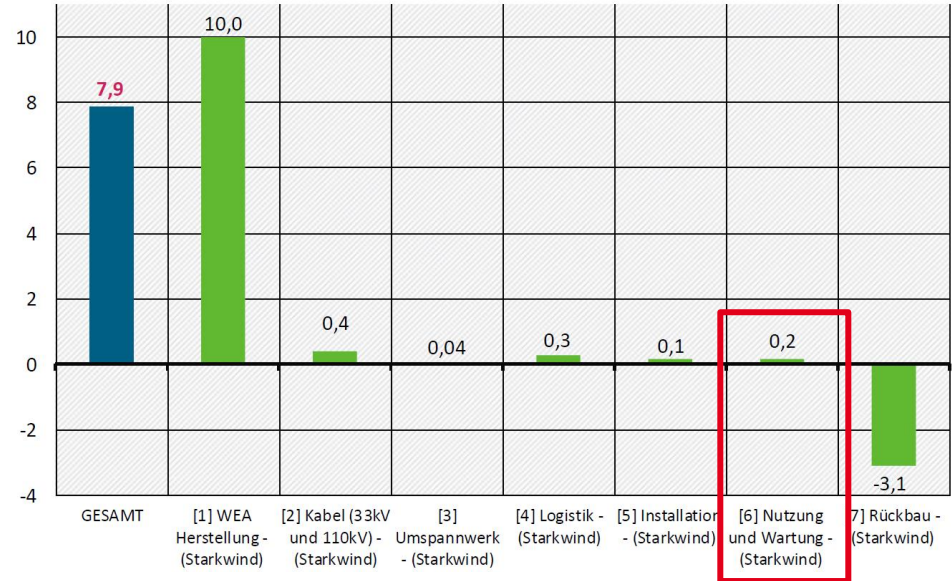
Verbesserungen durch die Betriebsführung

Das ist jetzt übrigens meine Forschung! :-)

Verbesserungen durch die Betriebsführung

- ↪ Lebensdauererlängerung reduziert die Auswirkungen *direkt*
- ↪ Verlängerung der Betriebserlaubnis notwendig
- ↪ Wird derzeit nahe dem End of Life evaluiert
- ↪ Kernfrage: Wie können wir eine Turbine über die gesamte Lebensdauer so *schonen*, dass sie länger laufen kann und mehr Energie erzeugt?

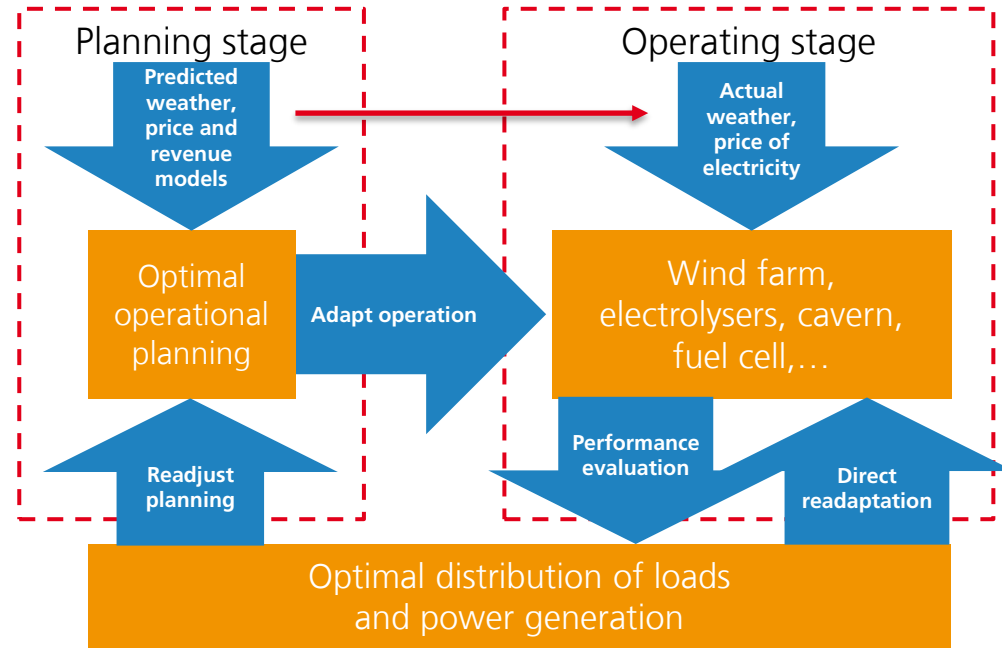
DURCHSCHNITT Onshore (Starkwind) - GWP [g CO₂-Äq./kWh] Basisszenario



Adaptive Betriebsführung

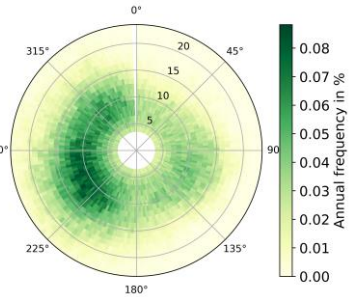
Basis der optimalen Betriebsplanung

- > Trennung von Planungs- und Betriebsphase des Systems
- > Bereitstellung der Planung als Sollwerte für den Betrieb
- > Optimierung einer zustandsabhängigen Langzeit-Betriebsplanung
- > Neuanpassung in Abhängigkeit von der Leistungsfähigkeit der Anlage

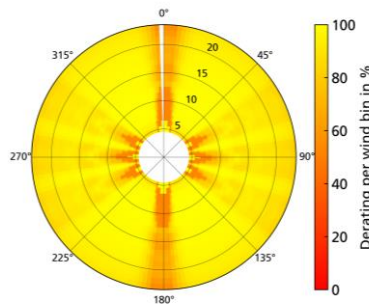


Adaptive Betriebsführung

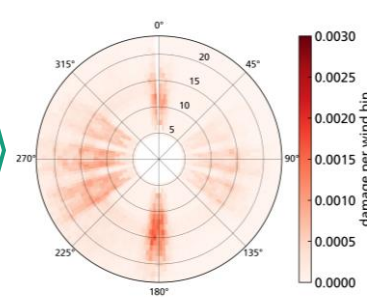
Optimierung von Ertrag und Umsatz über den gesamten Lebenszyklus



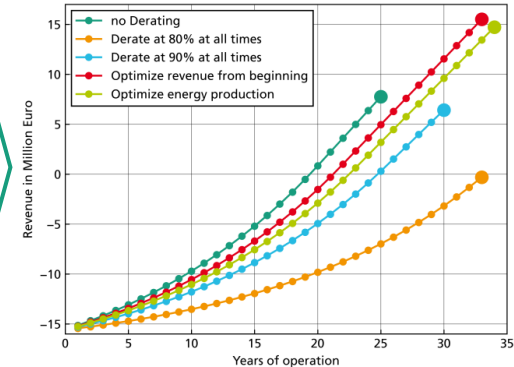
Von der
Windverteilung



zum geplanten
Betrieb



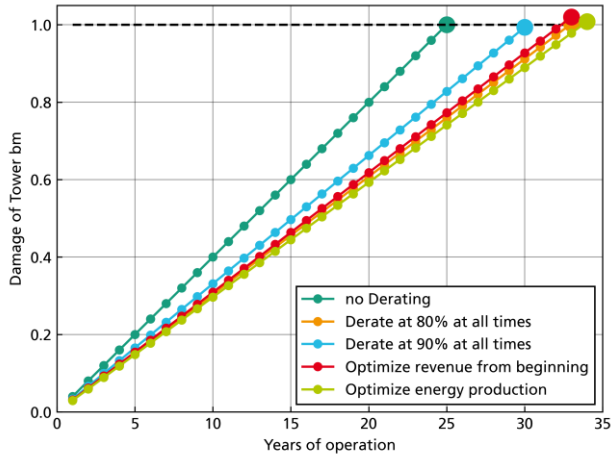
zum geplanten
Schädigungsfortschritt



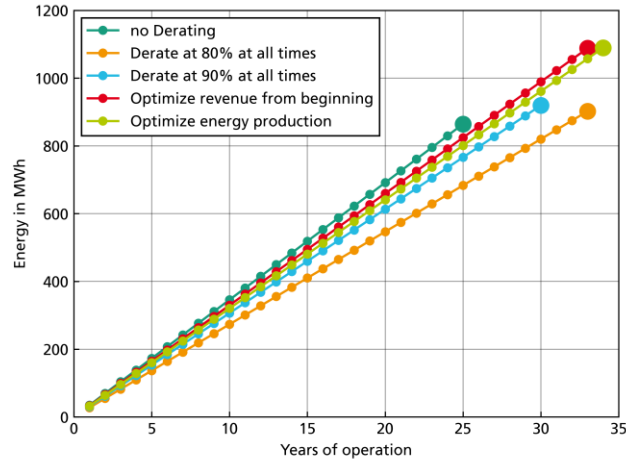
zu optimierter
Lebensdauer, Ertrag
und Umsatz

- ↪ Geplanter Betrieb über die gesamte Lebensdauer - modellbasierte Optimierung
- ↪ Gleichgewicht zwischen Stromerzeugung, Lasten und Lebensdauererlängerung
- ↪ Maximierter Ertrag

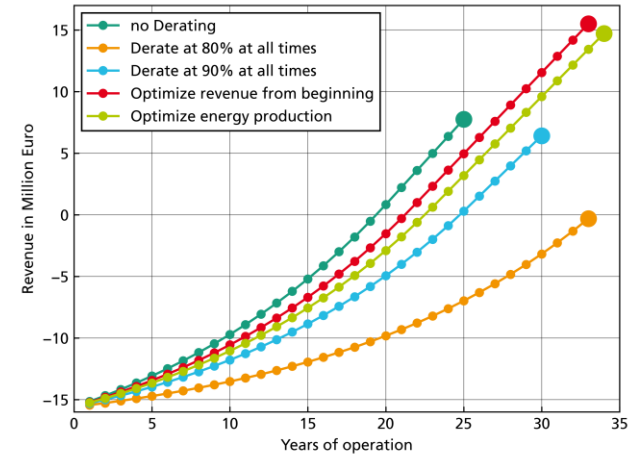
Adaptive Betriebsführung



Gleiche Schädigung der Komponenten



Gleicher Ertrag für „dummes“ derating, erhöhter Ertrag für optimiertes derating



„Dummes“ derating senkt Rendite, optimiertes derating erhöht sie

- ↪ Optimierte Betriebsführung erzeugt mehr Energie aus den gleichen Komponenten
- ↪ Ökologischer Impact wird direkt reduziert

Presentations held at WESC 2021, WindEurope Technology Workshop 2021



Quintessenz

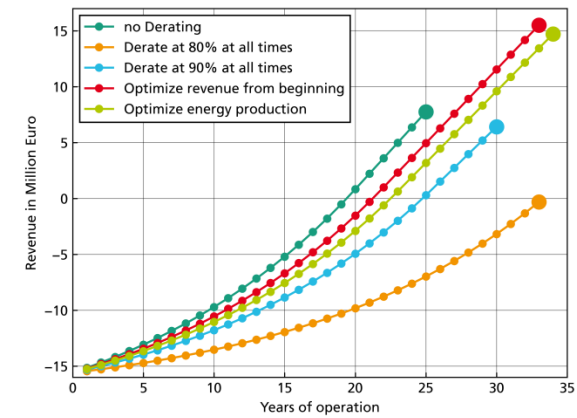
- Wir müssen *schnell* CO2-neutral werden
- Erneuerbare Energien müssen stark zum künftigen Strommix beitragen
- Windenergie ist ausgereift und sofort verfügbar
- Der energetische payback liegt bei wenigen Monaten
- Der ökologische Fußabdruck liegt bei sehr niedrigen ~8 g CO2eq/kWh
- Circular economy ist noch nicht möglich, aber die Hersteller und Forschung arbeiten bereits darauf hin
- Optimale Betriebsführung erlaubt eine weitere Verbesserung der Ökologie

Referenzstrommix	Offshore
Deutscher Strommix	4,5 Monate
Dänischer Strommix	10,7 Monate

5t CO₂ GW 1 200



DURCHSCHNITT



Vielen Dank für die Aufmerksamkeit!



KLIMA STREIK 25.3.

Bremen: 10h,
Bürgerweide

Osterholz-Scharmbeck:
10h, Bahnhof

Bremerhaven: 12h,
Ernst-Reuter-Platz

Gemeinsam mit
#FridaysForFuture
auf die Straßen

STOPPT KOHLE, ÖL UND GAS
STOPPT DEN KRIEG!

Oldenburg: 12h,
Pferdemarkt



Danksagung

Das Fraunhofer IWES wird gefördert durch

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi)

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)

Europäischer Fonds für regionale Entwicklung (EFRE):

Land Bremen

- ↪ Senator für Umwelt, Bau und Verkehr
- ↪ Senator für Wirtschaft, Arbeit und Häfen
- ↪ Senatorin für Wissenschaft, Gesundheit und Verbraucherschutz
- ↪ Bremerhavener Gesellschaft für Investitionsförderung und Stadtentwicklung mbH

Land Niedersachsen

Freie und Hansestadt Hamburg



Niedersachsen

