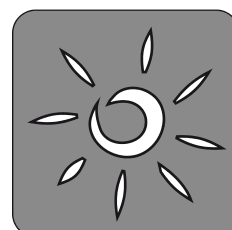
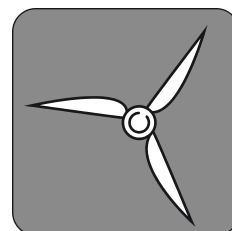


Komponentenbasierte Einheitszertifizierung

Vorschlag zur Umsetzung einer
komponentenbasierten Einheitszertifizierung in
den Technischen Richtlinien (TR 3, TR 4, TR 8)

FGW Arbeitskreis Komponentenbasierte
Einheitszertifizierung

Revision 00
Stand 03.09.2026



Herausgeber:
FGW e.V.
Fördergesellschaft Windenergie
und andere Dezentrale Energien

An der inhaltlichen Ausgestaltung des Berichts haben wesentlich mitgewirkt:

Gesa Quistorf (Fraunhofer-Institut für Windenergiesysteme IWES), Obfrau des AKs

Moritz Andrejewski (Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin)

Thomas Dreyer (Siemens Gamesa Renewable Energy Deutschland GmbH)

Sebastian Frahm (WRD Wobben Research and Development GmbH)

Uwe Jassmann (R&D Test Systems ApS)

Jonas Lesen (Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik IEE)

Daniel Lucht (Moeller Operating Engineering GmbH)

Christian Mehler (Hochschule Bremen, Fraunhofer-Institut für Windenergiesysteme IWES)

Heiko Röttgers (WRD Wobben Research and Development GmbH)

Ammar Salman (Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE)

FGW Arbeitskreis Komponentenbasierte Einheitenzertifizierung

03.09.2026

Stand

Herausgeber

FGW e.V.

Fördergesellschaft Windenergie und andere Dezentrale Energien

Oranienburger Straße 45

10117 Berlin

Tel. +49 (0)30 30101505-0

E-Mail info@wind-fgw.de

Internet www.wind-fgw.de

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliothek; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrecht zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Herausgebers. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Aus Gründen der einfacheren Lesbarkeit wird auf die geschlechtsneutrale Differenzierung verzichtet. Entsprechende Begriffe gelten im Sinne der Gleichbehandlung grundsätzlich für beide Geschlechter.

Folgende Teile der Technischen Richtlinien der FGW sind erhältlich:

- Teil 1:** Bestimmung der Schallemissionswerte
- Teil 2:** Bestimmung von Leistungskennlinien und standardisierten Energieerträgen
- Teil 3:** Bestimmung der elektrischen Eigenschaften von Erzeugungseinheiten und -anlagen, Speicher sowie für deren Komponenten am Mittel-, Hoch- und Höchstspannungsnetz
- Teil 4:** Anforderungen an Modellierung und Validierung von Simulationsmodellen der elektrischen Eigenschaften von Erzeugungseinheiten und -anlagen, Speicher sowie deren Komponenten
- Teil 5:** Bestimmung und Anwendung des Referenzertrages
- Teil 6:** Bestimmung von Windpotenzial und Energieerträgen
- Teil 7:** Betrieb und Instandhaltung von Kraftwerken für erneuerbare Energien
- Rubrik A:** Allgemeiner Teil
- Rubrik A1:** Anlagenverantwortung
- Rubrik B1:** Fachspezifische Anwendungserläuterungen für Nachweisprüfungen
- Rubrik B2:** Prüfung der elektrischen Betriebsmittel und Infrastruktur
- Rubrik B3:** Fachspezifische Anwendungserläuterung zur Überwachung und Überprüfung von Gründung und Tragstrukturen (GuT) bei Windenergieanlagen
- Rubrik D2:** Zustands-Ereignis-Ursachen-Schlüssel für Erzeugungseinheiten (ZEUS)
- Rubrik D3:** Globales Service Protokoll (GSP)
- Rubrik D3 – Anhang A:** XML-Schemadokumentation
- Teil 8:** Zertifizierung der elektrischen Eigenschaften von Erzeugungseinheiten und -anlagen, Speicher sowie für deren Komponenten am Stromnetz
- Teil 9:** Bestimmung der hochfrequenten Emissionen von regenerativen Energieerzeugungseinheiten
- Teil 10:** Bestimmung der Standortgüte nach Inbetriebnahme

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	9
1.1	Hintergrund	9
1.2	Zielsetzung	10
1.3	Dokumentenstruktur	10
2	Prozess der komponentenbasierten Einheitenzertifizierung	11
2.1	Motivation	11
2.2	Prozess und Logik der komponentenbasierten Einheitenzertifizierung	12
3	Test-Kategorien	14
3.1	Funktionstest	14
3.1.1	Definition	14
3.1.2	Anforderung	14
3.2	Fähigkeitstest	14
3.2.1	Definition	14
3.2.2	Anforderungen	14
3.3	Performancetest	14
3.3.1	Definition	14
3.3.2	Anforderungen	15
3.4	Referenztest	15
3.4.1	Definition	15
3.4.2	Anforderungen	15
4	Prüfumgebung	16
4.1	Definition der Prüfumgebungen	16
4.1.1	Model-in-the-Loop (Simulation)	17
4.1.2	Software-in-the-Loop (Sil)	17
4.1.3	Processor-in-the-Loop (Pil)	18
4.1.4	Controller-Hil (CHil)	18
4.1.5	Power-Hil (PHil)	19
4.1.6	Mechanical-Hil (MHil)	19
4.1.7	Vereinfachte Komponentenprüfstände	19
4.2	Anforderungen / Hinweise bzw. Rahmenbedingungen an die Prüfumgebungen	20
4.3	Verifikation der Prüfumgebung	21
4.3.1	qualifizierung der Prüfumgebung	22
4.4	Skalierung	22
4.4.1	Definition	23
4.4.2	Entwicklungsskalierung (Reglervalidierung in skaliertem Prüfumgebung)	23

4.4.3	Prüfstand / Prüfungsumgebungsskalierung	24
4.4.4	Produktfamilienskalierung	24
5	Komponenten der EZE	25
5.1	WEA	26
5.2	VKM.....	30
5.3	PV	34
5.4	Speicher.....	37
6	Messverfahren.....	41
6.1	Tests der FGW TR3 Rev. 26 [6]	42
6.1.1	Allgemeines.....	42
6.1.2	WirkleistungsAbgabe.....	43
6.1.3	Blindleistungsbereitstellung	46
6.1.4	Netzurückwirkungen	51
6.1.5	Trennung der EZE vom Netz	55
6.1.6	Nachweis der Zuschaltbedingungen	56
6.1.7	Verhalten bei Störungen im Netz (FRT).....	56
6.1.8	Nachweis des Arbeitsbereichs hinsichtlich Spannung und Frequenz (nur für PV-Wechselrichter mit $p_n \leq 100$ kW).....	58
6.2	Zusammenfassende Übersicht der Testverfahren	59
7	Modellbildung & Simulation	61
7.1	Defintionen mit Bezug zur Modellbildung	61
7.2	Modelldefinitionen	62
7.2.1	Emulationsmodelle.....	62
7.2.2	Simulationsmodelle	62
7.3	Validierung von Simulationsmodellen	63
8	Handlungsempfehlungen	66
8.1	Zertifizierungsprozess	66
8.2	Validierung & Modelle.....	67
8.3	Prüfumgebungen & Testverfahren/Messvorschriften	68
9	Veröffentlichungen und Projekte.....	71
10	Literaturverzeichnis	73

Begriffe und Definitionen

EZE-Regler: Der Begriff "EZE-Regler" bedeutet, dass alle relevanten Regelungsfunktionen berücksichtigt sind. Eine oder mehrere Regelungsfunktionen können in separaten und eigenständigen Komponenten bzw. Reglern umgesetzt sein. Der EZE-Regler kann auch Teil des EZA-Reglers sein, wie beispielsweise ein separater Wirkleistungsregler, Blindleistungsregler oder Spannungsregler (AVR). Darüber hinaus kann ein EZE-interner "zentraler" / "übergeordneter" Regler eingesetzt sein, welcher die entsprechenden Signale auf EZE-Ebene verarbeitet.

Für den Fall, dass separate Regler eingesetzt werden, ist dies in den nachfolgenden Kapiteln unter dem Begriff „EZE-Regler“ zu berücksichtigen, dass es für jede Regelungsfunktion / jeden Regler separat zu prüfen ist.

*Hinweis zum **EZE-Modell:*** Der Begriff EZE-Modell wird gleichbedeutend mit dem des endgültigem Simulationsmodells gemäß TR 4 [1] verwendet, jedoch mit dem Unterschied das es nicht zu jedem Zeitpunkt der Betrachtungen vollständig durch Feldmessungen validiert ist.

Komponente: Eine Komponente, unabhängig ob Software oder Hardware, definiert sich über eine oder wenige spezifische / abgrenzbare Funktion(en), die zur Funktion des Gesamtsystem der EZE beitragen. Komponenten können damit, als austauschbare komplexe Elemente verstanden werden, die eine geschlossene Funktionseinheit bilden.

Subsystem: Werden mehrere Komponenten zusammengefasst, so bilden sie ein (Sub-) System.

Hinweis: Im Dokument wird zur Verbesserung der Lesbarkeit häufig der Begriff „Komponente“ verwendet, schließt dann auch die Betrachtung von Subsystemen ein.

WEA-Typ III: WEA vom Typ III verfügen über einen doppelt gespeisten Asynchrongenerator, bei dem der Stator direkt an das Netz und der Rotor über ein Umrichtersystem an das Netz angeschlossen ist. WEA vom Typ III verfügen entweder über einen Chopper oder eine Crowbar zur Sicherstellung der FRT-Fähigkeit.

WEA-Typ IV: WEA vom TYP IV verfügen über Synchron- oder Asynchrongeneratoren und werden über einen Vollumrichter an das Netz angeschlossen. Werden direkt angetriebene Synchrongeneratoren eingesetzt, besitzen WEA des TYPs IV kein Getriebe. WEA vom Typ IV mit Choppern am Zwischenkreis des Umrichters können in vielen Fällen unter Vernachlässigung der aerodynamischen und mechanischen Teile der Windenergieanlage modelliert werden.

Hinweis zu VKM: Innerhalb des Dokumentes wird VKM als Synonym für Typ I-EZE mit unterschiedlichen Primärenergieträgern verwendet.

Abkürzungsverzeichnis

AK	Arbeitskreis
CHiL	Controller Hardware in the Loop
DUT	Device under test
EZA	Erzeugungsanlage
EZE	Erzeugungseinheit
FAEE	Fachausschuss Elektrische Eigenschaften
FNN	Forum Netztechnik/Netzbetrieb
FRT	Fault Ride Through
HW	Hardware
kEZ	komponentenbasierte Einheitenzertifizierung
MHiL	Mechanical Hardware in the Loop
MiL	Model in the Loop
OS	Oberschwingungen
PHiL	Power Hardware in the Loop
PiL	Processor in the Loop
PV	Photovoltaik
SiL	Software in the Loop
SW	Software
TAR	Technische Anschlussregel
TR	Technische Richtlinien
VKM	Verbrennungskraftmaschine
WEA	Windenergieanlagen

1 Einleitung

1.1 HINTERGRUND

Die stetig steigenden Anforderungen an die Zertifizierungsprozesse, getrieben durch nationale Forderungen, führen zu immer größeren Aufwänden und Herausforderungen für alle an den Prozessen beteiligten Stakeholder, wie Anlagenplaner, Hersteller, Anlagenbetreiber, Netzbetreiber, Messinstitute sowie Zertifizierungsstellen.

Die technischen Anschlussregeln VDE-AR-N 4110 / 4120 / 4130 [2] [3] [4] sowie der Network Code Requirements for Generators (NC RfG) [5] fordern oder erlauben grundsätzlich die Alternative einer Komponentenzertifizierung. Einzelne Komponenten können bereits heute nach den technischen Richtlinien der FGW einem Konformitätsprozess unterzogen und zertifiziert werden.

Des Weiteren besteht durch die Technischen Anschlussrichtlinien die Möglichkeit Herstellerprüfungen auf Testständen von relevanten Baugruppen innerhalb des Zertifizierungsprozesses zuzulassen, wenn die Äquivalenz zu Feldmessungen gegeben ist (vgl. VDE-AR-N 4110 / 4120 / 4130, Kapitel 11.2.1 [2] [3] [4]).

Die Validierung und Zertifizierung der elektrischen Eigenschaften des Umrichtersystems als zentrale Komponente von Photovoltaik-Erzeugungseinheiten (PV-EZE) und Speicher ist als etabliertes Verfahren anzusehen. Innerhalb der FGW TR 3 Rev. 26, Anhang D [6] werden zusätzlich die Vermessung von elektrischen Eigenschaften von Windenergieanlagen (WEA) auf System- (Gondel) und Subsystemprüfständen (elektrischer Triebstrang) beschrieben. Eine Vermessung der elektrischen Eigenschaften von WEA auf Komponentenebene ist jedoch nicht weiter definiert.

Für WEA wird international an der Definition der elektrischen Vermessung auf Komponentenebene gearbeitet. Die IEC/TS 61400-21-4 ED 1: Measurement and assessment of electrical characteristics – Wind turbine components and subsystems (*„Messung und Bewertung elektrischer Kennwerte – Komponenten und Teilsysteme von Windenergieanlagen“*) [7] definiert die Durchführung und Auswertung der elektrischen Vermessung von Systemprüfständen bis zu den Komponentenprüfständen.

Die Anforderungen zur Realisierung kürzerer Entwicklungszeiten für neue Erzeugungseinheiten (EZE) mit weiteren aufwendigen Verpflichtungen zum Nachweis der Netzanschlusskonformität steigen. Schon bei der Ankündigung neuer EZE werden von den Herstellern noch vor der Fertigstellung des Prototypens von ihren Kunden und Netzbetreibern valide Modelle gefordert. Um die Zeit zur Marktreife (*„Time-to-Market“*) bei den Herstellern zu reduzieren und gleichzeitig die Prüfqualität zu erhöhen und frühzeitig im Entwicklungsprozess valide Modelle zur Verfügung stellen zu können, werden Feldtests an den Prototypen alternativ bereits zum Teil mittels Prüfstandtests auf System- und Subsystemprüfständen in einer Laborumgebung durchgeführt und die Validierung der elektrischen Eigenschaften auf Komponentenebene angestrebt.

1.2 ZIELSETZUNG

Am 08.09.2020 erfolgte der Beschluss des FAEE einen Arbeitskreis zur komponentenbasierten Einheitenzertifizierung mit folgenden Inhalten einzurichten:

- Beschreibung des grundsätzlichen Ablaufs für die komponentenbasierte Einheitenzertifizierung für EZE und Speicher.
- Erarbeitung einer Strategie zur Einarbeitung / Einführung der komponentenbasierten Einheitenzertifizierung für alle EZE-Typen und Speicher in die TR 3, TR 4, TR 8.
- Erstellung von Handlungsempfehlungen für die jeweiligen AKs TR 3, TR 4, TR 8
- Begleitung der Integration des Verfahrens in die TRs (TR 3, TR 4, TR 8).

Auf Basis der aufgeführten Aspekte lassen sich für den Arbeitskreis zwei übergeordnete Ziele formulieren:

- Der komponentenbasierte Prozess muss eine frühzeitige Validierung der elektrischen Eigenschaften auf Komponentenebene ermöglichen und umfasst damit nicht nur die Vermessung der Komponenten, sondern auch die Erweiterung der bestehenden Verfahren zur Modellvalidierung und eine Anpassung des Nachweisprozesses.
- Der komponentenbasierte Prozess beinhaltet die Entwicklung eines zukünftigen Mess- & Validierungsverfahrens, welches sich besser in den Entwicklungspfad neuer EZE integriert, erneute Validierung und Rezertifizierung kostengünstig ermöglicht, einen großen Gültigkeitsbereich aufweist, zuverlässig und vertrauenswürdig ist und für alle EZE-Typen anwendbar ist.

Die im Laufe des Jahres 2024 federführend durch die Projektgruppe Systemanforderung des VDE FNN erarbeiteten Anforderungen und Nachweisverfahren des netzbildenden und systemstützenden Verhaltens von EZE waren nicht Kernbestandteil der Arbeit des Arbeitskreises komponentenbasierte Einheitenzertifizierung (AK kEZ). Prinzipiell lässt sich das beschriebene Vorgehen zukünftig auf entsprechende Fragestellungen übertragen.

1.3 DOKUMENTENSTRUKTUR

Im Folgenden wird zuerst der entwickelte Prozess der komponentenbasierten Einheitenzertifizierung und der grundsätzliche Ablauf dargestellt sowie mögliche Einsatzbereiche beschrieben. Im Anschluss werden einzelne Prozessschritte detailliert dargestellt. So werden unterschiedliche Testarten, Prüfumgebungen sowie die einzelnen Komponenten unterschiedlicher EZE und Speichersysteme definiert. Auf Basis dieser Definitionen werden die Tests der FGW TR 3 Rev. 26 [6] nach Testart, einzusetzender Prüfumgebung sowie relevante Komponenten charakterisiert. Innerhalb der Modellbildung werden in einem ersten Schritt Definitionen für die Modelle der Prüfumgebungen und der Komponentenmodelle, welche über den aktuellen Stand des Begriffs und Definitionsliste der FGW hinausgehen, aufgeführt. Daran anschließend wird aufgezeigt, an welchen Prozessstellen Plausibilitätsprüfungen und Validierungen von Modellen sinnvoll wären. Abschließend erfolgt die Formulierung von Handlungsempfehlungen, welche ebenfalls Empfehlungen zur Einarbeitung bzw. Einführung der komponentenbasierten Einheitenzertifizierung in die TR 3 [6], TR 4 [1] und TR 8 [8] beinhalten.

2 Prozess der komponentenbasierten Einheitenzertifizierung

2.1 MOTIVATION

Die Grundlagen für eine erfolgreiche komponentenbasierte Einheitenzertifizierung sind detaillierte Kenntnisse der EZE und ihrer Komponenten, abgesichert durch eine umfangreiche Messdaten- und Modellbasis. Viele EZE-Hersteller verfügen aufgrund ihrer langjährigen Erfahrung in der Entwicklung von EZE und der Vermessung ihrer elektrischen Eigenschaften über breites Wissen und umfangreiche Messdaten. Innerhalb der Entwicklung eines neuen Produktes wird auf diese Basis zurückgegriffen. Dabei werden parallel zur Hardwareentwicklung Modelle für die Nachweisführung der elektrischen Eigenschaften erstellt. Ein übliches Beschreibungsmodell für die Produktentwicklung ist das sogenannte V-Modell [VDI/VDE 2206:2021-11], wie es links in Abbildung 1 dargestellt ist.

In der **Entwicklungsphase** (linker Ast) werden die Anforderungen, die an die EZE gestellt werden, in Anforderungen an die System-, Subsystem- und Komponentenebene übersetzt, um die Subsysteme und Komponenten entsprechend zu entwickeln.

Klassischerweise werden innerhalb der **Validierungsphase** (rechter Ast) auf verschiedenen Ebenen Tests durchgeführt, um die Funktionen und Eigenschaften zu prüfen, mit den Anforderungen abzugleichen und validierte Modelle der Komponenten und Subsysteme zu erstellen. Erst am Ende der Validierungsphase erfolgt auf Systemebene oder in Feldmessungen die Vermessung und Prüfung der elektrischen Eigenschaften der EZE in Bezug auf die Anforderungen aus den Netzanschlussrichtlinien und somit die Modellvalidierung der EZE als Ganzes.

Der vorliegende Vorschlag einer komponentenbasierten Einheitenzertifizierung nutzt Tests, die häufig ohnehin Teil der Validierungsphase sind. Wie in Abbildung 1 gezeigt, sollen innerhalb der Entwicklungsphase neuer EZE oder bei einer Rezertifizierung ausgehend von Komponenten- und Subsystemtests, frühzeitig valide Modelle von Komponenten, Subsystemen und EZE bereitgestellt werden. Die Nutzung vorhandener Prüfstände auf Komponenten- und Subsystemebene verkürzt den Weg zu validen Modellen erheblich.

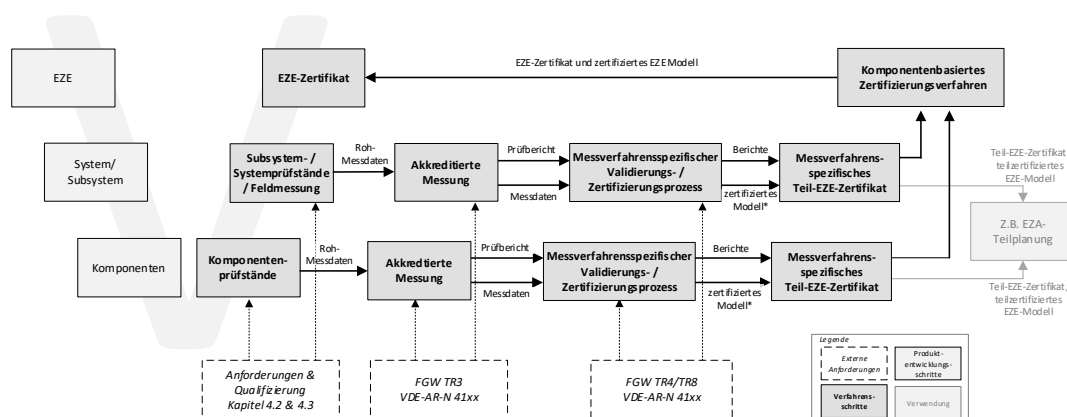


Abbildung 1: Grundprinzip des vorgeschlagenen Prozesses der komponentenbasierten Einheitenzertifizierung

2.2 PROZESS UND LOGIK DER KOMPONENTENBASIERTEN EINHEITENZERTIFIZIERUNG

Wie in Abbildung 1 angedeutet, ist in der Regel sowohl die Entwicklungs- als auch die Validierungsphase in Subsysteme und Komponenten untergliedert. Das elektrische Modell einer EZE ist ebenfalls häufig aus Modellen von Subsystemen und Komponenten aufgebaut. Diese Modelle sind für ausgewählte elektrische Eigenschaften und Untersuchungen zweckmäßig und für andere nicht.

Die grundsätzliche Idee der komponentenbasierten Einheitenzertifizierung ist, die EZE in relevante Komponenten zu zerlegen, sich für die Vermessung jedoch, nicht an den Komponenten, sondern den durchzuführenden Tests und die zu erfüllenden Anforderungen der Netzanschlussrichtlinien zu orientieren. Statt diese Anforderungen auf Komponentenebene zu übersetzen, wird definiert, welche Komponenten der EZE maßgeblichen Einfluss auf den jeweiligen Test und sein Ergebnis haben. Diese sollten Bestandteil des Tests sein. Dadurch kann direkt gegenüber den Anforderungen aus den Netzanschlussrichtlinien getestet werden.

Dieses prinzipielle Verfahren ist in Abbildung 1 dargestellt. Im V-Modell werden aus den Komponentenprüfständen und Subsystem-, Systemprüfstände sowie Feldmessungen Rohdaten aufgenommen. Je nach ausgewähltem Messverfahren, werden zur Vermessung verschiedene Komponenten und zuvor qualifizierte Prüfumgebungen unterschiedlicher Komplexität eingesetzt. Die Prüfumgebungen werden in Kapitel 4 definiert, die Anforderungen und Ansätze zur Verifikation, sowie die Qualifizierung werden dort beschrieben. Anhand der Prüfumgebungen werden akkreditierte Messungen, gemäß üblichen Anforderungen der TR3, durchgeführt, die resultierenden Prüfberichte sowie Messdaten finden im weiteren Prozess der komponentenbasierten Einheitenzertifizierung Verwendung.

Nach den akkreditierten Messungen durchlaufen die Ergebnisse – wie in Abbildung 1 gezeigt – einen messverfahrensspezifischen Validierungs- und Zertifizierungsprozess nach TR 4 [1] bzw. TR 8 [8]. Für jedes einzelne Messverfahren kann dabei ein eigenes Teil-EZE-Zertifikat erstellt werden. Dieses Zertifikat bestätigt sowohl die geprüfte elektrische Eigenschaft des Prüflings als auch das dafür verwendete und messverfahrensspezifisch zertifizierte Modell. Dieses messverfahrensspezifische Teil-EZE-Zertifikat kann beispielsweise direkt in der EZA-Planung eingesetzt werden.

Werden an einem Prüfling mehrere elektrische Eigenschaften auf unterschiedlichen Prüfumgebungen charakterisiert, entstehen entsprechend mehrere voneinander unabhängige messverfahrensspezifische Teil-EZE-Zertifikate. Jedes dieser messverfahrensspezifischen Teil-EZE-Zertifikate besitzt ausschließlich Gültigkeit im Kontext des jeweiligen Tests. Innerhalb des komponentenbasierten Einheitenzertifizierungsverfahrens werden die messspezifischen Teil-EZE-Zertifikate unter Berücksichtigung eines spezifischen Zertifizierungsprozesses (siehe Abschnitt 7.3) zu einem EZE-Zertifikat zusammengeführt (vgl. Abbildung 1).

Zum gesamten Prozess der komponentenbasierten Einheitenzertifizierung müssen zunächst Erfahrungswerte gesammelt werden, inwieweit das angewandte Vorgehen im Bereich der Vermessung und Modellvalidierung zuverlässig und reproduzierbar ist. Daher ist im Rahmen der Qualifizierung einer Prüfumgebung einmalig eine Absicherung durchzuführen, beispielsweise in Form eines Referenztests (siehe Abschnitt 3.4), bei dem die Vermessung der elektrischen Eigenschaften des Prüflings auf dem jeweiligen Prüfumgebungen mit Messungen in einer höherwertigen Prüfumgebung – wie etwa Systemprüfständen oder reproduzierten Feldmessungen an der gesamten EZE – abgeglichen wird. Wird durch die Absicherung gezeigt, dass Prüfumgebungen in der Lage sind den Feldtest zu ersetzen, kann der oben beschriebene komponentenbasierte Zertifizierungsprozess wie folgt angepasst werden:

Für die Durchführung der Messungen dürfen ausschließlich Prüfumgebungen eingesetzt werden, die für alle relevanten Prüfungen vollständig qualifiziert sind und deren Leistungsfähigkeit gemäß den geltenden Anforderungen nachgewiesen wurde.

Die erzeugten Messergebnisse sind dem Validierungs- und Zertifizierungsprozess nach TR 4 [1] bzw. TR 8 [8] zuzuführen. Werden alle definierten Anforderungen und Toleranzen eingehalten und wird das zugehörige EZE-Modell erfolgreich validiert, können diese Messergebnisse unmittelbar zur Erteilung des EZE-Zertifikats herangezogen werden.

3 Test-Kategorien

Jedes Testverfahren innerhalb der FGW TR 3 [6] hat zum Ziel, ein für die Systemstabilität des Stromnetzes relevantes elektrisches Verhalten oder eine elektrische Charakteristik des Prüflings zu prüfen oder zu vermessen.

Dabei kann zwischen der Prüfung von elektrischen Funktionen, der Vermessung von bestimmten elektrischen Fähigkeiten, sowie der Nachweis einer elektrischen Leistungsfähigkeit (Performance) unterschieden werden.

Innerhalb der definierten Tests der FGW TR 3 [6] beinhaltet ein Einzeltest im Feld oder auf Prüfständen prinzipbedingt immer alle oder mehrere der nachfolgend aufgeführten und definierten Testarten (Funktions-, Fähigkeits-, und Performancetest). Bei einem Test relevanter Komponenten auf Systemprüfständen oder der gesamten EZE im Feld erfolgt eine ganzheitliche Vermessung der elektrischen Eigenschaften.

Im Folgenden werden die einzelnen Testarten definiert und Anforderungen an den Prüfstand aufgezeigt, um die Tests dieser Testart durchzuführen. Ein Überblick der aktuellen Tests sowie den zugehörigen Testarten der FGW TR 3 Rev. 26 [6] wird in Abschnitt 6.2 gegeben.

3.1 FUNKTIONSTEST

3.1.1 DEFINITION

Ein Funktionstest (Functionality-Test) wird durchgeführt, um die eingesetzte Software und/oder die Zielhardware auf eine definierte Funktion zu überprüfen.

3.1.2 ANFORDERUNG

Für den Funktionstest ist kein Leistungsfluss auf dem Prüfstand erforderlich.

3.2 FÄHIGKEITSTEST

3.2.1 DEFINITION

Ein Fähigkeitstest (Capability-Test) stellt einen Hardwaretest dar und wird durchgeführt, um die Leistungsfähigkeit eines Prüflings zu überprüfen oder zu vermessen.

Beispielsweise dient der Fähigkeitstest dazu, die Betriebsgrenzen eines Prüflings zu vermessen und vom Hersteller angegebene (maximale) technische Größen zu überprüfen.

3.2.2 ANFORDERUNGEN

Diese Testart erfordert einen Leistungsfluss auf dem Prüfstand. Die Berücksichtigung der gesamten EZE-Dynamik ist nicht notwendig, sodass diese Tests ohne einen Hardware-in-the-Loop (HiL) Ansatz auf dem Prüfstand durchgeführt werden können.

3.3 PERFORMANCETEST

3.3.1 DEFINITION

Ein Performancetest stellt einen Hardwaretest dar und wird durchgeführt, um das Betriebsverhalten und die Dynamik eines Prüflings unter Berücksichtigung der gesamten EZE-Dynamik gegenüber definierten Anforderungen aus den VDE-AR-N 4110 / 4120 / 4130 [2] [3] [4] zu überprüfen oder zu vermessen. Der Performancetest kann den Funktions- und Fähigkeitstests abdecken.

3.3.2 ANFORDERUNGEN

Diese Testart erfordert einen Leistungsfluss auf dem Prüfstand. Für den Performance-Test muss die gesamte EZE-Dynamik abgebildet werden, sodass diese Tests einen HiL-Ansatz auf dem Prüfstand voraussetzen.

3.4 REFERENZTEST

3.4.1 DEFINITION

Er dient zur Überprüfung der gesamten EZE-Dynamik und dem fehlerfreien Zusammenspiel der einzelnen Komponenten der EZE oder des Speichers. Weist eine EZE wesentliche technische Weiterentwicklungen oder Neuerungen im Sinne eines Prototyps auf (vgl. VDE-AR-N 4110 / 4120 / 4130, Kapitel 12 [2] [3] [4]), ist es empfohlen, dass ein Referenztest durchgeführt wird, um das neuentwickelte Gesamtsystem der EZE mittels eines realen Feldtests zu vermessen. Der Referenztest kann dann zur Plausibilisierung des Prozesses der komponentenbasierten Einheitenzertifizierung genutzt werden.

3.4.2 ANFORDERUNGEN

Der Referenztest erfordert einen Leistungsfluss und wird am Gesamtsystem durchgeführt. Grundlage sind die aktuellen Verfahren zur Vermessung nach TR 3 [6] und Validierung der Modelle gemäß TR 4 [1].

4 Prüfumgebung

Aus den definierten Testarten in Kapitel 3 lassen sich die notwendigen Prüfumgebungen ableiten, die im Folgenden definiert werden. Im Anschluss werden benötigte Rahmenbedingungen an die Prüfumgebungen formuliert. Um die Güte der Messungen auf unterschiedlichen Prüfständen innerhalb des Zertifizierungsprozesses bewerten zu können, ist es sinnvoll, technische Anforderungen für Prüfstände zu definieren und einen Prozess zur Qualitätssicherung für Prüfstände zu entwickeln.

4.1 DEFINITION DER PRÜFUMGEBUNGEN

Für die Untersuchung und Bewertung einzelner Komponenten (und des sich daraus ergebenden Verhaltens der gesamten EZE) können unterschiedliche Prüfumgebungen für den Test von Komponenten- und/oder EZE-Eigenschaften sinnvoll sein. Die Abbildung 2 zeigt die grundsätzliche Struktur einer EZE mit mechanischen, elektrischen und leistungselektronischen Teilsystemen, die mit dem EZE-Regler (Control System) kommunizieren, der entscheidenden Einfluss auf das Gesamtverhalten der EZE besitzt.

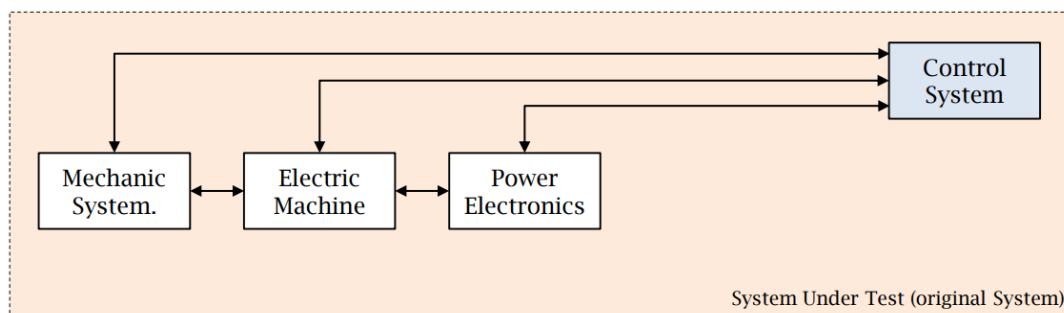


Abbildung 2: Zu testendes „Original“-System einer EZE (bestehend aus unterschiedlichen Teilsystemen sowie EZE-Regler)

4.1.1 MODEL-IN-THE-LOOP (SIMULATION)

Ohne den Einsatz von zu vermessender Hardware in einer Prüfumgebung, erfolgt eine Simulation des Modells der EZE und seiner Komponenten, sodass die entscheidenden Merkmale der EZE erfasst und ausreichend genau abgebildet werden.

In Kombination mit dem Modell des EZE-Reglers lässt sich grundsätzlich überprüfen, ob dieser das Betriebsverhalten der EZE gemäß den bestehenden Anforderungen beeinflussen kann. Dieser Schritt wird als Model-in-Loop (MiL) bezeichnet (Abbildung 3) und beinhaltet somit einen Test des Regelalgorithmus am simulierten Modell der EZE. Zeigt die EZE (in Kombination mit dem EZE-Regler und den relevanten Komponenten) das gewünschte Verhalten, erfolgt in der Regel eine Aufzeichnung von unterschiedlichen Systemparametern. Diese Daten können zur Überprüfung des EZE-Verhaltens in einer späteren Phase des Entwicklungs- oder Zertifizierungsprozesses verwendet werden.

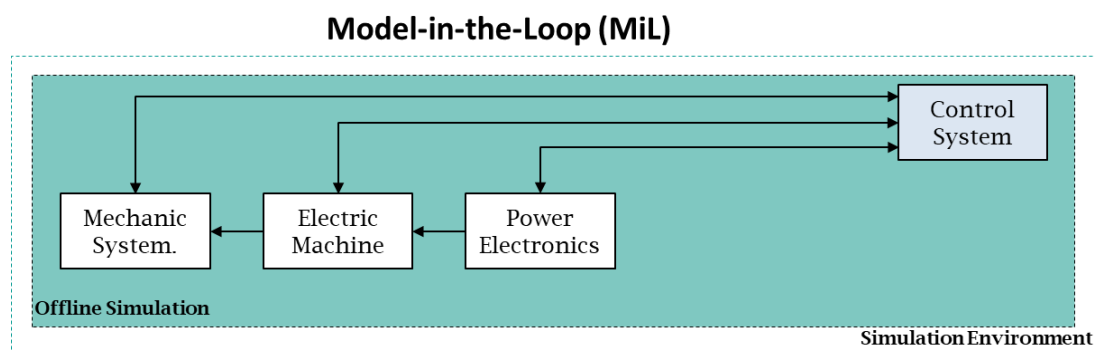


Abbildung 3: Simulation einer EZE (Teilsysteme sowie EZE-Regler)

4.1.2 SOFTWARE-IN-THE-LOOP (SiL)

Aufbauend auf der Durchführung einer reinen Simulation (Model-in-the-Loop / MiL), kann eine Prüfumgebung verwendet werden, bei der Quellcode generiert wird, um das Modell des EZE-Reglers zu ersetzen. Mit einer Einbindung des Quellcodes des EZE-Reglers in das Simulationsmodell entsteht eine Prüfumgebung, die als Software-in-the-Loop (SiL) bezeichnet wird (Abbildung 4). Der Quellcode kann in diesem Zusammenhang in geschützt ausführbarer Form eingesetzt werden. Abgesehen vom EZE-Regler bleibt damit das Modell der EZE im Vergleich zum MiL-Ansatz unverändert. Unter diesen Voraussetzungen lässt sich prüfen, ob das Modell des EZE-Reglers in ausführbaren Code überführt werden kann und hardwaremäßig implementierbar ist. Ein Vergleich des zeitlichen Verhaltens von Systemparametern mit Ergebnissen aus der Simulation (MiL), kann wichtige Hinweise in Bezug auf die Implementierbarkeit des EZE-Reglers liefern. Dieses Verfahren kann im gleichen Maße auf (Teil-)Funktionalitäten des EZE-Reglers oder von Komponenten übertragen werden.

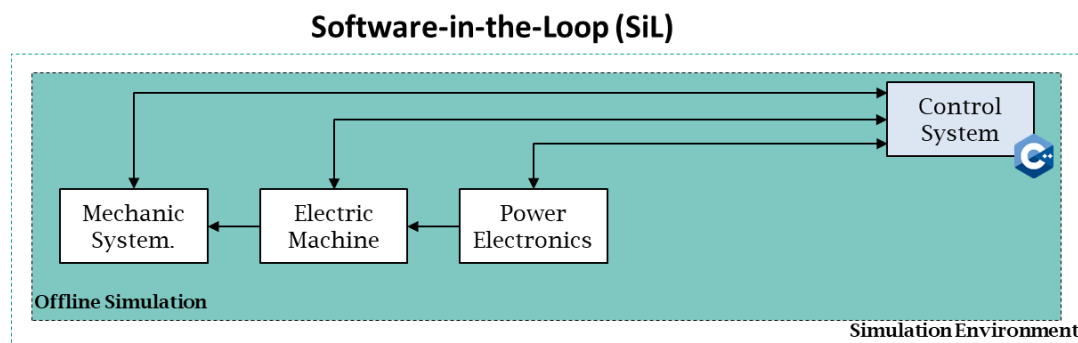


Abbildung 4: Simulation einer EZE (Teilsysteme) unter Einbindung Quellcodes des EZE-Reglers

4.1.3 PROCESSOR-IN-THE-LOOP (PiL)

In einem weiteren Schritt kann ein sogenannter Processor-in-the-Loop (PiL)-Test durchgeführt werden (Abbildung 5). In diesem Schritt wird der gesamte oder Teile des generierten Quellcodes des EZE-Reglers oder des zu testenden Prüflings auf einen eingebetteten Prozessor des zu verwendenden Zielsystems übertragen und eine Closed-Loop-Simulation mit der simulierten EZE durchgeführt. Das Subsystem des EZE-Reglers (oder der zu testenden Komponente) wird also durch einen „PiL“-Block ersetzt, in dem der generierte Quellcode auf der Zielhardware ausgeführt wird. Diese Testumgebung liefert somit Informationen, ob der Prozessor in der Lage ist, die zuvor entwickelte(n) Software(komponenten) auszuführen.

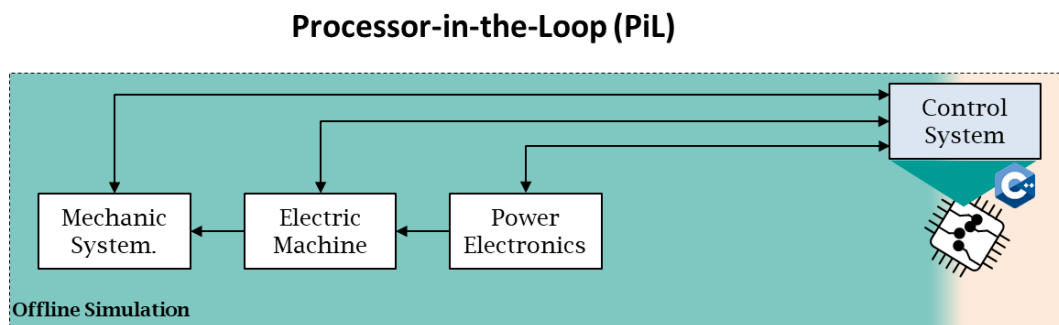


Abbildung 5: Simulation einer EZE (Teilsysteme) unter Einbindung des realen Zielprozessors (des EZE-Reglers), z.B. durch ein Evaluierungsboard

4.1.4 CONTROLLER-HIL (CHIL)

Beim Einsatz dieser Testumgebung wird der generierte Quellcode des EZE-Reglers direkt auf der physikalischen Hardware des EZE-Reglers implementiert und ausgeführt (Abbildung 6). Die Anbindung des EZE-Reglers an die simulierten Teilsysteme der EZE erfolgt über eine möglichst unveränderte und damit dem zu prüfenden System entsprechenden Signalschnittstelle. Damit steht ein Test der Systemintegration und der Leistungsfähigkeit des real einzusetzenden EZE-Reglers im Vordergrund. Durch den Einsatz physikalischer Hardware (gekoppelt über die Signalschnittstelle) ist bei dieser (und den folgenden) Prüfungen ein Einsatz von Echtzeitmodellen (vgl. Definition in Abschnitt 7.1) erforderlich.

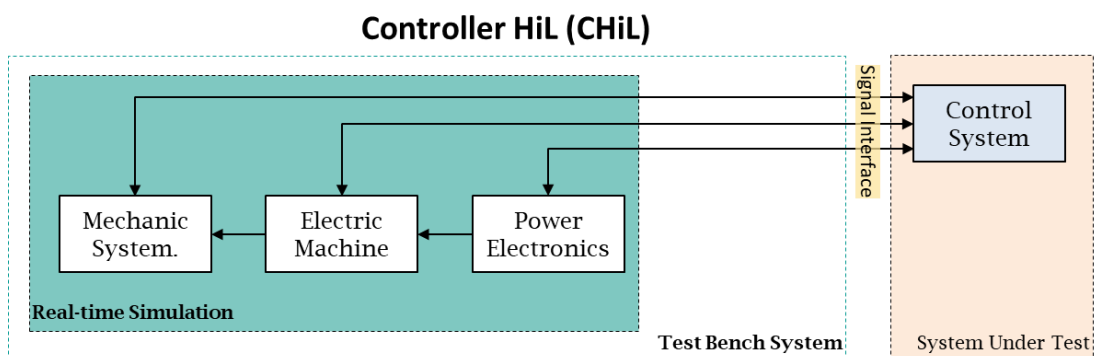


Abbildung 6: Simulation einer EZE (Teilsysteme) unter Einbindung eines realen EZE-Reglers

4.1.5 POWER-HIL (PHIL)

Eine substantielle Erweiterung der beschriebenen Testumgebungen ist eine Power-HiL-Umgebung (Abbildung 7). Die vorhandenen Daten- und Signalschnittstellen zur Simulationsumgebung werden um eine Schnittstelle zur Übertragung von (hoher) elektrischer Leistung ergänzt. Dazu werden Leistungsverstärker (in der Regel Netzemulatoren) eingesetzt, die eine Kopplung des zu prüfenden Teilsystems der EZE / der Komponente mit der Simulationsumgebung ermöglichen. Begrenzend wirkt in dieser Testumgebung die Leistungsfähigkeit des eingesetzten Netzemulators hinsichtlich der zu erzeugenden und aufzunehmenden Leistung sowie der damit verbundenen Dynamik.

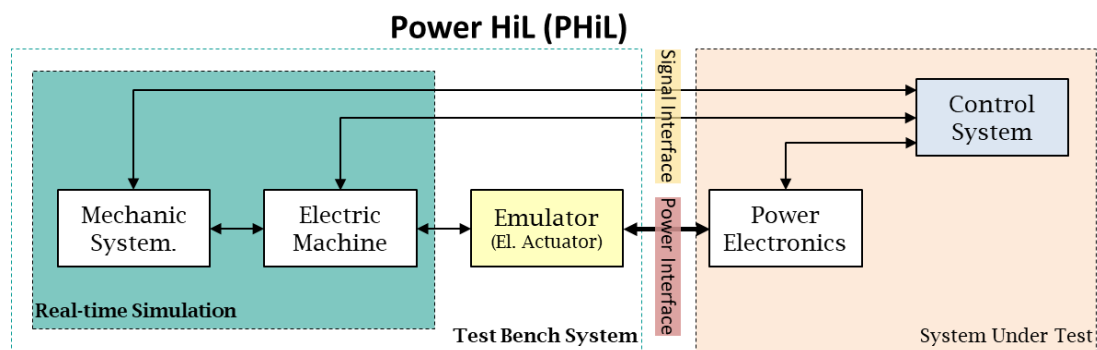


Abbildung 7: Simulation/Test einer EZE (Teilsysteme) in einer Power-HiL (PHiL) Umgebung

4.1.6 MECHANICAL-HIL (MHIL)

Wird die Testumgebung zusätzlich zum Einsatz eines Netzemulators zur Netzeinspeisung mit einer weitgehend realistischen Nachbildung der mechanischen (Leistungs-) Schnittstelle ergänzt, handelt es sich um eine Mechanical-HiL (MHIL)-Testumgebung (Abbildung 8). Die Testumgebung entspricht dann im Wesentlichen den in der TR 3 [6] beschriebenen System- und Teilsystemprüfständen mit den dort beschriebenen Schnittstellen.

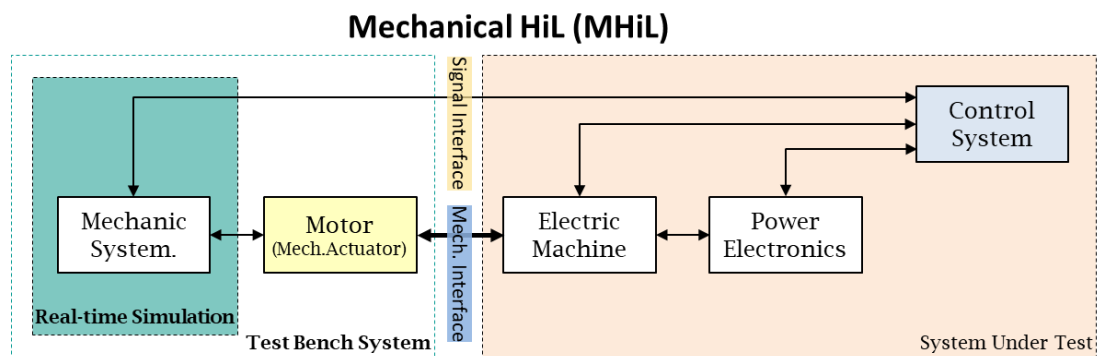


Abbildung 8: Simulation/Test einer EZE (Teilsysteme) in einer Mechanical-HiL (MHiL) Umgebung

4.1.7 VEREINFACHTE KOMPONENTENPRÜFSTÄNDE

Die im Abschnitt 0 bis Abschnitt 4.1.6 beschriebenen Prüfumgebungen zeichnen sich ausnahmslos durch den Einsatz von Modellen (unterschiedlichen Detaillierungsgrades) zur Beschreibung und Untersuchung des Verhaltens einzelner Komponenten und der daraus resultierenden Gesamtdynamik der EZE aus. Für viele Prüfpunkte (vgl. Kapitel 6) kann jedoch auch die Verwendung eines Komponentenprüfstandes ohne den Einsatz von Modellen ausreichend und zielführend sein. Diese Prüfstände können dann bspw. auch zum Nachweis der Leistungsfähigkeit eines Prüflings bei vorhandenem Leistungsfluss genutzt werden. Ein Beispiel hierfür ist ein klassischer Generator- / Umrichterprüfstand.

4.2 ANFORDERUNGEN / HINWEISE BZW. RAHMENBEDINGUNGEN AN DIE PRÜFUMGEBUNGEN

Ein wichtiges Ziel soll auch beim Prozess der komponentenbasierten Einheitenzertifizierung die Schaffung und Nachvollziehbarkeit einheitlicher Kriterien und Verfahren zur Sicherstellung der Vergleichbarkeit der Tests/Testverfahren in den jeweiligen Prüfumgebungen darstellen. Die Prüfumgebung kann projektspezifisch durch den Hersteller, Forschungsinstitutionen oder andere Anbieter bereitgestellt werden. Grundsätzlich ist es sinnvoll, neben konkreten Anforderungen an die Funktionalität der Prüfumgebung, nachprüfbar Anforderungen an den Prozess (Testplanung, -durchführung und -auswertung, usw.) sowie das gesamte Testequipment (Modelle, Messtechnik, Analysesoftware, Personal, usw.) zu stellen. Hieraus lässt sich ableiten, dass eine umfassende oder partielle Qualifizierung/Akkreditierung der Prüfumgebungen, des Prozesses sowie des Equipments eine höhere Verlässlichkeit bieten kann. Dazu muss beispielsweise ein Hersteller oder Betreiber einer Prüfumgebung nicht notwendigerweise eine vollumfängliche Qualifizierung/Akkreditierung nachweisen/erlangen, sondern kann vielmehr nur Teile qualifizieren/akkreditieren lassen, solange sichergestellt ist, dass alle weiteren Bestandteile des Zertifizierungsprozess durch qualifizierte/akkreditierte Dritte (bspw. Zertifizierungsstellen oder Messinstitute) bereitgestellt/abgedeckt werden.

Beispielhaft kann hier auf die internationalen Aktivitäten im Bereich der Windenergie zu diesem Thema hingewiesen werden:

- IEC 61400-21-4 [7]:
Da ist zum einen die technische Spezifikation IEC 61400-21-4, die Testprozeduren für das Vermessen der elektrischen Eigenschaften an Komponenten bzw. Systemen auf Prüfständen verschiedener Klassifikationen beschreibt. Hier enthalten sind auch unter anderem Qualitätsanforderungen der Netzemulatoren und der Verifikation von Emulationsmodellen.
- IECRE „Operation Dokument“ OD-0551-16 [9]:
Zudem sei auf die Aktivitäten der IECRE verwiesen, die sich u.a. mit der Qualifizierung von Prüfeinrichtungen basierend auf IEC-Standards beschäftigt. Am Beispiel von Blattprüfständen wurde so ein Prozess etabliert, der über ein entsprechendes erfolgreiches Assessment-Verfahren zu einer „IECRE Abnahmebescheinigung“ bzw. „IECRE Certificate of Acceptance“ führt. Aktuell wird daran gearbeitet, dieses Verfahren auf die Vorgaben der IEC 61400-21-4 [7] zu übertragen. Ein Prüfstandsbetreiber kann dann qualifiziert nachweisen, dass entsprechende Qualitätsanforderungen in Bezug auf die IEC 61400-21-4 [7] eingehalten werden sowie dass er nach ISO 17025 arbeitet oder akkreditiert ist.
- CENELEC 50549-10 [10]:
Die EN 50549-10 ist ebenfalls eine europäische Norm mit Bezug zur Netzintegration von Erzeugungseinheiten (insbesondere im Netz-Parallelbetrieb) und beschreibt zugehörige Bewertungsverfahren und Prüfeinrichtungen. Sie wurde im Kontext der EN-50549-1 und EN 50549-2 (Anforderungen an Erzeugungsanlagen zum Anschluss an Verteilnetze bis und einschließlich Typ B - Teil 1: Anschluss an das Niederspannungsnetz sowie Teil 2: Anschluss an das Mittelspannungsnetz) als auch der EN 50744-1 (eine in der Erarbeitung befindlichen Prüfvorschrift zum Nachweis netzbildender Eigenschaften von EZE) entwickelt.
Die EN 50549-10 lässt ebenfalls Prüfungen auf Komponentenebene unter Nutzung entsprechender Prüfstände/Prüfumgebungen zu, die sich abhängig von den Testverfahren unterscheiden können. Für die Prüfung von Windenergieanlagen wird ein Bezug zur IEC 61400-21-4 [7] hergestellt.

Die in den genannten Richtlinien bereits formulierten Qualitätsmerkmale sollten zukünftig Berücksichtigung finden, erweitert und ggf. angepasst werden (vgl. Handlungsempfehlungen in Kapitel 8.3)

4.3 VERIFIKATION DER PRÜFUMGEBUNG

Die Verifikation der Prüfumgebung, bestehend aus Emulationsmodellen und realen Aktuatoren (z.B. Motor), ist zentraler Bestandteil der Vermessungen für die komponentenbasierte Einheitenzertifizierung. Soweit möglich, soll diese Verifikation im Folgenden durch einen systematischen Prozess vereinheitlicht werden. Es ist sicherzustellen, dass die Emulationsmodelle korrekt implementiert sind, sich zusammen mit den Prüfstandkomponenten wie spezifiziert verhalten und keine unzulässigen Interaktionen mit den zu testenden Komponenten auftreten.

Anmerkung:

Zur Verifikation des Emulationsmodells ist ein Vergleich mit dem dazugehörigen Referenzmodell empfehlenswert, um einen möglichen Einfluss der Prüfstandkomponenten (realen Aktuatoren) erkennen zu können.

Die Verifikation muss in enger Abstimmung mit allen Projektbeteiligten durchgeführt werden und dient zur Sicherstellung der Genauigkeit, Robustheit sowie Echtzeitfähigkeit der Prüfumgebung. Grundsätzlich ist ein modularer Aufbau der Modelle zu empfehlen, um modellinterne Zwischengrößen zur Plausibilitäts-/Konsistenzprüfung nutzen zu können. Eine korrekte Kopplung von Modell und Prüfumgebung bzw. zu testenden Komponenten muss über alle relevanten Schnittstellen (Kommunikations- und Hardwareschnittstellen) sichergestellt werden. Ein Vergleich des Systemverhaltens mit bekannten Referenzfällen (bspw. über die Vorgabe von definierten Sollwertveränderungen) oder der Vergleich mit Offline-Simulationen sollten abschließender Bestandteil des Verifikationsprozesses sein. Idealerweise kann damit bereits eine erste Bewertung der Vertrauenswürdigkeit der Simulationsergebnisse erfolgen.

Für die Verifikation des Verhaltens ist die Betrachtung charakteristischer Modellgrößen unter Berücksichtigung von Gültigkeits- und Vertrauensbereichen notwendig. Die Verifikation der Prüfumgebung kann grundsätzlich auf zwei Wegen erfolgen:

Verifikation mit Hilfe des Referenzmodells:

In diesem Fall erfolgt ein Vergleich der mit Hilfe der Prüfumgebung erzielten Messergebnisse mit denen eines Referenzmodells der EZE oder der Komponente(n), welches idealerweise anhand von Messdaten validiert wurde (vgl. Abschnitt 2.2 und Abschnitt 7.2.2).

Verifikation mit Hilfe realer Messdaten:

In diesem Fall erfolgt ein Vergleich der mit Hilfe der Prüfumgebung erzielten Messergebnisse gegenüber realen Messdaten der EZE oder der Komponente(n). Die Messergebnisse können an einem Prüfstand oder im Feld gewonnen werden.

4.3.1 QUALIFIZIERUNG DER PRÜFUMGEBUNG

Perspektivisch soll die Qualifizierung der Prüfumgebung die Qualität des Prozesses der komponentenbasierten Einheitenzertifizierung absichern und im Idealfall eine normgerechte Dokumentation der durchgeführten Messungen ermöglichen. Die Qualifizierung der Prüfumgebungen sollte durch unabhängige Dritte erfolgen. Das Ziel muss darin bestehen, nachzuweisen, dass die Prüfumgebung innerhalb definierter Genauigkeiten zuverlässige und reproduzierbare Messergebnisse zum Zertifizierungsprozess beiträgt und bescheinigen, für welche Testarten die Prüfumgebung (vgl. Abschnitt 3) einsetzbar ist.

Die Qualifizierung der Prüfumgebungen sollte prüfbare Nachweise zu folgenden Aspekten beinhalten:

- Prozessbeschreibung mit detaillierter Beschreibung der Prüfumgebung und deren Verifikation
- Funktionsprüfung des gesamten Systems bestehend aus zu vermessender(n) Komponente(n) und der Emulation (Hardware/Prüfstände und Modelle) in Bezug auf Schnittstellen- und Zeitverhalten (Echtzeitfähigkeit)
- Messtechnik: Kalibrierung und Genauigkeit der eingesetzten Messtechnik
- Einmalige Prüfung der Reproduzierbarkeit von Referenztests durch Vergleich der Messungen
- Dokumentation der Tests sowie der Messergebnisse

Die einmalige Prüfung der Reproduzierbarkeit zeigt, dass auf Komponenten- bzw. Systemebene durchgeführte Tests ein hinreichend genaues Verhalten der gesamten EZE wiedergeben. Mit einer erfolgreichen Qualifizierung der Prüfumgebung sollen zudem die Voraussetzungen geschaffen werden, den Aufwand für weitere vergleichbare Tests möglichst gering zu halten, da auf bewährte und vertrauenswürdige Verfahren zurückgegriffen werden kann. Ein erneuter Nachweis der korrekten Funktionsweise der Prüfumgebung wird damit obsolet.

4.4 SKALIERUNG

Im Folgenden soll zunächst auf den Begriff „Skalierung“ im Zusammenhang mit der Entwicklung und Vermessung von EZE beim Einsatz von Prüfumgebungen mit angepasster/skalierter Leistung eingegangen werden.

4.4.1 DEFINITION

Da der Begriff „Skalierung“ in verschiedenen Zusammenhängen erwähnt und unterschiedlich interpretiert werden kann, soll dieser zunächst näher definiert werden.

Skalierung kann in diesem Zusammenhang wie folgt eingeteilt werden:

1. „Entwicklungsskalierung“ (Reglervalidierung in skalierten Prüfumgebung):
Reglerkonzepte einer EZE werden in einer Softwareumgebung entwickelt und mit einer realitätsnahen Abbildung des Verhaltens am Netzanschlusspunkt auf z.B. Stabilität, Funktionalität, dynamisches Verhalten usw. getestet.
2. „Prüfumgebungsskalierung“:
EZE, die eine modulare Struktur aufweisen, die prinzipiell eine Kopie eines EZE-Teils darstellen, z.B. bei einem Umrichtersystem welches je nach Leistungsklasse mehr oder weniger Umrichterstrings enthält, können in Teilen vermessen werden und die Ergebnisse entsprechend auch für größere Leistungen bspw. zur Validierung von Modellen verwendet werden.
3. „Produktfamilienskalierung“:
Messergebnisse, ob von Prüfstandtests oder Feldtests einer EZE können, teilweise ohne Nachvermessungen, auf z.B. eine EZE der gleichen Produktfamilie angewendet (skaliert) werden.

4.4.2 ENTWICKLUNGSSKALIERUNG (REGLERVALIDIERUNG IN SKALIERTER PRÜFUMGEBUNG)

Es stellt sich die Frage, ob Reglerkonzepte für EZE nach der Modellierungs- und Entwicklungsphase in einer skalierten Prüfumgebung für den Einsatz in der realen EZE validiert werden können. Hierzu werden je nach Art der EZE und den vorherrschenden Bedingungen am Netzanschlusspunkt realitätsnahe Prüfumgebungen benötigt, um die Stabilität, Funktionalität und das dynamische Verhalten des EZE-Reglers zu testen.

Je nach Anforderung an das zu testende System (device under test, DUT) müssen die Fähigkeiten der Prüfumgebung angepasst werden. Beispielsweise benötigt der Test eines einzelnen EZE-Reglers hinsichtlich des Einspeiseverhaltens neben der realen Hardware des EZE-Reglers eine realitätsnahe Abbildung des Verhaltens am Netzanschlusspunkt.

Skalierte Prüfstände wurden bereits als Grundlage für die Validierung von strom- und spannungsgeführten Regelungskonzepten von Umrichtersystemen hinsichtlich ihrer FRT-Stabilität und ihrer Fähigkeit Netzdienstleistungen bereitzustellen, erfolgreich verwendet. Die Veröffentlichungen [11], [12] und [13] zeigen den Aufbau und Einsatz solcher Prüfstände. Eine wichtige Rolle spielen skalierte Prüfstände bei Entwicklung von ergänzenden Regelungsverfahren wie z.B. netzbildenden Eigenschaften, zeigen die Veröffentlichungen [14] [15] [16] sowie das Forschungsprojekt [17]. Beispielsweise konnten so in den Forschungsprojekten [18] und [19] ein Netzwiederaufbau in einem Umrichter dominierten skalierten Versuchsnetz getestet werden. Ebenso konnten bereits übergeordnete Regelungskonzepte wie Parkregler (EZA-Regler) oder der Betrieb dynamischer virtueller Kraftwerke am Prüfstand getestet werden [20]. Die Möglichkeiten, sowie Vor- und Nachteile von Prüfständen in einer PHIL Umgebung besonders hinsichtlich netzbildender Eigenschaften wird u.a. in dem Forschungsprojekt [21] untersucht.

In Zukunft sollten durch Kooperationen mit Herstellern die Ergebnisse von skalierten Prüfumgebungen weiter evaluiert werden und in weiteren Schritten mit den entsprechenden Stellen für die Zulässigkeit der Nutzung solcher Prüfumgebungen zur Validierung von Komponenten einer EZE bzw. zur komponentenbasierten Einheitenzertifizierung in Richtlinien überführt werden.

4.4.3 PRÜFSTAND / PRÜFUMGEBUNGSSKALIERUNG

Speziell bei modular aufgebauten EZE stellt sich die Frage, ob auf einzelne Module bezogene Tests auf Komponentenprüfständen durchgeführt und die Ergebnisse auf zwei oder mehr Module übertragen werden können. Dies erspart bei zunehmend leistungsstärkeren EZE die Anpassung der Prüfstände und somit erhebliche Kosten.

Als Beispiel sei ein Umrichterprüfstand genannt, der für Prüflinge einer Leistung von 2 MW ausgelegt ist. Bei einem modularen Aufbau der EZE, sodass ein zweites (oder mehr) Umrichtersystem(e) parallel arbeitet und es somit zu einer Erhöhung der Ausgangsleistung kommt, ist ggf. der Test nur eines Umrichtersystems ausreichend. Ist dieses zweite (oder die weiteren) System(e) eine technisch gleichwertige Kopie des Ersten, so könnte die Vermessung nach dieser Idee auf einem einzigen System stattfinden und auf ein kombiniertes System höherer Leistung übertragen werden.

Diese Thematik wurde aus Zeitgründen nicht mehr vollständig in der IEC 61400-21-4 [7] aufgenommen. Es stellt allerdings ein wichtiges zukünftiges Instrument dar und sollte zukünftig in den Gremien der TR 3 / TR 4 / TR 8 diskutiert werden, idealerweise unter Berücksichtigung zu erwartender erster praktischer Ergebnisse/Erfahrungen.

4.4.4 PRODUKTFAMILIENSKALIERUNG

Hierzu sei zunächst auf die Ausführungen in der TAR-Mittelspannung (VDE-AR-N 4110:2023-09 – S.129f, 11.2 Einheitenzertifikat – 11.2.1 Allgemeines [2]) hingewiesen:

Ergebnisse der Vermessung einer Erzeugungseinheit können in Summe oder in Teilen auf andere Erzeugungseinheiten übertragen werden, wenn

1. die Ausführung und die für die elektrischen Eigenschaften maßgebende Regelungstechnik einschließlich der eingesetzten Software in diesen Erzeugungseinheiten technisch gleichwertig sind und
2. die Ergebnisse für die kleinste und größte Leistungsvariante vorliegen oder alternativ die Bemessungsscheinleistung der zu zertifizierenden Erzeugungseinheit zwischen dem $1/\sqrt{10}$ -fachen und 10-fachen (bei Typ-1-EZE) bzw. zwischen dem $1/\sqrt{10}$ -fachen und 2-fachen (bei Typ-2-EZE) der Bemessungsscheinleistung der vermessenen Erzeugungseinheit liegt.
3. Für die Nachweise des quasistationären Betriebes (siehe 11.2.3) sowie der statischen Spannungshaltung (siehe 11.2.4) können zur Validierung der Herstellerangaben, die unter 2. genannten Grenzen erweitert werden, wenn das Konzept der Erzeugungseinheit sowie die eingesetzten Komponenten technisch gleichwertig sind. Unter diesen Voraussetzungen sind Übertragungen für Erzeugungseinheiten Typ 2 von 100 kVA bis 10 MVA-Bemessungsscheinleistung zulässig.

Herstellerprüfungen von relevanten Baugruppen der Erzeugungseinheit auf Testständen können durch die Zertifizierungsstelle anerkannt werden, wenn sichergestellt ist, dass die Äquivalenz zu den Feldmessungen gegeben ist. Der Nachweis der Zulässigkeit ist im Zertifikat zu führen.“ (Quelle: VDE-AR-N 4110 [2]) Auf Basis dieser Vorgaben in den VDE-AR-N 4110 / 4120 / 4130 [2] [3] [4] empfiehlt der AK kEZ, dass zur Sicherstellung der Übertragbarkeit von Testergebnissen eine Überarbeitung der Definition von Produktfamilien erfolgt, die die bisherigen Vorgaben weiter konkretisiert und stärkeren Bezug auf die relevanten / zu vermessenden elektrischen Eigenschaften nimmt.

5 Komponenten der EZE

Im Folgenden werden die Komponenten der einzelnen EZE-Typen in Blockschaltbildern dargestellt.

- WEA (5.1)
- VKM (5.2)
- PV (5.3)
- Speicher (5.4)

Darauf aufbauend erfolgt für alle EZE-Typen eine tabellarische Beschreibung der Komponenten, deren Funktionsumfang sowie Schnittstellen. Die Aufteilung der Komponenten, deren Funktionsumfang sowie Schnittstellen stellen lediglich ein Beispiel für die jeweiligen EZE dar und wurden nach allgemein gültigem Wissen- und Kenntnisstand von allen Beteiligten innerhalb des AKs erarbeitet. Herstellerabhängige und systembedingte Abweichungen können daher durchaus bestehen, sodass spezifische Funktionalitäten beispielsweise auch Bestandteil anderen Komponenten zugeordnet werden können als in der folgenden Beschreibung.

Hinweis: Unabhängig davon, dass bei VKM häufig eine Nachweisführung mit Hilfe des Einzelnachweisverfahrens erfolgt und damit das hier vorgeschlagene Verfahren vergleichsweise geringere Bedeutung hätte, wurde eine Beschreibung der Komponenten von VKM vorgenommen, um eine Übertragbarkeit der Ansätze zu ermöglichen.

Hinweis: Der Begriff "EZE-Regler" kann bedeuten, dass alle Regelungsfunktionen berücksichtigt sind. In der Praxis ist es allerdings auch üblich, dass EZE-Technologie-Abhängig, eine oder mehrere bestimmte Regelungsfunktionen in separaten und eigenständigen Komponenten bzw. Reglern umgesetzt sind. Wie beispielsweise ein separater Wirkleistungsregler, Blindleistungsregler oder Spannungsregler (AVR). Darüber hinaus kann ein EZE-interner "zentraler" / "übergeordneter" Regler eingesetzt sein, welcher die entsprechenden Signale auf EZE-Ebene verarbeitet. Der EZE-Regler kann auch Teil des EZA-Reglers sein.

Die Beschreibung der „Externen Kommunikationsschnittstelle (Komponente I)“ ist dabei für alle EZE-Typen identisch:

Die „externe Kommunikation“ beschreibt im Wesentlichen alle für die Kommunikation der EZE zu übergeordneten (Teil-)Systemen notwendigen Bestandteile. Hierzu zählen insbesondere eine oder mehrere unterschiedliche Arten von Schnittstellen sowie die dazugehörigen Protokolle, um eine korrekte, sichere und stabile Datenübertragung zu den übergeordneten Systemen zu gewährleisten. Häufig sind die Funktionalitäten der „externen Kommunikation“ integraler Bestandteil der Hauptsteuerung der EZE und lassen sich nicht als eigenständige Hardwarekomponente betrachten.

5.1 WEA

Die folgende Abbildung stellt eine typische WEA als Blockschaltbild der einzelnen Komponenten dar.

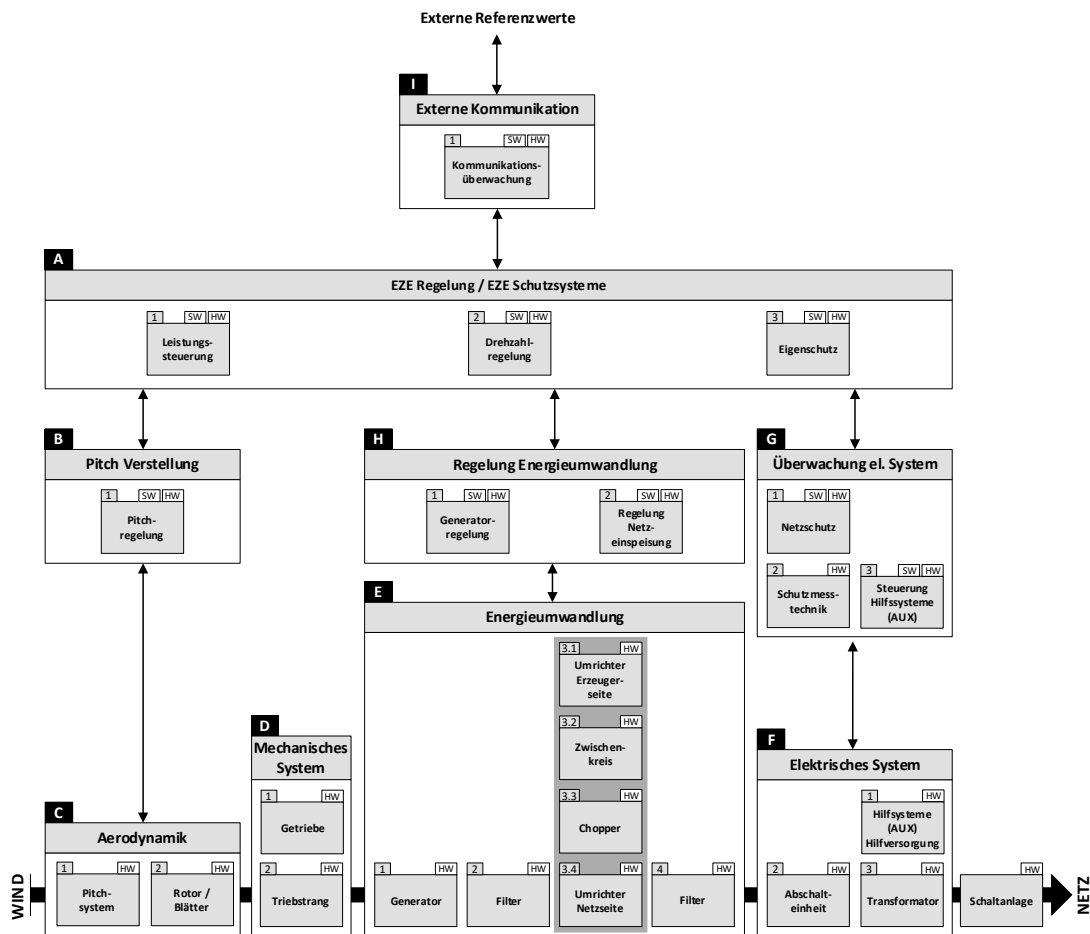


Abbildung 9: Übersicht der Komponenten einer WEA

Abbildung 9 zeigt die Aufteilung der WEA in neun Teilsysteme A-I inklusive der zugehörigen Komponenten. Im unteren Bereich der Abbildung werden die einzelnen Komponenten in Leistungsflussrichtung von der Aerodynamik über das mechanische System und die elektrische Energieumwandlung bis zur Netzeinspeisung dargestellt. Übergeordnet werden an entsprechender Stelle die zugehörigen Regelungen dargestellt. Die Vorgabe von externen Referenzwerten über die externe Kommunikationsschnittstelle bis zur EZE-Regelung ist ebenfalls dargestellt. Die Interaktionen der einzelnen Komponenten werden über die Pfeile symbolisiert. Zudem erfolgt eine Zuordnung einzelner Komponenten als Bestandteil von Hardware (HW) oder Software (SW). Der nachfolgenden Tabelle 1 können die jeweiligen Definitionen der Teilsysteme, ihrer Komponenten sowie deren Funktionsumfang entnommen werden.

Tabelle 1: Teilsysteme, Komponenten inklusive Funktionsumfang und Schnittstellen der WEA

Teilsystem	Komponente	Funktionsumfang der Komponente	Schnittstellen (Input (In), Output (Out)), sowie Parameter (Pa)
(A) EZE-Regelung / EZE-Schutzsysteme (SW & HW)	(A.1) Leistungssteuerung	Steuerung bzw. Regelung der erzeugerseitigen Leistungsaufnahme bzw. netzseitigen Leistungsabgabe	In: Wirk- & Blindleistungssollwert Out: Drehzahlsollwert Pa: EZE spez. Reglerparameter & Kennlinien
	(A.2) Drehzahlregelung	Steuerung bzw. Regelung der Rotordrehzahl	In: Drehzahlsollwert Out: Blattwinkelsollwert, Generatormomentsollwert Pa: EZE spez. Reglerparameter & Kennlinien
	(A.3) Eigenschutz	Systeme zur Überwachung / Ausführung WEA-Schutzfunktion(en)	Pa: EZE spez. physikalische (z.B. elektr. & mech.) Betriebsgrenzen Out: EZE spez. Derating & Abschaltbefehle
(B) Pitch-Verstellung (SW & HW)	(B.1) Pitchregelung	Regelung der Blattverstell-einrichtung	In: Blattwinkelsollwert Out: Stellgr. für Blattwinkelverstellung
(C) Aerodynamik (HW)	(C.1) Pitch-System	Stellglied der Blattverstell-einrichtung	In: Stellgr. für Blattwinkelverstellung Out: Blattwinkelwert
	(C.2) Rotor/Blätter	Aerodynamisch-mechanische Energiewandlung	In: Blattwinkelwert Out: aero. Drehmoment
(D) Mechanisches System (HW)	(D.1) Getriebe (optional)	Mechanische Leistungsübersetzung / Anpassung von Drehzahl bzw. Drehmoment	Pa: Getriebe spez. Parameter
	(D.2) Triebstrang	Mechanische Leistungsübertragung	In: aero. & gen. Drehmoment Out: Drehzahl Pa: Triebstrang spez. Parameter (bspw. Trägheiten)

(E) Energie- umwandlung (HW)	(E.1) Generator	Mechanisch- elektrische Energiewandlung	In: Drehzahl Out: gen. Drehmoment Spannung / Strom
	(E.2) Filter	Beeinflussung des Frequenzbereichs der erzeugerseitigen el. Energieübertragung (Übertragungs- verhalten)	In/Out: Spannung / Strom Pa: Filter spez. Parameter (bspw. Dämpfung / Grenzfrequenz)
	(E.3.1) Erzeugerseitiger Umrichter	Leistungs- elektronisches Stellglied	In: EZE spez. Stellgr. für Generatormoment, In/Out: Spannung / Strom
	(E.3.2) Zwischenkreis	Kurzzeit- Energiespeicher des Umrichtersystems	In/Out: Spannung / Strom
	(E.3.3) Chopper	Sicherungs- einrichtung des Zwischenkreises	In: Auslösesignal, Strom Out: Rückmeldung der Betriebsbereitschaft des Choppers
	(E.3.4) Netzseitiger Umrichter	Leistungs- elektronisches Stellglied	In: EZE spez. Stellgr. für Wirk- & Blindleistung In/Out: Spannung / Strom
	(E.4) Filter	Beeinflussung des Frequenzbereichs der netzseitigen el. Energieübertragung (Übertragungs- verhalten / i.d.R. zur OS-Dämpfung)	In/Out: Spannung / Strom Pa: Filter spez. Parameter (bspw. Dämpfung / Grenzfrequenz)
(F) Elektrisches System (HW)	(F.1) Hilfssysteme (AUX)/ Hilfsversorgung	El. Systeme zur Eigenversorgung	In: Spannung Out: EZE spez. Betriebsgrößen, Fehlermeldungen In/Out/Pa: EZE spez. Betriebsgrößen
	(F.2) Abschalteinheit	Schalteinrichtung zur Unterbrechung der el. Leistungsübertragung (des Hauptstrompfades)	In: Auslösesignal Schutzfunktion, Zuschaltbefehl
	(F.3) Transformator	Elektrische Leistungsübersetzung zur Netzeinspeisung	In/Out: Spannung / Strom
Optional	Schaltanlage	Kopplung zur Netz- einspeisung	In: Auslösesignal, In/Out: Spannung / Strom

(G) Überwachung elektrisches System (HW & SW)	(G.1) Netzschutz	System zur Ausführung der Netzschutzfunktion(en) (ohne Abschalteinheit)	In: Spannung, Frequenz Out: Auslösesignal Schutzfunktion Pa: EZE spez. elektr. Betriebsgrenzen
	(G.2) Schutzmesstechnik	Strom- & Spannungswandler	In/Out: Spannung / Strom
	(G.3) Steuerung Hilfssysteme (AUX)	System zur Steuerung der Hilfssysteme	In/Out/Pa: EZE spez. Betriebsgrößen
(H) Regelung Energie- umwandlung (HW & SW)	(H.1) Generatorregelung	Regelung der erzeugerseitigen Leistungselektronik	In: Generatormomentsollwert Out: EZE spez. Stellgr. für Generatormoment
	(H.2) Regelung Netzeinspeisung	Regelung der netzseitigen Leistungselektronik	In: Wirk- & Blindleistungs-sollwerte Out: EZE spez. Stellgr. für Wirk- & Blindleistung
(I) Externe Kommunikations- schnittstelle (HW & SW)	(I.1) Kommunikations- überwachung	Kommunikation mit übergeordneten Systemen (z.B. EZA-Regler)	In: Externe Referenzwerte Out: interne Referenzwerte

5.2 VKM

In der folgenden Abbildung wird das Blockschaltbild der einzelnen Komponenten einer typischen VKM dargestellt.

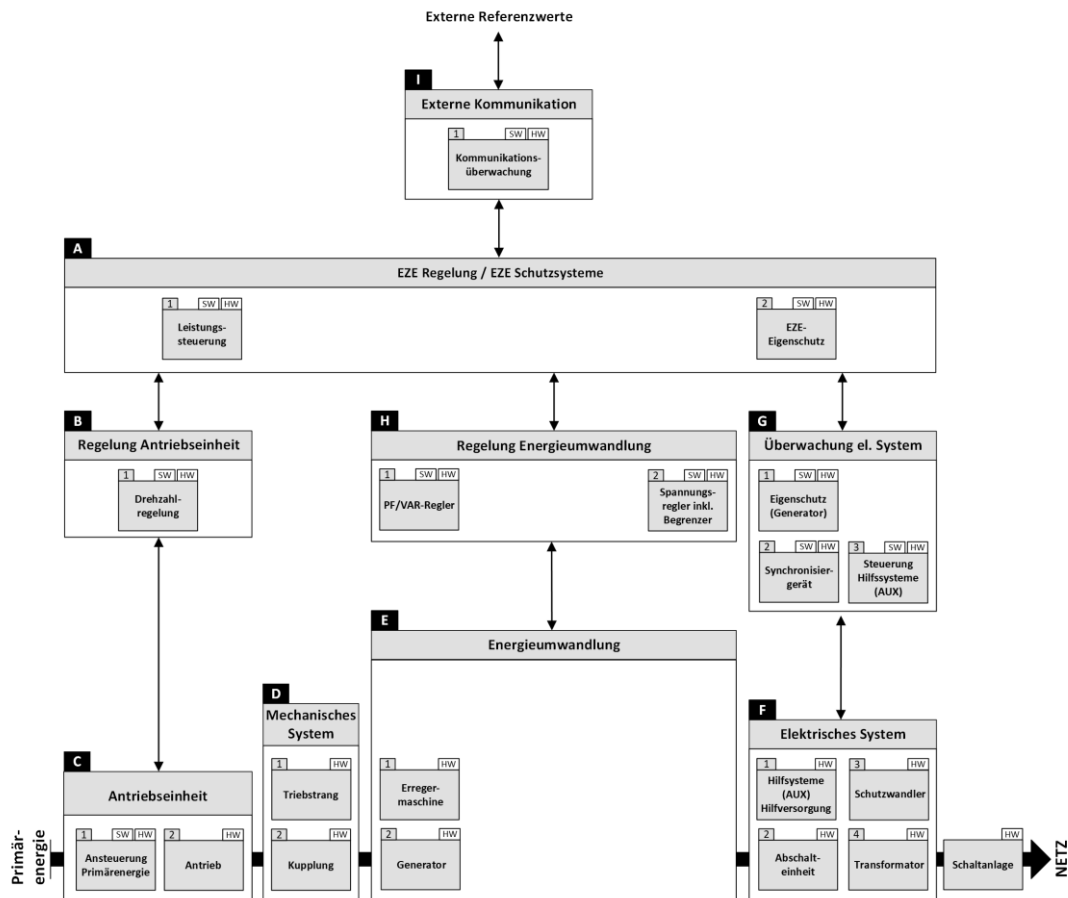


Abbildung 10: Übersicht der Komponenten einer typischen VKM

Abbildung 10 zeigt die Aufteilung der VKM in acht Teilsysteme A-I inklusive der zugehörigen Komponenten. Im unteren Bereich der Abbildung werden die einzelnen Komponenten in Leistungsflussrichtung von der Antriebseinheit über die elektrische Energieumwandlung bis zur Netzeinspeisung dargestellt. Übergeordnet werden an entsprechender Stelle die zugehörigen Regelungen dargestellt. Die Vorgabe von externen Referenzwerten über die externe Kommunikationsschnittstelle bis zur EZE-Regelung ist ebenfalls dargestellt. Die Interaktionen der einzelnen Komponenten werden über die Pfeile symbolisiert. Zudem erfolgt eine Zuordnung einzelner Komponenten als Bestandteil von Hardware (HW) oder Software (SW). Der nachfolgenden Tabelle 2 können die jeweiligen Definitionen der Teilsysteme, ihrer Komponenten sowie deren Funktionsumfang entnommen werden.

Hinweis:

*Es handelt sich bei der Übersicht um einen Arbeitsstand, der von Expert*innen aus dem Bereich VKMs / Typ I – EZE ergänzt/überarbeitet werden sollte.*

Tabelle 2: Teilsysteme, Komponenten inklusive Funktionsumfang und Schnittstellen der VKM

Teilsystem	Komponente	Funktionsumfang der Komponente	Schnittstellen (Input (In), Output (Out)), sowie Parameter (Pa)
(A) EZE-Regelung / (SW & HW)	(A.1) Leistungssteuerung	Steuerung bzw. Regelung der netzseitigen Wirk- und Blindleistungsabgabe	In: Wirk- & Blindleistungssollwert Out: Drehzahlsollwert & Erregersollwerte Pa: EZE spez. Regelparameter & Kennlinien
	(A.2) EZE-Eigenschutz	Systeme zur Überwachung / Ausführung VKM-Schutzfunktion(en)	Pa: EZE spez. physikalische (z.B. elektr. & mech.) Betriebsgrenzen Out: EZE spez. Derating & Abschaltbefehle
(B) Regelung Antriebseinheit	(B.1) Drehzahlregelung	System zur Regelung der Antriebseinheit hinsichtlich Drehzahl und Leistung	In: Drehzahl – und Leistungswerte Output: Verstellbefehle für Primärenergie
(C) Antriebseinheit (SW & HW)	(C.1) Ansteuerung Primärenergie	Umsetzung der Stellgröße	In: Stellgröße Out: Ventilstellgrößen
	(C.2) Antrieb	Energieumwandlung von Primärenergie in mechanische Energie	In: geregelte Primärenergie Out: mech. Drehmoment
(D) Mechanisches System (HW) <i>Hinweis: Das mechanische System ist meist Teil der Antriebseinheit.</i>	(D.1 / D.2) Triebstrang und Kupplung	Mechanische Leistungsübertragung.	In: mech. Drehmoment, Out: Drehzahl, Pa: Triebstrang spez. Parameter (bspw. Trägheit)
(E) Energieumwandlung (HW)	(E.1) Erregermaschine	Einheit zur Bereitstellung der Erregerenergie des Generators inkl. PMG / Erregertransformator	In: Stellgr. Erregung Out: Erregerstrom
	(E.2) Generator	Mechanisch-elektrische Energiewandlung	In: Drehmoment, Erregung Out: Spannung / Strom

(F) Elektrisches System (HW)	(F.1) Hilfssysteme (AUX)/ Hilfsversorgung	Messung von Strom und Spannung	In: Strom & Spannung Out Messwerte von Strom & Spannung
	(F.2) Abschaltseinheit	Schaltanrichtung zur Unterbrechung der el. Leistungs- übertragung (des Hauptstrompfades)	In: Auslösesignal Schutzfunktion, Zuschaltbefehl
	(F.3) Schutzwandler	El. Systeme zur Eigenversorgung	In: Spannung Out: EZE spez. Betriebsgrößen, Fehlermeldungen In/Out/Pa: EZE spez. Betriebsgrößen
	(F.4) Transformator	Elektrische Leistungs- übersetzung zur Netzeinspeisung	In/Out: Spannung / Strom
Optional	EZA-Schaltanlage	Kopplung zur Netz- einspeisung	In: Auslösesignal, In/Out: Spannung / Strom
(G) Netzschutz / Überwachung ... (HW & SW)	(G.1) Eigenschutz (Generator)	System zur Ausführung des Eigenschutz- und der Netzschutz- funktion(en) (ohne Abschaltseinheit)	In: Spannung, Frequenz, Strom, externe Auslösesignale Out: Auslösesignal Schutzfunktion Pa: EZE spez. elektr. Betriebsgrenzen
	(G.2) Synchronisiergerät	Synchronisierung der EZE zum übergeordneten Netz	In: Spannung, Frequenz und Phasenlage (Generator und Netz), Freigabesignal Out: Stellgr. EZE-Reglung, Zuschaltbefehl
	(G.3) Steuerung Hilfssysteme (AUX)	System zur Steuerung der Hilfssysteme	In/Out/Pa: EZE spez. Betriebsgrößen
(H) Regelung Energie- umwandlung (SW & HW)	(H.1) PF / VAR - Regler	Regelung der Blindleistung oder Netzspannung ggf. nach Statik	In: EZE-Regler- / Sollwerte PF / VAR Out: Erregerstrom
	(H.2) Spannungs-Regler inkl. Begrenzer	Regelung der Erregung auf Grundlage der Generatorspannung	In: EZE-Regler- / Generator- Spannung Out: Stellgr. Erregung Pa: Begrenzungsparameter

(I) Externe Kommunikation- schnittstelle (HW & SW)	(I.1) Kommunikations- überwachung	Kommunikation mit übergeordneten Systemen (z.B. EZA- Regler)	In: Externe Referenzwerte Out: interne Referenzwerte
---	---	---	---

5.3 PV

In der folgenden Abbildung wird das Blockschaltbild einer typischen PV-EZE dargestellt.

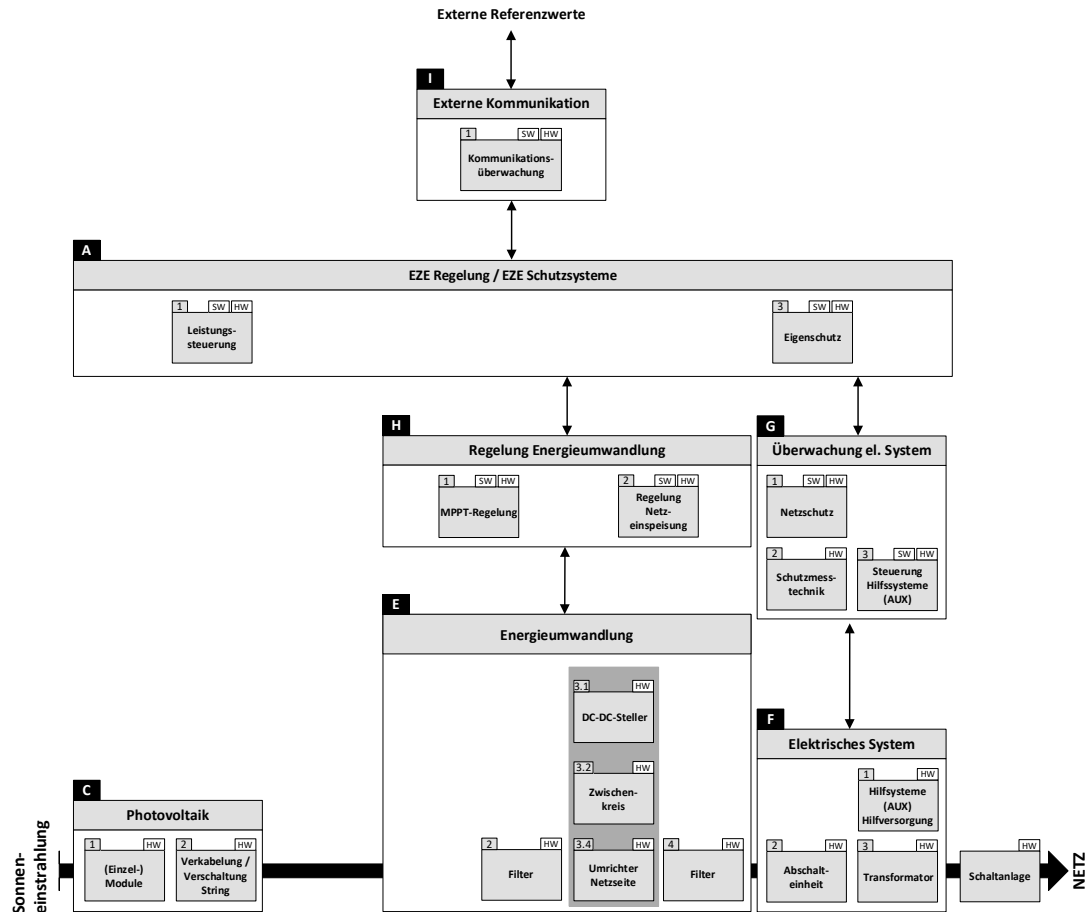


Abbildung 11: Übersicht der Komponenten einer typischen PV-EZE

Abbildung 11 zeigt die Aufteilung einer PV-EZE in sieben Teilsysteme A-I inklusive der zugehörigen Komponenten. Im unteren Bereich der Abbildung werden die einzelnen Komponenten in Leistungsflussrichtung von der Sonneneinstrahlung über die Module und die elektrische Energieumwandlung bis zur Netzeinspeisung dargestellt. Übergeordnet werden an entsprechender Stelle die zugehörigen Regelungen dargestellt. Die Vorgabe von externen Referenzwerten über die externe Kommunikationsschnittstelle bis zur EZE-Regelung ist ebenfalls dargestellt. Die Interaktionen der einzelnen Komponenten werden über die Pfeile symbolisiert. Zudem erfolgt eine Zuordnung einzelner Komponenten als Bestandteil von Hardware (HW) oder Software (SW). Der nachfolgenden Tabelle 3 können die jeweiligen Definitionen der Teilsysteme, ihrer Komponenten sowie deren Funktionsumfang entnommen werden.

Tabelle 3: Teilsysteme, Komponenten inklusive Funktionsumfang und Schnittstellen der PV-EZE

Teilsystem	Komponente	Funktionsumfang der Komponente	Schnittstellen (Input (In), Output (Out)), sowie Parameter (Pa)
(A) EZE-Regelung / EZE-Schutzsysteme (SW & HW)	(A.1) Leistungssteuerung	Steuerung bzw. Regelung der erzeugerseitigen Leistungsaufnahme bzw. netzseitigen Leistungsabgabe	In: Wirk- & Blindleistungssollwert Out: Stromsollwerte Pa: EZE spez. Reglerparameter & Kennlinien
	(A.3) Eigenschutz	Systeme zur Überwachung / Ausführung PV-Schutzfunktion(en)	Pa: Pa: EZE spez. physikalische (z.B. elektr. & mech.) Betriebsgrenzen Out: EZE spez. Derating & Abschaltbefehle
(C) Photovoltaik (HW)	(C.1) (Einzel-) Module	Einzelne oder gruppierte PV-Module zur Energieerzeugung	In: Sonneneinstrahlung Out: Modul-Strom / Spannung
	(C.2) Verkabelung / Verschaltung String	Verkabelung und Verschaltung der PV-Module zu Strings	In: Modul-Strom / Spannung Out: String-Strom / Spannung
(E) Energie- umwandlung (HW)	(E.2) Filter	Beeinflussung des Frequenzbereichs der erzeugerseitigen el. Energieübertragung (Übertragungsverhalten / i.d.R. zur OS-Dämpfung)	In/Out: Spannung / Strom Pa: Filter spez. Parameter (bspw. Dämpfung / Grenzfrequenz)
	(E3.1) DC-DC Steller	Leistungselektronisches Stellglied zur Anbindung des PV-Generators und Einstellung des MPP	In: EZE spez. Stellgr. für den Generatorstrom In/Out: Spannung / Strom
	(E.3.2) Zwischenkreis	Kurzzeit-Energiespeicher des Umrichtersystems	In/Out: Spannung / Strom
	(E.3.4) Umrichter Netzseite	Leistungselektronisches Stellglied	In: EZE spez. Stellgr. für Wirk- & Blindleistung In/Out: Spannung / Strom
	(E.4) Filter	Beeinflussung des Frequenzbereichs der netzseitigen el. Energieübertragung (Übertragungs-	In/Out: Spannung / Strom Pa: Filter spez. Parameter (bspw. Dämpfung / Grenzfrequenz)

		verhalten / i.d.R. zur OS-Dämpfung)	
(F) Elektrisches System (HW)	(F.1) Hilfssysteme (AUX)/ Hilfsversorgung	El. Systeme zur Eigen-versorgung	In: Spannung Out: EZE spez. Betriebsgrößen, Fehlermeldungen In/Out/Pa: EZE spez. Betriebsgrößen
	(F.2) Abschalteneinheit	Schalteneinrichtung zur Unterbrechung der el. Leistungsübertragung (des Hauptstrompfades)	In: Auslösesignal Schutzfunktion, Zuschaltbefehl
	(F.3) Transformator	Elektrische Leistungsübersetzung zur Netzeinspeisung	In/Out: Spannung / Strom
Optional	Schaltanlage	Kopplung zur Netz- einspeisung	In: Auslösesignal In/Out: Spannung / Strom
(G) Überwachung elektrisches System (HW & SW)	(G.1) Netzschutz	System zur Ausführung der Netzschutz- funktion(en) (ohne Abschalteneinheit)	In: Spannung / Frequenz, Out: Auslösesignal Schutzfunktion Pa: EZE spez. elektr. Betriebsgrenzen
	(G.2) Schutzmesstechnik	Strom- & Spannungswandler	In/Out: Spannung / Strom
	(G.3) Steuerung Hilfssysteme (AUX)	System zur Steuerung der Hilfssysteme	In/Out/Pa: EZE spez. Betriebsgrößen
(H) Regelung Energie- umwandlung (HW & SW)	(H.1) MPPT-Regelung	Regelung der Leistungselektronik zur Identifikation und Erreichung der maximalen PV- Leistung	In: PV-String Messwerte Strom / Spannung Out: Wirkleistungssollwert
	(H.2) Regelung Netzeinspeisung	Regelung der netzseitigen Leistungselektronik zur normgerechten Netzeinspeisung	In: Wirk- & Blindleistungs- sollwerte Out: EZE spez. Stellgr. für Wirk- & Blindleistung
(I) Externe Kommunikations- schnittstelle (HW & SW)	(I.1) Kommunikations- überwachung	Kommunikation mit übergeordneten Systemen (z.B. EZA- Regler)	In: Externe Referenzwerte Out: interne Referenzwerte

5.4 SPEICHER

Die folgende Abbildung stellt ein typisches Speichersystem als Blockschaltbild dar.

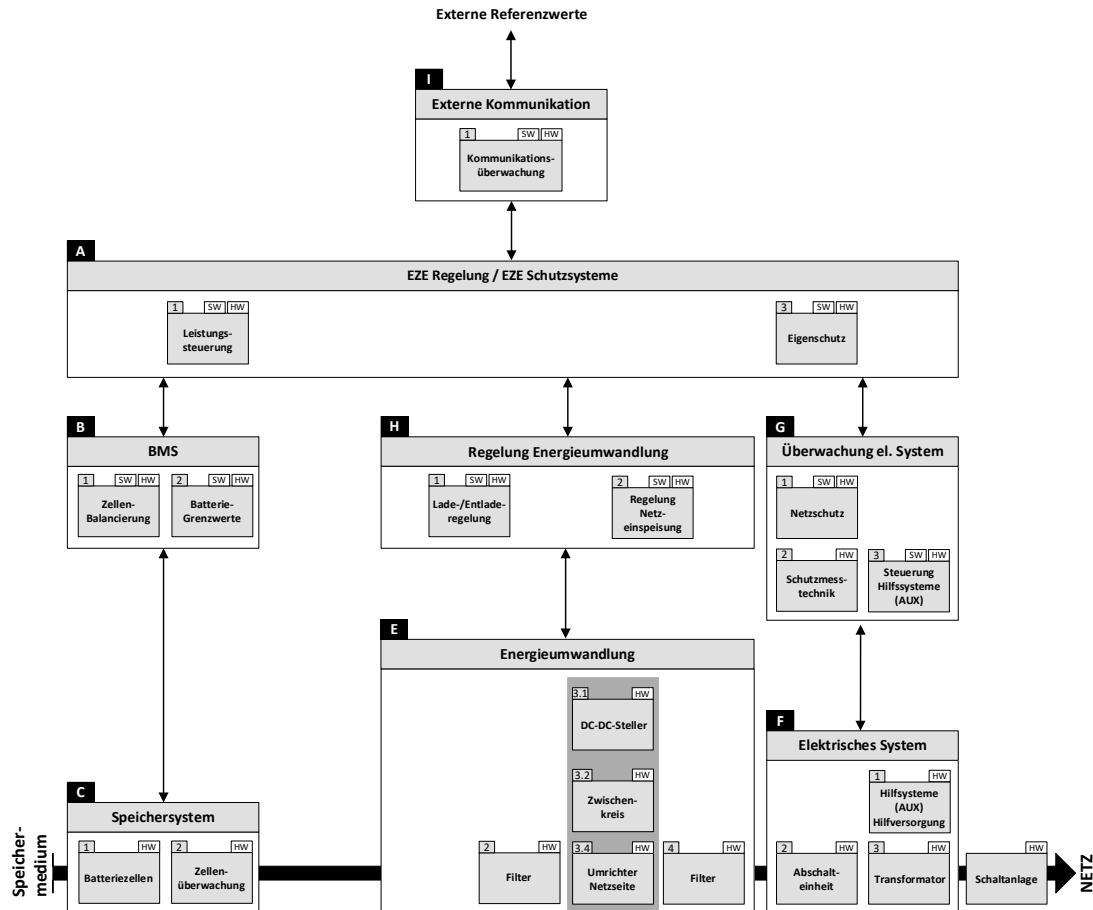


Abbildung 12: Übersicht der Komponenten eines typischen Speichersystems

Abbildung 12 zeigt die Aufteilung des Speichersystems in acht Teilsysteme A-I inklusive der zugehörigen Komponenten. Im unteren Bereich der Abbildung werden die einzelnen Komponenten in Leistungsflussrichtung vom Speichersystem über die Spannungsanpassung und die elektrische Energieumwandlung bis zur Netzeinspeisung dargestellt. Übergeordnet werden an entsprechender Stelle die zugehörigen Regelungen dargestellt. Die Vorgabe von externen Referenzwerten über die externe Kommunikationsschnittstelle bis zur EZE-Regelung ist ebenfalls dargestellt. Die Interaktionen der einzelnen Komponenten werden über die Pfeile symbolisiert. Zudem erfolgt eine Zuordnung einzelner Komponenten als Bestandteil von Hardware (HW) oder Software (SW). Der nachfolgenden Tabelle 4 können die jeweiligen Definitionen der Teilsysteme, ihrer Komponenten sowie deren Funktionsumfang entnommen werden.

Tabelle 4: Teilsysteme, Komponenten inklusive Funktionsumfang und Schnittstellen des Speichers

Teilsystem	Komponente	Funktionsumfang der Komponente	Schnittstellen (Input (In), Output (Out)), sowie Parameter (Pa)
(A) EZE-Regelung / EZE-Schutzsysteme (SW & HW)	(A.1) Leistungssteuerung	Steuerung der Leistungsaufnahme und -abgabe	In: Wirk- & Blindleistungssollwert Out: (Strom) Sollwerte für Lade / Entladeregulierung & Blindstromsollwert Pa: EZE spez. Reglerparameter & (Lade-) Kennlinien
	(A.3) Eigenschutz	Systeme zur Überwachung / Ausführung allgemeiner BSS-Schutzfunktion(en)	Pa: Pa: EZE spez. physikalische (z.B. elektr. & mech.) Betriebsgrenzen Out: EZE spez. Derating & Abschaltbefehle
(B) Batterie Management System (BMS) (SW & HW)	(B.1) Zellen-Balancierung	Ausgleich von Spannungs-differenzen zwischen einzelnen Batteriezellen	In: Zellspannungen Out: Stellgr. für Zellströme
	(B.2) Batteriegrenzwerte	System zur Überwachung der Batteriegrenzwerte	In: elektr. Messgrößen, Batterietemperatur Out: Fehlermeldungen, Derating, SoC, SoH Pa: Batteriegrenzwerte
(C) Speichersystem (HW)	(C.1) Batteriezellen	Individuelle Zellen des Speichermediums	In/Out: Spannung / Strom
	(C.2) Zellen-Überwachung	System zur Erfassung der individuellen Zellen Parameter	Out: Messwerte Strom, Spannung, SoC & Temperatur
(E) Energie-umwandlung (HW)	(E.2) Filter	Beeinflussung des Frequenzbereichs der batterie-seitigen el. Energieübertragung (Übertragungsverhalten)	In/Out: Spannung / Strom Pa: Filter spez. Parameter (bspw. Dämpfung / Grenzfrequenz)
	(E.3.1) Batterieseitiger DC-Steller	Leistungs-elektronisches Stellglied zur Anbindung der Batterie	In: EZE spez. Stellgr. für den Batteriestrom In/Out: Spannung / Strom

	(E.3.2) Zwischenkreis	Kurzzeit- Energiespeicher des Umrichtersystems	In/Out: Spannung / Strom
	(E.3.4) Umrichter Netzseite	Leistungs- elektronisches Stellglied	In: EZE spez. Stellgr. für Wirk- & Blindleistung In/Out: Spannung / Strom
	(E.4) Filter	Beeinflussung des Frequenzbereichs der netzseitigen el. Energieübertragung (Übertragungs- verhalten / i.d.R. zur OS-Dämpfung)	In/Out: Spannung / Strom Pa: Filter spez. Parameter (bspw. Dämpfung / Grenzfrequenz)
(F) Elektrisches System (HW)	(F.1) Hilfssysteme (AUX)/ Hilfsversorgung	El. Systeme zur Eigenversorgung	In: Spannung Out: EZE spez. Betriebsgrößen, Fehlermeldungen In/Out/Pa: EZE spez. Betriebsgrößen
	(F.2) Abschalteneinheit	Schalteinrichtung zur Unterbrechung der el. Leistungsübertragung (des Hauptstrompfades)	In: Auslösesignal Schutzfunktion, Zuschaltbefehl
	(F.3) Optionaler Transformator	Elektrische Leistungsübersetzung zur Netzeinspeisung	In/Out: Spannung / Strom
Optional	Schaltanlage	Kopplung zur Netz- einspeisung	In: Auslösesignal, In/Out: Spannung / Strom
(G) Überwachung elektrisches System (HW & SW)	(G.1) Netzschutz	System zur Ausführung der Schutzfunktion(en) (ohne Abschalteneinheit)	In: Spannung, Frequenz, Out: Auslösesignal Schutzfunktion Pa: EZE spez. elektr. Betriebsgrenzen
	(G.2) Schutzmesstechnik	Strom- & Spannungswandler	In/Out: Spannung / Strom
	(G.3) Steuerung Hilfssysteme (AUX)	System zur Steuerung der Hilfssysteme	In/Out/Pa: EZE spez. Betriebsgrößen
(H) Regelung Energie- umwandlung (HW & SW)	(H.1) Lade- & Entladeregelung	Regelung der batterieseitigen Leistungselektronik	In: Leistungssollwert Out: EZE spez. Stellgr. für DC-Steller
	(H.2) Regelung Netzeinspeisung	Regelung der netzseitigen Leistungselektronik	In: Wirk- & Blindleistungs- sollwerte

			Out: EZE spez. Stellgr. für Wirk- & Blindleistung
(I) Externe Kommunikations- schnittstelle (HW & SW)	(I.1) Kommunikations- überwachung	Kommunikation mit übergeordneten Systemen (z.B. EZA-Regler)	In: Externe Referenzwerte Out: interne Referenzwerte

6 Messverfahren

Auf Basis des aktuellen Stands der Erkenntnisse der Expert*innen des AK kEZ, gespeist aus einer Vielzahl von Messkampagnen im Freifeld und auf Prüfständen, Zertifizierungsverfahren sowie Forschungs- und Entwicklungsergebnissen, wurden für die einzelnen Tests der FGW TR 3 Rev. 26 [6] die Komponenten identifiziert, die signifikanten Einfluss auf die einzelnen Testergebnisse besitzen. Den entsprechenden Tests wurden mindestens zu verwendende Prüfumgebungen zugeordnet. Zudem erfolgte eine Festlegung, welche (Teil-) Komponenten bei den Tests emuliert werden können bzw. als reale Hardware vermessen werden müssen.

Zukünftige Entwicklungen, neue Erfahrungen und Erkenntnisse in dem vorliegenden Themenfeld werden zu Veränderungen der Testverfahren von Komponenten führen. Beispielsweise ist es denkbar, dass weniger umfangreiche Prüfumgebungen bei entsprechender Nachweisführung ebenfalls eine erfolgreiche Modellvalidierung ermöglichen. Entsprechende Erfahrungen sollen zukünftig in den Prozess einfließen und in der Weiterentwicklung der vorliegenden Dokumentation Berücksichtigung finden.

Da im AK kEZ vorwiegend Expert*innen aus der Windenergiebranche vertreten sind, müssen die Vorgaben/Tests für VKM, PV & Speicher zukünftig durch einen entsprechenden Expert*innenkreis überprüft und ggf. aktualisiert werden.

Wie in der FGW TR 3 (Kapitel 3) [6] beschrieben, kann (abhängig vom Messpunkt) der Transformator bei verschiedenen Testverfahren Bestandteil der EZE sein und damit die Validierung von Modellen EZE-spezifisch auf Niederspannungs- oder Mittelspannungsebene erfolgen.

Vermessung von Hilffsystemen

Im Unterschied zu der Vielzahl anderer Komponenten steht bei der Vermessung der Hilffsysteme nicht primär die Modellvalidierung, sondern vielmehr der Nachweis der korrekten Funktionsweise der Hilffsysteme und deren Steuerung im Vordergrund, insbesondere bei FRT-Ereignissen, kurzzeitigen Frequenzabweichungen sowie quasistationären Spannungs- und Frequenzbetriebsbereichen. Bei Prüfpunkten mit Bezug zu Netzzrückwirkungen ist zudem der Eintrag (die OS-Emission) der Hilffsysteme von Interesse.

Die Vermessung und Bewertung des Einflusses relevanter Hilffsysteme (Komponente F.1) und deren Steuerung (Komponente G.3) sollte daher u.a. in Anlehnung an die in der IEC 61400-21-4 [7] beschriebenen Verfahren erfolgen:

- Variante A:
Es erfolgt ein Test aller relevanten Hilffsysteme an einer (ggf. gesonderten) Prüfeinrichtung zur Sicherstellung der einwandfreien Funktion, insbesondere bei FRT-Ereignissen.
- Variante B:
Werden alle relevanten Hilffsysteme der EZE über einen Puffer(-speicher) wie bspw. eine USV entkoppelt, so ist prinzipiell ein Test dieses Puffer(-speichers) an einer (FRT-) Prüfeinrichtung möglich. Vorausgesetzt wird dabei, dass der Puffer(-speicher) während der Prüfung eine für den Betrieb der EZE aussagekräftige Belastung aufweist.
- Variante C:
Haben die Hilffsysteme (und deren Steuerung) im Rahmen von durchgeführten Performancetests eine korrekte Funktionsweise nicht nachweisen können, so muss die Nachweisführung im Rahmen von Referenztests (an der gesamten EZE oder an einem Prüfaufbau) für Hilffsysteme (und deren Steuerung) erfolgen.
- Variante D:
Die Nachweisführung kann zudem in Teilen / in Kombination mit von Herstellern

veranlassten und durchgeführten Prüfungen erfolgen. Die Nachweisführung (Herstellererklärung) muss durch eine unabhängige Stelle (bspw. eine Zertifizierungsstelle) bestätigt und für den Zertifizierungsprozess zugelassen werden. Diese Variante ist insbesondere zum Nachweis der OS-Emission anzuwenden.

6.1 TESTS DER FGW TR3 REV. 26 [6]

6.1.1 ALLGEMEINES

Ergänzende Hinweise / Erläuterungen zur Beschreibung der folgenden Tests:

Hintergrund des Tests:

Eine stichpunktartige Erläuterung, vor welchem Hintergrund und mit welchem Ziel der Test im Rahmen der Vermessung einer EZE durchgeführt wird.

Ziel gemäß FGW TR3 (vgl. FGW TR 3 Rev. 26 [6]):

Die exakte Formulierung des Ziels des Tests gemäß TR3 Rev. 26 [6].

Test-Kategorie:

Zuordnung des Tests zu einer Test-Kategorie gemäß Kapitel 3 (bspw. Performancetest).

Relevante Komponenten:

Auflistung der für den Test relevanten und mindestens zu berücksichtigenden Komponenten, unterteilt nach den EZE-Typen (WEA, VKM, PV, Speicher). Die Auflistung der EZE-Typen und deren Komponenten basiert auf Kapitel 5. Bei der Auflistung wird unterschieden zwischen Komponenten, die als reale Hardware beim Test vorhanden sein müssen und Komponenten, die emuliert werden können.

Lesebeispiel:

- WEA – Modell: B, C, D:

Die Komponenten B, C und D der WEA können emuliert werden.

- WEA – Hardware: A, E, H:

Die Komponenten A, E und H der WEA müssen als reale Hardware beim Test vorhanden sein.

Alle Komponenten B, C, D und A, E, H besitzen entscheidenden Einfluss auf das Ergebnis des Tests. Nicht aufgeführte Komponenten müssen nicht berücksichtigt werden, da sie keinen entscheidenden Einfluss auf das Testergebnis haben.

Sollten EZE-Typen nicht aufgeführt sein, so steht hier eine Erarbeitung und Festlegung der relevanten Komponenten aus.

Minimale Prüfumgebung:

Auflistung der mindestens einzusetzenden Prüfumgebung gemäß Kapitel 4, unterteilt nach den EZE-Typen (WEA, VKM, PV, Speicher):

Lesebeispiel:

- WEA: MHiL

Die minimal einzusetzende Prüfumgebung für WEA ist ein MHiL (Mechanical-HiL).

Sollten EZE-Typen nicht aufgeführt sein, so steht hier eine Erarbeitung und Festlegung der minimalen Prüfumgebung aus.

6.1.2 WIRKLEISTUNGSABGABE

Hinweis: Generell kann bei den Tests zur Wirkleistungsabgabe eine Unterscheidung in Performance- und Funktionstest vorgenommen werden, wenn sichergestellt wird, dass im Rahmen eines Performancetest (oder eines Referenztests) die Fähigkeit der Regelung der Wirkleistung der EZE unter den höchsten Anforderungen nachgewiesen wurde. Die von der EZE geforderte Wirkleistungsbereitstellung kann dann in Teilen als Fähigkeitstest betrachtet werden, da es sich um eine Variation der Sollwertvorgabe für die einzuspeisende Wirkleistung handelt.

6.1.2.1 Wirkleistungsspitzen

Hintergrund des Tests:

- Überprüfung der Stabilität der Leistungseinspeisung der EZE
- Überprüfung des Reglerverhaltens / der Reglerperformance (in Bezug auf das Störverhalten)
- Vermessung & Bestimmung von Nenngrößen der EZE sowie Worst-Case-Größen

Ziel gemäß FGW TR 3 (vgl. FGW TR 3 Rev. 26, Kapitel 4.1.1.1 [6]):

- Es sollen die maximalen Wirkleistungsspitzen als 10-Minuten-Mittelwert P_{600} als 60-Sekunden-Mittelwert P_{60} und als 0,2-Sekunden-Mittelwert $P_{0,2}$ bestimmt werden.

Test-Kategorie:

- Performancetest

Relevante Komponenten:

- WEA
Modell: B, C, D
Hardware: A, E, H
- VKM
Modell: A, H, E
Hardware: B, C, D, G.3, F.1

Minimale Prüfumgebung:

- WEA: M-HiL
- VKM: M-HiL

6.1.2.2 Wirkleistung nach Sollwertvorgabe

Hintergrund des Tests:

- Überprüfung des Reglerverhaltens / der Reglerperformance (in Bezug auf das Führungsverhalten: Einstellgenauigkeit, Dynamik, Gradient)
- Überprüfung der Schnittstelle zur Sollwertvorgabe durch den Netzbetreiber

Ziel gemäß FGW TR 3 (vgl. FGW TR 3 Rev. 26, Kapitel 4.1.2.1 [6]):

- Es wird geprüft, mit welcher Einstellgenauigkeit, mit welchem Gradienten und mit welcher Einschwingzeit die EZE einer Sollwertvorgabe z.B. eines Netzbetreibers folgen kann.

Test-Kategorie:

- Performancetest

Relevante Komponenten:

- WEA
Modell: B, C, D
Hardware: I, A, E, H
- VKM
Modell: A, H, E
Hardware: B, C, D, G.3, F.1, I

Minimale Prüfumgebung:

- WEA: MHiL
- VKM: MHiL

6.1.2.3 Wirkleistungseinspeisung in Abhängigkeit der Netzfrequenz

Hintergrund des Tests:

- Kombination aus der Funktion der P(f)-Statik sowie der Anforderung an die Dynamik

Ziel gemäß FGW TR 3 (vgl. FGW TR 3 Rev. 26, Kapitel 4.1.3.1 [6]):

- Es soll geprüft werden, mit welcher anfänglichen Zeitverzögerung, An- und Einschwingzeit sowie mit welchem Wirkleistungsgradienten die EZE auf eine Abweichung der Netzfrequenz von ihrem Nennwert reagiert.

Test-Kategorie:

- Funktionstest

Relevante Komponenten:

- WEA
Modell: A
Hardware: -
- VKM
Modell: -
Hardware: A, B, C.1

Minimale Prüfumgebung:

- WEA: SiL
- VKM: CHiL

6.1.2.4 Bereitstellung von Primärregelleistung**Hintergrund des Tests:**

- Kombination aus der Funktion der P(f)-Statik sowie der Anforderung an die Dynamik

Ziel gemäß FGW TR 3 (vgl. FGW TR 3 Rev. 26, Kapitel 4.1.4.1 [6]):

- Es wird die Fähigkeit der EZE geprüft, kontinuierlich die Wirkleistungsabgabe in Abhängigkeit der Frequenz anzupassen.

Test-Kategorie:

- Funktionstest

Relevante Komponenten:

- WEA
Modell: A
Hardware: -
- VKM
Modell: -
Hardware: A, B, C.1

Minimale Prüfumgebung:

- WEA: SiL
- VKM: CHiL

6.1.2.5 Wirkleistungsgradient nach Spannungslosigkeit

Hintergrund des Tests:

- Überprüfung, ob die EZE einer definierten Rampe folgt.

Ziel gemäß FGW TR 3 (vgl. FGW TR 3 Rev. 26, Kapitel 4.1.5.1 [6]):

- Ziel ist es, den Wirkleistungsgradienten beim Wiederauffahren der EZE nach Spannungslosigkeit zu vermessen.

Test-Kategorie:

- Funktionstest

Relevante Komponenten:

- WEA
Modell: A
Hardware: -
- VKM
Modell: -
Hardware: A, B, C.1

Minimale Prüfumgebung:

- WEA: SiL
- VKM: CHiL

6.1.3 BLINDLEISTUNGSBEREITSTELLUNG

Hinweis: Generell kann bei den Tests zur Blindleistungsbereitstellung eine Unterscheidung in Performance- und Funktions- bzw. Fähigkeitstest vorgenommen werden, wenn sichergestellt wird, dass im Rahmen eines Performancetest (oder eines Referenztests) die Fähigkeit der Regelung der Blindleistungsbereitstellung der EZE unter den höchsten Anforderungen nachgewiesen wurde. Die von der EZE geforderte Blindleistungsbereitstellung kann dann in Teilen als Funktions- bzw. Fähigkeitstest betrachtet werden, da es sich um eine Variation der Sollwertvorgabe für die einzuspeisende Blindleistung handelt.

6.1.3.1 Blindleistungsverhalten bei Sollwertvorgabe $Q = 0$

Hintergrund des Tests:

- Überprüfung der Einstellgenauigkeit der Blindleistung im Normalbetrieb bei Sollwertvorgabe von $Q = 0$.

Ziel gemäß FGW TR 3 (vgl. FGW TR 3 Rev. 26, Kapitel 4.2.1.1 [6]):

- Ziel ist es, das Blindleistungsverhalten der EZE im Normalbetrieb bei Sollwertvorgabe $Q = 0$ zu ermitteln.

Test-Kategorie:

- Fähigkeitstest

Relevante Komponenten:

- WEA – Typ III:
Modell: -
Hardware: A, E, H
- WEA – Typ IV:
Modell: E.1, H.1
Hardware: A, E.2 – E.4, H.2
- VKM
Modell: B, C
Hardware: A, H, E

Minimale Prüfumgebung:

- WEA – Typ III: Generator-Umrichter-Prüfstand
- WEA – Typ IV: PHiL
- VKM: MHiL

Hinweis: In Abhängigkeit von dem gewählten Messpunkt muss der EZE-Transformator berücksichtigt werden. Für Vermessungen des stationären Verhaltens kann der EZE-Transformator auch simulativ abgebildet werden.

Hinweis VKM: Wenn die Möglichkeit besteht die Erregereinheit innerhalb der Komponenten (I, A, B, C, H, E) ausreichend detailliert für die zugehörige EZE modellieren zu können, besteht die Möglichkeit in einer SIL-Prüfumgebungen den Test durchzuführen. Eine Parametrierung generischer Modelle ist nicht ausreichend.

6.1.3.2 Vermessung des maximalen Blindleistungsstellbereichs (P-Q-Diagramm)**Hintergrund des Tests:**

- Überprüfung des maximalen Blindleistungsstellbereichs (P-Q-Diagramm)

Ziel gemäß FGW TR 3 (vgl. FGW TR 3 Rev. 26, Kapitel 4.2.2.1 [6]):

- Ziel dieser Messung ist es, die maximale kapazitive (übererregte) und induktive (untererregte) Blindleistungsbereitstellung der EZE im Normalbetrieb zu ermitteln.

Test-Kategorie:

- Fähigkeitstest

Relevante Komponenten:

- WEA – Typ III:
Modell: -
Hardware: A, E, H
- WEA – Typ IV:
Modell: E.1, H.1
Hardware: A, E.2 – E.4, H.2
- VKM
Modell: B, C
Hardware: A, H, E

Minimale Prüfumgebung:

- WEA – Typ III: Generator-Umrichter-Prüfstand
- WEA – Typ IV: PHiL
- VKM: MHiL

Hinweis: In Abhängigkeit von dem gewählten Messpunkt muss der EZE-Transformator berücksichtigt werden. Für Vermessungen des stationären Verhaltens kann der EZE-Transformator auch simulativ abgebildet werden.

Grenzwerte können durch die Steuerung limitiert werden.

6.1.3.3 Vermessung einzelner Punkte des spannungsabhängigen P-Q-Diagramms

Hintergrund des Tests:

- Auszugsweise Überprüfung der Herstellererklärung mit dem Schwerpunkt der Berücksichtigung der Spannungsabhängigkeit.

Ziel gemäß FGW TR 3 (vgl. FGW TR 3 Rev. 26, Kapitel 4.2.3.1 [6]):

- Das in der Herstellererklärung angegebene spannungsabhängige P-Q-Diagramm soll durch die Vermessung einzelner Arbeitspunkte des P-Q-Diagramms verifiziert werden.

Test-Kategorie:

- Fähigkeitstest

Relevante Komponenten:

- WEA – Typ III:
Modell: -
Hardware: A, E, H
- WEA – Typ IV:
Modell: E.1, H.1
Hardware: A, E.2 – E.4, H.2
- VKM
Modell: A, B, C, H, E
Hardware: E – falls auf dem Prüfstand möglich

Minimale Prüfumgebung:

- WEA – Typ III: Generator-Umrichter-Prüfstand
- WEA – Typ IV: PHiL
- VKM: Generatorprüfstand, alternativ SIL

Hinweis: In Abhängigkeit von dem gewählten Messpunkt muss der EZE-Transformator berücksichtigt werden. Für Vermessungen des stationären Verhaltens kann der EZE-Transformator auch simulativ abgebildet werden.

6.1.3.4 Blindleistung nach Sollwertvorgabe**Hintergrund des Tests:**

- Prüfung des Reglerverhaltens bezüglich der Blindleistung in Bezug auf Einstellgenauigkeit und Einschwingzeit sowie Prüfung der Schnittstelle zur Sollwertvorgabe

Ziel gemäß FGW TR 3 (vgl. FGW TR 3 Rev. 26, Kapitel 4.2.4.1 [6]):

- Ziel der Messung ist es, die Reaktion der EZE auf die Blindleistungssollwertvorgabe oder Verschiebungsfaktorsollwertvorgabe in Bezug auf die Einstellgenauigkeit und Einschwingzeit zu ermitteln.

Test-Kategorie:

- Performancetest

Relevante Komponenten:

- WEA – Typ III:
Modell: B, C, D
Hardware: A, E, H
- WEA – Typ IV:
Modell: B, C, D, E.1, H.1
Hardware: A, E.2 – E.4, H.2
- VKM
Modell: B, C
Hardware: A, H, E

Minimale Prüfumgebung:

- WEA – Typ III: MHiL
- WEA – Typ IV: PHiL
- VKM: SiL

Hinweis: In Abhängigkeit von dem gewählten Messpunkt muss der EZE-Transformator berücksichtigt werden. Für Vermessungen des stationären Verhaltens kann der EZE-Transformator auch simulativ abgebildet werden.

6.1.3.5 Q(U) / Q(P) - Vermessung der Statik, Blindleistung Q mit Spannungsbegrenzungsfunktion**Hintergrund des Tests:**

- Funktionstest zur Überprüfung der Generierung des Sollwerts der Blindleistungsregelung der bereits innerhalb des Performance Tests in 6.1.3.4 getesteten Dynamik

Ziel gemäß FGW TR 3 (vgl. FGW TR 3 Rev. 26, Kapitel 4.2.5.1, 4.2.6.1, 4.2.7.1 [6]):

- Ziel ist es, das Verfahren der Regelung der Blindleistung in Abhängigkeit von der Spannung / Wirkleistung sowie der Spannungsbegrenzung zu überprüfen.

Test-Kategorie:

- Funktionstest

Relevante Komponenten:

- WEA
Modell: A
Hardware: -
- VKM
Modell: A, I, H
Hardware: -

Minimale Prüfumgebung:

- WEA: SiL
- VKM: SiL

6.1.4 NETZRÜCKWIRKUNGEN**6.1.4.1 Flicker im Dauerbetrieb****Hintergrund des Tests:**

- Ermittlung der Flicker-Emission der EZE

Ziel gemäß FGW TR 3 (vgl. FGW TR 3 Rev. 26, Kapitel 4.3.1.1 [6]):

- Das Ziel ist die Bestimmung des Flickerbeiwertes c als Funktion des Phasenwinkels der Netzimpedanz und der Wirkleistung der EZE.

Test-Kategorie:

- Performancetest

Relevante Komponenten:

- WEA
Modell: B, C, D
Hardware: A, E, F.1, F.2, G
- VKM
Modell: -
Hardware: E

Minimale Prüfumgebung:

- WEA: MHiL
- VKM: Generatorprüfstand

6.1.4.2 Spannungsänderungen und Flicker während Schalthandlungen**Hintergrund des Tests:**

- Ermittlung der Spannungsänderung- und Flicker-Emission der EZE

Ziel gemäß FGW TR 3 (vgl. FGW TR 3 Rev. 26, Kapitel 4.3.2.1 [6]):

- Das Zu-, Um- und Abschalten von Erzeugungseinheiten und -anlagen führt zu Spannungsänderungen und Flicker am Verknüpfungspunkt. Die netzabhängigen

Spannungsänderungsfaktoren $k_{U(\Psi_k)}$ und Flickerformfaktoren $k_{f(\Psi_k)}$ werden bestimmt, um entsprechende Netzzrückwirkungen am Verknüpfungspunkt bewerten zu können.

Test-Kategorie:

- Performancetest

Relevante Komponenten:

- WEA
Modell: B, C, D
Hardware: A, E, F.1, F.2, G
- VKM
Modell: A, H
Hardware: B, C, E

Minimale Prüfumgebung:

- WEA: MHiL
- VKM: Generatorprüfstand

Hinweis: Sollte der EZE-Transformator Bestandteil des Filterdesigns muss dieser ebenfalls Bestandteil des Testaufbaus (der Hardware) sein.

Hinweis VKM: Wenn keine Schaltanlage Bestandteil der zu prüfenden EZE ist, kann die vorgelagerte Schaltanlage der Kundenanlage oder die Schaltanlage des Prüfstands genutzt werden.

6.1.4.3 Oberschwingungen

Hintergrund des Tests:

- Ermittlung der Oberschwingungs-Emission der EZE

Ziel gemäß FGW TR 3 (vgl. FGW TR 3 Rev. 26, Kapitel 4.3.3.1 [6]):

- Das Ziel ist die Ermittlung der Oberschwingungsströme und – spannungen beim Dauerbetrieb der EZE.

Test-Kategorie:

- Fähigkeitstest

Relevante Komponenten:

- WEA – Typ III:
Modell: D.2
Hardware: E, F.1, F.3, H
- WEA – Typ IV:
Modell: -
Hardware: E 3.4 – E.4, F.1, F.3, H.2
- VKM:
Modell: -
Hardware: E 3.1 und E.2

Minimale Prüfumgebung:

- WEA – Typ III: MHiL
- WEA – Typ IV: PHiL
- VKM: Generatorprüfstand

6.1.4.4 Oberschwingungen / Subharmonische**Hintergrund des Tests:**

- Ermittlung der Oberschwingungs-Emission (Subharmonische) der EZE

Ziel:

- *Hinweis:* Der Test ist nicht Bestandteil der FGW TR 3 Rev. 26 [6]. Die im Folgenden aufgeführten Angaben basieren auf Diskussionen und Einschätzungen aus der Zusammenarbeit des AK kEZ mit der UAG OS-Modelle der FGW in Bezug auf WEA und liefern eine erste Einschätzung eines solchen Messverfahrens.

Test-Kategorie:

- Performancetest

Relevante Komponenten:

- WEA – Typ III:
Modell: C, D
Hardware: E, F.1, F.3, H
- WEA – Typ IV:
Modell: C, D.2
Hardware: E, F.1, F.3, H

Minimale Prüfumgebung:

- WEA – Typ III: MHiL
- WEA – Typ IV: PHiL

6.1.4.5 Unsymmetrien des Stroms

Hintergrund des Tests:

- Bestimmung der Unsymmetrie des Stroms bei Eintrag in das Netz durch die EZE

Ziel gemäß FGW TR 3 (vgl. FGW TR 3 Rev. 26, Kapitel 4.3.4.1 [6]):

- Ziel der Messung ist es, die Unsymmetrie im eingespeisten Strom der EZE zu ermitteln.

Test-Kategorie:

- Fähigkeitstest

Relevante Komponenten:

- WEA – Typ III:
Modell: -
Hardware: A, E, H, F.1
- WEA – Typ IV:
Modell: E.1, H.1
Hardware: A, E, H, F.1, F.2, G
- VKM
Modell: -
Hardware: E 3.1 und E.2

Minimale Prüfumgebung:

- WEA – Typ III: Generator-Umrichter-Prüfstand
- WEA – Typ IV: PHiL
- VKM: Generatorprüfstand

Hinweis: In Abhängigkeit von dem gewählten Messpunkt muss der EZE-Transformator berücksichtigt werden. Für Vermessungen des stationären Verhaltens kann der EZE-Transformator auch simulativ abgebildet werden.

6.1.5 TRENNUNG DER EZE VOM NETZ

Dieser Test erfolgt gemäß dem definierten Testverfahren der Komponentenprüfung in der FGW TR 3 Rev. 26, Kapitel 6.7 [6] und gilt als Standardverfahren innerhalb der Nachweisführung. Folglich wird dieser Test im AK Komponentenbasierte Einheitenzertifizierung nicht weiter diskutiert, da die Tests auf Komponentenebene durchgeführt werden.

Hintergrund des Tests:

- Test des Entkupplungsschutzes

Ziel gemäß FGW TR 3 (vgl. FGW TR 3 Rev. 26, Kapitel 4.4.1 [6]):

- Ziel der Prüfung ist es, die Funktionsfähigkeit des Entkupplungsschutzes im Rahmen einer Typenprüfung oder einer Inbetriebnahme zu testen.

Test-Kategorie:

- Funktionstest

6.1.6 NACHWEIS DER ZUSCHALTBEDINGUNGEN

Dieser Test erfolgt gemäß dem definierten Testverfahren innerhalb der FGW TR 3 Rev. 26 [6]. Die Testdurchführung an Prüfständen ist u.a. als Standardverfahren in Kapitel 4.5.1.2 definiert. Folglich wird dieser Test im AK Komponentenbasierte Einheitenzertifizierung nicht weiter diskutiert.

Hintergrund des Tests:

- Prüfung, dass die EZE in bestimmten Zuständen nicht zuschaltet

Ziel gemäß FGW TR 3 (vgl. FGW TR 3 Rev. 26, Kapitel 4.5.1 [6]):

- Ziel der Prüfung ist es, zu zeigen, dass eine Zuschaltung und Wiederzuschaltung der EZE bei den in VDE-AR-N 4110 / 4120 / 4130 [2] [3] [4] genannten Bereichen möglich ist.

Test-Kategorie:

- Funktionstest

6.1.7 VERHALTEN BEI STÖRUNGEN IM NETZ (FRT)

Hinweis: Generell kann bei den Tests zum Verhalten bei Störungen im Netz (FRT) eine Unterscheidung in Performance- und Funktionstest vorgenommen werden, wenn sichergestellt wird, dass im Rahmen eines Performancetest (oder eines Referenztests) die FRT-Fähigkeit der gesamten EZE und insbesondere der Hilfssysteme unter den höchsten Anforderungen nachgewiesen wurde. Die von der EZE geforderte Blindleistungsbereitstellung kann dann als Fähigkeitstest betrachtet werden, da es sich um eine Variation der Sollwertvorgabe für die einzuspeisende Blindleistung handelt.

Hintergrund des Tests:

- Prüfung der Möglichkeiten in Bezug auf die Blindleistungsbereitstellung, AVR – Funktionalität, hier zur Überprüfung auf die Funktionalität (Funktionstest).

Ziel gemäß FGW TR 3 (vgl. FGW TR 3 Rev. 26, Kapitel 4.6.1.1 [6]):

- Die Tests sollen dazu dienen, die Leistungsfähigkeit der EZE bei Überspannungs- und Unterspannungsereignissen zu bewerten. Des Weiteren wird getestet, welcher Strom während des Spannungseinbruchs bzw. der Überspannung bereitgestellt werden kann.

Test-Kategorie:

- Funktionstest

Relevante Komponenten für Funktionstests:

- WEA
Modell: -
Hardware: A, H.2
- VKM
Modell: -
Hardware: A, B, C, D, E, F, G, H, I

Minimale Prüfumgebung für Funktionstests:

- WEA: SiL
- VKM: offen

Hinweis: In Abhängigkeit des Testfalls, können Komponenten emuliert werden. Maßgeblich für die Bestimmung der relevanten Komponenten ist, an welcher Stelle die für den Funktionstest relevanten Funktionalität hinterlegt ist.

Hintergrund des Tests:

- Prüfung der Möglichkeiten in Bezug auf die Blindleistungsbereitstellung, AVR – Funktionalität, hier zur Überprüfung auf die Leistungsfähigkeit, als Performancetest (ggf. Referenztest).

Ziel gemäß FGW TR3:

- Die Tests sollen dazu dienen, die Leistungsfähigkeit der EZE bei Überspannungs- und Unterspannungsereignissen zu bewerten. Des Weiteren wird getestet, welcher Strom während des Spannungseinbruchs bzw. der Überspannung bereitgestellt werden kann.

Test-Kategorie:

- Performancetest

Relevante Komponenten für Performancetest:

- WEA – Typ III:
Modell: B, C, D
Hardware: A, E, G.1, G.2, H
- WEA – Typ IV:
Modell: B, C, D, E.1, H.1
Hardware: A, E.2 – E.4, G.1, G.2, H.2
- VKM
Modell: -
Hardware: A, B, C, D, E, F, G, H, I

Minimale Prüfumgebung für Performancetest:

- WEA – Typ III: mHiL
- WEA – Typ IV: PHiL
- VKM: offen

Hinweis: Ein Referenztest ist zur Berücksichtigung des Einflusses auf AUX-Systeme durchzuführen (sofern G.3 und F.1 nicht Bestandteil der Prüfung als Performancetest sind). In Abhängigkeit des Messpunktes muss der Trafo berücksichtigt werden. Eine Prüfung der Abschalteinheit erfolgt im Rahmen der "Schutzprüfung".

6.1.8 NACHWEIS DES ARBEITSBEREICHS HINSICHTLICH SPANNUNG UND FREQUENZ (NUR FÜR PV-WECHSELRICHTER MIT $P_N \leq 100$ kW)**Hintergrund des Tests:**

- Überprüfung der Herstellerangaben in Bezug auf das Aufrechterhalten der Netzverbindung (Nur für PV-Wechselrichter mit $P_N \leq 100$ kW gefordert)

Ziel gemäß FGW TR 3 (vgl. FGW TR 3 Rev. 26, Kapitel 4.7.1 [6]):

- Ziel der Vermessung ist es, die geforderten Mindestverweildauern der EZE im Netzparallelbetrieb im kompletten Spannungs- und Frequenzbereich nachzuweisen. (Nur für PV-Wechselrichter mit $P_N \leq 100$ kW gefordert)

Test-Kategorie:

- Fähigkeitstest

Relevante Komponenten:

- WEA – Typ III: Prüfung wird nicht gefordert.
- WEA – Typ IV: Prüfung wird nicht gefordert.
- VKM: Prüfung wird nicht gefordert.
- PV: offen
- Speicher: Prüfung wird nicht gefordert.

Minimale Prüfumgebung:

- WEA – Typ III: Prüfung wird nicht gefordert.
- WEA – Typ IV: Prüfung wird nicht gefordert.
- VKM: Prüfung wird nicht gefordert.
- PV: offen
- Speicher: Prüfung wird nicht gefordert.

6.2 ZUSAMMENFASSENDE ÜBERSICHT DER TESTVERFAHREN

Tabelle 5 Zusammenfassung der Testverfahren inkl. jeweiliger Testart, Komponenten und Prüfumgebung

-	Testverfahren	Kapitel TR 3 Rev. 26	Testart	Komponenten						
				VKM Hardware	VKM / Prüfumgebung	PV	Speicher	WEA Modell	WEA Hardware	WEA / Prüfumgebung
Wirkleistungs- regelung	Wirkleistungsspitzen	4.1.1	Performance	A*, B*, C, E*	MHiL			B, C, D	A, E, H	MHiL
	Wirkleistungs nach Sollwertvorgabe	4.1.2	Typ 1: Performance Typ 2: Performance	I*, A*, B*, C, E*	MHiL			B, C, D	I, A, E, H	MHiL
	Wirkleistungseinspeisung in Abhängigkeit der Netzfrequenz	4.1.3	Funktionstest	A	CHiL			A		SiL
	Bereitstellung von Primärregelleistung	4.1.4	Funktionstest	A	CHiL			A		SiL
	Wirkleistungsgradient nach Spannungslosigkeit	4.1.5	Funktionstest	A	CHiL			A		SiL
Blindleistungs- bereitstellung	Blindleistungsverhalten bei Sollwertvorgabe Q=0	4.2.1	Fähigkeitstest	A, B*, C*, H, E	MHiL				A, E, H	Typ III: klassischer Generator-Umrichter-Prüfstand
								E.1, H.1	A, E.2-E.4, H.2	Typ IV: PHiL
	Vermessung des maximalen Blindleistungsstellbereichs (PQ-Diagramm)	4.2.2	Fähigkeitstest	A, B*, C*, H, E	MHiL				A, E, H	Typ III: klassischer Generator-Umrichter-Prüfstand
								E.1, H.1	A,, E.2-E.4, H.2	Typ IV: PHiL
	Vermessung einzelner Punkte des spannungsabhängigen PQ-Diagramms	4.2.3	Fähigkeitstest	A, B*, C*, H, E	MHiL				A, E, H	Typ III: klassischer Generator-Umrichter-Prüfstand
								E.1, H.1	A, E.2-E.4, H.2	Typ IV: PHiL
	Blindleistung nach Sollwertvorgabe (Blindleistungsregelung)	4.2.4	Performance	A, B*, C*, H, E	MHiL			B, C, D	A, E, H	Typ III: MHiL
								C, D, E.1,	A, E.2-E.4, H.2	Typ IV: PHiL
	Q(U) Regelung	4.2.5	Funktionstest	A, I	CHiL			A		SiL
	Q(P) Regelung	4.2.6	Funktionstest	A, I	CHiL			A		SiL
	Blindleistung Q mit Spannungsbegrenzungsfunktion	4.2.7	Funktionstest	A, I	CHiL			A		SiL

Kategorie	Testverfahren	Kapitel TR 3 Rev. 26	Testart	Komponenten						
				VKM Hardware	VKM / Prüfumgebung	PV	Speicher	WEA Modell	WEA Hardware	WEA / Prüfumgebung
Netzurückwirkungen	Flicker im Dauerbetrieb	4.3.1	Performance, (ggf. Referenztest)	A*, B, C, E, H*				B, C, D	A, E, H, F.1, F.2, G	MHiL
	Spannungsänderungen und Flicker während Schalthandlung	4.3.2	Performance, (ggf. Referenztest)	A*, B, C, E, H*				B, C, D	A, E, H, F.1, F.2, G	MHiL
	Oberschwingungen	4.3.3	Fähigkeitstest					D.2	E, F.3 F.1, H	Typ III: mHiL
	Oberschwingungen	4.3.3	Fähigkeitstest			E.3, E.4, F.3, (F.1), H.1, H.2			E3.4, E.4, F.3 F.1, H.2	Typ IV: PHiL
	Oberschwingungen / Subharmonische	4.3.3	Performancetest					C, D	E, F.3 F.1, H	Typ III: mHiL
	Oberschwingungen / Subharmonische	4.3.3	Performancetest					C, D.2	E, F.1, F.3, H	Typ IV: PHiL
	Unsymmetrien des Stroms	4.3.4	Fähigkeitstest	A*, B, C, E, H*					A, E, H, F.1	Typ III: klassischer Generator-Umrichter-Prüfstand
Schutzprüfung	Trennung der EZE vom Netz	4.4	Funktionstest	G.1, F.3, F.4					G.1, G.2, F.2	
	Zuschalten ohne vorherige Schutzauslösung	4.5.1	Funktionstest	A, ggf. H					A	
	Zuschalten nach Auslösung des Entkopplungsschutzes	4.5.2	Funktionstest	A, ggf. H					A	
FRT	UVRT Typ 1	4.6.2	Funktionstest, (ggf. Referenztest)	A, B, C, D, E, F, G, H, I						
	OVRT Typ 1	4.6.2		A, B, C, D, E, F, G, H, I						
	UVRT Typ 2	4.6.3						A, H.2		SiL
	OVRT Typ 2	4.6.3						A, H.2		SiL
FRT	UVRT Typ 1	4.6.2	Performancetest (+ ggf. Referenztest)	A, B, C, D, E, F, G, H, I						
	OVRT Typ 1	4.6.2		A, B, C, D, E, F, G, H, I						
	UVRT Typ 2	4.6.3						B, C, D	A, E, G.1, G.2, H	Typ III: MHiL
	UVRT Typ 2	4.6.3						B, C, D, E.1, H.1	A, E.2 - E.4, G.1, G.2, H.2	Typ IV: PHiL
	OVRT Typ 2	4.6.3						B, C, D	A, E, G.1, G.2, H	Typ III: MHiL
	OVRT Typ 2	4.6.3						B, C, D, E.1, H.1	A, E.2 - E.4, G.1, G.2, H.2	Typ IV: PHiL
	Nachweis des Arbeitsbereiches hinsichtlich Spannung und Frequenz	4.7	Fähigkeitstest					E.1, H.1	A, E.2 - E.4, H.2, F.1, G.3	Typ IV: PHiL
		4.7						B, C, D	A, E, H, F.1, G.3	Typ III: MHiL

7 Modellbildung & Simulation

Für den Prozess der komponentenbasierten Einheitenzertifizierung ist der Einsatz von Modellen einzelner Komponenten (unabhängig, ob zu vermessende oder als Bestandteil der Prüfumgebung), der EZE und weiterer Systeme wie der Prüfumgebung eine essenzielle Voraussetzung.

Der vorliegende Abschnitt liefert dazu notwendige Definitionen und eine Übersicht der für den Prozess notwendigen Modelle.

7.1 DEFINITIONEN MIT BEZUG ZUR MODELLBILDUNG

Root mean square (RMS)-Modelle (vgl. FGW TR 4 Rev. 10 [1]):

Der Nachweis des Verhaltens bei Netzereignissen (symmetrischen und unsymmetrischen Fehlern, Frequenzänderung, ...) erfolgt meist mit dynamischen Simulationsmodellen im Zeitbereich, bei denen der Mittelwert der Grundschiwingung betrachtet wird (Symmetrische Komponenten der Grundschiwingung „RMS“).

Elektromagnetische transiente (EMT)-Modelle (vgl. FGW TR 4 Rev. 10 [1]):

In Netzen mit zunehmenden Umrichteranteil ergeben sich neue Anforderungen an Simulationsmethoden. Zur Betrachtung von Resonanzen und höherfrequenter Reglerinteraktion sind sogenannte Momentanwertmodelle / EMT-Modelle notwendig, die auch höhere Frequenzbereiche ausreichend genau abbilden können.

Detaillierungsgrad / Detaillierung eines Modells:

Der Detaillierungsgrad / die Detaillierung ist (gemäß FGW TR 4 [1]) ein Maß für die Komplexität und Genauigkeit eines Modells und im Wesentlichen abhängig von dem Zweck / der Aufgabe der Simulation, wobei mindestens zwischen den Hauptkategorien der stationären und dynamischen Verfahren unterschieden werden kann.

Modellkompatibilität:

Die Modellkompatibilität beschreibt die Möglichkeit der Interaktion von Modellen mit unterschiedlichem Detaillierungsgrad und / oder Simulationaufgaben. Insbesondere bei der Kombination von mehreren Komponentenmodellen oder Prüflings- und Prüfumgebungsmodellen ist daher eine entsprechende Kompatibilität sicherzustellen.

Echtzeitmodelle:

Echtzeitmodelle sind zeitdiskrete, deterministische Modelle, die in der Lage sind, in einer vorgegebenen Zeitschrittweite, also zu definierten Zeitpunkten, alle Eingangsgrößen zu verarbeiten und die entsprechenden Ausgangsgrößen bereitzustellen. Die Bearbeitung aller Simulationaufgaben / Reaktionen erfolgt demnach immer rechtzeitig und ohne Ausnahme. Die Reaktionszeiten von Echtzeitmodellen sind durch die zugeordnete Zeitschrittweite (Abtastzeit) definiert. Diese Schrittweite kann in Abhängigkeit von den zu emulierenden Komponenten und den durchzuführenden Tests entsprechend der zeitlichen Anforderung des realen Prozesses angepasst werden.

Echtzeitmodelle sind somit in Kombination mit entsprechenden realen Aktuatoren die entscheidende Voraussetzung, dafür dass mit Hilfe der Prüfumgebung möglichst realitätsnahe Tests durchgeführt werden können.

Nicht-Echtzeitmodelle:

Nicht-Echtzeitmodelle sind im Unterschied zu Echtzeitmodellen nicht deterministisch. Das bedeutet, dass keine speziellen Anforderungen an die Ausführungszeit der Modelle bestehen.

Beim Einsatz von Offline-Simulationsmodellen steht in der Regel eine Validierung von Simulationsmodellen und vorhandenen Messdaten im Vordergrund.

Schnittstelle:

Schnittstellen definieren die Verbindung zwischen einzelnen Komponenten, unabhängig davon, ob es sich um eine Hardware-, Software- oder simulierte/modellierte Komponente handelt. Sie werden beschrieben durch eine oder mehrere Ein- bzw. Ausgangsgrößen, die eine korrekte Funktion bei der Kopplung der Komponenten in Bezug auf Signal- und Leistungsfluss (sowohl elektrisch als auch mechanisch) sicherstellen.

7.2 MODELLDEFINITIONEN

7.2.1 EMULATIONSMODELLE

Emulationsmodelle sind Echtzeitmodelle (z.B. der Rotor- und Strukturdynamik, des Generators und / oder des Netzes) und werden zur Nachbildung nicht vorhandener Komponenten des Prüflings sowie für die Nachbildung des Netzes verwendet. Durch die Kombination von Emulationsmodellen und realen Aktuatoren* ergibt sich die Emulation der entsprechenden Komponenten. Die Kombination aus Emulationsmodell und Aktuator weist eine Dynamik auf, die hinreichend genau dem stationären und dynamischen Verhalten der emulierten Komponenten im realen Betrieb entsprechen muss.

*Aktuatoren sind in diesem Zusammenhang als Bestandteil der Prüfumgebung zu verstehen, vgl. Kapitel 4.1.5 / 4.1.6 – Mech. / El. Aktuator

7.2.2 SIMULATIONSMODELLE

Allgemeine Definition eines Simulationsmodells (gemäß der Definition der TR 4 [1]) mit der zusätzlichen Anforderung, dass das Modell alle Verhaltensweisen mit Bezug zur Nachweisführung der elektrischen Eigenschaften repräsentiert.

7.2.2.1 Prüfumgebungsmodell

Das Prüfumgebungsmodell beschreibt / simuliert die Funktion(en) / das Verhalten der Prüfumgebung und kann im Rahmen des Zertifizierungsprozesses für die offline Simulationen (siehe Definition Kapitel 7.1 “Nicht-Echtzeitmodelle (offline)”) zur Verifikation der Ergebnisse (von Prüfstands- / Komponententests) eingesetzt werden.

7.2.2.2 Referenzmodell der Komponente

An das Referenzmodell der Komponente werden die höchsten Anforderungen in Bezug auf den Detaillierungsgrad des dynamischen Verhaltens der Komponente gestellt. Abhängig von der zu prüfenden Komponente und des durchzuführenden Tests, kann es sich um ein EMT- oder RMS Modell handeln. Mit Hilfe der erzeugten Messdaten kann das Modell offline (mit der Playbackvariante) oder mit dem Modell der Prüfumgebung (auf Komponentenebene) validiert werden.

7.2.2.3 Referenzmodell der EZE

An das Referenzmodell der EZE werden die höchsten Anforderungen in Bezug auf den Detaillierungsgrad des dynamischen Verhaltens der gesamten EZE gestellt. In Abhängigkeit des durchzuführenden Tests, kann es sich um ein EMT- oder RMS Modell handeln.

Herstellerspezifische Modelle bieten in der Regel eine hohe Genauigkeit und lassen sich gut anhand von Messungen validieren. Die im Modell enthaltenen Parameter können den realen EZE-Parameter gut zugeordnet werden.

7.2.2.4 Reduziertes Modell der EZE / der Komponente

Reduzierte Modelle werden für einen bestimmten Markt oder für eine bestimmte Anwendung i.d.R. zur offline Simulation bereitgestellt. Ein reduziertes Modell der EZE / der Komponente wurde im Rahmen des Zertifizierungsprozesses validiert, kann gekapselt sein („Black-Box“) und besitzt i.d.R. einen geringeren Detaillierungsgrad oder eingeschränkte Funktionalitäten im Vergleich zu einem Referenzmodell.

7.2.2.5 Standardisierte / generische Modelle

Standardisierte Modelle (auch als generische Modelle bezeichnet, z.B. gemäß IEC 61400-27-1:2020, für das Mitsystem mit Ergänzung zum Gegensystem im Anhang F der TR 4 [1]) haben eine offengelegte Modellstruktur (ggf. in mehreren Varianten), nur die Parameter werden vom EZE-/Komponentenhersteller bereitgestellt. Die Implementierung in Software erfolgt beim Lieferanten der Simulationssoftware und ist oftmals international standardisiert.

7.3 VALIDIERUNG VON SIMULATIONSMODELLEN

Grundsätzlich können im Rahmen eines Zertifizierungsprozesses je nach projektspezifischen Erfordernissen sowohl der „Gesamtsystemansatz“ als auch das „Playback-Verfahren“ für die Validierung der unter Abschnitt 7.2.2.2 bis Abschnitt 7.2.2.5 beschriebenen Modelle genutzt werden. Beide Ansätze sind in der IEC 61400-27-2 [7] grundsätzlich formuliert. Sie können auf die Anforderungen der komponentenbasierten Einheitszertifizierung und damit einzelne Komponenten und Subsysteme adaptiert werden.

Gesamtsystemansatz:

Beim Gesamt-System-Ansatz werden, zusätzlich zu dem zu validierenden EZE-Modell, Netzmodell(e) und Modell(e) der Prüfumgebung eingesetzt. Damit können alle gemessenen Größen (in der Regel mindestens Netzspannung, Wirk- und Blindstrom bzw. Wirk- und Blindleistung) durch einen Vergleich von Mess- und Simulationsergebnissen validiert werden.

Dieser Ansatz ermöglicht die Überprüfung der Stabilität des Modells und damit der EZE bei geschlossenen Regelkreisen unter allen praktischen Betriebsbedingungen. Nachteilig ist, dass durch den Einsatz von Modellen des Netzes und der Prüfeinrichtungen zusätzliche Unsicherheiten entstehen, die ihren Ursprung nicht im EZE-Modell haben.

Für die Simulation einer Komponente muss das zu validierende Komponentenmodell um ein oder mehrere Modell(e) zur Abbildung relevanter Bestandteile der Prüfumgebung erweitert werden. Für die Validierung können dann neben den Ein- und Ausgangsgrößen der Komponente weitere Mess- und Simulationsgrößen der Prüfumgebung verwendet werden.

Hinweis: Gemäß Kapitel 4 können sowohl Hardware als auch Modelle (vgl. Kapitel 7.2) Bestandteil der Prüfumgebung sein.

Playback-Verfahren:

Beim Playback-Verfahren erfolgt eine Simulation der EZE, wobei gemessene Größen (in der Regel die Netzspannung) als Eingangsgrößen verwendet werden. Typischerweise werden mit diesem Verfahren die Verläufe von Wirk- und Blindstrom bzw. Wirk- und Blindleistung simuliert, die mit Messungen verglichen werden können.

Dieser Ansatz trägt dazu bei, Unsicherheiten aufgrund des Netzzustandes und der Prüfeinrichtungen zu reduzieren und kann daher in erster Linie für die Bewertung der Genauigkeit des EZE-Modells herangezogen werden. Für Stabilitätsuntersuchungen ist das Verfahren aufgrund der geöffneten Regelschleife nicht bzw. nur sehr eingeschränkt geeignet.

Eine Anpassung des Verfahrens auf die Simulation einer Komponente bedeutet die Vorgabe der jeweiligen komponentenspezifischen Eingangsgrößen. Simulierte Ausgangsgrößen können dann mit den dazugehörigen Messgrößen verglichen werden. Eine Simulation der Prüfumgebung ist nicht nötig.

Anwendbarkeit der Messdaten:

Im Rahmen des messverfahrenspezifischen Validierungsprozesses können die Messdaten für die folgenden Modellvalidierungen genutzt werden:

- Validierung der Referenzmodelle von Komponenten:

Die Referenzmodelle der Komponenten werden anhand entsprechender Messdaten validiert und zum Referenzmodell der EZE zusammengesetzt. Auch bei schon bestehenden EZE-Modellen kann das Verhalten des entsprechenden Komponentenmodells in der Gesamtsimulation überprüft werden.

- Validierung des EZE-Modells:

Die Messdaten der einzelnen Tests werden auf einem Komponentenprüfstand generiert, der als minimale Prüfumgebung für diesen Test in Kapitel 6 definiert ist. Diese Messdaten können zur Validierung des EZE-Modells genutzt werden.

Unabhängig davon können die Messungen ebenfalls für die Validierung der Emulationsmodelle, die Bestandteil anderer Prüfumgebungen sind, verwendet werden:

- Validierung des Emulationsmodells:

Die Messdaten einer Komponentenvermessung werden zur Validierung eines entsprechenden Echtzeitmodells genutzt, welches für den Betrieb eines Prüfstands mit Hardware-in-the-Loop (HiL) Ansatz notwendig ist und zur Vermessung weiterer Komponenten der EZE genutzt werden kann.

Aggregation und Plausibilisierung:

Die Aggregation mehrerer Komponentenmodelle zu einem EZE-Gesamtmodell ist methodisch zu beschreiben. In diesem Zusammenhang sind die relevanten dynamischen Kenngrößen der Komponenten (Zeitkonstanten, Dämpfungsfaktoren, Regelverstärkungen, Totzeiten) zu dokumentieren und physikalisch korrekt zu koppeln. Eine algebraische Addition oder Mittelung von Ergebnissen einzelner Modelle ohne Berücksichtigung der Regelungsinteraktion ist unzulässig. Die so gebildeten Gesamtsystemmodelle dienen als Grundlage für Untersuchungen auf EZE- bzw. EZA-Ebene.

Vor der Zertifizierung der EZE-Modelle ist eine Plausibilitätsprüfung der kombinierten Komponentenmodelle durchzuführen. Die Prüfung umfasst insbesondere die Überprüfung von Energie- und Stabilitätskonsistenz, Signalfluss und zeitlicher Synchronisation der gekoppelten Modelle. Ziel ist die Sicherstellung, dass keine unphysikalischen Energieflüsse, Mehrfachregelungen oder instabilen Eigenmoden durch die Kopplung entstehen.

Diese Plausibilisierung kann grundsätzlich folgende Prüfungen umfassen:

- (1) Energiefluss-Konsistenzprüfung: Überprüfung, ob die Summe der in den Komponentenmodellen berechneten Leistungen der gemessenen Gesamtleistung der Erzeugungseinheit entspricht. Abweichungen dürfen im stationären Zustand nur innerhalb noch zu bestimmender Grenzen liegen; unphysikalische Energieflüsse oder doppelte Leistungsverluste müssen ausgeschlossen sein.
- (2) Stabilitätsprüfung: Untersuchung, ob das gekoppelte Gesamtsystem nach einer kleinen Anregung (z. B. Spannungs- oder Frequenzsprung) ein gedämpftes Verhalten zeigt. Unzulässig sind wachsende Schwingungen oder ungedämpfte Oszillationen infolge überlagerter Regler.
- (3) Signalfluss- und Zeitkonsistenzprüfung: Sicherstellen, dass Soll- und Ist-Signale korrekt übertragen und verarbeitet werden. Die Signalrichtung muss eindeutig sein, und Zeitverzögerungen zwischen Komponenten dürfen noch zu definierende Zeiträume nicht überschreiten. Dadurch wird verhindert, dass doppelte Filterungen oder Rückkopplungsfehler auftreten.
- (4) Parameter- und Referenzabgleich: Vergleich gemeinsamer Parameter (z. B. Spannung-, Frequenz- oder Regelreferenzen, Reglerverstärkungen) zwischen den Modellen. Abweichungen sind zu dokumentieren und zu begründen.

Die genannten Plausibilitätsprüfungen können modellbasiert oder im Rahmen eines vereinfachten Hardware-in-the-Loop-Tests durchgeführt werden.

8 Handlungsempfehlungen

Im Rahmen der Diskussionen des AK kEZ haben sich eine Vielzahl von Fragestellungen ergeben, die zukünftig im AK kEZ und im Austausch mit weiteren beteiligten Stellen diskutiert, bearbeitet und weiterentwickelt werden sollten. Zu diesen Stellen gehören insbesondere Arbeitskreise der FGW (TR 3, TR 4, TR 8 sowie der FAEE), Hersteller, Messinstitute, Zertifizierungsstellen, Forschungseinrichtungen sowie der FNN.

Von großer Bedeutung ist zudem die Berücksichtigung zukünftiger Erfahrungen von Arbeiten und Maßnahmen mit Bezug zu einer komponentenbasierten Einheitenzertifizierung. Sollte sich beispielsweise zeigen, dass auch Messungen zur Nachweisführung in weniger umfangreichen Prüfumgebungen erfolgversprechende Ergebnisse liefern, sollte dies bei der Weiterentwicklung des Prozesses Berücksichtigung finden (vgl. Kapitel 6).

Nachfolgend sind, gruppiert nach Themenfeldern aber ohne eine zwangsläufige Priorisierung, einige Handlungsempfehlungen formuliert, die sich im Laufe der Diskussion des AK kEZ ergeben haben.

8.1 ZERTIFIZIERUNGSPROZESS

Textvorschlag komponentenbasiertes Zertifizierungsverfahren (vgl. Kapitel 2)

Diskussion und Formulierung eines Textvorschlages für den Prozess des komponentenbasierten Zertifizierungsverfahrens

- Hauptverantwortlich: TR 8, AK kEZ
- Teilverantwortlich: TR 3, TR 4, Zert.-Stellen

Anpassung des Prozesses der komponentenbasierten Einheitenzertifizierung

Zukünftig wird erwartet, dass durch kontinuierliche Weiterentwicklung einzelne Prüfumgebungen in der Lage sein werden, sämtliche für den jeweiligen Prüfling erforderlichen akkreditierten Messungen vollständig abzudecken. Die hierbei erzeugten Messergebnisse sind dem standardisierten Validierungs- und Zertifizierungsprozess zuzuführen. Erfolgt die Durchführung der Messungen unter Einhaltung aller definierten Anforderungen und Toleranzen und wird das zugehörige EZE-Modell erfolgreich validiert, können die Ergebnisse unmittelbar zur Erteilung des EZE-Zertifikats herangezogen werden. Für diesen Zweck dürfen ausschließlich Prüfumgebungen eingesetzt werden, die für alle relevanten Prüfungen vollständig qualifiziert und deren Leistungsfähigkeit im Rahmen der jeweils geltenden Anforderungen nachgewiesen ist.

Diskussion und Formulierung eines Textvorschlages für einen ggf. angepassten Prozess des komponentenbasierten Zertifizierungsverfahrens

- Hauptverantwortlich: TR 8, AK kEZ
- Teilverantwortlich: TR 3, TR 4, Zert.-Stellen

Überarbeitung der Definition von Produktfamilien

Erarbeitung und Formulierung einer Definition von Produktfamilien zur Weitergabe an den FNN, die die bisherigen Vorgaben weiter konkretisiert und stärkeren Bezug auf die elektrischen Eigenschaften nimmt.

- Hauptverantwortlich: TR 8
- Teilverantwortlich: AK kEZ, TR 3, TR 4

Prozess zum Versions- und Änderungsmanagement

Anpassung des Prozesses zum Versions- und Änderungsmanagement gemäß TR 8 [8] unter Berücksichtigung der folgenden Punkte:

Jede zertifizierte Komponente sollte eine eindeutige Parameter- und Firmware-Version besitzen und Änderungen an Software, Firmware oder zertifikatsrelevanten Parametern sind zu dokumentieren und der Zertifizierungsstelle zu melden. Für geringfügige Änderungen sollte über ein vereinfachtes Nachzertifizierungsverfahren nachgedacht werden.

- Hauptverantwortlich: TR 8
- Teilverantwortlich: AK kEZ, TR 3, TR 4

8.2 VALIDIERUNG & MODELLE

Zusätzlich zu den bestehenden Verfahren und beschriebenen Anforderungen innerhalb der TR 4 [1] sind folgende inhaltlichen Punkte im Modellbereich zukünftig relevant:

Validierungsverfahren für Komponentenmodelle (vgl. Kapitel 7)

Definition eines, im Idealfall allgemeingültigen, Validierungsverfahrens für die Komponentenmodelle sowie die Festlegung von Vertrauensbereichen / Grenzwerten und Modellgüten unter Berücksichtigung der Fehlerfortpflanzung zum EZE-Modell.

- Hauptverantwortlich: TR 4
- Teilverantwortlich: AK kEZ, TR 8, Zert.-Stellen

Verfahren zur Model-to-Model Validierung (vgl. Kapitel 7)

Definition von Verfahren zur Model-to-Model Validierung reduzierter / standardisierter Modelle, unabhängig davon, ob es sich um Modelle von Komponenten, der EZE oder der Prüfumgebung handelt

- Hauptverantwortlich: TR 4
- Teilverantwortlich: Zert.-Stellen, TR 8

Kopplung von Komponentenmodellen

Definition eines Prozesses zur Kombination von einem oder mehreren validierten Komponentenmodellen zu einem validierten Gesamtmodell der EZE. In diesem Zusammenhang ist zu prüfen, inwieweit eine Standardisierung und weitere Detaillierung der Schnittstellen zwischen Komponenten in Anlehnung der Darstellungen in Kapitel 5 notwendig ist.

- Hauptverantwortlich: TR 4
- Teilverantwortlich: AK KEZ, TR 8, Zert.-Stellen,

Allgemeine Mindestanforderung bei der Modellerstellung / Modellentwicklung

Das Simulationsmodell muss rechnerlauffähig sein und in einer marktüblichen Simulationssoftware zu nutzen und ggf. anzupassen sein. Zusätzlich ist auf eine akzeptable Laufzeit und Komptabilität zu achten.

- Hauptverantwortlich: TR 4

8.3 PRÜFUMGEBUNGEN & TESTVERFAHREN/MESSVORSCHRIFTEN

Unsicherheitsbetrachtung

Für die Unsicherheitsbetrachtung des gesamten Prozesses ist eine AK übergreifende Diskussion notwendig, da Unsicherheiten der Modelle, der Aktuatoren sowie der Messtechnik Anteile an der Gesamtunsicherheit liefern. Idealerweise erfolgt die Diskussion am Beispiel eines oder mehrerer Pilotprozesse.

- Hauptverantwortlich: AK KEZ,
- Teilverantwortlich: TR 3, TR 4, TR 8

Pilotprozess

Experimentelle Überprüfung des Verfahrens anhand ausgesuchter Komponenten und Durchführung eines beispielhaften Zertifizierungsprozesses

- Hauptverantwortlich: AK KEZ,
- Teilverantwortlich: Forschungsinstitute, TR 3, TR 4, TR 8

Messvorschriften für (einzelne) Komponenten

Erarbeitung von konkreten Messvorschriften an allgemeinen oder konkreten Komponenten zur Nachweisführung

- Hauptverantwortlich: TR 3
- Teilverantwortlich: TR 8, TR 4

Überprüfung und Einarbeitung der Prüfumgebungen in die FGW TR3 (vgl. Abschnitt 4.1)

Aufnahme der Definitionen der Prüfumgebungen in die TR 3, idealerweise mit Beispielen für ausgewählte Komponenten

- Hauptverantwortlich: TR 3 – AG Prüfstände
- Teilverantwortlich: AK kEZ, TR 3

Überprüfung und Einarbeitung der Testklassifizierungen in die FGW TR3 (vgl. Abschnitt 6.1)

Innerhalb der Testkategorien umfassen einzelne Tests die Überprüfung von Funktionen und der dynamischen Performance einer Einheit. Durch die Testklassifizierung ergibt sich die Möglichkeit die Testdurchführung zusammenzufassen und in einem Test die dynamische Performance der Einheit zu testen und in weiteren Tests die Funktionen zu überprüfen. Hier wird eine Anpassung der Testdurchführung und Dokumentation bei den einzelnen Tests benötigt.

- Hauptverantwortlich: TR 3
- Teilverantwortlich: AK kEZ, TR 3

Skalierung von Prüfergebnissen

Diskussion der Skalierung von Prüfergebnissen (Übertragbarkeit auf EZE größerer Leistung bzw. Test von Teilsystemen) sollte in den Gremien begonnen werden

- Hauptverantwortlich: TR 8, TR 3
- Teilverantwortlich: AK kEZ

„Qualitätssiegel“ Prüfumgebung/Prüfstand (vgl. Kapitel 4.2)

Erarbeitung eines (mehrstufigen) Verfahrens zur Sicherstellung der Vergleichbarkeit der Tests/Testverfahren in den Prüfumgebungen mit Bezug auf internationale Standards. In Abhängigkeit von der Prüfumgebung sollen u.a. Anforderungen an Reproduzierbarkeit, Verfahren zur Dokumentation, Toleranzen und ggf. Echtzeitfähigkeit erfolgen.

- Hauptverantwortlich: TR 8
- Teilverantwortlich: AK kEZ, TR 3, TR 4, Zert.-Stellen, Prüfstandbetreiber

Übergangsverfahren für neue Prüfstandsfähigkeiten

Aufgrund der hohen Dynamik dieser gesamten Thematik, ist davon auszugehen, dass getroffene Annahmen z.B. der Prüfumgebungsanforderungen sich kurzfristig abweichend darstellen. Kann ein Prüfstandsbetreiber nachvollziehbar zeigen, dass sich der Einsatzbereich der Prüfumgebung erweitert hat, muss es möglich sein, durch ein beschleunigtes Verfahren, dies anzuerkennen noch bevor es zu einer neuen Revision von TR 3/TR 4/TR 8 kommt. Daher scheint es sinnvoll, dazu ein beschleunigtes Verfahren zu entwickeln.

- Hauptverantwortlich: TR 8
- Teilverantwortlich: AK kEZ, TR 3, TR 4, Zert.-Stellen, Prüfstandbetreiber

Netzbildendes und Systemstützendes Verhalten

Die Erkenntnisse und Ideen des AK kEZ sollen auf aktuelle und zukünftige Fragestellungen zum netzbildenden und systemstützenden Verhalten von EZE an den FNN weitergegeben werden. Dies ist insbesondere für die Windenergie von großem Interesse, da zu dieser Fragestellung aktuell keinerlei Tests auf Prüfständen erlaubt sind.

- Hauptverantwortlich: TR 3
- Teilverantwortlich: AK kEZ, TR 8

9 Veröffentlichungen und Projekte

Die Validierung der elektrischen Eigenschaften auf Komponentenebene ist für Speichersysteme und PV-EZE seit Beginn des Testens an diesen Einheiten das Standardverfahren und wird auch in dieser Form im Nachweisprozess zertifiziert. An der Weiterentwicklung der Übertragung von Feldtests und Systemtest (Gondelprüfstand) auf die Komponentenprüfstände bei WEA arbeiten national und international WEA-Hersteller und Forschungsinstitute. Neben der Nachweisführung, dass komplexe Prüfstände in der Lage sind die elektrisch-mechanische Interaktion zu emulieren und die Feldtests auf den Prüfständen zu reproduzieren, werden auch Fragen zur Gütebestimmung im PHiL oder zur Modellvalidierung untersucht und Erfahrungen gesammelt. Die folgende Auflistung von Veröffentlichungen und Forschungsprojekten soll den Expert*innen innerhalb der AKs unterstützen, die passenden Informationen und Ansprechpartner/-innen in die sich ergebenden Diskussionen einfacher einbinden zu können. Die Liste hat keinen Anspruch auf Vollständigkeit:

Im Bereich Wind sind folgende Veröffentlichungen und Forschungsprojekte zur Nachweisführung auf Umrichter- und Reglerprüfständen bekannt:

- [1] Mohsen Neshati, Soroush Azarian, Owen Curran, Rahul R. Pillai, Jens Due, Emerson Guest, Nuno M A Freire, Thomas Dreyer, Frank Martin, "Grid Connection Testing of Wind Energy Converters with Medium Voltage Generator- and Grid Emulation on a Multi-Megawatt Power-Hardware-in-the-Loop Test Rig", Wind & Solar Integration Workshop, Copenhagen, 2023

- [2] Owen Curran, Mohsen Neshati, Gabriel Miguel Gomes Guerreiro, Thomas Dreyer, (Siemens Gamesa) und Sokratis Tentzerakis, Marcel Barschneider (UL Solutions), "WTG Grid Compliance Testing and Validation Part1: Grid-Converter Test Rig Measurement and Verification based on the IEC 61400-21-4", Wind & Solar Integration Workshop, Helsinki 2024

- [3] Gabriel Miguel Gomes Guerreiro, R. Sharma, O. Curran, M. Neshati, P. Kumar, T. Dreyer, K.H. Jensen, (Siemens Gamesa), "WTG Grid Compliance Testing and Validation Part2: Combined Test Rig- and Prototype WTG-Based Model Validation Proposal", Wind & Solar Integration Workshop, Helsinki 2024

- [4] Borowski, Philipp, "PQ4Wind – A Novel test bench for component-level wind turbine converter testing", 22nd Wind & Solar Integration Workshop, Den Haag 2022, 10.1049/icp.2022.2813

- [5] Hans, Florian, "Application of vector-based validation measures in power-hardware-in-the-loop testing of wind turbines" 23rd Wind & Solar Integration Workshop, Helsinki 2024

- [6] Verbundvorhaben [03EE2009A]: PQ4Wind – Power – Quality – Test und Impedanz – modell – Validierung für Hauptumrichter von Windenergieanlagen; Teilvorhaben: Aufbau einer Testeinrichtung und Entwicklung von Testverfahren zur Impedanzvermessung und zur Validierung von Oberschwingungsmodellen für Hauptumrichter von Windenergieanlagen; EnArgus

- [7] Verbundvorhaben: ENGEL – Emulated Nacelle Grid tEsting Laboratory; Teilvorhaben: Aufbau der 30 MW Testeinrichtung ENGEL zur Validierung von Multi-Megawatt-Windturbinenmodellen in zukünftigen offshore Energiesystemen; EnArgus

- [8] Verbundvorhaben: VirTuOS – Virtualisierung der Testverfahren von Windenergieanlagen durch Online-Services – VirTuOs; Teilvorhaben: Entwicklung und Validierung vernetzter Komponententests basierend auf Hardware-in-the-Loop Systemen; EnArgus

[9] Verbundvorhaben: VirTuOS – Virtualisierung der Testverfahren von Windenergieanlagen durch Online-Services – VirTuOs; Teilvorhaben: Analyse und Validität von virtualisierten komponentenbasierten Typprüfungen von Windenergieanlagen für die Konformitätsbewertung gegenüber Netzanschlussregeln“, EnArgus

[10] Verbundvorhaben: VirTuOS – Virtualisierung der Testverfahren von Windenergieanlagen durch Online-Services – VirTuOs; Teilvorhaben: Implementierung und Integration eines Power-HiL Prüfstands“, EnArgus

10 Literaturverzeichnis

- [1] FGW e.V. – Fördergesellschaft Windenergie und andere Dezentrale Energien, Technische Richtlinie 4 (TR 4) – Anforderungen an Modellierung und Validierung von Simulationsmodellen der elektrischen Eigenschaften von Erzeugungseinheiten und -anlagen, Speicher sowie deren Komponenten, Revision 26, Berlin: FGW e.V. – Fördergesellschaft Windenergie und andere Dezentrale Energien, 2022.
- [2] VDE FNN – Forum Netztechnik/Netzbetrieb im VDE, VDE-AR-N 4110 - Technische Regeln für den Anschluss von Kundenanlagen an das Mittelspannungsnetz und deren Betrieb (TAR Mittelspannung), Berlin: VDE FNN – Forum Netztechnik/Netzbetrieb im VDE, 2023.
- [3] VDE FNN – Forum Netztechnik/Netzbetrieb im VDE, VDE-AR-N 4120 - Technische Regeln für den Anschluss von Kundenanlagen an das Hochspannungsnetz und deren Betrieb (TAR Hochspannung) in Verbindung mit VDE-AR-N 4120/A1, Berlin: VDE FNN – Forum Netztechnik/Netzbetrieb im VDE, 2024.
- [4] VDE FNN – Forum Netztechnik/Netzbetrieb im VDE, VDE-AR-N 4130 - Technische Regeln für den Anschluss von Kundenanlagen an das Höchstspannungsnetz und deren Betrieb (TAR Höchstspannung), Berlin: VDE FNN – Forum Netztechnik/Netzbetrieb im VDE, 2018.
- [5] European Commission, Commission Regulation (EU) 2016/631 of 14 April 2016 establishing a network code on requirements for grid connection of generators (NC RfG), Brüssel: Official Journal of the European Union, 2016.
- [6] FGW e.V. – Fördergesellschaft Windenergie und andere Dezentrale Energien, Technische Richtlinie 3 (TR 3) - Bestimmung der elektrischen Eigenschaften von Erzeugungseinheiten und -anlagen, Speicher sowie für deren Komponenten am Mittel-, Hoch- und Höchstspannungsnetz, Revision 26, Berlin: FGW e.V. – Fördergesellschaft Windenergie und andere Dezentrale Energien, 2022.
- [7] International Electrotechnical Commission (IEC), IEC/TS 61400-21-4: Wind energy generation systems – Part 21-4: Measurement and assessment of electrical characteristics – Wind turbine components and subsystems, Genf: International Electrotechnical Commission (IEC), 2025 .
- [8] FGW e.V. – Fördergesellschaft Windenergie und andere Dezentrale Energien, Technische Richtlinie 8 (TR 8) - Zertifizierung der elektrischen Eigenschaften von Erzeugungseinheiten und -anlagen, Speicher sowie für deren Komponenten am Stromnetz, Rev. 10, Berlin: FGW e.V. – Fördergesellschaft Windenergie und andere Dezentrale Energien, 2025.
- [9] IECRE – IEC System for Certification to Standards Relating to Equipment for Use in Renewable Energy Applications, Assessment of RETLs for the measurement of electrical characteristics of electricity producing wind turbines, Genf: IECRE, 2017.
- [10] European Committee for Electrotechnical Standardization (CENELEC), EN 50549-10 Requirements for generating plants to be connected in parallel with distribution networks – Part 10: Tests for conformity assessment of generating units, Brüssel: European Committee for Electrotechnical Standardization (CENELEC), 2022.

-
- [11] Kisser, A. et al., „A Test-bed System for Validation of Ancillary Services of Wind Farms under Realistic Conditions,“ in *Proceedings of the 16th Wind Integration Workshop*, Berlin, 2017.
- [12] N. Schäfer, G. Arnold und T. Degner, „Fraunhofer IEE - SysTec Testzentrum für intelligente Netze und E-Mobilität,“ 2021.
- [13] N. Schaefer, D. Geibel, G. Arnold und T. Degner, „Testing of Compliance with Grid Code Requirements in IWES-SysTec Test Centre,“ in *Proceedings of the ISES Solar World Congress 2011*, 2011, Kassel.
- [14] T. Guhna, D. Stracke, M. Klee, F. Schnabel, A. Seibel und M. Jung, „Hardware and Software Concept for Distributed Grid-Forming Inverters in Microgrids,“ in *2021 23rd European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'21 ECCE Europe)*, Ghent,, 2021.
- [15] T. Guhna, A. Seibel, D. Stracke, F. Schnabel und M. Jung, „„Regelungsstrategie und Multisimulationstool für dezentral verteilte netzbildende Wechselrichter“,“ PV-Symposium, Bad Staffelstein, 2020.
- [16] T. Erckrath, A. Seibel, F. Schnabel, J. Steffen, D. Stracke, M. Klee, P. Unruh und M. Jung, „Netzbildende Regelung für verteilte Stromrichter – Validierung eines neuen Plug-&-Play-Konzeptes; Einzelvorhaben Fraunhofer IEE: PnP-Netze – Schlussbericht (Berichtszeitraum: 01.10.2018–30.09.2022),“ in *PnP-Netze - Schlussbericht: Berichtszeitraum: 01.10.2018-30.09.2022,“ (in de), Netzbildende Regelung für verteilte Stromrichter – Validierung*, Fraunhofer IEE, 2022.
- [17] „Verbundvorhaben [01180050/1]: Netzregelung 2.0 - Regelung und Stabilität im stromrichter-dominierten Verbundnetz,“.
- [18] W. Heckmann, H. Becker, C. Hachmann, U. Spanel, A. Bernhart und M. Müller-Mienack, „NETZ:KRAFT - Netzwiederaufbau unter Berücksichtigung zukünftiger Kraftwerksstrukturen: NETZ:KRAFT - öffentlicher Abschlussbericht,“ NETZ:KRAFT – Netzwiederaufbau unter Berücksichtigung zukünftiger Kraftwerksstrukturen, Kassel, 2019.
- [19] „Verbundvorhaben [01189226/1]: RuBICon - Rule-Based Initialisation of Converter Dominated Grids,“.
- [20] Andrejewski, M., et al., „Experimental Validation of a Dynamic Virtual Power Plant Concept Based on Multiple-Converter Power Hardware-In-the-Loop Test Bench,“ in *Proceedings 22nd Wind and Solar Integration Workshop*, 2023.
- [21] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) / EnArgus-Projektdatenbank, „Verbundvorhaben [01256890/1]: F-HiL_Reloaded – Entwicklung einer Prüfinfrastruktur zur normativen Validierung dynamischer Vorgänge von netzbildenden dezentralen Erzeugungsanlagen,“ Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK), Berlin.
- [22] J. Brombach, J. Koch, H. Wattar und D. Schulz, Optimierung von Bordnetzen hoher Lastdichte durch den Einsatz intelligenter Schutzeinrichtungen, Bremen: Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress (DLK), 2012.