

# Metrologie für die Energiewende

Tom Patrick Heins

17. Oktober 2025



Physikalisch-Technische Bundesanstalt  
Nationales Metrologieinstitut



# Physikalisch-Technische Bundesanstalt

## Nationale Metrologische Institut (NMI) Deutschlands

### Aufgaben

- Realisierung der SI-Einheiten
- Weitergabe an Labore und Industrie durch Kalibrierungen
- Gesetzlich vorgeschriebene Messungen

### Standorte

- Braunschweig
- Berlin

### Personal

- 2.100 Angestellte
- 190 Doktoranten



# Physikalisch-Technische Bundesanstalt

## Nationale Metrologische Institut (NMI) Deutschlands

### Aufgaben

- Realisierung der SI-Einheiten
- Weitergabe an Labore und Industrie durch Kalibrierungen
- Gesetzlich vorgeschriebene Messungen

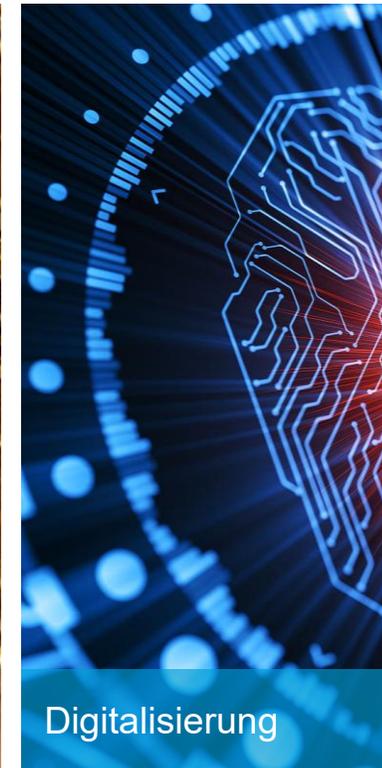
### Standorte

- Braunschweig
- Berlin

### Personal

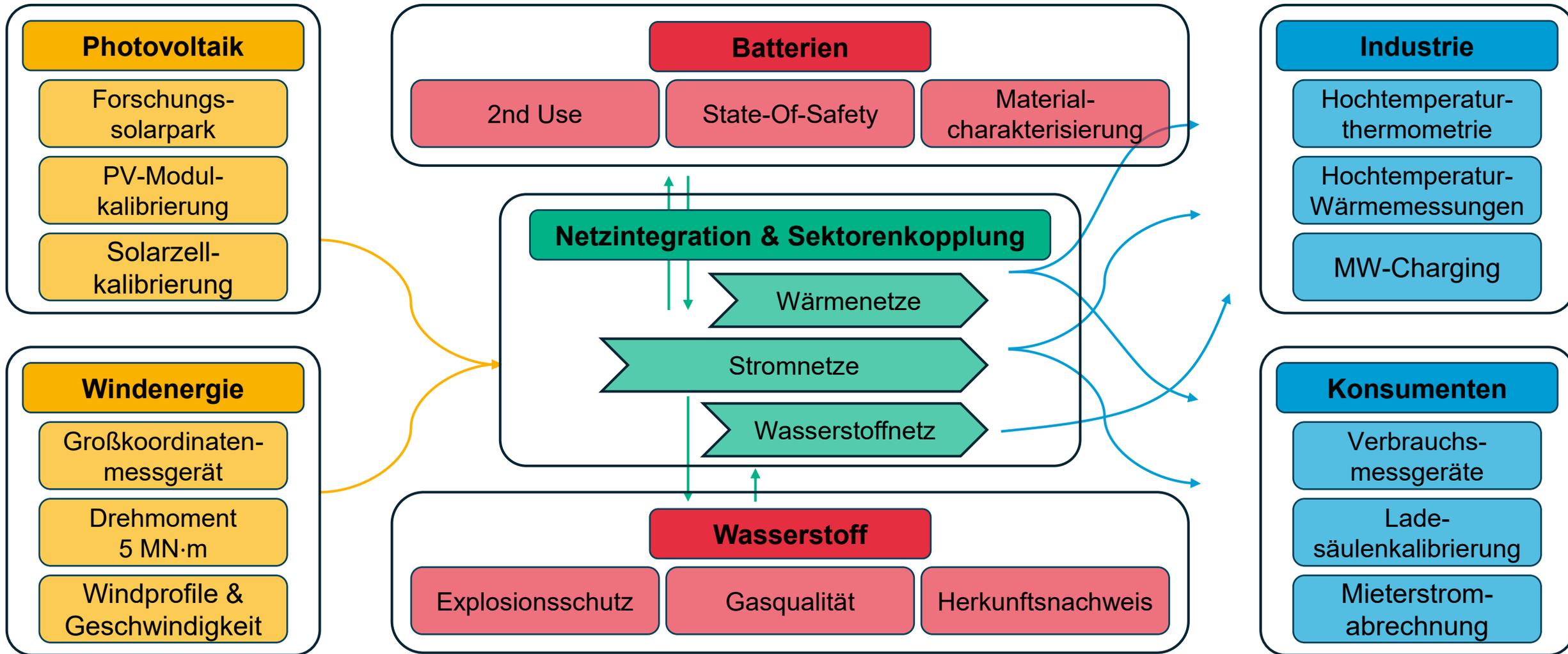
- 2.100 Angestellte
- 190 Doktoranten





Ziel: Die PTB stellt metrologische Dienstleistungen für alle Komponenten zukünftiger Energiesysteme zur Verfügung

# PTB und das Energiesystem



# Gliederung

---

1. Erzeugung
2. Übertragung
3. Speicherung & Konversion
4. Verbrauch

# 1. Erzeugung

## Photovoltaik

Forschungs-  
solarpark

PV-Modul-  
kalibrierung

Solarzell-  
kalibrierung

## Windenergie

Großkoordinaten-  
messgerät

Drehmoment  
5 MN·m

Windprofile &  
Geschwindigkeit

## Batterien

2nd Use

State-Of-Safety

Material-  
charakterisierung

## Netzintegration & Sektorenkopplung

Wärmenetze

Stromnetze

Wasserstoffnetz

## Wasserstoff

Explosionsschutz

Gasqualität

Herkunftsnachweis

## Industrie

Hochtemperatur-  
thermometrie

Hochtemperatur-  
Wärmemessungen

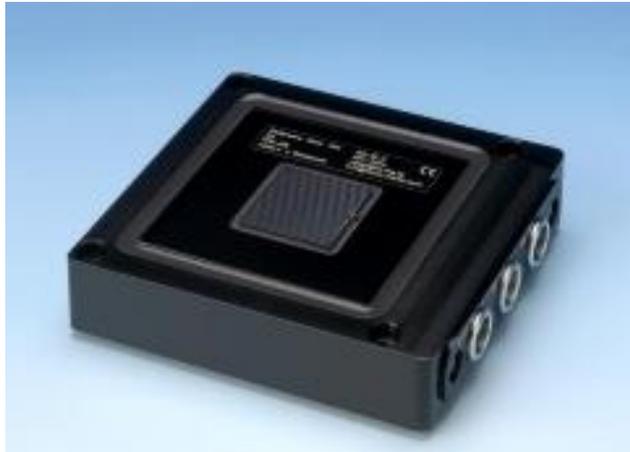
MW-Charging

## Konsumenten

Verbrauchs-  
messgeräte

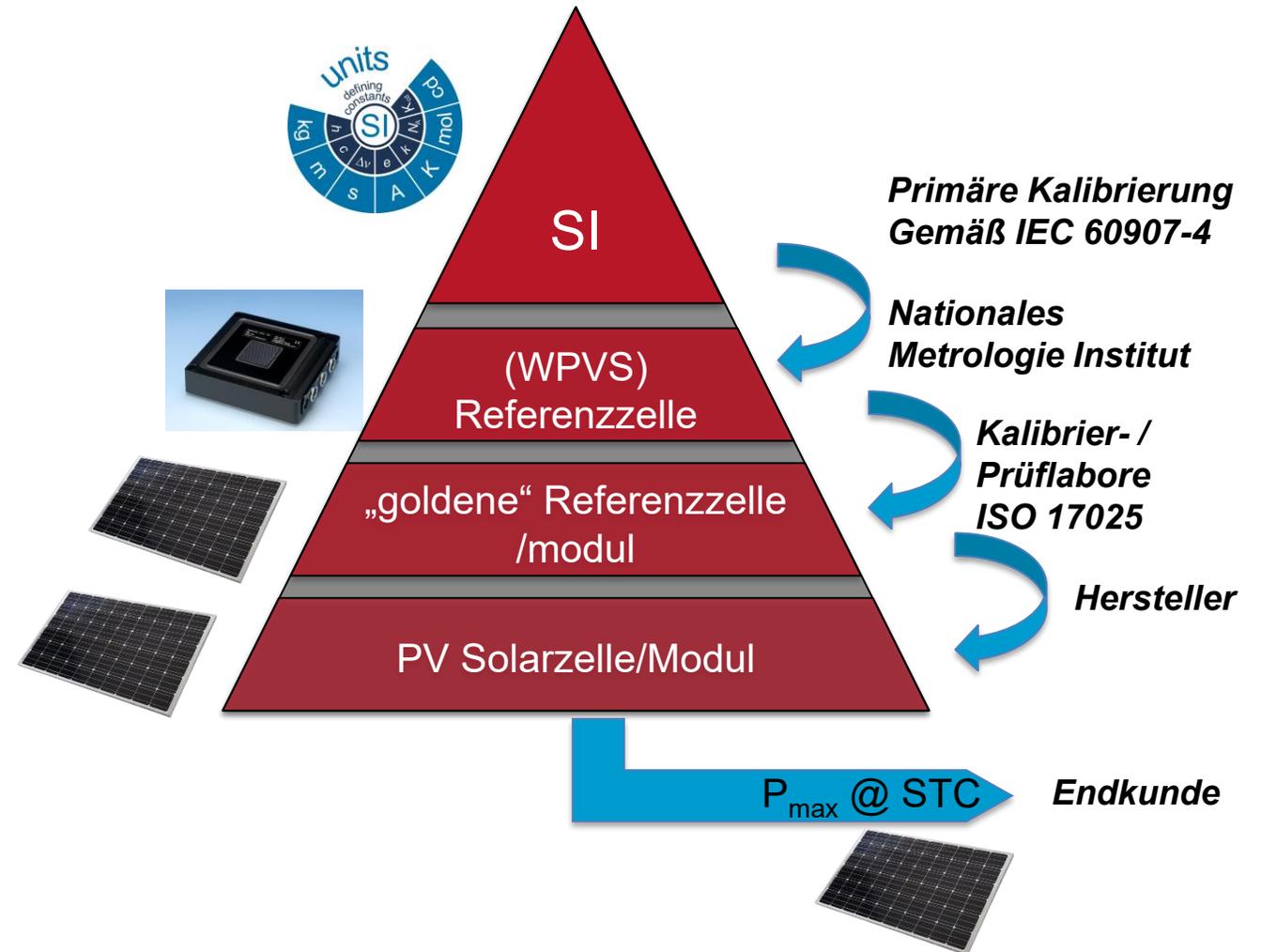
Lade-  
säulenkalibrierung

Mieterstrom-  
abrechnung

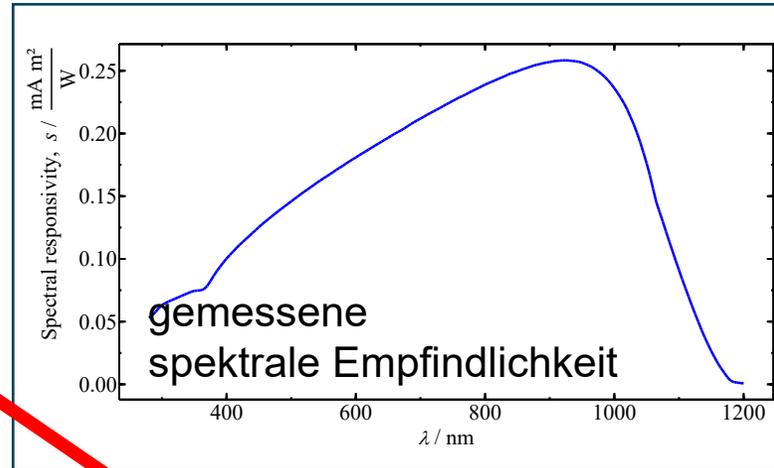
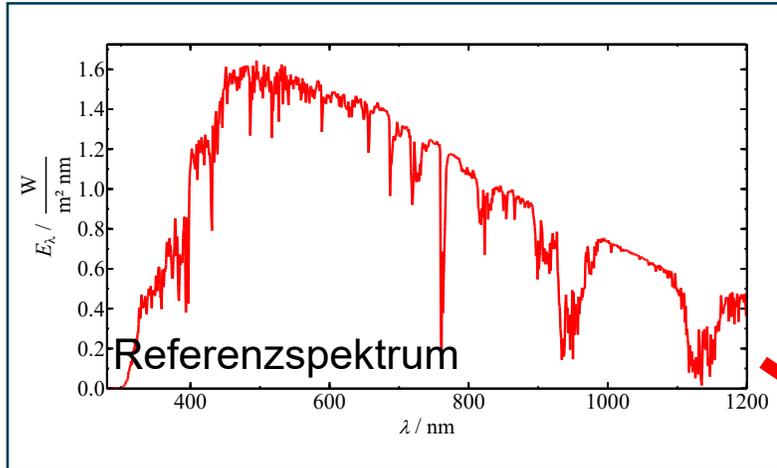


## World PV Scale (WPVS) Referenzzelle

- Charakterisierung von PV-Modulen mit Sonnensimulatoren
- Die Bestrahlungsstärke des Simulators muss bekannt sein
- Bestimmung erfolgt mit WPVS Referenzzellen
- Referenzzellen müssen kalibriert sein



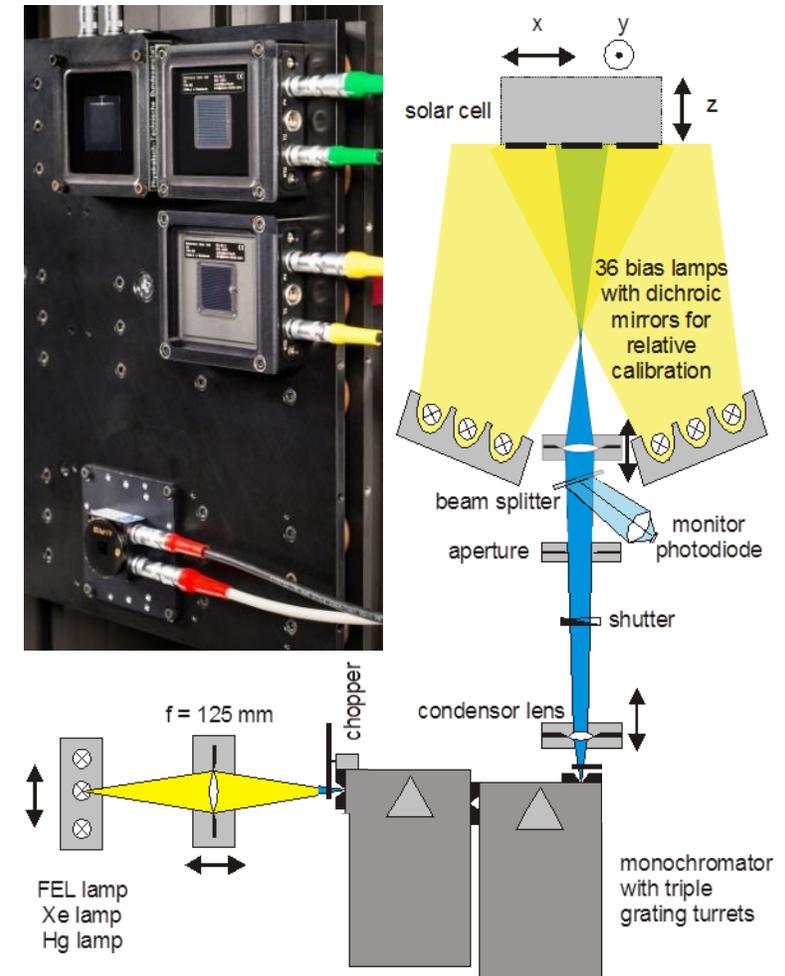
# Photovoltaik - Solarzellkalibrierung



Strom der Referenzsolarzelle:  $I = \int E_{AM1.5}(\lambda) \cdot s_{STC}(\lambda) d\lambda$

## Differenzielle spektrale Empfindlichkeit (DSR) – Verfahren

- Substitutionsprinzip
  - DUT: Referenz-Solarzelle
  - REF: kalibrierte Photodiode (rückgeführt auf PTB Kryoradiometer)
- Verwendung monochromatischer Bestrahlungsstärke
- Zusätzliche Bias-Bestrahlungsstärke



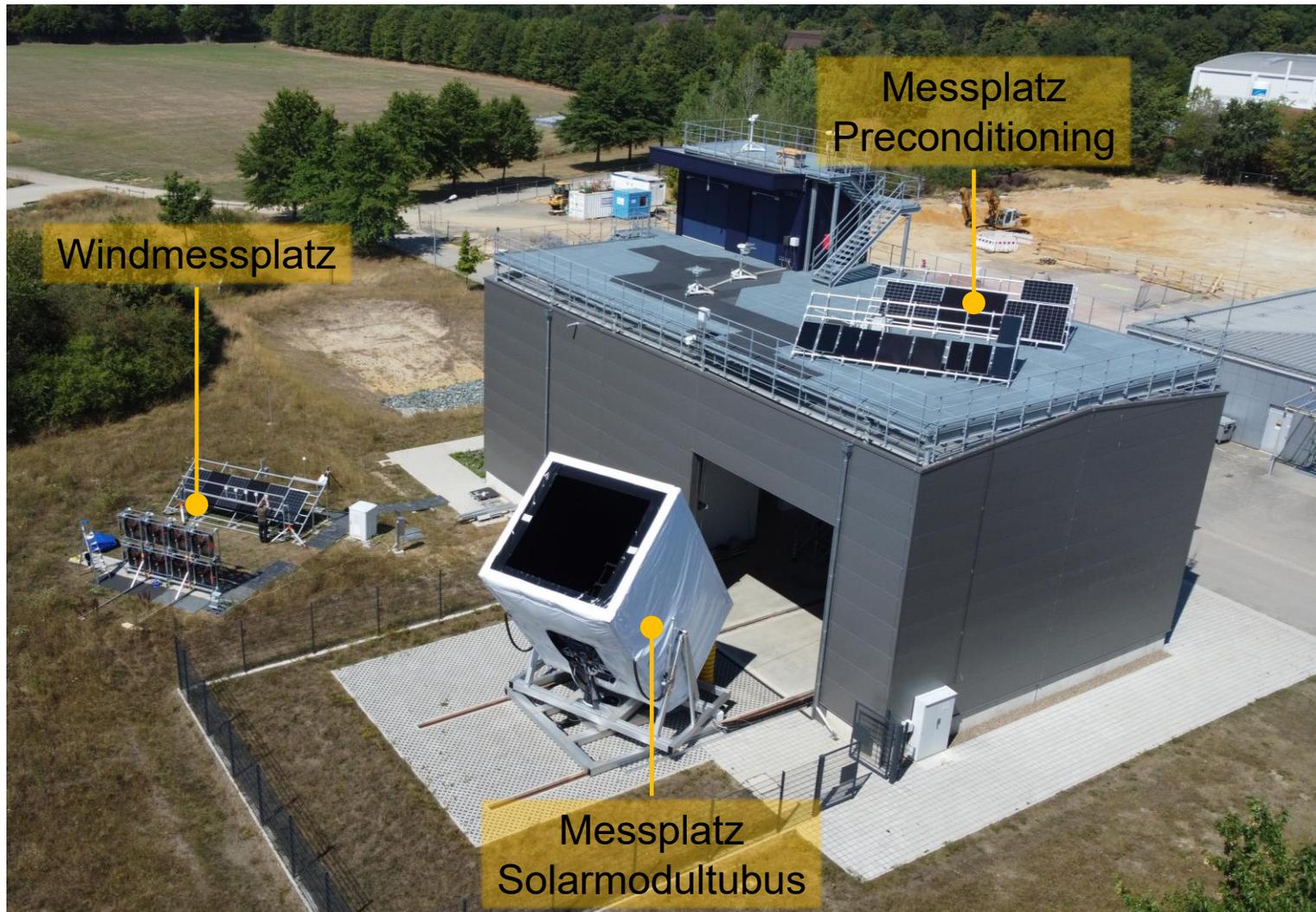
# Solarmodulkalibrierung: Indoor



## LED Sonnensimulator mit 26 verschiedenen "Farben"

- Bestrahlungsstärke einstellbar
- Bestrahlungsdauer einstellbar
- Temperaturkontrolle
  
- Spektrale Verteilung nicht perfekt
- Schlecht Skalierbar
- Divergente Lichtquelle

# PV-Modul-Kalibrierung: Outdoor



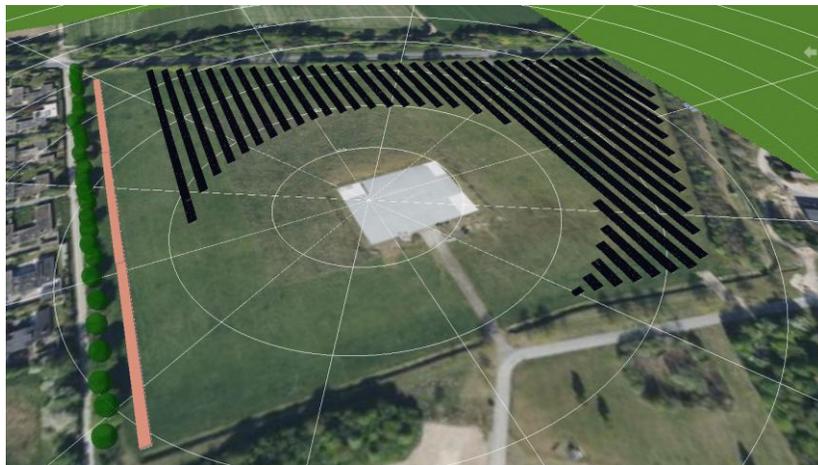
## Kompetenzzentrum Photovoltaik (2019 – 2023)

Solarmodultubus zur Messung elektrischer und optischer Moduleigenschaften mit direktem Sonnenlicht

- Sehr gute Spektralverteilung
- Parallele Lichtquelle
- Lichtquelle skalierbar, Wind
  
- Temperaturstabilität schwierig
- Spektrum und Bestrahlungsstärke nicht kontrollierbar

# Forschungssolarpark

## Geplant: Aufbau eines 4 MW Forschungssolarparks

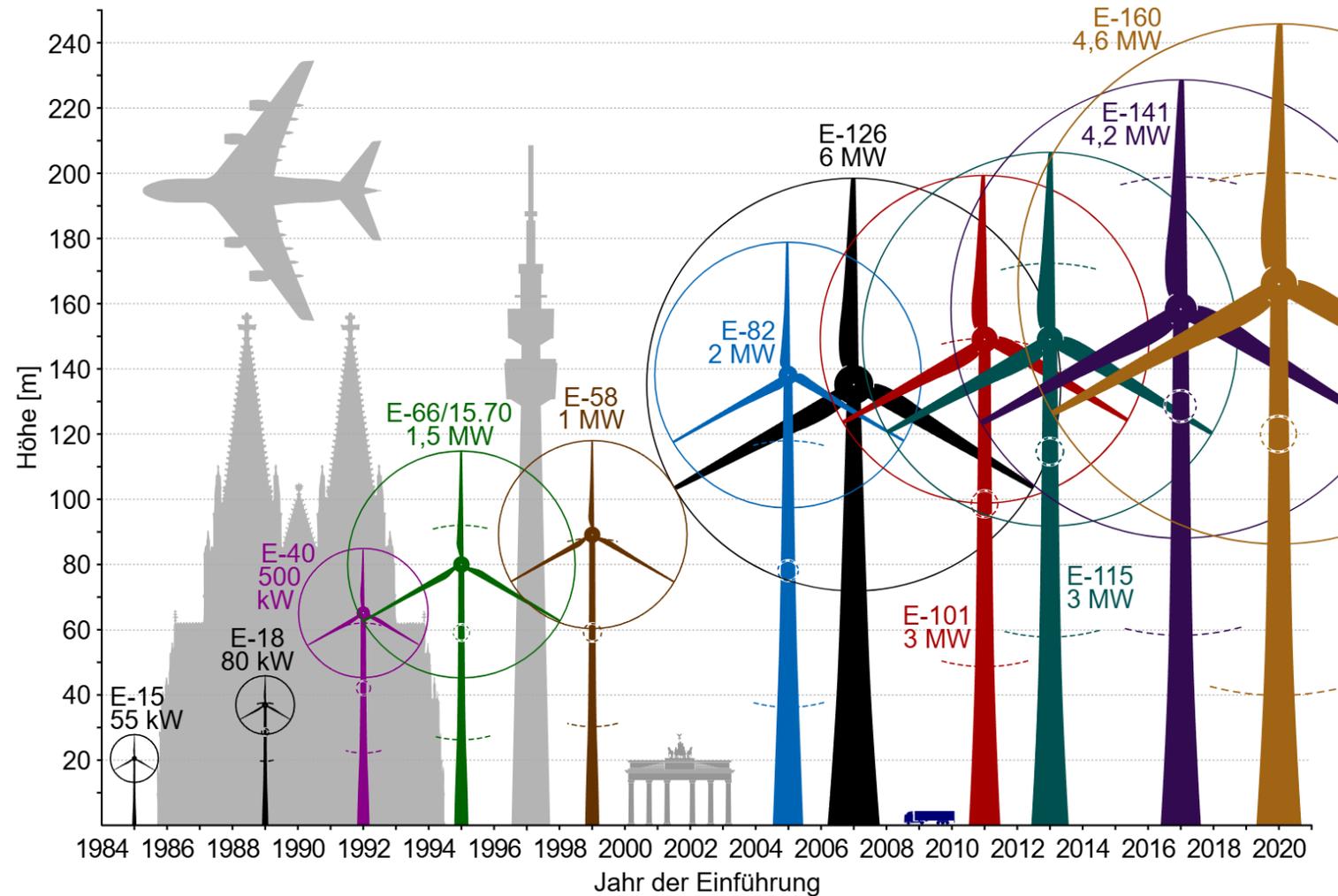


- Implementierung von Messtechnik für Datenerfassung im Solarpark
- Erstellung eines digitalen Zwillings aus erfassten Daten
- Untersuchung von Sensornetzwerken
- Kompetenzaufbau im Bereich messdatenbasierte Anlagenüberwachung
- Einachsige Nachführung für Agri-PV
- Alterungsuntersuchungen
  
- 4.000.000 kWh pro Jahr
  - 99,7 % Eigenverbrauch
  - deckt 15 % des PTB-Strombedarfs

# Kompetenzzentrum für Windenergie

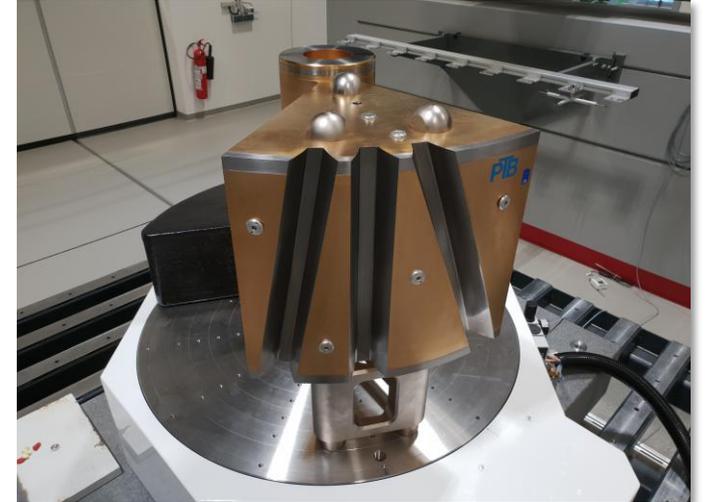


# Entwicklung von Windenergieanlagen (WEA)



# Groß-Koordinatenmessgerät

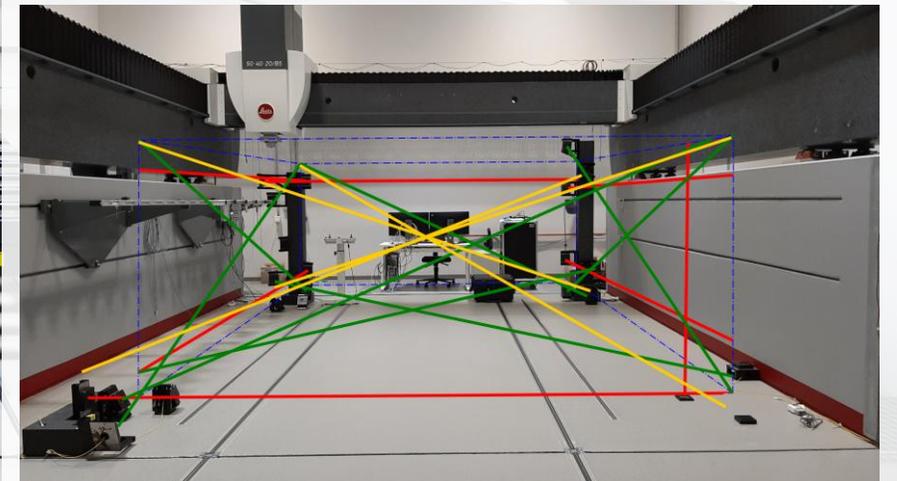
- Für die hochpräzise Fertigung von mechanischen Komponenten für WEA ist großskalige Koordinatenmesstechnik erforderlich
- Zur Kalibrierung von Koordinatenmessgeräten werden von der PTB Verzahnungsnormale bereitgestellt
- Die Kalibrierung dieser Normale erfolgt am Groß-Koordinatenmessgerät im Windkompetenzzentrum der PTB



# Groß-Koordinatenmessgerät



- Ausstattung:
  - Drehtisch:  $\varnothing$  2 m
  - optische und taktile Sensorik
  - Absolut Multilinesystem mit 31 Laserlinien für die Geometrieüberwachung



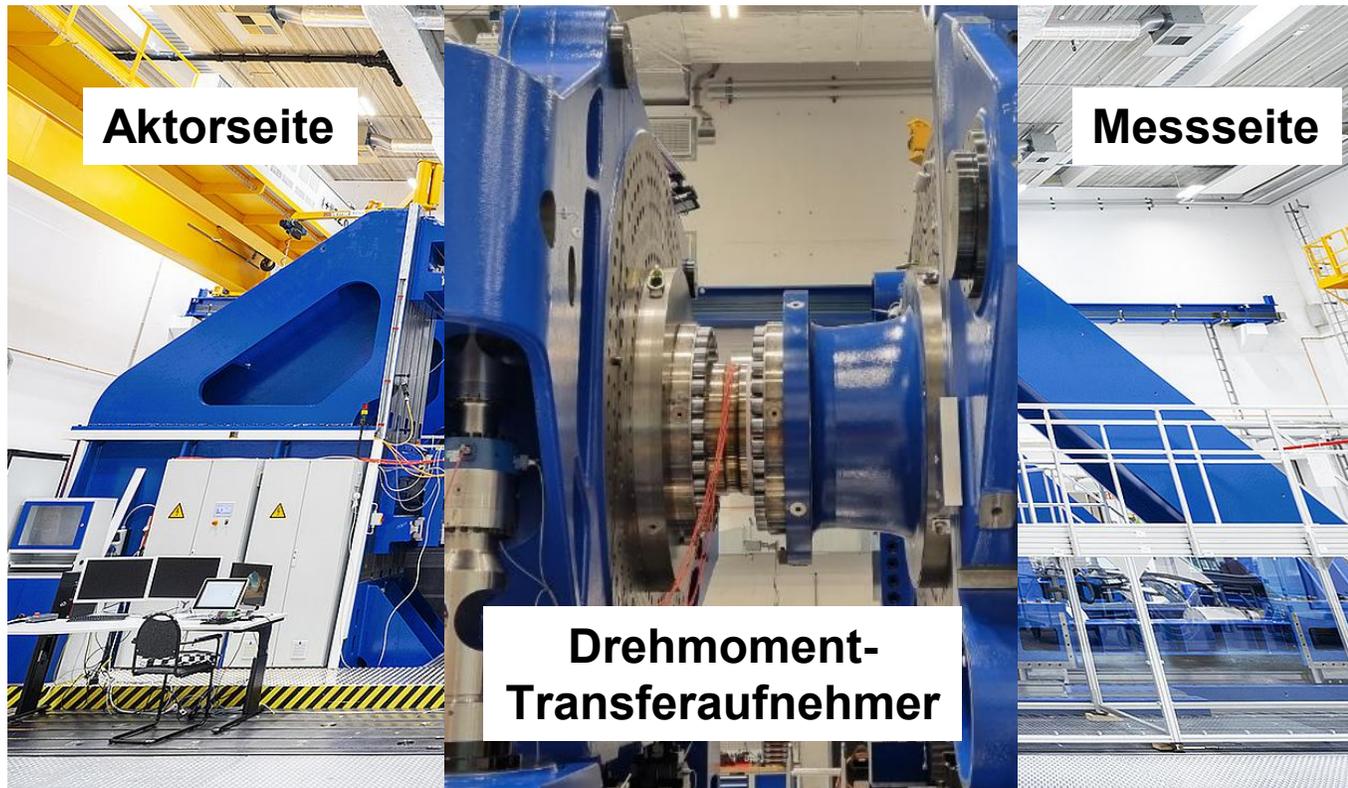
# Drehmomentmessungen

---

- Das Drehmoment einer WEA ist eine wichtige Messgröße für die Steuerung
  - Optimierte Betriebsführung (Ertragssteigerung)
  - Verhinderung von Beschädigung (z.B. Getriebe)
- An einer 5 MW-WEA tritt bei einer Drehzahl von 10 U/min ein Drehmoment von 4,8 MN m auf
- In der Vergangenheit: höchstes kalibrierbares Drehmoment an der PTB: 1,1 MN m
- Messungen höherer Drehmomente nicht metrologisch rückführbar

# Drehmomentmessungen

## Normalmesseinrichtung

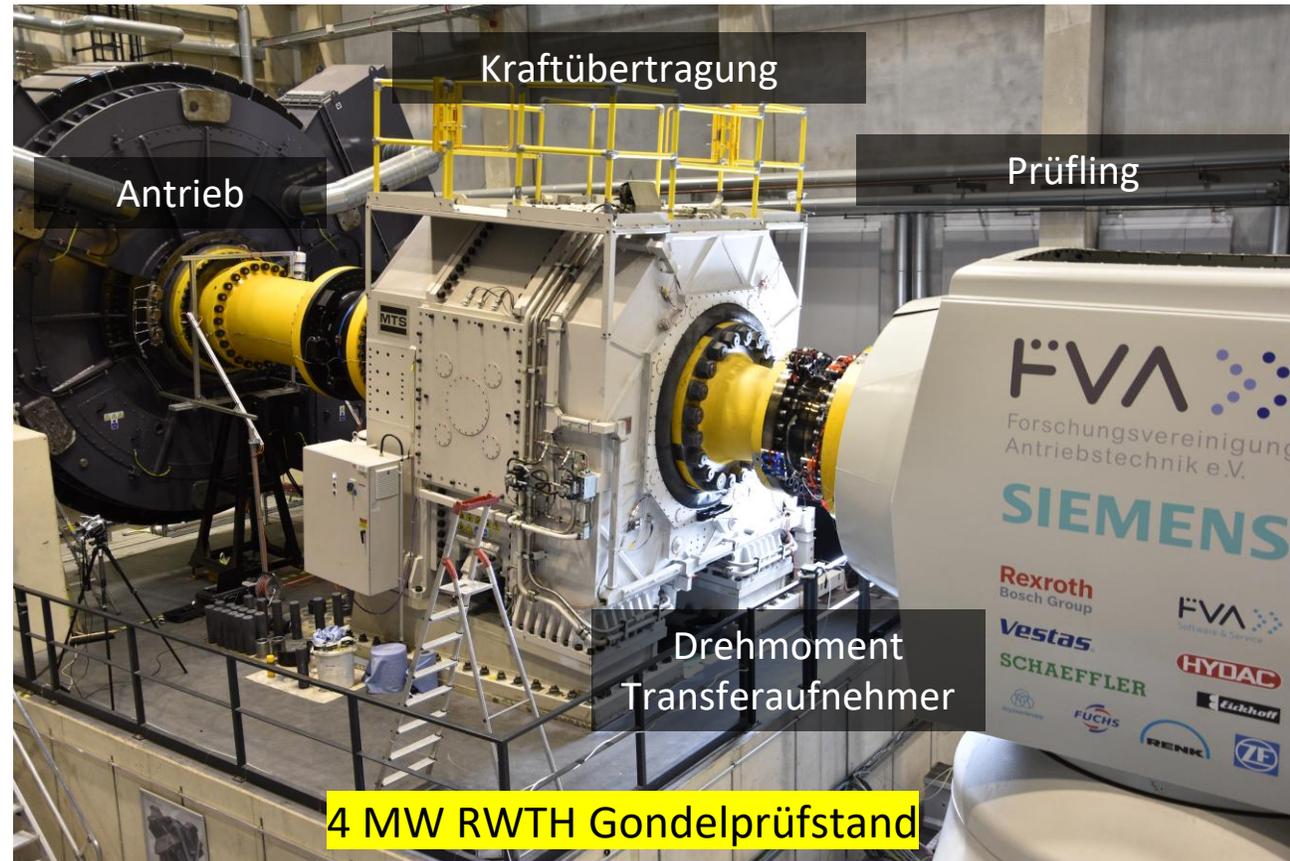


Messgröße	Messbereich	Angestrebte Messunsicherheit
Drehmoment $M_z$	0,5 – 1 MN·m	<0,5% (k=2)
	1 – 2,5 MN·m	<0,2% (k=2)
	2,5 - 5 MN·m	<0,1% (k=2)
Biegemoment $M_y$	900 kN m	<1% (k=2)
Biegemoment $M_x$	600 kN m	<1% (k=2)
Axialkraft $F_z$	400 kN	<1% (k=2)
Querkraft $F_y$	200 kN	<1% (k=2)
Querkraft $F_x$	2 kN	<1% (k=2)

- Kalibrierung von Drehmoment-Transferaufnehmern bis 5 MN m
- Perspektivisch: Ausbau auf bis zu 20 MN m

# Drehmomentmessungen

Anwendungsfall: rückgeführte Messung von Drehmoment bis 5 MN m am Gondelprüfstand des *Center for Wind Power Drives* (CWD) der RWTH-Aachen



# Windgeschwindigkeit

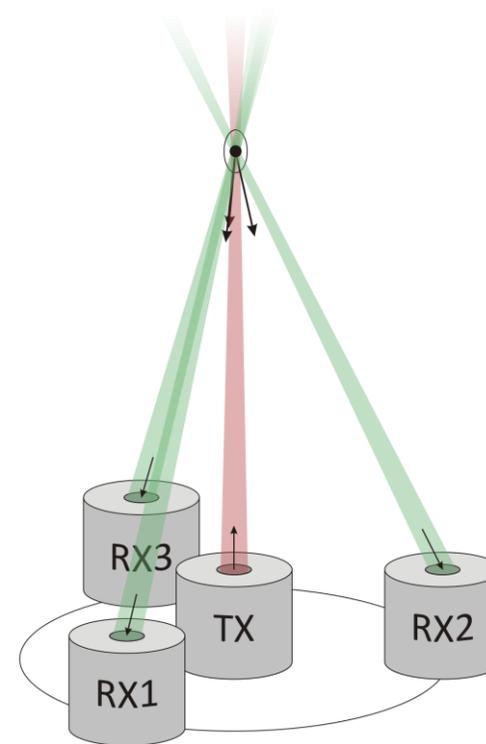
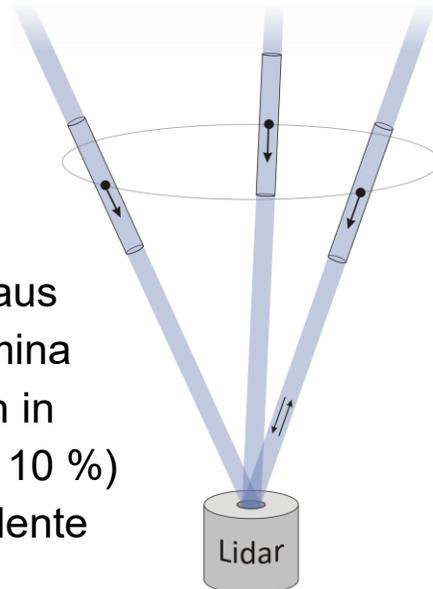
- Zur Prüfung von Standorten für WEA sind Windgeschwindigkeitsmessungen erforderlich



Foto: A.BourgeoisP - Wikimedia Commons - CC-BY-SA 4.0

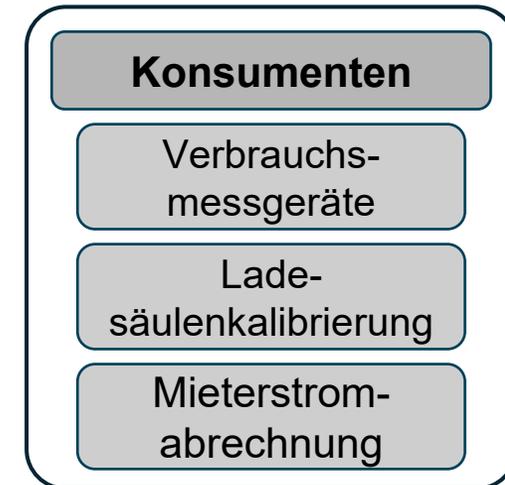
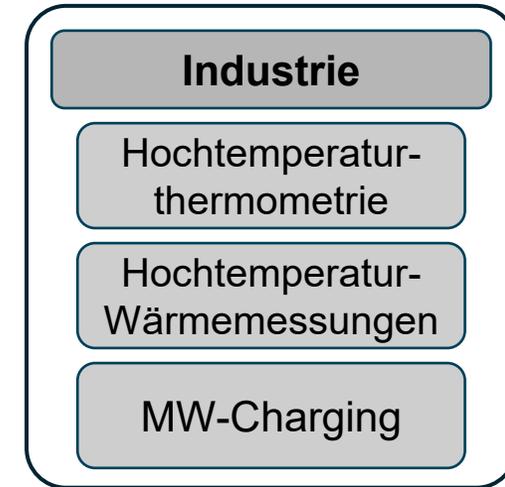
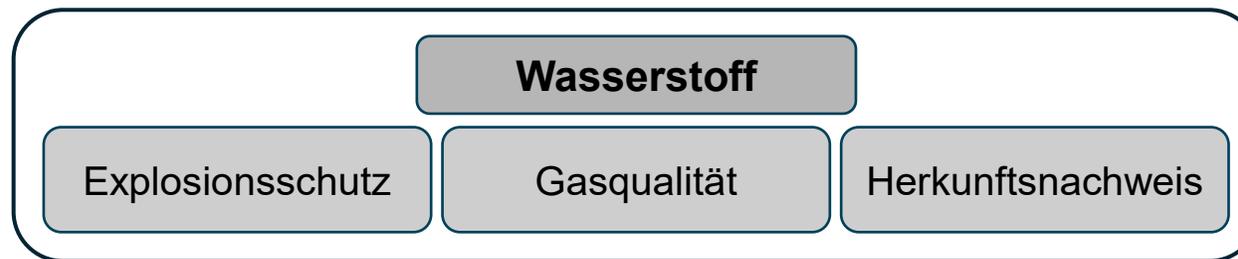
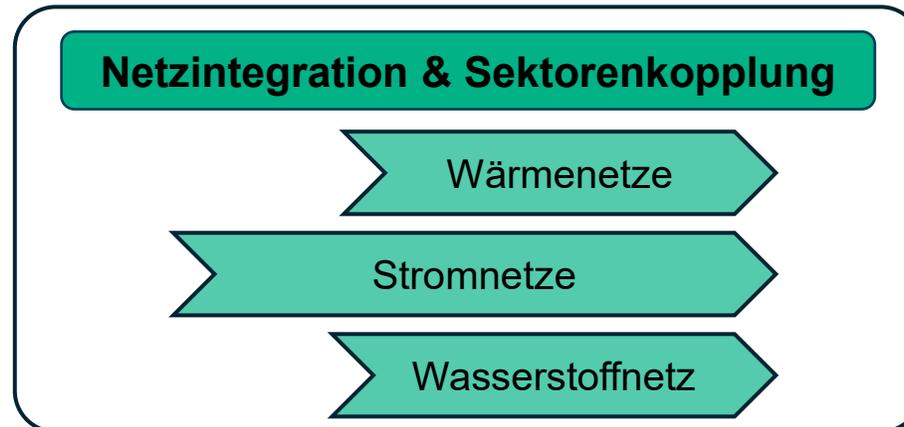
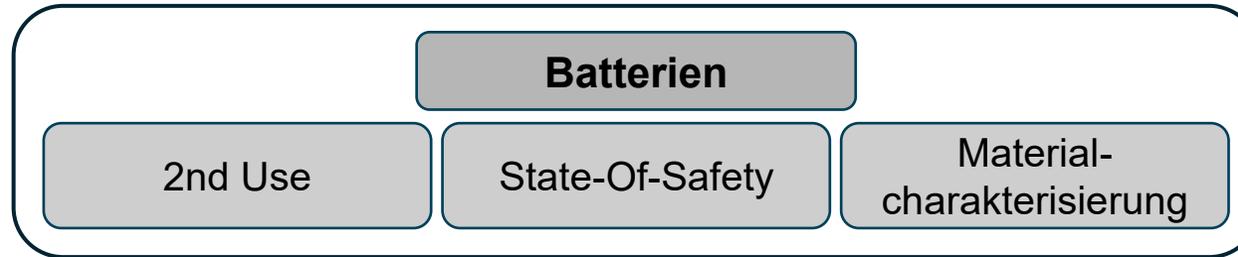
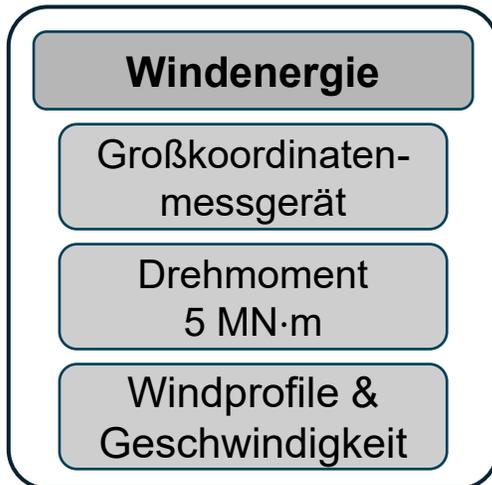
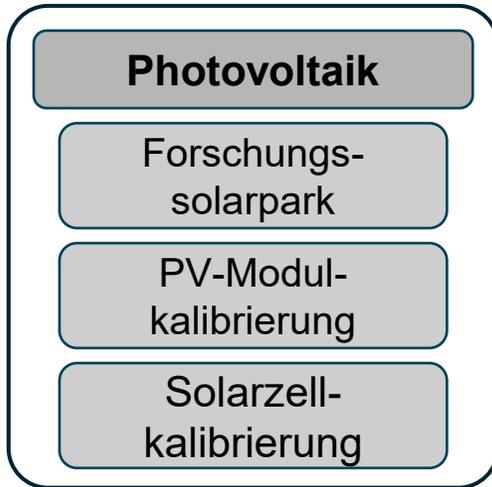
- Windmessmasten
  - Aufwendig
  - Ortsgebunden
  - Invasive Messung

- Wind-Lidar (monostatisch)
  - Verrechnet Messwerte aus unterschiedlichen Volumina
  - Messwertabweichungen in komplexem Gelände ( $> 10\%$ )
  - Nicht geeignet für turbulente Messgrößen



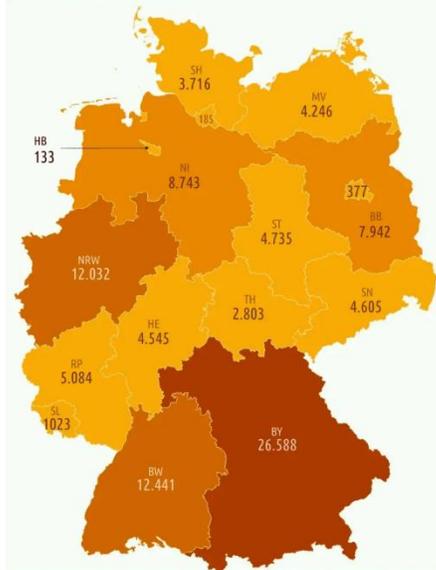
- Wind-Lidar der PTB (bistatisch)
  - Vektorielle Messung in einem kompakten Messvolumen
  - Messunsicherheit  $< 1,5\%$  (auch in komplexem Gelände)
  - Mit 10 Hz Messrate geeignet für turbulente Messgrößen

## 2. Übertragung



# Hochspannungsgleichstromübertragung

**PHOTOVOLTAIK IN DEUTSCHLAND 2024**  
Installierte Gesamtleistung pro Bundesland in Megawatt [MWp]



**WINDENERGIE IN DEUTSCHLAND 2023**  
Installierte Gesamtleistung pro Bundesland/Gebiet [Megawatt]



Source: BNetzA, Fraunhofer ISE Stand Jan 2025

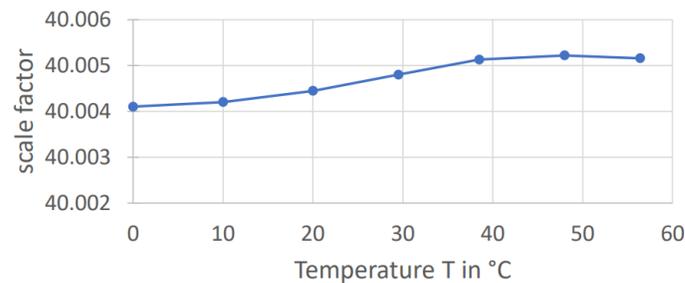
Source: Bundesnetzagentur, Stand Dez 2023

- Regionale Schwerpunkte der PV- und Windenergieerzeugung
- Die Distanzen zwischen Erzeugung und Verbrauch nehmen zu
- Große Leistungen über große Distanzen nur mit DC wirtschaftlich
- AC-Unterseekabel haben auf kurzen Distanzen hohe Verluste
- Zukünftiges Übertragungsnetz basiert vermehrt auf Hochspannungsgleichstromübertragung
- Suedlink
  - 4 GW Leistung
  - 525 kV
  - ~ 600 km
- Zukünftige Leistungen > 1000 kV
- Keine Mess- und Kalibriermöglichkeiten für diese Systeme
- IEC 60060 deckt die Spannungen realer HVDC-Systeme nicht mehr ab

# Hochspannungsgleichstromübertragung

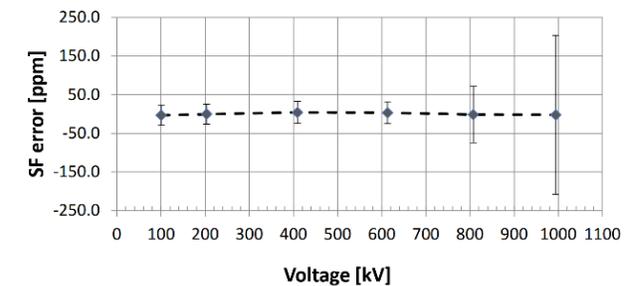
Ziel: Aufbau modularer rückgeführter Spannungsteiler > 1000 kV mit 200  $\mu\text{V/V}$

- 6 Module je 200 kV  $\rightarrow$  1200 kV System
- 5 Module je 400 kV  $\rightarrow$  2000 kV System
- Kalibrierung der Module gegen *nationalen Standard Spannungsteiler*
- Herausforderung: Temperaturabhängig des Teilverhältnis
- Für Messungen im Feld muss die Temperaturabhängigkeit bekannt sein



## ■ Vergleichsmessung mit dem NMI Schwedens

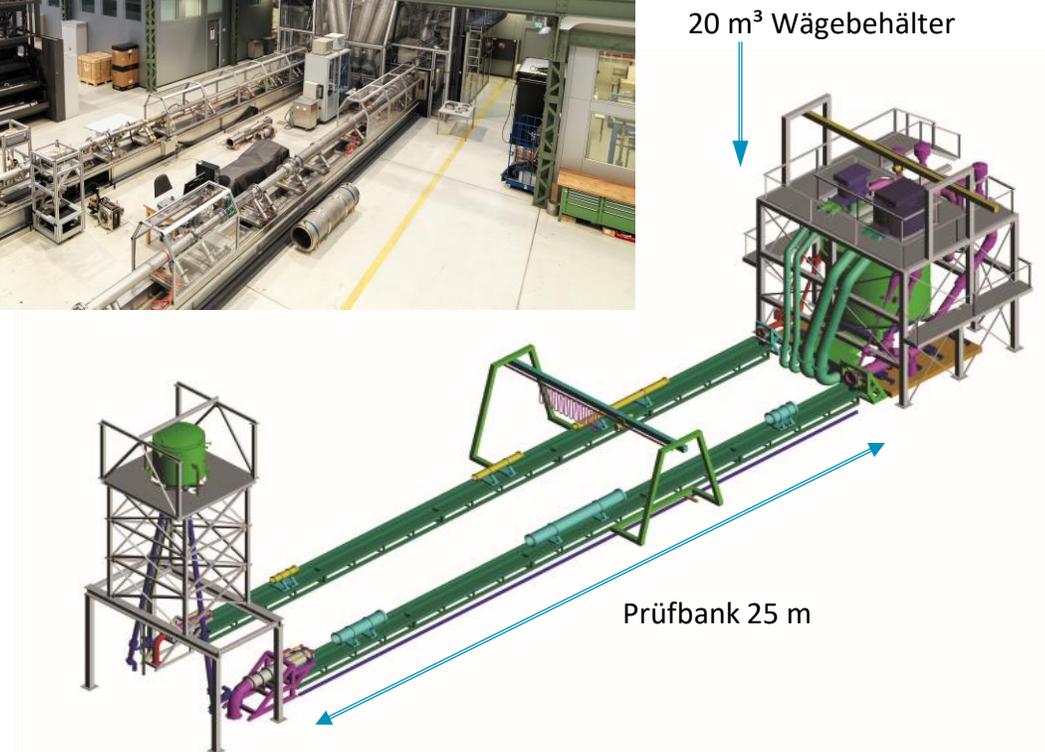
RCR 1000 vs RISE 1200



- Messunsicherheit: 1.200 kV  $\rightarrow$  20  $\mu\text{V/V}$   
2.000 kV  $\rightarrow$  30  $\mu\text{V/V}$

# Wärmenetze

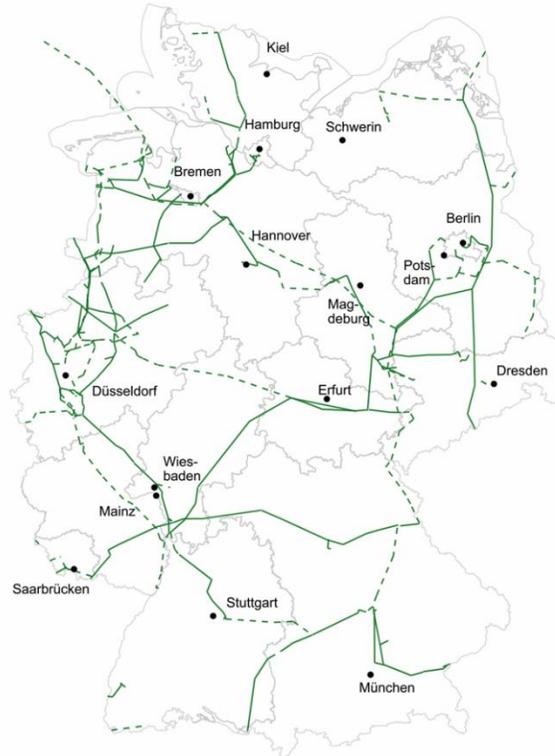
- Zur Bestimmung übertragener Energiemenge muss der Volumenstrom einer Wärmeleitung gemessen werden
- Durchflussprüfstand für Wasser von 3 °C bis 90 °C
- Volumenstrom bis zu 1000 m<sup>3</sup>/h
- Gravimetrische Referenz für geringste Messunsicherheit von 0,04 % (k=2)
- Rohrstrecken bis 400 mm Nennweite
- Kalibrierungen großer Durchflussmessgeräte über weiten Temperaturbereich



# Wasserstoffnetze

- Am 22. Oktober 2024 wurde das Wasserstoffkernnetz genehmigt
- Geeichte H<sub>2</sub>-Messtechnik ist jetzt erforderlich
- Gesetzlicher Auftrag der PTB
- Abrechnungsgerechtigkeit
- Aber: Kalibriermöglichkeiten für Transportmesstechnik für H<sub>2</sub> existiert nicht.

Genehmigtes Wasserstoffkernnetz



## Nationales Normal für Erdgas-Durchflussmessungen (PIGSAR @ Ruhrgas AG in Dorsten)

- Messunsicherheit: 0,13 % bis 0,16 % (durchflussabhängig)
- Druckbereich: 16 bis 50 bar
- Betriebsvolumen-Durchfluss: von 3 bis 6.500 m<sup>3</sup>/h
- Test-Medium: Erdgas
- Prüflinge: alle Volumen- und Massezähler

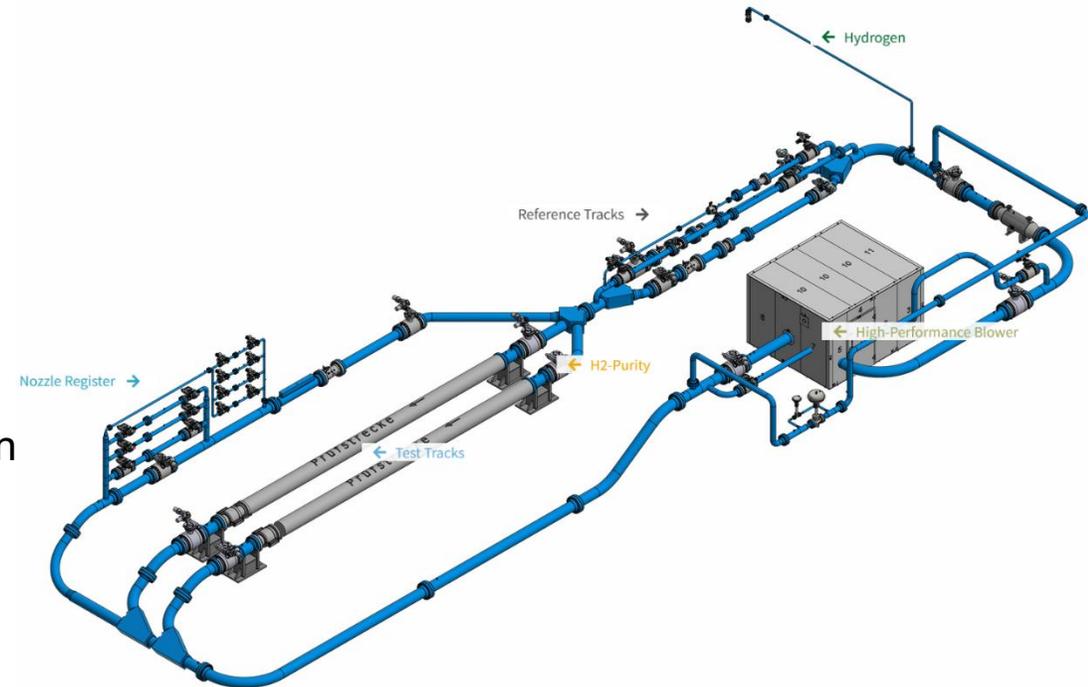
# Wasserstoffnetze

## Aufbau eines neuen Primärnormals für H<sub>2</sub>?

- Sehr Ressourcen-intensiv
- Zu langwierig
- **Kein neues Primärnormal für H<sub>2</sub>**
- **Fast-Track-Lösung für Erstkalibrierung**
- Übertragung von Erdgas auf H<sub>2</sub> über Ähnlichkeitsbetrachtungen
- Messung mit zwei verschiedenen Systemen

## Aufbau einer Closed Loop Prüfstrecke mit der Firma RMA

- RMA ist als staatlich zugelassenes Labor für das gesetzliche Messwesen in Deutschland tätig
- für Technologietests und Konformitätsbewertungen verwendet
- Messunsicherheit 0,3 %



- 2 Prüfstrecken à 11 m
- geschlossenes Kreislaufsystem
- Druckbereich von 8 bis 51 bar
- Durchflussmengen von 5 bis 6.000 m<sup>3</sup>/h
- Nennweiten der Prüfstücke von DN 50 bis DN 300

### 3. Speicherung & Konversion

**Photovoltaik**

- Forschungs-solarpark
- PV-Modul-kalibrierung
- Solarzell-kalibrierung

**Windenergie**

- Großkoordinaten-messgerät
- Drehmoment 5 MN·m
- Windprofile & Geschwindigkeit

**Batterien**

- 2nd Use
- State-Of-Safety
- Material-charakterisierung

**Netzintegration & Sektorenkopplung**

- Wärmenetze
- Stromnetze
- Wasserstoffnetz

**Wasserstoff**

- Explosionsschutz
- Gasqualität
- Herkunftsnachweis

**Industrie**

- Hochtemperatur-thermometrie
- Hochtemperatur-Wärmemessungen
- MW-Charging

**Konsumenten**

- Verbrauchsmessgeräte
- Ladesäulenkalibrierung
- Mieterstromabrechnung

# Wasserstoff

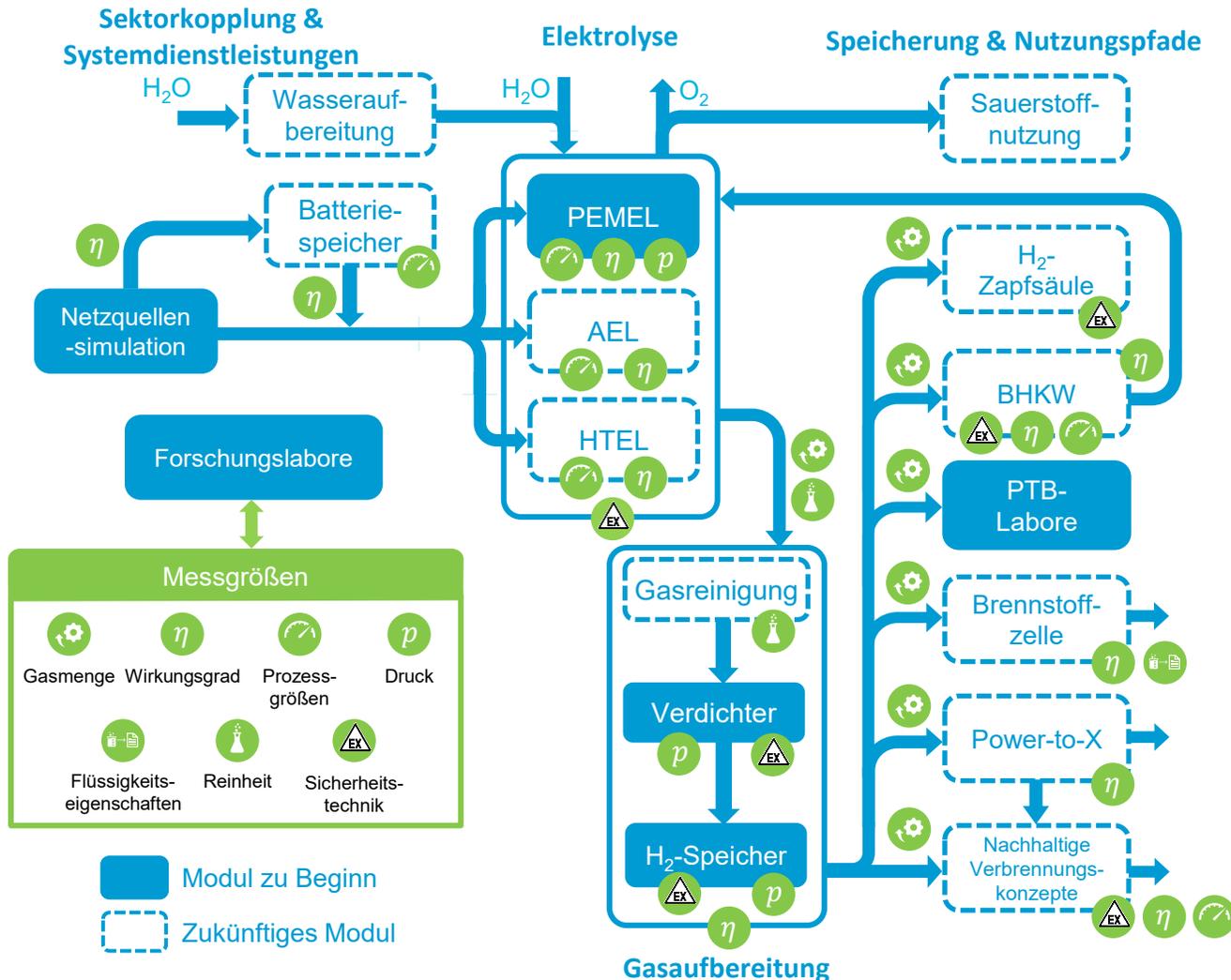
---

- Kalibrierungen für Transportmesstechnik bedient den bereits heute bestehenden messtechnischen Bedarf
- Welche Bedarfe an Messtechnik werden für den Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft benötigt?
- In Teilen noch unklar, weil offen ist, wie verschiedene Elemente des Energiesystems ineinander greifen werden

## ***Wasserstoffplattform***

- systemische Untersuchungen unter Realbedingungen
- metrologische und sicherheitstechnische Untersuchungen
- Systemische Betrachtung dynamischer Lastzustände
- Ziel ist die **Metrologie an Energiesystemen** an der PTB zu etablieren.

# Wasserstoff: Wasserstoffplattform



**Batteriespeicher:** mess- und sicherheitstechnische Fragestellungen in Sektor-gekoppelten Energiesystemen

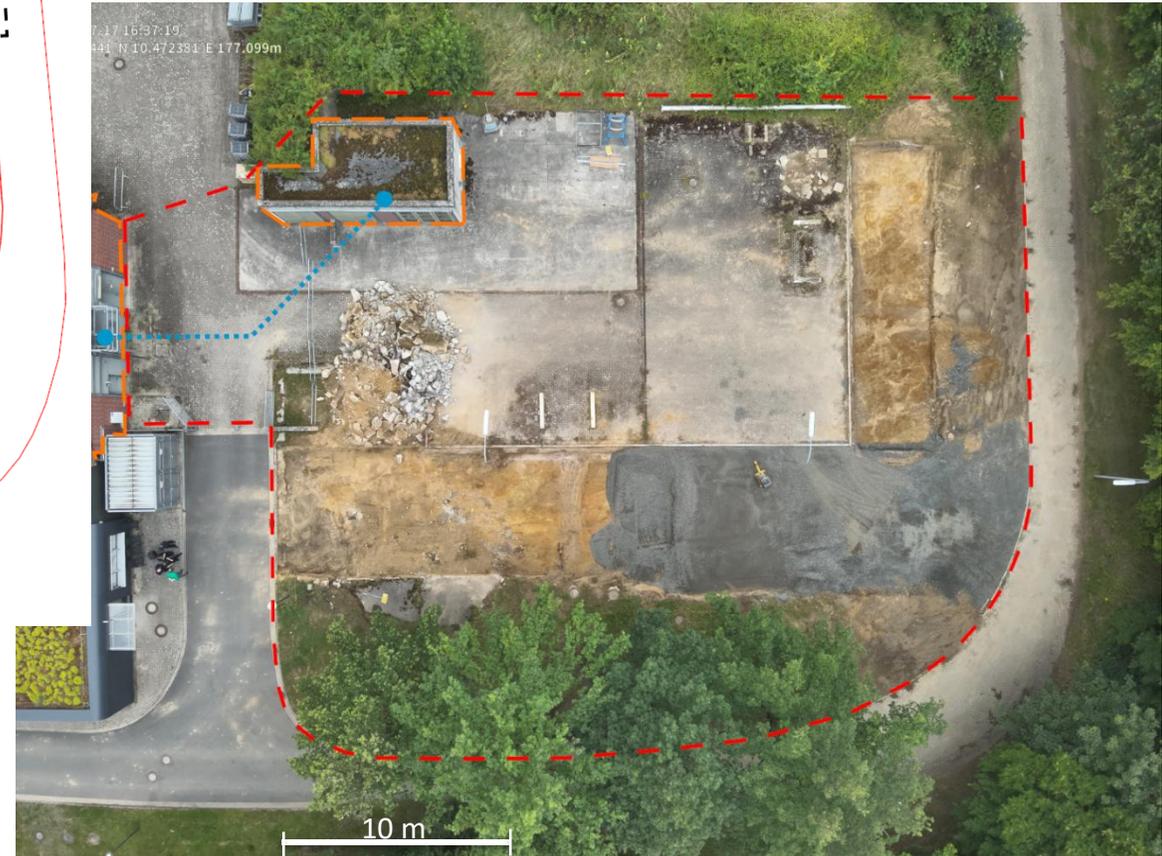
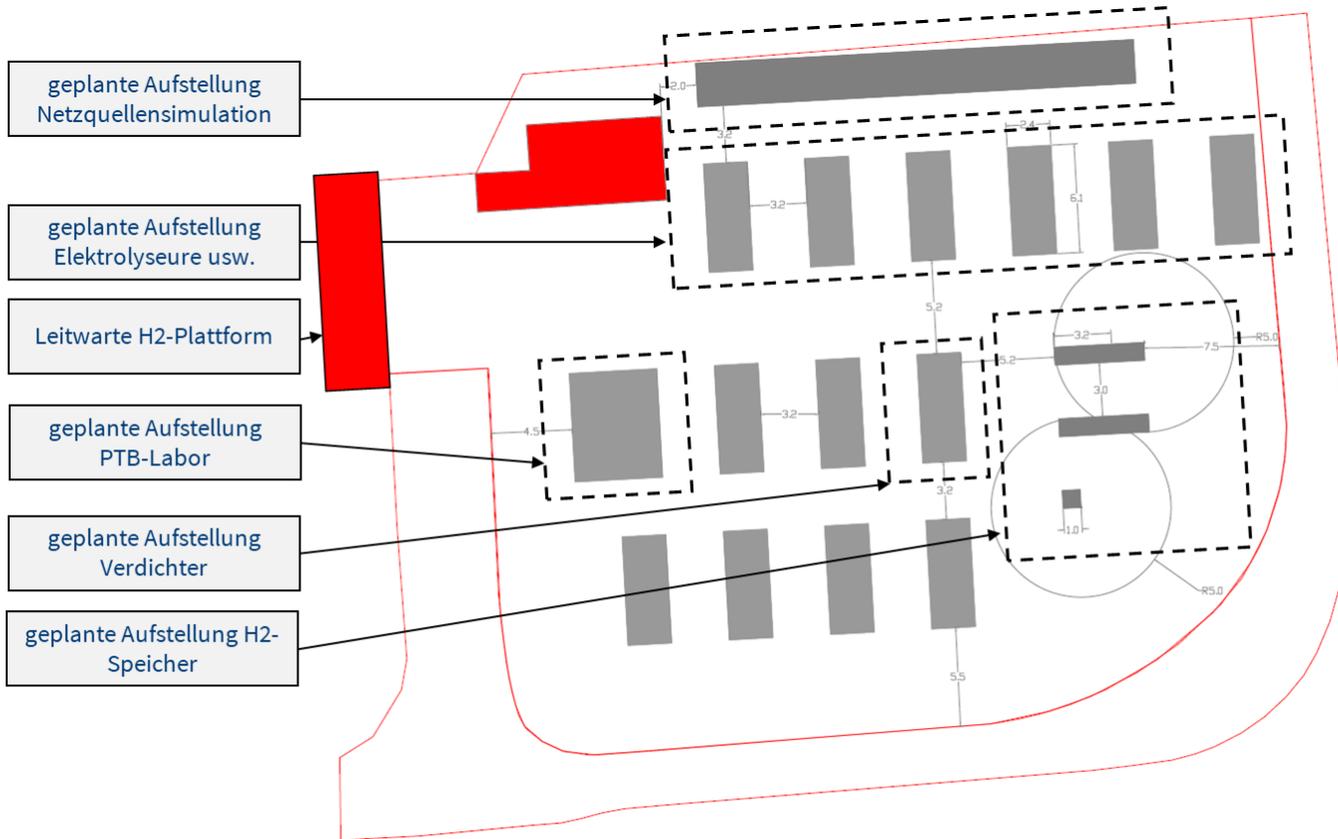
**H2-Zapfsäule:** Mess- und abrechnungstechnische Begleitung von Betankungsvorgängen im Mobilitätssektor sowie benötigte Sicherheitstechnik

**Blockheizkraftwerk (BHKW):** Effizienzanalyse; energetische Nutzung des erzeugten H<sub>2</sub>

**Power-to-X:** Weiterverarbeitung des erzeugten H<sub>2</sub> in Derivate für Speicherung, Transport und energetische oder stoffliche Nutzung

**Brennstoffzelle:** Effizienzanalyse bei der Rückverstromung mess- und sicherheitstechnische Begleitung von Brennstoffzellentechnologien

# Wasserstoff: Wasserstoffplattform



# 4. Verbrauch

**Photovoltaik**

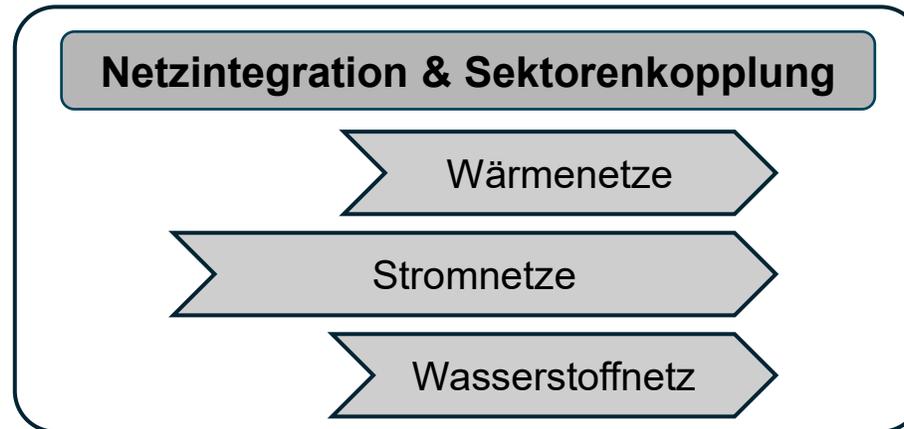
- Forschungs-solarpark
- PV-Modul-kalibrierung
- Solarzell-kalibrierung

**Windenergie**

- Großkoordinaten-messgerät
- Drehmoment 5 MN·m
- Windprofile & Geschwindigkeit

**Batterien**

- 2nd Use
- State-Of-Safety
- Material-charakterisierung



**Wasserstoff**

- Explosionsschutz
- Gasqualität
- Herkunftsnachweis

**Industrie**

- Hochtemperatur-thermometrie
- Hochtemperatur-Wärmemessungen
- MW-Charging

**Konsumenten**

- Verbrauchsmessgeräte
- Ladesäulenkalibrierung
- Mieterstromabrechnung

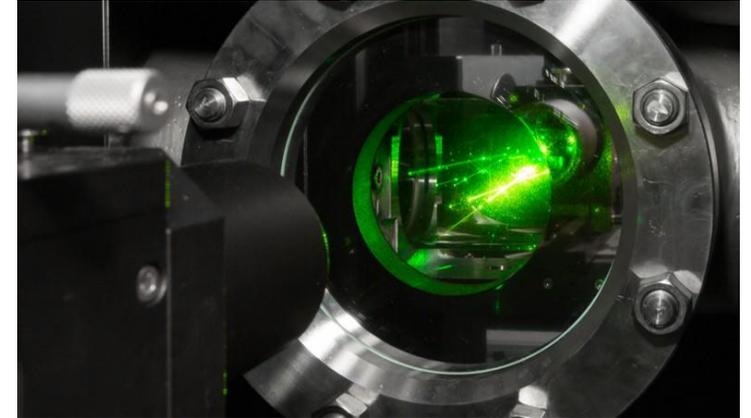
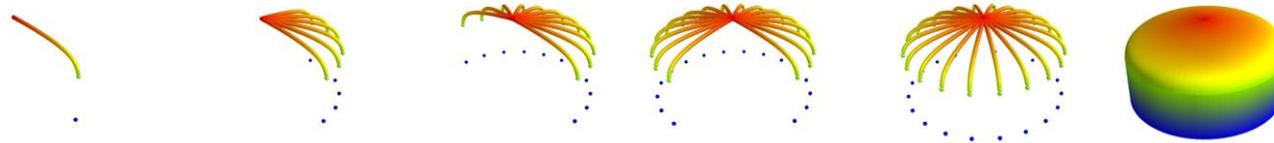
# Hochtemperatur-Wärmemessungen

---

- Die Bereitstellung industrieller Prozesswärme wird zunehmend nicht mehr auf fossilen Energieträgern basieren, sondern auf der Nutzung regenerativer Energien
- Elektrische Energie wird in Form von Wärme gespeichert und über Wärmeträgerfluide übertragen
- Hohe Temperaturen: häufig 200 – 300 °C
- Es bestehen gegenwärtig keine Kalibrierungen für  $T > 90$  °C
- Kalibrierung von Massestromsensoren bei 20 °C → Einsatz bei  $T > 300$  °C
- Extrapolation mit großer Unsicherheit

# Hochtemperatur-Wärmemessungen

- Vermessung der Durchflussraten per Laser-Doppler-Velozimetrie (LDV)
- Erstellung eines Strömungsprofils
- Ableitung des Volumenstroms
- Einsatz des PTB-LDV am Wärmeträgerteststand des DLR in Köln
- Durchflussraten transparenter Medien lassen sich bei 300 °C hochpräzise optisch vermessen
- Rückgeführte Messtechnik auf LDV-Basis
- Charakterisierung von Volumenstromsensoren
- Bewertung Extrapolation der Sensor-Hersteller
- Vor-Ort-Kalibrierung



# Zertifizierung von E-Ladesäulen

---

- Die PTB ist zuständige Konformitätsbewertungsstelle für Mess- und Eichrecht in Deutschland
- Ladesäulen für E-Fahrzeuge sind eichpflichtig
- Zertifizierung von Ladeeinrichtungen ist Verbraucherschutz
- 41 Ladesäulenfamilien für die Abrechnung zertifiziert:
  - 23 Hersteller für AC-Ladesäulen
  - 6 Hersteller für DC-Schnelllader
  - Insgesamt: bisher > 100 Zertifizierungsverfahren im Bereich Ladeinfrastruktur
- Herausforderung: Prüfung von „realen“ Ladesäulen im Feld
- Ziel: Entwicklung eines mobilen Prüfstands zur Prüfung von Ladesäulen

# Electric Vehicle Charger Inspection System (ELVIS)



- „Prüfungen im Feld so einfach wie im Labor“
- Vollautarke Stromversorgung
- AC-Ladeeinrichtungen unidirektional bis 22 kW
- DC-Ladeeinrichtungen unidirektional bis 15 kW
- Zukünftig:
  - Bidirektionales Laden
  - Megawatt Charging
- Testen von neuen Prüftechniken und Unterstützung der Standardisierung
- Unterstützung der Marktüberwachung
- Demonstrator für kommerzielle Prüfmittelhersteller
- Lösen von Logistikproblemen bei Prüfung/Eichung großer Schnellladesäulen

---

**Vielen Dank !**