

Abb. 1: Echtzeitfähiges Smart Grid Labor an der Technischen Universität Berlin.

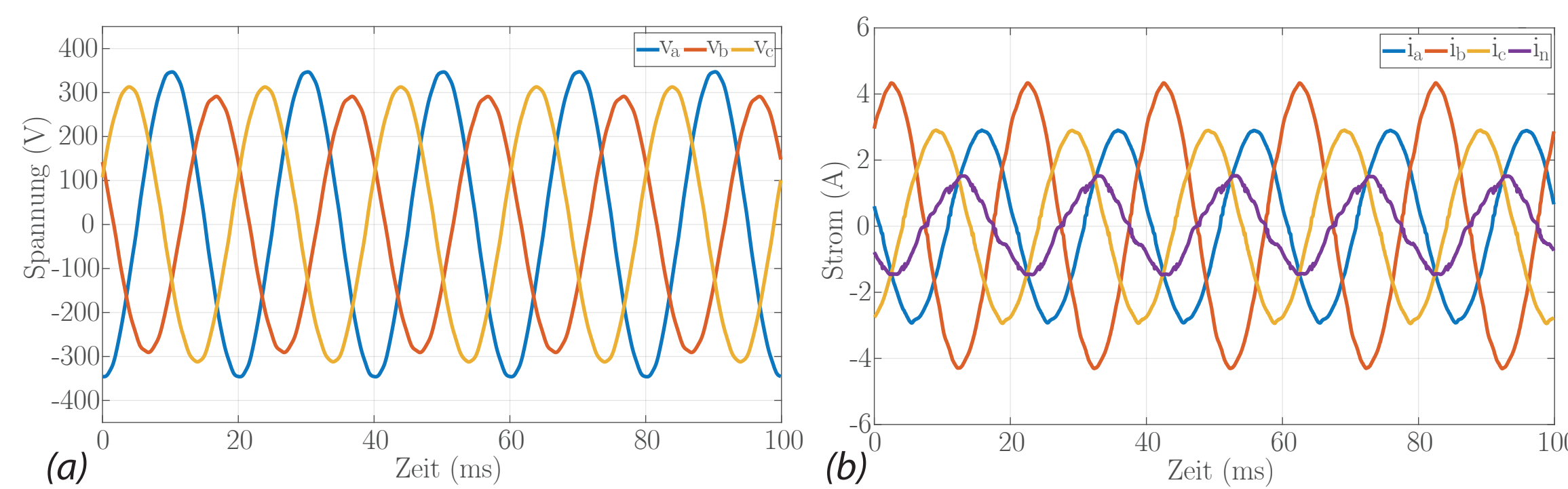


Abb. 2: Spannungsasymmetrien (a) verursacht durch unsymmetrische Phasenströme (b).

Einführung und Methodik

Spannungsasymmetrien können in zukünftigen Verteilnetzen verstärkt vorkommen. Grund hierfür sind vor allem ein hoher Zuwachs an Elektromobilität [1] und PV-Erzeugungsanlagen im Niederspannungs-Verteilnetz. Diese, über leistungselektronische Umrichter angeschlossenen Verbraucher und Erzeuger, können zu einer starken unsymmetrischen Netzbelastung führen, welche Spannungsasymmetrien zur Folge hat. Dies wurde im echtzeitfähigen Labor, dargestellt in **Abb. 1**, an der Technischen Universität Berlin untersucht.

Das Problem der Spannungsasymmetrien ist in **Abb. 2** gezeigt und entsteht durch unterschiedlich hohe Phasenströme. Diese Asymmetrien müssen kompensiert werden, um den Grenzwerten im IEEE Standard 1159 zu entsprechen. Hierfür wird eine Methodik für Systemanalyse und Reglerdesign entwickelt und in den abgebildeten Stufen **1** bis **5** verdeutlicht.

Konklusion

Bedingt durch Unwägbarkeiten im Software-Simulationsmodell ist abweichendes Verhalten in der Realität zu erwarten. Für die sichere Energieversorgung und das Verständnis tatsächlicher Vorgänge ist daher die umfangreiche Validierung im Hardware-Labor ein elementarer Bestandteil der gezeigten Methodik. Grundlage hierfür bildet eine quantitative Performance-Analyse der Prototypen anhand folgender Parameter:

- Schnelligkeit des Reglers
- Genauigkeit der Symmetrie, quantifizierbar durch Voltage Unbalance Factor (VUF)
- Genauigkeit der Spannungsregelung
- Überschwingen und transientes Verhalten

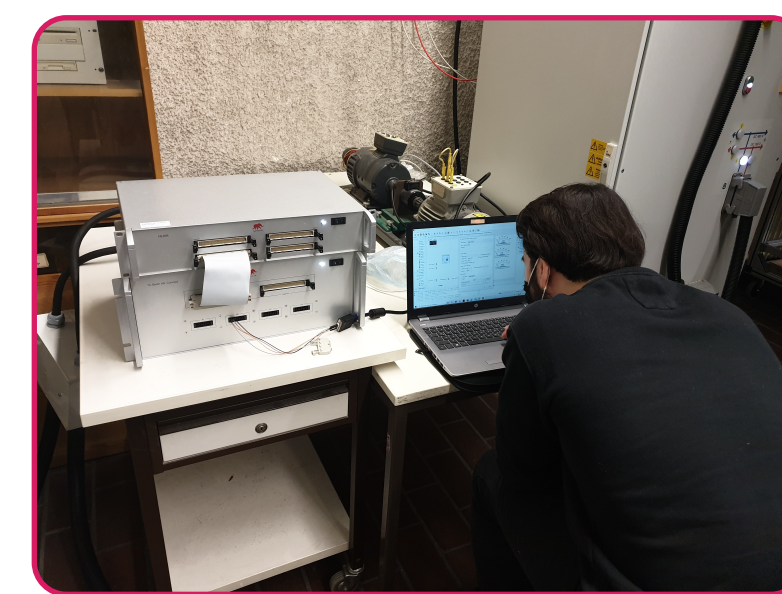


Abb. 9: Performance-Analyse.

Die Ergebnisse aus **Abb. 8** zeigen, dass Spannungsasymmetrien in Verteilnetzen durch multifunktionale Umrichter effektiv kompensiert werden können. Anhand der angegebenen Parameter lässt sich die Einhaltung des IEEE Standard 1159 überprüfen. So wird ein zuverlässiger Netzbetrieb, auch mit unsymmetrischen Lasten bei hoher Durchdringung mit leistungselektronischen Komponenten, erreicht.

4. Validierung im Labor und 5. Ergebnisauswertung

Für die Validierung wird das in **Abb. 6** dargestellte Labornetz, mit zunächst konservativen Reglereinstellungen, schrittweise in Betrieb genommen. Die Validierung weist nach, ob ein stabiler Betrieb für das entwickelte Regelungskonzept in verschiedenen Betriebspunkten erreicht wird. Hierbei zeigen sich Probleme der Stabilität, trotz simulativ erprobten Reglereinstellungen, wie **Abb. 7** verdeutlicht. Eine adäquate Netzspannung ist hier nicht gegeben und veranlasst zu weiteren Iterationsschritten ab Stufe **2**.

Faktoren für Instabilität können vielfältig sein und sind basierend auf erworbenen Erkenntnissen im Labor in **Tabelle 1** zusammengefasst. Durch mehrmalige Iteration wird eine stabile Netzspannung, wie in **Abb. 8** dargestellt, erreicht. Nach Aktivierung der Regelung zum Zeitpunkt $t = 40$ ms werden die Spannungsasymmetrien kompensiert, und die Performance kann analysiert werden.

Tabelle 1: Identifizierte Faktoren

Erkenntnisse aus dem Echtzeitlabor

- Ungenaue Bauteilwerte z.B. des Filters und der Leitungsimpedanz
- Ungenügende zeitliche Entkopplung der Stromregler- und Spannungsreglerbandbreite voneinander und zur Schaltfrequenz
- Schrittweise Inbetriebnahme muss Integratorzustände berücksichtigen und Integrator Wind-Up verhindern

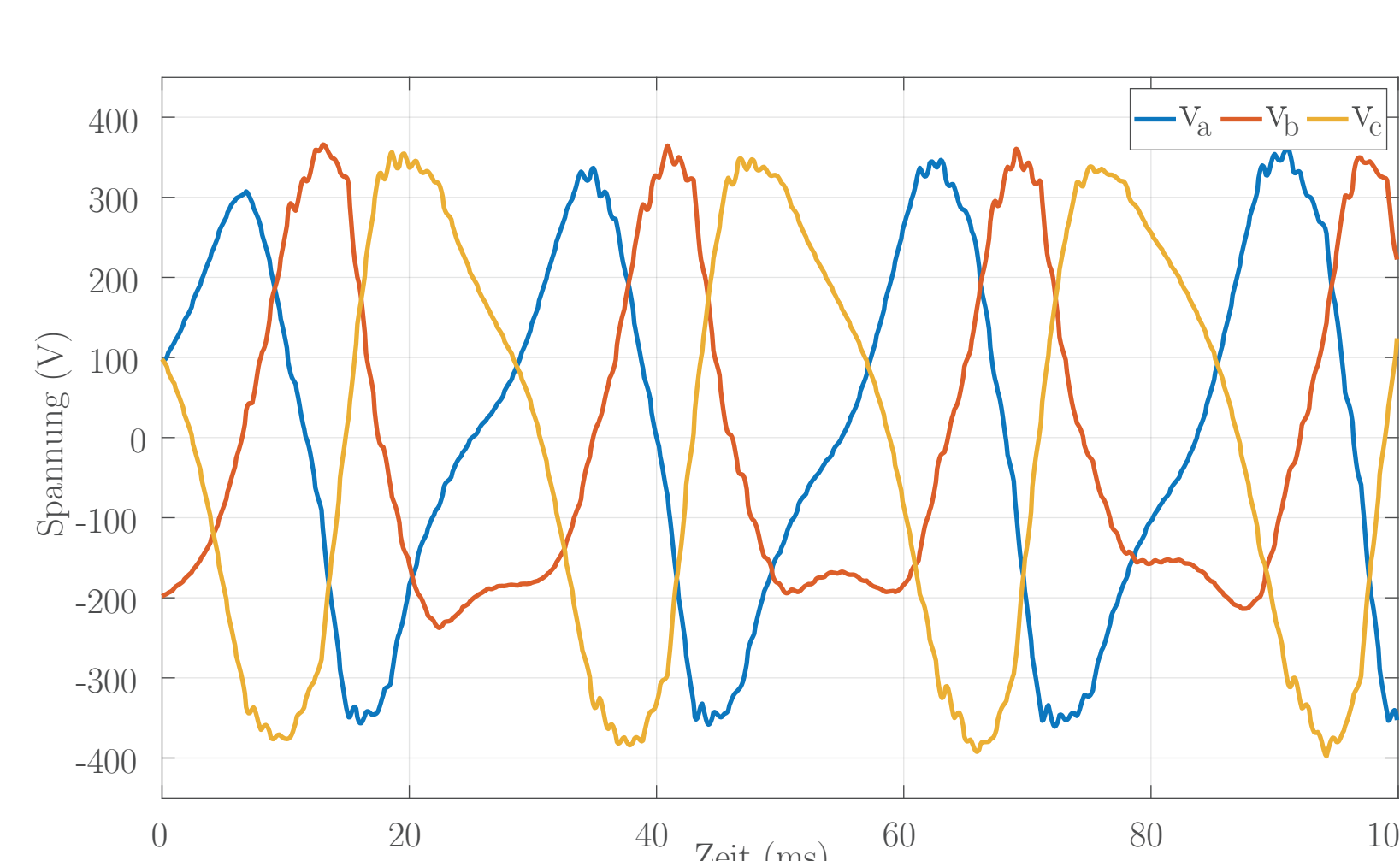


Abb. 7: Beispiel für eine instabile Spannungsregelung im Labor.

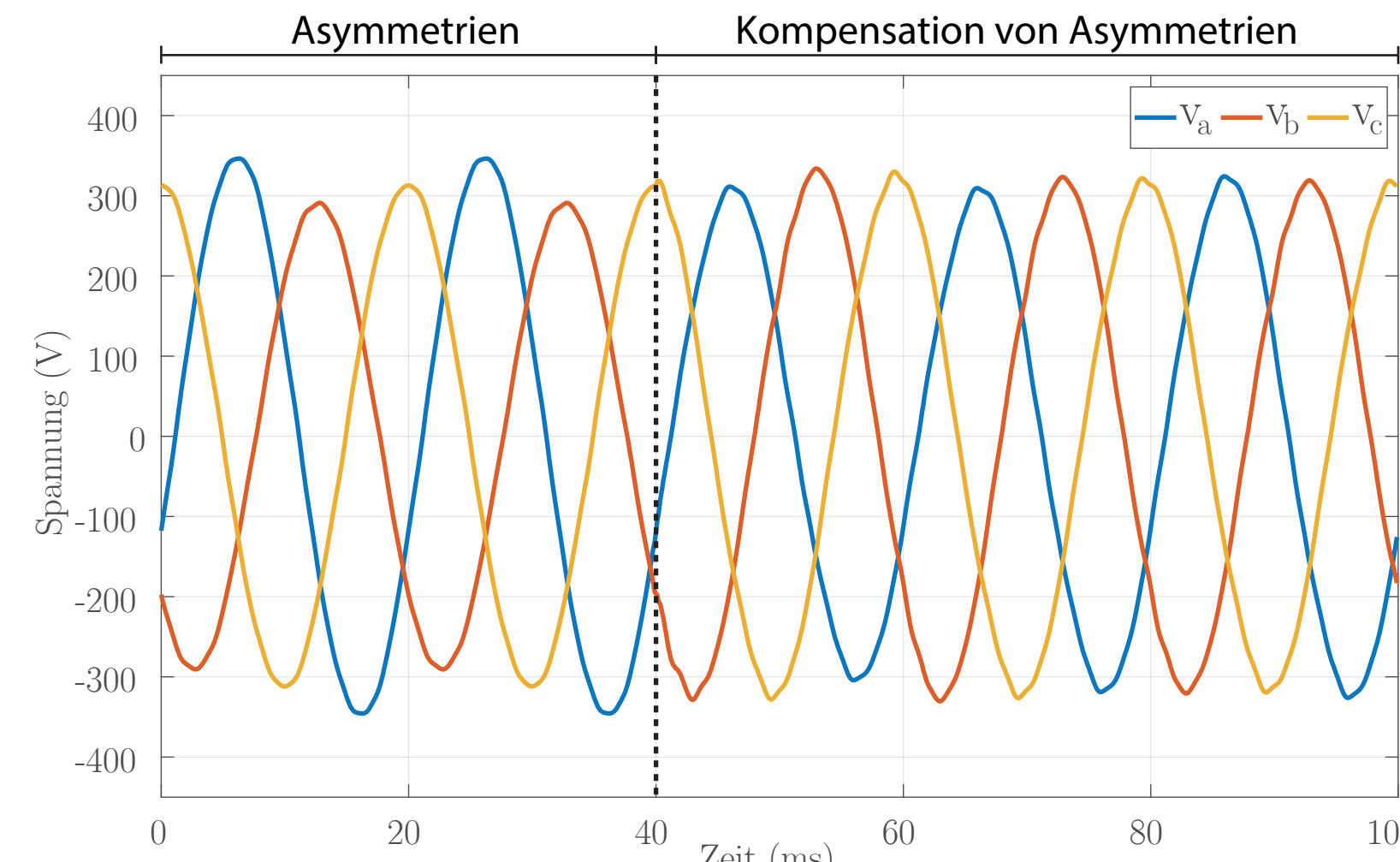


Abb. 8: Aktivierung der Regelung und Kompensation der Asymmetrien.

1. Simulationsmodell und 2. Regelungskonzept

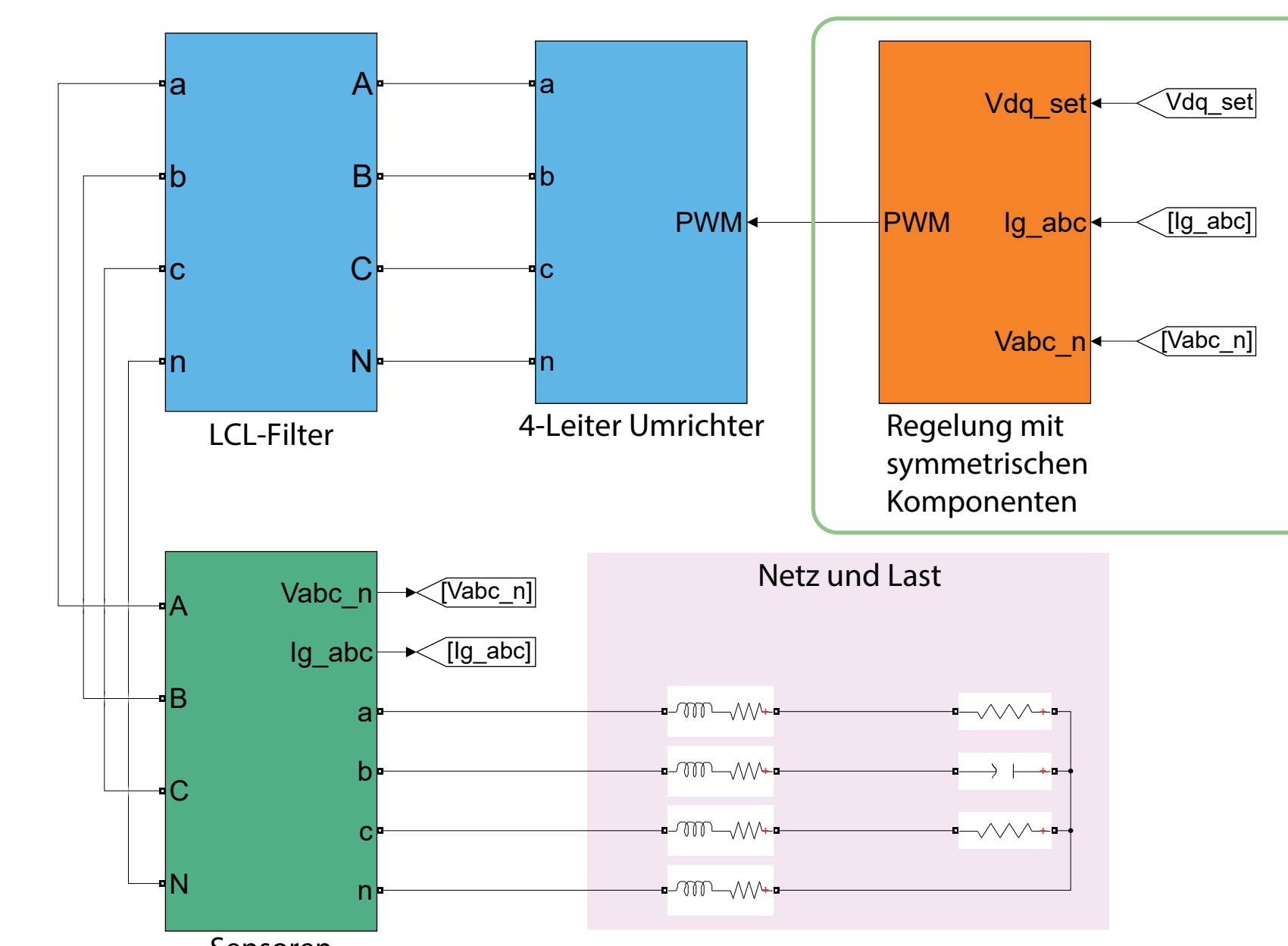


Abb. 3: Simulationsmodell des Labornetzes.

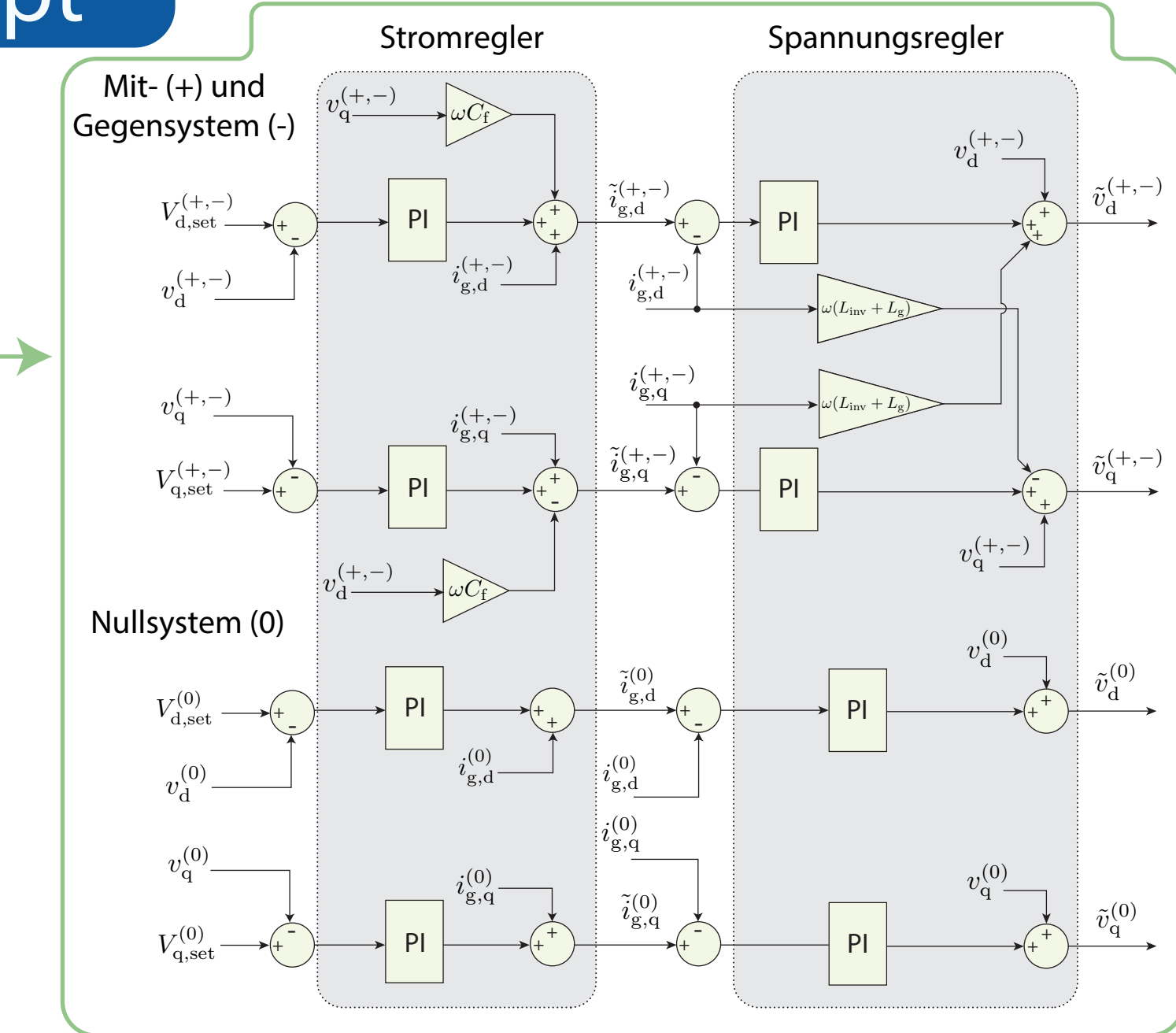


Abb. 4: Kaskadierte Regelung für Spannungsasymmetrien.

Ein detailliertes Modell des Labornetzes wird in **Abb. 3** in MATLAB/Simulink modelliert. Anschließend wird die Regelung in **Abb. 4** basierend auf symmetrischen Komponenten [2] und kaskadierten PI-Reglern ausgelegt. Die Stabilität des Systems für Strom- und Spannungsregler wird im Frequenzbereich mit Bodediagrammen evaluiert und nachfolgend durch Simulation bestätigt.

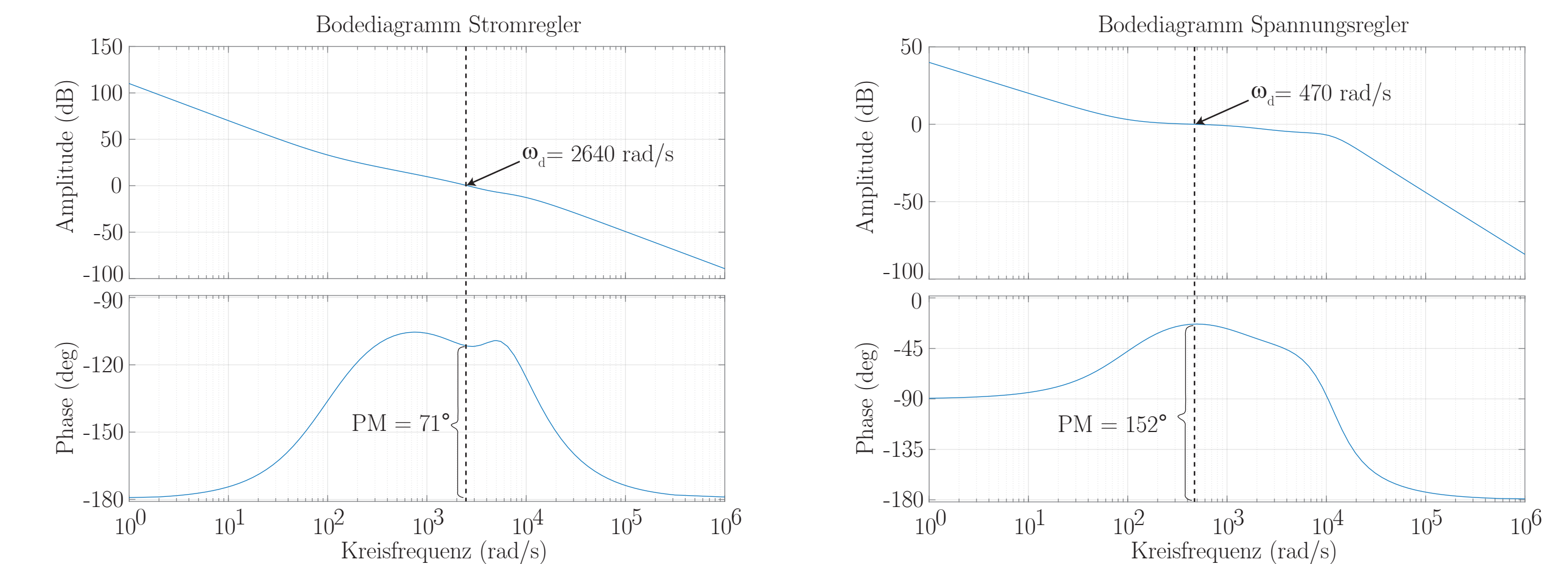
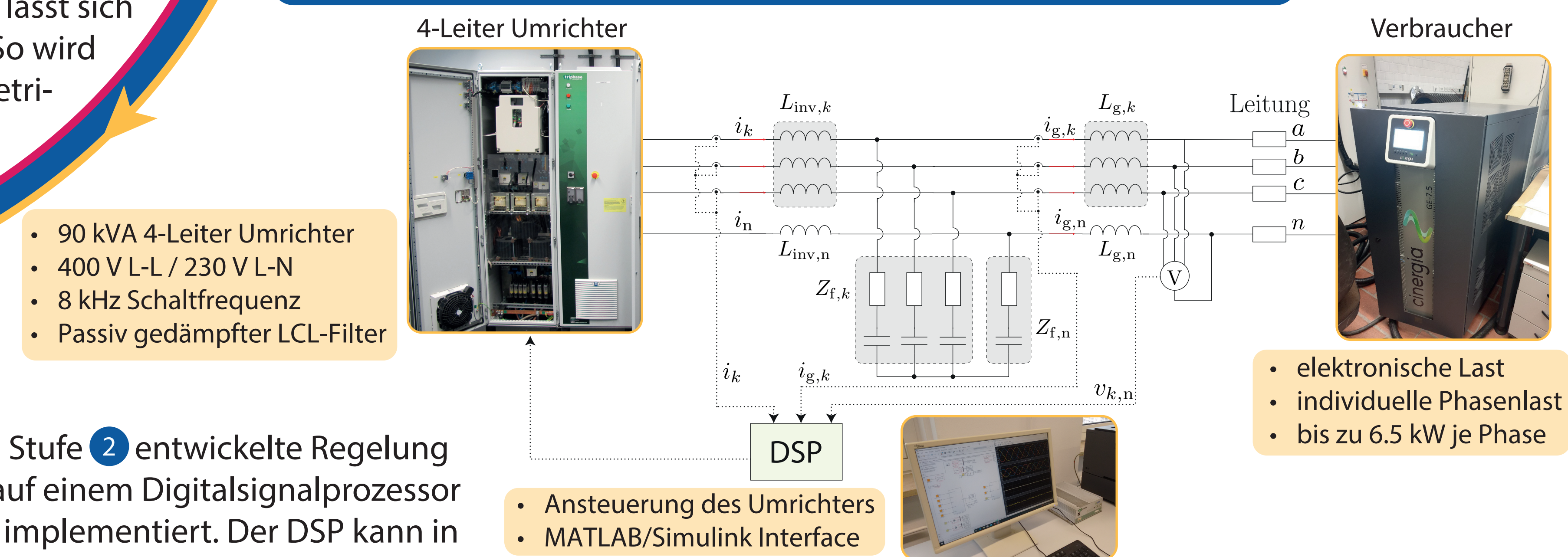


Abb. 5: Auslegung des inneren Stromreglers und äußeren Spannungsreglers.

3. Implementierung im echtzeitfähigen Labor



- 90 kVA 4-Leiter Umrichter
- 400 V L-L / 230 V L-N
- 8 kHz Schaltfrequenz
- Passiv gedämpfter LCL-Filter

Die in Stufe **2** entwickelte Regelung wird auf einem Digitalsignalprozessor (DSP) implementiert. Der DSP kann in MATLAB/Simulink programmiert werden und kompiliert anschließend die Blöcke in Embedded C-Code. Dies ermöglicht schnelle Änderungen und Anpassungen im Sinne von Rapid Control Prototyping. Der DSP übernimmt die Ansteuerung des 4-Leiter Umrichters, welcher Verbraucher im echtzeitfähigen Labor entsprechend **Abb. 6** versorgt.

Literatur

- [1] A. Ul-Haq, C. Cecati, K. Strunz, and E. Abbasi, "Impact of Electric Vehicle Charging on Voltage Unbalance in an Urban Distribution Network", Intelligent Industrial Systems, vol. 1, no. 1, 2015
- [2] I. Vechiu, O. Curea and H. Camblong, "Transient Operation of a Four-Leg Inverter for Autonomous Applications With Unbalanced Load," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 25, no. 2, 2010