

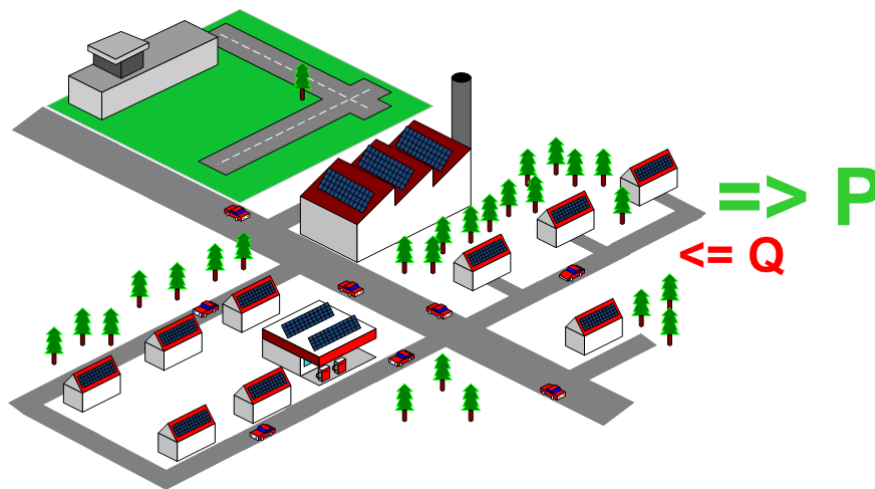


31.08.2012

Studie Q(U)

Kooperationsprojekt der EnBW Regional AG, der E.ON Bayern AG,
der SMA Solar Technology AG, der KACO new energy GmbH,
der Siemens AG und des Fachgebiets Elektrische
Energieversorgungsnetze der Technischen Universität München

Schlussbericht



Bearbeiter: Dipl.-Ing. Peter Esslinger, peter.esslinger@mytum.de

Dieser Bericht wurde nach bestem Wissen und Gewissen erstellt. Eine Garantie für die Richtigkeit der Angaben wird nicht übernommen. Eine Haftung jeglicher Art für Schäden und Folgeschäden, insbesondere entgangenen Gewinn wegen Mängeln des Berichts, ist ausgeschlossen.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	i
Abbildungsverzeichnis.....	iv
Tabellenverzeichnis	ix
1 Vorwort.....	1
2 Veranlassung.....	1
2.1 Ausgangssituation.....	1
2.1.1 Schwierigkeiten durch zunehmende dezentrale Einspeisung	1
2.1.2 Blindleistungsregelung durch PV-Wechselrichter.....	3
2.2 Ziele der Studie Q(U)	5
3 Versuchsaufbau.....	5
3.1 Modellnetz.....	5
3.1.1 Theoretische Grundlagen.....	6
3.1.2 Realisierung des Modellnetzes	9
3.2 Messung.....	11
3.3 Wechselrichter.....	12
3.4 Gesamtaufbau	15
3.5 Vergleich mit bisherigen Untersuchungen.....	16
3.5.1 Netznachbildung.....	17
3.5.2 Versuchsdurchführung.....	20
4 Durchführung der Studie Q(U)	21
4.1 Einspeiseprofile	21

4.1.1	Sprung	22
4.1.2	Rampe	22
4.1.3	Wechselhafter Tag (Ausschnitt aus den Messreihen)	23
4.2	Ansteuerung	24
5	Ergebnisse.....	25
5.1	Verifikation der Q(U)-Kennlinie	25
5.2	Sprungantworten der Wechselrichter.....	28
5.2.1	Wechselrichter KACO	29
5.2.2	SMA	34
5.2.3	Siemens	39
5.2.4	Zusammenfassung Sprungantwort.....	44
5.3	Longitudinale Anordnung	45
5.3.1	Rampe	45
5.3.2	Wechselhafter Tag.....	66
5.3.3	Wolkenzug	80
5.4	Parallele Anordnung	85
5.4.1	Rampe	86
5.4.2	Wechselhaft	91
6	Empfehlungen zur Parametrierung des Q(U)-Reglers	96
7	Empfehlungen für die Standardisierung	99
7.1	Parametrierung und Nachweis der Q(U)-Regelung	99
7.2	Relevante Spannung für die Q(U)-Regelung	99
7.3	Q(U)-Regelung von einphasigen Wechselrichtern und Einzelphasenblindleistungsregelung.....	100
8	Fazit.....	102

9 Literatur 104

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: PV-Anlagen in Deutschland.....	2
Abbildung 2: Spannungsfall bei Einspeisung aus PV-Anlagen nach [1]	3
Abbildung 3: Spannungsfall bei Einspeisung PV und Blindleistungsbezug nach [1] ..	4
Abbildung 4: longitudinale und parallele Anordnung der Wechselrichter im Modellnetz.....	6
Abbildung 5: Netzstrahl ohne Verzweigungen.....	8
Abbildung 6: Netzmodell des Versuchstands (extremer Fall)	9
Abbildung 7: Widerstände (im Vordergrund) und Induktivitäten (im Hintergrund)	10
Abbildung 8: Messanordnung bestehend aus Sentron PAC 4200 (oben) und Stromwandlern (unten)	12
Abbildung 9: prinzipielles Beispiel einer Q(U)-Kennlinie	13
Abbildung 10: Gesamtaufbau des Versuchstands	15
Abbildung 11: Überblick über den gesamten Versuchstand	16
Abbildung 12: Netznachbildung einer Vorgängerstudie (Abbildung direkt aus [5] übernommen)	17
Abbildung 13: Realisierung des Modellnetzes der Vorgängerstudie (direkt aus [6] übernommen)	19
Abbildung 14: Einspeiseprofil Sprung	22
Abbildung 15: Einspeiseprofil Rampe.....	23
Abbildung 16: Einspeiseprofil Wechselhaft mit Vergleich Messauslösung 1 s, Mittelung über 5 s (verwendet) und Mittelung über 10 s.....	24
Abbildung 17: Netznachbildung für Verifikation der Q(U)-Kennlinien	25
Abbildung 18: Q(U)-Kennlinie Wechselrichter Kaco	26

Abbildung 19: Q(U)-Kennlinie Wechselrichter SMA.....	27
Abbildung 20: Q(U)-Kennlinie Wechselrichter Siemens.....	28
Abbildung 21: Konfiguration der Netznachbildung für Sprungantworten.....	28
Abbildung 22: Q(U)-Kennlinie für Versuchsreihe Sprungantwort.....	29
Abbildung 23: Sprungantwort Wechselrichter KACO, PT1 deaktiviert	30
Abbildung 24: Sprungantwort Wechselrichter KACO, Zeitkonstante PT1 = 5 s.....	31
Abbildung 25: Sprungantwort Wechselrichter KACO, Zeitkonstante PT1 = 10 s.....	32
Abbildung 26: Sprungantwort Wechselrichter KACO, Zeitkonstante PT1 = 15 s.....	33
Abbildung 27: Sprungantwort Wechselrichter KACO, Zeitkonstante PT1 = 20 s.....	34
Abbildung 28: Sprungantwort Wechselrichter SMA, PT1 deaktiviert	35
Abbildung 29: Sprungantwort Wechselrichter SMA, Zeitkonstante PT1 = 5 s.....	36
Abbildung 30: Sprungantwort Wechselrichter SMA, Zeitkonstante PT1 = 10 s.....	37
Abbildung 31: Sprungantwort Wechselrichter SMA, Zeitkonstante PT1 = 15 s.....	38
Abbildung 32: Sprungantwort Wechselrichter SMA, Zeitkonstante PT1 = 20 s.....	39
Abbildung 33: Sprungantwort Wechselrichter Siemens, PT1 deaktiviert	40
Abbildung 34: Sprungantwort Wechselrichter Siemens, Zeitkonstante PT1 = 5 s...	41
Abbildung 35: Sprungantwort Wechselrichter Siemens, Zeitkonstante PT1 = 10 s.	42
Abbildung 36: Sprungantwort Wechselrichter Siemens, Zeitkonstante PT1 = 15 s.	43
Abbildung 37: Sprungantwort Wechselrichter Siemens, Zeitkonstante PT1 = 20 s.	44
Abbildung 38: Konfiguration der Netznachbildung für den extremen longitudinalen Fall.....	45
Abbildung 39: Q(U) Kennlinien für die longitudinale Anordnung.....	46
Abbildung 40: extreme longitudinale Anordnung: Rampe, ohne Regelung.....	48
Abbildung 41: extreme longitudinale Anordnung: Rampe, kleines Totband	49
Abbildung 42: Detail: extreme longitudinale Anordnung: Rampe, kleines Totband .	50

Abbildung 43: extreme longitudinale Anordnung: Rampe, mittleres Totband	51
Abbildung 44: extreme longitudinale Anordnung: Rampe, großes Totband.....	52
Abbildung 45: Konfiguration der Netznachbildung für den typischen longitudinalen Fall.....	53
Abbildung 46: typische longitudinale Anordnung: Rampe, Regelung deaktiviert.....	55
Abbildung 47: typische longitudinale Anordnung: Rampe, kleines Totband	56
Abbildung 48: Typische longitudinale Anordnung: Rampe, mittleres Totband	57
Abbildung 49: typische longitudinale Anordnung: Rampe, großes Totband	58
Abbildung 50: Netzkonfiguration für Versuche mit einphasiger Last.....	59
Abbildung 51: extreme longitudinale Anordnung: Rampe, kleines Totband, einphasige Last	61
Abbildung 52: extreme longitudinale Anordnung: Rampe, mittleres Totband, einphasige Last	62
Abbildung 53: extreme longitudinale Anordnung: Rampe, großes Totband, einphasige Last	63
Abbildung 54: extreme longitudinale Anordnung: Rampe, großes Totband, einphasige Last, nur Regelung bei Wechselrichter Siemens aktiviert	64
Abbildung 55: detaillierter Ausschnitt: extreme longitudinale Anordnung: Rampe, kleines Totband, einphasige Last.....	65
Abbildung 56: Konfiguration der Netznachbildung für den extremen longitudinalen Fall.....	66
Abbildung 57: extreme longitudinale Anordnung: wechselhaft, ohne Regelung	68
Abbildung 58: extreme longitudinale Anordnung: wechselhaft, kleines Totband	69
Abbildung 59: extreme longitudinale Anordnung: wechselhaft, mittleres Totband ..	70
Abbildung 60: extreme longitudinale Anordnung: wechselhaft, großes Totband	71
Abbildung 61: Konfiguration der Netznachbildung für den typischen longitudinalen Fall.....	72

Abbildung 62: typische longitudinale Anordnung: wechselhaft, ohne Regelung.....	74
Abbildung 63: typische longitudinale Anordnung: wechselhaft, kleines Totband (WR Kaco: Regelung erst bei $t = 520$ s aktiviert.....	75
Abbildung 64: typische longitudinale Anordnung: wechselhaft, mittleres Totband..	76
Abbildung 65: typische longitudinale Anordnung: wechselhaft, großes Totband	77
Abbildung 66: extreme longitudinale Anordnung: wechselhaft, kleines Totband, PT1 20 s.....	79
Abbildung 67: extreme longitudinale Anordnung: wechselhaft, Wolkenzug, ohne Regelung	81
Abbildung 68: extreme longitudinale Anordnung: wechselhaft, Wolkenzug, kleines Totband.....	82
Abbildung 69: extreme longitudinale Anordnung: wechselhaft, Wolkenzug, mittleres Totband.....	83
Abbildung 70: extreme longitudinale Anordnung: wechselhaft, Wolkenzug, großes Totband.....	84
Abbildung 71: Konfiguration des Netzmodells für den typischen parallelen Fall.....	85
Abbildung 72: typische parallele Anordnung: Rampe, ohne Regelung	87
Abbildung 73: typische parallele Anordnung: Rampe, kleines Totband	88
Abbildung 74: typische parallele Anordnung: Rampe, mittleres Totband	89
Abbildung 75: typische parallele Anordnung: Rampe, großes Totband	90
Abbildung 76: typische parallele Anordnung: wechselhaft, ohne Regelung.....	92
Abbildung 77: typische parallele Anordnung: wechselhaft, kleines Totband	93
Abbildung 78: typische parallele Anordnung: wechselhaft, mittleres Totband.....	94
Abbildung 79: typische parallele Anordnung: wechselhaft, großes Totband	95
Abbildung 80: ausschließlich spannungssenkende Q(U)-Kennlinie.....	97
Abbildung 81: symmetrische Q(U)-Kennlinie.....	97

Abbildung 82: asymmetrische/verschobene Q(U)-Kennlinie 98

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: berechnete Netzparameter für das untersuchte Landnetz.....	8
Tabelle 2: Parametrierung des Q(U)-Reglers für die Untersuchung der Sprungantworten.....	28
Tabelle 3: Parametersätze der Blindleistungsregelung im extremen longitudinalen Fall.....	46
Tabelle 4: Parametersätze der Blindleistungsregelung im typischen longitudinalen Fall.....	53
Tabelle 5: Parametersätze der Blindleistungsregelung im extremen longitudinalen Fall.....	66
Tabelle 6: Parametersätze der Blindleistungsregelung im typischen longitudinalen Fall.....	72
Tabelle 7: Reglerparameter für die typische parallele Anordnung	85

1 Vorwort

Der folgende Abschlussbericht fasst die Ergebnisse der Studie Q(U), die am Fachgebiet Elektrische Energieversorgungsnetze der Technischen Universität München durchgeführt wurde, zusammen. Diese entstand im Rahmen eines Kooperationsprojekts der EnBW Regional AG, der E.ON Bayern AG, der SMA Solar Technology AG, der KACO new energy GmbH, der Siemens AG und des Fachgebiets Elektrische Energieversorgungsnetze der Technischen Universität München.

Das Fachgebiet Elektrische Energieversorgungsnetze bedankt sich bei allen Projektpartnern für die stets reibungslose konstruktive Zusammenarbeit. Ein besonderer Dank geht an die Werkstatt des Lehrstuhls für Hochspannungstechnik für die hervorragende Unterstützung beim Aufbau des Versuchsstandes.

2 Veranlassung

Im Folgenden werden die Ausgangssituation, die zur Studie Q(U) führte, und die Zielsetzung dieser Studie kurz beschrieben.

2.1 Ausgangssituation

Der rasant fortschreitende Zubau von dezentralen Energieerzeugern, insbesondere Photovoltaikanlagen (Abbildung 1), bereitet in Niederspannungsnetzen zunehmend Schwierigkeiten.

2.1.1 Schwierigkeiten durch zunehmende dezentrale Einspeisung

Konsequenzen des vermehrten Zubaus zeigen sich in vielen Bereichen:

- Lastflussumkehr
- Schutzkonzepte

- Betriebsmittelbeanspruchung
- Einhaltung der zulässigen Spannungskriterien
- Spannungsqualität durch fluktuierende Einspeisung

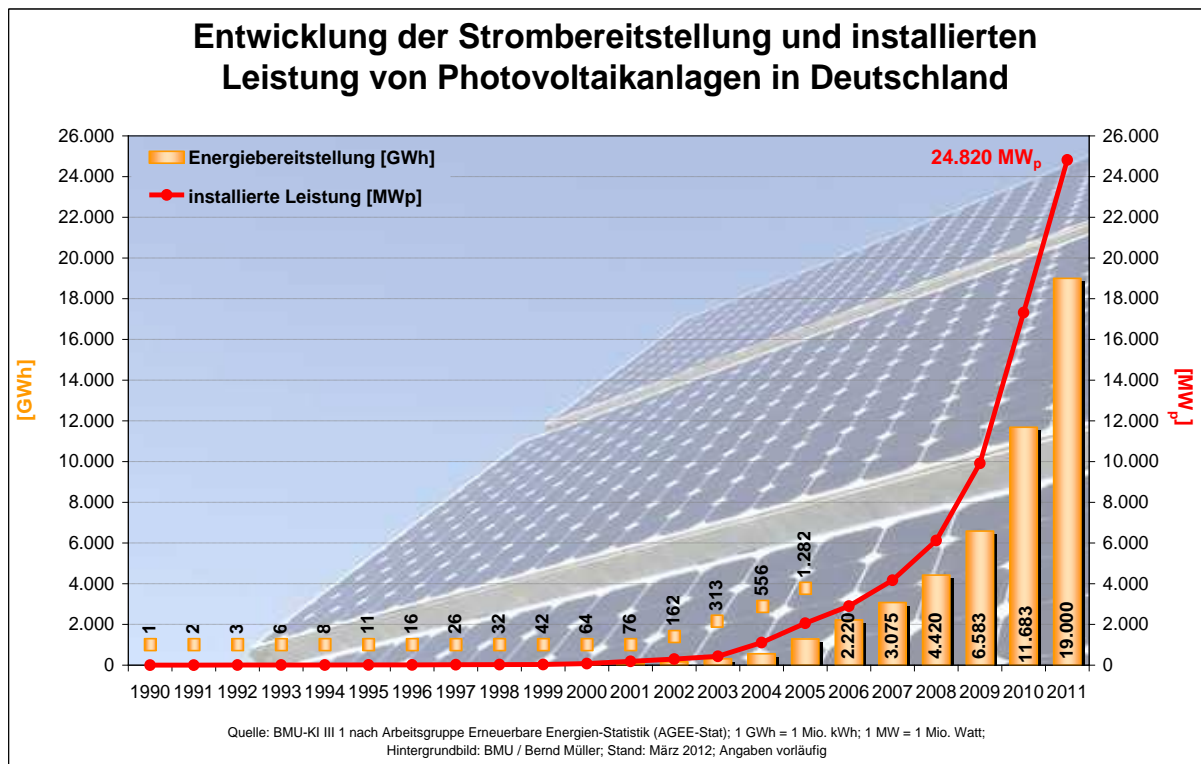


Abbildung 1: PV-Anlagen in Deutschland

Mittel- und Niederspannungsnetze sind für einen Lastfluss von der übergeordneten Netzebene über den Transformator zum Verbraucher dimensioniert. Die Betriebsmittel sind so bemessen, dass bei maximal zu erwartender Last unter Berücksichtigung der Schwankungen im überlagerten Netz das zulässige Spannungsband von $\pm 10\%$ am Hausanschluss eingehalten wird.

Bei hoher Durchdringung mit dezentralen Erzeugungsanlagen kommt es insbesondere in Zeiten geringer Last zu einer Invertierung des Lastflusses und einer Rückspeisung in das überlagerte Netz. Aufgrund der geänderten Lastflussrichtung befindet sich der Ort der maximalen Spannung nicht mehr am Transformator, sondern am Ende des Netzstranges. Wegen der häufig fluktuierenden Erzeugung z. B. durch PV-Anlagen kann es zu starken Spannungsschwankungen kommen. Abbildung 2 zeigt vereinfacht die mögliche Variation der Spannung an einem Netzstrang bei Last und fluktuierender dezentraler Erzeugung.

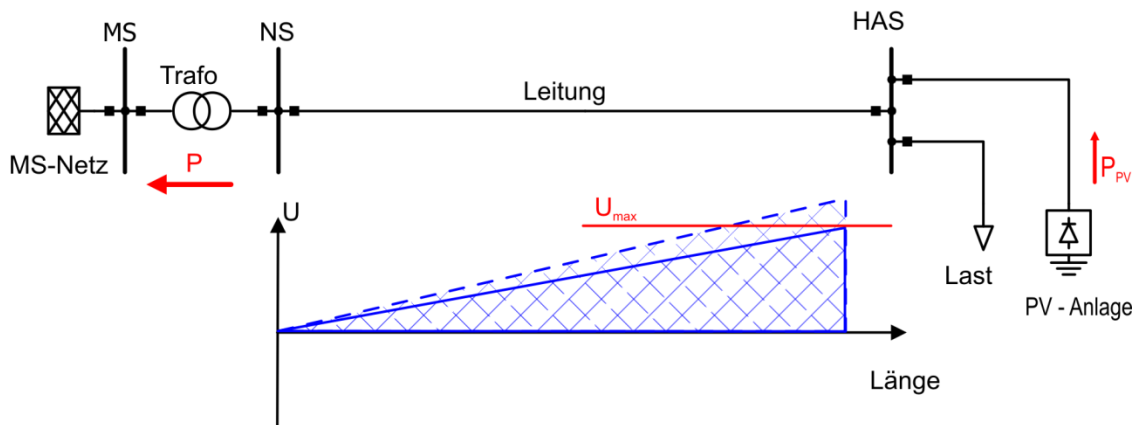


Abbildung 2: Spannungsfall bei Einspeisung aus PV-Anlagen nach [1]

Die maximal zulässige Spannungsanhebung wird durch zwei Vorschriften begrenzt:

- Spannungsband $\pm 10\%$ der Bemessungsspannung in 95 % aller 10-Minuten-Mittelwerte einer Woche nach DIN EN 50160 [2]
- Spannungsänderung durch Erzeugungsanlagen $\Delta U \leq \pm 3\%$ der Bemessungsspannung an jedem Netzverknüpfungspunkt nach VDE-AR-N 4105 [3]

Empfehlungen zur zulässigen Spannungserhöhung durch Erzeugungsanlagen in Niederspannungsnetzen auf $\leq 3\%$ [3] begrenzen die Aufnahmefähigkeit der Netze sehr stark [1]. Bei Ausnutzung des gesamten zulässigen Spannungsbandes von $\pm 10\%$ werden in den meisten Netzen auch die thermischen Belastungsgrenzen der Betriebsmittel erreicht.

2.1.2 Blindleistungsregelung durch PV-Wechselrichter

Moderne 4-Quadranten-Wechselrichter haben die Möglichkeit, Blindleistung zu beziehen oder abzugeben. Durch den Bezug induktiver Blindleistung durch die Wechselrichter kann die Spannung am Verknüpfungspunkt bzw. allgemein im Netz abgesenkt werden (Abbildung 3).

Die VDE-Anwendungsregel VDE-AR-N 4105 sieht folgende Möglichkeiten zur Blindleistungsregelung durch PV-Wechselrichter vor:

- Fester Verschiebungsfaktor $\cos \varphi$
- Verschiebungsfaktor-/Wirkleistungskennlinie $\cos \varphi = f(P)$
- Zukünftig auch netzspannungsabhängige Verfahren wie das aus höheren Spannungsebenen bekannte $Q(U)$ Kennlinienverfahren

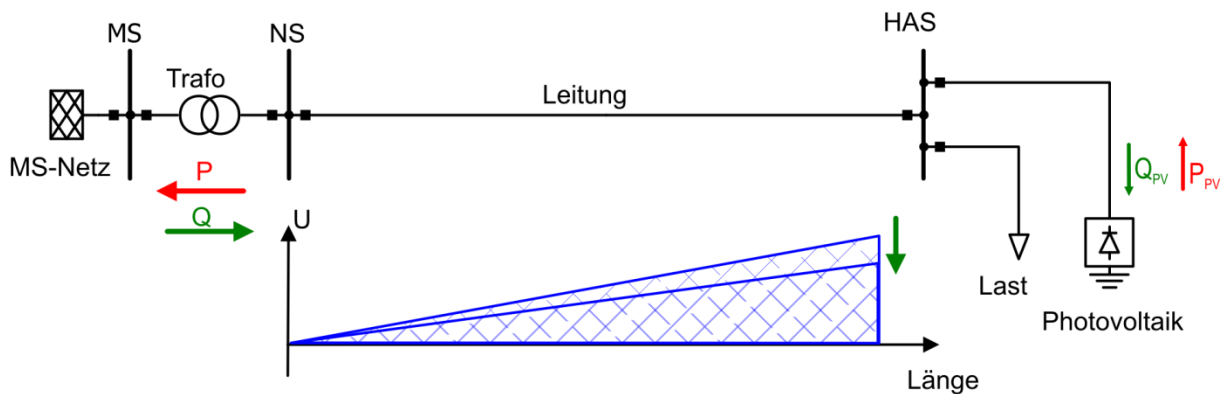


Abbildung 3: Spannungsfall bei Einspeisung PV und Blindleistungsbezug nach [1]

Eine Möglichkeit die Spannung zu beeinflussen stellt eine spannungsabhängige Blindleistungsregelung der PV-Wechselrichter dar. In der Mittelspannungsebene wird von verschiedenen Netzbetreibern bereits eine spannungsabhängige Kennlinie vorgegeben. Dies würde auch in der Niederspannung folgende unbestrittene technische Vorteile bieten:

- Spannungsabhängiger Blindleistungsbezug (wie in MS).
- Blindleistungsbezug nur wenn benötigt (also nur bei hoher Netzspannung).
- Spannungsstützung und Blindleistungskompensation bei Hochlast ebenfalls möglich

Bisherige Berechnungsmodelle [1] [4] [8] bestätigen die Funktion dieses Konzepts. Netzberechnungen haben gezeigt, dass bei geeigneter Dämpfung keine Schwingungen im Netz auftreten. Vorteile einer Regelung $Q(U)$ sind im Vergleich mit der derzeit möglichen Vorgabe einer $\cos \varphi = f(P)$ Kennlinie (vgl. VDE-AR N 4105) aber ein geringerer Blindleistungsbedarf und damit geringere Netzverluste.

Jedoch ist dieses Konzept unter Netzbetreibern nach wie vor umstritten und wurde deswegen nicht in die aktuelle Anwendungsregel für Erzeugungsanlagen in der Niederspannung (VDE-AR-N 4105) mit aufgenommen. Insbesondere gibt es Bedenken hinsichtlich der Stabilität dieses Verfahrens, die frühere Laboruntersuchungen [5] nicht auszuräumen vermochten. Diese sind jedoch nur bedingt aussagekräftig (siehe Abschnitt 3.5).

Ohne anerkannte Klärung werden jedoch keine Anlagen mit dieser Funktion realisiert und können daher auch nicht eingesetzt werden.

2.2 Ziele der Studie Q(U)

Ziel der Studie Q(U) ist eine neutrale Beurteilung des Stabilitätsverhaltens der Regelung Q(U) anhand der Verhältnisse in real existierenden NS-Netzen. Dies wird erreicht durch eine gemeinsame, unabhängige Studie am Fachgebiet Elektrische Energieversorgungsnetze der Technischen Universität München unter Beteiligung der betroffenen Netzbetreiber sowie Wechselrichterhersteller.

Verschiedene Hersteller von Wechselrichtern haben die für die Regelung benötigten Funktionalitäten bereits in ihre Produkte integriert. Vor einem flächendeckenden Einsatz dieser Regelung sollen in einem Modellversuch mit realen Wechselrichtern die Stabilität des Konzepts nachgewiesen und konkrete Parametervorschläge für einen zuverlässigen Betrieb ermittelt werden.

3 Versuchsaufbau

Die Untersuchungen werden an einem typischen und an einem Extremwertnetz durchgeführt. Ziel der typischen Netze ist es, die häufigsten auftretenden Netzstrukturen nachzubilden. Extremwertnetze sind Netze mit speziellen Parameterkonstellationen, wie hoch ausgelasteten Transformatoren, lange Netzausläufer, etc. Die Leitungen und Transformatoren der Netze werden durch konzentrierte Widerstände und Drosseln nachgebildet. Das Netz ist mit drei Q(U)-regelfähigen Wechselrichtern mit einer Bemessungsleistung von jeweils 10 kVA bestückt. Die Wechselrichter werden mit synthetischen Profilen gespeist, die aus realen Messungen einer PV-Anlage gebildet werden.

3.1 Modellnetz

Es wird eine longitudinale und eine parallele Anordnung der Wechselrichter (siehe Abbildung 4) untersucht. Bei der parallelen Anordnung befinden sich alle drei Wechselrichter am Ende des Netzausläufers. Die longitudinale Anordnung sieht eine gleichmäßige Verteilung der drei Wechselrichter längs des nachgebildeten Netzausläufers vor.

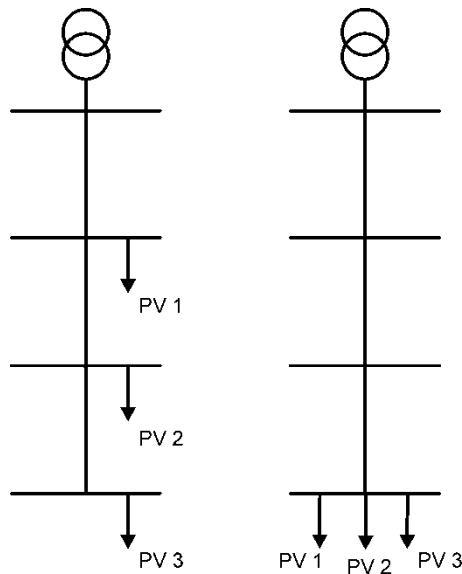


Abbildung 4: longitudinale und parallele Anordnung der Wechselrichter im Modellnetz

3.1.1 Theoretische Grundlagen

In [1] bzw. [9] wurden aus knapp 100 süddeutschen Niederspannungsnetzen Referenznetze abgeleitet. Dabei wird zwischen typischen Netzen und extremen Netzen unterschieden. Ziel der typischen Netze ist es, die häufigsten auftretenden Netzstrukturen nachzubilden. Extremwertnetze sind Netze mit speziellen Parameterkonstellationen, wie hoch ausgelasteten Transformatoren, lange Netzstrahlen, etc. Die Parameter wurden so gewählt, dass eine ermittelte Betriebsmittelbelastung, Spannungsanhebung etc. in 95 % der vorhandenen Netze gleich oder besser ist als im Extremwertnetz. So kann z. B. die Funktionsfähigkeit einer Blindleistungsregelung auch unter extremen Rahmenbedingungen nachgewiesen werden. Es wird ferner eine Einteilung vorgenommen in:

- Landnetze: Landnetze weisen eine geringe Anzahl von Verbrauchern je Trafostation auf. Der Anteil an Landwirtschaften und Gewerbe ist hoch. Es handelt sich um ein Strahlennetz mit wenigen langen Netzstrahlen. Der Anteil an Niederspannungsfreileitungen ist hier am höchsten.
- Dorfnetze: In Dorfnetzen steigt die Anzahl der Verbraucher je Trafostation gegenüber dem Landnetz. Die Verbraucher sind in erster Linie Einfamilienhäuser. Der Anteil von Landwirtschaft und Gewerbe ist geringer als auf dem Land. Die Netzform ist typischerweise ein offenes Ringnetz bzw. ein Strahlennetz.

- Vorstadtnetze: Vorstadtnetze weisen eine nochmals höhere Verbraucherzahl auf als Land- und Dorfnetze. Die Netzform ist meist ein offenes Ringnetz. Teilweise werden sie auch als Maschennetz mit 2 bis 3 einspeisenden Netzstationen betrieben. Die Verbraucher sind Ein- und Zweifamilienhäuser mit etwas geringerer Grundfläche als im Dorfnetz. Gegenüber dem Dorfnetz steigt die Bebauungsdichte an. Es ist kein nennenswerter Gewerbeanteil mehr vorhanden.

Im Rahmen der Studie Q(U) wird ein Landnetz im Versuchstand nachgebildet.

Der größte Netzstrahl des extremen Landnetzes nach [1] ist durch folgende Daten gekennzeichnet:

- Verbrauchersummenwiderstand: $\sum R_V = 1,85 \Omega$
- Freileitung NFA2X 4×70 mm²: $R' = 0,000443 \frac{\Omega}{m}, R/X \sim 2$
- Verbrauchersummenlänge: $\sum l_V = \frac{\sum R_V}{R'} = 4176,1 \text{ m}$

Der größte Netzstrahl des typischen Landnetzes nach [1] ist durch folgende Daten gekennzeichnet:

- Verbrauchersummenwiderstand: $\sum R_V = 0,843 \Omega$
- Freileitung NFA2X 4×70 mm²: $R' = 0,000443 \Omega/m, R/X \sim 2$
- Verbrauchersummenlänge: $\sum l_V = \frac{\sum R_V}{R'} = 1902,9 \text{ m}$

Die Größen Verbrauchersummenlänge und Verbrauchersummenwiderstand sind nach [1] wie folgt definiert: In Abbildung 5 ist der einfachste Fall eines Netzstrahls ohne Verzweigung dargestellt. Es wird angenommen, dass alle Verbraucher den konstanten Strom I beziehen und dass die Leitungen alle vom gleichen Typ sind (Widerstandsbelag R' und Reaktanzbelag X'). Der interessierende maximale Spannungsfall ΔU an einem Strahl mit n identischen Lasten ermittelt sich nach Gleichung (1). Der Term in den eckigen Klammern entspricht der Summe der einzelnen Längen vom Transformator zu den verschiedenen Verbrauchern und wird daher als Verbrauchersummenlänge $\sum l_V$ definiert.

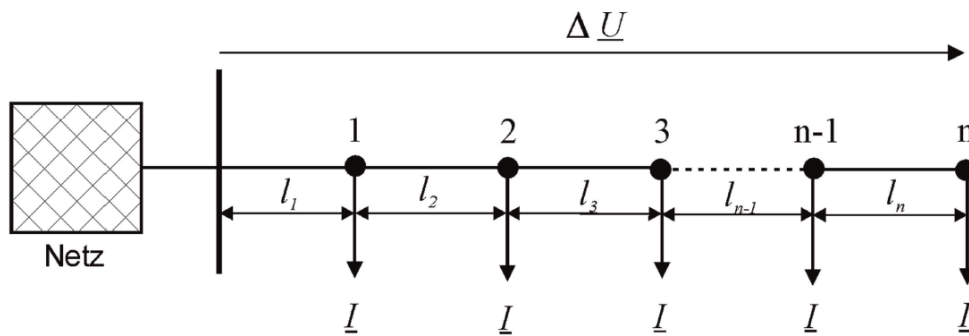


Abbildung 5: Netzstrahl ohne Verzweigungen

$$\Delta U = I(R' + jX') \cdot [l_1 + (l_1 + l_2) + \dots + (l_1 + l_2 + \dots + l_n)] \quad (1)$$

Bei Berücksichtigung unterschiedlicher Leitungstypen müssen für die Leitungsabschnitte unterschiedliche Widerstandsbeläge berücksichtigt werden (Gleichung (2)). In diesem Fall entspricht der Ausdruck in den eckigen Klammern dem Verbraucher-summenwiderstand $\sum R_V$ einer mit n gleichen Verbrauchern belasteten Leitung. Er stellt eine charakteristische Größe für den lastabhängigen Spannungsfall am Netzstrahl dar.

$$\Delta U = I \cdot [n \cdot l_1(R'_1 + jX'_1) + (n - 1) \cdot l_2(R'_2 + jX'_2) + \dots + 1 \cdot l_n(R'_n + jX'_n)] \quad (2)$$

Für drei Verbraucher (also drei Wechselrichter) lässt sich der Widerstand eines Abschnitts des extremen Netzstrahls unter der Annahme, dass diese jeweils identisch sind, nach Gleichung (3) berechnen. Analoges gilt für den typischen Fall.

$$R = \frac{\sum R_V}{6} = \frac{1,85 \Omega}{6} = 0,154 \Omega \quad (3)$$

Es ergeben sich somit je Leitungsabschnitt die in Tabelle 1 dargestellten Parameter.

Tabelle 1: berechnete Netzparameter für das untersuchte Landnetz

Netztyp	R	X	L	Länge
typisch	0,141 Ω	0,075 Ω	0,224 mH	317 m
extrem	0,308 Ω	0,154 Ω	0,490 mH	690 m

Für den Transformator werden für den typischen und extremen Netzstrahl eine Bemessungsleistung von 100 kVA, eine bezogene Kurzschlussspannung von 4 % und ein R/X-Verhältnis von 0,3 angenommen. Unter Vernachlässigung des ohmschen

Widerstands des Transformators wird dieser nur durch seine berechnete Induktivität von 0,25 mH nachgebildet.

3.1.2 Realisierung des Modellnetzes

Die Leitungsabschnitte werden durch konzentrierte Induktivitäten und Widerstände nachgebildet. Durch Variation der Elemente lassen sich ein langer (Extremwertnetz) und ein typischer Netzstrang nachbilden. Der Transformator wird durch eine konzentrierte Induktivität nachgebildet. Um den Versuchsaufbau möglichst flexibel zu halten und die verwendeten Widerstände und Induktivitäten zu standardisieren werden nur baugleiche Widerstände mit $R = 0,15 \Omega$ und Induktivitäten mit $L = 0,25 \text{ mH}$ verwendet (Abbildung 6). Damit kann man mit für die geplanten Untersuchungen mit hinreichender Genauigkeit die in Tabelle 1 zusammengefassten Netzparameter erreichen.

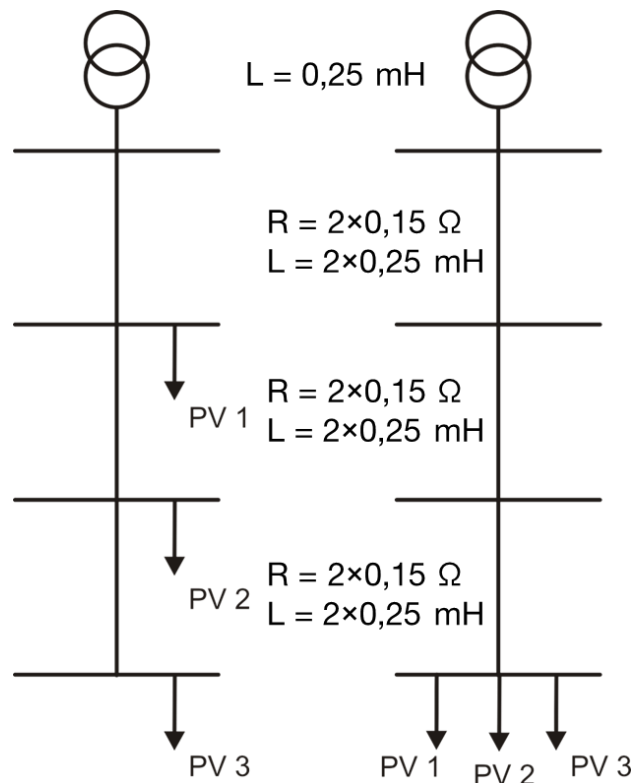


Abbildung 6: Netzmodell des Versuchstands (extremer Fall)

Als Widerstände wurden als Rohrwiderstände ausgeführte Bremswiderstände aus der Antriebstechnik verwendet. Diese haben zwar einen etwas höheren Toleranzbereich als kompakte Widerstände können aber durch Konvektion gekühlt werden. Somit entfallen aufwendige Installationen wie Kühlbleche und Lüfter. Die Widerstände wurden von der Firma Heine Resistors GmbH bezogen. Sie haben einen Widerstand von $R = 0,15 \Omega \pm 10 \%$ und einen Bemessungsstrom von 45 A.

Als Induktivitäten werden Drosseln der Firma Tramag Transformatorenfabrik GmbH & Co. KG verwendet. Sie weisen eine Induktivität von 0,25 mH auf und sind für einen Bemessungsstrom von 45 A ausgelegt.

Abbildung 7 zeigt die realisierte Anordnung von Widerständen und Induktivitäten für einen Leitungsabschnitt. Für den extremen Abschnitt werden der linke und der rechte Teil in Reihe geschaltet für den typischen Fall wird der rechte Teil überbrückt.

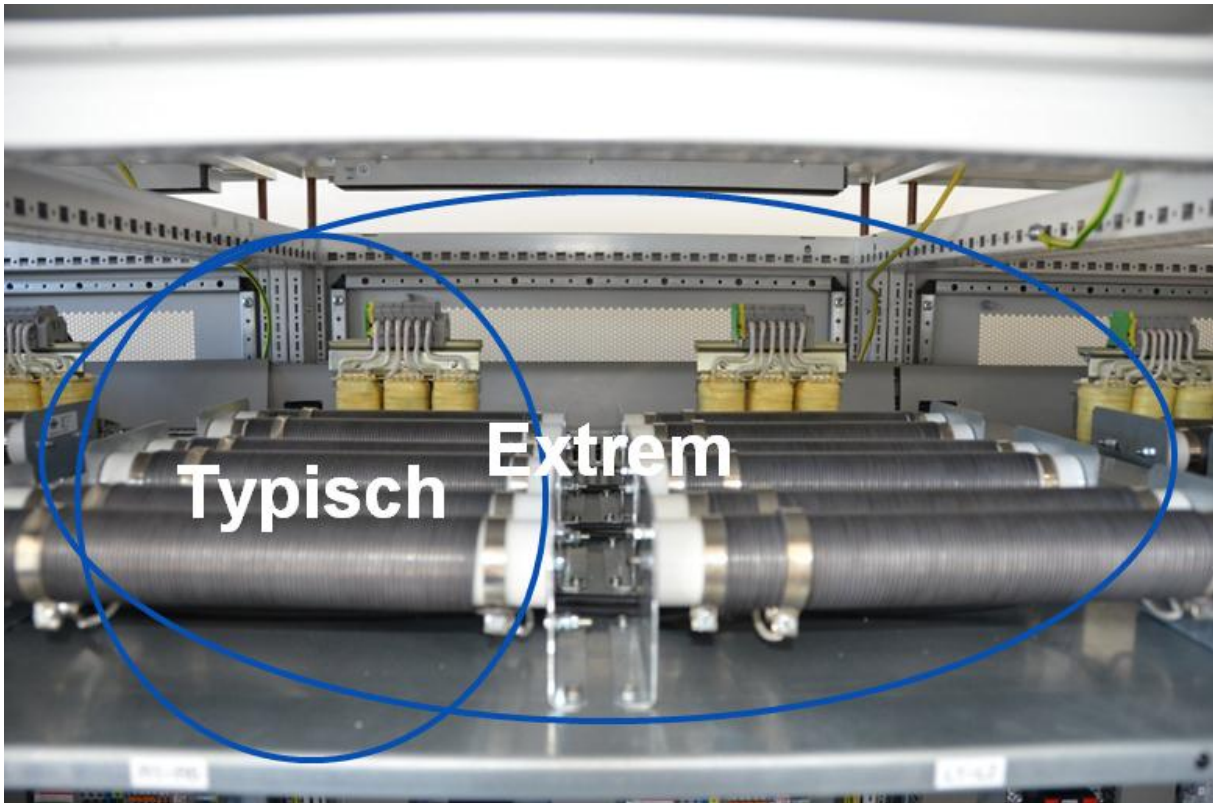


Abbildung 7: Widerstände (im Vordergrund) und Induktivitäten (im Hintergrund)

Für den extremen Fall ergeben sich somit folgende Werte für R und X (Gleichungen (4) und (5)).

$$R = 3 \cdot 0,3 \, \Omega = 0,9 \, \Omega \quad (4)$$

$$L = 3 \cdot 0,5 \, \text{mH} + 0,25 \, \text{mH} = 1,75 \, \text{mH} \Rightarrow X = 0,5498 \, \Omega \quad (5)$$

Somit ergibt sich die Gesamtimpedanz Z des extremen Netzstrahls nach Gleichung (6).

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} = 1,0546 \, \Omega \quad (6)$$

Die Kurzschlussleistung des nachgebildeten Netzstrahls ergibt sich nach Gleichung (7).

$$S_k'' = \frac{U^2}{Z} = 151,7 \text{ kVA} \quad (7)$$

Damit ergibt sich für den extremen Fall, falls alle Wechselrichter am Ende des Netzstrahls angeschlossen werden, ein Verhältnis von Kurzschlussleistung zu angeschlossener Leistung nach Gleichung (8).

$$\frac{S_k''}{P_{WR}} = \frac{151,7 \text{ kVA}}{30 \text{ kW}} \approx 5 \quad (8)$$

In der Praxis liegt gegenwärtig die typische Anfangskurzschlusswechselstromleistung S_k'' in Niederspannungsnetzen nach [13] zwischen 2 MVA und 50 MVA.

Nach [10] kann eine weitergehende Anschlussbeurteilung hinsichtlich Oberschwingungen im Niederspannungsnetz entfallen, wenn Gleichung (9) erfüllt ist.

$$\frac{S_k''}{S_{\text{angeschlossen}}} \geq 150 \quad (9)$$

Der Versuchsaufbau simuliert also ein Netz mit sehr hoher Durchdringung regenerativer Einspeiser. Somit wird eine für das Stabilitätsverhalten des Gesamtsystems extreme Situation nachgebildet. Zeigen sich hier keine Anzeichen für instabiles Verhalten, so sind auch im Felde keine zu erwarten.

3.2 Messung

Die Messungen wurden mit vier Siemens Sentron PAC 4200 Multifunktionsmessgeräten realisiert. Gemessen werden jeweils gemittelt über 10 Netzperioden (also 200 ms):

- Außenleiterspannungen U_1 , U_2 und U_3
- Ströme I_1 , I_2 und I_3
- Wirkleistung P_1 , P_2 , P_3 und P_{gesamt}
- Blindleistung Q_1 , Q_2 , Q_3 und Q_{gesamt}
- Scheinleistung S_1 , S_2 , S_3 und S_{gesamt}
- Leistungsfaktor $\cos \varphi$
- Oberschwingungsgehalt (Total Harmonic Distortion, THD) von Spannung und Strom
- Unsymmetrie von Strom und Spannung

Als Messwandler kommen Stromwandler des Typs MBS WSK 70.6N (Genauigkeitsklasse 0,5) der Firma MBS AG zum Einsatz. Abbildung 8 zeigt im Detail, wie der Aufbau des Messteils des Versuchsstands ausgeführt ist.



Abbildung 8: Messanordnung bestehend aus Sentron PAC 4200 (oben) und Stromwandlern (unten)

Die Messwerte werden im 200 ms Takt von den Messgeräten über Modbus TCP abgerufen.

3.3 Wechselrichter

Um möglichst realitätsnahe Situationen nachbilden zu können, werden drei handelsübliche Wechselrichter mit einer Bemessungsleistung von jeweils 10 kVA verwendet.

Jeder der beteiligten Hersteller stellte ein Modell zur Verfügung. Im Einzelnen handelt es sich um folgende Typen:

- SMA SUNNY TRIPOWER 10000TL
- KACO Powador 10.0 TL3
- Siemens SINVERT PVM 10

Die Wechselrichter sind in der Lage, eine $Q(U)$ -Regelung, die durch eine abschnittsweise lineare Kennlinie vorgegeben wird, durchzuführen. Die Kennlinie dieser abschnittsweise linearen $Q(U)$ -Relation besteht aus mindestens drei Geradenstücken. Diese Geradenstücke können mit mindestens fünf Stützpunkten in der Q - U -Ebene parametrisiert werden (siehe Beispiel in Abbildung 9).

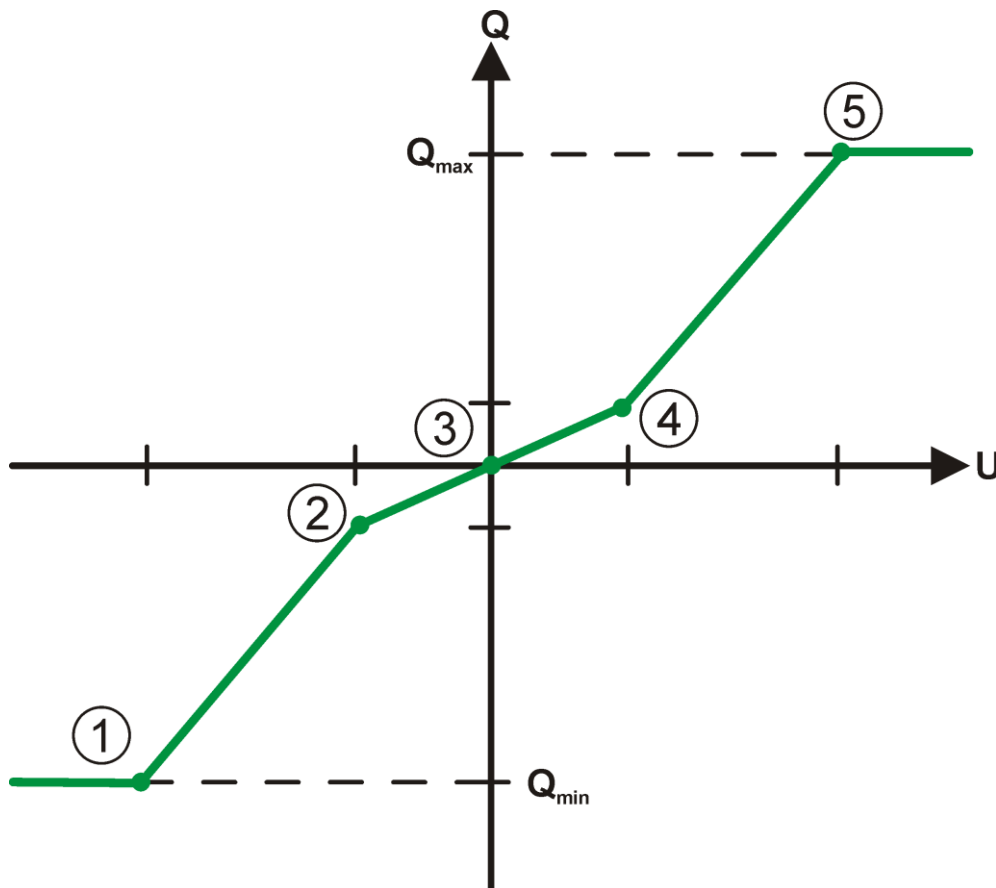


Abbildung 9: prinzipielles Beispiel einer $Q(U)$ -Kennlinie

Zudem ist eine Begrenzung der maximal auftretenden Blindleistungs-Gradienten möglich, um allfällige Instabilitäten durch Eigenfrequenzen und Messverzögerungen zu vermeiden. Deswegen ist ein PT1 Glied im Regler integriert und optional zuschaltbar. Hierbei sind jeweils die Zeitkonstanten T der PT1-Glieder parametrierbar.

Die Sprungantwort eines PT1-Gliedes wird durch Gleichung (10) beschrieben. Sie hat den Verlauf einer e-Funktion.

$$Q(t) = Q_{\max} \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) \quad (10)$$

Der Verlauf nähert sich dem Endwert Q_{\max} an. Nach der Zeit $t = T$ beträgt der Wert $0,63 Q_{\max}$ und nach $t = 3T$ bereits $0,95 Q_{\max}$. Der Betrag der Zeitkonstanten T bestimmt also die Schnelligkeit des Gliedes.

Für die Q(U)-Regelung durch die verschiedenen Wechselrichter gelten folgende Bedingungen:

- Im Wechselrichter Siemens Sinvert PVM 10 kann nicht direkt ein Sollwert Q für die Blindleistung vorgegeben werden, sondern nur ein Sollwert für den Phasenwinkel φ . Dieser Phasenwinkel ist aktuell beschränkt auf $\pm 30^\circ$. Dies entspricht einem minimalen $\cos \varphi$ von 0,87 (begrenzt zusätzlich durch die Bemessungsleistung). Für die geforderte Q(U)-Abhängigkeit wird daher ein externes Steuergerät vorgeschaltet (per Ethernet). Das Steuergerät (Sitrax DPU) liest zyklisch neben der aktuellen AC-Netzspannung U (Mittelwert der Effektivwerte L1-N, L2-N, L3-N) auch die aktuelle Wirkleistung P und schreibt den daraus errechneten Sollwert für φ . Der Wechselrichter wird mit aktiviertem MPP-Tracker betrieben.
- Im Wechselrichter SMA SUNNY TRIPOWER 10000TL wird die Q(U)-Regelung über die Software SMA SUNNY EXPLORER via Bluetooth parametrierbar. Dabei ist abweichend von Abbildung 9 eine Vorgabe der Größe des Totbandes und der Steigung der Q(U) Kennlinie jeweils in ganzzahligen Prozentwerten möglich. Die Blindleistung ist herstellerseitig auf 50 % der Geräteleistung begrenzt. Der Wechselrichter wird im Konstantspannungsbetrieb mit $U_{DC} = 600 \text{ V}$ betrieben.
- Im Wechselrichter KACO Powador 10.0 TL3 wird der Q(U) Regler über eine RS 485 Schnittstelle parametrierbar. Der minimale $\cos \varphi$ beträgt hier 0,8. Der Wechselrichter wird mit aktiviertem MPP-Tracker betrieben.

Hinsichtlich der Parametrierung und Realisierung der Q(U)-Kennlinien in Wechselrichtern existiert noch kein Standard. Deswegen unterscheiden sich die im Rahmen dieser Studie verwendeten Wechselrichter in der Art und Weise, wie jeweils die Kennlinien vorzugeben sind und wie genau die Regelung dann im Wechselrichter umgesetzt wird. Dies beeinträchtigt jedoch nicht der Aussagekraft der im Rahmen

der vorliegenden Studie erzielten Ergebnisse, da somit als Nebeneffekt auch das Verhalten einer Q(U)-Regelung bei jeweils unterschiedlicher Umsetzung in den einzelnen Wechselrichtern untersucht werden kann.

3.4 Gesamtaufbau

Der Gesamtaufbau der Versuchsanlage ist in Abbildung 10 dargestellt. Links und rechts elektrisch am Ende des Netzstrahls, befindet sich der Wechselrichter von KACO, in der Mitte der von SMA und rechts und elektrisch im Beginn des Netzstrahls, der von Siemens. Die elektrische Reihung der Wechselrichter erfolgte zufällig und kann unabhängig vom mechanischen Versuchsaufbau geändert werden. Unten befinden sich jeweils DC-Netzteile, die die Wechselrichter ansteuern. Mittig folgen Messeinheit und Klemmleisten. Oben (nicht im Bild) befindet sich jeweils in Abbildung 7 gezeigte Netznachbildung.

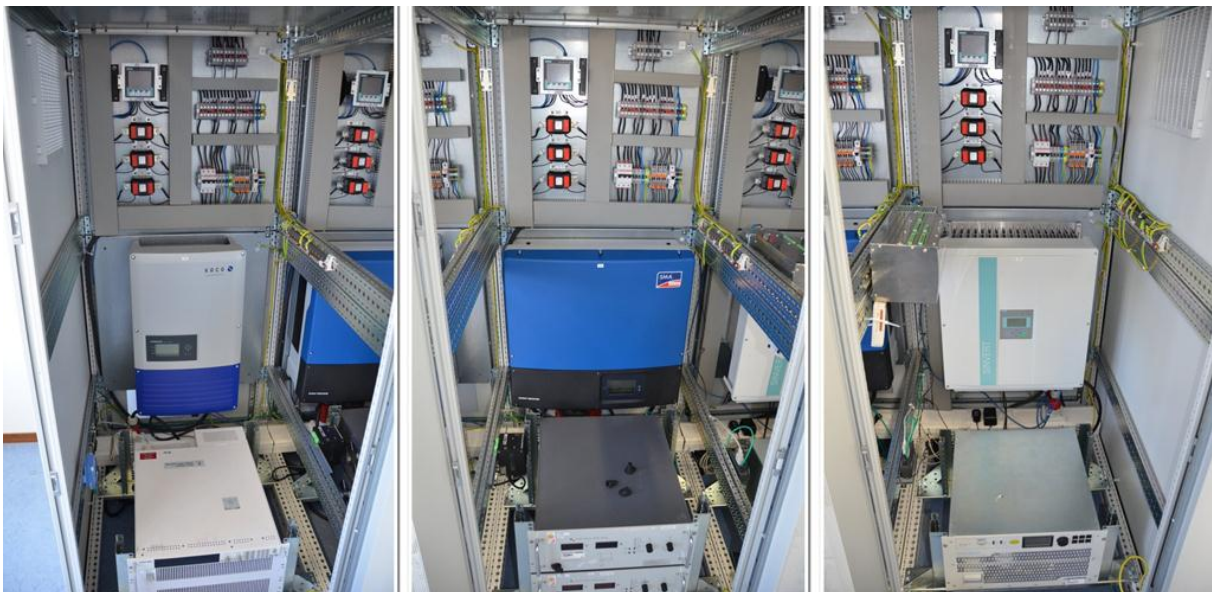


Abbildung 10: Gesamtaufbau des Versuchstands

Abbildung 11 zeigt einen Überblick über den gesamten Versuchstand. Der Schaltschrank im Vordergrund beinhaltet die Sicherheitssteuerung und die elektrische Versorgung der Versuchsanlage. In den Schränken, die hinter der Abschrankung zu erkennen sind, befindet sich die in Abbildung 10 dargestellte Installation.



Abbildung 11: Überblick über den gesamten Versuchsstand

3.5 Vergleich mit bisherigen Untersuchungen

In [5] wurde bereits ein Funktionsmustertest im Labor durchgeführt. Dabei konnten allfällige Instabilitäten der $Q(U)$ -Regelung nicht ausgeschlossen werden. Aus mehreren Gründen sind die damals erzielten Ergebnisse nur eingeschränkt aussagekräftig. Diese sollen im Folgenden dargelegt werden:

3.5.1 Netznachbildung

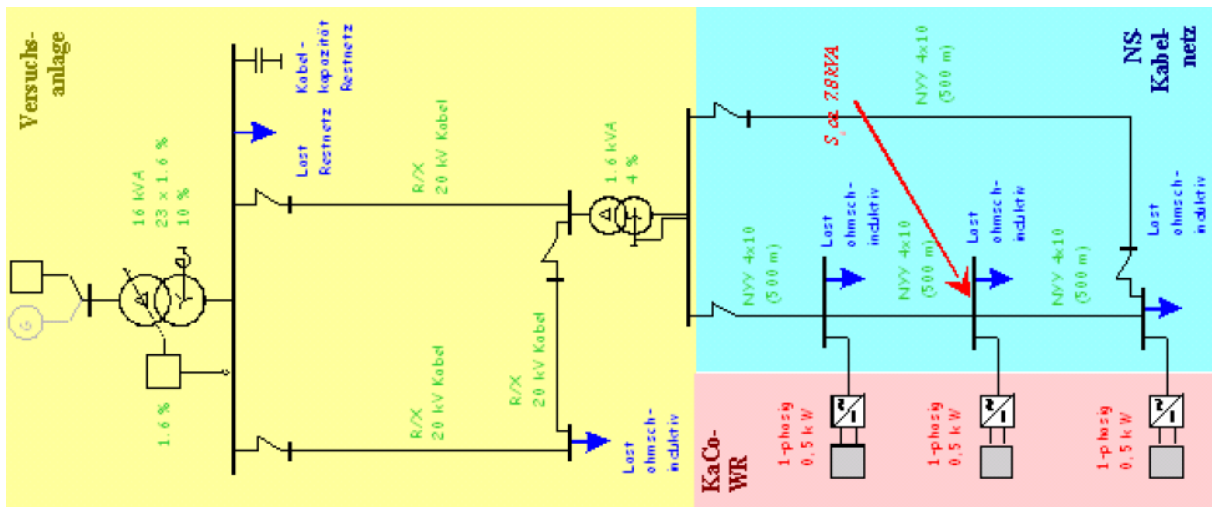


Abbildung 12: Netznachbildung einer Vorgängerstudie (Abbildung direkt aus [5] übernommen)

Abbildung 12 zeigt die in der oben genannten Vorgängerstudie verwendete Netznachbildung.

Angegeben wird hier für den Anschlusspunkt des mittleren Wechselrichters eine Kurzschlussleistung von $S_k'' = 7,8 \text{ kVA}$. Hieraus lässt sich nach Gleichung (11) die Netzimpedanz Z berechnen.

$$Z = \frac{U^2}{S_k''} = \frac{(400 \text{ V})^2}{7,8 \text{ kVA}} = 20,5 \Omega \quad (11)$$

Für die beiden Transformatoren mit 1,6 kVA bzw. 16 kVA lassen sich deren Impedanzen Z_{T1} und Z_{T2} nach den Gleichungen (12) und (13) berechnen.

$$Z_{T1} = u_k \cdot \frac{U^2}{S_r} = 0,1 \cdot \frac{(400 \text{ V})^2}{16 \text{ kVA}} = 1 \Omega \quad (12)$$

$$Z_{T2} = u_k \cdot \frac{U^2}{S_r} = 0,04 \cdot \frac{(400 \text{ V})^2}{1,6 \text{ kVA}} = 4 \Omega \quad (13)$$

Der ohmsche Anteil u_R der bezogenen Kurzschlussspannungen wird grob mit 1,5 % abgeschätzt. Somit ergeben sich die ohmschen Widerstände R_{T1} und R_{T2} nach den Gleichungen (14) und (15).

$$R_{T1} = u_r \cdot \frac{U^2}{S_r} = 0,015 \cdot \frac{(400 \text{ V})^2}{16 \text{ kVA}} = 0,15 \Omega \quad (14)$$

$$R_{T2} = u_r \cdot \frac{U^2}{S_r} = 0,015 \cdot \frac{(400 \text{ V})^2}{1,6 \text{ kVA}} = 1,5 \Omega \quad (15)$$

Somit lassen sich die Reaktanzen der Transformatoren nach den Gleichungen (16) und (17) abschätzen.

$$X_{T1} = \sqrt{Z_{T1}^2 - R_{T1}^2} = 0,99 \Omega \quad (16)$$

$$X_{T2} = \sqrt{Z_{T2}^2 - R_{T2}^2} = 3,7 \Omega \quad (17)$$

Das Kabel NYY 4×10 mm² hat laut Datenblatt einen Widerstandsbelag von $R' = 1,85 \Omega/\text{km}$. Somit ergibt sich der Leitungswiderstand R_L , den der mittlere Wechselrichter sieht, nach Gleichung (18).

$$R_L = R' \cdot l = 1,85 \frac{\Omega}{\text{km}} \cdot (500 \text{ m} + 500 \text{ m}) = 1,85 \Omega \quad (18)$$

Somit lässt sich die Reaktanz X_L der Leitung nach Gleichung (19) abschätzen.

$$X_L = \sqrt{Z^2 - (R_{T1} + R_{T2} + R_L)^2} - X_{T1} - X_{T2} = 15,5 \Omega \quad (19)$$

Dies entspricht einem R/X-Verhältnis der Leitung nach Gleichung (20).

$$\frac{R}{X} = \frac{R_L}{X_L} = \frac{1,85 \Omega}{15,5 \Omega} = 0,12 (!) \quad (20)$$

Solche Netzverhältnisse sind in Niederspannungsnetzen nicht anzutreffen. Hier sind Werte von $R/X = 2$ für Freileitungen und $R/X = 2,5$ für Kabel typisch. Ein R/X von 0,12 wäre höchstens in Hochspannungsnetzen anzutreffen. Aufgrund des dominierenden induktiven Anteils der Netznachbildung der Vorgängeruntersuchung reagiert diese wesentlich empfindlicher auf Blindleistungsänderungen. Bereits eine Blindleistungsänderung von 100 Var bewirkte in der Vorgängeruntersuchung eine Spannungsänderung von 10 V (!). Damit wurde ein viel zu empfindliches Gesamtsystem im damaligen Labornetz realisiert, das in der Realität auch nicht annähernd angetroffen werden kann. Dies erklärt, warum in der Vorgängeruntersuchung eine Instabilität des Systems nicht ausgeschlossen werden konnte.

Anmerkung: Nach Datenblatt weist ein NYY 4×10 mm² einen Induktivitätsbelag $L' = 0,301 \text{ mH/km}$ auf. Somit würde sich die Reaktanz des Kabels nach Gleichung (21) ergeben.

$$X_L = l \cdot 2\pi f \cdot L' = 1 \text{ km} \cdot 2\pi \cdot 50 \text{ Hz} \cdot 0,301 \text{ mH} = 0,0946 \Omega \quad (21)$$

Dies entspräche einem R/X-Verhältnis der Leitung nach Gleichung (22).

$$\frac{R}{X} = \frac{R_L}{X_L} = \frac{1,85 \Omega}{0,0946 \Omega} = 19,6 \quad (22)$$

Dieser Tabellenwert passt nicht zu dem in Gleichung (19) abgeschätzten Wert. Allerdings muss der Wert aus Gleichung (19) zutreffend sein, denn nur mit einer so großen Induktivität des Modellnetzes lassen sich die Ergebnisse der Vorgängerstudie erklären. Die Gründe für diese dominierende Induktivität im Netzmodell können hier aufgrund fehlender Informationen nicht genau nachvollzogen werden. Eine Ursache könnte in der Aufwicklung des Kabels auf Kabeltrommeln liegen. Dies sei in folgender Überlegung kurz dargelegt. Da keine genauen Daten über die verwendeten Kabeltrommeln außer Abbildung 13 vorliegen, werden vereinfachte Annahmen getroffen.



Abbildung 13: Realisierung des Modellnetzes der Vorgängerstudie (direkt aus [6] übernommen)

Es werden für eine Kabeltrommel folgende Werte angenommen:

- Mittlerer Durchmesser der Wicklung: $d = 70 \text{ cm}$
- Anzahl der Wicklungen $N \approx \frac{\text{Kabellänge}}{\text{mittlerer Wicklungsumfang}} = \frac{500 \text{ m}}{\pi \cdot 0,7 \text{ m}} \approx 227$
- Durchmesser Kabel NYY $4 \times 10 \text{ mm}^2$: $18,5 \text{ mm}$
- Länge der Spule bei (hypothetisch) einlagiger Wicklung: $l = N \cdot 18,5 \text{ mm} = 227 \cdot 18,5 \text{ mm} = 4,2 \text{ m}$

Daraus lässt sich nach Gleichung (23) die Induktivität der Kabeltrommel abschätzen.

$$L = N^2 \frac{\mu_0 \mu_r \cdot A}{l} = 227^2 \cdot \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}} \cdot 2\pi \cdot \left(\frac{0,7 \text{ m}}{2}\right)^2}{4,2 \text{ m}} = 11,9 \text{ mH} \quad (23)$$

Dies ergibt einen Reaktanzbelag für den Ort des mittleren Wechselrichters in Abbildung 12 nach Gleichung (24).

$$X_L = 2 \cdot 2\pi \cdot 50 \text{ Hz} \cdot 11,9 \text{ mH} = 7,5 \Omega \quad (24)$$

In Abbildung 13 ist zu erkennen, dass es sich bei den Kabeltrommeln nicht um einlagige Wicklungen handelt, sondern um mehrlagige Wicklungen. Dadurch würde sich die Reaktanz der Anordnung noch weiter erhöhen.

Dieses stark vereinfachte Beispiel legt nahe, dass durch die Verwendung von Kabeltrommeln im Versuchstand unrealistisch große Induktivitäten im Netzmodell vorhanden sind.

Das in der vorliegenden Studie nachgebildete Netz entspricht so gut wie möglich realen Verhältnissen (siehe Abschnitt 3.1.2). Hier ist der induktive Anteil des Netzes deutlich geringer. Das Netz reagiert somit unempfindlicher auf Blindleistungsänderungen und weist ein größeres Dämpfungsverhalten auf. Außerdem werden die Wechselrichter im Gegensatz zur Vorgängerstudie (vgl. 3.5.2) in realitätsnahen Betriebsbereichen betrieben.

3.5.2 Versuchsdurchführung

Die Versuchsdurchführung der Vorgängerstudie orientierte sich in zwei Punkten ebenfalls nicht an realistischen Fällen.

- **Ansteuerung der Wechselrichter:**

In der Vorgängerstudie wurden die Wechselrichter durchgehend mit konstanter Leistung betrieben. Es wurden keine realistischen Einspeiseprofile mit typischen Gradienten verwendet. Somit traten im Netzmodell auch keine durch PV-Einspeisung verursachten Spannungsänderungen auf, auf die eine Q(U)-Regelung reagieren müsste. Die Regelung wurde indirekt aktiviert. Es wurde in der Software des Reglers ein Sollwertsprung eingegeben, auf welchen dann der Regler reagierte. Dieses Vorgehen entspricht keiner in realen Netzen auftretenden Situation.

Zudem wurden die Wechselrichter in der Vorgängerstudie im minimalen Teillastbereich betrieben (500 W bei $P_r = 1500 \text{ W}$), und nicht in Betriebsbereichen, wie sie im praktischen Einsatz typischerweise vorherrschen. In diesem minimalen Teillastbereich kann in der Realität eine Q(U)-Regelung kaum wirksam werden und zudem können größere Ungenauigkeiten in der Regelung auftreten. Der Betrieb der Wechselrichter bei zu kleinen Anteilen der Nennleistung kann zu Problemen in Messwertaufbereitung und Regelung führen.

Außerdem wurde die Untersuchung in der Vorgängerstudie mit einphasigen Wechselrichtern durchgeführt.

- **Wahl der Parameter:**

Die Parameter der Q(U)-Regelung wurden aus [4] übernommen. Die dort vorgeschlagenen Parameter sind jedoch nur für realistische Netzverhältnisse richtig. Aufgrund der dominierenden Induktivität des Netzmodells hätten die Parameter der Regelung (insbesondere die Steigung der Q(U)-Kennlinie) auf diese angepasst werden müssen. Somit wäre zumindest eine maßstäblich realitätsnahe Situation möglich gewesen.

In der Vorgängerstudie wurde mit einer Q(U)-Kennlinie ohne Totband gearbeitet. Diese konnte durch ihre Steigung $k_{QU} = \frac{\Delta Q}{\Delta U}$ und eine Gradientenbegrenzung $\frac{\Delta Q}{\Delta t}$ parametrisiert werden. Als kritischer Parametersatz wurde hierbei $k_{QU} = 58$ und $T = 5$ s gewählt. Der $\cos \varphi$ war auf 0,9 begrenzt. Dies entspricht einem Q_{\max} von 0,436 p.u. Somit lässt sich die Spannung, ab der diese maximale Blindleistung erreicht wird, nach Gleichung (25) bestimmen.

$$\Delta U = \frac{\Delta Q}{k_{QU}} = \frac{0,436 \text{ p.u.}}{58} = 0,00751 \text{ p.u.} \quad (25)$$

Dies entspricht einer Spannungsdifferenz von 1,72 V. Der in der Vorgängerstudie verwendete kritischste Parametersatz ist in einer ähnlichen Größenordnung, wie der in der vorliegenden Studie verwendete Parametersatz.

4 Durchführung der Studie Q(U)

Im Folgenden werden wesentliche Punkte der Versuchsdurchführung am Fachgebiet Elektrische Energieversorgungsnetze der Technischen Universität München kurz erläutert.

4.1 Einspeiseprofile

Am Fachgebiet Elektrische Energieversorgungsnetze wurde im Dezember 2009 eine PV-Anlage mit einer Bemessungsleistung von 14 kW_p installiert. Die AC-Werte dieser

Anlage werden im 200 ms Takt kontinuierlich erfasst und als Sekundenmittelwerte in einer Datenbank gespeichert.

Die Studie Q(U) wurde mit drei unterschiedlichen Profilen durchgeführt:

4.1.1 Sprung

Um das Regelverhalten der einzelnen Wechselrichter untersuchen zu können, ist es notwendig, ihre Sprungantworten zu kennen. Deshalb wurden als erster Schritt Messreihen durchgeführt, bei denen die Wechselrichter einzeln mit Sprüngen der Wirkleistung beaufschlagt wurden. Es wurde das in Abbildung 14 dargestellte Einspeiseprofil verwendet. Der Verlauf beginnt nicht bei 0 kW, weil die Wechselrichter zunächst aktiviert werden müssen. Dies wird dadurch erreicht, dass zunächst allen DC-Netzteilen eine Leistung von 2,5 kW vorgegeben wird.

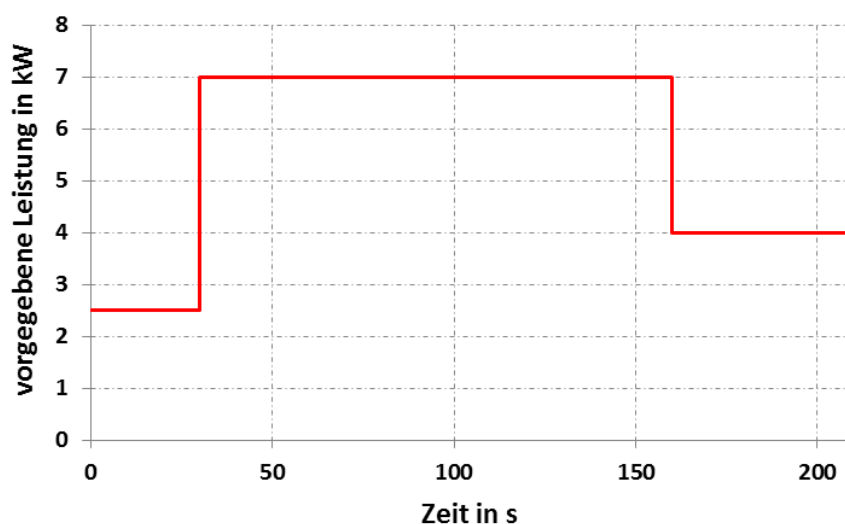


Abbildung 14: Einspeiseprofil Sprung

4.1.2 Rampe

Das Regelverhalten aller drei Wechselrichter im Gesamtsystem wurde zunächst mit einem rampenförmigen Verlauf der eingespeisten Wirkleistung untersucht. Hier kann das Regelverhalten leicht nachvollzogen und auf Plausibilität geprüft werden. Mit diesem kann nachgewiesen werden, ob sich die Q(U)-Reglung an schönen sonnigen Tagen stabil verhält. Treten bei dem verwendeten Rampenprofil keine Anzeichen für instabiles Verhalten auf, so ist auch an sonnigen Tagen, wo weit geringere Leis-

tungsgradienten auftreten kein instabiles Verhalten zu erwarten. Es wurde der in Abbildung 15 dargestellte Verlauf der Leistung verwendet.

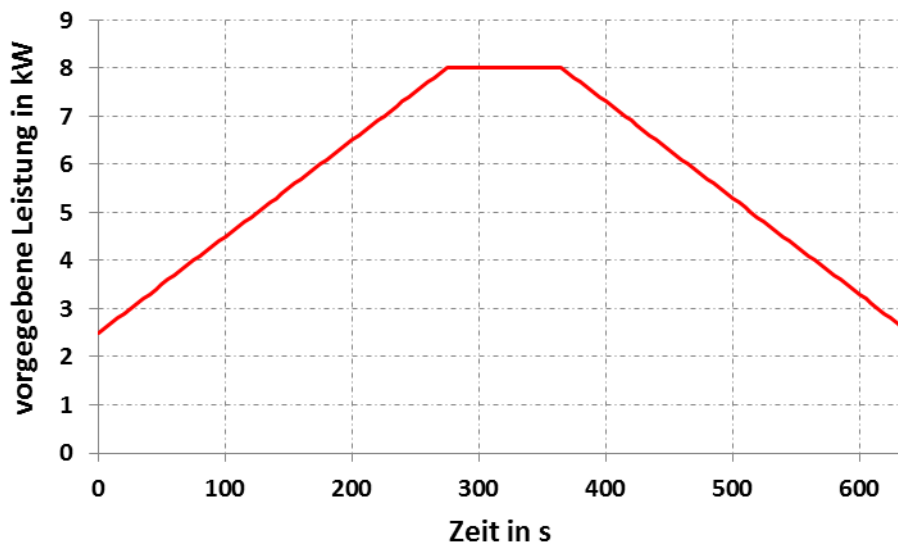


Abbildung 15: Einspeiseprofil Rampe

4.1.3 Wechselhafter Tag (Ausschnitt aus den Messreihen)

Um das Verhalten der Q(U)-Regelung an einem wechselhaften Tag zu untersuchen, wurde aus den Messreihen der PV-Anlage des Fachgebiets Elektrische Energieversorgungsnetze ein repräsentativer Ausschnitt gewählt. Hier treten die größten in der Realität zu erwartenden Änderungen der eingespeisten Leistung auf. Verhält sich die Regelung in dieser Situation stabil, so sind für den Einsatz im Felde keine weiteren Instabilitäten zu erwarten. Die Messwerte der PV-Anlage des Fachgebiets Elektrische Energieversorgungsnetze werden im Sekundentakt aufgezeichnet. In der Studie Q(U) werden die DC-Netzteile, die die Wechselrichter speisen, jedoch im 5 s-Takt angesteuert. In Abbildung 16 ist das verwendete Einspeiseprofil zu dargestellt. Deutlich ist zu erkennen, dass durch das Zeitraster von 5 s keine wesentliche Information abhandenkommt.

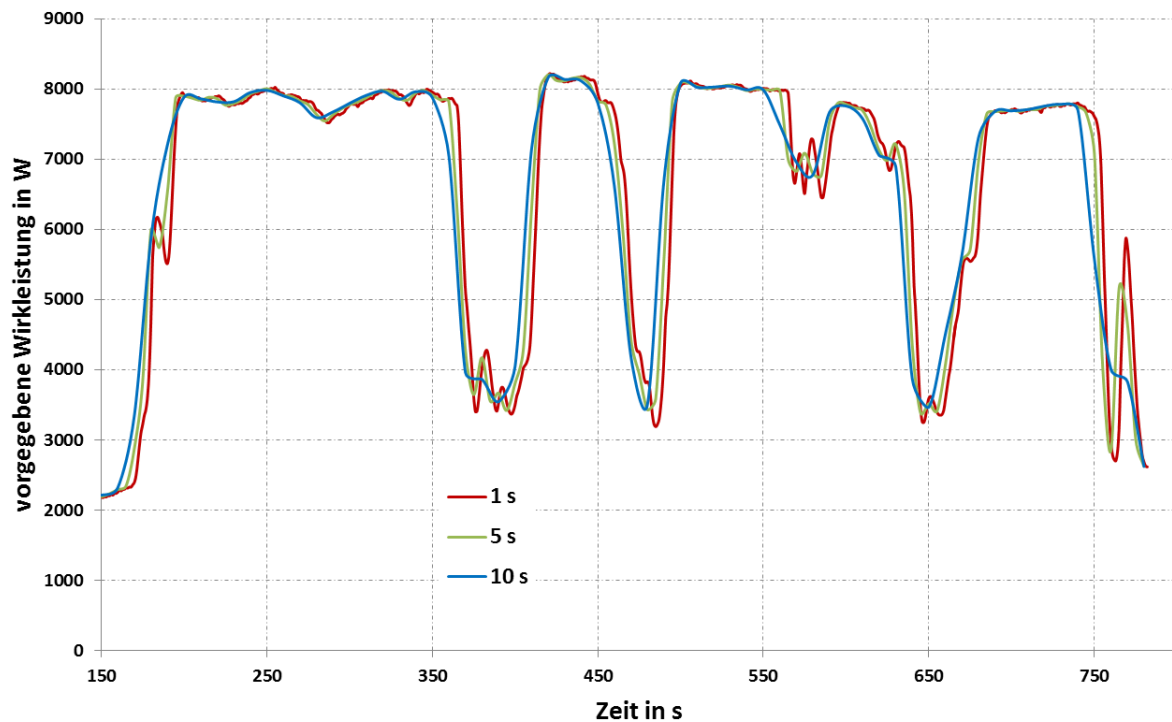


Abbildung 16: Einspeiseprofil Wechselhaft mit Vergleich Messauslösung 1 s, Mittelung über 5 s (verwendet) und Mittelung über 10 s

4.2 Ansteuerung

Die Ansteuerung des Versuchszustandes wurde weitgehend automatisiert und in NI LabView programmiert. Die Messwerte werden im 200 ms Takt aufgezeichnet.

5 Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Studie vorgestellt. Die Spannung in allen folgenden Diagrammen ist jeweils soweit nichts anderes angegeben der Mittelwert aus U_{L1} , U_{L2} und U_{L3} .

5.1 Verifikation der Q(U)-Kennlinie

Als erster Schritt wurden die Q(U)-Kennlinien der Wechselrichter verifiziert. Dies ist als Grundlage für alle folgenden Untersuchungen unerlässlich, weil nur somit sichergestellt werden kann, dass sich die Wechselrichter wie gewünscht verhalten. Hierbei wurde wie folgt vorgegangen:

- Die Netznachbildung wurde gemäß Abbildung 17 konfiguriert.

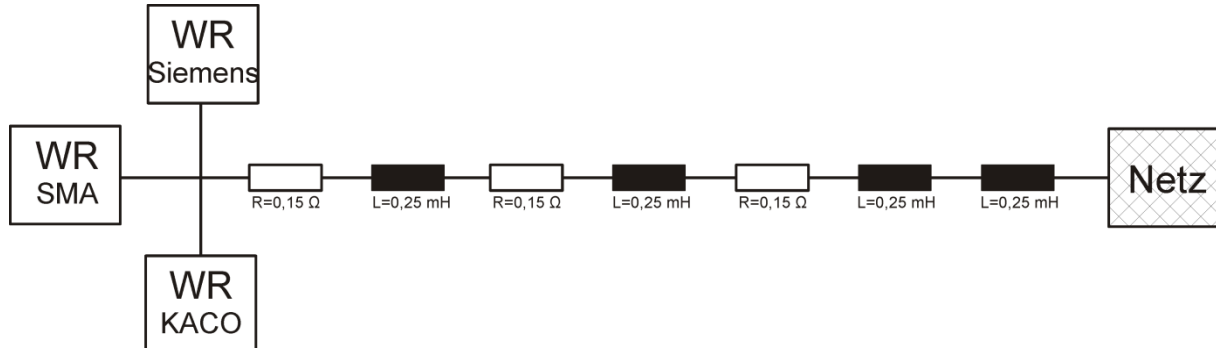


Abbildung 17: Netznachbildung für Verifikation der Q(U)-Kennlinien

- Dem Wechselrichter, dessen Kennlinie überprüft werden sollte, wurde durch sein zugehöriges DC-Netzteil eine konstante Leistung von $P = 7 \text{ kW}$ vorgegeben. Der Wechselrichter wurde so parametrisiert, dass er ab einer Spannung von 235 V beginnen soll, Blindleistung zu beziehen. Ab einer Spannung von 239 V soll eine maximale Blindleistung von 5 kVar erreicht werden. Zwischen diesen beiden Punkten soll die Kennlinie linear verlaufen.
- Den beiden anderen Wechselrichtern, deren Kennlinie jeweils nicht überprüft werden sollte, wurden durch ihre zugehörigen DC-Netzteile ein von $2,5 \text{ kW}$ bis 8 kW linear steigender Leistungsverlauf vorgegeben. Damit konnten an

dem zu überprüfenden Wechselrichter unterschiedliche Spannungen realisiert werden.

- Die aufgezeichneten Wertepaare von Spannung und bezogener Blindleistung wurden grafisch aufgetragen und mit der parametrisierten Kennlinie verglichen.

In Abbildung 18 sind die Ergebnisse für den Wechselrichter Kaco dargestellt. Es ist eine relativ gute Übereinstimmung zwischen parametrierter und gemessener Kennlinie zu erkennen. Zu beachten ist, dass der Wechselrichter Kaco als Eingangsgröße des Q(U)-Reglers den Maximalwert der drei Phasenspannungen verwendet. Die beiden anderen Wechselrichter verwenden hingegen den Mittelwert. Dies kann bei un-symmetrischen Spannungsverhältnissen im Netz, wie sie etwa durch einphasige Verbraucher auftreten können, zu unterschiedlichem Regelverhalten der jeweiligen Wechselrichter führen (siehe Abschnitt 5.3.1.3). Dementsprechend ist die Spannung in Abbildung 18 die maximale Spannung der drei Phasen.

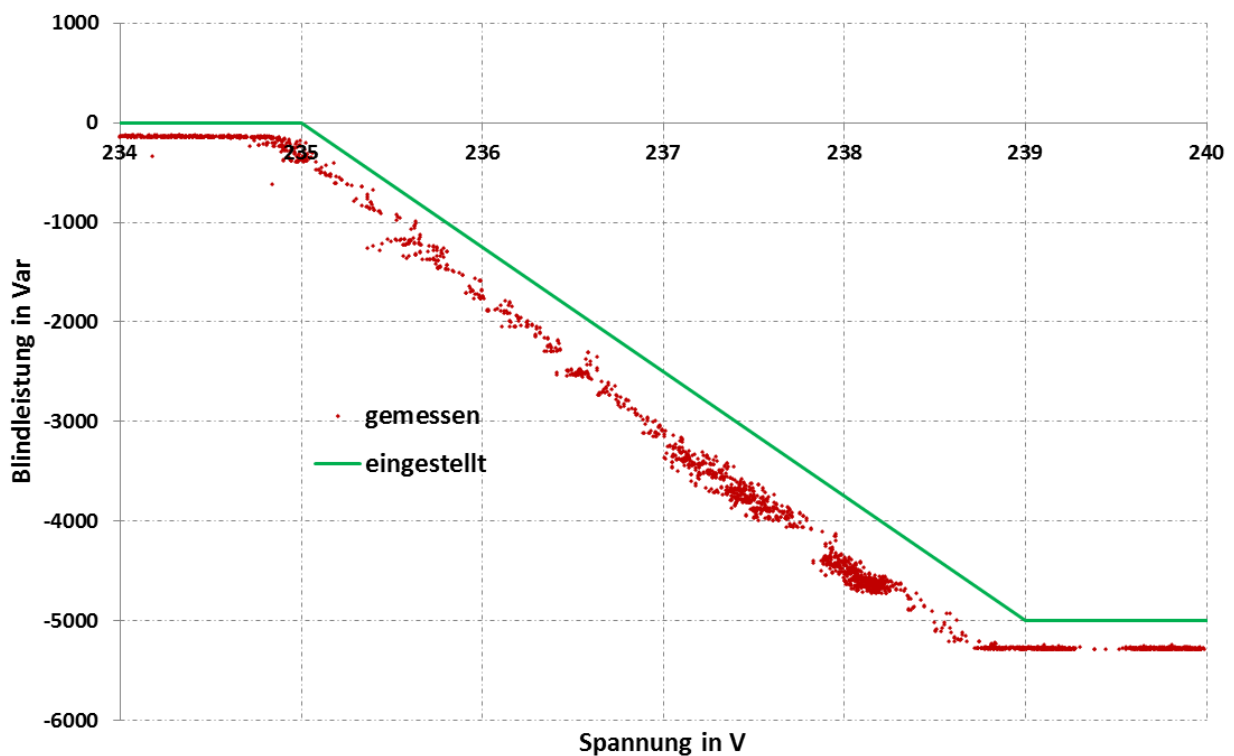


Abbildung 18: Q(U)-Kennlinie Wechselrichter Kaco

Abbildung 19 zeigt die Ergebnisse für den Wechselrichter SMA. Dargestellt sind wiederum der parametrisierte und der gemessene Verlauf der Q(U)-Kennlinie. Beide stimmen sehr gut überein. Die Parametrierung der Q(U)-Kennlinie beim Wechselrichter SMA erfolgt nicht wie bei den beiden anderen Wechselrichtern über Spannungs-Blindleistungs-Wertepaare, zwischen denen jeweils linear interpoliert wird (siehe Ab-

schnitt 3.3). Hier sind die Größe des Totbands und die Steigung der Kennlinie jeweils in ganzzahligen Prozentwerten einstellbar. Deswegen unterscheidet sich der parametrisierte Verlauf der Kennlinie leicht von den beiden anderen Wechselrichtern.

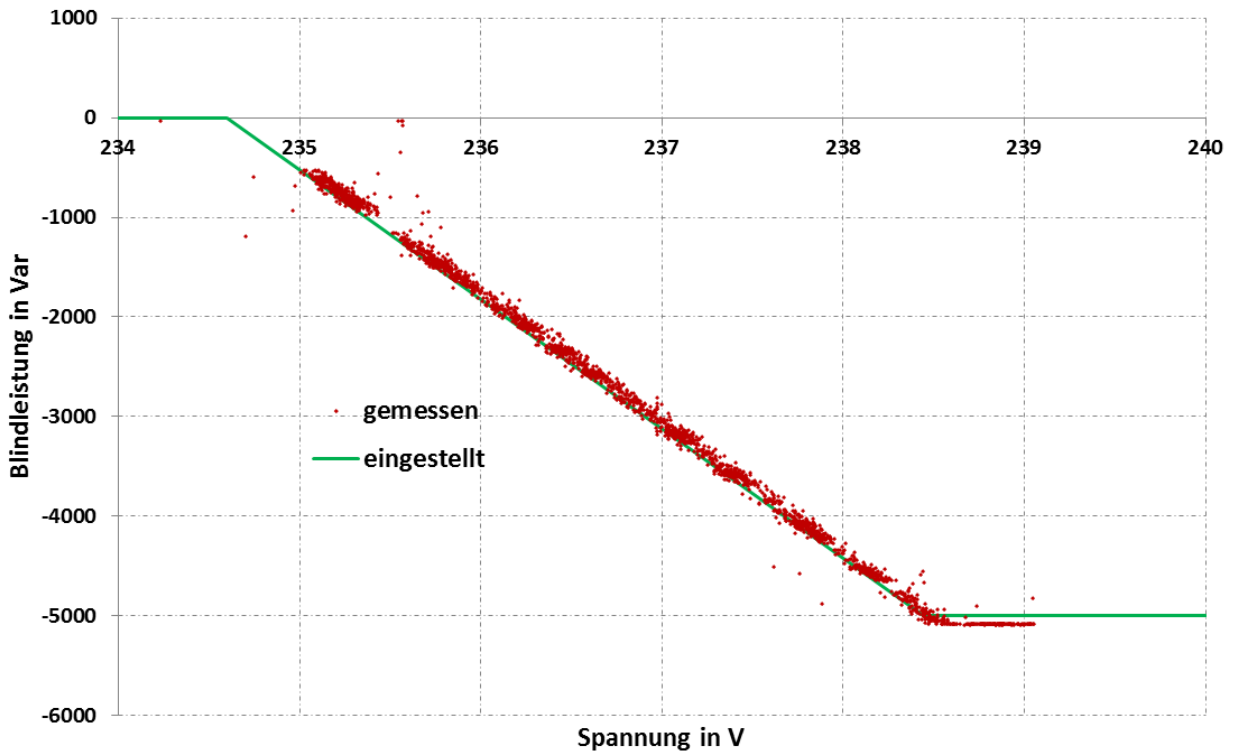


Abbildung 19: Q(U)-Kennlinie Wechselrichter SMA

Abbildung 20 zeigt die Ergebnisse für den Wechselrichter SMA. Dargestellt sind wiederum der parametrisierte und der gemessene Verlauf der Q(U)-Kennlinie. Der Wechselrichter Siemens weist im unregulierten Betrieb stets eine Blindleistungsabgabe von etwa 0,6...0,7 kVar auf. Dieser Offset tritt auch im geregelten Betrieb auf. Zudem ist die maximale Blindleistung durch einen minimalen $\cos \varphi$ von 0,87 und durch die Bemessungsleistung begrenzt. Der grundsätzliche Verlauf der Kennlinie wird für die vorliegende Studie hinreichend genau eingehalten. Auffällig ist, dass die Werte im Gegensatz zu den beiden anderen Wechselrichtern etwas stärker streuen.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass alle drei verwendeten Wechselrichter eine ihnen vorgegebene Q(U)-Kennlinie hinreichend genau in der Realität reproduzieren können. Somit ist sichergestellt, dass die im folgenden vorgestellten Ergebnisse für das Verhalten einer Q(U) Regelung aussagekräftig sind.

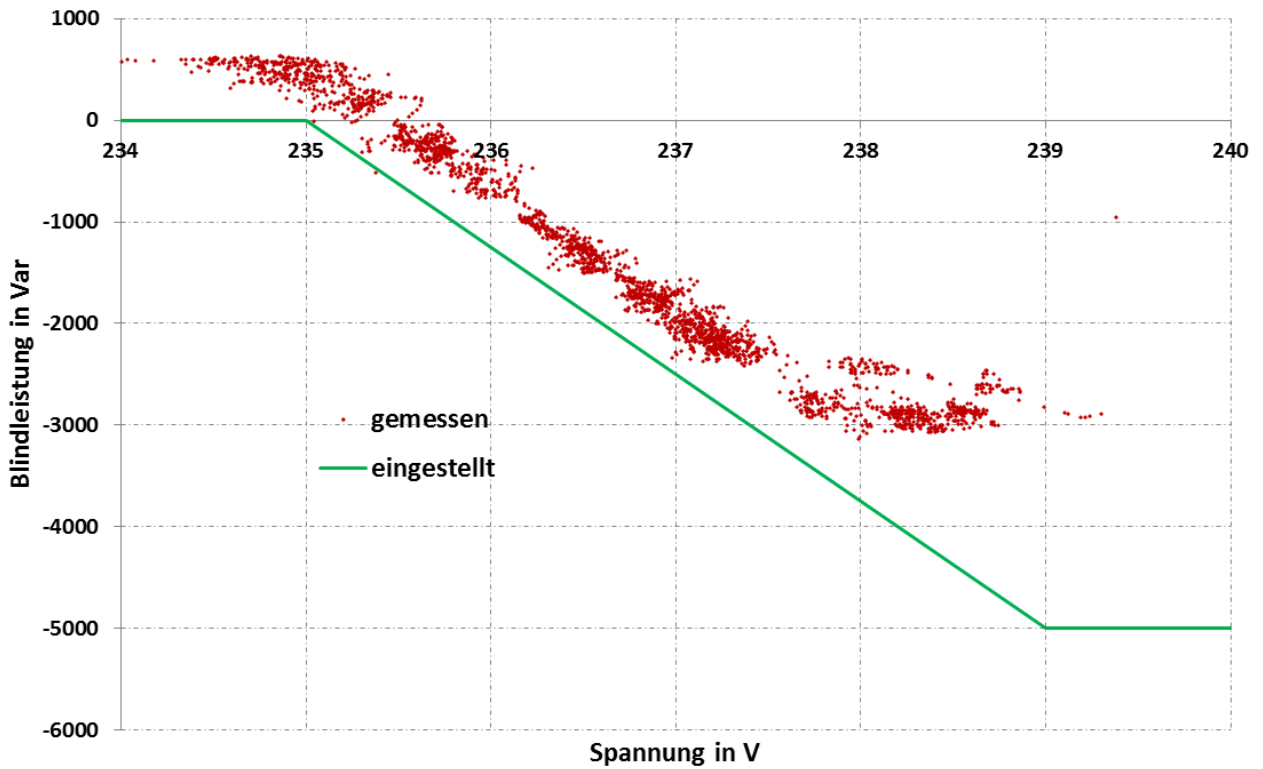


Abbildung 20: Q(U)-Kennlinie Wechselrichter Siemens

5.2 Sprungantworten der Wechselrichter

Zunächst wird das Regelverhalten jedes Wechselrichters einzeln untersucht. Hierzu wird die extreme Netzanordnung gewählt und die drei Wechselrichter sukzessive an deren Ende angeschlossen. Die resultierende Konfiguration des Netzmodells ist in Abbildung 21 dargestellt.

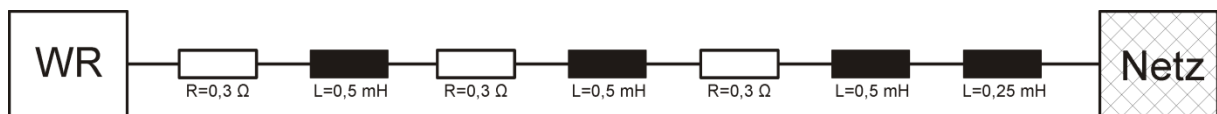


Abbildung 21: Konfiguration der Netznachbildung für Sprungantworten

Die Q(U)-Kennlinie wird jeweils wie folgt (Tabelle 2) parametrier:

Tabelle 2: Parametrierung des Q(U)-Reglers für die Untersuchung der Sprungantworten

Spannung U	232 V	235 V
Blindleistung Q	0	6000 Var

Es ergibt sich somit die in Abbildung 22 dargestellte Kennlinie. Sie besteht aus zwei definierten Spannungs-Blindleistungs-Wertepaaren, zwischen denen die Reglerkennlinie linear interpoliert wird. Für Spannungswerte kleiner 234 V wird keine Blindleistung bezogen. Für Spannungswerte größer 238 V wird durch den Regler konstant eine zu beziehende Blindleistung von 6 kVar vorgegeben. Auf eine Parametrierung der Abschnitte der allgemeinen $Q(U)$ -Kennlinie aus Abbildung 9, bei denen Blindleistung zur Spannungsstützung abgegeben werden soll, kann hier verzichtet werden. Am Modellnetz befinden sich nur Einspeiser (PV-Wechselrichter), die die Spannung im Netz erhöhen und keine Lasten, die die Spannung absenken würden. Deswegen ist hier nur der obere Teil der allgemeinen Kennlinie aus Abbildung 9 relevant und parametrierbar.

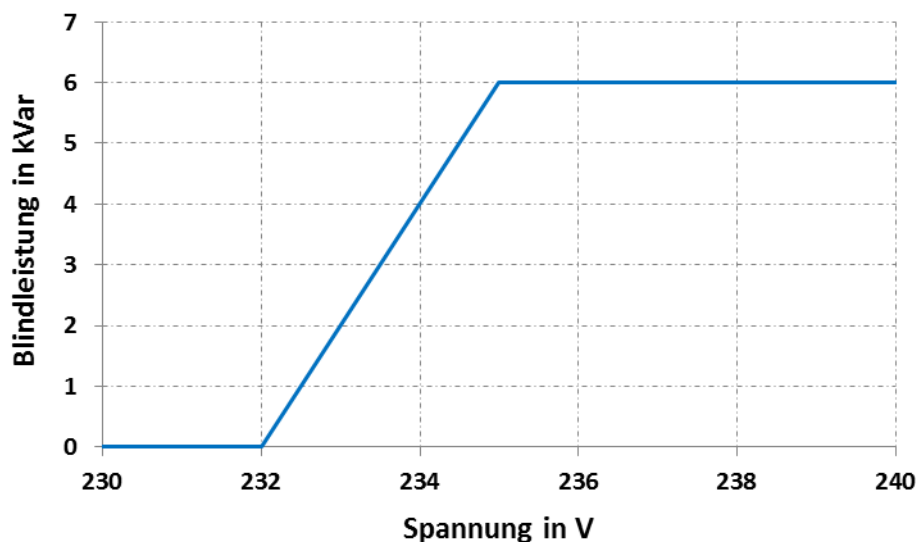


Abbildung 22: $Q(U)$ -Kennlinie für Versuchsreihe Sprungantwort

Die Zeitkonstante (Definition siehe Abschnitt 3.3) wird für jeden Wechselrichter zwischen 0 s, 5 s, 10 s, 15 s und 20 s variiert.

5.2.1 Wechselrichter KACO

Im Folgenden sind die Ergebnisse für den Wechselrichter Kaco dargestellt (Abbildung 23 bis Abbildung 27). Instabilitäten lassen sich nicht erkennen. Auch bei deaktiviertem PT1-Glied weist der Wechselrichter eine leichte Verzögerung bei der Bereitstellung von Blindleistung auf. Somit kann auch hier ein kurzes Überschwingen der Spannung nicht vermieden werden (Abbildung 23). Der Verlauf der bezogenen Blindleistung beruhigt sich bereits ab einer Zeitkonstante des PT1-Gliedes von 5 s deutlich.

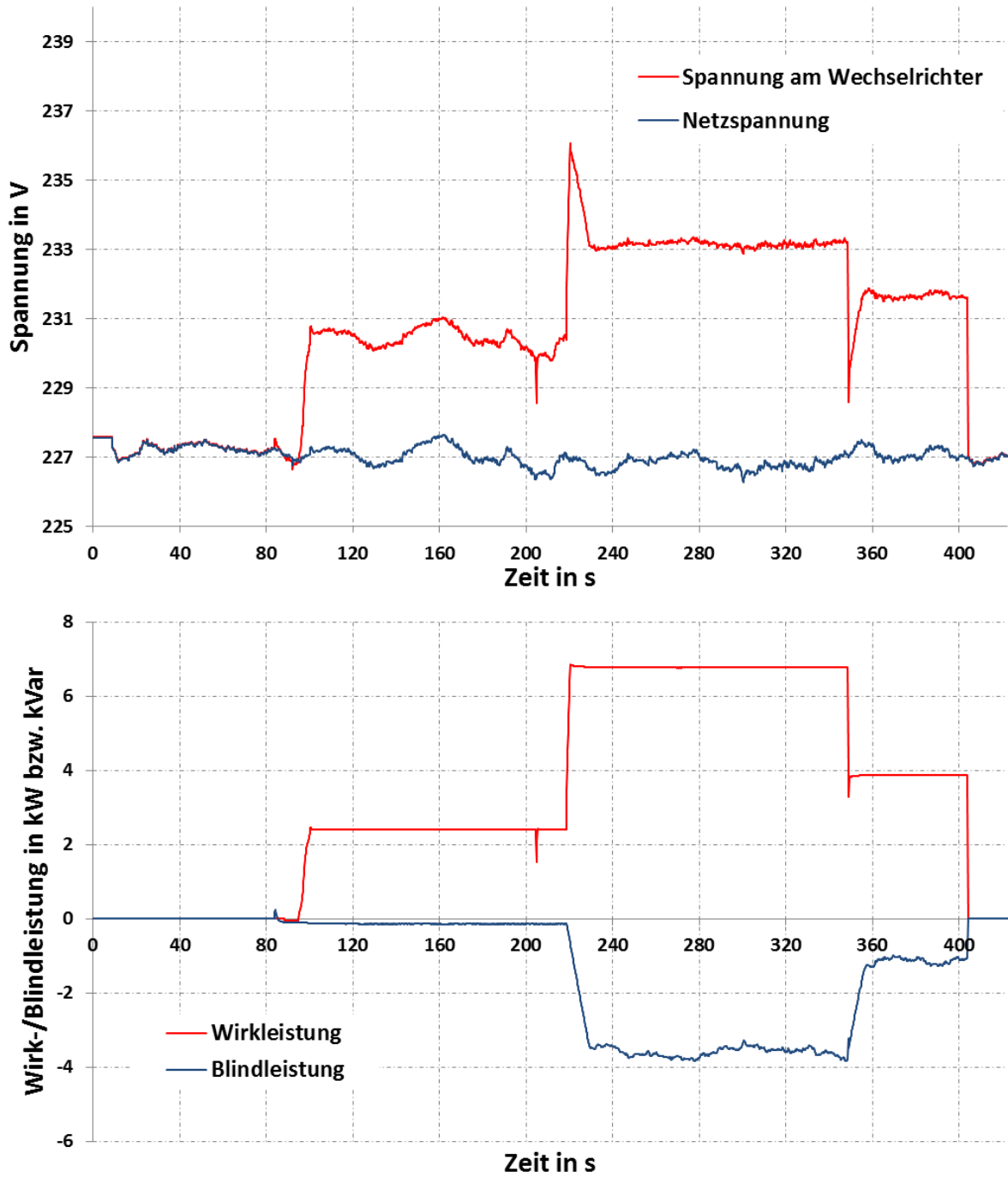


Abbildung 23: Sprungantwort Wechselrichter KACO, PT1 deaktiviert

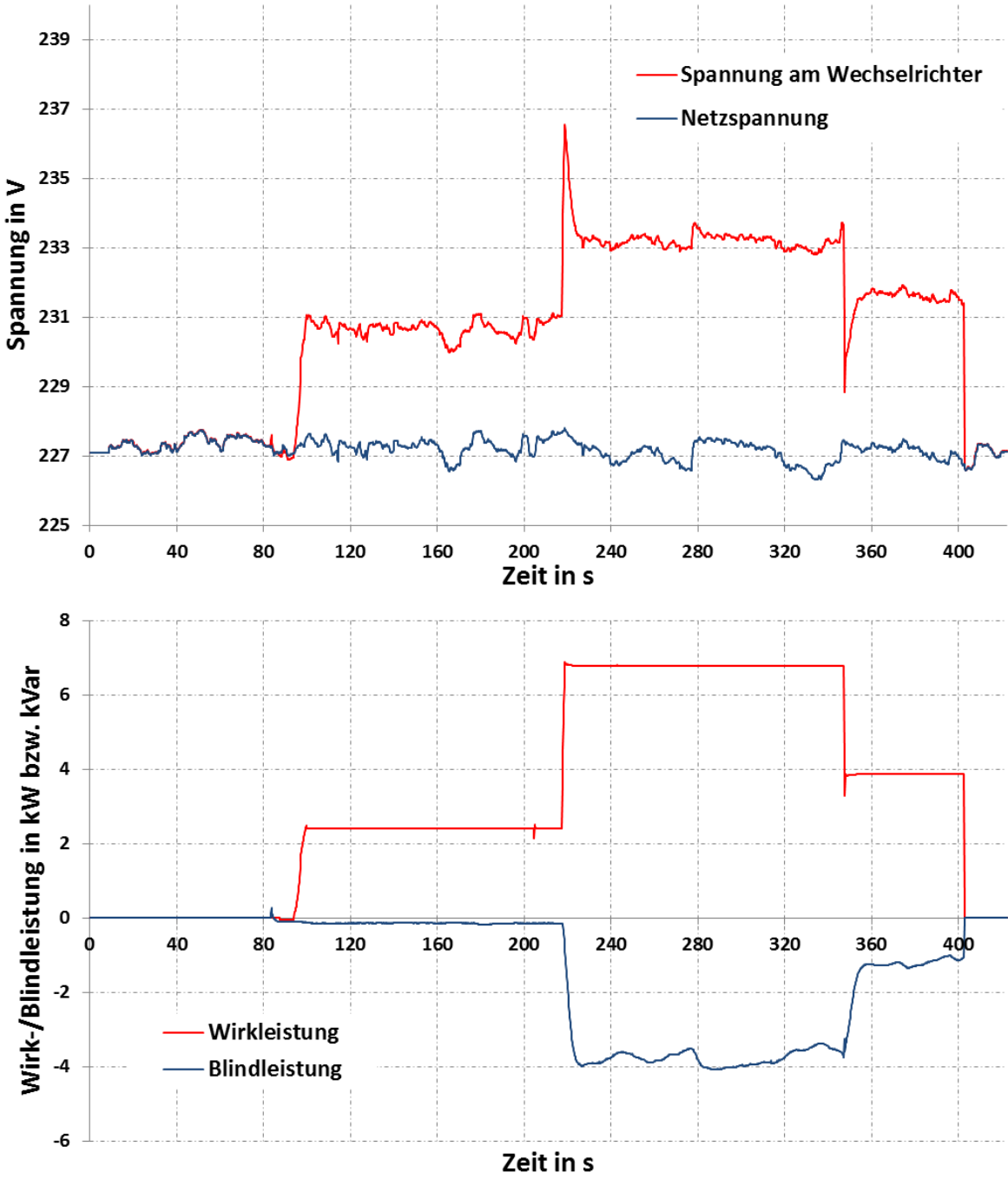


Abbildung 24: Sprungantwort Wechselrichter KACO, Zeitkonstante PT1 = 5 s

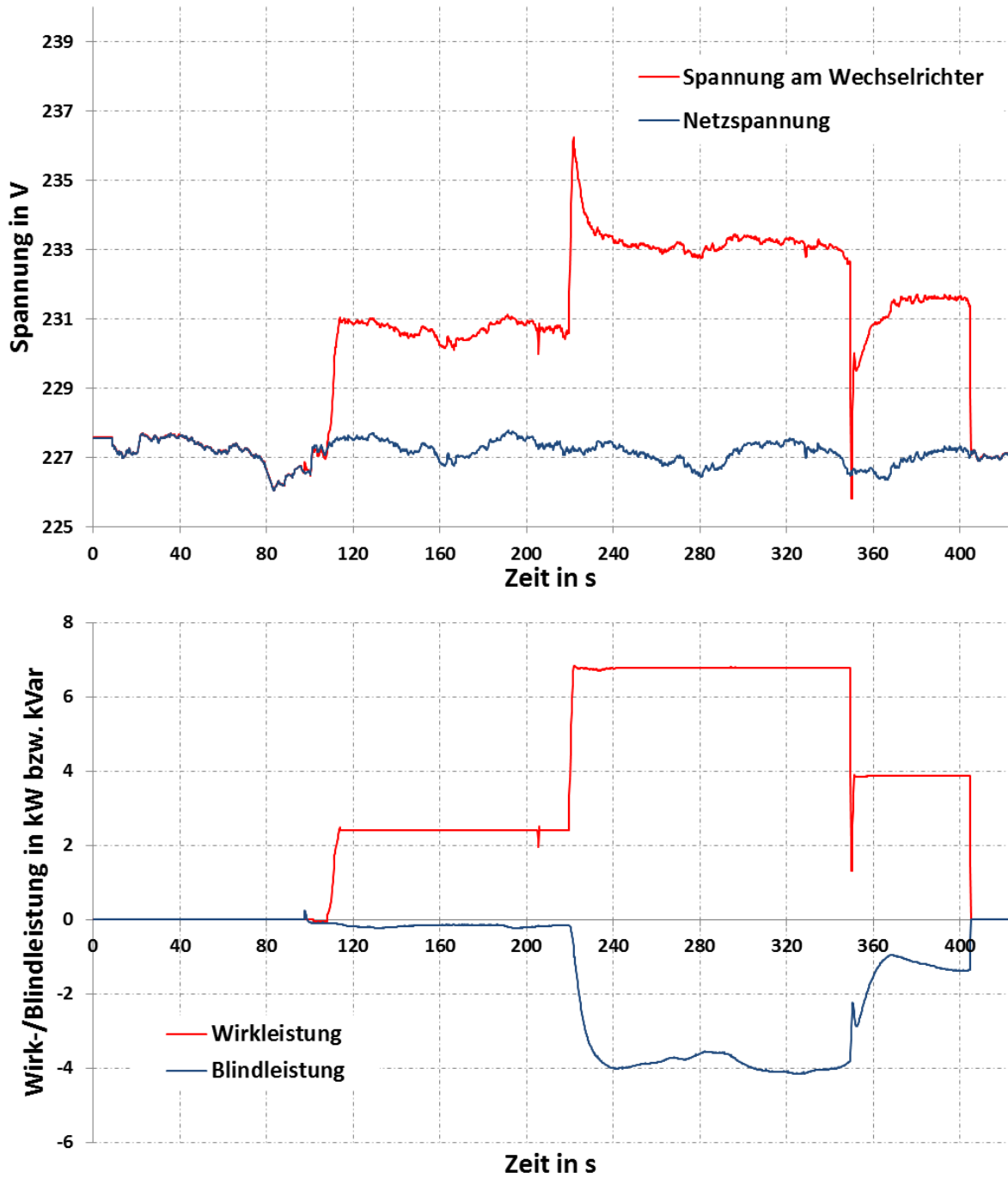


Abbildung 25: Sprungantwort Wechselrichter KACO, Zeitkonstante PT1 = 10 s

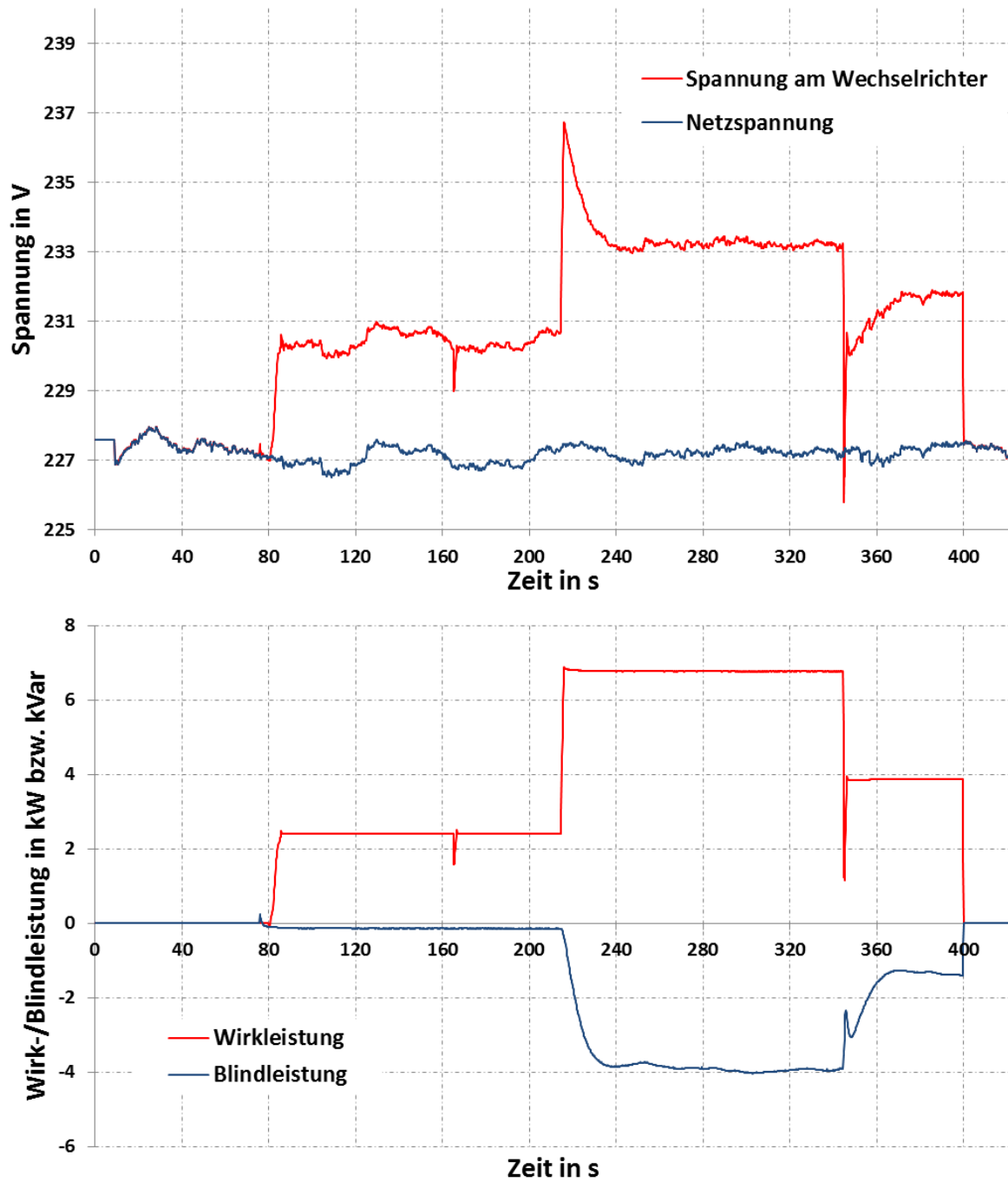


Abbildung 26: Sprungantwort Wechselrichter KACO, Zeitkonstante $PT1 = 15$ s

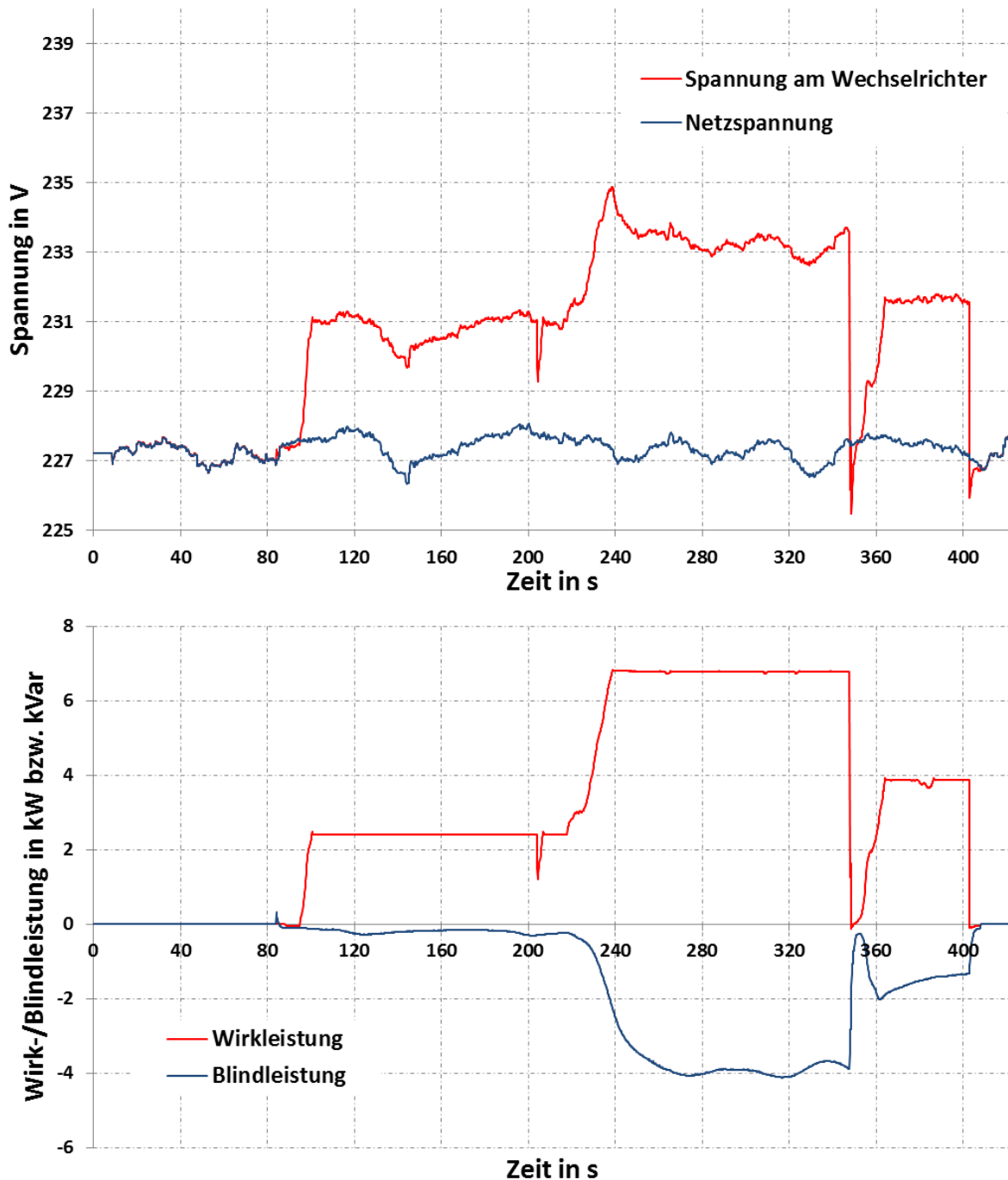


Abbildung 27: Sprungantwort Wechselrichter KACO, Zeitkonstante $PT1 = 20$ s

5.2.2 SMA

Im Folgenden sind die Ergebnisse für den Wechselrichter SMA dargestellt (Abbildung 28 bis Abbildung 32). Instabilitäten lassen sich nicht erkennen. Der Verlauf der bezogenen Blindleistung beruhigt sich bereits ab einer Zeitkonstante des $PT1$ -Gliedes von 5 s deutlich. Die in den Diagrammen erkennbaren kurzzeitigen Ein-

brüche der eingespeisten Wirkleistung werden von den DC-Netzteilen verursacht, die den Wechselrichter ansteuern. Die Ansteuerung erfolgt hier über ein analoges Signal und nicht wie bei beiden anderen Netzteilen über die serielle Schnittstelle. Deswegen zeigen sich im Leistungsverlauf stets kurze Einbrüche. Diese wirken sich jedoch nicht negativ auf die Q(U)-Regelung aus. Lediglich bei deaktiviertem PT1-Glied ist eine Reaktion auf diese kurzen Einbrüche zu erkennen (Abbildung 28). Bei aktiviertem PT1-Glied beeinflussen diese Einbrüche die Regelung nicht mehr.

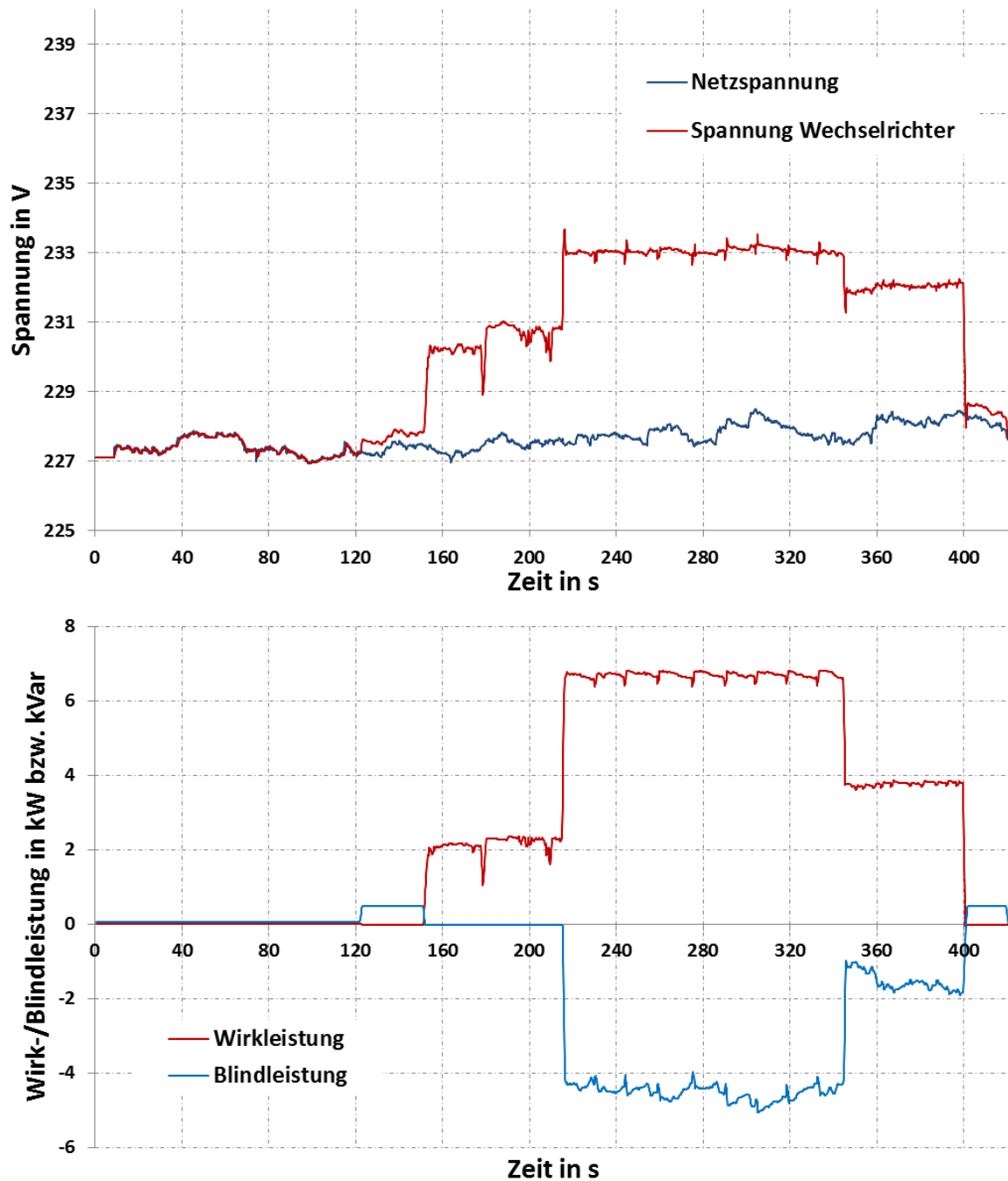


Abbildung 28: Sprungantwort Wechselrichter SMA, PT1 deaktiviert

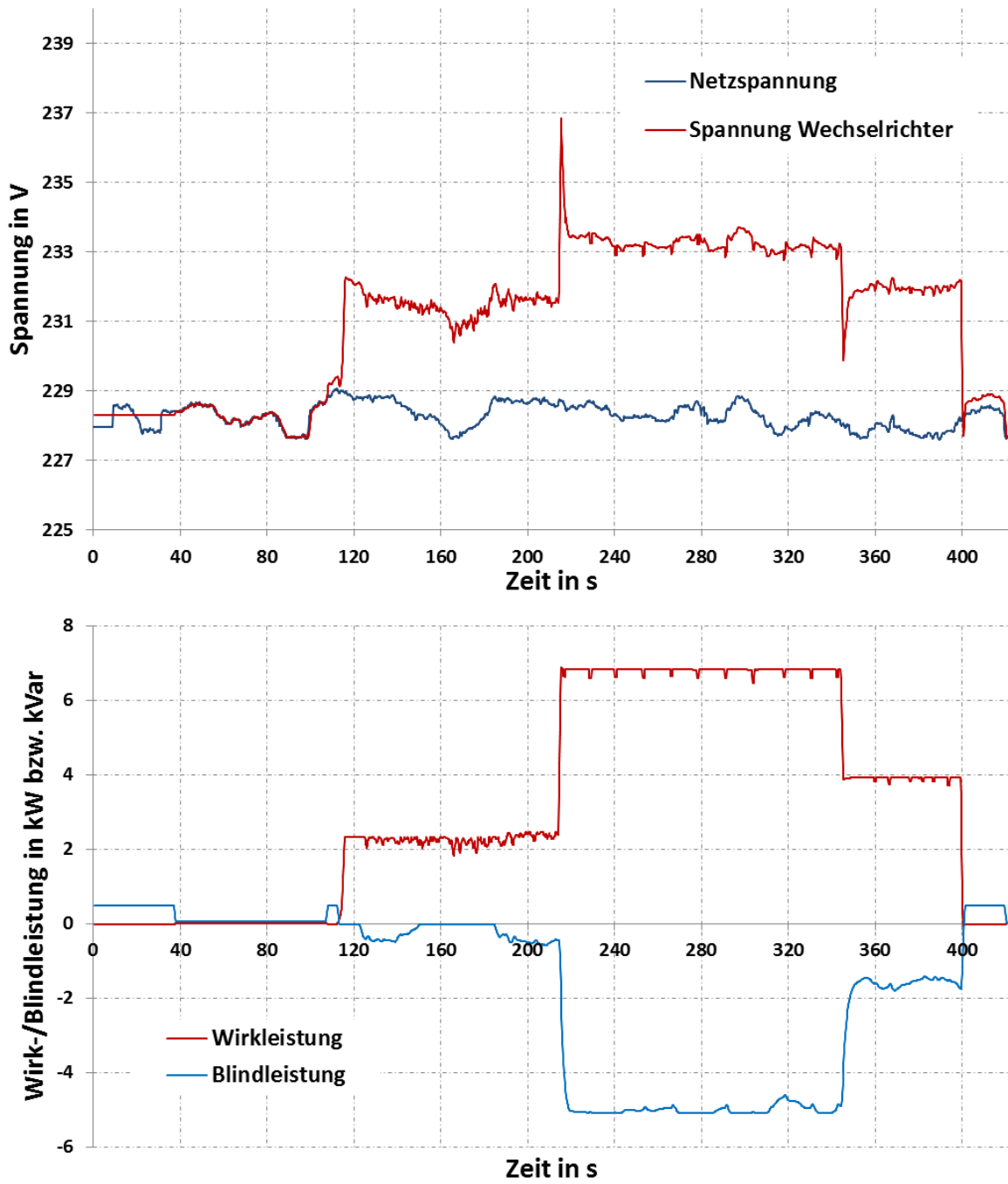


Abbildung 29: Sprungantwort Wechselrichter SMA, Zeitkonstante PT1 = 5 s

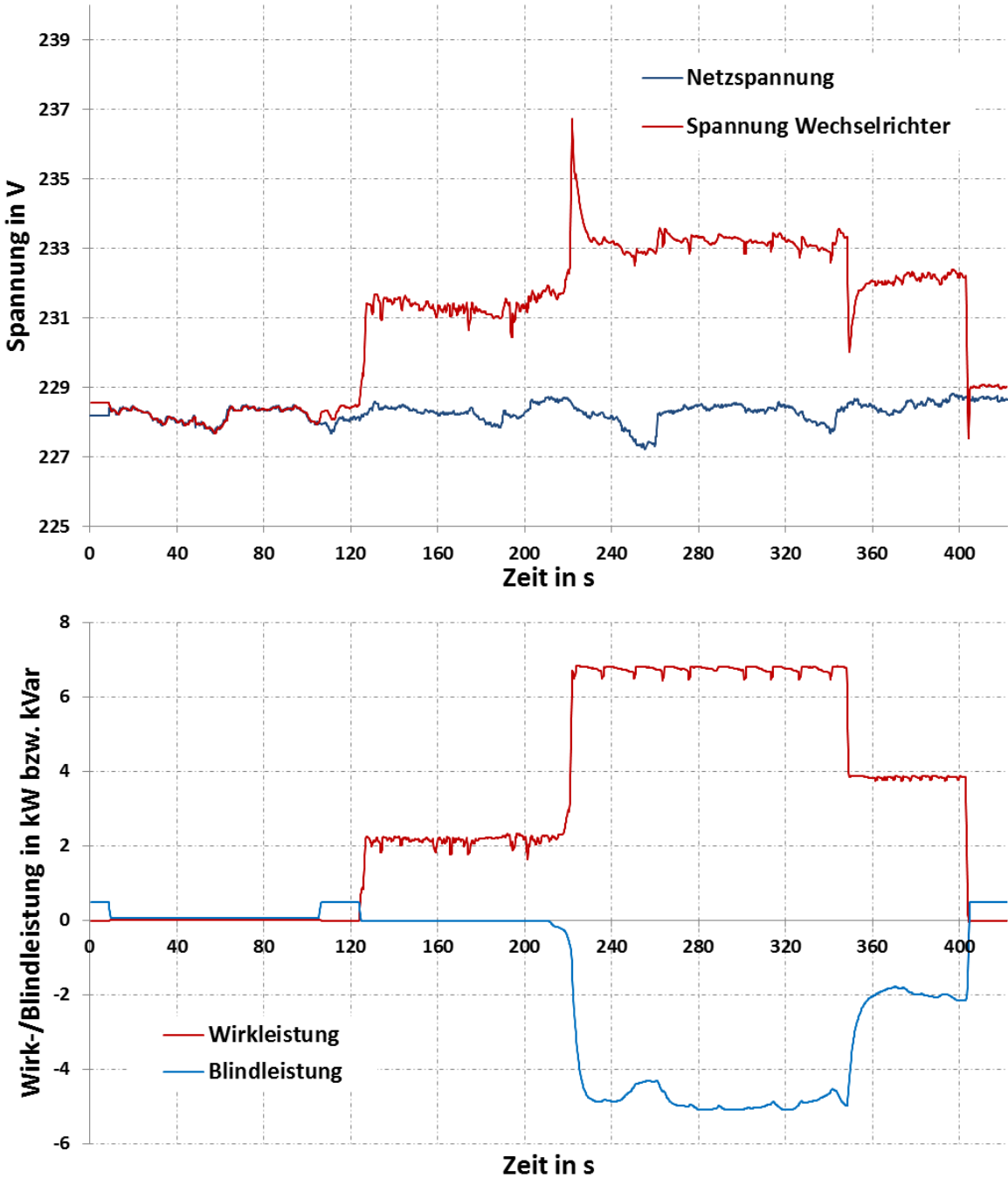


Abbildung 30: Sprungantwort Wechselrichter SMA, Zeitkonstante PT1 = 10 s

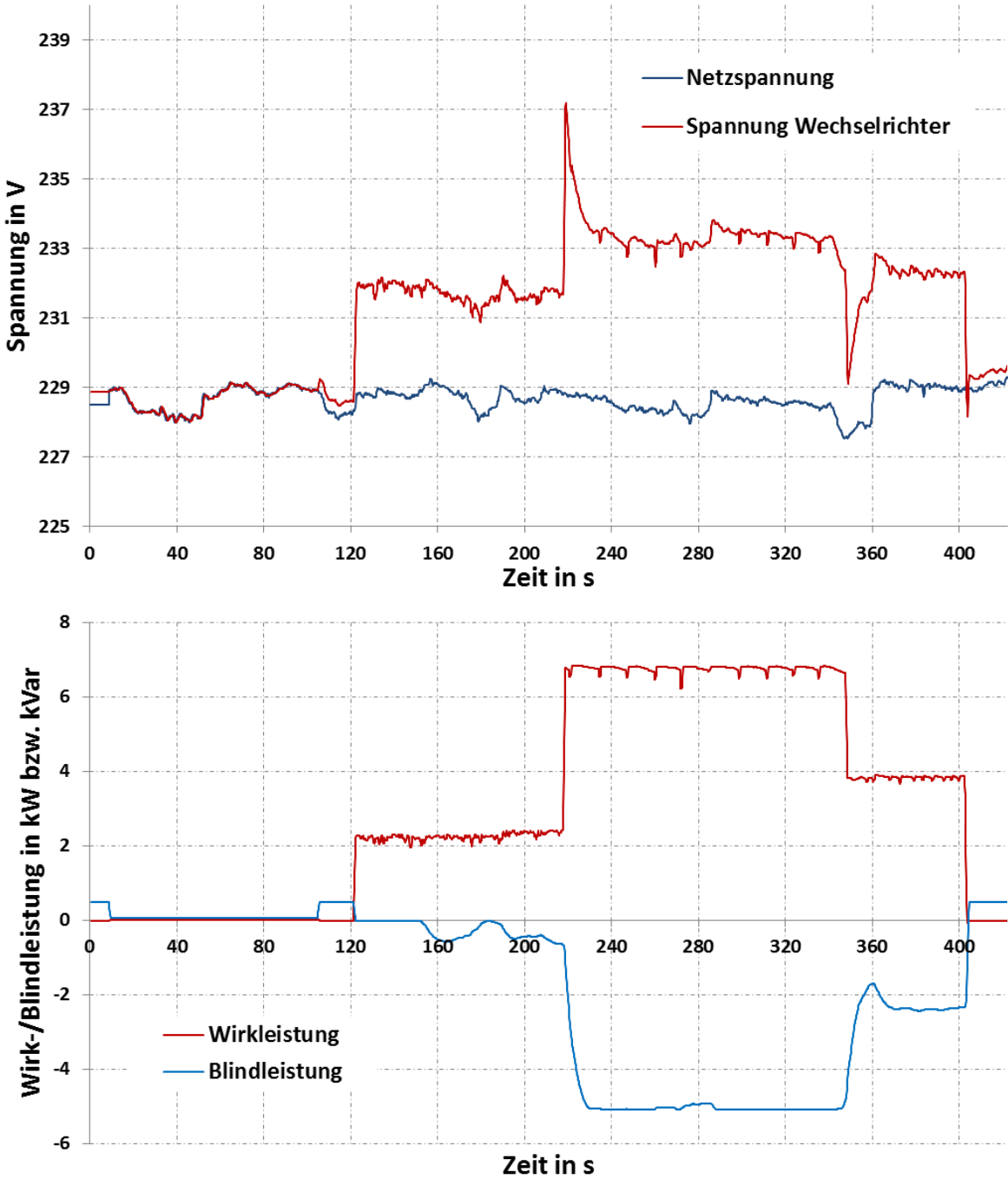


Abbildung 31: Sprungantwort Wechselrichter SMA, Zeitkonstante PT1 = 15 s

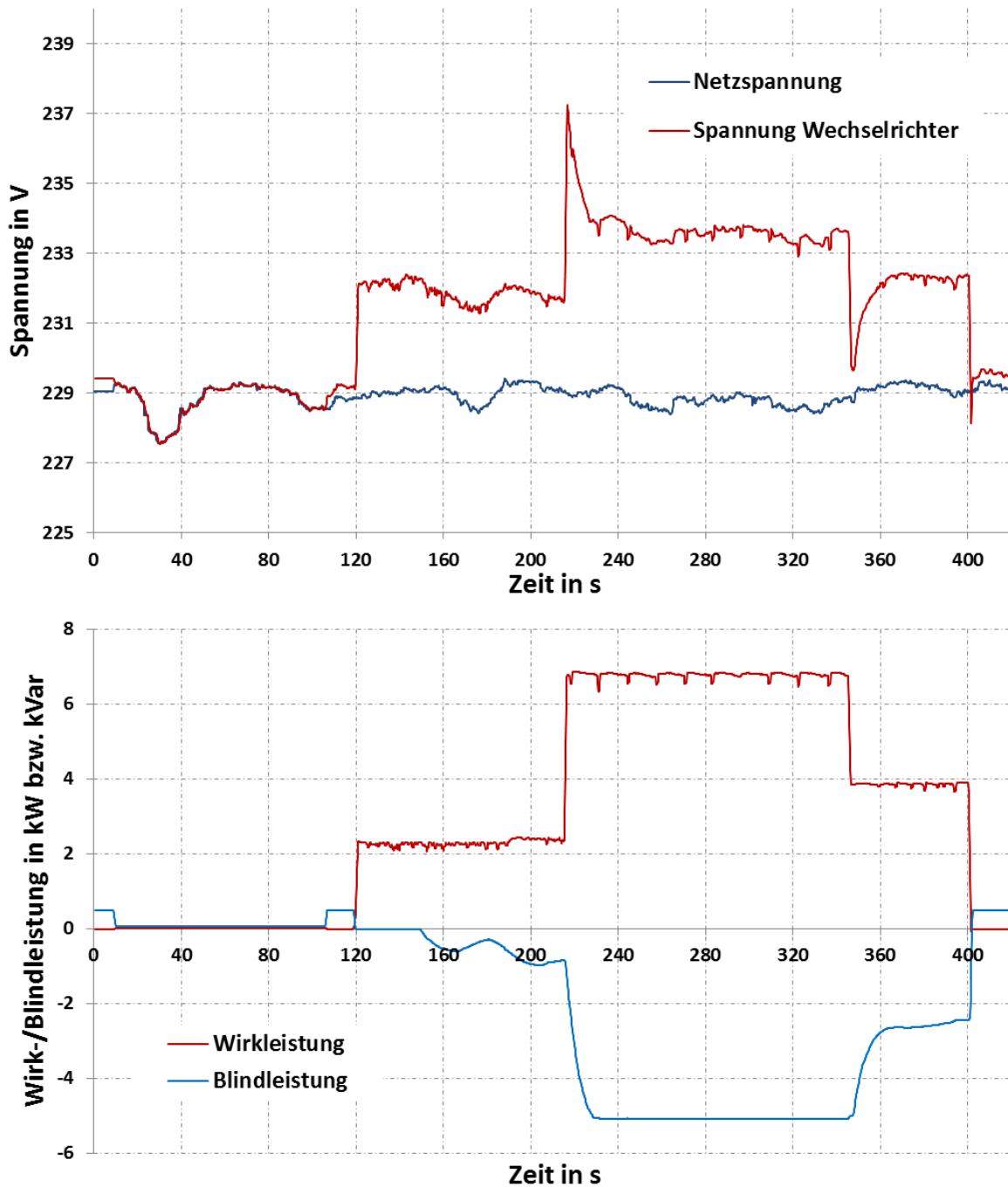


Abbildung 32: Sprungantwort Wechselrichter SMA, Zeitkonstante $PT1 = 20$ s

5.2.3 Siemens

Im Folgenden sind die Ergebnisse für den Wechselrichter Siemens dargestellt (Abbildung 33 bis Abbildung 37). Instabilitäten lassen sich nicht erkennen. Der Verlauf der bezogenen Blindleistung beruhigt sich bereits ab einer Zeitkonstante des $PT1$ -Gliedes von 5 s deutlich.

Der Wechselrichter verhält sich, wenn er in das Netz einspeist, kapazitiv und gibt an das Netz abhängig von der jeweils eingespeisten Wirkleistung zwischen etwa 500 Var bis etwa 700 Var Blindleistung an das Netz ab. Damit erklärt sich der leichte Sprung (siehe z. B. der markierte Bereich in Abbildung 33) in der Blindleistung beim Zuschalten des Wechselrichters. Dieser Blindleistungsoffset ist auch der Ausgangswert des Q(U)-Reglers des Wechselrichters. Auf diesen Wert wird die vom Regler geforderte Blindleistung jeweils addiert bzw. subtrahiert.

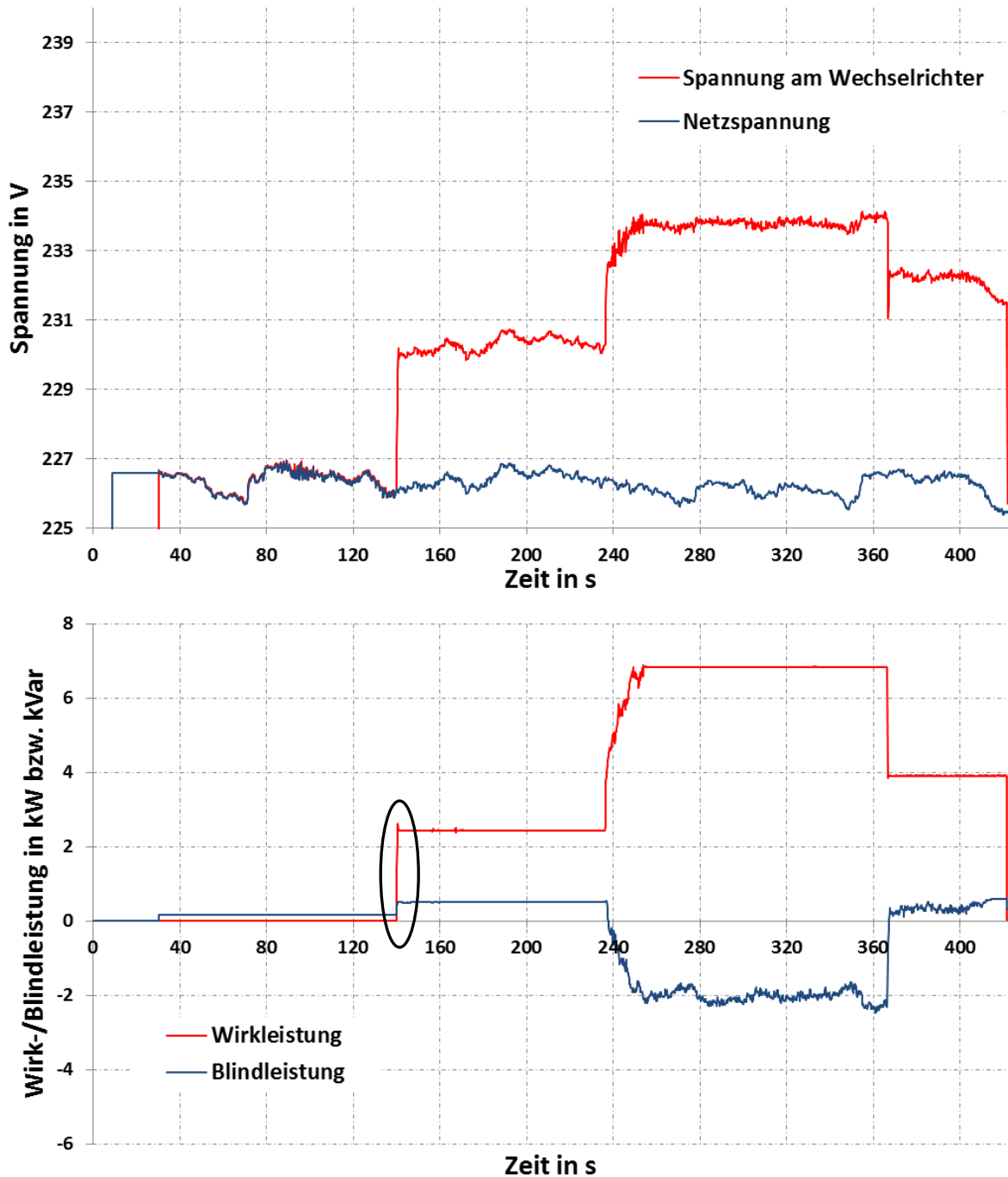


Abbildung 33: Sprungantwort Wechselrichter Siemens, PT1 deaktiviert

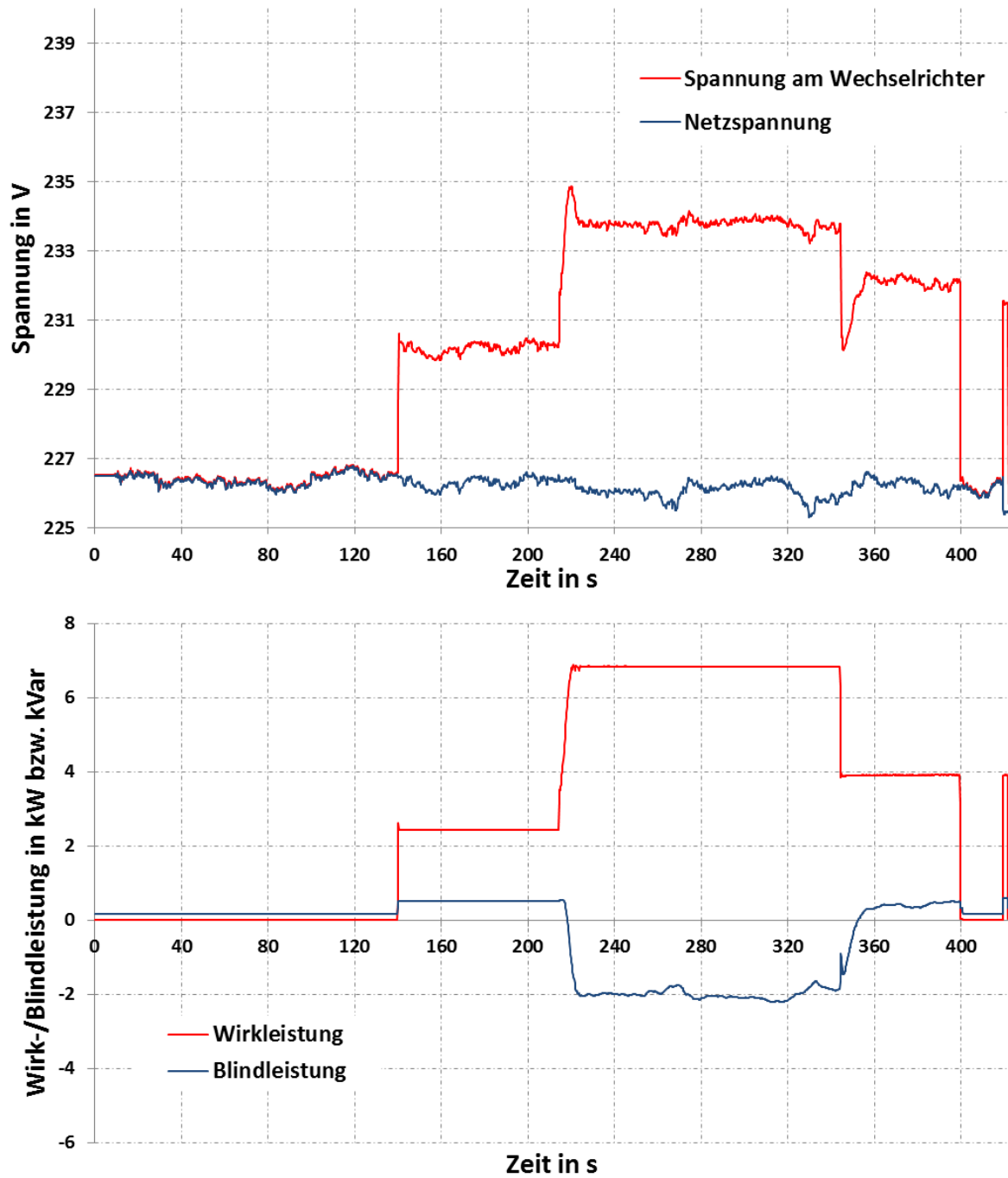


Abbildung 34: Sprungantwort Wechselrichter Siemens, Zeitkonstante $PT1 = 5$ s

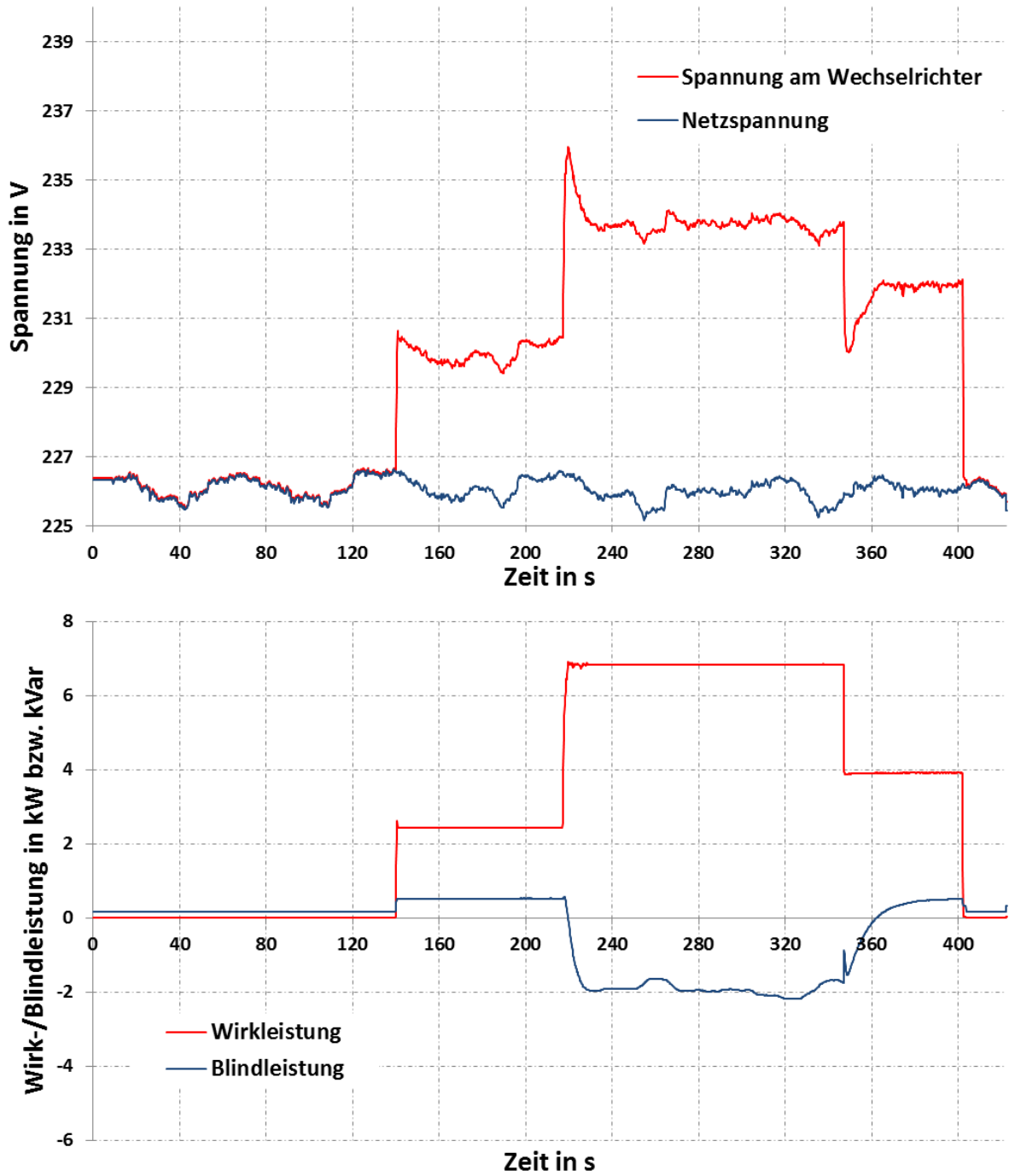


Abbildung 35: Sprungantwort Wechselrichter Siemens, Zeitkonstante PT1 = 10 s

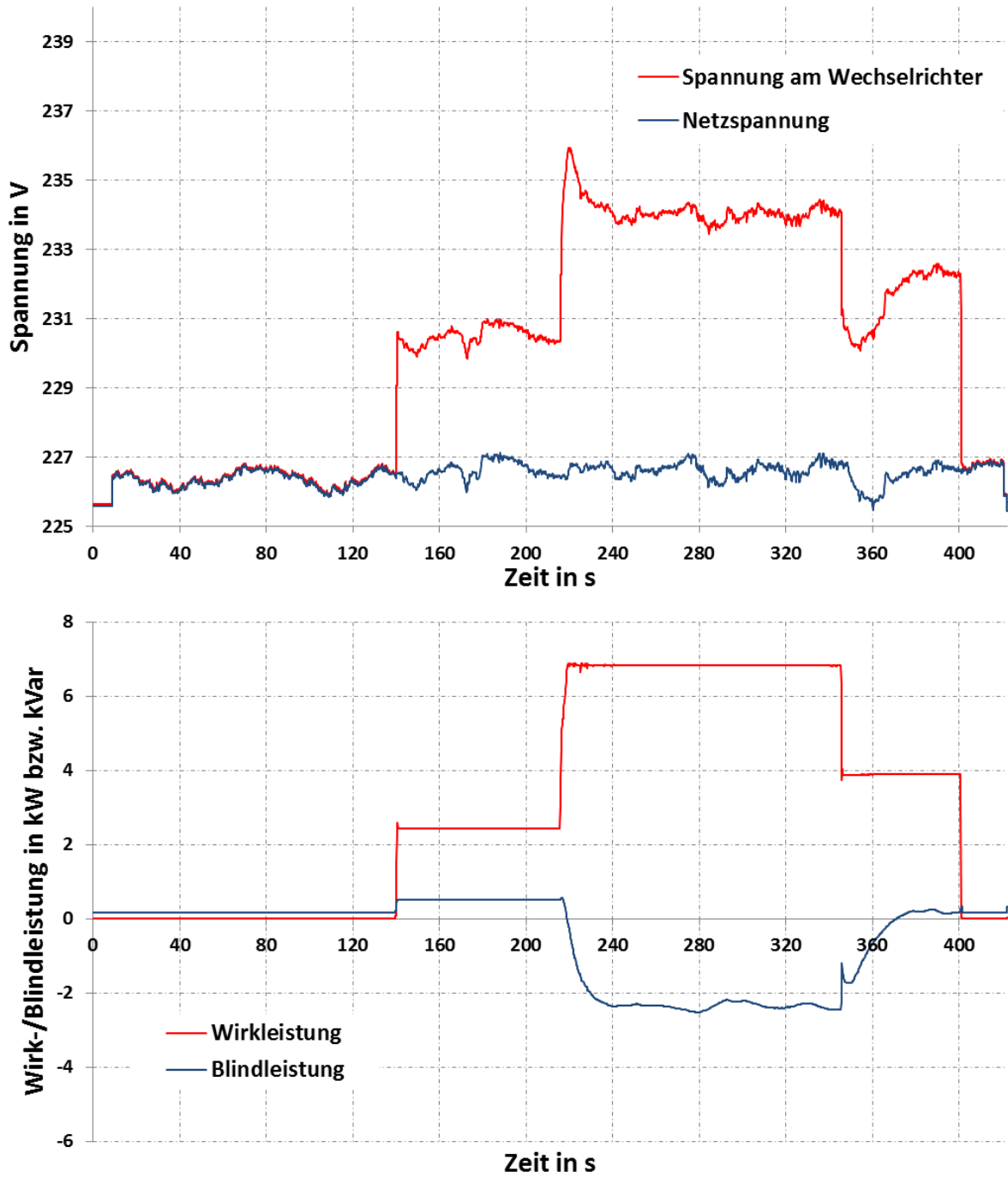


Abbildung 36: Sprungantwort Wechselrichter Siemens, Zeitkonstante PT1 = 15 s

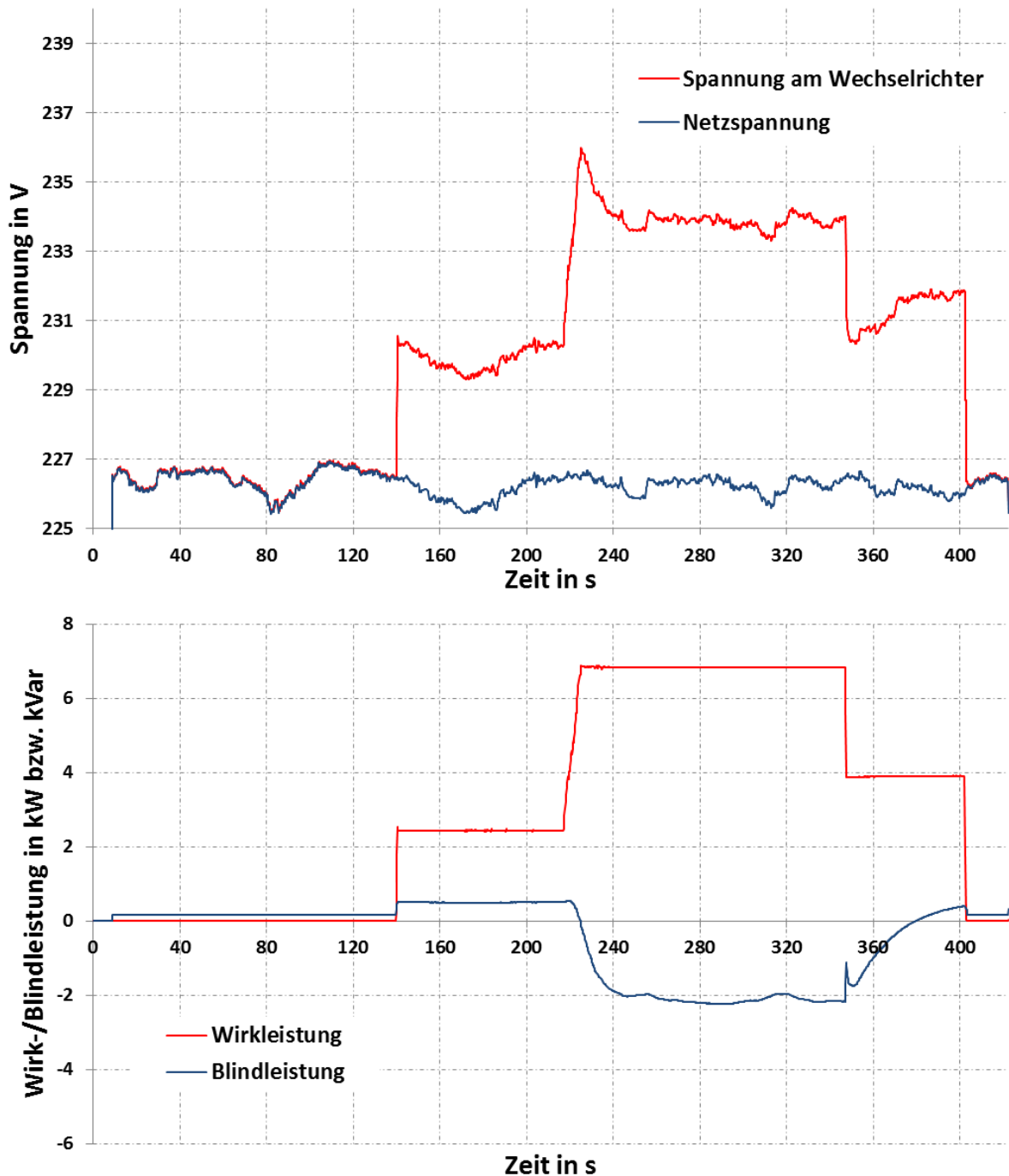


Abbildung 37: Sprungantwort Wechselrichter Siemens, Zeitkonstante $PT1 = 20$ s

5.2.4 Zusammenfassung Sprungantwort

Alle Wechselrichter verhalten sich wie erwartet. Allfällige Instabilitäten der Q(U)-Regelung sind nicht zu erkennen. Durch die begrenzten Anstiegszeiten der Blindleistung kommt es nach Spannungssprüngen immer zu einer kurzzeitigen Spannungsüberhöhung, die sich, sobald die Wechselrichter entsprechend Blindleistung bezie-

hen, wieder abbauen. Dies ist kein Anzeichen für eine Instabilität der Q(U)-Regelung, sondern systembedingt. Es empfiehlt sich daher nicht zu große Zeitkonstanten für das PT1-Glied zu wählen, damit typische Spannungsgradienten, wie sie bei PV-Einspeisung auftreten, noch kompensiert werden können. Bereits bei einer Zeitkonstante des PT1-Gliedes von 5 s beruhigt sich der Verlauf der abgegebenen Blindleistung deutlich. Zu kleine Zeitkonstanten sollten ebenfalls nicht gewählt werden, da dies die Sensibilität des Systems unnötig erhöht. Die Zeitkonstanten sollten nicht schneller sein, als die zu erwartenden Änderungen der eingespeisten Leistung $\frac{dP(t)}{dt}$.

5.3 Longitudinale Anordnung

Das Verhalten der einzelnen Wechselrichter im Gesamtsystem wird zunächst an einer longitudinalen Anordnung überprüft. Es werden eine extreme und eine typische Situation betrachten.

5.3.1 Rampe

Zunächst werden Untersuchungen mit einem rampenförmigen Verlauf der eingespeisten Leistung durchgeführt.

5.3.1.1 Extremes Netz

Die Konfiguration des Modellnetzes für den extremen Fall ist in Abbildung 38 dargestellt.

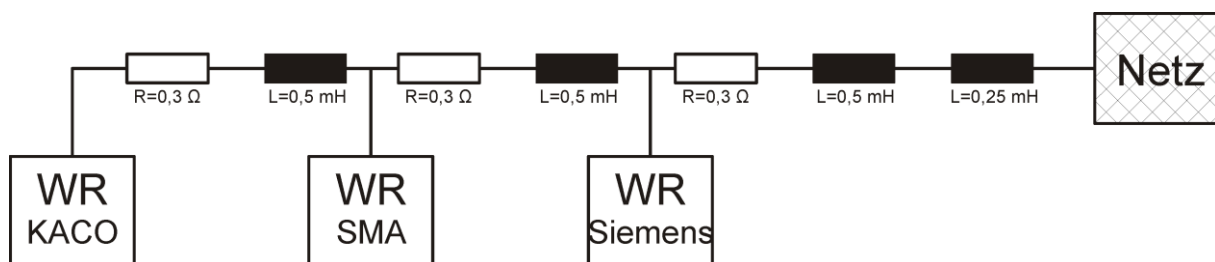


Abbildung 38: Konfiguration der Netznachbildung für den extremen longitudinalen Fall

Die verwendeten Parametersätze der Q(U)-Regelung sind in Tabelle 3 aufgezeigt. Aufgrund der in Abschnitt 5.2.4 vorgestellten Überlegungen wird die Zeitkonstante des PT1-Glieds der Wechselrichter standardmäßig auf 5 s eingestellt.

Tabelle 3: Parametersätze der Blindleistungsregelung im extremen longitudinalen Fall

Parametersatz	Q(U)-Kennlinie			Zeitkonstante PT1-Glied
	Spannung U	232 V	238 V	
Kleines Totband	Spannung U	232 V	238 V	5 s
	Blindleistung Q	0	6000 Var	
Mittleres Totband	Spannung U	234 V	238 V	5 s
	Blindleistung Q	0	6000 Var	
Großes Totband	Spannung U	236 V	238 V	5 s
	Blindleistung Q	0	6000 Var	

Es ergeben sich also die in Abbildung 39 dargestellten Q(U)-Kennlinien. Auf eine Parametrierung der Abschnitte der allgemeinen Q(U)-Kennlinie aus Abbildung 9, bei denen Blindleistung zur Spannungsstützung abgegeben werden soll, kann hier verzichtet werden. Am Modellnetz befinden sich nur Einspeiser (PV-Wechselrichter), die die Spannung im Netz erhöhen und keine Lasten, die die Spannung absenken würden. Deswegen ist hier nur der obere Teil der allgemeinen Kennlinie aus Abbildung 9 relevant und parametrierbar. Der parametrierbare maximale Wert der Blindleistung von 6.000 Var kann nur vom Wechselrichter Kaco erreicht werden.

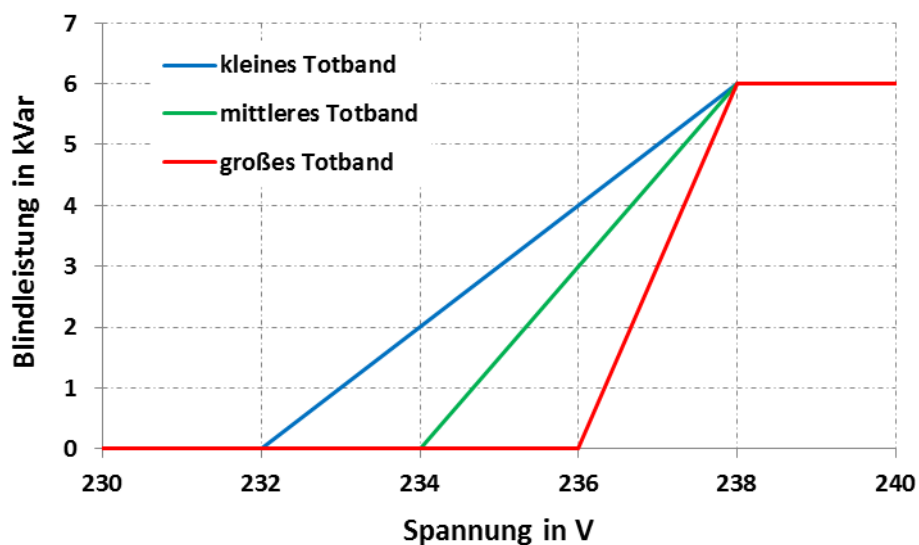


Abbildung 39: Q(U) Kennlinien für die longitudinale Anordnung

Die Ergebnisse sind in Abbildung 40 bis Abbildung 44 dargestellt. Der kurze Wirkleistungseinbruch (siehe z. B. Markierung in Abbildung 41) beim Wechselrichter KACO wird durch dessen MPP-Tracker verursacht. Diese Einbrüche entstehen, da die Wechselrichter mit einer DC-Quelle gespeist werden. Der MPP-Tracker des Wechselrichter KACO ändert sukzessive in kleinen Schritten die DC-Spannung. Es kann vorkommen, dass dabei die Spannung soweit erhöht wird, dass die Grenzen des DC-Netzteils erreicht werden. Geschieht dies, so bricht die Leistung kurzzeitig ein, bis der MPP-Tracker die DC-Spannung wieder abgesenkt hat. Bei den Wechselrichtern SMA und Siemens tritt dieser Effekt nicht auf, da diese im Konstantspannungsbetrieb verwendet werden. Diese Einbrüche der Wirkleistung kommen daher in der Realität so nicht vor. Jedoch sind auch in diesem extremen Fall keinerlei Anzeichen für instabiles Verhalten zu erkennen. Darüber hinaus sind keine weiteren Auffälligkeiten oder Hinweise für mögliches instabiles Verhalten anzutreffen.

Es fällt auf, dass der Q(U)-Regler des Wechselrichters KACO bei gleicher Parametrierung stets einen glatteren Verlauf im Vergleich zu den Wechselrichtern SMA und Siemens aufweist (siehe z. B. Markierung in Abbildung 41 unten). Um dieses Verhalten näher untersuchen zu können, ist in Abbildung 42 exemplarisch ein Ausschnitt aus Abbildung 41 in genauere Skalierung für die Wechselrichter SMA und KACO dargestellt. Im oberen Diagramm sind der Mittelwert der Spannungen U_{L1} , U_{L2} und U_{L3} an den Wechselrichtern aufgetragen. Dieser Spannungsmittelwert ist die Eingangsgröße des Q(U)-Reglers der Wechselrichter SMA und Siemens. Der Wechselrichter KACO hingegen verwendet als Eingangsgröße seines Q(U)-Reglers dem Maximalwert der Spannungen U_{L1} , U_{L2} und U_{L3} . Es ist deutlich zu erkennen, dass sich die Verläufe der dargestellten Spannungen abgesehen von einem Offset sehr ähnlich sind. Im mittleren Diagramm sind die eingespeisten Wirkleistungen je Phase L1, L2 und L3 für beide Wechselrichter aufgetragen. Beide speisen symmetrisch in alle drei Phasen ein. Im unteren Diagramm ist die von beiden Wechselrichtern bezogene Blindleistung dargestellt. Deutlich ist der oben erwähnte Unterschied zwischen beiden Wechselrichtern zu erkennen. Der Verlauf der Blindleistung wirkt beim Wechselrichter SMA deutlich unruhiger. Dieses unterschiedliche Verhalten ist jedoch nicht durch die unterschiedlichen Eingangsgrößen der Q(U)-Regler (siehe oberes Diagramm) oder durch unterschiedlich eingespeiste Wirkleistung zu erklären. Die Ursache liegt vielmehr darin, dass die Blindleistung beim Wechselrichter Kaco durch einen minimalen $\cos \varphi$ von 0,8 begrenzt ist. Je größer die vom Wechselrichter Kaco eingespeiste Wirkleistung ist, desto mehr Blindleistung kann er beziehen.

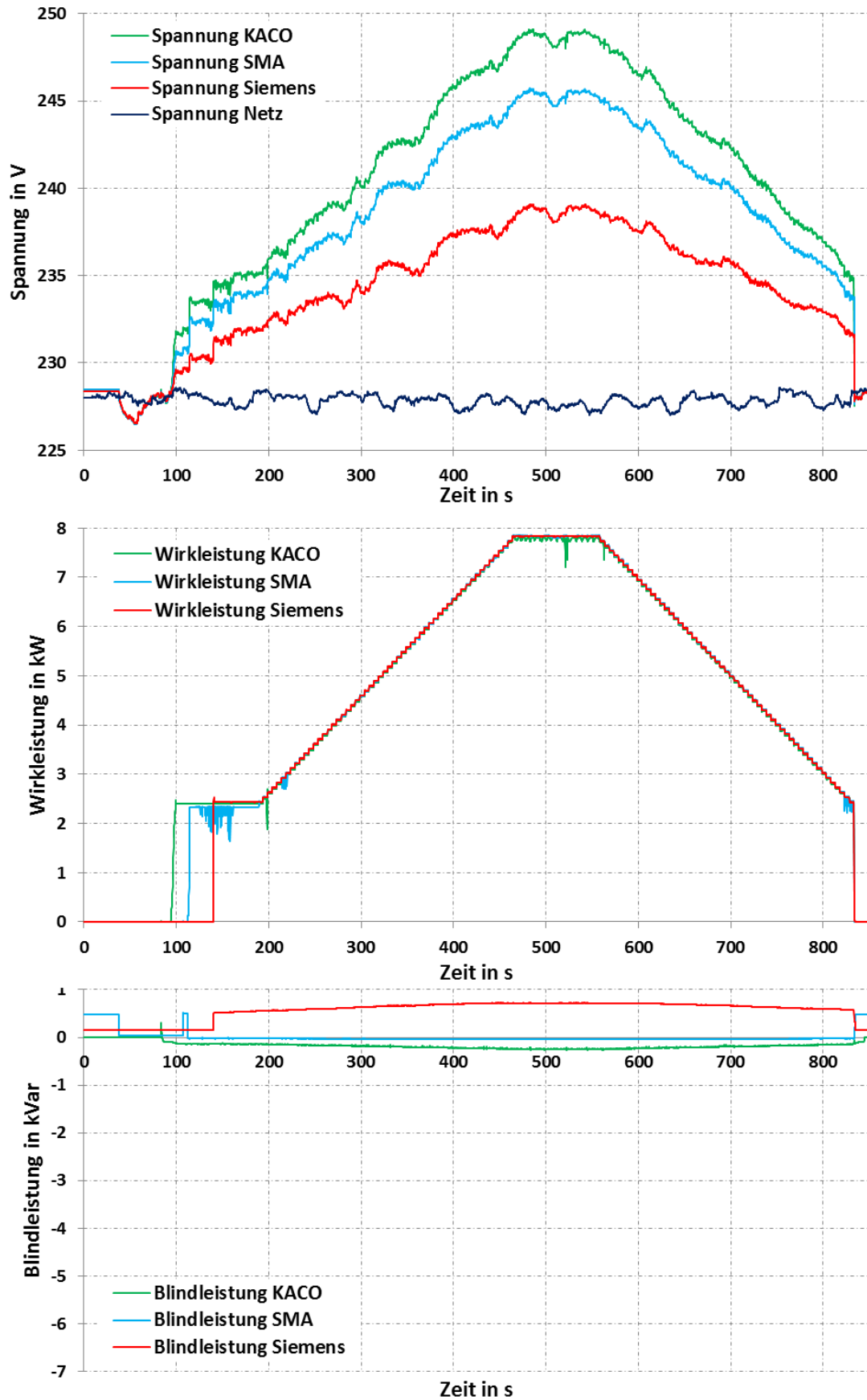


Abbildung 40: extreme longitudinale Anordnung: Rampe, ohne Regelung

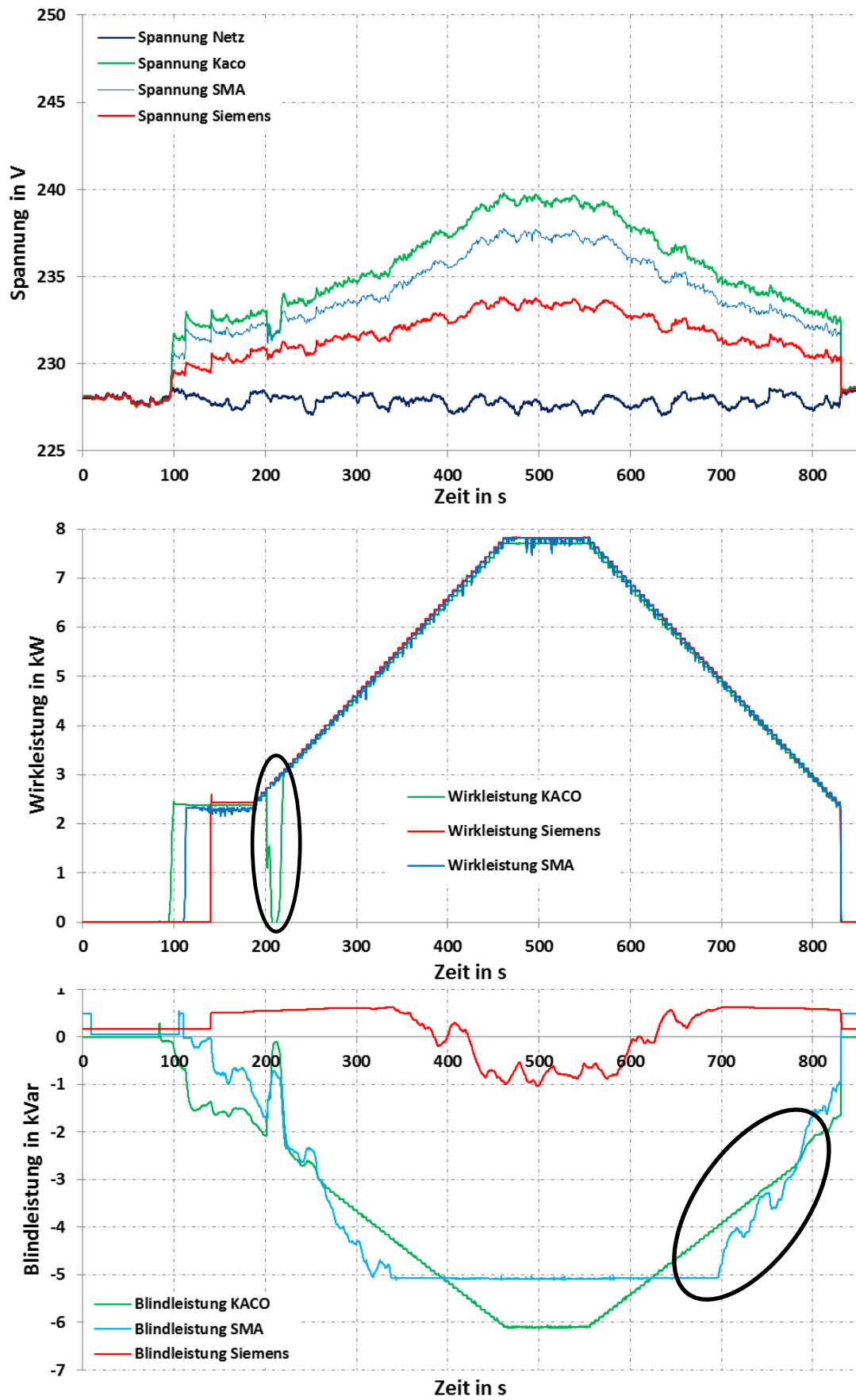


Abbildung 41: extreme longitudinale Anordnung: Rampe, kleines Totband

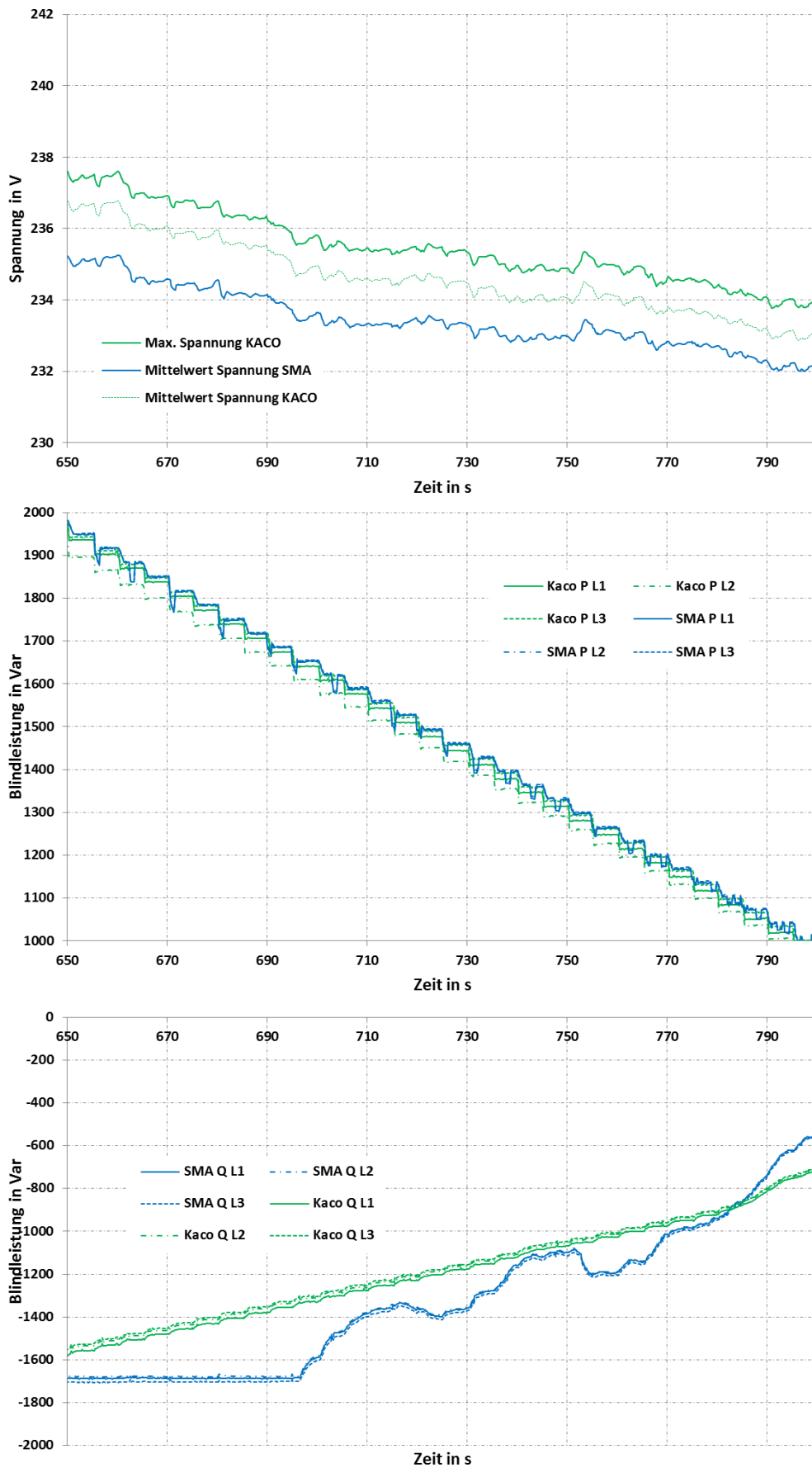


Abbildung 42: Detail: extreme longitudinale Anordnung: Rampe, kleines Totband

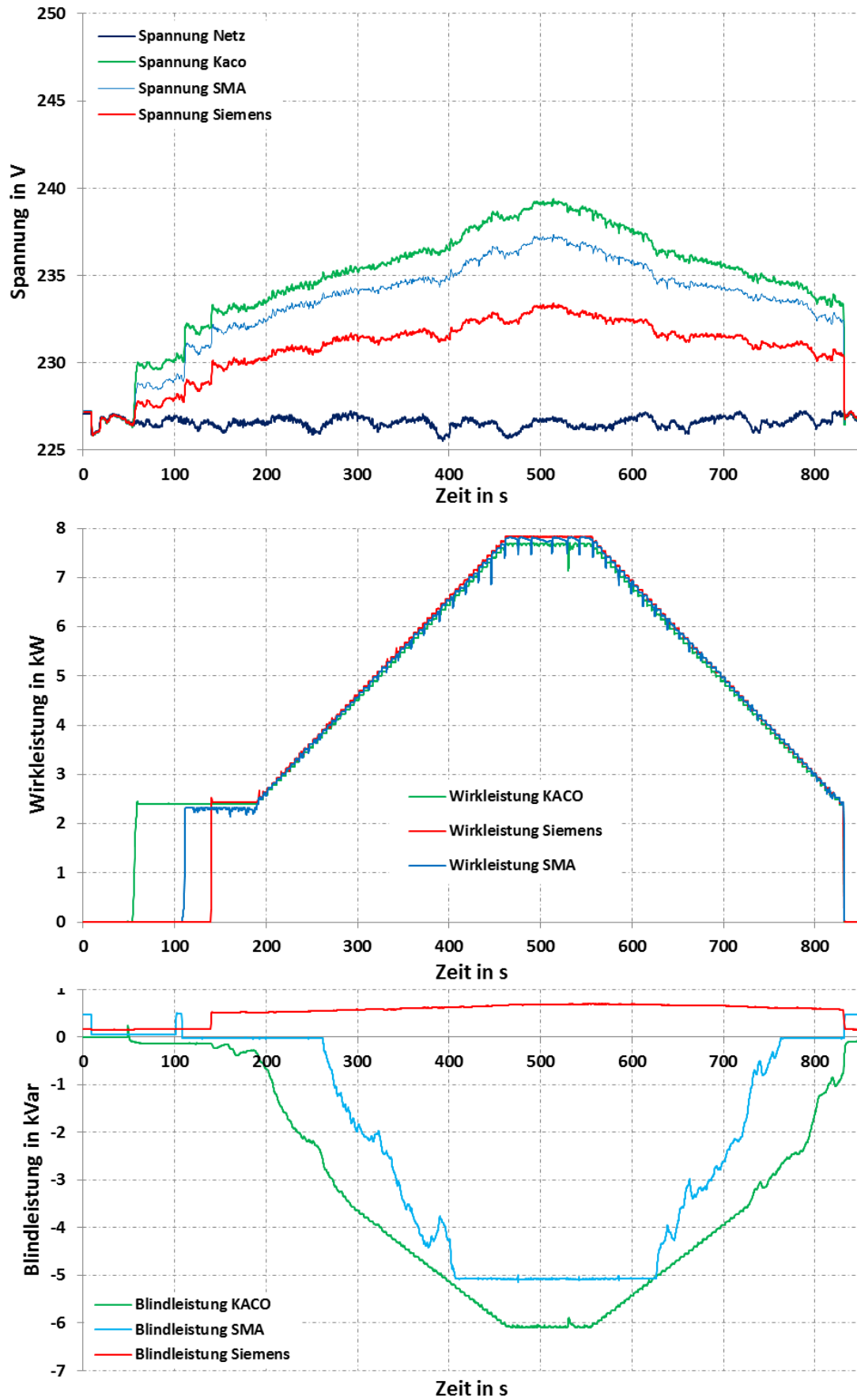


Abbildung 43: extreme longitudinale Anordnung: Rampe, mittleres Totband

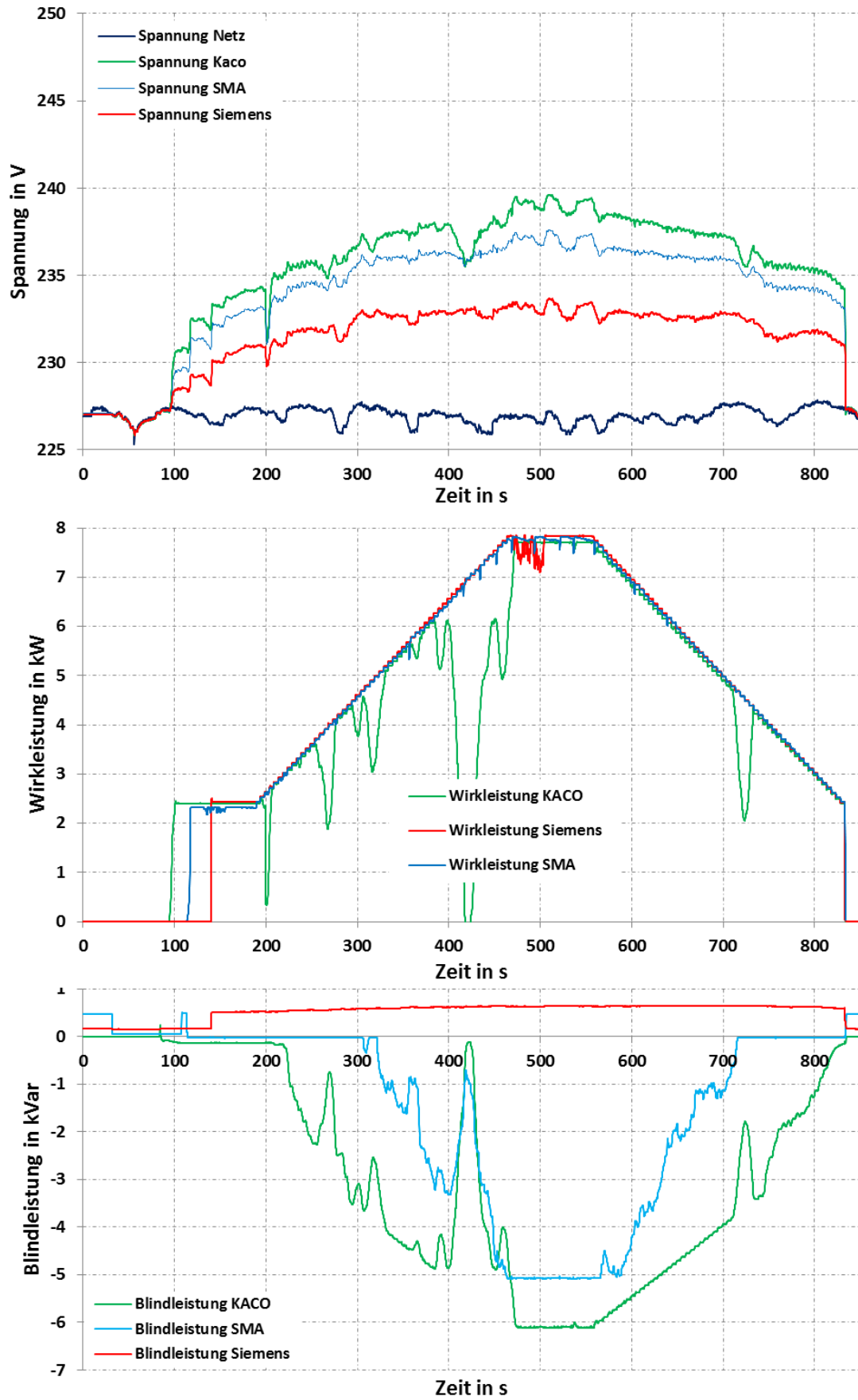


Abbildung 44: extreme longitudinale Anordnung: Rampe, großes Totband

5.3.1.2 Typisches Netz

Die Konfiguration des Modellnetzes für den typischen Fall ist in Abbildung 45 dargestellt.

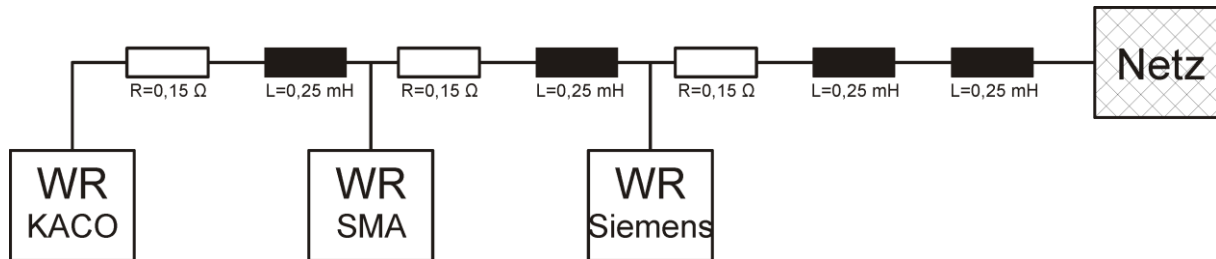


Abbildung 45: Konfiguration der Netznachbildung für den typischen longitudinalen Fall

Die verwendeten Parametersätze der Q(U)-Regelung sind in Tabelle 3 aufgezeigt. Aufgrund der in Abschnitt 5.2.4 vorgestellten Überlegungen wird die Zeitkonstante des PT1-Glieds der Wechselrichter standardmäßig auf 5 s eingestellt.

Tabelle 4: Parametersätze der Blindleistungsregelung im typischen longitudinalen Fall

Parametersatz	Q(U)-Kennlinie			PT1-Glied
	Spannung U	232 V	238 V	
Kleines Totband	Blindleistung Q	0	6000 Var	5 s
	Spannung U	234 V	238 V	
Mittleres Totband	Blindleistung Q	0	6000 Var	5 s
	Spannung U	236 V	238 V	
Großes Totband	Blindleistung Q	0	6000 Var	5 s
	Spannung U	236 V	238 V	

Es ergeben sich also die in Abbildung 39 dargestellten Q(U)-Kennlinien. Auf eine Parametrierung der Abschnitte der allgemeinen Q(U)-Kennlinie aus Abbildung 9, bei denen Blindleistung zur Spannungsstützung abgegeben werden soll, kann hier verzichtet werden. Am Modellnetz befinden sich nur Einspeiser (PV-Wechselrichter), die die Spannung im Netz erhöhen und keine Lasten, die die Spannung absenken würden. Deswegen ist hier nur der obere Teil der allgemeinen Kennlinie aus Abbildung 9 relevant und parametrierbar.

Die Ergebnisse sind in Abbildung 46 bis Abbildung 49 dargestellt. Der kurze Wirkleistungseinbruch beim Wechselrichter KACO wird durch dessen MPP-Tracker verursacht. Der Spannungssprung in Abbildung 48 (siehe Markierung) wird durch das Schalten des Stufenstellers im Umspannwerk verursacht. Auch bei dieser Anregung bleibt die Regelung stabil. Dieser (zufällige) Nachweis zeigt, dass die $Q(U)$ -Regelung unempfindlich gegenüber Schalthandlungen des Stufenstellers im Umspannwerk ist. Es sind keine weiteren Auffälligkeiten oder Hinweise für mögliches instabiles Verhalten anzutreffen.

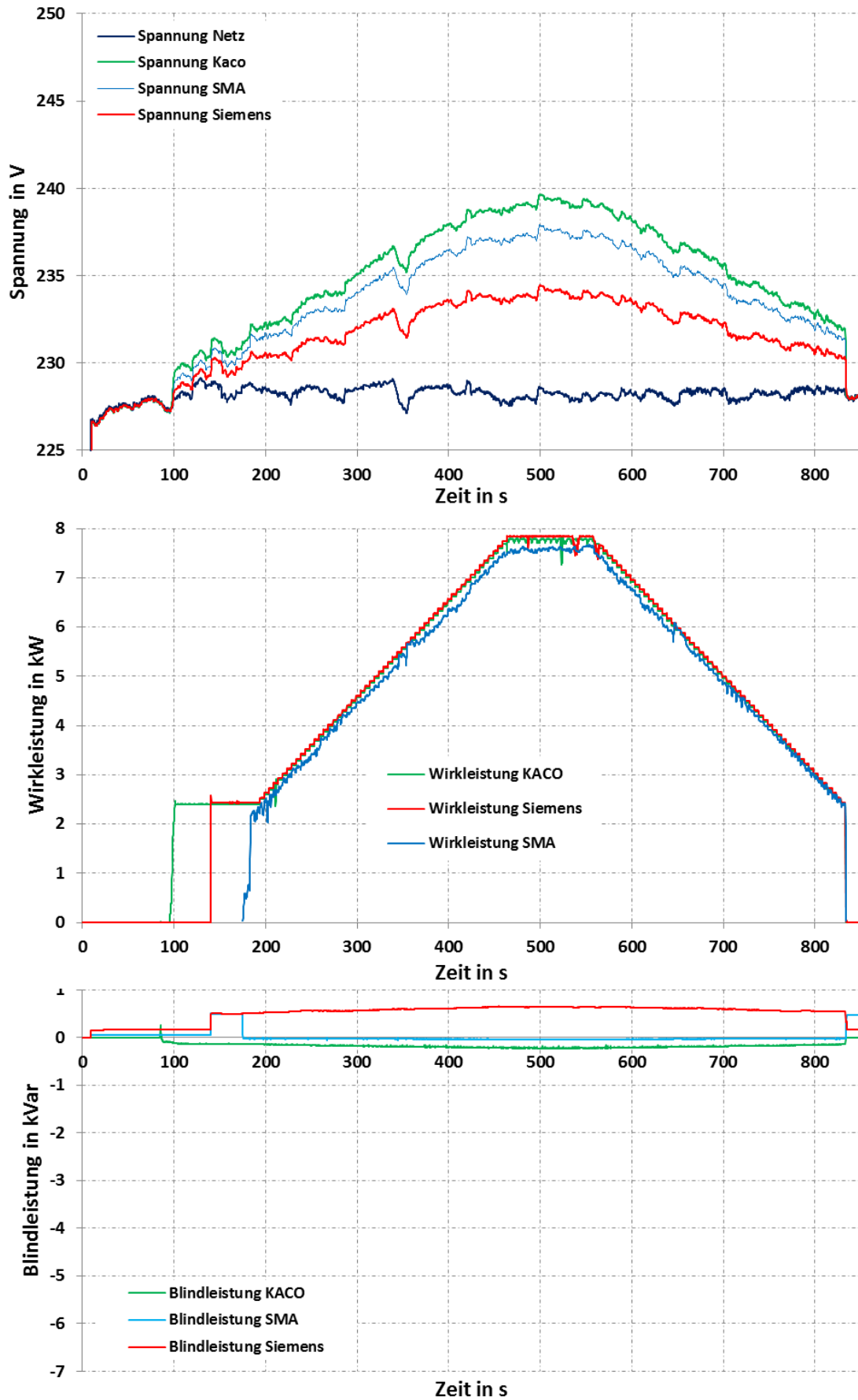


Abbildung 46: typische longitudinale Anordnung: Rampe, Regelung deaktiviert

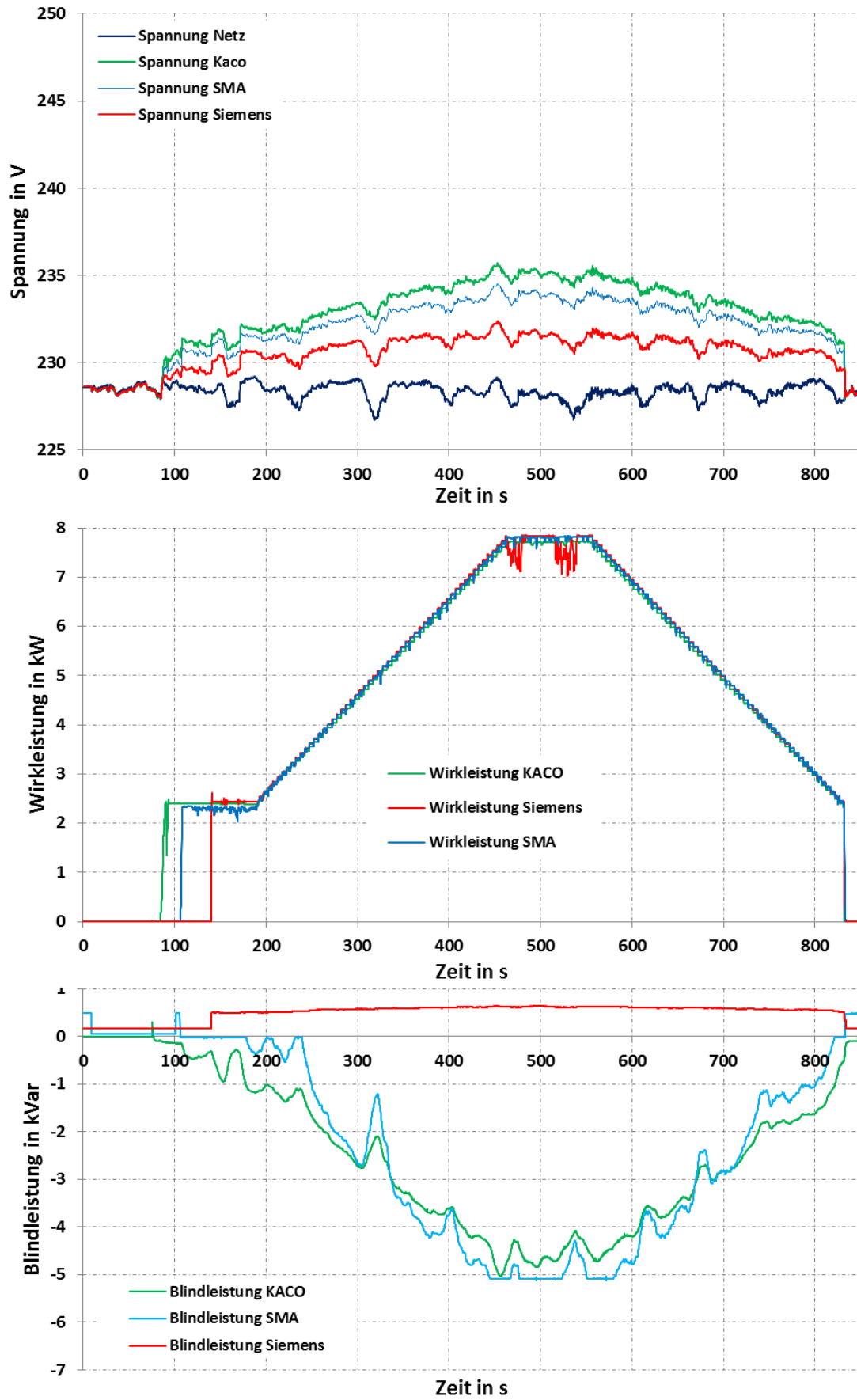


Abbildung 47: typische longitudinale Anordnung: Rampe, kleines Totband

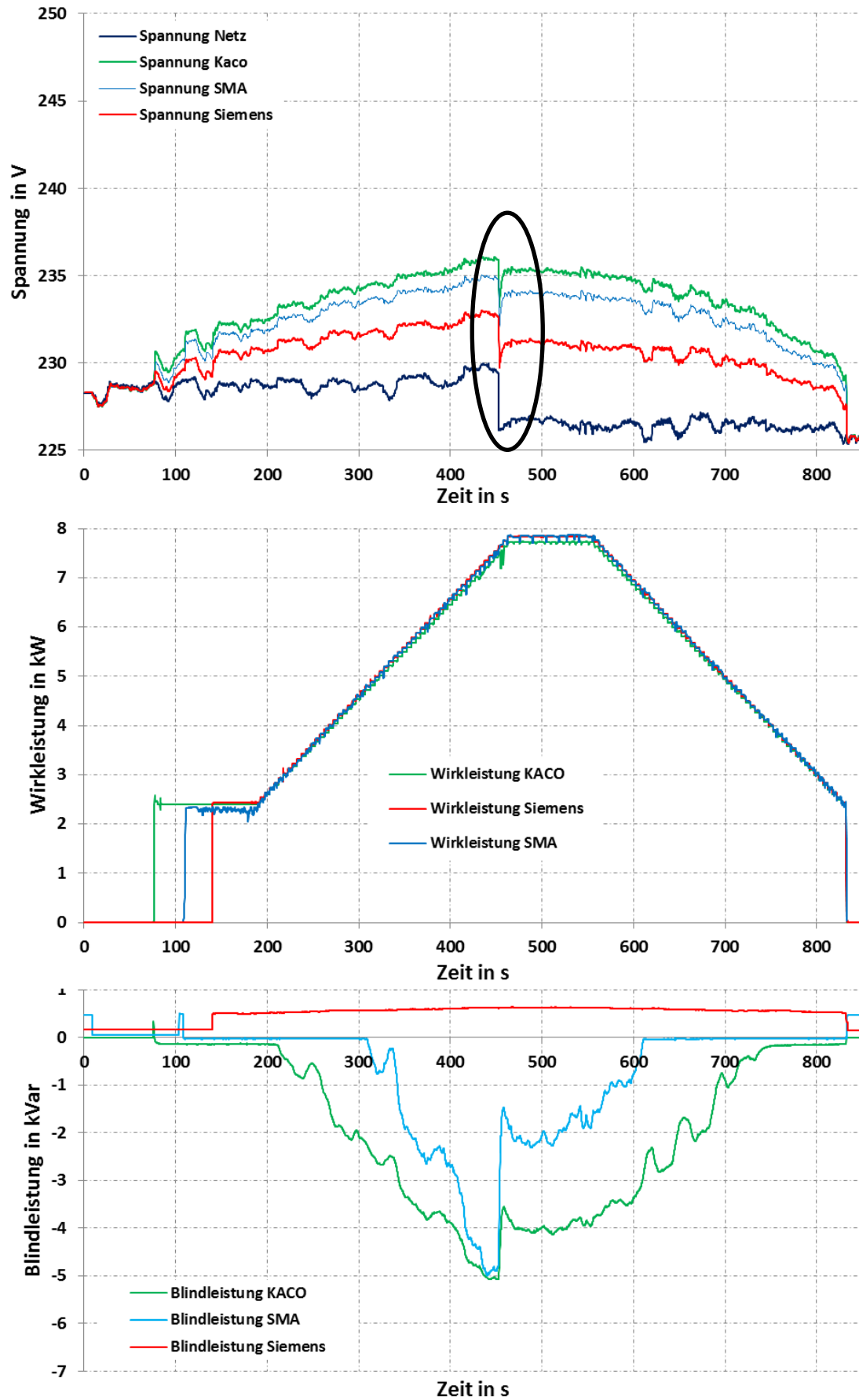


Abbildung 48. Typische longitudinale Anordnung: Rampe, mittleres Totband

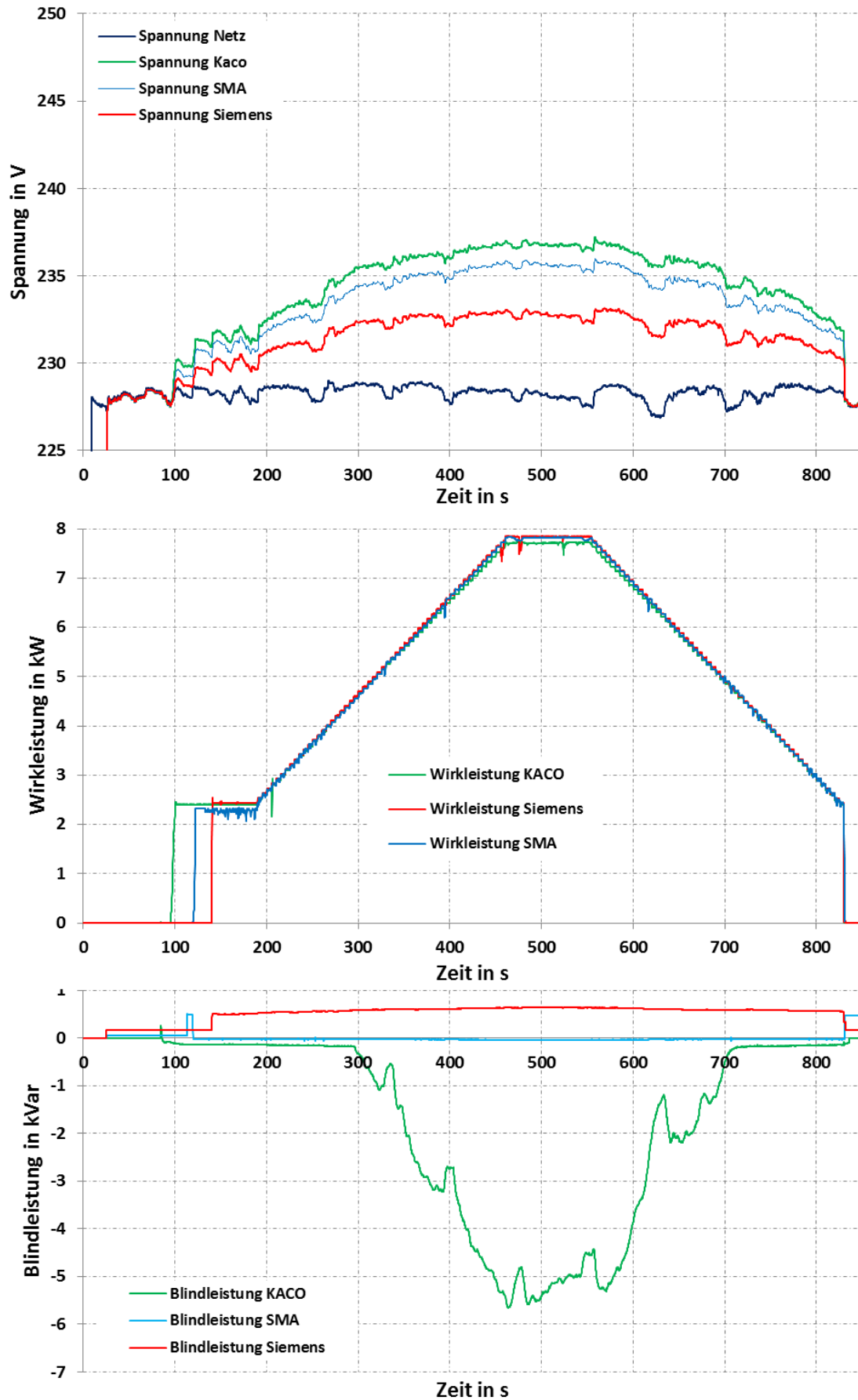


Abbildung 49: typische longitudinale Anordnung: Rampe, großes Totband

liegt darin begründet, dass die verschiedenen Wechselrichter das Eingangssignal (also die Spannung) des Q(U)-Reglers unterschiedlich berechnen. Beim Wechselrichter Kaco wird hier die größte der drei Phasenspannungen verwendet, bei den Wechselrichtern SMA und Siemens hingegen wird der Mittelwert der drei Phasenspannungen verwendet. Durch den starken Einbruch der Spannung U_{L1} , die beim Zuschalten der einphasigen Last an L1 jeweils auftritt, verringert sich der Mittelwert der drei Phasenspannungen. Folglich beziehen die Wechselrichter SMA und Siemens gemäß der Q(U)-Kennlinie weniger Blindleistung. Die beiden anderen Phasenspannungen U_{L2} und U_{L3} steigen jedoch aufgrund der zunehmenden durch die Wechselrichter eingespeisten Wirkleistung und des verringerten Blindleistungsbezugs der Wechselrichter SMA und Siemens weiter an. Somit bezieht der Wechselrichter Kaco im Gegensatz zu den anderen beiden Wechselrichtern mehr Blindleistung.

Hier besteht Klärungsbedarf. Es ist sinnvoll, wenn alle Wechselrichter ihr jeweiliges Eingangssignal des Q(U)-Reglers einheitlich berechnen (siehe auch Abschnitt 5.3.1.1).

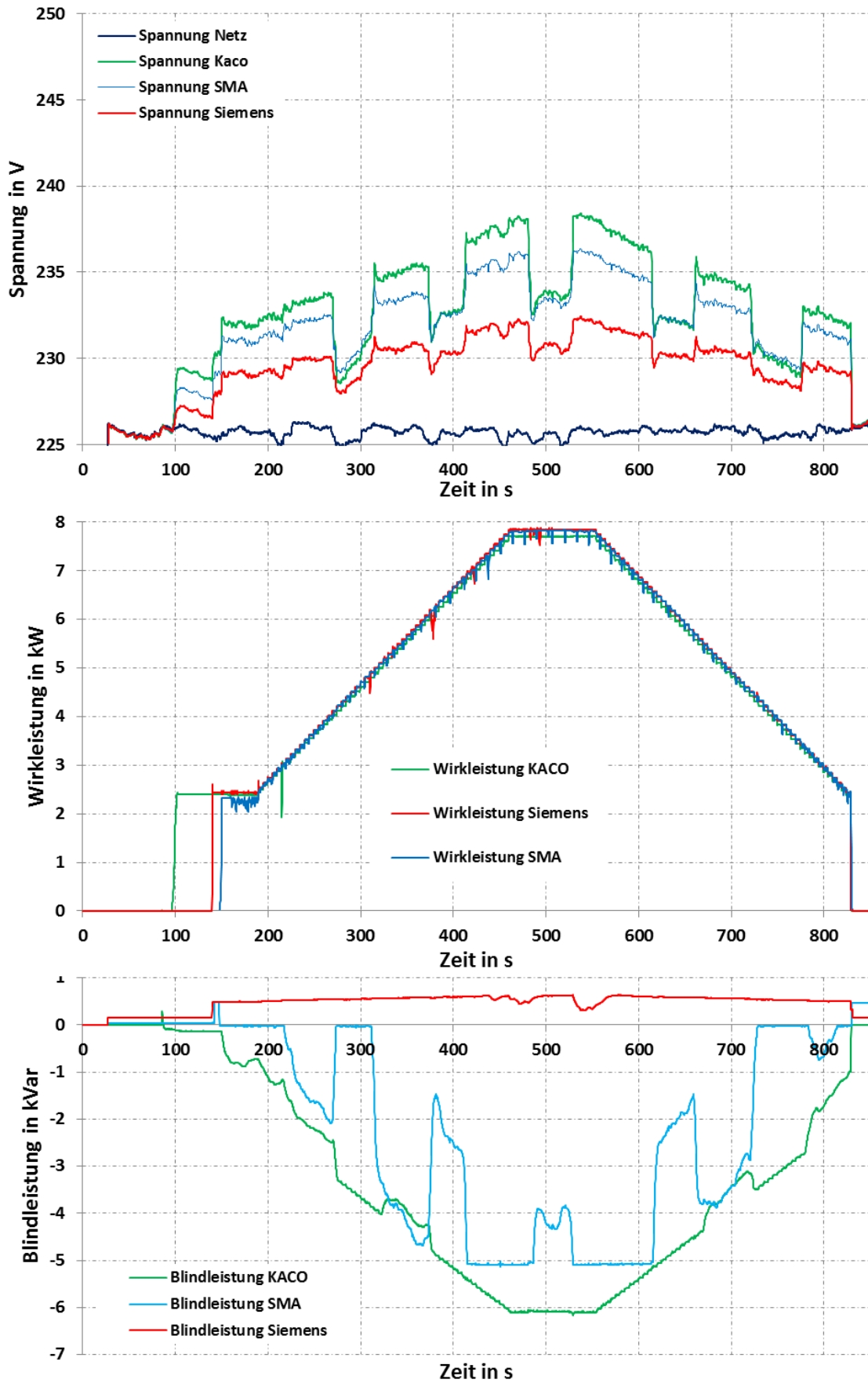


Abbildung 51: extreme longitudinale Anordnung: Rampe, kleines Totband, einphasige Last

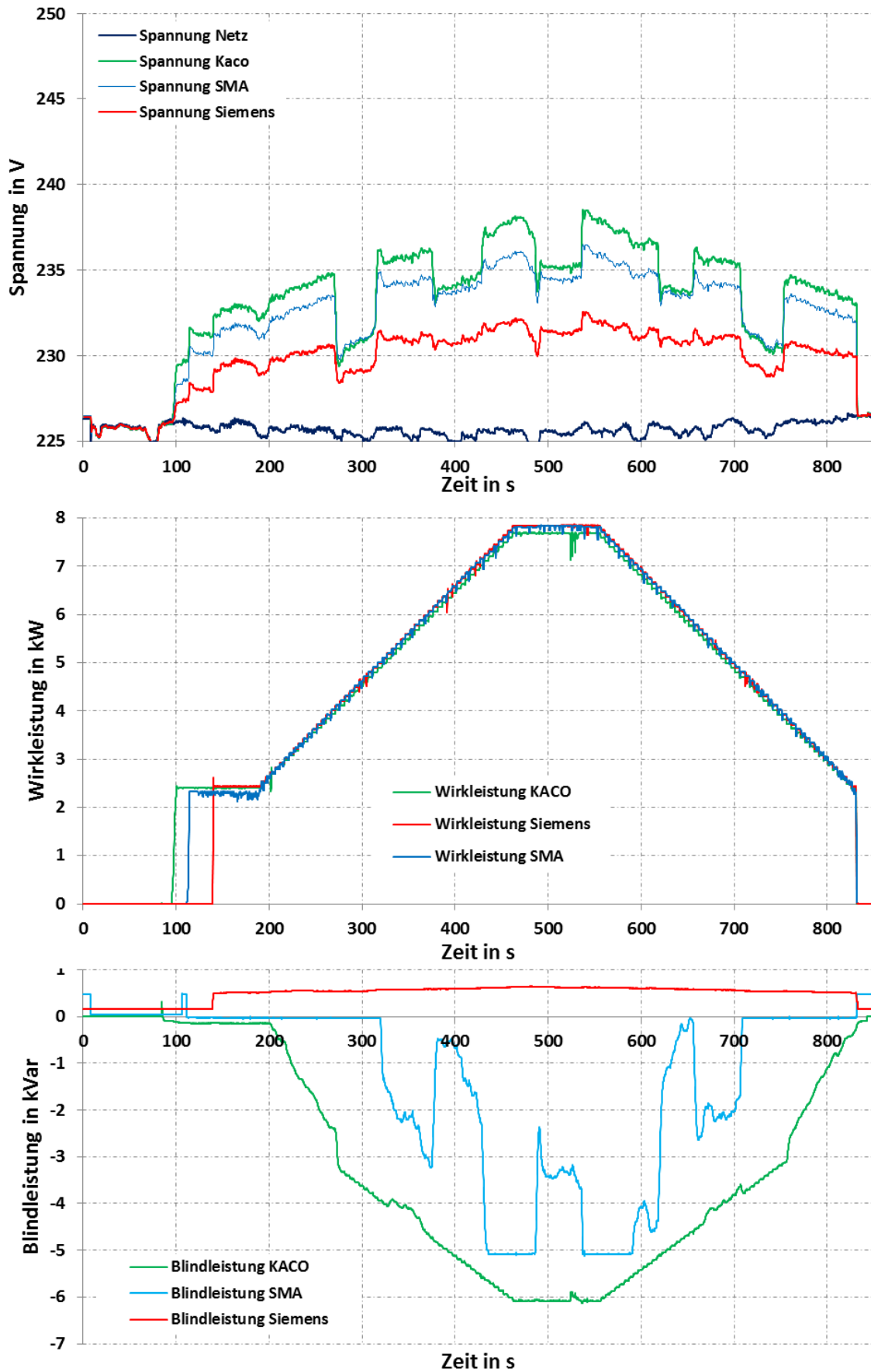


Abbildung 52: extreme longitudinale Anordnung: Rampe, mittleres Totband, einphasige Last

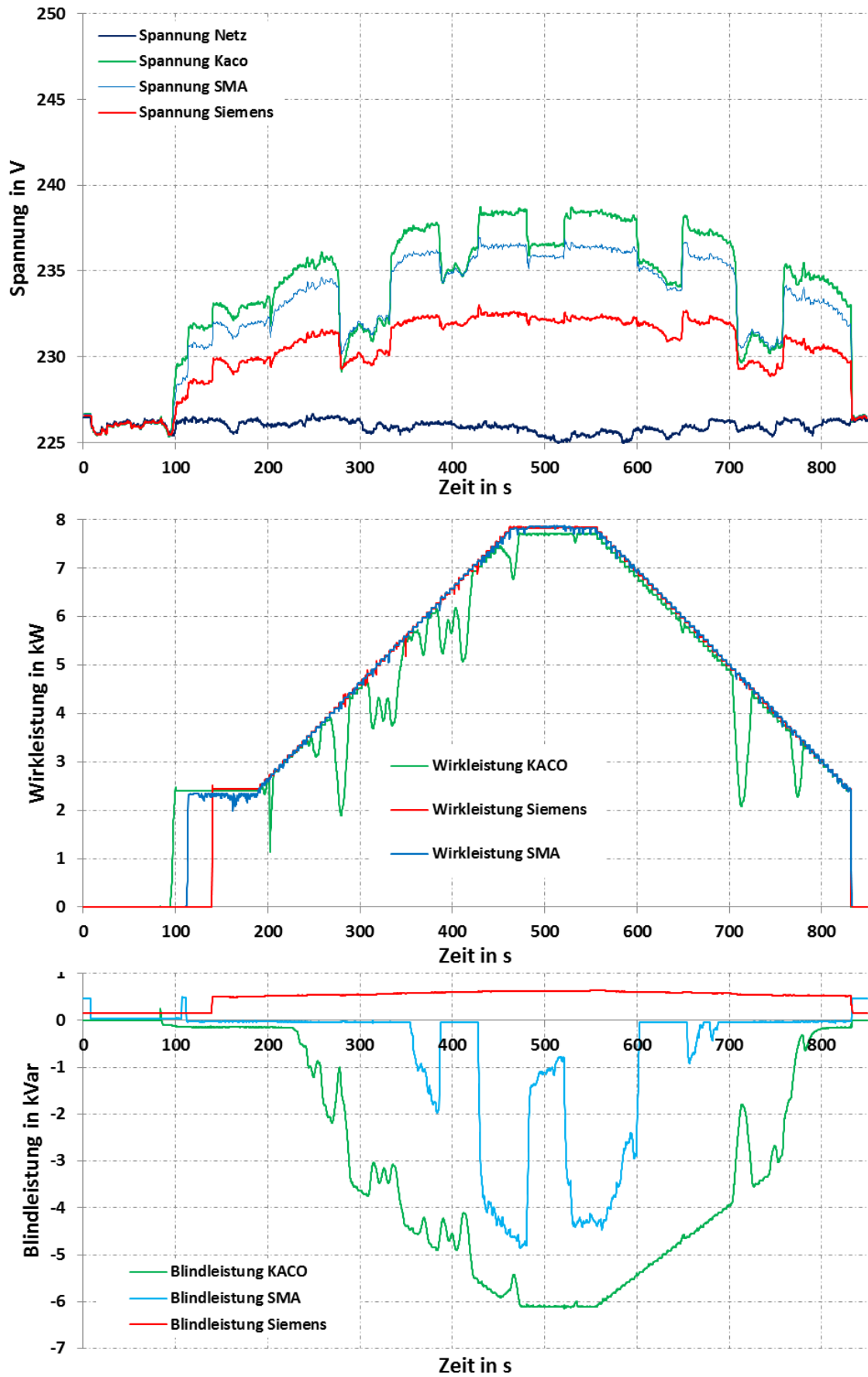


Abbildung 53: extreme longitudinale Anordnung: Rampe, großes Totband, einphasige Last

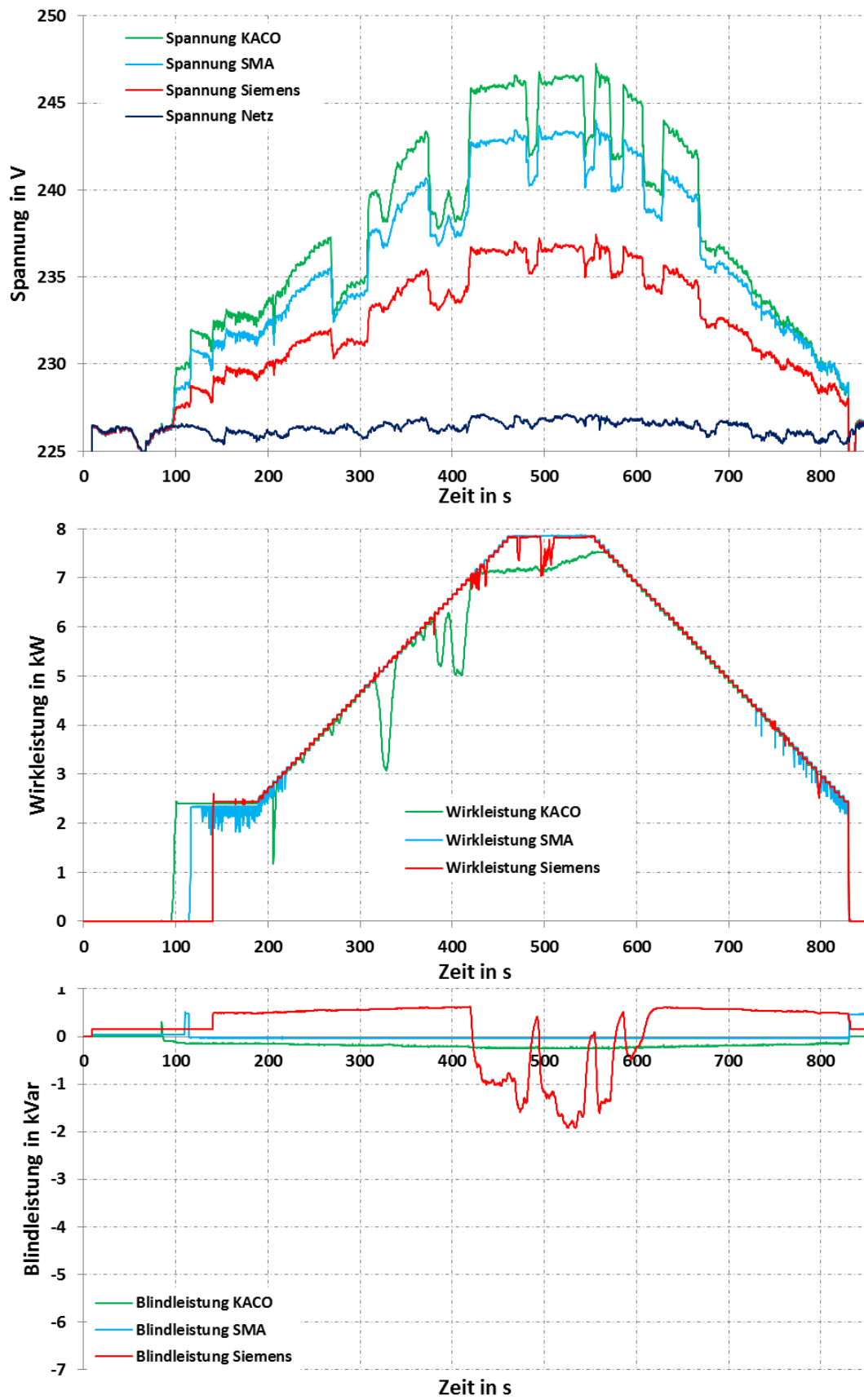


Abbildung 54: extreme longitudinale Anordnung: Rampe, großes Totband, einphasige Last, nur Regelung bei Wechselrichter Siemens aktiviert

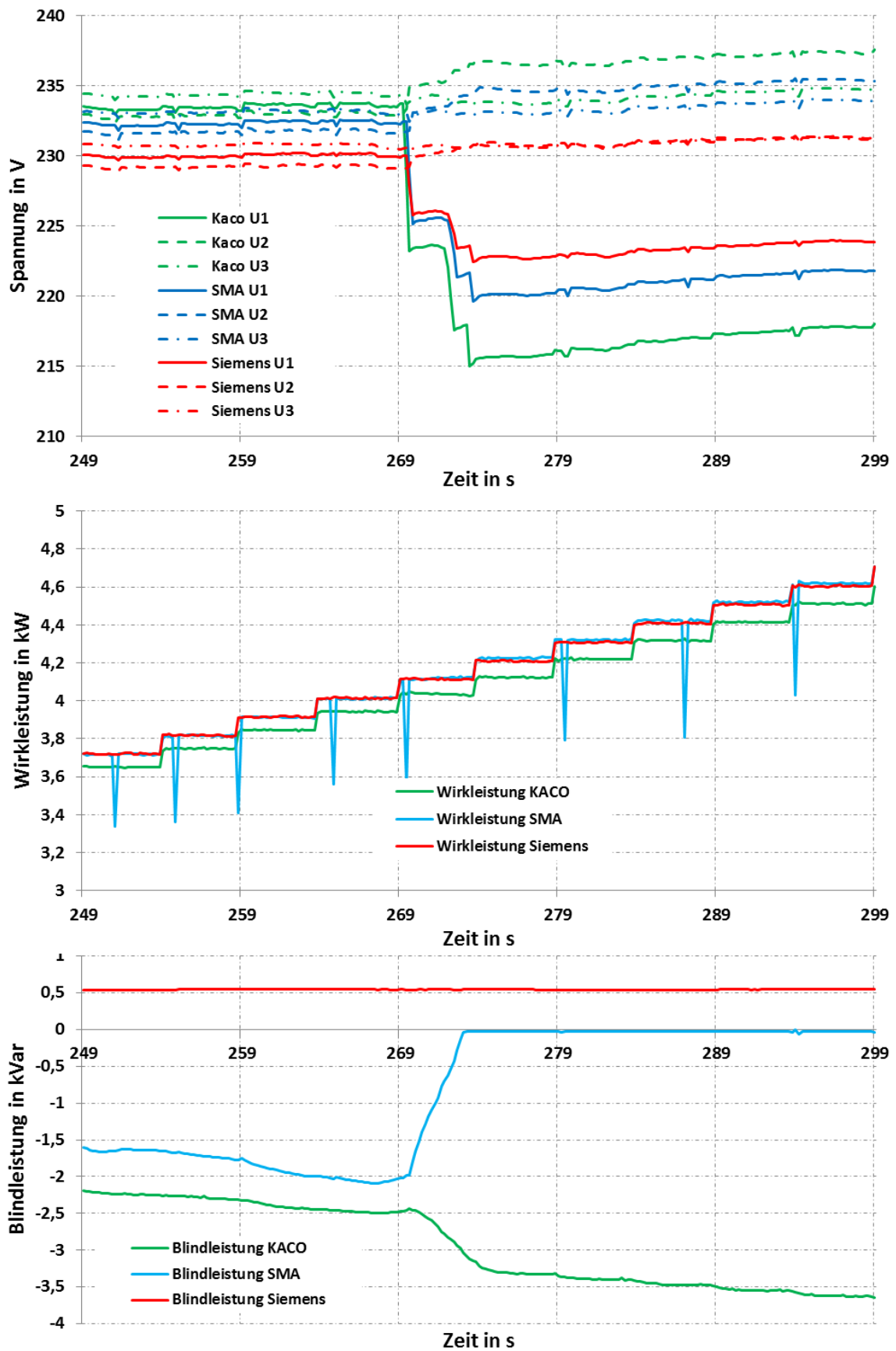


Abbildung 55: detaillierter Ausschnitt: extreme longitudinale Anordnung: Rampe, kleines Totband, einphasige Last

5.3.2 Wechselhafter Tag

5.3.2.1 Extremes Netz

Die Konfiguration des Modellnetzes für den extremen Fall ist in Abbildung 56 dargestellt.

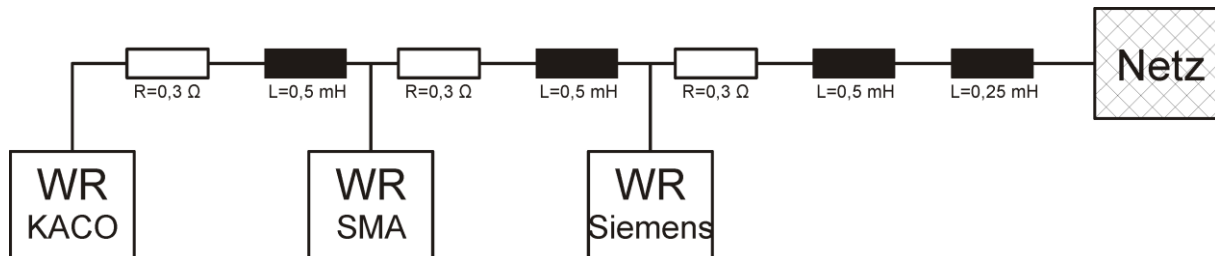


Abbildung 56: Konfiguration der Netznachbildung für den extremen longitudinalen Fall

Die verwendeten Parametersätze der Q(U)-Regelung sind in Tabelle 5 aufgezeigt. Aufgrund der Überlegungen aus Abschnitt 5.2.4 wird die Zeitkonstante des PT1-Glieds der Wechselrichter standardmäßig auf 5 s eingestellt.

Tabelle 5: Parametersätze der Blindleistungsregelung im extremen longitudinalen Fall

Parametersatz	Q(U)-Kennlinie			Zeitkonstante PT1-Glied
	Spannung U			
Kleines Totband	Spannung U	232 V	238 V	5 s
	Blindleistung Q	0	6000 Var	
Mittleres Totband	Spannung U	234 V	238 V	5 s
	Blindleistung Q	0	6000 Var	
Großes Totband	Spannung U	236 V	238 V	5 s
	Blindleistung Q	0	6000 Var	

Es ergeben sich also die in Abbildung 39 dargestellten Q(U)-Kennlinien. Auf eine Parametrierung der Abschnitte der allgemeinen Q(U)-Kennlinie aus Abbildung 9, bei denen Blindleistung zur Spannungsstützung abgegeben werden soll, kann hier verzichtet werden. Am Modellnetz befinden sich nur Einspeiser (PV-Wechselrichter), die die Spannung im Netz erhöhen und keine Lasten, die die Spannung absenken wür-

den. Deswegen ist hier nur der obere Teil der allgemeinen Kennlinie aus Abbildung 9 relevant und parametrisiert.

Die Ergebnisse sind in Abbildung 57 bis Abbildung 60 dargestellt. Der kurze Wirkleistungseinbruch beim Wechselrichter KACO wird durch dessen MPP-Tracker verursacht. Der Einbruch der Spannungen in Abbildung 59 (siehe Markierung) wird durch das Schalten des Stufenstellers im Umspannwerk verursacht. Dieser Spannungssprung beeinflusst die Q(U)-Regelung nicht negativ. Es sind keine weiteren Auffälligkeiten oder Hinweise für mögliches instabiles Verhalten anzutreffen.

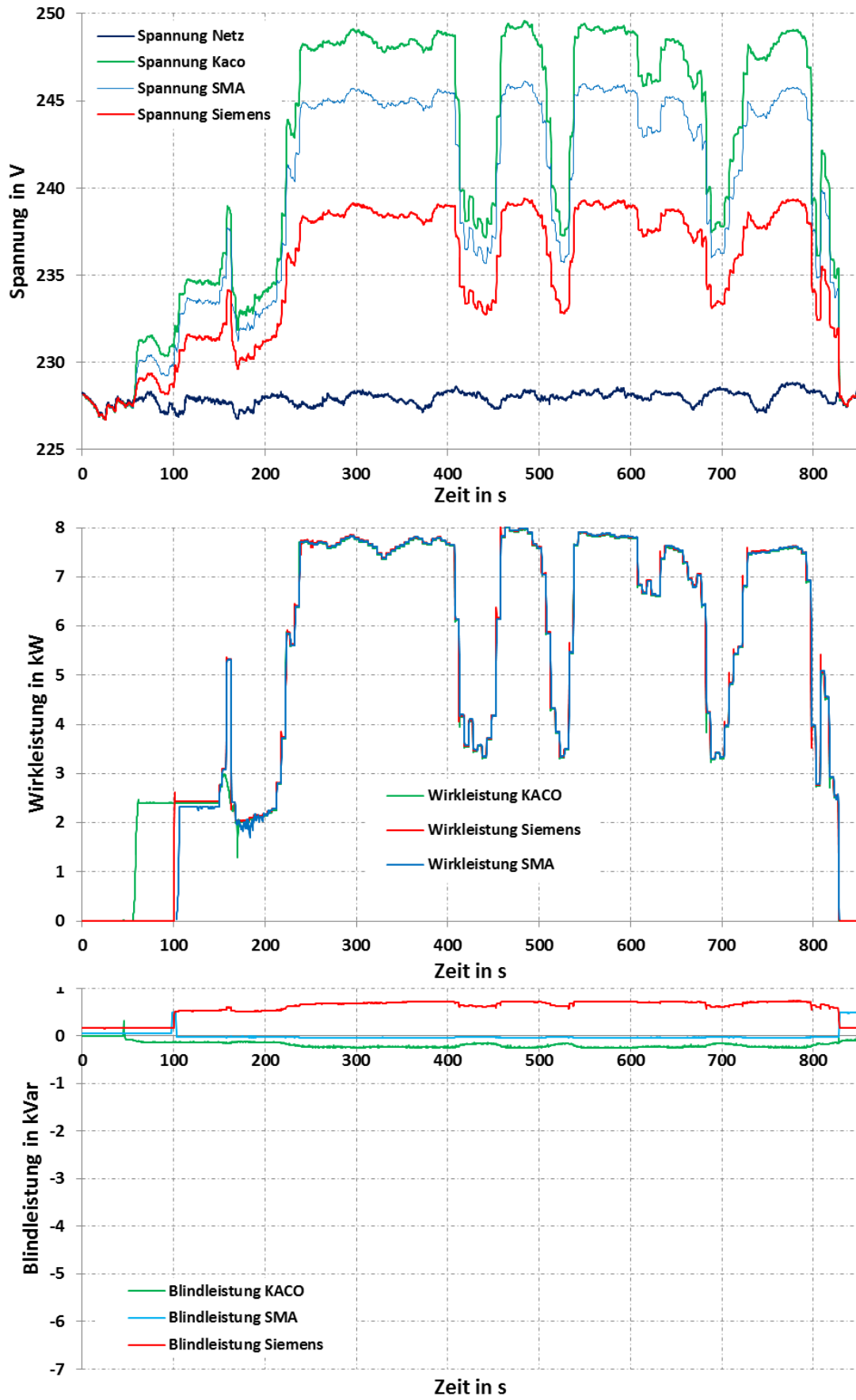


Abbildung 57: extreme longitudinale Anordnung: wechselhaft, ohne Regelung

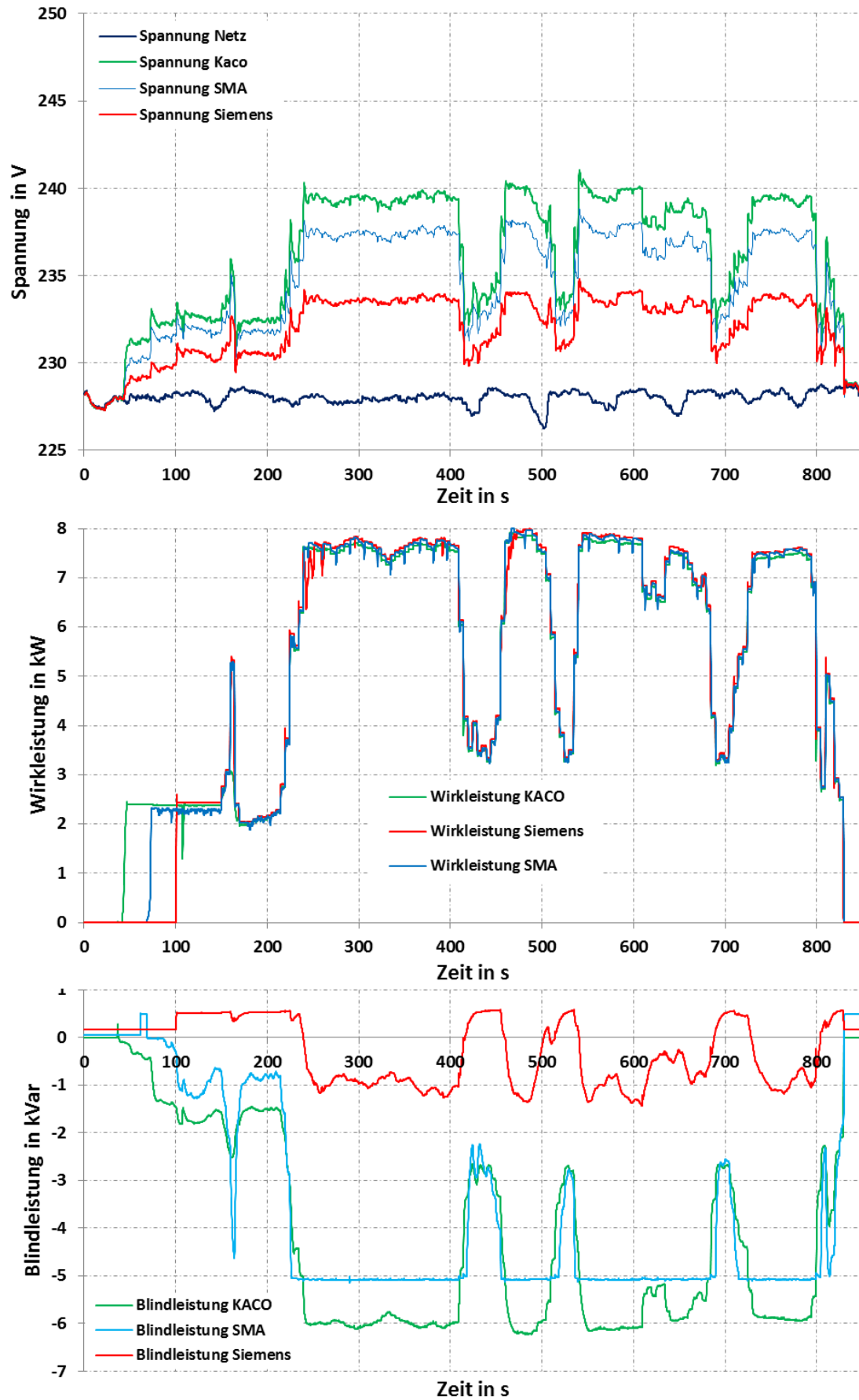


Abbildung 58: extreme longitudinale Anordnung: wechselhaft, kleines Totband

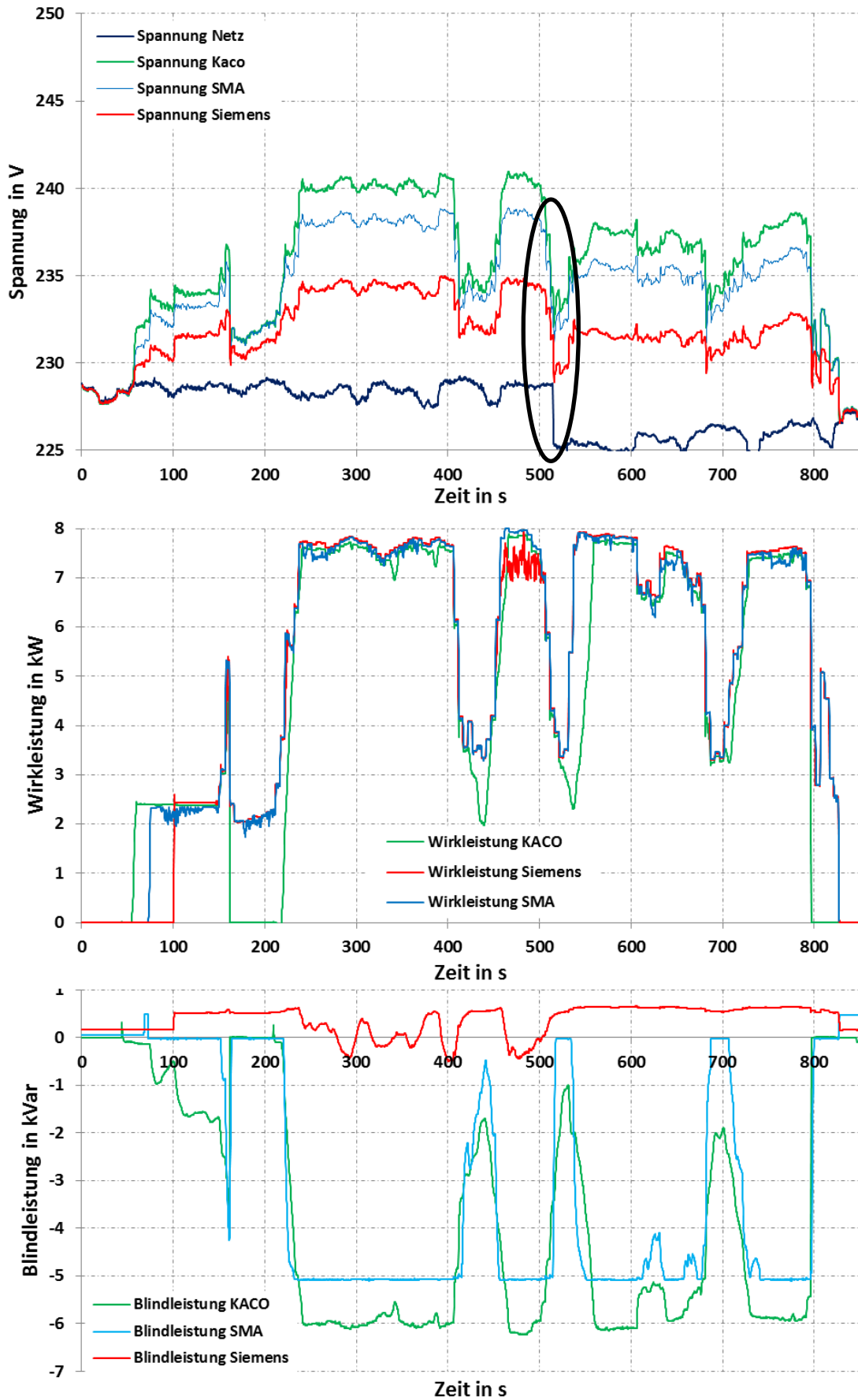


Abbildung 59: extreme longitudinale Anordnung: wechselhaft, mittleres Totband

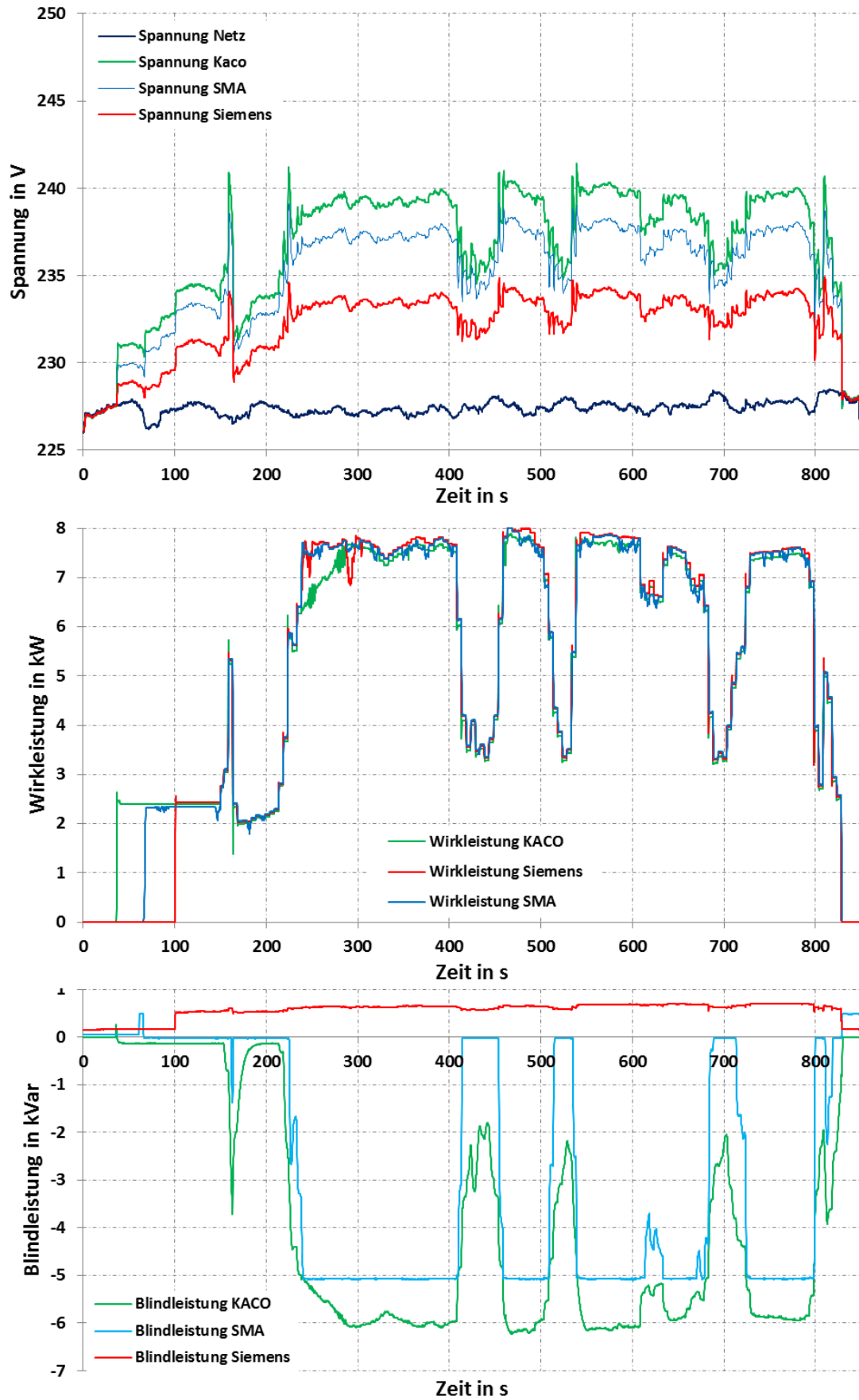


Abbildung 60: extreme longitudinale Anordnung: wechselhaft, großes Totband

5.3.2.2 Typisches Netz

Die Konfiguration des Modellnetzes für den typischen Fall ist in Abbildung 45 dargestellt.

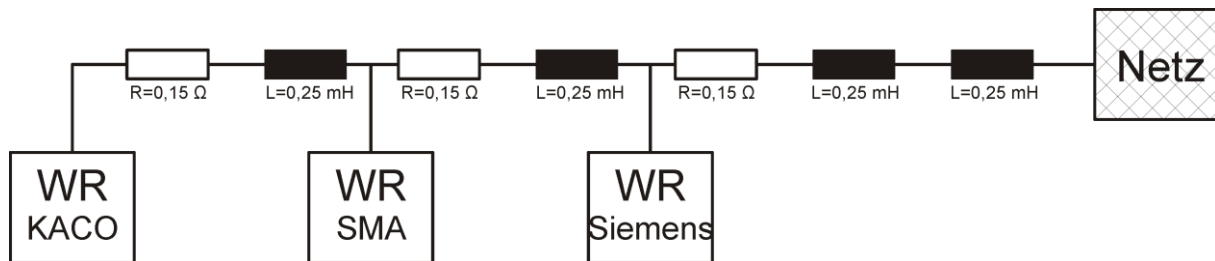


Abbildung 61: Konfiguration der Netznachbildung für den typischen longitudinalen Fall

Die verwendeten Parametersätze der Q(U)-Regelung sind in Tabelle 6 aufgezeigt. Aufgrund der Überlegungen aus Abschnitt 5.2.4 wird die Zeitkonstante des PT1-Glieds der Wechselrichter standardmäßig auf 5 s eingestellt.

Tabelle 6: Parametersätze der Blindleistungsregelung im typischen longitudinalen Fall

Parametersatz	Q(U)-Kennlinie			PT1-Glied
	Spannung U	232 V	238 V	
Kleines Totband	Blindleistung Q	0	6000 Var	5 s
	Spannung U	234 V	238 V	
Mittleres Totband	Blindleistung Q	0	6000 Var	5 s
	Spannung U	236 V	238 V	
Großes Totband	Blindleistung Q	0	6000 Var	5 s
	Spannung U	236 V	238 V	

Es ergeben sich also die in Abbildung 39 dargestellten Q(U)-Kennlinien. Auf eine Parametrierung der Abschnitte der allgemeinen Q(U)-Kennlinie aus Abbildung 9, bei denen Blindleistung zur Spannungsstützung abgegeben werden soll, kann hier verzichtet werden. Am Modellnetz befinden sich nur Einspeiser (PV-Wechselrichter), die die Spannung im Netz erhöhen und keine Lasten, die die Spannung absenken würden. Deswegen ist hier nur der obere Teil der allgemeinen Kennlinie aus Abbildung 9 relevant und parametrierbar.

Die Ergebnisse sind in Abbildung 62 bis Abbildung 65 dargestellt. Der kurze Wirkleistungseinbruch beim Wechselrichter KACO wird durch dessen MPP-Tracker verursacht. Exemplarisch wurde in Abbildung 63 die Q(U)-Regelung der Wechselrichter Kaco erst mitten in der Messreihe aktiviert. Damit sollte untersucht werden, ob die Q(U)-Regelung durch allfällige Initialisierungsvorgänge neu hinzukommender regelbarer Wechselrichter gestört wird. Es sind keine weiteren Auffälligkeiten oder Hinweise für mögliches instabiles Verhalten anzutreffen.

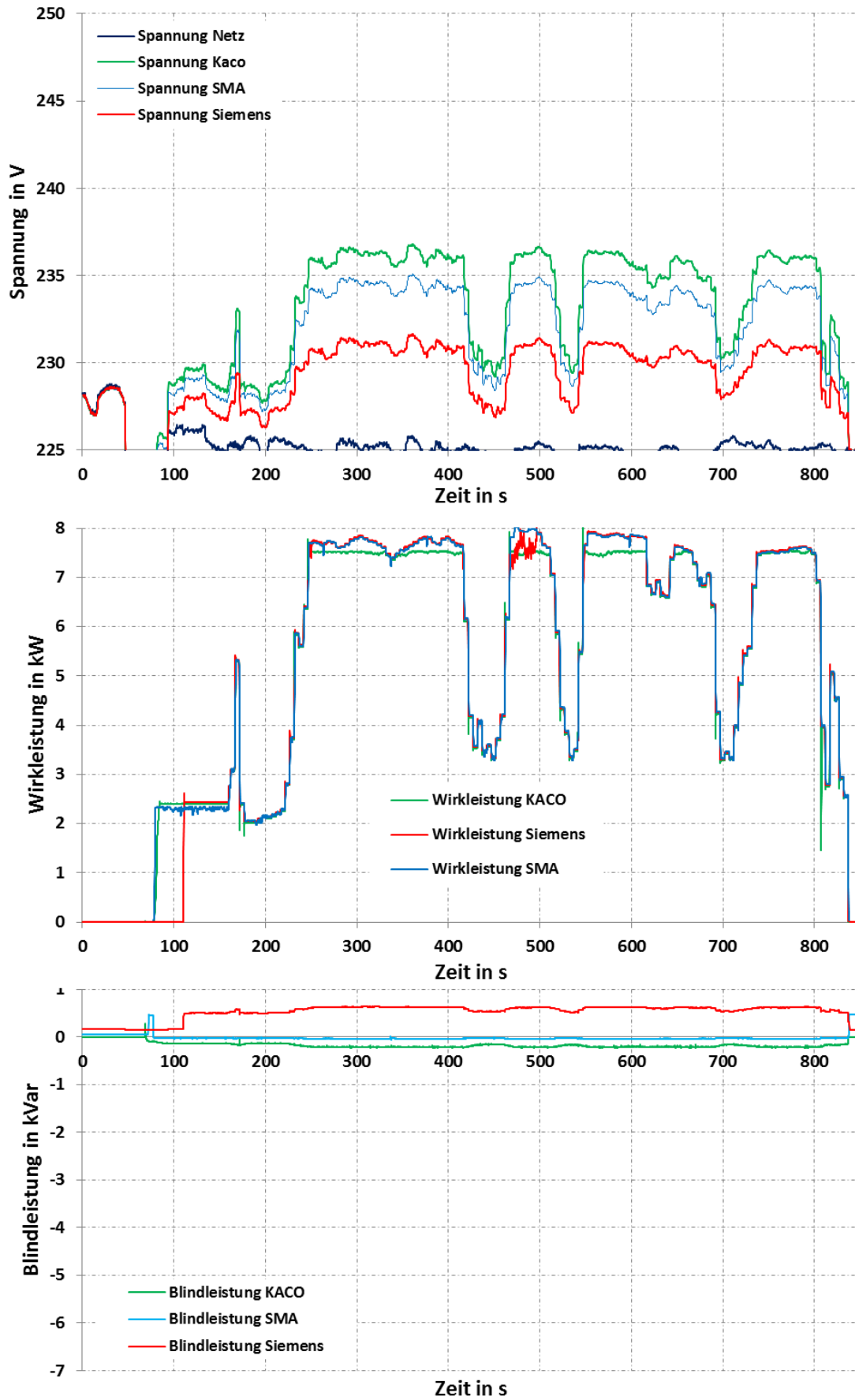


Abbildung 62: typische longitudinale Anordnung: wechselhaft, ohne Regelung

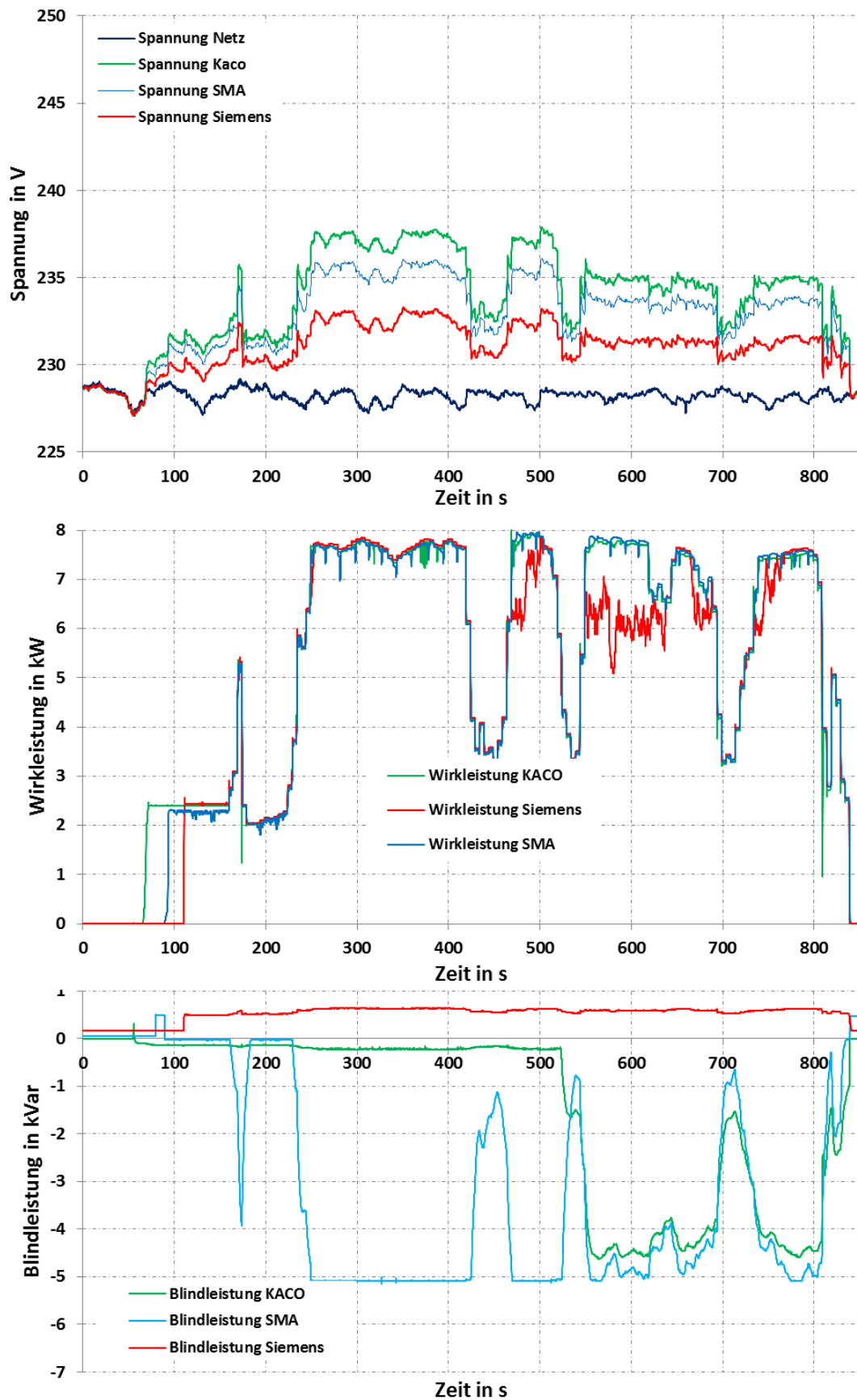


Abbildung 63: typische longitudinale Anordnung: wechselhaft, kleines Totband (WR Kaco: Regelung erst bei t = 520 s aktiviert)

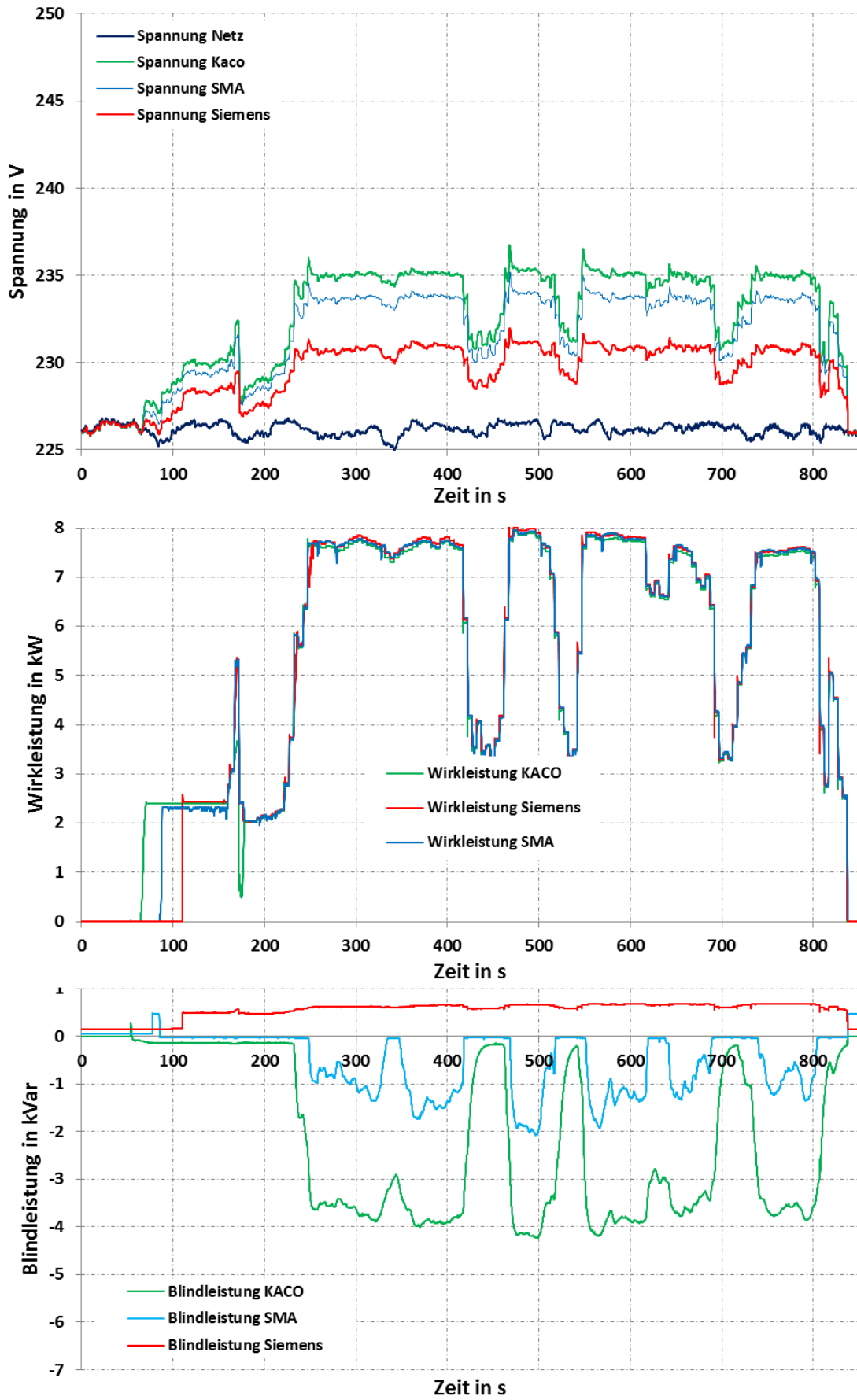


Abbildung 64: typische longitudinale Anordnung: wechselhaft, mittleres Totband

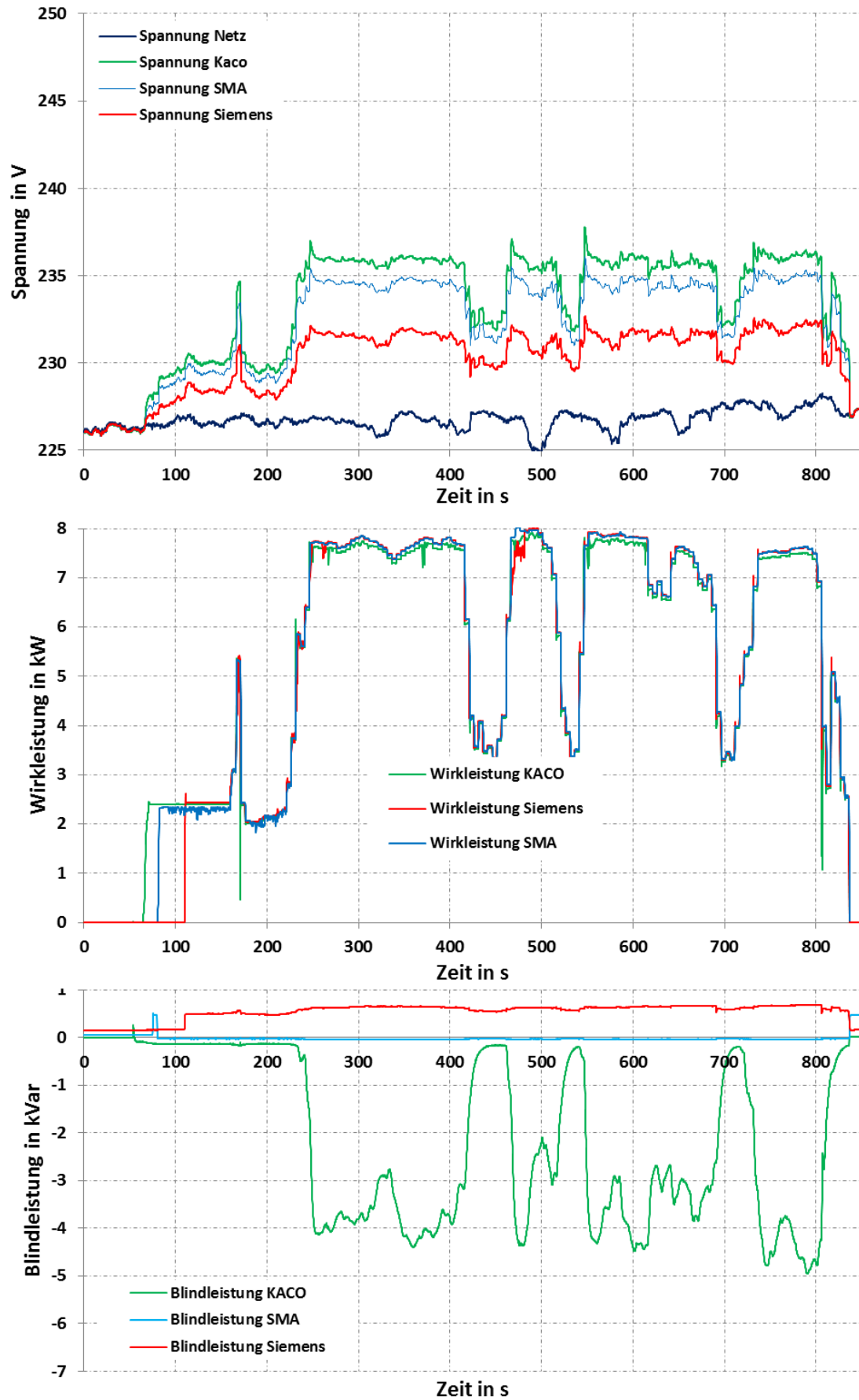


Abbildung 65: typische longitudinale Anordnung: wechselhaft, großes Totband

5.3.2.3 *Variation Zeitkonstante des PT1-Gliedes*

Für die extreme Netzanordnung aus Abbildung 56 wird für den Parametersatz „kleines Totband“ aus Tabelle 5 eine Variation der Zeitkonstante des PT1-Gliedes durchgeführt. Die Untersuchungen erfolgen für ein PT1-Glied mit der Zeitkonstante 20 s. Das Ergebnis ist in Abbildung 66 dargestellt. Eine Zeitkonstante von 20 s wirkt sich nicht negativ auf das Stabilitätsverhalten des Gesamtsystems aus. Es dauert jedoch länger, bis die Regelung spürbar eingreift und die Spannung absinkt.

Bei schnellen Leistungsänderungen kommt es hier zu einem kurzzeitigen Überschwingen der Spannung (siehe Markierung in Abbildung 66). Dieses Verhalten ist auch an den Sprungantworten der Wechselrichter (siehe Abschnitt 5.2) deutlich zu erkennen. Dieses Überschwingen verletzt jedoch nicht die DIN EN 50160 und ist auch bezüglich des Flickerverhaltens besser als der Spannungsverlauf ohne Q(U)-Regelung.

Bei kleineren Zeitkonstanten tritt dieses hier beobachtete Überschwingen der Spannung merklich geringer ausgeprägt auf (vergleiche Abbildung 58). Eine zu kleine Zeitkonstante des PT1-Gliedes ist jedoch nicht sinnvoll, weil dadurch das Gesamtsystem zu empfindlich werden würde. Zudem sind die maximal auftretenden Leistungsänderungen durch die Sonne und die PV-Anlage an sich begrenzt.

Allgemein lässt sich für dezentrale Einspeiser am Niederspannungsnetz (PV, BHKW, etc.) empfehlen, dass die Q(U) Regelung ein wenig (ca. ein- bis fünfmal) schneller sein sollte, als die maximal erwartbare Leistungsänderung $\frac{dP}{dt}$ der Erzeugungsanlage. Eine zu schnelle (größer zehnmal) Q(U) Regelung jedoch aus oben genannten Gründen ebenfalls nicht sinnvoll.

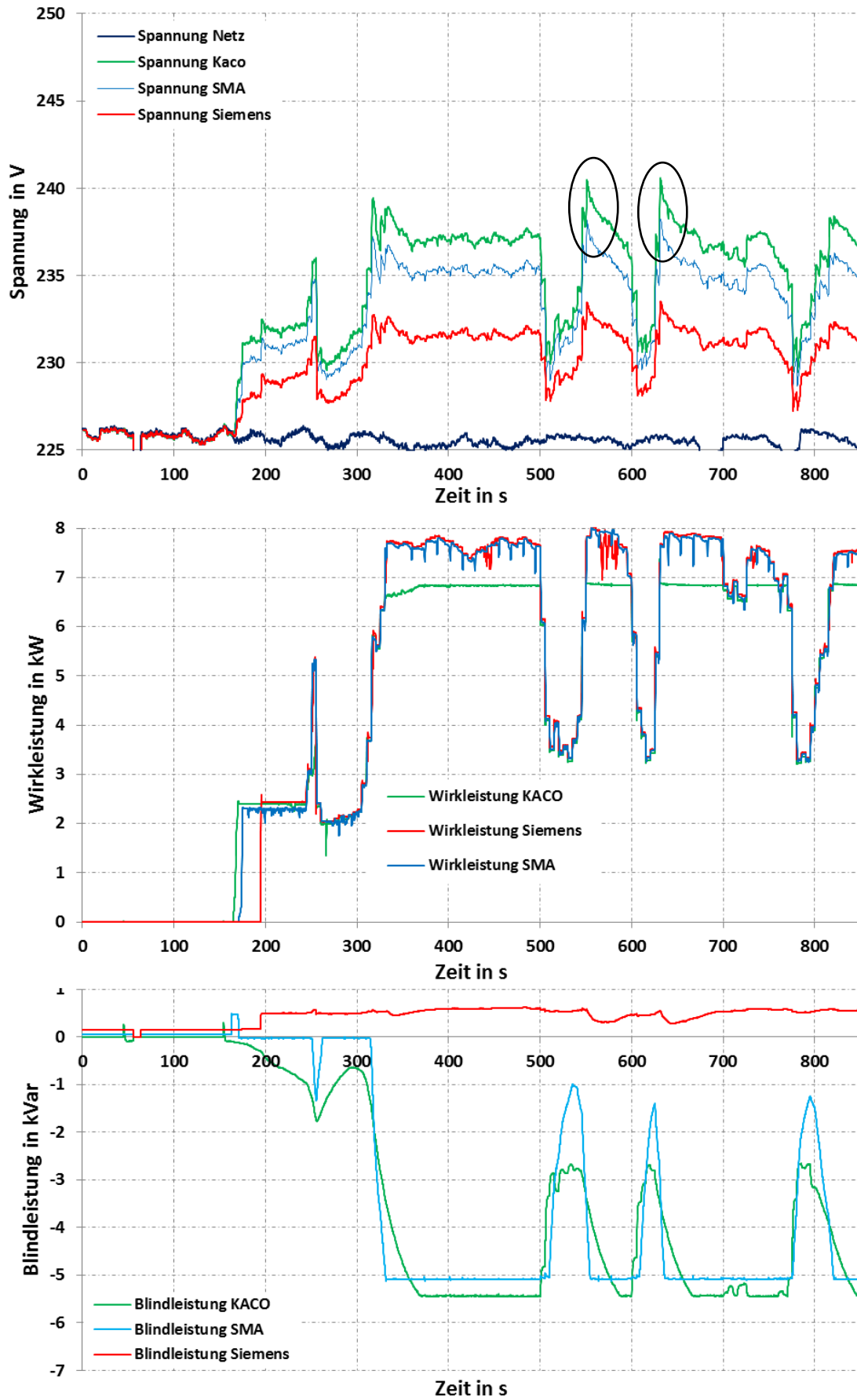


Abbildung 66: extreme longitudinale Anordnung: wechselhaft, kleines Totband, PT1 20 s

5.3.3 Wolkenzug

Bisher wurden nur Versuchsreihen durchgeführt, bei denen allen drei beteiligten Wechselrichtern stets identische Einspeiseprofile vorgegeben werden. In der longitudinalen Anordnung können in der Realität jedoch zeitversetzte Profile auftreten, die durch Wolkenzug verursacht werden. Deswegen wird eine Versuchsreihe durchgeführt, bei der die Wechselrichter die Einspeiseprofile jeweils um 15 s zeitversetzt nachfahren.

Dies entspricht einer Geschwindigkeit des Wolkenzugs für das extreme Netz vom 15,3 m/s. Typische Werte liegen zwischen 10 m/s und 20 m/s. [11]

Als Netzkonfiguration wird die extreme longitudinale Anordnung nach Abbildung 56 gewählt. Die Regler werden gemäß Tabelle 5 parametrisiert. Die Ergebnisse sind Abbildung 67 bis Abbildung 70 zu entnehmen. Deutlich zu erkennen ist jeweils die Abschwächung der auftretenden Spannungsgradienten durch den Zeitversatz der Einspeiseprofile. Hinweise auf allfälliges instabiles Verhalten der Regelung sind nicht zu erkennen.

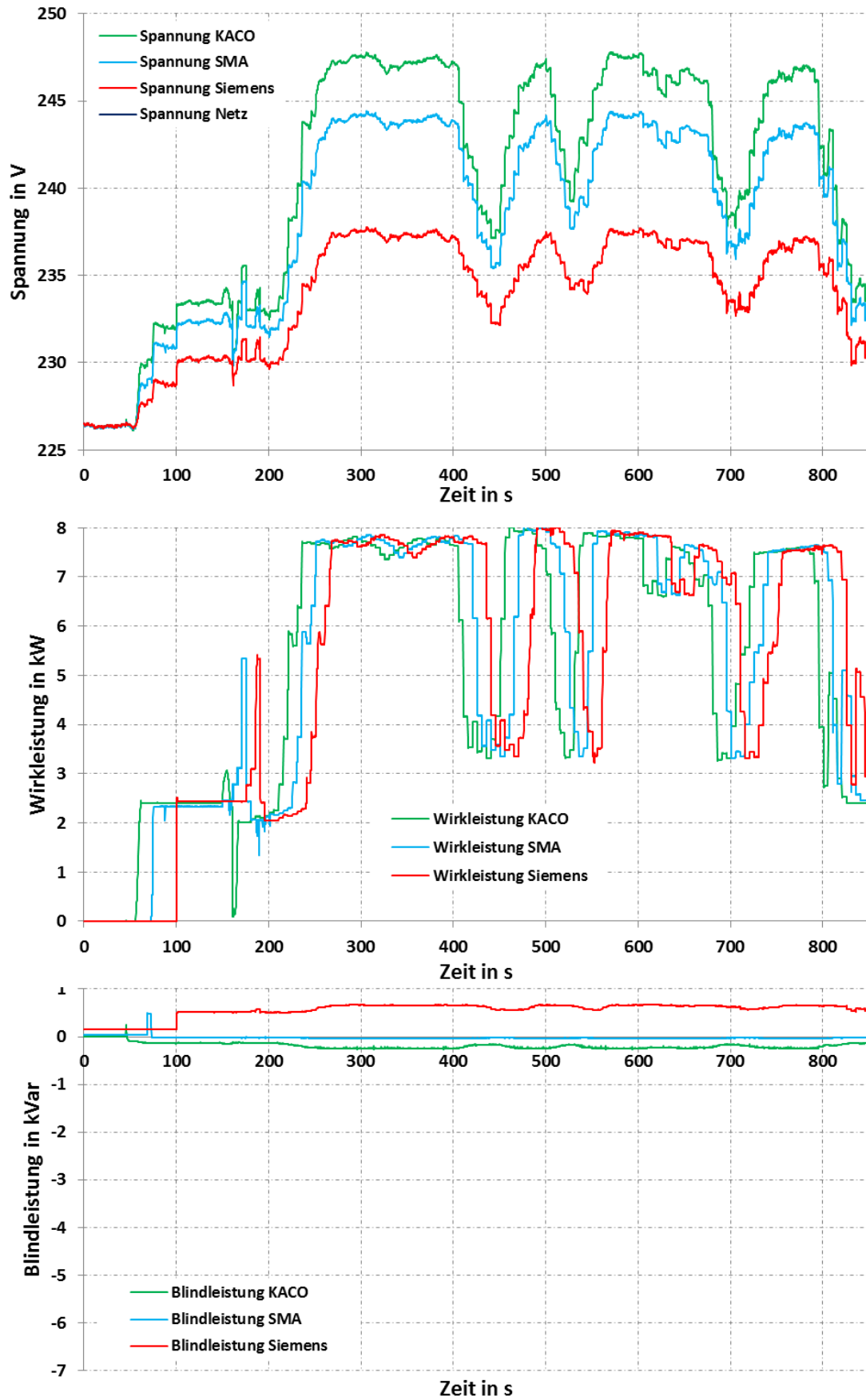


Abbildung 67: extreme longitudinale Anordnung: wechselhaft, Wolkenzug, ohne Regelung

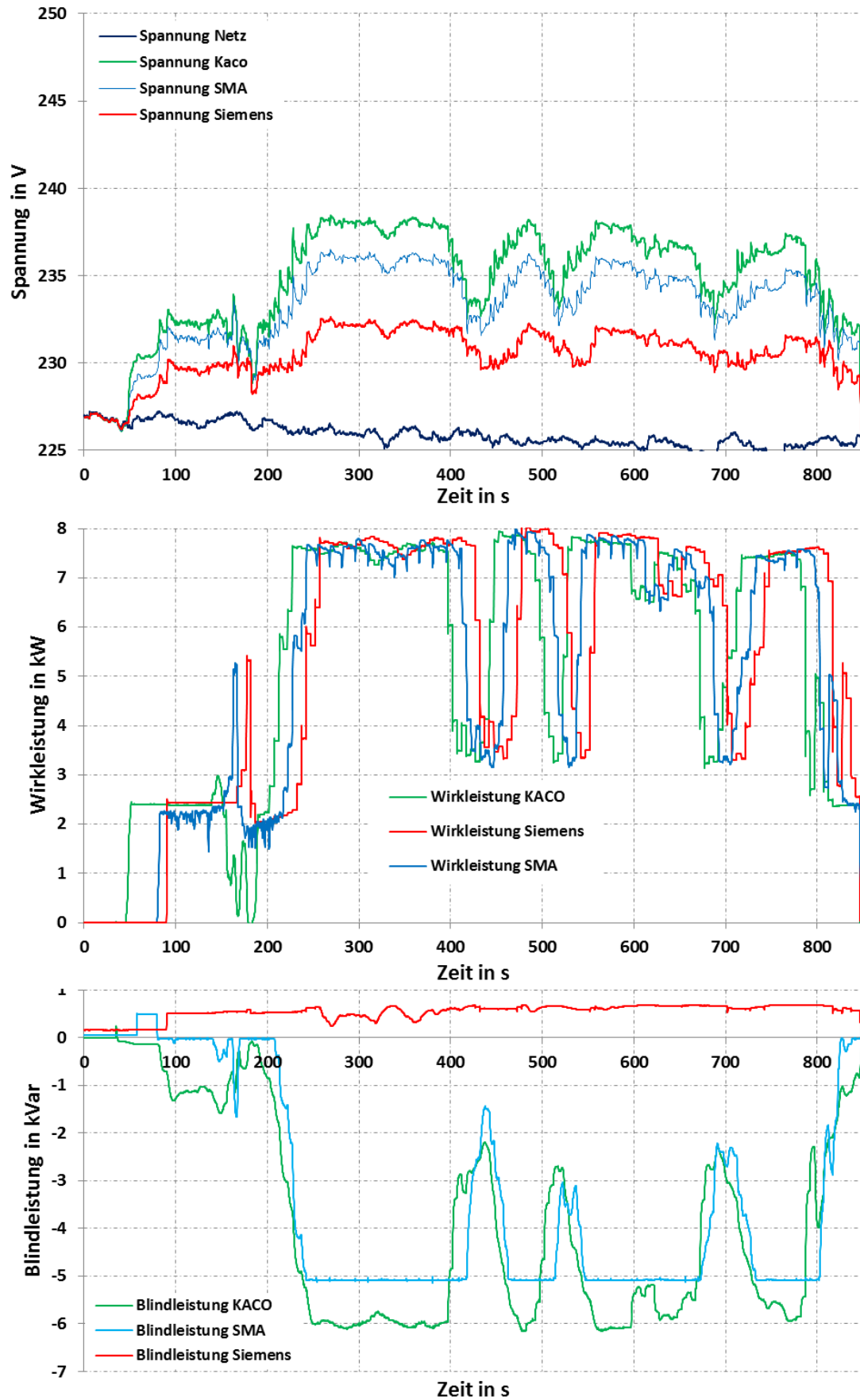


Abbildung 68: extreme longitudinale Anordnung: wechselhaft, Wolkenzug, kleines Totband

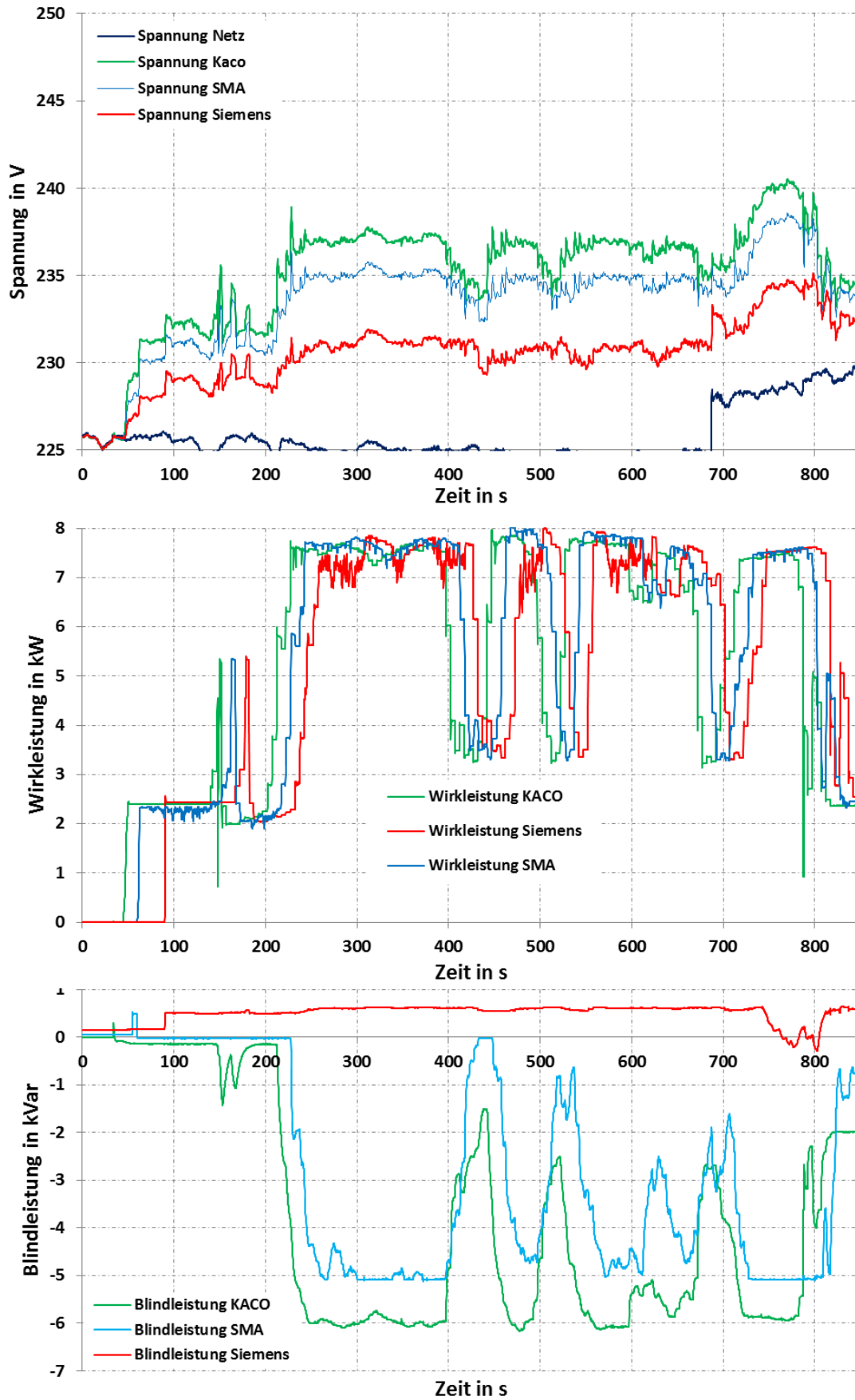


Abbildung 69: extreme longitudinale Anordnung: wechselhaft, Wolkenzug, mittleres Totband

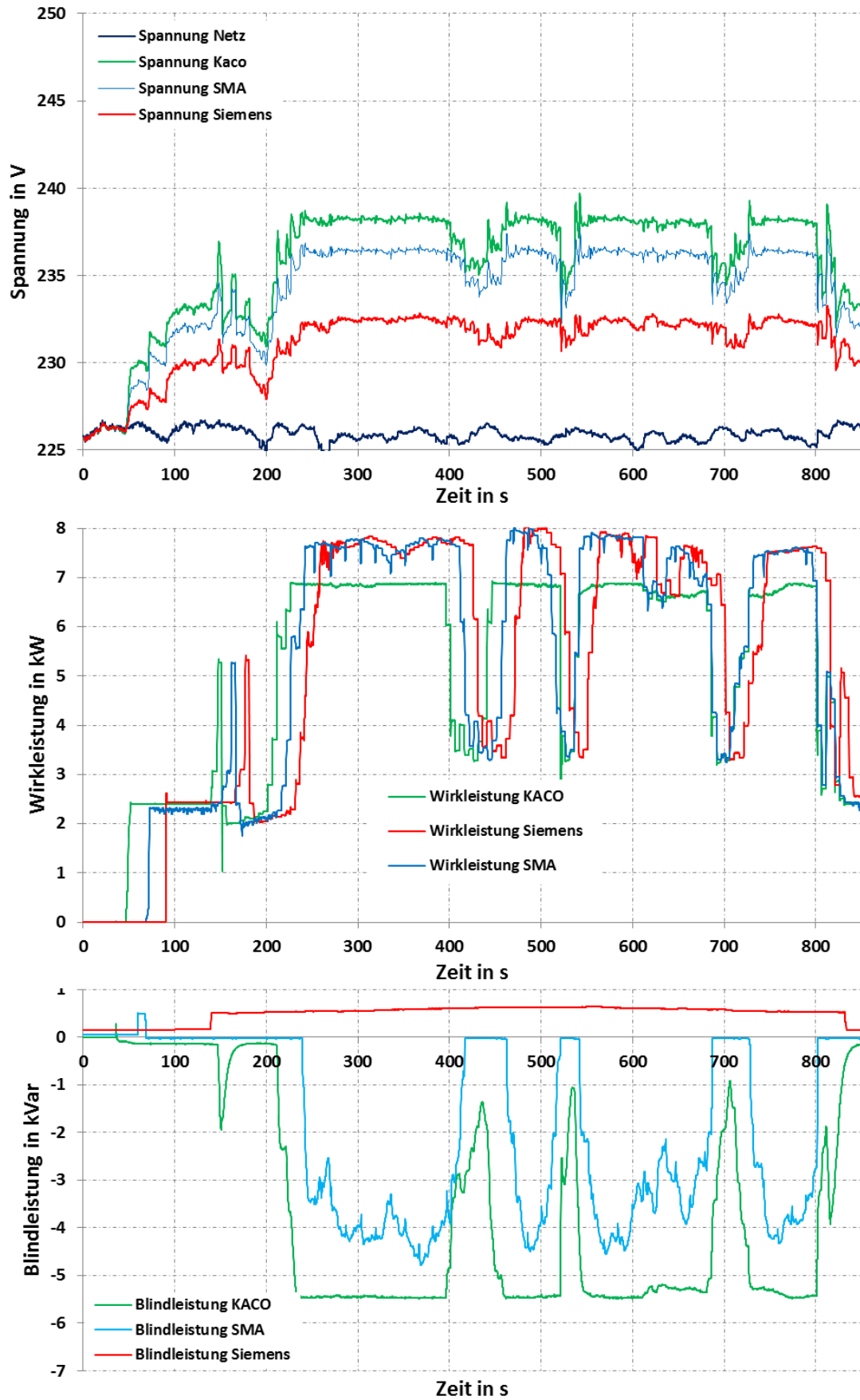


Abbildung 70: extreme longitudinale Anordnung: wechselhaft, Wolkenzug, großes Totband

5.4 Parallele Anordnung

Als weitere Netzkonfiguration wird eine parallele Anordnung der Wechselrichter am Ende des nachgebildeten Netzstrahls untersucht. Hier wird nur eine typische Anordnung betrachtet, da die Spannungen bei der extremen Anordnung zu hoch sind. Es ergibt sich also die in Abbildung 71 gezeigte Netzkonfiguration. Hierbei handelt es sich um die potentiell kritischste Situation, dass keine Dämpfung zwischen den Wechselrichtern vorhanden ist.

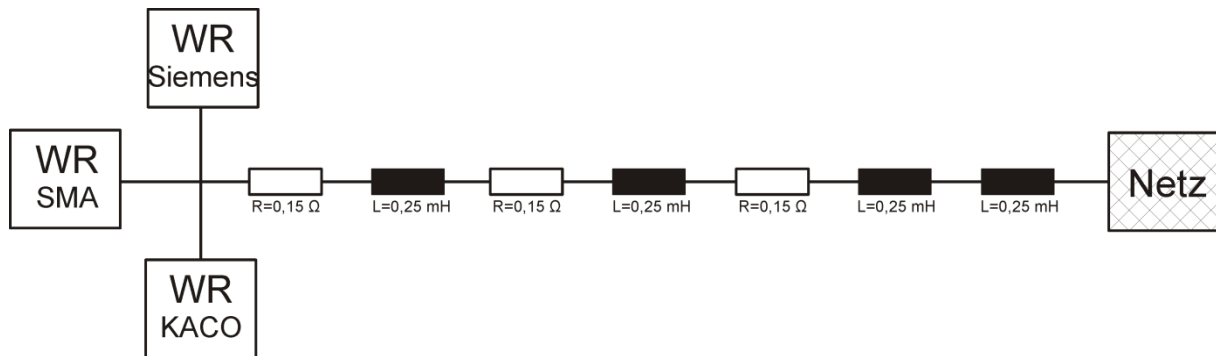


Abbildung 71: Konfiguration des Netzmodells für den typischen parallelen Fall

Die Parametrierung der Q(U)-Regler ist Tabelle 7 zu entnehmen. Aufgrund der Überlegungen aus Abschnitt 5.2.4 wird die Zeitkonstante des PT1-Glieds der Wechselrichter standardmäßig auf 5 s eingestellt.

Tabelle 7: Reglerparameter für die typische parallele Anordnung

Parametersatz	Q(U)-Kennlinie			Zeitkonstante PT1-Glied
	Spannung U	232 V	238 V	
Kleines Totband	Blindleistung Q	0	6000 Var	5 s
	Spannung U	234 V	238 V	
Mittleres Totband	Blindleistung Q	0	6000 Var	5 s
	Spannung U	236 V	238 V	
Großes Totband	Blindleistung Q	0	6000 Var	5 s
	Spannung U	236 V	238 V	

Es ergeben sich also die in Abbildung 39 dargestellten Q(U)-Kennlinien. Auf eine Parametrierung der Abschnitte der allgemeinen Q(U)-Kennlinie aus Abbildung 9, bei denen Blindleistung zur Spannungsstützung abgegeben werden soll, kann hier verzichtet werden. Am Modellnetz befinden sich nur Einspeiser (PV-Wechselrichter), die die Spannung im Netz erhöhen und keine Lasten, die die Spannung absenken würden. Deswegen ist hier nur der obere Teil der allgemeinen Kennlinie aus Abbildung 9 relevant und parametriert.

5.4.1 Rampe

Die Ergebnisse sind in Abbildung 72 bis Abbildung 75 dargestellt. Anzeichen für instabiles Verhalten sind nicht zu erkennen. Die kurzzeitigen Einbrüche der eingespeisten Leistung bei den Wechselrichtern Siemens und Kaco werden durch deren MPP-Tracker verursacht.

Es ist zu erkennen, dass die Wechselrichter trotz gleicher Spannung unterschiedliches Regelverhalten zeigen (vergleiche z. B. Abbildung 72). Hier besteht Klärungsbedarf hinsichtlich einer Standardisierung des Regelverhaltens.

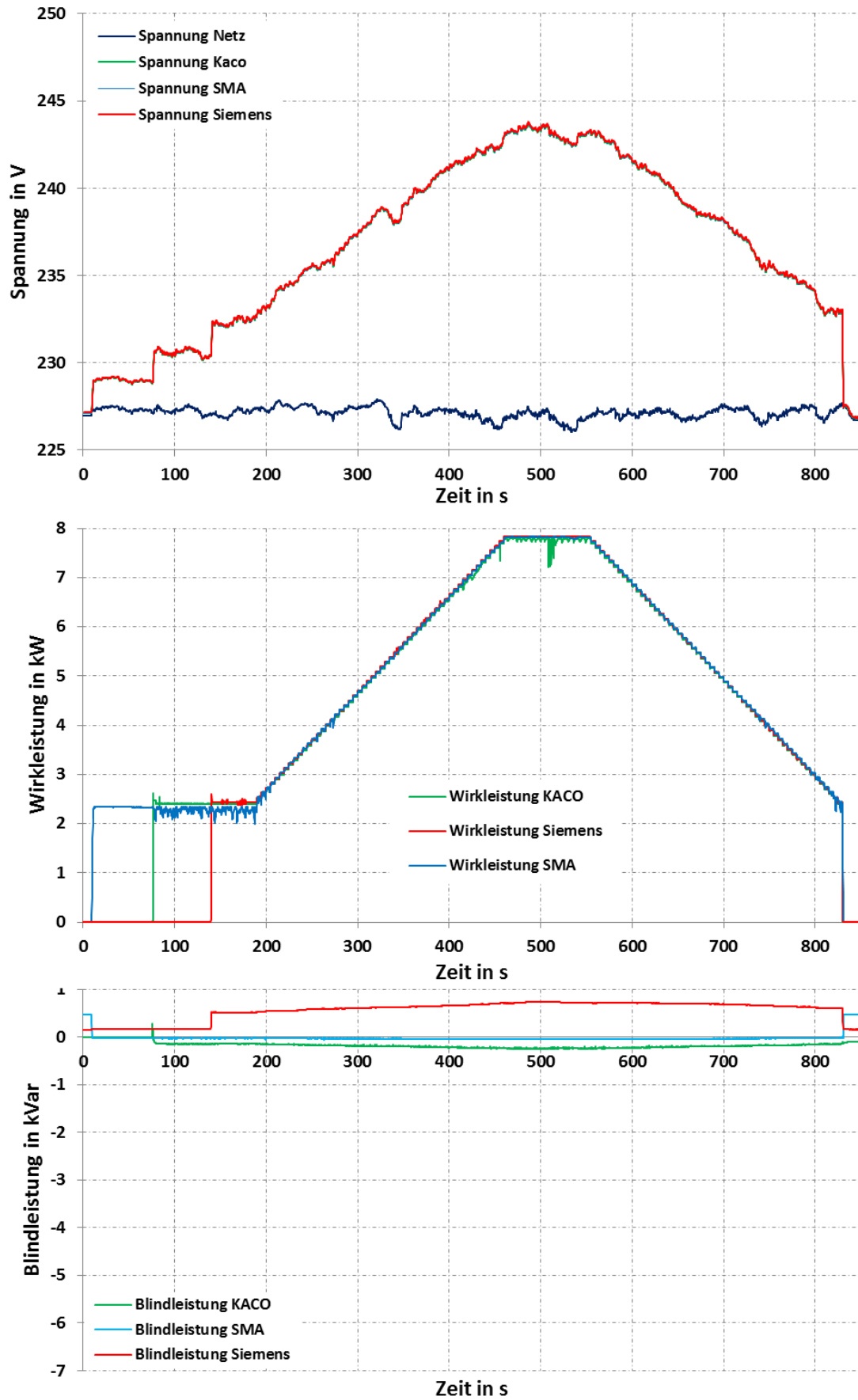


Abbildung 72: typische parallele Anordnung: Rampe, ohne Regelung

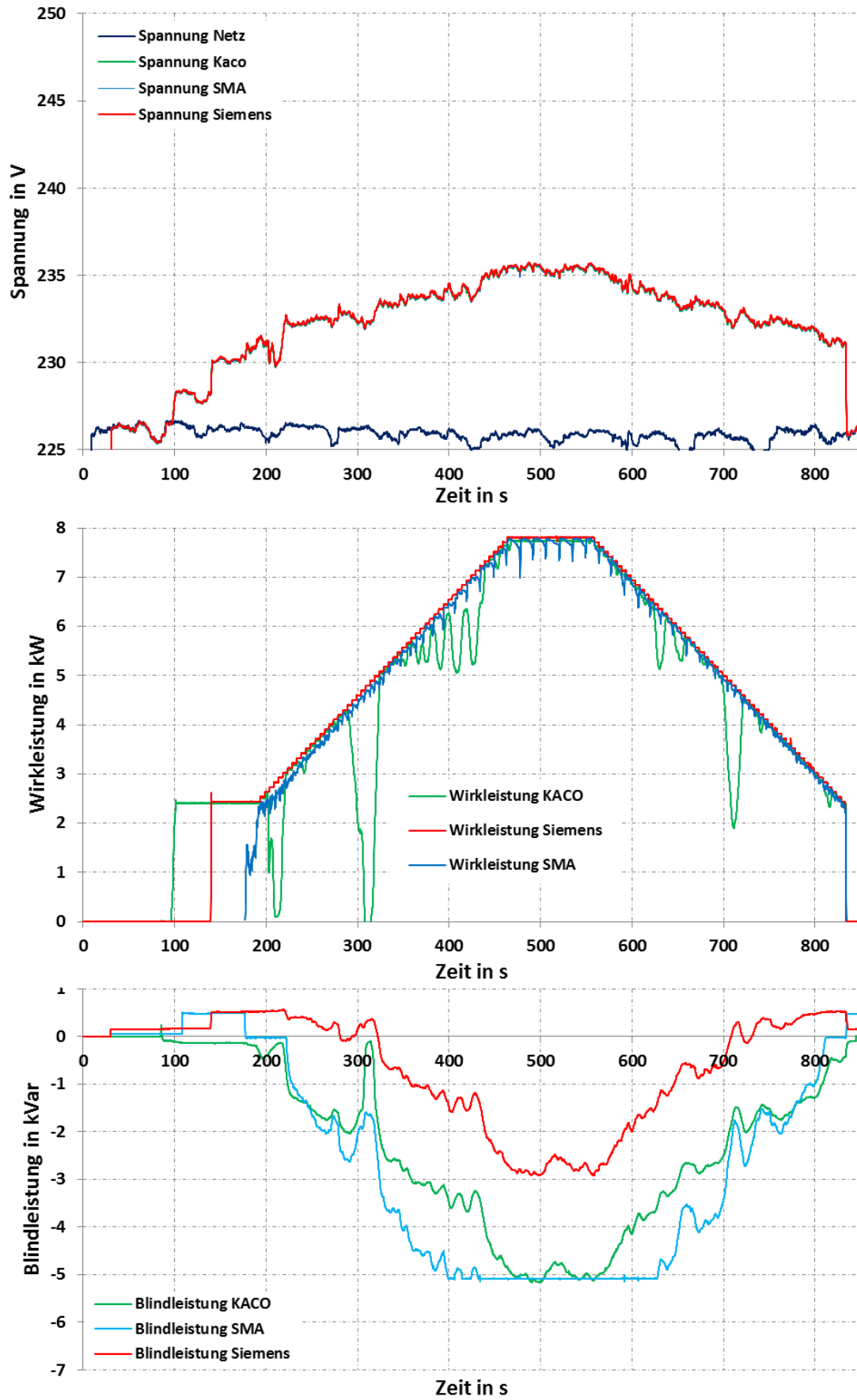


Abbildung 73: typische parallele Anordnung: Rampe, kleines Totband

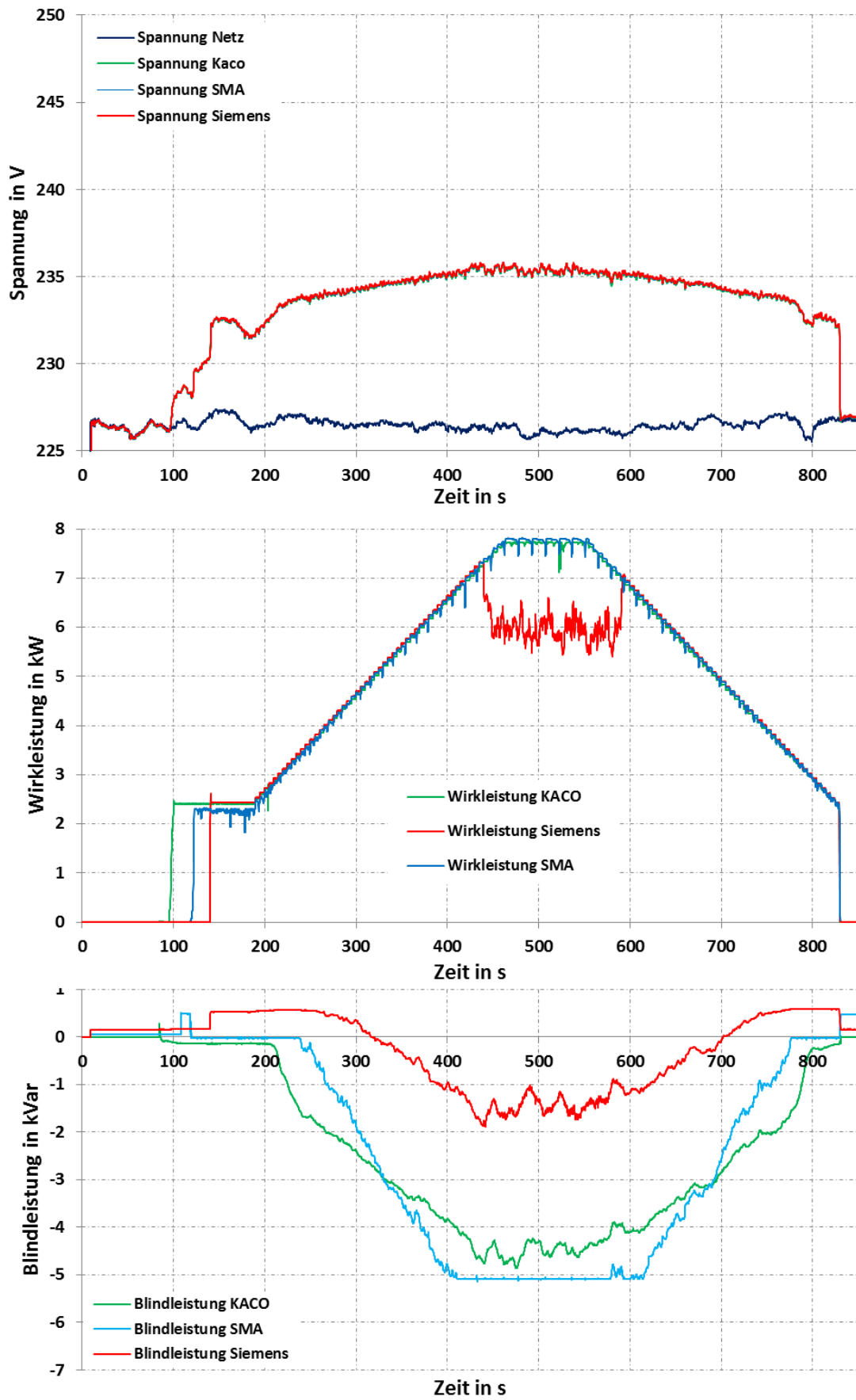


Abbildung 74: typische parallele Anordnung: Rampe, mittleres Totband

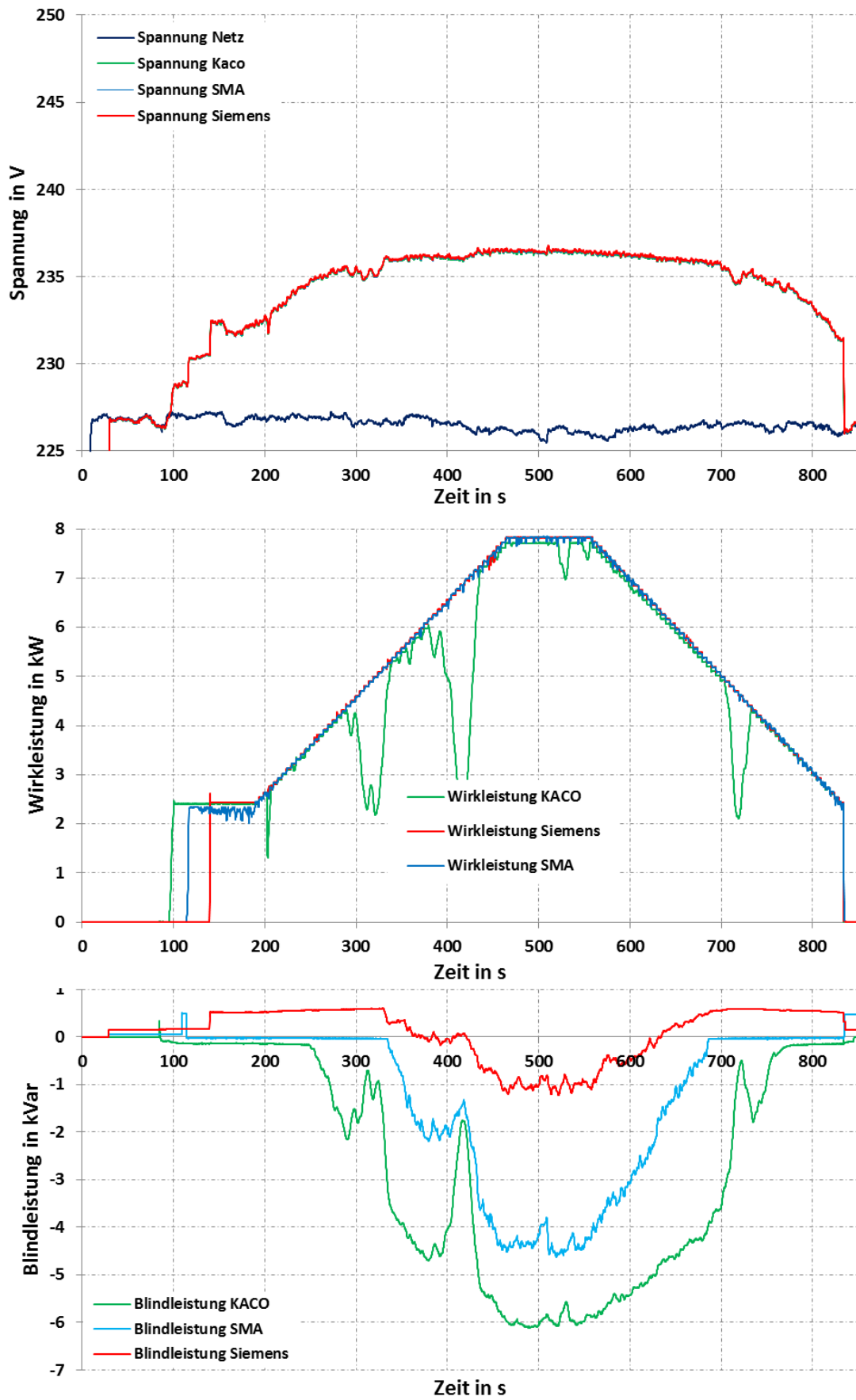


Abbildung 75: typische parallele Anordnung: Rampe, großes Totband

5.4.2 Wechselhaft

Die Ergebnisse sind in Abbildung 76 bis Abbildung 79 dargestellt. Anzeichen für instabiles Verhalten sind nicht zu erkennen. Die kurzzeitigen Einbrüche bzw. zeitweiligen Limitierungen der eingespeisten Leistung bei den Wechselrichtern Siemens und Kaco werden durch deren MPP-Tracker verursacht.

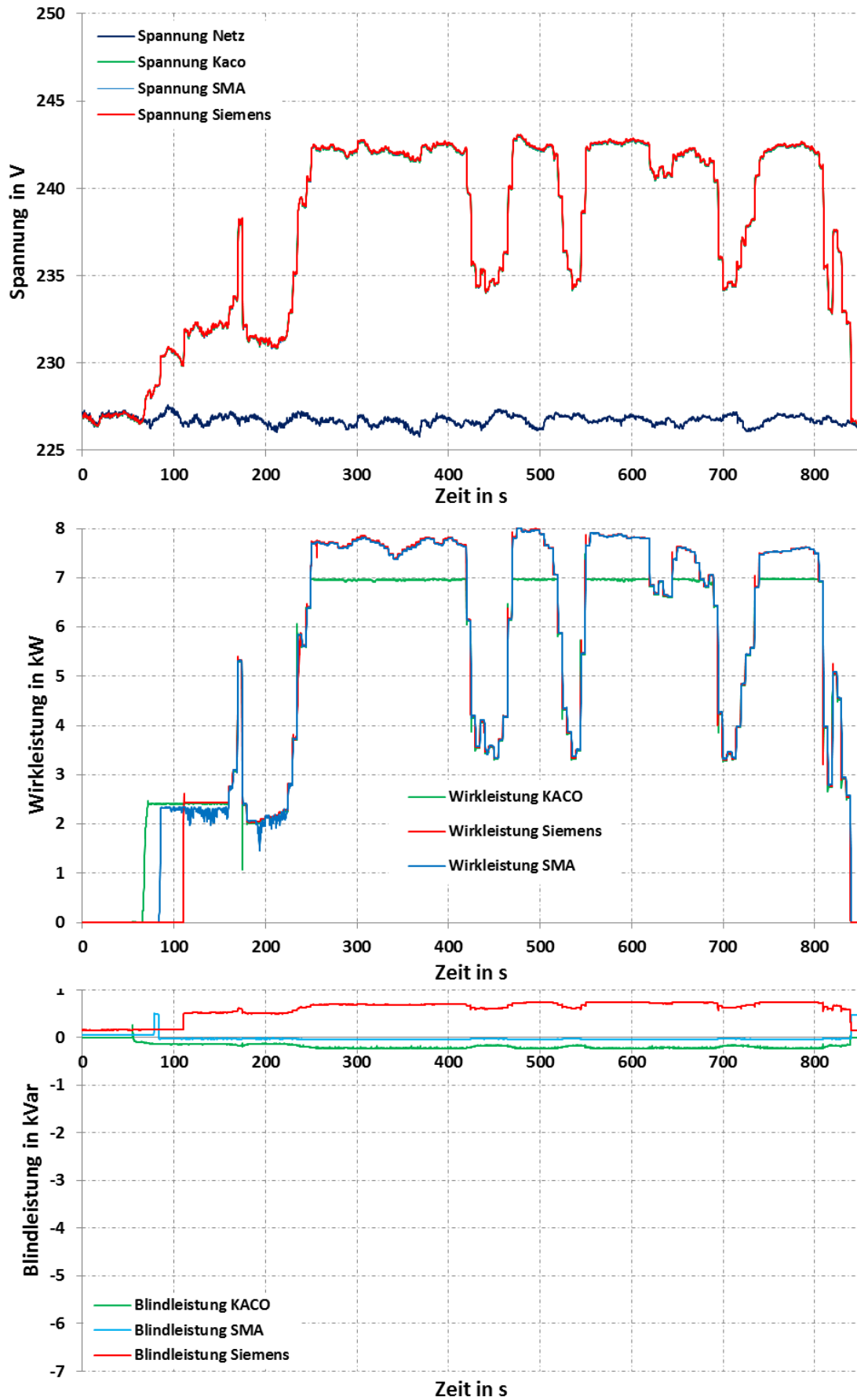


Abbildung 76: typische parallele Anordnung: wechselhaft, ohne Regelung

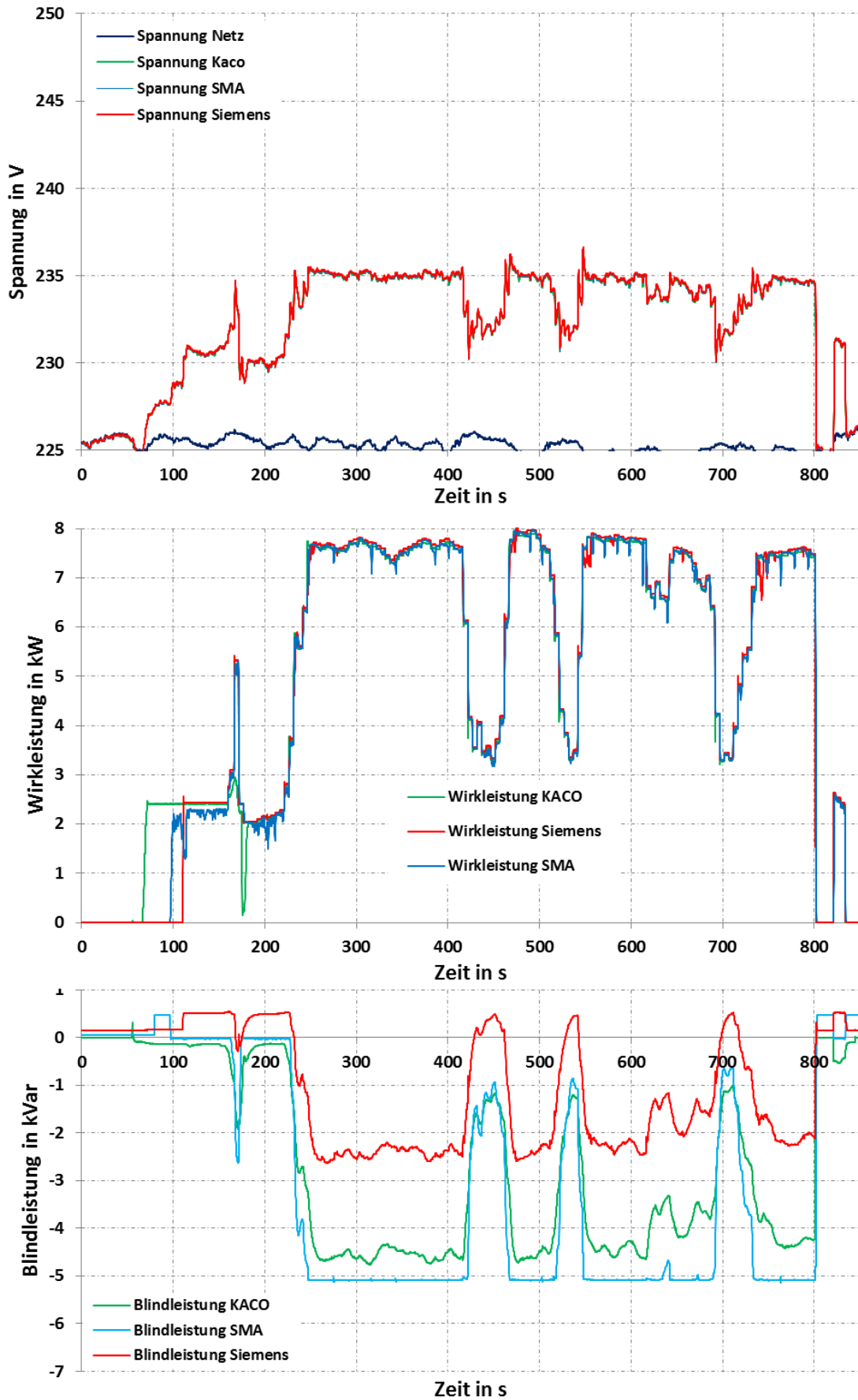


Abbildung 77: typische parallele Anordnung: wechselhaft, kleines Totband

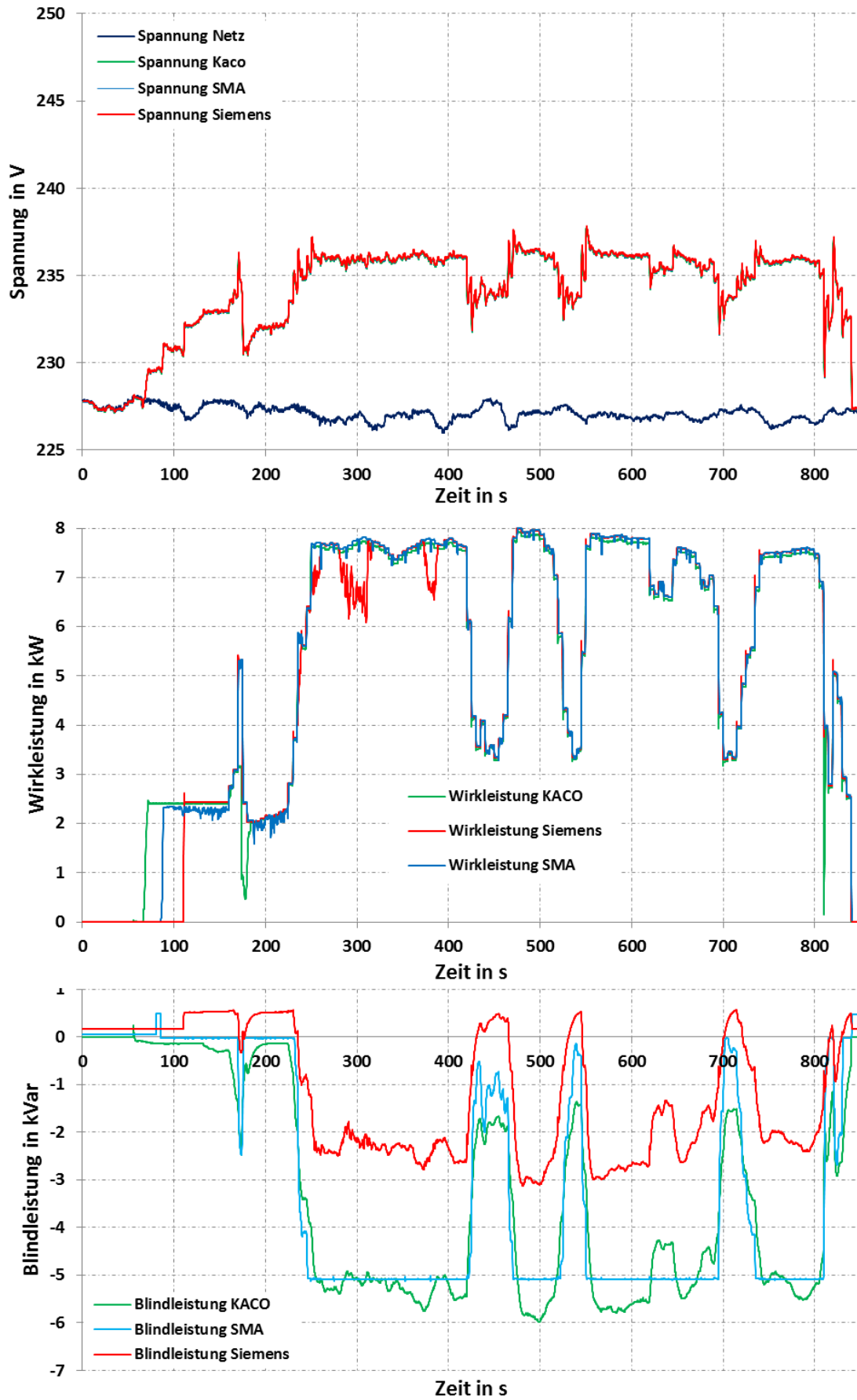


Abbildung 78: typische parallele Anordnung: wechselhaft, mittleres Totband

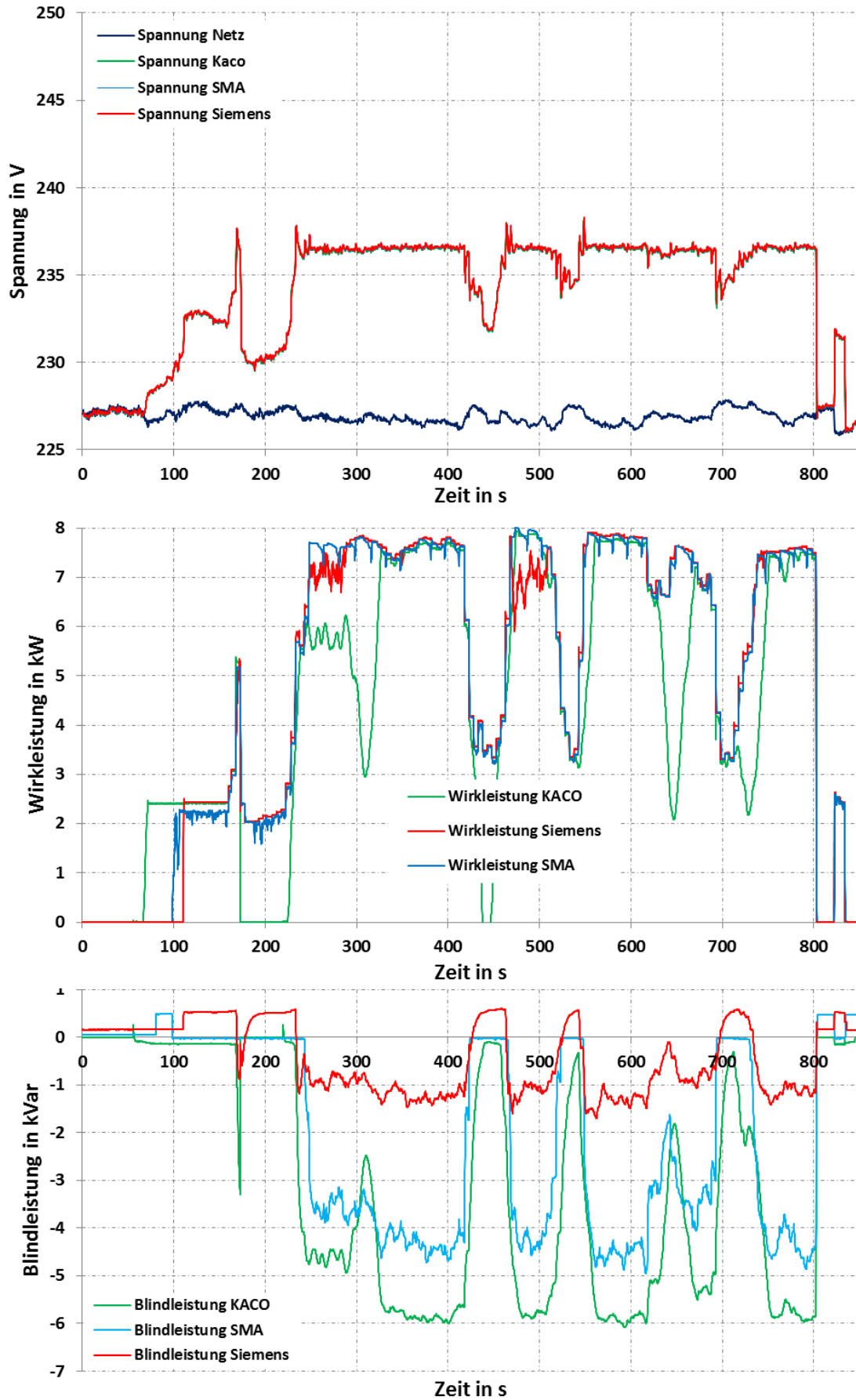


Abbildung 79: typische parallele Anordnung: wechselhaft, großes Totband

6 Empfehlungen zur Parametrierung des Q(U)-Reglers

In der vorliegenden Studie wurde das Stabilitätsverhalten der Regelung Q(U) untersucht. Die dabei verwendete Parametrierung der Q(U)-Kennlinien wurde entsprechend des Versuchsstandes gewählt, um insbesondere kritische Fälle darstellen und untersuchen zu können. Es konnten hierbei keine Anzeichen für Instabilitäten festgestellt werden. Es zeigten sich somit, unter Berücksichtigung der geforderten Stabilität des Gesamtsystems, keine strikten Einschränkungen für die Wahl der Parameter der Q(U)-Kennlinie.

Dennoch ergeben sich aus praktischen Überlegungen Vorschläge zur Parametrierung einer Q(U)-Kennlinie, die im Folgenden kurz vorgestellt werden sollen:

Grundsätzlich ist die Einstellung der Q(U)-Kennlinien von dezentralen Erzeugern im Niederspannungsnetz abhängig davon, wie der jeweilige Netzbetreiber sein Spannungsband in der Mittel- und Niederspannung fährt. Die Kennlinien und Regelungen in Mittel- und Niederspannungsnetzen sind entsprechend der jeweiligen Netzsituation und Philosophie des Netzbetriebes zu koordinieren.

Beispielsweise könnte eine spannungssenkende Wirkung durch untererregten Betrieb der Einspeiseanlage ab einer Spannung von 1,05 p.u. gefordert werden. Unter Berücksichtigung der Messtoleranz von 1 % sollte der maximale Blindleistungsbezug bei 1,09 p.u. erreicht werden, um die größtmögliche spannungssenkende Wirkung vor dem Ansprechen des Überspannungsschutzes gewährleisten zu können. Der Verlauf zwischen den beiden Punkten wird linear interpoliert. Als Vorgabe für den übererregten Bereich wäre der vollständige Verzicht (vergleiche Abbildung 80), ein symmetrischer (vergleiche Abbildung 81) oder ein asymmetrischer (vergleiche Abbildung 82) Kennlinienverlauf denkbar.

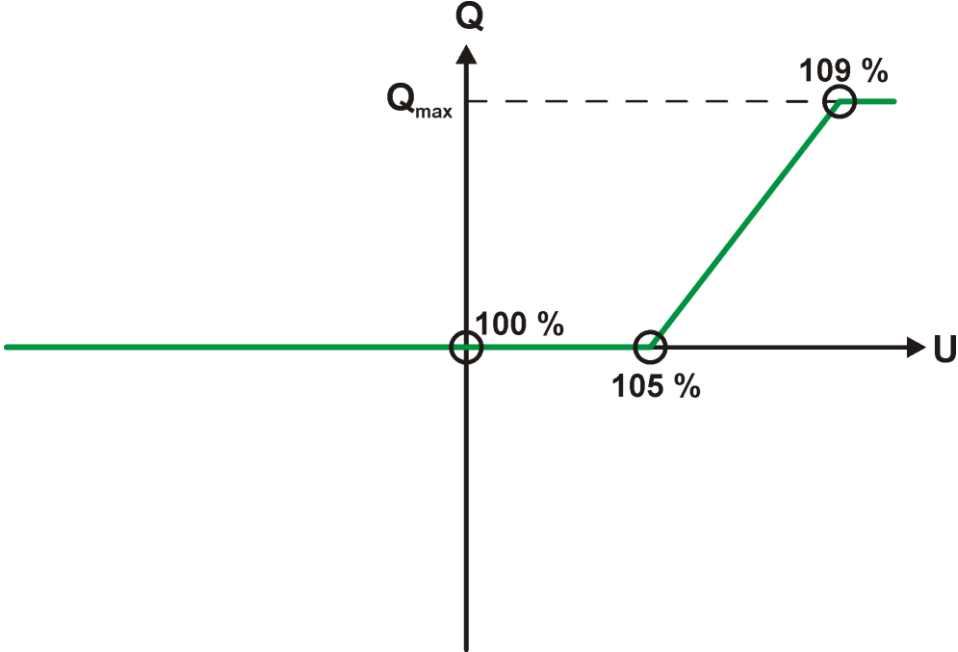


Abbildung 80: ausschließlich spannungssenkende Q(U)-Kennlinie

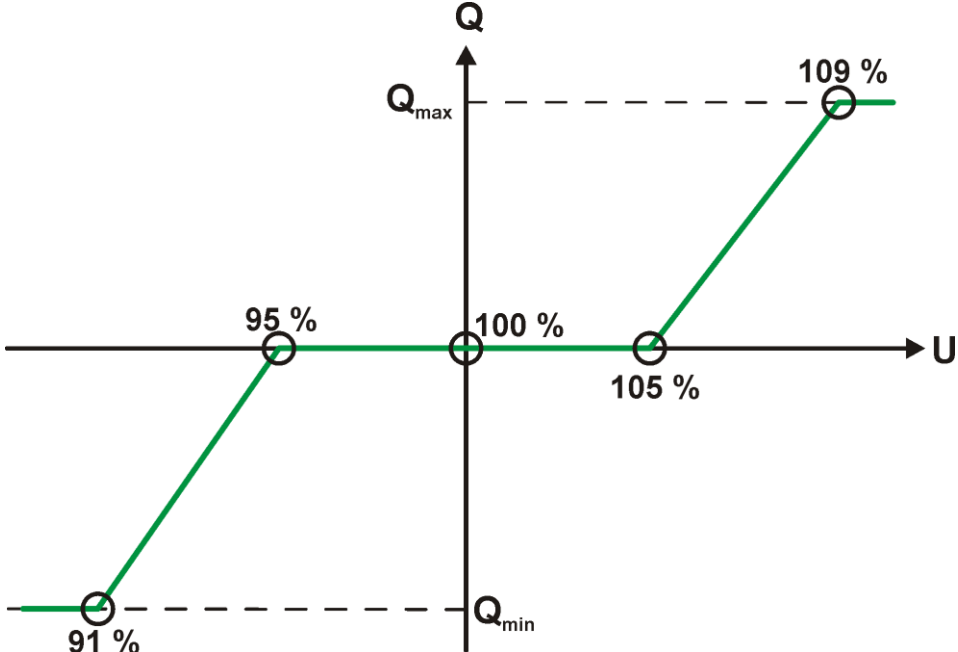


Abbildung 81: symmetrische Q(U)-Kennlinie

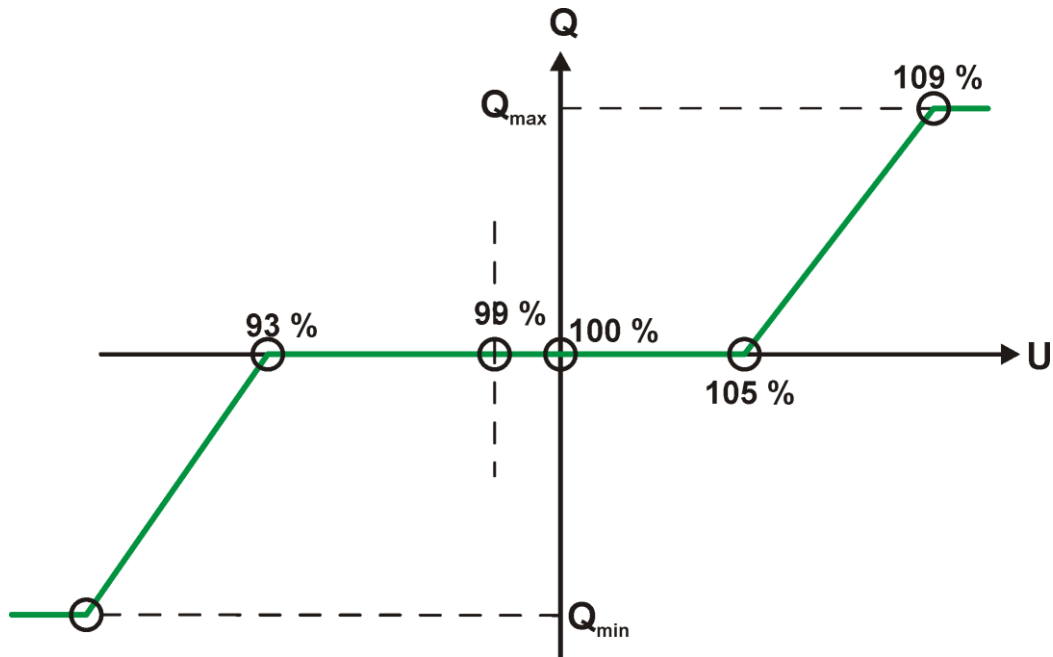


Abbildung 82: asymmetrische/verschobene Q(U)-Kennlinie

Hinsichtlich der Zeitkonstanten des PT1-Gliedes gelten die in den Abschnitten 5.2.4 und 5.3.2.3 vorgestellten Überlegungen. Allgemein lässt sich für dezentrale Einspeiser am Niederspannungsnetz (PV, BHKW, etc.) empfehlen, dass die Q(U) Regelung ein wenig (ca. ein- bis fünfmal) schneller sein sollte, als die maximal zu erwartende Leistungsänderung $\frac{dP}{dt}$ der Erzeugungsanlage. Eine zu schnelle (größer zehnfach) Q(U) Regelung ist jedoch aus oben genannten Gründen ebenfalls nicht sinnvoll. Die Zeitkonstante des PT1-Gliedes sollte zudem nicht zu groß gewählt werden, um eine Entkoppelung mit der Q(U)-Regelung in der Mittelspannung zu erreichen. Beispielsweise gibt die EnBW Regional AG für die Mittelspannung eine Gradientenbegrenzung von 45 s vor [7].

7 Empfehlungen für die Standardisierung

Bei der Durchführung der Versuche mit verschiedenen Wechselrichtern wurden zum Teil unterschiedliche Möglichkeiten für eine Implementierung des Anlagenverhaltens festgestellt, welche zwar den Vorgaben der VDE-AR-N 4105 entsprechen, aus netztechnischer Sicht jedoch standardisiert werden sollten.

7.1 Parametrierung und Nachweis der Q(U)-Regelung

Die in den Wechselrichtern implementierte Q(U)-Regelung ist sehr unterschiedlich zu parametrieren. Dies kann zu Schwierigkeiten bei der korrekten Umsetzung von Regelvorgaben führen. Um damit einhergehenden Problemen möglichst zuvorzukommen und Unklarheiten bei der Umsetzung zu vermeiden, sollte ein Standard zur Vorgabe der Kennlinie durch die Netzbetreiber (z. B. 5 Wertepaare oder Geradenabschnitte etc.) und zur Eingabe in die Wechselrichter entwickelt werden.

Bei der Erstellung der Einheitszertifikate (VDE V 0124-100) sollte ein Nachweis der Regelung entsprechend der Kennlinienvorgabe erfolgen.

7.2 Relevante Spannung für die Q(U)-Regelung

Bisher ist nicht explizit festgelegt, auf welche Spannung sich die Q(U)-Regelung bei 3-phasigen Wechselrichtern bezieht. Gegenwärtig implementierte Ansätze verwenden den Mittelwert der Leiter-Erde-Spannungen oder das Maximum der Leiter-Erde-Spannungen.

Weitere Varianten wären unter anderem die Mitsystemspannung oder die mittleren bzw. maximalen verketteten Spannungen.

Ein Vorteil der Verwendung des Spannungsmittelwertes kann ein durch die Mittelung weniger sensibles Regelverhalten sein. Eine Regelung auf Basis von zu ermittelten Mitsystemspannungen erscheint in Anbetracht des nicht genau zu quantifizierenden Mehrwertes gegenüber den anderen Methoden im Verhältnis zum erheblichen

Mehraufwand bei der Ermittlung und Implementierung der Berechnung in die Wechselrichter als nicht angemessen.

Die Varianten sollten weiter erörtert werden, um zum Teil bereits beobachtetes abweichendes Regelverhalten in Teilbereichen zu vermeiden, auch wenn dies für die Funktion und Stabilität des Gesamtsystems nicht relevant ist.

7.3 Q(U)-Regelung von einphasigen Wechselrichtern und Einzelphasenblindleistungsregelung

Die Versuche wurden nur an dreiphasigen Wechselrichtern durchgeführt. Hierbei wurde entsprechend den Vorgaben der VDE-AR-N 4105 sichergestellt, dass die Blindleistungsregelung symmetrisch (Mitsystem) erfolgt. Damit werden die bereits vorhandenen unsymmetrischen Strom- und Spannungsverhältnisse im Niederspannungsnetz nicht negativ beeinflusst.

Es bestünde mit Wechselrichteranlagen aber auch die Möglichkeit die Spannung auf einzelnen Phasen zu regeln oder gezielt Spannungsunsymmetrien (Gegensystemspannung) entgegen zu wirken.

Diese Methoden sind vielversprechend, bewirken aber auch unsymmetrische Ströme und Blindleistungsflüsse in der Niederspannung. Die Vor- und Nachteile, auch im Bezug auf die Schutzsysteme (kein Überstromschutz am Neutralleiter) sollten in weiterführenden Arbeiten untersucht werden. Entsprechend ist die Q(U)-Regelung von einphasigen Wechselrichtern, welche entsprechend auch nur einphasig regeln können, näher zu untersuchen.

Diese Effekte wurden in der vorliegenden Untersuchung nicht betrachtet. Es kann aber festgehalten werden, dass die vorliegende Regelung des Blindleistungs-Mitsystems keine erkennbaren negativen Auswirkungen auf die Symmetrieverhältnisse hat.

Grundsätzlich ist stets eine möglichst geringe Blindleistungseinspeisung ins Netz anzustreben. Die Q(U)-Kennlinie bietet gegenüber anderen Regelmethode eine bedarfsgerechte Blindleistungsbereitstellung, die die tatsächlich vorherrschenden Spannungsverhältnisse berücksichtigt. Die vorliegende Studie bestätigt die Stabilität und Wirksamkeit der Regelmethode, weshalb eine generelle Empfehlung der Q(U)-Kennlinie für dreiphasige Wechselrichter abgeleitet werden kann. Die Vorteile der

Q(U)-Kennlinie, hinsichtlich der bedarfsgerechten Blindleistungseinspeisung, sind auf ein- und zweiphasige Wechselrichter übertragbar und sollten in einer weiteren Studie untersucht werden.

8 Fazit

In dieser Studie wurde das Stabilitätsverhalten einer spannungsabhängigen Blindleistungsregelung $Q(U)$ durch PV-Wechselrichter untersucht. Hierfür wurden handelsübliche Wechselrichter mit der Bemessungsleistung 10 kVA in ein Modellnetz integriert. Diese Wechselrichter werden über DC-Netzteile angesteuert und können somit vorgegebene Einspeisepprofile nachfahren.

Die Netznachbildung besteht aus Widerständen und Induktivitäten mit denen möglichst realitätsnah und repräsentativ für Niederspannungsnetze, wie sie in Deutschland anzutreffen sind, ein typischer und ein extremer ländlicher Netzstrahl nachgebildet wird.

Es wurde aufgezeigt, dass die Ergebnisse einer Vorgängerstudie [5], bei der ein instabiles Verhalten der $Q(U)$ -Regelung nicht ausgeschlossen werden konnte, nicht aussagekräftig sind. Dies liegt an der dort verwendeten Netznachbildung, die für Niederspannungsnetze, wie sie in Deutschland vorkommen, in keiner Weise repräsentativ sind.

Zunächst wurde das Regelverhalten der einzelnen Wechselrichter verifiziert. Anschließend wurde das Regelverhalten der Wechselrichter hinsichtlich ihrer Sprungantwort untersucht. Dabei wurde die Zeitkonstante des PT1-Gliedes am Reglerausgang variiert. Anzeichen für instabiles Verhalten konnte bei keinem der drei Wechselrichter festgestellt werden. Dies gilt auch für ein deaktiviertes PT1 Glied. Dennoch wird empfohlen, das PT1-Glied stets mit einer Zeitkonstante von etwa 5 s aktiviert zu lassen, da somit das Ausgangssignal des Reglers beruhigt wird und er gegenüber Messrauschen oder andere Störeinflüsse unempfindlicher ist.

Darauf aufbauend wurde das Verhalten der drei Wechselrichter im Gesamtsystem untersucht:

- Zunächst wurde eine longitudinale Anordnung der Wechselrichter im Modellnetz betrachtet. Weder in der typischen noch in der extremen Netzanordnung konnten für einen rampenförmigen und für einen wechselhaften Verlauf der

durch die Wechselrichter eingespeisten Leistung Anzeichen für instabiles Verhalten entdeckt werden.

- Auch das Zuschalten einer einphasigen Last ($P = 4 \text{ kW}$) verursachte keinerlei Hinweise auf instabiles Verhalten. Hier hat sich allerdings gezeigt, dass hinsichtlich der Berechnungsart der Eingangsspannung der Q(U)-Regler der einzelnen Wechselrichter Standardisierungsbedarf besteht.
- Eine Variation der Zeitkonstante des PT1-Gliedes des Reglers verursachte kein instabiles Verhalten.
- Zusätzlich wurde das Verhalten des Gesamtsystems bei zeitversetzten Einspeiseprofilen, also Wolkenzug, untersucht. Hier ist deutlich die Vergleichmäßigung des Spannungsverlaufs zu erkennen. Durch die Überlagerung der Einspeiseprofile treten geringere Spannungsgradienten auf. Instabiles Verhalten ist auch hier nicht zu erkennen.
- Abschließend wurde eine parallele Anordnung der Wechselrichter am Ende des Netzstrahls im Modellnetz betrachtet. Auch hier konnten keinerlei Anzeichen für instabiles Verhalten entdeckt werden.

Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen konnten keine Anzeichen für ein instabiles Verhalten der Q(U)-Regelung erkannt werden. Die Messreihen basieren auf repräsentativen Netzkonfigurationen. Die verwendeten Reglerparameter wurden so gewählt, dass sie hinsichtlich des Stabilitätsverhaltens jeweils einen kritischen Fall darstellen. Deswegen ist auch im realen Einsatz der Q(U)-Regelung in Niederspannungsnetzen kein instabiles Verhalten zu erwarten.

Es wird zusätzlich eine allgemeine Empfehlung zur Parametrierung der Q(U)-Regelung und zur Standardisierung gegeben. Unter anderem wird empfohlen, dass die Methode, wie die Q(U) Kennlinie den jeweiligen Wechselrichtern vorzugeben ist, zu vereinheitlichen ist. Zudem besteht noch Abstimmungsbedarf im Hinblick auf möglichst gleiches Verhalten der Q(U)-Regelung der unterschiedlichen Wechselrichter.

9 Literatur

- [1] Kerber, Georg: Aufnahmefähigkeit von Niederspannungsverteilnetzen für die Einspeisung aus Photovoltaikkleinanlagen, Dissertation, Technische Universität München 2011
- [2] DIN EN 50160:2007: Merkmale der Spannung in öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen
- [3] VDE-AR-N 4105:2011: Erzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz - Technische Mindestanforderungen für Anschluss und Parallelbetrieb von Erzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz
- [4] Basse, Hauke; Leibfried, Thomas; Backes, Jürgen; Huber, Richard; Maurer, Bernd: Spannungshaltung in Verteilnetzen bei Stützung durch dezentrale Erzeugungsanlagen mit lokaler Blindleistungsregelung, Internationaler ETG-Kongress 2009 (ETG-FB 118)
- [5] Schaupp, Thomas.; Meyer, Tim.; Backes, Jürgen.; Wieben, Enno.: Entwicklung und Untersuchung von Solarwechselrichtern mit spannungsabhängiger Blindleistungseinspeisung in Labor und Feld, 25. Symposium Photovoltaik, Bad Staffelstein, 2010
- [6] V. Diedrichs, H. Lorenzen: Expansion of Laboratory Test Power System by Low-Voltage Cable Grid; University of Applied Sciences Wilhelmshaven, Germany; www.fh-oow.de/fbi/we/ee/Common/about/images/Poster_NS_Kabel_Versuchsnetz_100623.pdf (abgerufen am 30.06.2012)
- [7] Vorgaben der EnBW Regional AG zur Blindleistungs-/Spannungskennlinie Q(U) für Erzeugungsanlagen am Mittelspannungsnetz, Stand 08/2011
- [8] Kerber, G.; Witzmann, R., Sappl, H.: Voltage Limitation by Autonomous Reactive Power Control of Grid Connected Photovoltaic Inverters, Conference on Compatibility and Power Electronics, May 20 - 22, 2009

-
- [9] Kerber, G. ; Witzmann, R.: Statistische Analyse von NS-Verteilungsnetzen und Modellierung von Referenznetzen, ew - Das Magazin für die Energie Wirtschaft, 2008 (Heft 6), pp. 22-26
- [10] D-A-CH-CZ Technische Regeln zur Beurteilung von Netzurückwirkungen, 2. Ausgabe 2007
- [11] Scheffler J.; Bestimmung der maximal zulässigen Netzanschlussleistung photovoltaischer Energiewandlungsanlagen in Wohnsiedlungsgebieten; Dissertation, Universität Chemnitz, 2002
- [12] Vorgaben der E.ON Bayern zur Q(U)-Kennlinie im MS-Netz,
http://www.eon-bayern.com/pages/eby_de/Netz/Stromnetz/Netzanschluss/Technische_Mindestanforderungen/TAB_MSP/Technische_Richtlinie_Erzeugungsanlagen.pdf
- [13] Schlabbach, Mombauer: Power Quality, VDE-Schriftenreihe 127, VDE Verlag GmbH, 2008