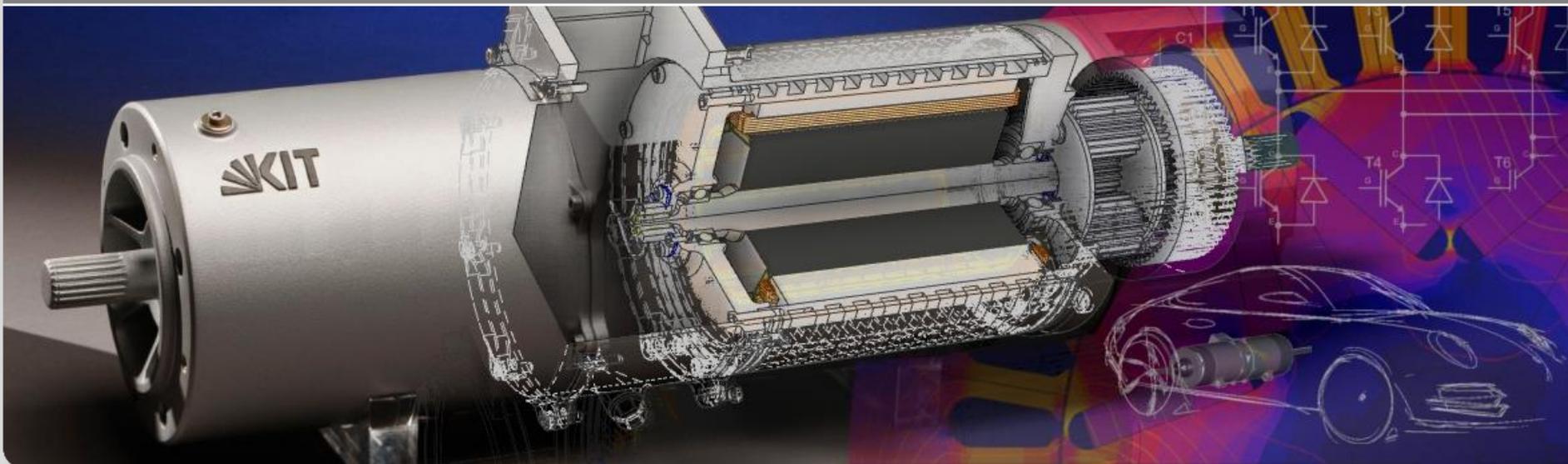
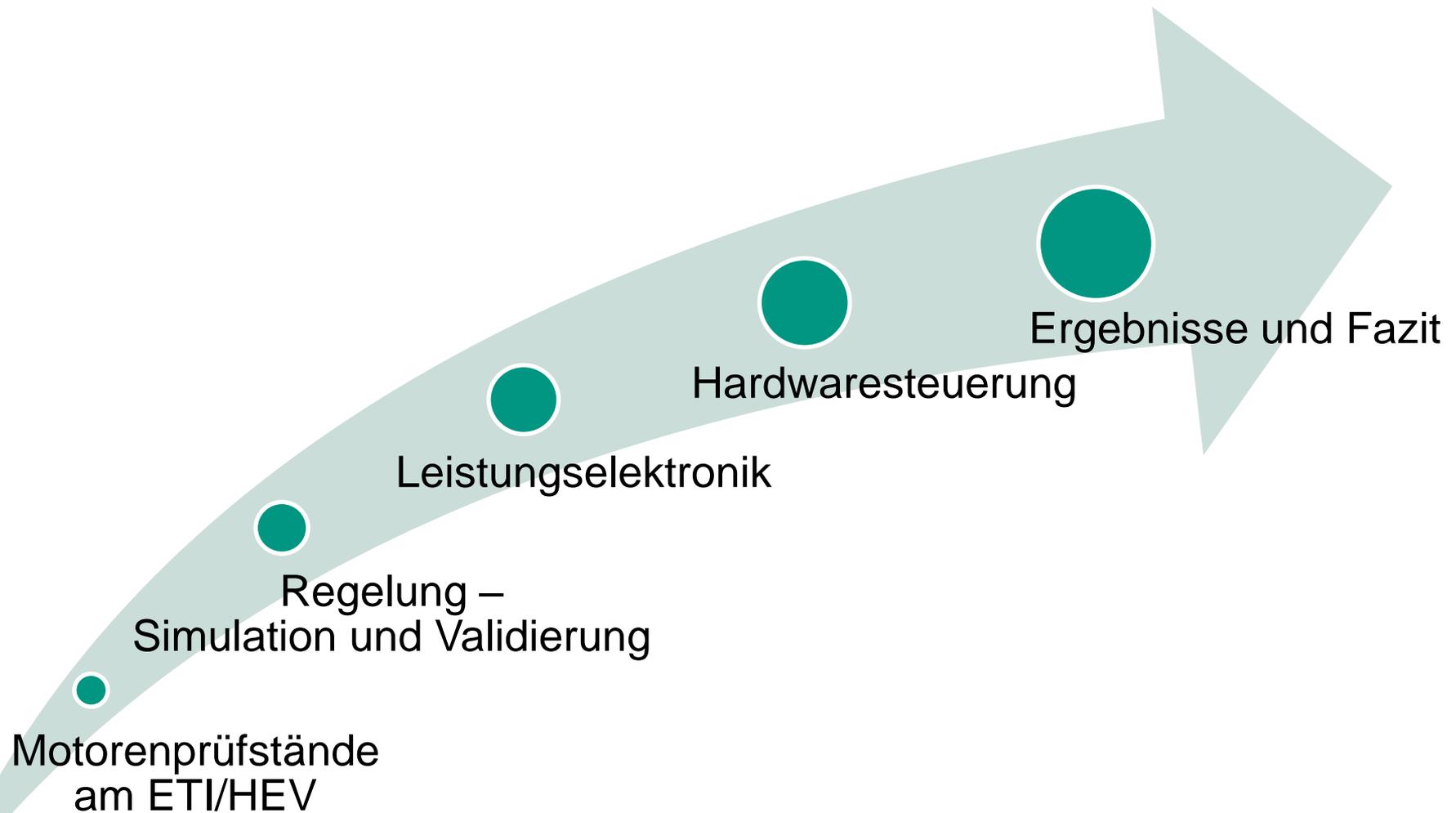


# Entwicklungsschritte beim Aufbau eines kompletten Motorenprüfstands

Christian Klöffler, David Horsch, Marc Veigel, Martin Doppelbauer

Elektrotechnisches Institut (ETI) - Hybridelektrische Fahrzeuge





# Motorenprüfstände am Elektrotechnischen Institut (ETI)

- Leitung: Prof. Dr.-Ing. Michael Braun
- Forschungsschwerpunkt:
  - Leistungselektronik
  - Regelung elektrischer Maschinen
  
- Professur für Hybridelektrische Fahrzeuge (HEV)
  - Leitung: Prof. Dr.-Ing. Martin Doppelbauer
  - elektromagnetische und mechanische Auslegung elektrischer Maschinen
  - gesamtheitliche Betrachtung und Optimierung des elektrischen Antriebsstranges

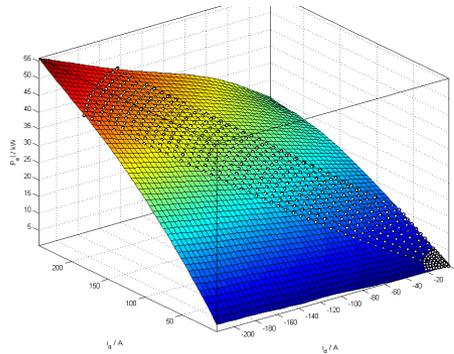


# Motorenprüfstände am Elektrotechnischen Institut (ETI)

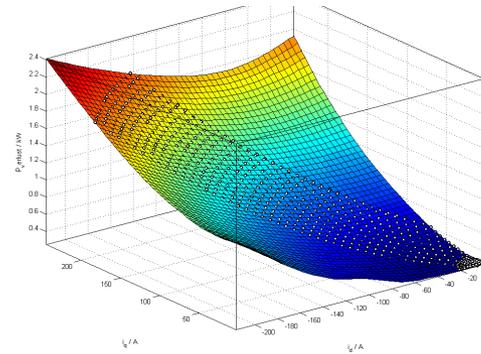
- Charakterisierung und Vermessung von elektrischen Traktionsmotoren

Messgrößen

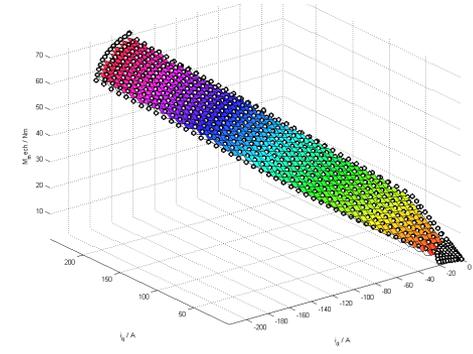
Elektrische Leistung



Maschinenverluste

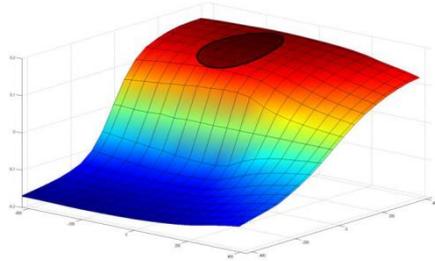


Drehmoment

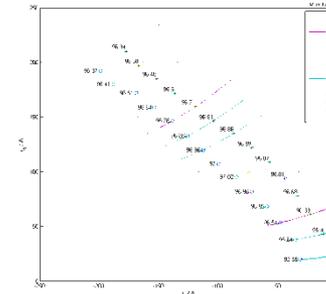


Abgeleitete Erkenntnisse

Ableitung nicht-linearer Regelparameter

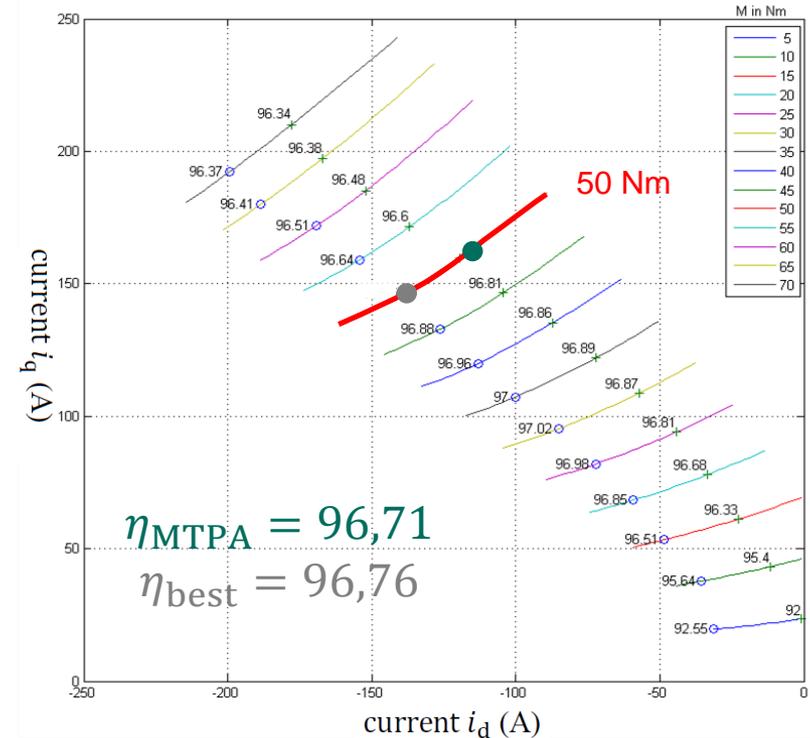
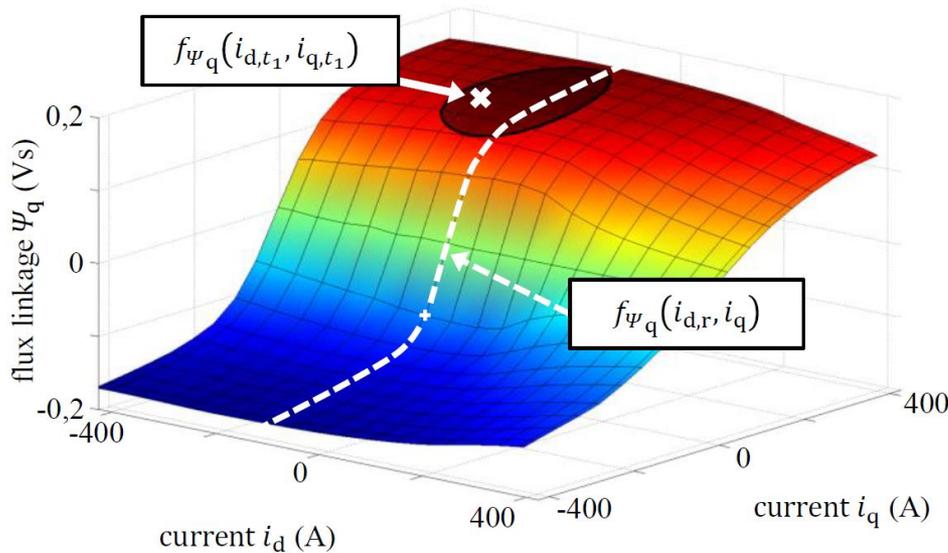


Wirkungsgradoptimale Betriebsstrategien



# Motorenprüfstände am Elektrotechnischen Institut (ETI)

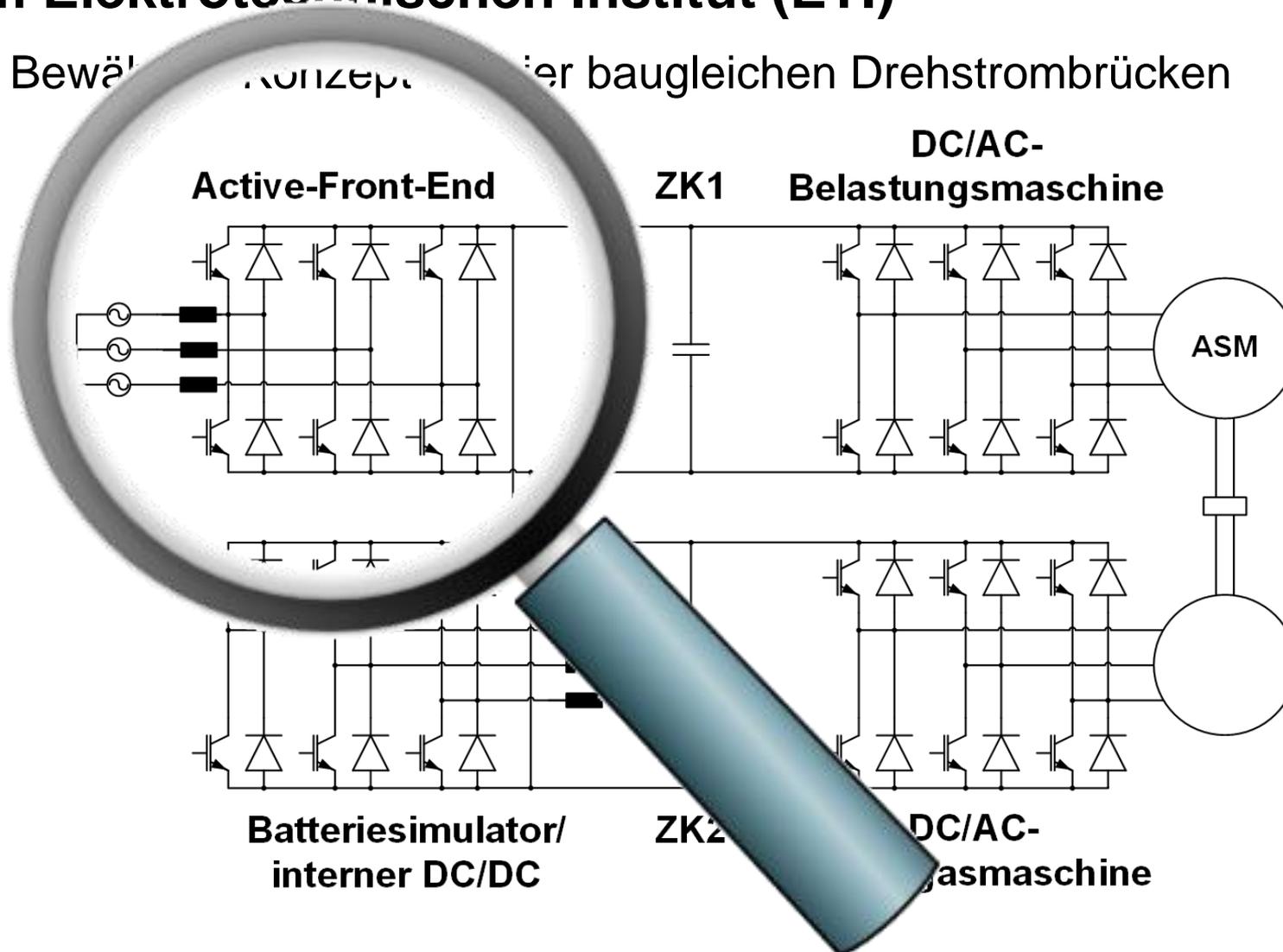
- Ableitung nichtlinearer Reglerparameter
  - Regler z.B. mit Flusskennfeldern statt konstanten Induktivitäten
- Wirkungsgradoptimale Betriebsstrategien
  - u.a. Berücksichtigung von Eisenverlusten gegenüber MTPA-Verfahren



Quelle: J. Richter, T. Gemaßmer, *Predictive Current Control of Saturated Cross-Coupled Permanent Magnet Synchronous Machines*

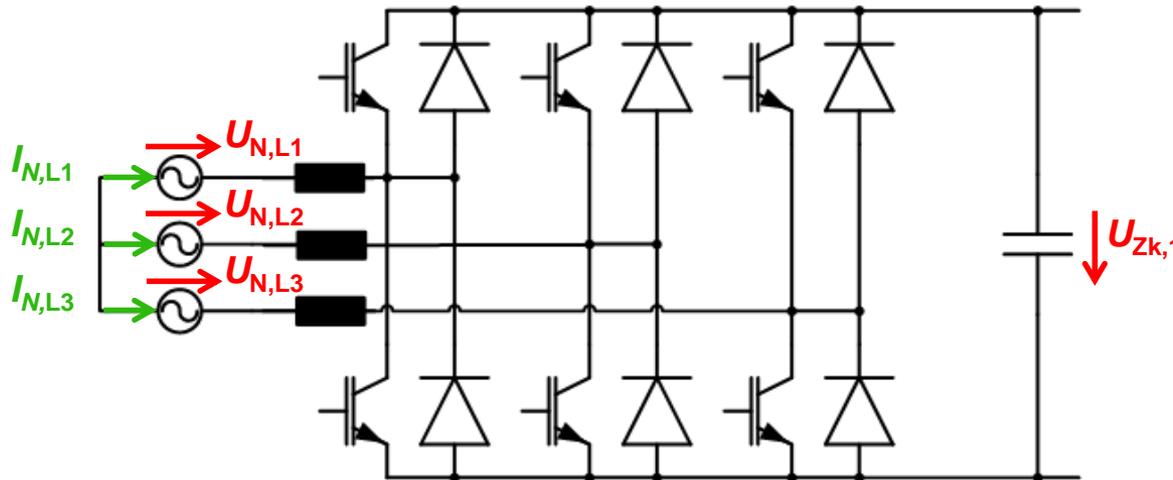
# Motorenprüfstände am Elektrotechnischen Institut (ETI)

- Bewährtes Konzept für baugleichen Drehstrombrücken



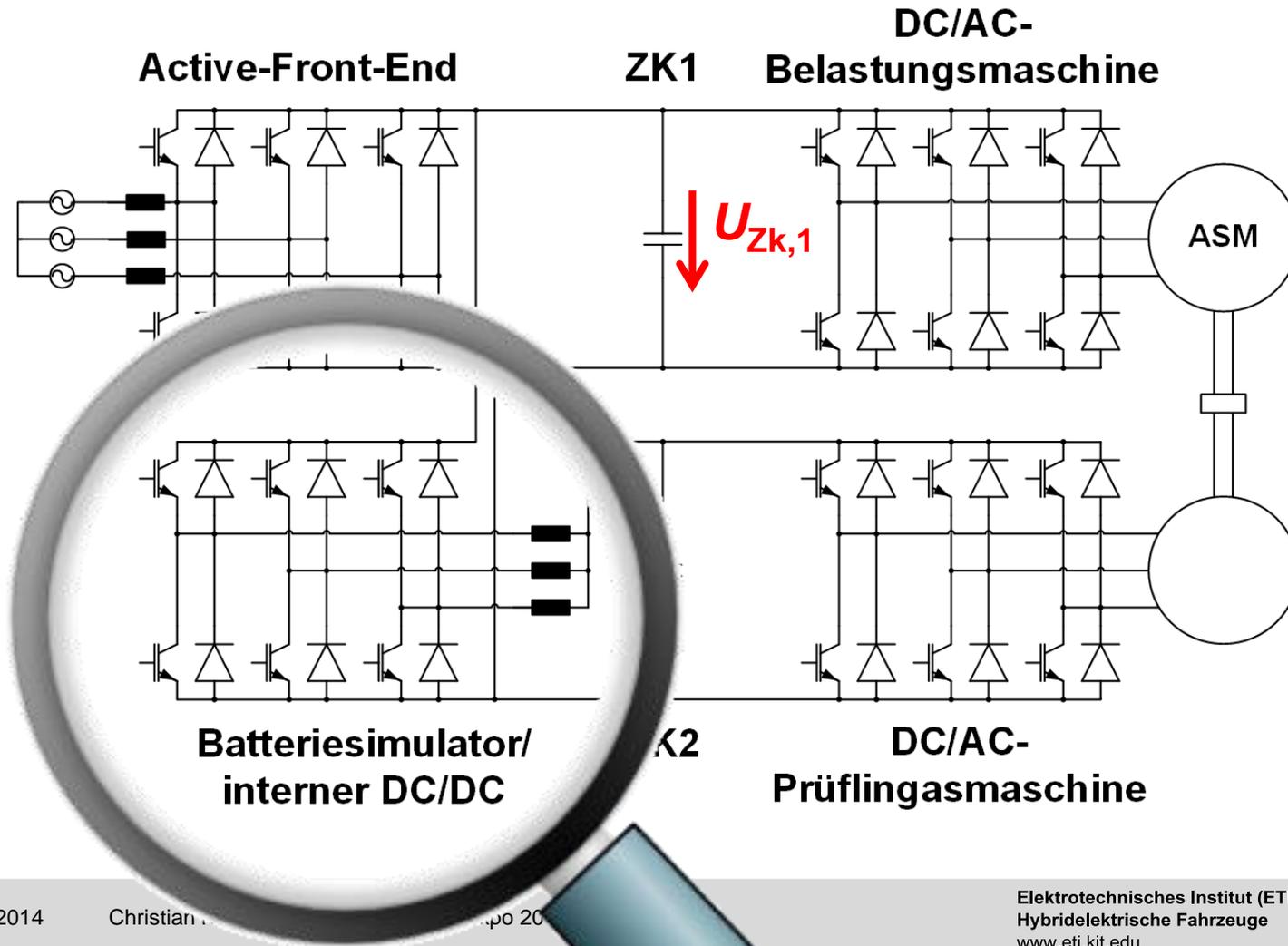
# Motorenprüfstände am Elektrotechnischen Institut (ETI)

- Active-Front-End
  - aktive Gleichrichtung der Netzspannung und Rückspeisefähigkeit
  - blindstromarme Leistungsaufnahme
  - variable Spannung im Zwischenkreis 1 (565 bis 900 V)



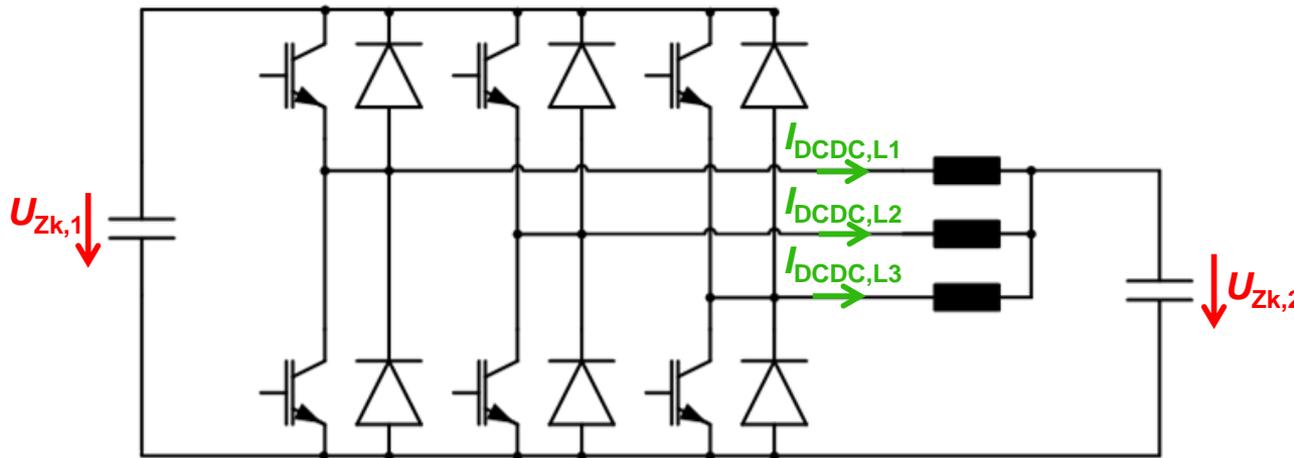
# Motorenprüfstände am Elektrotechnischen Institut (ETI)

- Bewährtes Konzept mit vier baugleichen Drehstrombrücken



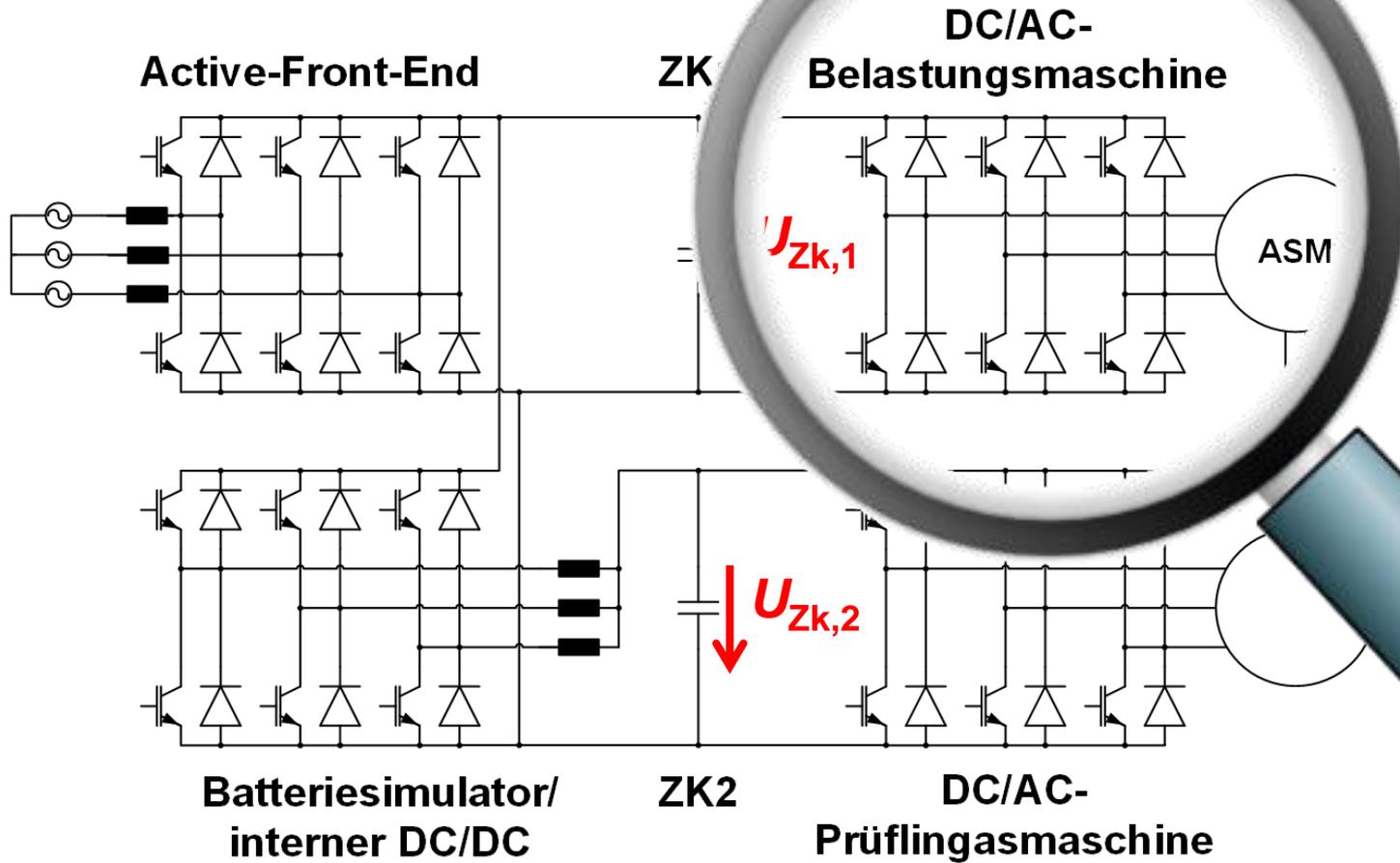
# Motorenprüfstände am Elektrotechnischen Institut (ETI)

- DC/DC-Wandler
  - variables Level der Zwischenkreisspannung  
je nach Prüflingsmotor im Zwischenkreis 2 (100 bis 900 V)
  - Batteriesimulation (z.B. Entladekurve über Fahrzyklus)



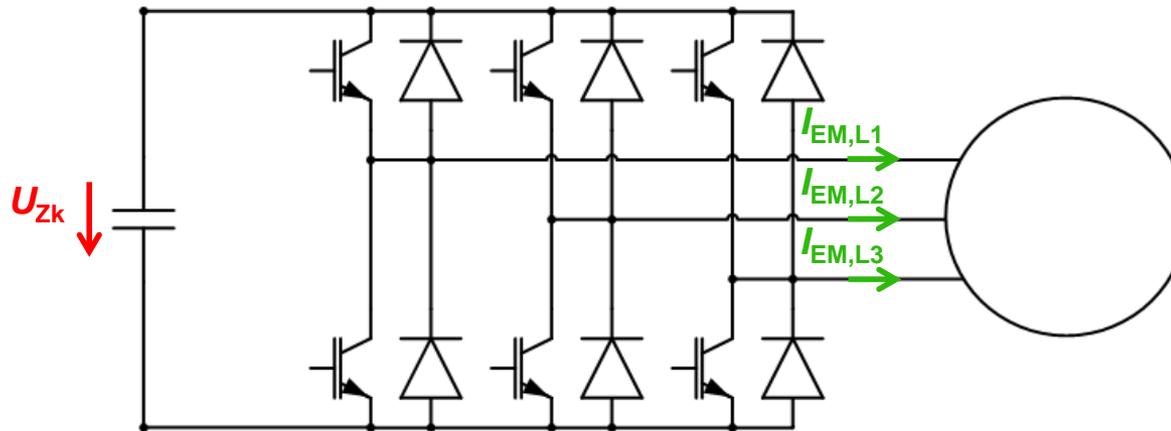
# Motorenprüfstände am Elektrotechnischen Institut (ETI)

- Bewährtes Konzept mit vier baugleichen Leistungselektronik-Modulen



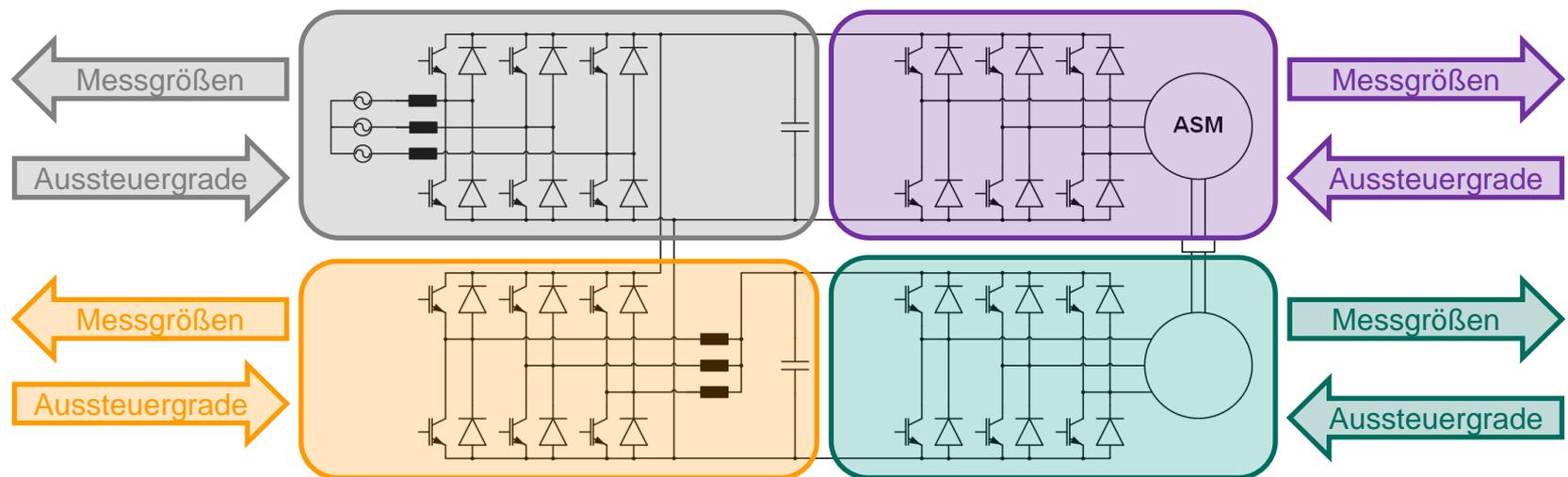
# Motorenprüfstände am Elektrotechnischen Institut (ETI)

- Maschinenumrichter
  - Drehzahlregelung (meist bei Lastmaschine)
  - Drehmomentregelung (meist bei Prüflingsmaschine)
  - variable Regel- und Modulationsverfahren



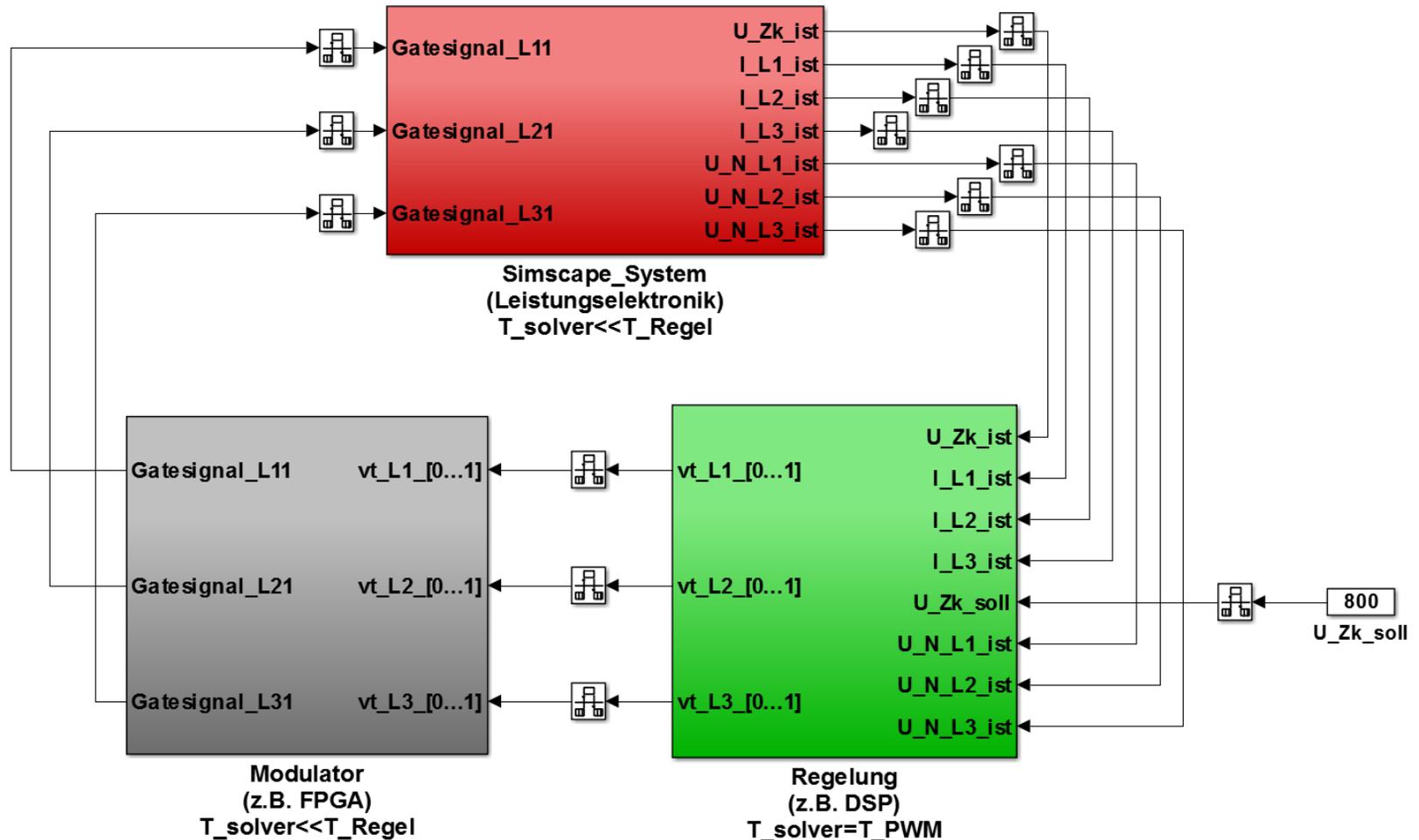
# Regelung – Simulation und Validierung

- jede Drehstrombrücke hat eine autonom ablaufende Regelung (ausreichende Entkopplung über Zwischenkreiskapazitäten)
- Regelungen laufen auf einem Echtzeitrechensystem
  - ETI-DSP-System (institutseigene Entwicklung)
  - dSpace-System (kommerzielle Industrielösung)



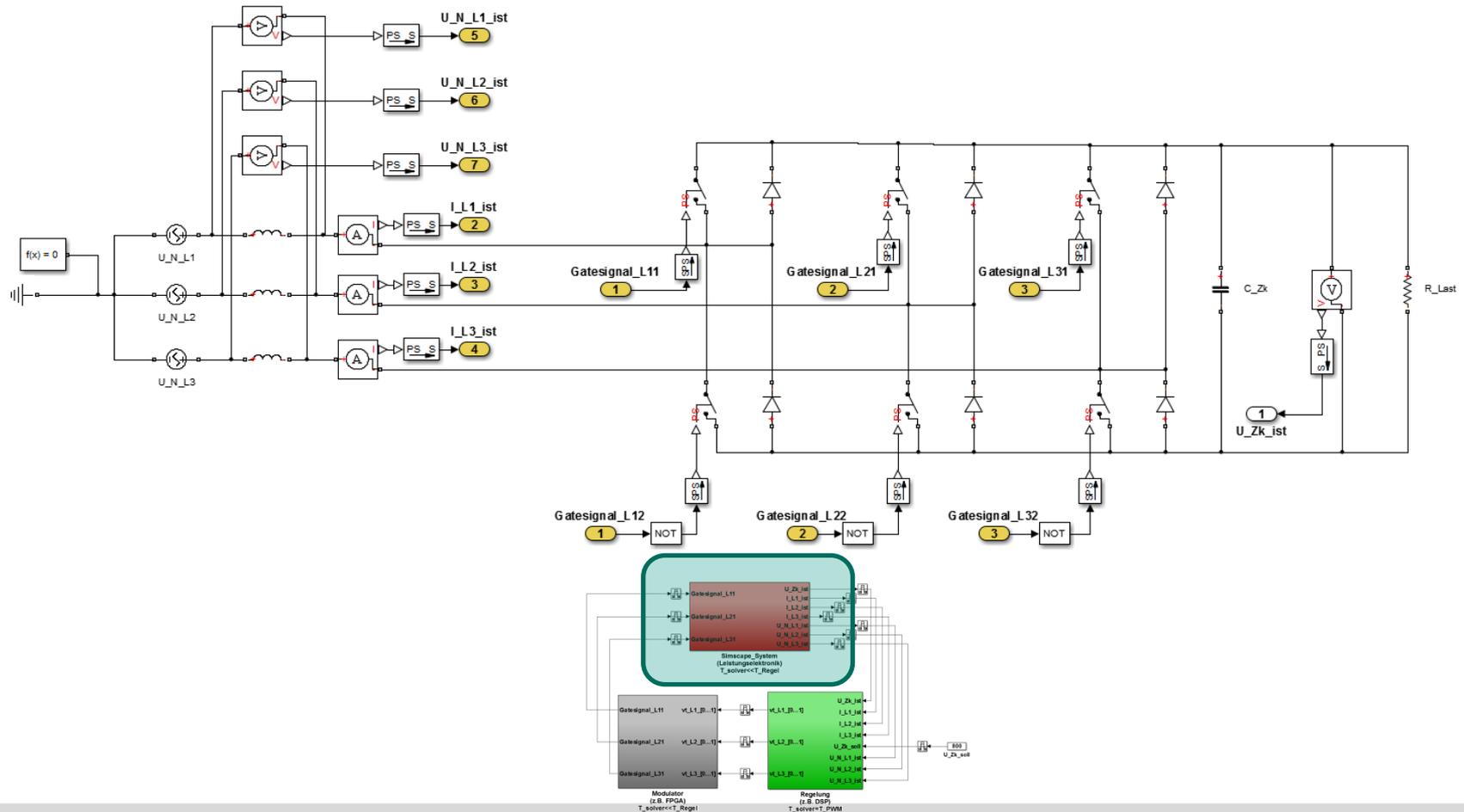
# Regelung – Simulation und Validierung

- Simulationsaufbau für jede Drehstrombrücke (hier z.B. AFE)



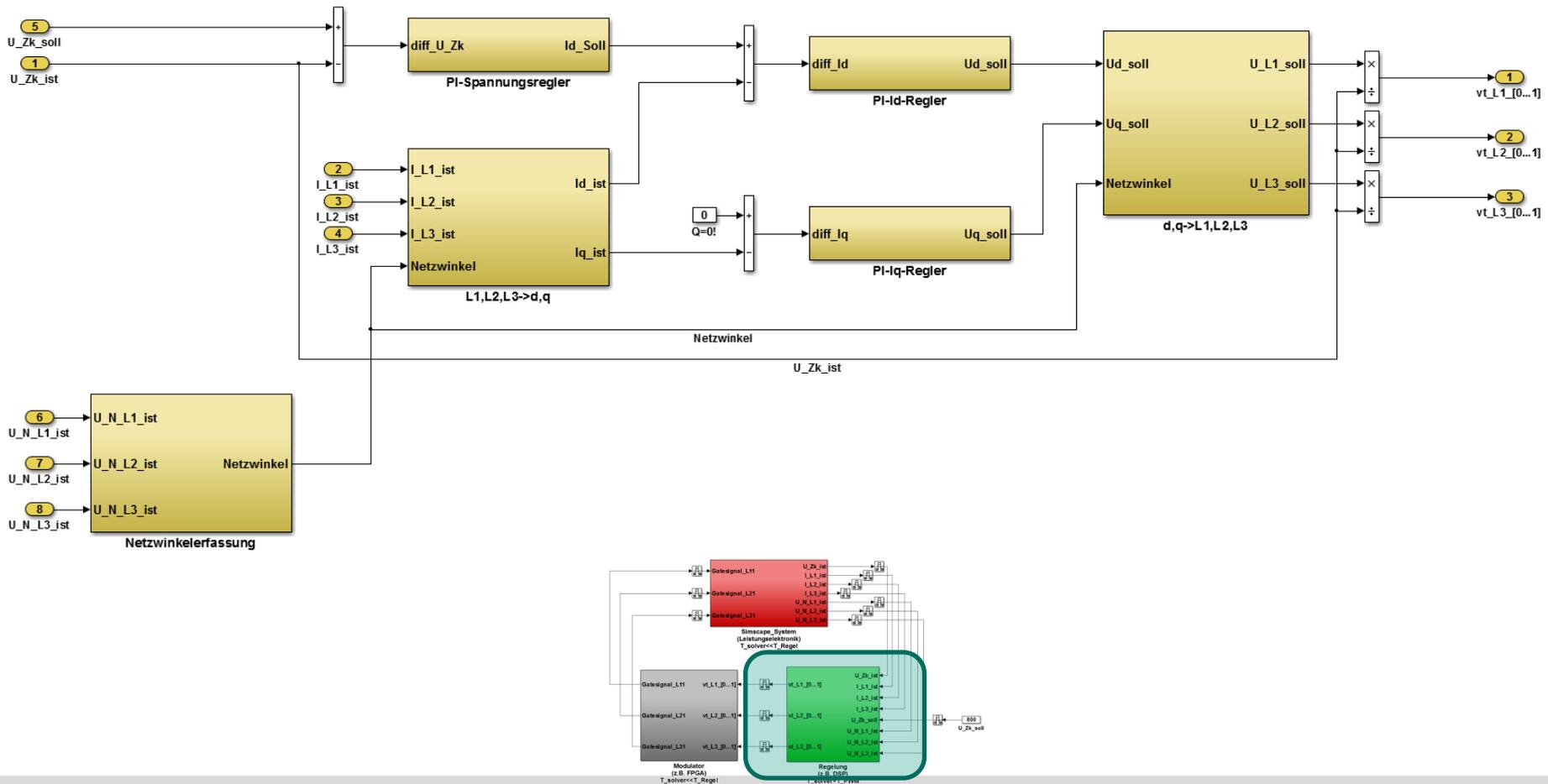
# Regelung – Simulation und Validierung

- Simscape-System ( $T_{\text{Solver}} \ll T_{\text{Regel}}$ )



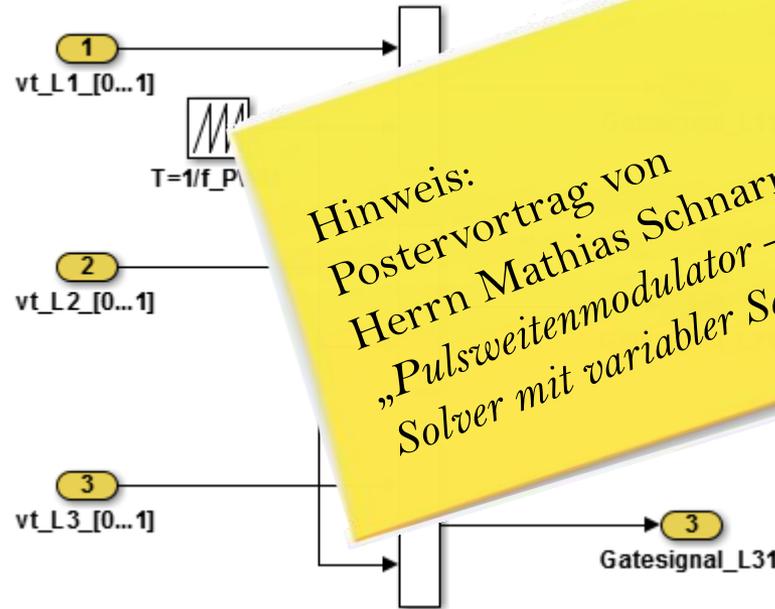
# Regelung – Simulation und Validierung

- Regelung ( $T_{\text{Solver}} = T_{\text{Regel}}, T_{\text{Regel}} = T_{\text{PWM}}$ )

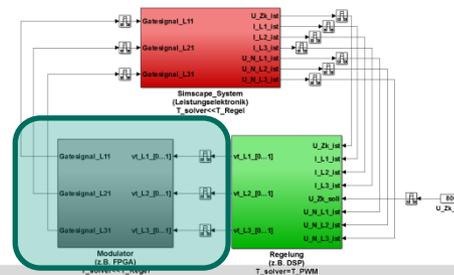


# Regelung – Simulation und Validierung

- Modulator ( $T_{\text{Solver}} \ll T_{\text{Regel}}$ )

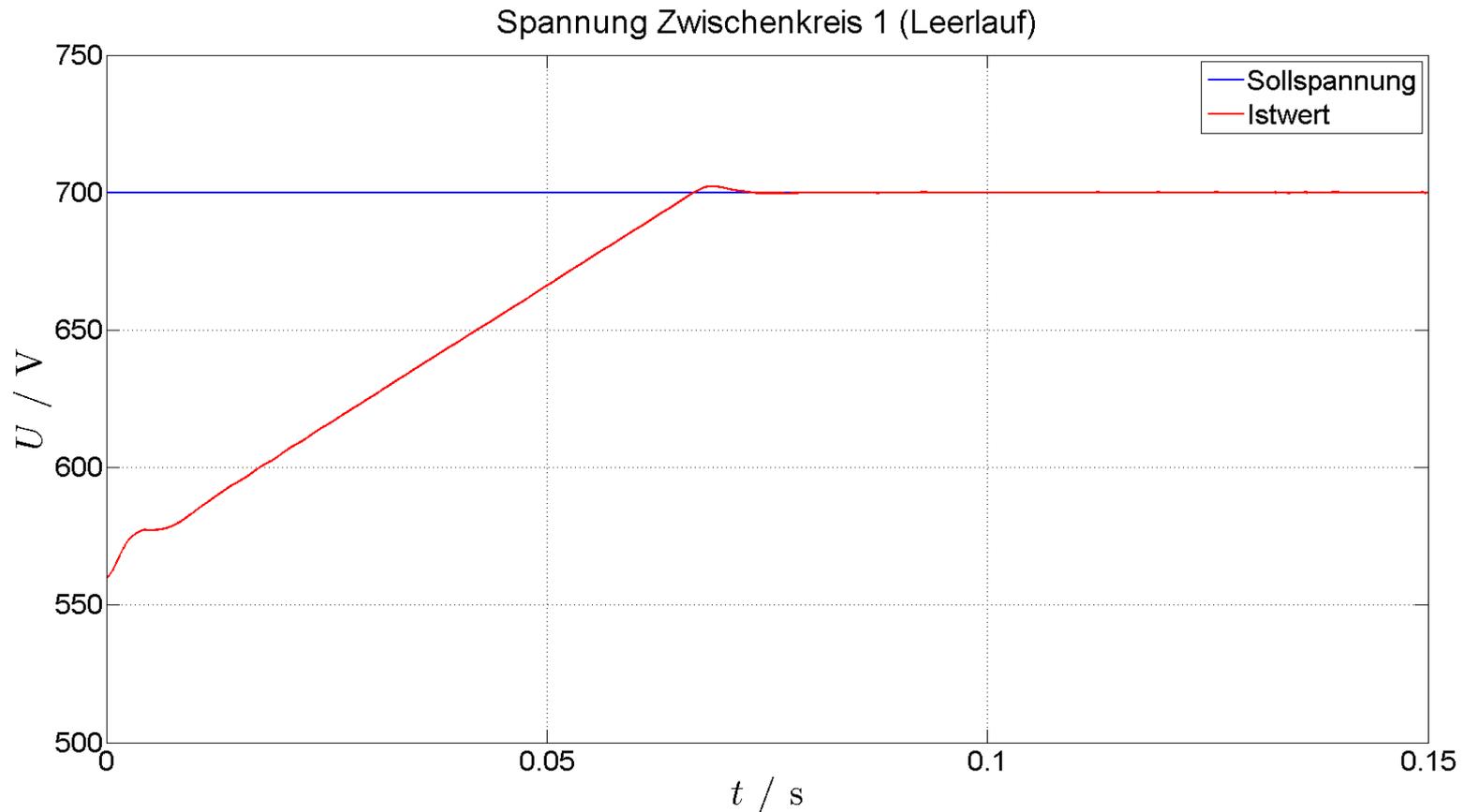


Hinweis:  
Postervortrag von  
Herrn Mathias Schnarrenberger  
„Pulsweitenmodulator – Ein Design für  
Solver mit variabler Schrittweite“



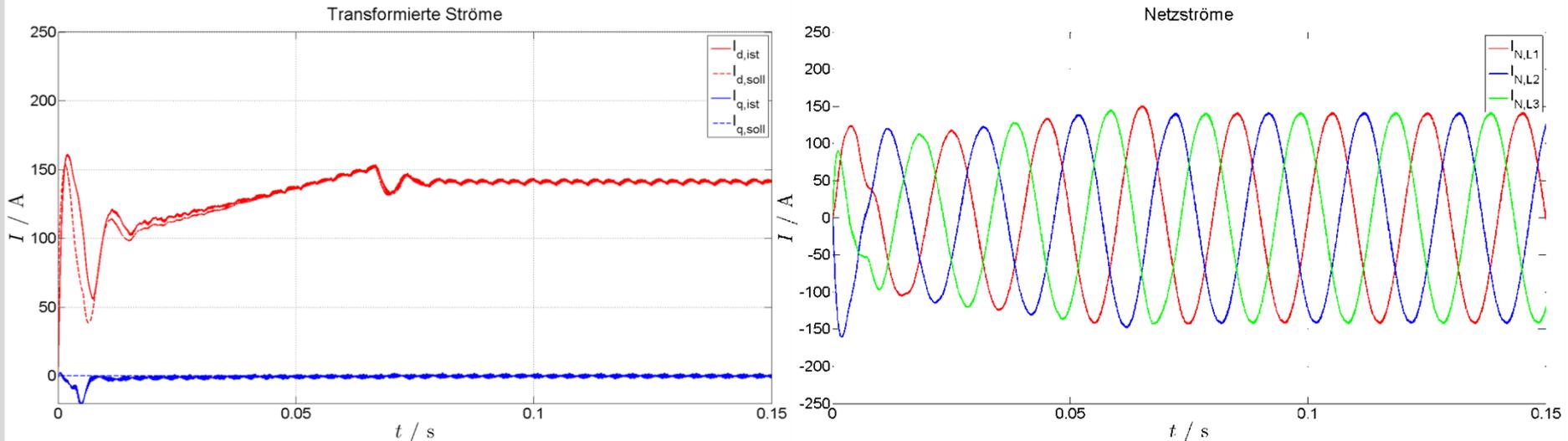
# Regelung – Simulation und Validierung

- Simulationsergebnisse Active-Front-End (Leerlauf)



# Regelung – Simulation und Validierung

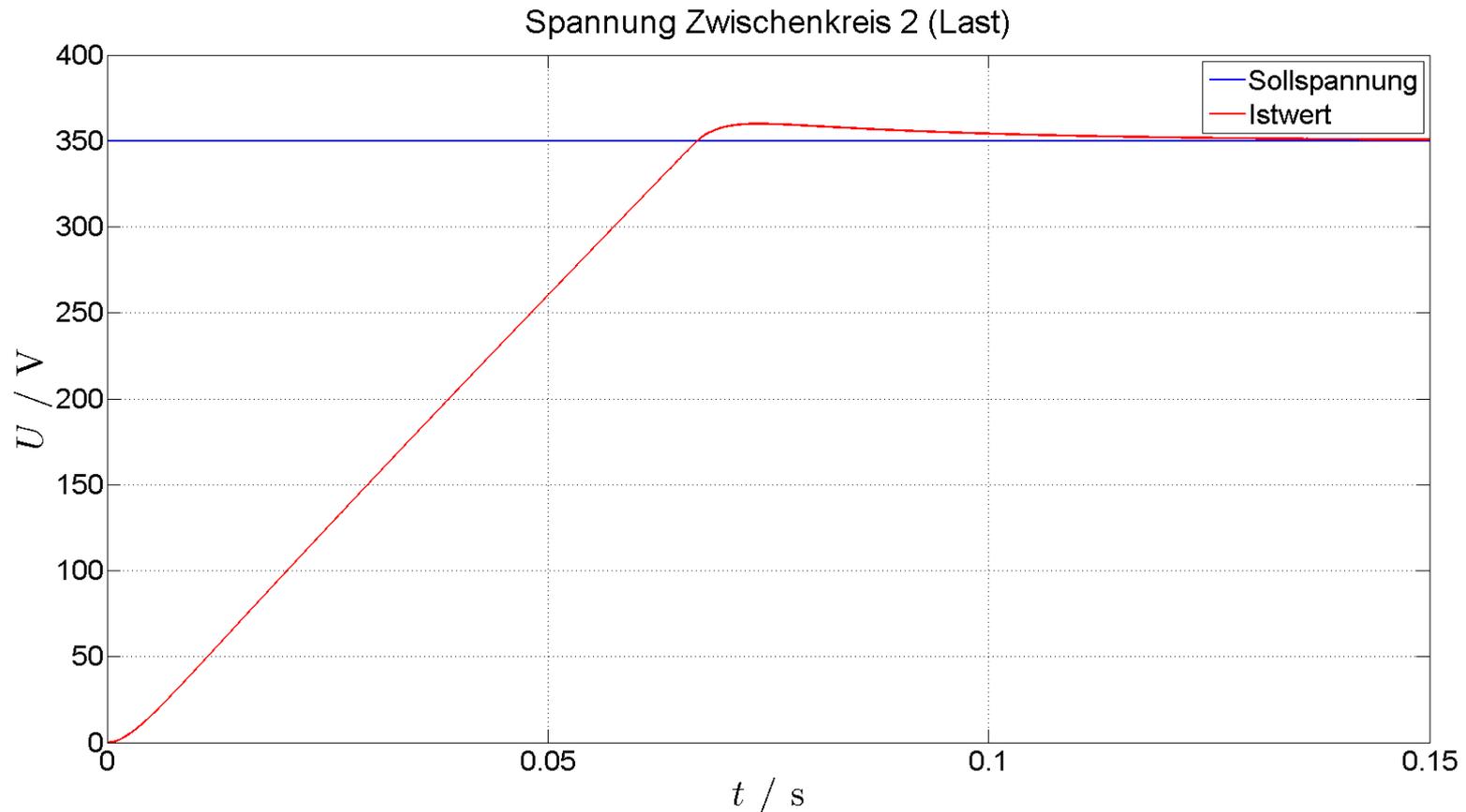
- Simulationsergebnisse Active-Front-End (unter Last, ca. 75 kW)



- Regelung ist schnell und stationär genau
- keine ungewünschte Blindleistungseinspeisung in das Netz
- überschwingungsarme Netzströme

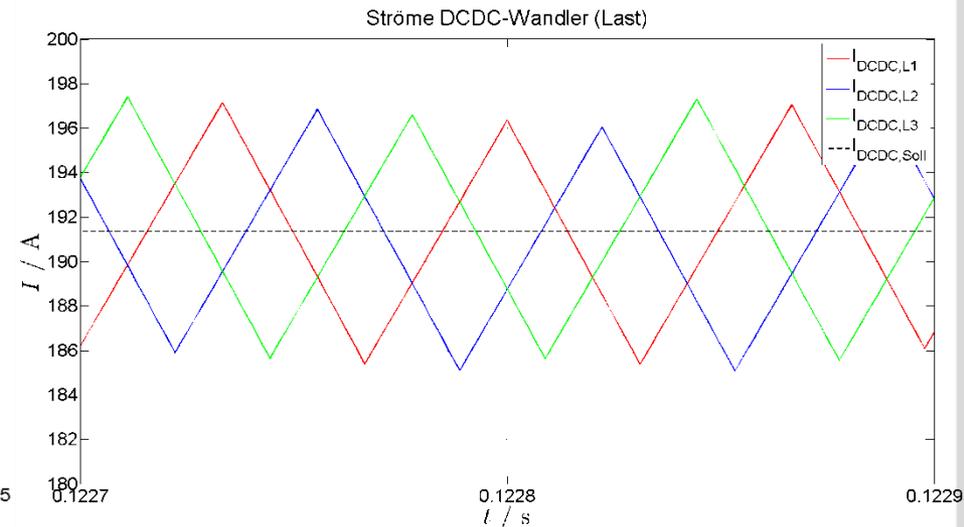
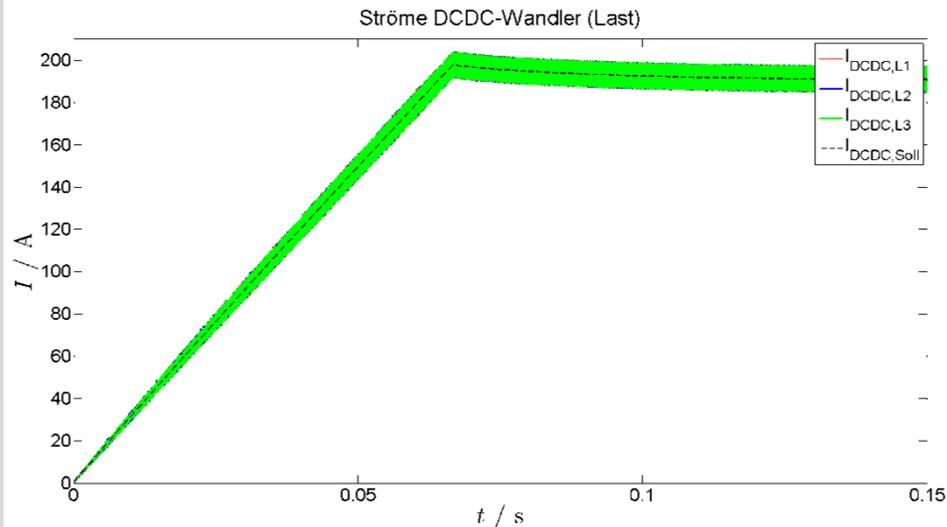
# Regelung – Simulation und Validierung

- Simulationsergebnisse DC/DC-Wandler  
(unter Last, ca. 200 kW)



# Regelung – Simulation und Validierung

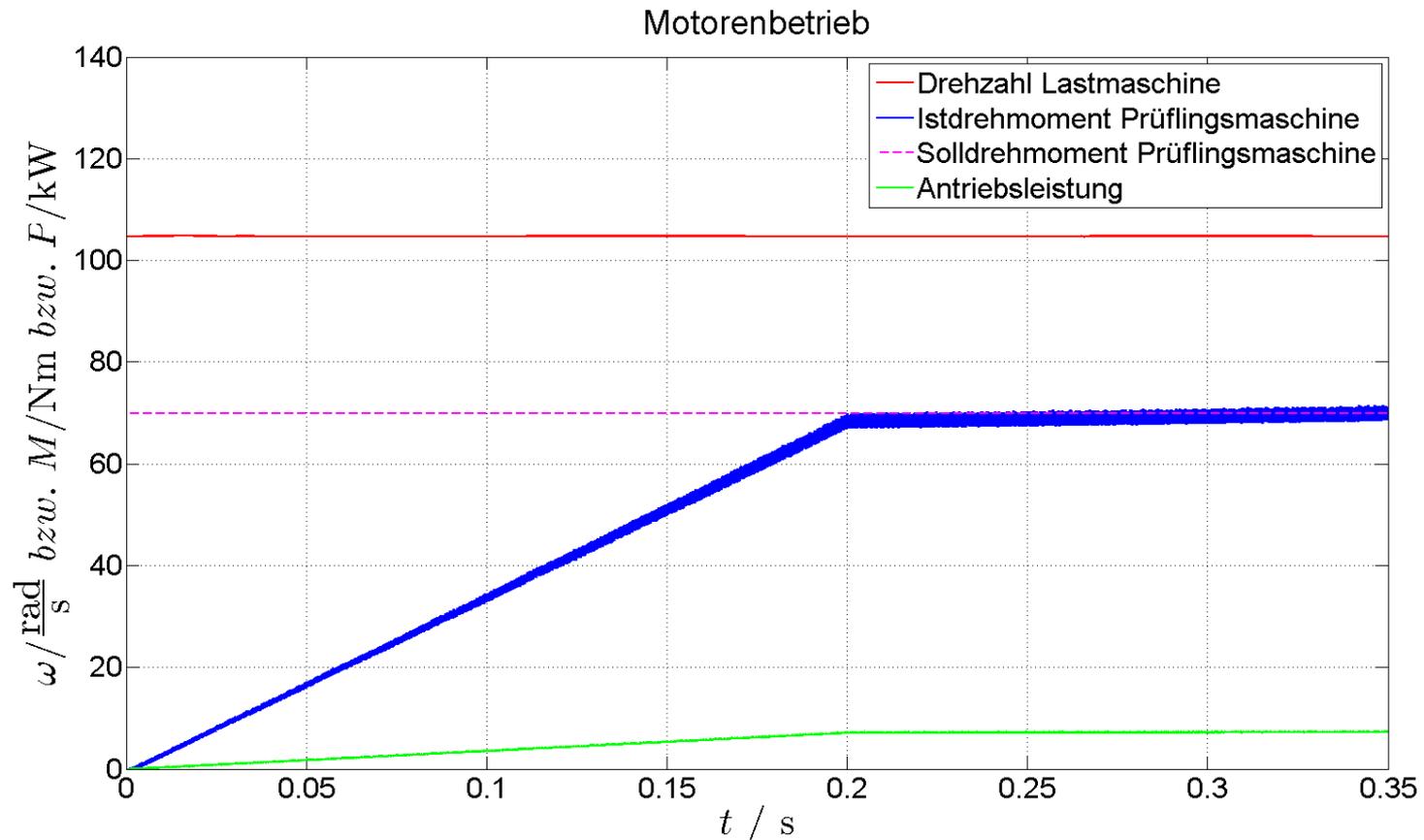
- Simulationsergebnisse DC/DC-Wandler (unter Last, ca. 200 kW)



- Regelung des Strommittelwertes
- Regelung ist schnell und stationär genau
- phasenversetzte Ansteuerung führt zu kleinem Spannungsripple

# Regelung – Simulation und Validierung

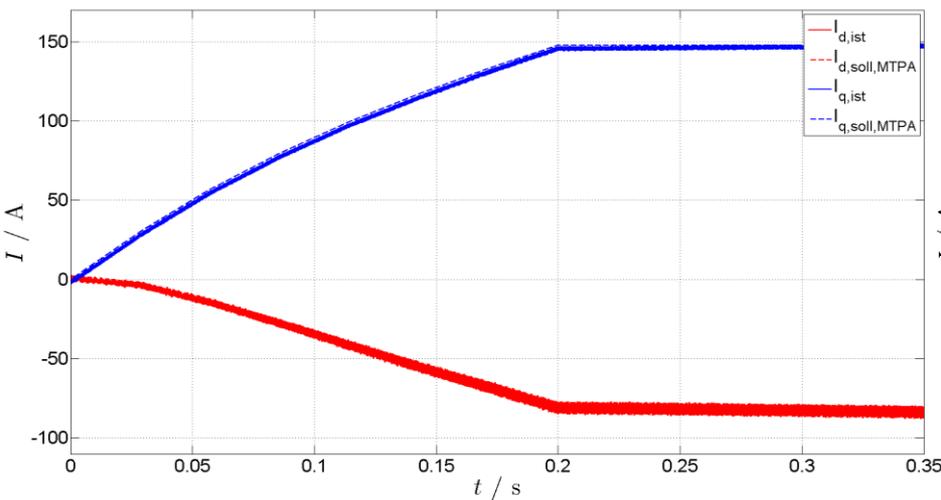
- Simulationsergebnisse Prüflingsumrichter  
( $n_{LM,soll} = 1000$  1/min,  $M_{PM,soll} = 75$  Nm)



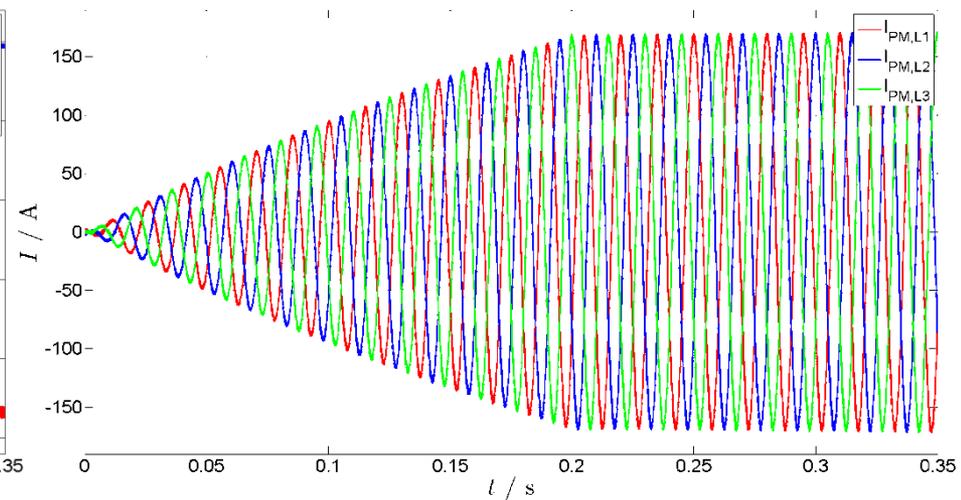
# Regelung – Simulation und Validierung

- Simulationsergebnisse Prüflingsumrichter  
( $n_{LM,soll} = 1000$  1/min,  $M_{PM,soll} = 75$  Nm)

Transformierte Ströme



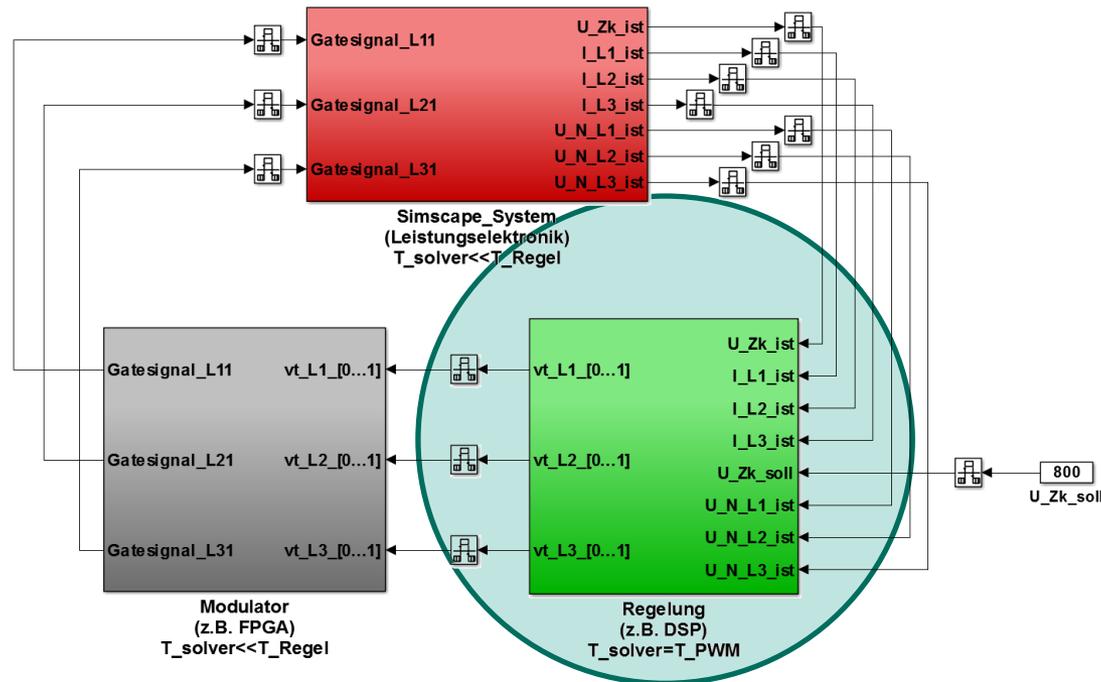
Ströme Prüfmaschine



- Stromvorgabe sowohl über MTPA als auch über FEM-Tabellen erfolgreich getestet

# Regelung – Simulation und Validierung

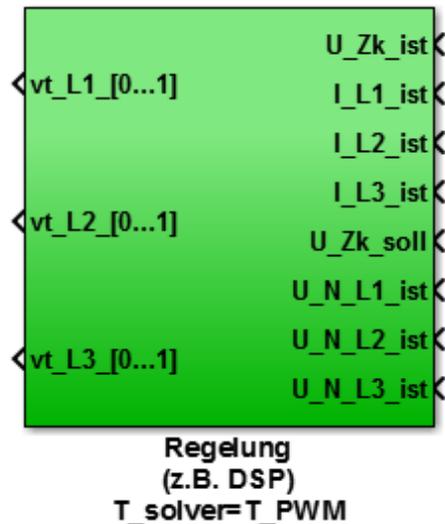
- getesteter Regelungsblock kann komplett zur Codegenerierung herangezogen werden



- lediglich die systemspezifischen Blöcke zum Einlesen und Ausgeben von Werten (Mess- und Steuergrößen) müssen eingefügt werden

# Regelung – Simulation und Validierung

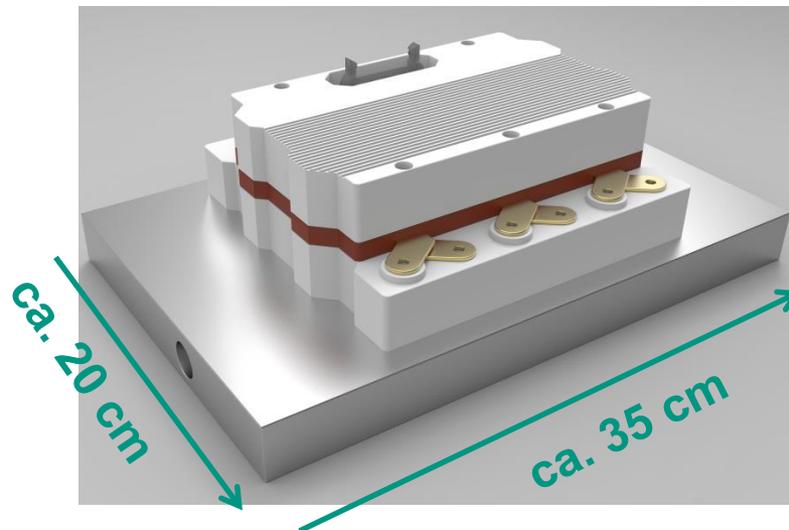
- Generierung eines platformsspezifischen C-Codes aus dem getesteten Simulinkmodell



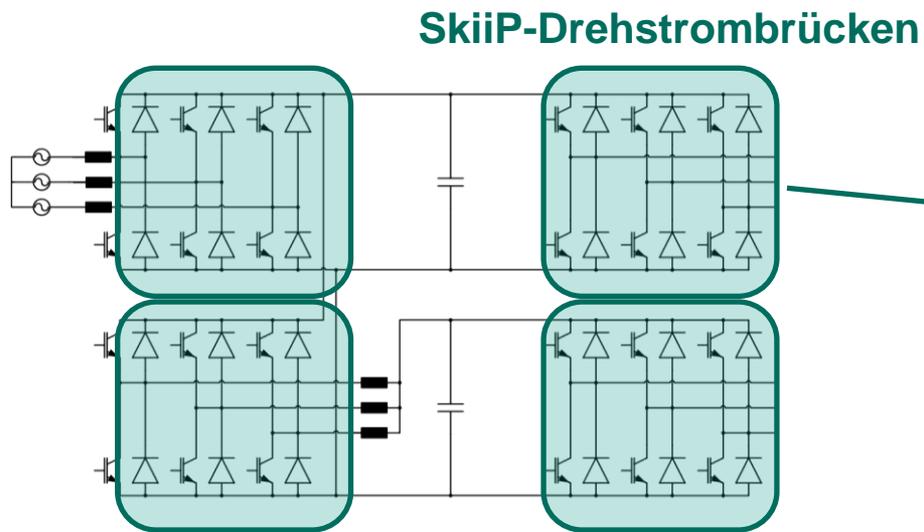
- Rechenzeit ausreichend um bei  $f = 15$  kHz jede Periode die neuen Sollwerte zu berechnen
- beide Varianten erfolgreich getestet

[1] [www.dspace.com](http://www.dspace.com)

- Anforderungen
  - große Stromstärken
  - möglichst kompakter Aufbau
- wassergekühlte Elektronik
  - Drehstrombrücken von Semikron

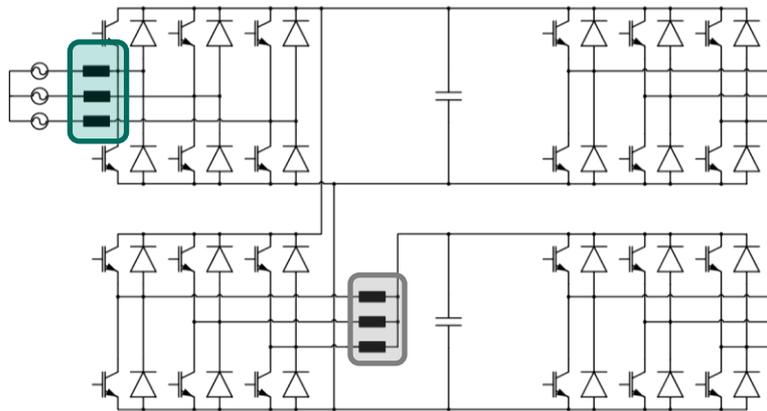


- CAD-Planung des Aufbaus



- CAD-Planung des Aufbaus

dSPACE

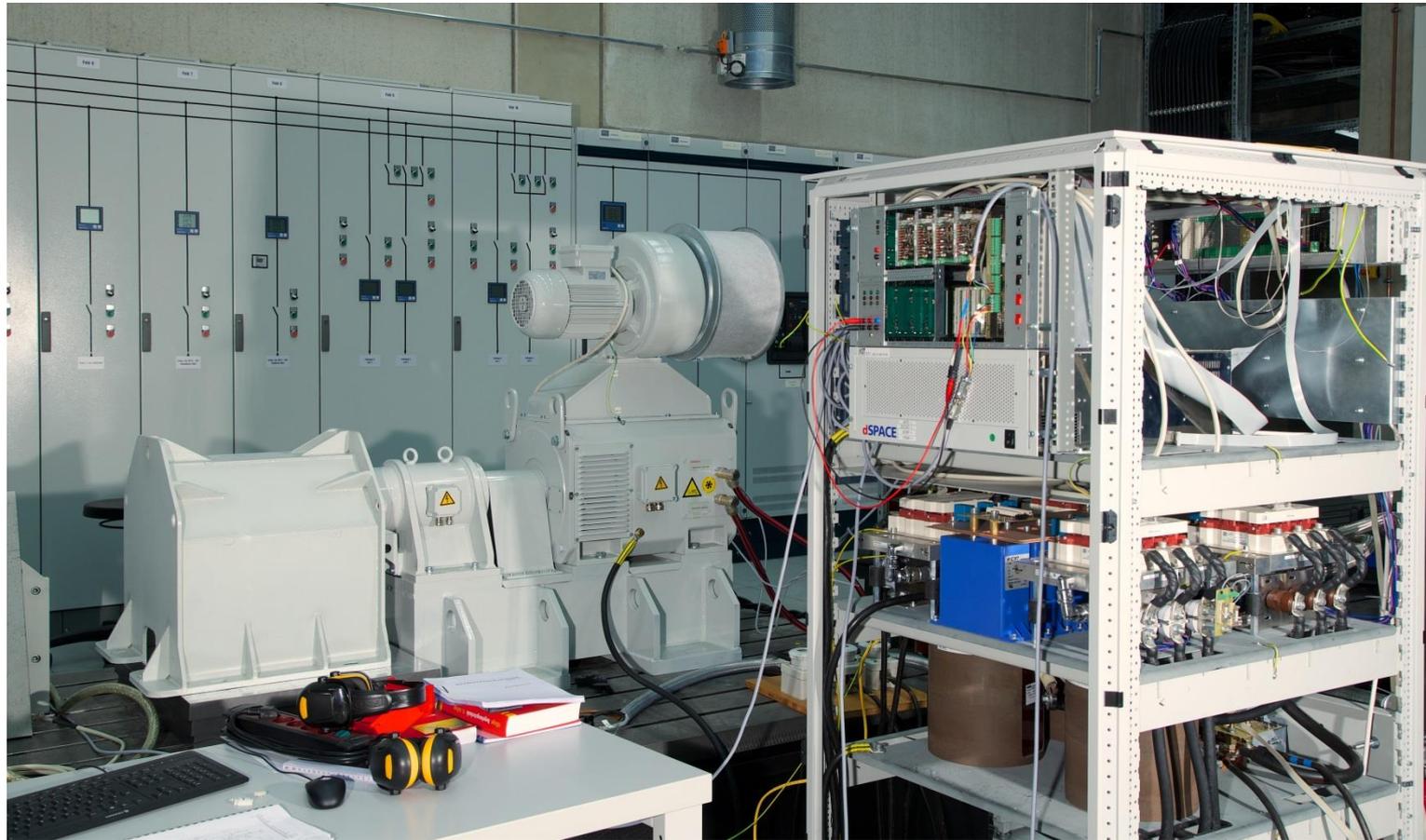


DC/DC-Drossel

AFE-Drehstromdrossel



## ■ Fertiger Aufbau





**Hilfsbetriebe**

**Schütze**

**Pulsfreigabe**

**Fehlercode**

0 - Kein Fehler

**Sollwerte**

**Ablaufsteuerung**

Zustand: 9 - Lastmaschine in Betrieb

DCDC\_2\_Bereit

**Pulsfreigaben SOLL**

AFE, DCDC 1, DCDC 2, LM, PM

**Active Front End**

Sollwertvorgabe: u\_ZK\_1 [V] = 750

**Batteriesimulator**

Sollwertvorgabe: u\_ZK\_2 [V] = 350

Batteriekennlinie: Batteriekapazität 5.5 Ah, SOC 100.0 %

Reset SOC

**DCDC 2**

Sollwertvorgabe: u\_ZK\_3 [V], Freq\_DCDC2, n\_Phase\_DCDC2

Sollwerte im DSP: V, Hz

Istwert: Mess\_U\_ZK\_3In1 = V

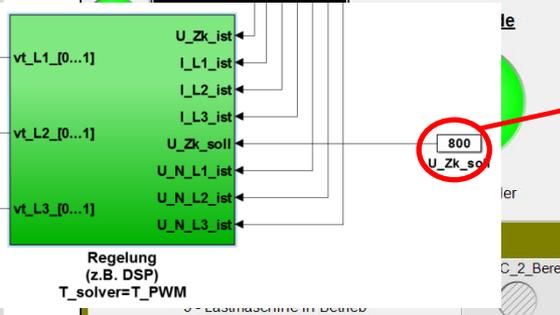
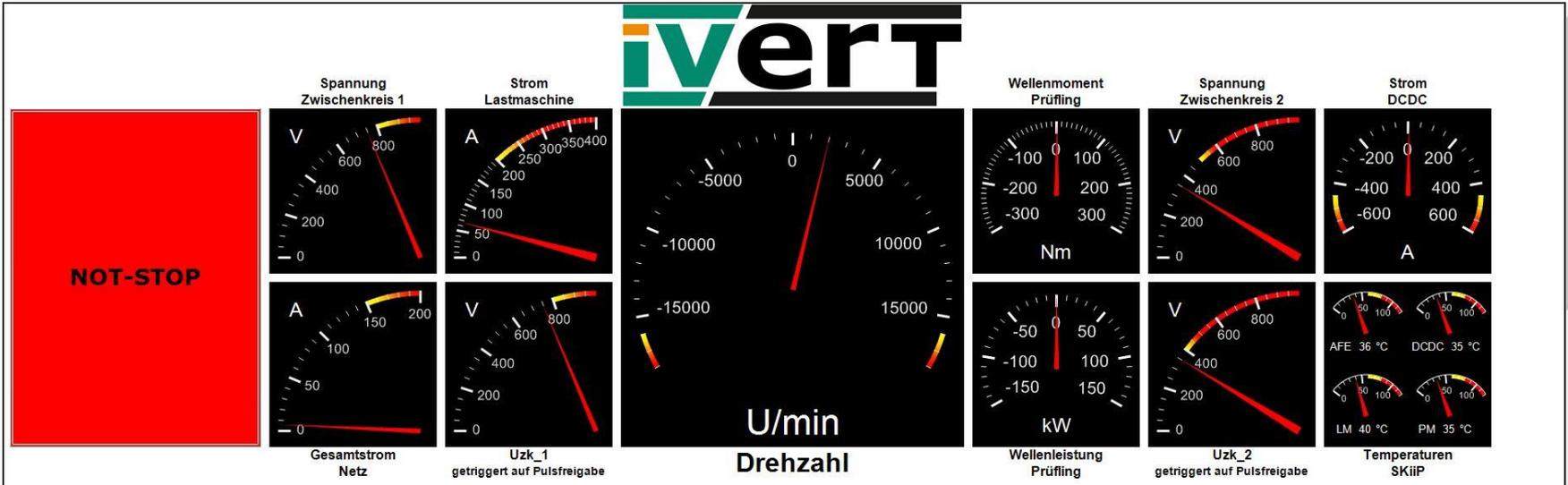
Fehler: Stromfehler Stop, Kommunikation

**Lastmaschine**

Sollwertvorgabe: Drehzahl\_ASM [1/min] = 2000, Flussfaktor = 0.5

**Prüflingsmaschine**

Sollwertvorgabe: M\_soll (+=Moton), Erregerstrom, id\_soll, iq\_soll



## Sollwerte

**Active Front End**

Sollwertvorgabe

u\_ZK\_1 [V]: 750

**Lastmaschine**

Sollwertvorgabe

Drehzahl\_ASM [1/min]: 2000 | Flussfaktor: 0.5

**Batteriesimulator**

Sollwertvorgabe

u\_ZK\_2 [V]: 350

Batteriekennlinie

Batteriekapazität: 5.5 Ah | SOC: 100.0 %

Reset SOC

**Prüflingsmaschine**

Sollwertvorgabe

M\_soll (+=Moton): --- | Erregerstrom: ---

id\_soll: 0 | iq\_soll: 0

**DCDC 2**

Sollwertvorgabe

U\_ZK\_3 [V]: --- | Freq\_DCDC2: --- | n\_Phase\_DCDC2: ---

**Sollwerte im DSP**

Mess\_U\_ZK\_3In1: --- V | Kommunikation: --- Hz

**Istwert**

Mess\_U\_ZK\_3In1: --- V

**Fehler**

Stromfehler Stop: [ ] | Kommunikation: [ ]

# Ergebnisse und Fazit

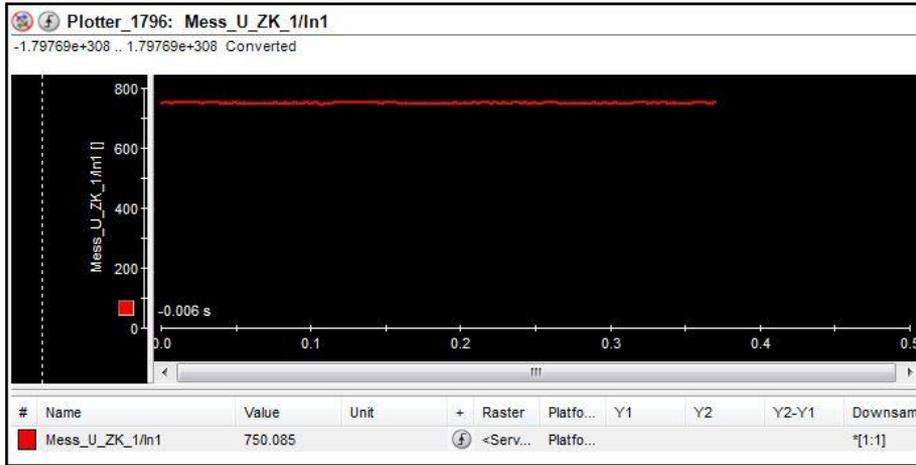


Abb. 1: Messung  $U_{Zk1}$

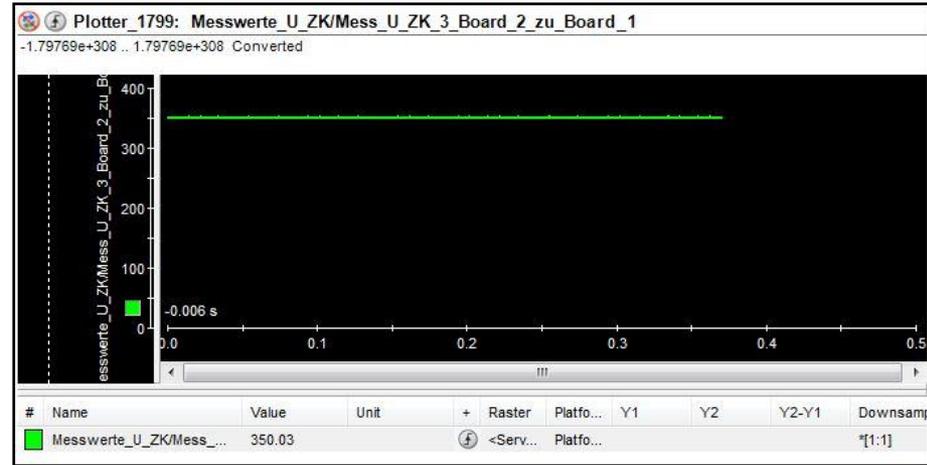


Abb. 2: Messung  $U_{Zk2}$

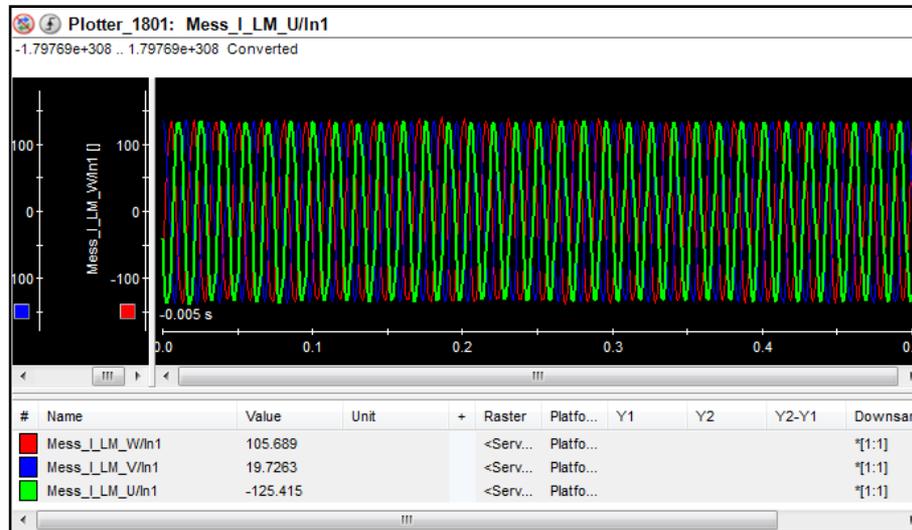


Abb. 3: Messung  $I_{PM}$

# Ergebnisse und Fazit

- Vergleichsweise hohe Maximalleistung aufgrund der Wasserkühlung

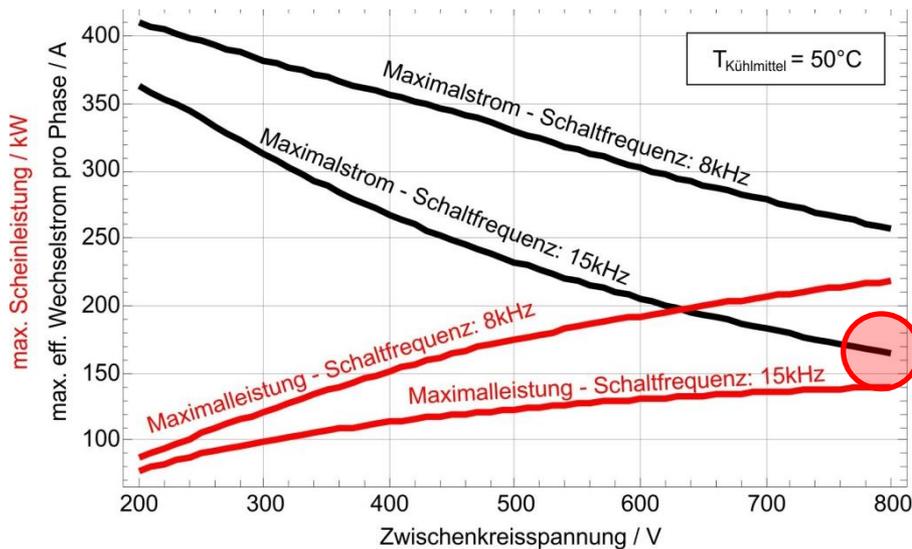


Abb. 1: Berechnete Maximalwerte

Thermische Übergänge und Kapazitäten schwer zu ermitteln, deshalb zuvor konservative Rechnung

Technische Daten	
$P_{\text{max}}$	250 kW
$n_{\text{max}}$	18.000 U/min
$U_{\text{Zk1}}$	565...800 V
$U_{\text{Zk2}}$	100... 800 V
$I_{\text{PM,max}}$	470 A
$I_{\text{DCDC,max}}$	1000 A
$f_{\text{PWM,max}}$	15 kHz
$P_{\text{LC,max}}$	30 kW
$f_{\text{CPU}}$	2,6 GHz
$t_{\text{cyc}}$	50 $\mu\text{s}$

Abb. 2: Tatsächlich Maximalwerte

## ■ Vorteile der Toolkette



- frühzeitiges Ausschließen prinzipieller Fehler
  - keine Gefahr der Bauteilzerstörung beim Testen der Regelung
  - freier Zugriff auf alle Prozessdaten  
(spart zusätzlich Sensorik bei der Inbetriebnahme)
  - reibungslose C-Code-Generierung
- Herangehensweise hat sich bewährt und wird auch in Zukunft weiter eingesetzt