universität freiburg

Vorstellung Zentrum für Erneuerbare Energien (ZEE)

Prof. Dr. Moritz Diehl, ZEE managing director
Ida Malou Bechmann, ZEE administrator

ZEE Miniworkshop *Flugwindenergie in Baden-Württemberg* und ZEE Besuch Daniela Evers (MdL)

Freiburg, 8. August 2025

zee
Zentrum für Erneuerbare Energien
Centre for Renewable Energy

zee

Zentrum für Erneuerbare Energien
Centre for Renewable Energy

universität freiburg

Das ZEE ist ein interdisziplinäres Universitätszentrum (gegründet 2007 von 7 Fakultäten) mit aktuellem Fokus auf Vernetzung, internationaler Zusammenarbeit und Wissenschaftskommunikation.

Ziel ist das Zusammenbringen von Akteuren in und um die Universität Freiburg, die am Thema “Erneuerbare Energien” interessiert sind, und das Entwickeln interdisziplinärer Forschungsideen und gemeinsamer Projekte.

Das ZEE hat vier Partnerinstitutionen:

- Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems
- Offenburg University of Applied Sciences
- Forest Research Institute, and
- Öko-Institut e.V.

zee

Zentrum für Erneuerbare Energien
Centre for Renewable Energy

universität freiburg

Aktive Mitglieder:

Prof. Dr. Jürgen Bauhus
Prof. Dr. Dierk Bauknecht
Prof. Dr. Andreas Bett
Prof. Dr. Joschka Bödecker
Prof. Dr. Oana Cojocaru-Mirédin
Prof. Dr. Moritz Diehl
Prof. Dr. Sonia Dsoke
Prof. Dr. Stefan Glunz
Prof. Dr. Marten Hillebrand
Prof. Dr. Andrea Kiesel
Prof. Dr. Alexandra-Maria Klein
Prof. Dr. Holger Neuhaus
Prof. Dr. Michael Pregernig
Prof. Dr. Bastian Rapp
Prof. Dr. Dirk Schindler
Prof. Dr. Michael Schmidt
Prof. Dr. Anke Weidlich
Prof. Dr. Markus Weiler
Prof. Dr. Christof Wittwer
Prof. Dr. Peter Woias
Prof. Dr. Cathrin Zengerling

universität freiburg

Board of Directors (BoD) and Management Team of ZEE

Prof. Dr. Andreas Christen
(Director)

Prof. Dr. Anke Weidlich
(Director)

Prof. Dr. Moritz Diehl
(Managing Director)

Ida Malou Bechmann
(ZEE Administrator)

Prof. Dr. Stefan Glunz
(Permanent Guest of BoD)

Prof. Dr. Dirk Schindler
(Permanent Guest of BoD)

Christine Paasch
(Financial Administrator)

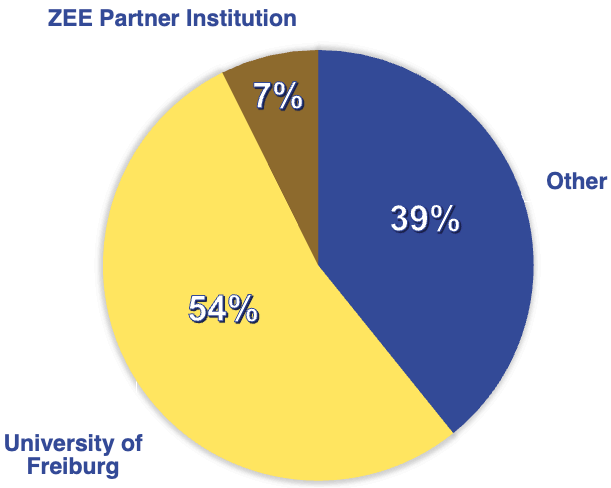
Jährliches Hauptereignis des ZEE:

Renewable Energy Day Freiburg

(seit 4. Dezember, 2023)

universität freiburg

Renewable Energy Day Freiburg on July 15, 2024 - 200 participants



Renewable Energy Day Freiburg - July 15, 2024

Renewable Energy Day Freiburg - July 15, 2024

Renewable Energy Research Workshop (Freiburg / Republic of Korea) June 12, 2024

Besuch einer südkoreanischen Delegation beim ZEE

sowie von vier südkoreanischen Fernsehjournalisten

ZEE Workshop October 17-18, 2024

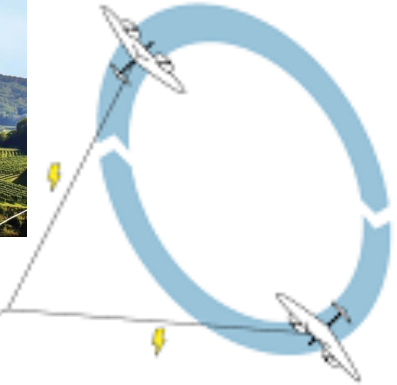
Prospects for Canada-Germany Energy Collaboration

Renewable Energy Day Freiburg 2025

(20. Mai 2025, mit Kerstin Andreae und Andreas Löschel als Keynote Speaker)

Aktuell laufen über das ZEE drei Forschungsprojekte

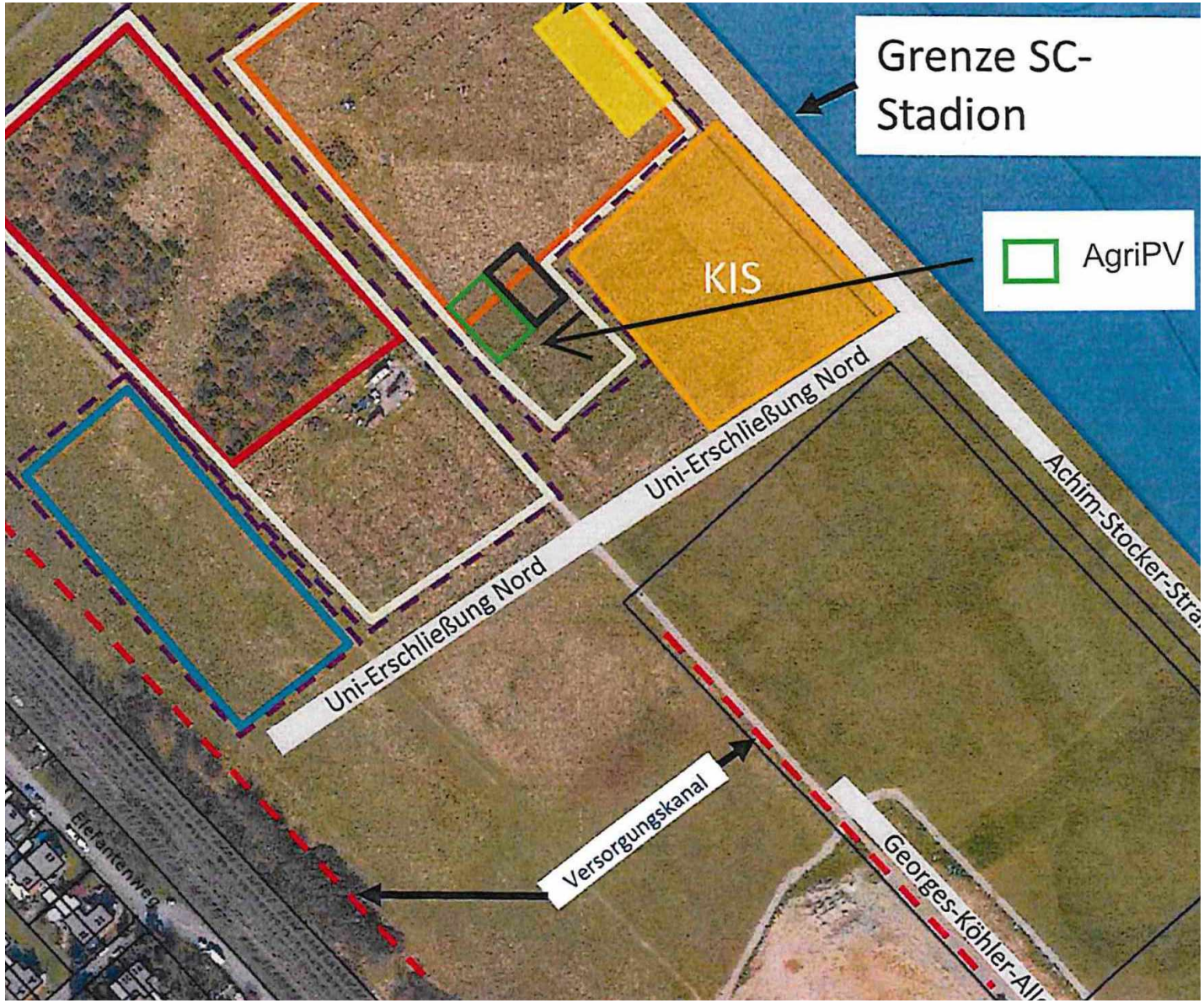
- GrECCo – Grid-Sensitive Energy Community Coordination



- MAWERO - Multi-wing Airborne Wind Energy Robustness Optimization

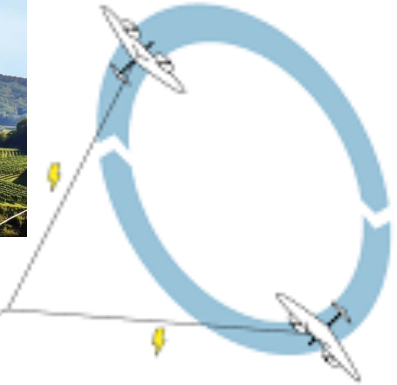
- Agri-photovoltaics (Agri-PV) Project

Fraunhofer ISE


Grenze SC-Stadion
AgriPV
KIS
Uni-Erschließung Nord
Uni-Erschließung Nord
Achim-Stocker-Stra
Versorgungskanal
Georges-Köhler-All
Elefantenweg

Aktuell laufen über das ZEE drei Forschungsprojekte

- GrECCo – Grid-Sensitive Energy Community Coordination



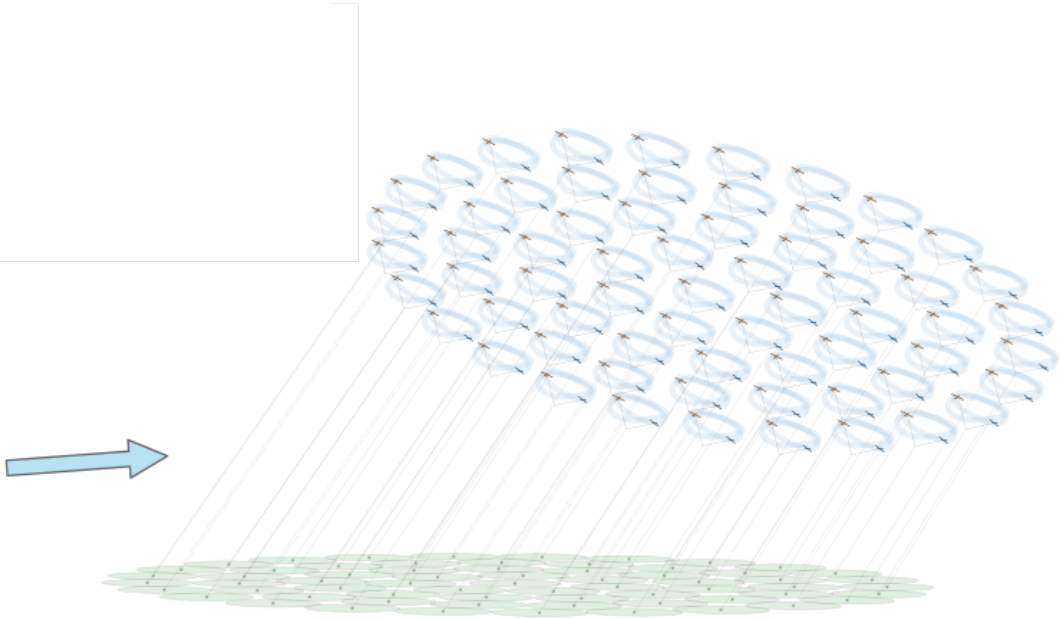
- **MAWERO - Multi-wing Airborne Wind Energy Robustness Optimization**

- Agri-photovoltaics (Agri-PV) Project

Fraunhofer ISE

DFG Projekt MAWERO bewilligt

Numerical optimal control for Multi-Wing
Airborne Wind Energy Robustness Optimization



Höhenwindenergie

Höhenwindenergie

Freiburger Wissenschaftler will Windkraftanlagen in den Himmel schicken

BZ-Abo | Riesige Windkraft-Parks, die viel Energie aus luftiger Höhe liefern und vom Boden aus kaum zu sehen sind: Das ist die Vision einer Freiburger Forschergruppe. Sie hoffen auf einen Prototypen in drei Jahren. 2 min

Jelka Louisa Beule
Do, 25. Jan 2024, 14:00 Uhr
Freiburg

1/2

universität freiburg

zee
Zentrum für Erneuerbare Energien
Centre for Renewable Energy

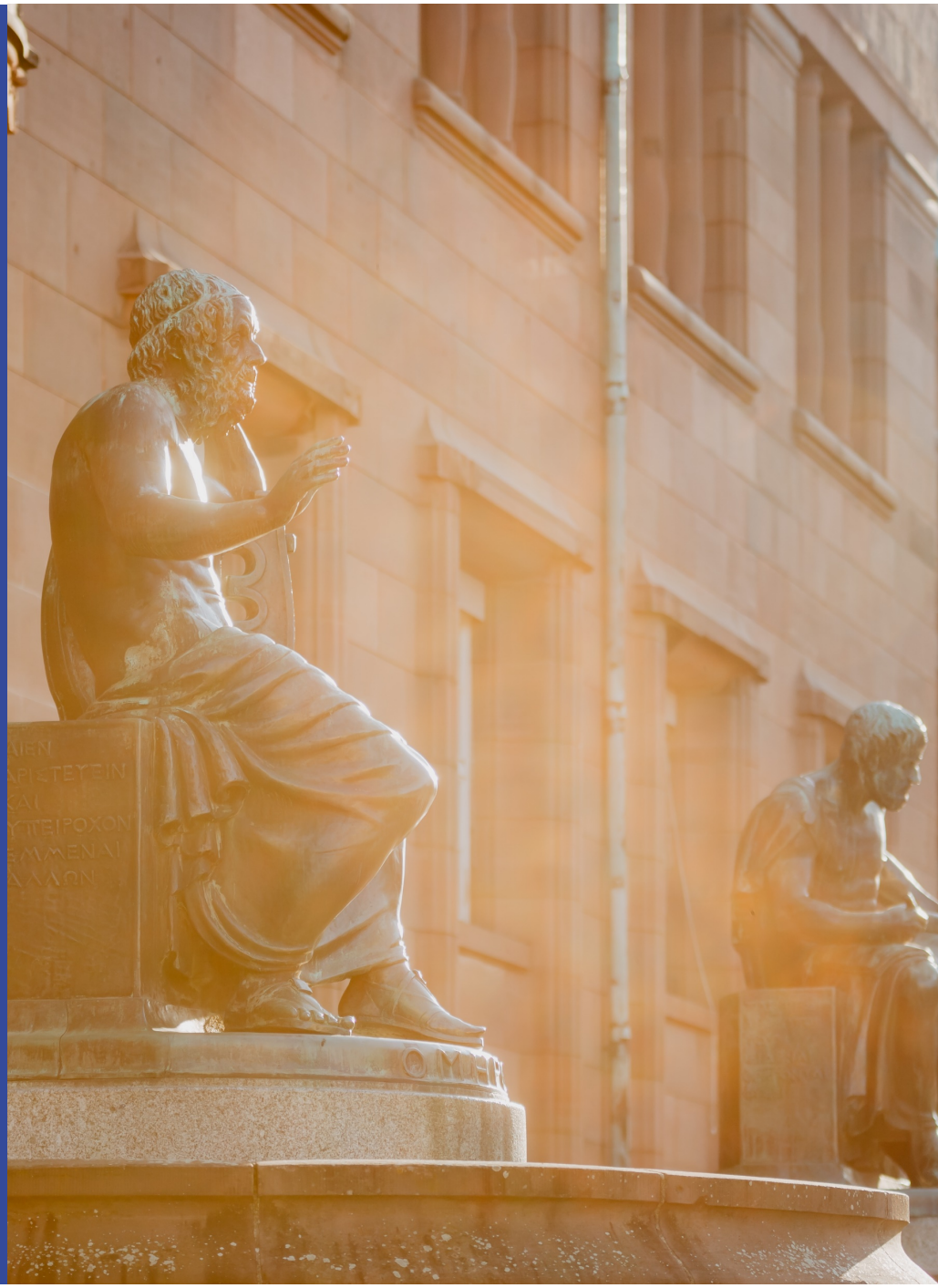
Einführung die Höhen- und Flugwindenergie

Prof. Dr. Moritz Diehl (Direktor des ZEE)

Institut für Mikrosystemtechnik (IMTEK), Universität Freiburg,
Georges-Köhler-Allee 102, D-79110 Freiburg

ZEE Miniworkshop *Flugwindenergie in Baden-Württemberg*
und ZEE Besuch Daniela Evers (MdL)

8. August 2025



Unser persönlicher Energieverbrauch

- Eine typische Europäer*in verbraucht **5 kW**

(1 kW Elektrizität + Transport + Heizung ...)

Unser persönlicher Energieverbrauch

- Eine typische Europäer*in verbraucht **5 kW**

(1 kW Elektrizität + Transport + Heizung ...)

- Das sind 120 kWh oder 12 Liter Benzin pro Tag

Unser persönlicher Energieverbrauch

- Eine typische Europäer*in verbraucht **5 kW**

(1 kW Elektrizität + Transport + Heizung ...)

- Das sind 120 kWh oder 12 Liter Benzin pro Tag

- Ein Hin- und Rückflug nach Los Angeles verbraucht

1200 Liter Kerosin pro Person (~100 Tage)

[MacKay 2009]

Unser persönlicher Energieverbrauch

- Eine typische Europäer*in verbraucht **5 kW**

(1 kW Elektrizität + Transport + Heizung ...)

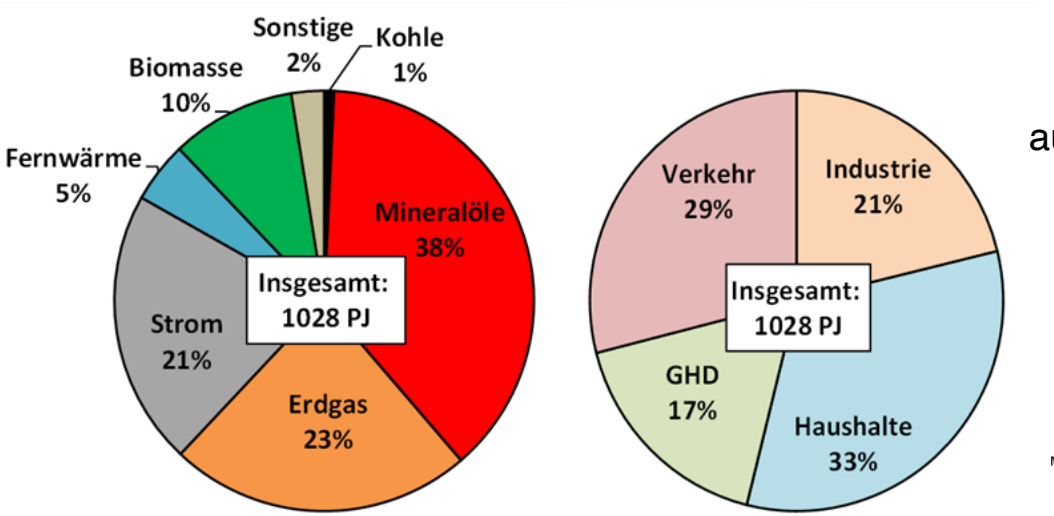
- Das sind 120 kWh oder 12 Liter Benzin pro Tag

- Ein Hin- und Rückflug nach Los Angeles verbraucht 1200 Liter Kerosin pro Person (~100 Tage)

[MacKay 2009]

5 kW: drei starke Haarföhne, von der Geburt bis zum Tod angeschaltet.

Wieviel Energie verbrauchen wir in Baden-Württemberg ?



aus:

Energiekonzept für Baden-Württemberg

Baden-Württemberg
MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

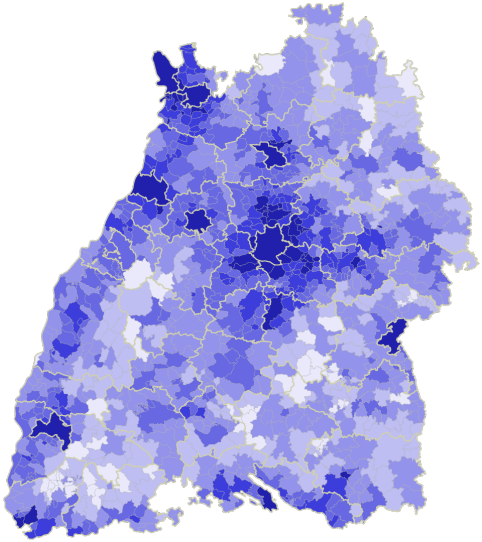


Abbildung 1: *Endenergieverbrauch in Baden-Württemberg im Jahr 2021 nach Energieträgern und Sektoren (Quelle: StaLa 2023, PJ = Petajoule)*

BW Endenergieverbrauch: 1028 PJ pro Jahr (= 1,028 10^18 J pro (8760 * 3600 Sekunden)) = **32,6 GW**

BW Einwohnerzahl: **11,25 Millionen**

BW Endenergieverbrauch pro Einwohner: (32,6 GW / 11,25 10^6 =) **2,9 kW pro Einwohner**

Unser persönlicher Energieverbrauch in Baden-Württemberg

- Eine typische Badenwürttemberger*in verbraucht **3 kW** (1 kW Elektrizität + Transport + Heizung ...)
- Das sind 72 kWh pro Tag
- In Zukunft müssen wir diesen Bedarf fast vollständig mit erneuerbarer Elektrizität decken

3 kW: zwei starke Haarföhne, von der Geburt bis zum Tod angeschaltet.

Wieviele Solarmodule braucht man, um 3 kW zu erzeugen ?

Wieviele Solarmodule braucht man, um 3 kW zu erzeugen ?

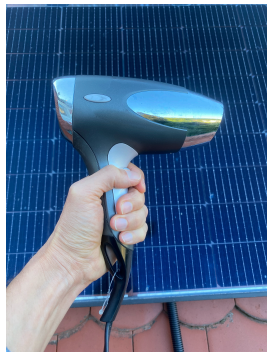
Wieviele Solarmodule braucht man, um 3 kW zu erzeugen ?

Mein Balkonsolarmodul (1,15m x 1,75m, 360 W) mit Südausrichtung hat an einem sonnigen Tag (7. August 2025) 1,8 kWh erzeugt, das war im Tagesdurchschnitt 75 W. Im Jahresdurchschnitt liefert es knapp 50 W.

Wieviele Solarmodule braucht man, um 3 kW zu erzeugen ?

Mein Balkonsolarmodul (1,15m x 1,75m, 360 W) mit Südausrichtung hat an einem sonnigen Tag (7. August 2025) 1,8 kWh erzeugt, das war im Tagesdurchschnitt 75 W. Im Jahresdurchschnitt liefert es knapp 50 W.

Wieviele Solarmodule braucht man, um 3 kW zu erzeugen ?

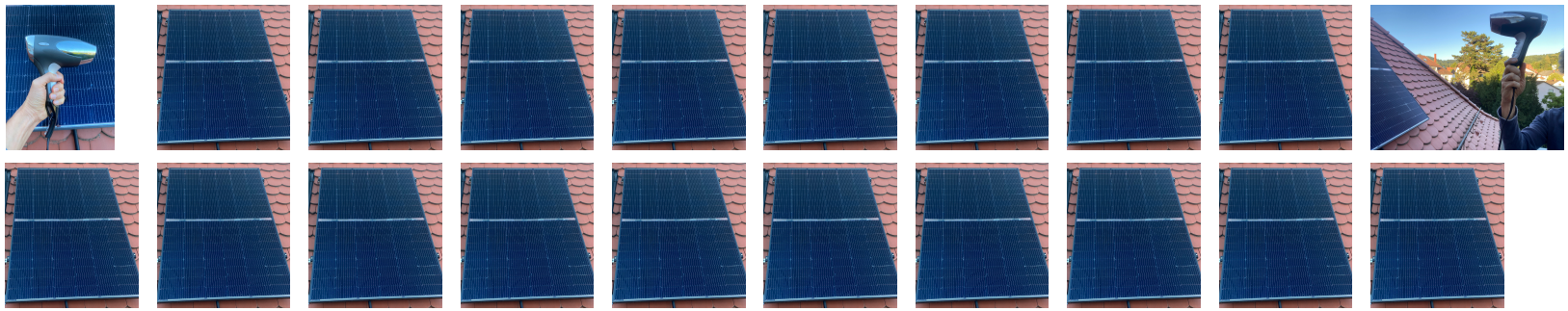


Mein Balkonsolarmodul (1,15m x 1,75m, 360 W) mit Südausrichtung hat an einem sonnigen Tag (7. August 2025) 1,8 kWh erzeugt, das war im Tagesdurchschnitt 75 W. Im Jahresdurchschnitt liefert es knapp 50 W.

Wieviele Solarmodule braucht man, um 3 kW zu erzeugen ?

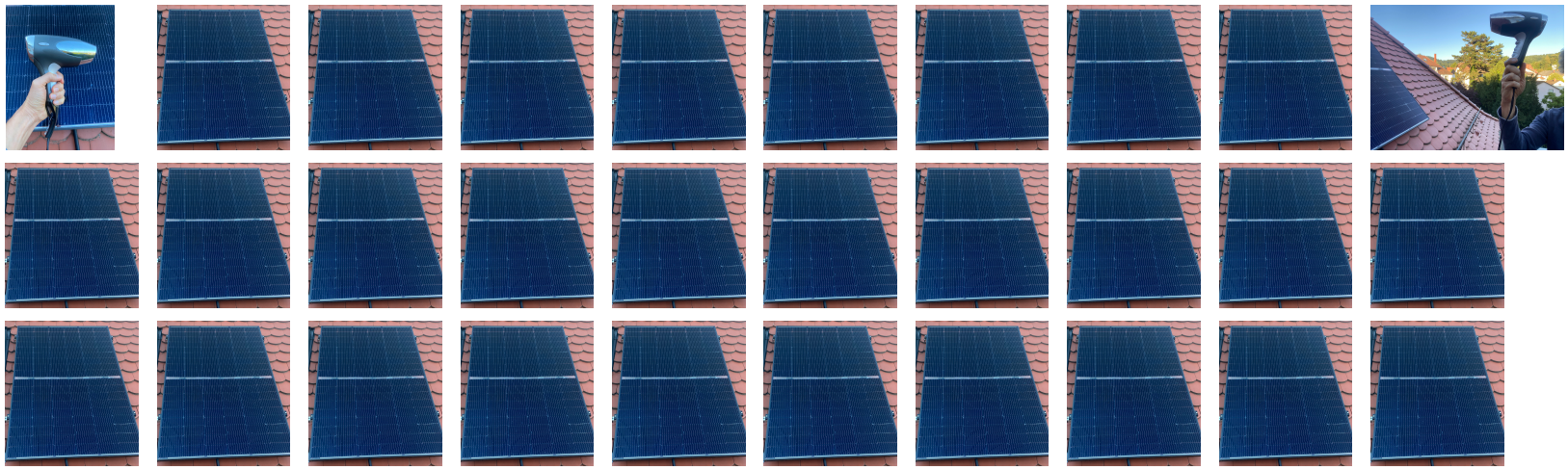
Mein Balkonsolarmodul (1,15m x 1,75m, 360 W) mit Südausrichtung hat an einem sonnigen Tag (7. August 2025) 1,8 kWh erzeugt, das war im Tagesdurchschnitt 75 W. Im Jahresdurchschnitt liefert es knapp 50 W.

Wieviele Solarmodule braucht man, um 3 kW zu erzeugen ?



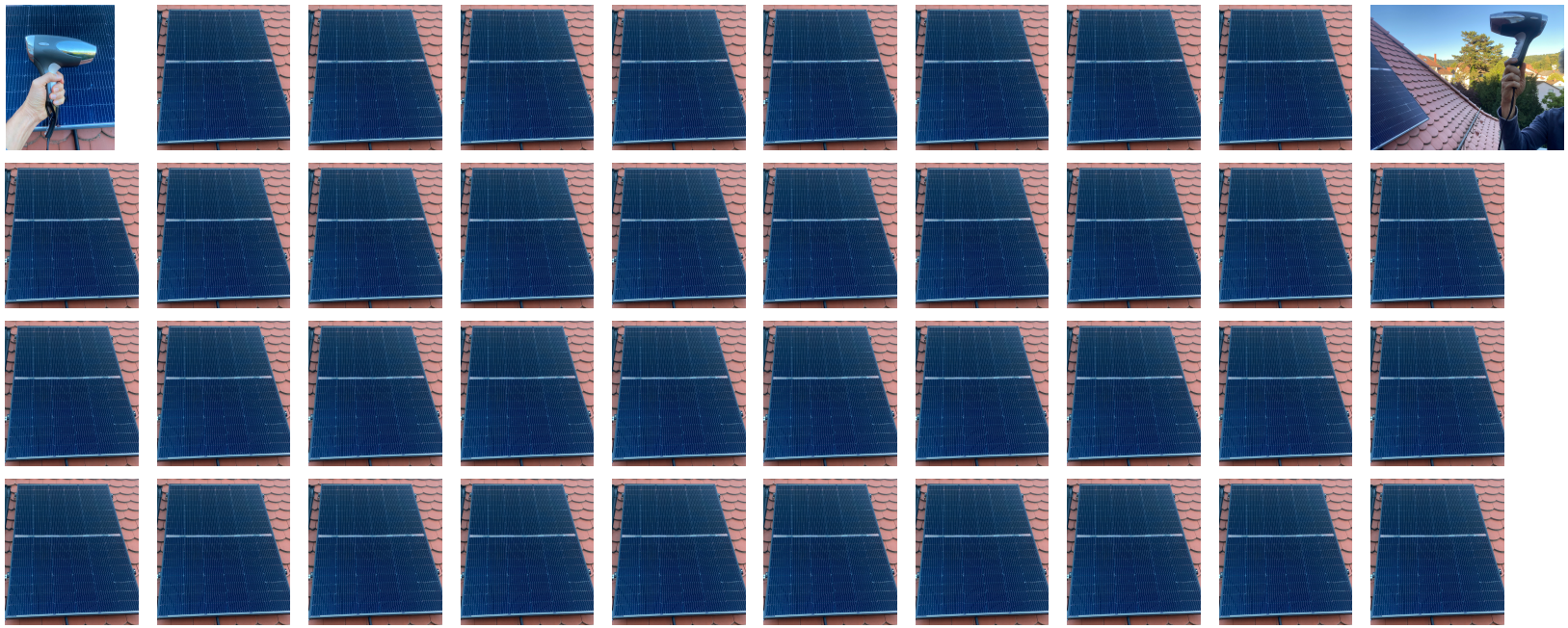
Mein Balkonsolarmodul (1,15m x 1,75m, 360 W) mit Südausrichtung hat an einem sonnigen Tag (7. August 2025) 1,8 kWh erzeugt, das war im Tagesdurchschnitt 75 W. Im Jahresdurchschnitt liefert es knapp 50 W.

Wieviele Solarmodule braucht man, um 3 kW zu erzeugen ?



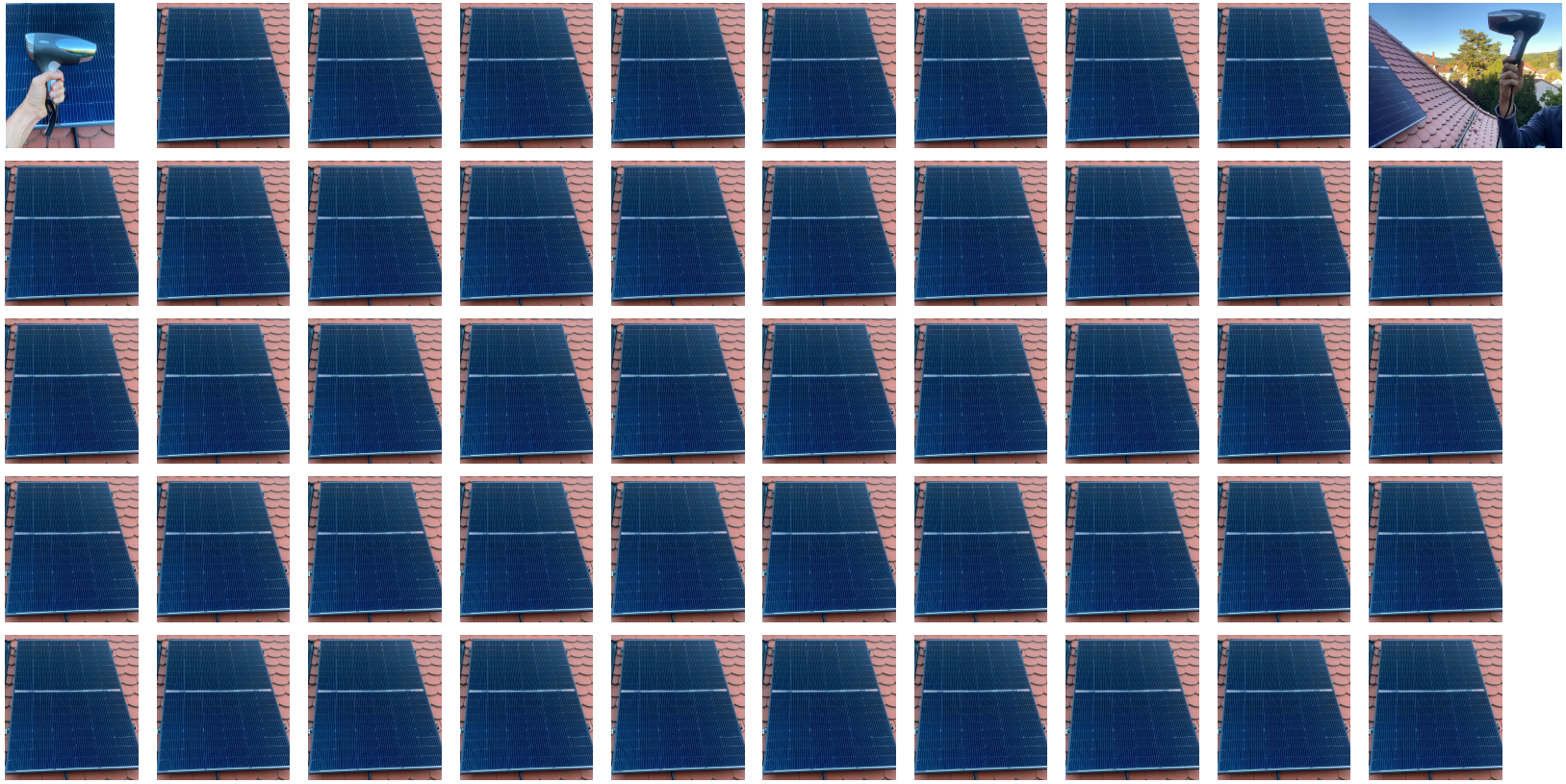
Mein Balkonsolarmodul (1,15m x 1,75m, 360 W) mit Südausrichtung hat an einem sonnigen Tag (7. August 2025) 1,8 kWh erzeugt, das war im Tagesdurchschnitt 75 W. Im Jahresdurchschnitt liefert es knapp 50 W.

Wieviele Solarmodule braucht man, um 3 kW zu erzeugen ?



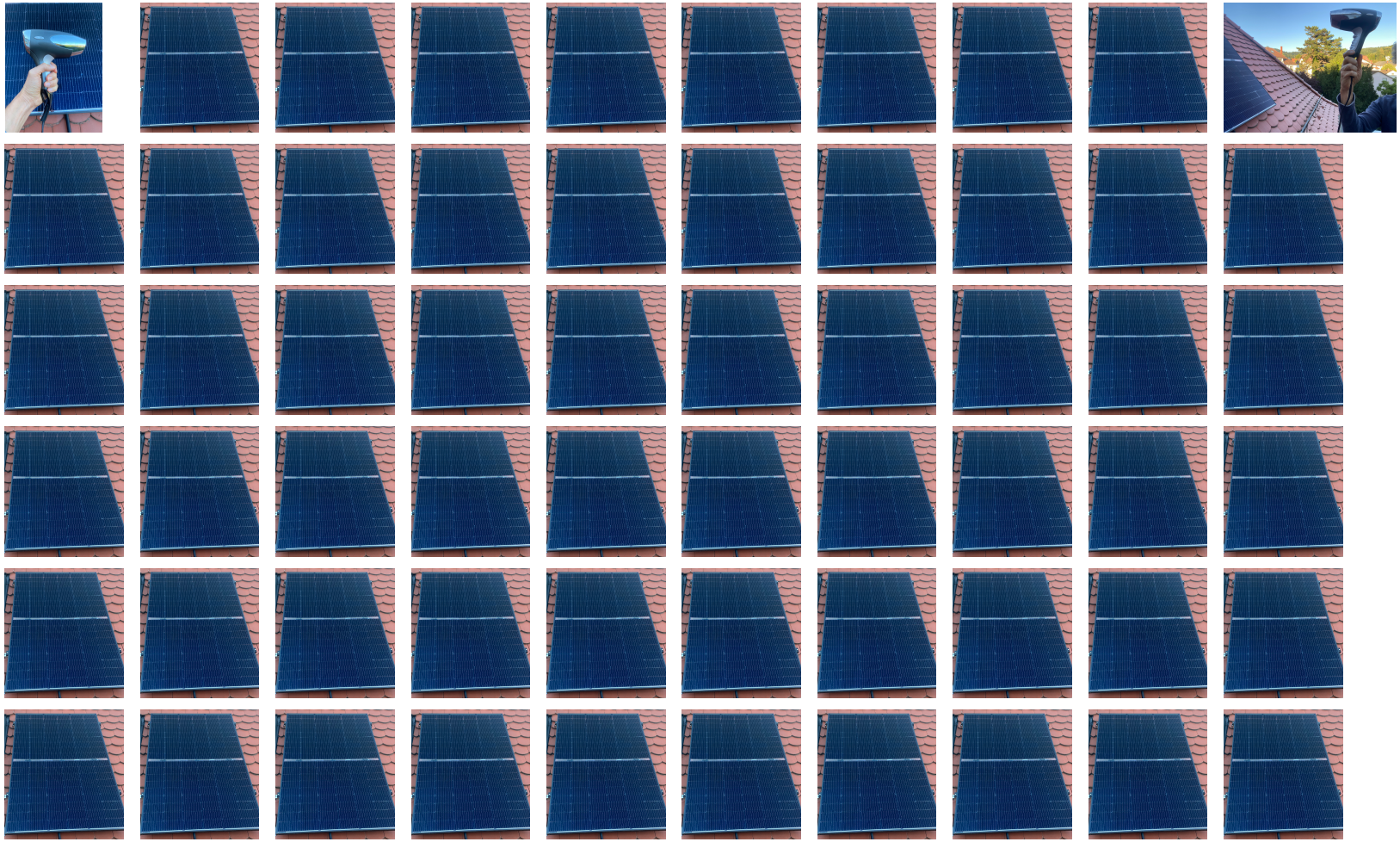
Mein Balkonsolarmodul (1,15m x 1,75m, 360 W) mit Südausrichtung hat an einem sonnigen Tag (7. August 2025) 1,8 kWh erzeugt, das war im Tagesdurchschnitt 75 W. Im Jahresdurchschnitt liefert es knapp 50 W.

Wieviele Solarmodule braucht man, um 3 kW zu erzeugen ?



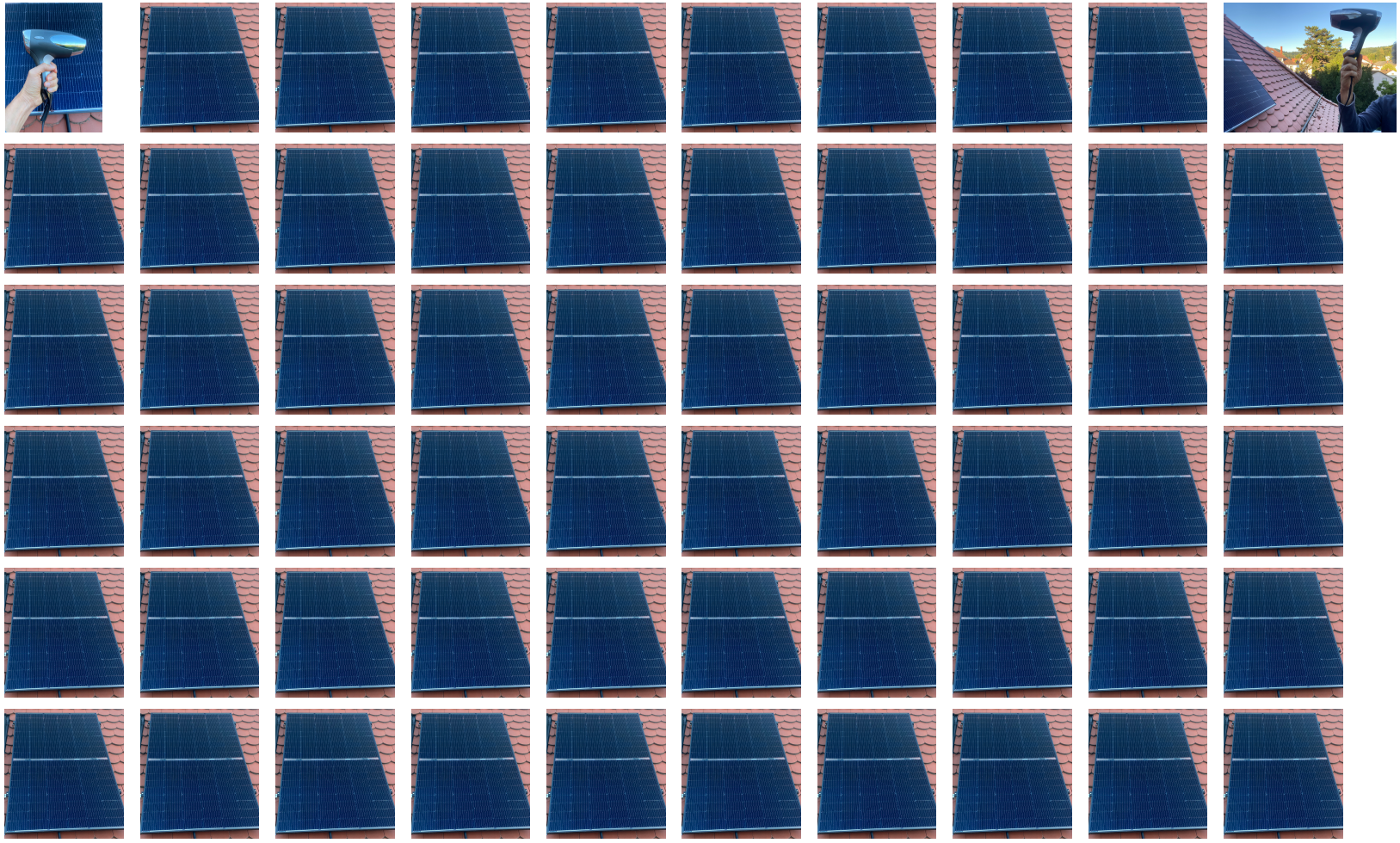
Mein Balkonsolarmodul (1,15m x 1,75m, 360 W) mit Südausrichtung hat an einem sonnigen Tag (7. August 2025) 1,8 kWh erzeugt, das war im Tagesdurchschnitt 75 W. Im Jahresdurchschnitt liefert es knapp 50 W.

Wieviele Solarmodule braucht man, um 3 kW zu erzeugen ?



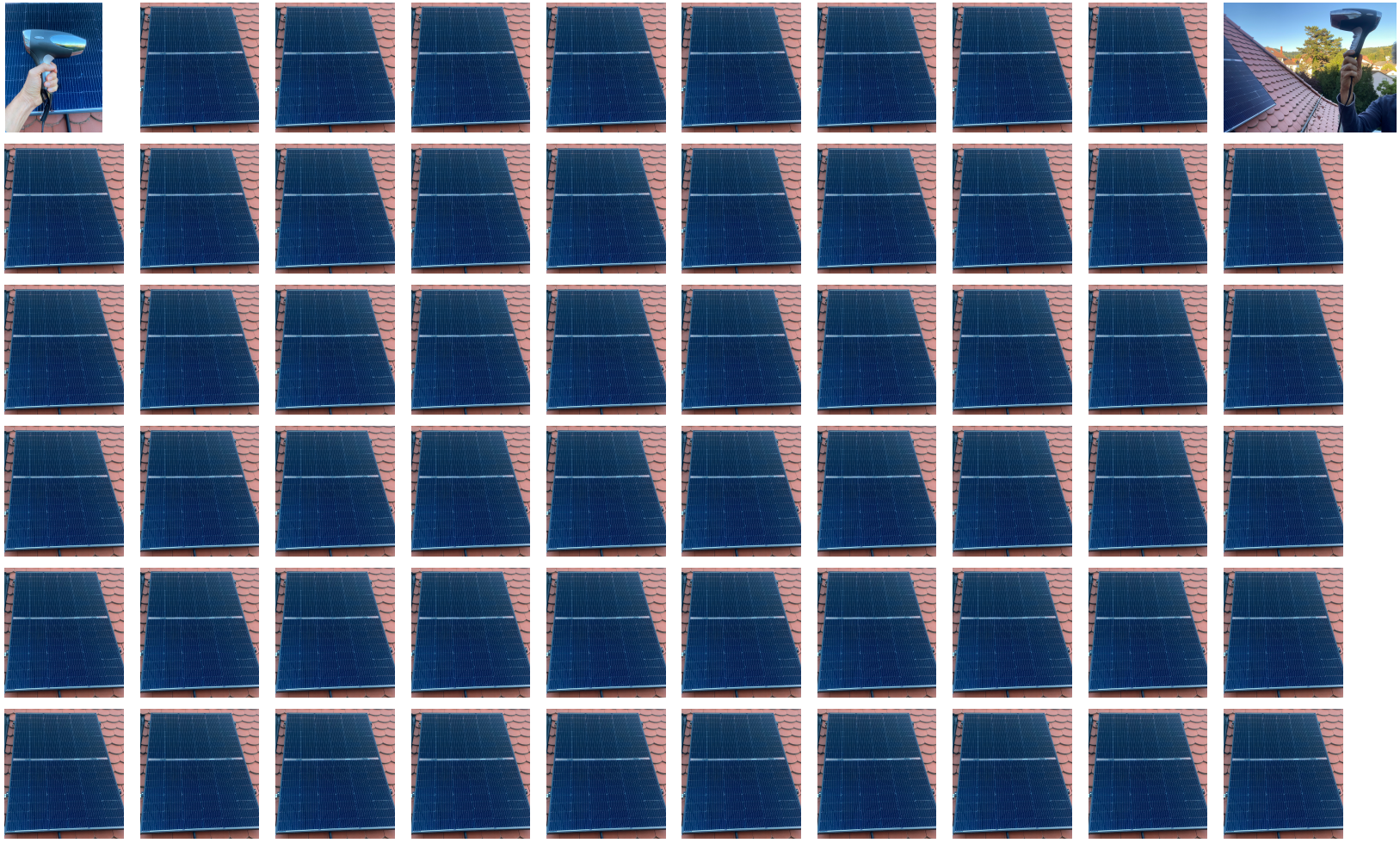
Mein Balkonsolarmodul (1,15m x 1,75m, 360 W) mit Südausrichtung hat an einem sonnigen Tag (7. August 2025) 1,8 kWh erzeugt, das war im Tagesdurchschnitt 75 W. Im Jahresdurchschnitt liefert es knapp 50 W. **Für meine 3 kW bräuchte ich 60 Balkonmodule.**

Wieviele Solarmodule braucht man, um 3 kW zu erzeugen ?



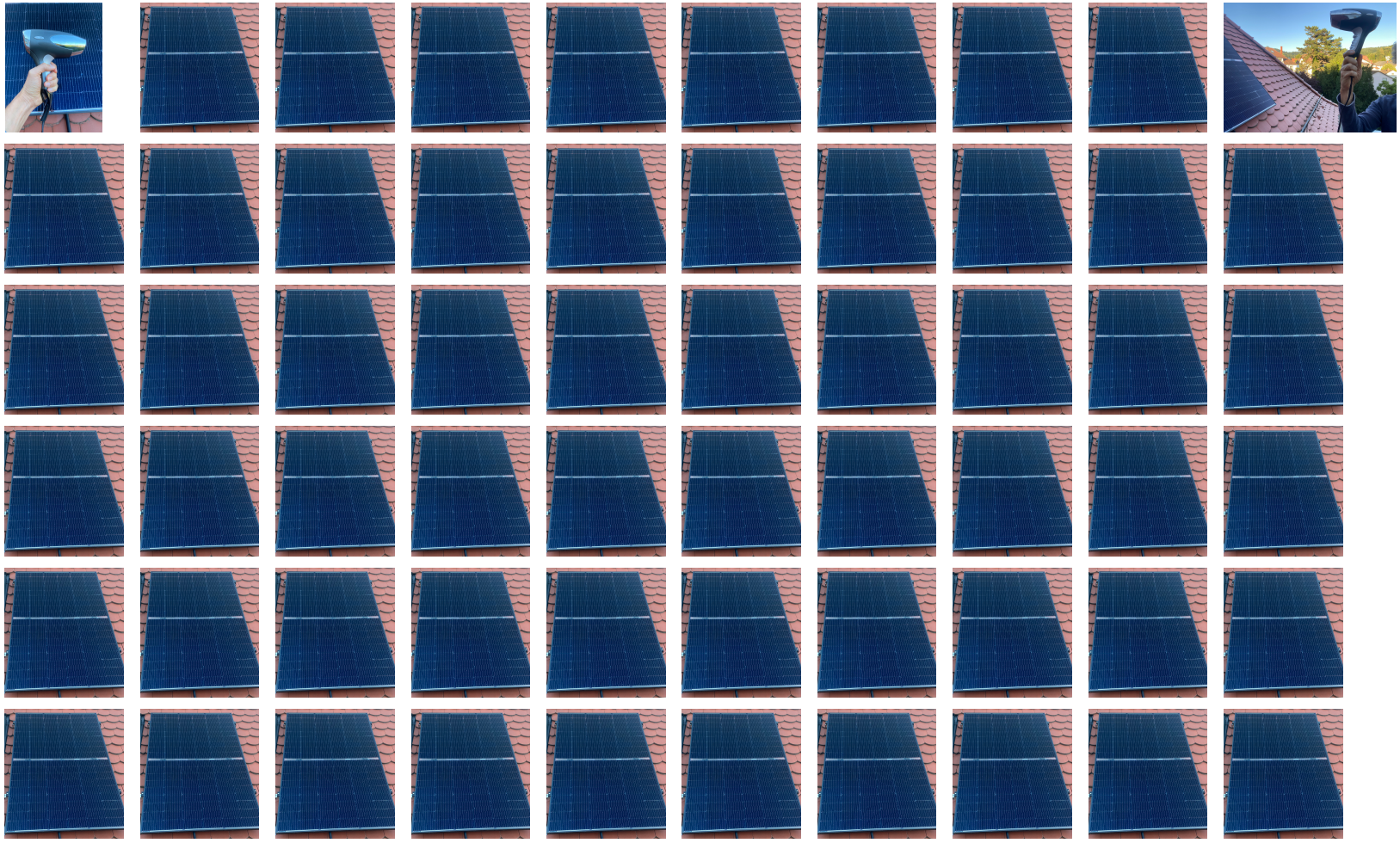
60 Balkonmodule.

Wieviele Solarmodule braucht man, um 3 kW zu erzeugen ?



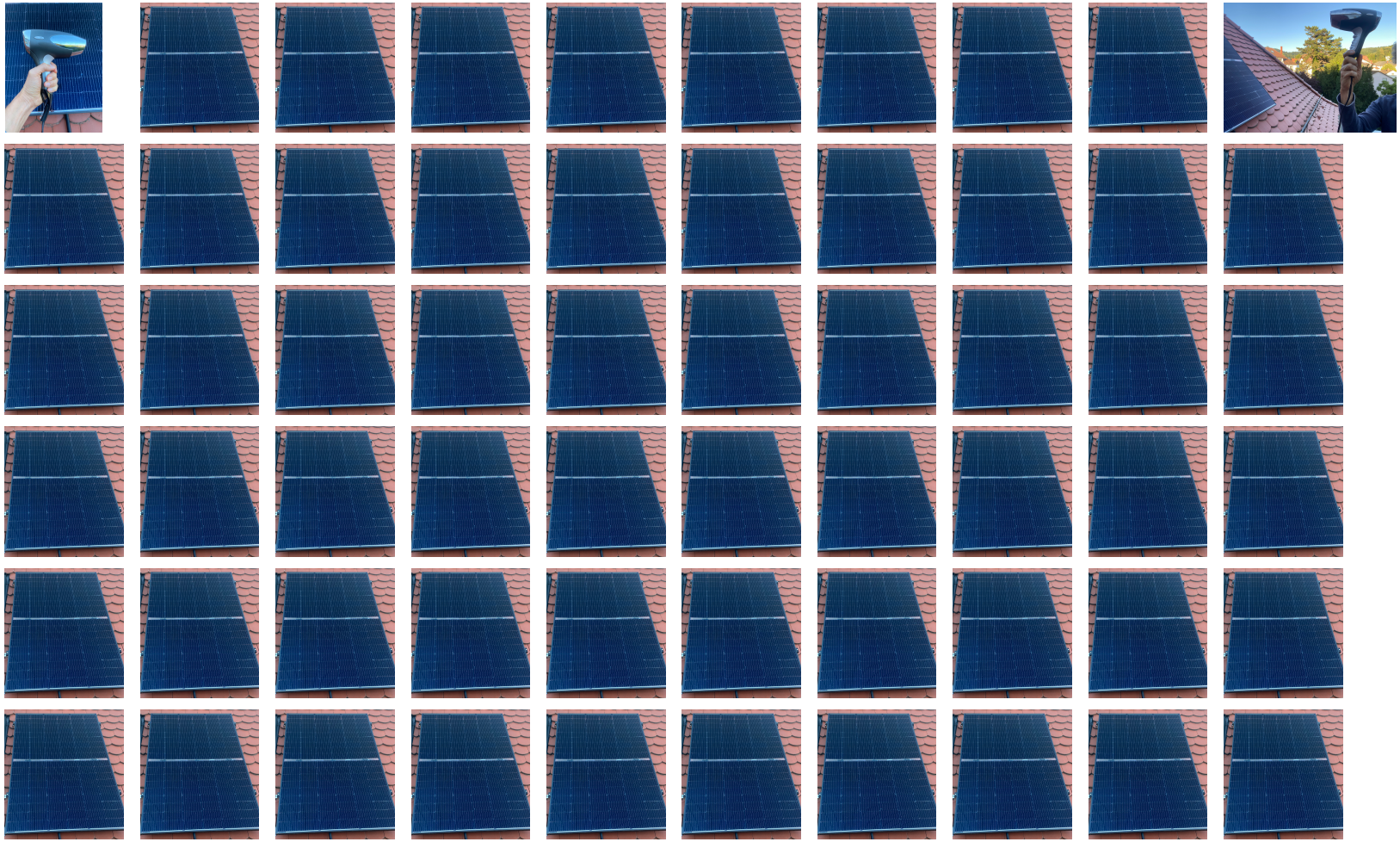
60 Balkonmodule. Für jede Baden-Württemberger*in.

Wieviele Solarmodule braucht man, um 3 kW zu erzeugen ?



60 Balkonmodule. Für jede Baden-Württemberger*in. Preis ca. EUR 18 000.

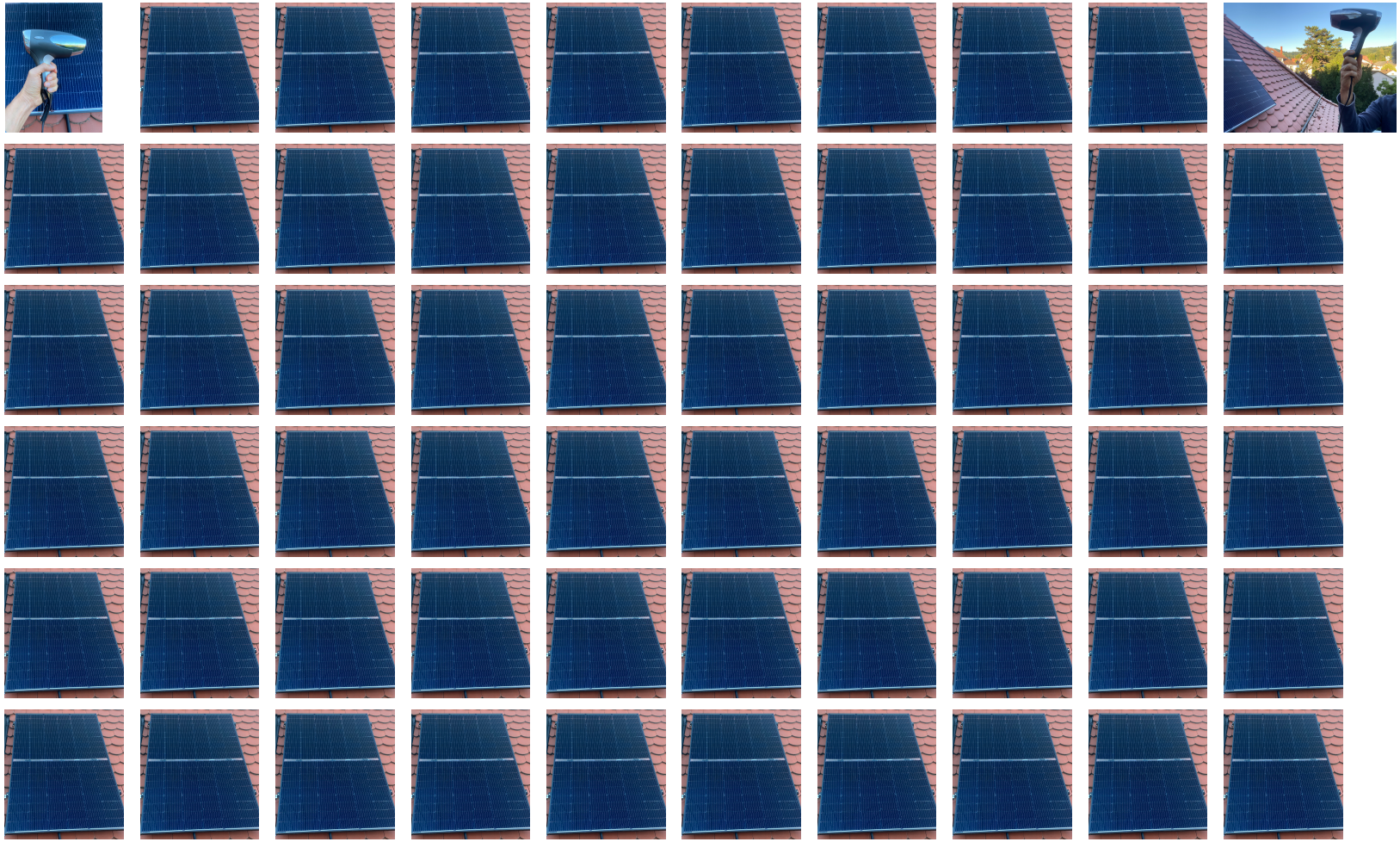
Wieviele Solarmodule braucht man, um 3 kW zu erzeugen ?



Gesamt-Modul-Gewicht: 1200 kg

60 Balkonmodule. Für jede Baden-Württemberger*in. Preis ca. EUR 18 000.

Wieviele Solarmodule braucht man, um 3 kW zu erzeugen ?



Gesamt-Modul-Gewicht: 1200 kg

60 Balkonmodule. Für jede Baden-Württemberger*in. Preis ca. EUR 18 000.
Immobilienpreis für 3,6m² Wohnfläche. Dann wären wir (fast) klimaneutral.

Wieviel Erdöl braucht man, um 3 kW über 20 Jahre zu decken ?

Wieviel Erdöl braucht man, um 3 kW über 20 Jahre zu decken ?

1 Liter Öl enthält 10 kWh chemisch gespeicherte Energie.

Jede Baden-Württemberger*in braucht über 20 Jahre 20*8760h*3 kW = 525600 kWh.

Wieviel Erdöl braucht man, um 3 kW über 20 Jahre zu decken ?

1 Liter Öl enthält 10 kWh chemisch gespeicherte Energie.

Jede Baden-Württemberger*in braucht über 20 Jahre 20*8760h*3 kW = 525600 kWh.

Wieviel Erdöl braucht man, um 3 kW über 20 Jahre zu decken ?

1 Liter Öl enthält 10 kWh chemisch gespeicherte Energie.

Jede Baden-Württemberger*in braucht über 20 Jahre 20*8760h*3 kW = 525600 kWh.

Wieviel Erdöl braucht man, um 3 kW über 20 Jahre zu decken ?

1 Liter Öl enthält 10 kWh chemisch gespeicherte Energie.

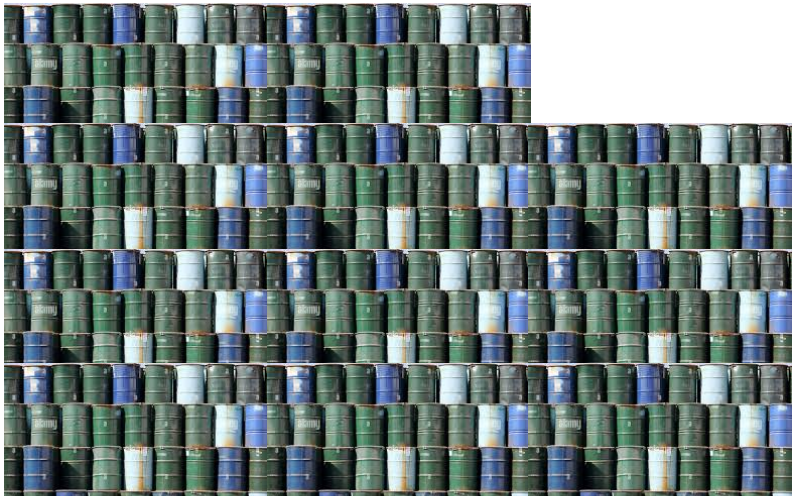
Jede Baden-Württemberger*in braucht über 20 Jahre 20*8760h*3 kW = 525600 kWh.

Wieviel Erdöl braucht man, um 3 kW über 20 Jahre zu decken ?

1 Liter Öl enthält 10 kWh chemisch gespeicherte Energie.

Jede Baden-Württemberger*in braucht über 20 Jahre 20*8760h*3 kW = 525600 kWh.

Wieviel Erdöl braucht man, um 3 kW über 20 Jahre zu decken ?

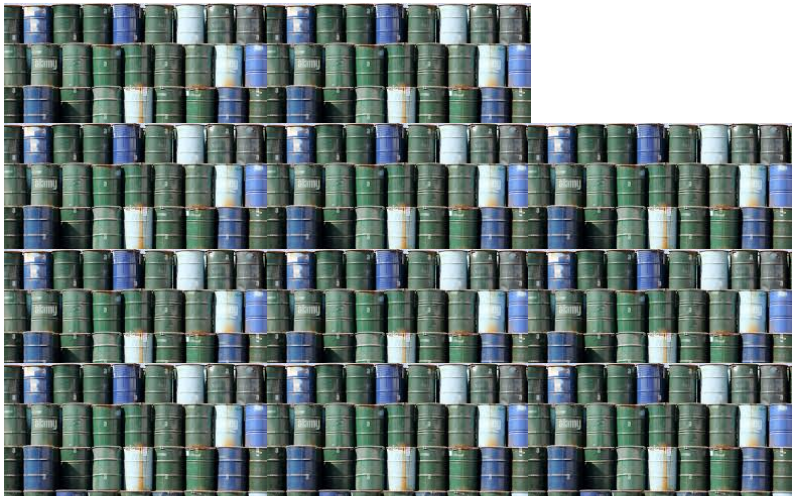


1 Liter Öl enthält 10 kWh chemisch gespeicherte Energie.

Jede Baden-Württemberger*in braucht über 20 Jahre 20*8760h*3 kW = 525600 kWh.

Das entspricht 52,560 Tausend Liter, 45 000 kg, oder **330 Barrel Öl.**

Wieviel Erdöl braucht man, um 3 kW über 20 Jahre zu decken ?



1 Liter Öl enthält 10 kWh chemisch gespeicherte Energie.

Jede Baden-Württemberger*in braucht über 20 Jahre 20*8760h*3 kW = 525600 kWh.

Das entspricht 52,560 Tausend Liter, 45 000 kg, oder **330 Barrel Öl.**

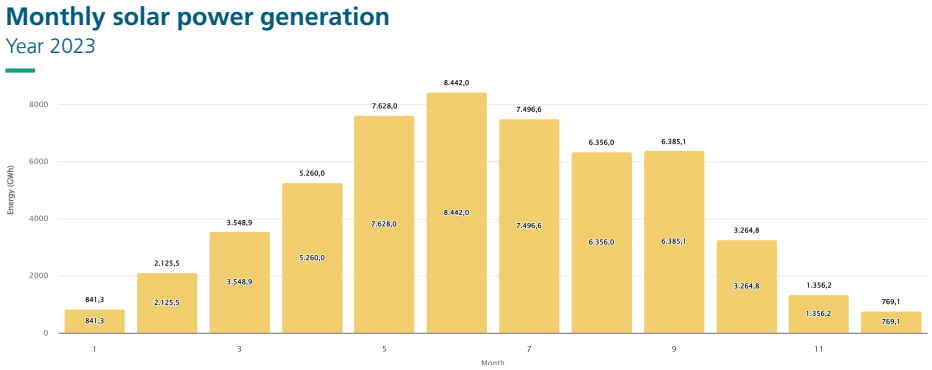
Ein Barrel Brent-Öl kostet auf dem Weltmarkt ca. **EUR 60**

Erdöl-Import Kosten pro Person (über 20 Jahre): EUR 19800.

Erdöl ist bereits jetzt teurer als Balkonsolar!

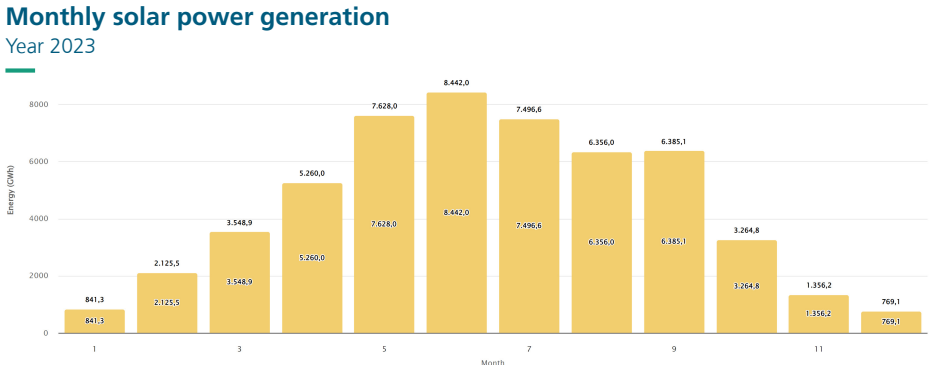
Einziger Nachteil von Solarenergie in Deutschland: Sommer-Saisonalität passt nicht zum winterlichen Heizbedarf

Solarstromerzeugung im Januar um 90% kleiner als im Juni



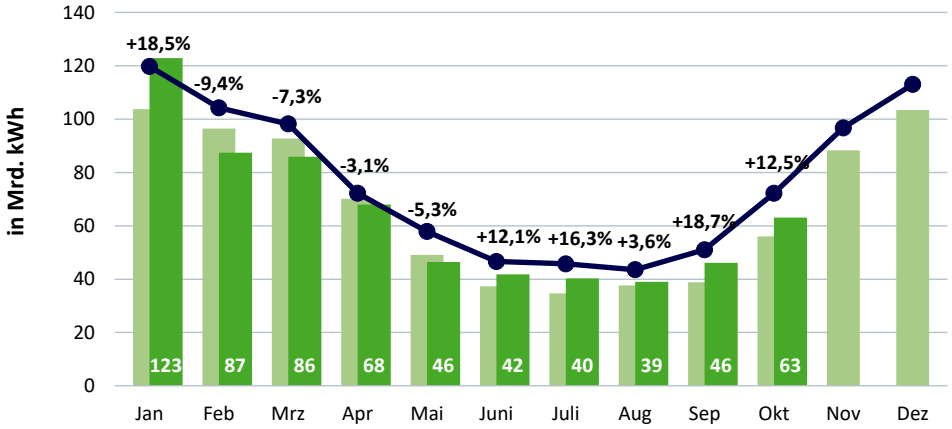
Einziger Nachteil von Solarenergie in Deutschland: Sommer-Saisonalität passt nicht zum winterlichen Heizbedarf

Solarstromerzeugung im Januar um 90% kleiner als im Juni



Monatlicher Erdgasverbrauch in Deutschland

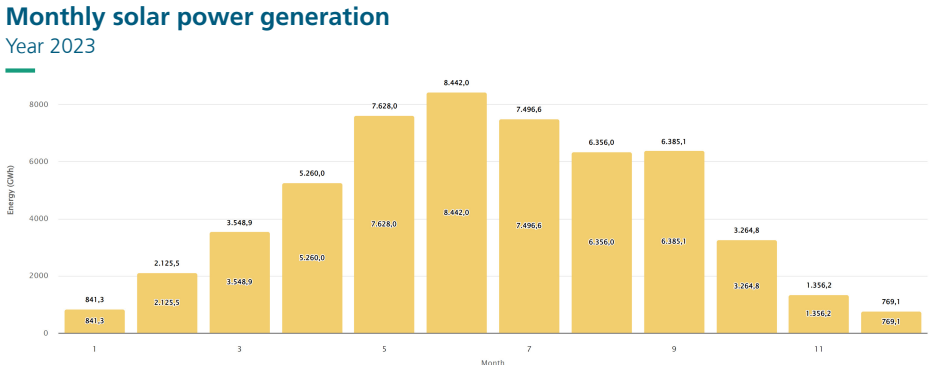
2024 bisher: 641 Mrd. kWh* (Veränderung zum Vorjahreszeitraum: +3,9 %)



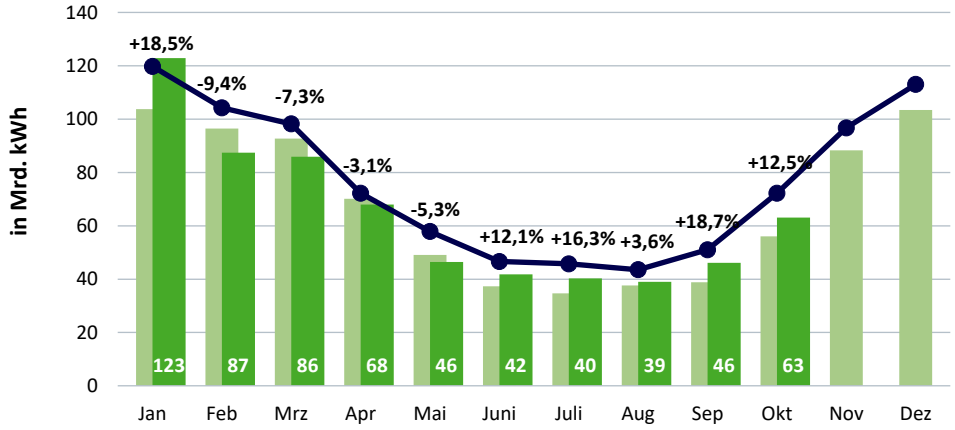
Quelle: BDEW, Stand 11/2024

Einziger Nachteil von Solarenergie in Deutschland: Sommer-Saisonalität passt nicht zum winterlichen Heizbedarf

Solarstromerzeugung im Januar um 90% kleiner als im Juni



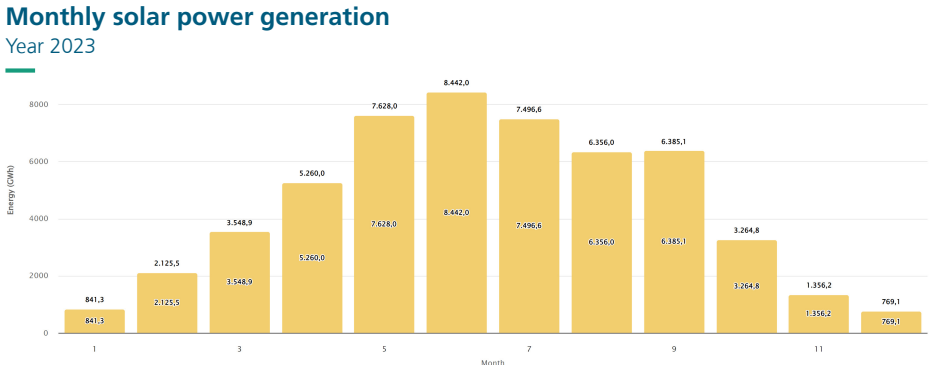
Aktuell dient fossiles Gas als “Pufferspeicher” für den Winterheizbedarf



Quelle: BDEW, Stand 11/2024

Ein glücklicher Zufall

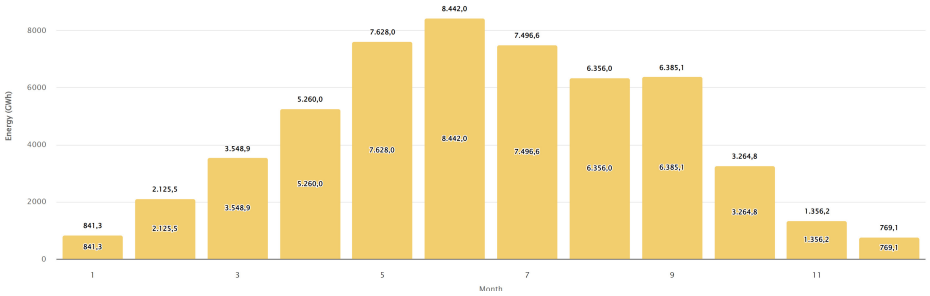
Solarstromerzeugung im Januar
um 90% kleiner als im Juni



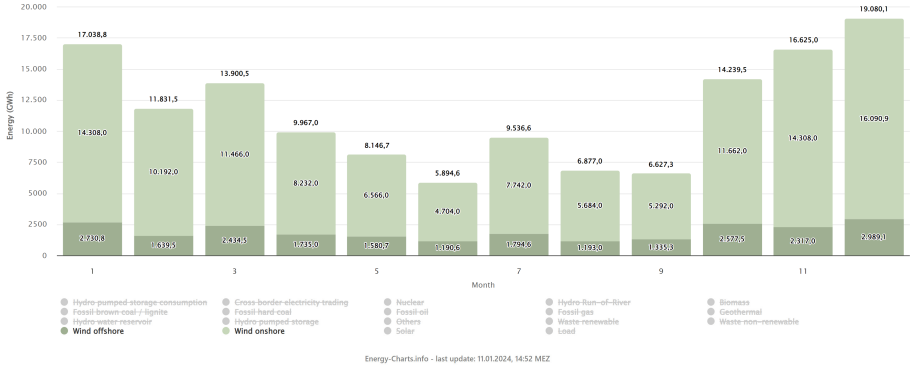
Ein glücklicher Zufall

Solarstromerzeugung im Januar
um 90% kleiner als im Juni

Monthly solar power generation
Year 2023



Monthly wind power generation onshore and offshore
Year 2023



Source: https://www.energy-charts.info/charts/energy/chart.htm?l=en&c=DE&month=-1&stacking=stacked_grouped&year=2023&partsum=1

*Data on public power generation

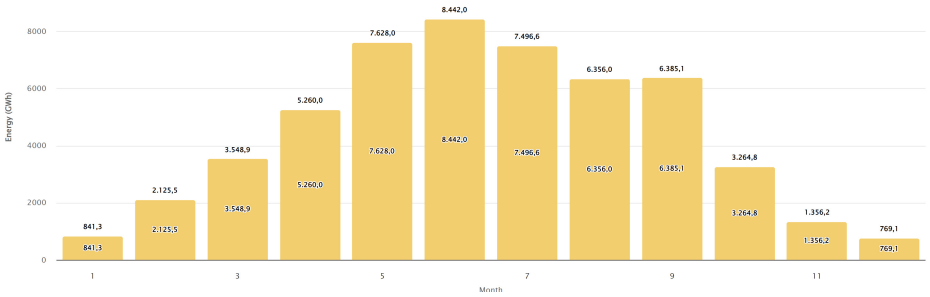
© Fraunhofer ISE
FHG-SK: ISE-INTERNAL

Fraunhofer ISE

Ein glücklicher Zufall

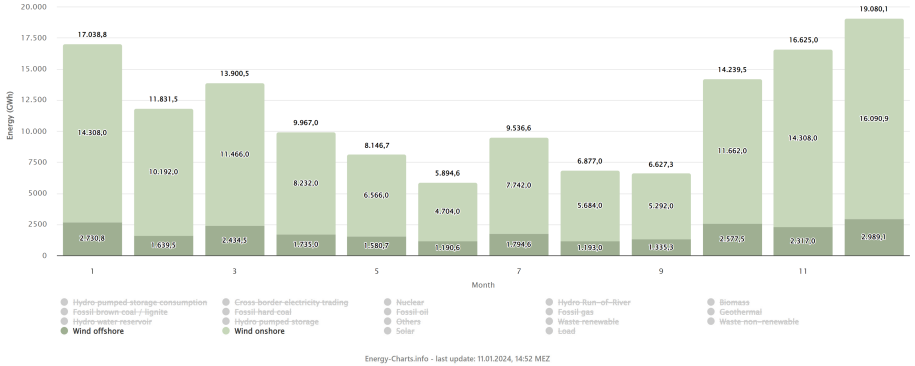
Solarstromerzeugung im Januar um 90% kleiner als im Juni

Monthly solar power generation
Year 2023



Glücklicher Zufall: Windenergie in Deutschland ist im Winter dreimal stärker als im Sommer

Monthly wind power generation onshore and offshore
Year 2023



Source: https://www.energy-charts.info/charts/energy/chart.htm?l=en&c=DE&month=-1&stacking=stacked_grouped&year=2023&partsum=1

*Data on public power generation

© Fraunhofer ISE
FHG-SK: ISE-INTERNAL

Fraunhofer ISE

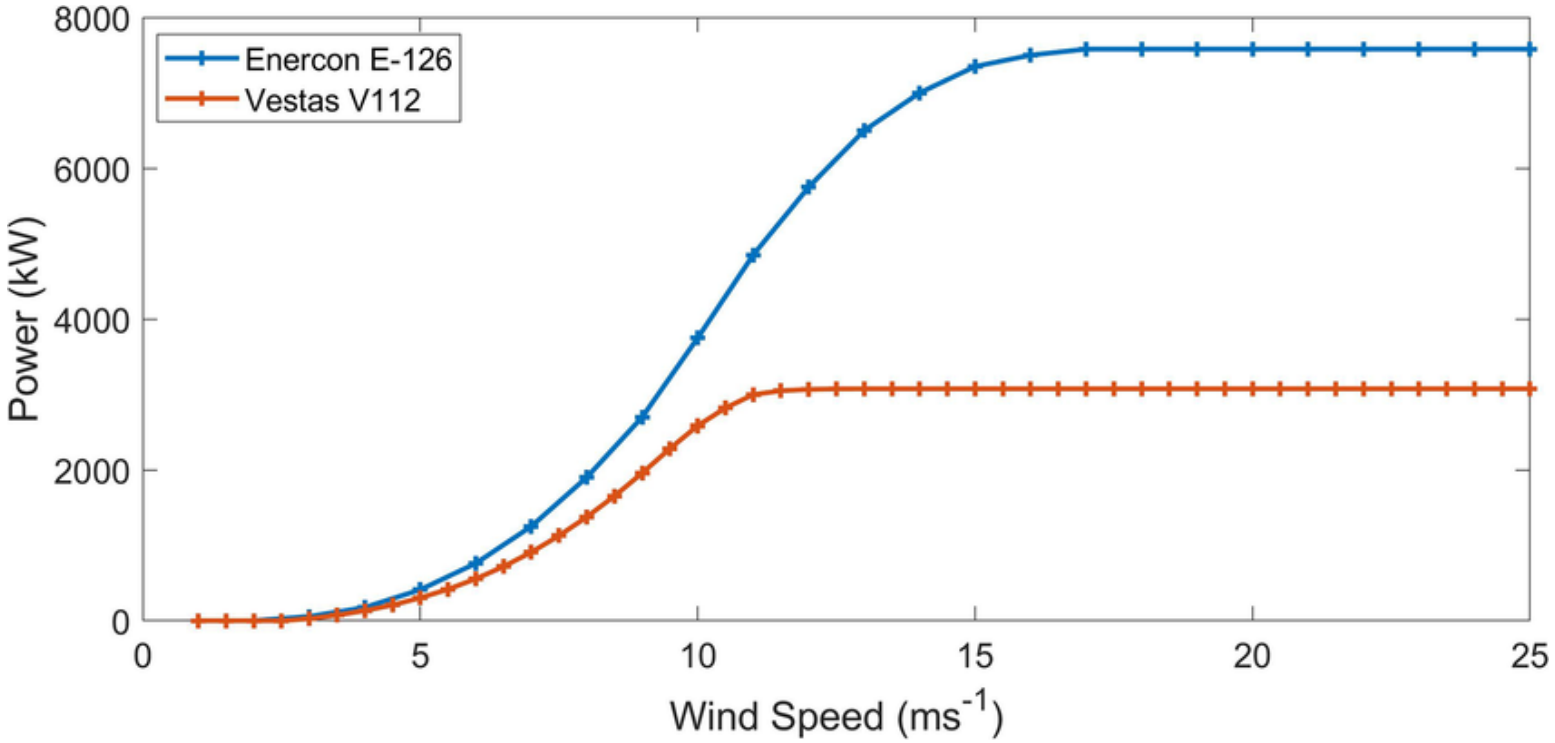
Neue E-138 Windturbine Freiburg-Holzschlägermatte

(Studierenden-Besichtigung mit Tim Schober, Ökostromgruppe, am 10.7.2025)

Nabenhöhe 160 m

ca. 1 MW Durchschnittsleistung (Nennleistung 4,2 MW)

Windturbinenleistung wächst kubisch mit der Windgeschwindigkeit (und ist fast vernachlässigbar unterhalb 7 m/s)



Durchschnittsleistung / Nominalleistung = Kapazitätsfaktor (z.B. 1 MW / 4 MW = 25% für E-138)

Neue E-138 Windturbine Freiburg-Holzschlägermatte

(Studierenden-Besichtigung mit Tim Schober, Ökostromgruppe, am 10.7.2025)

Nabenhöhe 160 m

ca. 1 MW Durchschnittsleistung (Nennleistung 4,2 MW)
ca. 8 MEUR Investitionssumme inkl. Errichtung

Neue E-138 Windturbine Freiburg-Holzschlägermatte

(Studierenden-Besichtigung mit Tim Schober, Ökostromgruppe, am 10.7.2025)

Nabenhöhe 160 m

ca. 1 MW Durchschnittsleistung (Nennleistung 4,2 MW)
ca. 8 MEUR Investitionssumme inkl. Errichtung
Gewicht ca. 4000 t:

- 60 t Rotorblätter (GFK)
- 200 t Gondel und
- 640 t Stahlturm
- 3000 t Betonfundament

Neue E-138 Windturbine Freiburg-Holzschlägermatte

(Studierenden-Besichtigung mit Tim Schober, Ökostromgruppe, am 10.7.2025)

Nabenhöhe 160 m

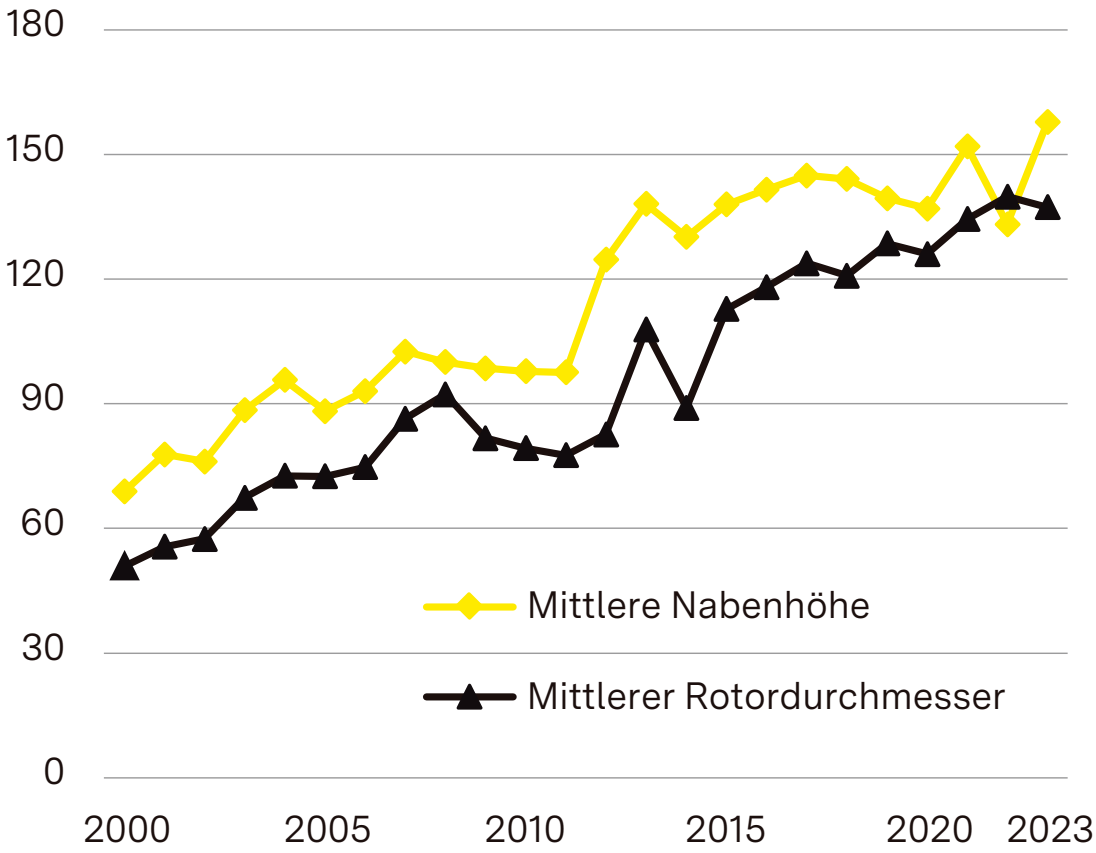
ca. 1 MW Durchschnittsleistung (Nennleistung 4,2 MW)
ca. 8 MEUR Investitionssumme inkl. Errichtung
Gewicht ca. 4000 t:

- 60 t Rotorblätter (GFK)
- 200 t Gondel und
- 640 t Stahlturm
- 3000 t Betonfundament

Windturbine versorgt 333 Personen mit je 3 kW, also

- 24000 EUR Investitionssumme pro Person
- 180 kg Rotorblätter, 12 t Gesamtgewicht pro Person

Nabenhöhe und Rotordurchmesser [m]
nach Inbetriebnahmejahren



Sonne, Erdöl, und Wind haben ähnliche Kosten (3 kW pro Person, über 20 Jahre)

Solarmodule:
- 1,2 Tonnen
- 18 000 EUR

Erdöl:
- 45 Tonnen
- 19 800 EUR

Windturbinenanteil (0.3%):
- 12 Tonnen (1,8 t Stahl, 0,18 t Rotor)
- 24 000 EUR

Sonne, Erdöl, und Wind haben ähnliche Kosten (3 kW pro Person, über 20 Jahre)

Solarmodule:
- 1,2 Tonnen
- 18 000 EUR

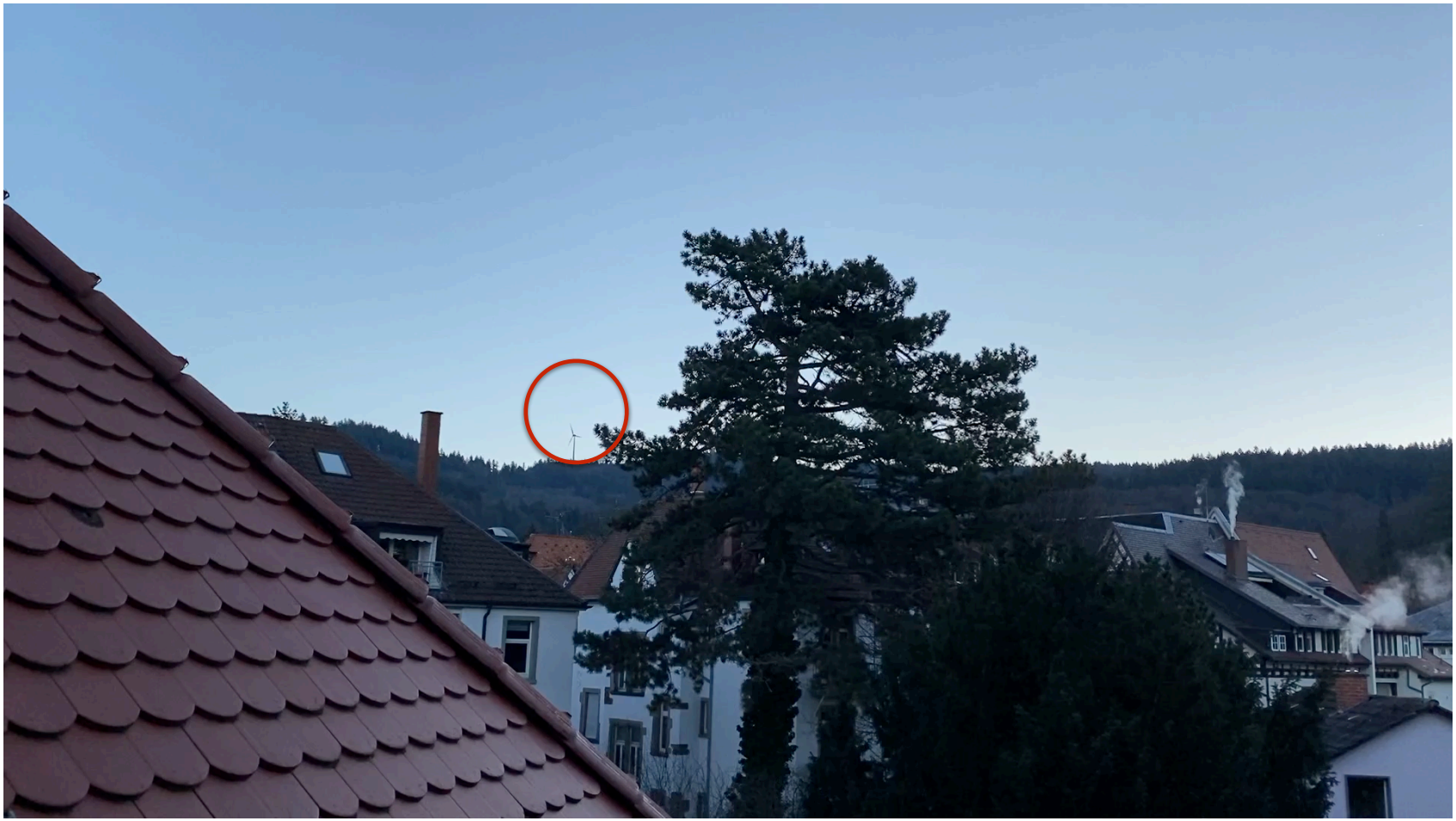
Erdöl:
- 45 Tonnen
- 19 800 EUR

Windturbinenanteil (0.3%):
- 12 Tonnen (1,8 t Stahl, 0,18 t Rotor)
- 24 000 EUR

Windturbinen sind nur wegen Turm und Fundament sehr materialintensiv. Die Rotorblätter sind mit 180 kg extrem leicht im Vergleich zu 1200 kg Solarmodulen und 45 000 kg Öl …

Könnten wir eine Windturbine ohne Turm und ohne Fundament bauen?

A sunny morning in Freiburg …



1) Even on a sunny day, there is some wind up in the hills.

2) There is still a lot of sky above the turbine.

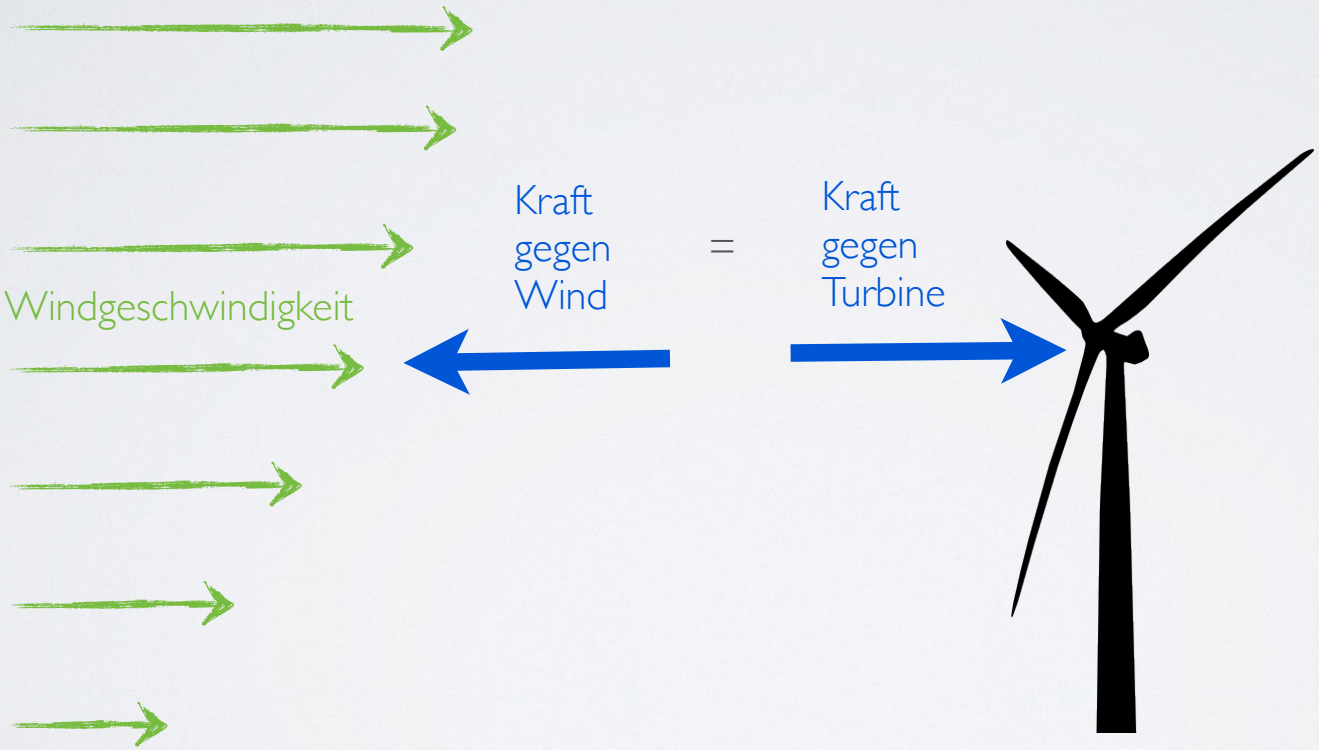
Zwei Arten von Höhenwindenergie

A) Turmbasiert (z.B Schipkau, 300 m Nabenhöhe)

B) Turmfrei = Flugwindenergie

Leistung: Kraft x Windgeschwindigkeit

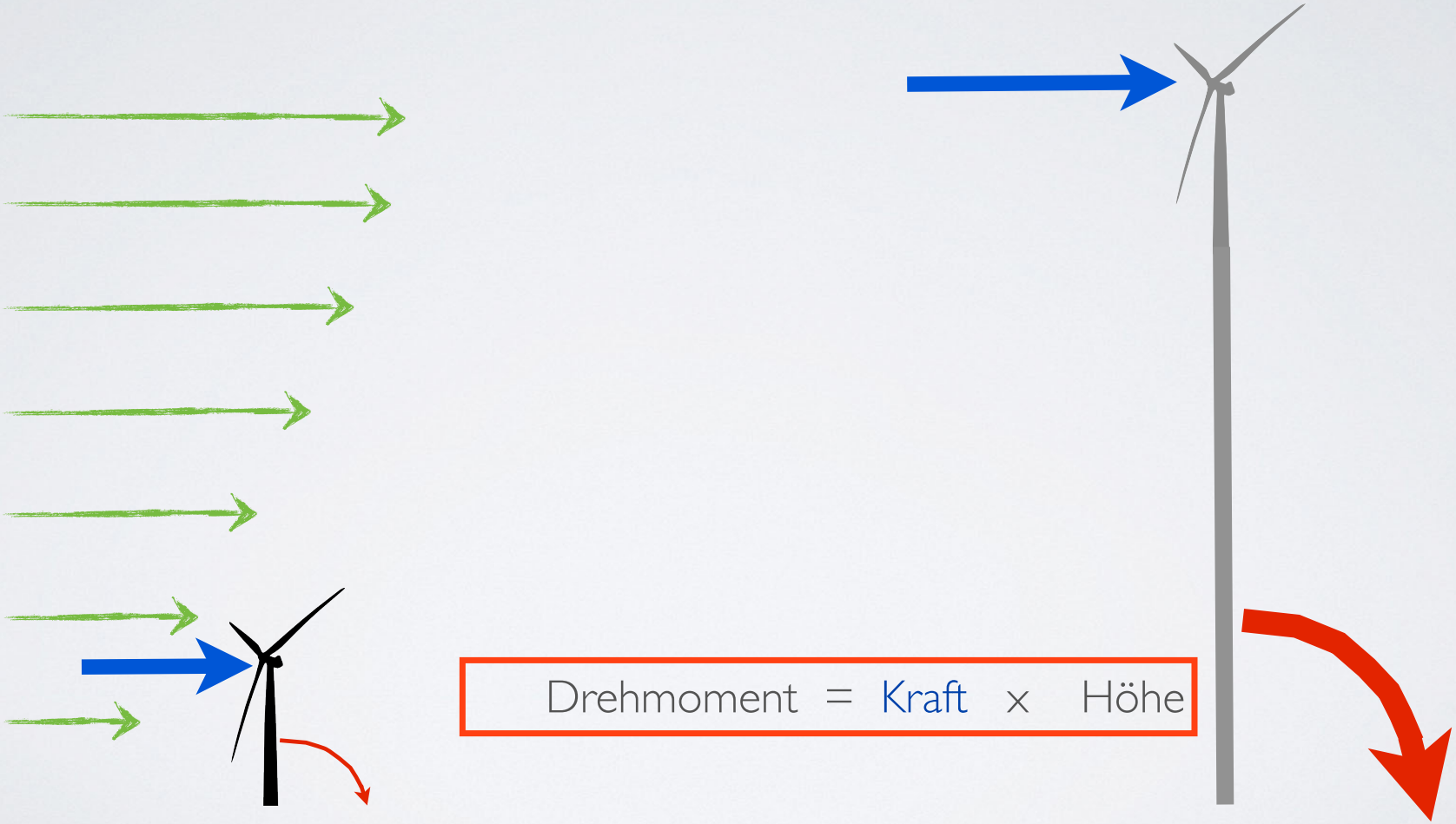
"Ohne Kraft gegen den Wind keine Windenergie"



Power extracted from the wind = Force x Windspeed

Eine 500m hohe Turbine ist schwer zu bauen

Langer Hebel führt zu großem Drehmoment

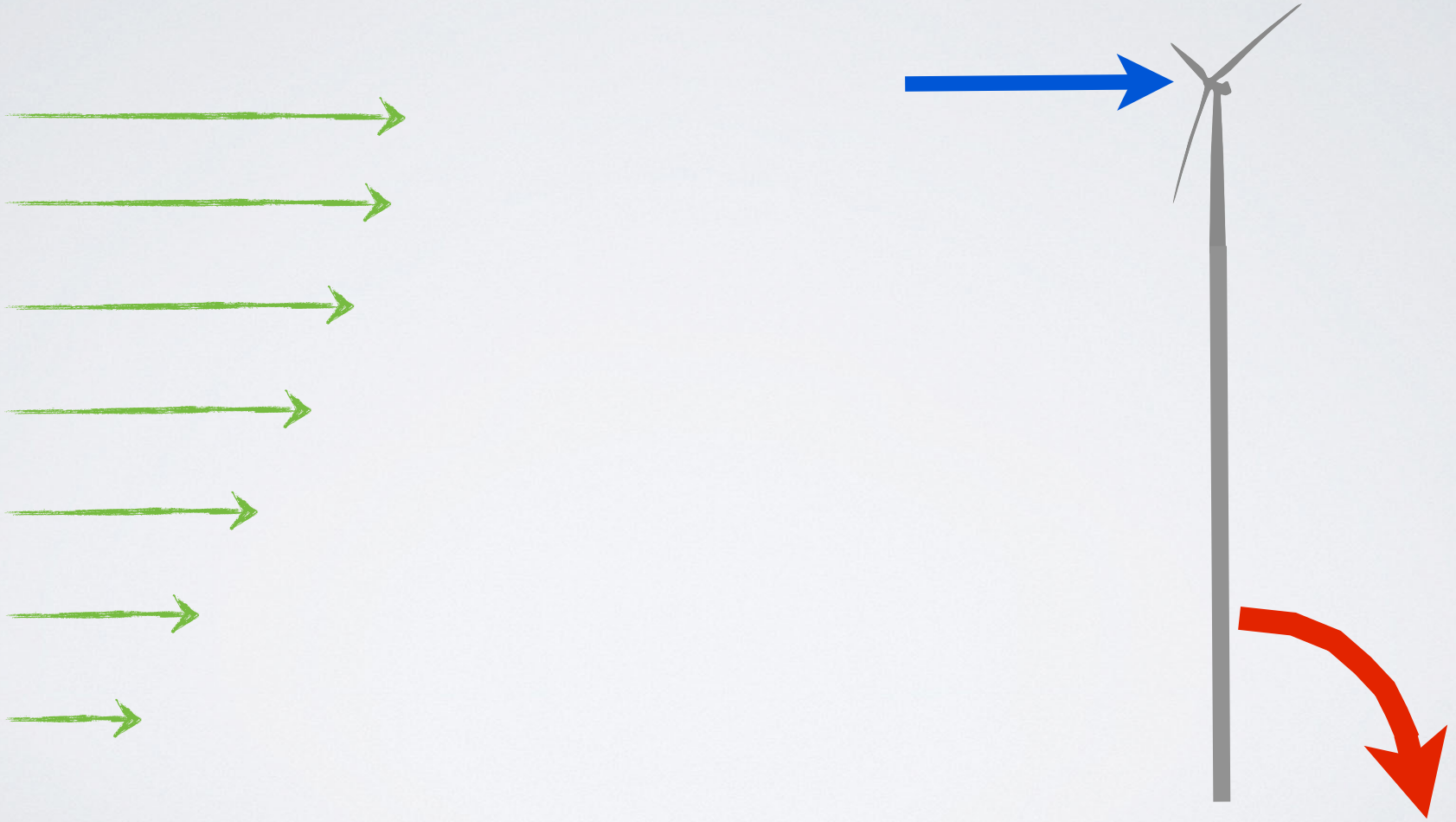


Drehmoment = Kraft x Höhe

Ohne Kraft kann keine Windenergie geerntet werden

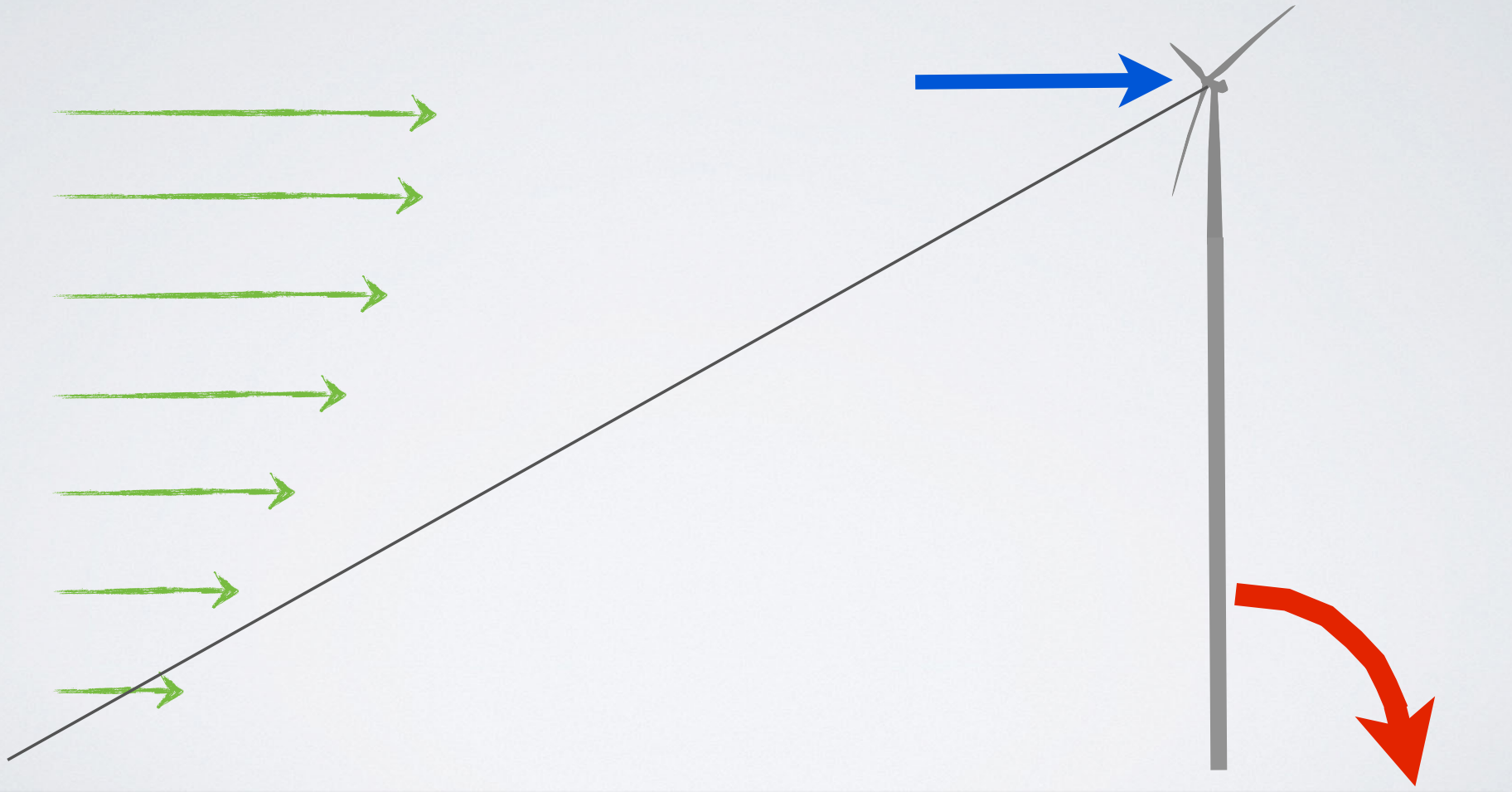
Eine 500m hohe Turbine ist schwer zu bauen

Langer Hebel führt zu großem Drehmoment



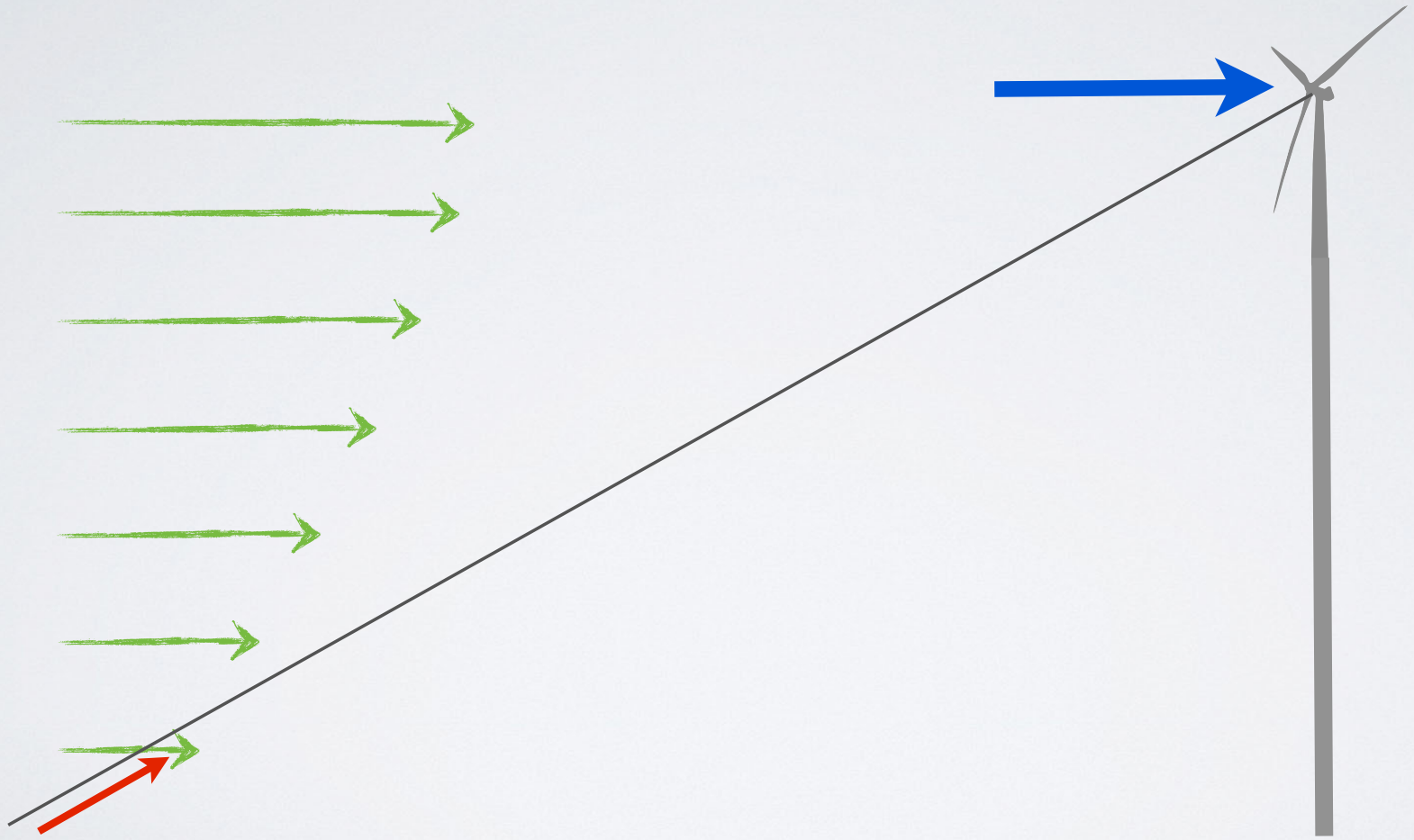
Ohne Kraft kann keine Windenergie geerntet werden

Eine 500m hohe Turbine ist schwer zu bauen



Ohne Kraft kann keine Windenergie geerntet werden

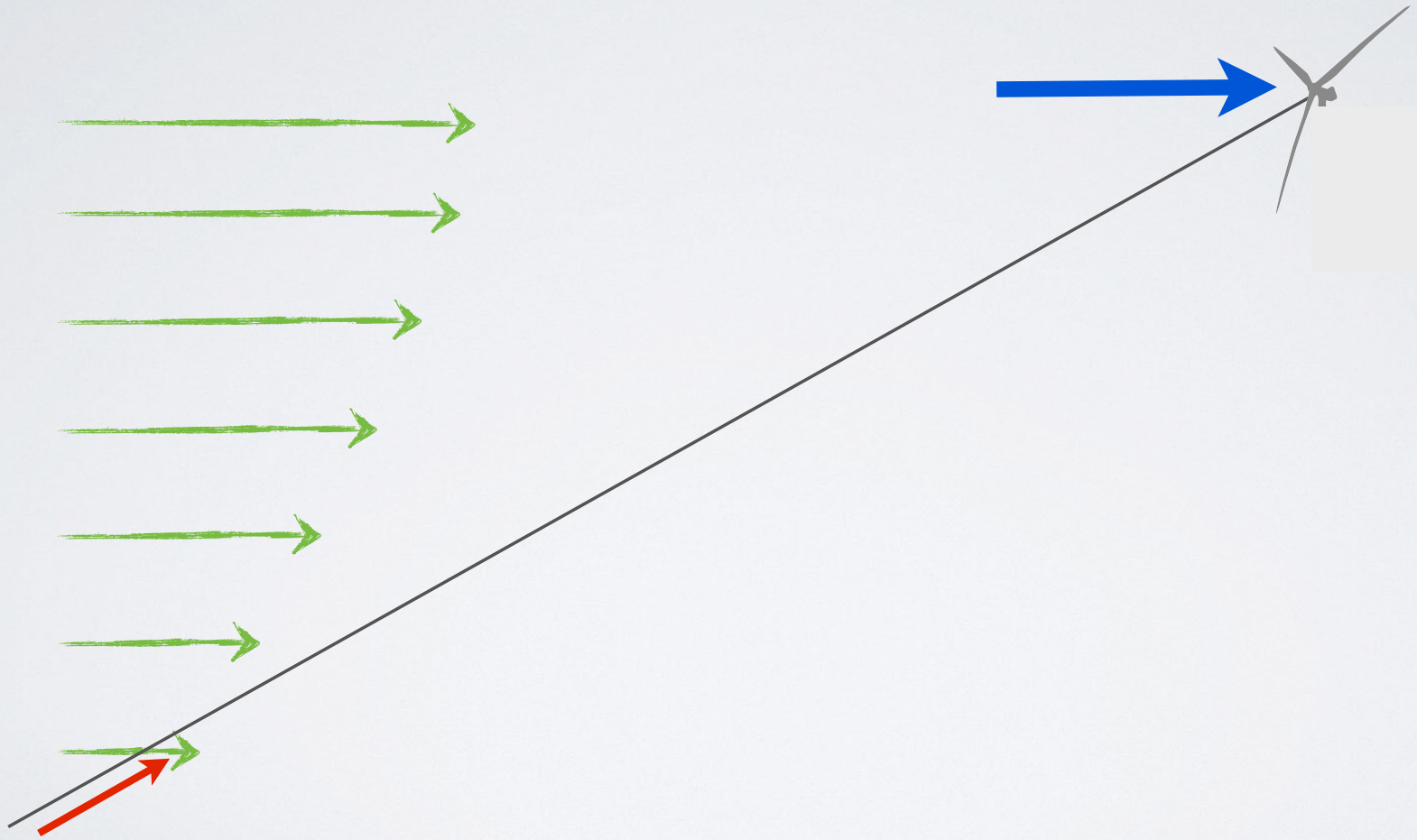
Eine 500m hohe Turbine ist schwer zu bauen



Ohne Kraft kann keine Windenergie geerntet werden

Eine 500m hohe Turbine ist schwer zu bauen

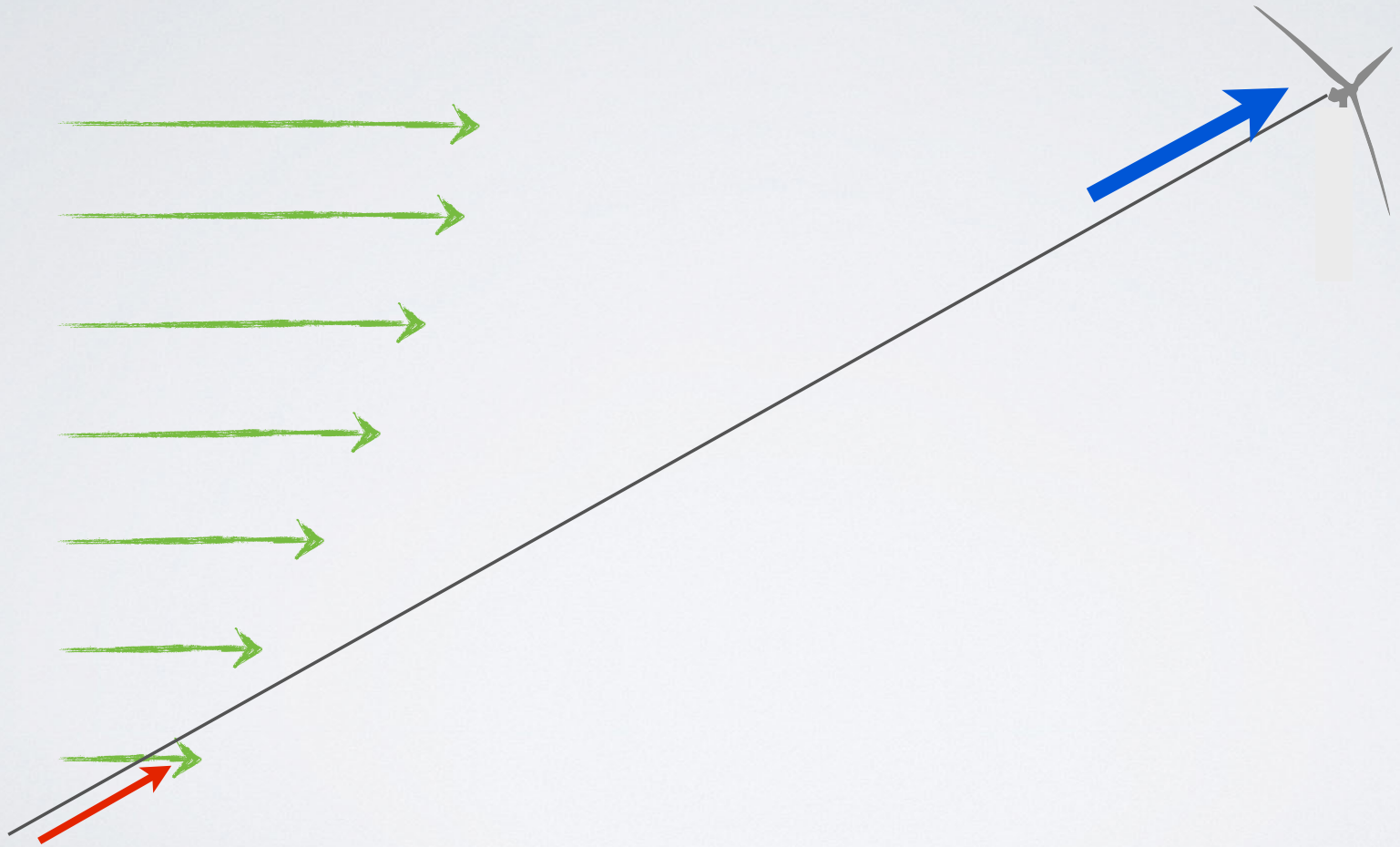
Ein Kabel kann die Kraft sehr effizient aufnehmen



Ohne Kraft kann keine Windenergie geerntet werden

Eine 500m hohe Turbine ist schwer zu bauen

Ein Kabel kann die Kraft sehr effizient aufnehmen

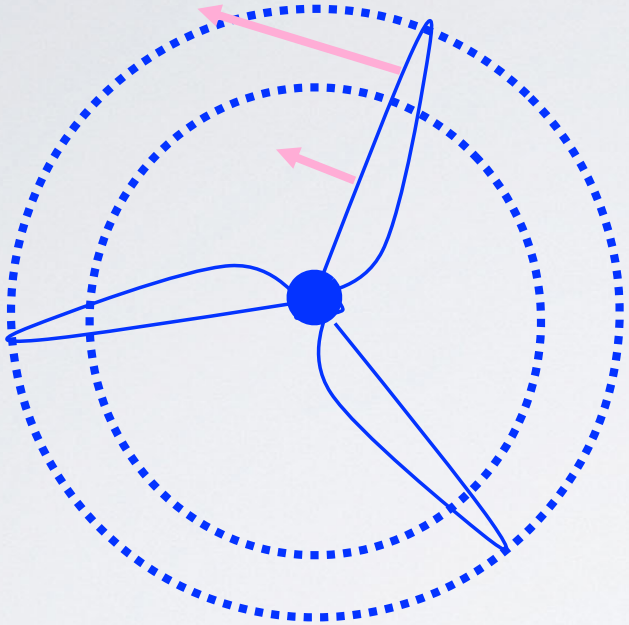


Ohne Kraft kann keine Windenergie geerntet werden

Metamorphose einer Windturbine

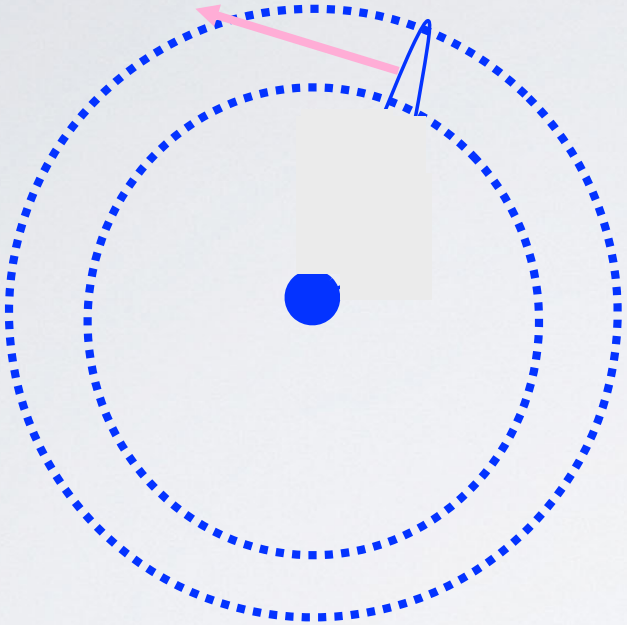
DER CROSSWIND-EFFEKT
und
zwei Varianten, damit Energie zu ernten

Normale Windturbine



Durch die hohe Geschwindigkeit sind die Flügelspitzen der effizienteste Teil des Rotors

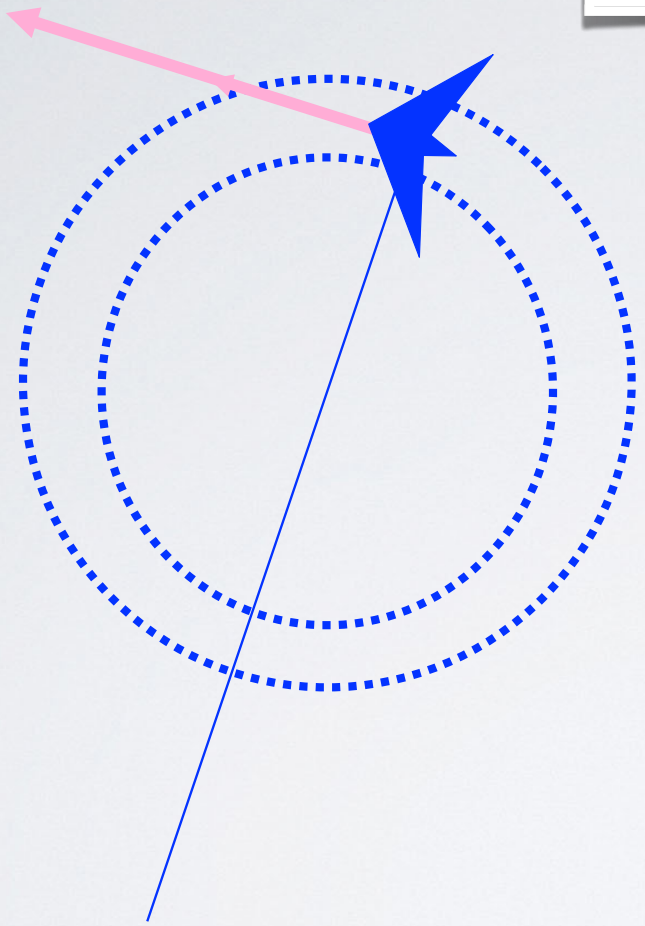
Normale Windturbine



Durch die hohe Geschwindigkeit sind die Flügelspitzen der effizienteste Teil des Rotors

Können wir eine Turbine nur aus Flügelspitzen und Generator bauen?

Der Crosswind-Effekt

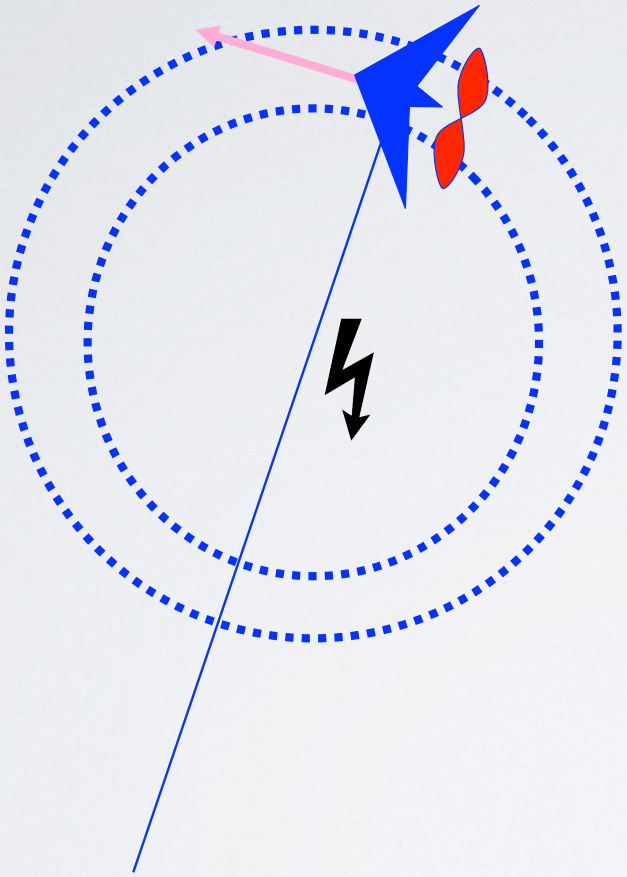


- Wind lässt Drachen schnelle Loopings fliegen
- Drachen fliegt **quer zum Wind**
- starke Zugkraft in der Leine: Kraft wächst quadratisch mit der Drachen-geschwindigkeit

Aber wohin soll der Generator ?

("Drachen" = fliegendes Objekt an einer Leine)

Variante 1: Drag Modus (Turbine an Bord)

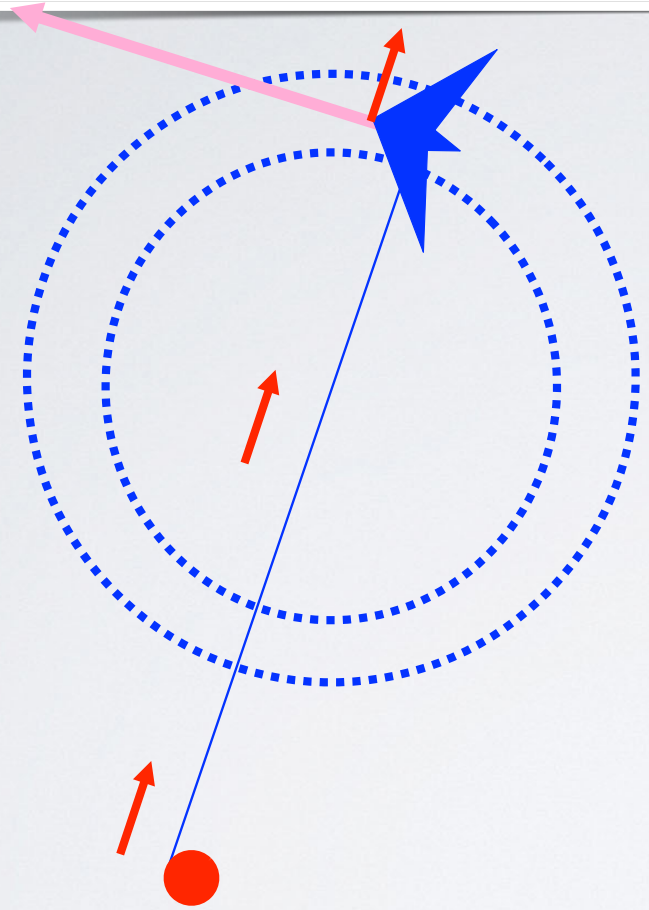


- effektiver Wind treibt kleine Windturbine an Bord des Drachens an
- Strom wird durch Kabel zum Grund geleitet

Vorteil: kleiner schnelldrehender Generator
Nachteil: Kabel muss Hochspannung leiten

A flying wind turbine (Makani Power, California)

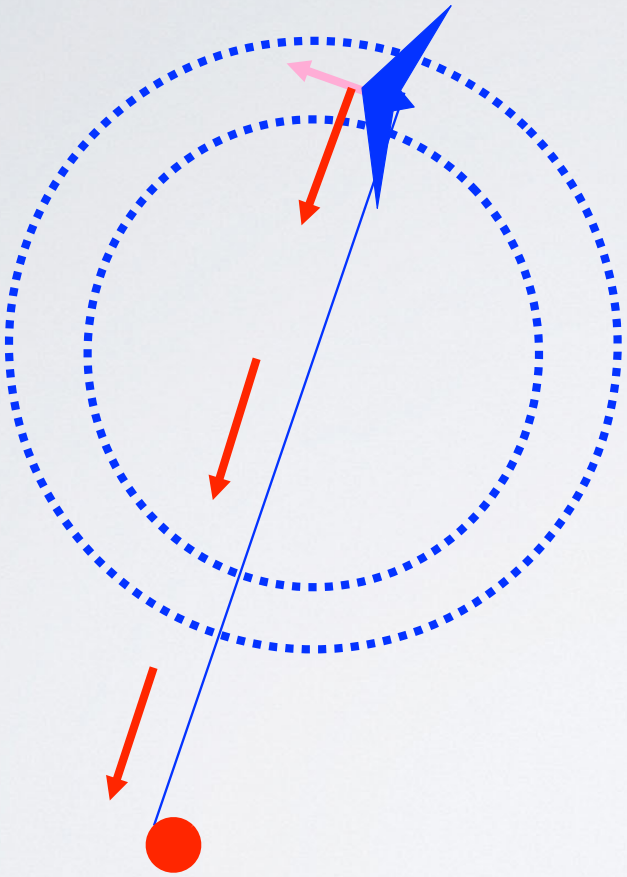
Variante 2: Lift Modus (Generator am Boden)



Pumpzyklus mit zwei Phasen:

- Produktionsphase:
  - Drachen fliegt schnell, hohe Zugkraft
  - Leine wird von Trommel abgerollt
  - Generator produziert Elektrizität

Variante 2: Lift Modus (Generator am Boden)



Pumpzyklus mit zwei Phasen:

- Produktionsphase:
  - Drachen fliegt schnell, hohe Zugkraft
  - Leine wird von Trommel abgerollt
  - Generator produziert Elektrizität
- Rückholphase:
  - Drachen fliegt langsam, geringe Zugkraft
  - Leine wird wieder aufgerollt

Vorteil: elektrische Maschine am Boden
Nachteil: langsam drehender, schwerer Generator

Illustration des Pumpzyklus (Lift Modus)

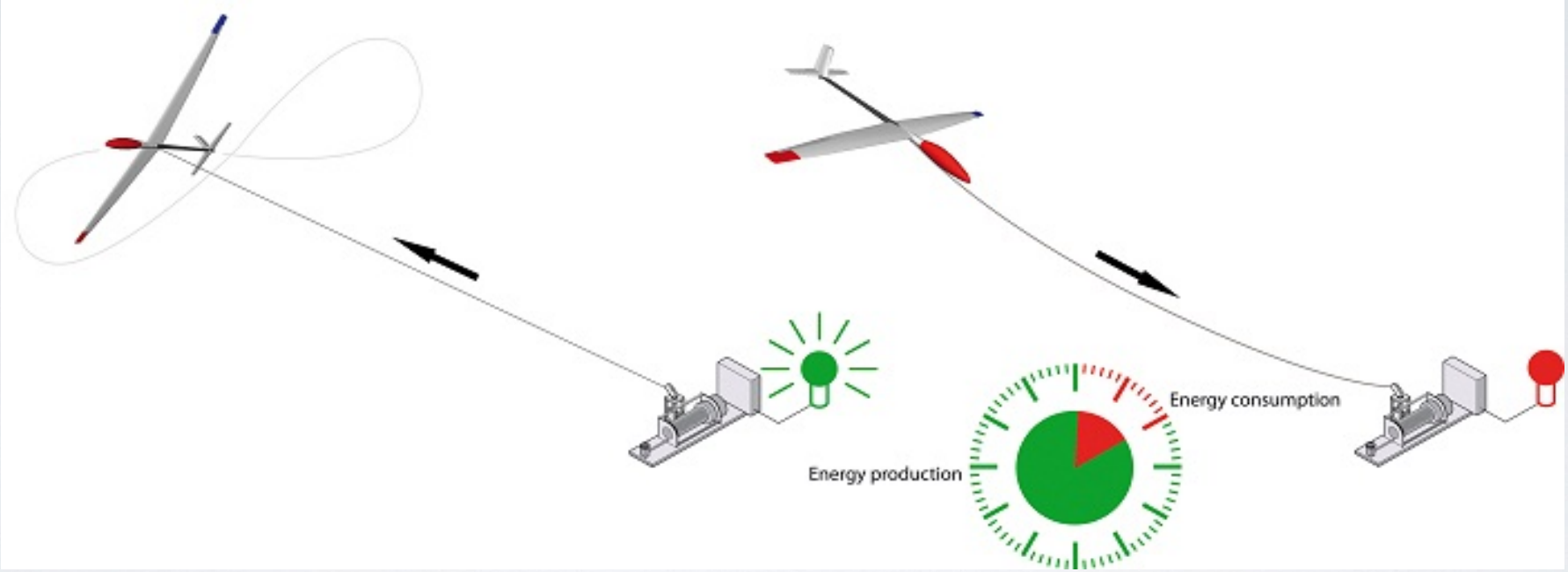
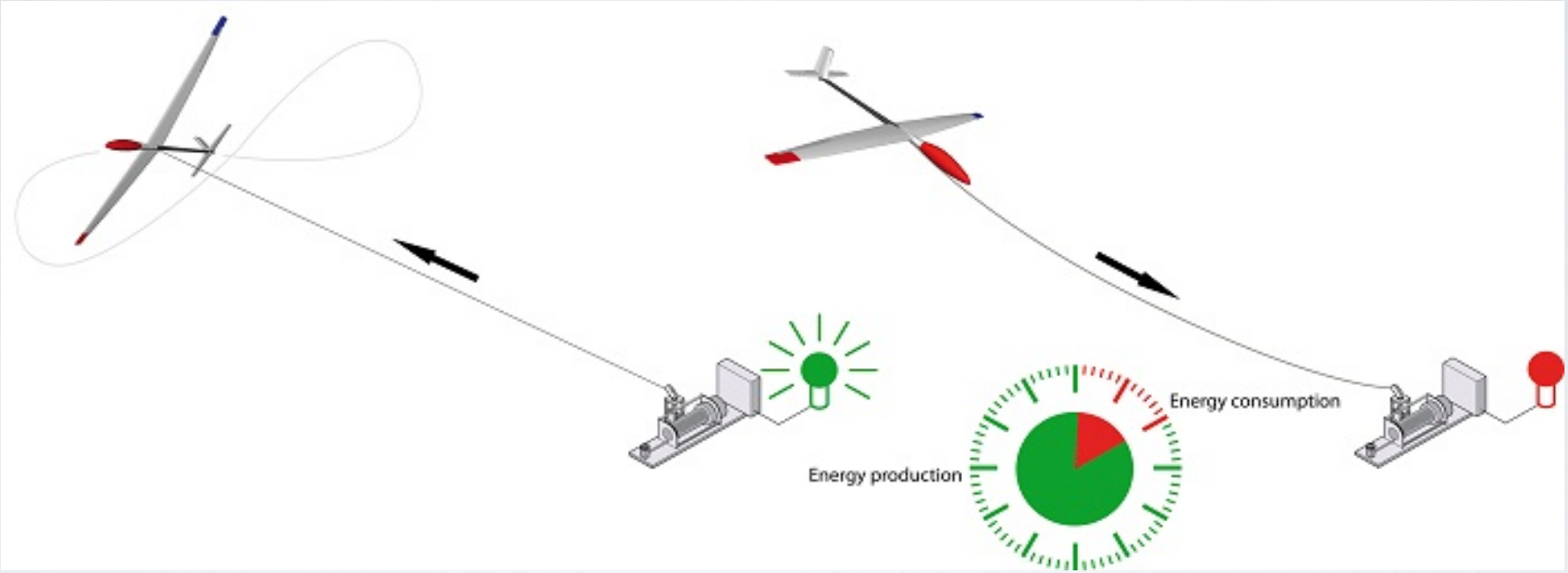


Illustration des Pumpzyklus (Lift Modus)



Welche Abrollgeschwindigkeit ist optimal?

- Zu langsam: Generator dreht zu wenig.
- Zu schnell: Drachen "sieht" weniger Wind, zu wenig Kraft.

Small-scale systems: close to market-ready

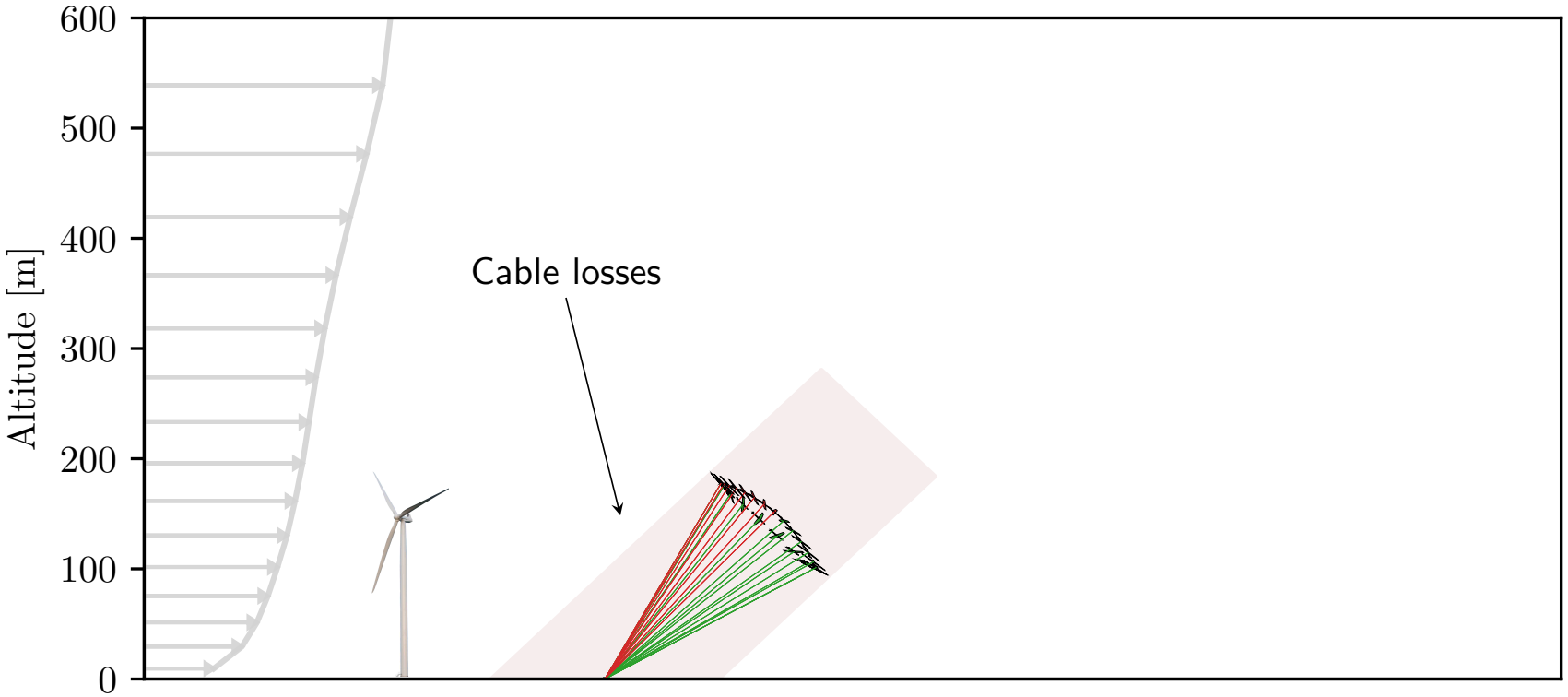
Courtesy of Skysails Power, Kitemill, Makani Power (top), Kitepower, Enerkite, Twingtec (bottom)

Flugwindenergiekonferenz 2011 in Leuven

Flugwindenergiekonferenz in Berlin

Flugwindenergiekonferenz in Freiburg

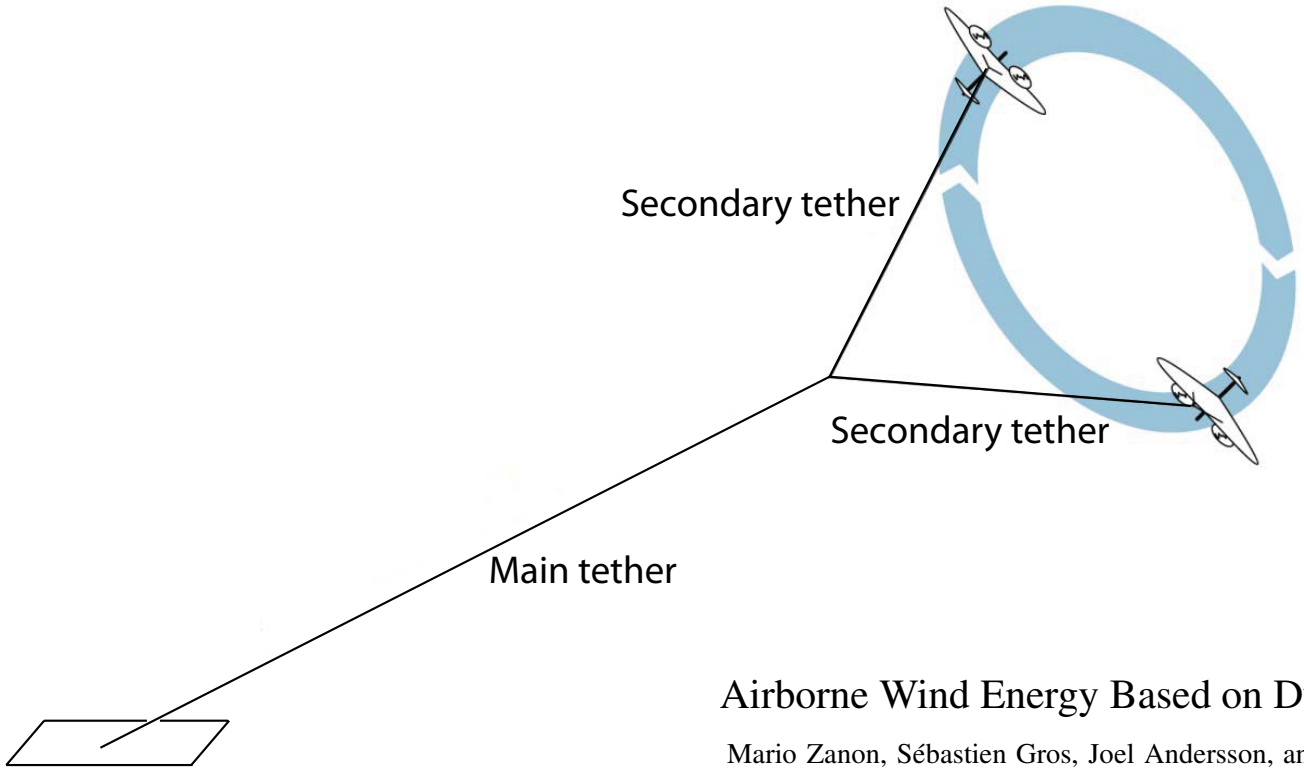
Minimizing cable losses



Turbine image courtesy of Shutterstock

Dual Kite Systems

- Two airfoils circling around each other have **less tether drag**
- can reach 40 kW/m^2 (power per wing area) with small devices
- centrifugal forces compensate each other

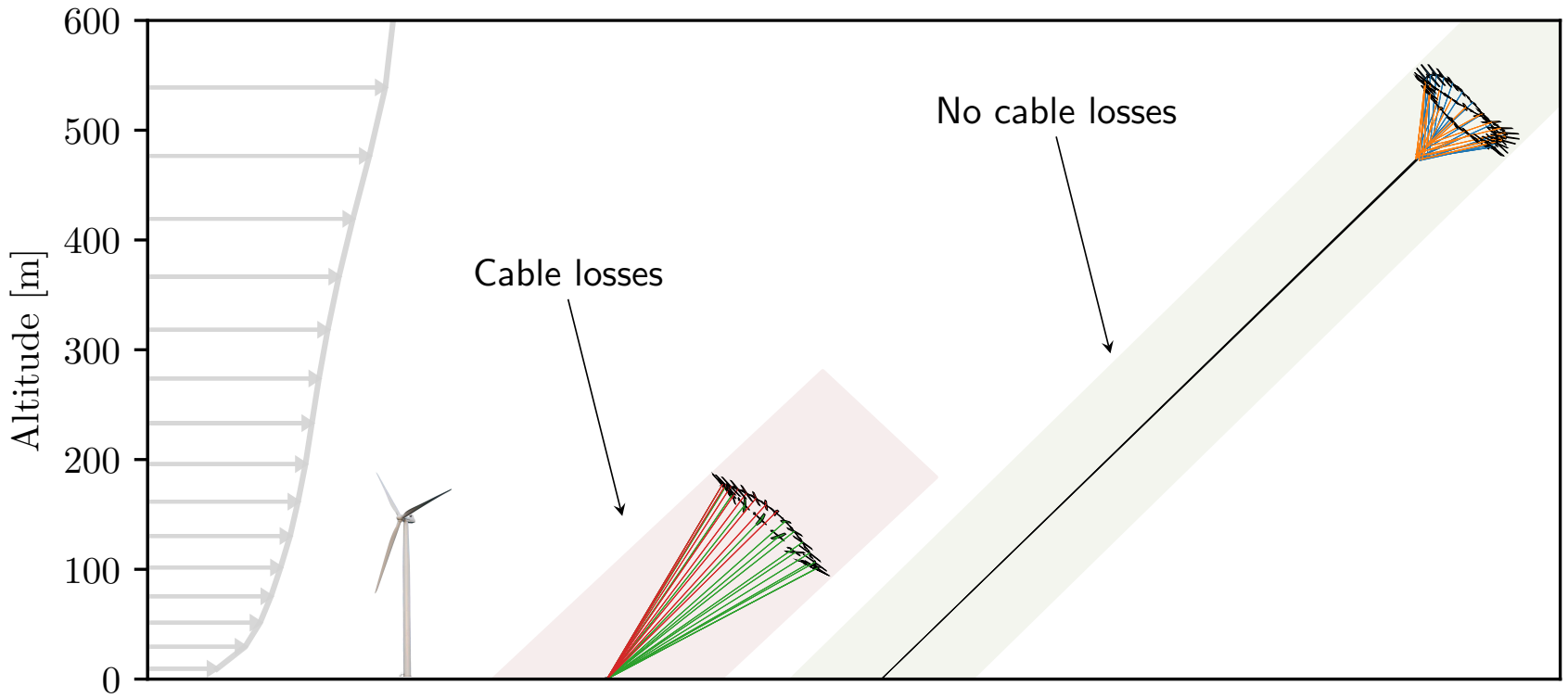


Airborne Wind Energy Based on Dual Airfoils

Mario Zanon, Sébastien Gros, Joel Andersson, and Moritz Diehl

IEEE TRANSACTIONS ON CONTROL SYSTEMS TECHNOLOGY, VOL. 21, NO. 4, JULY 2013

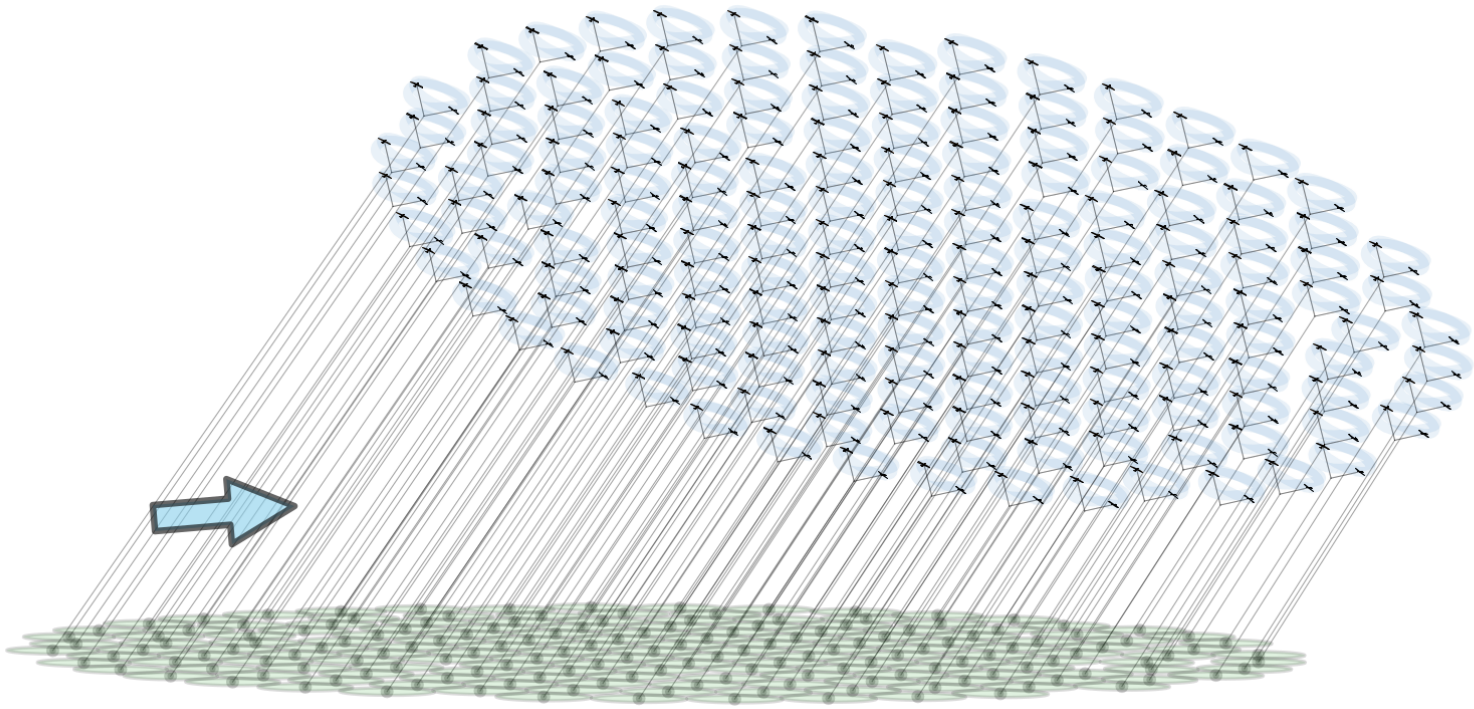
Minimizing cable losses



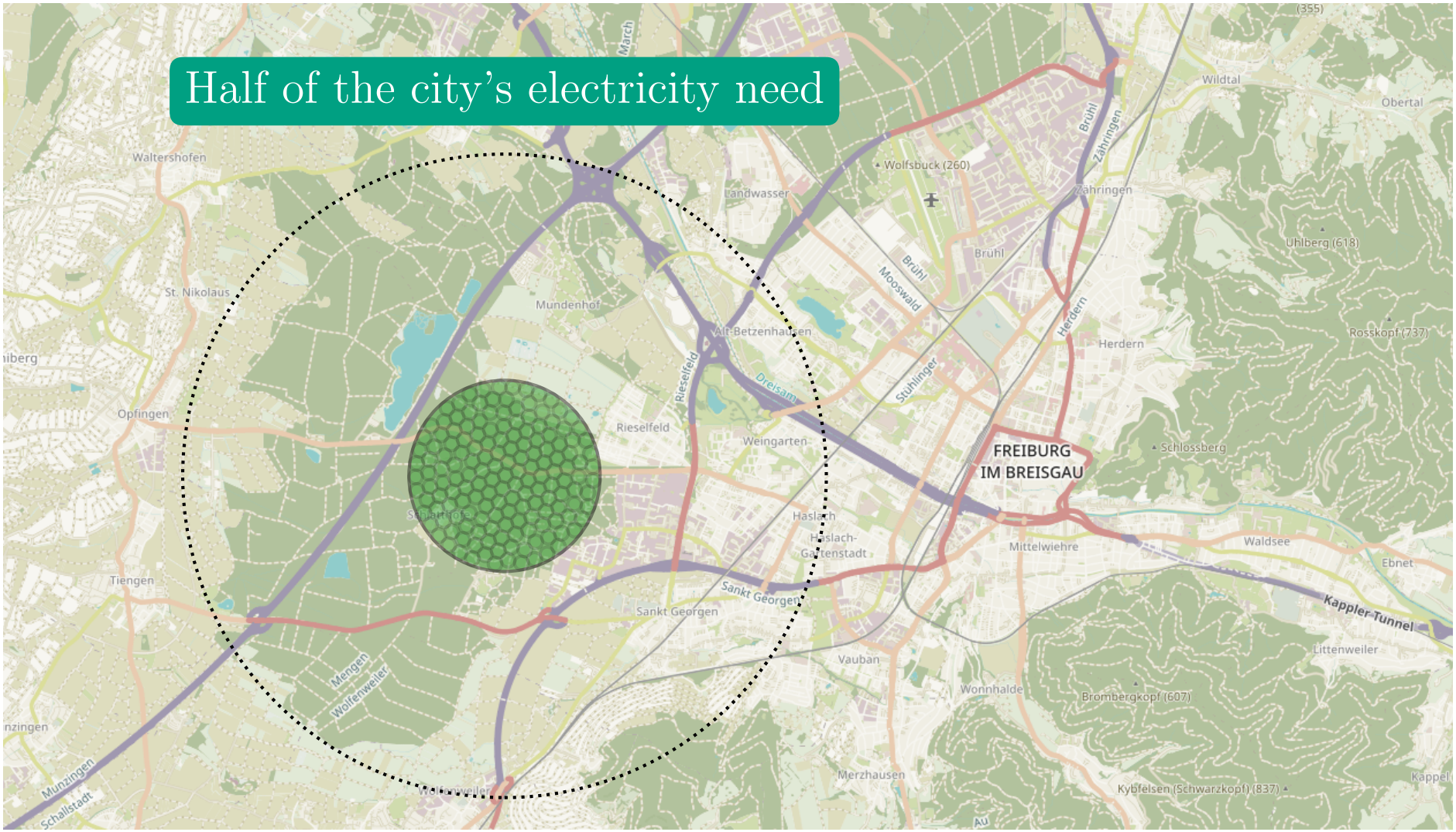
Turbine image courtesy of Shutterstock

Vision of vertical wind farm

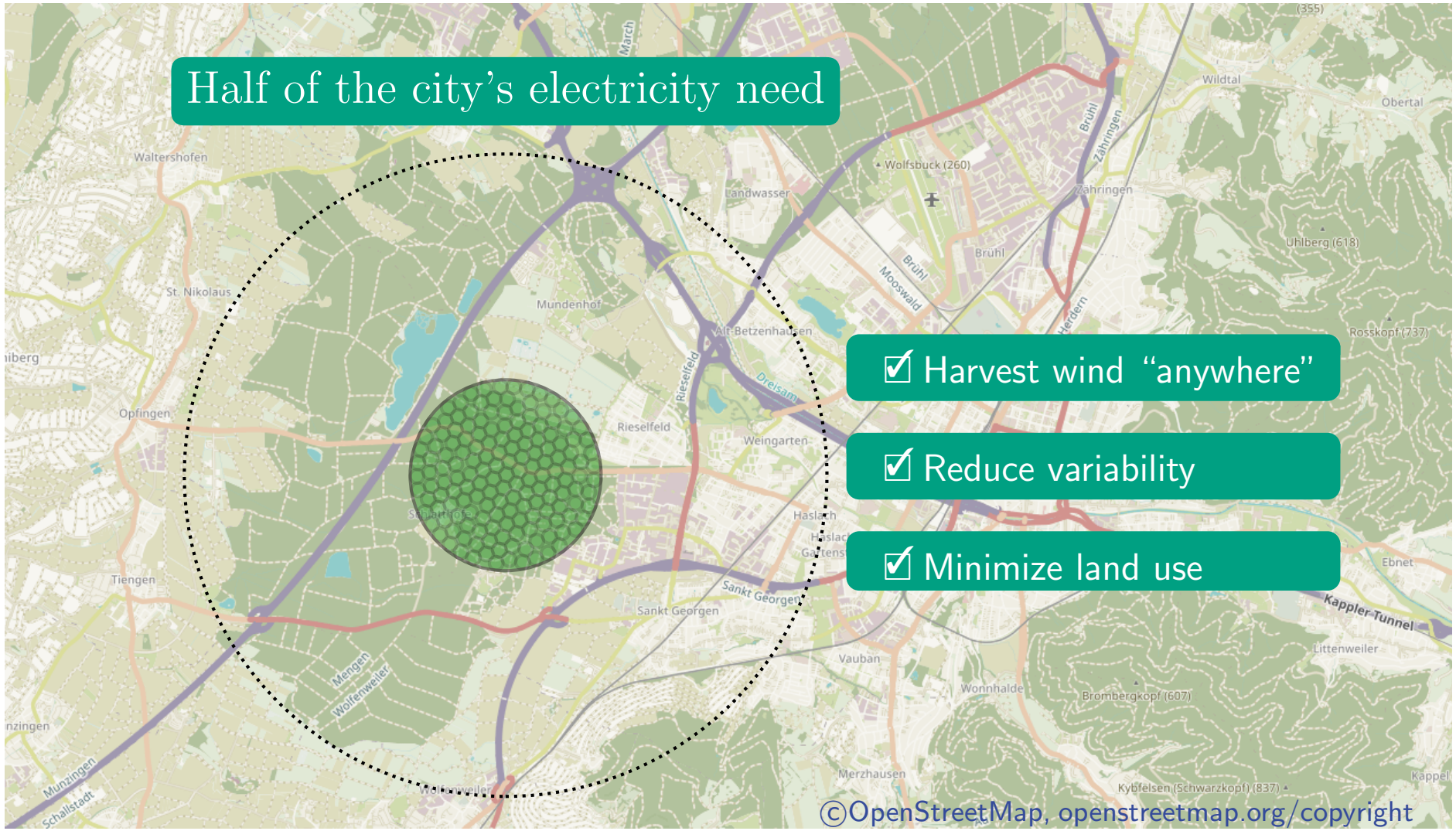
yearly average power density 7.5 MW/km^2 (conventional was 2.5 MW/km^2), much less material needed



Example: a vertical wind farm for Freiburg

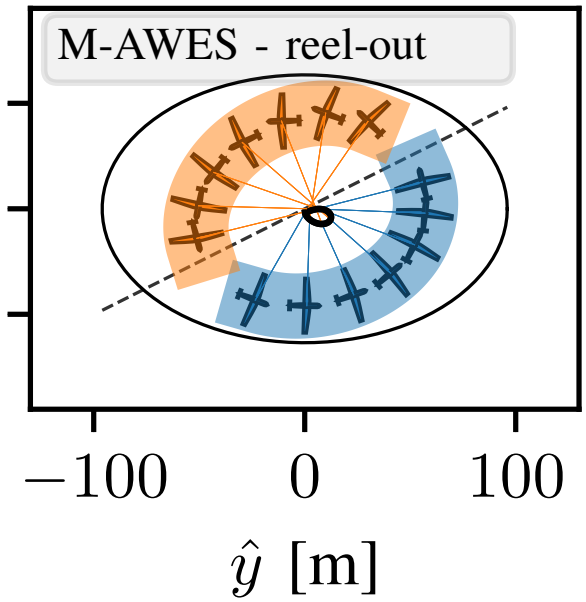


Example: a vertical wind farm for Freiburg



Detailed Flight Trajectory Optimization Study

optimising power density for single and multiple wing airborne wind energy systems



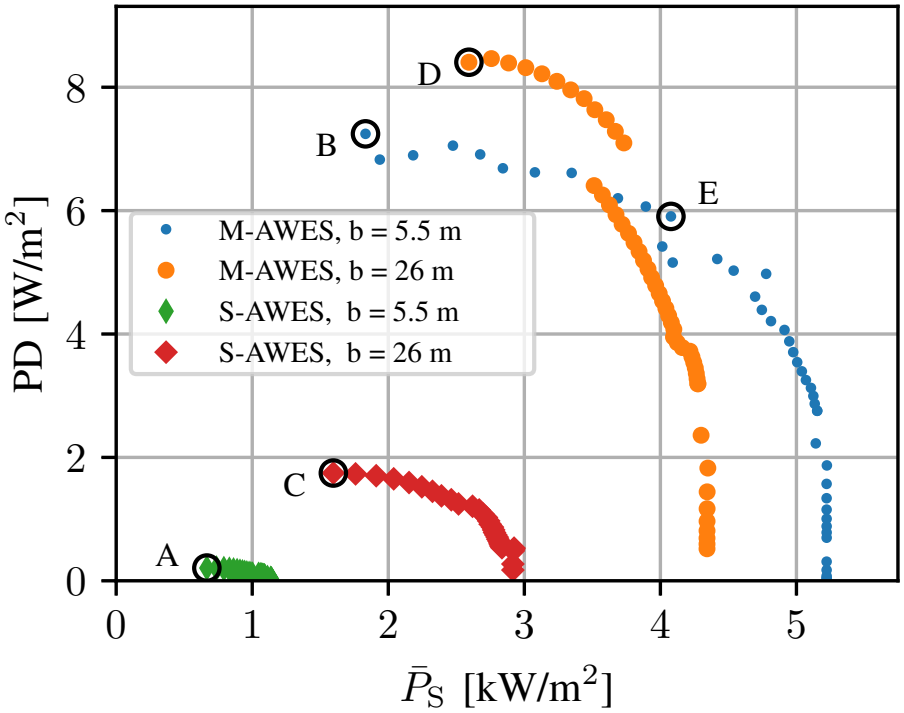


Fig. 4: Pareto efficiency front between power density and power per wing area for small- and moderate-size S-AWES and M-AWES.

[Vertical Airborne Wind Energy Farms with High Power Density per Ground Area based on Multi-Aircraft Systems, J. De Schutter, J. Harzer, M. Diehl, European Journal of Control, 2023]

Detailed Flight Trajectory Optimization Study

optimising power density for single and multiple wing airborne wind energy systems

Design E is a dual wing system with two aircraft of each 3 m² surface area and 36 kg weight, i.e. 12 kg per 1 m² .

At 7 m/s , design E delivers 4 kW/m², and assuming a capacity factor of 50% one needs 1,5 m² wing area to deliver 3 kW on average, weighing 18 kg.

The ground area power density at the same capacity factor would be 3 MW/km²

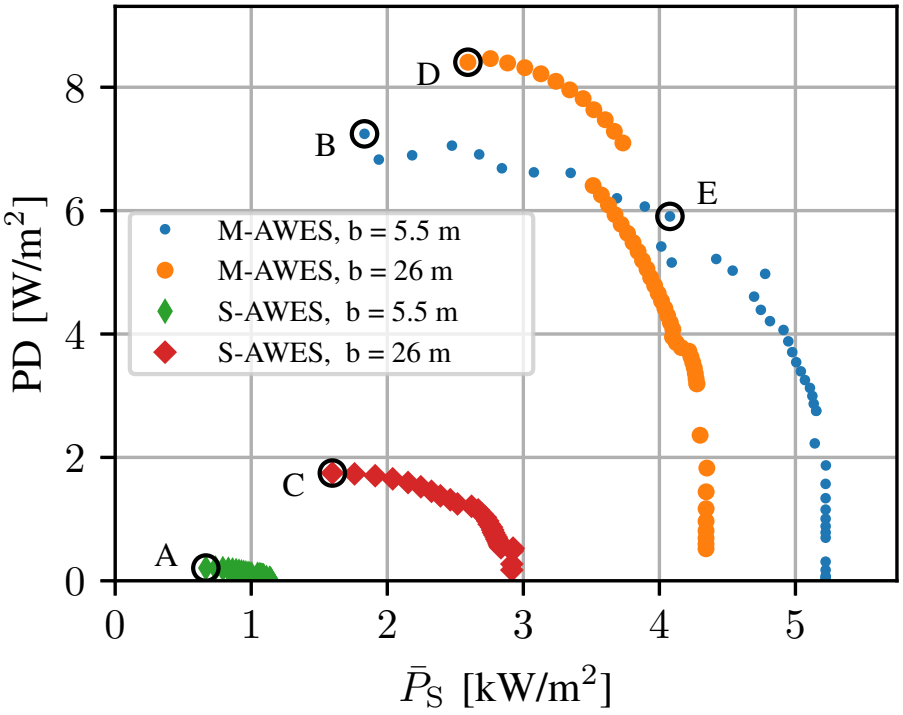
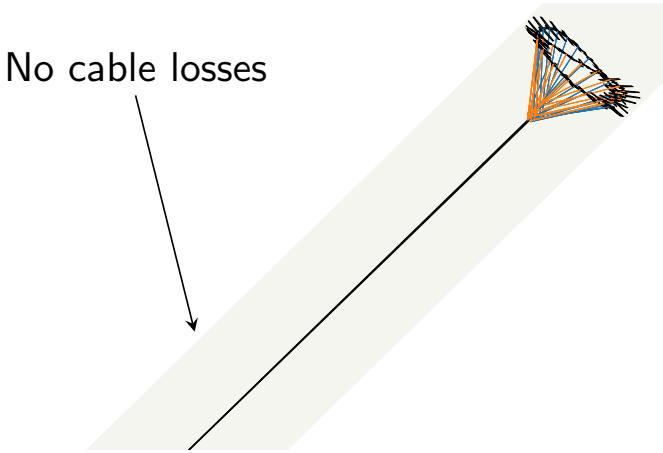


Fig. 4: Pareto efficiency front between power density and power per wing area for small- and moderate-size S-AWES and M-AWES.

[Vertical Airborne Wind Energy Farms with High Power Density per Ground Area based on Multi-Aircraft Systems, J. De Schutter, J. Harzer, M. Diehl, European Journal of Control, 2023]

Sonne, Erdöl, Wind und Flugwindenergie im Vergleich (3 kW pro Person, über 20 Jahre)



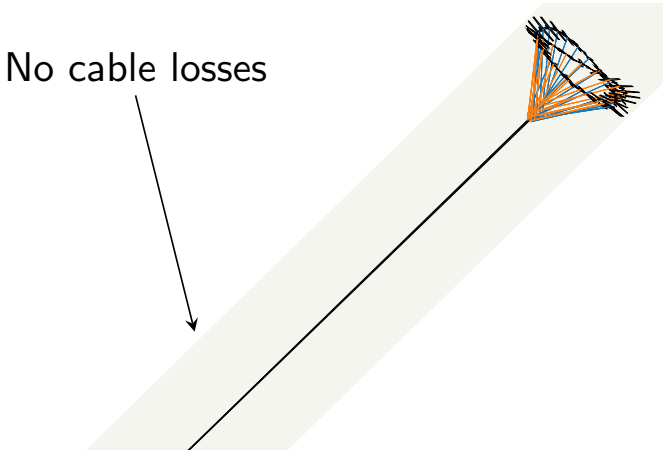
Solarmodule:
- 1,2 Tonnen
- 18 000 EUR

Erdöl:
- 45 Tonnen
- 19 800 EUR

Windturbinenanteil (0.3%):
- 12 Tonnen (1,8 t Stahl, 180 kg Rotor)
- 24 000 EUR

Flugwindenergieanlage:
- 18 kg Flügel mit 1,5 m^2
- Kosten noch unbekannt

Sonne, Erdöl, Wind und Flugwindenergie im Vergleich (3 kW pro Person, über 20 Jahre)



Solarmodule:
- 1,2 Tonnen
- 18 000 EUR

- Bodenfläche ca. 300 m²

Erdöl:
- 45 Tonnen
- 19 800 EUR

Windturbinenanteil (0.3%):
- 12 Tonnen (1,8 t Stahl, 180 kg Rotor)
- 24 000 EUR

- Windparkfläche ca 1500 m²

Flugwindenergieanlage:
- 18 kg Flügel mit 1,5 m²

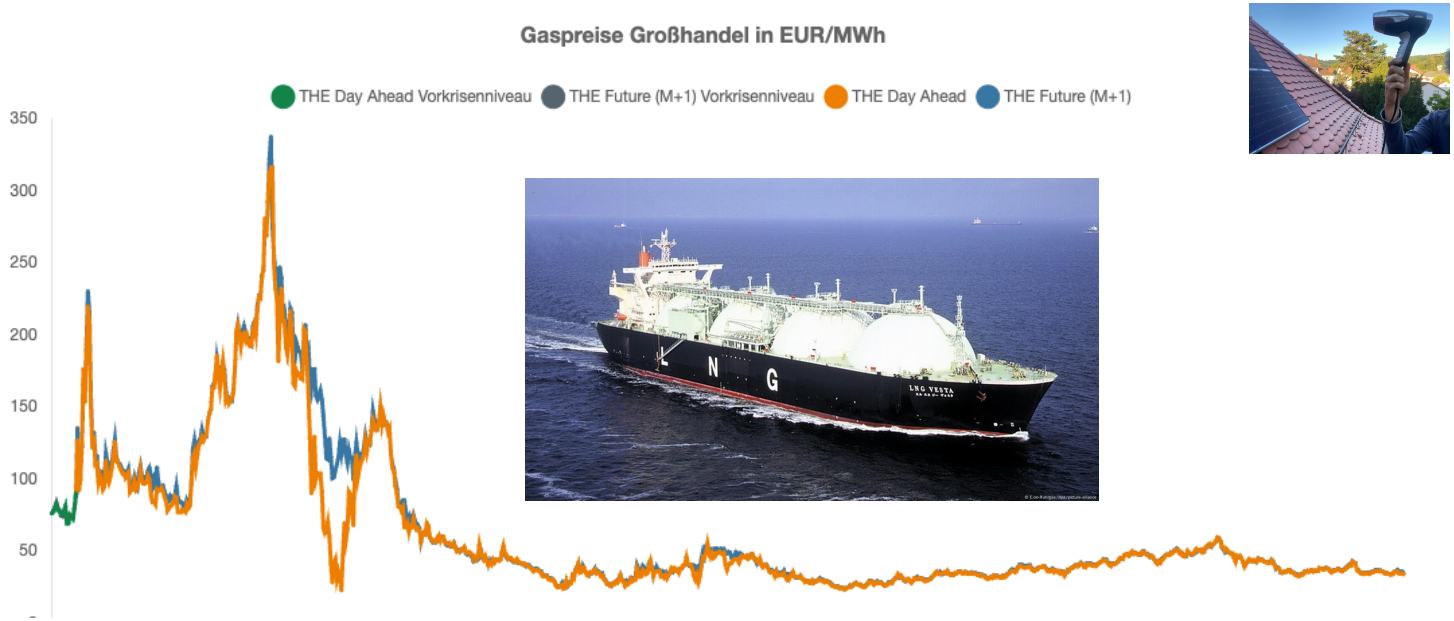
- Kosten noch unbekannt

- Windparkfläche ca 1000 m²

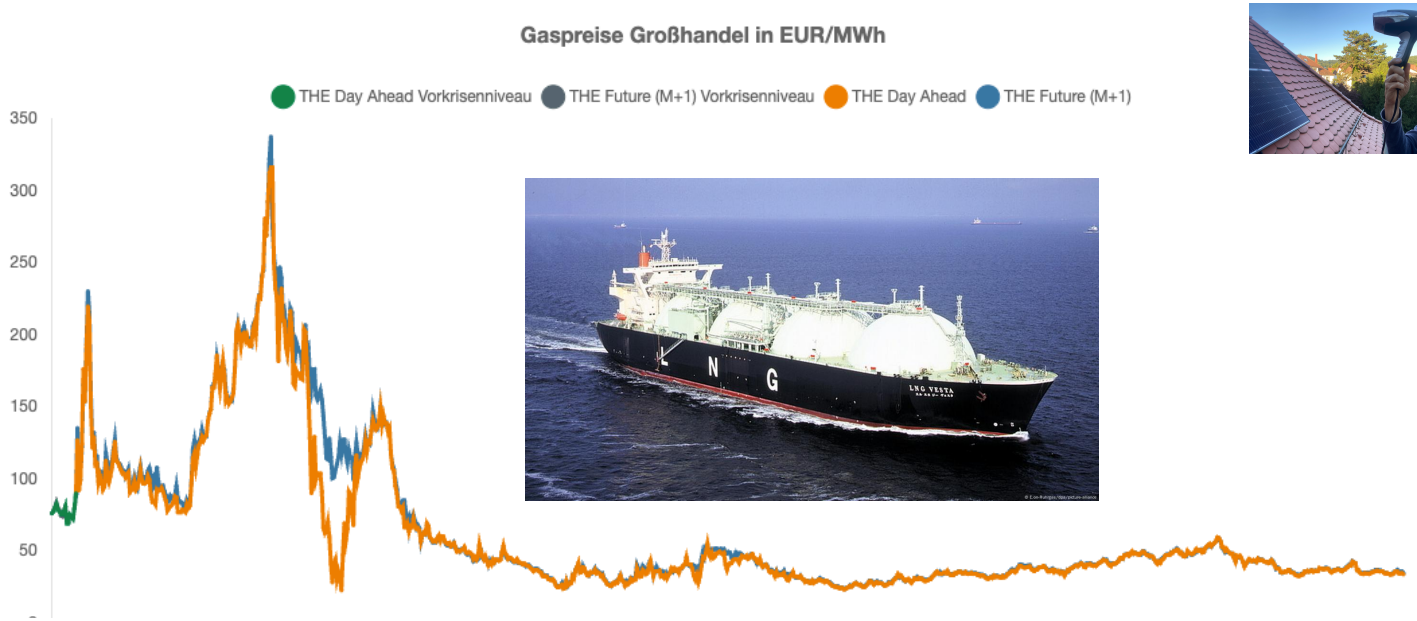
Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit !

Anhang

Wieviel Erdgas braucht man, um 3 kW über 20 Jahre zu decken ?

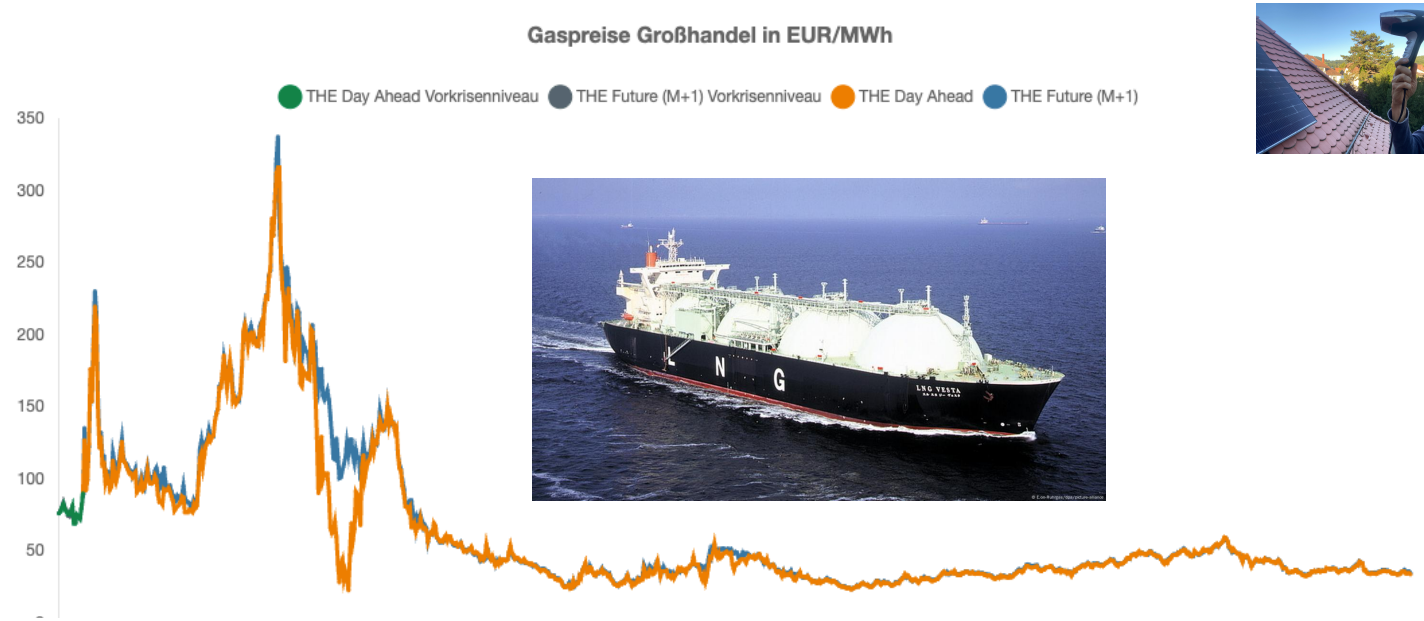


Wieviel Erdgas braucht man, um 3 kW über 20 Jahre zu decken ?



Jede Baden-Württemberger*in braucht über 20 Jahre 20*8760h*3 kW = 525600 kWh.

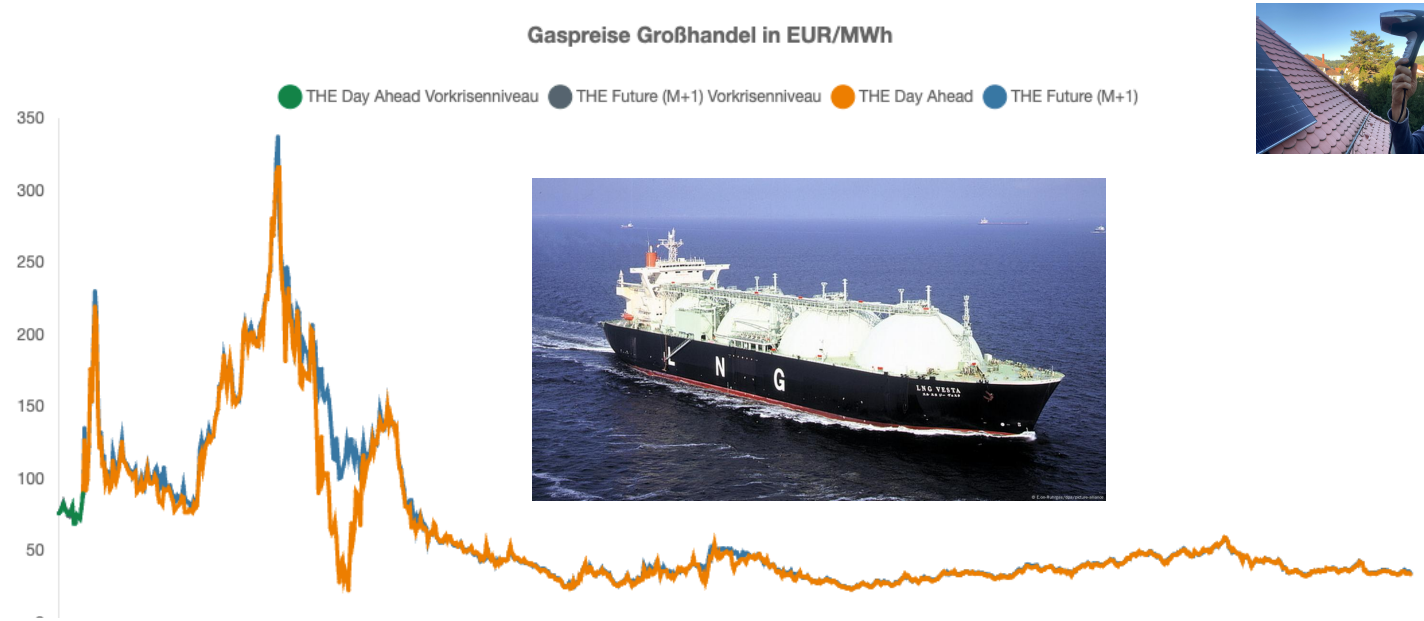
Wieviel Erdgas braucht man, um 3 kW über 20 Jahre zu decken ?



Jede Baden-Württemberger*in braucht über 20 Jahre 20*8760h*3 kW = 525600 kWh.

Eine kWh Gas hat ein Volumen von 100 Liter und kostet im Europäischen Großhandel 3,5 Cent.

Wieviel Erdgas braucht man, um 3 kW über 20 Jahre zu decken ?



Jede Baden-Württemberger*in braucht über 20 Jahre 20*8760h*3 kW = 525600 kWh.

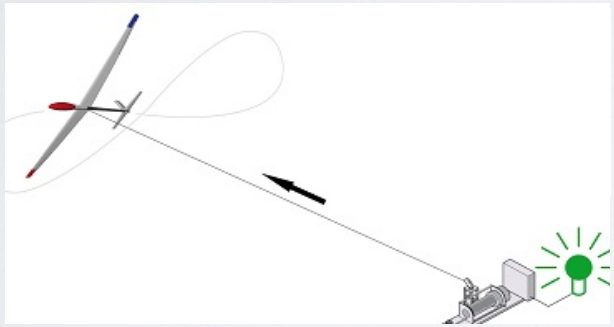
Eine kWh Gas hat ein Volumen von 100 Liter und kostet im Europäischen Großhandel 3,5 Cent.

Gas-Import Kosten pro Person (über 20 Jahre): EUR 18396.

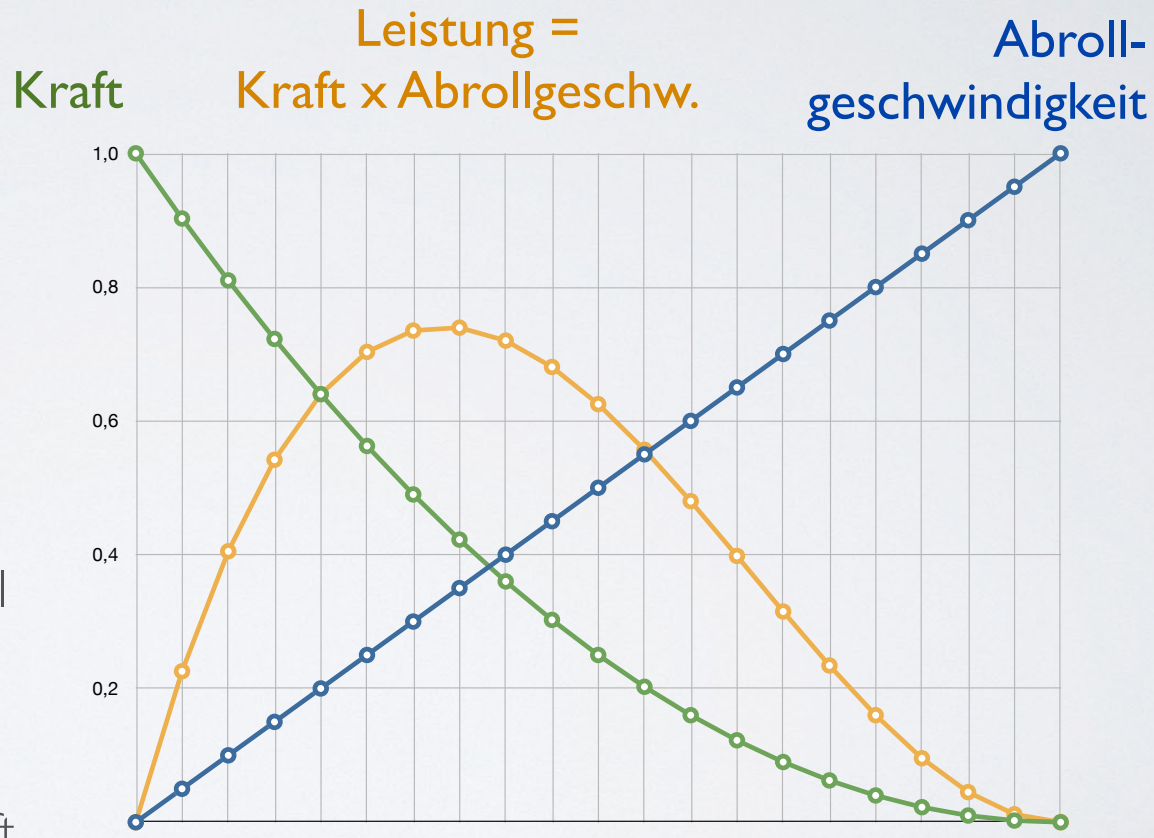
Auch Erdgas ist in Europa teurer als Balkonsolar (EUR 18 000)!

Welche Abrollgeschwindigkeit ist optimal?

Maximale Leistung wird bei 1/3 der Windgeschwindigkeit erreicht



Bemerkung: Drachen fliegt viel schneller quer zum Wind, abhängig von seiner aerodynamischen Effizienz. Je schneller, desto höher die Kraft.



Die Formel von Miles Loyd

J. ENERGY VOL. 4, NO. 3
ARTICLE NO. 80-4075

Crosswind Kite Power

Miles L. Loyd*
Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, Calif.

$$P = \frac{2}{27}\,\rho\,A\,w^3\,C_\mathrm{L}\left(\frac{C_\mathrm{L}}{C_\mathrm{D}}\right)^2$$

Leistung P
Luftdichte ρ
Drachenfläche A
Windgeschw. w

Auftriebs-
Widerstands-
Verhältnis (L/D) $\left(\frac{C_\mathrm{L}}{C_\mathrm{D}}\right)$

Flügelfläche von **1 m²** produziert Leistung von **40 kW**
(bei Wind von 13 m/s und L/D Verhältnis von 15).
Dieselbe Effizienz für Lift und Drag Modus.

More Complex Example: Power Optimal Trajectories in Airborne Wind Energy (AWE)

formulated and solved daily by practitioners using open-source python package “AWEBox” [De Schutter et al. 2023]

For simple plane attached to a tether:

- 20 differential states (3+3 trans, 9+3 rotation, 1+1 tether)
- 1 algebraic state (tether force)
- 8 invariants (6 rotation, 2 due to tether constraint)
- 3 control inputs (aileron, elevator, tether length)

Translational:

$$\begin{bmatrix} m & 0 & 0 & x \\ 0 & m & 0 & y \\ 0 & 0 & m & z \\ x & y & z & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{z} \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_x + m\left(\dot{\delta}^2 r_A + \dot{\delta}^2 x + 2\dot{\delta}\dot{y} + \ddot{\delta}y\right) \\ F_y + m\left(y\dot{\delta}^2 - 2\dot{x}\dot{\delta} - \ddot{\delta}(rA + x)\right) \\ F_z - gm \\ -\dot{x}^2 - \dot{y}^2 - \dot{z}^2 \end{bmatrix}$$

Rotational:

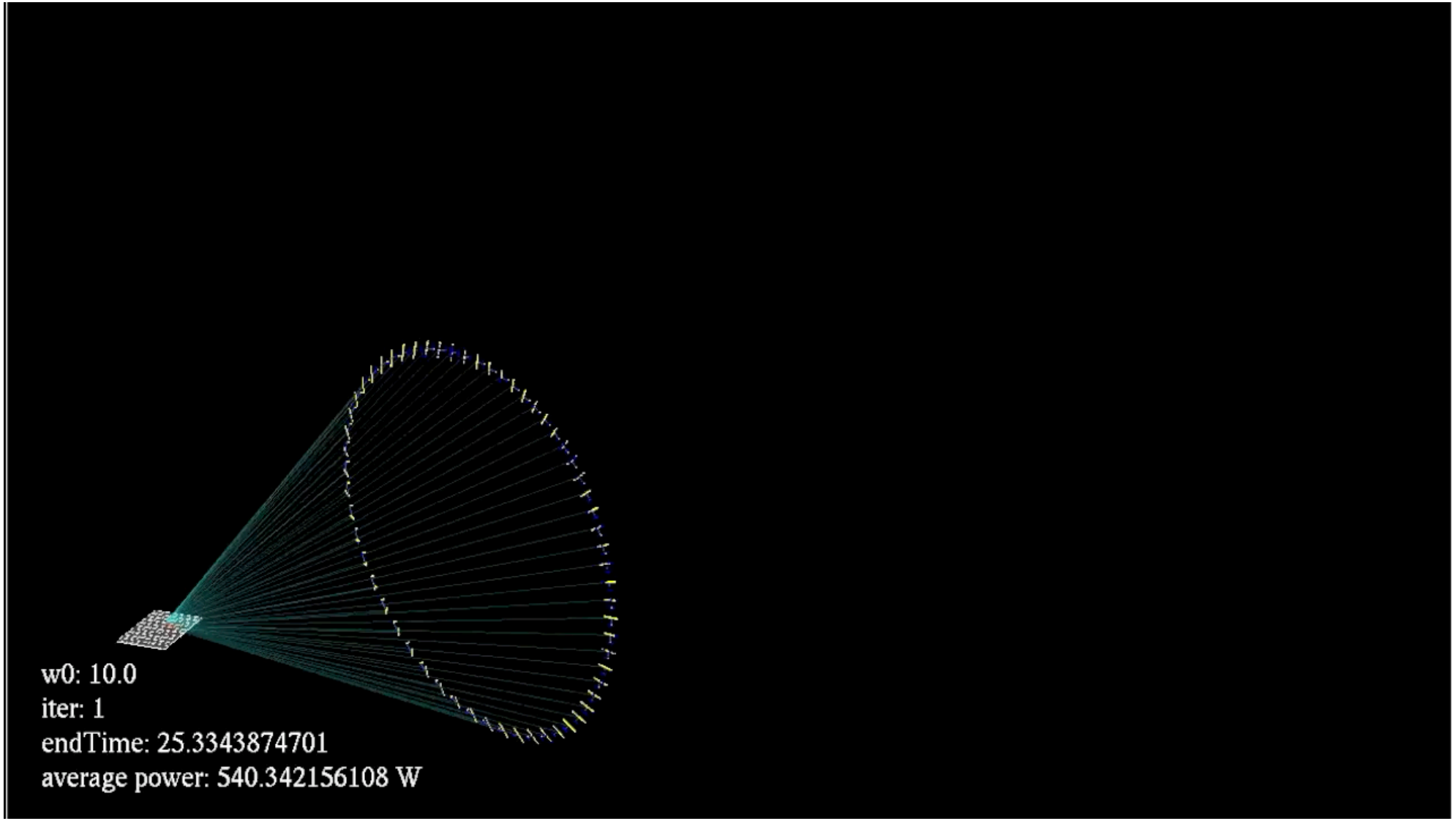
$$\dot{R} = R\omega_\times - R^T \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\delta} \end{bmatrix}, \qquad J\dot{\omega} = T - \omega \times J\omega, \qquad R = \begin{bmatrix} \vec{E}_x & \vec{E}_y & \vec{E}_z \end{bmatrix}$$

Aero. coefficients:

$$\vec{v} = \begin{bmatrix} \dot{x} - \dot{\delta}y \\ \dot{y} + \dot{\delta}(r_\mathrm{A} + x) \\ \dot{z} \end{bmatrix} - \vec{w}(x, y, z, \delta, t), \qquad \alpha = -\frac{\vec{E}_z^T \vec{v}}{\vec{E}_x^T \vec{v}}, \qquad \beta = \frac{\vec{E}_y^T \vec{v}}{\vec{E}_x^T \vec{v}}$$

Aero. forces/torques:

$$\vec{F}_\mathrm{A} = \frac{1}{2}\rho A \|\vec{v}\|(C_\mathrm{L}\vec{v} \times \vec{E}_y - C_\mathrm{D}\vec{v}), \quad \vec{T}_\mathrm{A} = \frac{1}{2}\rho A \|\vec{v}\|^2 \begin{bmatrix} C_\mathrm{R} \\ C_\mathrm{P} \\ C_\mathrm{Y} \end{bmatrix}$$

Newton-Type Optimization Iterations for Power Optimal Flight

(video by Greg Horn, using CasADi and Ipopt as optimization engine)