

# Anlagenspezifisches Nachweisverfahren für Kundenanlagen

Plant specific compliance process for customer systems

<b>DISCLAIMER</b>	<b>3</b>
<b>ANWENDUNGSBEREICH</b>	<b>3</b>
<b>1 ANLAGENSPEZIFISCHES NACHWEISVERFAHREN</b>	<b>4</b>
1.1. Ebenen der Nachweiserbringung	4
1.2. Ablauf des Nachweisverfahrens	6
1.3. Nachweiserbringung auf Einheitenebene	8
1.4. Nachweiserbringung auf Anlagenebene	8
<b>2 MODELLVALIDIERUNG</b>	<b>11</b>
2.1. Allgemeine Anforderungen an die Modellvalidierung	11
2.2. Validierung Einheitenmodell	11
2.3. Validierung Anlagenmodell	12
2.4. RMS-Anlagenmodelle	12
2.5. EMT-Anlagenmodelle	12
2.6. Harmonische Anlagenmodelle	12
2.7. Plausibilisierung von Modellen	13
<b>3 LITERATURHINWEISE</b>	<b>14</b>

## Disclaimer

Die deutschen Übertragungsnetzbetreiber skizzieren in diesem Dokument einen möglichen Prozess zur Nachweiserbringung für die derzeit gültigen technischen Anforderungen an Kundenanlagen. Es ist zu beachten, dass sich aufgrund der schnellen Entwicklung von neuartigen Technologien in der Hoch- und Höchstspannungsebene kein Anspruch auf Vollständigkeit ergibt. Die detaillierte Ausgestaltung des Nachweisprozesses muss daher projektspezifisch und in enger Abstimmung mit dem relevanten Netzbetreiber erfolgen. Zu diesem Zweck dienen die zur VDE-AR-N 4120/4130 ergänzenden technischen Anschlussbedingungen (TAB) des Netzbetreibers. Dieses Dokument dokumentiert den aktuellen Stand der Technik auf der Grundlage der ersten praktischen Projekterfahrungen. Die deutschen Übertragungsnetzbetreiber engagieren sich aktiv für die kontinuierliche Überarbeitung der für die Systemstabilität erforderlichen Anforderungen und Nachweise für Kundenanlagen, um die Systemstabilität angesichts sich stetig wandelnder Anforderungen zu gewährleisten. Folglich ist mit zukünftigen Ergänzungen im vorliegenden Dokument, den Technischen Netzanschlussregeln (TAR) und den Technischen Anschlussbedingungen des relevanten Netzbetreibers (TAB) zu rechnen.

## Anwendungsbereich

Die Anwendung dieses Dokuments für den Nachweis der Anforderungen für den Anschluss von Kundenanlagen obliegt dem betreffenden Netzbetreiber. Die Anforderungen gelten für die Gesamtheit der Kundenanlage inklusive aller zur Aufrechterhaltung des Betriebs erforderlichen Nebenanlagen (z.B. Kühlung, Kompressoren, Erzeugungseinheiten, unterbrechungsfreie Stromversorgung). Daraus folgt, dass die Erbringung von Nachweisen auf Anlagenebene erforderlich ist.

Mit dem Begriff Kundenanlagen werden u.a. Erzeugungsanlagen (Typ 2), Elektrolyseanlagen, Rechenzentren, Batteriespeicher und sonstige industrielle Großverbraucher (z.B. Stahlwerke) bezeichnet, die in ihrer Gesamtheit alle am Netzanschlusspunkt angeschlossenen Einheiten, Zusatzkomponenten und sonstigen elektrischen Betriebsmittel (z.B. Netzanschlussleitungen, Schutzkomponenten) umfassen.

ANMERKUNG 1 FÜR DIE NACHWEISFÜHRUNG SIND DIE VOM RELEVANTEN NETZBETREIBER GESTELLTEN TECHNISCHEN ANFORDERUNGEN AN DIE KUNDENANLAGE ENTSCHEIDEND.

# 1 Anlagenspezifisches Nachweisverfahren

Dieses Dokument beschreibt den Ablauf und die Anforderungen an den Nachweis der Technischen Anforderungen für den Anschluss von Kundenanlagen an das Hoch- und Höchstspannungsnetz. Der allgemeine Prozess ist in der VDE-AR-N 4120/4130 in Kapitel 4.2 beschrieben. Nachfolgend wird auf die erforderlichen Ergänzungen für den Nachweis der in Kapitel 10 der VDE-AR-N 4120/4130, den auf Netztransparenz [3] veröffentlichten Anforderungen und den TAB des Netzbetreibers definiert.

## 1.1. Ebenen der Nachweiserbringung

Bei der Nachweisführung können nach Vorgabe des Netzbetreibers drei Ebenen erforderlich sein:

- 1. Test auf Einheitenebene:** Validierung von Simulationsmodellen der Einheiten auf der Grundlage von Messungen auf dem Prüfstand oder ggf. mittels HiL-Tests, sofern verfügbar und im Rahmen der simulativen Nachweise auf Anlagenebene anwendbar.
- 2. Simulativer Nachweis auf Anlagenebene:** Nachweis der Anforderungen auf Anlagenebene unter Berücksichtigung der (validierten) Einheitenmodelle und Modelle von ggf. erforderlichen Zusatzkomponenten im Anlagendesign. Die Konformität muss auf Anlagenebene nachgewiesen werden.
- 3. Test auf Anlagenebene:** Tests des Verhaltens der Kundenanlage am Netzanschlusspunkt auf Anlagenebene und Validierung der Simulationsmodelle der Kundenanlage auf der Grundlage von durchgeführten Messungen im Rahmen der Inbetriebnahme.

Die erforderlichen Simulationsmodelle gemäß Kapitel 4 im Dokument „Technische Anforderungen für den Anschluss von Elektrolyseanlagen“ [3] sind entsprechend Kapitel 2 auf Basis der Einheiten- und Anlagentests sowie durch vergleichende Simulationen zu validieren.

Tabelle 1 gibt einen Überblick zu den möglichen Nachweisebenen. Es ist zu beachten, dass die konkrete Ausgestaltung der Nachweisführung projektspezifisch mit dem relevanten Netzbetreiber abzustimmen ist. Dies gilt insbesondere vor dem Hintergrund von technischen Anforderungen für neue Arten von Kundenanlagen (z.B. Elektrolyseanlagen, Rechenzentren, Batteriespeicher), zu denen in den aktuellen Versionen der VDE-AR-N 4120 und VDE-AR-N 4130 noch keine passenden Nachweise formuliert sind. In diesem Fall erfolgt die detaillierte Ausgestaltung der erforderlichen Nachweise über die TAB/Musterverträge des relevanten Netzbetreibers.

Der Ablauf orientiert sich an dem Einzelnachweisverfahren (Anlagenzertifikat C), wie es in Kapitel 11.6 der VDE-AR-N 4130 beschrieben ist. Messungen und Prüfprotokolle von Tests auf Einheitenebene (z.B. Messungen auf dem Prüfstand, Feldtests) können für die Validierung der Einheitenmodelle einbezogen werden. Da Zusatzkomponenten erforderlich sein können, um die Anforderungen auf Anlagenebene zu erfüllen, liegt der Fokus bei der Nachweisführung auf den simulativen Nachweisen auf Anlagenebene. Hierzu müssen Einheitenmodelle und detaillierte Modelle der erforderlichen Zusatzkomponenten (z.B. Chopper, STATCOM, Batteriespeicher, unterbrechungsfreie Stromversorgung) in einem detaillierten Anlagenmodell integriert werden, um die Erfüllung der Anforderungen auf Anlagenebene nachzuweisen. Zudem sind im Rahmen der Inbetriebnahme Tests auf Anlagenebene vorgesehen.

Der Ablauf des Nachweisverfahrens ist in Kapitel 1.2 beschrieben. Das Kapitel 2 gibt einen allgemeinen Überblick über die Vorgehensweise bei der Modellvalidierung.

Tabelle 1 Übersicht der Möglichkeiten für die Nachweisführung auf Einheiten- und Anlagenebene für eine Auswahl von technischen Anforderungen der VDE-AR-N 4120/4130

Technische Anforderung aus den relevanten Dokumenten	1. Test auf Einheitenebene zur Modellvalidierung	2. Simulative Nachweise auf Anlagenebene	3. Inbetriebnahmetest auf Anlagenebene
Kurzschlussleistungsbereich		■	
Robustheit gegenüber Frequenzgradienten		■	
Robustheit gegenüber temporären Spannungsänderungen (FRT-Fähigkeit)	■	■	
Wiederkehr der Wirkleistungsaufnahme nach einem Fehler	■	■	
Lastabwurf und Wirkleistungsanpassung bei Über- und Unterfrequenz	■	■	
Zuschaltung nach Auslösung durch Schutzeinrichtung	■	■	
Netzsicherheitsmanagement (u.a. Systemautomatiken)	■	■	■
Regelgeschwindigkeit der Wirkleistungsanpassung	■	■	■
Dynamische Netzstützung	■	■	
Blindleistung	■	■	■
Interaktionen		■	
<b>VDE-AR-N 4120/30, Kap. 5.3</b> Spannung und Frequenz am Netzanschlusspunkt		■	
<b>VDE-AR-N 4120/30, Kap. 5.4</b> Netzurückwirkungen	■	■	■
<b>VDE-AR-N 4120/30, Kap. 5.5</b> Blindleistungsverhalten		■	■
<b>Anmerkung:</b> Diese Tabelle stellt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Es sind Ergänzungen der zu erbringenden Nachweise erforderlich, die projektspezifisch durch den relevanten Netzbetreiber definiert werden.			

## 1.2. Ablauf des Nachweisverfahrens

Das Nachweisverfahren für die Anforderungen an Kundenanlagen erfolgt durch einen mehrstufigen Prozess, der in Abbildung 2 dargestellt wird. Dieser Prozess ist bei jeder wesentlichen Veränderung an der Kundenanlage erneut zu durchlaufen (z.B. bei Erweiterungen durch einen mehrstufigen Ausbau).

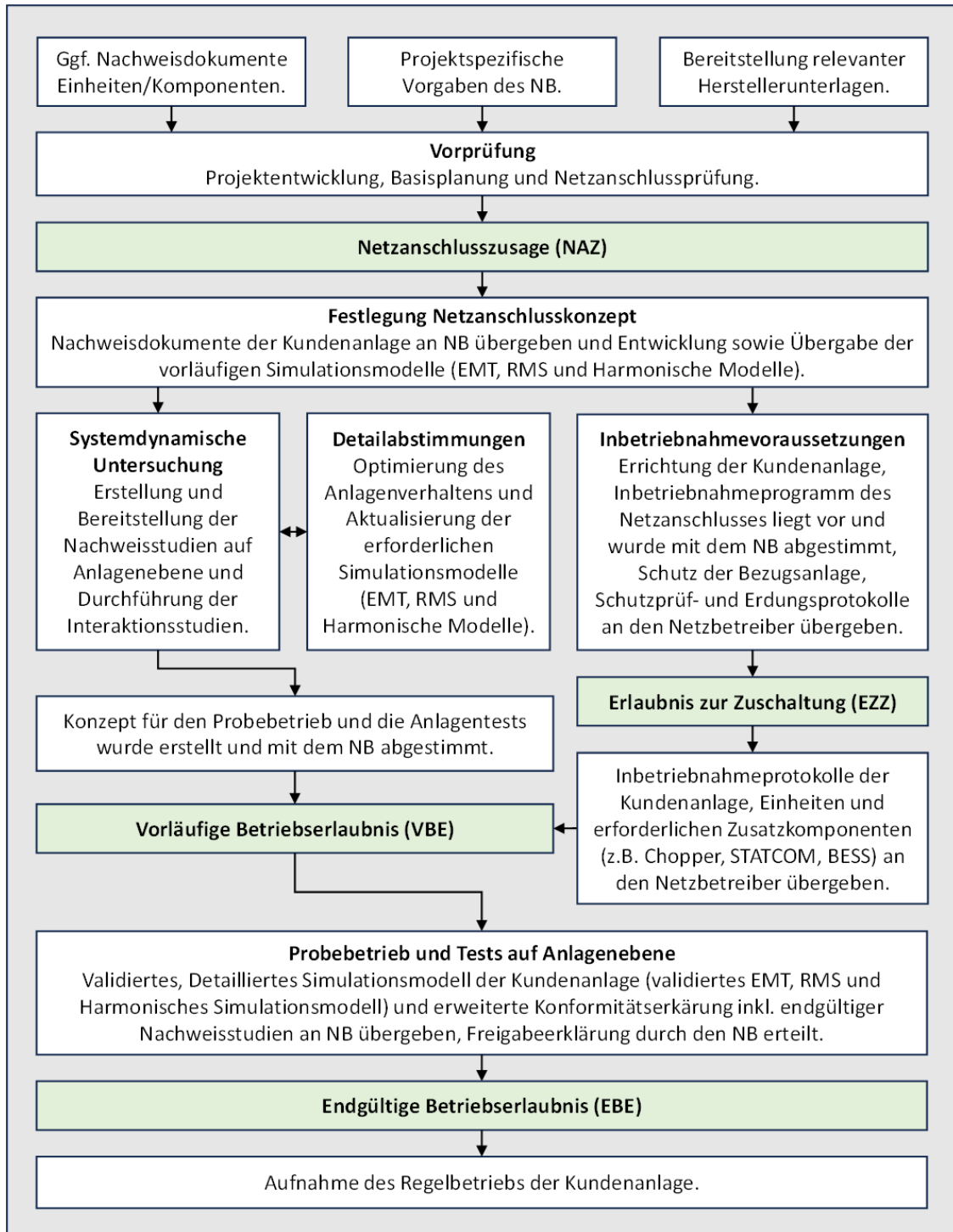


Abbildung 1 Ablauf zur Erlangung der Netzanschlusszusage (NAZ), der Erlaubnis zur Zuschaltung (EZZ), der Vorübergehenden Betriebserlaubnis (VBE) und der Endgültigen Betriebserlaubnis (EBE)

Nach einer erfolgreichen Vorprüfung erteilt der Netzbetreiber die Netzanschlusszusage (NAZ).

Das Verfahren zur Erlangung der endgültigen Betriebserlaubnis (EBE) basiert auf den projektspezifischen Vorgaben des Netzbetreibers, den bereitgestellten Herstellerunterlagen, den Nachweisdokumenten aus den Tests an den Einheiten, den simulativen Nachweisen im Rahmen der systemdynamischen Untersuchungen auf Anlagenebene sowie dem Probebetrieb und Tests auf Anlagenebene.

Mit den Nachweisdokumenten und den detaillierten Simulationsmodellen der Kundenanlage (bestehend aus EMT- und RMS-Modellen sowie einem Harmonischen Modell) wird nachgewiesen, dass die geplante Kundenanlage die technischen Anforderungen für den Netzanschluss nach den Vorgaben des Netzbetreibers erfüllt. Alle Nachweisdokumente der Einheit(en) sowie der verbauten Betriebsmittel und Komponenten (z.B. Anlagenregler, Chopper, Batteriespeicher, STATCOM, unterbrechungsfreie Stromversorgung) sind in deutscher und/oder englischer Sprache zu erstellen und dem Netzbetreiber vorzulegen. Alle sonstigen Anlagen zum Nachweisdokument sind ebenfalls in deutscher und/oder englischer Sprache einzureichen.

Die Ausgestaltung der Prozessschritte „Erlaubnis zur Zuschaltung“ (EZZ), „Vorübergehende Betriebserlaubnis“ (VBE) und „Endgültige Betriebserlaubnis“ (EBE) bezieht sich auf die textliche Beschreibung der Kapitel 4.2.3, 4.2.4 und 4.4 der VDE-AR-N 4130 bzw. Kapitel 4.2 bis 4.3 der VDE-AR-N 4120 und den in Abbildung 1 dargestellten Prozessablauf.

Die Nachweisdokumente mitsamt der Übergabe der aktualisierten Simulationsmodelle (EMT, RMS, Harmonisches Modell) und ein mit dem Netzbetreiber abgestimmtes Konzept für den Probebetrieb und die Anlagentests sind die Voraussetzungen für die Erteilung der VBE. Ferner müssen das Inbetriebnahmeprotokoll des Netzanschlusses, die Schutzprüf- und Erdungsprotokolle vor der Erteilung der EZZ vorliegen und an den Netzbetreiber übergeben werden. Das Schutzkonzept der Kundenanlage selbst muss geprüft und erfolgreich abgeschlossen sein.

Auf Basis von Inbetriebnahmeprotokollen, die ggf. durch Messprotokolle ergänzt werden, ist durch den Anschlussnehmer eine Inbetriebnahmeerklärung der Kundenanlage einschließlich aller Inbetriebnahmeprotokolle der Einheit(en) und deren Komponenten vorzulegen. Parallel dazu ist eine systemdynamische Untersuchung durchzuführen, die in zwei Studienpakete untergliedert ist

- **Teil A: Nachweisstudien zum Anlagen- und Systemverhalten**, und
- nach Vorgabe des Netzbetreibers **Teil B: Detaillierte Interaktionsstudie**,

die in enger Abstimmung mit dem relevanten Netzbetreiber durchzuführen ist. Der Anschlussnehmer ist für die Durchführung der Nachweisstudien zum Anlagen- und Systemverhalten verantwortlich und der relevante Netzbetreiber für die Durchführung der detaillierten Interaktionsstudien. Sofern eine Optimierung des Anlagenverhaltens zur Einhaltung der Netzanschlussregeln erforderlich ist, müssen geeignete Maßnahmen in enger Abstimmung mit dem Netzbetreiber identifiziert und umgesetzt werden. Der Anschlussnehmer ist in diesem Fall zur Mitwirkung verpflichtet. Entsprechend sind die Simulationsmodelle (EMT- und RMS-Modelle, Harmonisches Modell) zu aktualisieren und dem Netzbetreiber zu übergeben. Der Inbetriebnahmeerklärung liegt eine vollständige Dokumentation der Inbetriebnahme der errichteten Kundenanlage zugrunde. Das Vorliegen der vollständigen Dokumentation (u.a. Inbetriebnahmeerklärung, Dokumentation der erfolgreich durchgeführten systemdynamischen Untersuchung), der aktualisierten Simulationsmodelle der Kundenanlage (bestehend aus einem EMT, einem RMS und einem Harmonischen Modell) und ein mit dem Netzbetreiber abgestimmtes Konzept für den Probebetrieb und die Anlagentests sind die Voraussetzungen zur Erteilung der VBE durch den Netzbetreiber.

Nach Bestimmung der endgültigen Modell- und Regelungsparameter durch Messungen ist das detaillierte Simulationsmodell (bestehend aus einem EMT-, einem RMS- und einem harmonischen Modell) erneut zu aktualisieren und durch den Netzbetreiber zu prüfen und freizugeben (gemäß Kapitel 2).

Das validierte, detaillierte Simulationsmodell (bestehend aus einem validierten EMT-, einem validierten RMS- und einem validierten harmonischen Modell) ist dem Netzbetreiber zur Prüfung zu übergeben. Der Netzbetreiber wird nach erfolgreicher Prüfung des übergebenen validierten, detaillierten Simulationsmodells, nach Abschluss der Inbetriebnahme- und Optimierungsarbeiten und übergebener finaler Dokumentation der Kundenanlage eine Freigabeerklärung erteilen. Diese Freigabeerklärung stellt die formale Voraussetzung für die Endgültige Betriebserlaubnis (EBE) dar.

Nach Erteilung der EBE kann die Kundenanlage den kommerziellen Regelbetrieb aufnehmen.

### 1.3. Nachweiserbringung auf Einheitenebene

Für jede Einheit sind Nachweisdokumente erforderlich. In diesen Nachweisdokumenten werden die elektrischen Eigenschaften der Einheit ausgewiesen, um die Einheitenmodelle zu validieren und darauf folgend im Zuge des Nachweisprozesses die Konformität der geplanten Kundenanlage mit den Anforderungen der Netzbetreiber auf Anlagenebene nachweisen zu können.

Die Nachweise an der Einheit sind auf einem geeigneten Prüfstand oder im Rahmen von Feldtests durchzuführen. Diese Tests dienen dem Nachweis der Fähigkeiten bzw. Limitierungen der Einheiten sowie der Validierung der Einheitenmodelle. Sollte weder ein geeigneter Prüfstand zur Verfügung stehen noch ein Feldtest möglich sein, können für den Nachweis bestimmter Fähigkeiten der Einheiten u.a. auch HiL<sup>1</sup>-Tests zur Anwendung kommen. Die Ausgestaltung der Nachweisführung auf Einheitenebene wird projektspezifisch und in Abstimmung mit dem Netzbetreiber festgelegt.

Sollten externe Komponenten, z.B. für die Wiederkehr der Wirkleistung nach einem Fehler oder die dynamische Netzstützung, verwendet werden, müssen diese in den Nachweisdokumenten auf den jeweiligen Deckblättern ausgewiesen werden. Für diese Komponenten müssen detaillierte Komponentenmodelle erstellt werden. Durch die Kombination der Komponenten- und Einheitenmodelle sind geeignete Anlagenmodelle für die Erbringung der simulativen Nachweise auf Anlagenebene zu erstellen. Auch in diesem Fall ist ein Ausweis des Vermögens der Einheit(en) erforderlich.

Für die Validierung der Simulationsmodelle ist ein geeignetes Konzept zwischen dem Anschlussnehmer und dem Netzbetreiber abzustimmen (u.a. mittels Einheiten-, Anlagen- und Komponententests, Prüfcontainer, Hardware-in-the-Loop, Vermessung der Einheiten und Komponenten, ...). Die Modellvalidierung kann durch eine qualifizierte Stelle im Auftrag des Anschlussnehmers erfolgen. Grundlage für die Erstellung eines Nachweisdokuments sind Vermessungen in Anlehnung an die FGW-Richtlinie TR 3 [1], die Regelungen in den TAB/Musterverträgen des relevanten Netzbetreibers und ergänzende Herstellererklärungen zu der Einheit.

Ergebnisse der Vermessung einer Einheit können in Summe oder in Teilen auf andere Einheiten übertragen werden, wenn

- 1) die Ausführung und die für die elektrischen Eigenschaften maßgebende Regelungstechnik einschließlich der eingesetzten Software in diesen Einheiten technisch gleichwertig ist und
- 2) die Ergebnisse für die kleinste und größte Leistungsvariante vorliegen.

### 1.4. Nachweiserbringung auf Anlagenebene

Die projektspezifische Ausgestaltung der simulativen Nachweisführung erfolgt in enger Abstimmung mit dem relevanten Netzbetreiber. Der Anlagenbetreiber ist für die Erstellung der simulativen Nachweisstudien verantwortlich. Während der Erstellung der vorläufigen Nachweisstudien und des Evaluierungsberichts stehen der relevante Netzbetreiber und der Anschlussnehmer in fachlichem Austausch zueinander, um mögliche Risiken im frühen Projektstadium zu identifizieren und Abhilfemaßnahmen einzuleiten.

Durch den Anschlussnehmer sind beim relevanten Netzbetreiber die erforderlichen Nachweisdokumente der Kundenanlage einzureichen. Hierin bestätigen Anschlussnehmer und Hersteller auf Basis von Nachweisdokumenten der Einheit(en) sowie weiterführender Planungsunterlagen und den Nachweisdokumenten aus der systemdynamischen Untersuchung (Teil A: Nachweisstudien zum Anlagen- und Systemverhalten, nach Vorgabe des Netzbetreibers Teil B: Detaillierte Interaktionsstudien) mitsamt einer Übergabe der validierten Simulationsmodelle (EMT, RMS, Harmonisches Modell), welche die elektrischen Eigenschaften der Kundenanlage in der Gesamtheit aller am Netzanschlusspunkt angeschlossenen Einheiten, Zusatzkomponenten und sonstiger elektrischer Betriebsmittel (z.B. Netzanschlussleitungen, Schutzeinrichtungen) die technischen Anforderungen gemäß den projektspezifischen Vorgaben des Netzbetreibers im zu bewertenden Planungsstand vollumfänglich erfüllen.

Bei Erweiterungen eines bestehenden Netzanschlusses ist das Zusammenwirken mit bereits vorhandenen Einheiten und Zusatzkomponenten mit Dokumentationsstand zum Zeitpunkt ihrer Inbetriebnahme (sofern keine weiteren Unterlagen vorliegen) in die Nachweisdokumente zu dokumentieren, unabhängig von den Eigentumsverhältnissen innerhalb der Kundenanlage.

---

<sup>1</sup> HiL: Hardware-in-the-Loop

Änderungen an bestehenden Kundenanlagen bzw. der Einheiten, die wesentliche Auswirkungen auf das elektrische Verhalten der Kundenanlage am Netzanschlusspunkt haben, erfordern ein neues Nachweisdokument.

Wesentliche Auswirkungen haben unter anderem:

- Die Erhöhung der installierten Wirkleistung (z.B. durch geplante Ausbaustufen) bzw. Veränderung des Stellbereiches für die Blindleistungsbereitstellung.
- Der Umbau oder die Modernisierung im Umfang  $\geq 50\% P_{AV, B}$ .
- Der Austausch von bzw. Änderungen an Einheiten bzw. deren Komponenten, sofern diese nicht typgleich sind.
- Softwareänderungen, sofern sie einen Einfluss auf das elektrische Verhalten der Kundenanlage haben.
- Änderungen der elektrischen Infrastruktur (wie z.B. Netztransformatoren oder Kabelverbindungen). Die Beurteilung dieser Änderungen liegt in der Verantwortung des Anschlussnehmers in Absprache mit dem Netzbetreiber.

Die Erstellung der neuen Nachweisdokumente erfolgt sowohl für die Wirkleistungserhöhung, als auch für die umgebaute oder modernisierte Leistung anteilig auf Basis der Anforderungen zum Zeitpunkt der Wirkleistungserhöhung/Umbau/Modernisierung. In den anderen Fällen ist in dem neuen Nachweisdokument die weitere Einhaltung der Anforderungen aus dem zuletzt erstellten Nachweisdokument zu bewerten.

Der Netzbetreiber stellt zur Erarbeitung des Nachweisdokuments die im Netzbetreiber-Abfragebogen (siehe Vordruck E.9, VDE-AR-N 4120/30 und ggfls. weiteren Vordrucken des relevanten Netzbetreibers) aufgeführten Daten zur Verfügung. Individualabsprachen mit dem Netzbetreiber sind im Rahmen der Erstellung des Nachweisdokuments zu berücksichtigen.

Nach erfolgreicher Prüfung und Freigabe der Nachweisstudien und des Evaluierungsberichts durch den Netzbetreiber erteilt dieser die Vorläufige Betriebserlaubnis (VBE).

Der Anschlussnehmer kann mit den Inbetriebnahmetests beginnen, sobald die simulativen Nachweisstudien auf Anlagenebene die Konformität der Anlagenregelung nachgewiesen haben und der zuständige Netzbetreiber die VBE erteilt hat. Die konkrete Ausgestaltung der Inbetriebnahme- und Anlagentests muss projektspezifisch mit dem relevanten Netzbetreiber abgestimmt werden. Der Anschlussnehmer muss die Anlagenmodelle und Ergebnisse der simulativen Nachweisstudien durch einen Vergleich mit den Tests auf Anlagenebene überprüfen.

**ANMERKUNG 21** WENN WÄHREND DER INBETRIEBNAHME UND DES PROBEBETRIEBS EREIGNISSE WIE KURZSCHLÜSSE, SPANNUNGSABFÄLLE, AUSGEPRÄGTE OBERSCHWINGUNGSKOMPONENTEN, LEISTUNGSSCHWANKUNGEN ETC. AUFTRETEN, MUSS DER ANSCHLUSSNEHMER DAS VERHALTEN DER KUNDENANLAGE AUF DIESE EREIGNISSE DOKUMENTIEREN UND AUSWERTEN.

Bei der Inbetriebnahme der Kundenanlage handelt es sich insbesondere um Funktionsprüfungen, die erst durchgeführt werden können, wenn sich funktionsfähige Einheiten der Kundenanlage im Probebetrieb befinden, oder die gesamte Kundenanlage in Betrieb ist. Ziel dieser Prüfungen ist der Nachweis der Funktionstüchtigkeit der gesamten Wirkungskette vom Anschlusspunkt der Kundenanlage bis zu den Einheiten und möglichen Komponenten. Diese Maßnahmen werden vom Anlagenerrichter bzw. Inbetriebsetzer durchgeführt. Es ist außerdem eine Funktionsprüfung von der netzführenden Stelle des Netzbetreibers bis zum Anschlusspunkt der Kundenanlage durch den Anlagenerrichter bzw. Inbetriebsetzer, gemeinsam mit dem Netzbetreiber vorzunehmen.

Der Anschlussnehmer hat sicherzustellen, dass die reale Steuerungshardware identische Ergebnisse liefert, wie in den simulativen Nachweisstudien. Alle Schutzfunktionen der Kundenanlage und deren Einstellungen müssen denen der simulativen Nachweisstudien entsprechen. Wenn während der Inbetriebnahme, der Erprobung oder des Betriebs Änderungen an der Hardware oder Software von Steuerungs-, Mess- oder Schutzsystemen auftreten, die das dynamische Verhalten beeinflussen können, muss der Anschlussnehmer die betroffenen Teile der simulativen Nachweisstudien mit aktualisierten Simulationsmodellen wiederholen. Wenn der Anschlussnehmer gegenüber dem relevanten Netzbetreiber nachweisen kann, dass die Änderungen das dynamische Verhalten nicht beeinflussen, kann der relevante Netzbetreiber entscheiden, dass eine Wiederholung nicht erforderlich ist.

Der Nachweis ist in Form eines gemeinsamen Funktionsprüfprotokolls Netzbetreiber/Anlagenbetreiber (Inbetriebnahmeprotokoll der Kundenanlage) zu dokumentieren. Alternativ kann der Netzbetreiber in

Abstimmung mit dem Anlagenbetreiber die Funktionsprüfung eigenständig von fern durchführen und protokollieren. Der Anlagenbetreiber erhält eine Kopie des Protokolls. Sollte bei der Inbetriebnahme die Sollwertvorgabe durch den Netzbetreiber nicht möglich sein (z. B. keine Hardware vor Ort, schriftliche Absage der Prüfung durch den Netzbetreiber) ist dies zu dokumentieren.

Mit der Finalisierung der Inbetriebnahme- und Anlagentests müssen dem relevanten Netzbetreiber die endgültigen Simulationsmodelle, die endgültigen Nachweisstudien, der aktualisierte Evaluierungsbericht und die Konformitätserklärung übergeben werden. Der relevante Netzbetreiber wird die Simulationsmodelle, die Nachweisdokumente und die Konformitätserklärung prüfen und erteilt nach erfolgreicher Überprüfung die endgültige Betriebserlaubnis (EBE).

## 2 Modellvalidierung

### 2.1. Allgemeine Anforderungen an die Modellvalidierung

Für alle in diesem Abschnitt referenzierten Tests sind mindestens die Spannungen und die Ströme sowie die daraus ermittelten Wirk- und Blindleistungen zu ermitteln und zu dokumentieren. Diese Werte sind für die Validierung der Einheiten- und Anlagenmodelle heranzuziehen. Die Validierung erfolgt modellabhängig jeweils für jedes der in Tabelle 1 im Kapitel 4.1 des Anforderungsdokuments [3] genannten Anwendungsgebiete.

Die in den folgenden Unterabschnitten beschriebenen Modellvalidierungspfade sind in Abbildung 2 grafisch dargestellt.

Werden im Betrieb signifikante Abweichungen zwischen Modellverhalten und Einheiten- bzw. Anlagenverhalten festgestellt, müssen Anlagenbetreiber und Netzbetreiber ein Vorgehen zur Anpassung des Modells und aller abgeleiteten Modelle, d.h. z.B. die auf Basis des detaillierten EMT-Anlagenmodell validierten Modelle, vereinbaren. Für vereinfachte Komponenten-, Einheiten- und Anlagenmodelle sind keine Genauigkeitsanforderungen erforderlich.

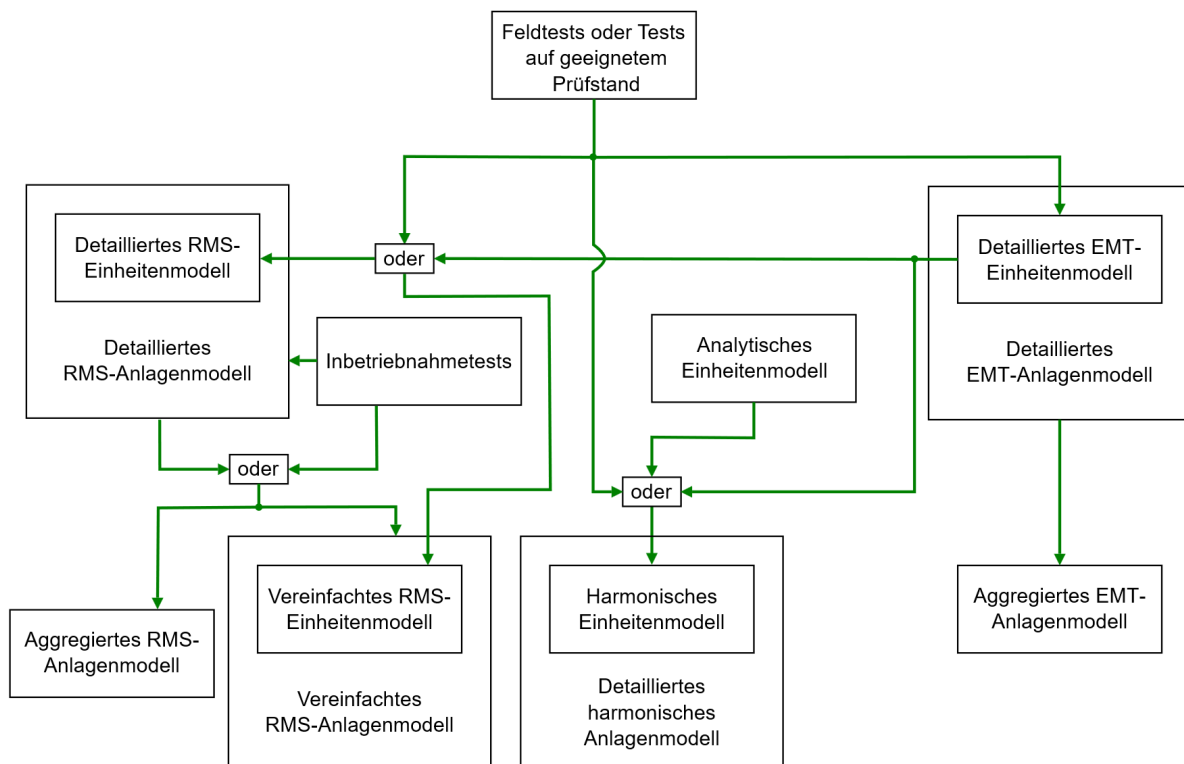


Abbildung 2 Schematische Darstellung der Modellvalidierungspfade und -abhängigkeiten

### 2.2. Validierung Einheitenmodell

Die Bestätigung der Modellvalidierung erfolgt im Falle des detaillierten RMS-Einheitenmodell durch eine akkreditierte Zertifizierungsstelle. Bei allen anderen Modelltypen ist eine Validierung durch eine qualifizierte Stelle (z.B. Hersteller) ausreichend.

Es ist eine Validierung der Fähigkeiten der Einheitenmodelle (z.B. vereinfachte, generische, detaillierte und herstellereinspezifische RMS- und EMT-Modelle) entsprechend Tabelle 1 des Anforderungsdokuments [3] auf Basis der Nachweise aus Kapitel 3 und Kapitel 11.2 der VDE-AR-N 4130 notwendig.

Die Validierung der Einheitenmodelle ist gegen Messungen auf einem geeigneten Prüfstand, mittels HiL-Tests oder einem Feldtest der Einheit durchzuführen. Alternativ darf das harmonische und das RMS-Einheitenmodell in vergleichender Simulation gegen das validierte EMT-Einheitenmodell validiert werden. Das harmonische Einheitenmodell darf des Weiteren alternativ gegen ein analytisches Einheitenmodell validiert werden. Beim harmonischen Modell gilt einschränkend, dass zur Validierung ein anderes Verfahren heranzuziehen ist, als jenes das zur Erstellung des harmonischen Einheitenmodells nach Kapitel 4.6 des Anforderungsdokuments [3] genutzt wurde. Es ist ausreichend, die Validierung des harmonischen Einheitenmodells exemplarisch für einen Arbeitspunkt im Normalbetrieb durchzuführen, es sein denn, der Unterschied der Impedanzen zum validierten Arbeitspunkt ist größer als 5%.

Der Nachweis der Modellvalidierung ist für Einheiten gleicher Bauart nur einmalig notwendig.

### **2.3. Validierung Anlagenmodell**

Die Erstellung des endgültigen Simulationsmodells einschließlich Aktualisierung aufgrund der Messergebnisse kann durch den Anlagenbetreiber erfolgen. Vorläufige noch nicht zertifizierte Modelle müssen auf Anforderung des Netzbetreibers dem Netzbetreiber bereitgestellt werden.

### **2.4. RMS-Anlagenmodelle**

Das detaillierte RMS-Anlagenmodell ist auf Basis validierter detaillierter RMS-Einheitenmodelle, Herstellerangaben zu Komponenten und einem auf Basis der Nachweise aus Kapitel 5 und Kapitel 11.4 der VDE-AR-N 4130 validiertem Modell des Anlagenreglers zu erstellen.

Zunächst erfolgt ein Benchmarking auf Basis vergleichender Simulationen mit dem detaillierten EMT-Anlagenmodell. Dafür sind die Simulationen in Kap. 5.3 heranzuziehen. Sobald Konformitäts- und/oder Inbetriebnahmetests zur Verfügung stehen erfolgt anschließend die Validierung auf Basis vergleichender Simulationen mit den Konformitäts- und/oder Inbetriebnahmetests. Die Bestätigung der Modellvalidierung erfolgt durch eine akkreditierte Zertifizierungsstelle.

Das aggregierte und vereinfachte RMS-Anlagenmodell ist auf Basis vergleichender Simulationen mit dem validierten detaillierten RMS-Anlagenmodell durch eine qualifizierte Stelle (z.B. Hersteller) zu vergleichen. Limitierungen und Vereinfachungen des aggregierten Modells sind klar zu beschreiben. Der Anwendungsbereich muss angegeben werden. Dafür sind die Simulationen aus Kapitel 4 und Kapitel 11.4 der VDE-AR-N 4130 heranzuziehen.

### **2.5. EMT-Anlagenmodelle**

Das detaillierte EMT-Anlagenmodell ist auf Basis validierter detaillierter EMT-Einheitenmodelle, Herstellerangaben zu Komponenten und einem auf Basis der Nachweise aus Kapitel 5 und Kapitel 11.3.2 der VDE-AR-N 4130 validiertem Modell des Anlagenreglers zu erstellen.

Eine Validierung des detaillierten EMT-Anlagenmodells auf Basis vergleichender Simulationen und Tests ist bei Inbetriebnahme nicht erforderlich.

Das aggregierte EMT-Anlagenmodell ist auf Basis vergleichender Simulationen mit dem detaillierten EMT-Anlagenmodell zu vergleichen. Limitierungen und Vereinfachungen des aggregierten Modells sind klar zu beschreiben. Der Anwendungsbereich muss angegeben werden. Dafür sind die Simulationen in aus Kapitel 4 und Kapitel 11.4 der VDE-AR-N 4130 heranzuziehen.

### **2.6. Harmonische Anlagenmodelle**

Das detaillierte harmonische Anlagenmodell ist auf Basis validierter harmonischer Einheitenmodelle und Herstellerangaben zu Komponenten zu erstellen. Die Validierung des detaillierten harmonischen Anlagenmodells erfolgt durch eine qualifizierte Stelle (z.B. Hersteller) nur auf Anforderung des

Netzbetreibers. Die Validierung kann beispielsweise anhand von Feldtests oder vergleichender Simulationen mit dem EMT-Modell erfolgen.

## 2.7. Plausibilisierung von Modellen

Die Modelle müssen nicht nur für die vermessenen Arbeitspunkte angewandt werden können. Um sicherzustellen, dass die Modelle plausible Werte auch bei nicht validierten Arbeitspunkten ausgeben, müssen von einer qualifizierten Stelle (z.B. Hersteller) Plausibilisierungstests (nach FGW TR4 Abschnitt 5.5 und 5.6) mit den Modellen durchgeführt werden. Auf Anforderung des Netzbetreibers sind zusätzliche vom Netzbetreiber vorgegebene Plausibilisierungstests durchzuführen.

### 3 Literaturhinweise

[1] Technische Richtlinie für Erzeugungseinheiten und Anlagen – Teil 3: Bestimmung der elektrischen Eigenschaften von Erzeugungseinheiten und -anlagen am Mittel-, Hoch- und Höchstspannungsnetz, (TR 3), Revision 26 Stand 05.04.2022, FGW e.V.

[2] Technische Richtlinien für Erzeugungseinheiten und -anlagen – Teil 4: Anforderungen an Modellierung und Validierung von Simulationsmodellen der elektrischen Eigenschaften von Erzeugungseinheiten und -anlagen (TR 4), Revision 10, Stand 05.04.2022, FGW e.

[3] Technische Anforderungen für den Anschluss von Elektrolyseanlagen, 4ÜNB in Zusammenarbeit mit dem DWV, 21.02.2025. [Online] <https://www.netztransparenz.de/de-de/Über-uns/Studien-und-Positionspapiere/Anforderungen-an-Elektrolyseanlagen/>.