

Promotionsvortrag,  
Holger Ruf,  
20.12.2016



Hochschule Ulm



Stadtwerke Ulm/Neu-Ulm  
Netze GmbH

# Nutzung von satellitengestützten Einstrahlungsdaten für die Leistungsflussberechnung in lokalen elektrischen Verteilnetzen mit vielen Photovoltaikanlagen



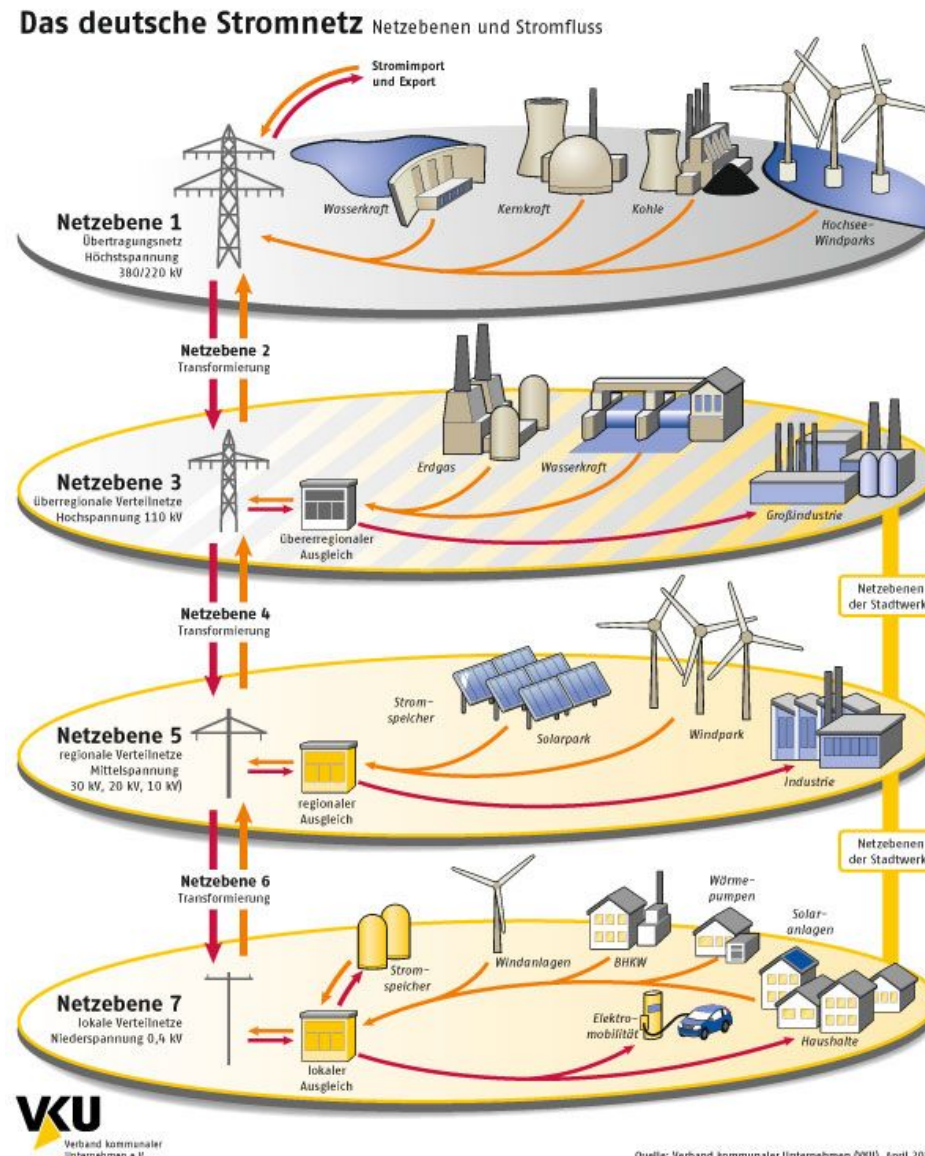
# Inhalt



- Einführung ins Stromnetz
- Energiewende und Energiemeteorologie
- Wetterabhängige Sektoren im Stromsystem
- Blick von “Oben” auf das Verteilnetz
- Ansatz und Ergebnisse
- Zusammenfassung

# Ebenen des Stromnetzes

- Übertragungsnetz (220-380 kV)
- Überregionale Verteilnetze (110 kV)
- Regionale Verteilnetze (10-30 kV)
- Lokale Verteilnetze (400 V)



# Einsatz Kraftwerke

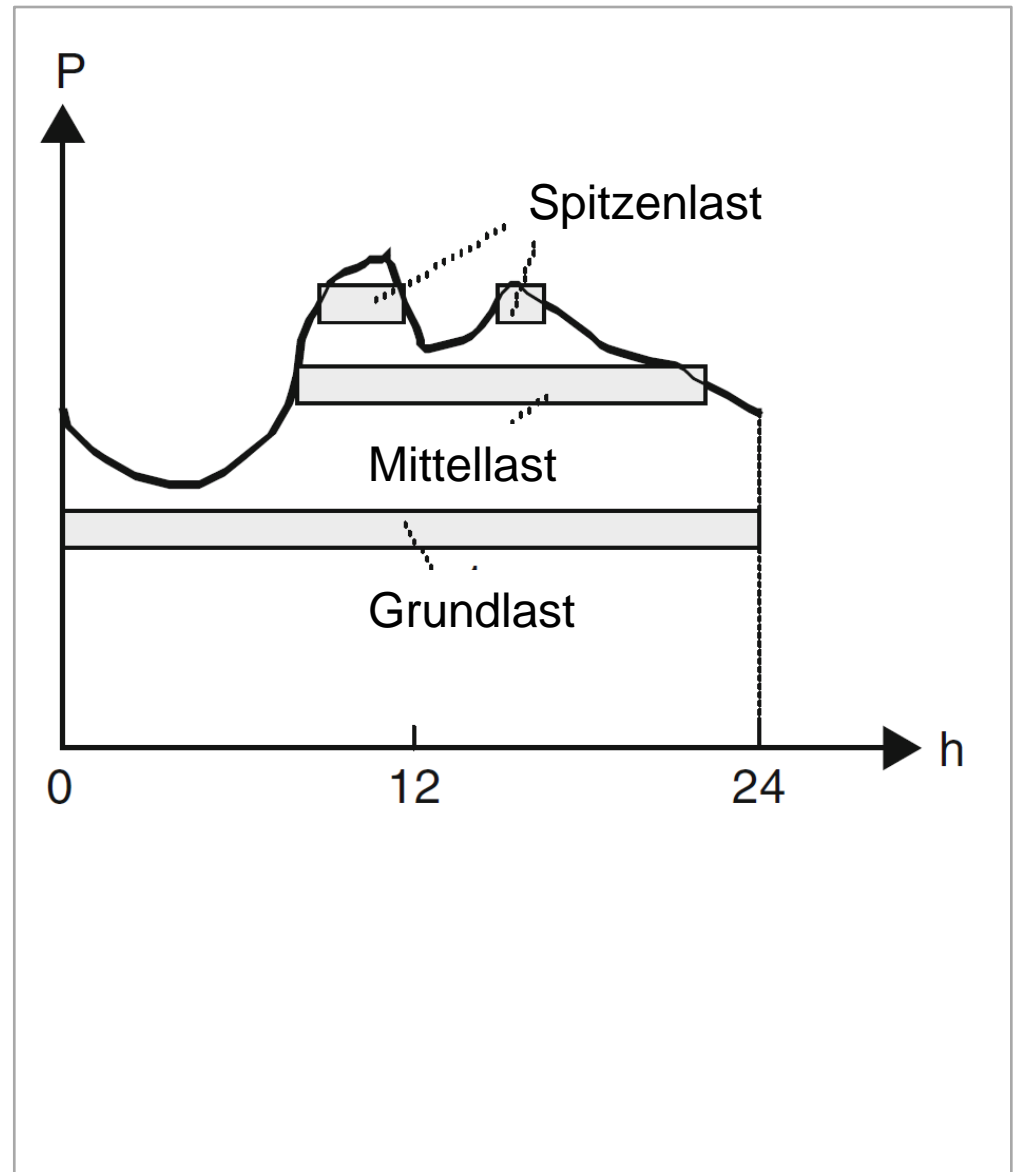


Hochschule Ulm



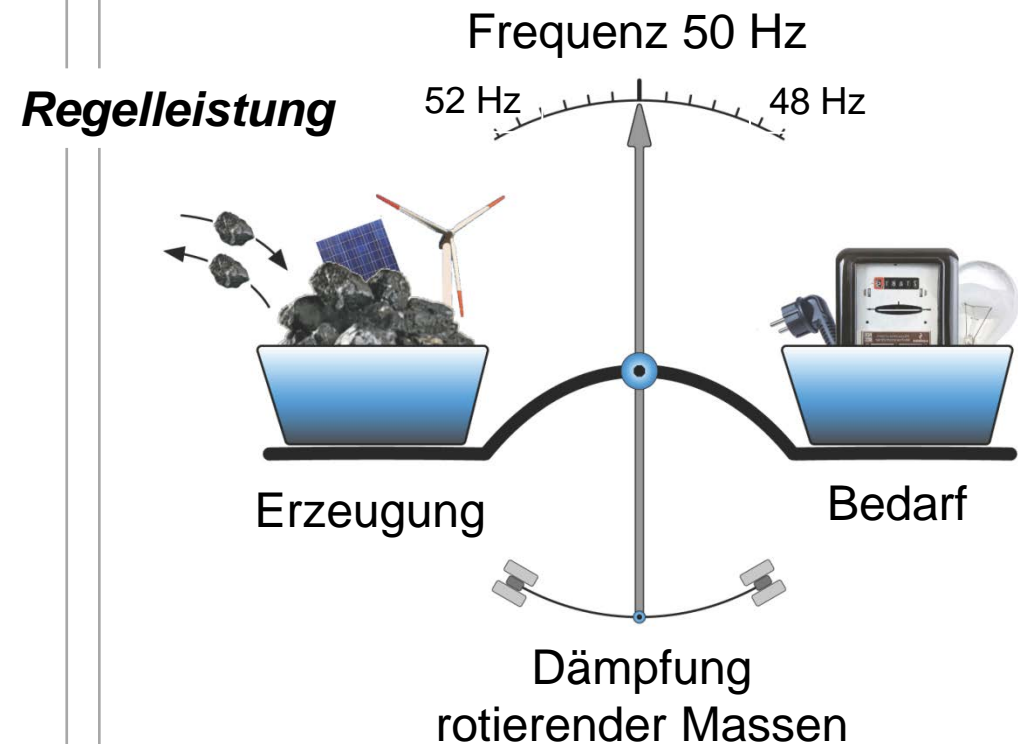
Stadtwerke Ulm/Neu-Ulm  
Netze GmbH

- Klassisch: Kraftwerke folgen dem Leistungsbedarf der Last
- Verschiedene Kraftwerkstypen für verschiedene Situationen
- Grundlast
  - Z.B. Laufwasser-, Braunkohle- und Atomkraftwerke
- Mittellast
  - Z.B. KWK- und Steinkohlekraftwerke
- Spitzenlast
  - Z.B. Pumpspeicher- und Gaskraftwerke



# Frequenzregelung

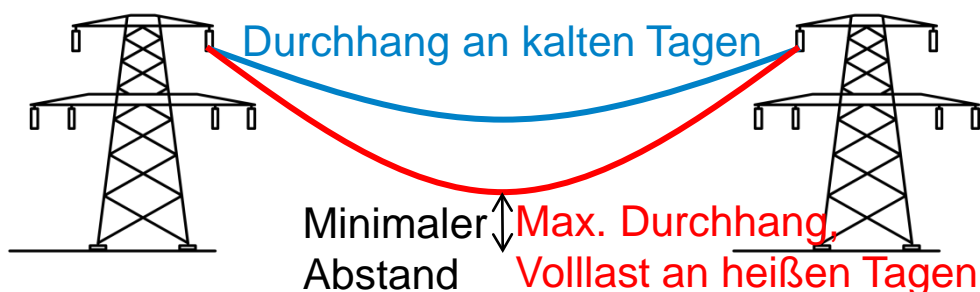
- Verbindliche Regeln auf europäischer und nationaler Ebene
- Übertragungsnetzbetreiber sind zuständig
- Primärregelleistung
  - Nennleistung innerhalb von 30 Sekunden
  - Insgesamt 3000 MW in Kontinentaleuropa
  - Deutschland 583 MW
  - Z.B. durch dezentrale, vollautomatische Regelungen an Großkraftwerken
- Sekundärregelleistung
  - Nennleistung innerhalb von 5 Minuten
  - Deutschland ~ 2000 MW
  - Z.B. Pumpspeicher- oder Steinkohlekraftwerke
- Minutenregelleistung
  - Nennleistung innerhalb von 15 Minuten
  - Deutschland ~ 1700 MW
  - Z.B. KWK-Anlagen, Virtuelle Kraftwerke, steuerbare Lasten



# Strom- und Spannungsregelungen



- Stromregelung
  - Leitungsauslastung
  - Thermische Grenzen
  - Leitungserwärmung und Durchhang



- Spannungsregelung
  - Spannungsänderung durch Leistungsänderung
  - Automatische Trennung von Kraftwerken, Leitungen oder Trafos → Stromausfall
- Eine Gegenmaßnahme
  - Lokale Blindleistungsbereitstellung
- Beispiel
  - Stromausfall in Südschweden und Ost-Dänemark 2003
  - Kosten etwa 270 Million €
  - 2.4 Million Menschen
  - Weitere Informationen:  
Paul Beagon & Conor O'Boyle  
[http://faraday1.ucd.ie/modules/archive/stability/2003\\_sweden\\_denmark.pdf](http://faraday1.ucd.ie/modules/archive/stability/2003_sweden_denmark.pdf)

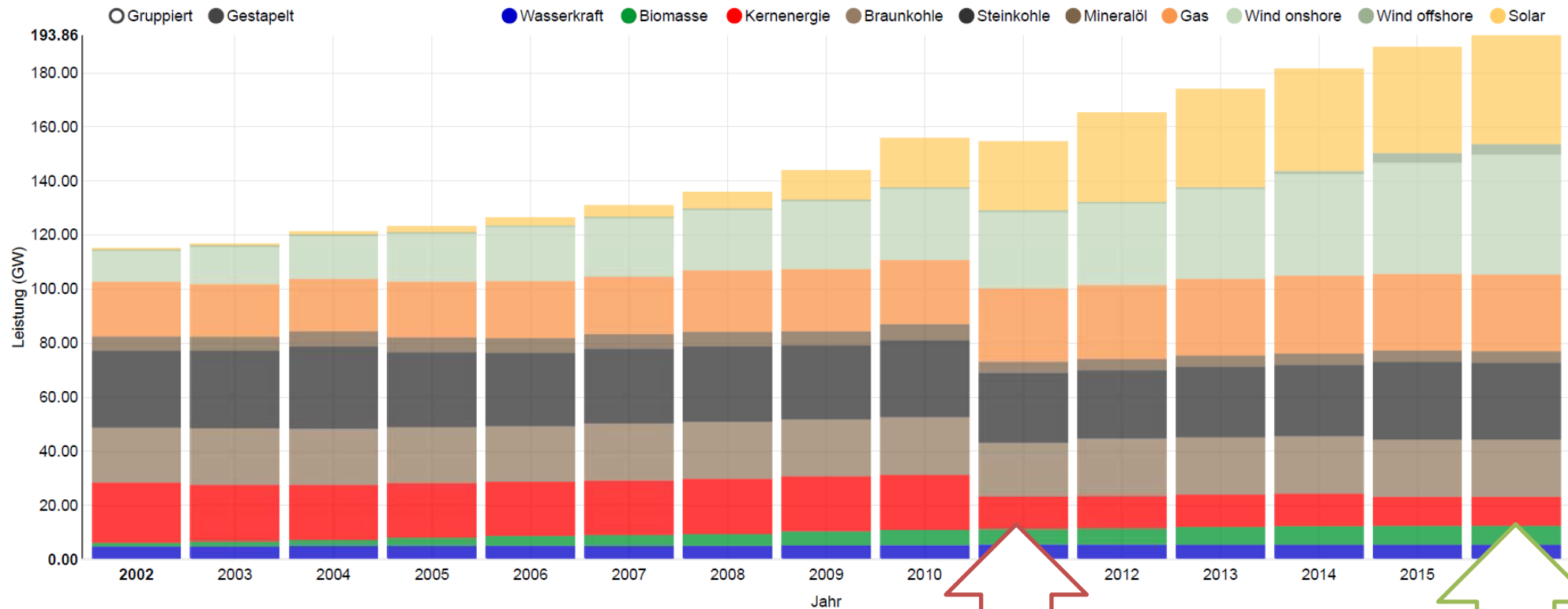
# Inhalt



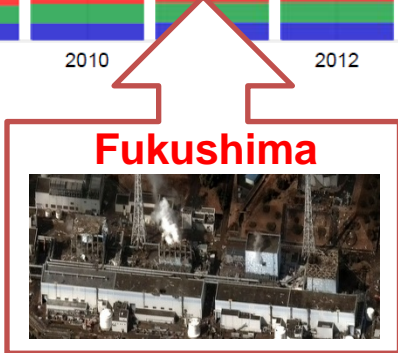
- Einführung ins Stromnetz
- **Energiewende und Energiemeteorologie**
- Wetterabhängige Sektoren im Stromsystem
- Blick von “Oben” auf das Verteilnetz
- Ansatz und Ergebnisse
- Zusammenfassung

# “Energiewende”

## Installierte Netto-Leistung zur Stromerzeugung in Deutschland



Datenquelle: AGEE, BMWi, Bundesnetzagentur  
letztes Update: 31 Oct 2016 15:00

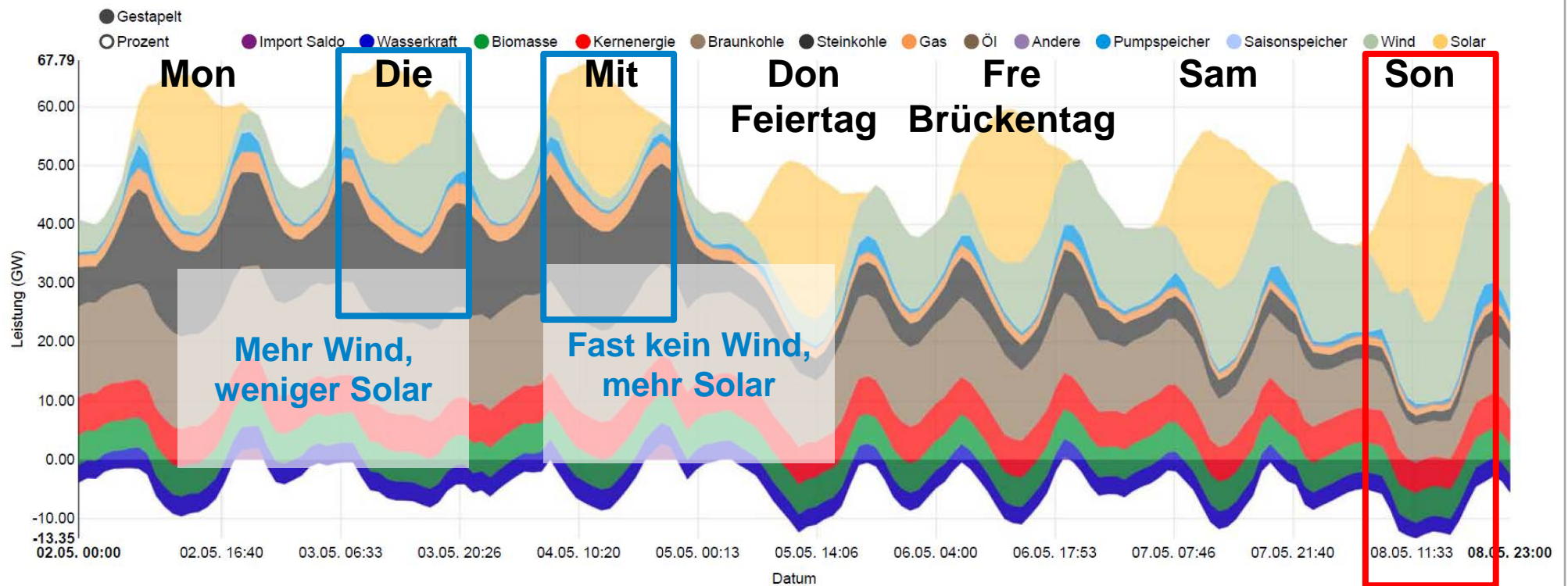


40 GW Solar  
47 GW Wind  
9 GW Biomasse  
5 GW Wasser  
10 GW Nuklear  
33 GW Gas und Öl  
49 GW Kohle



# Deutsche Stromproduktion

## Stromproduktion in Deutschland in Woche 18 2016



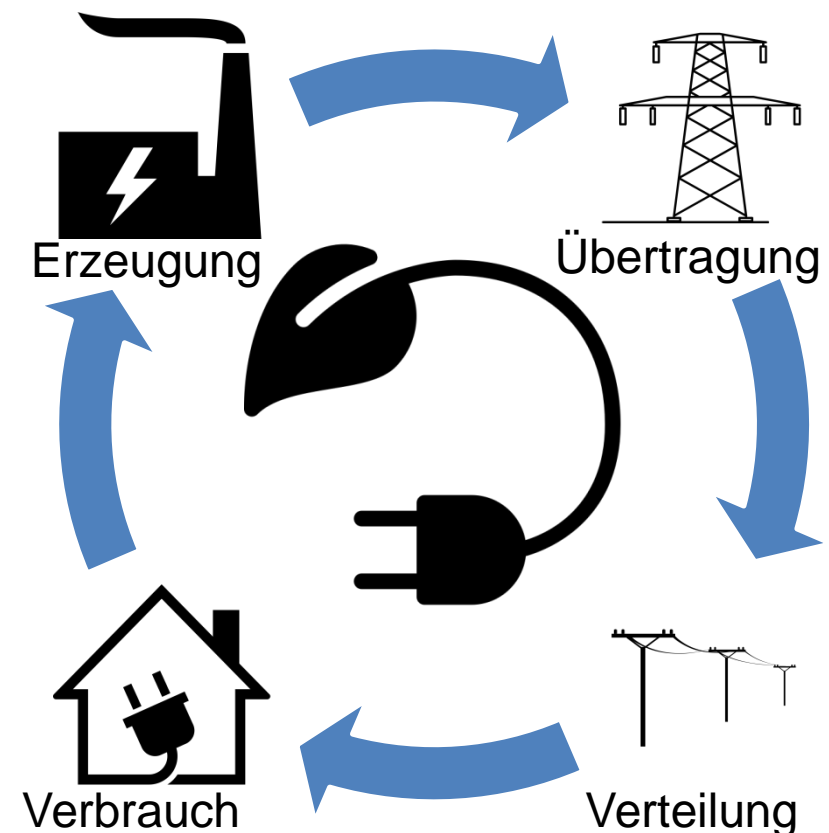
Datenquelle: 50 Hertz, Amprion, Tennet, TransnetBW, EEX  
 letztes Update: 14 May 2016 09:16

**HIGH SCORE**  
**> 90% Leistung gedeckt durch Erneuerbare**

# Energiemeteorologie

- Definition
  - Energiemeteorologie ist ein aktuelles Forschungsfeld an der Schnittstelle zwischen Erneuerbaren Energien und Atmosphärenphysik.
- Lange Historie und Verbindung zwischen Energiewirtschaft und Meteorologie:
  - Vorhersage von Verbrauch z.B. saisonale Effekte wie kalte Winter, Dürren, El Nino
  - Tägliche Effekte wie Lichtbedarf
  - Universität Oldenburg: Beyer, Hans Georg (1985), DA: Untersuchungen zur Statistik eines Windfeldes für die Berechnung der Leistungsabgabe kleiner Windenergiekonverter
  - Olsson, L. E. (1994) 'ENERGY-METEOROLOGY: A new discipline', *Renewable Energy*, vol. 5, 5-8, pp. 1243–1246.
- Wird wichtiger mit steigender Anzahl Erneuerbarer Energien, insbesondere Solar und Wind

- Energiemeteorologie betrifft **ALLE** Sektoren des Energiesystems

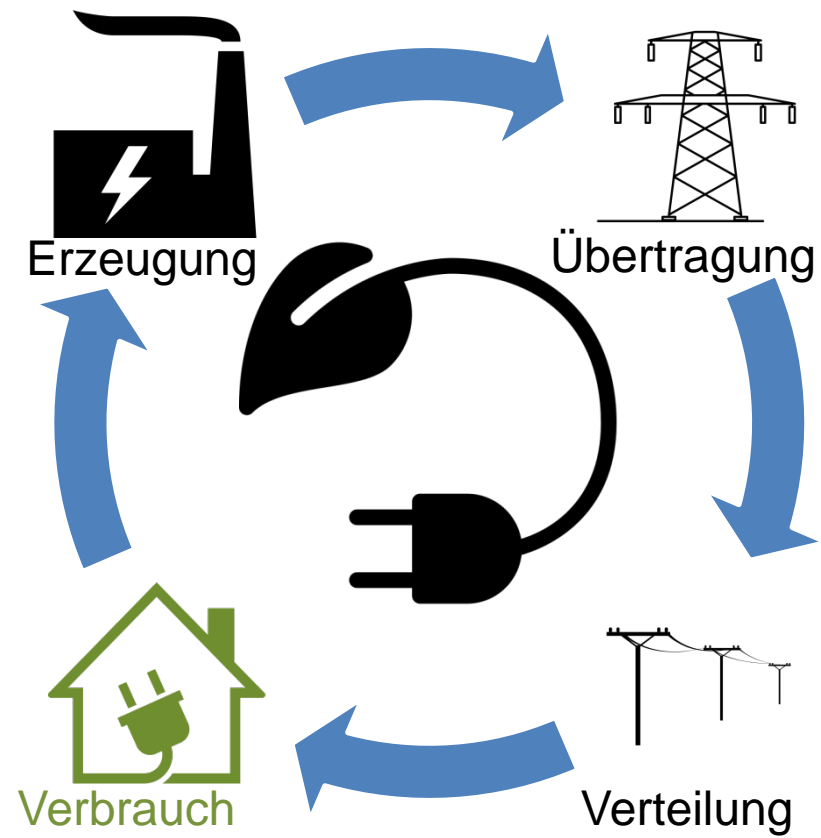


# Inhalt



- Einführung ins Stromnetz
- Energiewende und Energiemeteorologie
- **Wetterabhängige Sektoren im Stromsystem**
- Blick von “Oben” auf das Verteilnetz
- Ansatz und Ergebnisse
- Zusammenfassung

# Verbrauch



# Temperaturabhängigkeit des Verbrauchs



Hochschule Ulm

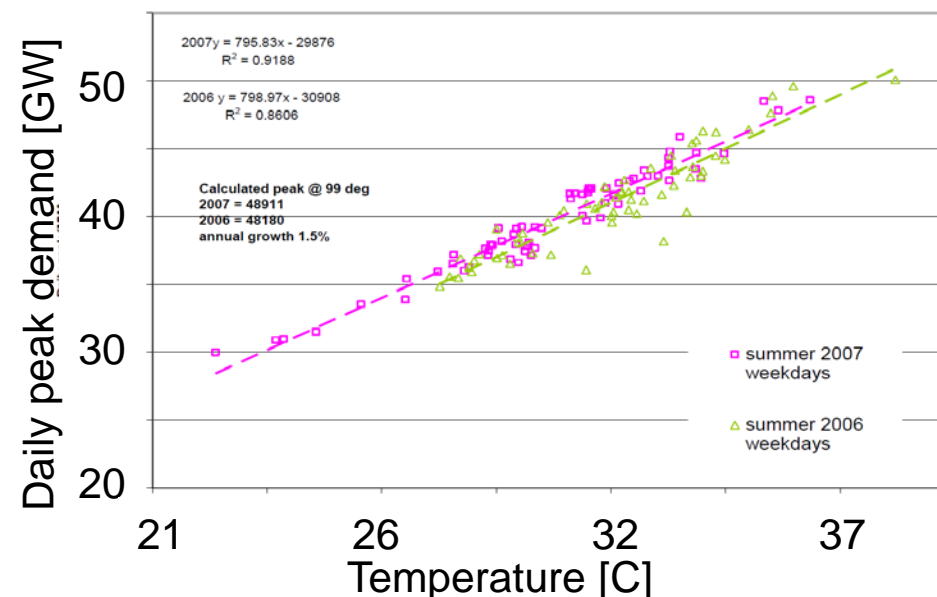


Stadtwerke Ulm/Neu-Ulm  
Netze GmbH

- Verbrauch ändert sich mit der Außentemperatur
- Länderabhängig
- Beispiele
  - Frankreich, elektrische Heizungen
  - - 2400 MW / °C
  - Hoher Bedarf wenn es kalt ist
  - Kalifornien, viele Klimaanlage
  - + 1160 MW / °C
  - Hoher Bedarf wenn es heiß ist
- Bedarf an Temperaturvorhersagen

- Reuters Schlagzeile am 14.2.2012:
  - **“Germany powers France in cold despite nuclear u-turn”**
  - <http://www.reuters.com/article/europe-power-supply-idUSL5E8DD87020120214>

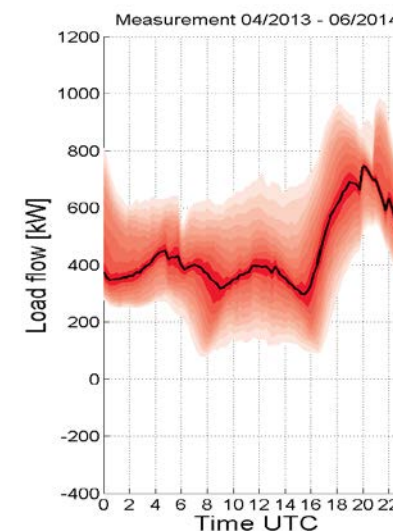
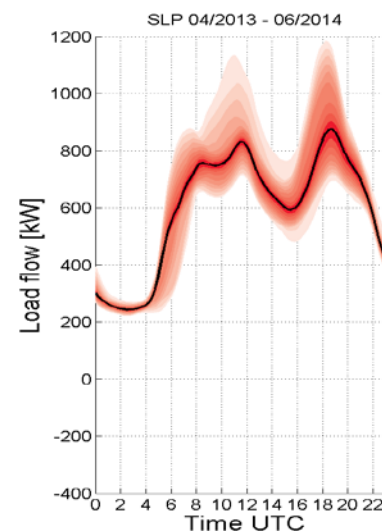
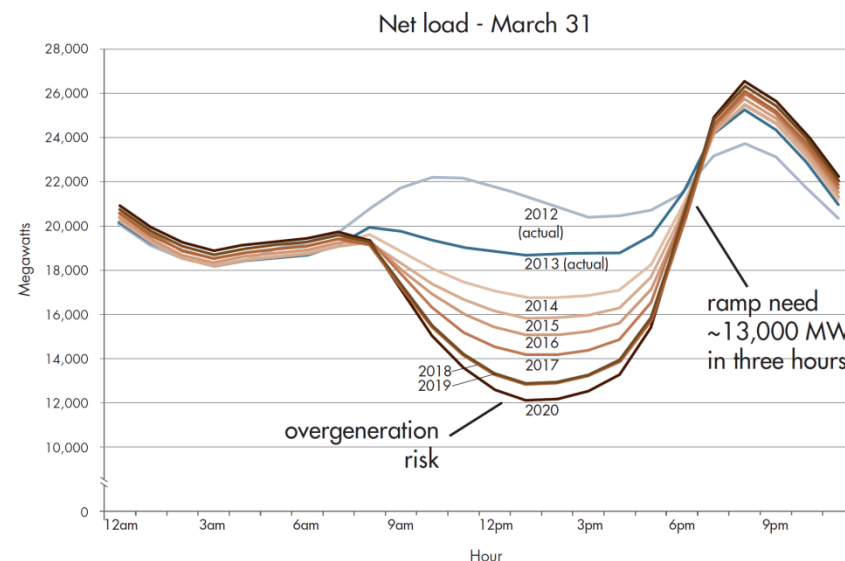
## CAISO 2006-2007 Summer Weekday Temperature and Afternoon Peak Comparison



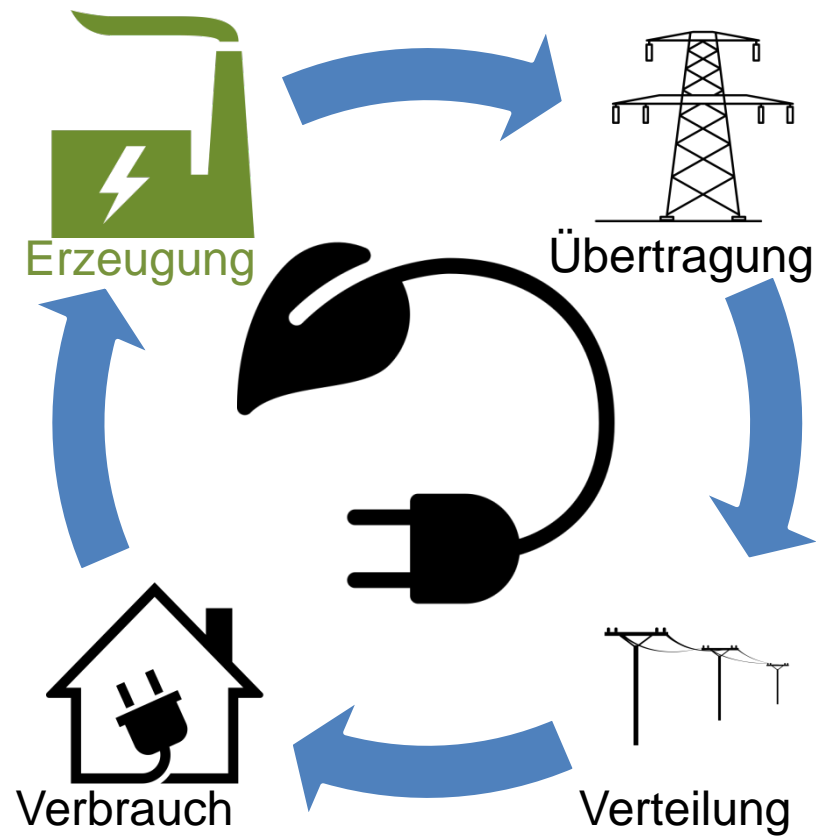
# Kleine, dezentrale PV Anlagen - “behind the meter”



- Lokale und dezentrale Erzeugung von kleinen PV Anlagen
  - Beeinflusst das angenommene Lastprofil der Gebäude, wetterabhängig
  - Erzeugungsspitze kann deutlich höher sein als Verbrauchsspitze
  - Energiesystem wird dynamischer mit hohen Leistungsrampen
  - USA: sogenannte “Duck curve”
- Auch in kleinen Gebieten sichtbar, z.B. Niederspannungsnetz
  - Z.B.: Ulm, 2013-2014



# Erzeugung



# Erzeugungsabschaltung

- Umgebungsbedingungen
  - Sturm an Windanlagen
  - Hitzewelle und Trockenheit an konventionellen Kraftwerken
    - Frankreich 2003, 4000 MW Leistungsreduktion
    - Kosten etwa 300 Million €
- Leitungsauslastung und „fehlende“ Leitungen
  - Z.B. Deutschland
  - ~ 3200 km HGÜ Übertragungsleitungen
  - ~ 1000 km AC Übertragungsleitungen
  - ~ 5200 km AC/DC Netzausbau
  - Kosten 27 – 34 Milliarden €
  - Winderzeugung in Norddeutschland, Bedarf in Süddeutschland  
→ sog. “Re-dispatch”



Quelle: VDE | FNN/Übertragungsnetzbetreiber

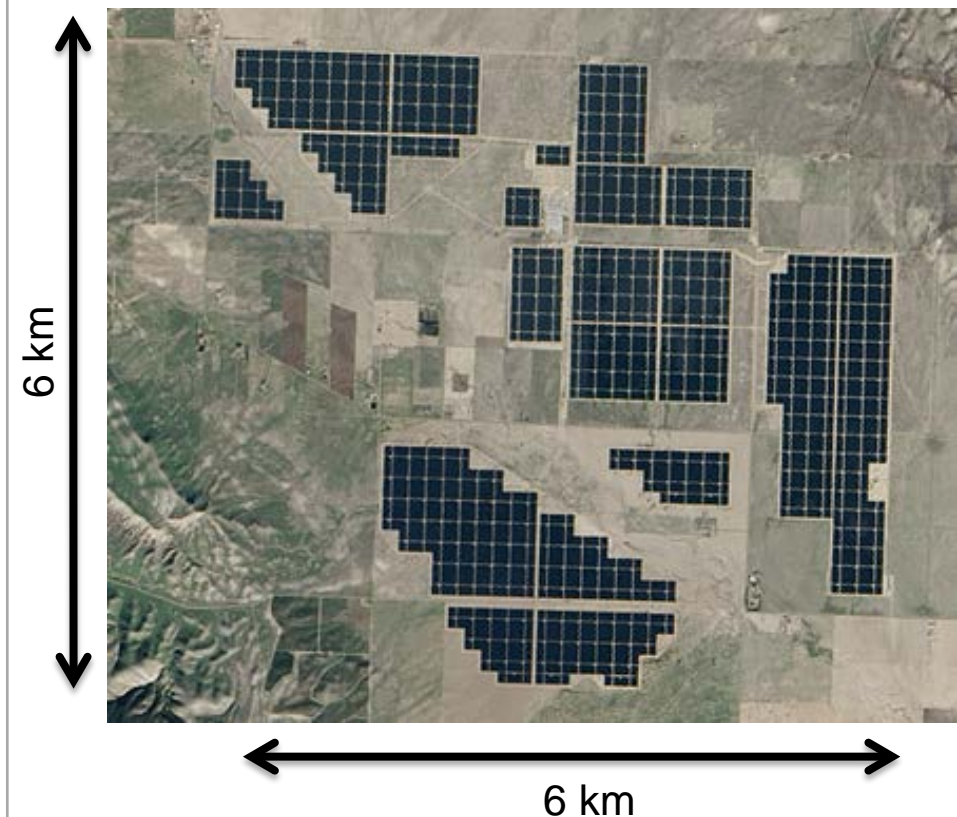


# Solkraftwerke



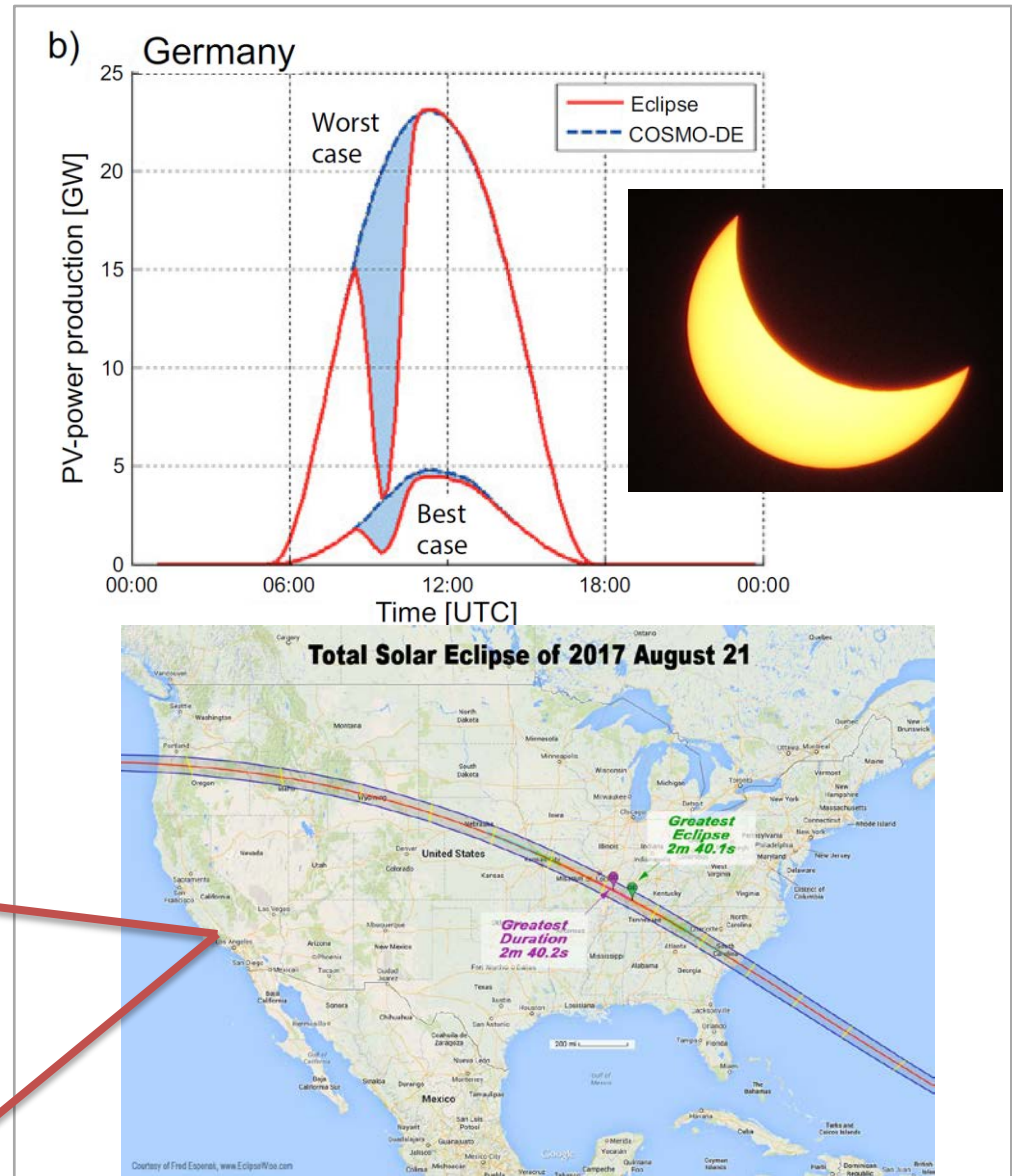
- Variabilität von Solarkraftwerken
  - Räumliche Mittelung
  - Einspeiseleistung am Netzanschluss
  - Auswirkungen auf das Stromnetz
- Modellierung von PV Einspeiseleistung
  - Leistung einer PV Anlage
  - Leistung vieler PV Anlagen
  - Umgang mit Ungenauigkeiten und fehlenden Daten

**550 MW Topaz PV Kraftwerk, CA, USA**

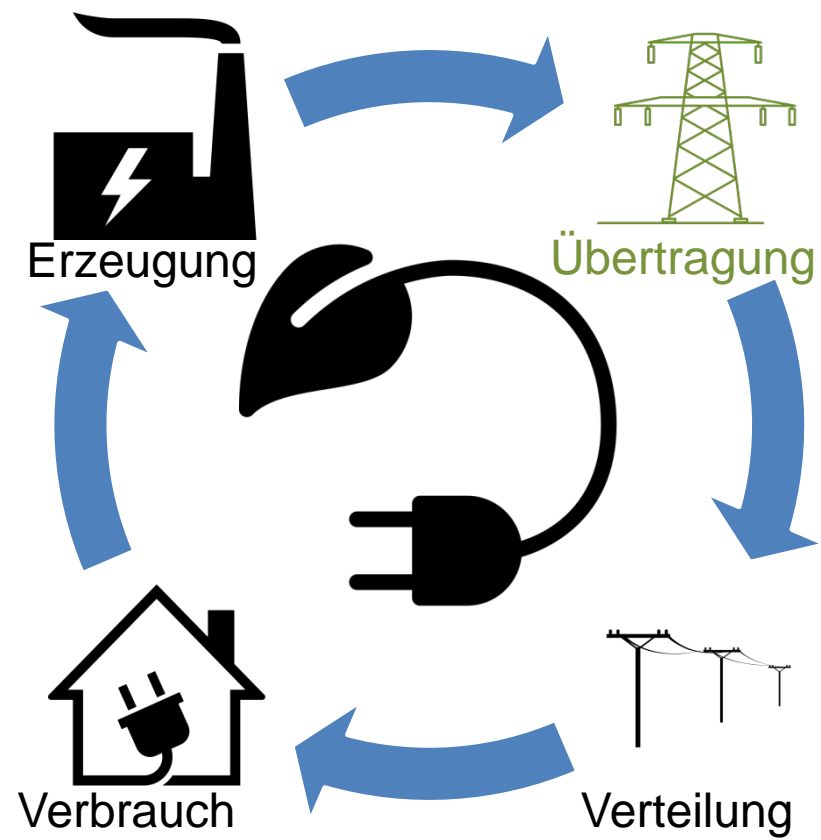


# „Kosmische“ Ereignisse an Solarkraftwerken

- Partielle Sonnenfinsternis über Europa am 20.3.2015
  - Vorbereitungen von ÜNBs zusammen mit Vorhersageanbietern ein Jahr im Voraus
  - PV Leistungsrampe von 4300 MW / 15min in Deutschland
  - Abruf von 2000 MW Regelleistung
- Wer ist der Nächste?
  - USA, am 21.8.2017 , 17:15 -18:45 UTC (Mittagszeit in USA)
  - 550 MW Topaz Kraftwerk im Bereich 70% Sonnenfinsternis



# Übertragung



# Übertragungsnetz

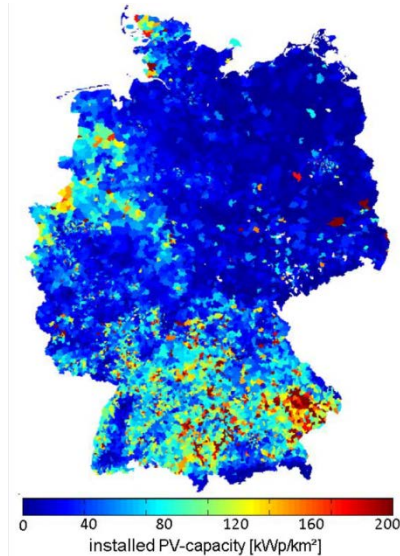


Hochschule Ulm



Stadtwerke Ulm/Neu-Ulm  
Netze GmbH

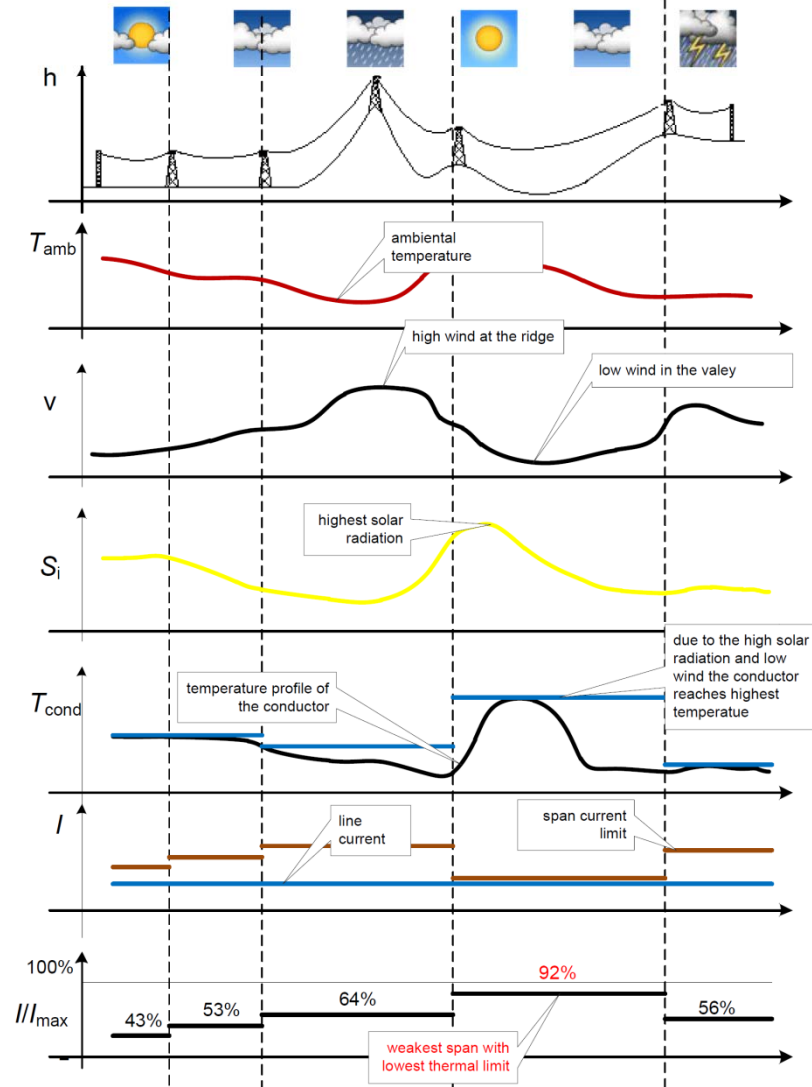
- Regionale oder lokale Erzeugungsvorhersagen
  - Stand der Technik bei ÜNBs
  - Regionale Erzeugung
  - Wo, wann, wie viel?
    - Berechnung der Leitungsübertragungskapazitäten
    - Planung von Abschaltungen oder Wartungen
    - Leistungsflusssteuerung
- Extremereignisse z.B. Stürme, Eis, Blitzschlag
  - Z.B. Stromausfall im Münsterland, November 2005
  - Bis zu 250 000 Menschen für mehrere Tage
  - Kosten ~ 100 Millionen €



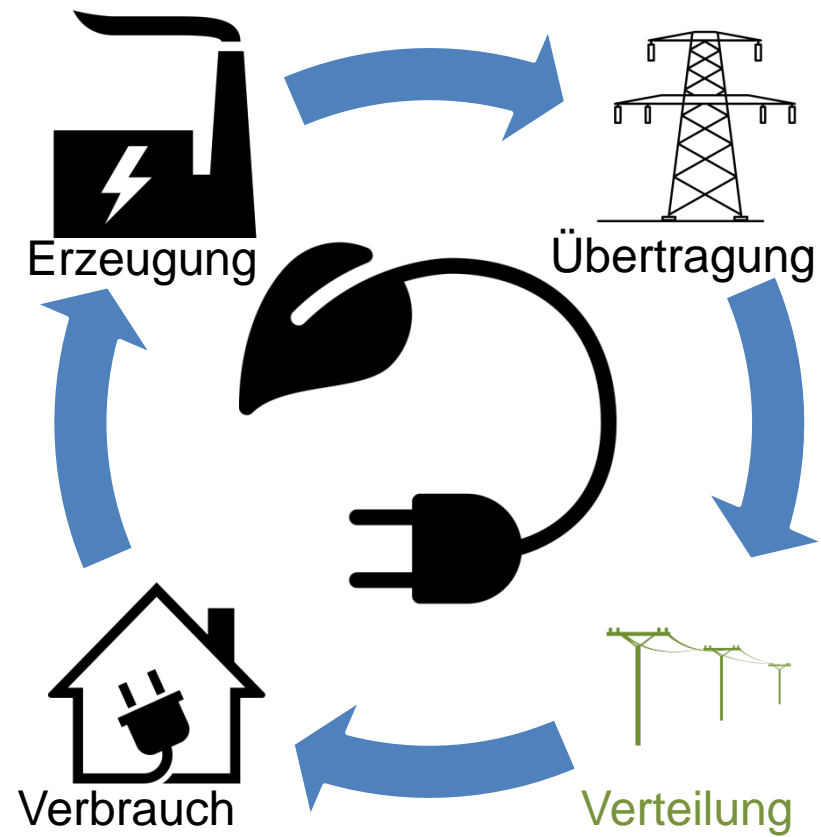
Quelle: Andrea Steiner, Carmen Köhler (2015): "Objective Identification of Critical Weather Events for Ensuring Net Stability"  
ICEM 2015, CO, USA, [http://icem2015.org/wp-content/uploads/2015/07/1150\\_AndreaSteiner.pdf](http://icem2015.org/wp-content/uploads/2015/07/1150_AndreaSteiner.pdf)  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ahaus\\_Reste\\_des\\_Schneechaos\\_12-2005.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ahaus_Reste_des_Schneechaos_12-2005.jpg)

# Dynamic Line Rating (DLR)

- Ziele von DLR
  - Sichere Nutzung von Transportkapazitäten von Übertragungsleitung
  - Anstelle eines statischen Stromes basieren auf standardisierten Umgebungsbedingungen
  - "Dynamische Ströme" basierend auf tatsächlichen atmosphärischen Bedingungen
- Studien
  - Kapazitätssteigerung von 5% bis 15% bei existierenden Netzen (EPRI, 2011)
  - Einsparungen ~ 100 Millionen \$ (Hur, K. et al., 2010)
- Laut ENTSO-E :
  - 11 ÜNB nutzen DLR
  - 9 ÜNB nutzen Daten von Wetterstationen
  - 1 ÜNB nutzt feste saisonale Grenzwerte (Winter / Sommer)



# Verteilung



# Spannungsregelung: Betrieb von Stufenstellern

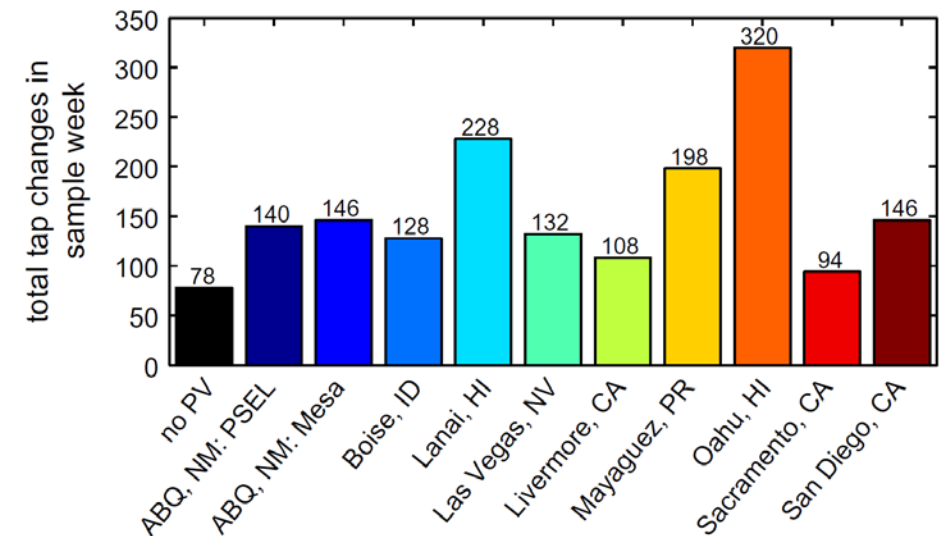
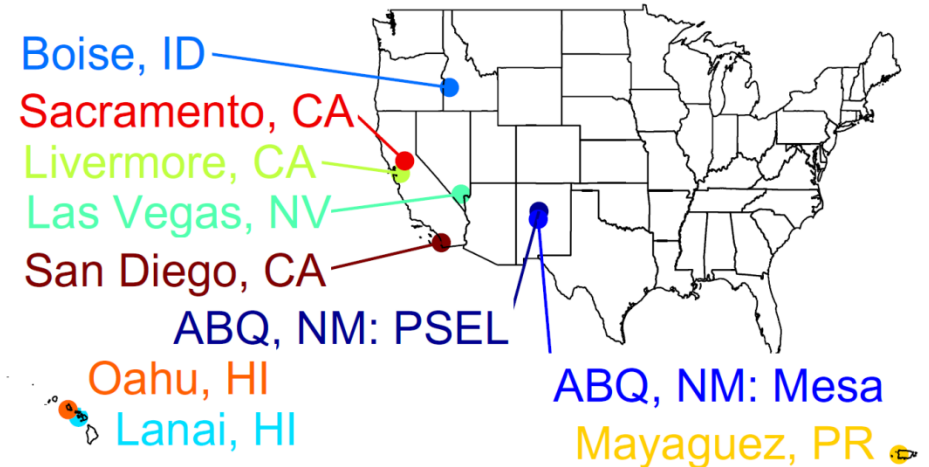


Hochschule Ulm



Stadtwerke Ulm/Neu-Ulm  
Netze GmbH

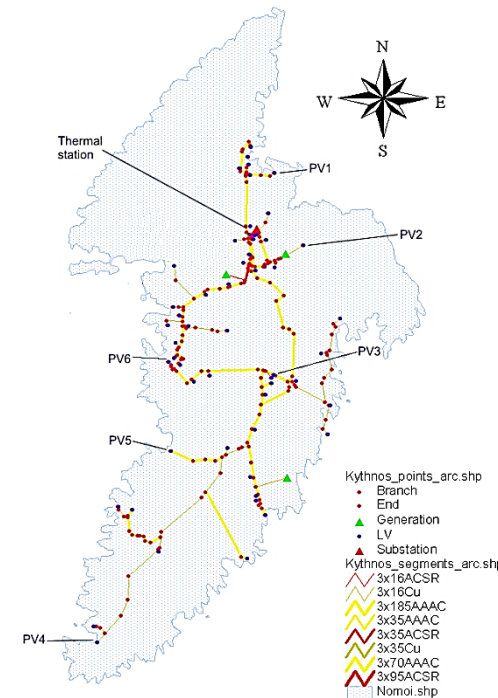
- Stufensteller bieten diskrete Schritte im Windungsverhältnis von Transformatoren
- Erlauben stufenweise Spannungsänderung am Ausgang
- Hohe Variabilität kann zu hoher Anzahl an Schalthandlungen führen → Verschleiß
- Beispiele
  - Volatile PV-Einspeiseleistung abhängig von der Einstrahlungsvariabilität
  - Abhängig von der PV Nennleistung
  - Abhängig vom Klima



Quelle: Lave, M., Reno, M. J. and Broderick, R. J. (2015) 'Characterizing local high-frequency solar variability and its impact to distribution studies', Solar Energy, vol. 118, pp. 327–337 [Online]. DOI: 10.1016/j.solener.2015.05.028.

# Steuerung Inselnetze

- Isolierte Netze, meist ohne Anschluss an großen Netzwerken für Leistungsaustausch
- Begrenzte Regelleistung
- Hohe Verhältnisse von Erneuerbaren/Last sind schnell erreicht
- Hoher Aufwand für Netzstabilisierung (Frequenz, Spannung)
- Bekannte Beispiele:
  - Kythnos, Griechenland
  - La Reunion, Frankreich (nahe Madagaskar)
  - Hawai'i, USA (schnelle Einstrahlungsrampen)
- Ebenfalls wichtig für sog. Micro Grids
  - Illinois Institute of Technology
  - <http://www.iitmicrogrid.net/microgrid.aspx>



**Center For Renewable Energy Sources (CRES):** “A 15 min advance notice, that cloud cover is eminent, would be adequate to start up the back up systems and avoid instability or blackout events.”



# Inhalt



Hochschule Ulm



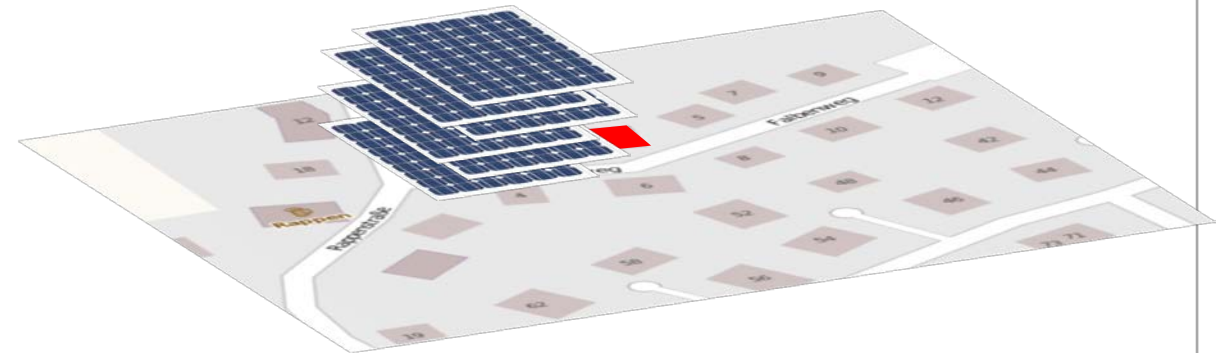
Stadtwerke Ulm/Neu-Ulm  
Netze GmbH



- Einführung ins Stromnetz
- Energiewende und Energiemeteorologie
- Wetterabhängige Sektoren im Stromsystem
- **Blick von “Oben” auf das Verteilnetz**
- Ansatz und Ergebnisse
- Zusammenfassung

# Verfügbare Daten im Verteilnetz

- Verbrauch
  - Jahresverbrauch
  
- Maximaler Strom am Transformator
  - Jahreswert
  
- Erzeugung
  - Jahresertrag
  - Anschlusspunkt
  - Nennleistung
  - Keine Ausrichtung,  
Keine Abschattung,  
Keine aktuelle Einspeisung



# Herausforderungen für den Verteilnetzbetreiber

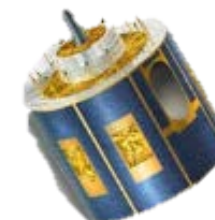


Hochschule Ulm



Stadtwerke Ulm/Neu-Ulm  
Netze GmbH

- **Das Energiesystem wird komplexer und Kosten müssen gesenkt werden**
- **Fragen**
  - Wie ist die Zeitreihe an einem Ortsnetztransformator mit vielen PV-Anlagen?
  - Historische Daten über mehrere Jahre?
  - Erweiterbar für Studien?
  - Daten in naher Echtzeit?
  - Vorhersage von Leistungsflüsse?
- Nicht verfügbar mit Schleppzeigermessungen
- Aber, mit meteorologischen Daten und Fernerkundungstechniken



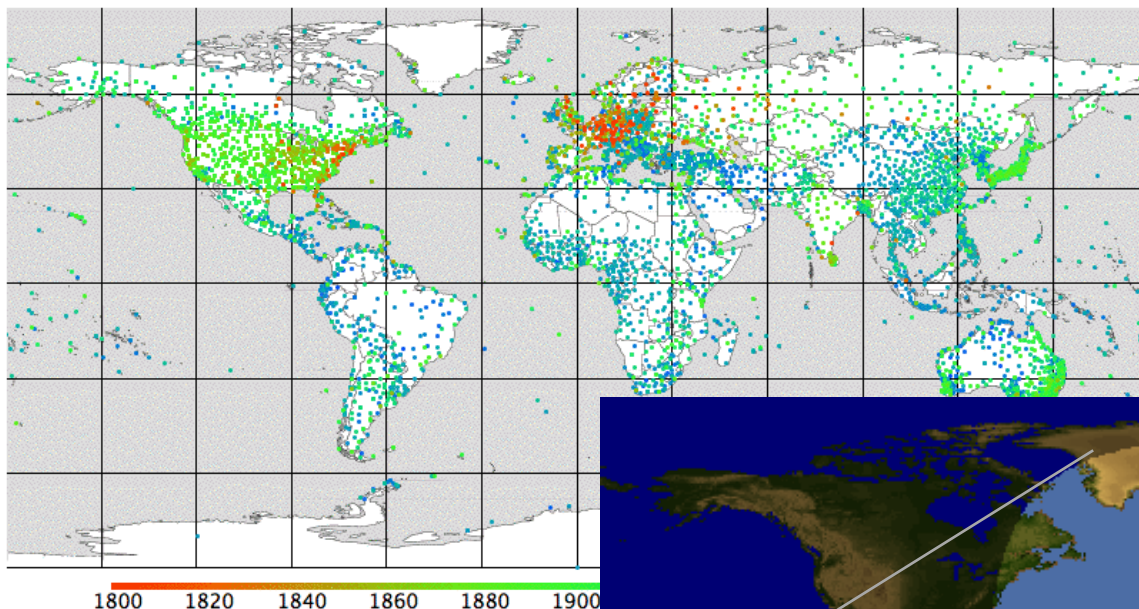
# Solare Einstrahlung vom Wettersatellit – Warum?



Hochschule Ulm



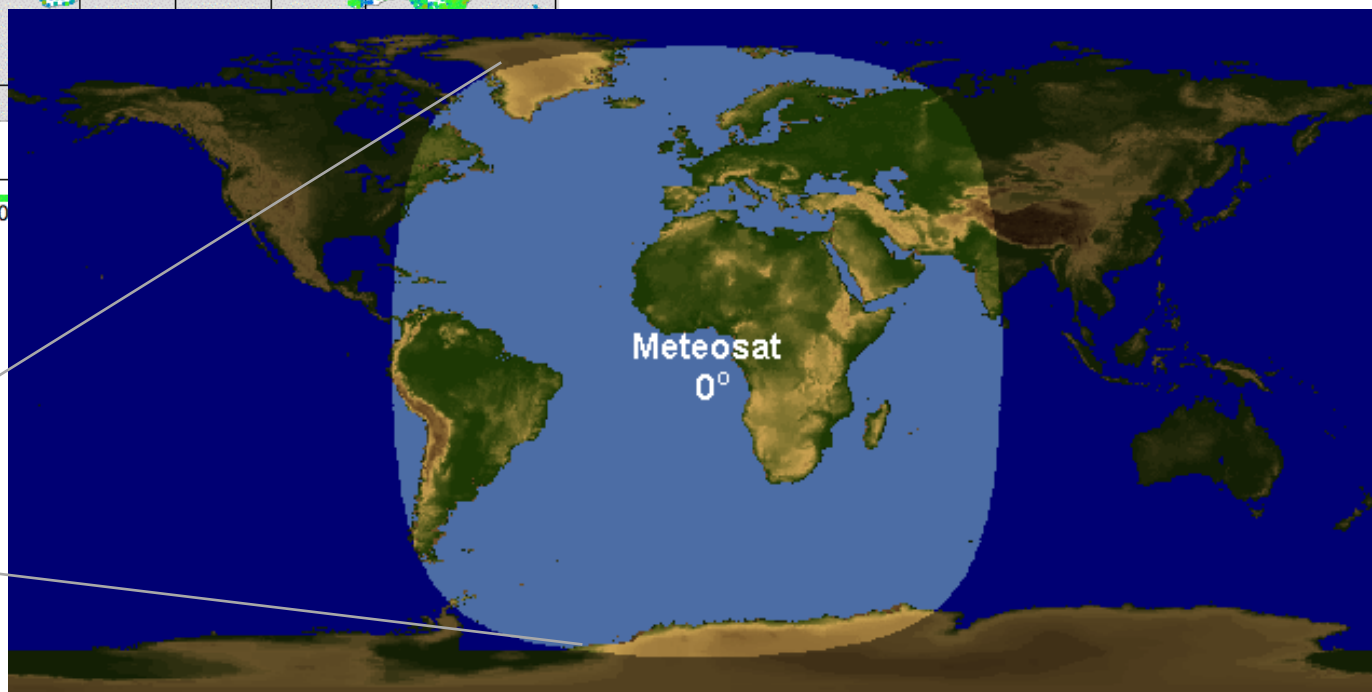
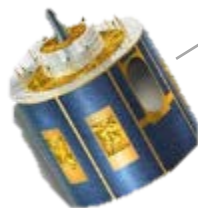
Stadtwerke Ulm/Neu-Ulm  
Netze GmbH



Beispiel Deutscher Wetterdienst:

- 1900 Stellen messen Niederschlag
- 286 Stationen messen Wind
- 28 Stationen messen „höherwertig“ solare Einstrahlung

Lösung: Satelliten z.B.  
Meteosat Second Generation  
(MSG)



# Deutsches Verteilnetz vom Satelliten aus gesehen



Asset	absolut	pro km <sup>2</sup>	pro km <sup>2</sup> (Siedlungsfläche)	pro MSG pixel
MS-Leitungen	507.000 km	1,4 km/km <sup>2</sup>	10,4 km/km <sup>2</sup>	21,3 km/px
NS-Leitungen	1.160.000 km	3,2 km/km <sup>2</sup>	23,9 km/km <sup>2</sup>	48,7 km/px
HS/MS Trafo	7.500	0,02 /km <sup>2</sup>	0,15 /km <sup>2</sup>	0,3 /px
MS/NS Trafo	560.000	1,6 /km <sup>2</sup>	11,6 /km <sup>2</sup>	23,5 /px
PV Systeme	~1.500.000	4,2 /km <sup>2</sup>	31 /km <sup>2</sup>	63 /px
PV Leistung	~40.000 MWp	112 kWp/km <sup>2</sup>	825 kWp/km <sup>2</sup>	1.680 kWp/px

Germany = 357168 km<sup>2</sup>, MSG pixel ≈ 15 km<sup>2</sup>

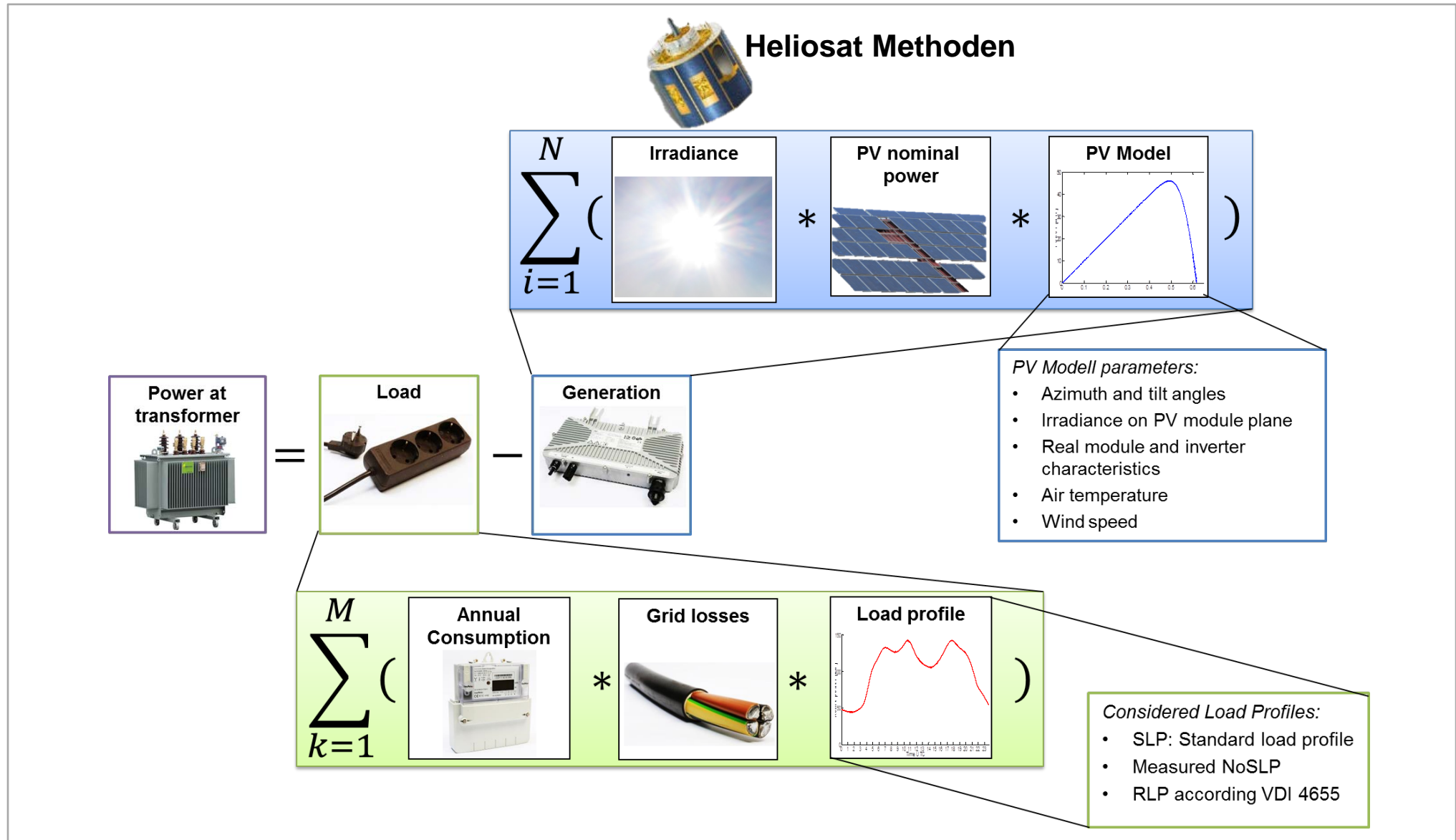
Source: EWE Netz GmbH und <https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/veroeffentlichungen-pdf-dateien/studien-und-konzeptpapiere/aktuelle-fakten-zur-photovoltaik-in-deutschland.pdf>

# Inhalt



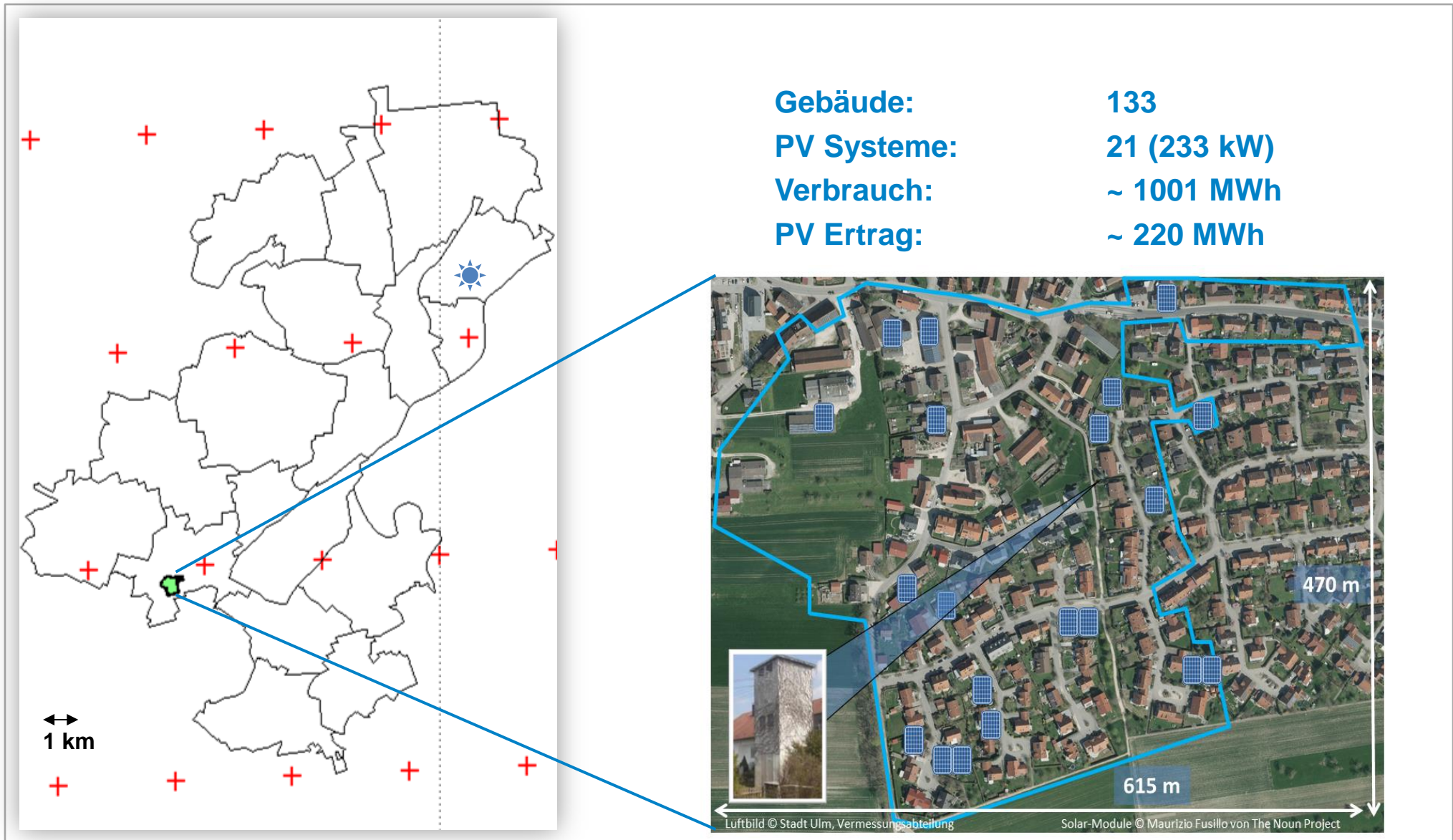
- Einführung ins Stromnetz
- Energiewende und Energiemeteorologie
- Wetterabhängige Sektoren im Stromsystem
- Blick von “Oben” auf das Verteilnetz
- **Ansatz und Ergebnisse**
- Zusammenfassung

# Ansatz



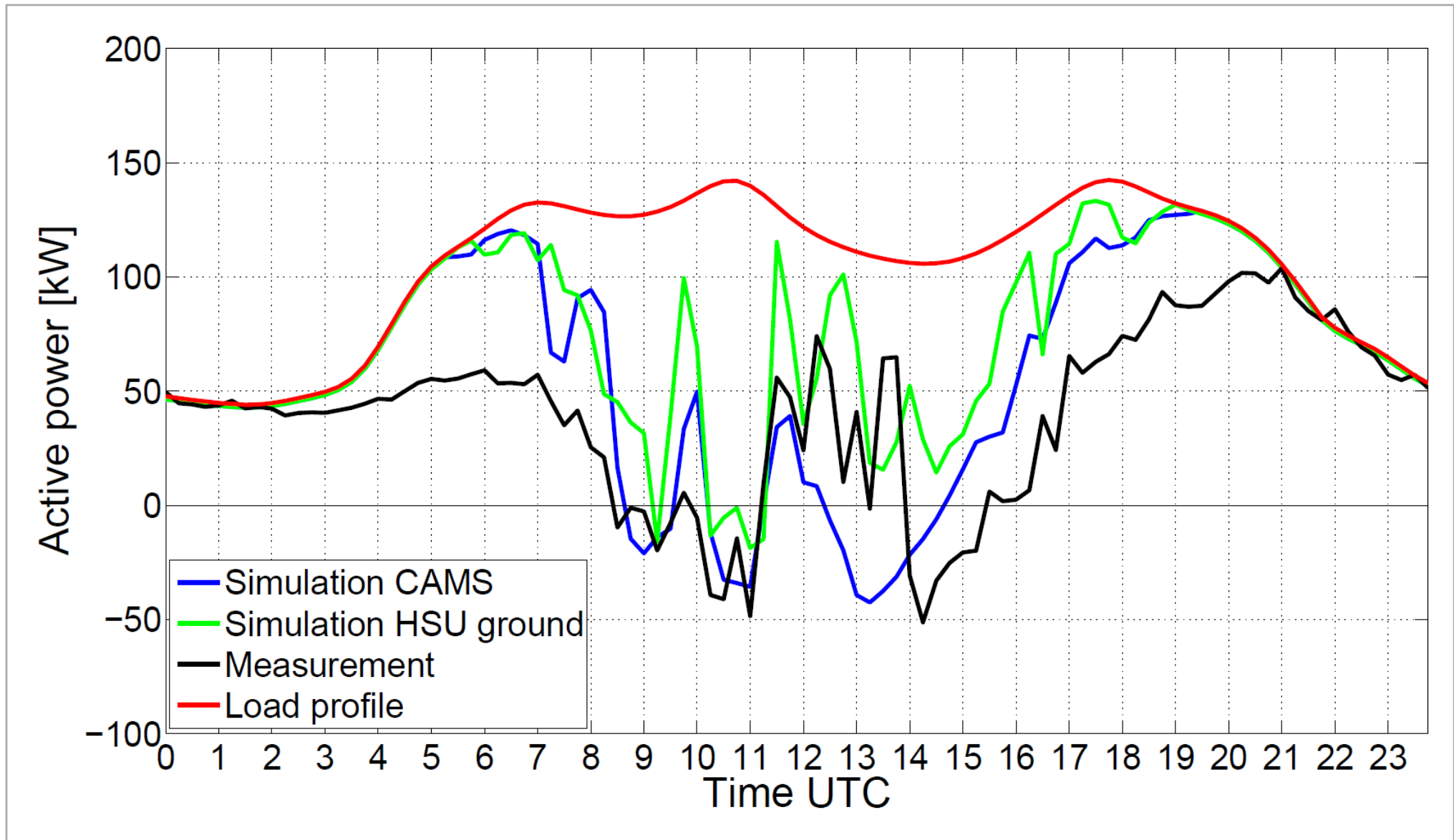
Quelle: Ruf, H. (2016) Computation of the Load Flow at the Transformer in Distribution Grids with a Significant Number of Photovoltaic Systems using Satellite-derived Solar Irradiance Data: Doctoral thesis [Online], Grimstad, University of Agder. Available at <http://hdl.handle.net/11250/2398250> (Accessed 23 August 2016).

# Testgebiet Ulm-Einsingen

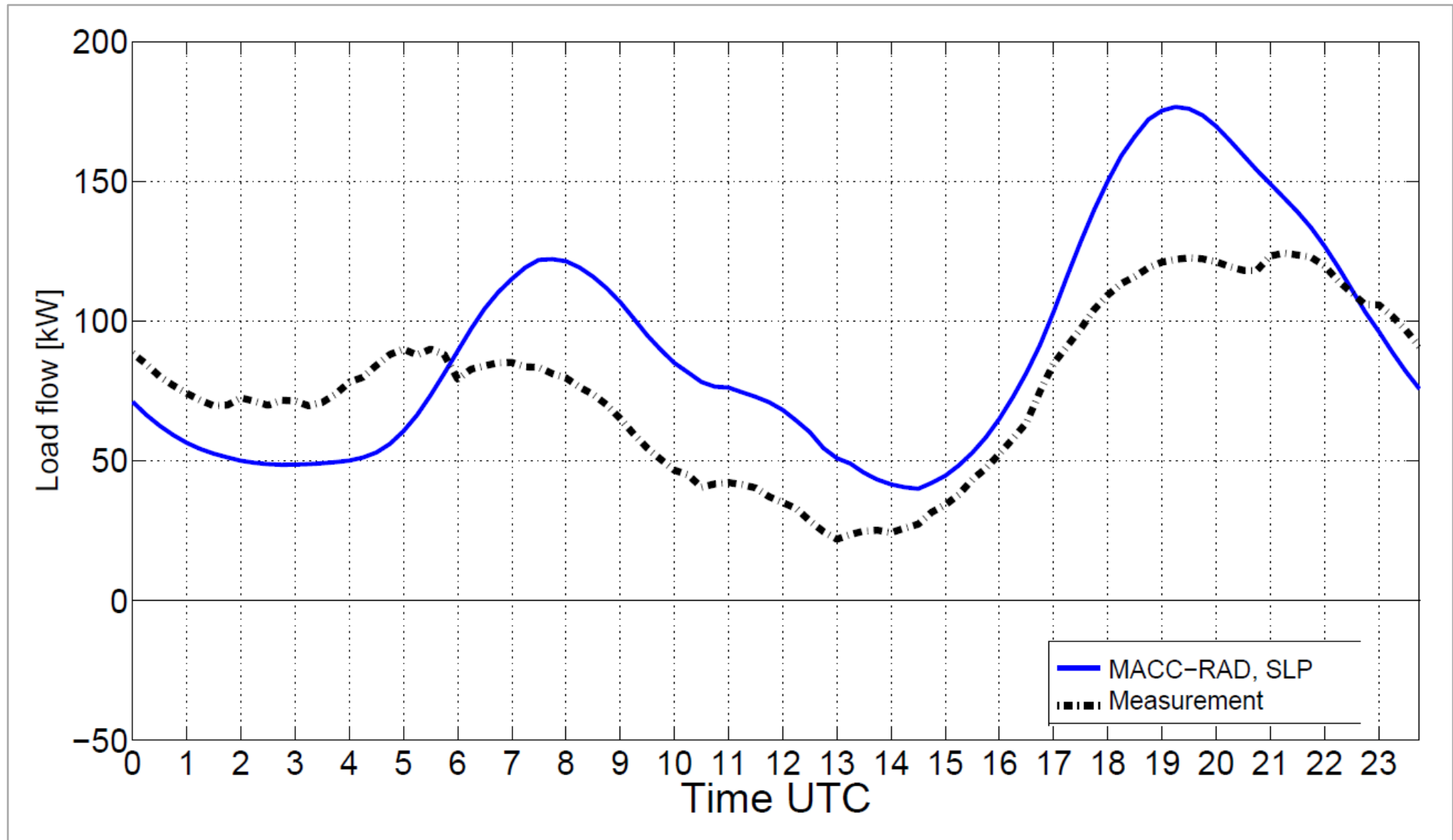




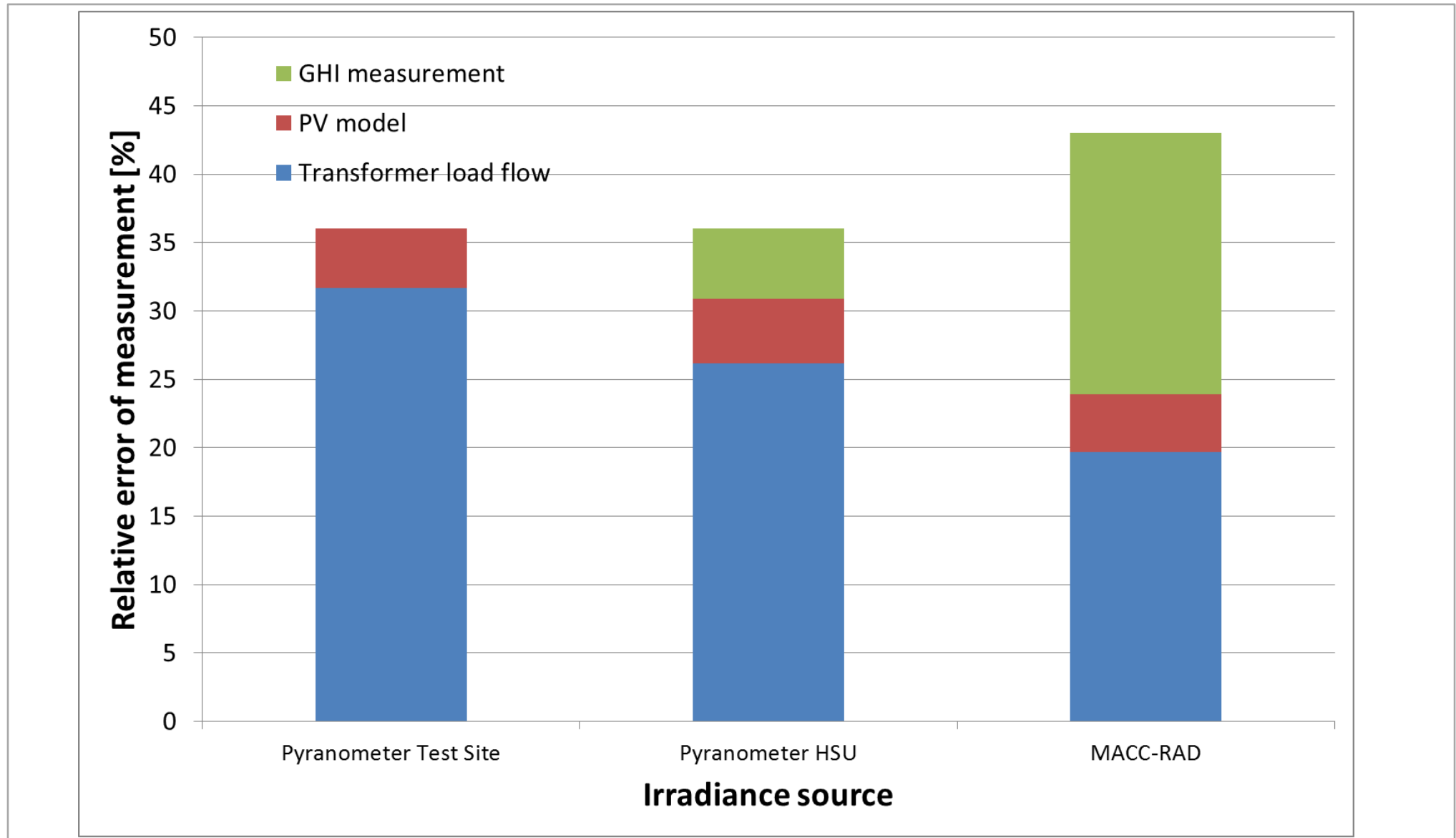
# Ergebnisbeispiel: 03.08.2012



# Mittlerer Tag im Jahr 2012

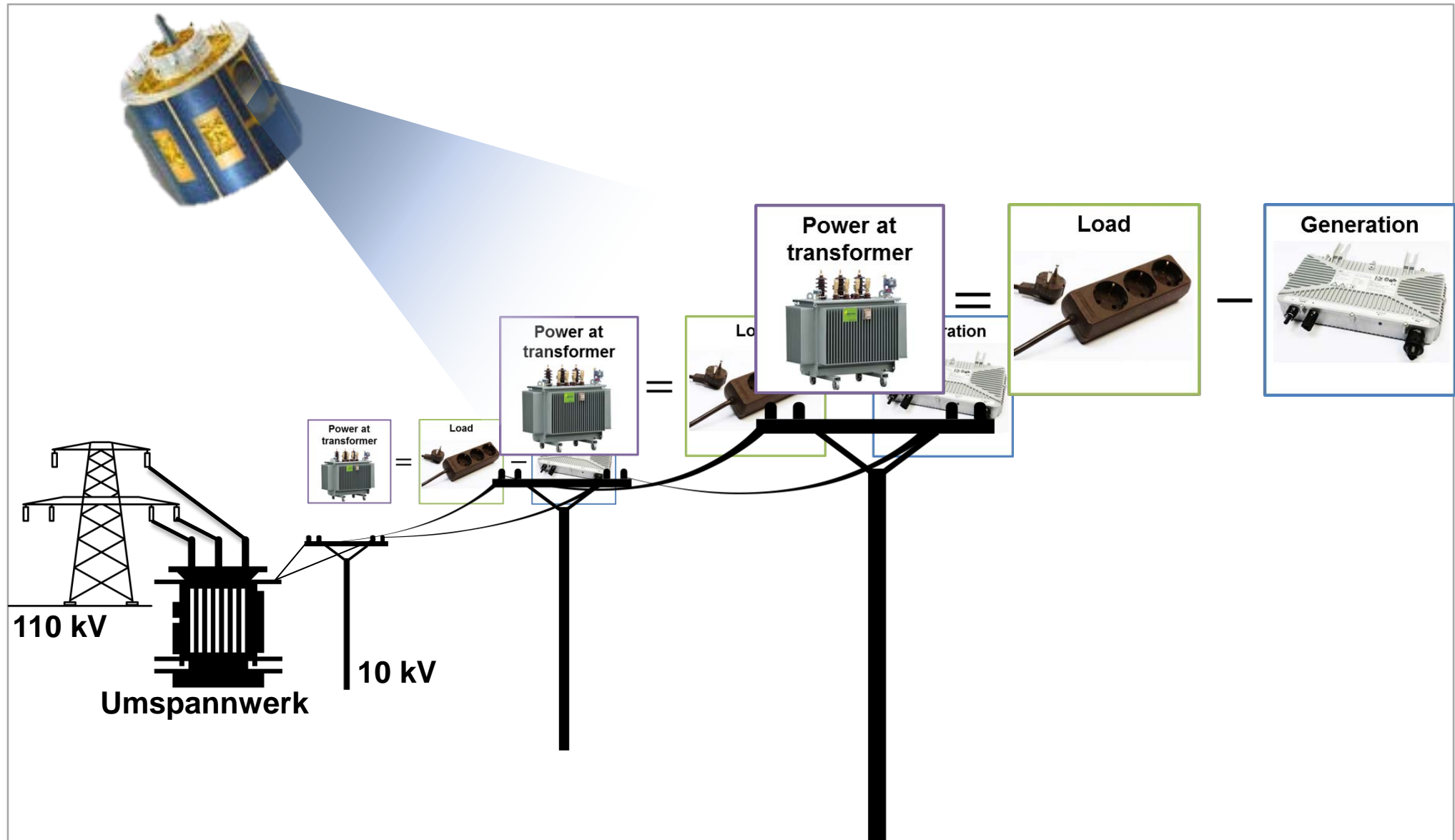


# Experiment: Fehlerquelle bei der Lastflussberechnung



Experiment duration: 7.8.2014 – 9.10.2014 (63 days)

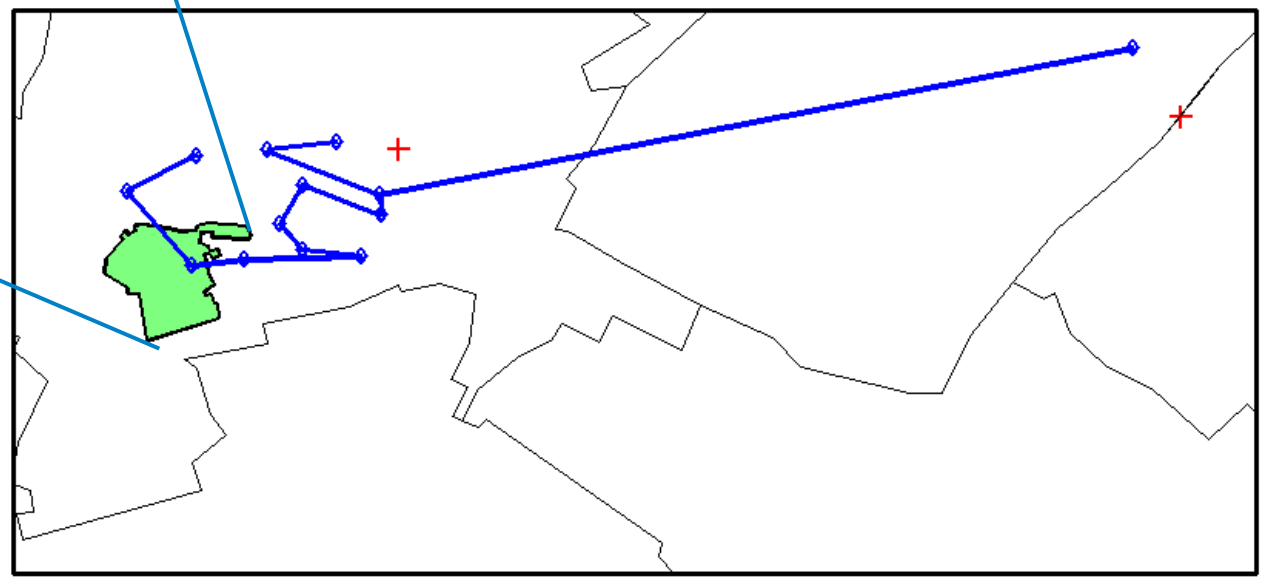
# Skalierung auf Mittelspannung



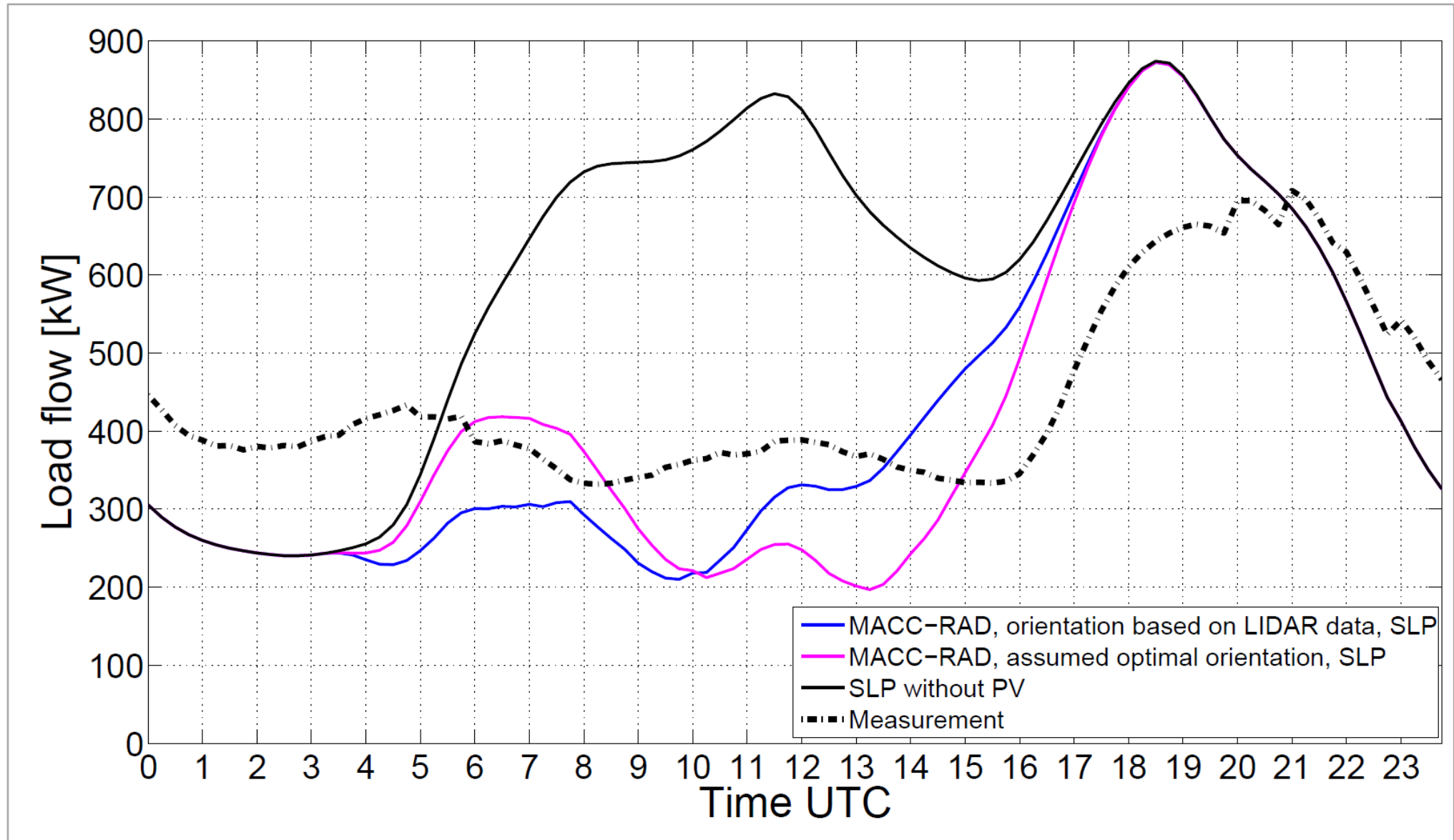
# Mittelspannungsleitung



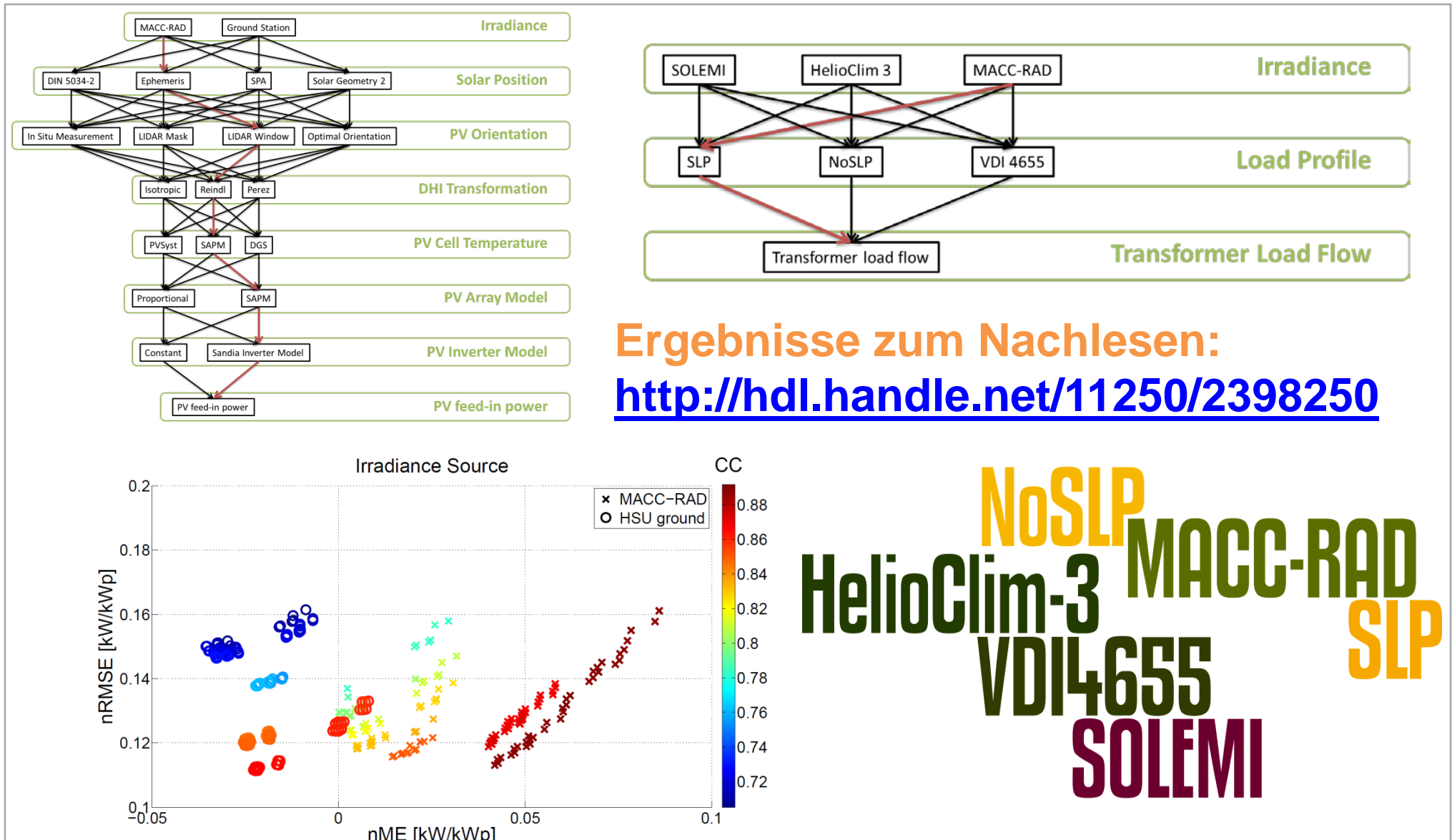
<b>Transformatoren</b>	<b>12</b>
<b>Gebäude:</b>	<b>~ 1350</b>
<b>PV Systeme:</b>	<b>112 (1431 kW)</b>
<b>Verbrauch:</b>	<b>~ 4200 MWh</b>
<b>PV Ertrag:</b>	<b>~ 1300 MWh</b>



# Mittlerer Tag (4/2013 – 12/2014)



# Einfluss der Modelle auf das Ergebnis



# Inhalt

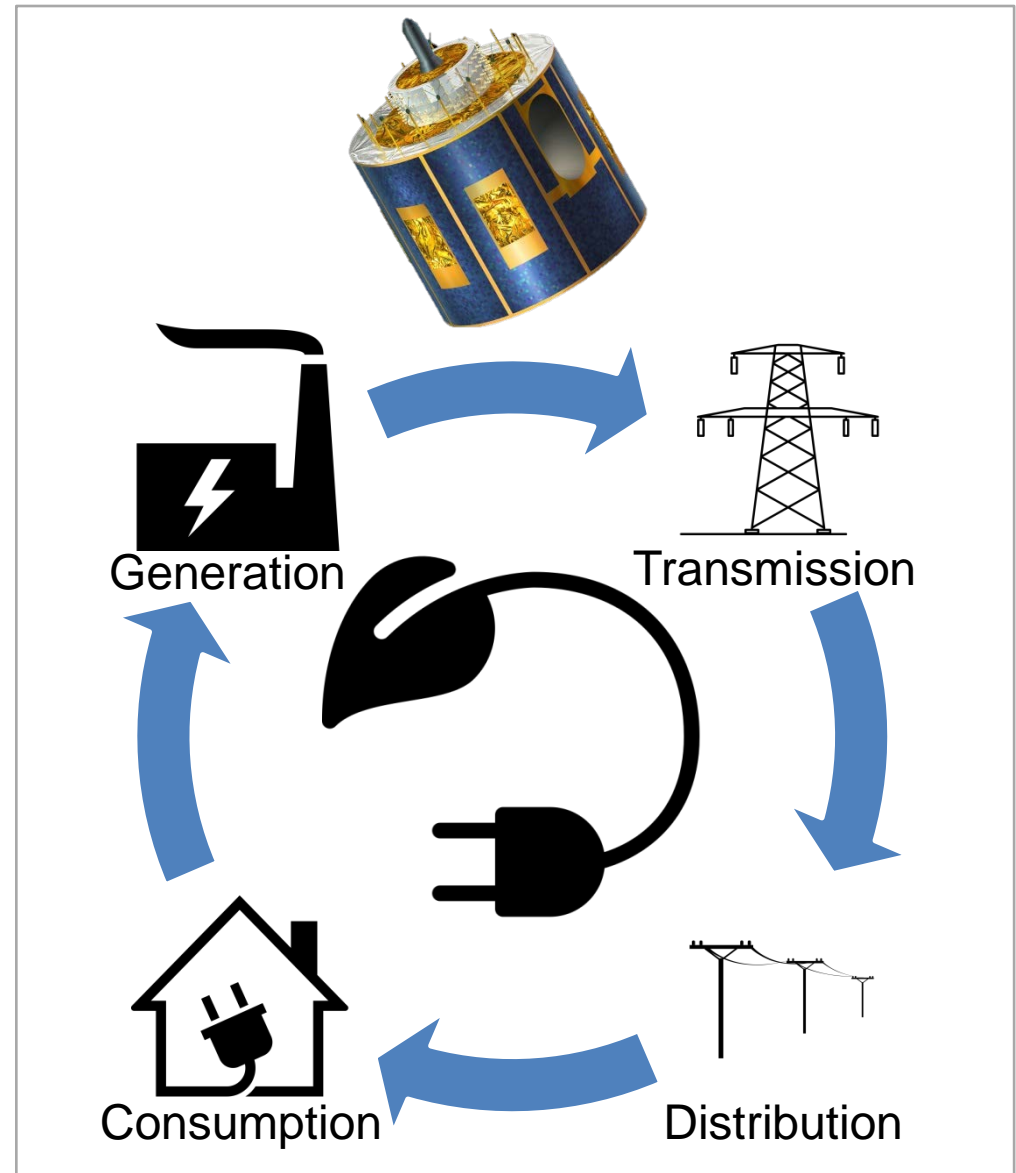


- Einführung ins Stromnetz
- Energiewende und Energiemeteorologie
- Wetterabhängige Sektoren im Stromsystem
- Blick von “Oben” auf das Verteilnetz
- Ansatz und Ergebnisse
- **Zusammenfassung**



# Zusammenfassung

- Energiemeteorologie gibt es seit Jahrzehnten
- Energiemeteorologie wird zunehmend wichtiger mit Erneuerbaren Energien
- **Energiemeteorologie ist in ALLEN Bereichen des Energiesystems enthalten**
- Bedarf an verschiedenen Zeitbereichen, aber häufig nicht verfügbar
  - Historie → Planungsgrundlage und Anpassung von Vorhersagemodellen
  - Echtzeit → aktueller Status von Netze und Kraftwerke
  - Vorhersage → Planung und Netzbetrieb
- Lastfluss an einem Trafo mit vielen PV Anlagen mit Hilfe von Satellitendaten berechenbar
- Verschiedene Modelle validiert
- Genauigkeit noch verbesserungsfähig, verschiedene Stellschrauben
  - Einstrahlung
  - PV Modell
  - Lastprofil
- Historische Daten (seit 2004) verfügbar.
- Verfahren ist skalierbar und im gesamten MSG-Beobachtungsfenster nutzbar (Europa und Afrika)



# Vielen Dank



**Holger Ruf**

**Ingenieurbüro Holger Ruf**

Email: [ruf@holger-ruf.de](mailto:ruf@holger-ruf.de)

**Gerd Heilscher**

**Hochschule Ulm - University of Applied Sciences**

Email: [heilscher@hs-ulm.de](mailto:heilscher@hs-ulm.de)

**Marion Schroedter-Homscheidt**

**Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V**

Email: [marion.schroedter-homscheidt@dlr.de](mailto:marion.schroedter-homscheidt@dlr.de)

**Hans Georg Beyer**

**University of Agder**

Email: [hans-georg.beyer@uia.no](mailto:hans-georg.beyer@uia.no)

**Florian Meier**

**Stadtwerke Ulm/Neu-Ulm Netze GmbH**

Email: [florian.meier@ulm-netze.de](mailto:florian.meier@ulm-netze.de)

