

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

## 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**

DECEMBER 4, 2023  
14:00-18:00

Aula der Universität Freiburg (KG I)  
Platz der Universität 3  
79098 Freiburg

Center for Renewable Energy  
**ZEE**  
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

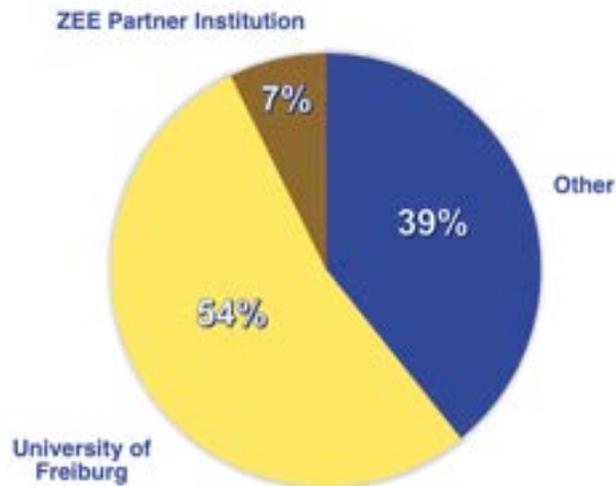
universität freiburg

**JOIN US TO**

- HEAR**  
From Keynote Speakers
- CHECK**  
Research Poster Exhibition
- LEARN**  
About Renewable Energy Stakeholders

for more info <https://www.zee-uni-freiburg.de>  
E-Mail: [zee@zee.uni-freiburg.de](mailto:zee@zee.uni-freiburg.de)

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



## RENEWABLE ENERGY DAY FREIBURG 2024

 **Aula der Universität  
Freiburg (KG II)**  
Platz der Universität 3,  
79098 Freiburg



You are invited to share your thoughts

### AGENDA

- 14:00 Introduction
- 14:15 Keynote Talk  
(Patrick Graichen)
- 14:45 Poster Session 1
- 15:30 Coffee Break
- 16:00 Keynote Talk  
(Hans-Martin Henning)
- 16:30 Keynote Talk  
(Christian Paul)
- 17:00 Poster Session 2
- 17:45 Aperó with Snacks
- 18:00 End of the Event  
(all talks are in English)

### OUR KEYNOTE SPEAKERS



**PATRICK GRAICHEN** How (not) to solve the climate crisis: Insights from political experience

**HANS-MARTIN HENNING** Key features of the future energy system

**CHRISTIAN PAUL** Freiburg's path to decarbonization

And many posters on renewable energy research in Freiburg and surroundings. 



For more information: [www.zee-uni-freiburg.de](http://www.zee-uni-freiburg.de)

# Renewable Energy Day Freiburg - July 15, 2024



universität freiburg

## 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



The poster features a dark blue background with a white and yellow leaf-like graphic on the left. At the top right, it includes the German and Canadian flags, the University of Freiburg logo, and the ZEE Center for Renewable Energy logo. The main title 'ZEE WORKSHOP' is in large, bold, black letters. Below it, the subtitle 'on Prospects for Canada-Germany Energy Collaboration' is in a smaller font. A calendar icon indicates the dates: Thursday, October 17, 2024 (14:00-17:00) and Friday, October 18, 2024 (8:00-10:00), followed by a public lecture at 14:00. A circular portrait of Prof. Ian Rowlands, PhD, is on the right. Below the portrait, his name and affiliation (School of Environment, Resources and Sustainability, University of Waterloo, Canada) are listed. The University of Waterloo logo is at the bottom left, and the workshop location (University of Freiburg, Room 01-012, Georges-Köhler-Allee 102, 79110 Freiburg) is at the bottom right. The website URL <https://www.zee-uni-freiburg.de> is at the bottom center.

universität freiburg  
Center for Renewable Energy  
ZEE  
Wahrnehmung Universität Freiburg

# ZEE WORKSHOP

on Prospects for Canada-Germany  
Energy Collaboration

Thursday, October 17, 2024: 14:00-17:00  
Friday, October 18, 2024: 8:00-10:00  
(Followed by Public Lecture at 14:00)

**GUEST SPEAKER**  
**Prof. Ian Rowlands, PhD.**  
School of Environment, Resources and Sustainability  
University of Waterloo, Canada  
PROF. ROWLANDS SPEAKS THURSDAY AT 14:00 (AND FRIDAY AT 14:00)

**UNIVERSITY OF WATERLOO**

<https://www.zee-uni-freiburg.de>

University of Freiburg,  
Room 01-012  
Georges-Köhler-Allee 102,  
79110 Freiburg

# Renewable Energy Day Freiburg 2025

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

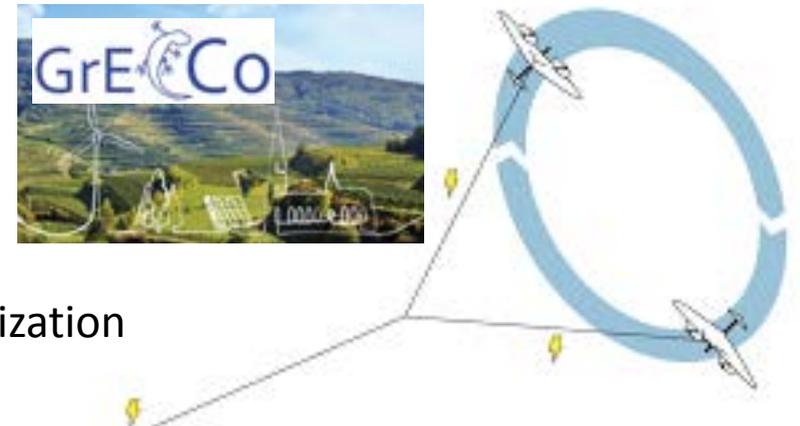


# Aktuell laufen über das ZEE drei Forschungsprojekte

- GrECCo – Grid-Sensitive Energy Community Coordination

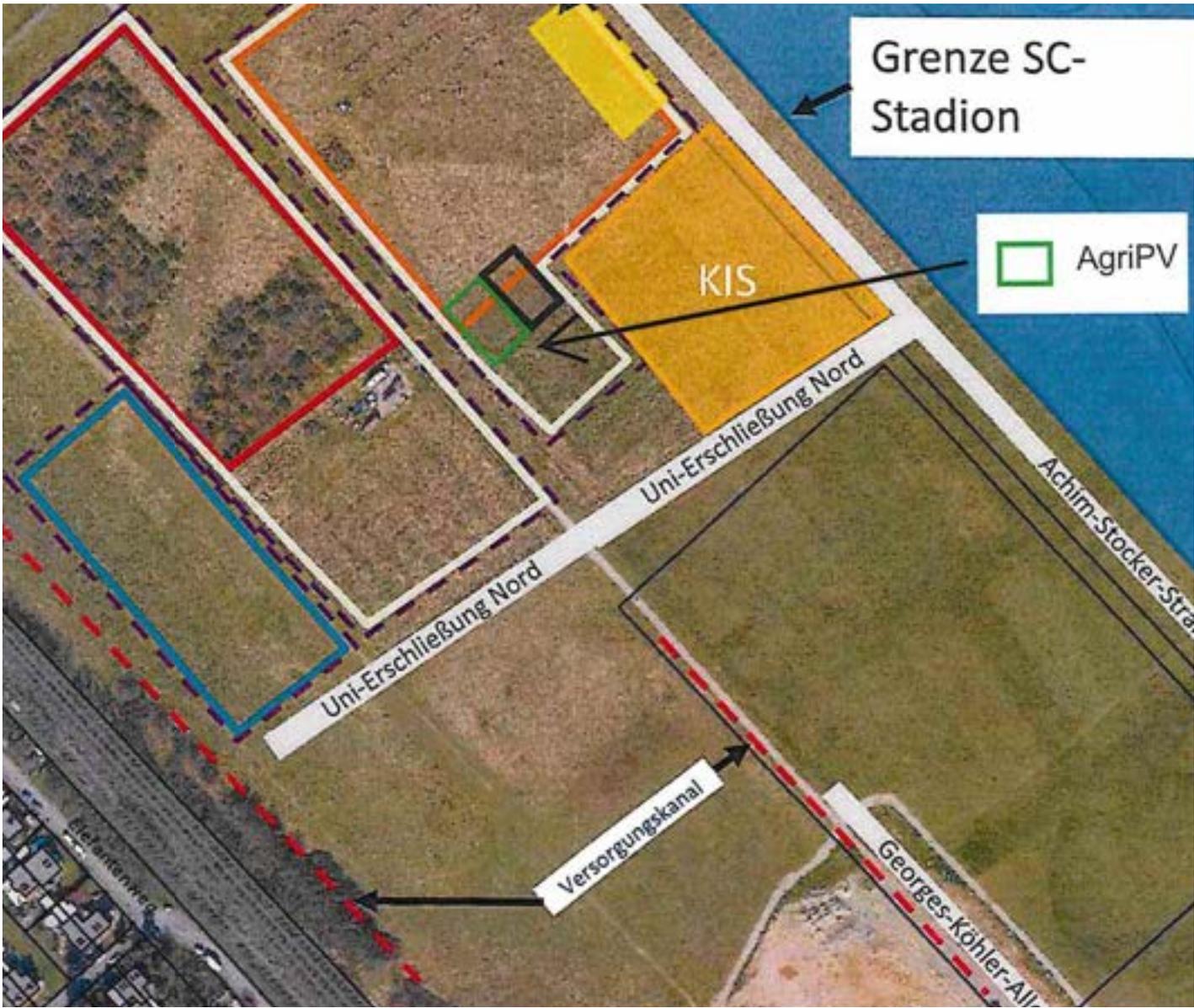


- MAWERO - Multi-wing Airborne Wind Energy Robustness Optimization



- Agri-photovoltaics (Agri-PV) Project



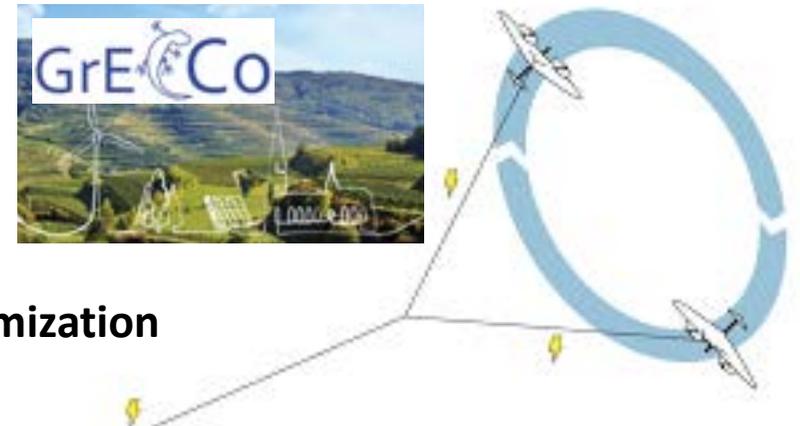


# Aktuell laufen über das ZEE drei Forschungsprojekte

- GrECCo – Grid-Sensitive Energy Community Coordination



- MAWERO - Multi-wing Airborne Wind Energy Robustness Optimization

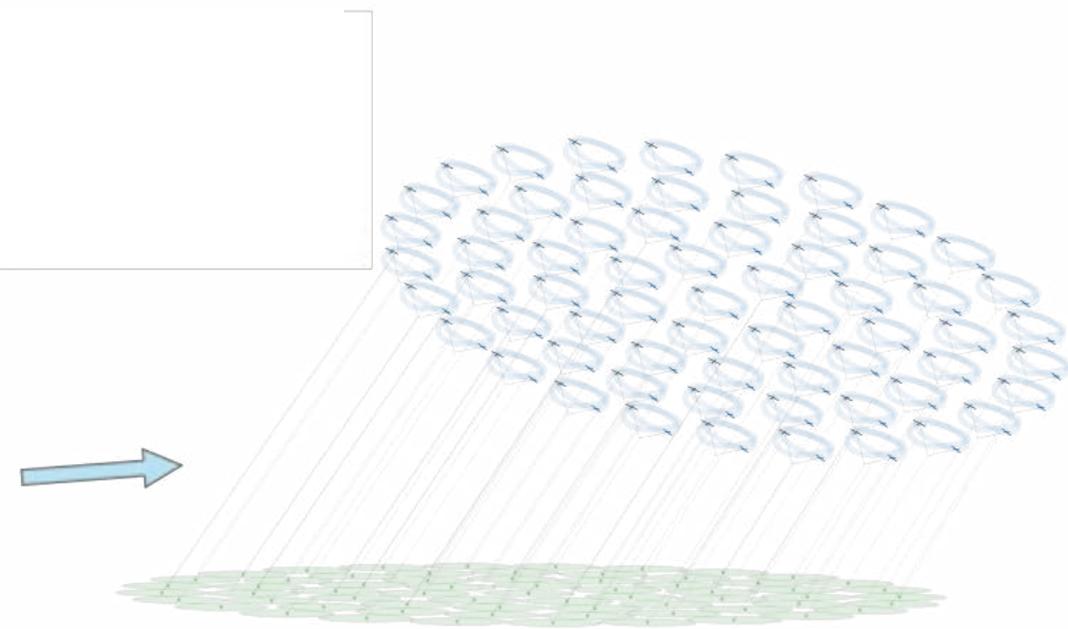


- Agri-photovoltaics (Agri-PV) Project



# DFG Projekt MAWERO bewilligt

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



universität freiburg

Höhenwindenergie

Höhenwindenergie

## Freiburger Wissenschaftler will Windkraftanlagen in den Himmel schicken

BZ-Abn | 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  
Di, 25. Jan 2024, 14:00 Uhr  
Freiburg



1/5

universität freiburg



**zee**

Zentrum für Erneuerbare Energien  
Centre for Renewable Energy

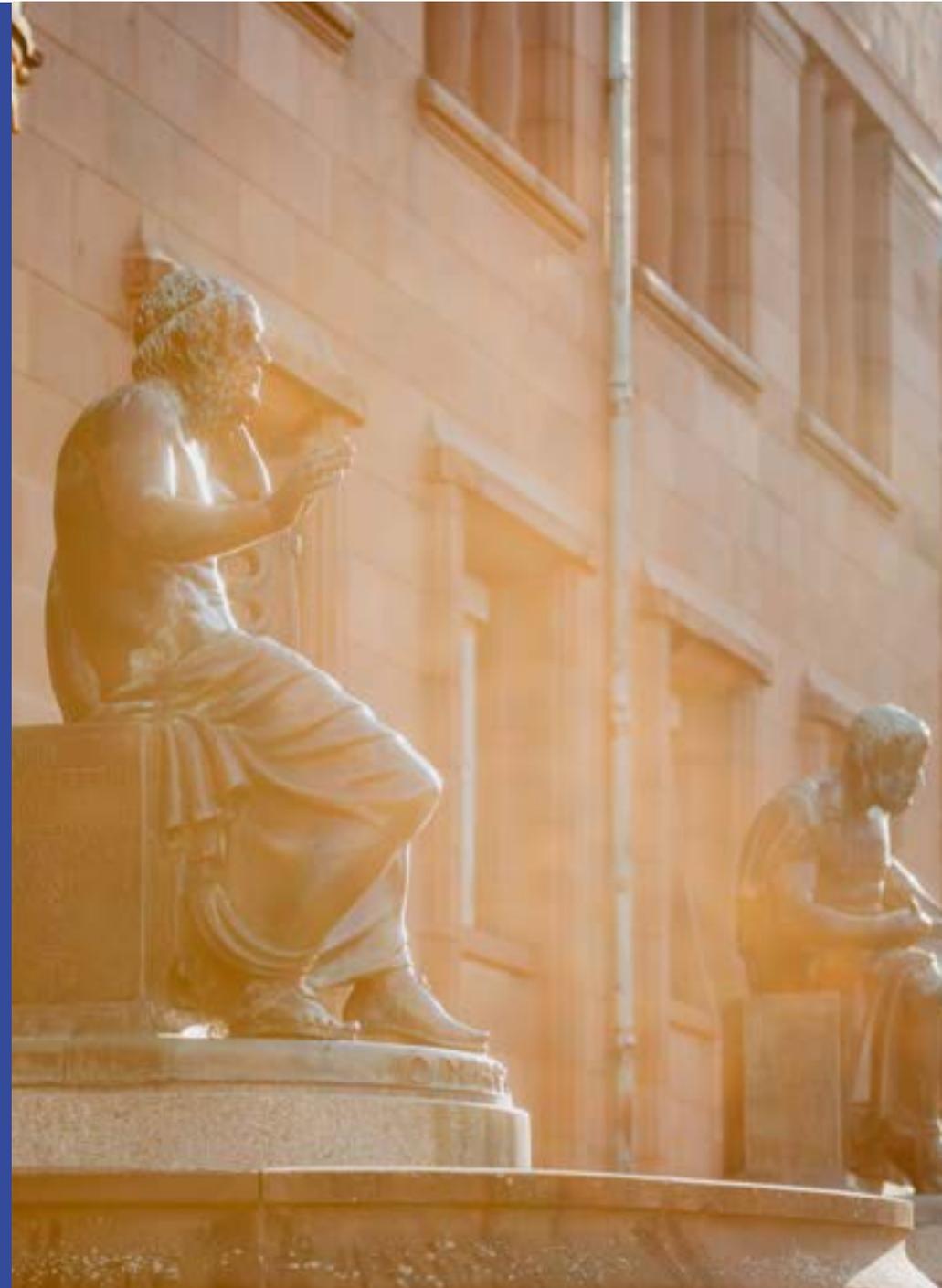
# Einführung die Höhen- und Flugwindenergie

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



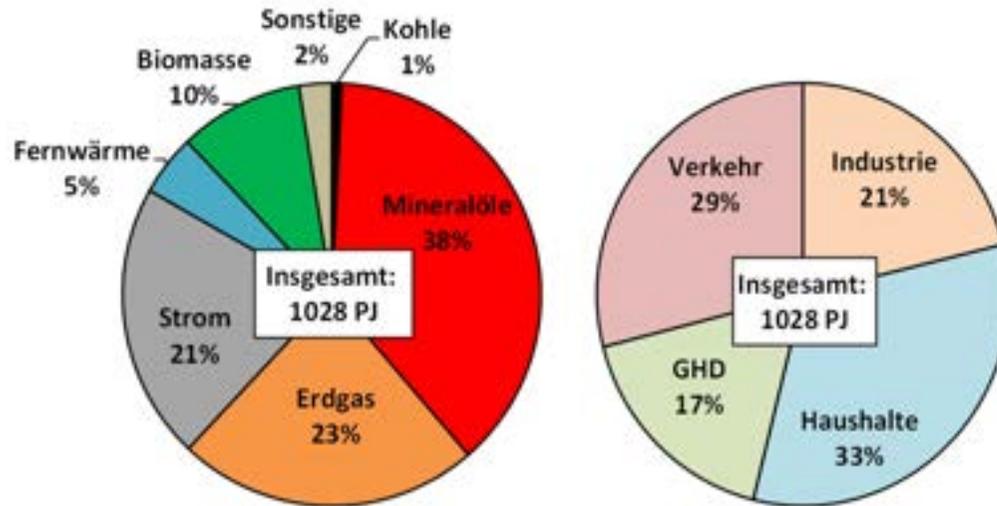
- Eine typische Europäer\*in verbraucht **5 kW** (1 kW Elektrizität + Transport + Heizung ...)
- Das sind 120 kWh oder 12 Liter Benzin pro Tag
- Ein Hin- und Rückflug nach Los Angeles verbraucht 1200 Liter Kerosin pro Person (~100 Tage)

[MacKay 2009]



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

# Wieviel Energie verbrauchen wir in Baden-Württemberg ?



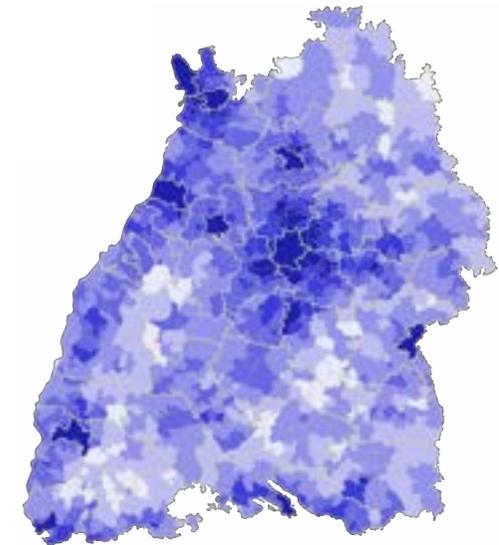
aus:

**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 (=  $1,028 \cdot 10^{18}$  J pro  $(8760 \cdot 3600)$  Sekunden) = **32,6 GW**

BW Einwohnerzahl: **11,25 Millionen**

BW Endenergieverbrauch pro Einwohner:  $(32,6 \text{ GW} / 11,25 \cdot 10^6 = )$  **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 ?



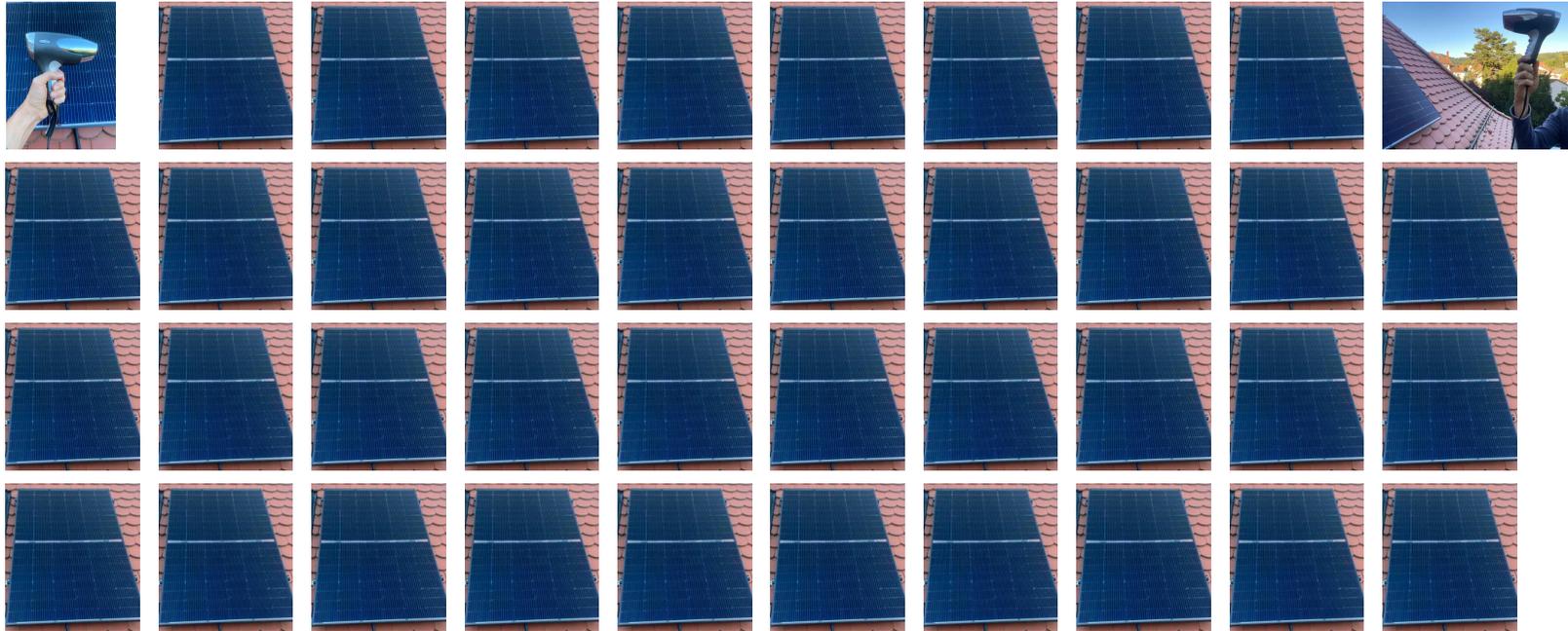
Mein Balkonsolarmodul (1,15m x 1,75m, 360 W) mit Südausrichtung hat an einem sonnigen Tag (7. August 2025) 1,8 kWh erzeugt, das war im Tagesdurchschnitt 75 W. Im Jahresdurchschnitt liefert es knapp 50 W.

## Wieviele Solarmodule braucht man, um 3 kW zu erzeugen ?



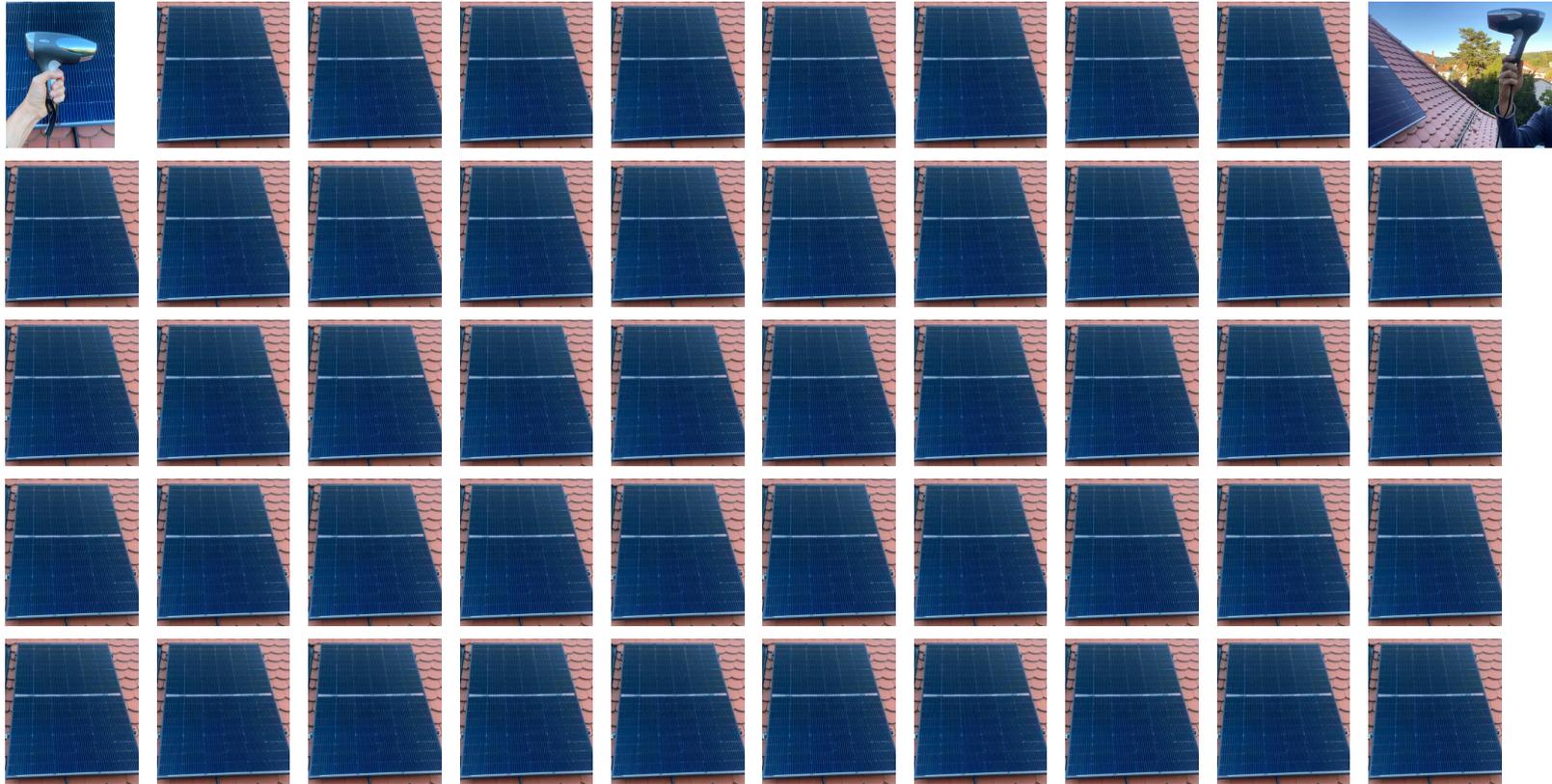
Mein Balkonsolarmodul (1,15m x 1,75m, 360 W) mit Südausrichtung hat an einem sonnigen Tag (7. August 2025) 1,8 kWh erzeugt, das war im Tagesdurchschnitt 75 W. Im Jahresdurchschnitt liefert es knapp 50 W.

# Wieviele Solarmodule braucht man, um 3 kW zu erzeugen ?



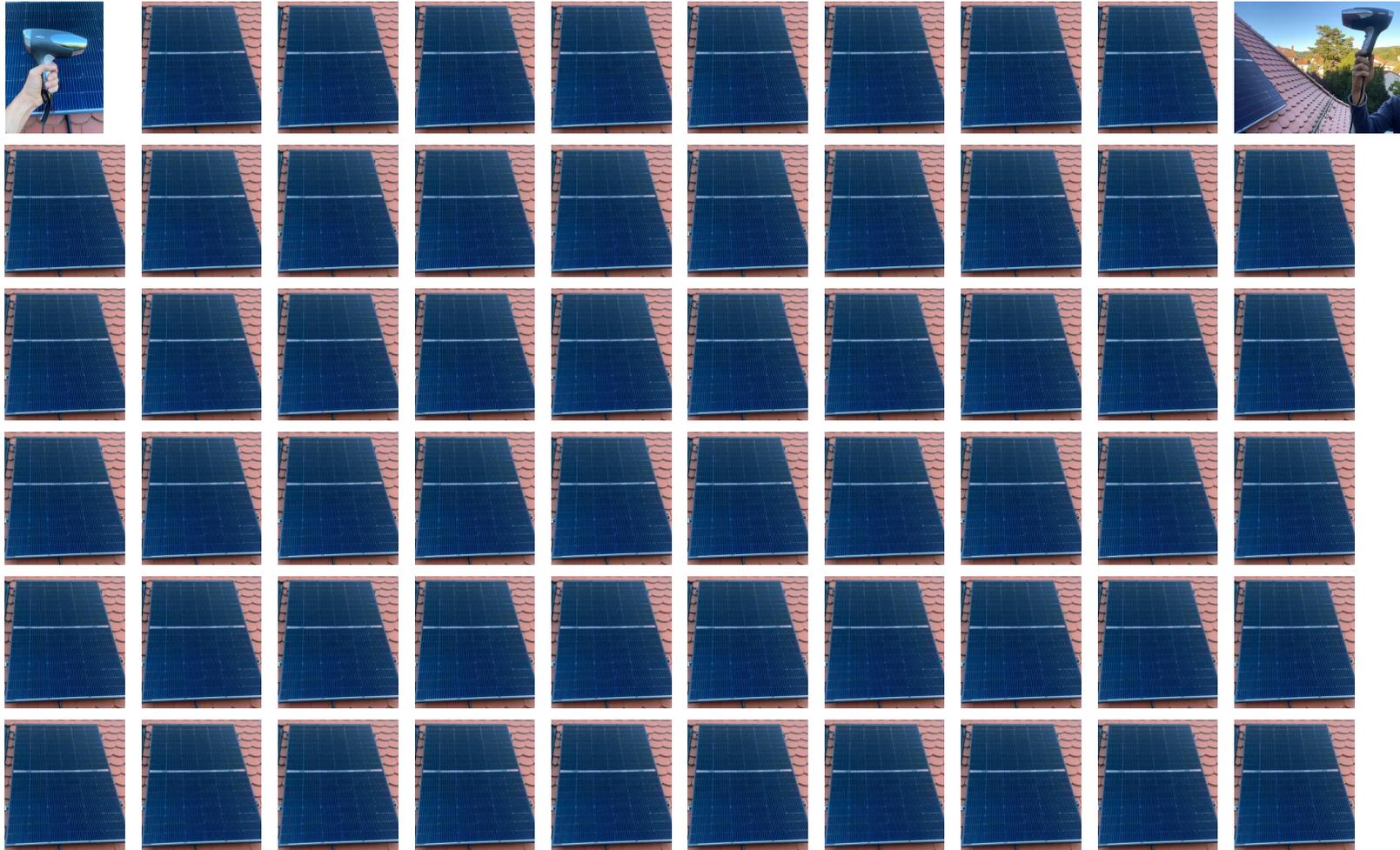
Mein Balkonsolarmodul (1,15m x 1,75m, 360 W) mit Südausrichtung hat an einem sonnigen Tag (7. August 2025) 1,8 kWh erzeugt, das war im Tagesdurchschnitt 75 W. Im Jahresdurchschnitt liefert es knapp 50 W.

# Wieviele Solarmodule braucht man, um 3 kW zu erzeugen ?



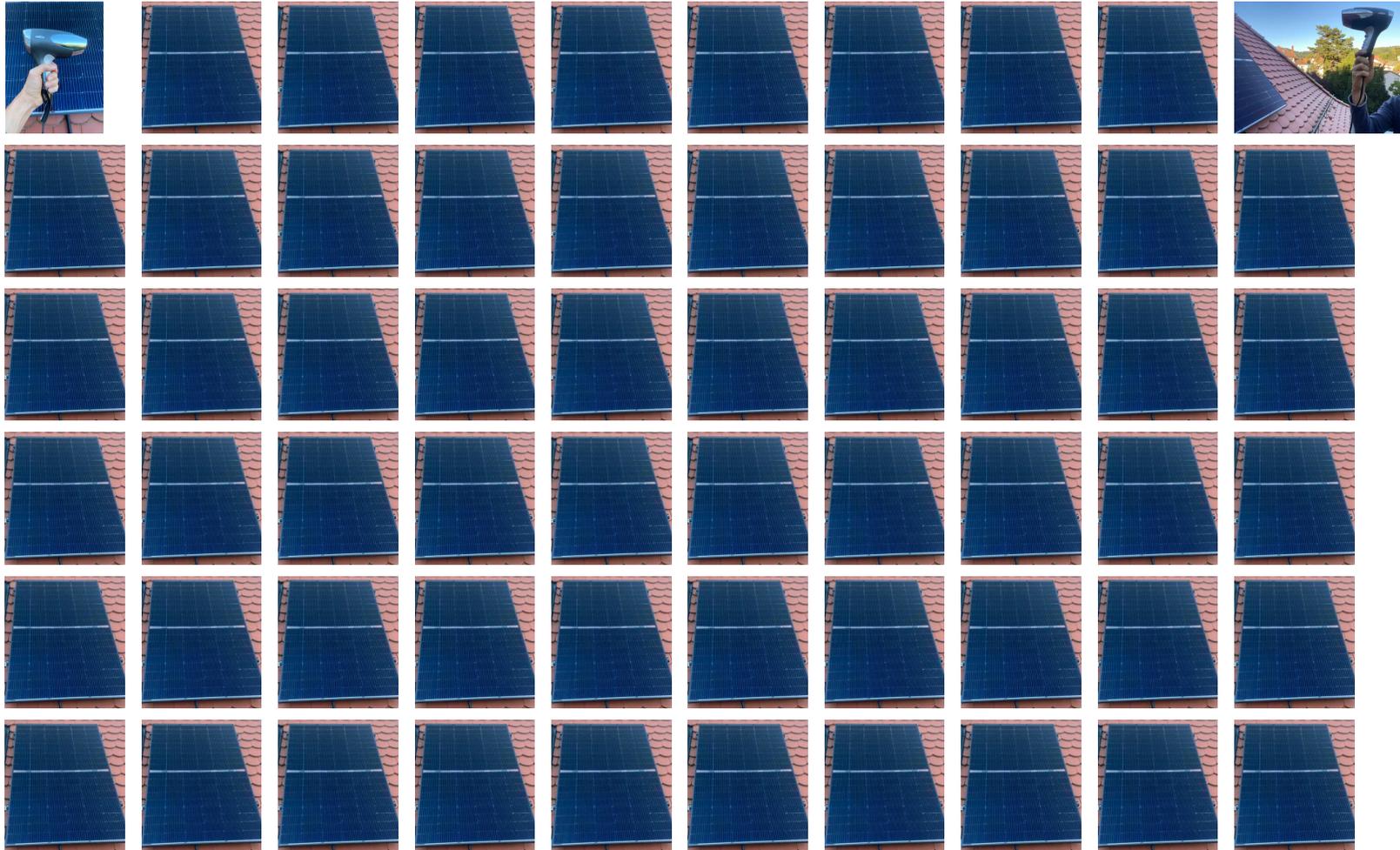
Mein Balkonsolarmodul (1,15m x 1,75m, 360 W) mit Südausrichtung hat an einem sonnigen Tag (7. August 2025) 1,8 kWh erzeugt, das war im Tagesdurchschnitt 75 W. Im Jahresdurchschnitt liefert es knapp 50 W.

# Wieviele Solarmodule braucht man, um 3 kW zu erzeugen ?



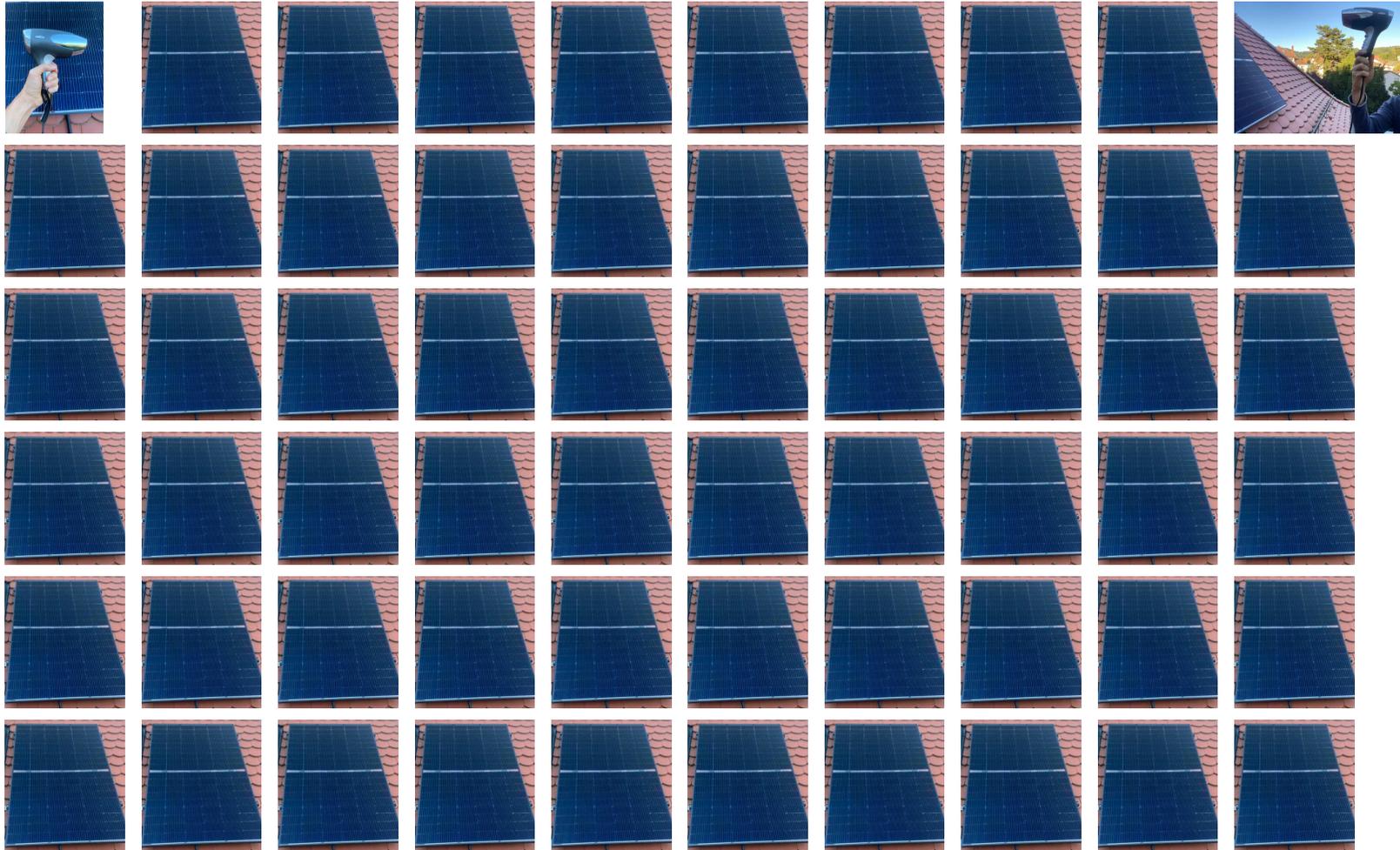
Mein Balkonsolarmodul (1,15m x 1,75m, 360 W) mit Südausrichtung hat an einem sonnigen Tag (7. August 2025) 1,8 kWh erzeugt, das war im Tagesdurchschnitt 75 W. Im Jahresdurchschnitt liefert es knapp 50 W. **Für meine 3 kW bräuchte ich 60 Balkonmodule.**

# Wieviele Solarmodule braucht man, um 3 kW zu erzeugen ?



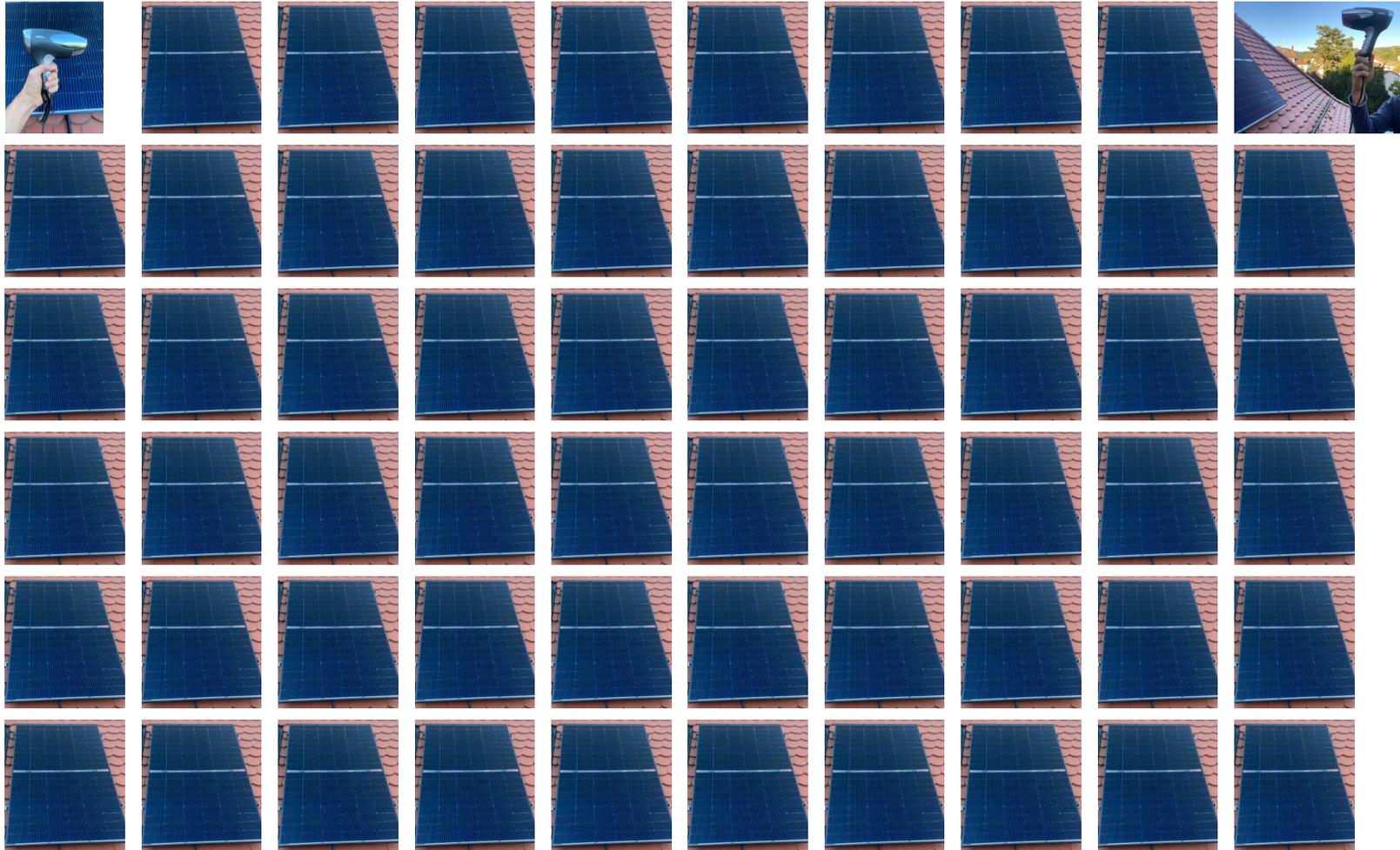
**60 Balkonmodule.**

# Wieviele Solarmodule braucht man, um 3 kW zu erzeugen ?



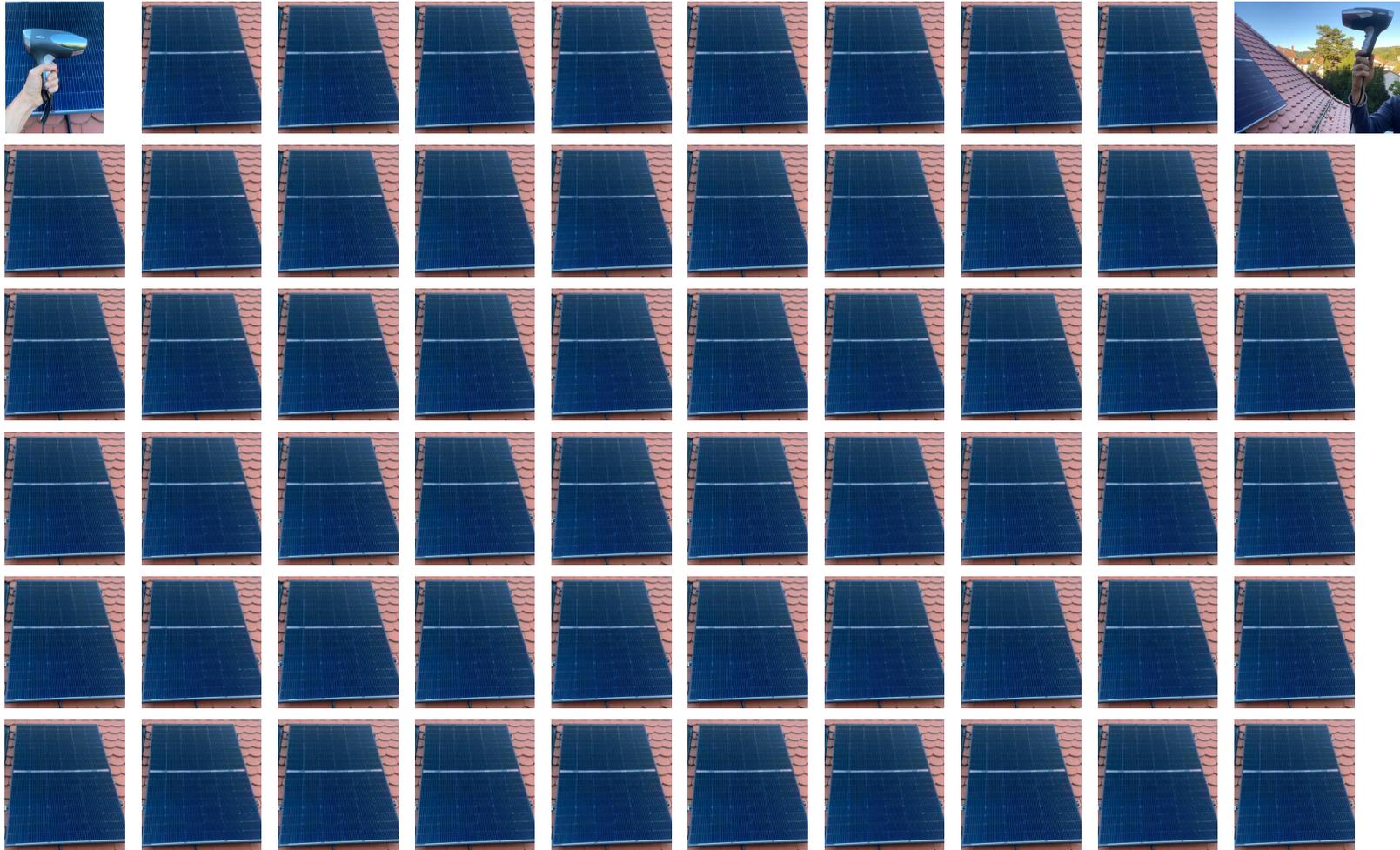
**60 Balkonmodule. Für jede Baden-Württemberger\*in.**

# Wieviele Solarmodule braucht man, um 3 kW zu erzeugen ?



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

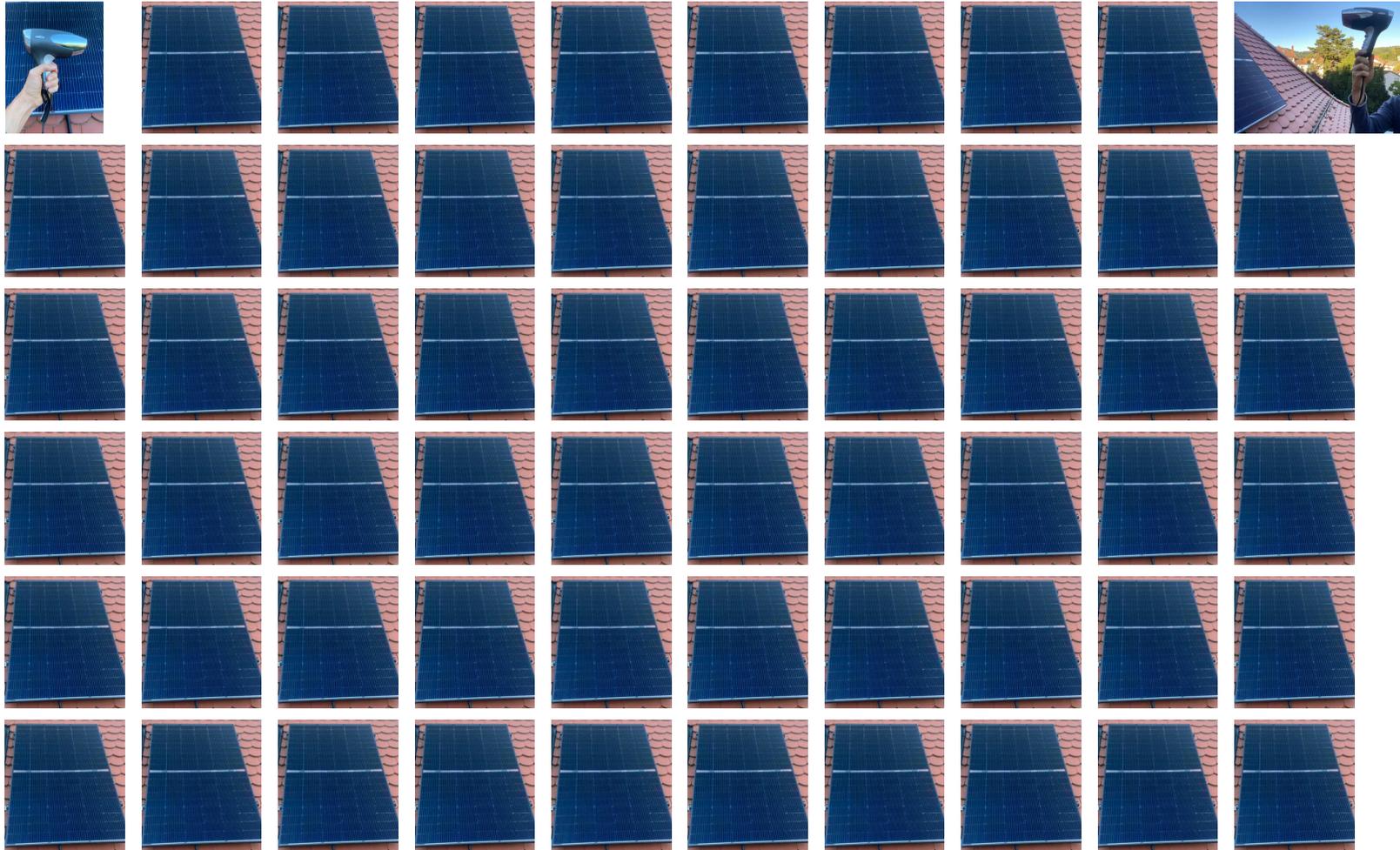
# Wieviele Solarmodule braucht man, um 3 kW zu erzeugen ?



**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 3,6m<sup>2</sup> 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  $20 \cdot 8760 \text{h} \cdot 3 \text{ kW} = 525600 \text{ kWh}$ .

## 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  $20 \cdot 8760 \text{h} \cdot 3 \text{ kW} = 525600 \text{ kWh}$ .

# 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  $20 \cdot 8760 \text{h} \cdot 3 \text{ kW} = 525600 \text{ kWh}$ .

## 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  $20 \cdot 8760 \text{h} \cdot 3 \text{ kW} = 525600 \text{ kWh}$ .

# 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  $20 \cdot 8760 \text{h} \cdot 3 \text{ kW} = 525600 \text{ kWh}$ .

## 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  $20 \cdot 8760 \text{h} \cdot 3 \text{ kW} = 525600 \text{ kWh}$ .

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  $20 \cdot 8760 \text{h} \cdot 3 \text{ kW} = 525600 \text{ kWh}$ .

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!**

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

Solarstromerzeugung im Januar um 90% kleiner als im Juni

Monthly solar power generation

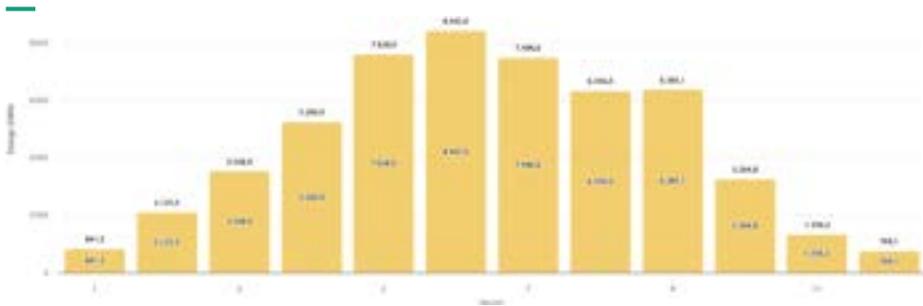
Year 2023



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

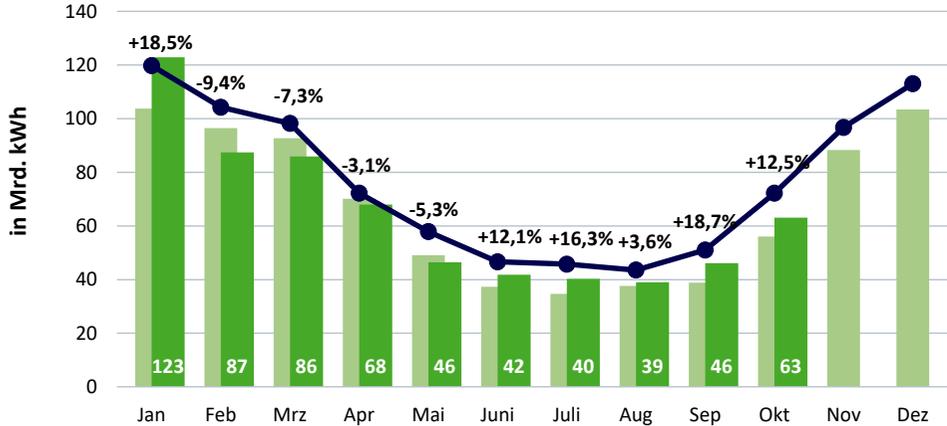
Solarstromerzeugung im Januar um 90% kleiner als im Juni

Monthly solar power generation  
Year 2023



## Monatlicher Erdgasverbrauch in Deutschland

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



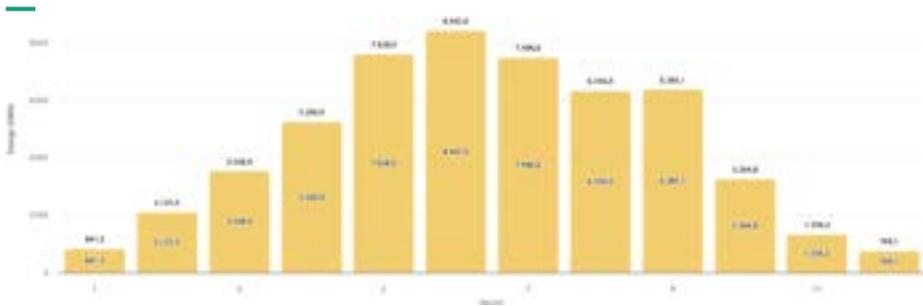
Quelle: BDEW, Stand 11/2024

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

Solarstromerzeugung im Januar um 90% kleiner als im Juni

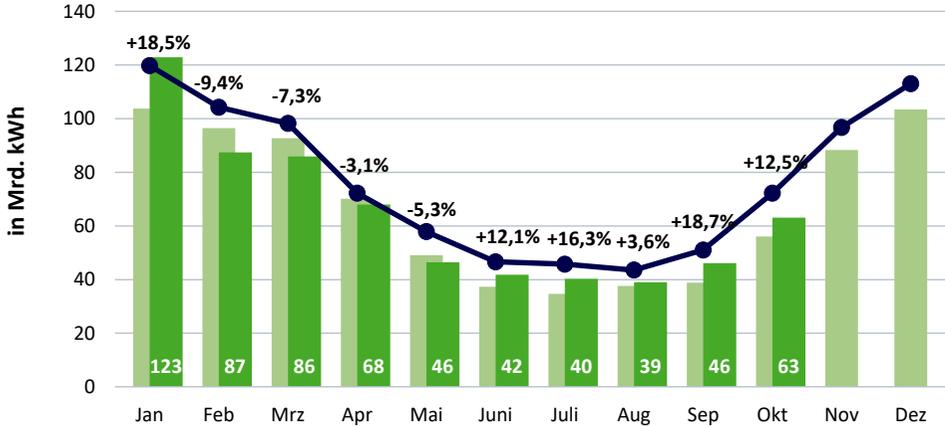
Monthly solar power generation

Year 2023



## Monatlicher Erdgasverbrauch in Deutschland

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



Aktuell dient fossiles Gas als "Pufferspeicher" für den Winterheizbedarf

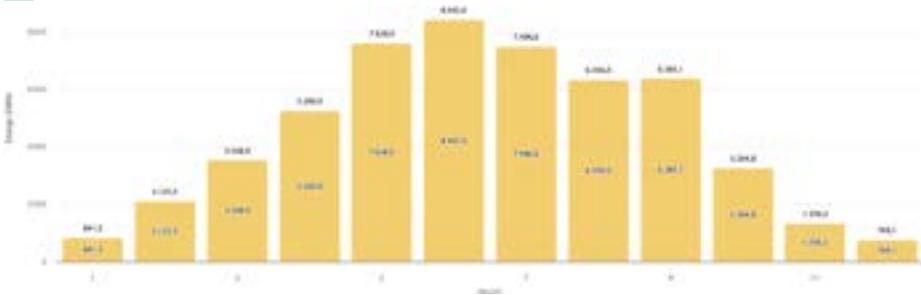
Quelle: BDEW, Stand 11/2024

# Ein glücklicher Zufall

Solarstromerzeugung im Januar um 90% kleiner als im Juni

Monthly solar power generation

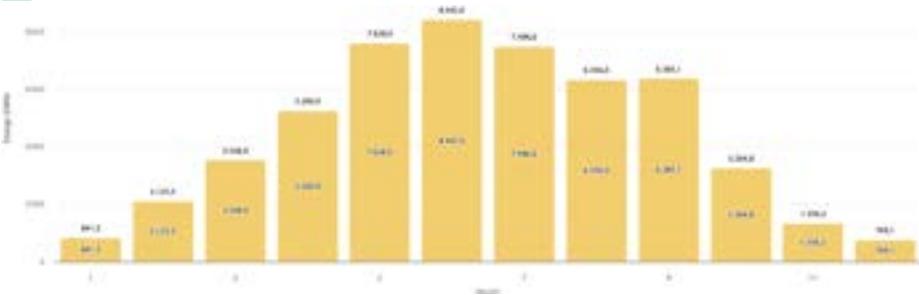
Year 2023



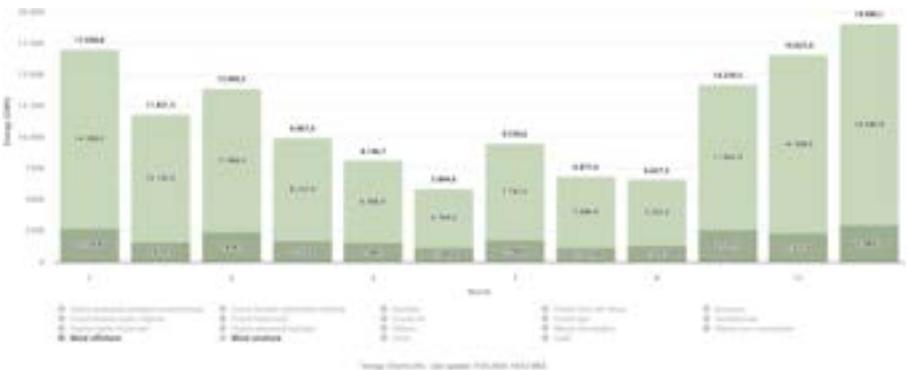
# Ein glücklicher Zufall

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?en&c=DE&month=1&stacking=stacked\\_grouped&year=2023&partsum=1](https://www.energy-charts.info/charts/energy/chart.htm?en&c=DE&month=1&stacking=stacked_grouped&year=2023&partsum=1)

\*Data on public power generation

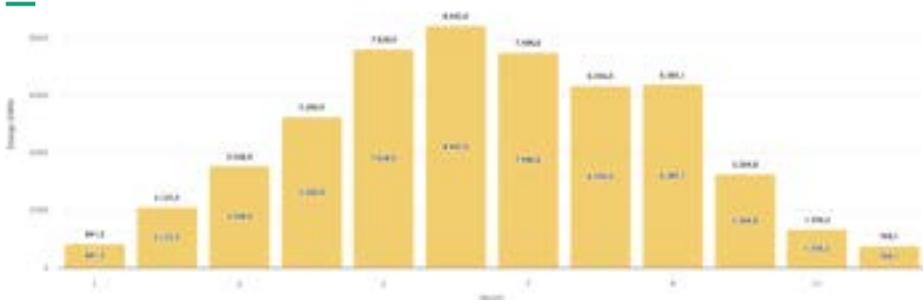
# Ein glücklicher Zufall

Solarstromerzeugung im Januar um 90% kleiner als im Juni

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

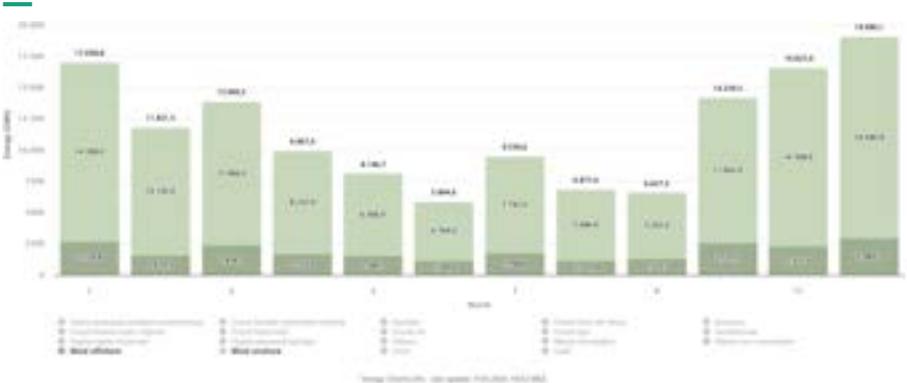
Monthly solar power generation

Year 2023



Monthly wind power generation onshore and offshore

Year 2023



Source: [https://www.energy-charts.info/charts/energy/chart.htm?m=DE&month=1&stacking=stacked\\_grouped&year=2023&partsum=1](https://www.energy-charts.info/charts/energy/chart.htm?m=DE&month=1&stacking=stacked_grouped&year=2023&partsum=1)

\*Data on public power generation

# Neue E-138 Windturbine Freiburg-Holzschlägermatte

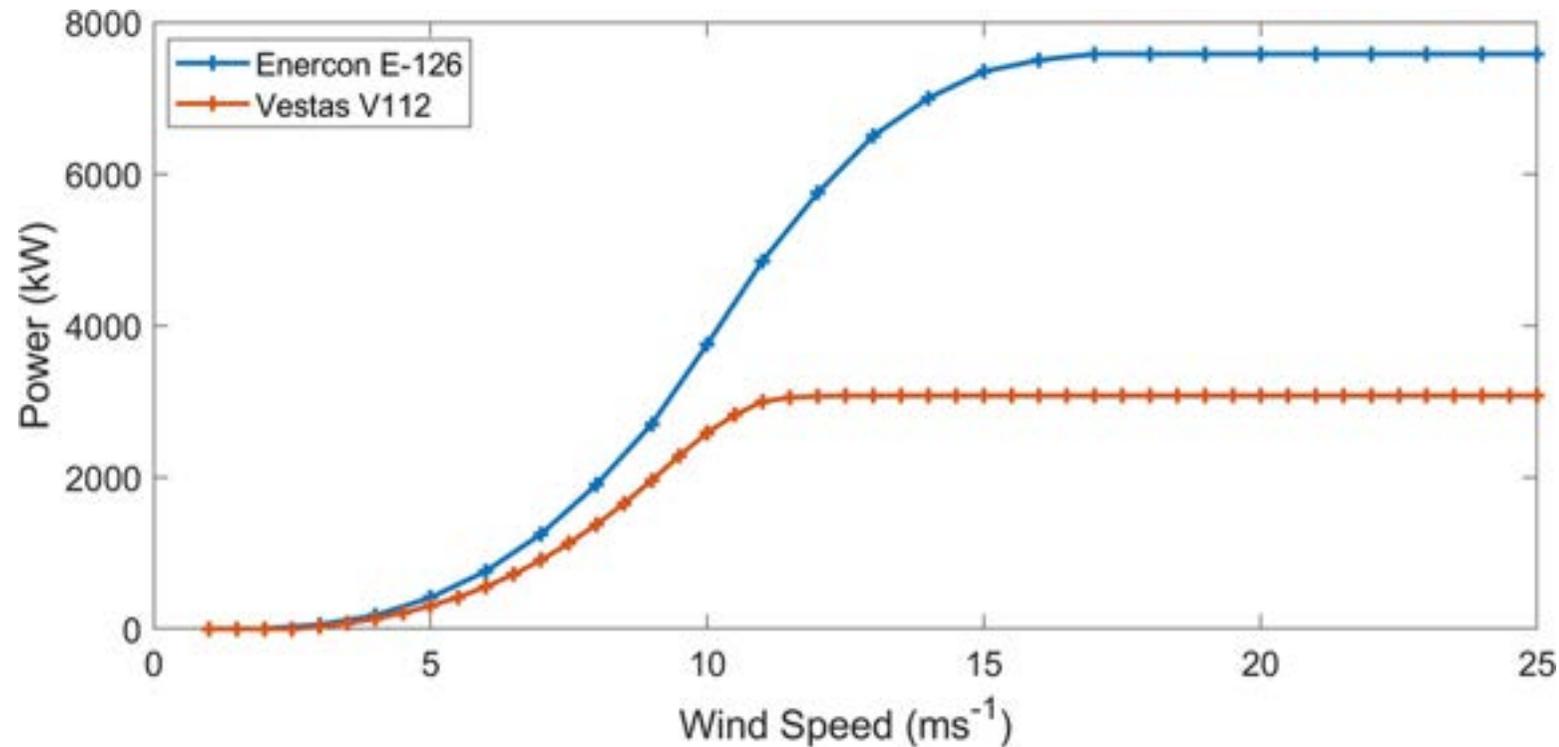
(Studierenden-Besichtigung mit Tim Schober, Ökostromgruppe, am 10.7.2025)



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

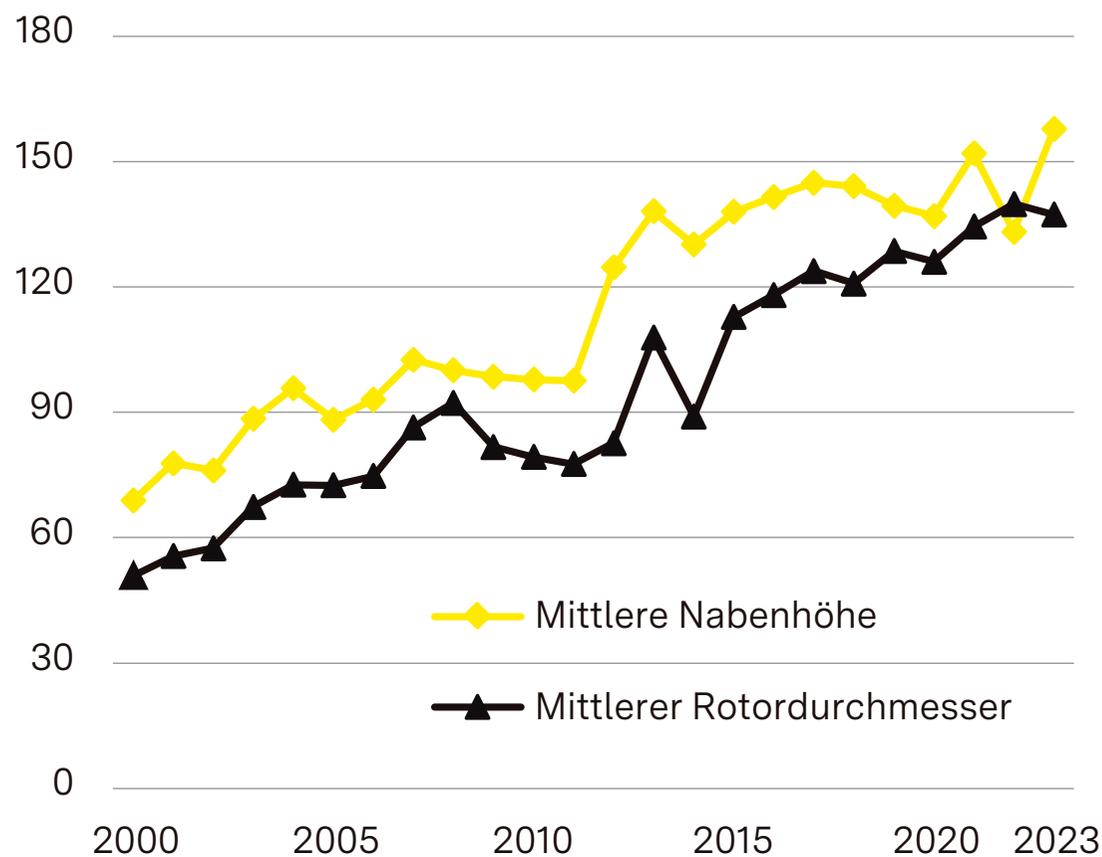
Windturbine versorgt 333 Personen mit je 3 kW, also

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

# Erneuerbare Energien

in Baden-Württemberg 2023

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)

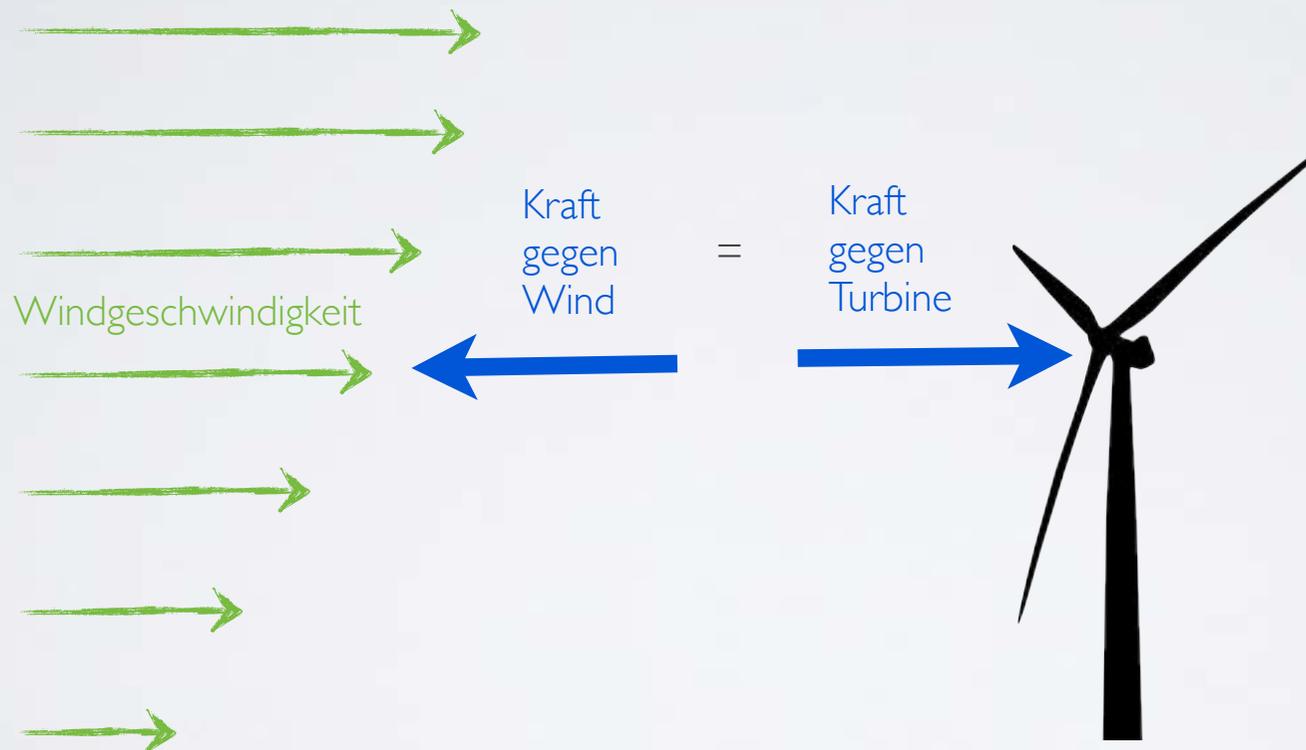


B) Turmfrei = Flugwindenergie



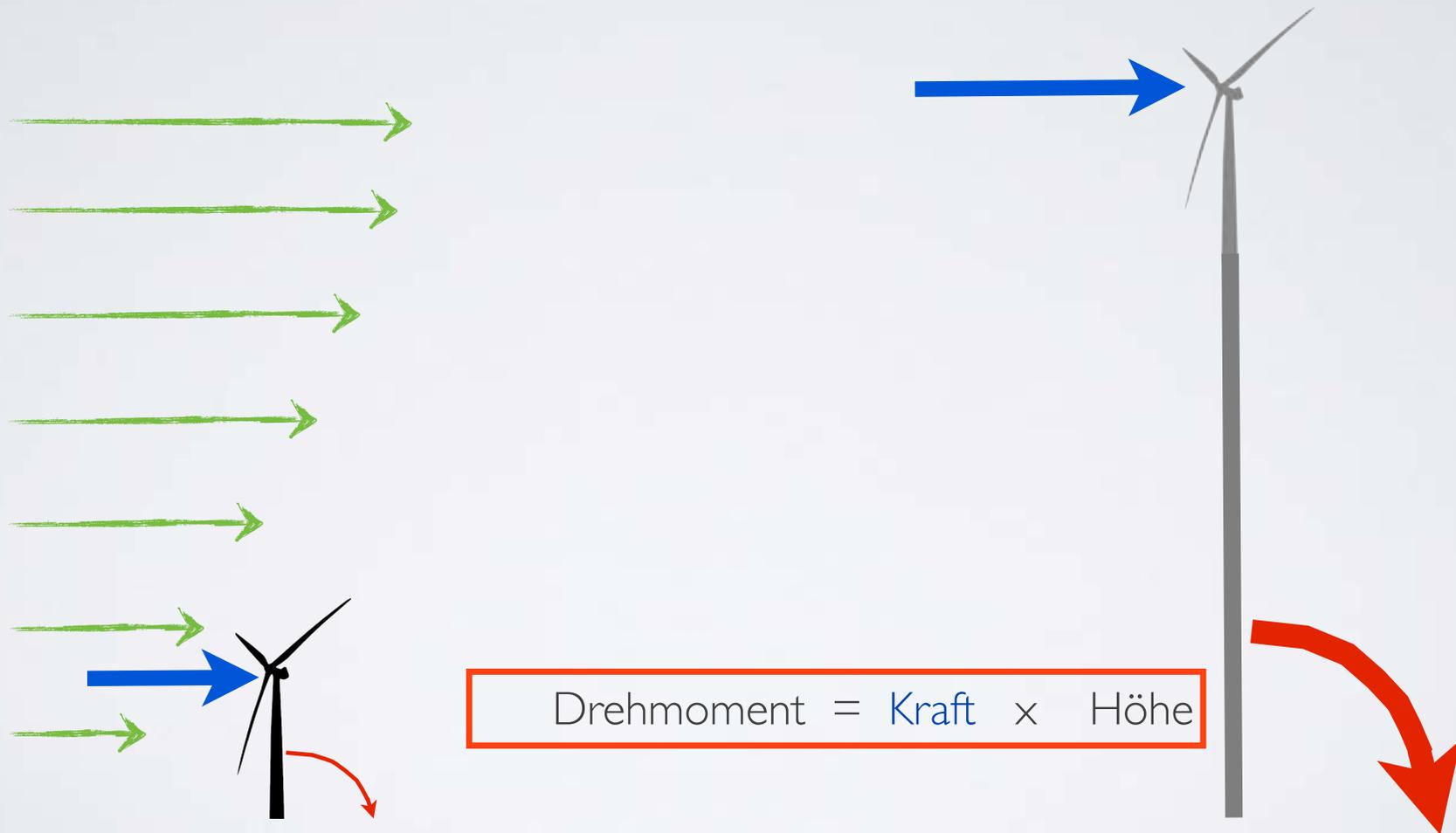
# Leistung: Kraft x Windgeschwindigkeit

“Ohne Kraft gegen den Wind keine Windenergie”



# Eine 500m hohe Turbine ist schwer zu bauen

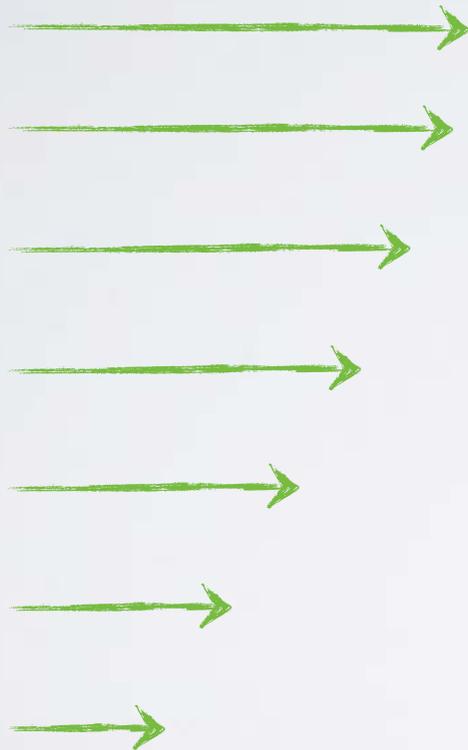
Langer Hebel führt zu großem Drehmoment



Ohne Kraft kann keine Windenergie geerntet werden

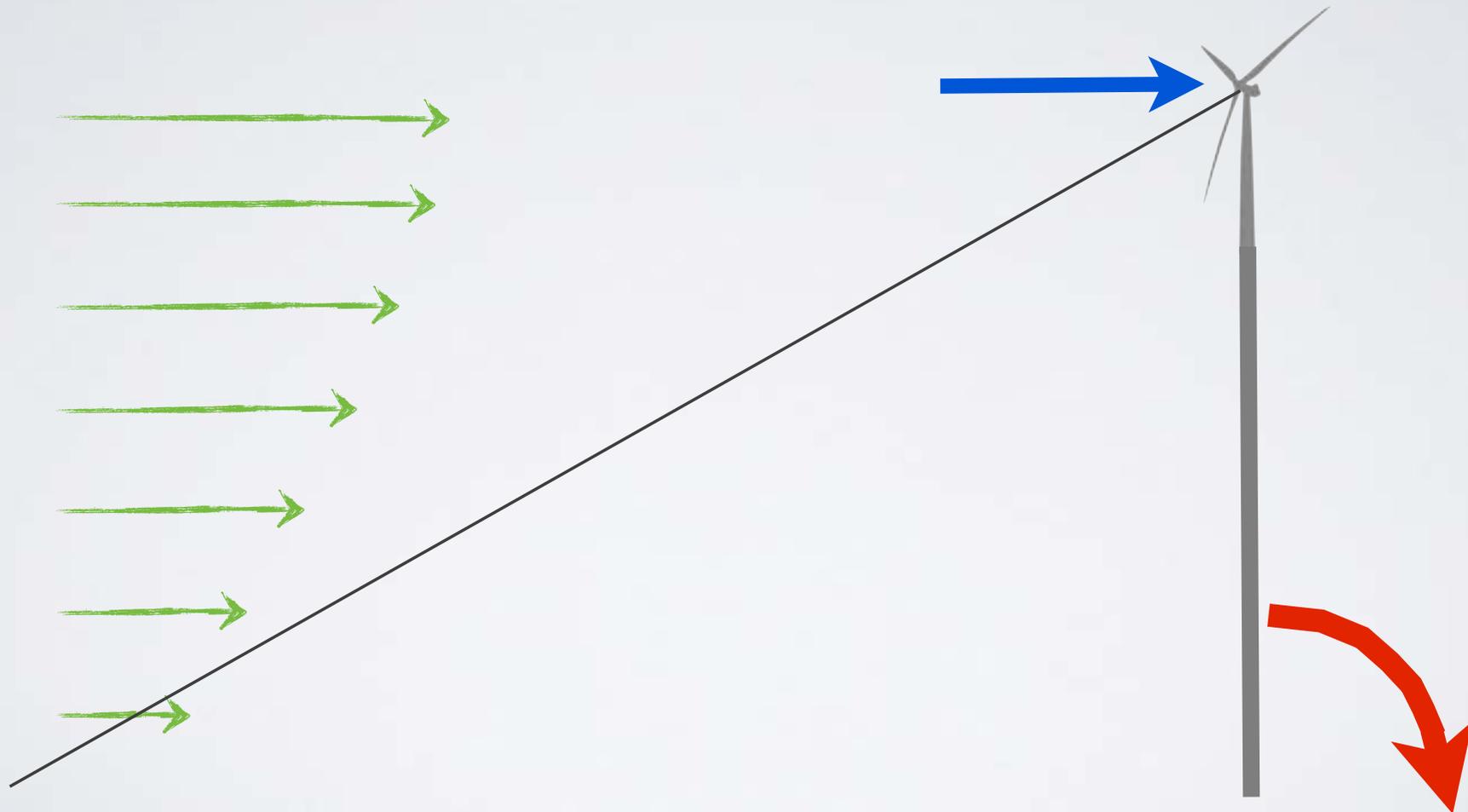
# Eine 500m hohe Turbine ist schwer zu bauen

Langer Hebel führt zu großem Drehmoment



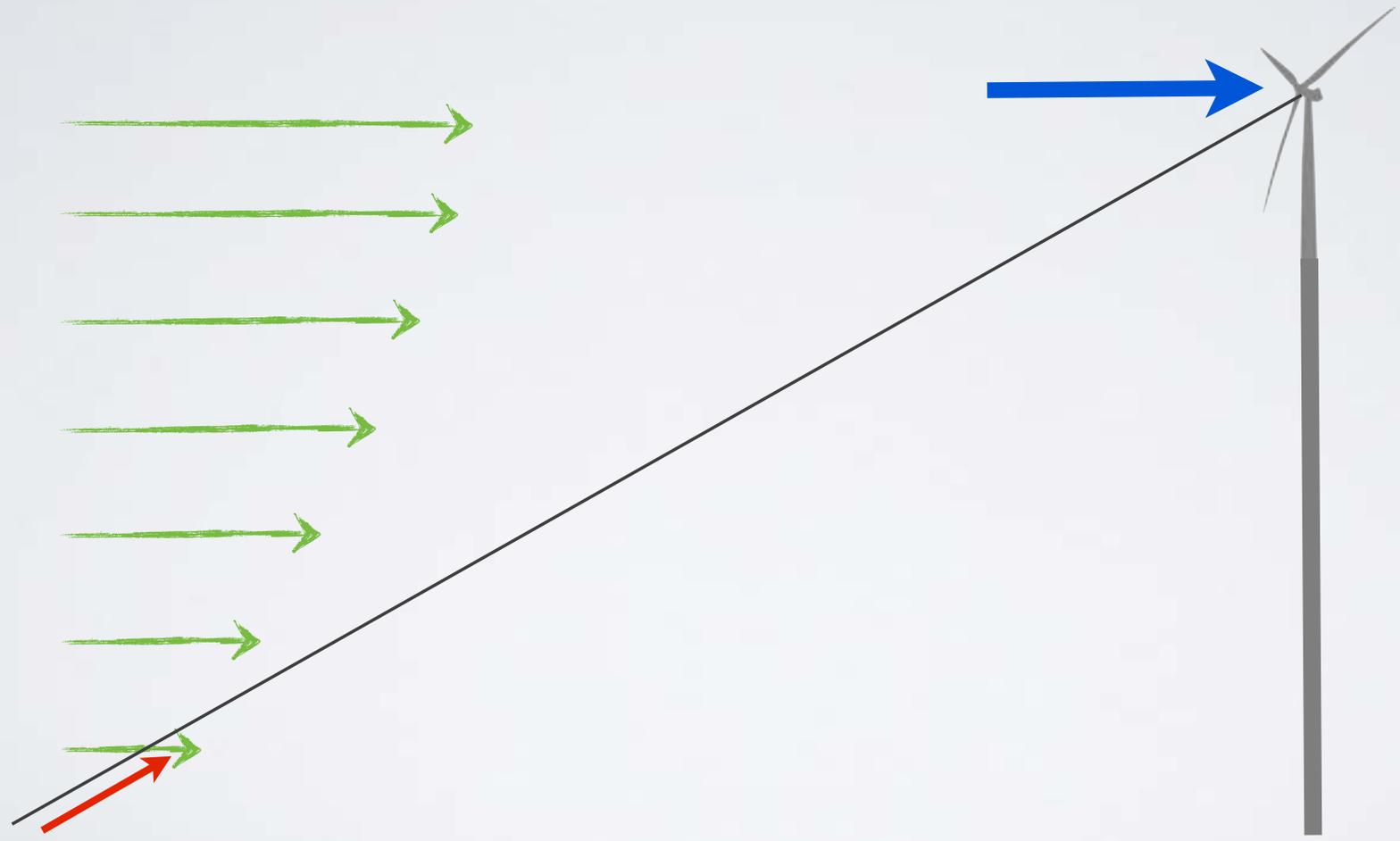
Ohne Kraft kann keine Windenergie geerntet werden

Eine 500m hohe Turbine ist schwer zu bauen



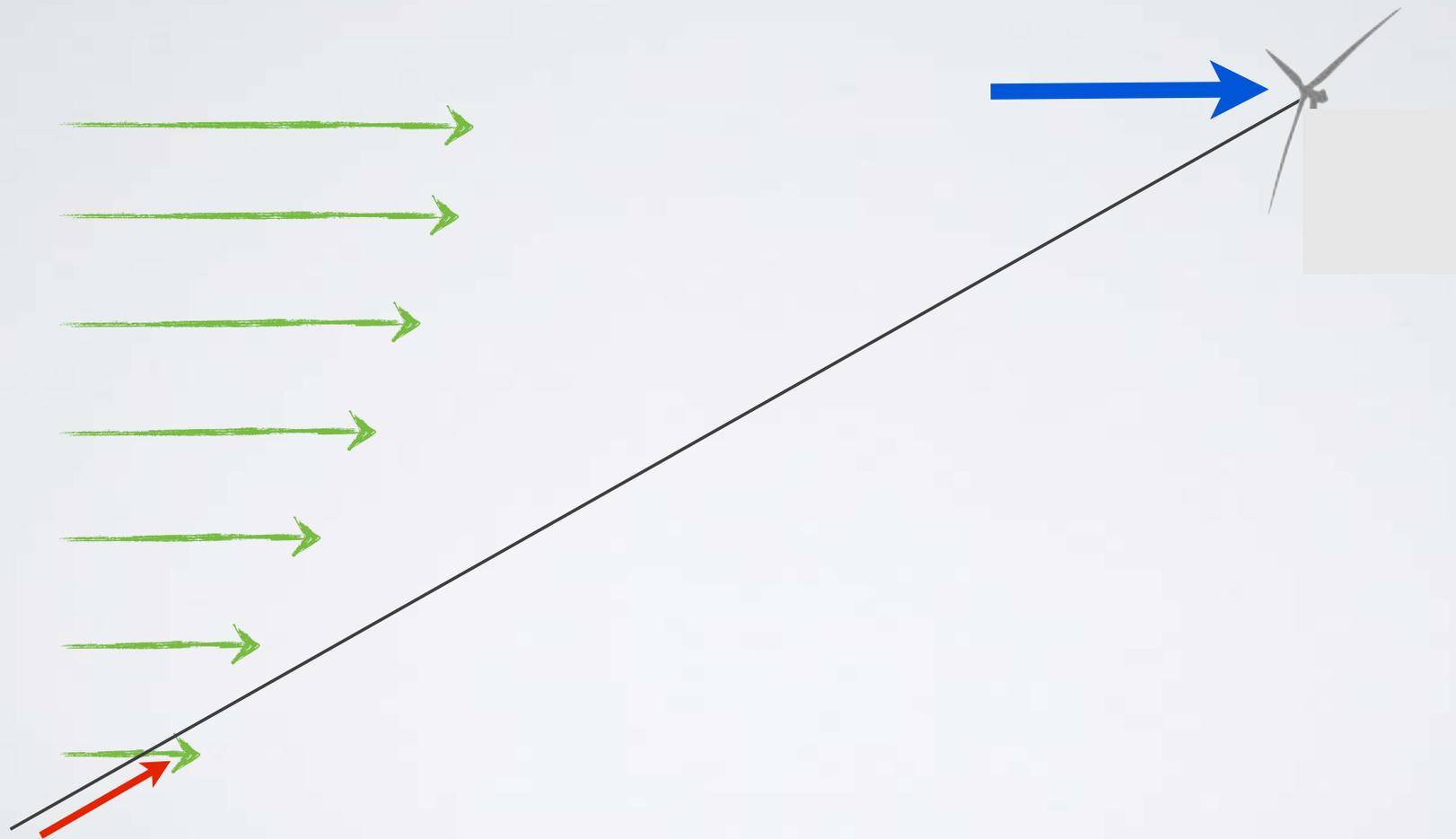
Ohne Kraft kann keine Windenergie geerntet werden

Eine 500m hohe Turbine ist schwer zu bauen



# Eine 500m hohe Turbine ist schwer zu bauen

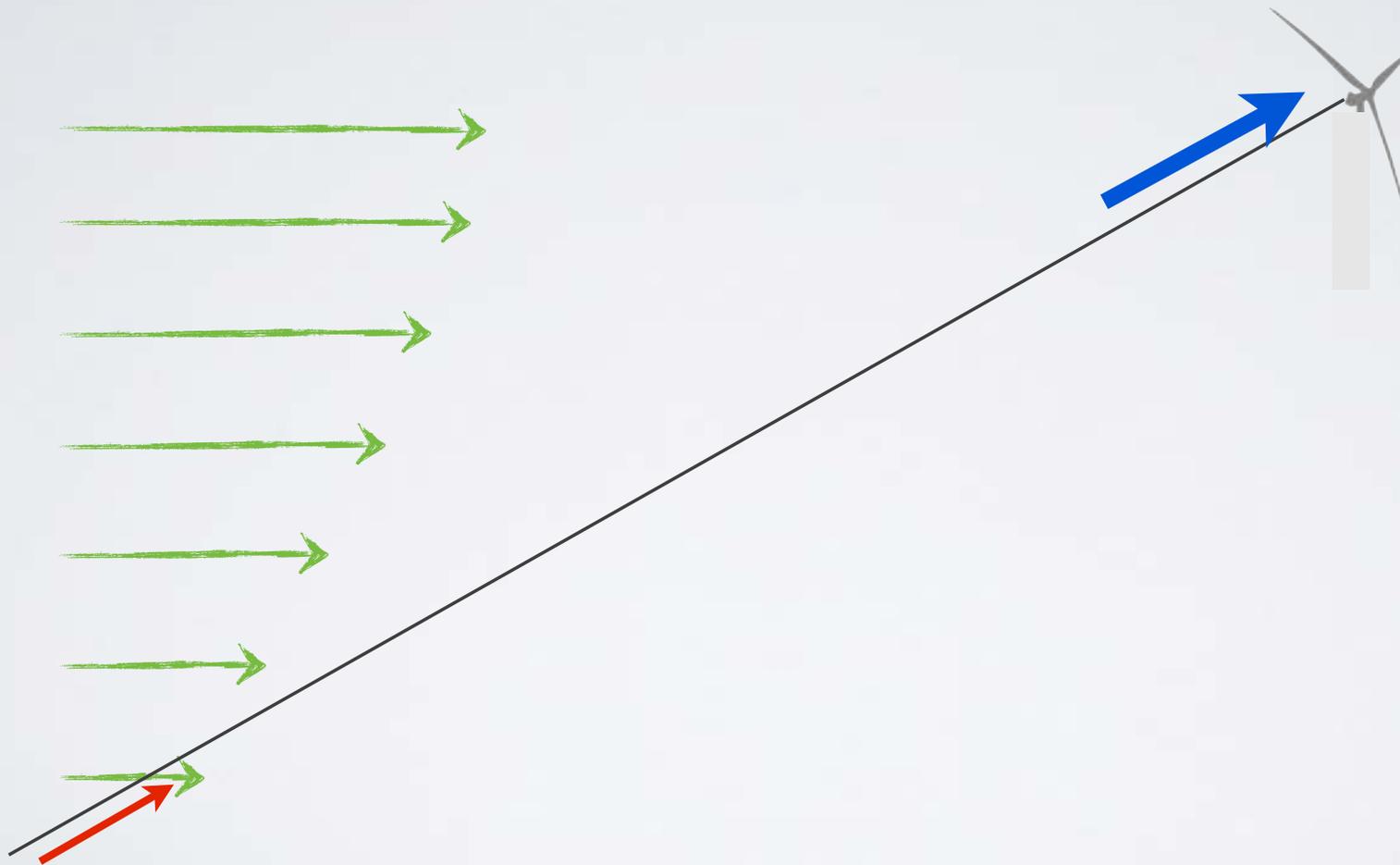
Ein Kabel kann die Kraft sehr effizient aufnehmen



Ohne Kraft kann keine Windenergie geerntet werden

# Eine 500m hohe Turbine ist schwer zu bauen

Ein Kabel kann die Kraft sehr effizient aufnehmen



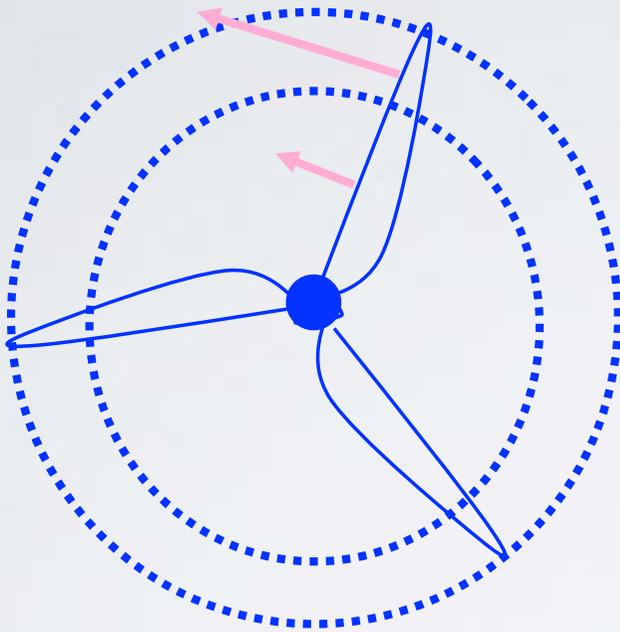
Ohne Kraft kann keine Windenergie geerntet werden

# Metamorphose einer Windturbine



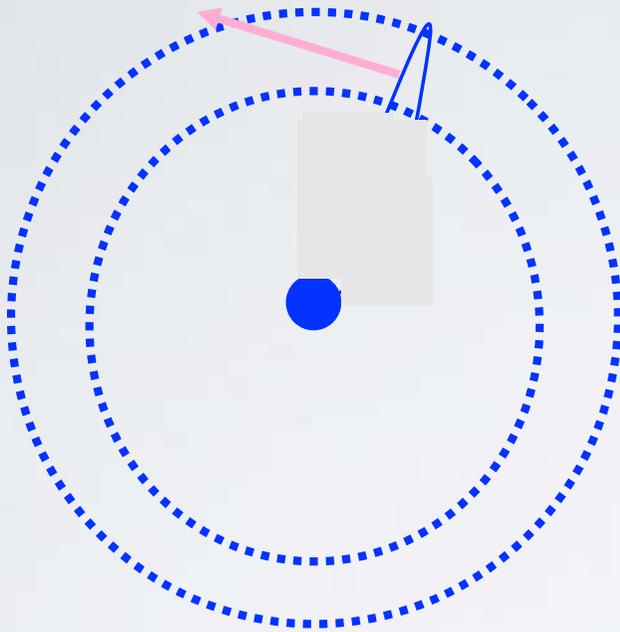
DER CROSSWIND-EFFEKT  
und  
zwei Varianten, damit Energie zu ernten

## Normale Windturbine



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

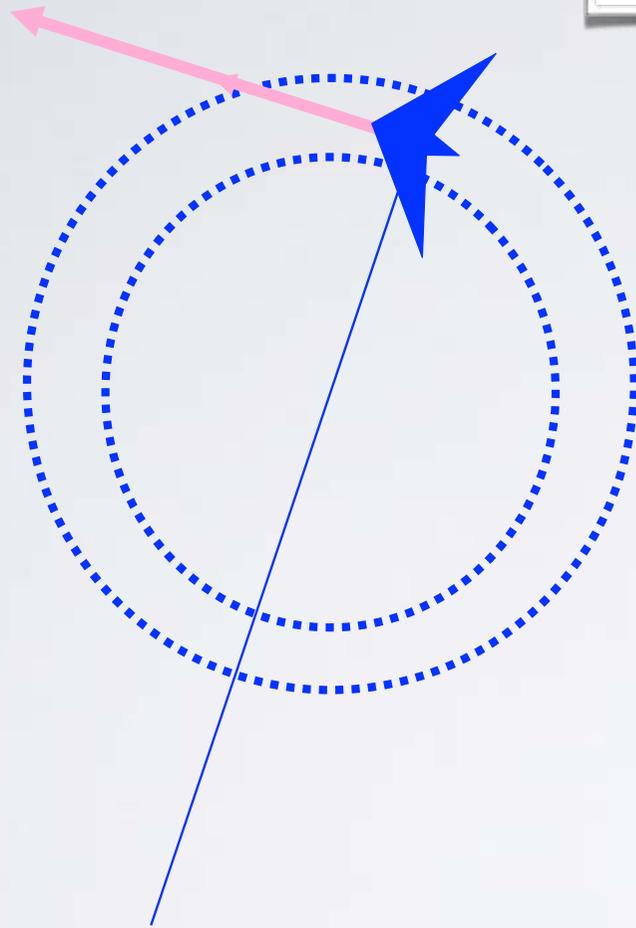
## Normale Windturbine



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

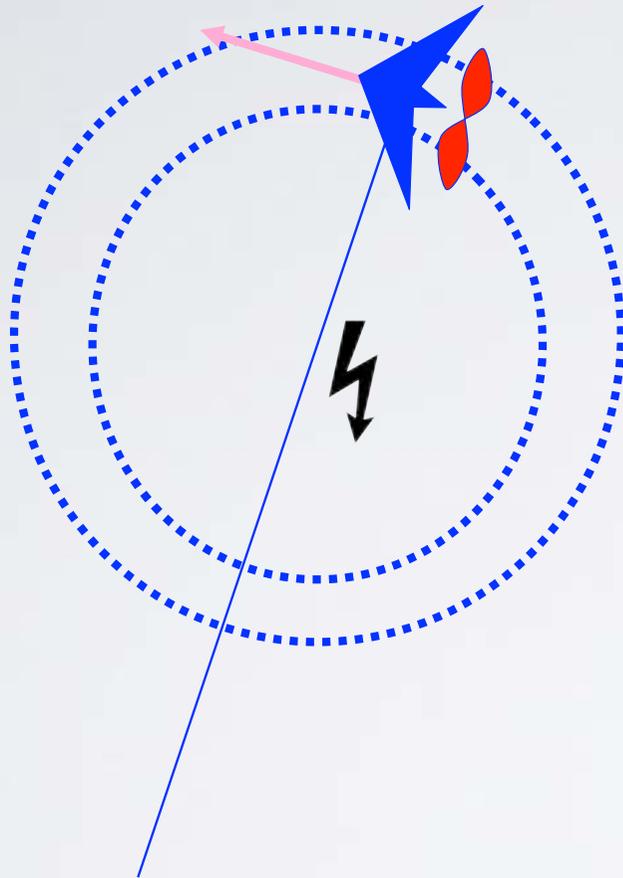


- Wind lässt Drachen schnelle Loopings fliegen
- Drachen fliegt **quer zum Wind**
- starke Zugkraft in der Leine: Kraft wächst quadratisch mit der Drachengeschwindigkeit

Aber wohin soll der **Generator** ?

(“Drachen” = fliegendes Objekt an einer Leine)

## Variante I: Drag Modus (Turbine an Bord)



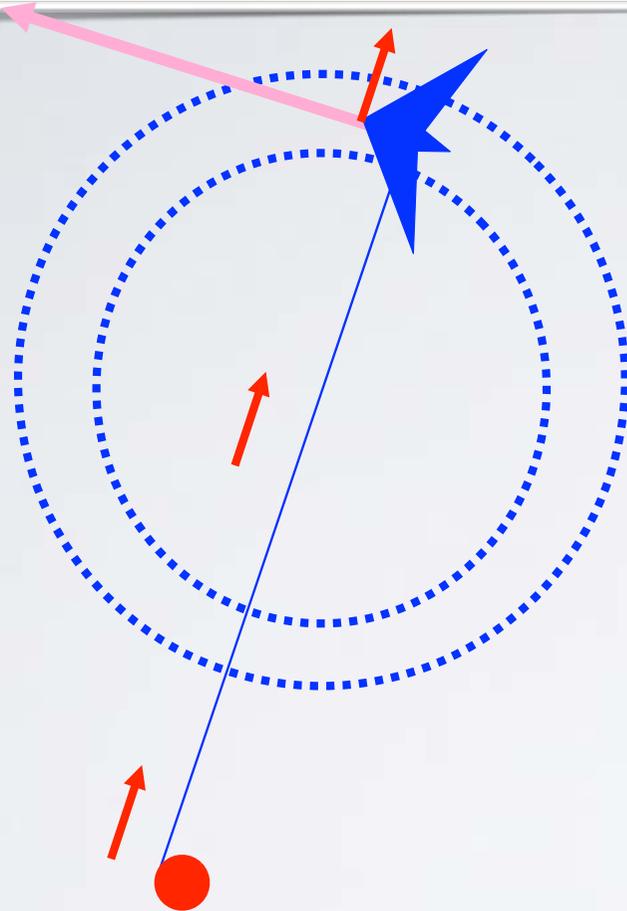
- effektiver Wind treibt kleine Windturbine an Bord des Drachens an
- Strom wird durch Kabel zum Grund geleitet

Vorteil: kleiner schnelldrehender Generator  
Nachteil: Kabel muss Hochspannung leiten

# A flying wind turbine (Makani Power, California)



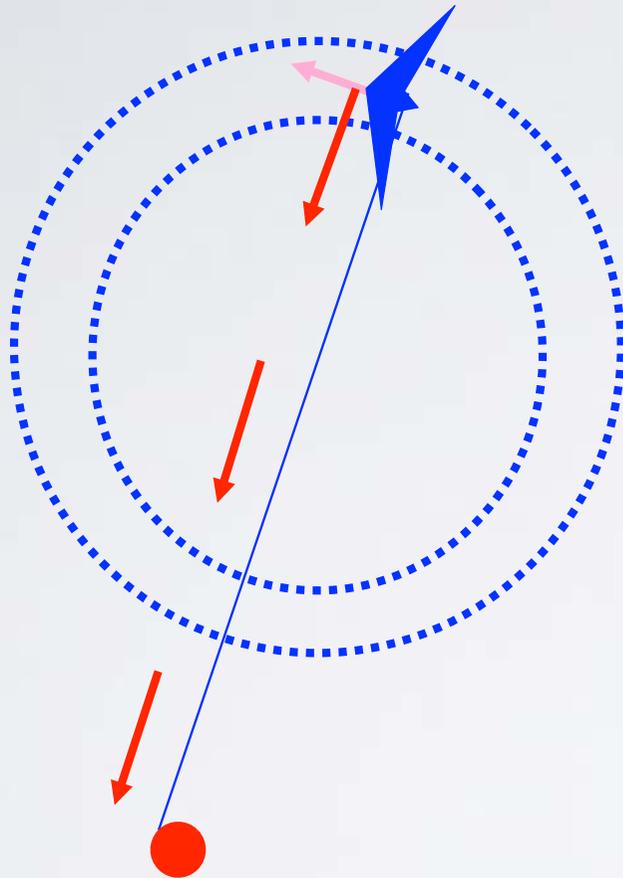
## Variante 2: Lift Modus (Generator am Boden)



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)



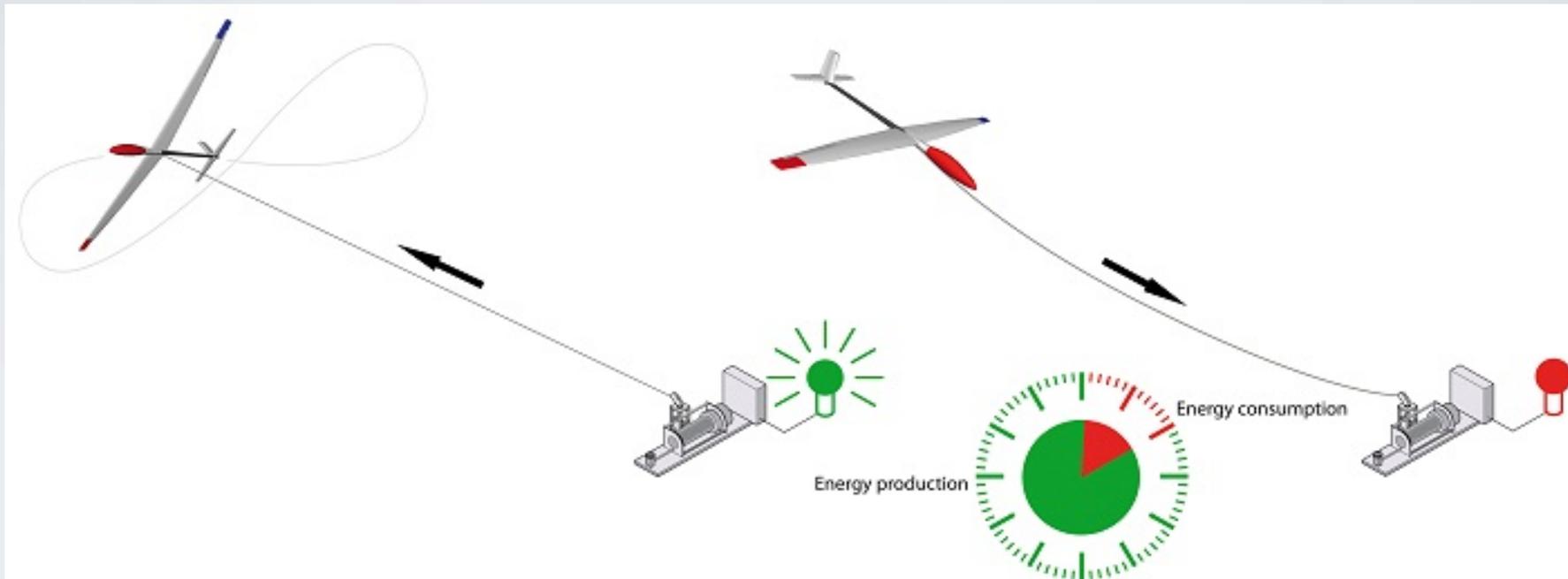
Pumpzyklus mit zwei Phasen:

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

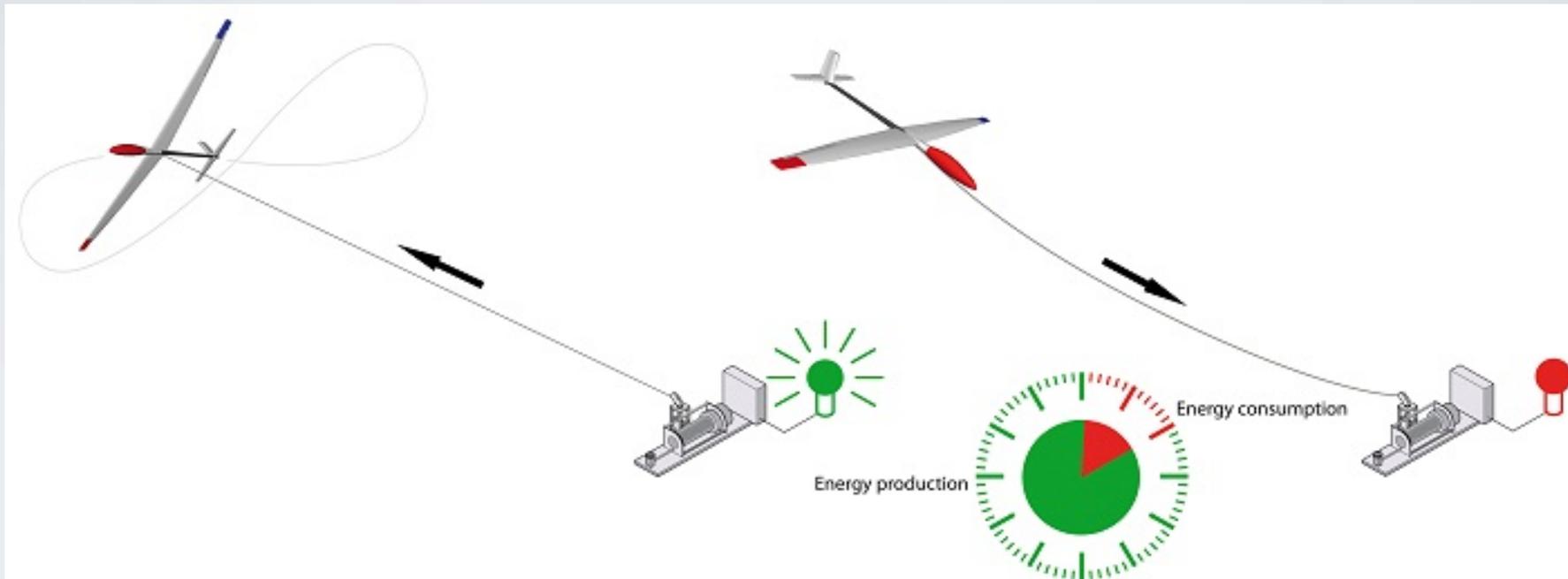
Vorteil: elektrische Maschine am Boden

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)

**AIRBORNE**  
**WIND ENERGY 2011**  
**CONFERENCE**

Flugwindenergiekonferenz 2011 in Leuven

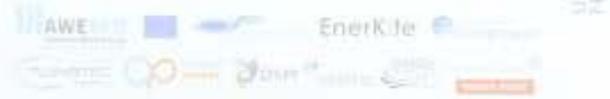


# Flugwindenergiekonferenz in Berlin

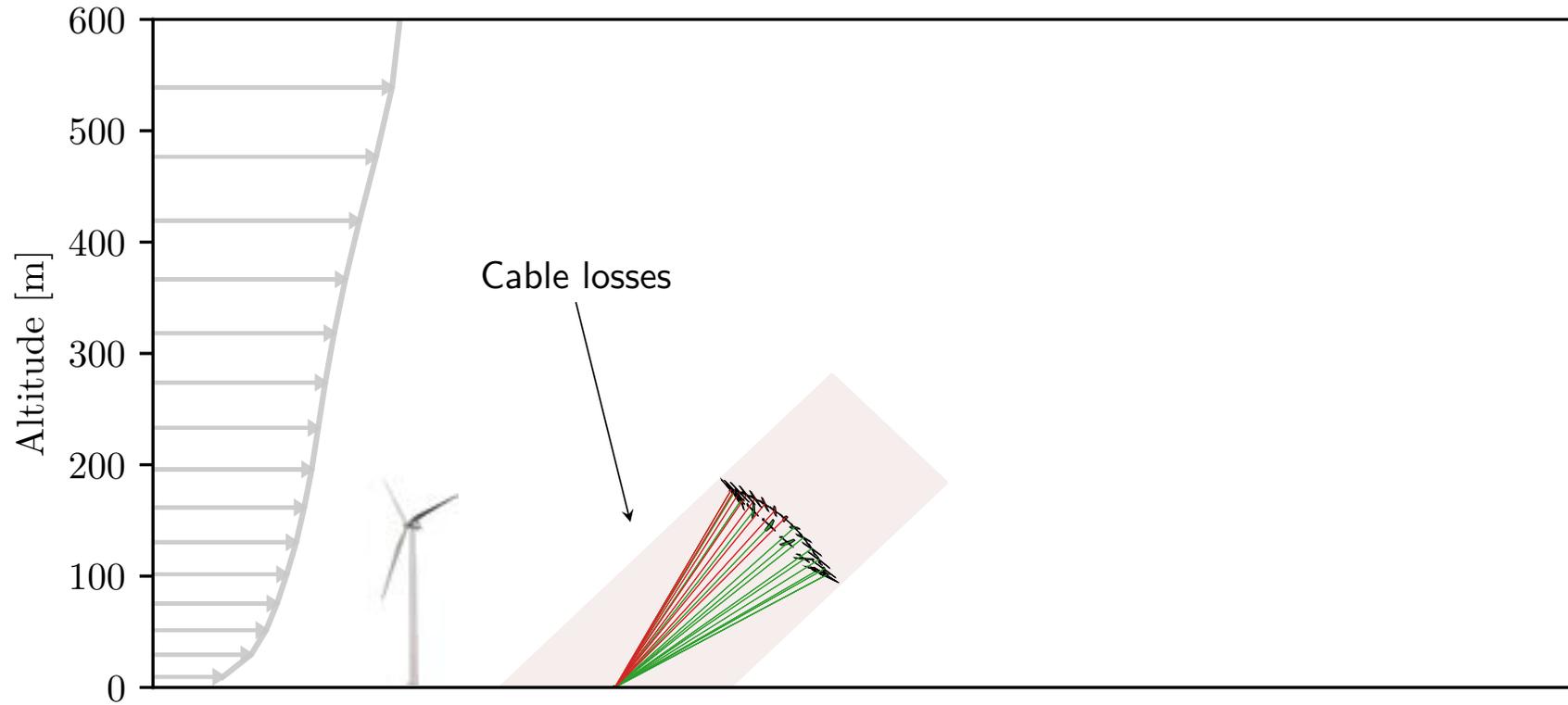


# Flugwindenergiekonferenz in Freiburg

October 5-6, 2017, Freiburg



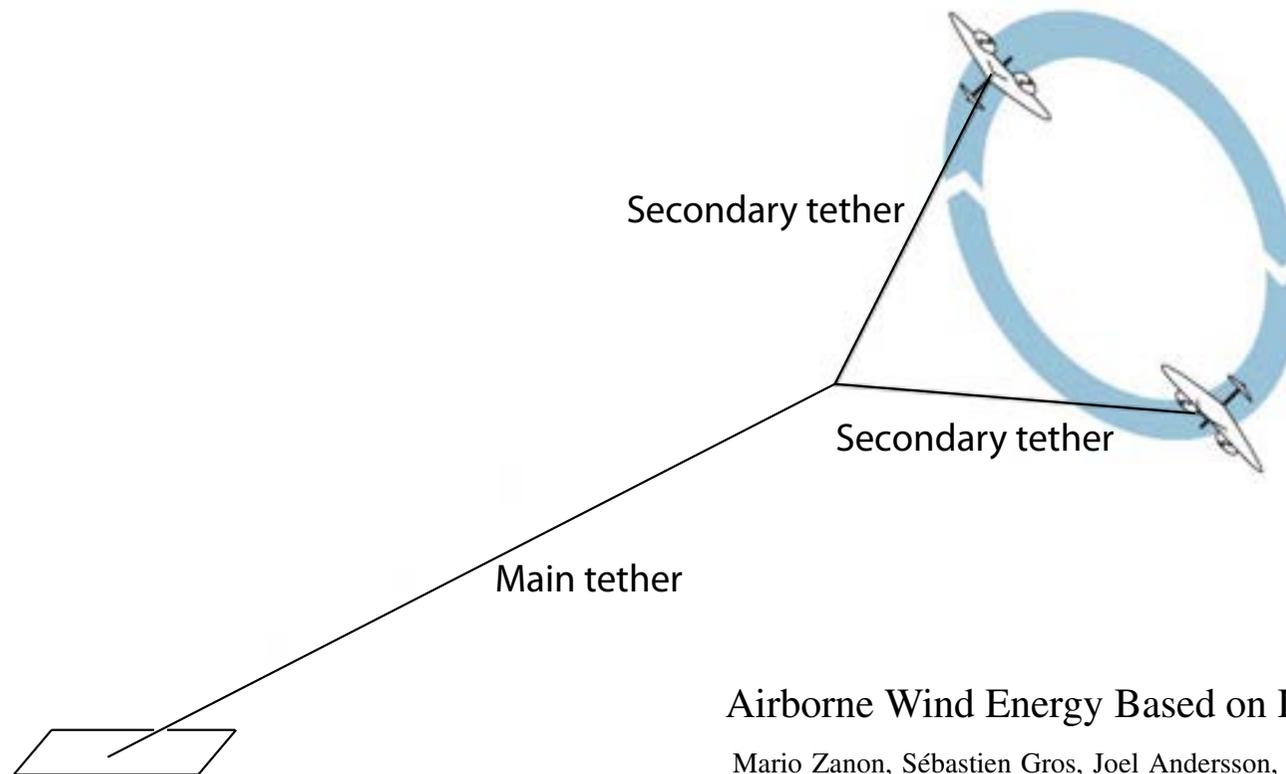
# Minimizing cable losses



Turbine image courtesy of Shutterstock

# Dual Kite Systems

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

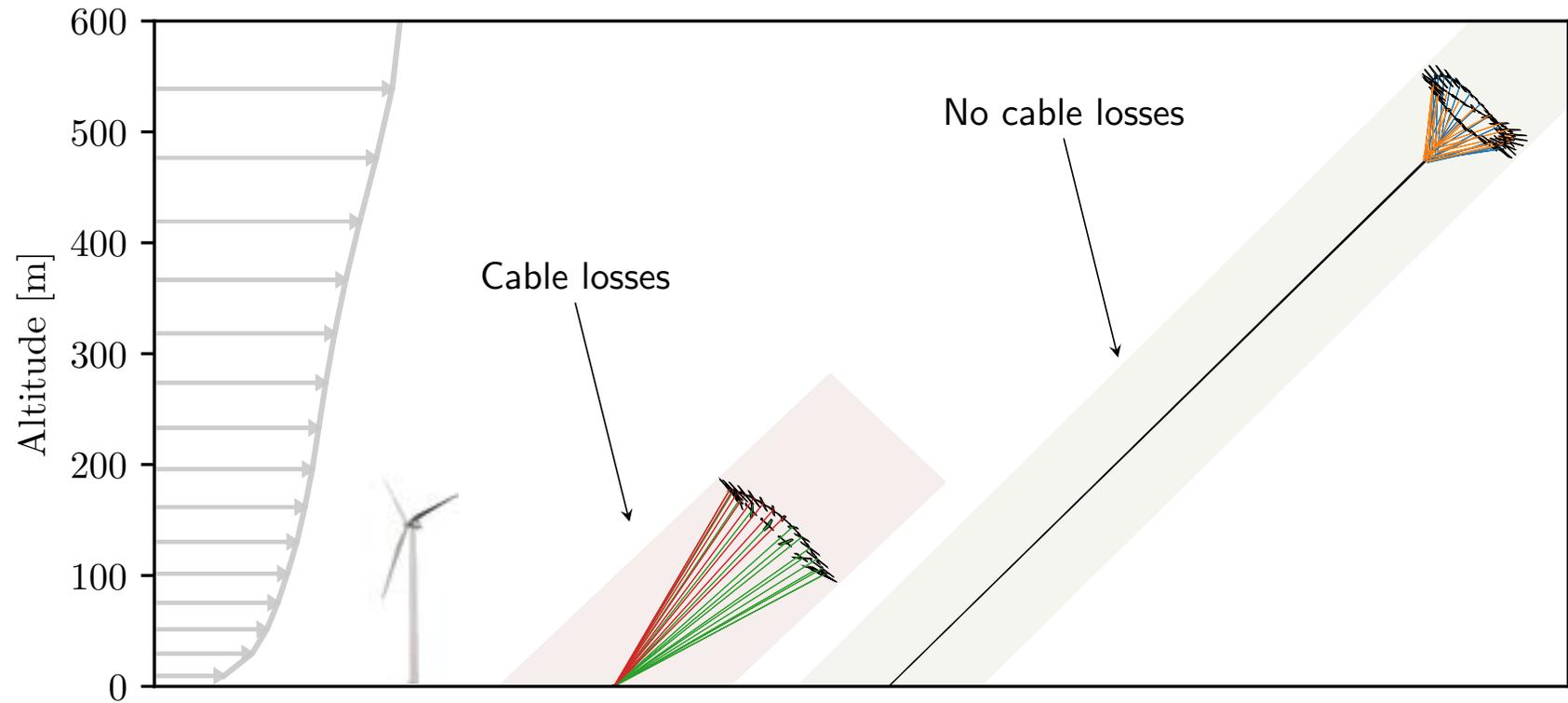


Airborne Wind Energy Based on Dual Airfoils

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

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

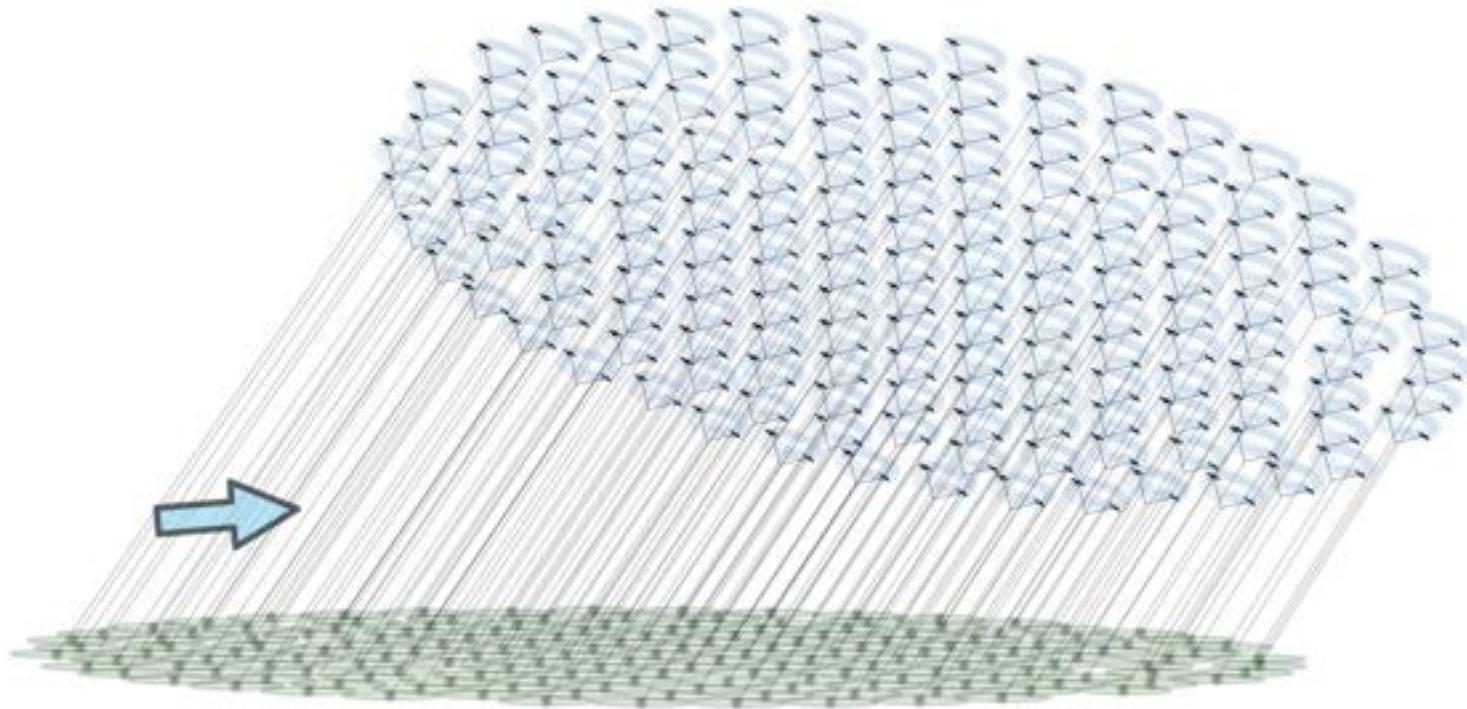
# Minimizing cable losses



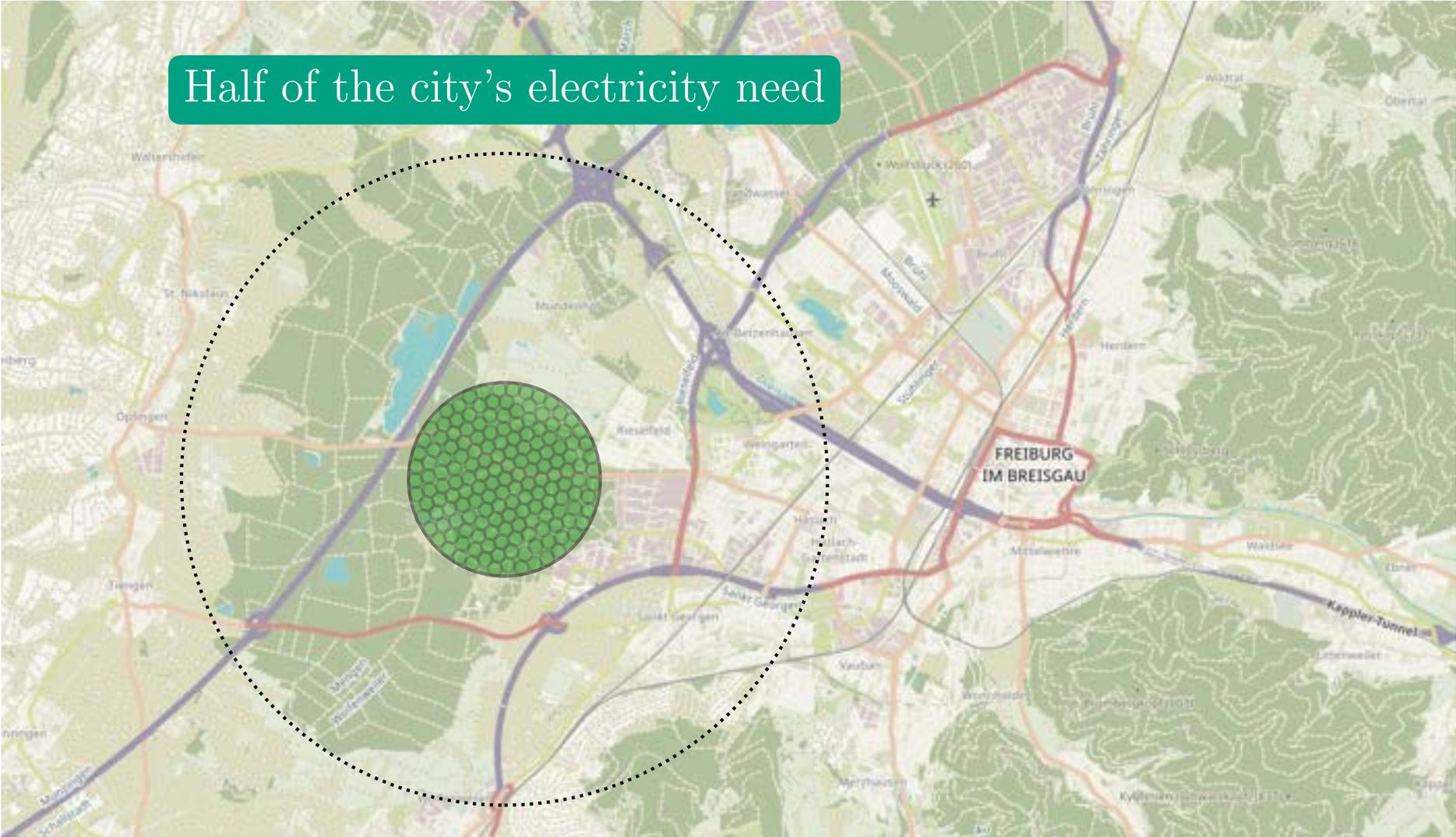
Turbine image courtesy of Shutterstock

# Vision of vertical wind farm

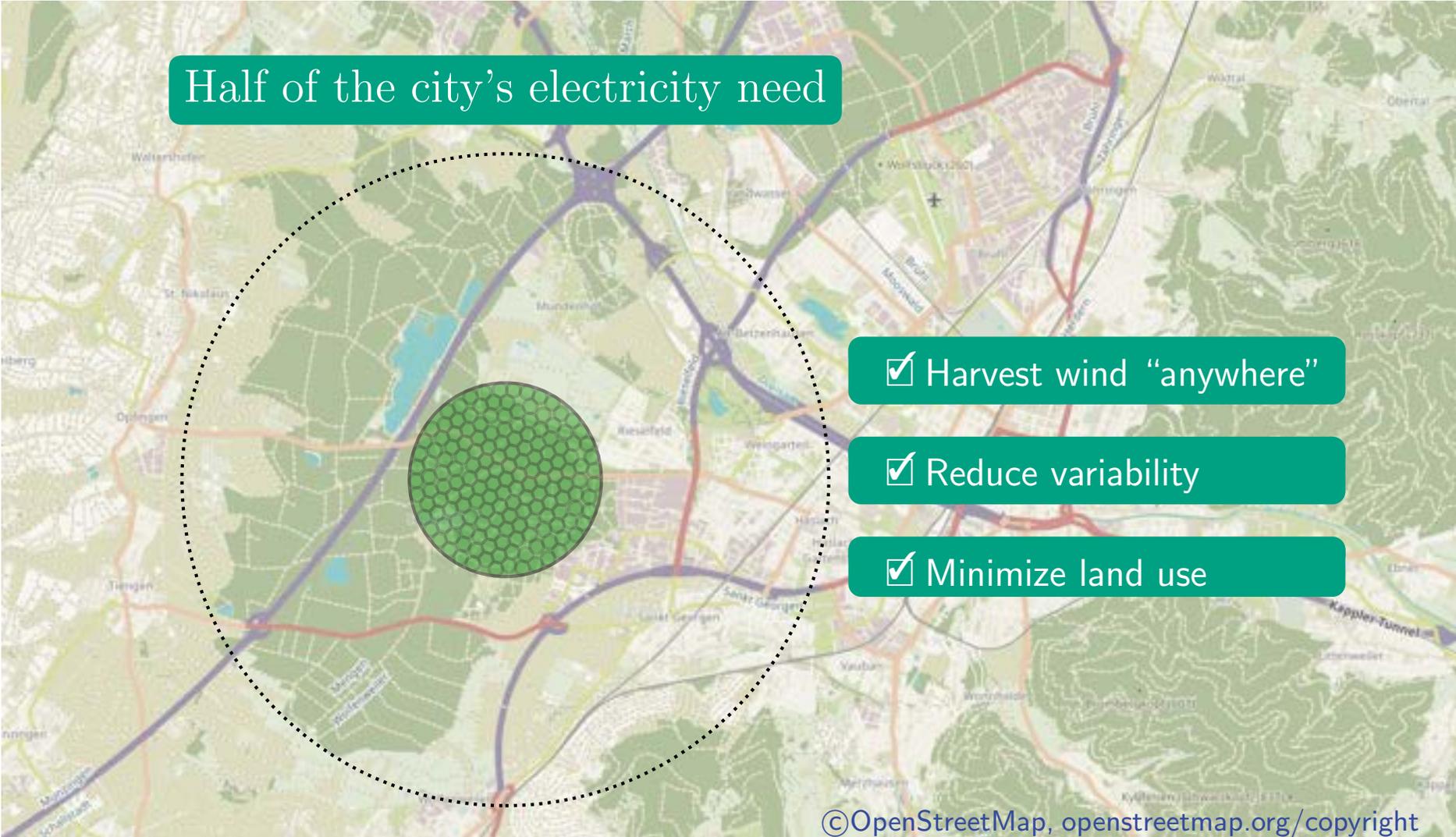
yearly average power density 7.5 MW/km<sup>2</sup> (conventional was 2.5 MW/km<sup>2</sup>),  
much less material needed



# 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

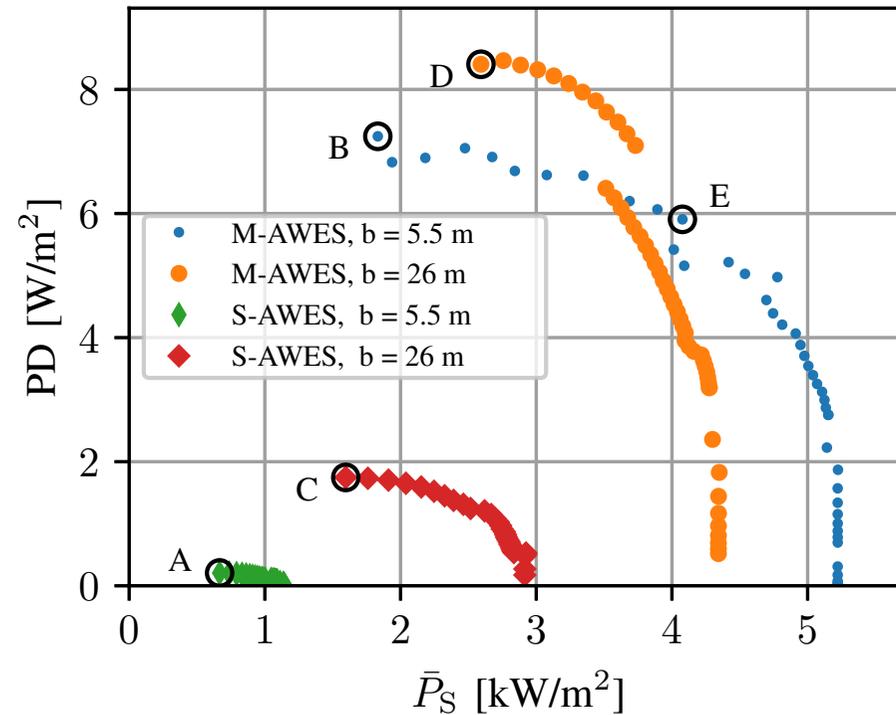
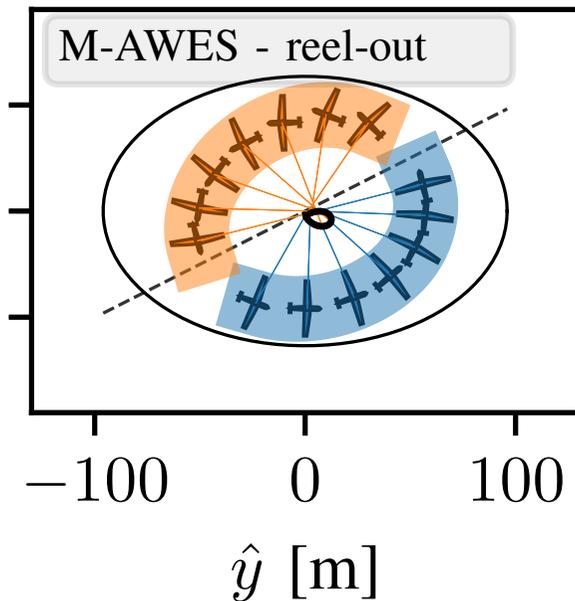


Fig. 4: Pareto efficiency front between power density and power per wing area for small- and moderate-size S-AWES and M-AWES.

[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 m<sup>2</sup> surface area and 36 kg weight, i.e. 12 kg per 1 m<sup>2</sup>.

At 7 m/s, design E delivers 4 kW/m<sup>2</sup>, and assuming a capacity factor of 50% one needs 1,5 m<sup>2</sup> 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/km<sup>2</sup>

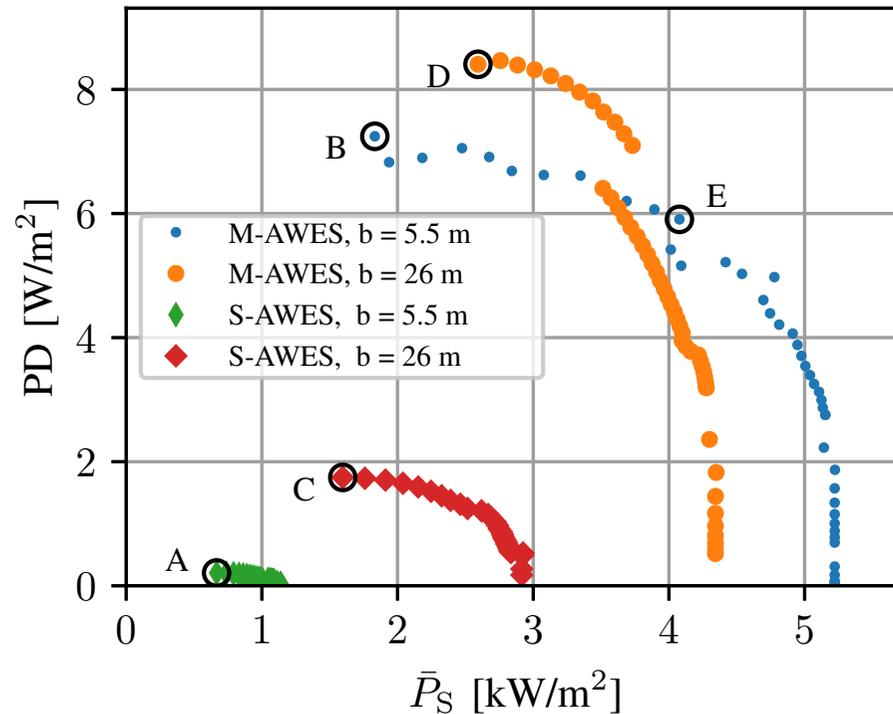
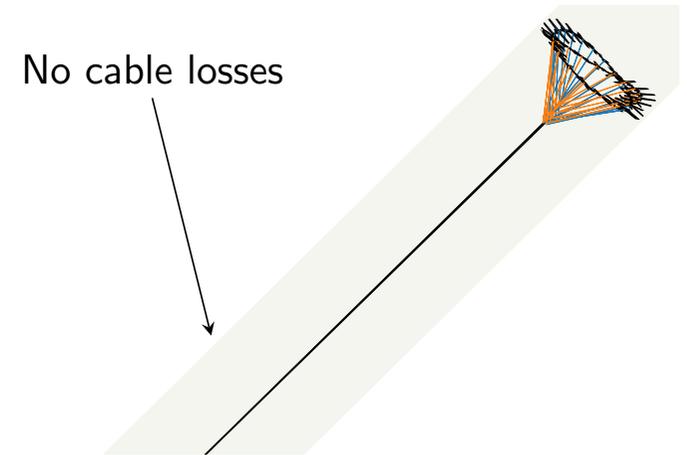


Fig. 4: Pareto efficiency front between power density and power per wing area for small- and moderate-size S-AWES and M-AWES.

[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

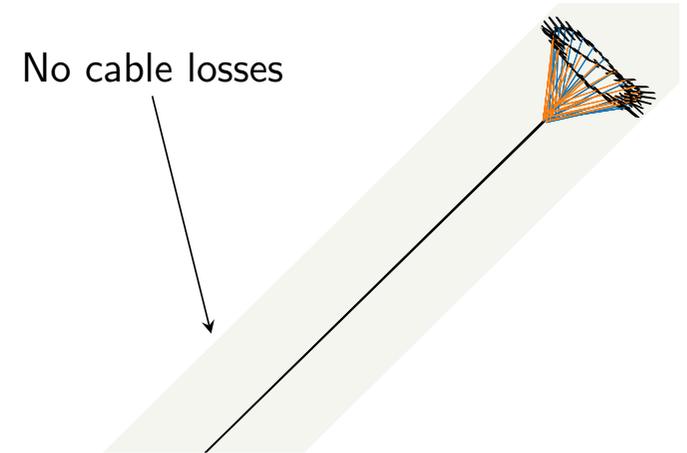
## Windturbinenanteil (0.3%):

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

## Flugwindenergieanlage:

- 18 kg Flügel mit 1,5 m<sup>2</sup>
- 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 m<sup>2</sup>**

## Erdöl:

- 45 Tonnen
- 19 800 EUR

## Windturbinenanteil (0.3%):

- 12 Tonnen (1,8 t Stahl, 180 kg Rotor)
- 24 000 EUR
- **Windparkfläche ca 1500 m<sup>2</sup>**

## Flugwindenergieanlage:

- 18 kg Flügel mit 1,5 m<sup>2</sup>
- Kosten noch unbekannt
- **Windparkfläche ca 1000 m<sup>2</sup>**

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  $20 \cdot 8760 \text{h} \cdot 3 \text{ kW} = 525600 \text{ kWh}$ .

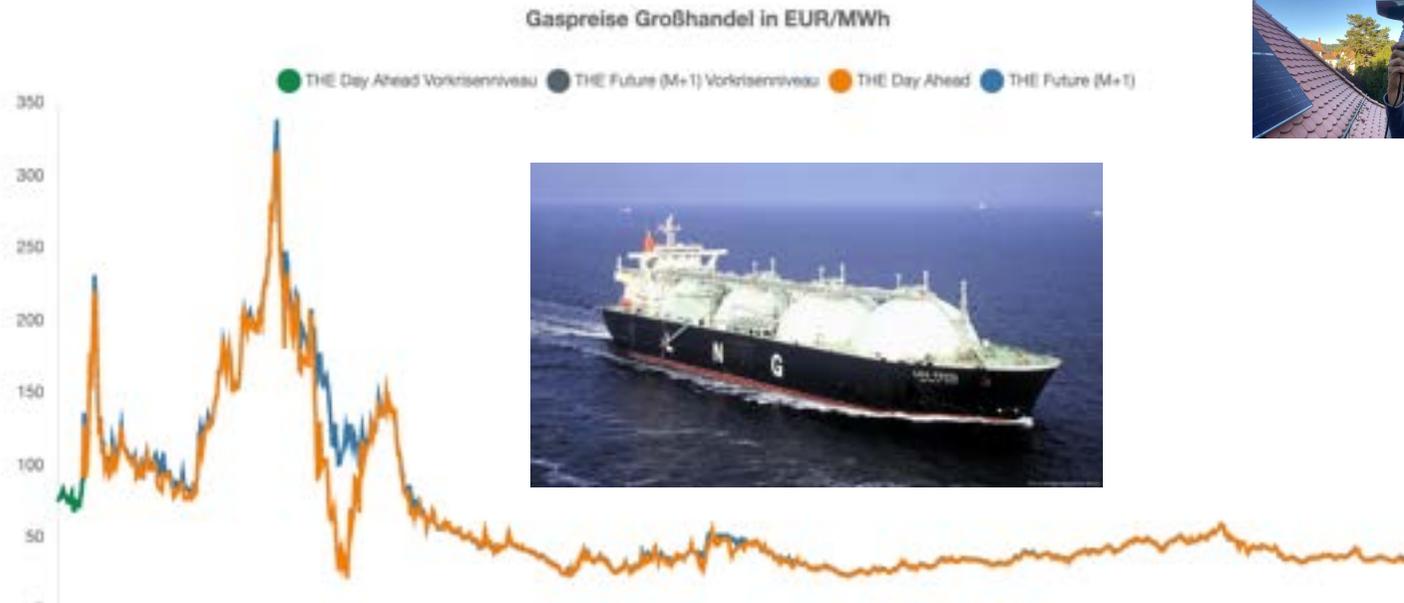
# Wieviel Erdgas braucht man, um 3 kW über 20 Jahre zu decken ?



Jede Baden-Württemberger\*in braucht über 20 Jahre  $20 \cdot 8760 \text{h} \cdot 3 \text{ kW} = 525600 \text{ kWh}$ .

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  $20 \cdot 8760 \text{h} \cdot 3 \text{ kW} = 525600 \text{ kWh}$ .

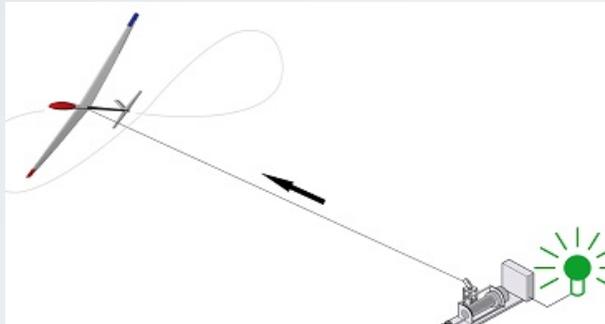
Eine kWh Gas hat ein Volumen von 100 Liter und kostet im Europäischen Großhandel 3,5 Cent.

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

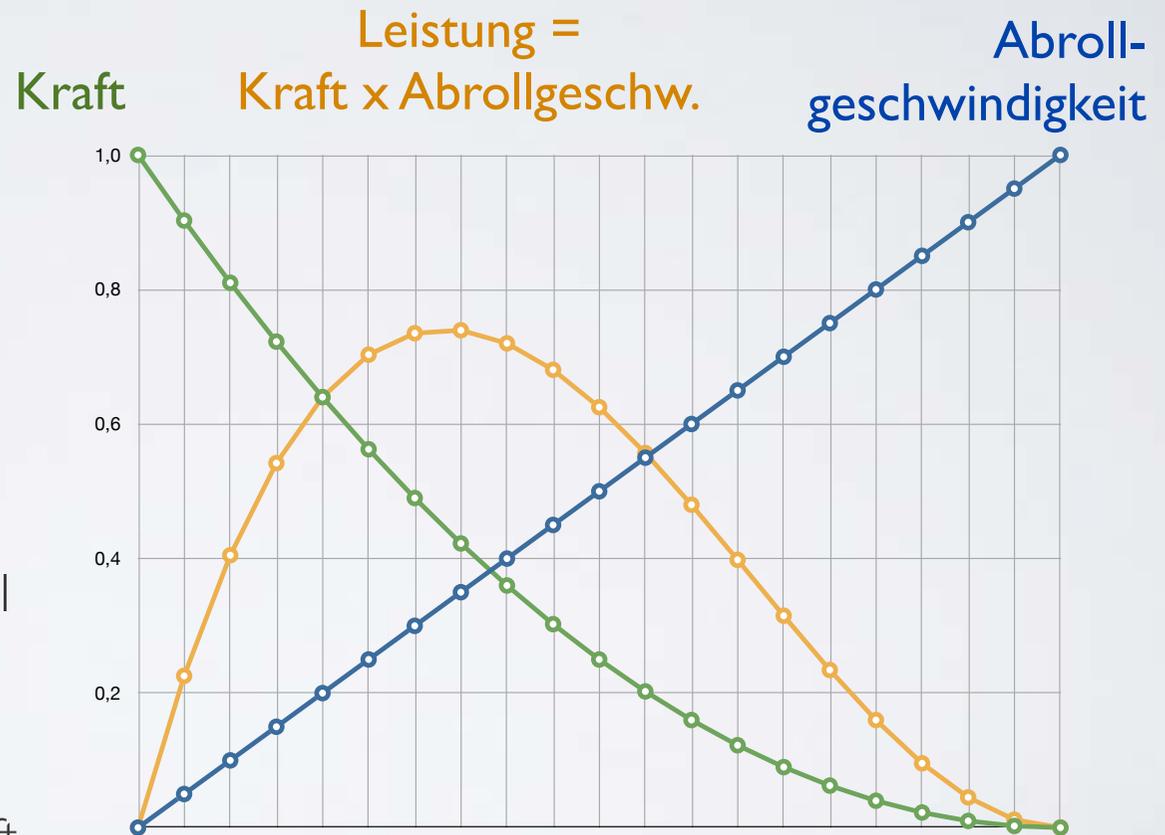
**Auch Erdgas ist in Europa teurer als Balkonsolar (EUR 18 000)!**

# 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.*

$$P = \frac{2}{27} \rho A w^3 C_L \left( \frac{C_L}{C_D} \right)^2$$

Leistung  $P$

Luftdichte  $\rho$

Drachenfläche  $A$

Windgeschw.  $w$

Auftriebs-

Widerstands-

Verhältnis (L/D)

$$\left( \frac{C_L}{C_D} \right)$$

Flügelfläche von **1 m<sup>2</sup>** 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)

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

$$\text{Rotational: } \dot{R} = R\omega_{\times} - R^T \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\delta} \end{bmatrix}, \quad J\dot{\omega} = T - \omega \times J\omega, \quad R = [ \vec{E}_x \quad \vec{E}_y \quad \vec{E}_z ]$$

$$\text{Aero. coefficients: } \vec{v} = \begin{bmatrix} \dot{x} - \dot{\delta}y \\ \dot{y} + \dot{\delta}(r_A + x) \\ \dot{z} \end{bmatrix} - \vec{w}(x, y, z, \delta, t), \quad \alpha = -\frac{\vec{E}_z^T \vec{v}}{\vec{E}_x^T \vec{v}}, \quad \beta = \frac{\vec{E}_y^T \vec{v}}{\vec{E}_x^T \vec{v}}$$

$$\text{Aero. forces/torques: } \vec{F}_A = \frac{1}{2}\rho A \|\vec{v}\| (C_L \vec{v} \times \vec{E}_y - C_D \vec{v}), \quad \vec{T}_A = \frac{1}{2}\rho A \|\vec{v}\|^2 \begin{bmatrix} C_R \\ C_P \\ C_Y \end{bmatrix}$$

# Newton-Type Optimization Iterations for Power Optimal Flight

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

