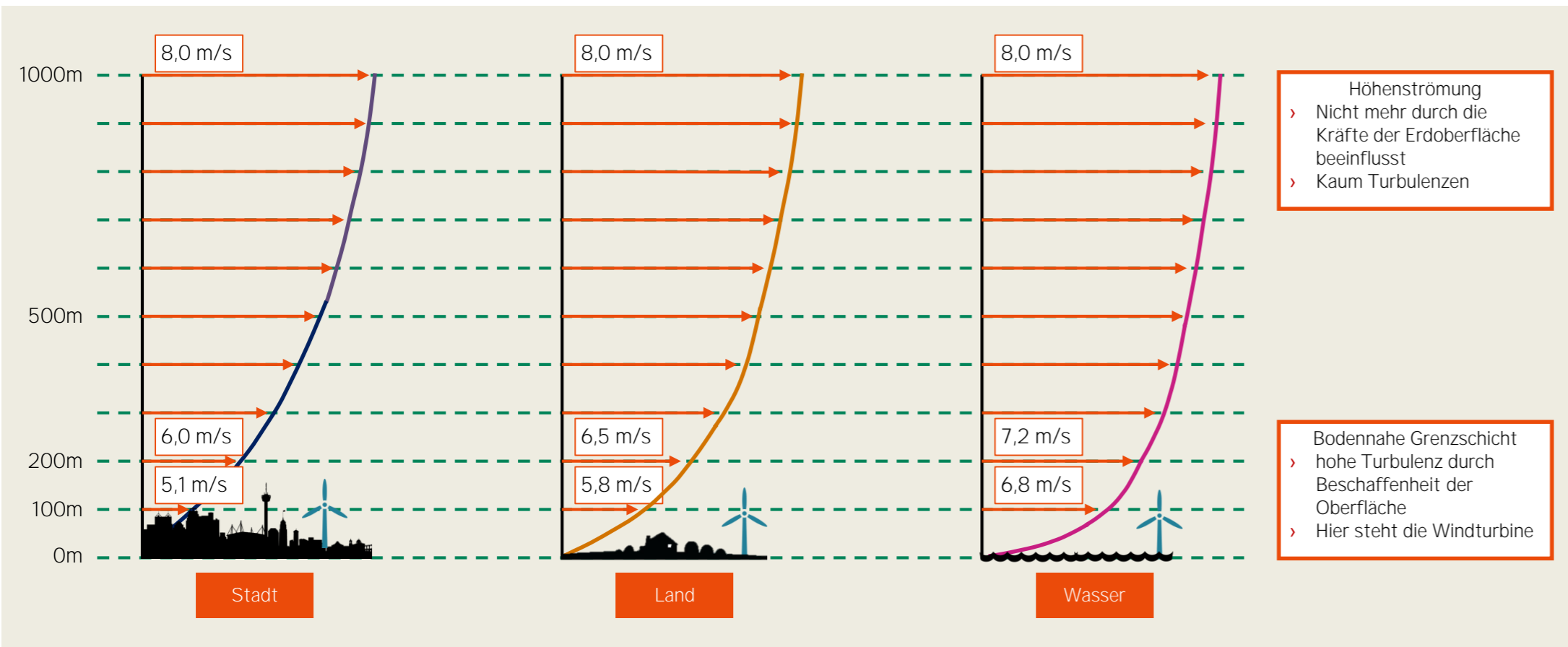


Rauhigkeitseffekt³



Dynamischer Auftrieb¹

Die Luft oberhalb des Flügels strömt mit einer höheren Geschwindigkeit als die Luft unterhalb des Flügels (siehe Infobox zu „Zirkulation“). Nach dem Gesetz von Bernoulli führt dies zu einem Unterdruck über dem Flügel und einem Überdruck unter der Tragfläche – die Folge ist dynamischer Auftrieb. Hinweis: Der dynamische Auftrieb ist die primäre jedoch nicht die alleinige Ursache dafür, dass sich ein Windrad dreht und ein Flugzeug fliegt.

Zirkulation

Bei kleinen Strömungsgeschwindigkeiten folgt die Strömung unter der Tragfläche der Heckkante, weshalb der sog. Anfahrwirbel entsteht (siehe A). Als physikalische Konsequenz bildet sich ein zweiter Wirbel mit entgegengesetztem Drehimpuls. Dieser Wirbel bildet sich um den Flügel herum (siehe B) und wird als Zirkulation bezeichnet. Dieser Wirbel überlagert sich mit der anströmenden Luft, sodass die Luft oberhalb des Flügels schneller als die Luft unterhalb des Flügels strömt.

Geschwindigkeitsenergie

Lageenergie

$$e = \frac{u^2}{2} + \frac{p}{\rho} + g \cdot z = \text{konstant}$$

Druckenergie

e = Energie u = Geschwindigkeit
p = Druck ρ = Dichte
g = Gravitation z = Höhe

Anzahl Rotorblätter⁴

| WKA mit 1 Rotorblatt: | WKA mit 2 oder 4 Rotorblättern: | WKA mit 3 Rotorblättern: „Industriestandard“ | WKA mit 5+ Rotorblättern: |
|--|---|---|--|
| <p>Pro</p> <ul style="list-style-type: none"> Kosten: Materialkosten fallen nur für ein Rotorblatt an. (ca. 200.000 € pro Blatt für eine große WKA) <p>Contra</p> <ul style="list-style-type: none"> Energieentnahme: Sehr geringe da nur 1 Rotorblatt Energie aufnimmt. Instabilität: Blatt läuft unruhig und würde den Turm schnell aus dem Fundament hebeln. | <p>Pro</p> <ul style="list-style-type: none"> Energieentnahme: Durch zusätzliche Rotorblätter kann dem Wind mehr Energie entnommen werden. <p>Contra</p> <ul style="list-style-type: none"> Instabilität: Bei gerader Anzahl an Rotoren wird die Spannung eines Rotorblattes an das direkt gegenüberliegende Blatt übertragen. Dies führt zu einer hohen Belastung des Materials (Lager etc.) <p>Beispiel: In Bodennahe ist die Windgeschwindigkeit geringer als in 100-200 m Höhe. Das obere Blatt bekommt dann besonders hohen Winddruck zu spüren, während das untere in ein Luftloch fällt - was die Lager unnötig belasten und den ganzen Turm in Schwingungen versetzen würde.</p> | <p>Pro</p> <ul style="list-style-type: none"> Materialbelastung: Bei ungerader Rotorzahl verteilen sich die Biegekräfte gleichmäßiger und die Anlage läuft viel runder. Wirtschaftlichkeit: Materialkosten und Energieentnahme im optimalen Verhältnis (für große WKA). <p>Contra</p> <ul style="list-style-type: none"> Geringere Energieentnahme als bei 4+ Rotorblättern. | <p>Pro</p> <ul style="list-style-type: none"> Energieentnahme: Erhöht sich mit der Anzahl an Rotorblättern <p>Contra</p> <ul style="list-style-type: none"> Verwirbelungen bei steigender Anzahl von Rotorblättern. Jedes Blatt durchläuft jeweils die Verwirbelungen des voranlaufenden Blattes; sie nehmen sich sozusagen gegenseitig den Wind aus den Segeln. Kosten: Jedes Rotorblatt kostet und dies muss im Verhältnis zum Nutzen stehen (Kosten vs. Nutzen). |

Bremse²

- Mechanische Scheibenbremsen werden zur Fixierung der Rotorblätter, Notabschaltung und zum manuellem Stopp bei Wartung eingesetzt

Getriebe²

- WEA mit und ohne Getriebe im Einsatz, wobei die Verwendung eines Getriebe Industriestandard ist
- Anpassung der Drehzahl und des Drehmomentes zwischen Rotor und Generator, Ziel: Rotor dreht mit niedriger Drehzahl (6-20 min⁻¹) und hohem Drehmoment, Generator dreht mit hoher Drehzahl (900-2000 min⁻¹) und niedrigem Drehmoment

Messinstrumente²

- Messwerte wie Windgeschwindigkeit und -richtung werden direkt an der WEA ermittelt, um sich optimal darauf einzustellen

Generator²

- Energiewandler (mechanische in elektrische Energie) der aus Rotor und Stator besteht
- Leistung 2,5 bis 10 MW (Industriestandard)

Rotornabe²

- Verbindet die Rotorblätter mit dem Rest der Anlage und überträgt die Leistung
- Nabenhöhe: 120-140m (Industriestandard)

Gondel²

- Dient als Einhausung und schützt die sensible Technik vor Umwelteinflüssen
- Besteht üblicherweise aus GFK oder Aluminium

Rotorblatt²

- Hauptkomponente bei der Umwandlung von Windenergie in mechanische Energie
- Kann verstellt werden (pitchen), um sich ideal zur Windgeschwindigkeit zu positionieren
- Länge: 50-80m (Industriestandard)

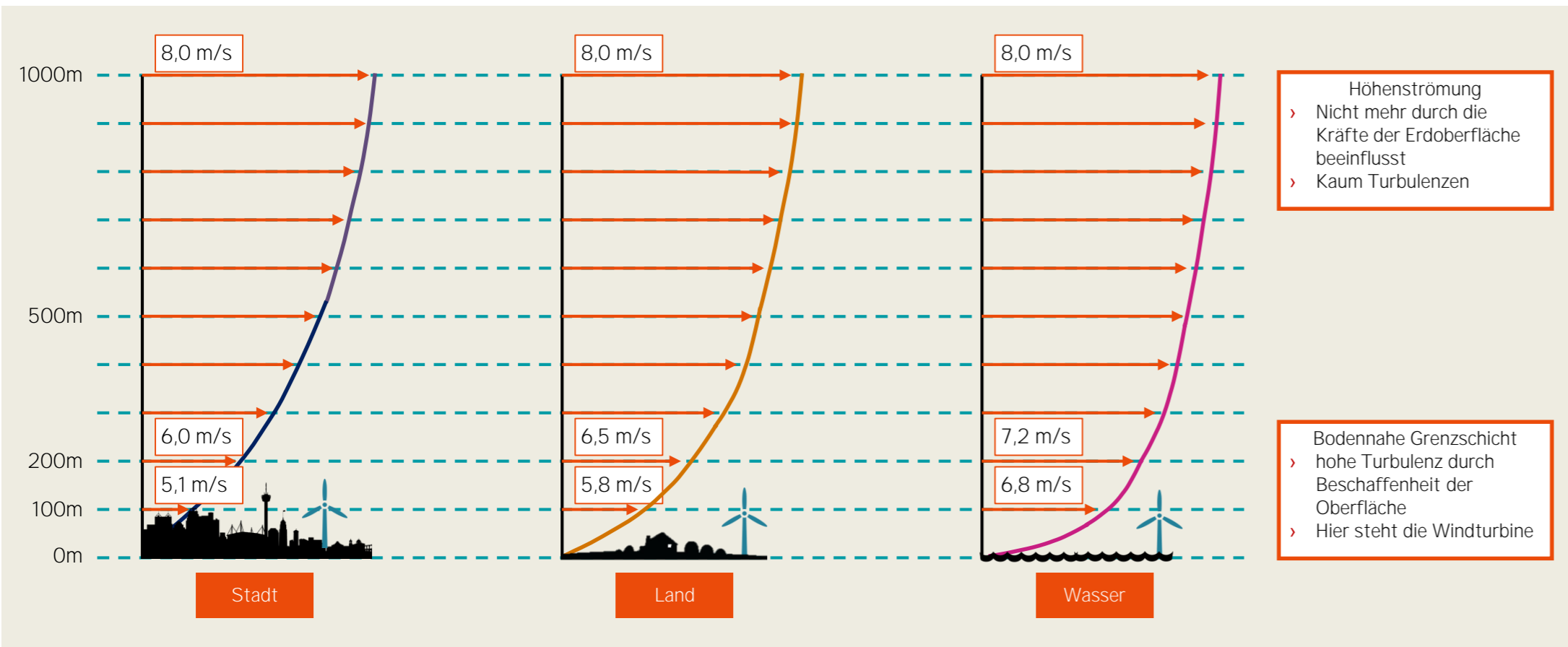
Turm²

- Größe und schwerste Komponente einer WEA
- Hohe des Turms ist vor allem standortabhängig
- Macht 15 bis 25% der Investitionskosten aus
- Art des Turms ist abhängig von Anlagentyp, Nabenhöhe und Windprofil: Rohrtürme aus Stahl sind heutzutage die gängigste Turmbauart

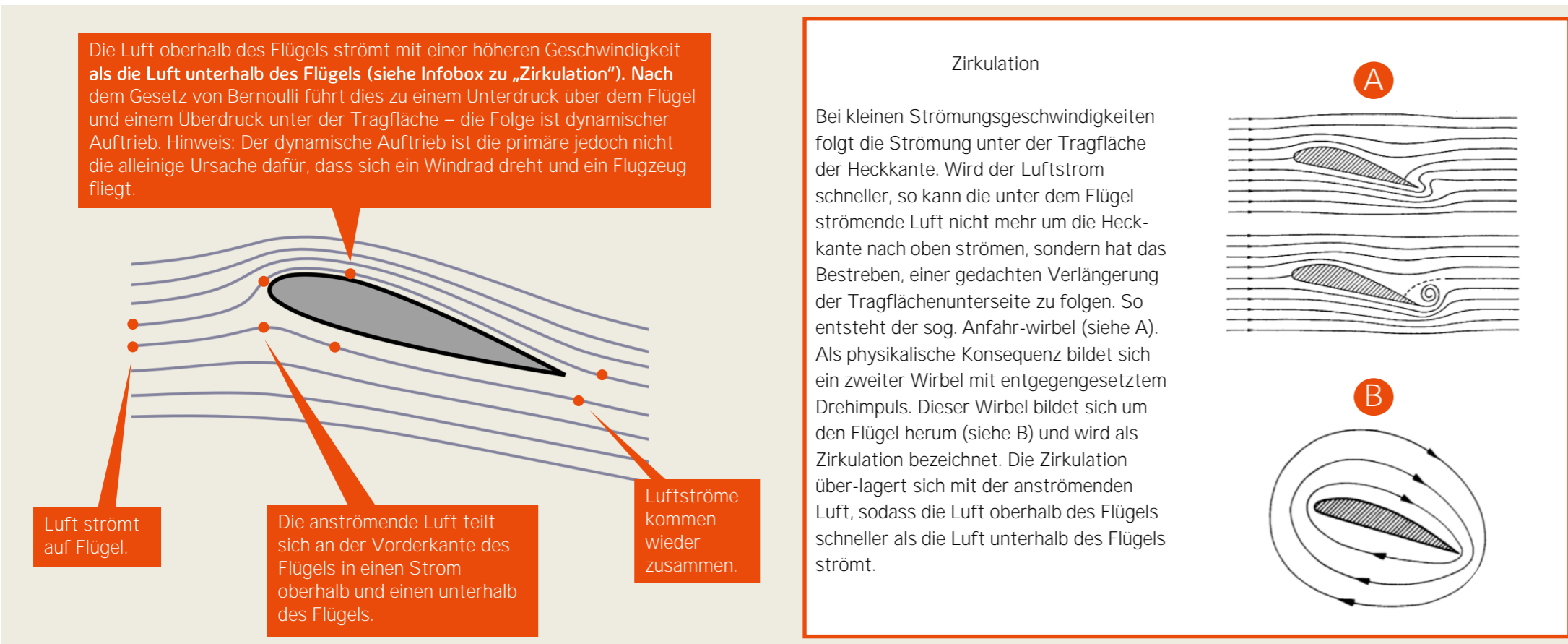
Height markers: 200 m, 160 m, 120 m, 80 m, 40 m

¹ https://www.physnet.uni-hamburg.de/TUHH/Luftwiderstand_Ergaenzung.pdf
² <https://www.wind-energie.de/themen/anlagentechnik/konstruktiver-aufbau/>
³ <http://www.renewable-energy-concepts.com/german/windenergie/wind-basiswissen/rauhigkeitsklassen.html>
⁴ <https://www.geo.de/wissen/17579-rtkl-endlich-verstehen-warum-haben-windraeder-nur-drei-fluegel>

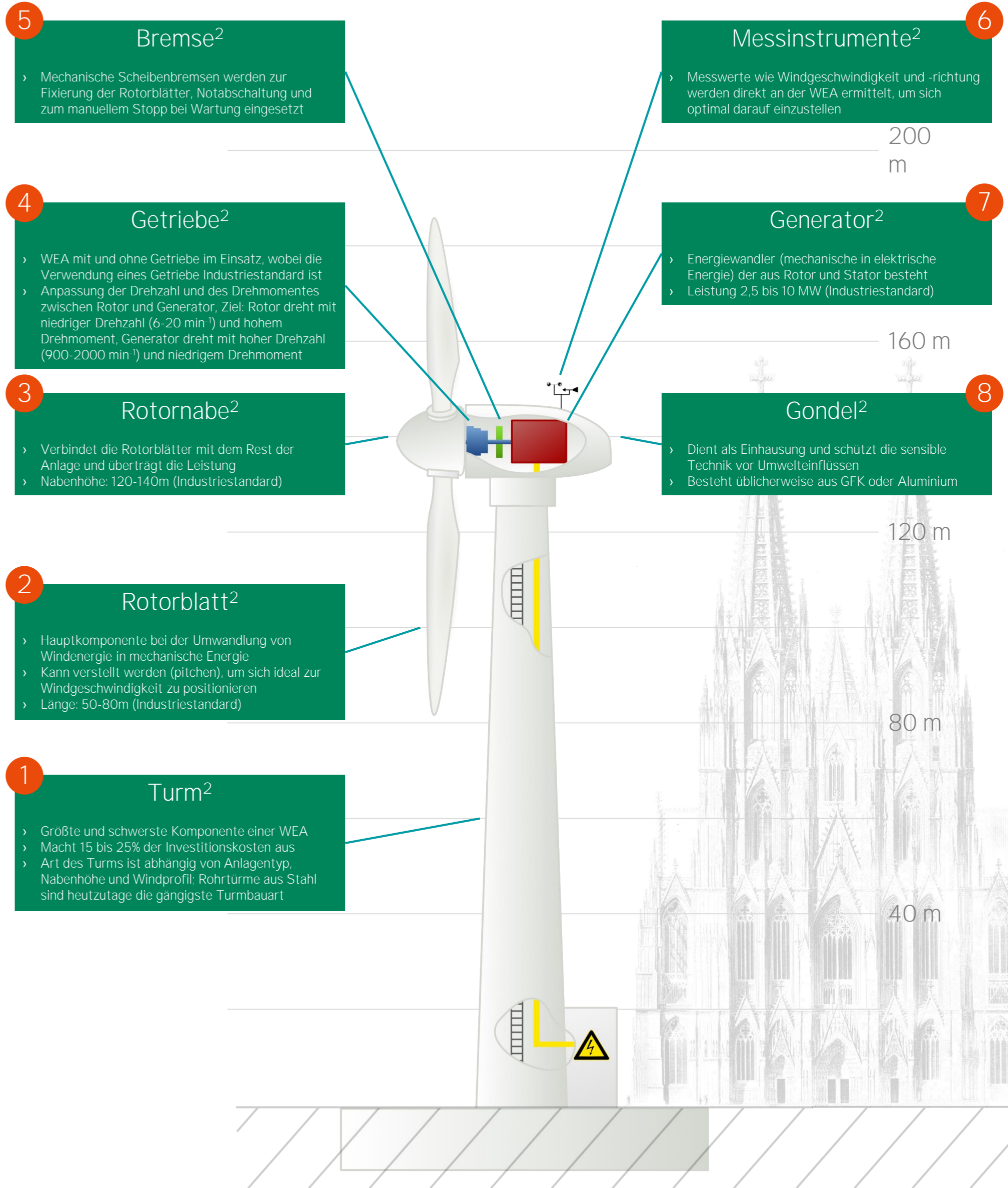
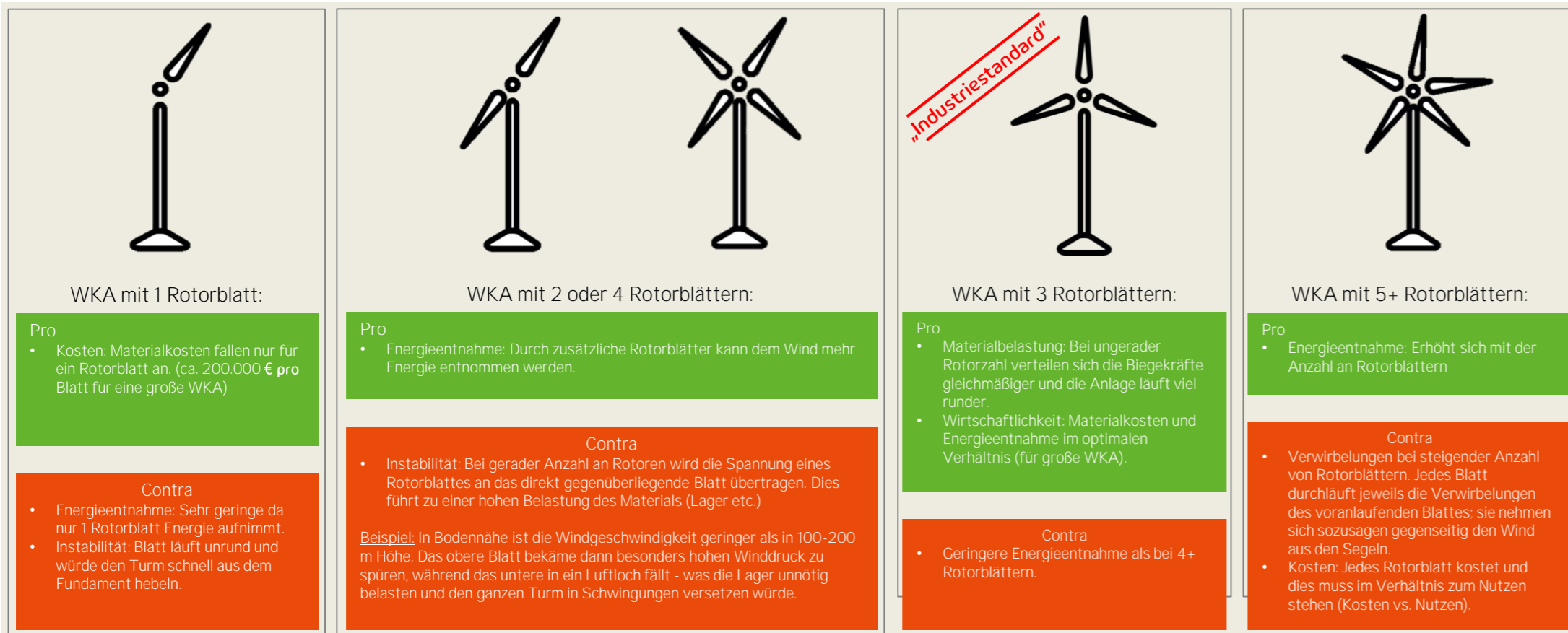
Rauhigkeitseffekt³



Dynamischer Auftrieb¹



Anzahl Rotorblätter⁴



¹ https://www.physnet.uni-hamburg.de/TUHH/Luftwiderstand_Ergaenzung.pdf
² <https://www.wind-energie.de/themen/anlagentechnik/konstruktiver-aufbau/>
³ <http://www.renewable-energy-concepts.com/german/windenergie/wind-basiswissen/rauhigkeitsklassen.html>
⁴ <https://www.geo.de/wissen/17579-rtkl-endlich-verstehen-warum-haben-windraeder-nur-drei-fluegel>

