



„Wie wirtschaftlich ist Wind in der Stadt?“

**L&T CONNECTS – FORSCHUNG VERNETZEN &
KOOPERIEREN**

Karel Frana | Andreas Härtwig | 06. November 2023



Agenda

1. Motivation
2. Projektpartner
3. Kleinwindenergieanlagen
4. Fazit



Hochschule
Zittau/Görlitz
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES



HÄRTWIG
MASCHINENBAU



Wandel durch
Innovation
in der Region



life &
technology



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

GEFÖRDERT VOM

Motivation:

- Steigerung der energetischen Unabhängigkeit (u.a. im Unternehmen) durch verstärkten Einsatz von Erneuerbaren Energie
- Erster Weg: Nutzung der Photovoltaik
- Steigerung der Autarkie durch zusätzliche Nutzung von Windenergie

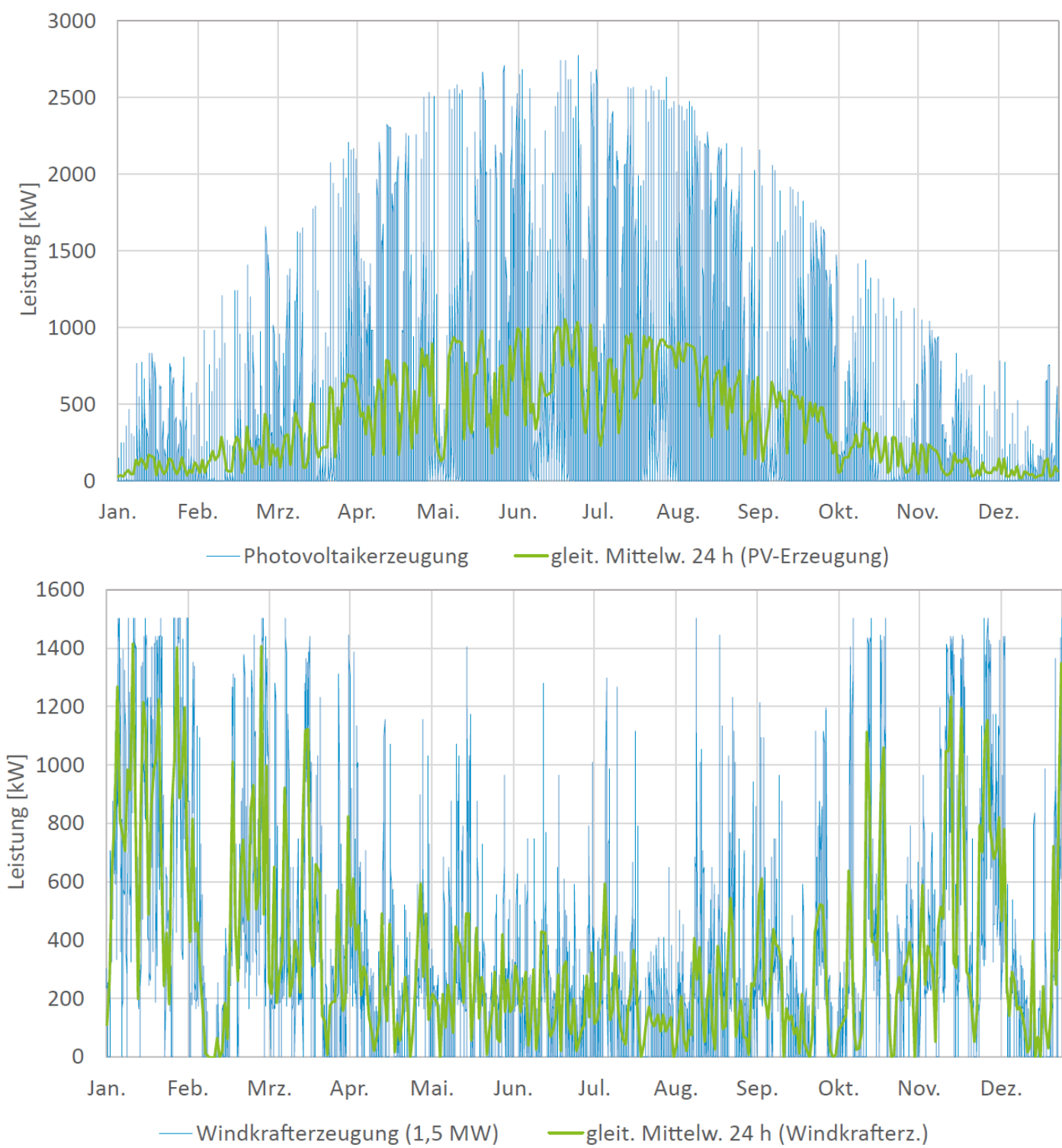


Abb.1: Exemplarische Gegenüberstellung der Erzeugung aus der EE Photovoltaik (oben) und Windkraft (unten) am Beispiel der Gemeinde Nebelschütz.
(Projekt: [Gemeindeenergiekonzept Nebelschütz](#))

Windenergie fürs Eigenheim

Windturbinen vertikal - Strom erzeugen fürs Eigenheim



© stock.adobe.com/zhang Yongxin

Windturbinen mit vertikaler Achse sind klein, sie erzeugen auch bei wenig Wind noch Strom. Bislang waren Wachstum der Windturbinen noch begrenzt, aber der Markt ist in Bewegung. Viele Fragen sind noch offen.

MINI-WINDTURBINE

Aeromine Technologies: Mini-Windturbine statt Photovoltaik?

31.10.2022, 08:25 Uhr

Mini-Windturbinen galten für Privathaushalte bisher als ineffektiv und waren auch laut und wartungsintensiv. Deshalb konnte man sie eher selten auf Dächern finden. Nun kann sich die Situation ändern.



[6]



Ausgangssituation:

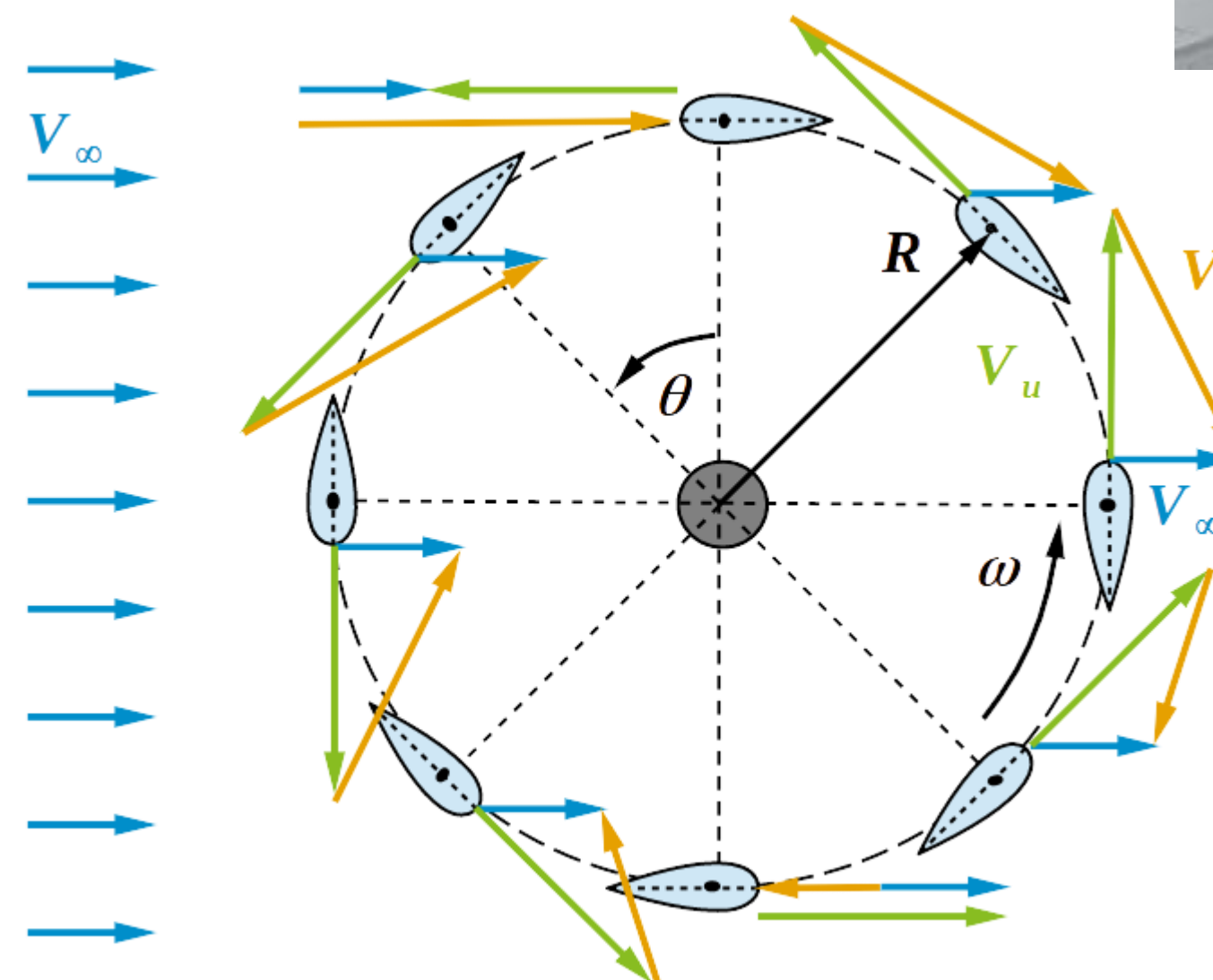
- Im Offshore und ländlichen Bereich sind Anlagen mit horizontaler Drehachse (HAWT) etabliert
- Für urbane Gebiete sind Turbinen mit **vertikaler Rotationsachse (VAWT)** prädestiniert
- Vorteile: Akzeptanz, Schattenwurf, Wartung, Vogelschlag, etc.

Spezielle Probleme VAWT:

- Schwankendes Drehmoment an Rotorachse
- Geringerer Leistungsbeiwert als HAWT
- Fähigkeit zum Selbststart

Generelle Probleme von WKA:

- Wiederverwertung und Recycling nach Lebensdauer
- Einsatz umweltgerechter Werkstoffe an Stelle von GFK und CFK



Teilprojekt Hochschule Zittau/Görlitz:

Strömungsmechanische Optimierung von NFK-Rotoren

- 1,0 VZÄ Wiss. MA: Franz Thiele

Hauptarbeitspunkte:

- Betriebsszenarien und Standortanalyse
- Analyse gewellte Konturen
- Pitch-System
- Aerodynamische Auslegung Rotor
- Modelluntersuchungen
- Optimierung Betriebsverhalten

Ergebnisverwertung:

- Weiterentwicklung des Energieforschungsfeldes Mittelherwigsdorf
- Stärkung des Forschungsschwerpunktes Energie und Umwelt

Gesamtvorhaben:

Innovative Windenergie-Technologien in der Lausitz

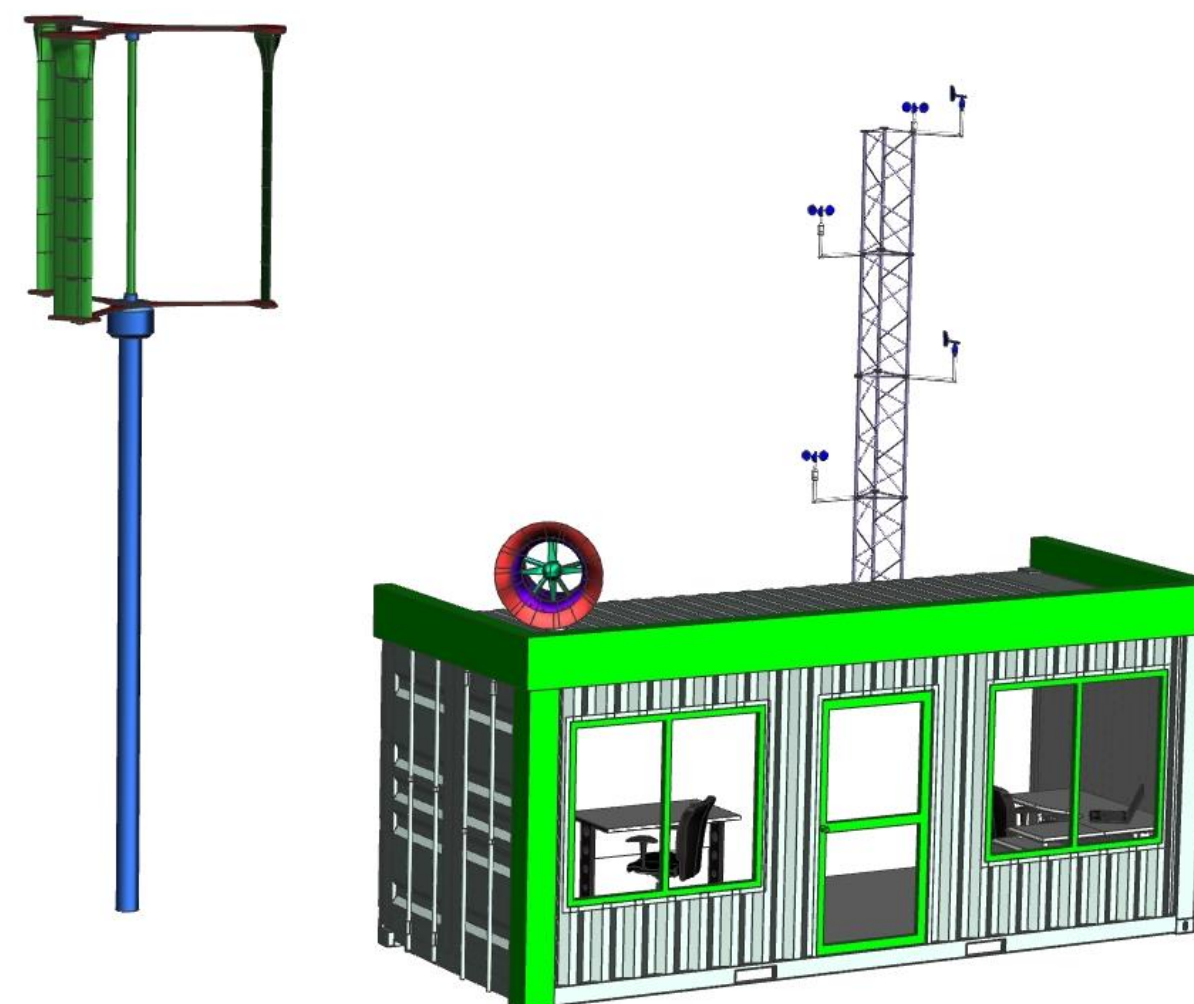
- Laufzeit: 01.02.2023 bis 31.12.2025
- Fördersumme: 582.000 €

Innovationsbereiche Life and Technology:

- Additive Fertigung
- Vernetzte Energie(-speicher)-systeme

Innovationsstrategie Freistaat Sachsen:

- Umwelt → Umwelttechnik
- Energie → Energieumwandlung und -Nutzung



Teilprojekt Firma Härtwig:

Festkörpermechanische Entwicklung von NFK-Rotoren

- 0,8 VZÄ Meister/Ingenieur: Kevin Härtwig
- 0,4 VZÄ Techniker: Felix Stübner

Hauptarbeitspunkte:

- Einsatz von Naturfaserwerkstoffen
- Herstellung der Tragflügel
- Additive Fertigung des Demonstrators
- Installation auf dem Energieforschungsfeld
- Skalierung auf weitere Baugrößen
- Vorbereitung Prototypenbau

Ergebnisverwertung:

- Etablierung neuer Fertigungstechniken
- Einwerbung ZIM-Projekt (Prototypenentwicklung)
- Vertrieb der Windturbine

Vertretungsprofessur Strömungsmechanik und Fluidenergiemaschinen

Prof.-Ing. Karel Frana, Ph.D.



Fakultät Maschinenwesen

02763 Zittau

Schwenninger Weg 1

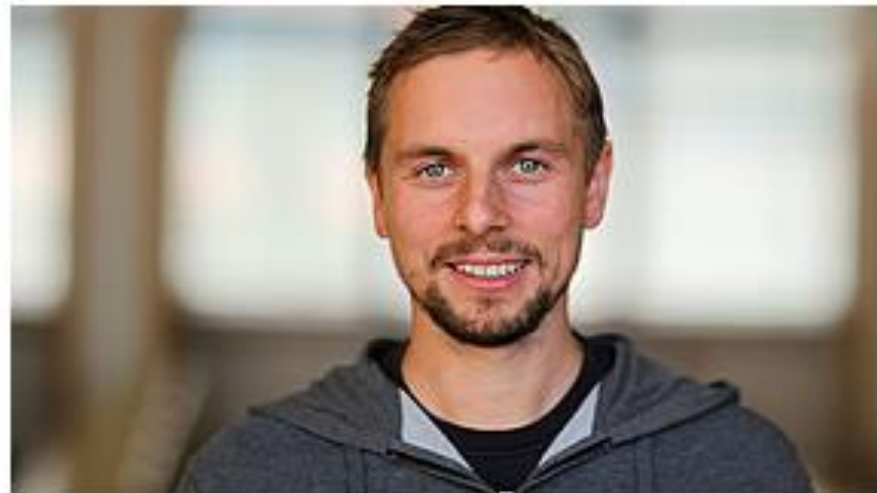
Gebäude Z VII, Raum 122

+49 3583 612-4896

Karel.Frana@hszg.de

Laboringenieur

Felix Rothe, M.Eng.



Fakultät Maschinenwesen

02763 Zittau

Schwenninger Weg 1

Gebäude Z VII, Raum 43

+49 3583 4880

f.rothe@hszg.de

Wissenschaftliche Mitarbeiter

Franz Thiele, M.Eng,



Fakultät Maschinenwesen

02763 Zittau

Schwenninger Weg 1

Gebäude Z VII, Raum 11a

+49 3583 4384

Franz.Thiele@hszg.de

Martin Sünder, M.Eng,



Fakultät Maschinenwesen

02763 Zittau

Schwenninger Weg 1

Gebäude Z VII, Raum 113

+49 3583 612-4881

Martin.Sünder@hszg.de

Vertretungsprofessur Strömungsmechanik und Fluidenergiemaschinen

Lehrveranstaltungen/Module

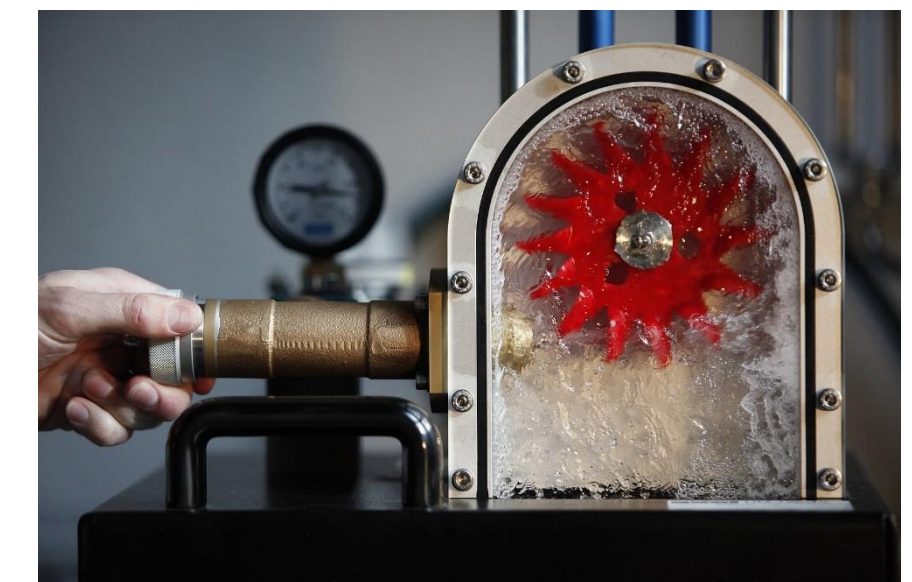
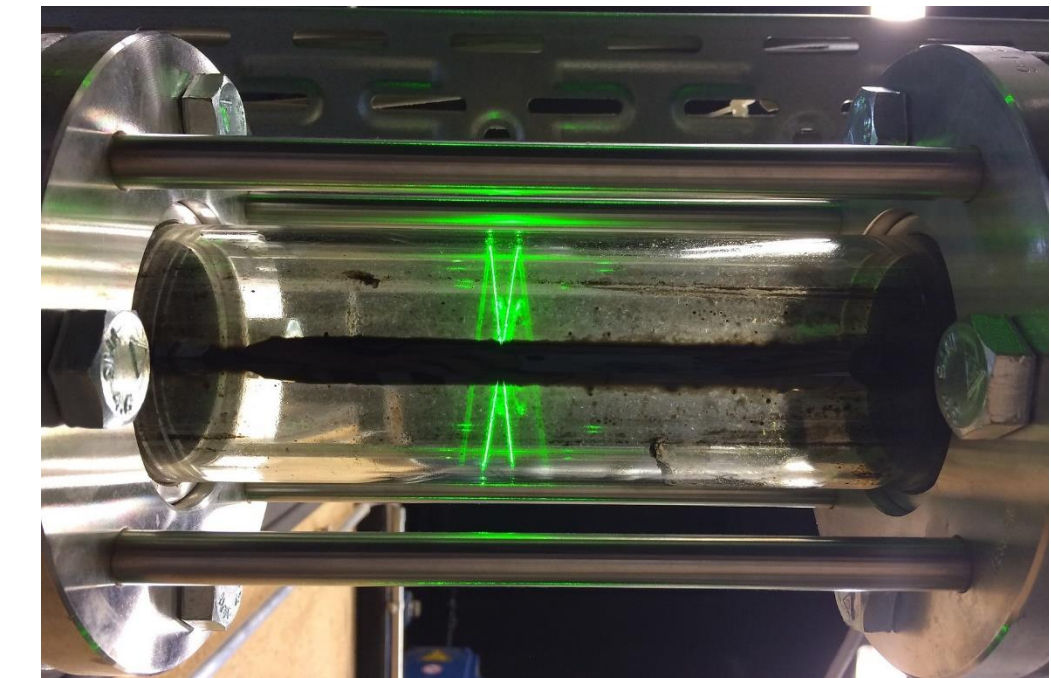
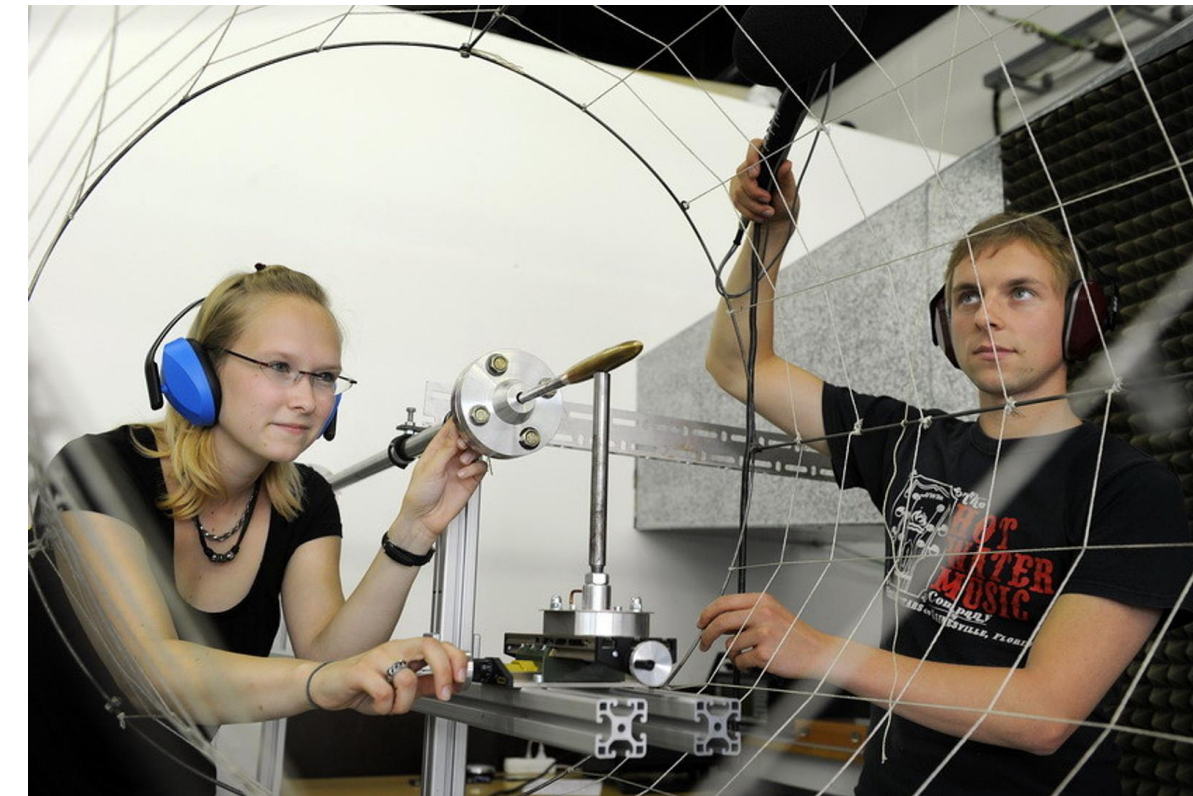
- Strömungsmechanik 1
- Strömungsmechanik 2
- Fluidenergiemaschinen
- Numerische Strömungsmechanik
- Grundkonzepte der Regenerativen Energietechnik
- Regenerative Energietechnik

Lehr- und Forschungslabor

- Grundlagenpraktika (technische Strömungen in Rohrleitungen, Gasdynamik etc.)
- Vertiefungspraktika (Betriebsverhalten von Wasser- und Windturbinen, Rohrleitungssystem mit Pumpen etc.)
- Komplexpraktika (Freistrah, Photovoltaik etc.)

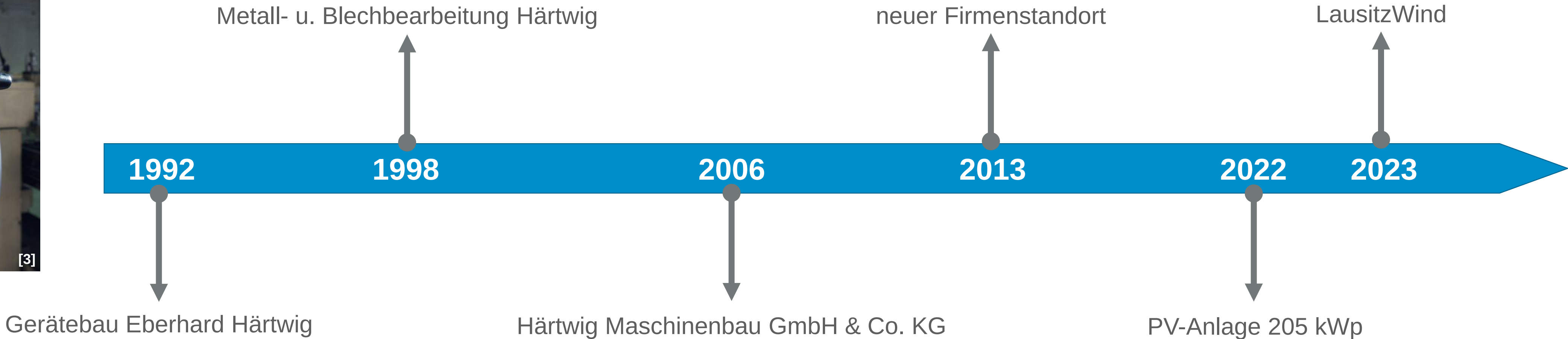
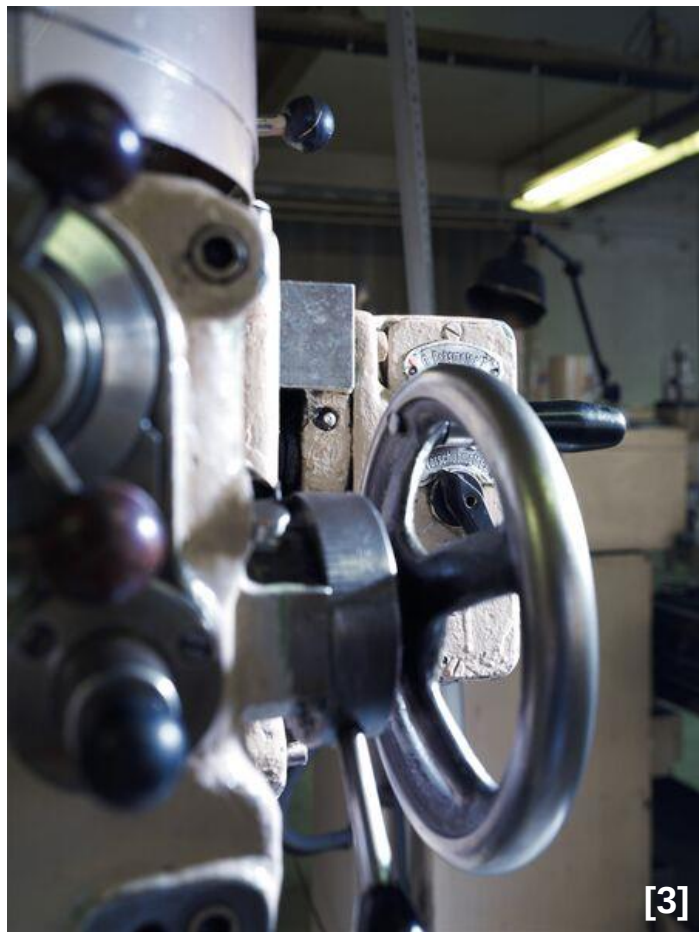
Messtechnische Ausstattung

- 3 Strömungskanäle zur Untersuchung von Objekten verschiedener Größe in variablen Geschwindigkeitsbereichen
- 2 Visualisierungskanäle (1 Wasserstoffbläschenkanal, 1 Nebelfadenkanal mit Laserlichtschnittoptik) zur Abbildung von Umströmungsvorgängen
- Schallintensitätsmesstechnik: Brüel & Kjær, Pulse-System + Software "PulseLabShop"
- 1D-/2D-Hitzdrahtsystem: Dantec Dynamics + Software "MiniCTA"
- 2D-Laser-Doppler-Anemometer: Dantec Dynamics
- Mehrkanaldruckscanner, pneumatische Sonden etc.



Härtwig Maschinenbau GmbH Co. KG

- Familienbetrieb seit 1992
- Stammsitz in Cunewalde
- Großteilmfertigung in Dürrehennersdorf
- ca. 70 Mitarbeiter



Härtwig Maschinenbau GmbH Co. KG

Arbeitsfelder:

- gesamte Wertschöpfungskette von der Angebotslegung über die Entwurfs- und Ausführungsplanung bis zur Fertigung und Montage/Inbetriebnahme beim Kunden
- Zulieferer für den Maschinenbau z.B. Trumpf SE + Co. KG, ATN Hölzel GmbH, etc.
- Herstellung von Transportsystemen für die Automobilindustrie
- Zulieferer für diverse regionale Unternehmen

Produktionstiefe:

- Blechbearbeitung (CNC-Laserschneiden, CNC-Brennschneiden, CNC-Abkanten)
- Bearbeitung von Stangenmaterial (CNC-Sägen, Rohrbiegen)
- Oberflächenbearbeitung (Entgraten, Strahlen mit Stahlsand, Korund, Glasperle)
- CNC-Drehen und CNC-Fräsen
- MAG-, MIG- u. WIG-Schweißen von Baugruppen bis 2t
- MAG-Schweißroboter (1200mm x 1000mm)
- Oberflächenbeschichtung mit Ein- und Zweikomponentennasslack
- Montage von Baugruppen (auch Pneumatik, Hydraulik und Elektrik)



Bauformen

- Unterscheidung in horizontalachsige Windturbinen (HAWT) und vertikalachsige Windturbinen (VAWT)

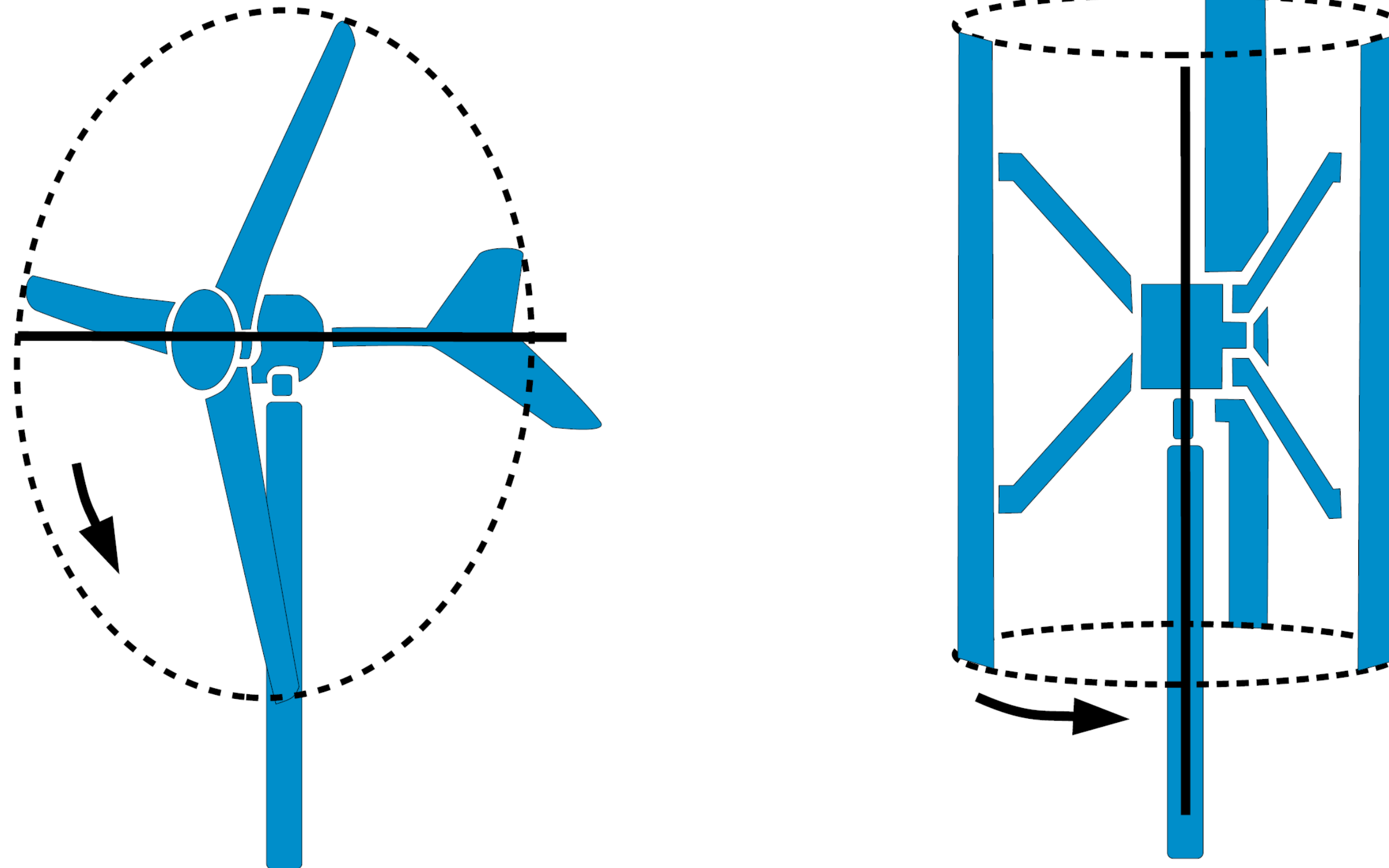


Abb. 2: Gegenüberstellung der grundlegenden Kleinwindenergieanlagen, Klassifiziert nach der Anordnung der Rotationsachse in horizontalachsige (links) und vertikalachsige Windturbinen (rechts).

Klassifizierung in Anlehnung an den BWE

- Basis: Bundesverband WindEnergie e.V. (BWE)
- Kategorisierung auf Grundlage der Anwendungsgebiete
- Gruppierung in drei Leistungsklassen

Tab. 1: Klassifizierung von KWEA entsprechend deren Anwendungsgebiete in Anlehnung an den BWE.

	Einsatzgebiet	Spannung	Nennleistung	Klasse
A	Inselsystem mit Batterie	12/24/48 V DC	0...1,5 kW	Klasse I – Mikrowind- energieanlagen
B	Anlage auch Netzgekoppelt	230 V AC		
C	Gebäudeintegrierte Anlage	230 V AC	1,5...5 kW	
	Freie Aufstellung	230 V AC		
D	Gewerbegebiet, Landwirtschaft	400 V AC	5...30 kW	Klasse II – Miniwind- energieanlagen
E	Gewerbegebiet, Landwirtschaft	20 kV AC	30...100 kW	Klasse III – Mittelwind energieanlagen

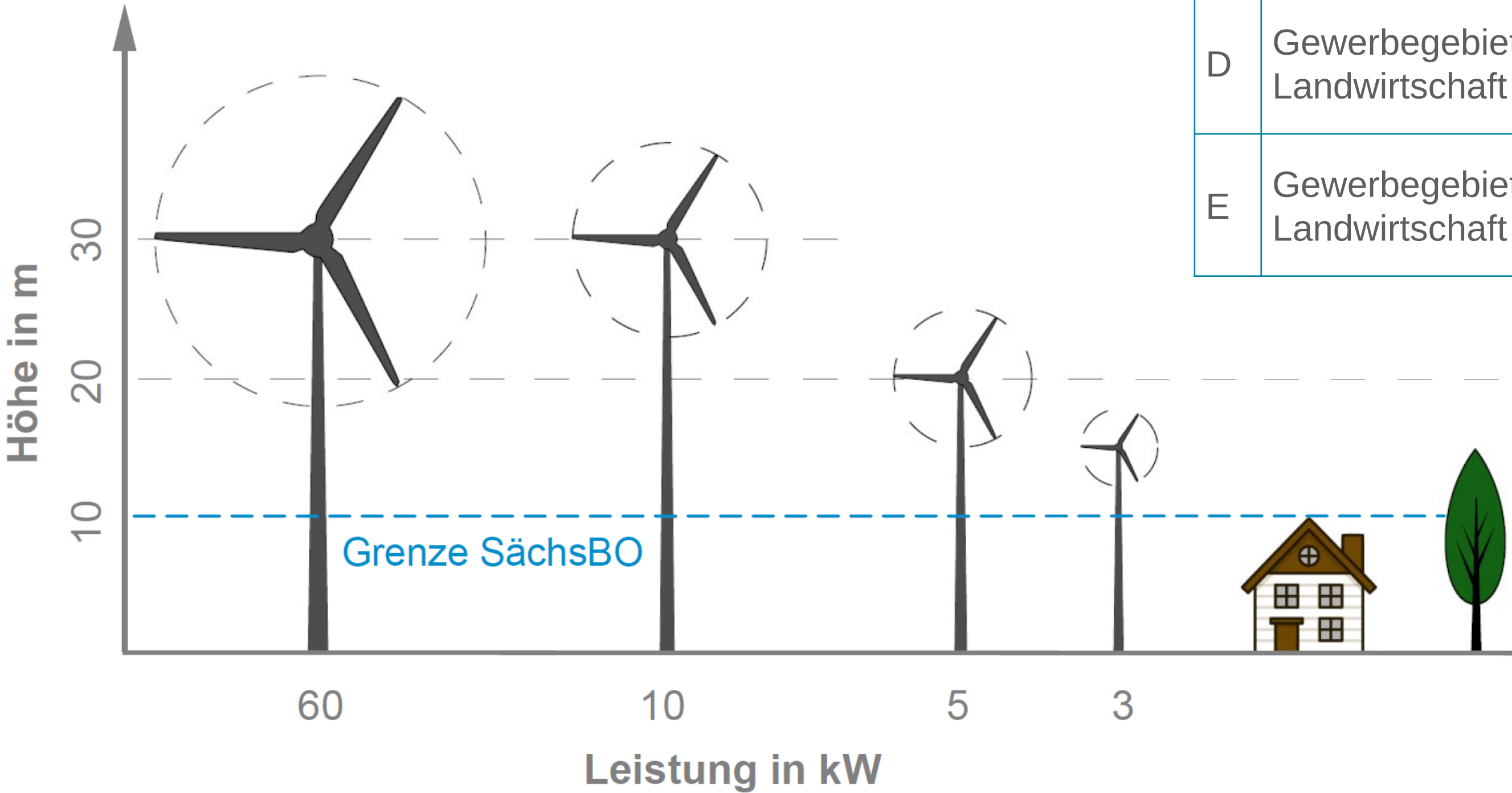
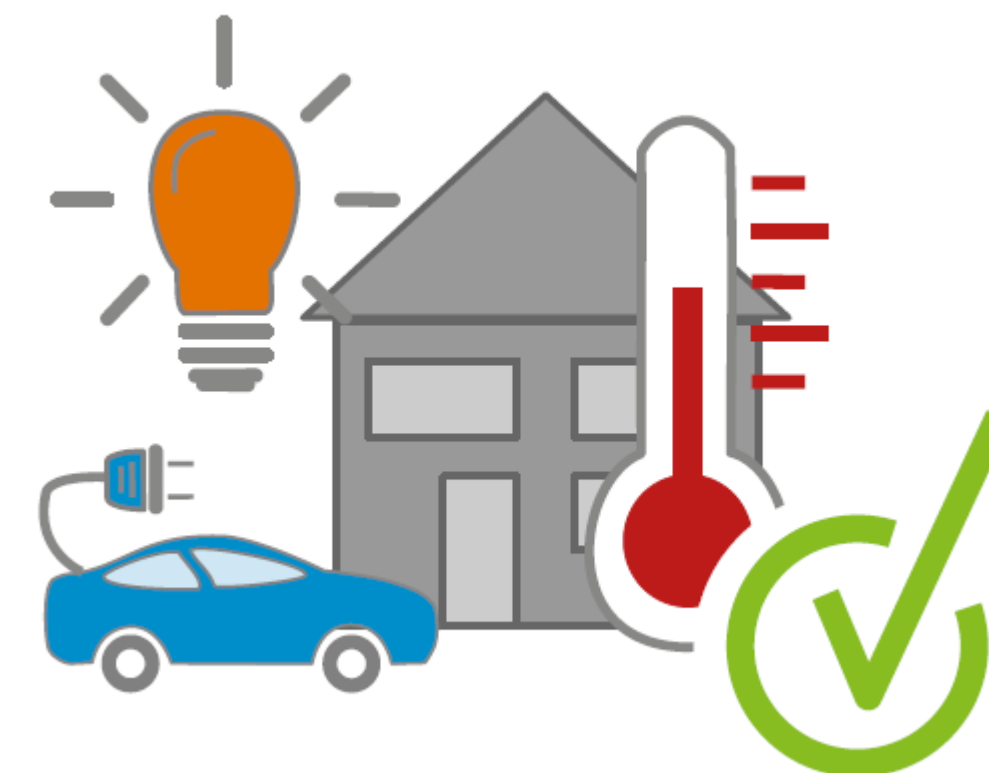
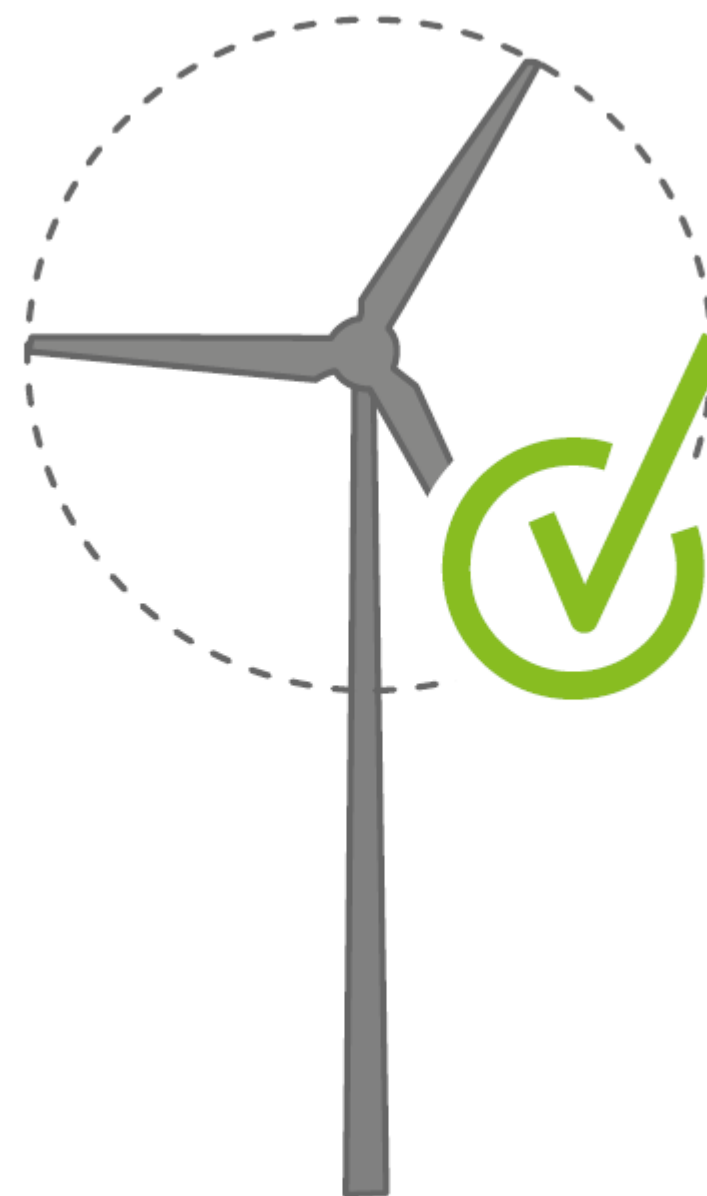
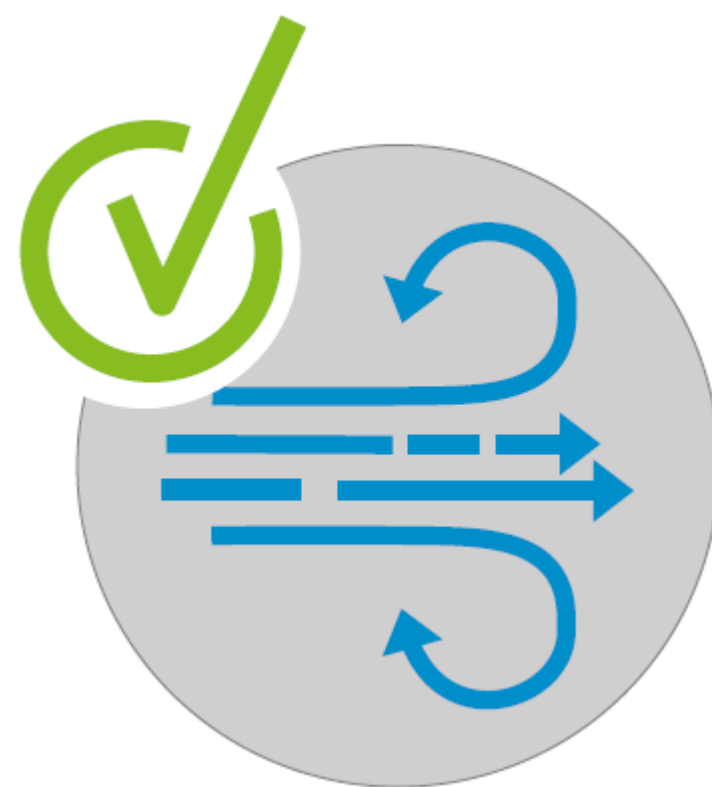


Abb. 3: Vergleich unterschiedlicher Anlagengrößen und Leistungsklassen gängiger KWEA.

Haupteinflussfaktoren für den wirtschaftlichen Betrieb einer KWEA

Vier wesentliche Faktoren:

- Baugenehmigung (oder Freistellung)
- Windstärke (und –richtung) am Installationsort
- technische Qualität der Anlage
- Eigenverbrauch des Windstromes



Gesetzlicher Rahmen zur Errichtung einer KWEA

- Bundesweit keine einheitliche Regelung
- Regelung in den Landesbauordnungen, hier Sächsische Bauordnung (SächsBO)
- Kriterien zur Genehmigung:
 - Anlagengesamthöhe (über Geländekante)
 - Rotordurchmesser
 - Baugebiet
 - Abstandregelungen
 - Umweltverträglichkeit etc.
- Anlagen bis 10 m Höhe besitzen i.A. keine räumliche Wirkung und sind nach § 35 des Baugesetzbuches (BauGB) privilegiert
 - in Sachsen und Brandenburg ebenfalls
 - Verfahrensfreistellung, d.h. die Anlage kann ohne die Benachrichtigung des Bauamts aufgestellt werden

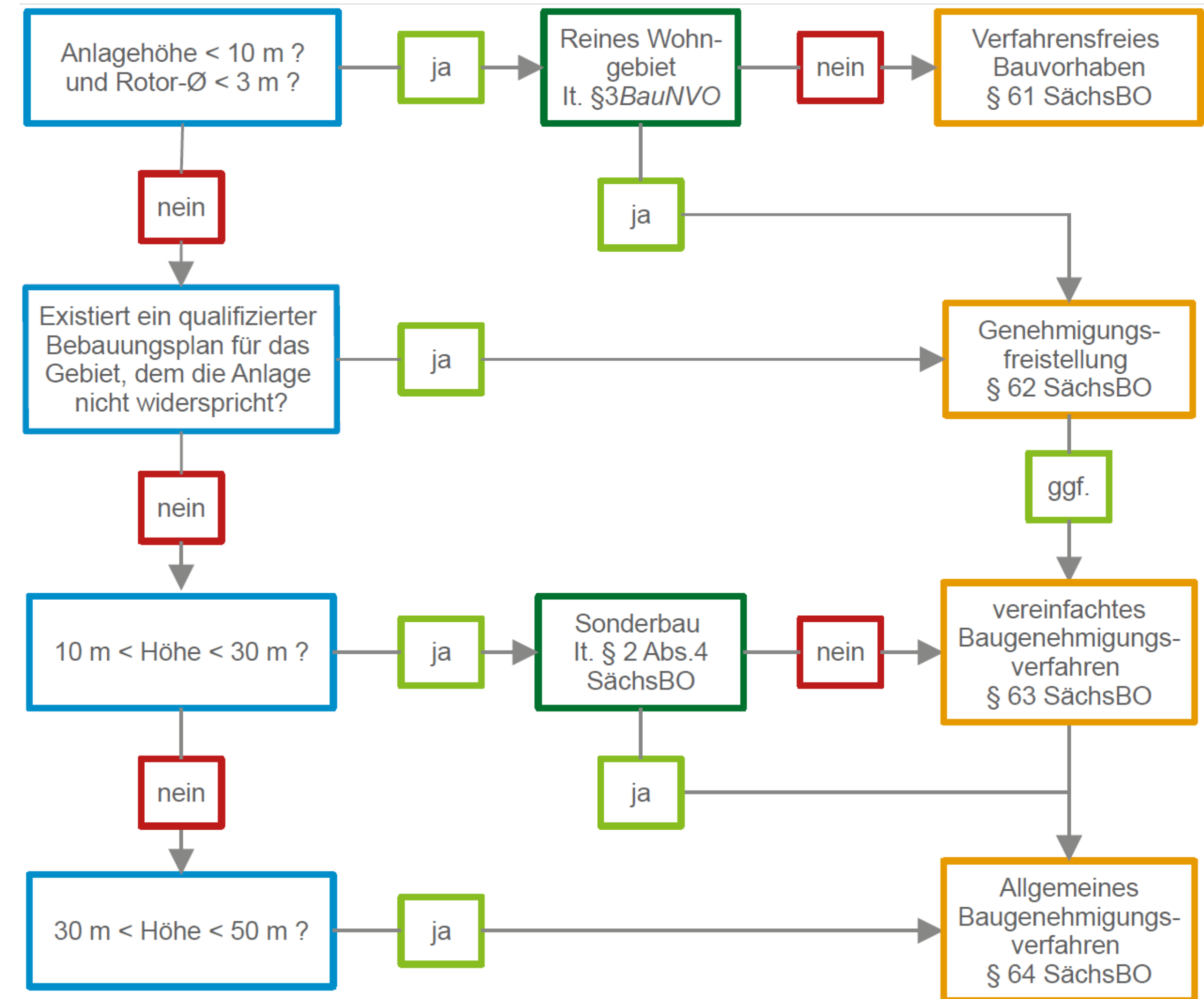


Abb. 4: Entscheidungsdiagramm zum Genehmigungsverfahren von KWEA nach SächsBO.

Standortbetrachtung/-auswahl

- Haupteinflussfaktor für die Wirtschaftlichkeit einer KWEA
- Möglichst hohe mittlere Jahreswindgeschwindigkeit
 - freier Standort ohne Versperrung der Hauptwindrichtung
- Beschaffung solider Winddatenbasis
 - Messungen vor Ort (über langen Zeitraum)
 - Daten nahegelegener Messstationen (separate Standortbewertung notwendig)
 - Testreferenzjahre des Deutschen Wetterdienstes
 - Windkarten

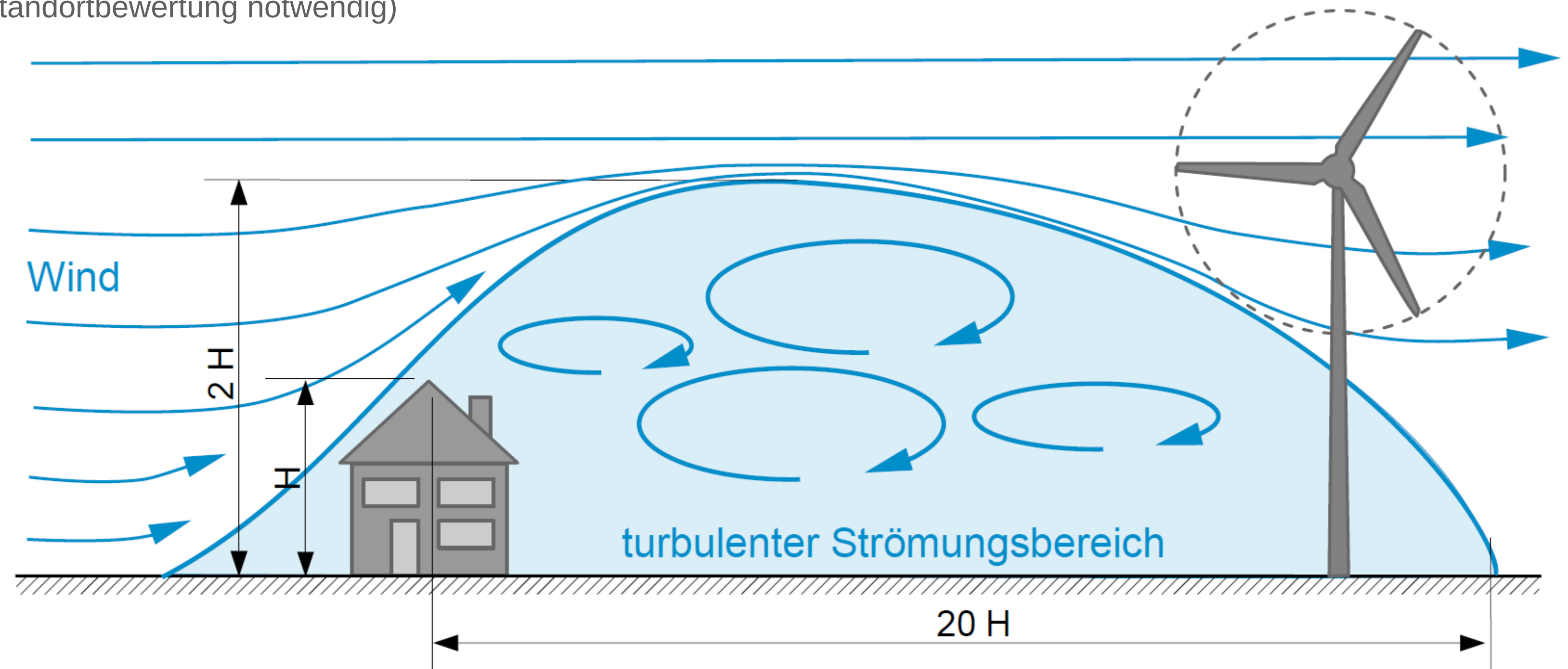
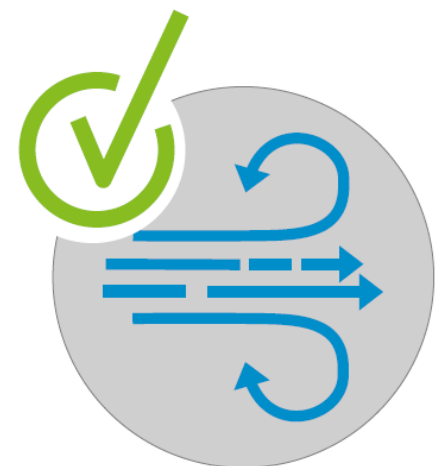


Abb. 5: Einflussbereich eines Hindernisses auf die Windströmung und somit auf das Betriebsverhalten einer KWEA.



Standortbetrachtung/-auswahl

- Betrachtung der Wirtschaftsregion Lausitz als Basis
- Zunächst Orientierung an der SächsBO
 - genehmigungsfreie Errichtung bis 10 m Anlagenhöhe
 - Auswahl charakteristischer Standorte

Tab. 2: Charakterisierung der repräsentativ ausgewählten Anlagenstandorten in der Lausitz.

Id.	Einsatzgebiet	Landkreis	Charakterisierung
1	Waldgebiet	Elbe-Elster	Waldgebiet
2	Industriegebiet Weinau (Zittau)	Görlitz	urbanes Industriegebiet, künstliche Oberfläche
3	Ackerfläche	Dahme-Spree	landwirtschaftliche Fläche, Ackerland
4	Bärwalder See	Görlitz	Wasserfläche ohne Hindernisse
5	Berg Czorneboh	Bautzen	bewaldeter Berg

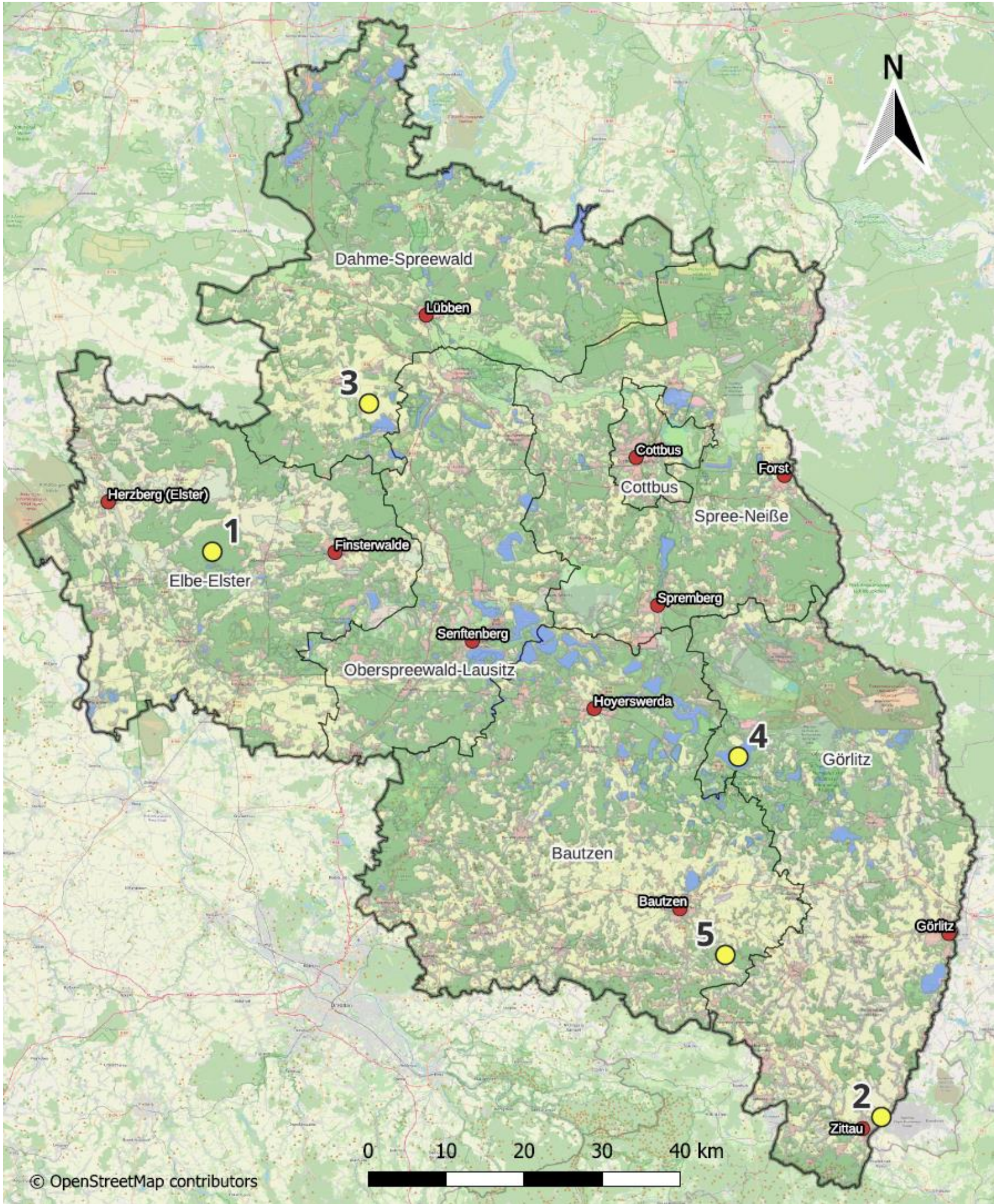
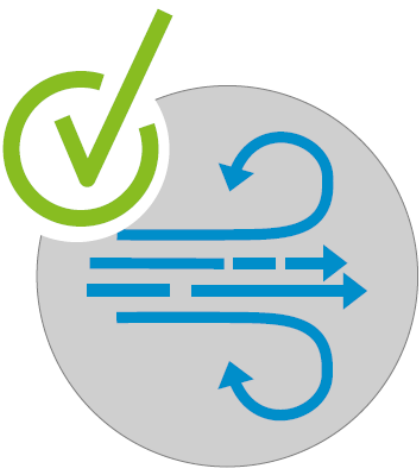


Abb. 6: Lage der repräsentativ ausgewählten Standorte in der Lausitz (gelbe Markierungen).

Vergleich unterschiedlicher Standorte

- Bewertung auf Basis der sog. Weibullverteilung
- Häufigkeit der Windgeschwindigkeit an einem Standort

$$f_w = \frac{k}{A} \left(\frac{w}{A}\right)^{(k-1)} \exp \left[- \left(\frac{w}{A}\right)^k \right]$$

- Form- und Skalierungsparameter aus statistischen Auswertung von Messungen oder Windprognosedaten

Tab. 3: Detailbeschreibung des Windaufkommens zur Ertragsbestimmung von KWEA der repräsentativ ausgewählten Anlagenstandorten in der Lausitz.

Id.	Einsatz- gebiet	Form- parameter k [-]	Skalierungs- parameter A [m/s]	mittlere Geschwindigkeit c [m/s]	Rauigkeits- höhe z ₀ [m]
1	Waldgebiet	1,811	3,590	3,22	1,0
2	Industriegebiet	1,634	3,836	3,45	0,07
3	Ackerfläche	1,842	4,310	3,86	0,05
4	See	2,076	4,399	3,93	0,0
5	Berg (bewaldet)	1,831	4,520	4,06	1,1
6	Stadtkern (Zittau)	1,586	3,157	2,86	0,9
7	Berg (freier Hang)	1,787	4,552	4,09	0,05

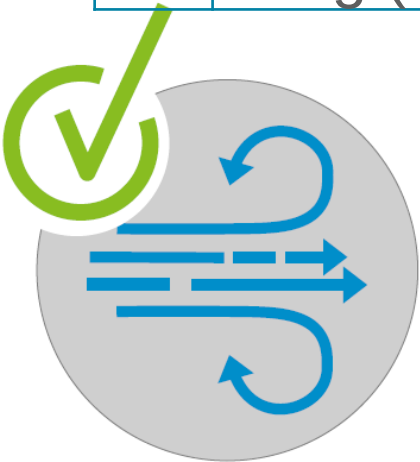
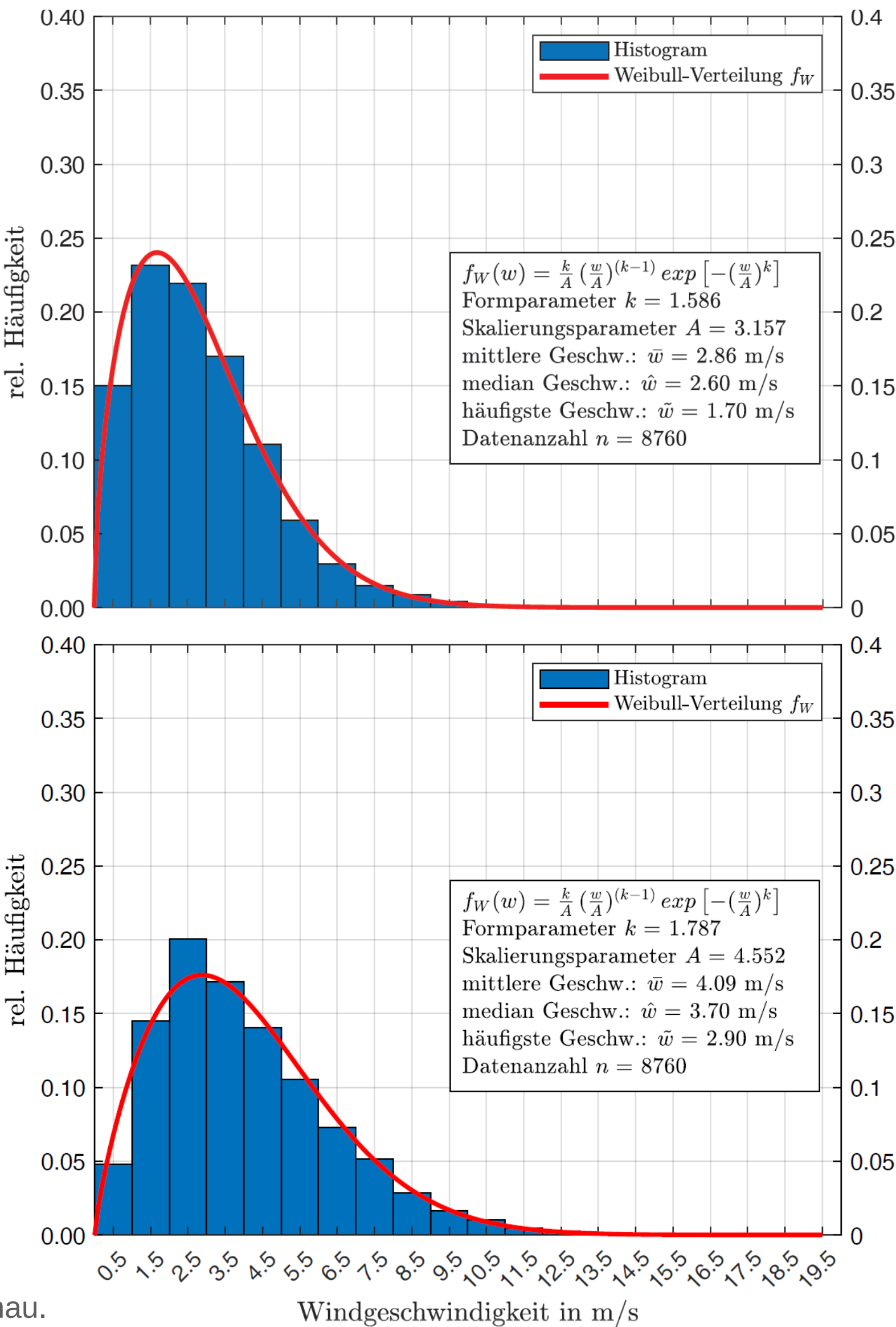


Abb. 7: Einfluss der Topografie auf die Weibullverteilung zweier „nah“ beieinanderliegender Standorte. Oben: Stadtkern von Zittau, unten: an der Siedlung am Breiteberg in der Gemeinde Großschönau.



Einfluss der Rauigkeit in Städten

- Ausgeprägte Rauigkeit infolge der Gebäude
 - starker Einfluss (Widerstand) auf die bodennahe Windverteilung
 - lokal sehr heterogen variierende Winde
- Im generalistisch gewählten Ansatz sind lokale „Hotspots“ nicht abbildbar

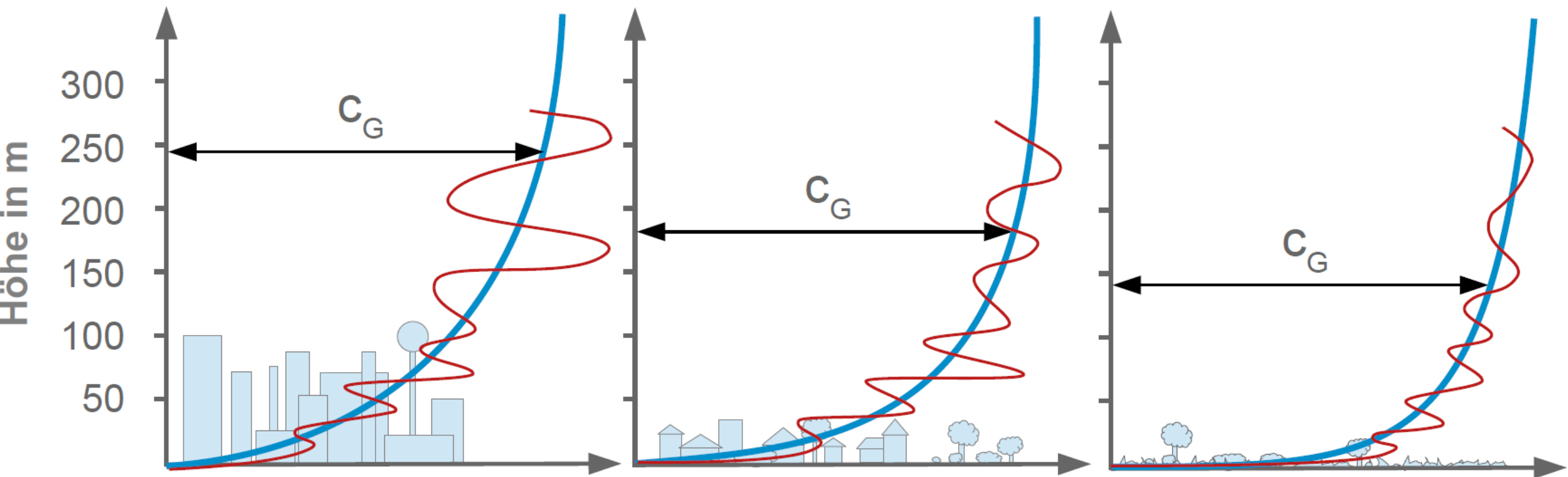


Abb. 8: Windgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Höhe und Rauigkeit unterschiedlicher Standorte. Zu erkennen ist das die geostrophische Windgeschwindigkeit mit zunehmender Rauigkeit erst bei wesentlich größerer Höhe erreicht wird.

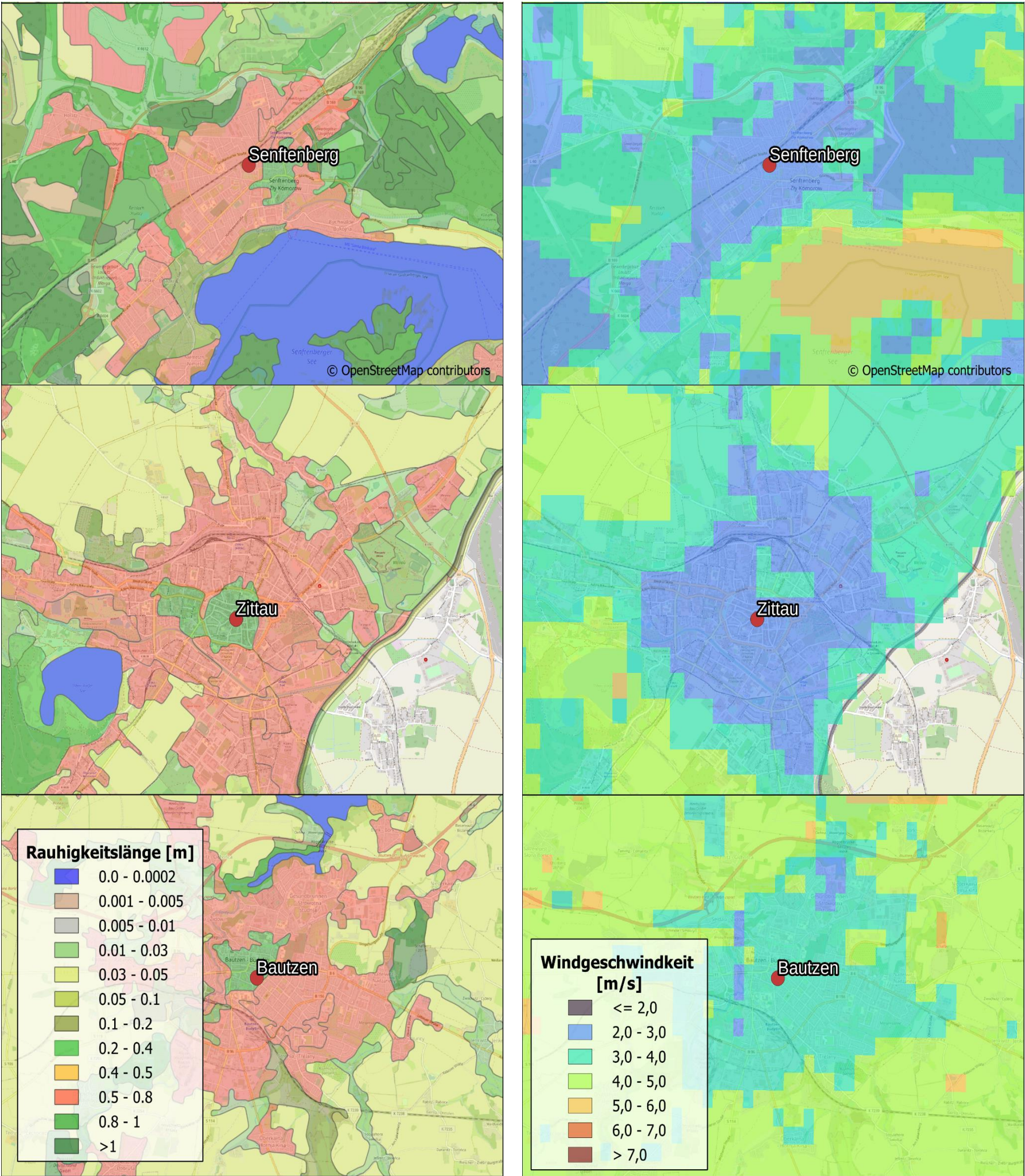
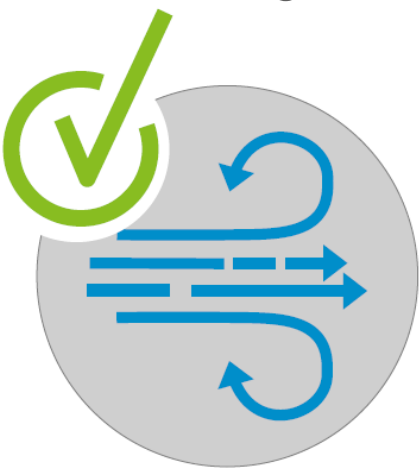


Abb. 9: Rauigkeit und mittlere Windgeschwindigkeit in 10 m über den Grund für v.o.n.u. Senftenberg, Zittau und Bautzen.

Technische Qualität der Anlage

- Solide technische Anlage:
 - Sturmsicher
 - Langlebig
 - Etabliert ggf. zertifiziert (in Dtl. lediglich ein Hersteller)
- benötige Anlagendaten zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit einer KWEA:
 - Masthöhe → zur Umrechnung der Winddaten
 - Anlagenleistung
 - Kosten der Anlage (zumindest Investitionskosten)
 - Leistungsdiagramm des Herstellers
- energetische Ertragsbetrachtung auf Basis des örtlichen Windaufkommens

$$P = c_P \frac{\rho_{Luft}}{2} A_{WEA} w^3$$

$$E = \sum P \Delta t$$

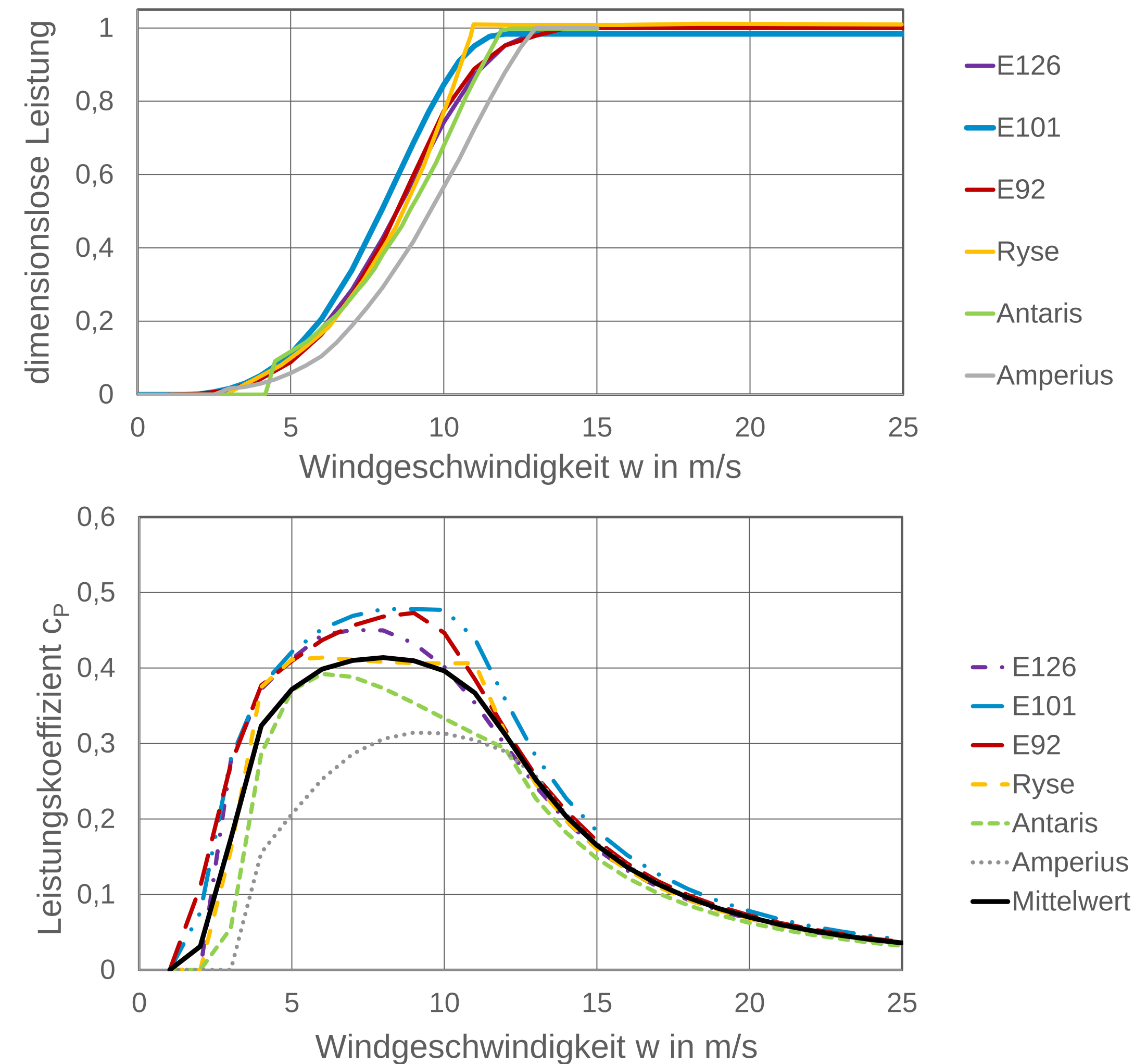
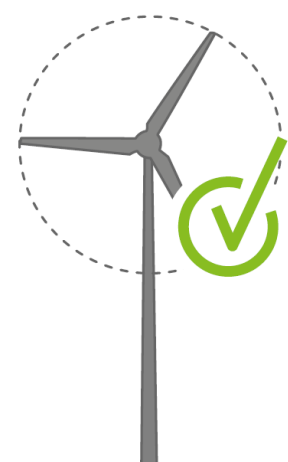


Abb. 10: Normierte Leistungskurven $P = f(w)$ exemplarisch gewählter Windenergieanlagen (oben) sowie Abhängigkeit des Leistungsbeiwertes c_P von der Windgeschwindigkeit w (unten).

Kosten und monetärer Ertrag

- Bewertungsmaßstäbe:
 - Stromgestehungskosten (€/kWh)
 - Amortisationszeit (Zeit bis die Anlage Profit generiert)
 - Preis pro kW installierter Leistung
- benötigte monetäre Daten zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit einer KWEA:
 - Investitionskosten
 - jährliche Ausgaben
 - Anlagenlaufzeit (sollte 20 Jahre betragen)
 - Strombezugspreis (dzt. rund 35 Ct/kWh)
 - Einspeisevergütung (nach EEG 2023)
 - Eigenverbrauchsquote (möglichst Maximal)

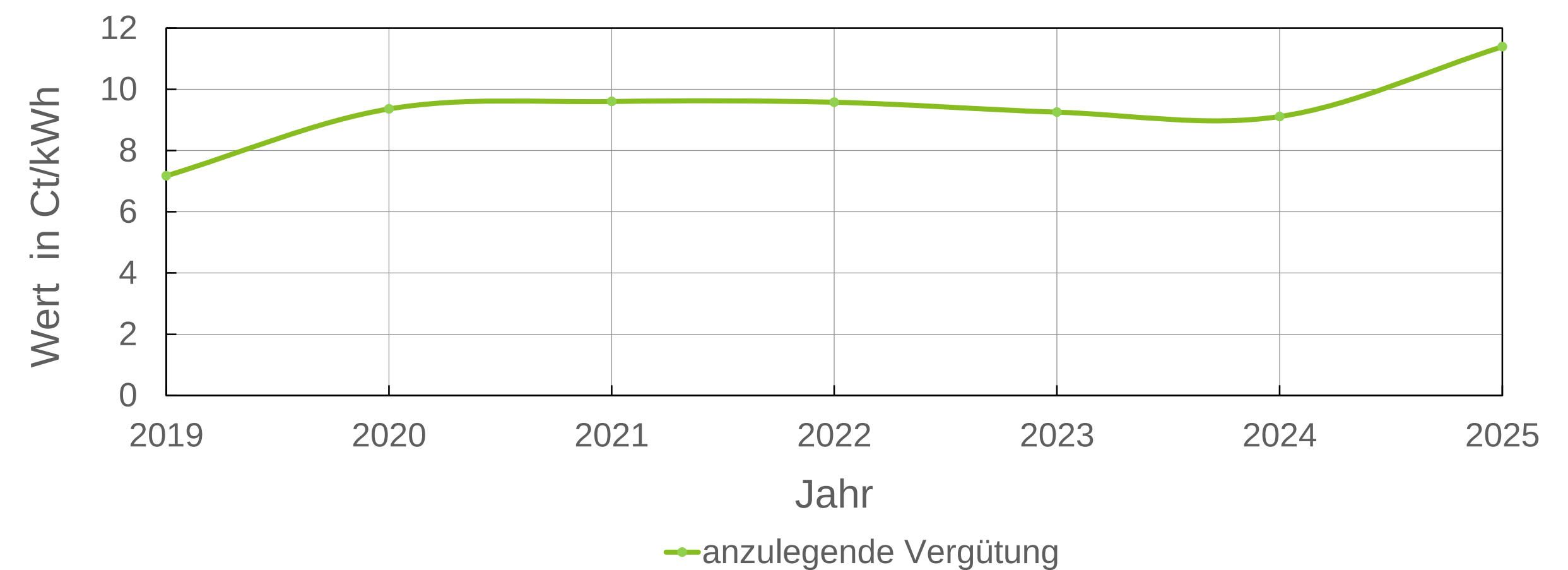
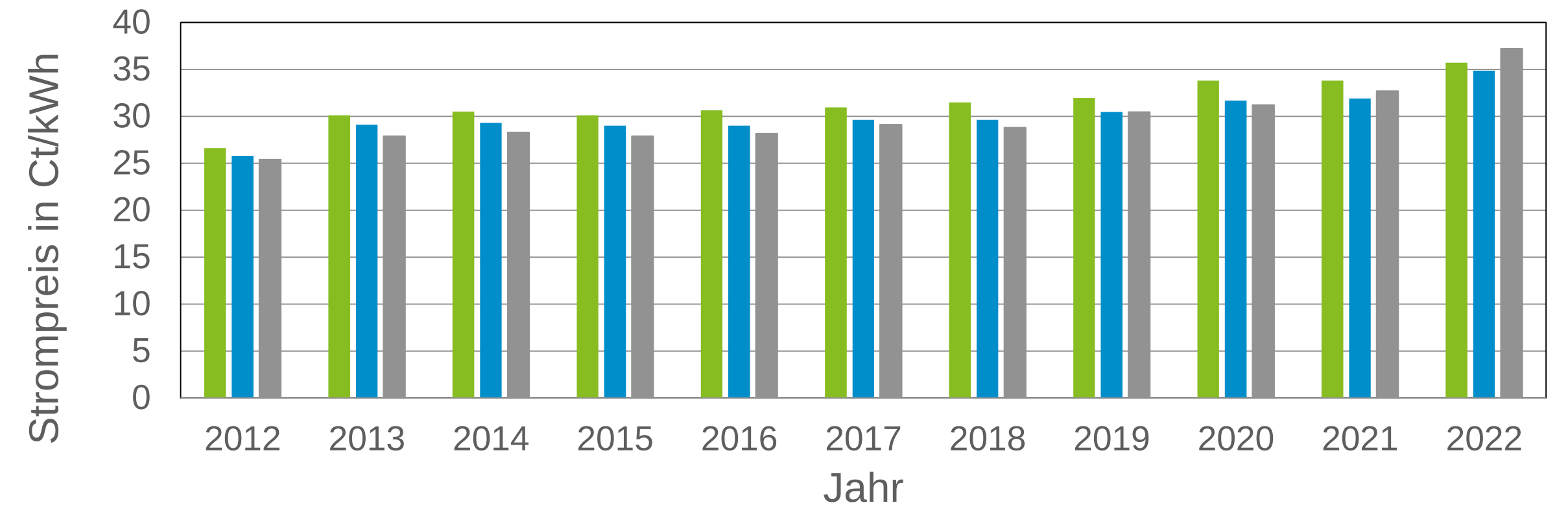
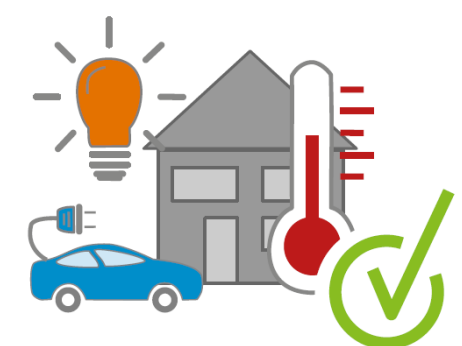


Abb. 11: Entwicklung des durchschnittlichen Strombezugspreises für Haushalte (oben) sowie der Einspeisevergütung für KWEA unter 50 kW Nennleistung (unten).



Kosten und monetärer Ertrag

- Ansatz zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit einer allgemeinen Anlage
 - Im Projekt: Entwicklung einer neuen Anlage → keine bekannten Kosten
 - umgekehrter Ansatz: Bestimmung der notwendigen Anlagenhöhe in Verhältnis zu variablen Investitionskosten
 - Zunächst für einen starken Windstandort
- Einordnung der Anlagenkosten und Anlagenhöhe für PHH und GHD
- Verortung der Anlagenentwicklung, insbesondere der Kosten

Tab. 4: Zusammenfassung der Hauptanlagenparameter zur Bestimmung der notwendigen Anlagenhöhe in Abhängigkeit der Investitionskosten in Abbildung 12.

Parameter	Einheit	Anlage 1	Anlage 2	Anlage 3
Rotorhöhe	[m]	3	4	5
Rotordurchmesser	[m]	4	5	6
Nennleistung	[kW]	3,5	6,5	10

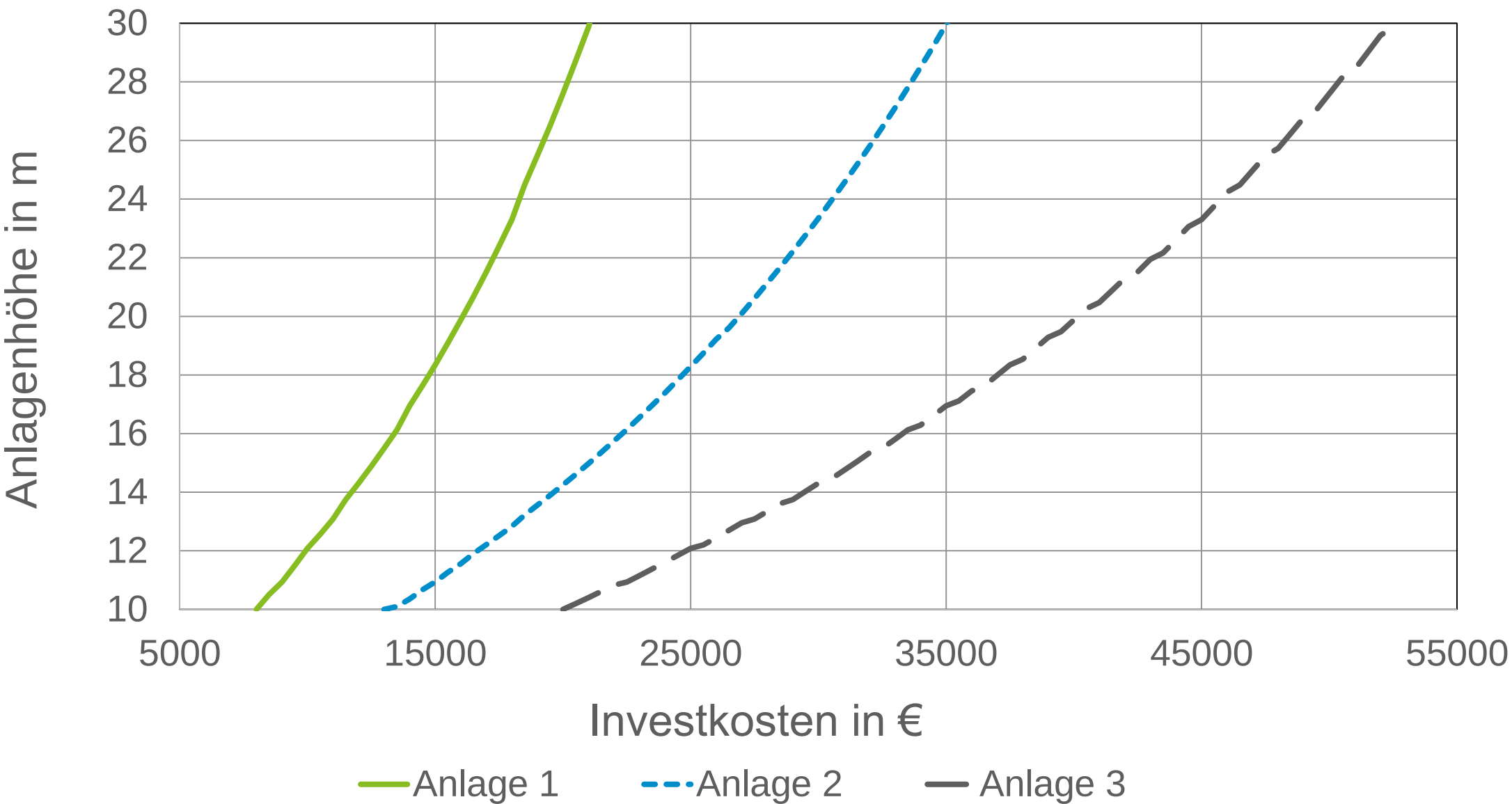
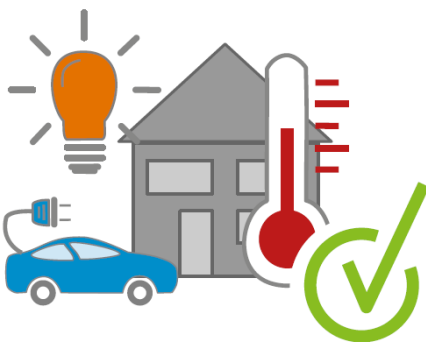


Abb. 12: Anlagenhöhe in Abhängigkeit der Investitionskosten zur Erzielung einer Amortisationszeit von 15 Jahren von drei verschiedenen VAWT an einem sehr windstarken Standort.



Schlussfolgerung für die Entwicklung und den Betrieb einer KWEA in der Lausitz

- Wirtschaftliche Betrieb einer KWEA ist möglich, bedarf aber ein paar wesentlicher Faktoren:
 - Vor allem einen windstarken Standort
 - gute Auslegung
 - Möglichst höhere Vergütung
- Entwicklung einer neuen Anlage steht unter den Aspekt diese in den Rahmen *Baurecht – Vergütung – Kosten – Umsetzbarkeit* passgenau zu entwickeln
- Vorteile der neuen Methoden, Materialien, Fertigungsverfahren sollten hierfür genutzt werden
- Ziel: Entwicklung der Anlagen im Vorbild der Photovoltaik mit beständiger Verortung in der Lausitz

Weitere Schritte im Projekt (in Bezug zur wirtschaftlichen Entwicklung einer KWEA)

- Aufbereitung der Kennlinien zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit (Kosten-Anlagenhöhen-Verhältnis) für weitere repräsentative Standorte der Lausitz
- Konkretisierung der Anlagenparameter → Entwicklung des ersten Demonstrators

Fazit zum Thema des Nachmittags „Wie wirtschaftlich ist Wind in der Stadt?“

- Unter den richtigen Rahmenbedingungen kann diese Technologie die autarke Versorgung mit elektrischer Energie im Zusammenspiel mit Photovoltaik ergänzen

**Wenn der Wind des Wandels weht,
bauen die Einen Schutzmauern,
die Anderen bauen Windmühlen.**

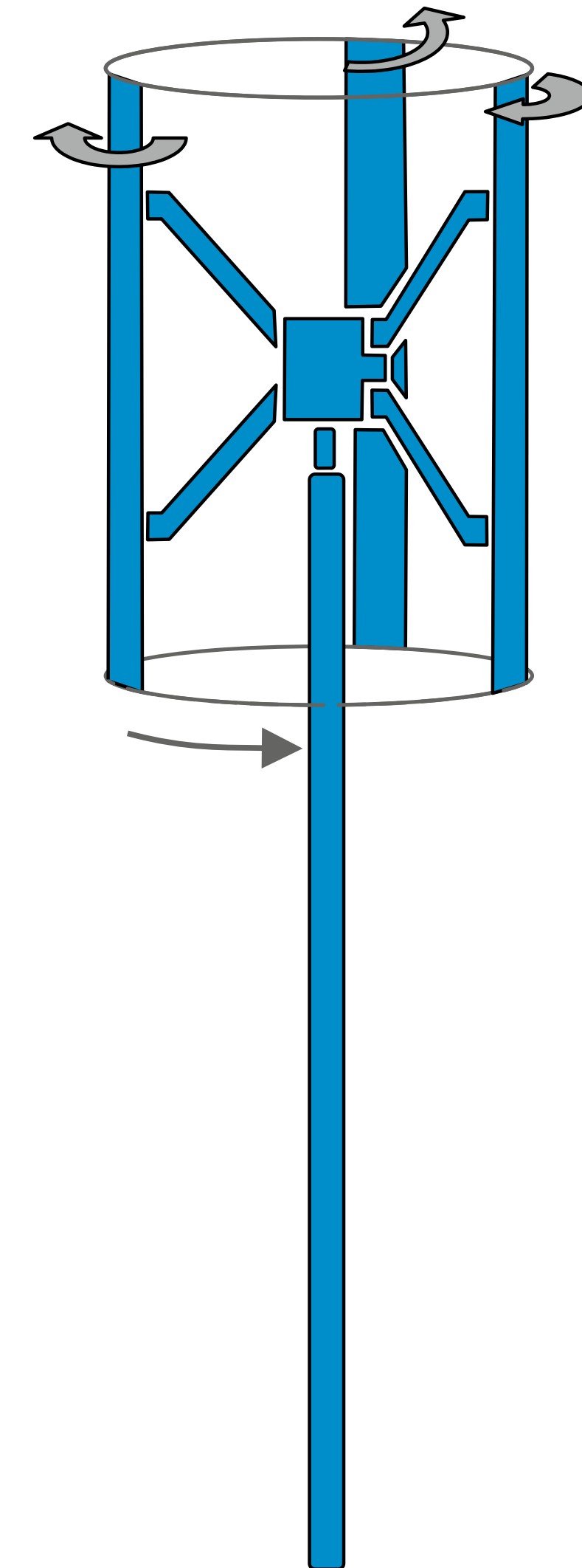
—
Chinesische Weisheit

Prof.-Ing. Karel Frana
Karel.Frana@hszg.de

Fakultät Maschinenwesen
Fachgruppe Strömungsmechanik und
Fluidenergiemaschinen
www.f-m@hszg.de

Andreas Härtwig
a.haertwig@maschinenbau-haertwig.de

Härtwig Maschinenbau GmbH & Co. KG
www.maschinenbau-haertwig.de



Quelle:

- [1] <http://www.cunewalde.de/industrie.html>
- [2] <https://life-and-technology.eu/2023/05/23/frischer-wind-aus-der-lausitz-beim-einsatz-regenerativer-energien/>
- [3] <https://www.maschinenbau-haertwig.de/>
- [4] <https://www.saechsische.de/plus/tausend-verschiedene-teile-am-tag-3999269.html>
- [5] <https://www.agrarheute.com/management/finanzen/vertikale-windturbinen-kaufen-alles-hausbesitzer-wissen-muessen-601044>
- [6] <https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/energie/aeromine-technologies-mini-windturbine-statt-photovoltaik/>
- [7] <https://www.agrarheute.com/management/agribusiness/windturbinen-vertikal-strom-erzeugen-fuers-eigenheim-600088>
- [8] <https://www.efre-bremen.de/projekte/projekte-2014-2020/recycling-von-rotorblaettern-aus-windenergieanlagen-32368>
- [9] De Tavernier, D. A. M. (2021). Aerodynamic advances in vertical-axis wind turbines.