



Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

## Simulation des thermodynamischen Verhaltens der Kraftwerksanlage

**Prof. Dr.-Ing. Klaus Görner**

Dr.-Ing. Gerd Oeljeklaus, M.Sc. Marcel Richter, Dipl.-Ing. Florian Möllenbruck

Lehrstuhl für Umweltverfahrenstechnik und Anlagentechnik  
Universität Duisburg-Essen

Flexible Kraftwerke für die Energiewende

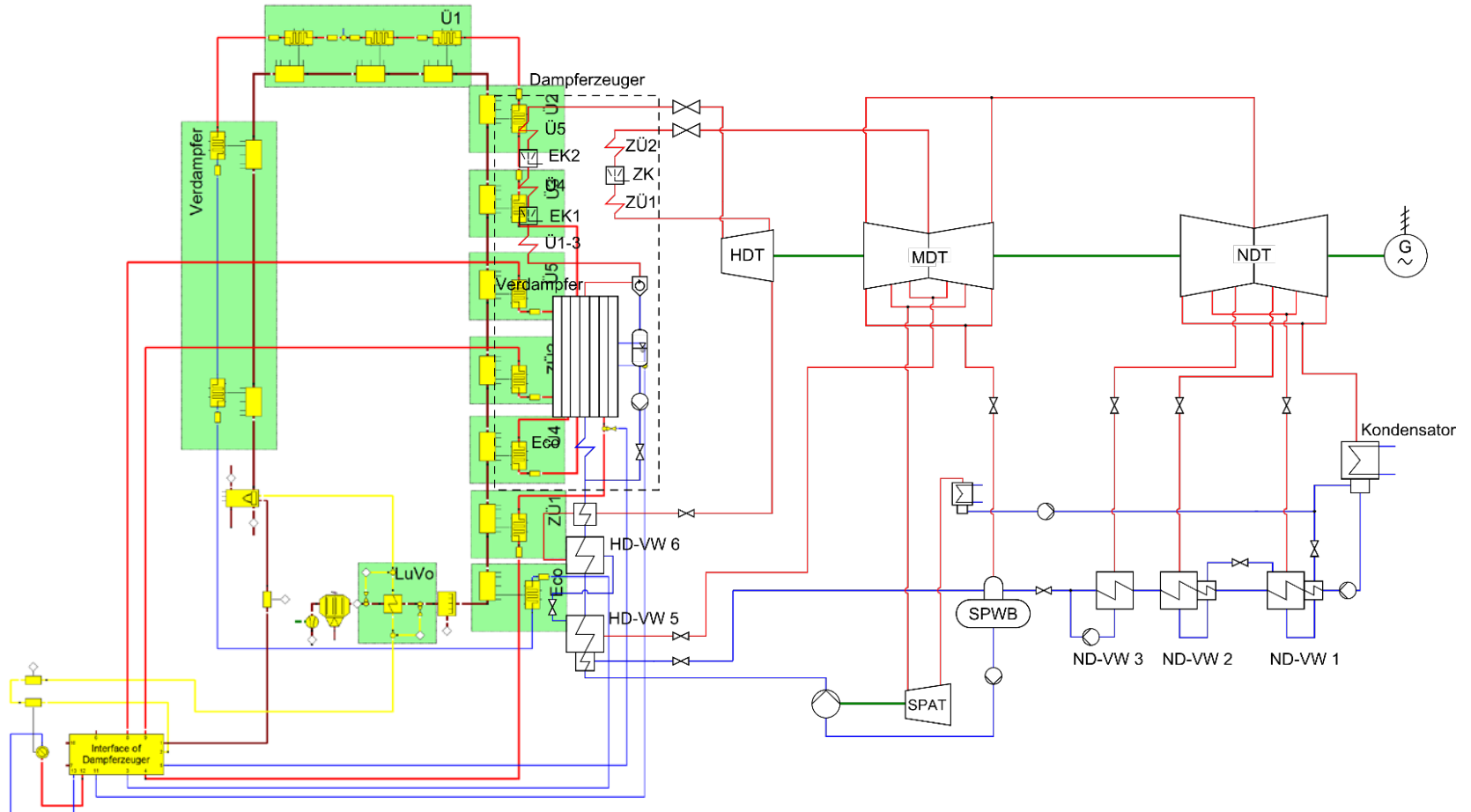
25. Mai 2016, Düsseldorf

- Umfang und Ziele der thermodynamischen Berechnungen
- Validierung der dynamischen Simulationsmodelle
- Simulationsstudien zu Flexibilitätsoptionen
- Zusammenfassung und Ausblick

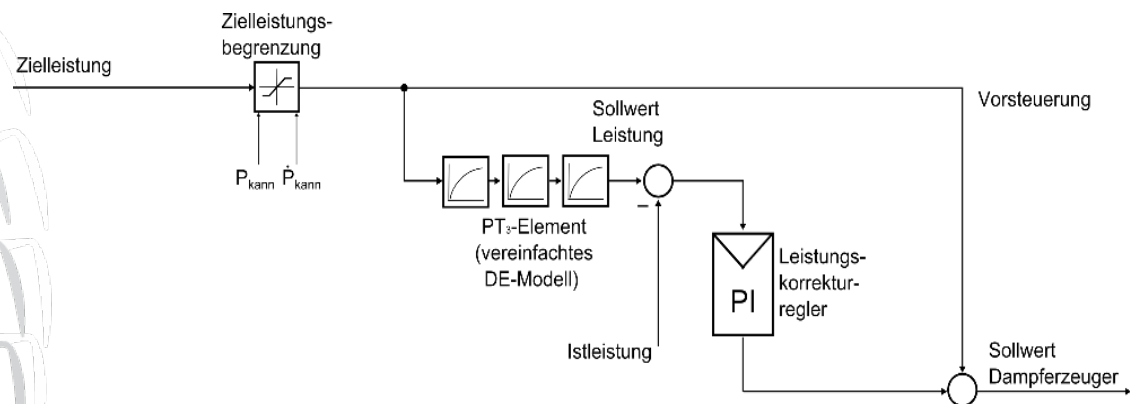
- **Erstellung und Validierung stationärer und dynamischer Simulationsmodelle zu den beiden Referenzanlagen**
  - Kraftwerk Voerde, Block A
  - Kraftwerk Schwarze Pumpe (KSP), Block A
  
- **Durchführung von Simulationsstudien zu den im Projekt betrachteten Flexibilitätsoptionen**
  - Integration thermischer Energiespeicher
    - Mindestlastabsenkung + Erhöhung der Laständerungsgeschwindigkeit
  - 1-Mühlenbetrieb
    - Mindestlastabsenkung
  - Indirekte Feuerung
    - Erhöhung der Laständerungsgeschwindigkeit
  - Änderungen in Blockregelung
    - Erhöhung der Laständerungsgeschwindigkeit
  
- **Überprüfung der Übertragbarkeit der Erkenntnisse auf Neubaukonzepte**

# Umfang der stationären Simulationsmodelle

- **Detaillierte Abbildung des Wasser-/Dampfkreislaufs und des Dampferzeugers**
  - Grundlage: Wärmeschaltbilder und Messwerte der Kraftwerksbetreiber



- **Detaillierte Abbildung des Wasser-/Dampfkreislaufs und des Dampferzeugers**
  - Grundlage: stationäre Simulationsmodelle
- **Berücksichtigung von Speichereffekten (zeitliche Ableitungen) bei instationären Komponentenmodellen**
  - Heizflächen
  - Speisewasserbehälter / Vorwärmer / Anfahflasche
  - Kohlemühlen
  - ...
- **Implementierung der wesentlichen Regelungsstrukturen**
  - Blockregelung
  - Speisewasserregelung
  - Dampftemperaturregelung
  - Umwälzregelung
  - ...



# Dynamische Simulationsmodelle: Vorgehensweise

## Betrachtete Zeiträume

Sekunden

Minuten

Stunden

Tage

(Primärregelung)

Mindestlastabsenkung

Anpassungen in Leittechnik

Speicherkonzepte

Lastwechsel

Zukünftige Lastprofile

(An- und Abfahrvorgänge)

## Verwendete Simulationstools

### Modelica/Dymola

- Kraftwerksbibliothek "ClaRa"  
(COORETEC-Projekt DYNCAP)
- **Detaillierte Simulation** von Vorgängen im Sekundenbereich und darunter

KW  
Schwarze  
Pumpe

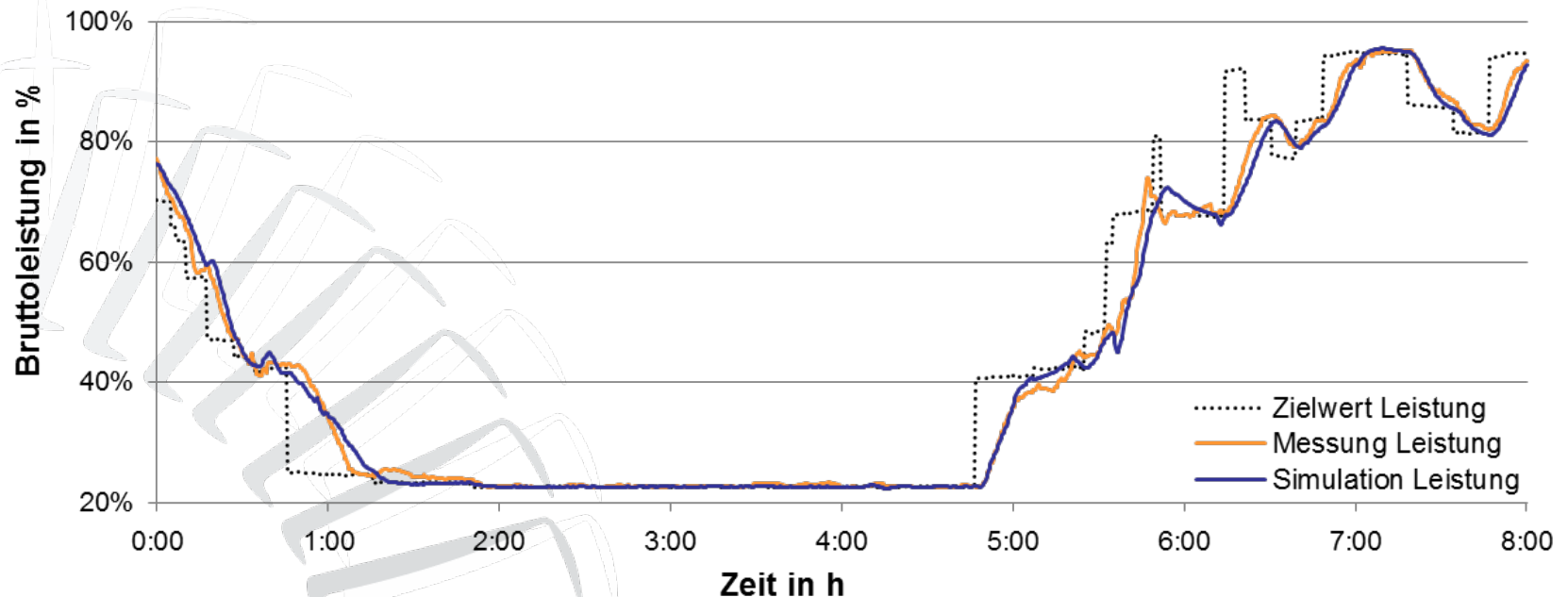
### Epsilon® Professional

- Release 11  
(instationäre Wärmetauscher, PI(D)-Regler, Übertragungsfunktionen)
- **Simulation von Vorgängen im Minutenbereich und darüber** (bei gleichzeitig schnellem Modellaufbau)

KW Voerde

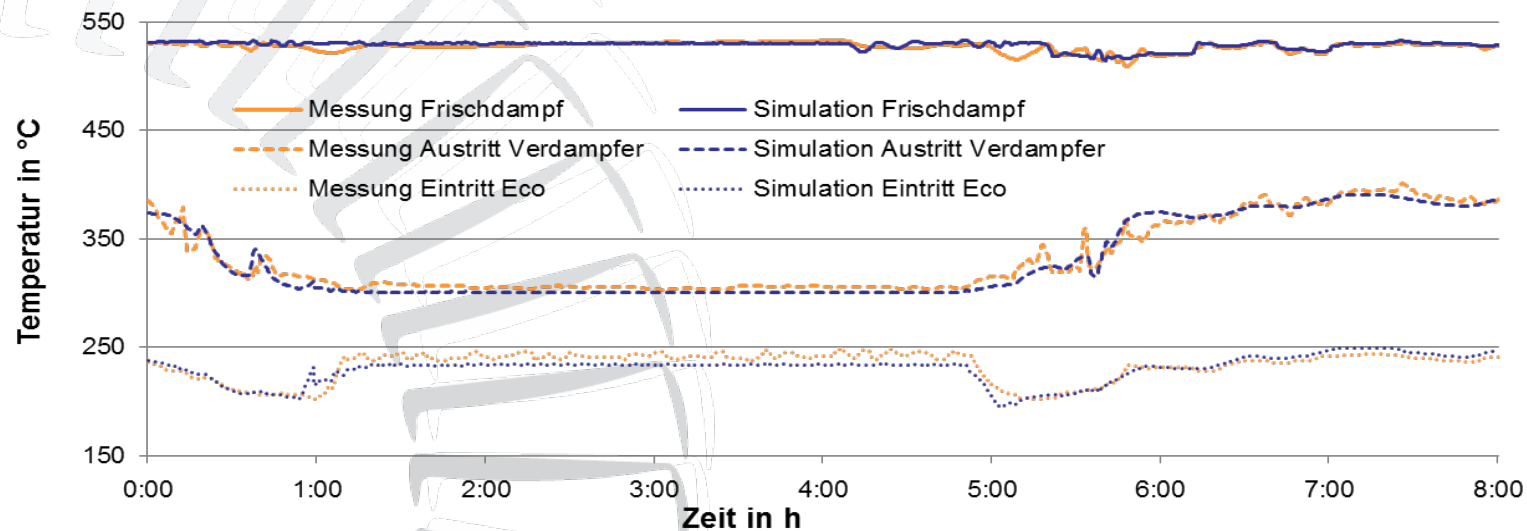
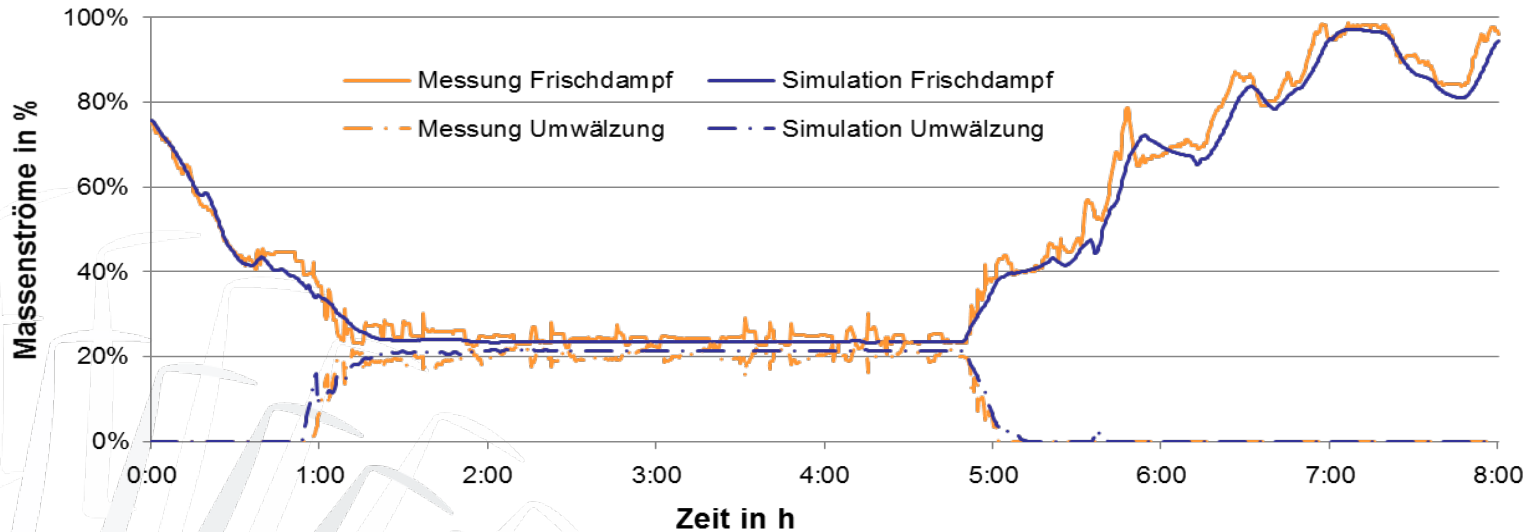
# Dynamisches Modell Kraftwerk Voerde - Validierung

- Typisches Lastprofil für Steinkohlekraftwerke
  - Betrieb in Mindestlast in den Nachtstunden
  - Lastwechsel in Richtung Volllast in den Morgenstunden
- Messwerte vom Kraftwerksbetreiber STEAG aufgezeichnet
- EingangsvARIABLE des Simulationsmodells: Zielwert Leistung



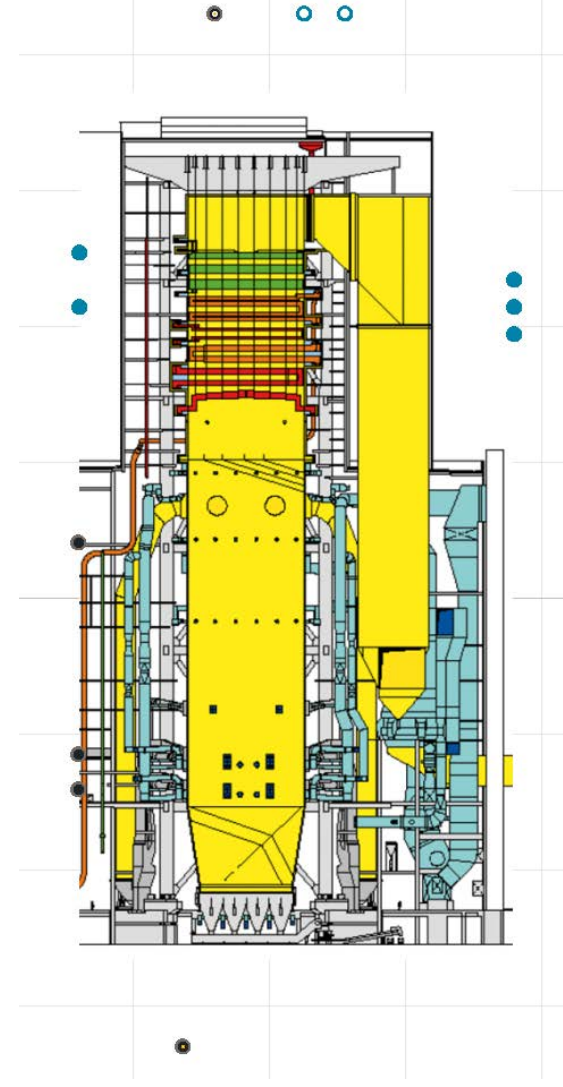
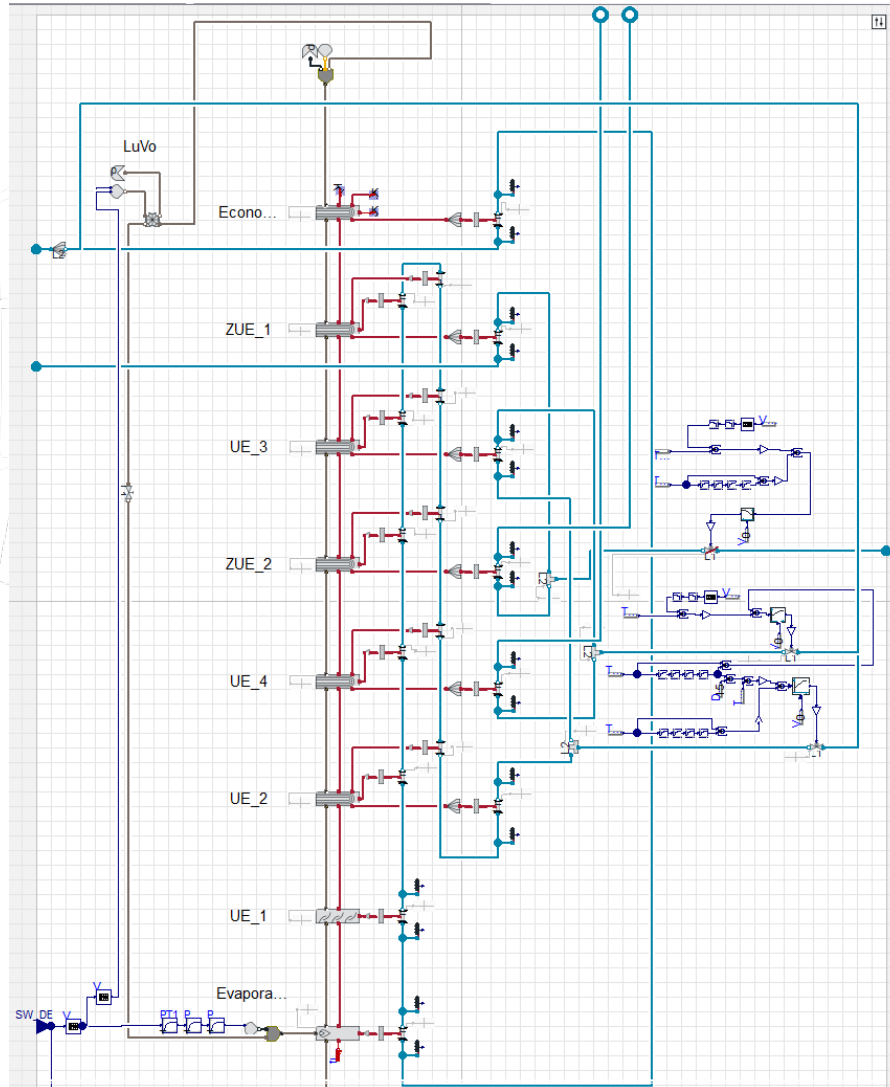
- → Gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Messwerten
  - Auch wesentliche dynamische Schwankungen werden repräsentiert (z.B. Zuschalten von Kohlemühlen zwischen 5:00 und 6:00)

# Dynamisches Modell Kraftwerk Voerde - Validierung

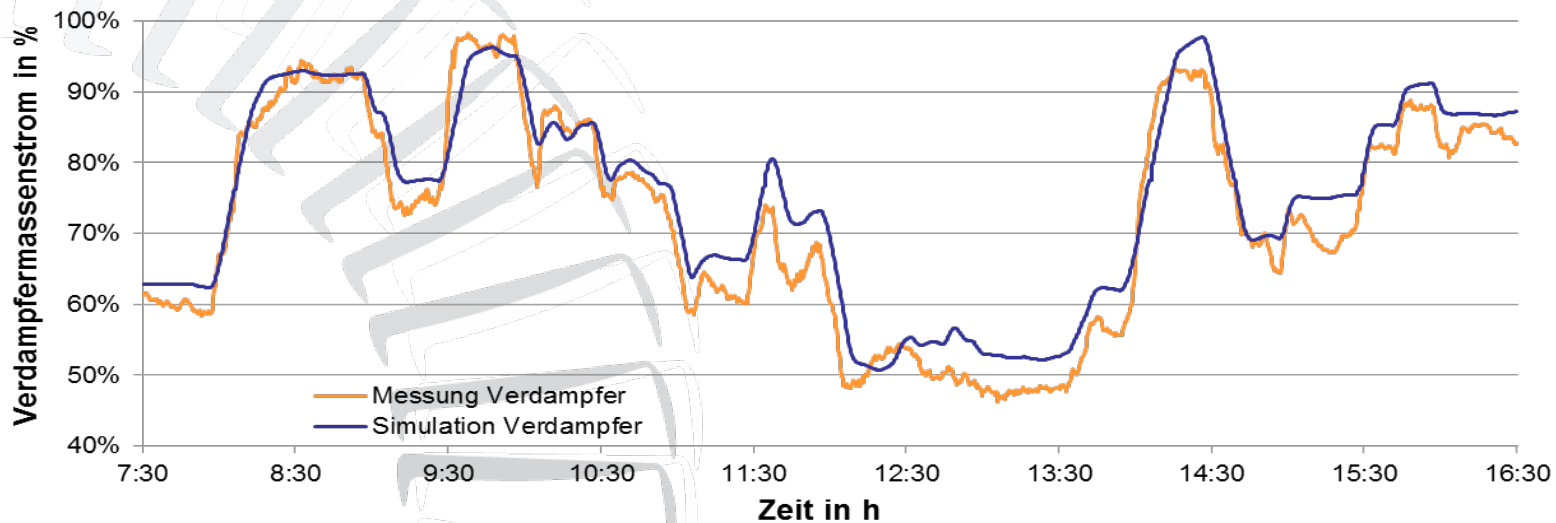
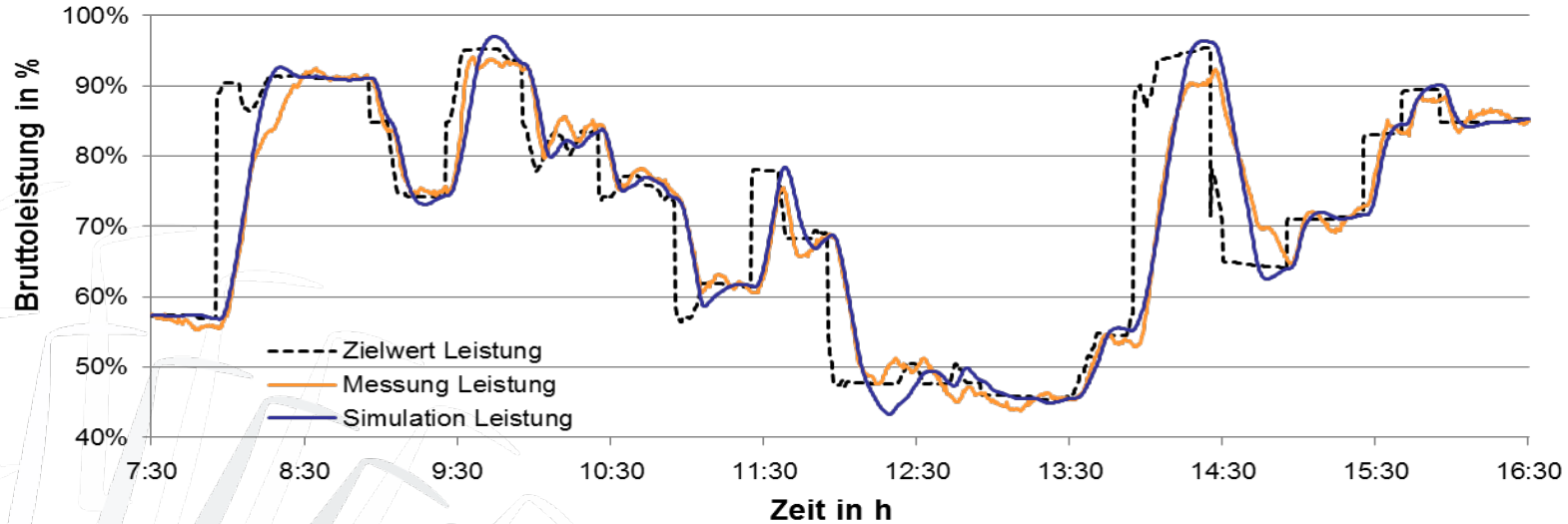




# Dyn. Modell KSP: Detaillierter Dampferzeuger



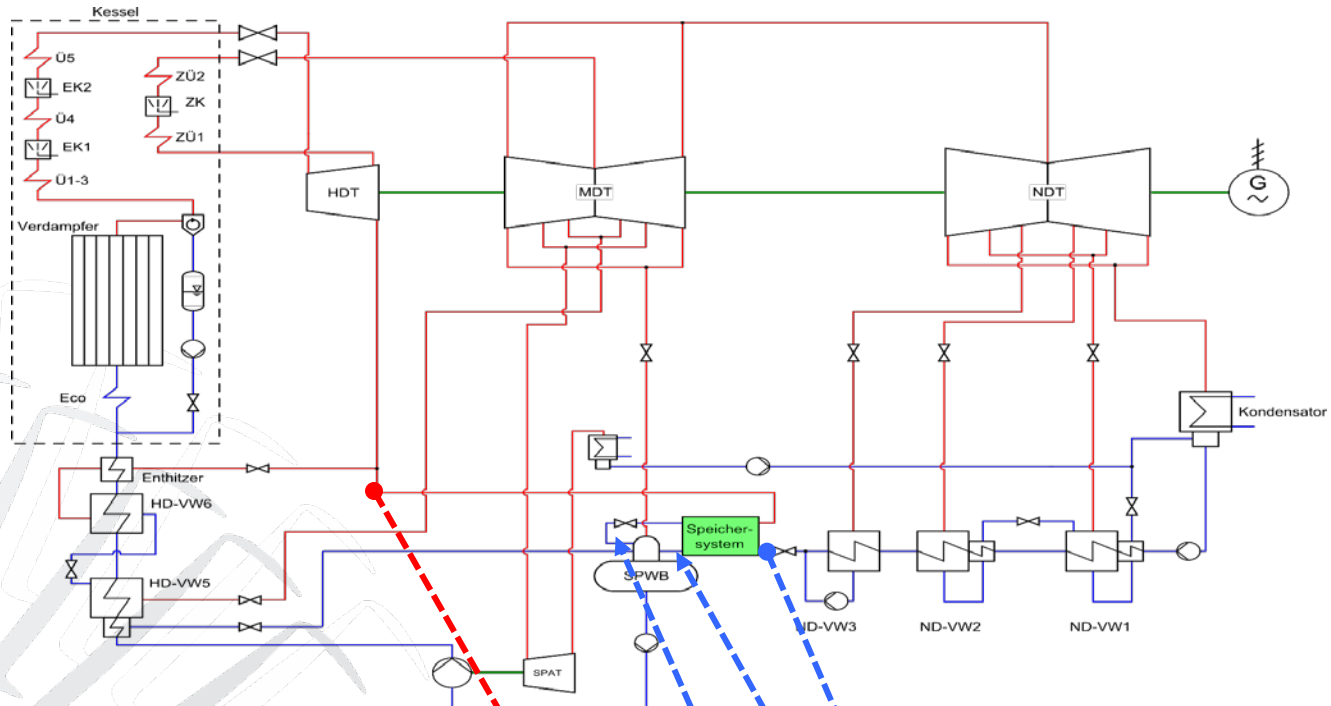
# Dynamisches Modell KSP - Validierung



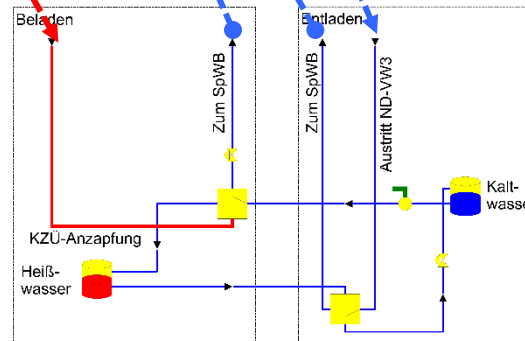
## Integration thermischer Energiespeicher

- **(Teilweise) Entkoppelung von Dampferzeuger und Dampfturbinen**
- **Mögliche Zielstellungen**
  - Lastverschiebung zwischen Mindestlast und Volllast
  - Erhöhung der Laständerungsgeschwindigkeit
  - (Bereitstellung von Regelenergie)
  - (Verbesserung von An- und Abfahrvorgängen)
- **Erarbeitung von 3 Vorzugsvarianten innerhalb P-DKW**
  - Verschiedene Integrationspunkte im Wasser-/Dampfkreislauf
  - Nutzung von Frischdampf, HZÜ-Dampf oder KZÜ-Dampf beim Beladen
  - Erzeugung von HZÜ-Dampf oder Ersetzen von Anzapfdampf (Vorwärmer) beim Entladen

# Simulationsstudien: Integration therm. Speicher



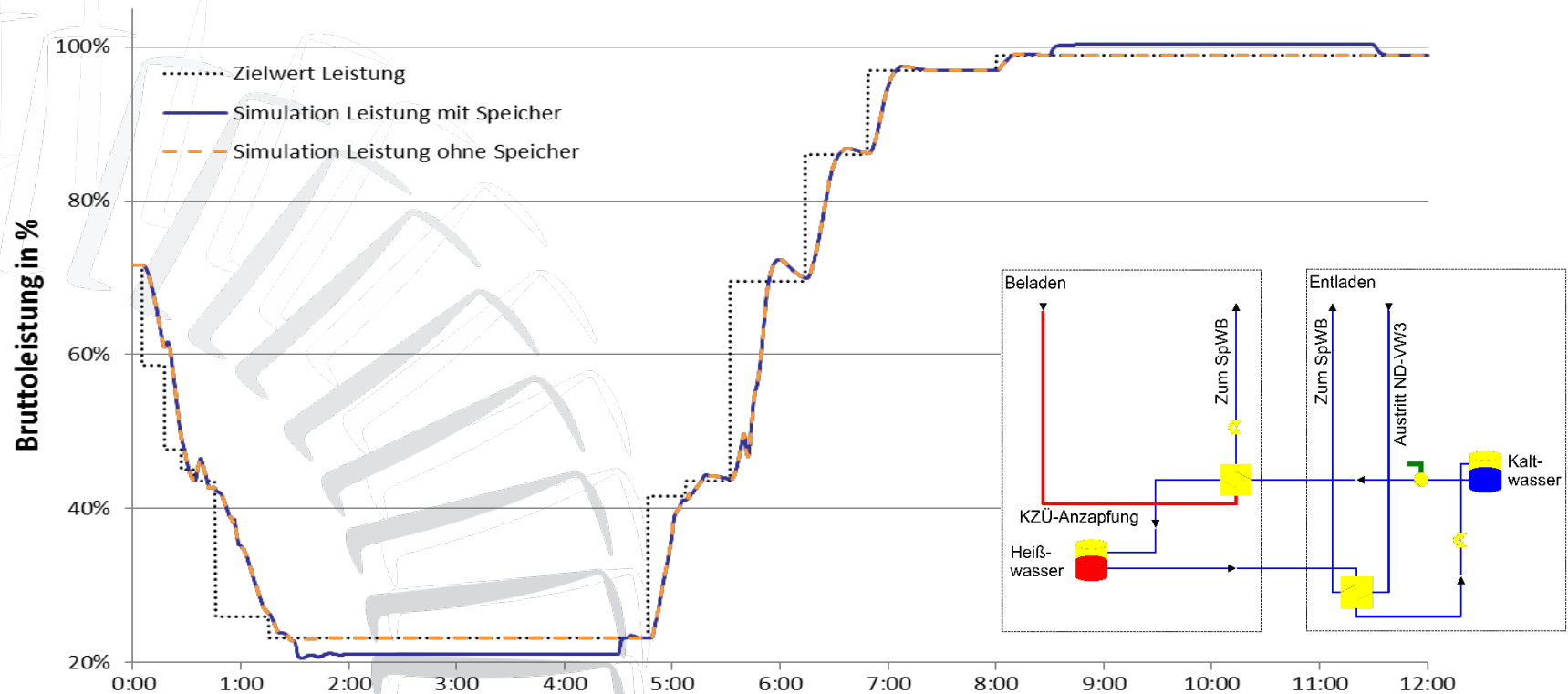
**Beladen des  
Speichers**



**Entladen des  
Speichers**

# Simulationsstudien: Integration therm. Speicher

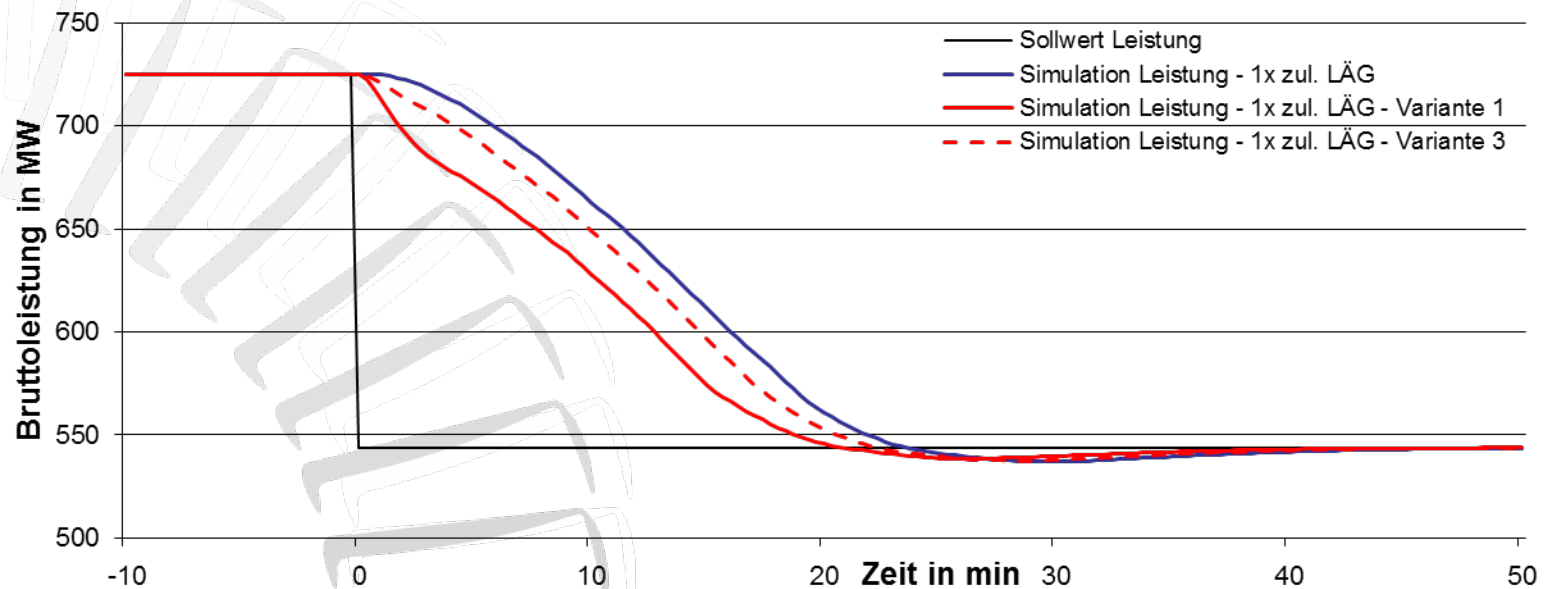
Leistungsreduktion in Mindestlast	%-Punkte	2,0	Leistungssteigerung in Volllast	%-Punkte	1,3
Wärmestrom Be- und Entladung	MW <sub>th</sub>	56	Kapazität Kalt- & Heißspeicher	MWh	168
Temperatur Heißwasserspeicher	°C	170	Temperatur Kaltwasserspeicher	°C	140
Be- und Entladedauer	Std.	3	Wassermasse Speichersystem	t	5.000

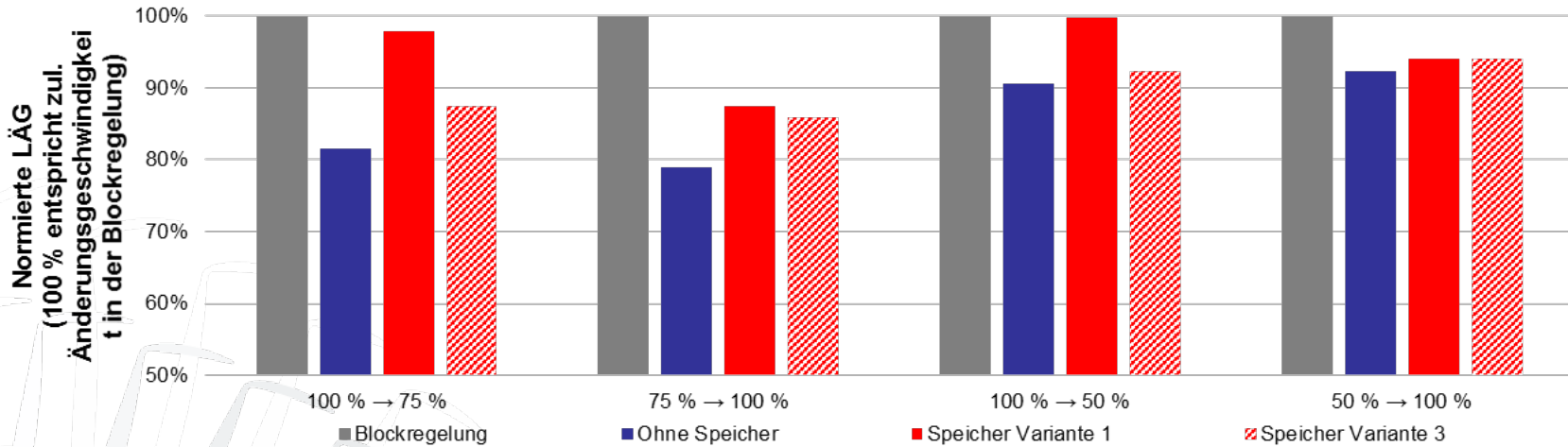


## Erhöhung der Laständerungsgeschwindigkeit durch Nutzung therm. Energiespeicher

### ■ Vorgehensweise:

- Laden des Speichers zur schnelleren Lastabsenkung
- Entladen des Speichers zur schnelleren Laststeigerung
- Anpassungen in Blockregelung zur Berücksichtigung des zusätzlichen Freiheitsgrades notwendig





- Laständerungsgeschwindigkeit (LÄG) kann für alle betrachteten Lastfälle verbessert werden
- Verbesserung der LÄG ist größer, je kleiner der Lastsprung ist
  - Bei großen Lastsprüngen bleibt die „klassische“ Anpassung der Brennstoffwärmeleistung und damit das träge Verhalten des ursprünglichen Prozesses führend
  - Nutzung einer TES-Integration hinsichtlich einer schnellen, aber vergleichsweise geringen Anpassung der Leistung (z.B. Regelenergie) von besonders großem Interesse
- Bei größeren Speicherleistungen (z.B. aufgrund der Verschiebung der betrieblichen Grenzen), sind auch größere Effekte auf die LÄG zu erwarten.
- Weitere Untersuchungen in Folgeprojekt FLEXI-TES angestrebt
  - Erweiterung der Untersuchungen im Hinblick auf Mehrfachnutzen
    - Mindestlast + LÄG + Regelenergie + An- und Abfahren

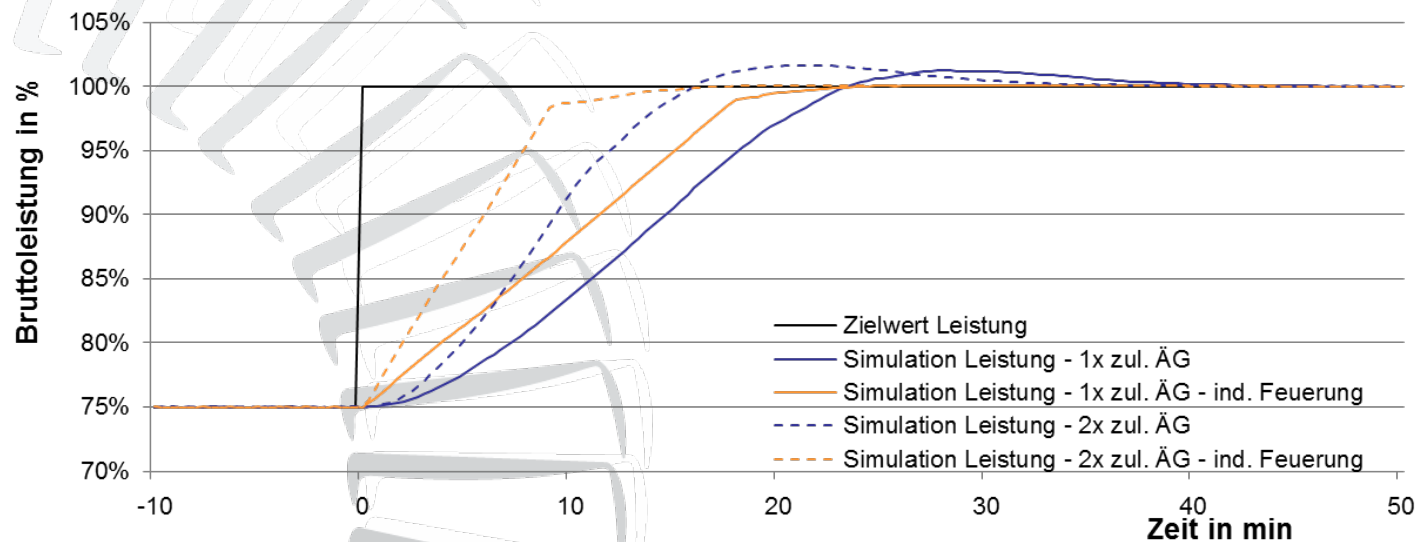
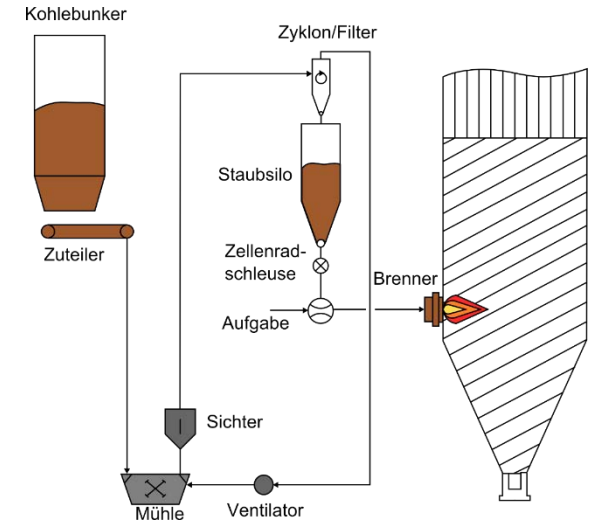
# Weitere Simulationsstudien

## ■ 1-Mühlenbetrieb für Mindestlastabsenkung

- KW Voerde: Absenkung von derzeit 23 % auf 15 % möglich

## ■ Indirekte Feuerung

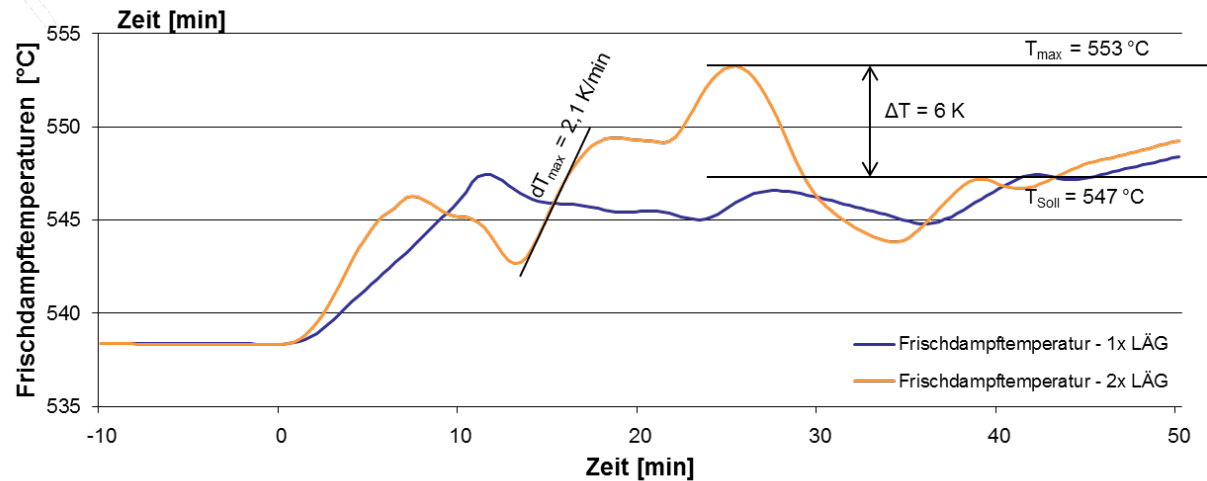
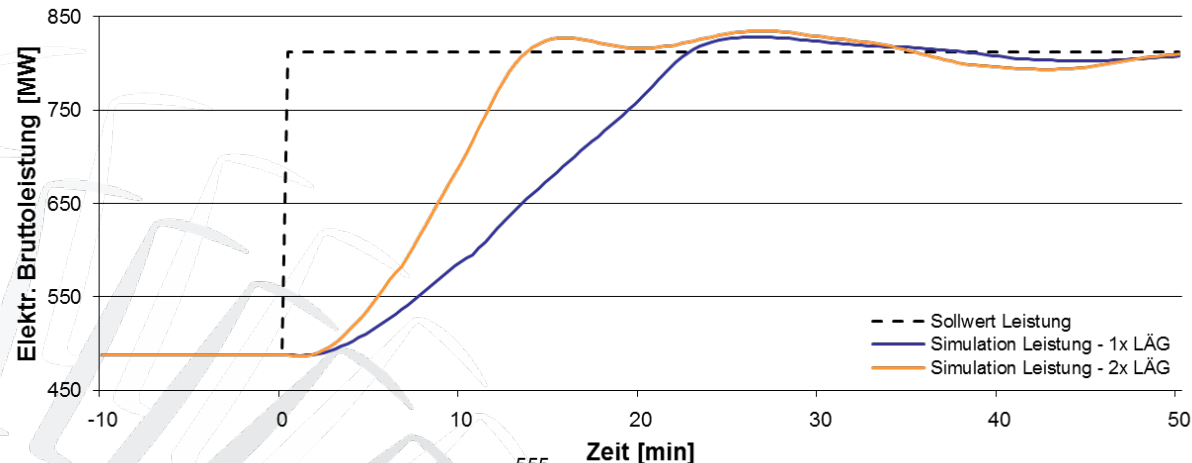
- Kohlemühlen sind limitierender Faktor für Dynamik
- Entkopplung über Staubzwichensilo möglich
- Laständerungsgeschwindigkeit kann dadurch um Faktor 2 erhöht werden





## ■ Modifikationen in der Blockregelung

- Limitierend sind dickwandige Bauteile
- Laständerungsgeschwindigkeit wird erhöht (z.B. durch Austausch gegen andere Werkstoffe)



# Zusammenfassung und Übertragbarkeit auf Neubaukonzepte

## Grundsätzlich

- Es stehen diverse Optionen zur Flexibilisierung kohlegefeuerter Kraftwerke zur Verfügung, die eine weitere Integration fluktuierender Erneuerbarer Energien ermöglichen
- Flexibilitätsoptionen können bei Neubaukonzepten bereits während der Auslegung berücksichtigt werden, wodurch die Effekte auf die Flexibilisierung im Allgemeinen größer sein können, als bei Retrofit-Maßnahmen

## Thermische Energiespeicher

- Je nach Konzept und Integrationspunkt unterschiedliche Effekte und betriebliche Grenzen / begrenzende Komponenten
- Diese können bereits in der Auslegung berücksichtigt werden
- Größere Speicherleistungen und demnach Effekte zu erwarten
- Erleichterungen bezüglich Standortplanung / Platzplanung / Platzbedarf

# Zusammenfassung und Übertragbarkeit auf Neubaukonzepte

## 1-Mühlenbetrieb

- Kann bereits während der Auslegung berücksichtigt werden
- Sofern 1-Mühlenbetrieb nicht zulässig, könnte auch eine höhere Anzahl an kleineren Mühlen in der Auslegung angestrebt werden

## (Partielle) indirekte Feuerung

- Aufgrund umfangreicher Anpassungen im Feuerungssystem und in der Leittechnik insbesondere eine Alternative für Neubauprojekte

## Anpassungen in Regelungsstrukturen

- Maßnahmen, die insbesondere für Retrofits/Bestandsanlagen relevant sind
- Vergleichsweise geringe Investitionskosten / Umsetzungskosten, da keine aufwändigen Umbaumaßnahmen erforderlich sind
- Angepasste / Moderne Regelungskonzepte auch für Neubauprojekte empfehlenswert

- **Erweiterung der dynamischen Simulationsmodelle**
    - (Primär-) Regelenergie
    - Anfahrvorgänge
  
  - **Bewertung der Integration thermischer Energiespeicher hinsichtlich Mehrfachnutzen**
    - Mindestlastabsenkung
    - Erhöhung der Laständerungsgeschwindigkeit
    - Bereitstellung von Regelenergie
    - Verbesserung von An- und Abfahrvorgängen
- **Projekt FLEXI-TES als Nachfolgeprojekt von P-DKW angestrebt**
- **Weitere Untersuchungsschwerpunkte denkbar**
    - Erweiterung der dynamischen Simulationen hinsichtlich KWK
    - Erweiterung der dynamischen Simulationen hinsichtlich GuD
    - Sektorenkopplung (Energiewirtschaft – energieintensive Industrie)

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie



UNIVERSITÄT  
DUISBURG  
ESSEN

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

# Herzlichen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

Kontakt:

**Prof. Dr.-Ing. Klaus Görner**

Lehrstuhl für Umweltverfahrenstechnik und Anlagentechnik

Universität Duisburg-Essen

Leimkugelstraße 10 | 45141 Essen, Germany

Tel. +49 201/183-7511 | E-Mail: klaus.goerner@uni-due.de