

Auswirkungen der Netzsicherheitsbasierten Primärregelung auf die Inselnetzerkennung marktüblicher Niederspannungs-Umrichter

Laborstudie

Björn Oliver Winter Michelle Magrian Nelly Schulz
Max Gand Stefanie Walujski Bernd Engel

13. Februar 2024

Kontakt:

Björn Oliver Winter

elenia Institut für Hochspannungstechnik und Energiesysteme

Schleinitzstraße 23

38106 Braunschweig

bjoern.winter@tu-braunschweig.de

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6860-3930>

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	1
2	Einleitung	5
2.1	Thematischer Hintergrund	5
2.2	Zielsetzung und Untersuchungsgegenstand	5
2.3	Methodisches Vorgehen	6
3	Vermessung und Kalibrierung der Frequenzstützung	7
3.1	Aufbau und Verifikation eines geeigneten Prüfaufbaus	7
3.1.1	Vermessung der DC-Quellendynamik	8
3.1.2	Vermessung der AC-Quellendynamik	9
3.2	Referenzmessung des Umrichterhaltens in Werkseinstellungen	10
3.3	Kalibrierung des EUT-Antwortverhaltens nach PRNB-Parametersatz	14
4	Prüfung der Fähigkeit des EUT zur Erkennung ungewollter Inselnetze	21
4.1	Verfahren zur Einstellung, Teilnetzbildung und Messung	21
4.2	Fähigkeit des Prüflings zur Inselnetzerkennung in Werkseinstellungen	25
4.3	Fähigkeit des Prüflings zur Inselnetzerkennung nach Kalibrierung der PRNB-Antwort	27
4.4	Verifikationstests zur Prüfung des Testaufbaus	29
5	Auswertung der Messdaten	32
5.1	Einleitende Betrachtung	32
5.2	Vorgehen: statistische Auswertung und Varianzanalyse	33
5.2.1	Voraussetzung: Normalverteilung der Daten	33
5.2.2	Voraussetzung: homogene Varianz der Daten	36
5.2.3	Varianzanalyse	38
5.2.4	Verifikation und Diskussion der Auswertung	43
6	Zusammenfassung und Interpretation der Ergebnisse	49
7	Kritische Würdigung und Ausblick	50
8	Anhang	52
8.1	Zu Kapitel 3.1.1: Technische Daten der DC-Last zur Vermessung der Quellendynamik	52
8.2	Weitere Non-Detection Zones	53
8.2.1	Zu Kapitel 4.2: Non-Detection Zones in Werkseinstellungen	53
8.2.2	Zu Kapitel 4.3: Vergleich Nachlaufzeiten in Werkseinstellungen vs. PRNB-Parametersatz	55
8.2.3	Zu Kapitel 4.4: Nachlaufzeiten mit arbiträr deaktivierter aktiver Inselnetzerkennung	57
8.3	Zu Kapitel 5.1: Kruskal-Wallis Test	59
8.4	Zu Kapitel 5.2.3: Vollständiges quadratisches Modell	60
8.5	Zu Kapitel 5.2.3: Varianzanalyseergebnisse des lean models	61
8.6	Zu Kapitel 6: Weitere Plots Modellvorhersagen vs Messwerte	62
	Abbildungsverzeichnis	68
	Tabellenverzeichnis	69
	Quellenverzeichnis	69

Abkürzungs- & Symbolverzeichnis

DEA	Dezentrale Energieanlagen
EUT	Equipment under Test
NA	Netz- und Anlagen
NAP	Netzanschlusspunkt
NDZ	Non-Detection Zone
PRNB	Netzsicherheitsbasierte Primärregelung
P_{EMAX}	maximale Wirkleistung des Equipment under Test (EUT)
P_{ref}	Bezugs-Wirkleistung des EUT auf die aktuelle Frequenz
P_{Tol}	Toleranzband der gemessenen Antwort des EUT
s	Normierte Statik der Frequenzhaltungsfunktion
τ	Zeitkonstante der PT1-Sprungantwort
T_V	Verzögerungszeit der PT1-Sprungantwort auf den Frequenzsprung

1 Zusammenfassung

Derzeit wird angesichts des schwindenden Beitrags rotierender Massen aus Kraftwerken diskutiert, den Beitrag zukünftiger Dezentrale Energieanlagen (DEA) zur globalen Frequenzhaltung gegenüber den aktuell gültigen Vorgaben der technischen Anschlussregeln [VDE18] auch in der Niederspannung zu erhöhen. Die Projektgruppe (PG) Systemanforderungen des FNN hat hierzu einen vorläufigen Vorschlag für die Bereitstellung u.a. einer Netzsicherheitsbasierte Primärregelung (PRNB) und dem robusteren Verbleib von Anlagen im Fehlerfall erarbeitet. Die PRNB soll in zukünftige Anlagen im Bereich netzkritischer Abweichungen der globalen Frequenz vom Soll aktiv werden und dort die Anlagenleistung mit wesentlich höherer Dynamik und Statik als bislang gefordert zum Ziel der Netzstützung anpassen. In der vorliegenden Studie wurde vor diesem Hintergrund anhand eines exemplarischen marktüblichen PV-Wechselrichters geprüft, ob diese Vorgaben in der den Studienleitern vorliegenden Version des Arbeitsdokuments vom 02.03.2023 [VDE] die Fähigkeit des Umrichters zur Inselnetzerkennung in der Niederspannung beeinflussen könnten. Hierzu wurde die Funktion des Prüflings zur Frequenzhaltung zunächst in einem geeigneten Testaufbau anhand von Frequenzsprüngen untersucht.

In den einleitenden Messungen wurde eine Anschlagzeit des Prüflings von 318 ms gemessen, was die derzeit geforderte Dynamik mit Anschlagzeiten von 2 s mühelos einhält. Die Messungen werden in Kapitel 3.2 erläutert. Ein grober Vergleich der aktuellen Anforderungen und einigen zukünftigen Mindestanforderungen der PRNB [VDE] ist zur Übersicht in Tabelle 1.1 aufgezeigt.

Beschreibung	Größe	Anforderung nach VDE-AR-N-4015:2018	Anforderung nach PRNB-Vorgaben	Messung des Prüflings in Werkseinstellungen
Initiale Zeitverzögerung	T_V	$\ll 2$ s	< 25 ms	10,3 ms
Anschlagzeit	T_{an}	< 2 s (Typ2) < 1 s (Speicher) ¹	$149,5$ ms ²	318 ms

Tabelle 1.1: Vergleich der Anforderungen an die Dynamik der Antwort nach den untersuchten Vorgaben mit den ersten Messungen des Prüflings

Die Tabelle ist hierbei als einleitender unvollständiger Überblick speziell über die geforderten Dynamiken zu verstehen. Die konkreten Parameter der aktuellen Anforderungen nach VDE-AR-N-4105:2018 [VDE18] sind in Tabelle 3.4 und die diskutierten neuen PRNB-Anforderungen [VDE] in Tabelle 3.5 und 3.6 detaillierter aufgeführt. In den neuen Anforderungen werden zudem erhöhte Anforderungen an die Statik und die Schutzeinstellungen des Geräts gestellt.

In einer iterativen Versuchsreihe wurde sowohl die Antwort des Prüflings als auch seine Schutzeinstellungen an die diskutierten Anforderungen der PRNB angepasst. Diese Vorgaben sehen zudem eine Prüfung des Umrichterhaltens vor, die u.a. eine definierte Antwort der Leistungseinspeisung bei eingepägtem Frequenzprofil innerhalb vorgegebener Toleranzen vorsieht. In den ermittelten Parametersätzen werden diese Toleranzen wiederholbar, bei drei geprüften Durchläufen, eingehalten. Einer dieser Durchläufe ist exemplarisch in Abbildung 1.1 dargestellt.

¹Weitere Anforderungen an die Dynamik ergeben sich aus mittelbaren Größen, siehe Tabelle 3.4

²Die Anschlagzeit wird in beiden Anforderungen unterschiedlich definiert, für den Vergleich in dieser Tabelle wurde eine ungefähre Näherung $T_{an} \approx 2,3 \cdot \tau$ der mittleren Dynamik zwischen den Grenzkurven zugrundegelegt

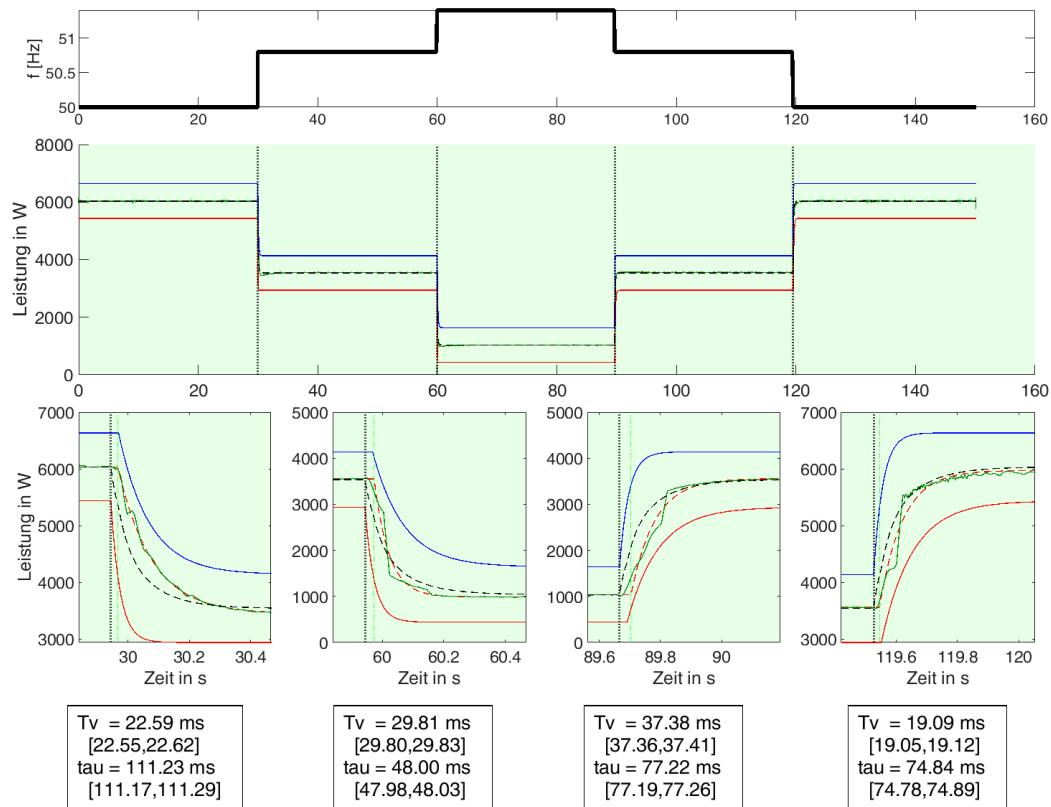


Abbildung 1.1: Bestandene Prüfung bei Vergleich des gemessenen Verhaltens des EUT mit den aktualisierten Anforderungen

Das eingeprägte Referenz-Frequenzprofil ist in der oberen Darstellung abgebildet. Die gesamte Antwort des Prüflings in seiner Momentanleistung ist in der mittleren Darstellung wiedergegeben. Auf jeden der Sprünge findet sich unten ein vergrößerter Ausschnitt, der die Leistung in grün innerhalb der vorgegebenen Toleranzen (durch die rote und blaue Linie dargestellt) zeigt. Schwarz gestrichelt ist das arithmetische Mittel zwischen den Grenzen dargestellt. In rot gestrichelt ist eine durch Regression ermittelte Annäherung einer ideal gedämpften Antwort dargestellt, aus der die unter der jeweiligen Darstellung aufgeführten und in der Prüfvorschrift detaillierten Parameter Verzögerungszeit (T_V) und Zeitkonstante (τ) der Leistungsantwort mitsamt ihrer $1 - \sigma$ -Vertrauensintervalle ermittelt worden sind. Das Vorgehen in Messung und Auswertung zusammen mit den weiteren Ergebnissen wird in Kapitel 3.3 beschrieben.

Anschließend wurde ermittelt, ob diese Erhöhung der Dynamik Auswirkungen auf die Fähigkeit des Prüflings zur Erkennung ungewollter Teilnetzbildung hat. Die hierzu aufgenommenen Messungen und Auswertungen sind in Kapitel 4 aufgeführt. Im Verlauf der Messreihe wurde das Gerät wiederholt im Parallelbetrieb mit einer passiven RL-Last einer Teilnetzbildung ausgesetzt und die Nachlaufzeit des Prüflings bis zur Erkennung und Abschaltung des ungewollten Betriebszustands ermittelt. Hierbei wurden Parameter mit vermutet hohem Einfluss auf die Erkennung gezielt variiert, um die Aussage möglichst breit fassen zu können. Hierzu zählten der Arbeitspunkt des Prüflings (P_{EUT}, Q_{EUT}), die Austauschleistung mit dem Netz zum Zeitpunkt der Teilnetzbildung durch Lastvariation ($\Delta P_{Grid}, \Delta Q_{Grid}$) und die Parametrierung des geprüften Geräts. Eine exemplarische Gegenüberstellung zweier vergleichender Messreihen des Prüflings in Werkseinstellungen und mit dem ermittelten PRNB-konformen Parametersatz für ansonsten identische

Faktoren ist in der folgenden Abbildung 1.2 dargestellt:

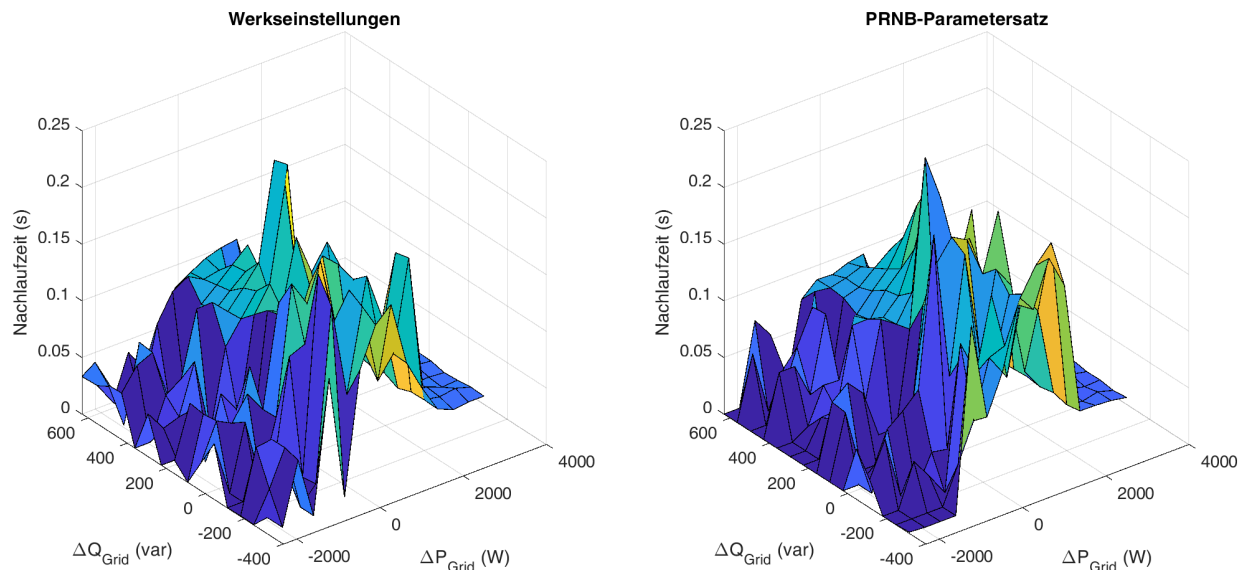


Abbildung 1.2: Vergleich der Antwortflächen in beiden Parametrierungen, Arbeitspunkt (a), Durchlauf 1

Die Darstellungen links (Werkseinstellungen) und rechts (PRNB-konformer Parametersatz) umfassen die gemessene Nachlaufzeit des Prüflings in separaten Messreihen dargestellt über der variierten Austauschleistung mit dem Netz in Blind- und Wirkleistung. Diese wurde nach Prognosen der parallel durchgeführten Simulationsstudie festgelegt. Ersichtlich ist, dass hiermit ein lokaler Bereich erhöhter Nachlaufzeit im Labor ermittelt werden konnte. Die Nachlaufzeit umfasst allerdings in jeder Messung einen Bruchteil der laut Spezifikation [DIN14] maximal zulässigen Nachlaufzeit von 2 s. Die Umstellung des Parametersatzes scheint die Nachlaufzeit nicht drastisch zu erhöhen. Auffällig hier ist, dass die Messwerte von der ausgetauschten Wirkleistung vor Teilnetzbildung in Mittelwert und Varianz stark beeinflusst werden. Weitere Erläuterungen der Messungen sind in Kapitel 4.3 aufgeführt.

Aus der rein optischen Betrachtung lässt sich die Fragestellung, ob eine systematische Erhöhung der Nachlaufzeit durch die Neuparametrierung festzustellen ist, und ob diese ggf. nur in sensitiven Parameterkombinationen der Versuche auftritt, nicht eindeutig beurteilen. Zur Feststellung und Quantifizierung werden die Messungen daher anschließend in Kapitel 5 im Rahmen einer statistischen Versuchsanalyse prozessiert. Im Ergebnis können die Einflussgrößen auf die Nachlaufzeit hierbei anhand eines Regressionsmodells über den Messdaten bestimmt werden. Die Prognose des gebildeten Modells (Fläche) in Relation zu den tatsächlichen Messdaten ist exemplarisch in Abbildung 1.3 festgehalten:

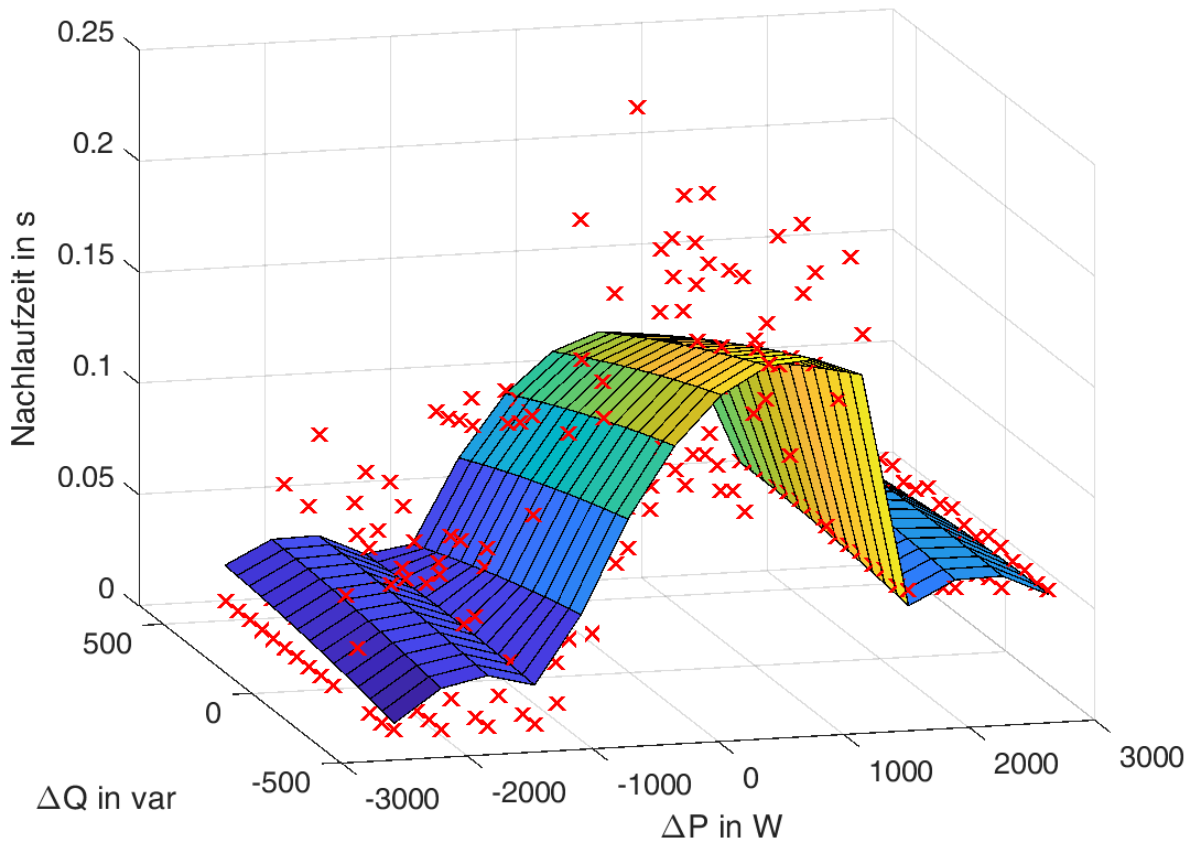


Abbildung 1.3: Modellvorhersage und Messungen, PRNB-Parametersatz, Arbeitspunkt (a)

In der quantitativen Auswertung lassen sich mittlere Erhöhungen der Nachlaufzeit partiell feststellen. Diese sind unabhängig vom Arbeitspunkt in der Höhe mit bis zu etwa 9 ms jedoch sehr gering und treten zudem in Randbereichen der Antwortfläche auf, die in der Referenzmessung ohnehin niedrige Nachlaufzeiten aufwiesen. Der 'sensible' Bereich vergleichsweise hoher Nachlaufzeit in Bereichen niedriger Austausch-Wirkleistung bspw. in der Mitte der Abbildung 1.3 weist keine wesentlichen Erhöhungen auf. Die Erkenntnisse werden in Kapitel 6 detaillierter dargestellt. Einschränkende Bedingungen und Empfehlungen zur weiteren Betrachtung der Problematik sind abschließend in Kapitel 7 beschrieben.

Die Studie weist zusammenfassend nach, dass bereits heute marktübliche Geräte in der Lage sind, die PRNB-Vorgaben umzusetzen. Am Beispiel des betrachteten Geräts konnte hierbei nachgewiesen werden, dass im betrachteten Aufbau keine kritische Verschlechterung der Fähigkeit des Prüflings zur Erkennung ungewollter Teilnetzbildung zu erwarten ist. Die Gültigkeit der Ergebnisse ist dabei zunächst auf das untersuchte Gerät im gegenüber realen Netzumgebungen notwendigerweise vereinfachten Testaufbau einzuschränken, bestätigt aber in kombinierter Betrachtung mit der Simulationsstudie exemplarisch die dort breiteren Schlussfolgerungen.

2 Einleitung

2.1 Thematischer Hintergrund

Als ungewollte Teilnetze werden Netzabschnitte bezeichnet, die sich bspw. infolge eines Netzfehlers oder einer Schutzgeräteausrückung vom Verbundnetz trennen, oder aber zu Wartungszwecken bewusst getrennt werden, in denen jedoch infolge zufällig bestehender Ausgangsbedingungen die Netzspannung innerhalb der zulässigen Grenzen für den Weiterbetrieb aller Anlagen aufrecht erhalten wird. Dies kann insbesondere bei lokal ungefähr ausgeglichener Einspeisung und Verbrauch bei Präsenz von Anlagen mit Netzstützungsverfahren zu stark erhöhten Nachlaufzeiten des Netzabschnitts führen, in denen der Betriebszustand des Netzes durch Netzbetreiber nicht aktiv kontrolliert oder unterbrochen werden kann. Damit einhergehende Risiken werden im Personenschutz bei Wartungsarbeiten, aber auch in Geräte- und Betriebsmittelschäden wie auch Komplikationen mit Schutzsystemen überlagerter Netzebenen gesehen [VDE16]. In den unteren Netzebenen lässt sich dieser ungewünschte Betriebszustand in Ermangelung von Messeinrichtungen nicht feststellen. Aus diesen Gründen sind netzseitige Umrichter von DEA in der Niederspannung mit dezentralen Verfahren ausgestattet, die eine ungewollte Teilnetzbildung durch Trennung der Anlage vom Netz verhindern sollen. Passive Verfahren messen mit der Trennung einhergehende charakteristische Veränderungen ohne aktiven Eingriff der Anlage in das Netz. Aktive Verfahren destabilisieren dennoch gebildete Teilnetze durch Veränderung der Ausgangsparameter der Anlage mit dem Ziel der Abschaltung des Netzabschnitts. Demgegenüber stehen Netzstützungsverfahren der Anlage, die im Normalbetrieb bspw. die Frequenz- und Spannungshaltung unterstützen soll und mitunter auch in ungewollten Betriebszuständen stabilisierend wirken kann.

In [Boe+15] wurde ein potentieller Zielkonflikt zwischen Netzstützungsverfahren mit hoher Dynamik und der Anforderung zur Inselnetzerkennung von DEA in der Niederspannung festgestellt. In [VDE16] wurden hierfür Ansätze zur Lösung weiter untersucht, mit dem Ergebnis dass durch zeitliche Priorisierung der Netzstützung vor der Inselnetzerkennung eine partielle Mitigation der Problematik erreicht werden kann. Hier war allerdings die dynamische Netzstützung im Ziel der Untersuchungen und die Lösung durchführbar, weil die Wirkung der dynamischen Netzstützung zeitlich strikt begrenzt ist. Zwischen den zwei in der Wirkweise diametral unterschiedlichen Anforderungen an die DEA, die Stützung im netzgebundenen Betrieb und die gewollte Destabilisierung im Fall der Bildung ungewollter Teilnetze besteht jedoch weiterhin ein inhärenter Zielkonflikt und mit der Einführung dynamischerer Frequenzhaltung, deren Wirkung in bestimmten Frequenzbereichen zeitlich nicht begrenzt ist, ergibt sich die Befürchtung, dass sich entstehende Zielkonflikte verschärfen können. Somit soll in dieser Studie untersucht werden, ob beide Anforderungen an die DEA in der Niederspannung weiterhin erfüllt werden können.

2.2 Zielsetzung und Untersuchungsgegenstand

Ziel der Laborstudie ist es, die Auswirkungen einer beschleunigten Wirkleistungsreaktion zur Frequenzstützung eines netzfolgenden Wechselrichters auf dessen Fähigkeiten zur Erkennung ungewollter Inselnetze zu untersuchen. Es ist nicht Ziel der Untersuchungen, festzustellen, ob ein marktüblicher Wechselrichter mit abgeänderter Parametrierung weiterhin die Prüfung von Verfahren zur Inselnetzerkennung nach EN 62116 bestehen würde. Da von einem feingliedrigeren Zugriff der Hersteller auf interne Geräteparameter ausgegangen werden kann, besitzen diese vielfältigere Möglichkeiten hinsichtlich der Optimierung jedweden Verhaltens auf Prüfvorschriften, weswegen aus den Ergebnissen hierfür keine Aussage zu erwarten ist. Vielmehr wird lediglich ein in grober Anlehnung an den Prüfaufbau erstelltes Laborsetup zur Ermittlung der oben beschriebenen Gütekriterien für die Inselnetzerkennung genutzt. Von dem Prüfaufbau wird zur

Herstellung realitätsnäherer Ausgangsbedingungen und zur Generierung für die Fragestellung zielführender Ergebnisse nach Maßgabe des Expertenkreises bewusst abgewichen. Die Untersuchung umfasst zudem ausschließlich die Fähigkeit des Umrichters zur Erkennung ungewollter Teilnetze im netzgebundenen Betrieb - etwaige Funktionen von Umrichtern zur Bildung von gewollten Inselnetzen zur Versorgung lokaler Microgrids nach Trennung vom Verbundnetz, bspw. im Not- und Ersatzbetrieb für Haushalte, sind hiervon unberührt und nicht Gegenstand der Untersuchung.

2.3 Methodisches Vorgehen

Der Einfluss der Parametrierung des Antwortverhaltens nach PRNB-Vorgaben auf die Fähigkeit von marktüblichen Wechselrichtern zur Inselnetzerkennung soll im Rahmen dieser Studie exemplarisch untersucht werden. Hierzu wird ein Inselnetz-Versuchsaufbau genutzt und nach Maßgabe des teilnehmenden Expertenkreises an eine möglichst realitätsnahe Wiedergabe von Netzumgebungen angepasst, um den Prüfling wiederholt Teilnetzbildungen auszusetzen. Durch Variation von Arbeitspunkt und Lastparametern wird dann in Versuchsreihen die Zuverlässigkeit der Erkennung mit vorab kalibrierten und verifizierten Parametersätzen ermittelt.

In einer Referenzuntersuchung, in der der Wechselrichter im Auslieferungszustand einer Untersuchungsreihe ausgesetzt wird, wird die Zuverlässigkeit seiner Erkennungsverfahren qualitativ und quantitativ ermittelt. Hierzu wird in jedem Versuch die Nachlaufzeit nach Bildung des Teilnetzes bis zur Abschaltung des Umrichters ermittelt. Aus diesen Daten wird eine Non-Detection Zone (NDZ) gebildet, in der der Erfolg/Misserfolg der Erkennung über den zu variierenden Parametern abgebildet wird. Zur ausreichenden Ermittlung der notwendigen Daten wird eine Versuchsreihe 49 einzelne Versuche umfassen, in denen zwei vorab abzustimmende Größen des Aufbaus variiert werden können. Weiterhin wird die mittlere Nachlaufzeit quantitativ ausgewertet und grafisch aufbereitet.

Anschließend wird das Gerät möglichst eng an die diskutierten und unten spezifizierten Vorgaben, umfassend die Statik und Dynamik des $P(f)$ -Antwortverhaltens sowie die Netz- und Anlagen (NA)-Schutzeinstellungen, angepasst. Der RoCoF-Schutz als nicht relevantes Abschaltkriterium war hierbei bereits in Werkseinstellungen deaktiviert und wird auch in den neuen Parametersätzen nicht verwendet. Zur Anpassung werden die zugänglichen Einstellungen des Geräts iterativ geändert und mittels einer aktuell diskutierten, in Kapitel 3.3 erläuterten Prüfmethodik eine möglichst gute Abbildung der diskutierten Parametervorgaben erzielt (Im Folgenden: Kalibrierung). Das erzielte Verhalten des Wechselrichters wurde dokumentiert und zusammen mit dem $P(f)$ -Antwortverhalten nach Werkseinstellungen dem Auftraggeber vor Durchführung der weiteren Versuchsreihen zur Bewertung zur Verfügung gestellt. Die gemessenen Eigenschaften sollen weiterhin zur Abstimmung der Simulationsstudie dienen, um ein möglichst realitätsnahes Umrichterverhalten abzubilden. Umgekehrt haben Zwischenergebnisse der Simulationsstudie die möglichst günstige Parameterwahl der durchzuführenden Laborversuche vorab informiert.

Schließlich werden die Inselnetz-Versuchsreihen sowohl in Werkseinstellungen des Geräts als auch mit den ermittelten Einstellungen wiederholt und für diese jeweils eigene Non-Detection Zones wie auch entsprechende Auswertungen der Nachlaufzeit erstellt. Der Vergleich der so erzielten Ergebnisse mit der Referenzfahrt wird dann genutzt, um etwaige Veränderungen der Zuverlässigkeit der Inselnetzerkennung durch die geänderten Parametrierungen zu bewerten.

3 Vermessung und Kalibrierung der Frequenzstützung

3.1 Aufbau und Verifikation eines geeigneten Prüfaufbaus

Das Ziel des Laboraufbaus ist es, sowohl die Vermessung des Frequenzverhaltens des EUT in hinreichender Genauigkeit und Dynamik auszuführen als auch die anschließende Durchführung der Inselnetzversuche ermöglichen.

Der grundsätzliche Testaufbau ist in der folgenden Abbildung 3.1 dargestellt:

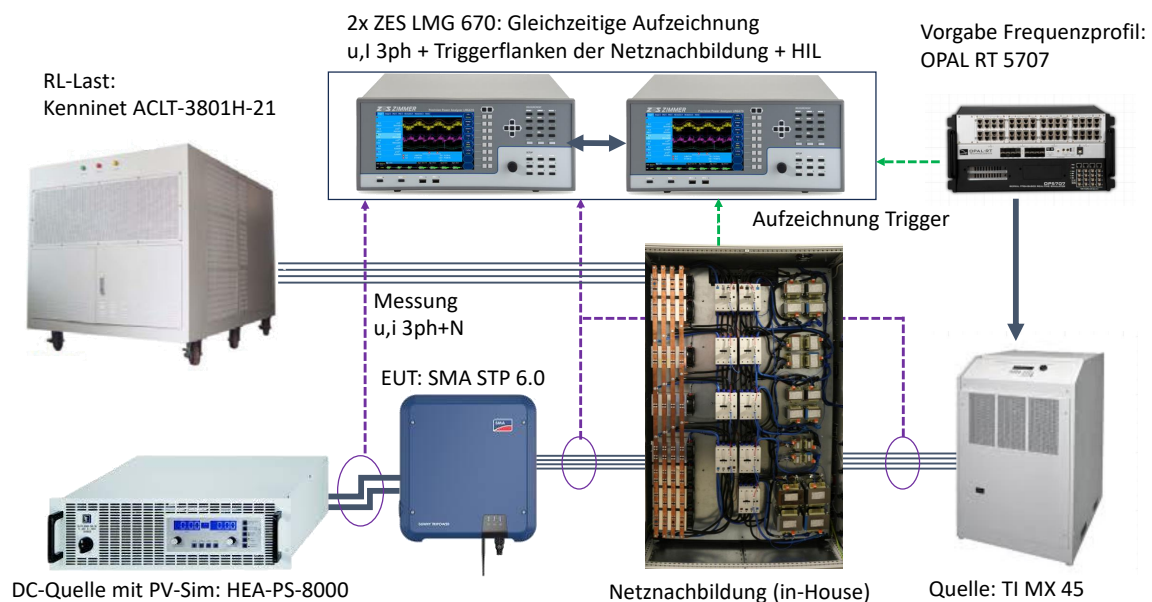


Abbildung 3.1: Verwendeter Laboraufbau der Studie

Die Bezeichnungen der eingesetzten Komponenten sind in der folgenden Tabelle 3.1 aufgelistet:

Funktion	Bezeichnung
DC-Quelle	EA PSI 81000-30
AC-Quelle	CI MX 45-3PI
RL-Last	Kenninet ACLT-3801H-21
Messung	2x ZES LMG 670
Profilgenerator	OPAL RT 5707 Echtzeitsimulator
EUT	SMA STP6.0-3AV-40

Tabelle 3.1: Eingesetzte Komponenten des Versuchsaufbaus

Wesentliche, u.a. auch in der [DIN14] geforderte Anforderungen stellen sich an die Dynamik der Komponenten und die Auflösung der Messung. Diese müssen wesentlich schneller/größer sein als die zu erwartenden Dynamiken im Verlauf der Versuche, um sicherzustellen, dass das Verhalten des EUT die ausschließliche Einflussgröße auf die Ergebnisse darstellt. Um dies sicherzustellen, wurden zunächst die für

die Dynamik wesentlichen Komponenten des Testaufbaus, die DC- und AC-seitigen Spannungsquellen, einzeln vermessen.

3.1.1 Vermessung der DC-Quelldynamik

Die eingesetzte Quelle wurde an drei einphasige DC-Lasten des Typs ZSACRV9826 geschaltet. Die technischen Daten jeder Last sind in Tabelle 8.1 im Anhang aufgeführt.

Die DC-Quelle wurde in allen folgenden Versuchen auf die in Tabelle 3.2 aufgeführten Parameter eingestellt:

Parameter	Wert
$P_{Sel,MPP}$	6.1 kW
$U_{Lim,DC}$	650 V
$I_{Sel,DC}$	24 A

Tabelle 3.2: Eingestellte Parameter der DC-Quelle

Die Ergebnisse sind in der unteren Abbildung 3.2 dargestellt.

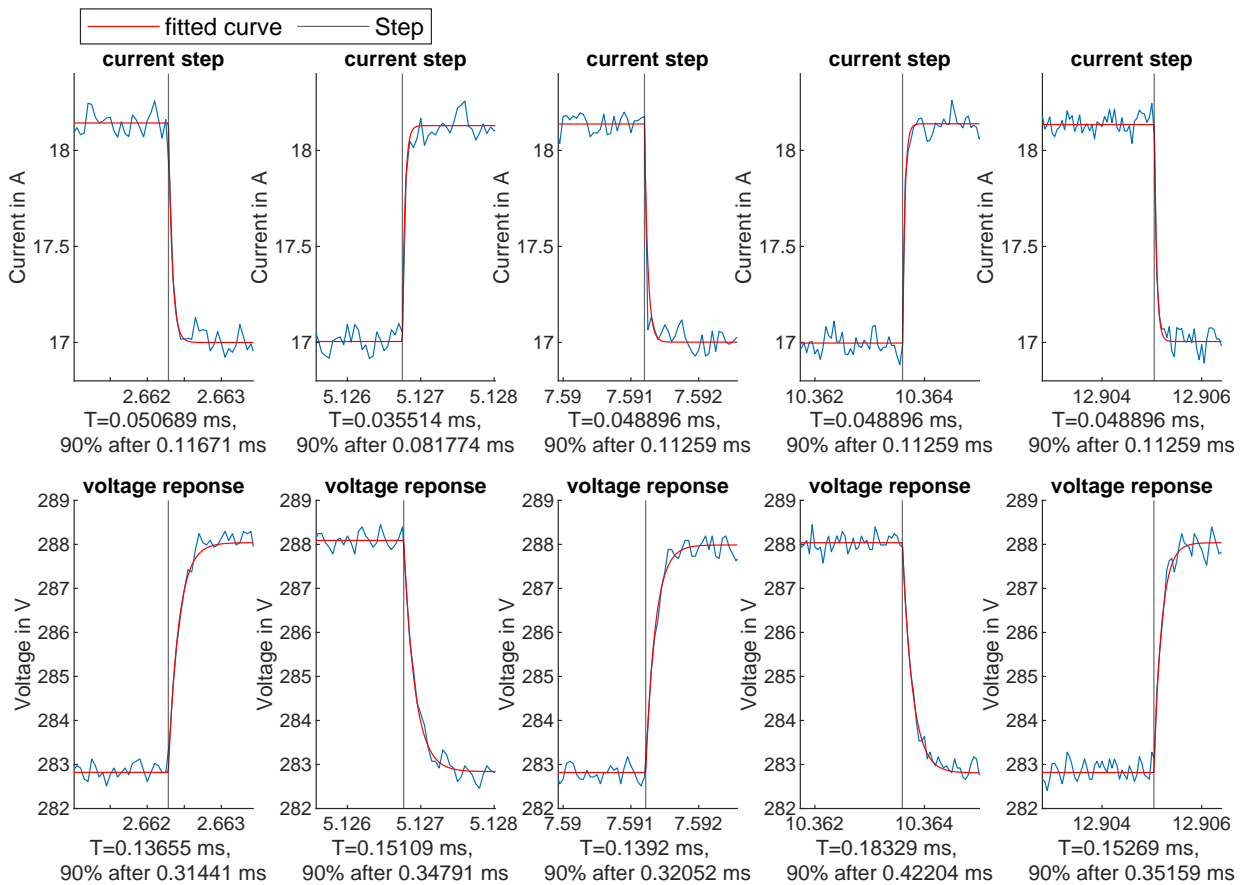


Abbildung 3.2: Ergebnisse der Vermessung der Eigendynamik der DC-Quelle

In der Grafik sind die durch wiederholte Lastsprünge vermessene Reaktion der DC-Quelle mit U-I-Kennlinienregler dargestellt. Zunächst wurde die Quelle mit aktivierter Kennlinie mit 85% der Nominalleistung des später zu prüfenden EUT (5,15 kW) belastet. Darauf aufbauend wurde die Quelle in Anlehnung

an die Vorgaben der DIN EN 62116 VDE 0126-2:2014-11 (Tabelle 2 an Prüfaufbauten allgemeine Inselnetzprüfungen) [DIN14] mit Lastsprüngen von $\pm 5\%$ des eingestellten Arbeitspunktes belastet.

Unter jede Messung in Strom und Spannung (blau) wurde eine allgemeine Sprungfunktion der generellen Form (PT1-Sprungantwort) :

$$u, i(t) = u, i_{begin} + u, i_{delta} \cdot (1 - e^{-\frac{t_0-t}{\tau}}) \quad (3.1)$$

gelegt und die Abweichung dieser zu den Messwerten durch iterative Anpassung der freien Parameter (u/i_{begin} , u/i_{delta} , T , t_0) minimiert (Fitting). Die hieraus errechnete Zeitkonstante τ in Strom und Spannung wird als Messwert für die Dynamik der jeweiligen Seite angenommen.

Die obere Reihe zeigt fünf Lastsprünge, die sequenziell auf den Prüfaufbau gegeben worden sind. Die nachträgliche Auswertung der Sprungdynamik der Last zeigt, dass diese 90% ($\approx 2,3 \cdot \tau$) ihres Zielwertes in unter 0.12 ms (Anschwingzeit T_a) erreicht und somit deutlich schneller agiert als die Reaktion der Quelle. Hierdurch zeigt sich, dass die Last hinreichend schnell ist, um die Dynamik der Quelle zu prüfen. Die untere Reihe der Abbildung zeigt die hierzu jeweils korrespondierenden Antworten der durch die Quelle geregelten Spannung. Die Auswertung der Messungen zeigt eine Zeitkonstante von $< 0,19$ ms und eine maximale Anschwingzeit von unter 450 μ s. Diese ist deutlich kleiner als die nach [DIN14] geforderte Zeitspanne von < 1 ms. Damit wird angenommen, dass die Dynamik des U-I-Reglers der DC-Quelle hinreichend hoch ist, um einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Messergebnisse zu haben.

3.1.2 Vermessung der AC-Quellendynamik

Zudem wurden die von der AC-Quelle eingepprägten Verzögerungen auf den Testaufbau charakterisiert. Hierzu wurde durch den in Abbildung 3.1 dargestellten HIL-Aufbau ein symmetrisches dreiphasiges 50Hz-Sinussignal über die Quelle auf Nennspannung verstärkt. Am Ein- und Ausgang der Quelle wurden jeweils die Signale abgegriffen und die Verzögerung durch die Quelle charakterisiert. Die folgende Abbildung 3.3 zeigt ein exemplarisches Messergebnis:

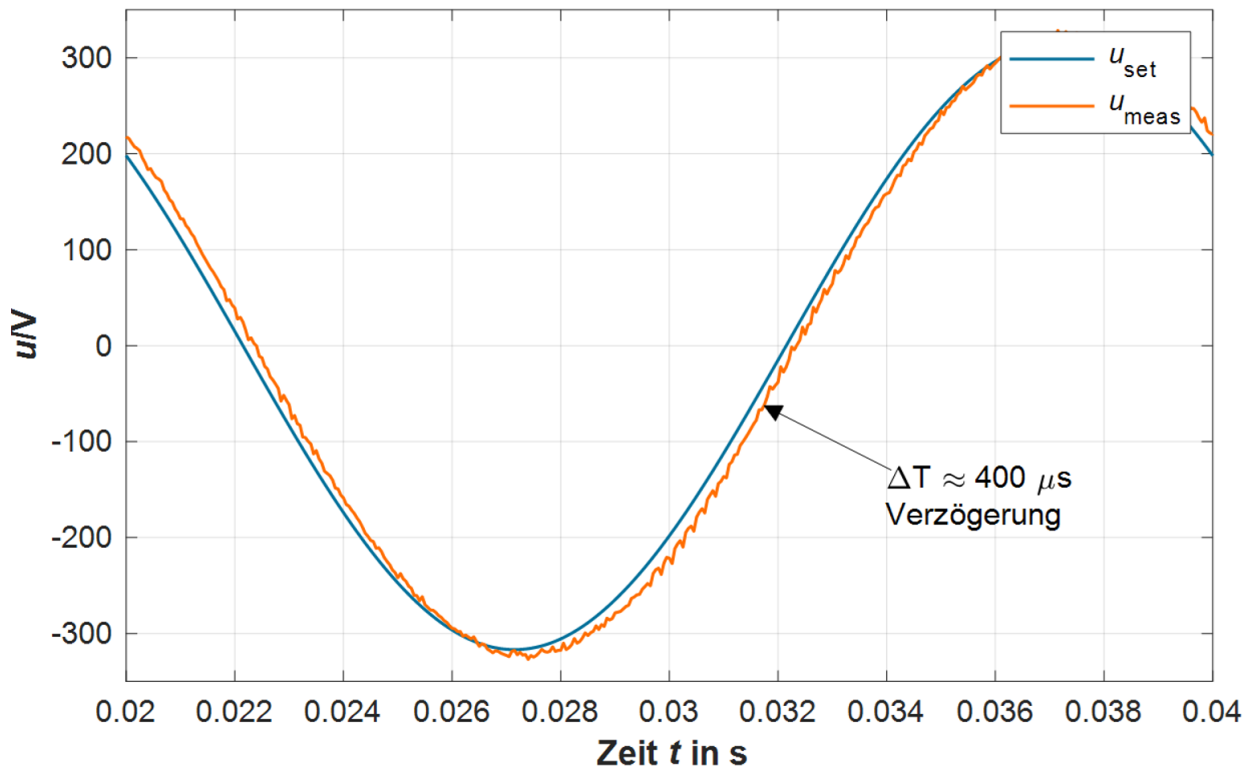


Abbildung 3.3: Verzögerung über der AC-Quelle

In dieser Grafik ist die maximal gemessene Verzögerung im Detail abgebildet. Durch den Datenabgleich ergibt sich eine Verzögerung von etwa 400 μs . Die daraus entstehende Phasenverschiebung wird als vernachlässigbar für die folgenden Untersuchungen angenommen. Eine Änderung der Sollfrequenz wirkt sich nicht messbar innerhalb der Verzögerungszeit auf die Sollwerte aus.

3.2 Referenzmessung des Umrichterhaltens in Werkseinstellungen

Dem dargestellten Testaufbau wird ein zu vermessender Wechselrichter hinzugefügt. Wichtige Kriterien für die Auswahl des Wechselrichters waren eine hohe Marktdurchdringung und eine Leistungsklasse in einer Größenordnung, die typischerweise auf der Niederspannungsebene eingesetzt wird. Aus dem Projektgremium heraus wurde ein dreiphasiger PV-Wechselrichter mit einer Nennleistung von 6 kVA (SMA STP6.0-3AV-40) [SMA] vorgeschlagen. Die wichtigsten technischen Daten des Wechselrichters sind in der folgenden Tabelle dargestellt:

Eigenschaft	Größe
Max. Generatorleistung	9000 Wp
Max. Eingangsspannung	850 V
MPP-Spannungsbereich	260 V bis 800 V
Bemessungsleistung (bei 230 V, 50 Hz)	6000 W
Netzfrequenz / Bereich	50 Hz / 45 Hz bis 55 Hz
Bemessungsausgangsstrom / Max. Ausgangsstrom	3 x 8,7 A / 3 x 9,1 A
Max. Wirkungsgrad / europ. Wirkungsgrad	98,2 % / 97,6 %

Tabelle 3.3: Technische Daten des für die Untersuchungen eingesetzten PV-Wechselrichters Sunny Tripower 6.0 [SMA]

Die aktuelle gültigen technischen Anschlussregeln für den Anschluss von Erzeugungsanlagen an die Niederspannung (VDE-AR-N4105:2018) [VDE18] lassen in Bezug auf die Anforderungen an die Dynamik von Anlagen im Falle von Frequenzabweichungen außerhalb des Bereichs von 49,8 bis 50,2 Hz Auslegungsspielraum zu.

Größe	Kriterium	Begründung/Formel
T_V	Anfängliche Zeitverzögerung	'möglichst ≤ 2 s', sollte 'deutlich unter 2 s für Typ-2/Speicher sein
erforderliche Leistungsanpassung		
T_{an}	$90\% \cdot \Delta P$ nach T_{an} ≤ 2 s (Typ 2), ≤ 1 s (Speicher)	Anschwingzeit, bis 90% des geforderten Leistungssprungs ΔP erstmalig erreicht ist
	$9\% \cdot \Delta P$ nach Ablauf von	$T_V + 0,1 \cdot (T_{an} - T_V)$
T_{ein}	≤ 20 s (Typ 2, Speicher)	Einschwingzeit, bis Korridor um $\pm 10\%$ des Zielwerts der Leistung nicht mehr verlassen wird

Tabelle 3.4: Kriterien nach VDE-AR-N4015:2018 an das dynamische Verhalten von Typ2-Anlagen und Speichern bei Frequenzabweichungen (P(f)-Frequenzstützung)

Einleitend wird das EUT in seinen Werkseinstellungen vermessen. Zur Inbetriebnahme wurde der der VDE-AR-N4105:2018 [VDE18] entsprechende Standardparametersatz ("VDE-AR-N4105 im Einrichtungsassistenten) im Gerät aktiviert. Von den sich daraus ergebenden Parametereinstellungen wurden nur die Parameter zur Art der Blindleistungsvorgabe von werksseitig deaktiviert/keine Blindleistung auf einen extern vorgegebenen Sollwert umgestellt, um die Inselnetzprüfungen zu ermöglichen. Die anderen Einstellungen wurden in den Untersuchungen des Kapitels 3.2 auf Werkseinstellungen vermessen. Davon ausgehend, dass diese im Mittel bei der Installation von Wechselrichtern bei den Endkunden keine wesentlichen Veränderungen erfahren, soll auf diese Weise ein Bild von dem typischen Verhalten des Wechselrichters bei Fehlerfällen gewonnen werden. Weitere Parameteränderungen waren im späteren Studienverlauf zur Abbildung der PRNB-Vorgaben notwendig, diese werden in dem entsprechenden Kapitel 3.3 separat erläutert.

Im Prüfaufbau wird der Wechselrichter zunächst bei getrennter Last einem Frequenzsprung ausgesetzt. Hierbei wird bei einem gewählten Sollwert von 2 kW dreiphasig Strom und Spannung an den Klemmen des Umrichters gemessen. Die ungefilterte Momentanleistung wird hieraus wie folgt gebildet:

$$p(t) = \sum_{m=1}^3 u_m \cdot i_m \quad (3.2)$$

In der folgenden Abbildung 3.4 ist die Momentanleistung (blau, linke Achse) sowie der Verlauf der Sollfrequenz (Orange, rechte Achse) dargestellt.

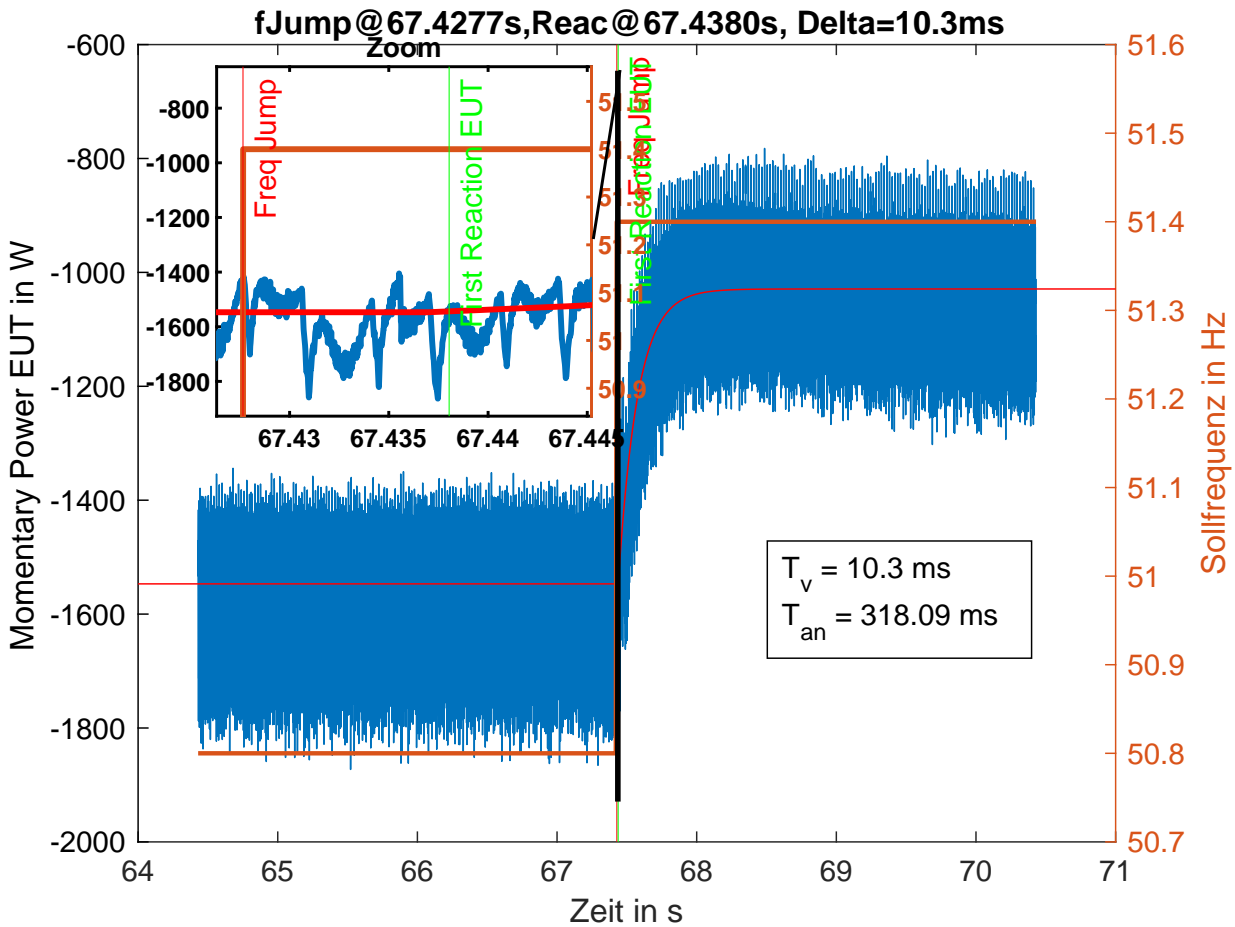


Abbildung 3.4: Leistungsänderung des EUT

Der Zeitpunkt des Sollfrequenzsprunges lässt sich über ein parallel zum Sprungzeitpunkt abgeleitetes Triggersignal an die Messeinrichtung genau abbilden. Die Größe der Momentanleistung hat zum Vorteil, dass eine Verfälschung der Ergebnisse durch etwaige online-Filterung/Nulldurchgangsmessung angesichts der hohen Dynamiken und kleinen zu bestimmenden Zeitkonstanten ausgeschlossen werden kann. Aufgrund des hohen Rauschens der Leistung, ein Resultat der Multiplikation zweier gemessener Größen, ist eine genaue Bestimmung des Verhaltens des EUT jedoch nicht direkt durchführbar. Aus diesem Grund wird in die Messung ein PT1-Sprung nach der Vorgabe der Gleichung 3.1 in die Antwort der Momentanleistung gelegt. Über die freien Parameter der Gleichung lassen sich die für die weiteren Untersuchungen relevante Verzögerung T_v und die Dynamik des EUT ableiten. Die errechnete Größe T_0 ist beispielhaft in grün im Zoom der Abbildung 3.4 eingetragen. Insgesamt ergibt sich, wie in diesem Beispiel dargestellt, bereits in den Werkseinstellungen ein hochdynamisches Verhalten des EUT, das die aktuellen Anforderungen an die Frequenzstützung nach Tabelle 3.4 weitaus übersteigt. Eine Einschwingdauer ist angesichts des hohen Rauschens nicht eindeutig zu bestimmen. Sie wird in diesen ersten Beispielmessungen grob innerhalb von $T_{ein} \approx 600 \text{ ms}$ beobachtet.

Für die folgenden Betrachtungen wird für die Leistungsmessung ein 20 ms-Mittelwertfilter verwendet. Das Ergebnis ist in Abbildung 3.5 dargestellt:

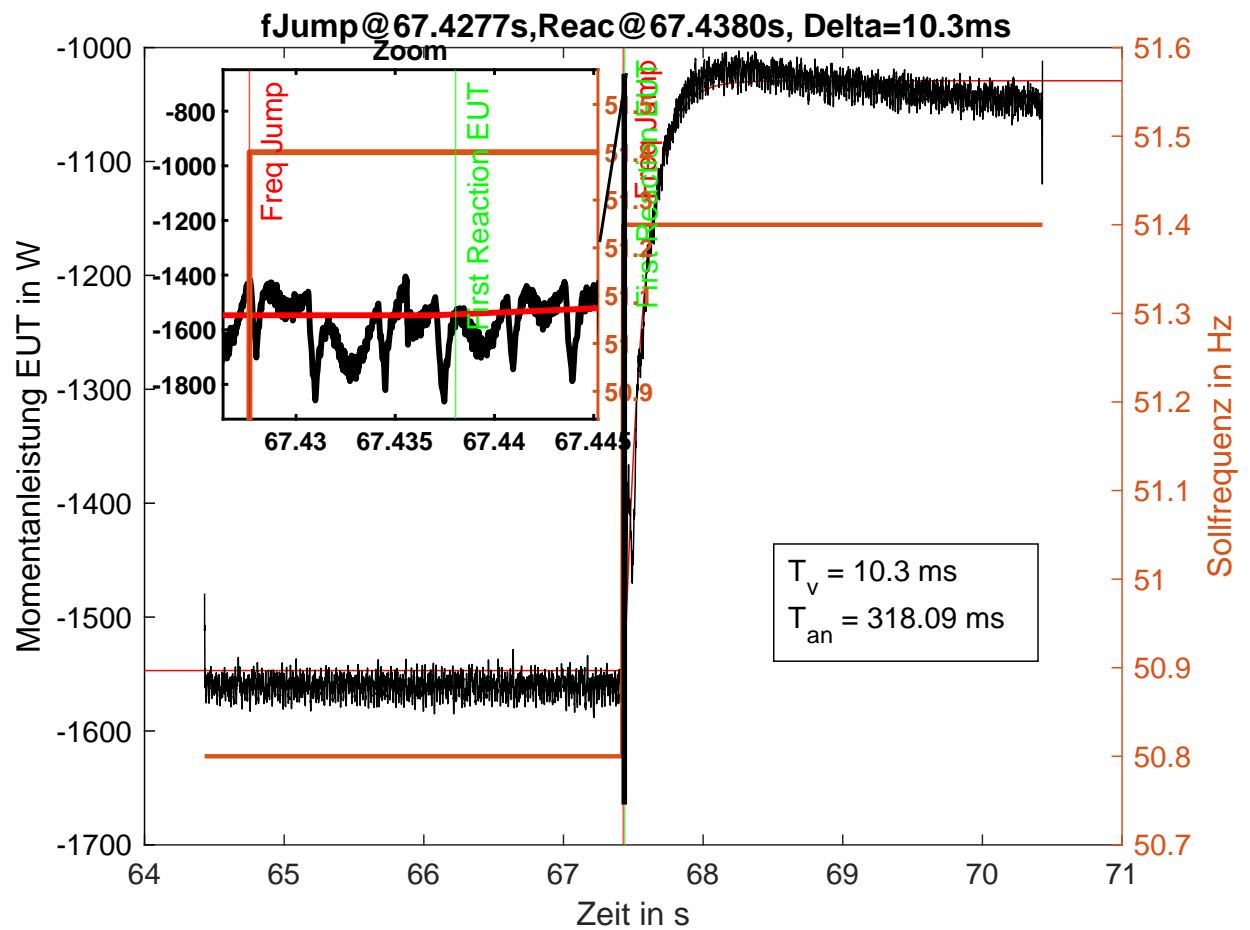


Abbildung 3.5: Leistungsänderung des EUT, gefiltert

Die Ergebnisse der symmetrischen Filterung beeinflussen das fitting, insbesondere in den relevanten Größen T_0 und T_{an} nicht, daher wird vorausgesetzt, dass die hierdurch entstehenden Einflüsse vernachlässigbar sind. Die Anschlagzeit nach den Kriterien der Tabelle 3.4 lässt sich hier allerdings genauer auf etwa 318 ms einordnen. Die folgenden Messungen werden somit durch das Mittelwertfilter prozessiert.

Die folgende Abbildung 3.6 stellt einen Vergleich des Verhaltens des Wechselrichters bei Applikation eines Überfrequenzprofils mit den Minimalanforderungen der [VDE18] dar.

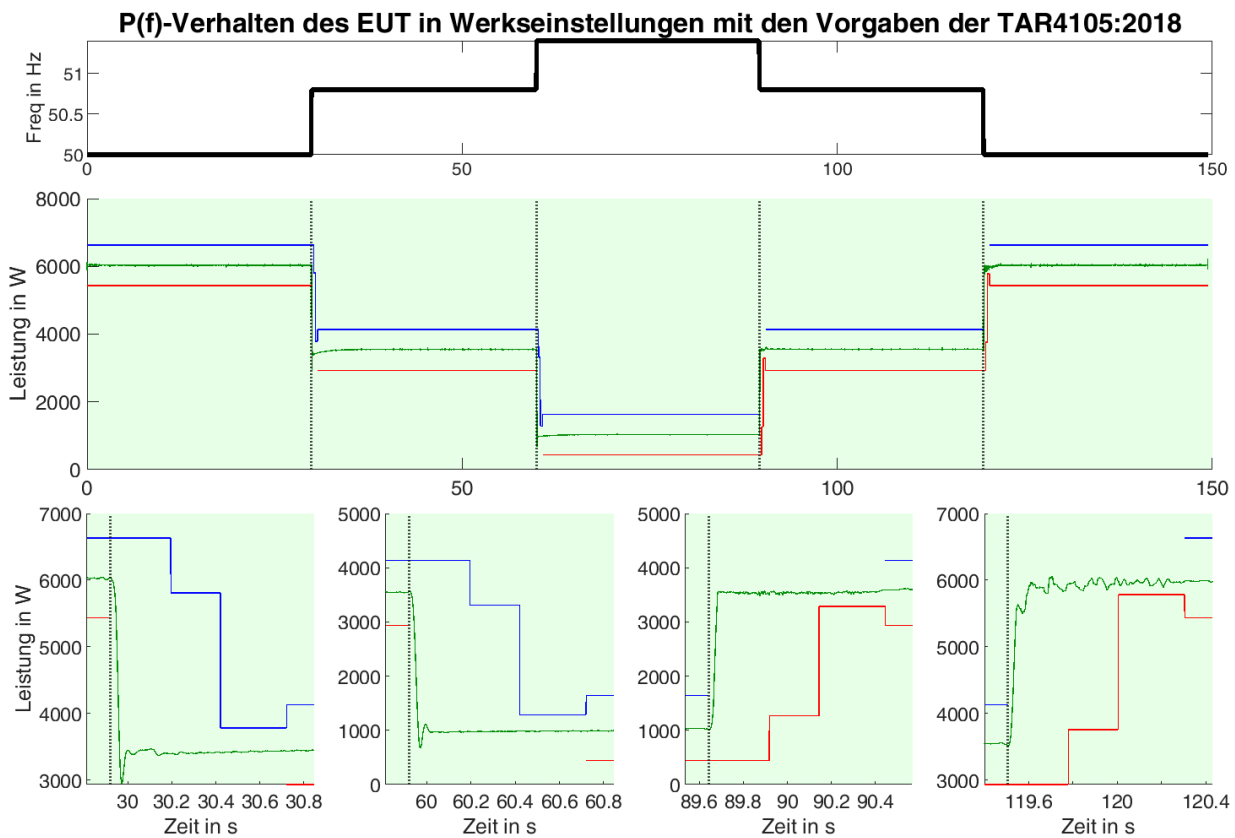


Abbildung 3.6: Vergleich des gemessenen Verhaltens des EUT mit den aktuellen Anforderungen nach VDE-AR-N4105:2018

In Abbildung 3.6 ist im oberen Messverlauf das von dem Echtzeitsimulator vorgegebene Frequenzprofil mit 4 Frequenzsprüngen [50 Hz - 50,8 Hz - 51,4 Hz - 50,8 Hz - 50 Hz] zu erkennen. Der mittlere Messverlauf stellt die Ausgangsleistung als Reaktion des Wechselrichters auf die Frequenzänderungen dar. Die vier unteren Messungen stellen einen Zoom der Leistungsmessung um die 4 Zeitpunkte der Frequenzsprünge herum dar. In blau und rot sind zudem die einzuhaltenden Vorgaben nach aktuell geltender Norm der Tabelle 3.4 dargestellt. Die Hintergrundfarbe indiziert das Einhalten der Grenzwerte während der Messung. In diesem Fall befinden sich Messwerte innerhalb der Grenzen, wodurch die grüne Hintergrundfarbe die bestandene Messung anzeigt. Die Leistungskurve des Wechselrichters hält mit großem zeitlichen Abstand die vorgegebenen Minimalanforderungen ein. Somit ist zu erwarten, dass das vermessene Gerät, zusammen mit der Möglichkeit, das dynamische Verhalten des EUT mit Installateurszugriff feingliedrig anzupassen, hier auch schärfere Anforderungen umsetzen kann.

3.3 Kalibrierung des EUT-Antwortverhaltens nach PRNB-Parametersatz

Nach der Identifikation des Verhaltens bei Werkseinstellungen gegenüber den aktuell gültigen Vorgaben zur Frequenzhaltung soll nun die Reaktionsgeschwindigkeit und das dynamische Verhalten iterativ erhöht werden, um eine aktuell diskutierte verschärfte Vorgabe der Norm, die PRNB, einzuhalten. Im Gegensatz zur aktuell geltenden Norm, die nur wenige feste Zeitpunkte vorgibt, bis zu denen ein prozentualer Anteil des Leistungssprungs zu erfolgen hat, sieht die aktualisierte Version der Norm einen klaren Korridor vor, in dem die Leistungsänderung des Wechselrichters erfolgen soll. Es werden eine obere und untere Grenzkurve vorgegeben, die nicht geschnitten werden dürfen. Durch die Vorgabe von kontinuierlichen Toleranzbändern

werden unerwünschte Verhaltensweisen vermieden, wie zum Beispiel starke Überschwinger oder Ausreißer. Weitere Vorgaben, wie beispielsweise an die Mindestdämpfung des Systems, können den diskutierten Anforderungen entnommen werden.

Nachfolgend werden die diskutierten verschärften Vorgaben der PRNB dargestellt. Der Verlauf der Grenzkurven ergibt sich aus den Formeln der Tabelle 3.5.

Gültigkeit	Funktion
$t < T_V$	$P_{Start} + \text{sign}(P_{Soll} - P_{Start}) \cdot P_{Tol}$
$t \geq T_V$	$P_{Start} + (P_{Soll} - P_{Start}) \cdot (1 - e^{-\frac{T_V-t}{\tau}}) + \text{sign}(P_{Soll} - P_{Start}) \cdot P_{Tol}$
	P_{Start} : Leistung vor dem Sprung P_{Soll} : erwartete Leistung nach dem Sprung

Tabelle 3.5: Gleichungen der Toleranzbänder für die Prüfung der Sprungantwort der PRNB

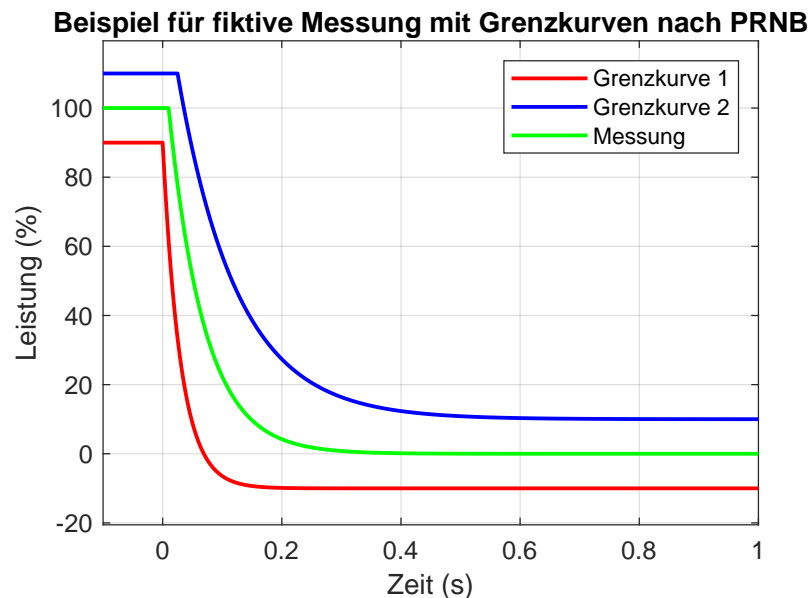


Abbildung 3.7: Beispielhafte Grenzkurven nach Vorgabe des PRNB-Arbeitsdokuments [VDE]

In Abbildung 3.7 sind beispielhafte Grenzkurven nach Norm zu sehen. In diesem Fall gibt die untere rote Begrenzungskurve die maximal zulässige Dynamik des EUT an. Sie stellt den exponentiellen Kurvenverlauf ohne Verzögerung dar. Die blaue Grenzkurve, die die minimal erlaubte Dynamik vorgibt, enthält eine Verzögerungszeit der PT1-Sprungantwort auf den Frequenzsprung (T_V) und eine Zeitkonstante der PT1-Sprungantwort (τ). Die maximal zulässige Verzögerung ist aufgrund eines Toleranzband der gemessenen Antwort des EUT (P_{Tol}) etwas höher. Die konkreten Parameter sind in Tabelle 3.6 [VDE] aufgelistet.

Parameter	Grenzkurve 1	Grenzkurve 2
τ	0,03 s	0,10 s
T_V	0,0 s	0,025 s
P_{Tol}	$+10\% \cdot P_{EMAX}$	$-10\% \cdot P_{EMAX}$

Tabelle 3.6: Parameter der Toleranzbänder für die Prüfung der Sprungantwort nach PRNB, diskutierte Parameter

Die Prüfung dient dem Nachweis des Zeitverhaltens und damit der Mindestdämpfung zur Sicherstellung der Systemstabilität. Die gesamte Prüfung wird in vier Messintervallen durchgeführt. In jeder Messung wird

die Frequenz der Spannungsvorgabe von einem in Tabelle 3.7 dargestellten Startwert auf einen Zielwert sprunghaft geändert. Die erwarteten Leistungen ergeben sich aus einer für die PRNB diskutierten Default-Statik von $s=2,9\%$ (entspr. einer Steigung von $69\% P_{ref} / \text{Hz}$).

Prüfung	Frequenz in Hz	Erwartete Wirkleistungsabgabe der EZE in $\% P_{EMAX}$
a)	50,00 \rightarrow 50,80	100 \rightarrow 58,6
b)	50,80 \rightarrow 51,40	58,6 \rightarrow 17,2
c)	51,40 \rightarrow 50,80	17,2 \rightarrow 58,6
d)	50,80 \rightarrow 50,00	58,6 \rightarrow 100

Tabelle 3.7: Vorgabe von Frequenzsprüngen bei $s=2,9\%$, [VDE]

Nach der Vorgabe ist die Prüfung bestanden, wenn die ermittelten Sprungantworten stets im Bereich der Frequenzübergänge aus 3.7 innerhalb der in der Tabelle 3.5 definierten Toleranzbänder liegen. Hierbei werden die Berechnungsgrößen maximale Wirkleistung des EUT (P_{EMAX}), Bezugs-Wirkleistung des EUT auf die aktuelle Frequenz (P_{ref}) und Normierte Statik der Frequenzhaltungsfunktion (s) verwendet.

Nachfolgend werden zur visuellen Unterstützung der Erläuterung des Prüfablaufs beispielhafte explorative Messungen dargestellt, in denen die Grenzwerte teilweise eingehalten und verletzt werden.

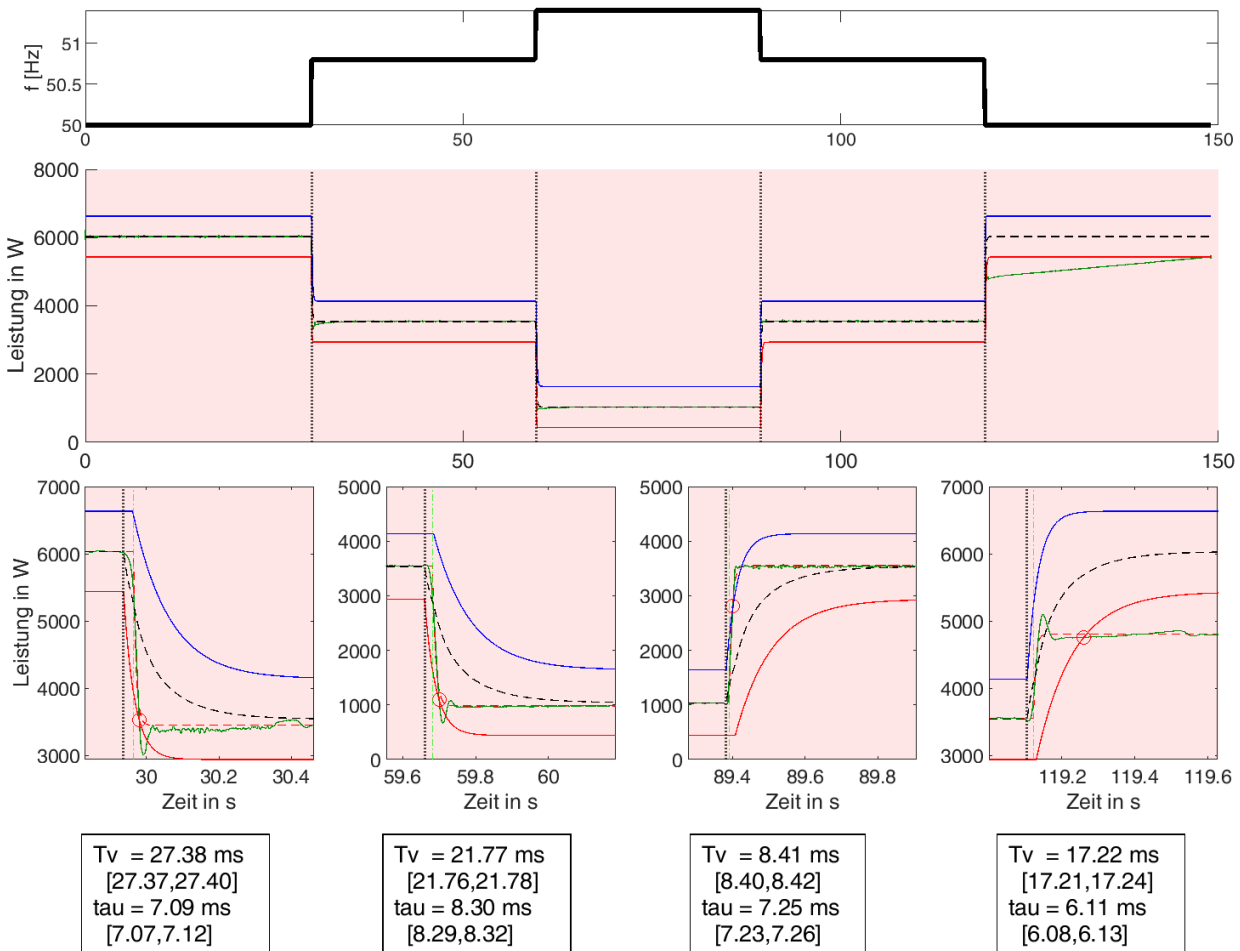


Abbildung 3.8: Fehlgeschlagene Prüfung bei Vergleich des gemessenen Verhaltens des EUT mit den aktualisierten Anforderungen

In Grafik 3.8 ist eine beispielhafte Messreihe zu sehen, bei der die Einstellungen des EUT auf die höchstmögliche Dynamik in den relevanten Einstellungen angehoben wurden und somit alle Einzelmessungen die Grenzkurven reißen. Auch hier wird in der mittleren Grafik die gemessene Leistung in Relation zu den Grenzkurven mit genauere Betrachtung der Übergänge in der untersten Reihe dargestellt. Der gemessenen Antwort wird zu jedem Sprungzeitpunkt mit einem PT1-Fit analog zu Kapitel 3.1.1 (rot gestrichelt) überlagert. Die so ermittelte Verzögerungszeit T_V und Zeitkonstante τ sind darunter mitsamt der $1-\sigma$ -Umgebung (Messunsicherheits-Intervall) jeweils numerisch angegeben. Zusätzlich ist ein Mittelwert zwischen den beiden Grenzkurven (schwarz gestrichelt) eingezeichnet, der in den diskutierten Prüfungen keine Entsprechung hat, sich jedoch zur schnellen quantitativen Einschätzung der Abweichung des Messverlaufs von einem robusten fiktiven Idealverlauf eignet. Weiterhin sind der genaue Zeitpunkt des Frequenzsprungs (vertikal gestrichelt, schwarz) sowie der Zeitpunkt der initialen Reaktion des EUT nach den Ergebnissen des Fits eingezeichnet (vertikal gestrichelt, grün). In dem dargestellten Fall werden die Grenzkurven der maximal zulässigen Dynamik geschnitten. Der Wechselrichter reagiert besonders schnell auf die Frequenzänderungen und reißt in den ersten beiden Fällen mit einem Überschwingen die vorgegebenen Grenzkurven. In dieser Maximaleinstellung ist die nötige Systemdämpfung nicht gegeben.

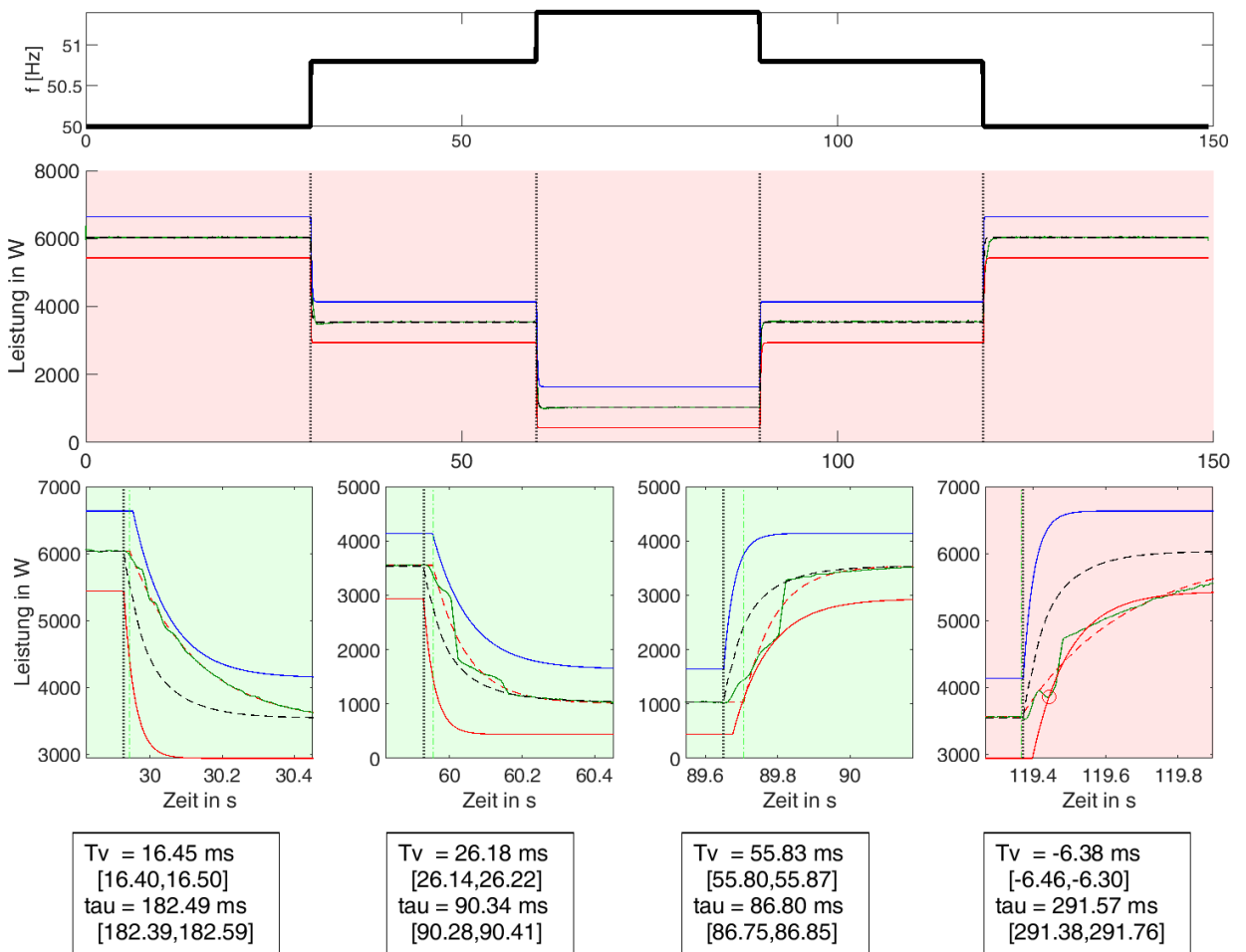


Abbildung 3.9: Grenzwertverletzung bei Vergleich des gemessenen Verhaltens des EUT mit den aktualisierten Anforderungen

In Grafik 3.9 ist zu sehen, dass bei der Auswertung der Messreihe drei Einzelmessungen bestehen. Die letzte Messung schneidet die untere, strengere Grenzkurve. Diese wird nach etwa 150 ms geschnitten (roter Kreis).

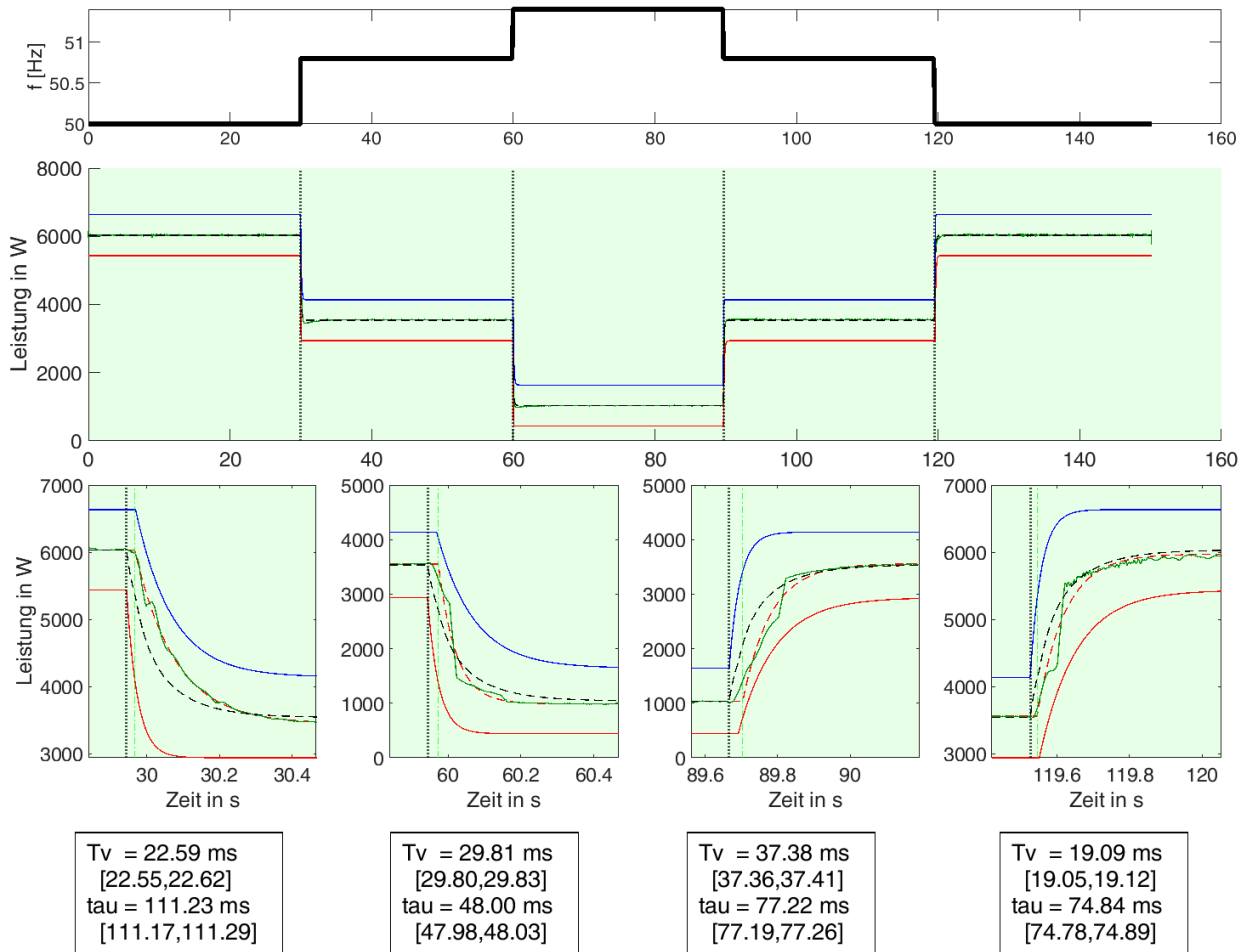
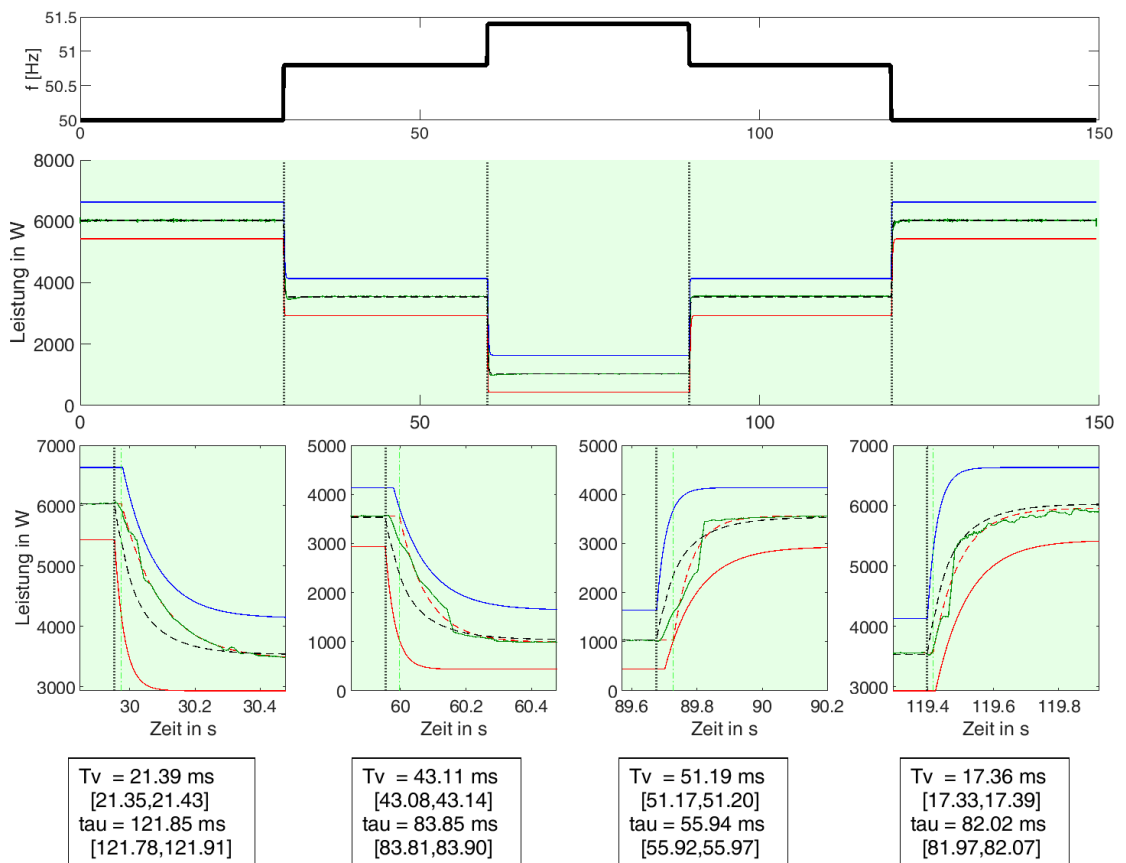
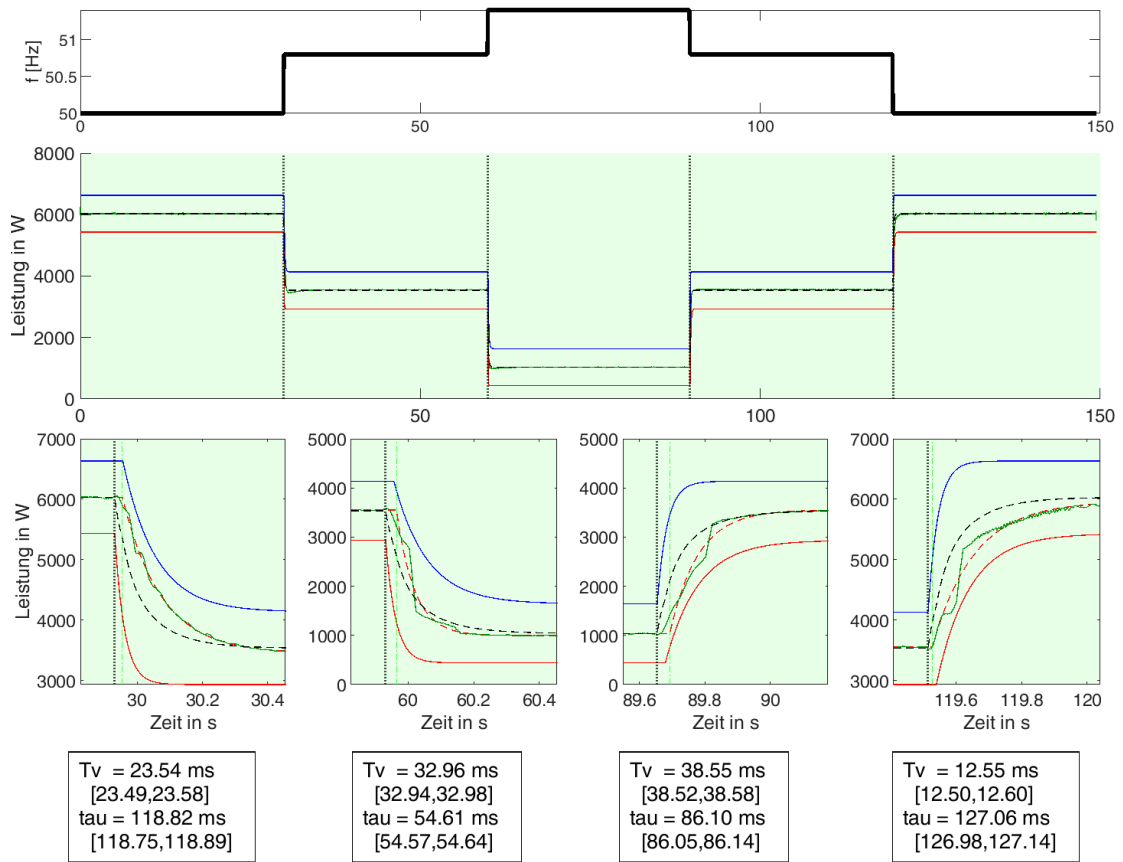


Abbildung 3.10: Bestandene Prüfung bei Vergleich des gemessenen Verhaltens des EUT mit den aktualisierten Anforderungen

Bei der in Abbildung 3.10 dargestellten Messung halten alle Einzelmessungen die Grenzkurven ein.

Im nächsten Schritt wurden die als relevant für das PRNB-konforme Verhalten identifizierten Parameter verändert. So soll getestet werden, ob eine schnellere Reaktion des Wechselrichters auf die Frequenzänderungen möglich ist. Die hierfür verwendeten Parameter sind in der Tabelle 8.2 im Anhang detailliert aufgelistet. Die Ermittlung des geeignetsten Parametersatzes für ein PRNB-konformes Verhalten des Wechselrichters erfolgt im Rahmen einer Messreihe, bei der die für die Dynamik relevanten Parameter des EUT iterativ in den jeweils möglichen Kombinationen durchlaufen werden. Für jede Parameterkombination wird das EUT jeweils drei Durchläufe mit dem oben dargestellten Frequenzprofil unterzogen und die entsprechenden Sprungantworten gemessen. Nach jedem Durchlauf wird das EUT durch Trennen der AC-Quelle abgeschaltet und neu hochgefahren, um voneinander unabhängige Versuche zu gewährleisten.

Aus den insgesamt 150 Kandidaten ergab sich die in Tabelle 8.2 dargestellte Parameterkombination, die nach Auswertung eine robuste Einhaltung der Vorgaben ermöglichte, d.h. bei jedem der insgesamt 12 Frequenzsprünge eine Sprungantwort der Leistung innerhalb der PRNB-Vorgaben aufwies. Diese sind in Abbildung 3.11 unten dargestellt:



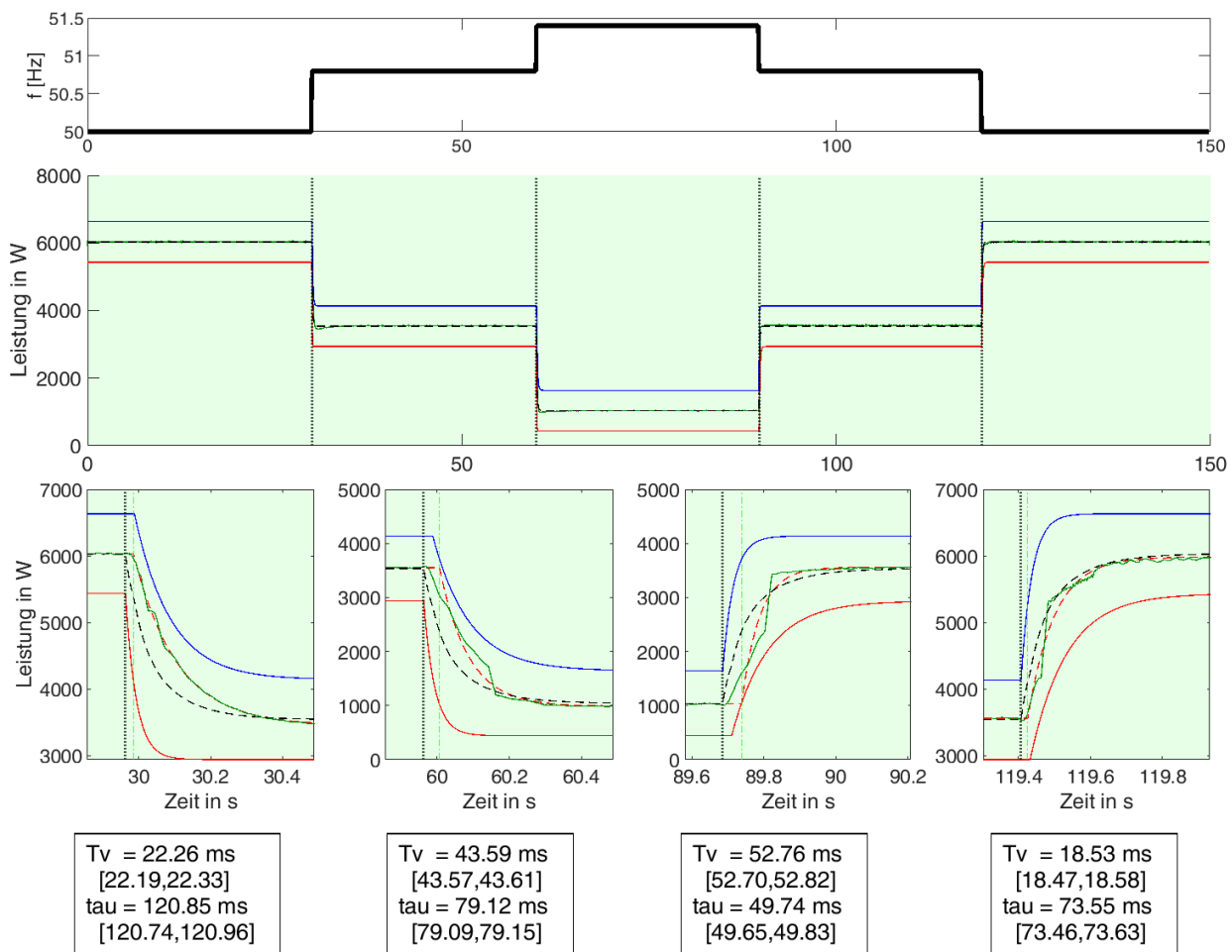


Abbildung 3.11: Prüfdurchläufe mit dem gewählten PRNB-Parametersatz

Bemerkenswert an der Auswertung ist, dass im gefundenen Parametersatz die Dynamik des EUT gegenüber den PRNB-Vorgaben etwas erhöht werden muss, um die etwas größeren initialen Verzögerungen in der Sprungantwort auszugleichen. Aufgrund der in den Grenzkurven vorgegebenen Toleranzen ist dies möglich. Insgesamt besitzt der EUT in den ermittelten Einstellungen weiterhin einen überkritisch gedämpften Antwortverlauf ohne Überschwinger.

In den Auswertungen fand sich ein weiterer Parametersatz, dessen Antwortverlauf in den Prüfungen insgesamt etwas weniger von dem schwarz gestrichelten fiktiven Idealverlauf abwich, da hier jedoch einer der 12 Sprünge nicht bestanden wurde, wurde dieser in Abstimmung mit der Studienleitung verworfen.

4 Prüfung der Fähigkeit des EUT zur Erkennung ungewollter Inselnetze

Im zweiten Teil der Studie wird geprüft, wie sich die erweiterten Anforderungen zur netzsicherheitsbasierten Primärregelung und die geänderten Schutzeinstellungen auf die Fähigkeit des EUT zur Erkennung ungewollter Inselnetze im Netzparallelbetrieb auf der Niederspannungsebene auswirken.

4.1 Verfahren zur Einstellung, Teilnetzbildung und Messung

Um die Auswirkungen der Neuparametrierung auf die Fähigkeit des Wechselrichters zur Erkennung ungewollter Inselnetze zu bewerten, wird der EUT mit beiden Parametersätzen einer Reihe von Inselnetztests unterzogen.

Die Ergebnisse sind hierbei generell nicht zu verallgemeinern, und sollen nur einen generellen Ausblick darüber geben, ob sich die geänderten Anforderungen an Wechselrichter mit den bisherigen Anforderungen an die Inselnetzerkennung grundsätzlich vereinbaren lassen. Aus diesem Grund wird auch explizit nicht nach den Vorgaben der DIN EN:62116 [DIN14] geprüft, ob der Wechselrichter mit den neuen Einstellungen die für die Typzulassung notwendigen Anforderungen an die Inselnetzerkennung erfüllt. Hierbei ist davon auszugehen, dass Umrichterhersteller weitaus tiefere Eingriffsmöglichkeiten in die Regelung des Wechselrichters und weitaus mehr Möglichkeiten hätten, das Verhalten des Wechselrichters an die Prüfbedingungen anzupassen, als ein externes Labor. Die Untersuchungen dienen vielmehr dem Zweck, grundsätzlich abzuschätzen, ob eine wirksame Inselnetzerkennung mit erhöhten Anforderungen an die Dynamik technisch vereinbar ist. Die Untersuchungen werden daher als Differenzmessung ausgeführt, die einen Vergleich der Erkennungsperformance mit den PRNB-Parametern im Vergleich zu den Werkseinstellungen ermöglichen sollen.

Hierzu wird der Prüfling im Testaufbau aus Abbildung 3.1 einer Serie von Inselnetzfällen ausgesetzt. Variiert wird hierbei:

1. Der Parametersatz (Werkseinstellungen oder PRNB-Parametersatz)
2. Der Arbeitspunkt des zu prüfenden Wechselrichters.
3. Die zum Zeitpunkt der Inselung mit dem Netz ausgetauschte Wirk- und Blindleistung

Zu 1): Die Neuparametrierung umfasst die im Anhang in Tabelle 8.2 dargestellten Größen. Mit 'Parametername' wird der eindeutige interne Name der Einstellung bezeichnet. Der Wert 'Werkseinstellungen' und 'Zielwert' eines jeden Eintrags gibt die zwei im jeweiligen Durchlauf eingestellten Parametersätze an.

Zu 2): Im Verlauf der Versuche werden jeweils drei Arbeitspunkte des EUT angefahren. Der erste Arbeitspunkt wurde in Anlehnung an die Einspeisung des modellierten Wechselrichters in der Simulationsstudie gewählt, um eine möglichst gute Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten. In der Simulationsstudie wird das eingesetzte 100 kVA-Wechselrichtermodell mit $Q = 26,3$ kvar betrieben. Herunterskaliert auf das 6 kVA-EUT bedeutet das eine eingespeiste Blindleistung von 1,58 kvar. Zusätzlich dazu wird jeweils in einer eigenen Testreihe ein Arbeitspunkt mit höherer und niedrigerer Blindleistungseinspeisung geprüft. Insgesamt ergeben sich die folgenden Arbeitspunkte:

- (a) $P = 5,79 \text{ kW}, Q = 1,58 \text{ kvar} \rightarrow \cos(\phi) = 0,96$
- (b) $P = 5,20 \text{ kW}, Q = 3 \text{ kvar} \rightarrow \cos(\phi) = 0,86$
- (c) $P = 5,98 \text{ kW}, Q = 0,5 \text{ kvar} \rightarrow \cos(\phi) = 0,99$

Die gewählten Arbeitspunkte sind in der Abbildung 4.1 grafisch dargestellt:

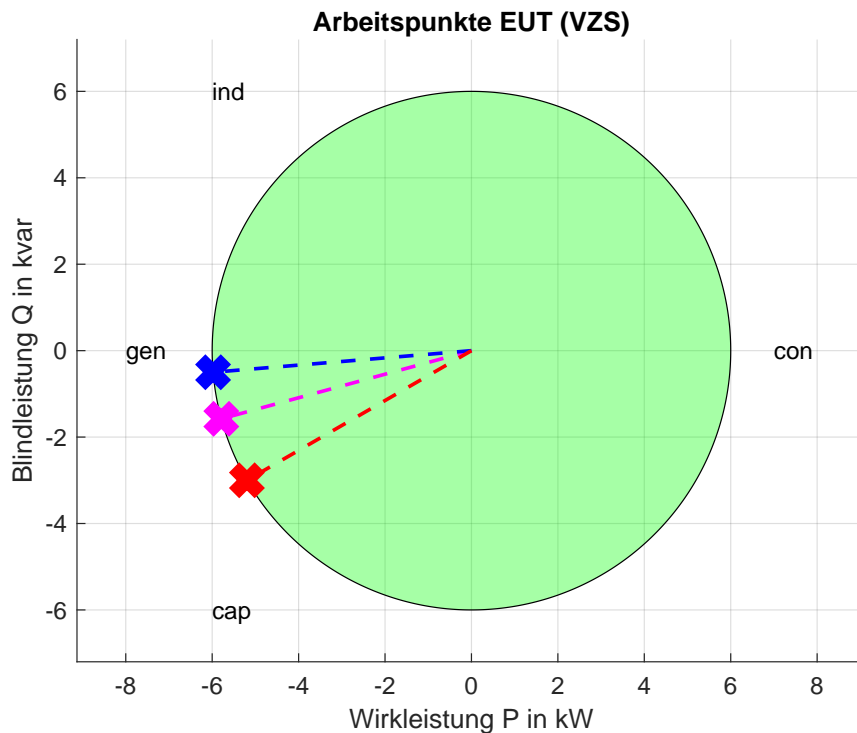


Abbildung 4.1: Vermessene Arbeitspunkte des EUT im Versuchsverlauf

Zu 3: Die mit dem Netzanschluss ausgetauschte Wirk- und Blindleistung ergibt sich als direkte Differenz zwischen der Einspeisung des EUT und dem Leistungsbezug der eingesetzten Last. Im hierfür gewählten Versuchsaufbau wurde anstelle des üblichen RLC-Schwingreises die Nachbildung einer möglichst realistischen Netzersatzlast nach [PSS17] gewählt. Die linearen Elemente dieser Last ($k_{pu} = 2, k_{pf} = 0, k_{qu} = 2, k_{qf} = -1$) können im genutzten Labor abgebildet und auf die Nennleistung des EUT skaliert werden. In Näherung ergäbe sich hier eine RL-Last, die laut der Quelle gleichzeitig eine Art Worst-Case-Abschätzung der Netzersatzlast darstellt. Durch diese wird $\Delta P, \Delta Q$ als Austauschleistung vor der Teilnetzbildung variiert. Die Parameterbereiche für den AP des Umrichters, der Last sowie ΔP und ΔQ wurde vor Versuchsdurchführung unter Zuhilfenahme von Zwischenergebnissen der Simulationsstudie im gegenseitigen Austausch festgelegt.

Innerhalb einer Versuchsreihe wird allein die zum Zeitpunkt der Inselung mit dem Netz ausgetauschte Wirk- und Blindleistung variiert. Dafür wird die RL-Last mehrschrittig eingeregelt, und die in Abbildung 3.1 am NAP gemessene Wirk- und Blindleistung auf den jeweiligen Zielwert eingestellt. Der EUT besitzt dabei stets kapazitives Verhalten. Wenn am Netzanschlusspunkt (NAP) insgesamt induktives Verhalten vorliegt, bedeutet dies, dass die eingestellte absolute Blindleistungsaufnahme der Last die Einspeisung durch den EUT überwiegt. Eine gleiche Höhe bedeutet eine resultierende reine Wirkleistungseinspeisung oder -aufnahme am NAP ($Q_{RL}/Q_{EUT} = 1$). Die Wirkleistung wird auf die gleiche Weise eingestellt. Allen Grafiken wird hierbei das Verbraucherzählpeilsystem zugrundegelegt, eine negative Zielleistung am NAP

bedeutet einen Einspeiseüberschuss des EUT gegenüber der lokalen Wirkleistungsaufnahme durch die Last ($P_{RL}/P_{EUT} < 1$).

In Anlehnung an die ersten Ergebnisse der Simulationsstudie wurde der zu untersuchende Bereich im Labor auf die folgenden Punkte festgelegt. Hier fällt für den simulierten Wechselrichter ein wesentlicher Teil kritischer Arbeitspunkte mit einem Teilgebiet erfolgreicher Inselnetzerkennung zusammen. Die Veränderung beider Gebiete sollte im Labor betrachtet werden. Der Bereich ist bewusst nicht auf $\Delta P, \Delta Q = 0$ zentriert.

(A) $P_{RL}/P_{EUT} = [60\% \dots 150\%]$

(B) $Q_{RL}/Q_{EUT} = [80\% \dots 140\%]$

Die folgende Abbildung 4.2 zeigt exemplarisch die für die Versuchsreihe des AP (a) resultierenden Versuche:

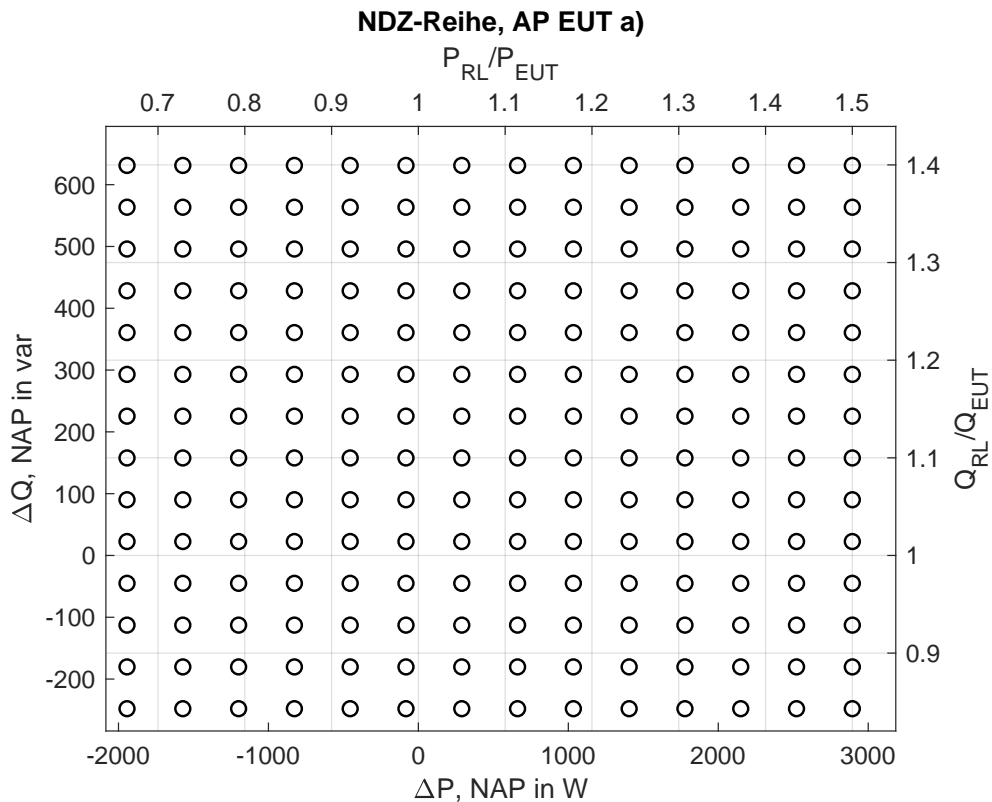


Abbildung 4.2: Versuche der Versuchsreihe (a)

Jeder Eintrag auf dem Diagramm entspricht hierbei einem Versuchsdurchlauf. Insgesamt werden pro Versuchsreihe $15 \times 15 = 225$ Versuche durchgeführt. Wie in Kapitel 5.2 beschrieben, wird jeder Versuch zweimal durchgeführt, um die notwendige Testsensitivität zu erhalten und eine vollständige Unterscheidung zwischen der dem Versuchsaufbau immanenten Streuung der Ergebnisse und nicht kontrollierten externen Faktoren durchführen zu können. Um den vollständigen Vergleich der Auswirkung der Neuparametrierung des EUT über alle Arbeitspunkte und den vollständigen Untersuchungsraum der Netzanschlussleistungen zu ermöglichen, umfasst die folgende Untersuchung insgesamt $225 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 2 = 2.700$ Versuche.

Die abgeprüften Arbeitsgebiete sind damit immer auf die eingespeiste Leistung des EUT normiert. Der absolute Bereich der Wirk- und Blindleistung am NAP wird in den Versuchsreihen (a) bis (c) entsprechend variiert, um die relativen Bereiche (A) und (B) vergleichbar zu halten. Im zweiten Durchlauf werden die

Versuche im abgeprüften Untersuchungsraum zudem in randomisierter Reihenfolge durchgeführt, um die Störung durch etwaige unkontrollierte systematische Abweichungen in den Ergebnissen zu minimieren.

Der Ablauf eines einzelnen Versuchs umfasst somit die folgenden Schritte:

- Hochfahren der AC-Quelle und Warten auf den Beginn der Einspeisung des Equipment under Test (EUT).
- Zugriff auf die Einstellungen des EUT und Setzen eines Arbeitspunktes gemäß Item (a) bis (c). Ggf. iterativ, falls Abweichungen gemessen werden; beim ersten Versuch werden hier alle Parameter aus Tabelle 8.2 gesetzt und verifiziert.
- Einregelung der Wirk- und Blindleistung am NAP auf den Zielwert des jeweiligen Versuchs gemäß Item (A) und (B); hierzu Steuerung der Real- und Imaginäranteile der RL-Last; die Zielgröße wird auf 10 W und 10 var genau eingeregelt, ggf. wird hierzu ein Feinabgleich der Last durchgeführt.
- Start einer hochauflösenden Messung aller relevanten, in Abbildung 3.1 dargestellten Größen
- Start der Inselung und Messung der Einspeisung des EUT
- Nach Abschalten des EUT oder 10 s Beenden des Versuchs; Abspeichern der verwendeten Einstellungen und Messdaten.

Ein exemplarischer Verlauf ist in der untenstehenden Abbildung 4.3 dargestellt:

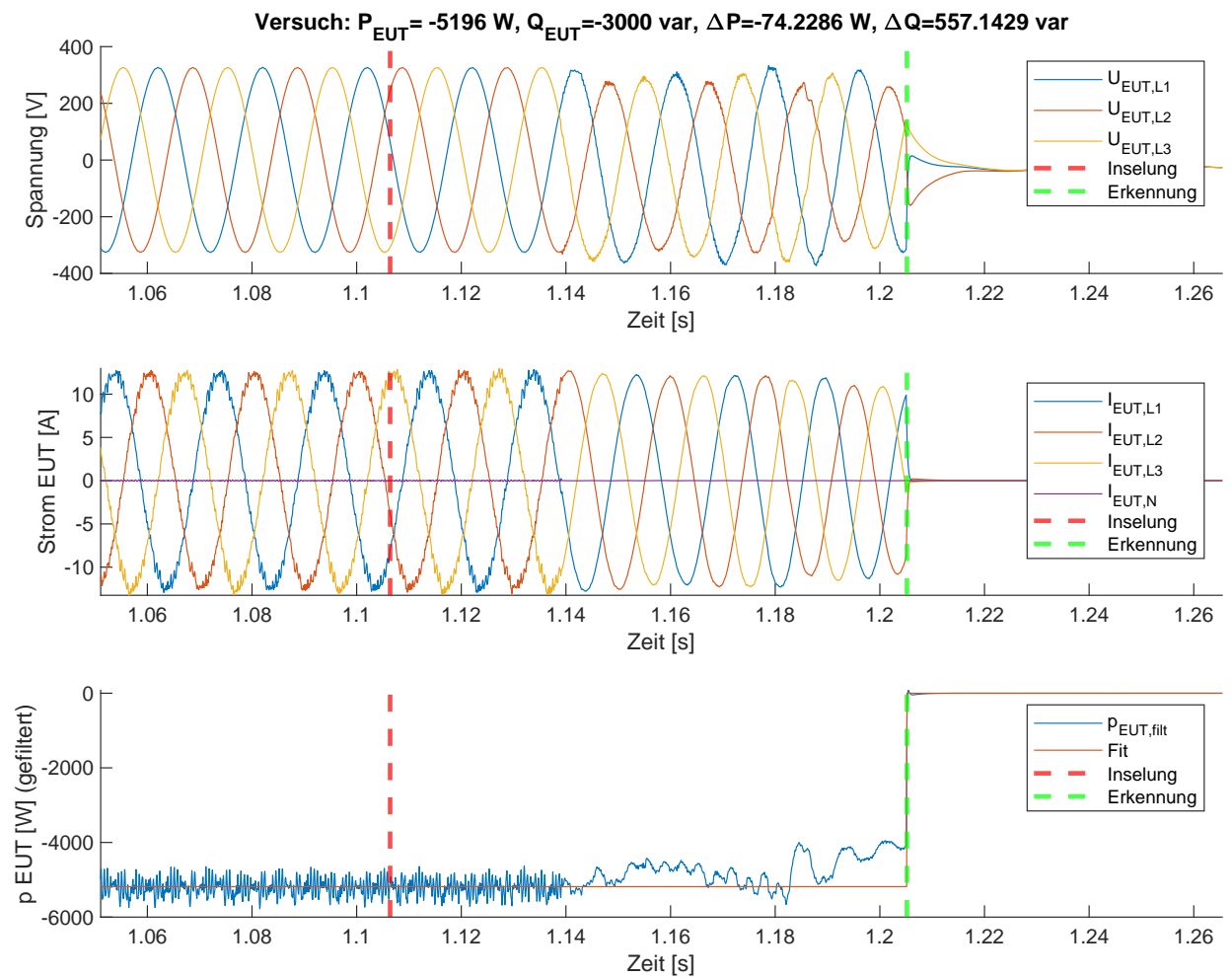


Abbildung 4.3: Exemplarischer Verlauf der Größen am EUT im Verlauf einer Inselung

In dieser sind die gemessenen Größen sowie die daraus ermittelte Leistung am EUT dargestellt. Nach Einstellung der Arbeitspunkte der Last und des EUT und Erreichen eines stationären Zustands wird die Insel durch Öffnen des Schützes zum NAP gebildet. Die in den Versuchsdurchläufen erfasste Zielgröße, die das Vermögen des EUT zur Inselnetzerkennung bewertet, ist die Nachlaufzeit des Geräts. Diese entspricht dem Zeitraum zwischen dem Öffnen des Schützes am NAP bis zum Abschalten des EUT. Ersteres wird über ein Triggersignal der Netznachbildung genau erfasst (rot gestrichelte Linie), letzteres nachträglich aus der Datenauswertung bestimmt (grüne Linie). In diesem Beispiel beträgt die Nachlaufzeit $1205,2 \text{ ms} - 1106,4 \text{ ms} = 98,8 \text{ ms}$.

4.2 Fähigkeit des Prüflings zur Inselnetzerkennung in Werkseinstellungen

Werden die ermittelten Nachlaufzeiten je Versuchsreihe über der eingeregelter NAP-Austauschleistung zu Beginn der Teilnetzbildung aufgetragen, ergibt sich die folgende Ansicht:

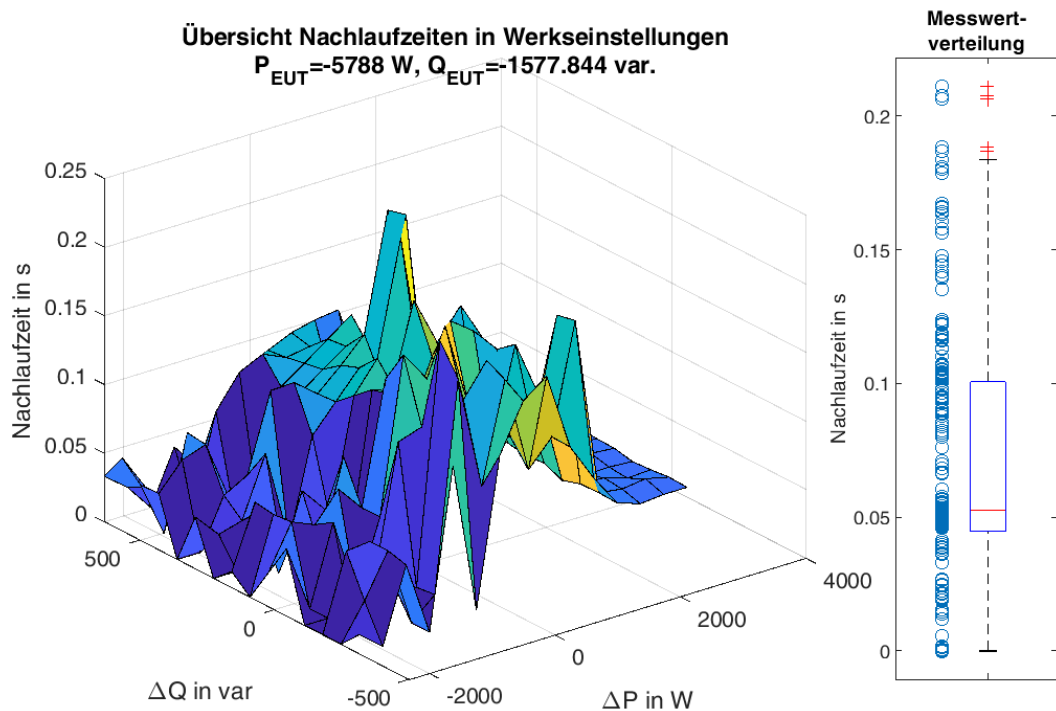


Abbildung 4.4: Antwortfläche der Nachlaufzeit über der Austauschleistung, Arbeitspunkt (a), Werkseinstellungen, Durchlauf 1

Zunächst ist ersichtlich, dass die Teilnetzbildung durch den EUT in jedem Versuch in unter 250 ms beendet worden ist. Als Orientierung kann hier die Prüfnorm für die Inselnetzerkennungsfunktion für Hersteller [DIN14] (IEC 62116) genannt werden, die für die Erkennung einer ähnlichen Inselnetzstruktur mit RLC-Schwingkreis u.a. eine Maximaldauer von 2 s vorsieht. Aus der Grafik wird jedoch ersichtlich, dass mit den durchgeführten Versuchen eine von der Simulationsstudie prognostizierte sensitive Zone erhöhter Erkennungsdauer von Wechselrichtern relativ gut getroffen worden ist. In den Extrema besonders hoher Wirkleistungseinspeisung in das Netz sinkt die Erkennungsdauer teils bis auf 0 s, wobei hier einige Variationen zu erkennen sind. Bei geringer Wirkleistung ist eine erhöhte Erkennungsdauer zu sehen, mit einzelnen Maxima von etwas über 200 ms. Mit besonders hohem Wirkleistungsbezug aus dem Netz ergibt sich eine sehr stetige Erkennungsdauer um etwa 50 ms. In diesem Bereich der Antwortfläche nimmt das erkennbare Rauschen gleichzeitig stark ab. Die zur Inselung ausgetauschte Blindleistung scheint demgegenüber einen nachrangigen Effekt auf die Erkennungsdauer zu besitzen. Aus der Darstellung der Messwertverteilung geht eine mittlere Dauer von 52,7 ms, sowie Quartilen bei 100,5 (75 %) und 4,5 ms (25 %) hervor.

Die folgende Abbildung 4.5 ist eine korrespondierende Versuchsreihe unter dem EUT-Arbeitspunkt (b):

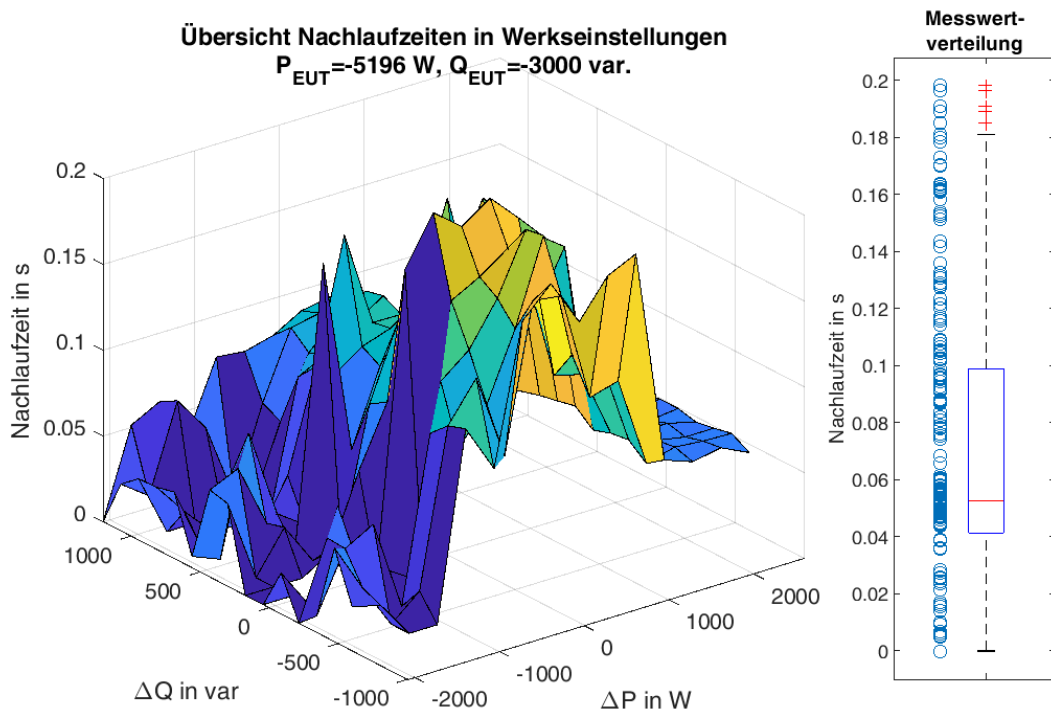


Abbildung 4.5: Antwortfläche der Nachlaufzeit über der Austauschleistung, Arbeitspunkt (b), Werkseinstellungen, Durchlauf 1

Die Versuchsreihe zeigt qualitativ einen sehr ähnlichen Verlauf. Insbesondere im Bereich stark negativer Austauschblindleistung ergibt sich hier optisch der Eindruck etwas höherer Nachlaufzeit, während bei stark positiver Austauschblindleistung einige Bereiche höherer Nachlaufzeit wegfallen. Das Ergebnis zeigt im Vergleich mit dem vorherigen Durchlauf keine unmittelbar optisch auffällige Tendenz.

Abbildungen der weiteren Durchläufe in verschiedenen Einstellungen der Arbeitspunkte sind optisch ähnlich und finden sich im Anhang (Abbildung 8.1 - 8.4).

4.3 Fähigkeit des Prüflings zur Inselnetzerkennung nach Kalibrierung der PRNB-Antwort

Nach Durchführung der Versuchsreihen mit bis auf die geänderte Parametrierung identischen Ausgangsbedingungen ergeben sich hierfür eigene Antwortflächen. In den folgenden Abbildungen werden diese im direkten Vergleich zu den korrespondierenden Versuchsreihen mit Werkseinstellungen dargestellt, um einen visuellen Vergleich zu ermöglichen.

Die folgende Abbildung 4.6 zeigt die Antwortflächen in Arbeitspunkt (a):

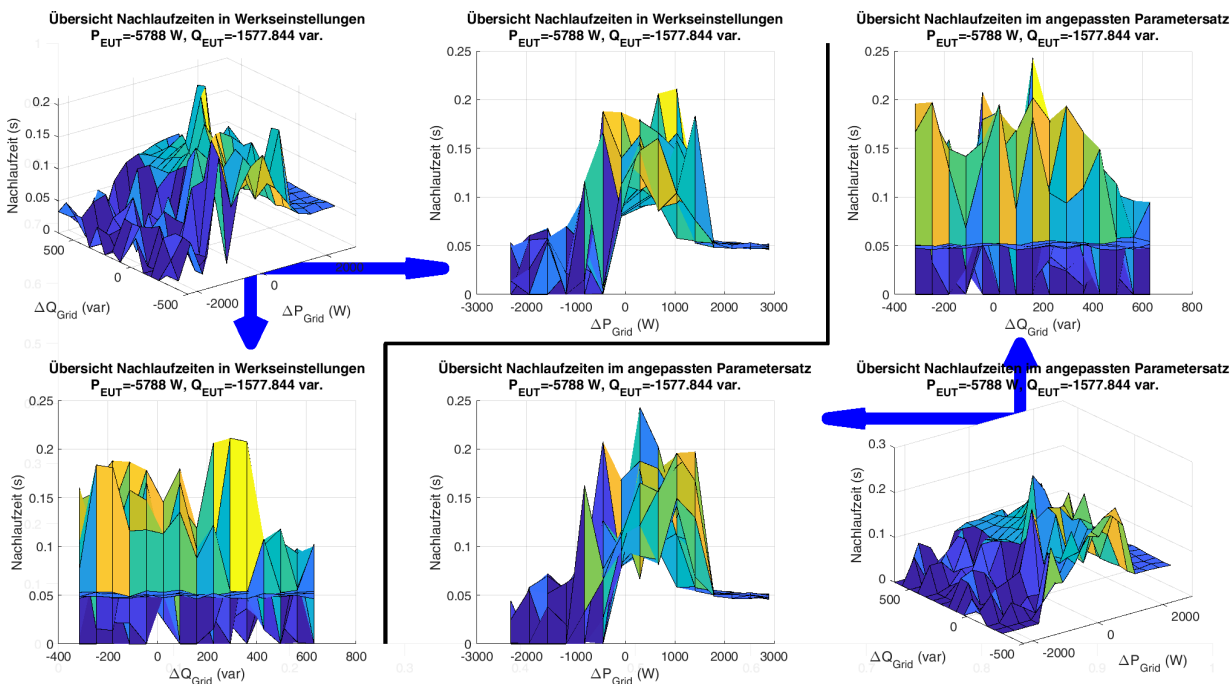


Abbildung 4.6: Vergleich der Antwortflächen in beiden Parametrierungen, Arbeitspunkt (a), Durchlauf 1

In dieser sind links oben die Antwortfläche in Werkseinstellungen und rechts unten die Antwortfläche der Versuche im PRNB-Parametersatz dargestellt. Die jeweils benachbarten Grafiken stellen Projektionen dieser Antwortflächen auf die jeweiligen Achsen dar, um eine bessere Ansicht der Daten zu ermöglichen. auf den gleichen Achsen und damit vergleichbar sind damit jeweils die beiden Grafiken in der mittleren Spalte sowie die Grafiken rechts oben und links unten.

Auf den ersten Blick wird deutlich, dass die Neuparametrierung des Umrichters die Antwortzeit zumindest nicht besonders deutlich erhöht. Die mittleren Antwortzeiten liegen immer noch in der selben Größenordnung, auch hier kann das EUT die Insel stets in unter 250 ms erkennen und seine Einspeisung einstellen. Der Vergleich der Flächen projiziert auf die ΔQ -Achse zeigt, dass einige Durchläufe im Bereich 200 - 400 var etwas schneller erkannt worden sind. Dafür ist das Maximum der Antwortzeit im neuen Parametersatz mit 243 ms anstelle von 211 ms etwas höher. Deutliche Trends in der Anpassung der Nachlaufzeiten sind optisch nicht zu erkennen, bzw. werden von Rauschen überlagert. Markant ist nach wie vor die sehr konsistente Erkennungsdauer von etwa 50 ms bei hohen positiven Austauschleistungen ΔP .

Die Variation des Arbeitspunkts des EUT fördert hier im direkten Vergleich mit der Werkseinstellung aus der rein visuellen Bewertung keine weiteren markanten Erkenntnisse zutage. Die entsprechenden Grafiken sind im Anhang dargestellt (s. Abbildung 8.5 - 8.6).

Im zweiten Durchlauf ergab sich in der PRNB-Parametrierung im Arbeitspunkt (b) ein Versuchsdurchlauf, in dem das EUT knapp 500 ms benötigte, um die Inselung zu erkennen. Obwohl auch dieses weit unterhalb der Schwelle von 2 s ist, und durch die geforderten angepassten NA-Schutzeinstellungen ermöglicht wird, sticht der Versuch markant als Ergebnis hervor. Die entstehenden Antwortflächen sind in der folgenden Abbildung 4.7 dargestellt:

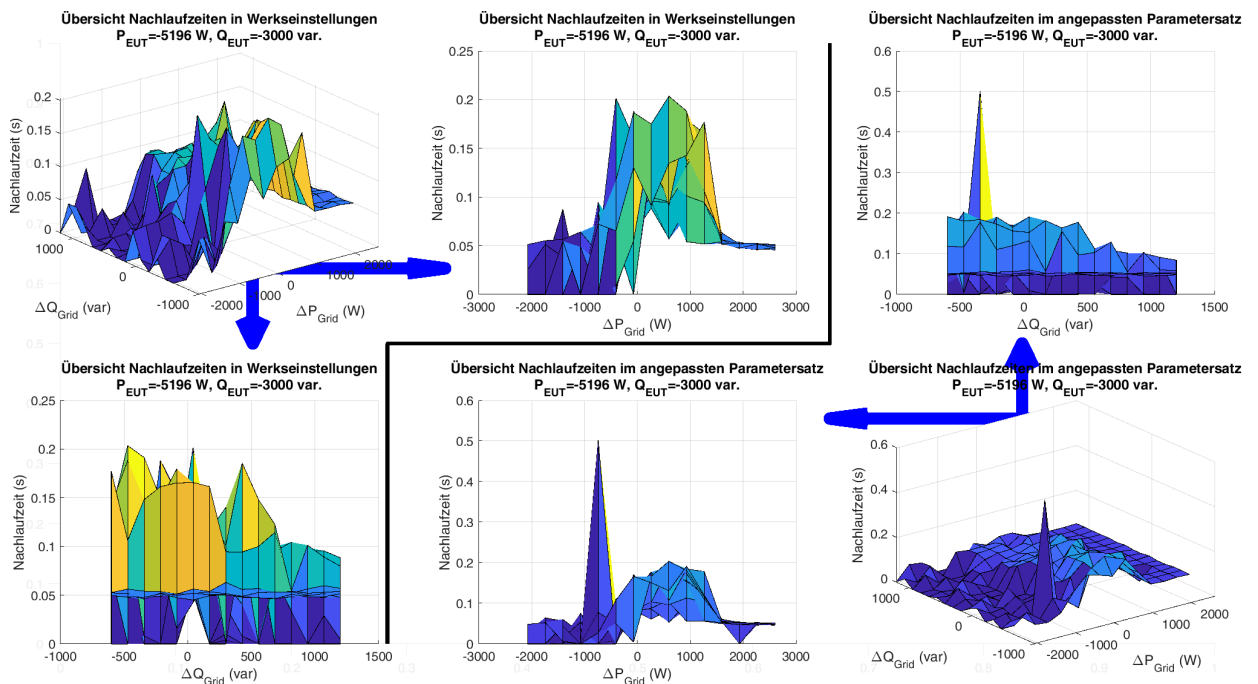


Abbildung 4.7: Vergleich der Antwortflächen in beiden Parametrierungen, Arbeitspunkt (b), Durchlauf 2

Darüber hinaus ergeben sich allerdings auch im zweiten Durchlauf keine wesentlichen optisch erkennbaren Unterschiede. Die weiteren Antwortflächen finden sich im Anhang (s. Abbildung 8.7 - 8.8).

4.4 Verifikationstests zur Prüfung des Testaufbaus

Analog zu den internen Verifikationen des Aufbaus bei der PRNB-Kalibrierung wurden Verifikationstests der Inselnetz-Versuche durchgeführt. Diese werden in diesem Kapitel beschrieben. Vornehmlich wurde hier die Frage untersucht, ob die Erkennung und Einstellung der Einspeisung des EUT auf die Inselung selbst zurückzuführen ist. Eine Rückmeldung über die Ursache der Einstellung des EUT über die grafische Oberfläche des Geräts konnte nicht eindeutig auf die Erkennung der Inselnetzsituation zurückgeführt werden. Um anderweitige Einflüsse, wie auftretende Fehler durch das Öffnen der Netzverbindung oder Einflüsse des Aufbaus bestmöglich ausschließen zu können, wurden die im vorherigen Kapitel beschriebenen Versuche mit identischen Konditionen, aber mit im EUT deaktivierter aktiver Inselnetzerkennung durchgeführt.

Ein visueller Vergleich der Antwortflächen im Arbeitspunkt (a) mit und ohne aktiver Inselnetzerkennung ist für die Werkseinstellungen in der folgenden Abbildung 4.8 und für den PRNB-Parametersatz in der Abbildung 4.9 aufbereitet:

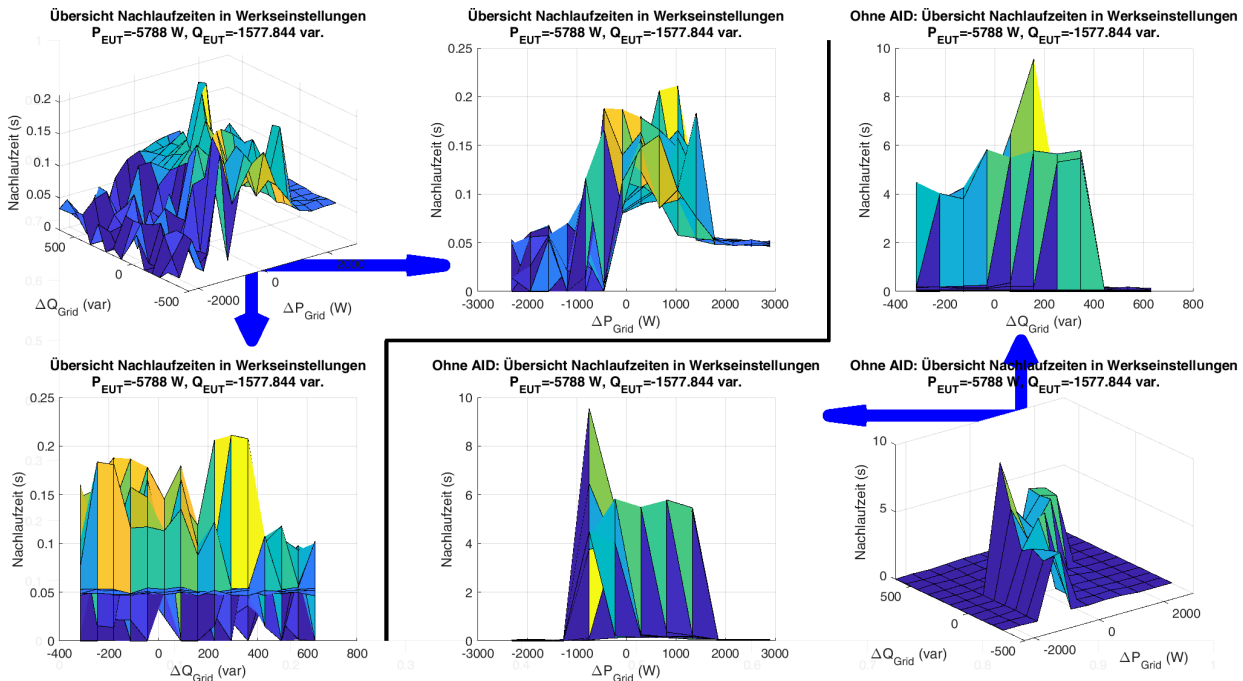


Abbildung 4.8: Vergleich der Antwortflächen mit und ohne aktiver Inselnetzerkennung, Arbeitspunkt (a), Werkseinstellungen

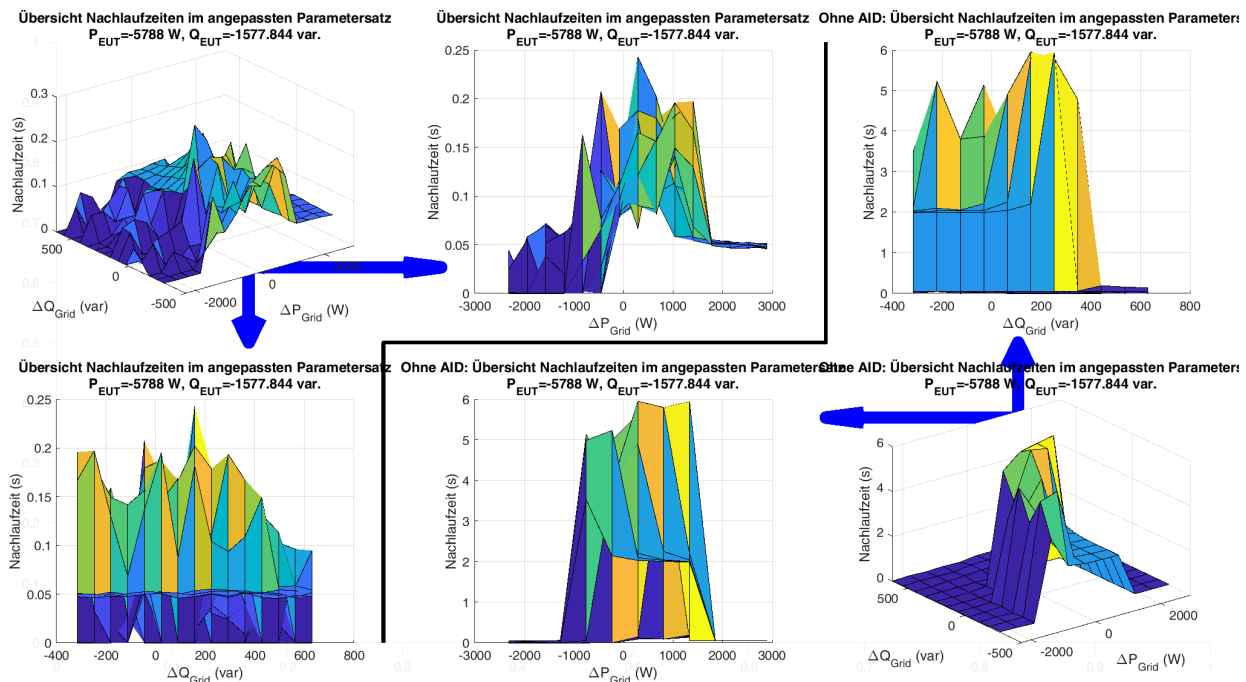


Abbildung 4.9: Vergleich der Antwortflächen mit und ohne aktiver Inselnetzerkennung, Arbeitspunkt (a), PRNB-Parametersatz

In beiden Fällen ist das Ergebnis markant: die künstliche Deaktivierung der aktiven Inselnetzerkennung zum Zweck der Verifikation führt zu stark verlängerten Nachlaufzeiten mit bis zu 6 s in den Fällen, in denen eine Insel im Versuchsaufbau erfolgreich ausgebildet werden konnte. Die Anzahl der Fälle, in denen das

EUT über die Ausbildung der Insel hinaus einspeist, sinkt jedoch gegenüber dem Referenzversuch auf eine kleinere Zone um den Bereich geringer Austauschleistung. Im Ergebnis können diese Messreihen jedoch als Bestätigung der Annahme gesehen werden, dass die Inselnetzerkennung des EUT selbst die tatsächlich gemessene Einflussgröße in der Beendigung der Insel der vorangegangenen Versuchen gewesen ist und diese weitestgehend unabhängig von Einflüssen des Versuchsaufbaus selbst die Abschaltung des Geräts veranlasst.

Die weiteren Arbeitspunkte wurden ebenfalls mit sehr ähnlichen Ergebnissen geprüft, die entsprechenden Abbildungen sind dem Anhang beigefügt (s. Abbildung 8.9 bis 8.12).

5 Auswertung der Messdaten

Aus der rein visuellen Bewertung der Antwortflächen und Messdaten der aufgenommenen Messreihen lässt sich kein eindeutiges Ergebnis zu der Eingangsfrage ableiten, ob eine Neuparametrierung des EUT nach den Vorgaben des PRNB-Parametersatzes die Effektivität der Inselnetzerkennung verringert. Es wird zumindest deutlich, dass die Änderung das Ergebnis nicht um Größenordnungen beeinflusst und die Änderungen, falls vorhanden, klein sein dürften. Eine eindeutige Bewertung, ob bestimmte Bereiche der Antwortfläche eine erhöhte Nachlaufzeit besitzen und unter welchen Bedingungen diese auftritt, sowie welche der variierten Faktoren einen messbaren Einfluss auf das Ergebnis aufweisen, ist aus den Grafiken oben nicht eindeutig festzustellen. Aus diesem Grund erfolgt in diesem Kapitel eine statistische Analyse der Messdaten, aus deren Ergebnis sich eine quantitative Bewertung des Ergebnisses ableiten lässt.

5.1 Einleitende Betrachtung

Ziel der Auswertung ist die Beantwortung der Frage, ob es einen Effekt der Neuparametrierung auf die Nachlaufzeit gibt und wann dieser auftritt. Bei einer einfachen Gegenüberstellung der mittleren Nachlaufzeit in beiden Parametrierungen sind nur minimale Unterschiede auffällig. Dies ist in der folgenden Abbildung 5.1 dargestellt:

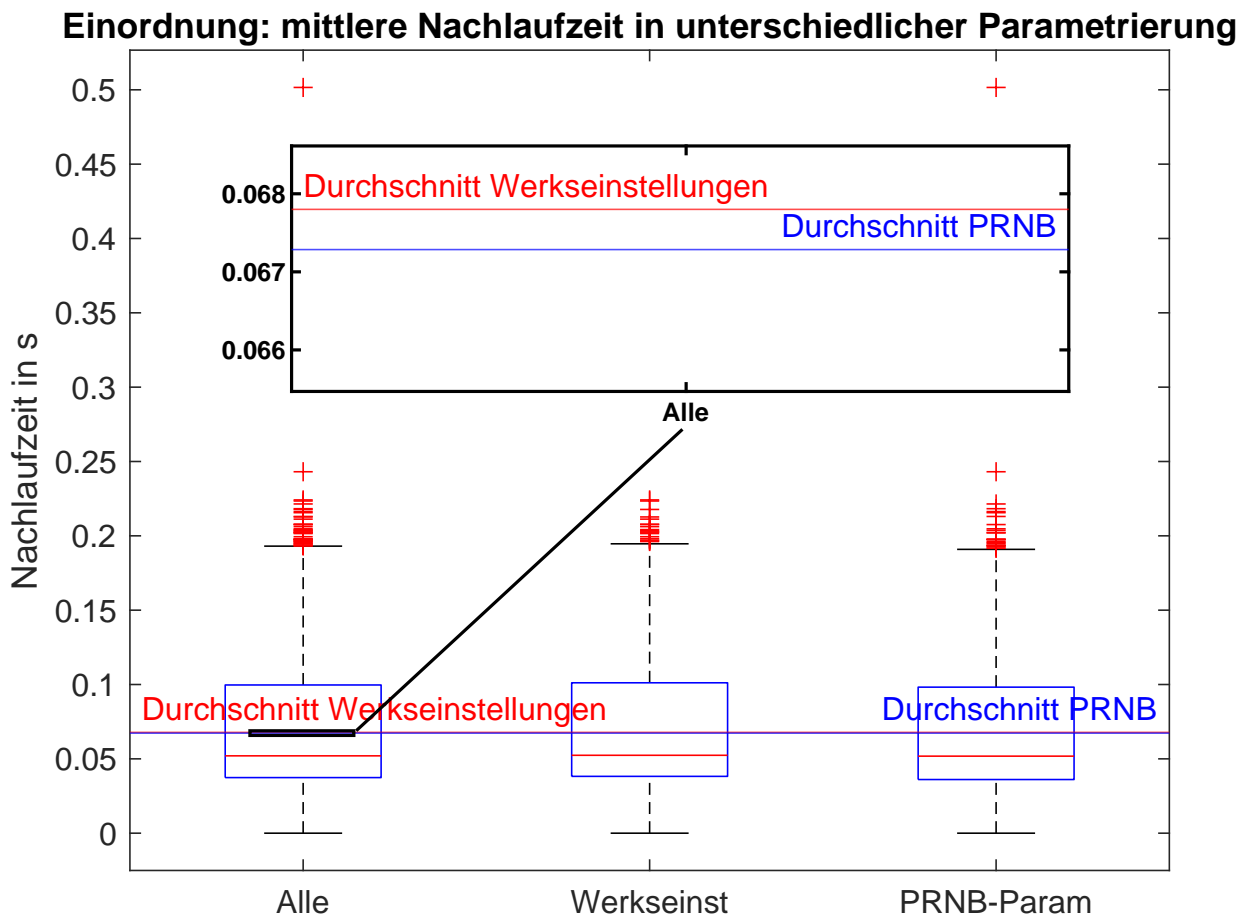


Abbildung 5.1: Verteilung und mittlere Nachlaufzeiten in beiden Parametrierungssätzen, Übersicht

Auf den Achsen der Grafik sind die Verteilungen der Nachlaufzeiten aller Messungen sowie der in Werkseinstellungen und der Messungen mit PRNB-Parametersatz getrennt dargestellt. Die rote Linie gibt hierbei jeweils den Median an, die Begrenzungen des Kastens stellen jeweils die 25% und 75%-Quartile dar. Die 'Antennen' der Boxen erstrecken sich über einem Bereich der basierend auf der Länge der Quartile als erwartbar angenommen werden kann. Extreme Messungen darüber hinaus sind mit roten Kreuzen eingetragen. Wie ersichtlich wird, ist der bloße Vergleich des Durchschnitts nicht aussagekräftig. Andere variierte Parameter, beispielsweise die Austauschleistung, überlagern das Ergebnis weitaus stärker, dazu kommt laborbedingtes Rauschen.

Varianten einfacher t-Tests oder H-Tests auf die Gesamtmenge der Messungen beider Parametrierungen zeigen keine signifikanten Unterschiede in diesen Mittelwerten. So ergibt bspw. der in Tabelle 8.4 im Anhang dargestellte Kruskal-Wallis-Test (eine robustere Variante gegenüber Abweichungen in der Normalverteilung) auf Unterschiede zwischen den beiden Parametrierungen einen p-Wert von 0,43 an, womit kein Unterschied detektiert werden kann. Derartige Tests müssen jedoch fehlschlagen, da Effekte und Rauschen den zu bestimmenden Effekt stark überlagern. Die statistische Aussagekraft eines solchen Tests (β) liegt trotz der hohen Versuchszahl bei 5%. Um den Einfluss mit einer üblichen Aussagekraft von 80% abschätzen zu können, wären 13 Millionen Versuche notwendig.

Mit diesen Tests lässt sich zudem keine Aussage treffen, ob die Erkennung beispielsweise in bestimmten Bereichen stark geschwächt wird. Es ist unklar, ob mit einer Erhöhung der maximal auftretenden Nachlaufzeit zu rechnen ist oder ob diese nur in 'unkritischen' Bereichen mit bereits schneller Erkennung auftritt. Zudem könnte es Kombinationen an Faktoren geben, die die Nachlaufzeit besonders stark erhöhen. Um dies betrachten zu können, bietet sich eine Varianzanalyse der Daten an.

5.2 Vorgehen: statistische Auswertung und Varianzanalyse

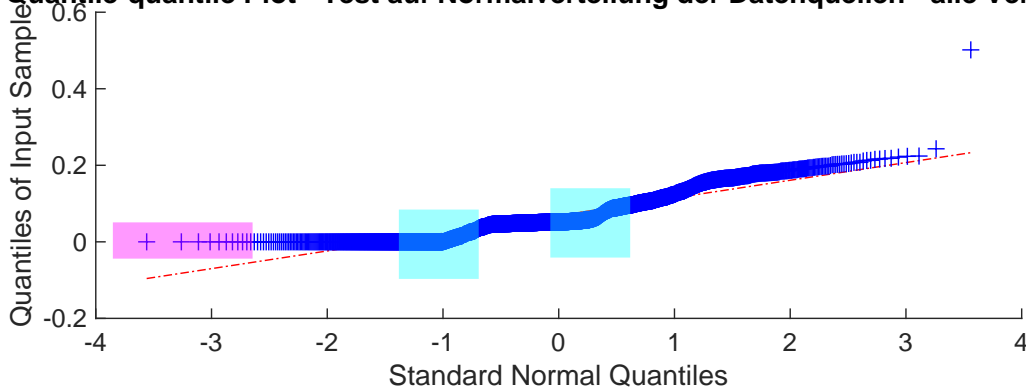
Eine Varianzanalyse bietet die Möglichkeit, den Effekt jedes anderen kontrollierten Parameters auf die Nachlaufzeit herauszurechnen und somit die Überlagerung der Parametrierung zu reduzieren. Zudem kann im selben Zug per Regression ein statistisches Modell erstellt werden, um Aussagen über etwaige Interaktionen der Parametrierung mit den anderen variierten Faktoren zu treffen. So kann beispielsweise berechnet werden, ob eine erhöhte Nachlaufzeit nur in bestimmten Arbeitspunkten auftreten würde, was in der reinen Mittelwertbetrachtung nicht ersichtlich wäre.

Für eine gültige Analyse müssen bestimmte Voraussetzungen erfüllt sein. Dazu gehören eine (annähernde) Normalverteilung und eine (annähernd) homogene Varianz der Messergebnisse.

5.2.1 Voraussetzung: Normalverteilung der Daten

Die Verwendung eines Signifikanzniveaus zur Quantifizierung von Unterschieden unterliegt grundsätzlich der Annahme, dass die Daten aus einer normalverteilten Grundgesamtheit stammen. Bei dem vorliegenden ausgeglichen Design mit hoher Anzahl an Messpunkten ist eine Varianzanalyse jedoch robust gegenüber Verletzungen dieser Annahme ([Bla+17],[Sch+10]). Es wurde daher nur einleitend überprüft ob eine prinzipielle Ähnlichkeit der Daten mit einer Normalverteilung vorliegt.

Quantile-quantile Plot - Test auf Normalverteilung der Datenquellen - alle Versuche



Histogramm und Fit der Normalverteilung

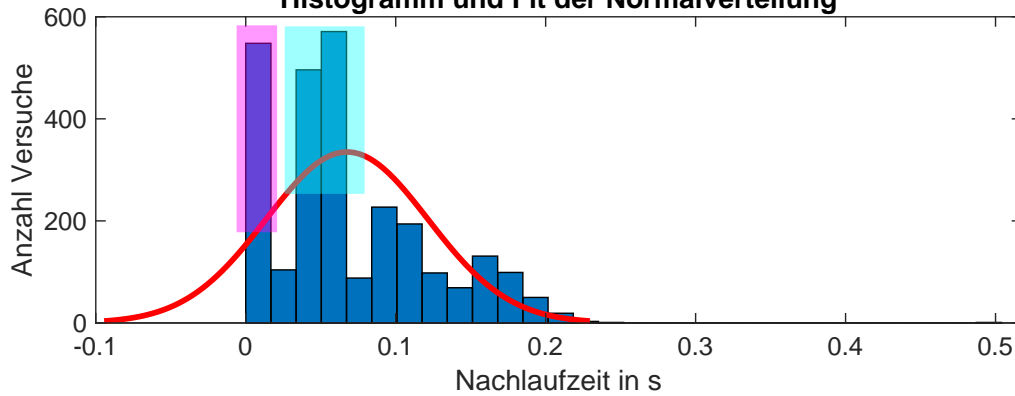


Abbildung 5.2: Überprüfung der Normalverteilung - Alle Messungen

Auf der Abbildung 5.2 sind oben die Quantile der aufgenommenen Daten über den Quantilen einer Normalverteilung mit gleicher Varianz und Mittelwert wie die Daten aufgetragen. Hier sind charakteristische Abweichungen von dem per roter Linie eingezeichneten Idealverlauf zu erkennen. Zunächst weichen wenige extreme Messungen von der Kurve deutlich ab (Bereich in Magenta), was für die Auswertung weniger ins Gewicht fällt. Deutlich erkennbar sind aber sprunghafte Änderungen der Steigung, die auf eine Kumulation von Messergebnissen (Bereich in Türkis) hinweisen. Auf der unteren Grafik sind die Daten als Histogramm aufgetragen. Die selben Abweichungen treten hier deutlich zutage.

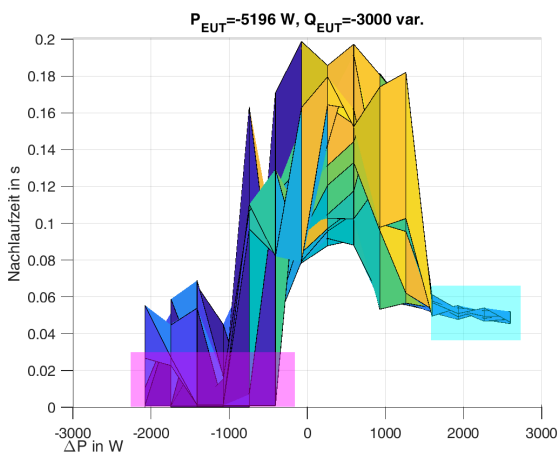


Abbildung 5.3: Zuordnung der Verteilungsabweichungen auf eine Antwortfläche

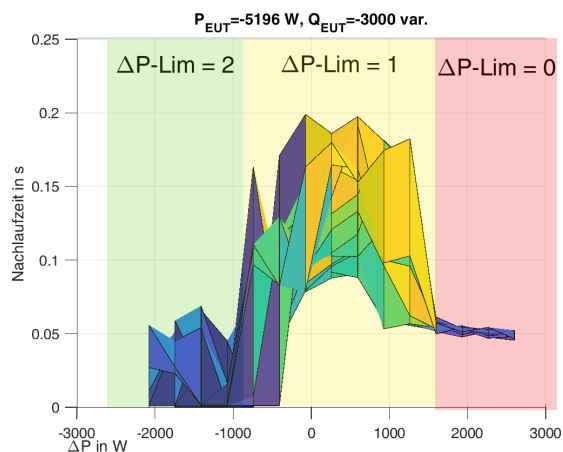


Abbildung 5.4: Unterteilung der Antwortfläche in drei Teilflächen über kategorischem Prädiktor

Wie in Abbildung 5.3 skizziert, lassen sich die Abweichungen konkreten Bereichen auf der Antwortfläche zuordnen. Darüber hinaus wird deutlich, dass sich das Verhalten des Umrichters klar in Abhängigkeit der Austausch-Wirkleistung sprunghaft unterscheidet: Bei starker Einspeisung in das Netz ist die Erkennung oftmals instantan, mit mittlerer Varianz der Erkennungszeit. Ab einem bestimmten Punkt steigt die Erkennungszeit stark und nichtlinear an, die Varianz erhöht sich stark. Mit hohem Wirkleistungsbezug hingegen pendelt sich die Erkennungsdauer auf grob 50 ms mit sehr niedriger Varianz ein. Um dieses Verhalten modellieren und auswerten zu können, wird den variierten Faktoren ein kategorischer Prädiktor, 'DeltaPLimit' hinzugefügt, der der Regression ermöglicht, das Modellverhalten über diese drei Bereiche unterschiedlich zu definieren. Dies ist in Abbildung 5.4 dargestellt. Die Nutzung des Prädiktors ermöglicht eine wesentlich bessere Modellanpassung an die Daten. Zugleich erfüllt die Unterteilung der Antwortfläche eine bessere Wiedergabe der Normalverteilungsannahme durch die Messungen.

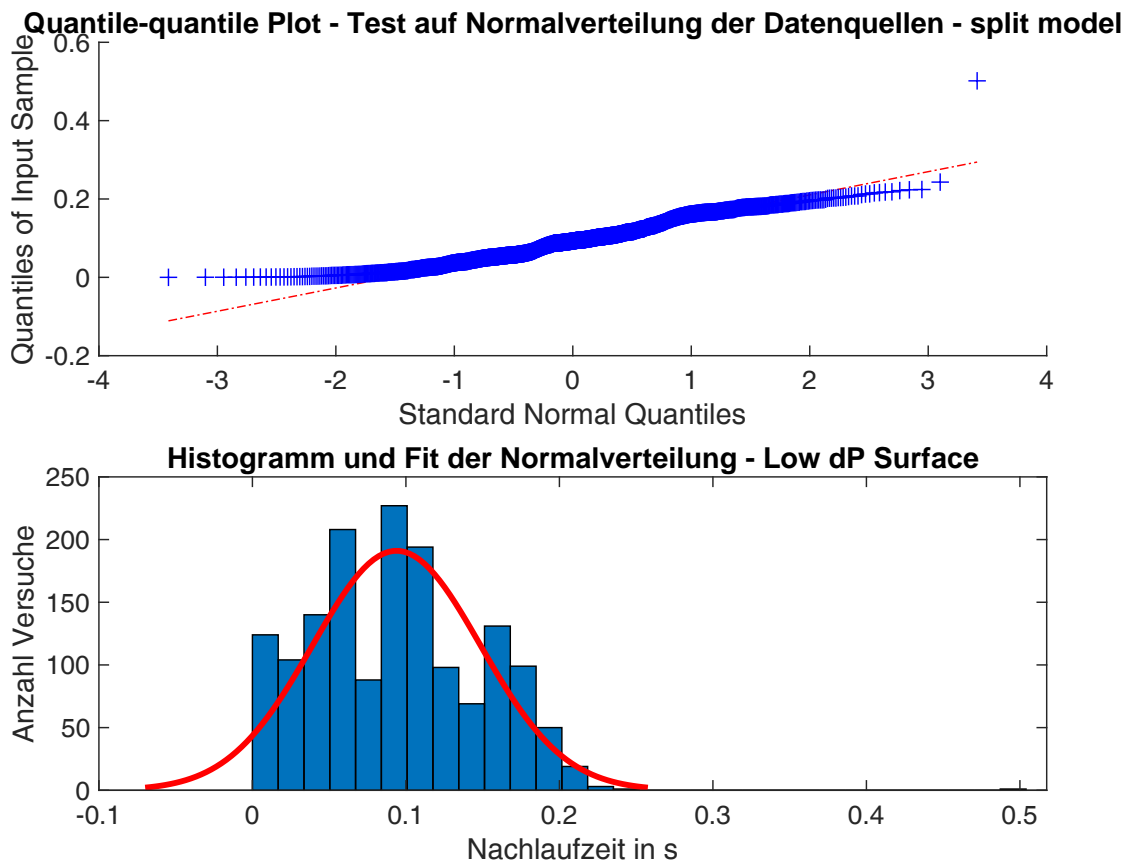


Abbildung 5.5: Überprüfung der Normalverteilung - $dPLimit \geq 1$

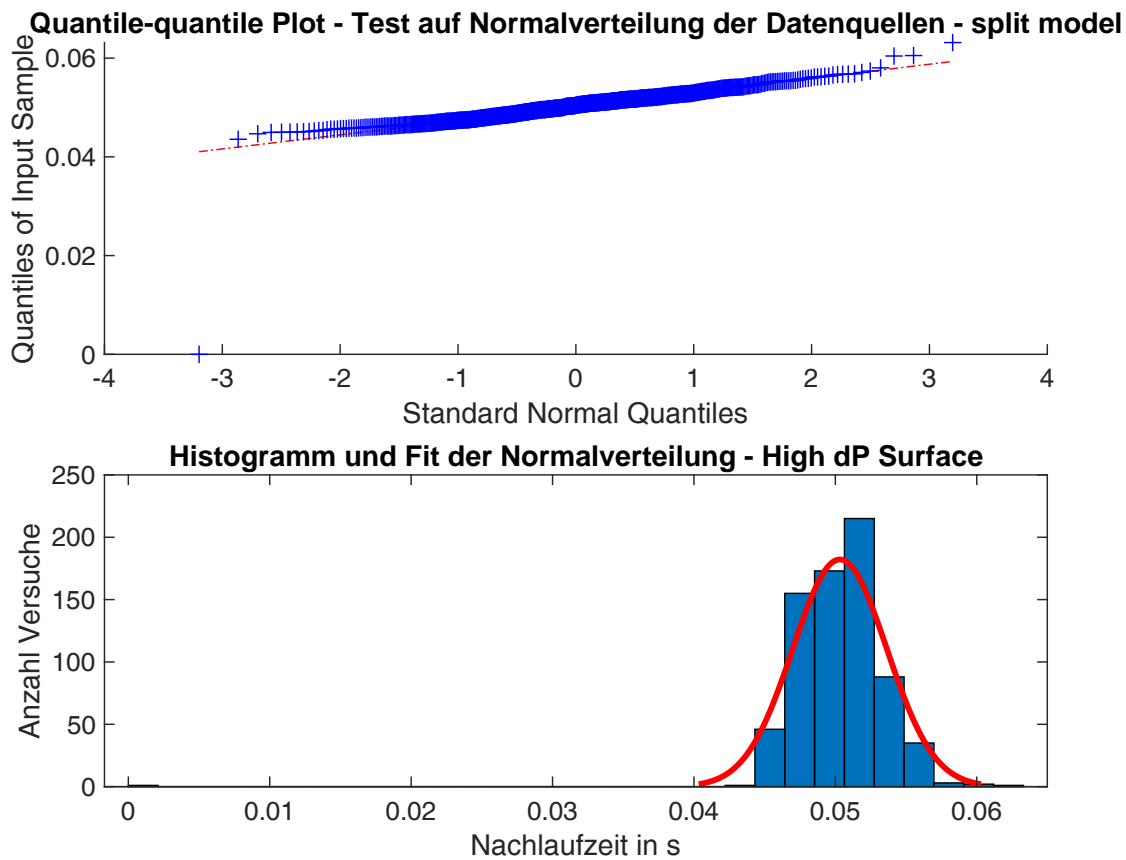


Abbildung 5.6: Überprüfung der Normalverteilung - $dPLimit < 1$

In den Abbildungen 5.5 und 5.6 ist die Verteilung der Messdaten der unterteilten Fläche dargestellt. Versuche mit einer Nachlaufzeit von $t=0$ s werden zudem etwas schwächer gewichtet. Hierdurch ergibt sich eine Verteilung der Daten, die als ausreichend angesehen werden kann, um die Normalverteilungsannahme zu bestätigen. Die optisch erkennbare unterschiedliche Messdatenvarianz über den unterschiedlichen $\Delta PLimit$ führt jedoch zu einer Einschränkung des finalen Modells, die unten fortführend diskutiert wird.

5.2.2 Voraussetzung: homogene Varianz der Daten

Die Varianzhomogenität der Daten über dem wichtigen Faktor der Parametrierung lässt sich optisch in der folgenden Grafik darstellen:

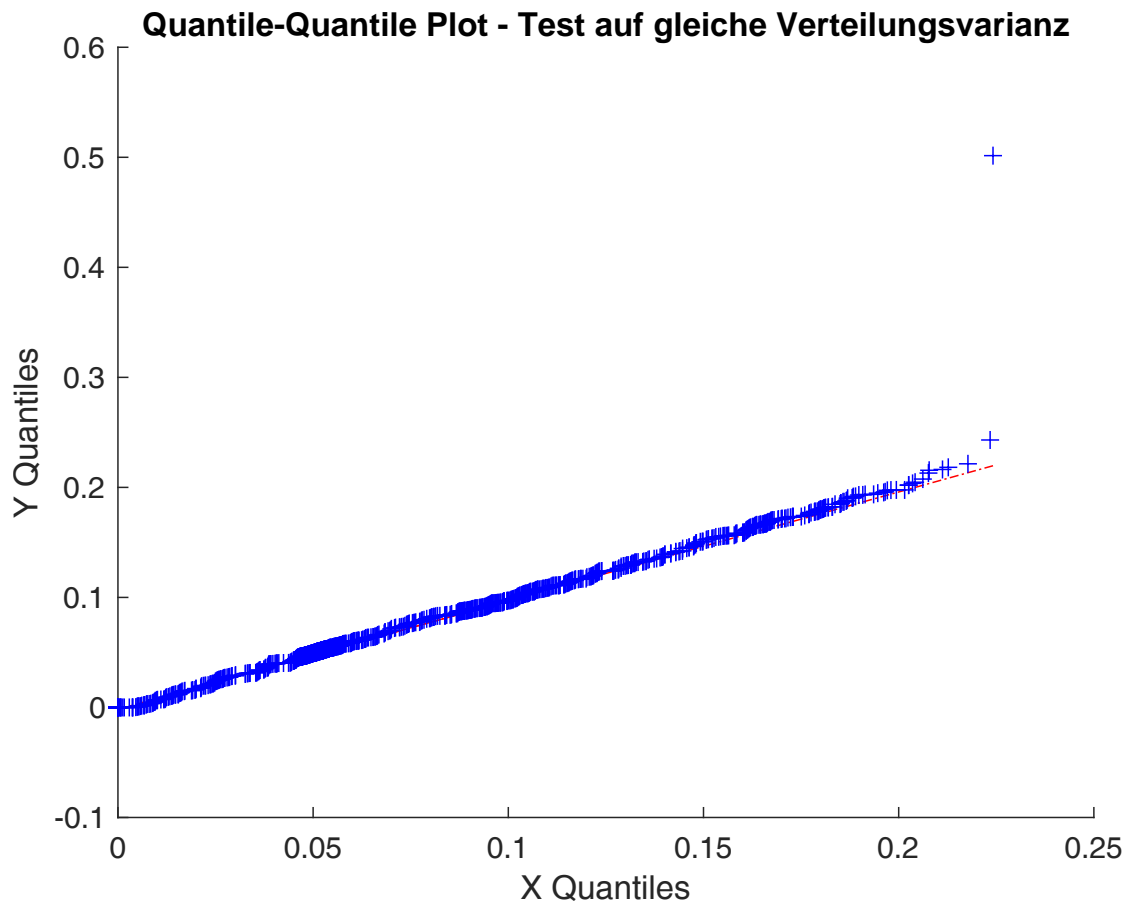


Abbildung 5.7: Homogenität der Varianz - Parametrierung

In der Abbildung 5.7 sind die jew. Quantile der Messdaten getrennt nach der Parametrierung des EUT aufgetragen. Wie ersichtlich wird, folgt die Verteilung der Idealvorgabe insgesamt bis auf einen Ausreißer gut und wird daher als unproblematisch für die folgende Auswertung angesehen. Die Varianz über den anderen Faktoren, insbesondere mit vielen Stufen lässt sich optisch schlechter darstellen und wurde daher numerisch überprüft. Die Varianz über allen Faktoren wurde mit Levene-Test kontrolliert und ist hinreichend homogen für die folgende Auswertung. Als Beispiel wird das Testergebnis über den vier durchgeführten Versuchsreihen (getrennt nach Parametrierung und Wiederholung) im üblichen 5%-Signifikanzniveau in Tabelle 5.1 dargestellt:

The number of samples are: 4

Sample	Size	Variance
1	675	0.0027
2	675	0.0028
3	675	0.0030
4	675	0.0032

Levene's Test for Equality of Variances $F=1.1731$, $df1= 3$, $df2=2696$

Probability associated to the F statistic = 0.3185

The associated probability for the F test is equal or larger than 0.05

So, the assumption of homoscedasticity was met.

Tabelle 5.1: Test auf homogene Varianz mit dem Levene-Test

Anzumerken ist, dass auch die Überprüfung der Messdaten über DeltaPLimit mit $p=0.092$ den Levene-Test besteht. Die weitere Überprüfung ergab keine Auffälligkeiten, sodass die Voraussetzung homogener Varianz als gegeben angesehen wird.

5.2.3 Varianzanalyse

Es wird zunächst eine Regression eines vollständigen quadratischen Modells mit Interaktionen auf die Antwortfläche durchgeführt. Die Prädiktoren sind DeltaP, DeltaQ, Q_{EUT} (der Arbeitspunkt des EUT), ParameterSet (Parametrierungsart Werkseinstellungen oder PRNB) und DeltaPLimit (Unterteilung des Modells). Das Modell selbst ist an dieser Stelle weniger von Belang, wird aber der Vollständigkeit halber im Anhang in Tabelle 8.5 aufgeführt. Die Ergebnisse der hierauf basierenden Varianzanalyse sind in der Tabelle 5.2 aufgeführt.

	SumSq	DF	MeanSq	F	pValue
DeltaP	675.06e-3	1	7e-01	697.36	91.833e-138
DeltaQ	134.03e-3	1	1e-01	138.46	334.58e-33
ParameterSet	157.08e-6	1	2e-04	162.27e-3	687.1e-3
Q_{EUT}	44.605e-6	1	4e-05	46.079e-3	830.05e-3
DeltaPLimit	1.0056	2	5e-01	519.44	25.181e-192
DeltaP:DeltaQ	13.691e-3	1	1e-02	14.144	172.98e-6
DeltaP:ParameterSet	6.5137e-3	1	7e-03	6.729	9.5378e-3
DeltaP: Q_{EUT}	231.19e-6	1	2e-04	238.83e-3	625.09e-3
DeltaP:DeltaPLimit	610.81e-3	2	3e-01	315.5	953.61e-126
DeltaQ:ParameterSet	3.4332e-6	1	3e-06	3.5467e-3	952.52e-3
DeltaQ: Q_{EUT}	160.06e-6	1	2e-04	165.35e-3	684.31e-3
DeltaQ:DeltaPLimit	191.03e-3	2	1e-01	98.671	4.5152e-42
ParameterSet: Q_{EUT}	38.235e-6	1	4e-05	39.498e-3	842.48e-3
ParameterSet:DeltaPLimit	5.561e-3	2	3e-03	2.8724	56.739e-3
$Q_{EUT} : \text{DeltaPLimit}$	253.72e-6	2	1e-04	131.05e-3	877.18e-3
DeltaP ²	398.43e-3	1	4e-01	411.59	310.24e-87
DeltaQ ²	3.8693e-3	1	4e-03	3.9971	45.679e-3
Q_{EUT}^2	32.525e-6	1	3e-05	33.6e-3	854.57e-3
Error	2.5894	2.675e+3	1e-03	1	500e-3

Number of observations: 2699, Error degrees of freedom: 2679
 Root Mean Squared Error: 0.0337
 R-squared: 0.613, Adjusted R-Squared: 0.61
 F-statistic vs. constant model: 223, p-value = 0

Tabelle 5.2: Varianzanalyse des vollständigen quadratischen Modells

In der linken Spalte ist der jeweilige untersuchte Faktor, entweder in linearer oder quadratischer Form abgebildet. Die Interaktionen mehrerer linearer Faktoren sind zudem durch einen ':' angegeben. Der Term Sum of Squares (SumSq) stellt ein Maß für die Korrelation der Ergebnisse bei Variation des jeweiligen Faktors dar, lässt sich also als ein Maß dafür interpretieren, wie viel der Varianz der Messung dem jeweiligen Faktor zugeordnet werden kann. Die Freiheitsgrade (Degrees of Freedom, DF) des Faktors (1 pro Faktor, 2 für eine Interaktion) stellen ein Maß für die Komplexität des Modells dar. Die dem Fehler (Error) verbleibenden DF nach Abzug der für das Modell benötigten Freiheitsgrade sind angemessen, und hoch genug, um ein 'Overfitting' des Modells zu vermeiden. Der dem Faktor zugeordnete mittlere quadratische Wert (Mean square, MeanSq) führt die beiden vorangegangenen Messungen in Relation zusammen um Faktoren mit unterschiedlichen Freiheitsgraden vergleichbar zusammenzuführen. Die letzte Zeile der Tabelle betrachtet den Restfehler 'Error', der in der Varianzanalyse einem zufälligen Messfehler/nicht betrachteten Einflüssen/Rauschen zugeordnet wird. Die Relation des MeanSq eines Faktors zum MeanSq des Restfehlers (Mean square Error, MSE), hier zu 0.001 berechnet, stellt eine Art Signal-Rausch-Verhältnis des variierten Faktors dar, also wie deutlich sein Einfluss über dem Messfehler erkennbar ist. Der p-Wert bewertet diesen unter Einbezug der Freiheitsgrade und stellt eine Aussage über die Wahrscheinlichkeit dar, mit der Einfluss dieses Faktors tatsächlich zufälliger Natur ist. Ein niedriger p-Wert bedeutet, dass es unwahrscheinlich ist, einen Fehler zu begehen, wenn dieser Faktor als bedeutsam (signifikant) gewertet wird. Die übliche Schwelle hierfür, das Signifikanzniveau α von 5% (entspr. $p=0.05$) wird in dieser Studie angewendet. Der unten angegebene R^2 (R-squared, ein Maß für die mittlere Abweichung der Messwerte vom Modell) stellt dar, wie deutlich das Modell die Messwerte abbildet und liegt im üblichen Bereich für Labormessungen.

Dieser Wert wurde genutzt, um die optimalen Werte für DeltaPLimit iterativ so zu bestimmen, dass R^2 für das gesamte Modell maximiert wird.

Der Vorteil der Varianzanalyse wird im direkten Vergleich des 'Restrauschens' (sumSq, Error) mit dem des reinen Mittelwerttests aus Tabelle 8.4 im Anhang deutlich: Da ein großer Teil der Varianz auf die anderen im Test variierten Faktoren zurückgeführt werden kann, ist das verbleibende Rauschen, demgegenüber sich der speziell zu untersuchende Faktor 'ParameterSet' als signifikant erweisen muss, deutlich geringer und die Analyse damit deutlich sensitiver. Basierend auf dem F-Wert wird der relative Beitrag jedes Faktors zur Erklärung der Messdatenvarianz ermittelt. Das Ergebnis ist in Abbildung 5.8 dargestellt.

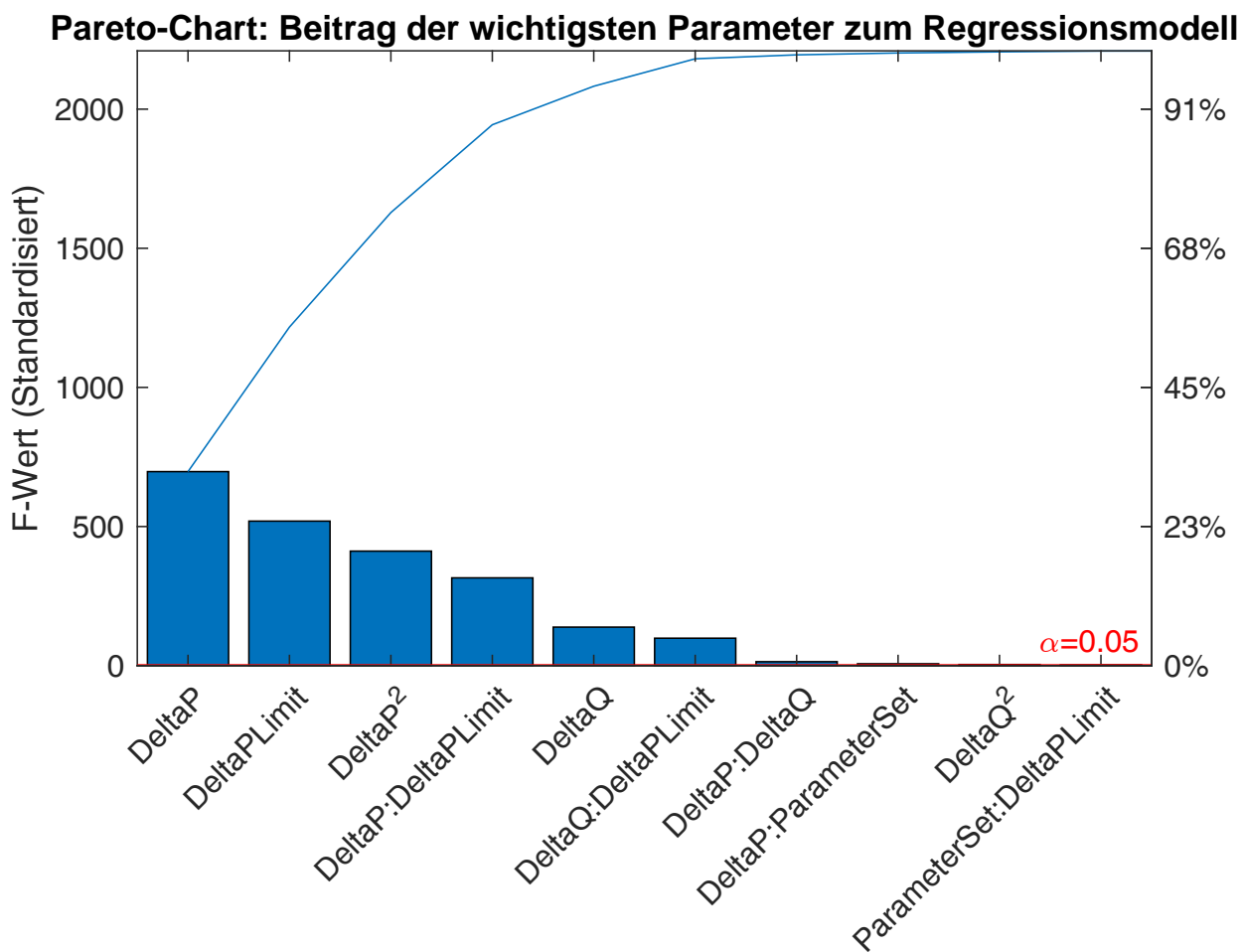


Abbildung 5.8: Übersicht der Beiträge der wichtigsten Faktoren im Regressionsmodell

In dieser Grafik sind die wichtigsten Faktoren, geordnet nach ihrem Beitrag zum Modell (absoluter F-Wert linke Achse, relativer Beitrag rechte Achse), dargestellt. Üblicherweise und auch in dieser Messung erklären wenige Faktoren einen Großteil der Messwertverläufe. Eine grundlegende lineare und quadratische Abhängigkeit der Ergebnisse von der Austausch-Wirkleistung deckt sich mit der optischen Betrachtung der Antwortflächen aus Kapitel 4.2 und 4.3. Der eingeführte Faktor 'DeltaPLimit' ist ebenfalls wichtig für die genaue Abbildung der Messdaten und wird im weiteren daher beibehalten. Der Einfluss der Austausch-Wirkleistung wirkt sich über die verschiedenen durch DeltaPLimit getrennten Bereiche zudem unterschiedlich aus. Nach diesen tritt der Einfluss der Austausch-Blindleistung auf die Messung und schließlich der Einfluss der Variation der Parametrierung auf.

Ein Parameter muss ein Signifikanzniveau $\alpha > 0.05$ aufweisen, um einen bedeutenden Mehrwert gegenüber dem Rauschen beizutragen (signifikante Faktoren). Der diesem Signifikanzniveau entsprechenden

F-Wert wurde in der folgenden Abbildung 5.9 vergrößert dargestellt:

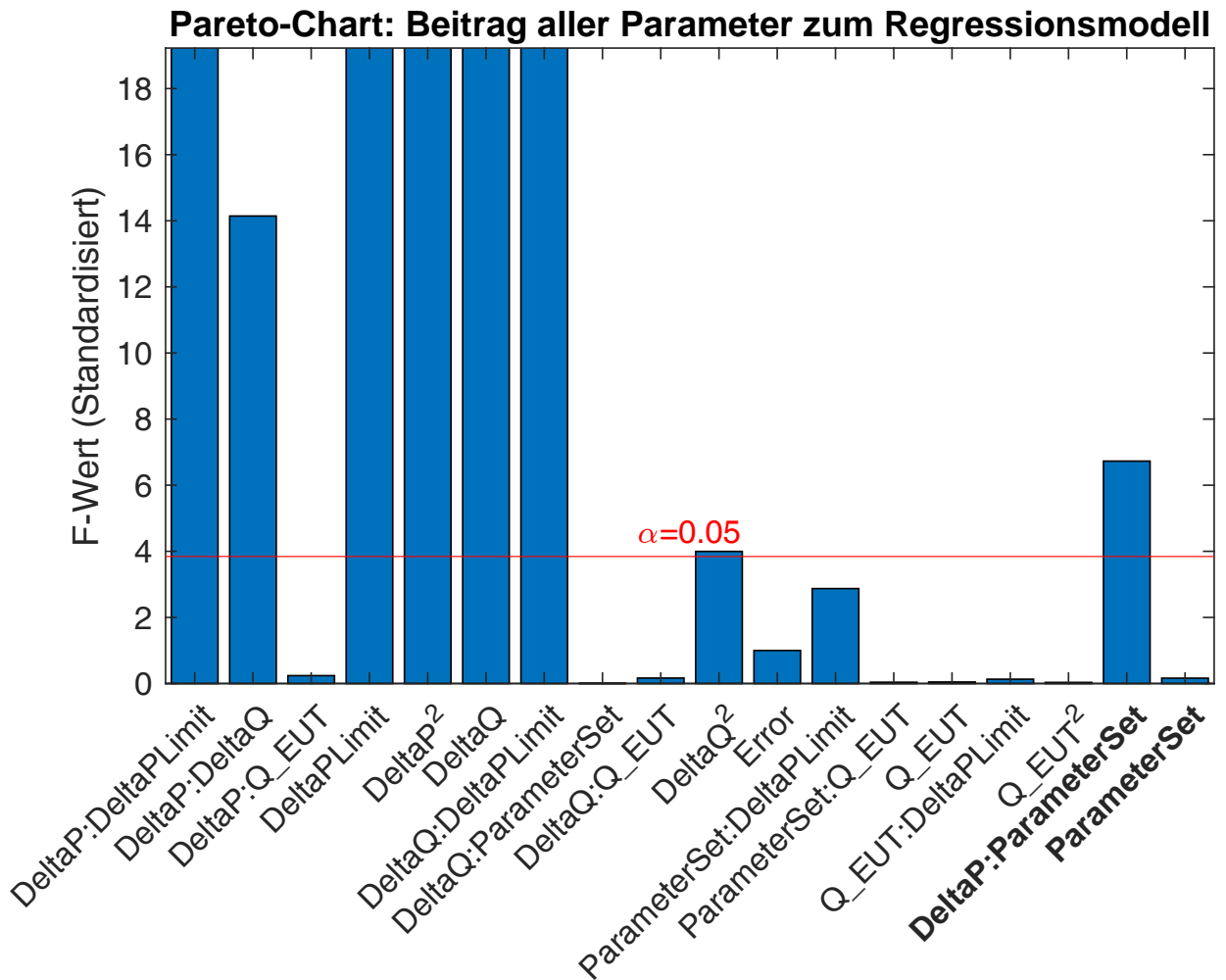


Abbildung 5.9: Beiträge der Faktoren zum Modell, vergrößerte Darstellung

Hier sind insbesondere die beiden fett dargestellten Parameter von Bedeutung. Die Variation des Parametersatzes fällt im Beitrag weit unter das Signifikanzniveau zurück und wäre daher üblicherweise in der weiteren Auswertung verworfen worden. Allerdings ist in der Interaktion mit DeltaP ein Beitrag feststellbar, der in der Analyse im Rauschen identifiziert werden kann. Hierfür war eine deutliche Erhöhung der Freiheitsgrade durch die Verdopplung der Versuchszahl nötig, jeder Versuch wurde also zweimal in randomisierter Reihenfolge durchgeführt. Da die Abbildung einer Interaktion die Aufnahme beider Grundfaktoren voraussetzt, werden beide Faktoren in das Modell übernommen.

Die Auswertung der Ergebnisse erfolgt schließlich anhand eines präzisierten Modells ('lean Model'), das durch schrittweise Varianzanalyse zur Verwerfung der nicht signifikanten Faktoren gebildet wird. Dabei werden iterativ die Faktoren mit $\alpha < 0.05$ verworfen, eine Neuberechnung durchgeführt, die Faktoren mit $\beta > 0.1$ hinzugefügt und erneut berechnet. Das resultierende Modell besteht aus 12 Termen und 4 Prädiktoren.

	Estimate	SE	tStat	pValue
(Intercept)	-121.15e-3	11.349e-3	-10.675	44.133e-27
DeltaP	160.58e-6	8.6023e-6	18.667	326.76e-75
DeltaQ	28.998e-6	7.0965e-6	4.0863	45.116e-6
ParameterSet ₂	-12.635e-3	5.2e-3	-2.4298	15.174e-3
DeltaPLimit ₁	239.75e-3	12.001e-3	19.977	69.275e-84
DeltaPLimit ₂	42.369e-3	10.173e-3	4.1647	32.164e-6
DeltaP:DeltaQ	-11.521e-9	2.8459e-9	-4.0483	53.048e-6
DeltaP:ParameterSet ₂	5.3128e-6	2.0403e-6	2.6039	9.2683e-3
DeltaP:DeltaPLimit ₁	-103.59e-6	7.6733e-6	-13.5	311.86e-42
DeltaP:DeltaPLimit ₂	-283.67e-6	14.686e-6	-19.316	6.1093e-78
DeltaQ:DeltaPLimit ₁	-64.937e-6	6.605e-6	-9.8315	196.23e-24
DeltaQ:DeltaPLimit ₂	-40.479e-6	11.601e-6	-3.4892	492.27e-6
ParameterSet ₂ : <i>DeltaPLimit</i> ₁	10.741e-3	5.0066e-3	2.1454	32.011e-3
ParameterSet ₂ : <i>DeltaPLimit</i> ₂	21.143e-3	8.7922e-3	2.4047	16.252e-3
DeltaP ²	-35.99e-9	1.7592e-9	-20.458	14.682e-87
DeltaQ ²	-7.5237e-9	2.9741e-9	-2.5297	11.472e-3

Number of observations: 2699, Error degrees of freedom: 2683

Root Mean Squared Error: 0.0311

R-squared: 0.671, Adjusted R-Squared: 0.669

F-statistic vs. constant model: 364, p-value = 0

Tabelle 5.3: Finales präzisiertes Modell zur Messdatenanalyse

Das Modell beschreibt die Messung etwa genauso gut wie das vollständige Modell (R² bleibt gleich). Auffällig ist, dass im Rahmen der Neubildung der Prädiktor Q_{EUT} vollständig aus dem Modell entfernt worden ist. Die Variation dieses Parameters ging also nicht mit einer statistisch signifikanten Veränderung der Messung einher.

Die vollständige Darstellung der Varianzanalyse dieses Modells ist im Anhang in Tabelle 8.6 aufgeführt. Gegenüber der Analyse des vollständigen Modells ergeben sich hier keine grundsätzlichen Unterschiede.

Wichtige Prädiktoren in Hinblick auf die Ausgangsfrage, ob durch die Neuparametrierung die Erkennungszeit verändert wird, ist 'Parameterset_2' in Zeile 4, der zunächst global sogar eine Verringerung der Nachlaufzeit um 12 ms bei Wahl dieses Parametersatzes abbildet. Der Prädiktor DeltaP:Parametersatz_2 in Zeile 8 tritt zwar signifikant in den Daten hervor, ist in der Höhe aber ähnlich groß. Ein betrachtetes ΔP von [-2500W ... 3000 W]*DeltaP:Parametersatz_2 ergibt eine Veränderung zwischen -13 ms bis +16 ms über die Antwortfläche. Die hohen Abweichungen treten zudem nur in den extremen Bereichen von ΔP zutage, in denen die Nachlaufzeit bereits gering ist. In dem Bereich hoher Nachlaufzeit in der Mitte der Antwortfläche hat dieser Parameter kaum Einfluss und somit eher vernachlässigbare Auswirkungen auf eine etwaige Erhöhung der zu erwartenden maximalen Nachlaufzeit. Die rein kategorischen Prädiktoren ParameterSet_2:DeltaPLimit_1 und ParameterSet_2:DeltaPLimit_2 in Zeile 13 und 14 stellen ebenfalls eine Auswirkung der Parametrierung auf die Nachlaufzeit dar. Ihr Auftreten als signifikante Faktoren stellt dar, dass sich die mittleren Nachlaufzeiten in den durch DeltaPLimit eingegrenzten Teilbereichen unterschiedlich durch die Neuparametrierung erhöhen. Letzterer bedeutet eine Erhöhung der Nachlaufzeit um 21 ms insbesondere im Bereich negativer Austauschleistung, was durch die globale Reduzierung von Zeile 4 netto eine Erhöhung um etwa 9 ms bedeutet. Im durch DeltaPLimit_1 bezeichneten Bereich der hohen Nachlaufzeiten bedeutet Zeile 13 eine Erhöhung um knapp 11 ms, in Kombination mit Zeile 4 findet hier insgesamt keine Erhöhung statt, da sich beide Effekte etwa aufheben. Insgesamt kann also keine Verschlechterung

der Erkennungsperformance im 'kritischen' Bereich hohen Nachlaufzeiten durch die Neuparametrierung festgestellt werden.

5.2.4 Verifikation und Diskussion der Auswertung

Im Folgenden wird das gebildete Modell auf Konsistenz untersucht und das Modellverhalten diagnostiziert und diskutiert. In der folgenden Tabelle 5.4 ist eine zusammenfassende Darstellung der Modellanalyse aufgeführt.

	SumSq	DF	MeanSq	F	pValue
Total	7.863	2698	2.9145e-3	-	-
Model	5.274	23	229.3e-3	236.88	0
. Linear	4.388	6	731.26e-3	755.42	0
. Nonlinear	0.886	17	52.139e-3	53.862	739.4e-159
Residual	2.589	2675	968.01e-6	-	-
. Lack of fit	1.371	1326	1.0342e-3	1.1453	6.576e-3
. Pure error	1.218	1349	902.98e-6	-	-

Tabelle 5.4: Zusammenfassende Darstellung der Varianzanalyse des präzisierten Modells

Die Auswertung (p-Wert des Modells von 0) legt eine insgesamt deutliche Wiedergabe der Messwerte durch das Modell sowohl im linearen als auch im quadratischen Anteil nahe, wobei der lineare Anteil die meiste Bewegung der Messungen abdeckt. Wie auch in den Grafiken unten ersichtlich, gibt ein Modell jedoch nicht jeden Datenpunkt exakt wieder, was gewollt ist um ein Overfitting zu vermeiden. Die entstehende Abweichung zwischen konkreter Messung und Modellvorhersage findet sich in den Residuen (Residual component). Da aufgrund der Verdopplung der Messungen jeweils zwei Messungen zu jeder Parameterkombination vorliegen, lassen sich diese weiter in den 'Lack of Fit', die mittlere Abweichung zwischen Messung und Vorhersage des notwendigerweise reduzierten Modells sowie den 'Pure Error', den mittleren Unterschied zwischen zwei Messungen mit gleichem Parametersatz ('Messrauschen/Messfehler'), zerlegen. Beide Einflüsse wirken etwa gleich stark auf die Residuen ein.

Diskutierenswert ist der mit $p=0.0086$ signifikante Lack-of-Fit. Dieser Test bewertet die mittlere Modellabweichung von den Messwerten in Relation zu der mittleren Abweichung zwischen zwei wiederholten Messpunkten. Es handelt sich hierbei um einen generellen Test, der auf eine Reihe verschiedener Ursachen reagiert, von denen einige kritisch, andere wiederum unkritisch für die Nutzung des Modells sind. Die möglichen Ursachen mit potentiell schwerwiegenderen Auswirkungen wurden daher separat untersucht. Insbesondere wurde ausgeschlossen, dass eine etwaige zu geringe Ordnung des Modells oder systematische Abweichungen dazu führen, dass das Modell die Daten ungenau wiedergeben könnte.

Für ersteres wurden vollständige und präzisierte Modelle höherer polynomialer Ordnungen untersucht. Diese Modelle gewinnen üblicherweise sehr schnell an Komplexität, weshalb sie nur dann eingesetzt werden, wenn sie einen wesentlich höheren Mehrwert in der Erklärung der Daten bieten. Dies ist dann der Fall wenn tatsächlich Abhängigkeiten dritter oder höherer Ordnung aus den Daten oder etwaiger zugrundeliegenden Analytik erkennbar ist. In dieser Untersuchung ist dies nicht der Fall. Ein präzisiertes Modell dritter bzw. vierter Ordnung liefert mit einem R^2 von 0,686 bzw. 0,689 nur einen unwesentlich höhere Beiträge als das finale Modell mit $R^2 = 0,671$. Ein Lack-of-fit besteht hier zudem weiter, weshalb eine zu niedrige Ordnung an dieser Stelle nicht als Ursache unmittelbar in Betracht kommt.

Etwaige systematische Abweichungen des Modells gestalten sich in der Analyse der Residuen, der Differenzen zwischen tatsächlicher Messung und Modellvorhersage, nicht als angezeigt.

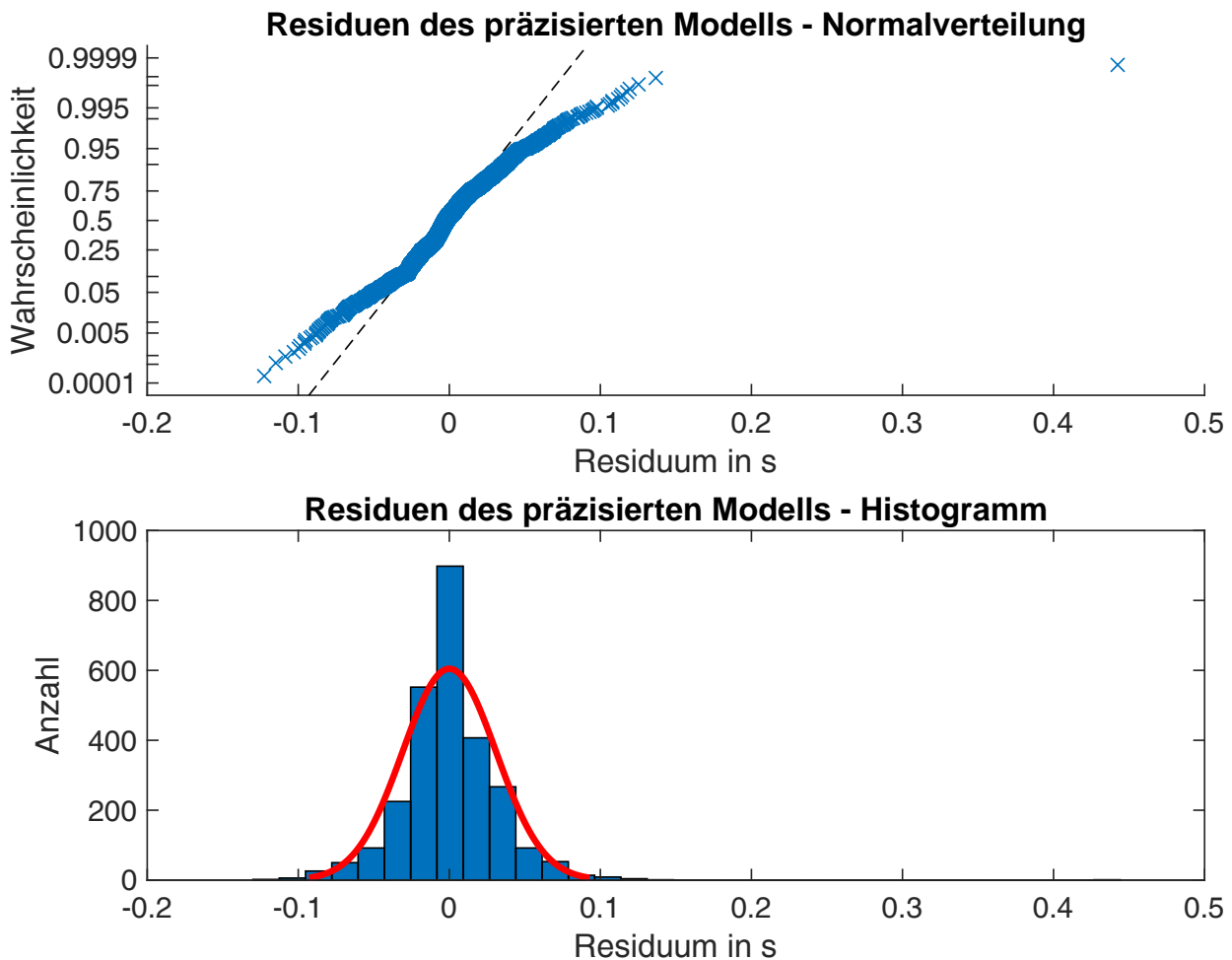


Abbildung 5.10: Residuen des präzisierten Modells - Verteilung

In Abbildung 5.10 ist die Verteilung der Residuen dargestellt. Wie im Quantilplot und Histogramm ersichtlich, ergibt sich keine Überbetonung der negativen oder positiven Residuen, die Verteilung entspricht grundsätzlich einer Normalverteilung und die Abweichungen von der Referenzlinie sind etwa gleichmäßig zu beiden Seiten betont. Die einzige Abweichung ergibt sich in der deutlichen Überbetonung der Residuen um 0 s, was sich dann auch in den unterschiedlichen Steigungen der Normalverteilungsreferenz in der oberen Grafik wiederfindet. Dies besitzt aber keine Auswirkung auf die Vorhersagefähigkeit des Modells. In der Gesamtheit werden die mittleren Messergebnisse durch das Modell nicht einseitig überbetont sondern genau wiedergegeben.

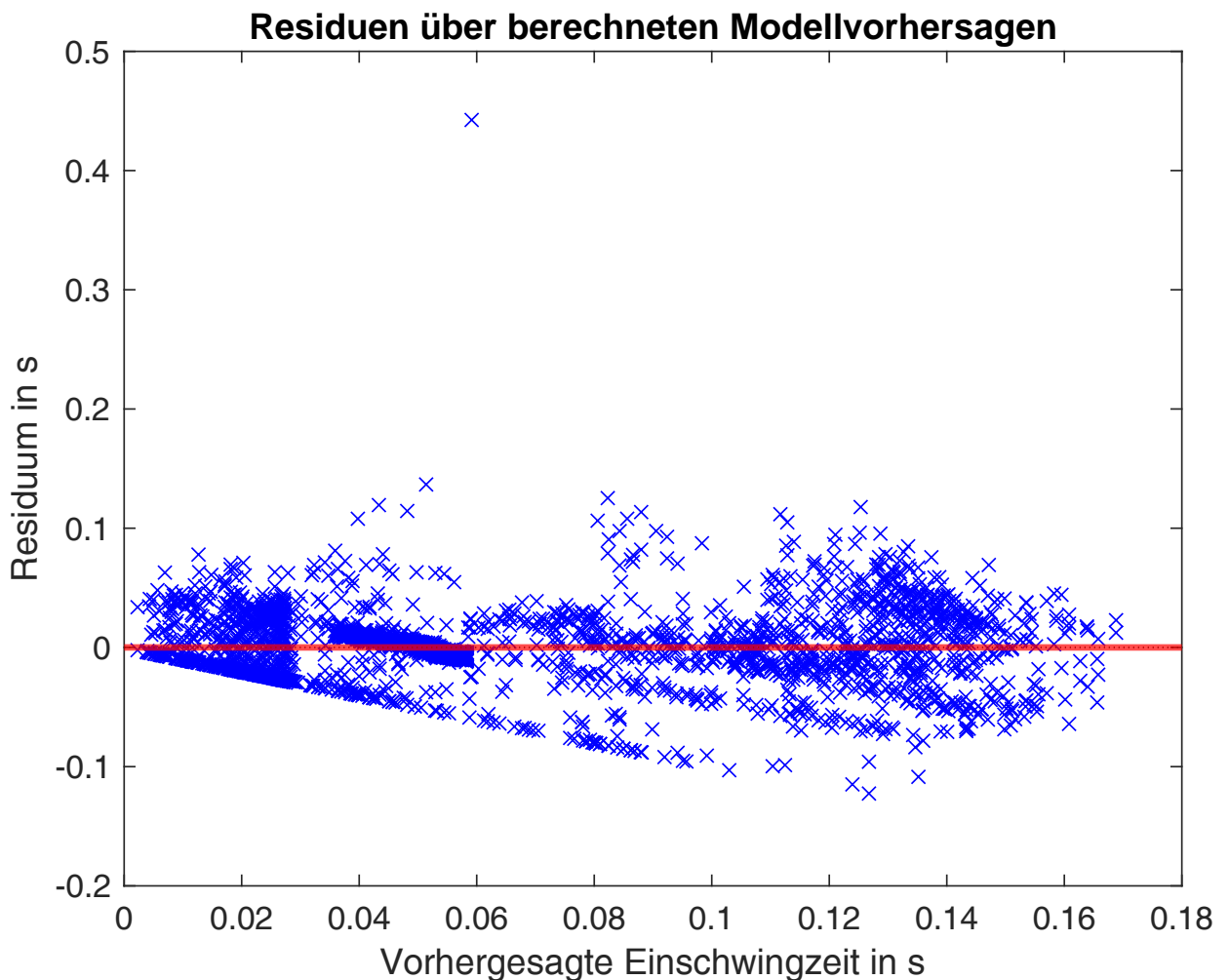


Abbildung 5.11: Analyse der Residuen über der Modellvorhersage

In Abbildung 5.11 sind die Residuen über der Modellprädiktion aufgelistet. Auch hier zeigt sich eine gleichmäßige Verteilung der Residuen über die Einschwingzeit. Der optische Eindruck einer Unterbetonung der Vorhersage bei besonders niedrigen Einschwingzeiten links ergibt sich aus der sehr starken Häufung der Residuen in Form einer Linie. Das ist eine Folge der Tatsache, dass negative Einschwingzeiten physisch nicht möglich sind und sich hier eine deutliche 'Abbruchkante' der Residuen ausbildet. Da auch schon in der einleitenden Betrachtung lokalen Häufungen beobachtet wurden, ergibt sich die Motivation der Überprüfung dieser auf die einzelnen Prädiktoren, was beispielhaft in der folgenden Grafik dargestellt ist.

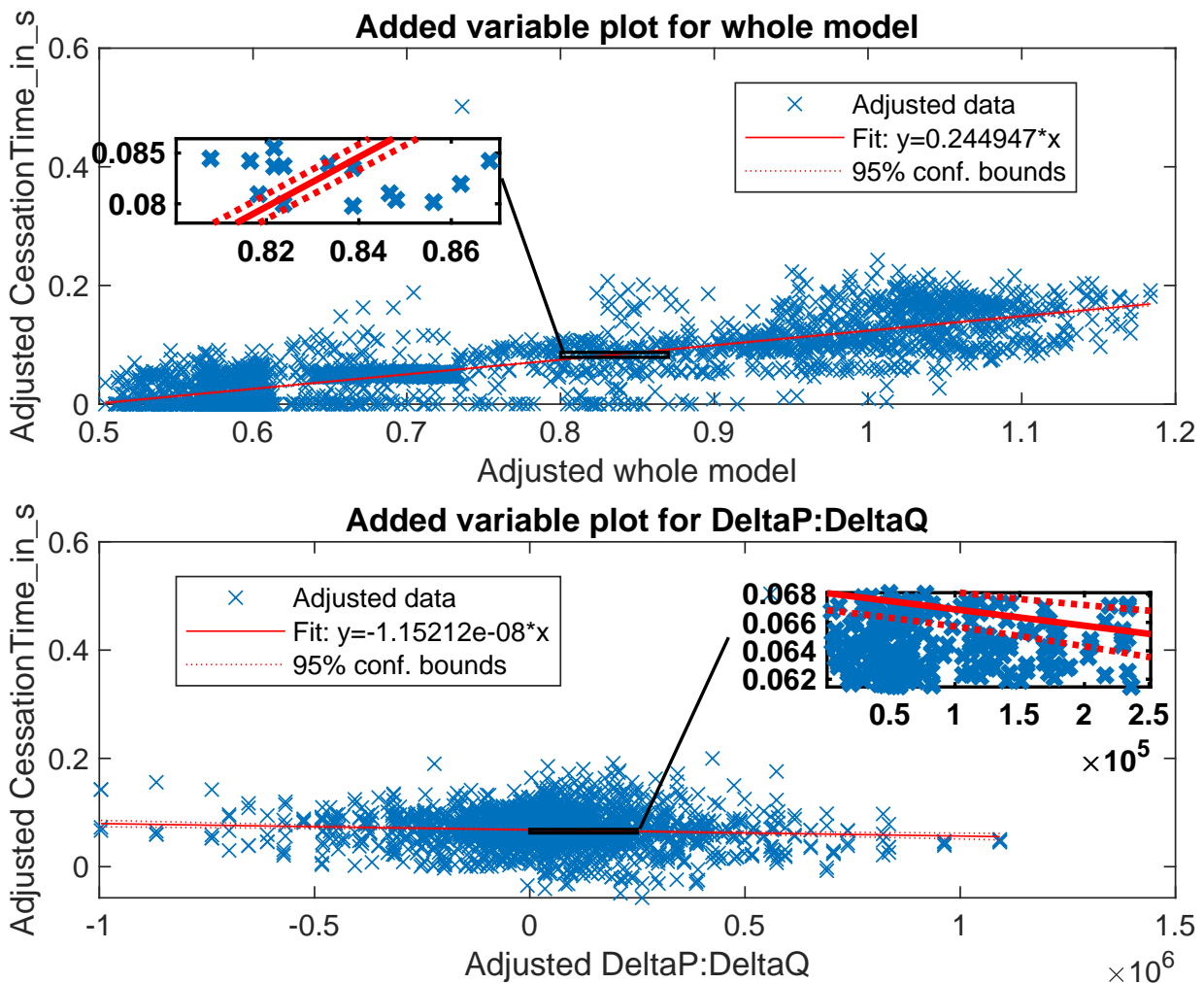


Abbildung 5.12: Partieller Regressionsplot des Modells, hier am Beispiel vollst. Modell und Prädiktor :

Der partielle Regressionsplot (auch 'Added variable Plot') in Abbildung 5.12 dient der Beurteilung der Abhängigkeit des Ergebnisses vom einzelnen Prädiktor bei bereinigtem Einfluss durch die jeweils anderen Prädiktoren [Jan09]. Oben ist der Plot für das gesamte Modell, unten für einen beispielhaft dargestellten Prädiktor für die Interaktion $\Delta P : \Delta Q$ dargestellt. Auch hier zeigt sich eine optisch gute Übereinstimmung der Prädiktion mit den Messwerten. Auffällig in der Vergrößerung ist jedoch, dass das 95%-Konfidenzintervall sehr eng gegenüber der optisch beobachtbaren Streuung der Werte zu sein scheint. Die Konfidenzintervalle berechnen sich aus der mittleren Streuung der Ergebnisse um den prädizierten Wert. Da in bestimmten Bereichen der Antwortfläche die Streuung stark unterschiedlich ist, und die Ergebnisse insbesondere bei hoher Wirkleistung im Netzaustausch sehr präzise auf einen Wert zulaufen, kann diese mittlere Berechnung die Unterschiede in verschiedenen Bereichen nicht überall günstig wiedergeben, da die verwendete Regression mit einem konstanten Intervall arbeitet. Die Ergebnisgrafik in Abbildung 5.14 zeigt dies optisch deutlich.

Als Ursache kommt daher vor allem die sehr geringe Variabilität und damit hohe Wiederholgenauigkeit zwischen zwei Messungen mit gleichen Faktorenniveaus in Frage. Der Pure Error MeanSq ist im Verhältnis zu den anderen Werten sehr niedrig, weshalb der Test sehr sensitiv ausfällt. In Kombination mit dem sehr kleinen Konfidenzintervall erscheinen abweichende Messungen, insbesondere in Bereichen mit hoher Variabilität als stark abweichende Punkte, die den Test ausschlagen lassen können. Diese Ursache betrifft allerdings nur die vorhergesagte Bandbreite der Messungen, nicht ihren Mittelwert und ist daher für die folgende Auswertung, die allein an letzteren orientiert ist, nicht von Belang.

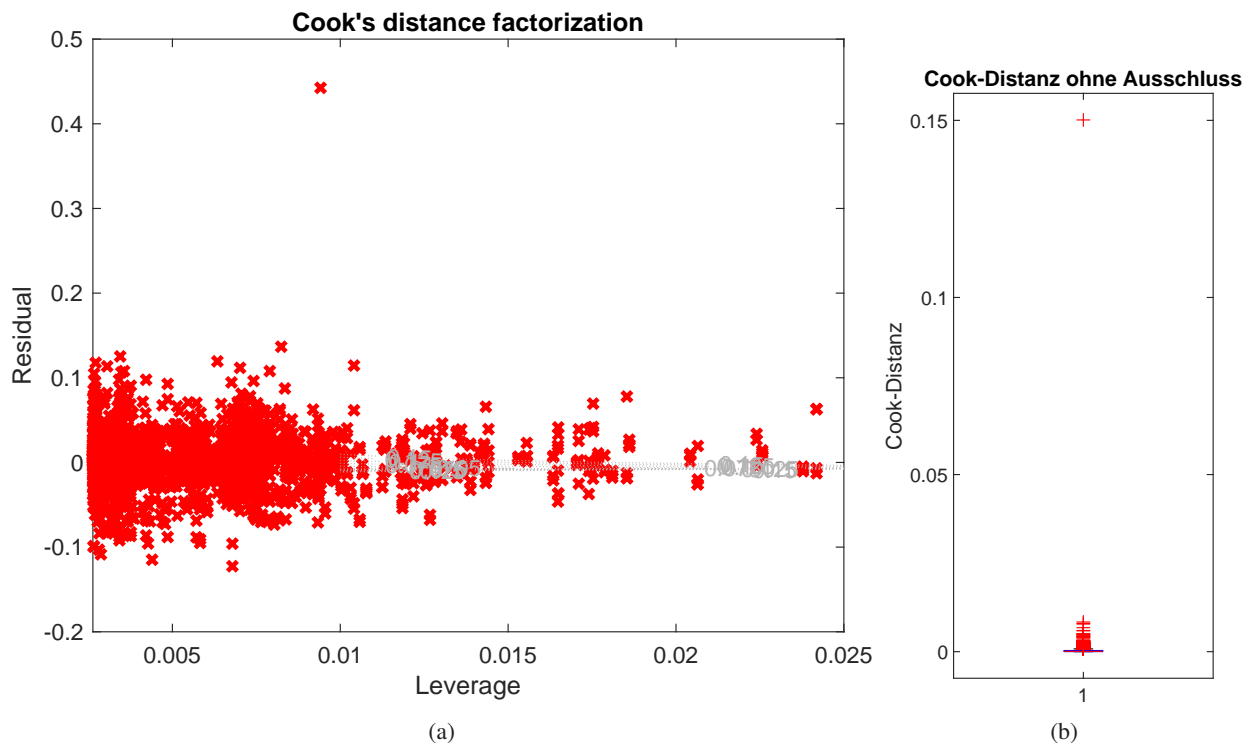


Abbildung 5.13: Cook's Distance (a) Einfluss der Residuen auf das Modell, (b) Normierte Messwerte

Auch die Betrachtung von etwaigen Ausreißern war Teil der Diagnose. Die Residuen wurden dafür dahingehend geprüft, ob sie das Modell selbst durch ihre Präsenz wesentlich verfälschen können. Prinzipiell ist dies in Regressionsanalysen möglich, weil die Quadrate hoher Residuen einen sehr hohen Einfluss auf Größen wie den MeanSq entwickeln können. Daher wurde mit dem Cook's Test bewertet, welchen Einfluss ('Leverage') jede Messung auf das Modell besitzt.

In der Grafik 5.13a sind die hierfür kritischen Größen Modelleinfluss (Leverage) und Abweichung von der Modellvorhersage (Residuum) übereinander aufgetragen. Auffällig wird der für die Modellvalidität sehr vorteilhafte trichterförmige Gesamtverlauf, in dem die größten Ausreißer sehr geringen Modelleinfluss besitzen. Einzige Ausnahme ist die Messung mit nahezu einer halben Sekunde Inselnetzbetrieb, die in den Antwortflächen oben auch deutlich erkennbar war. Diese besitzt im Verhältnis zu den anderen Einflüssen jedoch auch noch einen sehr geringen Einfluss mit einer normierten Leverage $< 0,01$. Dies wird auch in der Abbildung 5.13b deutlich, die die Messungen an einer normierten Größe, der 'Cook's Distance' aufträgt. Der betreffende Ausreißer liegt mit einer Cook's Distance von 0.15 deutlich unter 1 und hat somit keinen hinreichenden Modelleinfluss, um eine weitere Bewertung und einen Ausschluss aus der Messreihe notwendig zu machen. Dies ist plausibel, da die Messung insgesamt eine sehr hohe Versuchszahl umfasst, die die Wirkung einzelner Messungen stark verringert. Ein probeweiser Ausschluss hätte den R^2 um 0,023 und somit vernachlässigbar verbessert, und auf den MeanSq des Lack-of-Fit keinen messbaren Einfluss gehabt.

Weitere Verbesserungen des Modells wären mit anderen Modellen als polynominalen Funktionen oder spezifischen Transformationen, die mehr Freiheitsgrade in der Bestimmung der Konfidenzintervalle in verschiedenen Bereichen der Antwortfläche zulassen, möglich. Im Rahmen dieser Studie wurde dies allerdings aufgrund der geringen Relevanz für die Ergebnisbestimmung nicht weiter betrachtet.

Die untenstehende Abbildung 5.14 zeigt die Antwort des gebildeten Modells als durchgängige Fläche für eine exemplarische Kombination, während die tatsächlichen Messungen als Kreuze hervorgehoben sind:

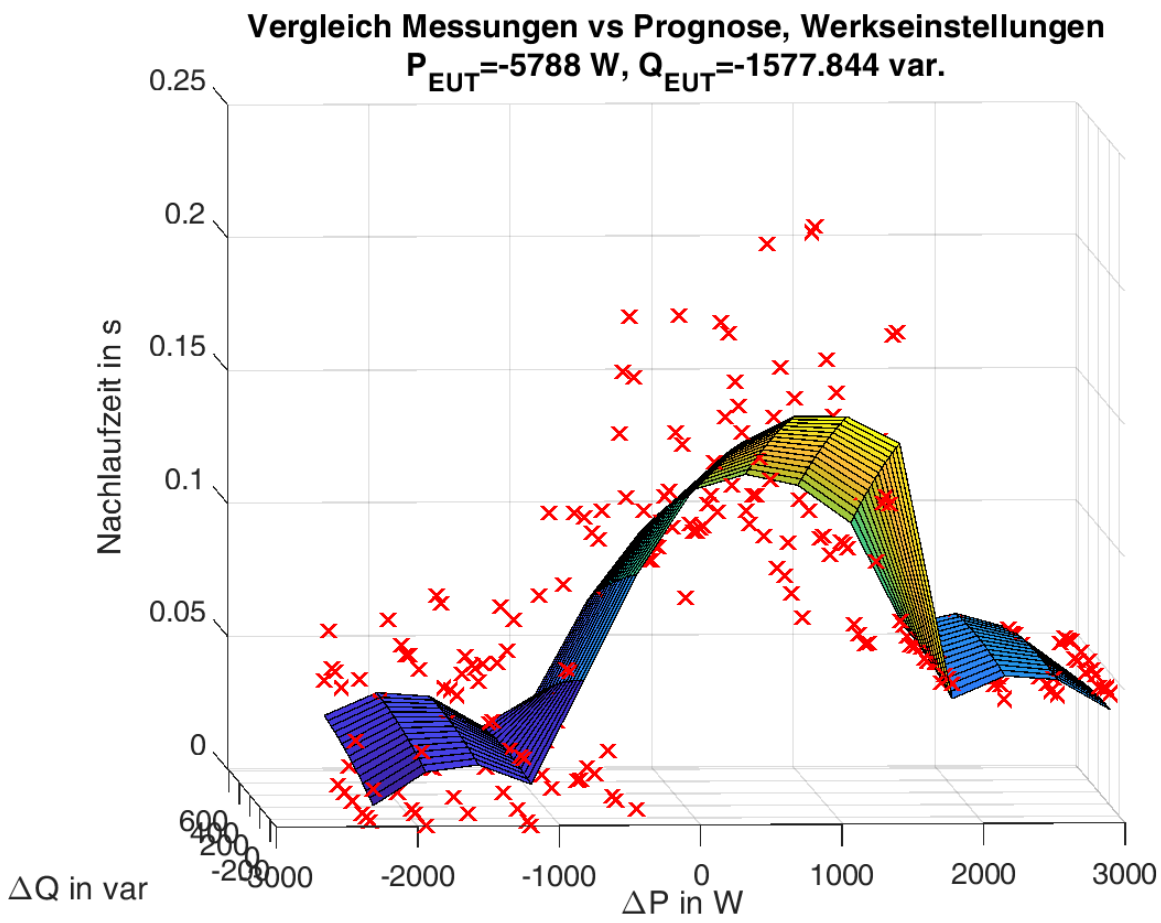


Abbildung 5.14: Modellvorhersage und Messungen, Werkseinstellungen, Arbeitspunkt (a)

Weitere Grafiken sind dem Anhang als Abbildung 8.13 bis 8.15 beigefügt.

6 Zusammenfassung und Interpretation der Ergebnisse

Die Untersuchungen der Dynamik des untersuchten Umrichters belegen, dass dieser auch heute schon ein wesentlich höhere Gradienten in der Frequenzhaltung als von den Mindestanforderungen nach VDE-AR-N4105 [VDE18] gefordert, aufweist. Die Anpassungen dieser in Kapitel 3.3 zeigt seine prinzipielle Fähigkeit, auch den derzeit diskutierten Anforderungen der PRNB in Statik und Dynamik innerhalb der zulässigen Toleranzen zu entsprechen. Hierfür war jedoch die Kalibrierung innerhalb eines engen Wertebereichs notwendig, innerhalb dessen das EUT in der Lage war, die Vorgaben wiederholbar umzusetzen. Bereits in den benachbarten Parametersätzen war eine wiederholbare Einhaltung der Verlaufstoleranzen der PRNB-Kurve nicht mehr zuverlässig gegeben. In der Praxis könnte dies einen erhöhten Aufwand der Hersteller in der Kalibrierung der Geräte zur Einhaltung der Toleranzen bei gleichzeitiger Erfüllung der weiteren Anforderungen an die Geräte bedeuten. Einschränkend ist zu dem geprüften Gerät zu betonen, dass die werkseitig eingestellte Dynamik die aktuellen Anforderungen nach VDE-AR-N4105 [VDE18] bereits weit überstieg, andere Geräte, die in Werkseinstellungen träger reagieren, könnten sich im Verhalten eventuell stärker ändern. Dies wurde im Rahmen der Studie nicht untersucht.

In der anschließenden Prüfung der Fähigkeit der Inselnetzerkennung konnte ein Bereich lokal erhöhter Erkennungsdauer gefunden und untersucht werden. Die Inselnetzerkennung des EUT in Werkseinstellungen erfolgt in der Prüfung sehr zuverlässig: in jedem der 2.700 Versuche unterschiedlichster Konditionen stellte der Prüfling innerhalb maximal 25% der bspw. in der IEC 62116 [DIN14] geforderten maximalen Erkennungsdauer von 2 s die Einspeisung nach Bildung der Insel ein. An dieser Zuverlässigkeit und an der grundsätzlich schnellen Erkennungsdauer ändert auch die Einstellung des neuen Parametersatzes nichts, wie allein aus der optischen Bewertung der Antwortfläche, bspw. in Abbildung 4.6 deutlich wird. Eine Veränderung der Erkennungsdauer ist aus einem reinen Vergleich von Mittelwerten nicht erkennbar und hätte daher höchstens lokal mit bestimmten Parameterkombinationen auftauchen können. Dies wurde in der anschließenden quantitativen Untersuchung ausgeschlossen.

Die Ergebnisse der Auswertung zeigen, dass der Arbeitspunkt des EUT das Ergebnis nicht signifikant beeinflusst. Wird das EUT mit dem Parametersatz 'PRNB' ausgestattet (Parameterset 2), verringert das die Erkennungszeit global zunächst sogar um ca. 12 ms. Durch das Zusammenwirken mit den anderen Faktoren ergibt sich eine Erhöhung der Antwortzeit um etwa 9 ms an den Rändern der Antwortfläche. Im Bereich der vorher maximalen Nachlaufzeiten wird die Antwortzeit jedoch nicht wesentlich erhöht. Das an den Messungen gebildete Modell selbst wurde dabei eingehend auf Konsistenz seiner Aussagen und Wiedergabe der Messdaten überprüft. Die Ergebnisse zeigen somit auf, dass die Einführung einer PRNB-konformen Frequenzstützung im EUT keine Erhöhung der Erkennungsdauern von Inselnetzen im betrachteten Setup über den gesamten geprüften Bereich verschiedener EUT-Arbeitspunkte und Lastparameter mit sich bringt. Die Gültigkeit der Ergebnisse ist dabei zunächst auf das untersuchte Gerät im gegenüber realen Netzumgebungen notwendigerweise vereinfachten Testaufbau einzuschränken.

7 Kritische Würdigung und Ausblick

Aus den Ergebnissen der Studie lassen sich zunächst keine technischen Hürden für die Einführung der PRNB in der Niederspannung ableiten. Diese scheint stabil möglich und ist bereits heute teilweise von kommerziell verfügbaren Umrichtern umsetzbar. Etwaige nachteilige Auswirkungen der Parameterveränderungen konnten im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen nicht festgestellt werden. Die diskutierten zulässigen Toleranzen von $\pm 10\%$ in der Antwort auf Frequenzsprünge erfordern aufgrund der hohen Dynamik eine sorgfältige Einstellung des Geräts um diese zuverlässig und wiederholbar ausführen zu können. Es ist möglich, dass eine Erhöhung der initialen Antworttoleranz die Kompatibilität mit weiteren Geräten erhöht, was in diesem Rahmen nicht untersucht worden ist. Die Ergebnisse der Studie beziehen sich daher zunächst nur auf den untersuchten Umrichter und lassen sich nur im Gesamtbild mit der parallel durchgeführten Simulationsstudie verallgemeinern.

Es gibt bestimmte Effekte und Konstellationen, die die Ergebnisse der Studie möglicherweise beeinflussen können, in dessen Rahmen aber nicht betrachtet wurden. Insbesondere die Interaktionen mehrerer Umrichter im nahe benachbarten Betrieb im Falle einer ungewollten Teilnetzbildung können Einfluss auf die Erkennungsperformance der beteiligten Geräte besitzen. Die aktuellen Prüfanforderungen an die Inselnetzerkennung nach IEC 62116 [DIN14] gelten im Wesentlichen als erfüllt, falls ein einzelnes Gerät in der Lage ist, eine ungewollte Teilnetzbildung allein im Parallelbetrieb mit einer passiven Last zu innerhalb kurzer Zeit erkennen. Es existieren jedoch keine Anforderungen daran, dass ein bestimmtes Erkennungsverfahren die Funktionsweise ggf. industrieüblicher oder etablierter Verfahren von Bestandsanlagen nicht stören darf, weshalb die Interaktion mehrerer Komponenten, was jedoch für reale Inselnetzfälle anzunehmen ist, üblicherweise nicht weiter untersucht werden. Diese Art von Untersuchungen sind zudem herausfordernd, da es außerhalb der Prüfung seiner Wirksamkeit im vereinfachten Testaufbau keine Anforderung an die Art der Wirkung im Gerät gibt. Erzielte Untersuchungsergebnisse lassen sich daher schwer auf alle Umrichtertypen oder Herstellerfamilien mit ihren mitunter sehr verschiedenen Reaktionsmustern verallgemeinern, womit auch eine deterministische Beschreibung komplexer ungewollter Teilnetzbildungen mit vielen beteiligten Umrichtern nur in gewissem Abstraktionsniveau möglich ist. Dies wurde im Rahmen der parallel durchgeführten Simulationsstudie getan. Die Ergebnisse beider Studien sind kohärent und erlauben in ihren Ergebnissen eine Gesamtsicht, nach der auch nach Einführung der PRNB die bestehende Zuverlässigkeit der Erkennungsverfahren nicht leidet. Ungeachtet der vorhandenen Validität solcher Untersuchungen ist es möglich, dass die laborbasierte Betrachtung von Interaktionen mehrerer Umrichterklassen neues Licht auf die Grundannahmen der Untersuchungen nach Stand der Technik werfen kann. Es existieren erste Betrachtungen, die, allerdings für Erkennungsverfahren für netzbildende Umrichter und damit nicht für diesen Untersuchungsfall zeigen, dass ein Verfahren welches grundsätzlich Prüfungen nach [DIN14] bestehen könnten, nicht notwendigerweise effektiv in komplexen Teilnetzbildungssituationen wirken können [Win+23]. Die Erweiterung der Prüfvorschrift zur Anwendbarkeit auf diesen Umrichtertyp könnte somit diskutiert werden mit dem Ziel, die zuverlässige Inselnetzerkennung auch im kombinierten Betrieb beider Umrichterklassen zu gewährleisten. Für die untersuchten netzfolgenden Umrichter sind Untersuchungen mit derartigen Auswirkungen gegenwärtig nicht bekannt.

Es könnte sich lohnen, die Untersuchung ausschließlich netzfolgender Umrichter in naher Zukunft zu erweitern. Einige bisher bestehende theoretische und laborbasierte Untersuchungen [WSE23] außerhalb des Rahmens dieser Studie deuten darauf hin, dass die derzeit diskutierte Einführung von Umrichtern mit netzbildender Regelung eine wesentliche Auswirkung auf die Zuverlässigkeit insbesondere bestehender Systeme und ihrer Erkennungsverfahren besitzen kann. In Anbetracht einer möglichen Einführung netzbildender Technologie wird die Untersuchung von Interaktionen der Umrichtertypen an Bedeutung gewinnen. Kurzfristig steht hierbei die Frage im Raum, welche Eigenschaften aktuelle netzfolgende Systeme zum

kompatiblen Betrieb mit künftigen Umrichtersystemen befähigen wird und welche Anforderungen über die bestehenden Prüfungen hinaus dafür an sie zu stellen sind. Ein gewisser geforderter Grundmechanismus oder zumindest die öffentlich zugängliche Beschreibung prinzipieller Wirkungsweisen der Erkennungsverfahren wären hilfreich, um die Charakteristik komplexer Netzabschnitte und der Erfolgswahrscheinlichkeit der Inselnetzerkennung im Verbund analytisch untersuchen zu können. Umgekehrt stellt sich ebenso die Frage, welche Charakteristik die Inselnetzerkennung für netzbildende Systeme aufweisen sollte, um zuverlässig im Betrieb mit bestehenden Anlagen ungewollte Teilnetzbildungen zu erkennen. Entsprechende Anforderungen und Prüfungen, die ein kompatibles Verhalten dieses Anlagentyps sicherstellen, sind zu erarbeiten. Kompatibel in diesem Sinne würde bedeuten, dass betrachtete Verfahren einander in ihrer Wirkungsweise nicht stören oder sogar konstruktiv ergänzen anstatt die Erkennung der anderen Anlage zu blockieren. Angesichts einer durch die Präsenz netzbildender Umrichter ausgelösten stärkeren Verkopplung von Effekten der Netzstützung und Inselnetzerkennung ist nicht auszuschließen, dass eine höhere Dynamik der Frequenzstützung, die mit der PRNB für netzfolgende Anlagen angestrebt wird, in ausschließlich netzfolgend betriebenen Teilnetzen unkritisch, jedoch in Kombination mit der Einführung auch nur geringer Anteile netzbildender Anlagen die Erkennungsdauer beteiligter Geräte zukünftig erhöhen könnte. Derartige potentielle Effekte sollten idealerweise frühzeitig realitätsnah untersucht werden, um die damit einhergehenden Risiken abschätzen und Gegenmaßnahmen begleitend zur Einführung netzbildender Umrichter in die Niederspannung umsetzen zu können.

8 Anhang

8.1 Zu Kapitel 3.1.1: Technische Daten der DC-Last zur Vermessung der Quellendynamik

Anforderung	Wertebereich
Dauerlast	9800 W
Minimale Lastspannung	50 V
Maximale Lastspannung	260 V
Laststrom	70 A
Frequenzbereich	0 Hz, 40 - 700 Hz
Stellbereich Strom	0 - 70 A
Stellbereich Widerstand	0,714 – 171Ω
Anstiegs- und Abstiegszeit (DC)	50 μs (von 10% auf 90% I _{max})
Genauigkeit der Einstellung des Stroms über Schnittstelle bei 50 Hz	±0,5% vom Sollwert und ±0,3% vom Stellbereich (hier 70A)
Genauigkeit der Einstellung des Widerstands über Schnittstelle bei 50 Hz	±1,5% vom Sollwert und ±0,5% vom Stellbereich (hier 70A)
Auflösung Sollwerte	16 Bit

Tabelle 8.1: Technische Daten der DC-Last zur DC-Quellenvermessung

8.2 Weitere Non-Detection Zones

8.2.1 Zu Kapitel 4.2: Non-Detection Zones in Werkseinstellungen

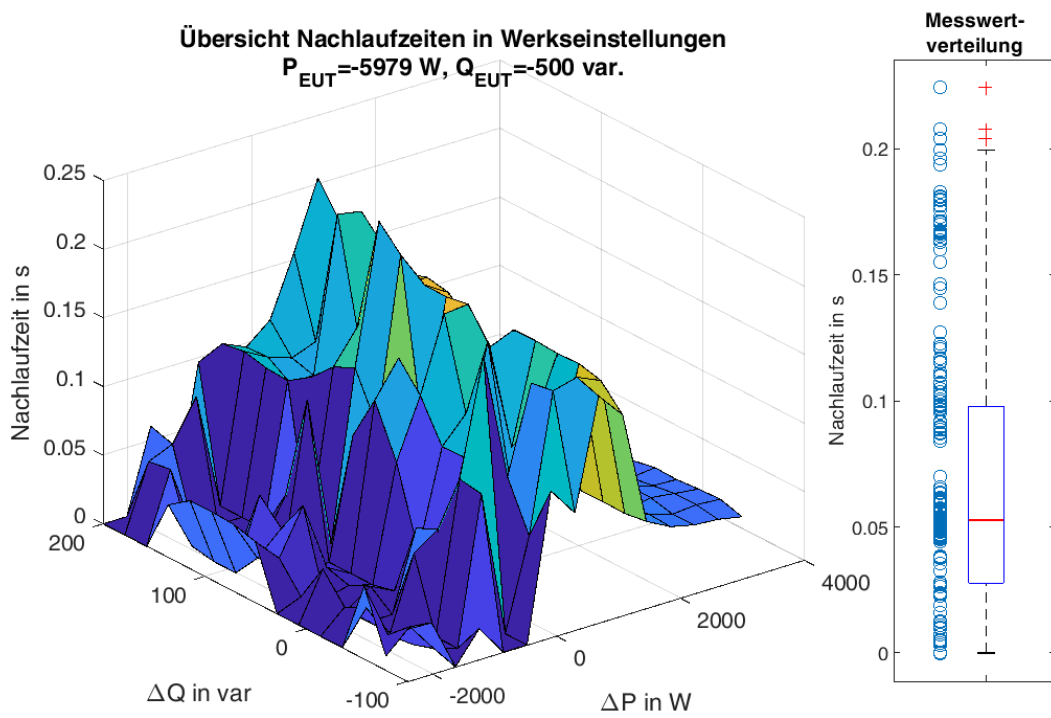


Abbildung 8.1: Antwortfläche der Nachlaufzeit über der Austauschleistung, Arbeitspunkt (c), Werkseinstellungen, Durchlauf 1

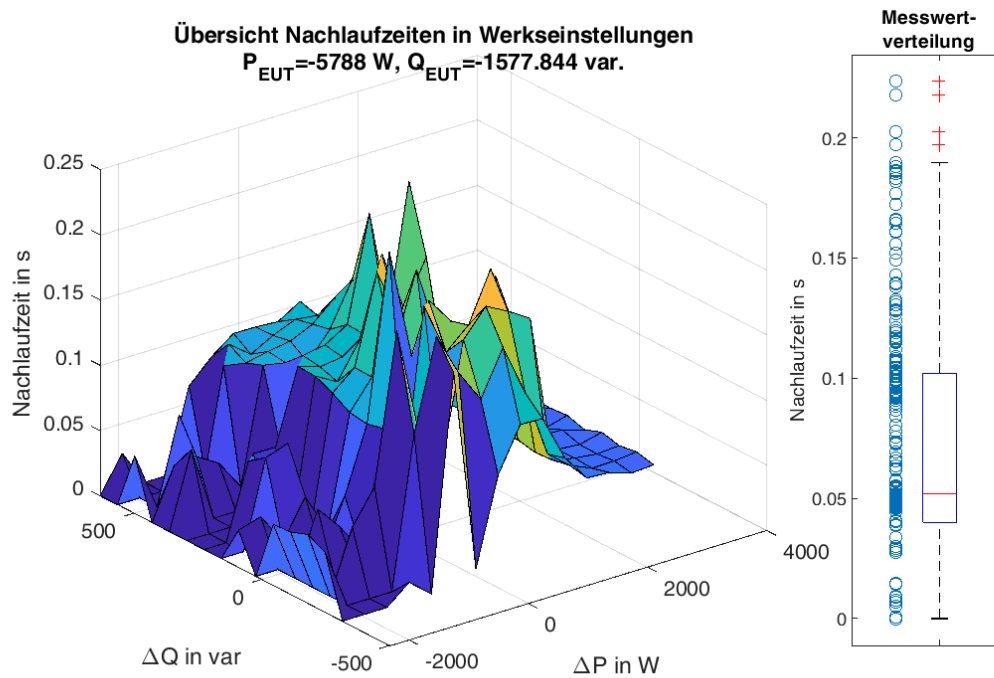


Abbildung 8.2: Antwortfläche der Nachlaufzeit über der Austauschleistung, Arbeitspunkt (a), Werkseinstellungen, Durchlauf 2

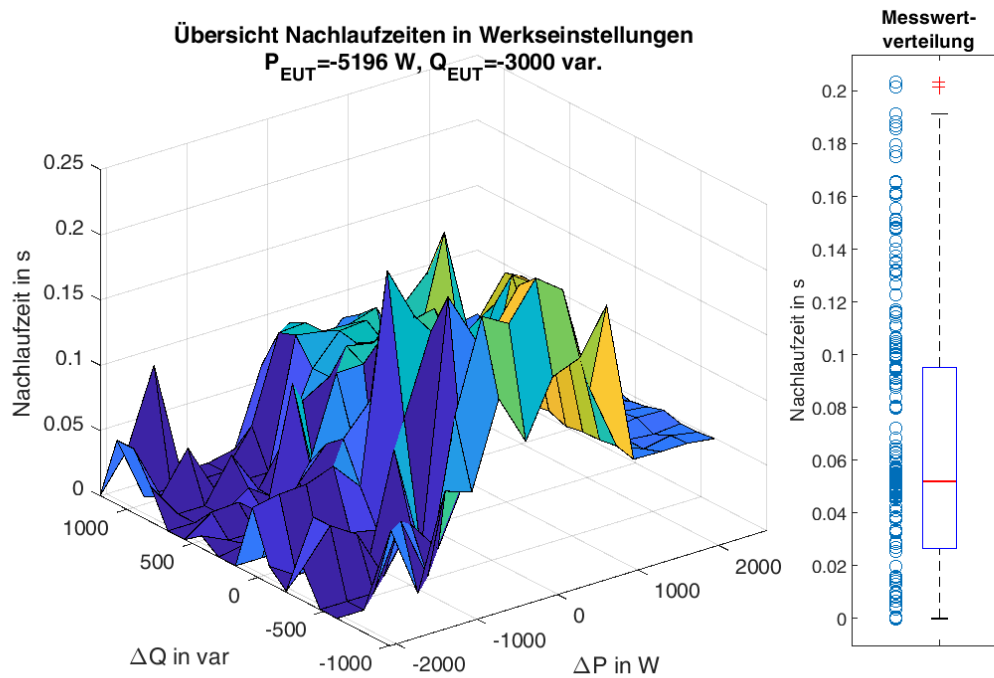


Abbildung 8.3: Antwortfläche der Nachlaufzeit über der Austauschleistung, Arbeitspunkt (b), Werkseinstellungen, Durchlauf 2

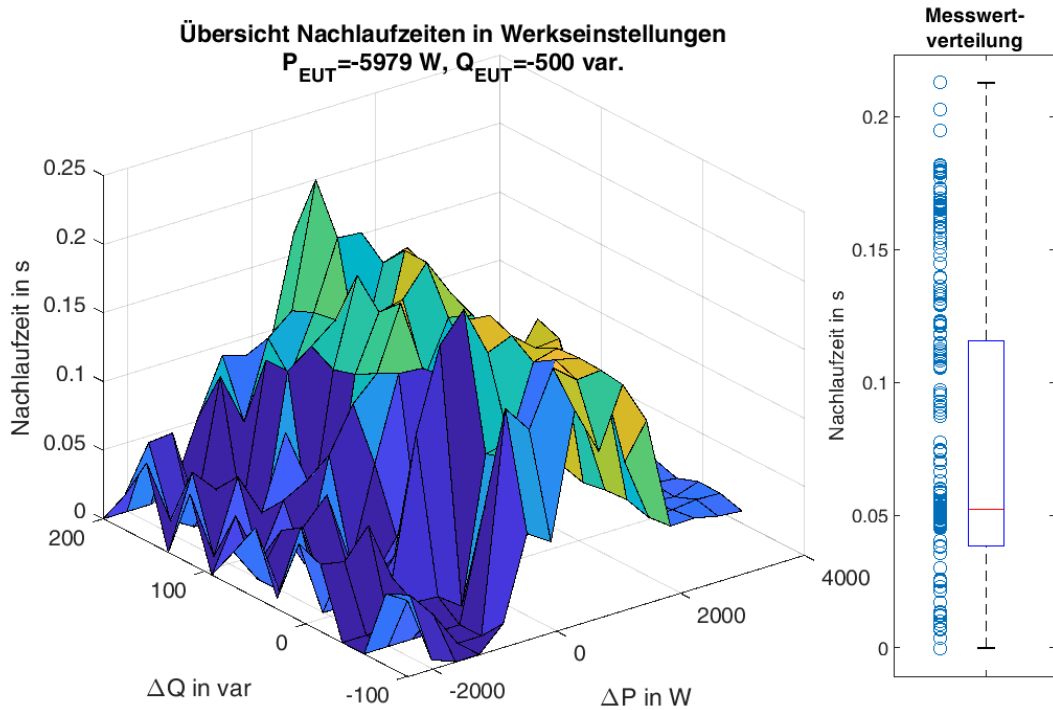


Abbildung 8.4: Antwortfläche der Nachlaufzeit über der Austauschleistung, Arbeitspunkt (c), Werkseinstellungen, Durchlauf 2

8.2.2 Zu Kapitel 4.3: Vergleich Nachlaufzeiten in Werkseinstellungen vs. PRNB-Parametersatz

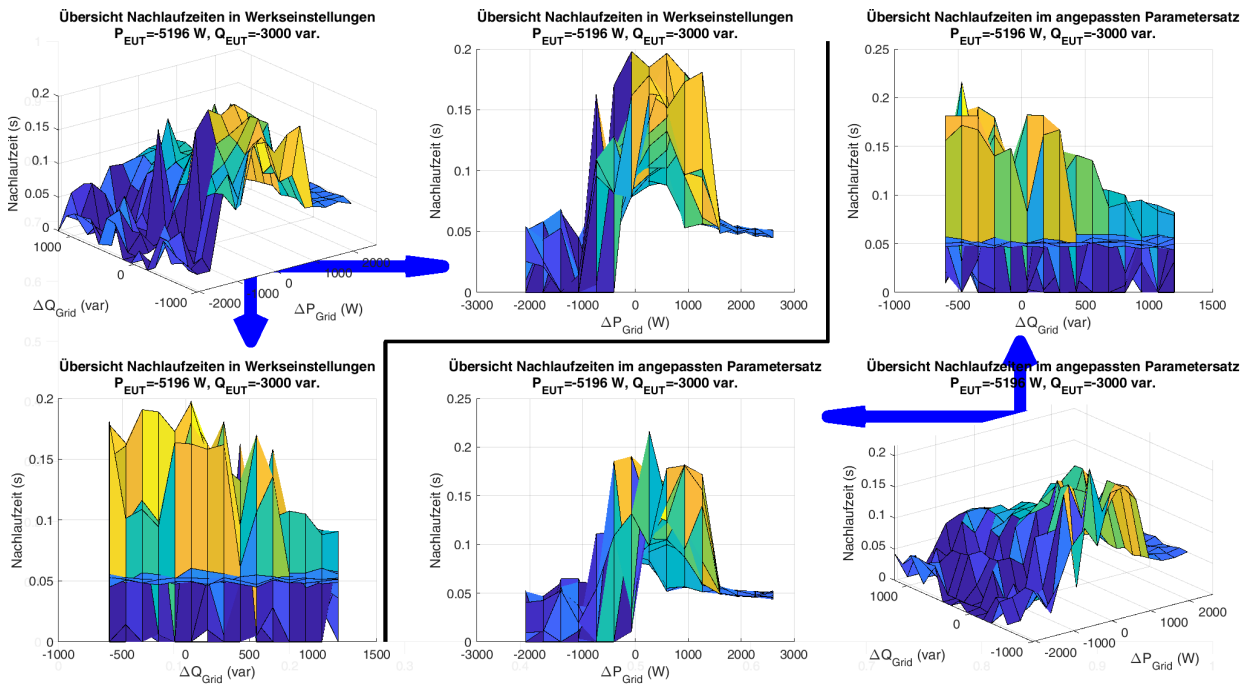


Abbildung 8.5: Vergleich der Nachlaufzeiten in Werkseinstellungen vs. PRNB-Parametersatz. Arbeitspunkt (b), Durchlauf 1

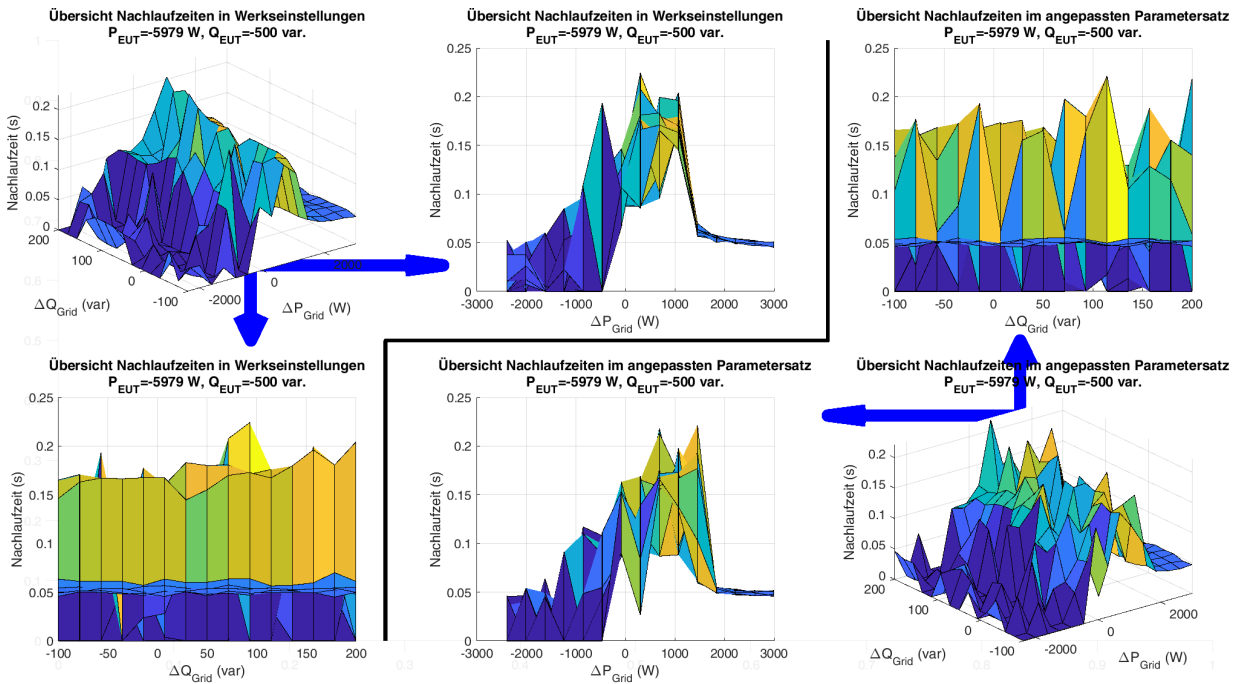


Abbildung 8.6: Vergleich der Nachlaufzeiten in Werkseinstellungen vs. PRNB-Parametersatz. Arbeitspunkt (c), Durchlauf 1

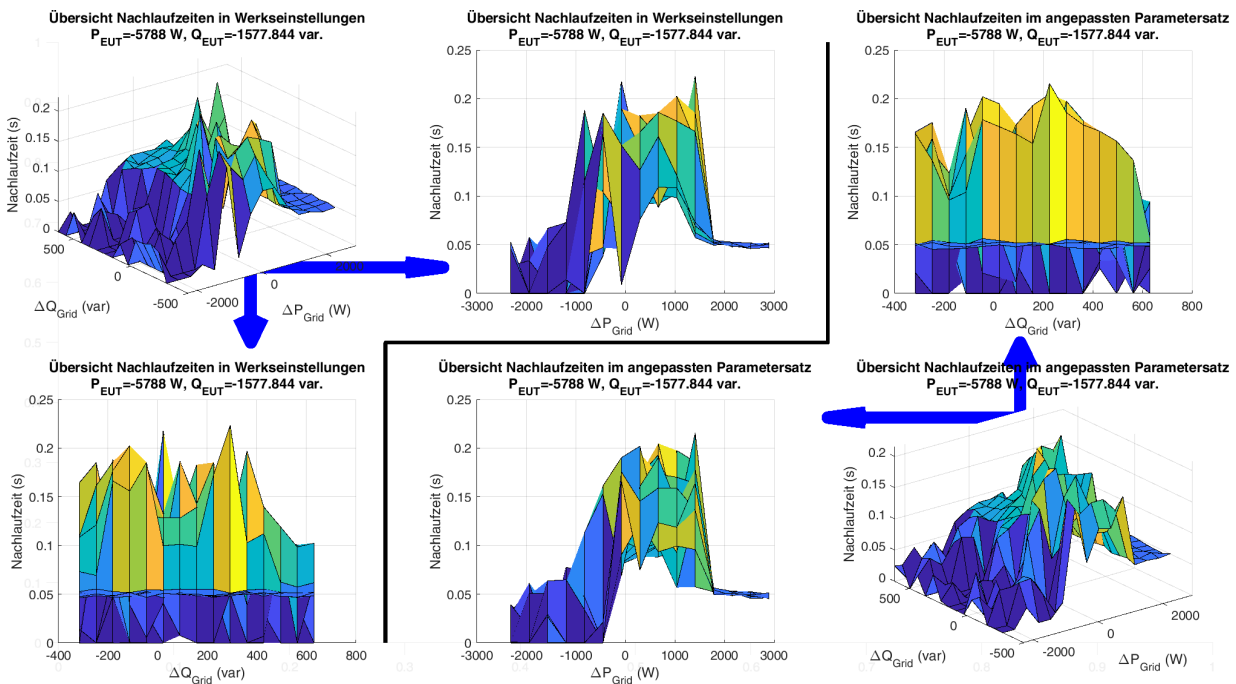


Abbildung 8.7: Vergleich der Nachlaufzeiten in Werkseinstellungen vs. PRNB-Parametersatz. Arbeitspunkt (a), Durchlauf 2

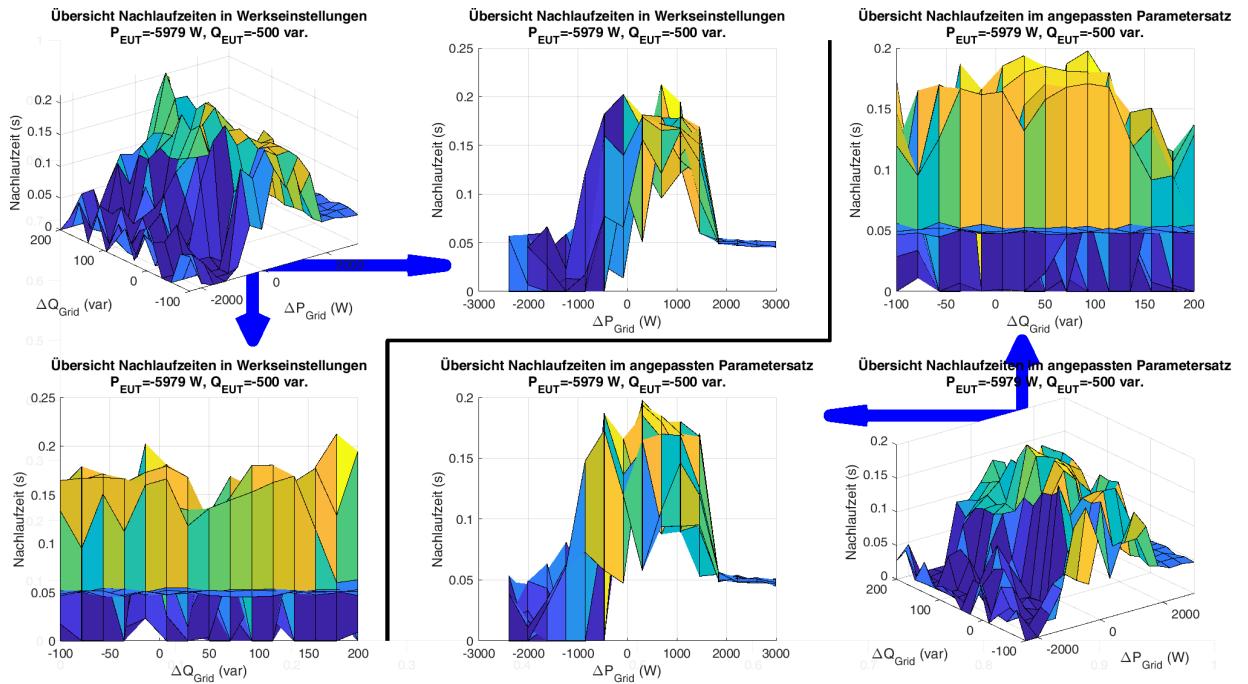


Abbildung 8.8: Vergleich der Nachlaufzeiten in Werkseinstellungen vs. PRNB-Parametersatz. Arbeitspunkt (c), Durchlauf 2

8.2.3 Zu Kapitel 4.4: Nachlaufzeiten mit arbiträr deaktivierter aktiver Inselnetzerkennung

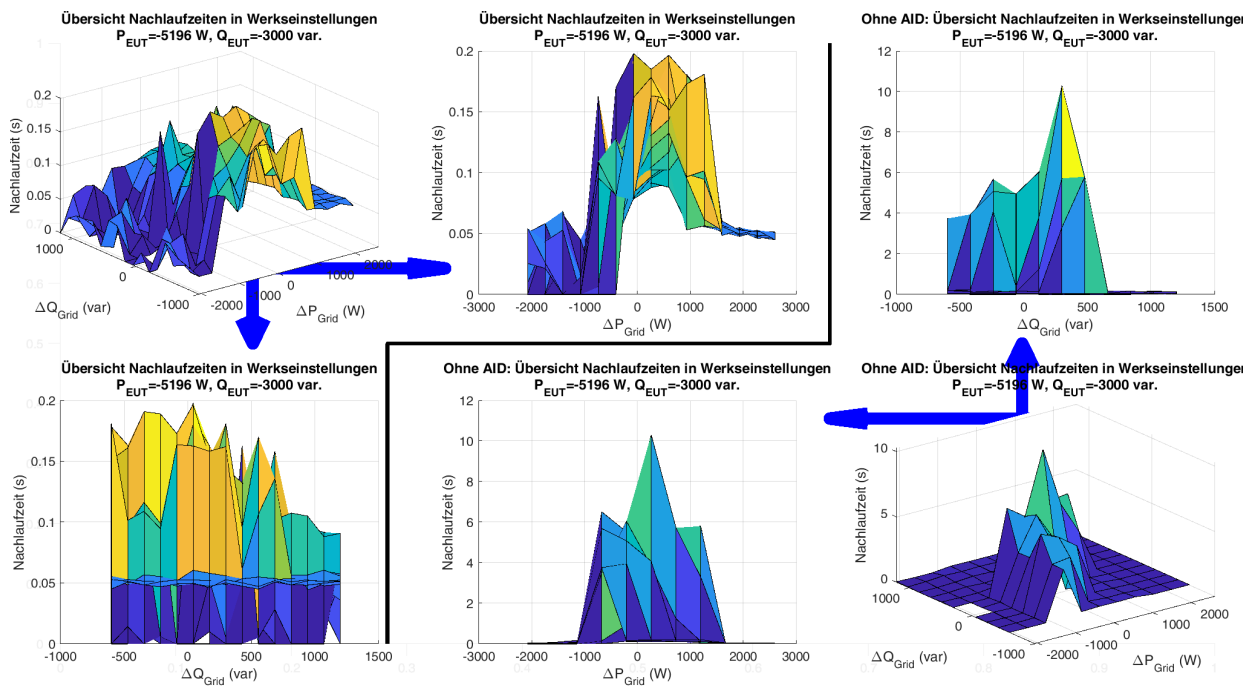


Abbildung 8.9: Vergleich der Antwortflächen mit und ohne aktiver Inselnetzerkennung, Arbeitspunkt (b), Werkseinstellungen

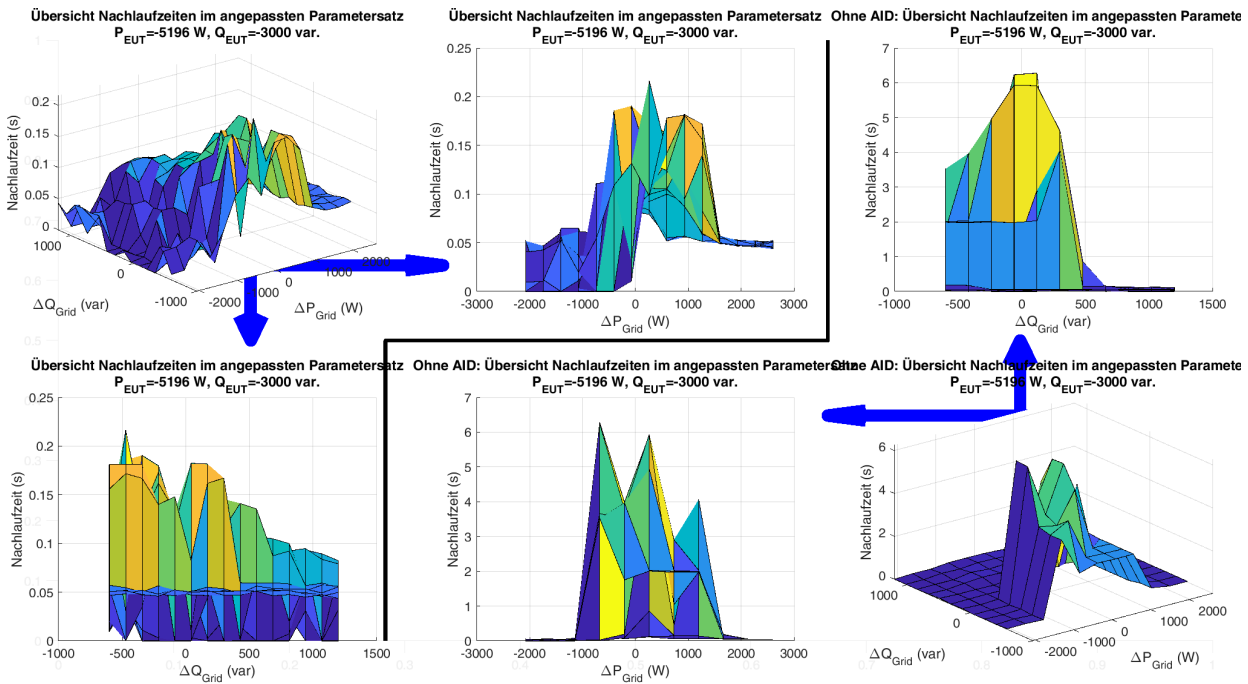


Abbildung 8.10: Vergleich der Antwortflächen mit und ohne aktiver Inselnetzerkennung, Arbeitspunkt (b), PRNB-Parametersatz

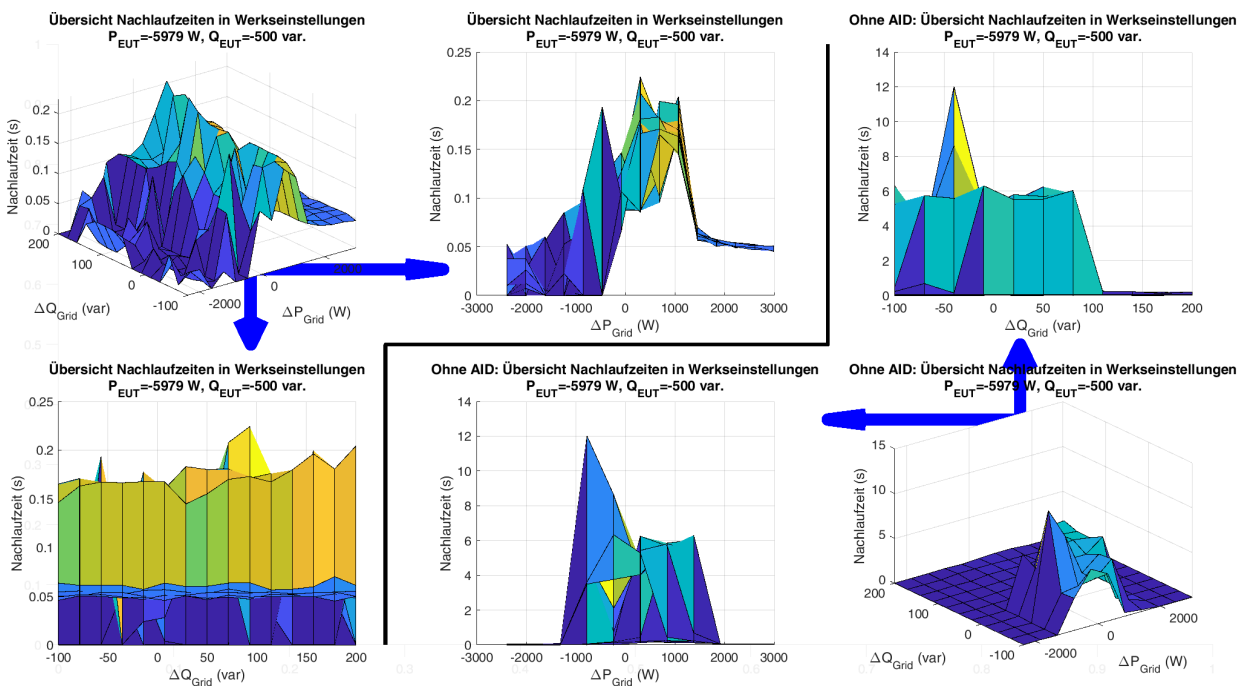


Abbildung 8.11: Vergleich der Antwortflächen mit und ohne aktiver Inselnetzerkennung, Arbeitspunkt (c), Werkseinstellungen

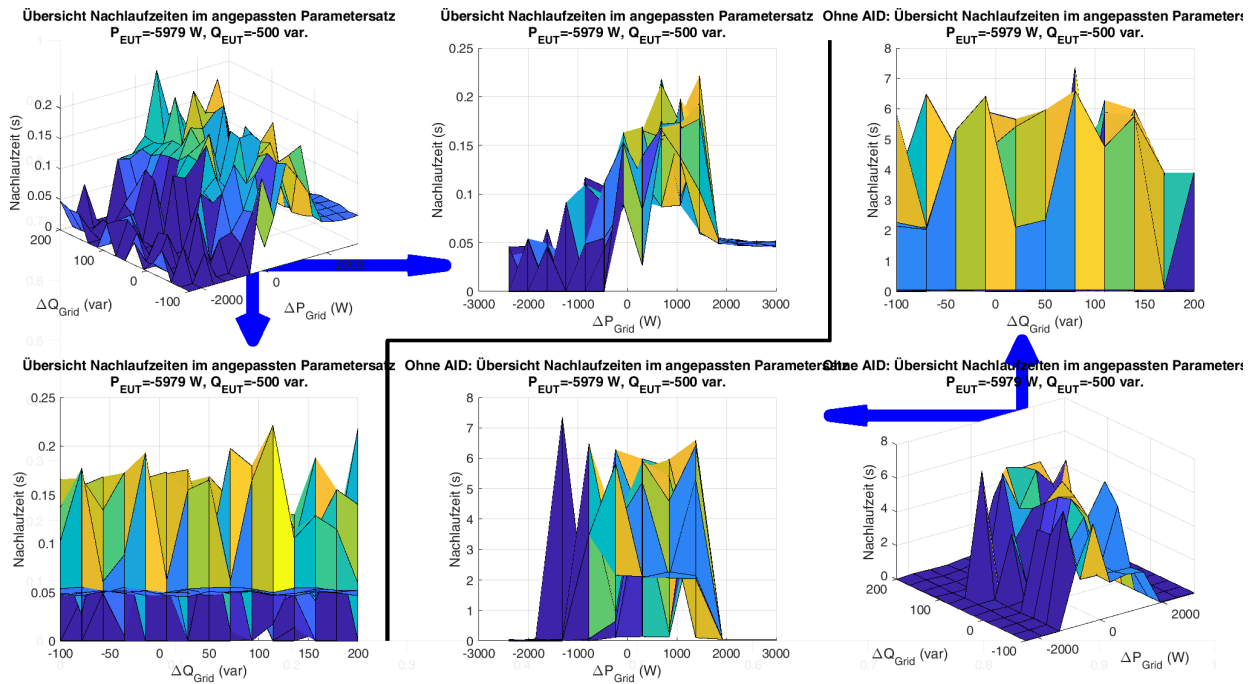


Abbildung 8.12: Vergleich der Antwortflächen mit und ohne aktiver Inselnetzerkennung, Arbeitspunkt (c), PRNB-Parametersatz

8.3 Zu Kapitel 5.1: Kruskal-Wallis Test

Source	SS	df	MS	Chi ²	Prob → Chi ²
Groups	378262.4839	1.0000	378262.4839	0.6253	0.4291
Error	1631697637.5161	2697.0000	605004.6858		
Total	1632075900.0000	2698.0000			

Tabelle 8.4: Kruskal-Wallis Test auf Unterschiede in beiden Parametrierungsgruppen. Der p-Wert von 0.43 lässt darauf schließen, dass hiermit kein Unterschied detektiert werden kann.

8.4 Zu Kapitel 5.2.3: Vollständiges quadratisches Modell

	Estimate	SE	tStat	pValue
(Intercept)	-124.13e-3	12.858e-3	-9.6538	1.0653e-21
DeltaP	161.47e-6	8.9256e-6	18.09	4.2295e-69
DeltaQ	30.669e-6	9.9201e-6	3.0916	2.0114e-3
ParameterSet ₂	-12.235e-3	5.6193e-3	-2.1772	29.55e-3
Q_{EUT}	-2.0804e-6	4.1179e-6	-505.21e-3	613.45e-3
DeltaPLimit ₁	241.5e-3	13.382e-3	18.047	8.5916e-69
DeltaPLimit ₂	46.148e-3	13.103e-3	3.5218	435.74e-6
DeltaP:DeltaQ	-11.159e-9	2.9672e-9	-3.7608	172.98e-6
DeltaP:ParameterSet ₂	5.3021e-6	2.044e-6	2.594	9.5378e-3
DeltaP: Q_{EUT}	523.9e-12	1.072e-9	488.7e-3	625.09e-3
DeltaP:DeltaPLimit ₁	-103.7e-6	7.7792e-6	-13.33	2.703e-39
DeltaP:DeltaPLimit ₂	-283.75e-6	14.837e-6	-19.124	162.16e-78
DeltaQ:ParameterSet ₂	194.72e-9	3.2697e-6	59.554e-3	952.52e-3
DeltaQ: Q_{EUT}	1.0496e-9	2.5811e-9	406.64e-3	684.31e-3
DeltaQ:DeltaPLimit ₁	-64.282e-6	6.8638e-6	-9.3654	15.554e-21
DeltaQ:DeltaPLimit ₂	-38.967e-6	12.063e-6	-3.2303	1.2516e-3
ParameterSet ₂ : Q_{EUT}	241.55e-9	1.2154e-6	198.74e-3	842.48e-3
ParameterSet ₂ : DeltaPLimit ₁	10.72e-3	5.0149e-3	2.1376	32.639e-3
ParameterSet ₂ : DeltaPLimit ₂	21.1e-3	8.8074e-3	2.3958	16.655e-3
Q_{EUT} : DeltaPLimit ₁	991.29e-9	2.5868e-6	383.21e-3	701.6e-3
Q_{EUT} : DeltaPLimit ₂	2.2549e-6	4.5174e-6	499.15e-3	617.71e-3
DeltaP ²	-35.996e-9	1.7743e-9	-20.288	310.24e-87
DeltaQ ²	-7.29e-9	3.6463e-9	-1.9993	45.679e-3
Q_{EUT}^2	-160.01e-12	872.91e-12	-183.3e-3	854.57e-3

Tabelle 8.5: Vollständiges quadratisches Regressionsmodell

8.5 Zu Kapitel 5.2.3: Varianzanalyseergebnisse des lean models

	SumSq	DF	MeanSq	F	pValue
DeltaP	659.13e-3	1	659.13e-3	682.79	27.548e-135
DeltaQ	151.79e-3	1	151.79e-3	157.24	42.93e-36
ParameterSet	157.23e-6	1	157.23e-6	162.87e-3	686.56e-3
DeltaPLimit	1.0063	2	503.15e-3	521.21	5.7935e-192
DeltaP:DeltaQ	15.821e-3	1	15.821e-3	16.389	53.048e-6
DeltaP:ParameterSet	6.5452e-3	1	6.5452e-3	6.7802	9.2683e-3
DeltaP:DeltaPLimit	627.66e-3	2	313.83e-3	325.1	377.48e-129
DeltaQ:DeltaPLimit	205.32e-3	2	102.66e-3	106.35	3.5804e-45
ParameterSet:DeltaPLimit	5.5872e-3	2	2.7936e-3	2.8939	55.532e-3
DeltaP ²	404.03e-3	1	404.03e-3	418.53	14.682e-87
DeltaQ ²	6.1778e-3	1	6.1778e-3	6.3996	11.472e-3
Error	2.59	2683	965.34e-6	1	500e-3

Tabelle 8.6: Ergebnisse der Varianzanalyse des präzisierten models

8.6 Zu Kapitel 6: Weitere Plots Modellvorhersagen vs Messwerte

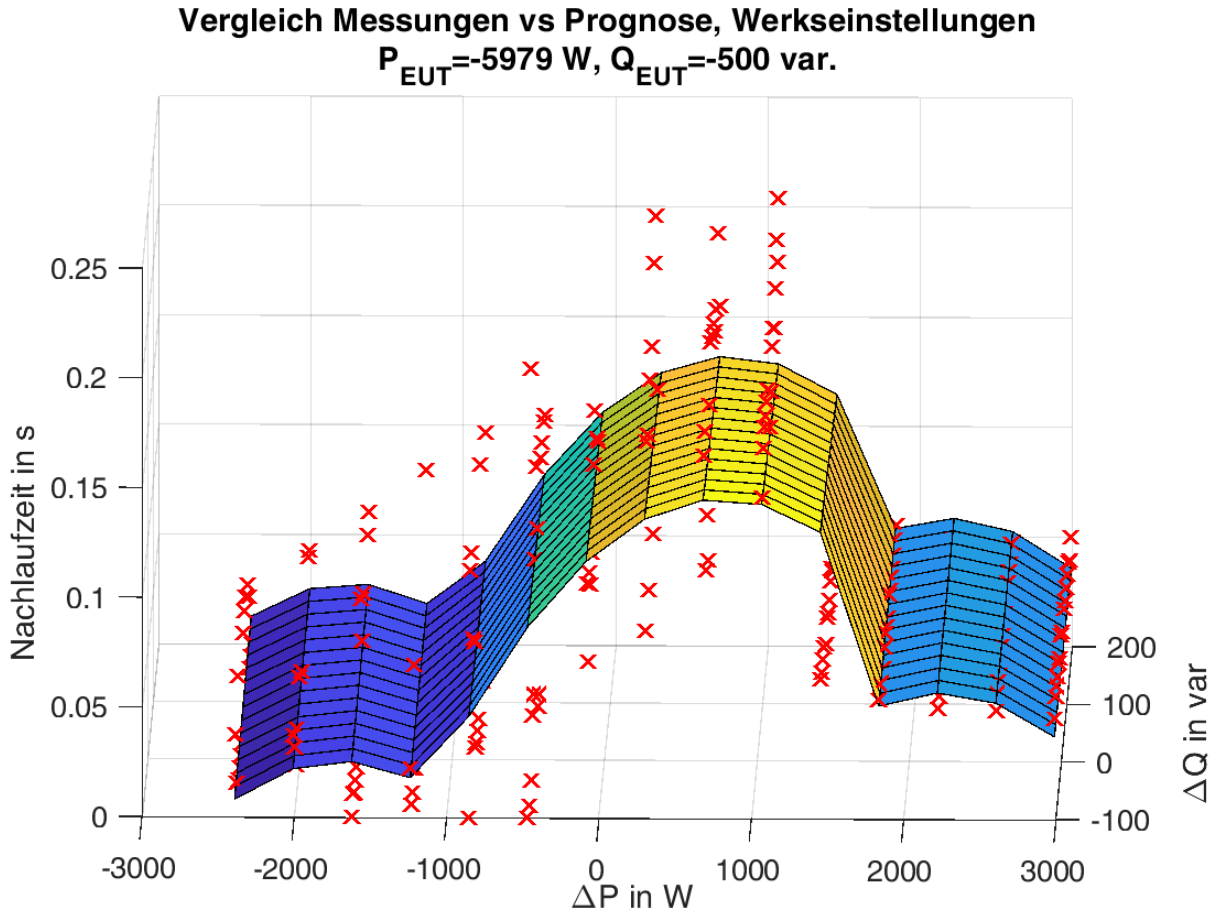


Abbildung 8.13: Modellvorhersage und Messungen, Werkseinstellungen, Arbeitspunkt (c)

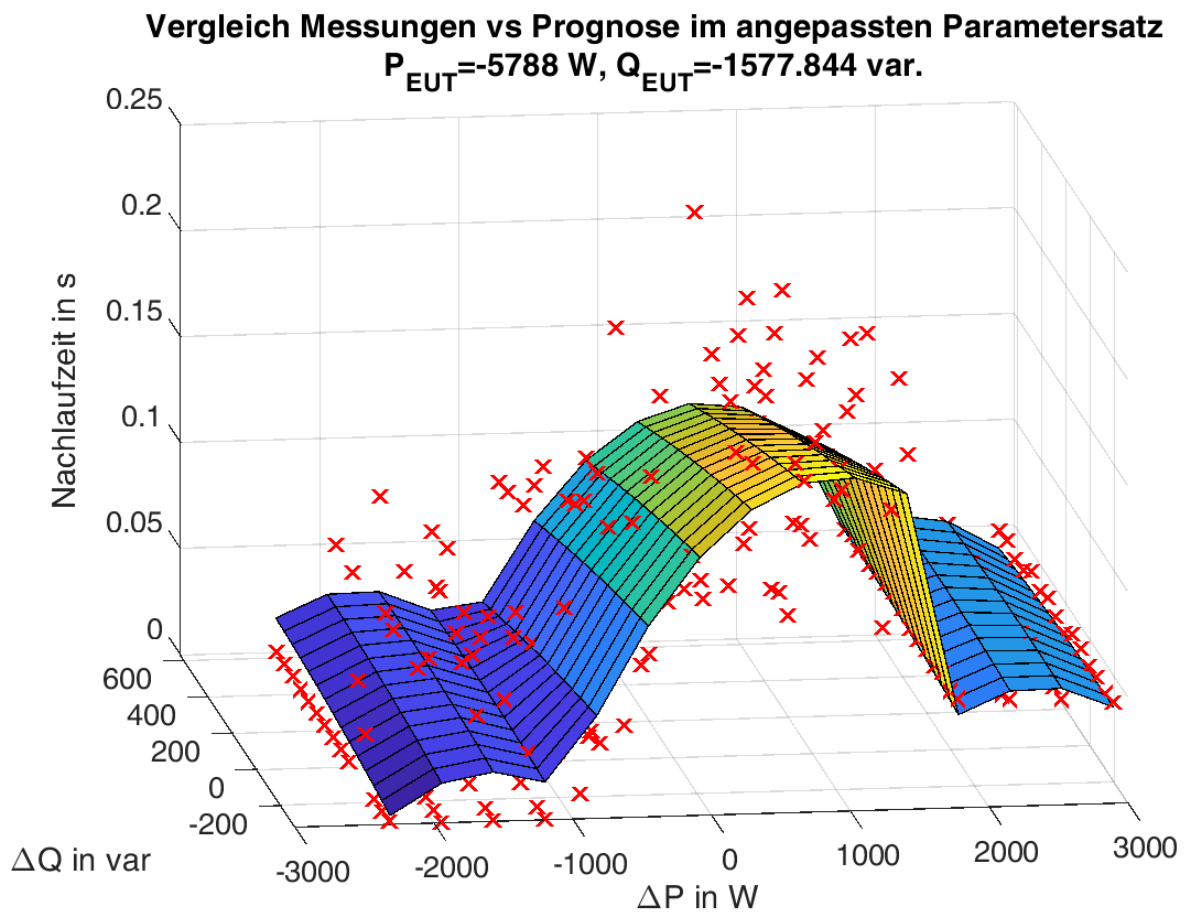


Abbildung 8.14: Modellvorhersage und Messungen, PRNB-Parametersatz, Arbeitspunkt (a)

Vergleich Messungen vs Prognose im angepassten Parametersatz
 $P_{EUT} = -5196 \text{ W}$, $Q_{EUT} = -3000 \text{ var}$.

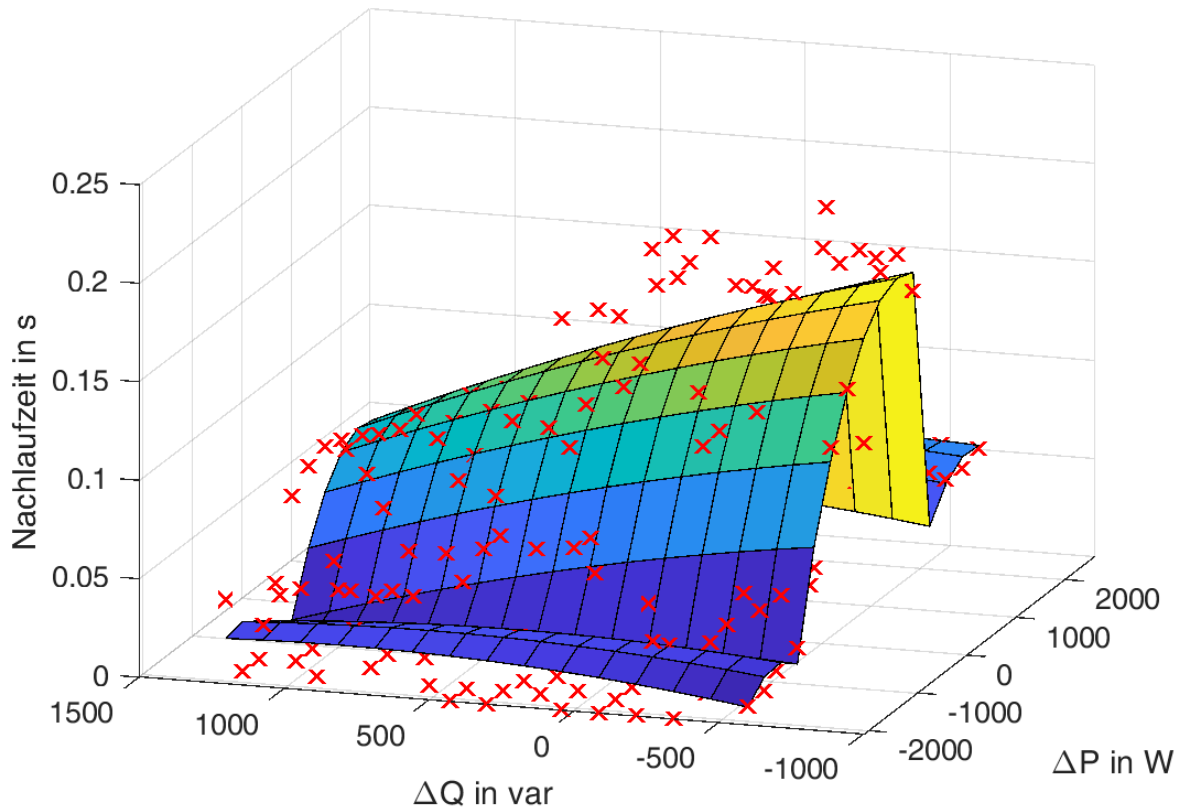


Abbildung 8.15: Modellvorhersage und Messungen, PRNB-Parametersatz, Arbeitspunkt (b)

Tabelle 8.2: Angepasste Parameter für den PRNB-Parametersatz (1)

Kategorie	Parametername	Parameterbeschreibung	Register	Werkseinstellung	Zielwert	Kommentar
Fehlerverhalten	Inverter.WCtIHzModCfg.WTms	Einstellzeit in s	44339	50	39	Einheit anscheinend in [10 ms]
	Inverter.WCtIHzModCfg.WCtIHzCfg.HzOvGra	Wirkleistungsänderung bei Überfrequenz	44351	-40000	-69000	%/Hz
	Inverter.WCtIHzModCfg.WCtIHzCfg.HzOvGra	Wirkleistungsänderung bei Überfrequenz	44353	-40000	-69000	%/Hz
	Inverter.WCtIHzModCfg.WCtIHzCfg.HzOvGra	Wirkleistungsänderung bei Überfrequenz	44355	-40000	-69000	%/Hz
	Inverter.WCtIHzModCfg.WCtIHzCfg.HzUnGra	Wirkleistungsänderung bei Unterfrequenz	44365	-40000	-69000	%/Hz
	Inverter.WCtIHzModCfg.WCtIHzCfg.HzUnGra	Wirkleistungsänderung bei Unterfrequenz	44367	-40000	-69000	%/Hz
	Inverter.WCtIHzModCfg.WCtIHzCfg.HzUnGra	Wirkleistungsänderung bei Unterfrequenz	44369	-40000	-69000	%/Hz
	Inverter.WCtIHzModCfg.WCtIHzCfg.HzStopWGra	Wirkleistungsänderungsrate nach Fehlerende	40242	9	1000	in %/min
	NA-Schutz					
Spannungsgrenzen	GridGuard.Cntry.VolCtI.hL.imPu	Mittlere Maximalschwelle in pu	44299	2000	1250	Wert in p.u. * 1000
	GridGuard.Cntry.VolCtI.hL.imTmms	Mittlere Maximalschwelle Auslösezeit in ms	40450	100000	200	in ms
	GridGuard.Cntry.VolCtI.hL.imPu	Untere Maximalschwelle in p.u.	44301	1250	1100	Wert in p.u. * 1000
	GridGuard.Cntry.VolCtI.hL.imTmms	Untere Maximalschwelle Auslösezeit in ms	40456	100	3000	in ms

Tabelle 8.3: Angepasste Parameter für den PRNB-Parametersatz (2)

Kategorie	Parametername	Parameterbeschreibung	Register	Werkseinstellung	Zielwert	Kommentar	
Frequenzgrenzen	GridGuard.Cntry.FrqCtl.Max	Obere Maximalschwelle in Hz	40103	6600	5250	Wert in Hz * 1000	
	GridGuard.Cntry.FrqCtl.MaxTmms	Obere Maximalschwelle Auslösezeit in ms	40426	100000	2000	in ms	
	GridGuard.Cntry.FrqCtl.hLim	Untere Maximalschwelle in Hz	40432	5150	5150	Wert in Hz * 1000	
	GridGuard.Cntry.FrqCtl.hLimTmms	Untere Maximalschwelle Auslösezeit in ms	40434	100	5000	in ms	
	GridGuard.Cntry.FrqCtl.lLimTmms	Obere Minimalschwelle Auslösezeit in ms	40438	100	2000	in ms	
	Wertevorgaben	Inverter.VArModCfг.VArModOut	Blindleistungsverfahren bei Wirkleistungsabgabe	41319	303	1071	303: Aus (Off), 1071: Q, manuelle Vorgabe in VAr (VArCnst)
Inverter.VArModCfг.VArModZerW		Blindleistungsverfahren bei Nullwirkleistung	41323	303	1071	303: Aus (Off), 1071: Q, manuelle Vorgabe in VAr (VArCnst)	
Inverter.VArModCfг.VArCnstCfгDmd.VAr		Manuelle Blindleistungsvorgabe bei Wirkleistungsabgabe	40202	0	*	in var, pos: cap, übererregt	
Inverter.WModCfг.WMod		Betriebsart Wirkleistung	40210	1079	1077	1077: Manuelle Vorgabe in W (WCnst), 1079: Externe Vorgabe (WCtlCom)	
Inverter.WModCfг.WCnstCfг.W		Wirkleistungsbegrenzung in W	40212	6000	*	in W	
Inverter.WModCfг.WCtlComCfг.Dyn.WGraEna		Externe Wirkleistungsvorgabe, Begrenzung der Änderungsrate	44029	308	303	303: Aus (Off) 308: Ein (On)	

Abbildungsverzeichnis

1.1	Bestandene Prüfung bei Vergleich des gemessenen Verhaltens des EUT mit den aktualisierten Anforderungen	2
1.2	Vergleich der Antwortflächen in beiden Parametrierungen, Arbeitspunkt (a), Durchlauf 1 . .	3
1.3	Modellvorhersage und Messungen, PRNB-Parametersatz, Arbeitspunkt (a)	4
3.1	Verwendeter Laboraufbau der Studie	7
3.2	Ergebnisse der Vermessung der Eigendynamik der DC-Quelle	8
3.3	Verzögerung über der AC-Quelle	10
3.4	Leistungsänderung des EUT	12
3.5	Leistungsänderung des EUT, gefiltert	13
3.6	Vergleich des gemessenen Verhaltens des EUT mit den aktuellen Anforderungen nach VDE-AR-N4105:2018	14
3.7	Beispielhafte Grenzkurven nach Vorgabe des PRNB-Arbeitsdokuments [VDE]	15
3.8	Fehlgeschlagene Prüfung bei Vergleich des gemessenen Verhaltens des EUT mit den aktualisierten Anforderungen	16
3.9	Grenzwertverletzung bei Vergleich des gemessenen Verhaltens des EUT mit den aktualisierten Anforderungen	17
3.10	Bestandene Prüfung bei Vergleich des gemessenen Verhaltens des EUT mit den aktualisierten Anforderungen	18
3.11	Prüfdurchläufe mit dem gewählten PRNB-Parametersatz	20
4.1	Vermessene Arbeitspunkte des EUT im Versuchsverlauf	22
4.2	Versuche der Versuchsreihe (a)	23
4.3	Exemplarischer Verlauf der Größen am EUT im Verlauf einer Inselung	25
4.4	Antwortfläche der Nachlaufzeit über der Austauschleistung, Arbeitspunkt (a), Werkseinstellungen, Durchlauf 1	26
4.5	Antwortfläche der Nachlaufzeit über der Austauschleistung, Arbeitspunkt (b), Werkseinstellungen, Durchlauf 1	27
4.6	Vergleich der Antwortflächen in beiden Parametrierungen, Arbeitspunkt (a), Durchlauf 1 . .	28
4.7	Vergleich der Antwortflächen in beiden Parametrierungen, Arbeitspunkt (b), Durchlauf 2 . .	29
4.8	Vergleich der Antwortflächen mit und ohne aktiver Inselnetzerkennung, Arbeitspunkt (a), Werkseinstellungen	30
4.9	Vergleich der Antwortflächen mit und ohne aktiver Inselnetzerkennung, Arbeitspunkt (a), PRNB-Parametersatz	30
5.1	Verteilung und mittlere Nachlaufzeiten in beiden Parametrierungssätzen, Übersicht	32
5.2	Überprüfung der Normalverteilung - Alle Messungen	34
5.3	Zuordnung der Verteilungsabweichungen auf eine Antwortfläche	34
5.4	Unterteilung der Antwortfläche in drei Teilflächen über kategorischem Prädiktor	34
5.5	Überprüfung der Normalverteilung - $dPLimit \geq 1$	35
5.6	Überprüfung der Normalverteilung - $dPLimit < 1$	36
5.7	Homogenität der Varianz - Parametrierung	37
5.8	Übersicht der Beiträge der wichtigsten Faktoren im Regressionsmodell	40
5.9	Beiträge der Faktoren zum Modell, vergrößerte Darstellung	41
5.10	Residuen des präzisierten Modells - Verteilung	44

5.11	Analyse der Residuen über der Modellvorhersage	45
5.12	Partieller Regressionsplot des Modells, hier am Beispiel vollst. Modell und Prädiktor :	46
5.13	Cook's Distance (a) Einfluss der Residuen auf das Modell, (b) Normierte Messwerte	47
5.14	Modellvorhersage und Messungen, Werkseinstellungen, Arbeitspunkt (a)	48
8.1	Antwortfläche der Nachlaufzeit über der Austauschleistung, Arbeitspunkt (c), Werkseinstellungen, Durchlauf 1	53
8.2	Antwortfläche der Nachlaufzeit über der Austauschleistung, Arbeitspunkt (a), Werkseinstellungen, Durchlauf 2	54
8.3	Antwortfläche der Nachlaufzeit über der Austauschleistung, Arbeitspunkt (b), Werkseinstellungen, Durchlauf 2	54
8.4	Antwortfläche der Nachlaufzeit über der Austauschleistung, Arbeitspunkt (c), Werkseinstellungen, Durchlauf 2	55
8.5	Vergleich der Nachlaufzeiten in Werkseinstellungen vs. PRNB-Parametersatz. Arbeitspunkt (b), Durchlauf 1	55
8.6	Vergleich der Nachlaufzeiten in Werkseinstellungen vs. PRNB-Parametersatz. Arbeitspunkt (c), Durchlauf 1	56
8.7	Vergleich der Nachlaufzeiten in Werkseinstellungen vs. PRNB-Parametersatz. Arbeitspunkt (a), Durchlauf 2	56
8.8	Vergleich der Nachlaufzeiten in Werkseinstellungen vs. PRNB-Parametersatz. Arbeitspunkt (c), Durchlauf 2	57
8.9	Vergleich der Antwortflächen mit und ohne aktiver Inselnetzerkennung, Arbeitspunkt (b), Werkseinstellungen	57
8.10	Vergleich der Antwortflächen mit und ohne aktiver Inselnetzerkennung, Arbeitspunkt (b), PRNB-Parametersatz	58
8.11	Vergleich der Antwortflächen mit und ohne aktiver Inselnetzerkennung, Arbeitspunkt (c), Werkseinstellungen	58
8.12	Vergleich der Antwortflächen mit und ohne aktiver Inselnetzerkennung, Arbeitspunkt (c), PRNB-Parametersatz	59
8.13	Modellvorhersage und Messungen, Werkseinstellungen, Arbeitspunkt (c)	62
8.14	Modellvorhersage und Messungen, PRNB-Parametersatz, Arbeitspunkt (a)	63
8.15	Modellvorhersage und Messungen, PRNB-Parametersatz, Arbeitspunkt (b)	64

Tabellenverzeichnis

1.1 Vergleich der Anforderungen an die Dynamik der Antwort nach den untersuchten Vorgaben mit den ersten Messungen des Prüflings	1
3.1 Eingesetzte Komponenten des Versuchsaufbaus	7
3.2 Eingestellte Parameter der DC-Quelle	8
3.3 Technische Daten des für die Untersuchungen eingesetzten PV-Wechselrichters Sunny Tri-power 6.0 [SMA]	10
3.4 Kriterien nach VDE-AR-N4015:2018 an das dynamische Verhalten von Typ2-Anlagen und Speichern bei Frequenzabweichungen (P(f)-Frequenzstützung)	11
3.5 Gleichungen der Toleranzbänder für die Prüfung der Sprungantwort der PRNB	15
3.6 Parameter der Toleranzbänder für die Prüfung der Sprungantwort nach PRNB, diskutierte Parameter	15
3.7 Vorgabe von Frequenzsprüngen bei $s=2,9\%$, [VDE]	16
5.1 Test auf homogene Varianz mit dem Levene-Test	38
5.2 Varianzanalyse des vollständigen quadratischen Modells	39
5.3 Finales präzisiertes Model zur Messdatenanalyse	42
5.4 Zusammenfassende Darstellung der Varianzanalyse des präzisierten Modells	43
8.1 Technische Daten der DC-Last zur DC-Quellenvermessung	52
8.4 Kruskal-Wallis Test auf Unterschiede in beiden Parametrierungsgruppen. Der p-Wert von 0.43 lässt darauf schließen, dass hiermit kein Unterschied detektiert werden kann.	59
8.5 Vollständiges quadratisches Regressionsmodell	60
8.6 Ergebnisse der Varianzanalyse des präzisierten models	61
8.2 Angepasste Parameter für den PRNB-Parametersatz (1)	65
8.3 Angepasste Parameter für den PRNB-Parametersatz (2)	66

Literatur

- [Jan09] Ben Jann. "Diagnostik von Regressionsschätzungen bei kleinen Stichproben (mit einem Exkurs zu logistischer Regression)". In: Klein aber fein! Hrsg. von Peter Kriwy und Christiane Gross. VS Research Forschung und Entwicklung in der analytischen Soziologie. Wiesbaden: VS Verl. für Sozialwiss, 2009, S. 93–125. isbn: 978-3-531-16526-4. doi: 10.1007/978-3-531-91380-3\textunderscore5. url: https://www.soz.unibe.ch/ueber_uns/personen/jann/publications_of_ben_jann/e131246/e131268/diagnostik_ger.pdf.
- [Sch+10] Emanuel Schmider u. a. "Is It Really Robust?" In: Methodology 6.4 (2010), S. 147–151. issn: 1614-1881. doi: 10.1027/1614-2241/a000016.
- [Boe+15] Boemer, J.C. u. a. Weiterentwicklung des Verhaltens von Erzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz im Fehlerfall - Systemsicherheitsaspekte. 2015.
- [VDE16] VDE|FNN. FNN-Studie: Wirksame Verfahren zur Inselnetzerkennung in 0,4-kV-Netzen: Inselnetzerkennung. Hrsg. von VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V und .Forum Netztechnik/Netzbetrieb im VDE. 2016. url: <https://www.vde.com/de/fnn/themen/sicherer-betrieb-dez/studien/studie-inselnetzerkennung>.
- [Bla+17] María J. Blanca u. a. "Non-normal data: Is ANOVA still a valid option?" In: Psicothema 29.4 (2017), S. 552–557. doi: 10.7334/psicothema2016.383.
- [PSS17] Sebastian Palm, Peter Schegner und Tobias Schnelle. "Measurement and modeling of voltage and frequency dependences of low-voltage loads". In: 2017 IEEE Power & Energy Society General Meeting. IEEE, 2017, S. 1–5. isbn: 978-1-5386-2212-4. doi: 10.1109/PESGM.2017.8273781.
- [Win+23] Björn Oliver Winter u. a. "Limitations of current norms to predict reliable islanding detection by example of two detection methods for grid-forming inverters". In: Renewable Energy Grid Integration Week 2023. 2023.
- [SMA] SMA Solar Technology AG. "Sunny Tripower 3.0 / 4.0 / 5.0 / 6.0 - Datenblatt". In: (). url: <https://files.sma.de/downloads/STP3-6-3AV-40-DS-de-40.pdf>.
- [VDE] VDE|FNN, PG SysAnf. unveröffentlichtes Arbeitsdokument zur PRNB-Parametrierung und -prüfung vom 02.03.2023.
- [DIN14] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. Photovoltaik-Wechselrichter für den Anschluss an das Stromversorgungsnetz - Prüfverfahren für Maßnahmen zur Verhinderung der Inselbildung: Utility-interconnected photovoltaic inverters - Test procedure of islanding prevention measures. Berlin, November 2014.
- [VDE18] VDE Verband der Elektrotechnik, Elektronik, Informationstechnik e.V. TAR 4105 - Erzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz - Technische Mindestanforderungen für Anschluss und Parallelbetrieb von Erzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz: Generators connected to the low-voltage distribution network - Technical requirements for the interconnection to and parallel operation with low-voltage distribution networks. Berlin, November 2018.
- [WSE23] Björn Oliver Winter, Julian Schwung und Bernd Engel. "Robust Detection Method of Low-Voltage Islanding for Grid-Forming Inverters Operated in Conjunction with Existing PV Inverters". In: 2023 IEEE 50th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC). IEEE, 6/11/2023 - 6/16/2023, S. 1–7. isbn: 978-1-6654-6059-0. doi: 10.1109/PVSC48320.2023.10360097.