

Technische Anforderung für den Anschluss von Elektrolyseanlagen

Technical requirements for the connection of electrolyser facilities

1	EINLEITUNG	3
1.1.	Anwendungsbereich	3
1.2.	Begriffe und Definitionen	3
1.3.	Referenzen	3
2	TECHNISCHE ANFORDERUNGEN AN ELEKTROLYSEANLAGEN	5
2.1.	Kurzschlussleistungsbereich	5
2.2.	Robustheit gegenüber Frequenzgradienten	5
2.3.	Robustheit gegenüber temporären Spannungsänderungen (FRT-Fähigkeit)	6
2.4.	Wiederkehr der Wirkleistungsaufnahme nach einem Fehler	8
2.5.	Lastabwurf und Wirkleistungsanpassung bei Über- und Unterfrequenz	9
2.6.	Zuschalten nach Auslösung durch Schutzeinrichtung	11
2.7.	Netzsicherheitsmanagement	12
2.8.	Regelgeschwindigkeit der Wirkleistungsanpassung	13
2.9.	Dynamische Netzstützung	13
2.10.	Blindleistung	17
2.11.	Interaktionen	20
3	PRIORISIERUNG	22
4	MODELLANFORDERUNGEN	23
4.1.	Allgemeines	23
4.2.	Detaillierte Simulationsmodelle	25
4.3.	Aggregierte Simulationsmodelle	25
4.4.	RMS-Modelle	25
4.5.	EMT-Modelle	26
4.6.	Harmonische Modelle	27
5	NACHWEIS (AUSBLICK)	28

1 Einleitung

In diesem Dokument werden diejenigen Anforderungen an Elektrolyseanlagen aufgeführt und definiert, die aus Sicht der vier deutschen Übertragungsnetzbetreiber (ÜNB) mit hoher Dringlichkeit umgesetzt werden müssen.

Dieses Dokument ist als Ergänzung zu den Anforderungen der VDE-AR-N 4120/4130 zu verstehen. Die Kapitel 1 bis 9 der VDE AR-N 4120/4130, insbesondere Kapitel 5 (Netzanschluss) enthalten bereits Anforderungen an Elektrolyseanlagen.

Das vorliegende Dokument gliedert sich in technische Anforderungen an Elektrolyseanlagen, deren Priorisierung Anforderungen an Simulationsmodelle und Nachweisverfahren.

ANMERKUNG 1 Kapitel 5 der VDE-AR-N 4120/4130 beschreibt unter anderem Anforderungen hinsichtlich der Spannung und der Frequenz am Netzanschlusspunkt, Netzurückwirkungen, Blindleistungsverhalten sowie Resonanzen und Reglerinteraktionen.

1.1. Anwendungsbereich

Die Anwendung dieses Dokuments für den Anschluss von Elektrolyseanlagen obliegt dem betreffenden Netzbetreiber.

Dieses Dokument legt die Systemanforderungen für die Planung, die Errichtung, den Betrieb und die Änderung von Elektrolyseanlagen für die Gewinnung von Wasserstoff fest, die am Netzanschlusspunkt an ein Hoch- oder Höchstspannungsnetz der allgemeinen Versorgung angeschlossen werden.

Als Hochspannungsnetz wird das 110 kV-Drehstromnetz mit einer Netzfrequenz von 50 Hz betrachtet.

Als Höchstspannungsnetz wird das Drehstromnetz mit Spannungen ≥ 150 kV mit einer Netzfrequenz von 50 Hz betrachtet.

Elektrolyseanlagen an Offshore-Anschlüssen sind von dieser Regelung ausgenommen.

1.2. Begriffe und Definitionen

Für Elektrolyseanlagen gelten die Definitionen, Formelzeichen und Bezeichnungen der VDE AR-N 4120/4130 [2,3].

Zusätzlich werden die folgenden Begriffe in diesem Dokument definiert:

Elektrolyseeinheit: Elektrolyseeinheit ist die kleinste autark betreibbare Einheit zur Erzeugung von Wasserstoff oder anderen Gasen auf der Basis eines Elektrolyseprozesses.

Elektrolyseanlage: Anlage zur Erzeugung von Wasserstoff oder anderen Gasen auf der Basis eines Elektrolyseprozesses, die sich aus ein oder mehreren Elektrolyseeinheiten zusammensetzt.

Wrapper: Schnittstellenfunktion zwischen Simulationssoftware und (verschlüsseltem) Modellelement.

Konstantspannungsregelung: Integral wirkende Spannungsregelung, die durch Anpassung der Blindleistungsfahrweise einer Einheit oder Anlage eine konstante Mitsystemspannung an einem Referenzknoten einregelt.

1.3. Referenzen

- [1] Commission Regulation (EU) 2016/1388 of 17 August 2016 establishing a Network Code on Demand Connection.

- [2] VDE-AR-N 4120: 2018-11: Technische Regeln für den Anschluss von Kundenanlagen an das Hochspannungsnetz und deren Betrieb (TAR HS).
- [3] VDE-AR-N 4130: 2018-11: Technische Regeln für den Anschluss von Kundenanlagen an das Höchstspannungsnetz und deren Betrieb (TAR HöS).
- [4] VDE-AR-N 4131: 2019-03: Technische Anschlussbedingungen für HGÜ-Systeme und über HGÜ-Systeme angeschlossene Erzeugungsanlagen (TAR HGÜ).

2 Technische Anforderungen an Elektrolyseanlagen

Die Systemanforderungen und Funktionen beziehen sich auf die gesamte Kundenanlage, d.h. die Elektrolyseanlage inkl. aller anderen Komponenten, die am Netzanschlusspunkt (NAP) betrieben wird.

Elektrolyseanlagen müssen als dreiphasige Drehstromanlagen ausgeführt werden. Das bedeutet, dass Elektrolyseanlagen im ungestörten Betrieb mit symmetrischen Drehspannungsquellen arbeiten müssen. Ebenfalls zugelassen ist der Bezug von symmetrischen Drehströmen. Als Bezugsgröße für diese Ströme ist – auch wenn die Klemmenspannungen nicht symmetrisch sind – das Mitsystem der Klemmenspannungen heranzuziehen.

Der Referenzwert der Spannung beträgt:

- $U_{\text{ref}} = 400 \text{ kV}$ (1 pu) bei der Netzspannungsebene 380 kV
- $U_{\text{ref}} = 220 \text{ kV}$ (1 pu) bei der Netzspannungsebene 220 kV und
- $U_{\text{ref}} = 110 \text{ kV}$ (1 pu) bei der Netzspannungsebene 110 kV.

Sofern die installierte Wirkleistung P_{inst} der Elektrolyseanlage größer als die vereinbarte Anschlusswirkleistung P_{AV} ist, so ist, sofern nicht anders angegeben, bei allen weiteren Anschlussbedingungen als Bezugsgröße die vereinbarte Anschlusswirkleistung P_{AV} zu wählen.

Der Netzbetreiber ist berechtigt, die Elektrolyseanlage vom Netz zu trennen, wenn die vorgegebenen netzverträglichen Grenzen im stationären Betrieb (nach VDE-AR-N 4120/30), wie beispielsweise die vereinbarte Anschlussleistung S_{AV} überschritten werden.

2.1. Kurzschlussleistungsbereich

Die Elektrolyseanlage muss unabhängig vom Betriebspunkt in der Lage sein, im Bereich zwischen der minimalen und maximalen Kurzschlussleistung betrieben werden können. Die minimale und maximale Kurzschlussleistung wird vom Netzbetreiber angegeben.

Die Elektrolyseanlage muss ohne Leistungseinbußen im gesamten Bereich zwischen minimaler und maximaler Kurzschlussleistung am NAP ohne Einschränkung der Funktionalität betrieben werden können

Der Anschlussnehmer muss ermitteln, bis zu welcher minimalen Kurzschlussleistung die Elektrolyseanlage betrieben werden kann. Die Ergebnisse sind dem Netzbetreiber mitzuteilen.

2.2. Robustheit gegenüber Frequenzgradienten

Elektrolyseanlagen müssen folgende Frequenzgradienten (Frequenzänderungsgeschwindigkeit, aus dem Englischen: Rate of Change of Frequency - RoCoF) ohne Trennung vom Netz durchfahren können.

- $\pm 4,0 \text{ Hz/s}$ ermittelt über eine Dauer von 0,25 s oder
- $\pm 2,0 \text{ Hz/s}$ ermittelt über eine Dauer von 0,5 s oder
- $\pm 1,5 \text{ Hz/s}$ ermittelt über eine Dauer von 1 s oder
- $\pm 1,25 \text{ Hz/s}$ ermittelt über eine Dauer von 2 s.

Dies schränkt die Beteiligung am Lastabwurf nach Kapitel 2.5 nicht ein.

Eine kurzzeitige Abweichung der Wirk- und Blindströme gegenüber dem Ausgangszustand ist zulässig.

2.3. Robustheit gegenüber temporären Spannungsänderungen (FRT-Fähigkeit)

Ziel der FRT-Fähigkeit¹ ist es, bei kurzzeitigen Spannungseinbrüchen oder -erhöhungen eine ungewollte Abschaltung von Elektrolyseanlagen und damit eine Gefährdung der Netzstabilität zu verhindern.

ANMERKUNG 1 Ereignisse, die zu kurzzeitigen Spannungseinbrüchen oder -erhöhungen führen, sind typischerweise Netzfehler (Kurzschlüsse), können aber auch andere Ursachen haben. Zur besseren Lesbarkeit wird im Folgenden der Begriff Netzfehler verwendet.

Elektrolyseanlagen müssen eine FRT-Fähigkeit aufweisen. Dies bedeutet, dass Elektrolyseanlagen in der Lage sein müssen, alle folgenden Grundanforderungen zu erfüllen. Diese Grundanforderungen gelten sowohl für symmetrische, als auch für unsymmetrische Fehler im Netz:

- Sie dürfen sich bei Netzfehlern in den in Abbildung 1 und Abbildung 2 dargestellten Grenzen nicht vom Netz trennen. Bezugspunkt ist der Netzanschlusspunkt.
- Elektrolyseanlagen müssen in der Lage sein, eine beliebige Folge von 1- und 2-poligen Netzfehlern nacheinander zu durchfahren. Wenn zum Durchfahren der Netzfehler eine Energieaufnahme aus den angeschlossenen Netzen durch die Elektrolyseanlagen erforderlich ist, kann in begründeten Fällen die Folge der zu durchzufahrenden Netzfehler eingeschränkt werden. In diesem Fall darf eine Einschränkung jedoch nicht erfolgen, solange die gesamte kumulierte Energie, die in den vorangegangenen 30 min aufgrund von Netzfehlern während der Netzfehler nicht aus dem Netz aufgenommen werden konnte, kleiner als das Äquivalent einer elektrischen Energie der vereinbarten Anschlusswirkleistung $P_{AV} \cdot 2 \text{ s}$ ist.
- Im Fall von 3-poligen Netzfehler müssen Elektrolyseanlagen in der Lage sein mindestens drei aufeinanderfolgende Unterspannungsereignissen innerhalb von 30 Minuten nacheinander zu durchfahren. Elektrolyseanlagen müssen in der Lage sein, eine beliebige Folge von 3-poligen Überspannungsereignisse nacheinander zu durchfahren.

ANMERKUNG 2: Führt eine sprunghafte Spannungsänderung zu einer Rückkehr aller Leiter-Leiter-Spannungen in den Bereich $> 110 \%$ oder $< 90\%$ der Nennspannung sollte dies als ein erneuter Fehlerbeginn gewertet werden.

Die FRT-Kurven nach Abbildung 1 und Abbildung 2 gelten nicht für einpolige Fehler (Erdkurzschluss) im Netz. Elektrolyseanlagen dürfen sich bei einpoligen Fehlern (Erdkurzschluss) im Netz, die vom Netzschutz geklärt werden, konstruktionsbedingt nicht vom Netz trennen.

ANMERKUNG 3 Die FRT-Grenzkurven beschreiben die Grundanforderungen an das Verbleiben der Elektrolyseanlagen am Netz. Sie sind nicht dafür konzipiert, einen Über bzw.- Unterspannungsschutz zu parametrieren.

Nach Fehlerklärung kommt es aufgrund der dynamischen Wechselwirkungen zwischen Elektrolyseanlagen und Netz zu einem Ausgleichsvorgang der Spannung (am Netzanschlusspunkt wie auch Eigenbedarfsspannung). Über- und Unterspannungsereignis treten dabei zeitlich unabhängig voneinander auf, können aber dieselbe Ursache haben.

Abweichend von den vorgehen beschrieben Grundanforderungen dürfen sich Elektrolyseanlagen vom Netz trennen, wenn eine auftretende kurzzeitige Spannungserhöhung ΔU_{NAP} (Differenz der höchsten Leiter-Leiter Spannung am Netzanschlusspunkt zu deren 1-Minuten-Mittelwert U_{1min} bei Fehlerbeginn bezogen auf die Netznennspannung) die Grenzkurve nach Abbildung 1 überschreitet. Dabei entspricht P_{ref} 400 kV für Anschlüsse am 380-kV-Netz und 220 kV für Anschlüsse am 220-kV-Netz.

¹ FRT steht für fault-ride-through und kann nach einer Robustheit gegenüber temporären Spannungserhöhungen (HVRT) und Absenkungen (LVRT) differenziert werden.

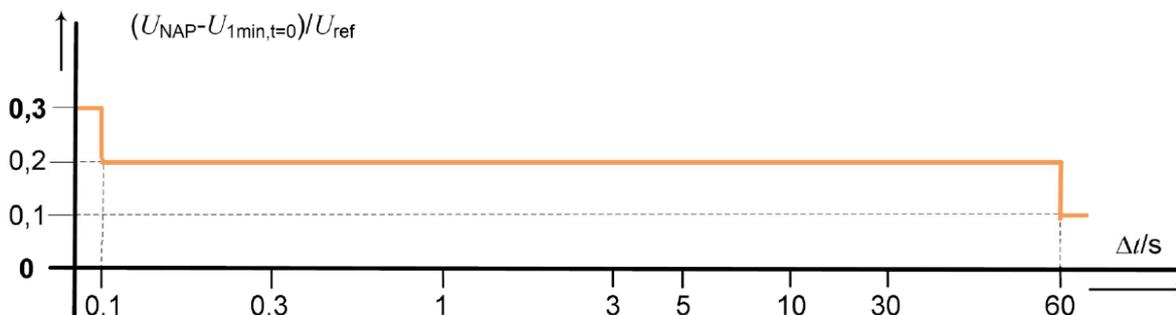


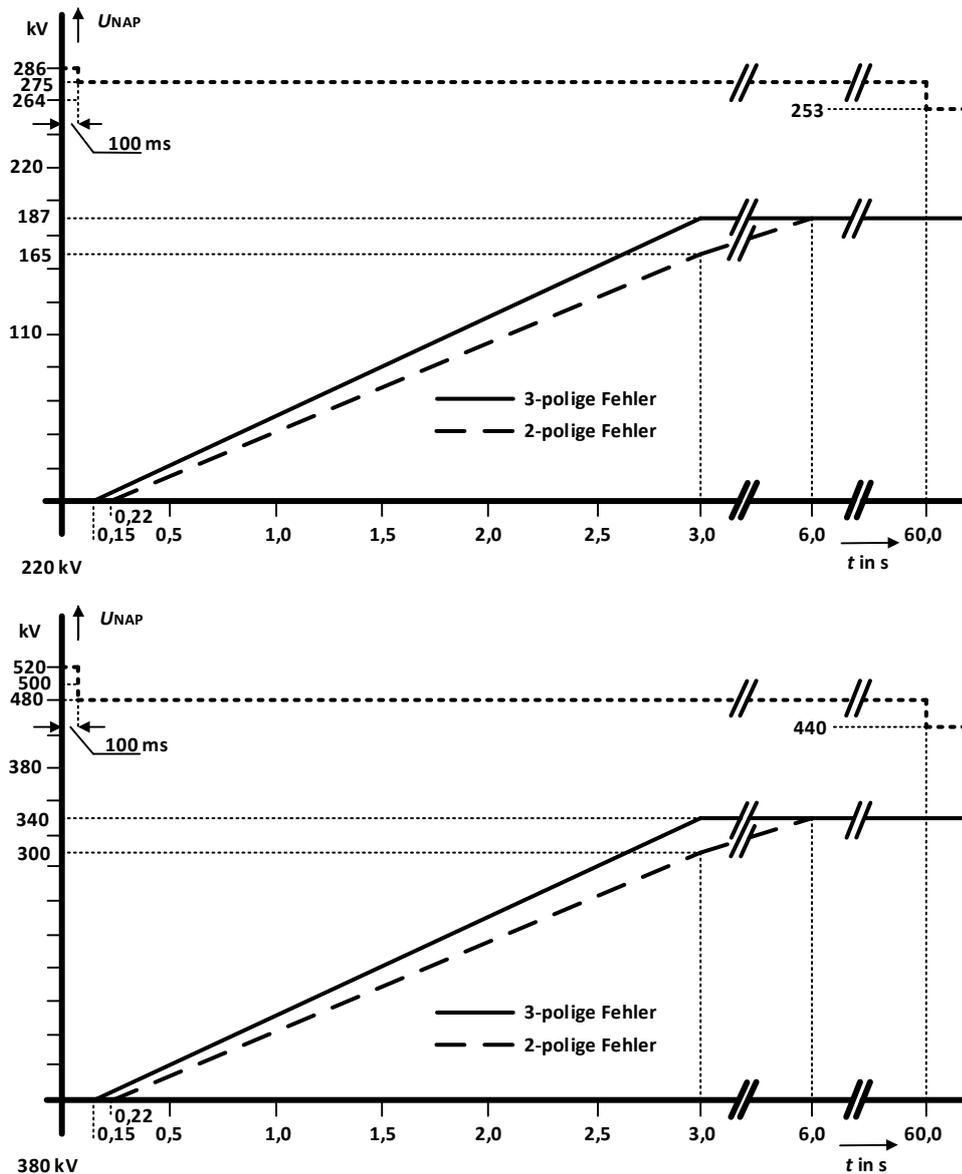
Abbildung 1: Grenzkurve für relative Spannungserhöhungen

Solange alle Leiter-Leiter-Spannungen am Netzanschlusspunkt innerhalb der in Abbildung 1 und Abbildung 2 dargestellten Grenzkurven liegen, darf es im gesamten Betriebsbereich nicht zur Instabilität der Elektrolyseanlage und nicht zu einer Trennung vom Netz kommen.

Zur Beurteilung der FRT-Grenzkurven bei Spannungseinbruch ist jeweils die kleinste der drei Leiter-Leiter-Spannungen heranzuziehen, bei Spannungserhöhung die größte der drei Leiter-Leiter-Spannungen.

ANMERKUNG 4 Die „Fault-Ride-Through“-Kurven (FRT) sind wie folgt zu interpretieren: Bei $t = 0$ s tritt ein Fehler (Kurzschluss) im Netz ein. Die Spannung am Netzanschlusspunkt der Elektrolyseanlage bricht auf einen Wert U_{NAP} ein. Nach der Fehlerklärungszeit t_f ist der Fehler durch die Schutzrichtungen abgeschaltet, die Spannung „springt“ auf einen höheren Wert. Die Grenzkurven in den Abbildungen stellen Einhüllende einer möglichen Kurvenschar dar. Bei einem realen Netzfehler ist zu erwarten, dass sich die Leiter-Leiter-Spannungen gedämpft oszillierend verhalten und in der Regel zwischen den Grenzkurven verbleiben. Der zeitliche Verlauf der Spannung hängt stark vom Netzfehler, der Netztopologie und evtl. elektromechanischen Schwingungen von betroffenen Bezugseinheiten ab, und ist deshalb nicht im Detail vorhersehbar.

ANMERKUNG 5 Beim Durchfahren von Fehlern (temporäre Spannungsänderung) kann ein Blockieren des Umrichters kurzzeitig zulässig sein, sofern die Anforderungen nach Abschnitt 2.9 dadurch nicht eingeschränkt werden.



U_{NAP} Effektivwert der aktuellen Spannung am Netzanschlusspunkt

Abbildung 2: Fault-Ride-Through-Grenzkurve (FRT) für den Spannungsverlauf am Netzanschlusspunkt für eine Elektrolyseanlage. U_{NAP} ist der Effektivwert der aktuellen Spannung am Netzanschlusspunkt.

Für einen Netzanschlusspunkt im 110kV Netz sind die Fault-ride-through-Grenzkurven nach Bild 12 in Kapitel 10.2.3.3 der VDE-AR-N 4120 anzuwenden.

2.4. Wiederkehr der Wirkleistungsaufnahme nach einem Fehler

Falls sich alle Leiter-Leiter-Spannungen der Netzspannung nach Fehlerklärung wieder innerhalb des Spannungsbandes $U_{ref} \pm 10\%$ befinden und der Wirkstrom der Elektrolyseanlage während des Netzfehlers reduziert wurde, muss der Wirkstrom sofort nach Eintritt in dieses Spannungsband so schnell wie möglich gesteigert werden, bis 90% des Vorfehlerwertes des Wirkstromes oder der Wirkleistung erreicht ist.

Die Anschwingzeit darf maximal 1 s betragen. Davon abweichend kann der Netzbetreiber in Abstimmung mit dem Anlagenbetreiber schnellere Anschwingzeiten < 1 s festlegen.

Ein temporäres Überschwingen des Wirkstroms um 10 % des vereinbarten Anschlusswirkleistung P_{AV} ist zulässig.

2.5. Lastabwurf und Wirkleistungsanpassung bei Über- und Unterfrequenz

Allgemeines

Elektrolyseanlagen müssen am Lastabwurfkonzept des Netzbetreibers teilnehmen.

Alternativ zur Teilnahme am Lastabwurf kann der Netzbetreiber wie im Folgenden beschrieben eine Beteiligung an der Wirkleistungsanpassung bei Über- und Unterfrequenzereignissen durch die Änderung des frequenzabhängigen Wirkleistungsbezugs verlangen.

Auch eine Kombination aus Lastabwurf und Wirkleistungsanpassung ist möglich und wird vom Netzbetreiber entschieden. Die jeweiligen Frequenzschwellen der Elektrolyseeinheiten (Festlegung der Grenzfrequenz für den Übergang vom Frequenzschutz in den Lastabwurf) sind vom Netzbetreiber vorzugeben.

Lastabwurf

Die Beteiligung am Lastabwurf ist in VDE-AR-4130 Kapitel 6.3.3.2 geregelt. Die Beteiligung von Elektrolyseanlagen am Lastabwurf erfolgt nicht durch die Trennung der Anlage am Netzanschlusspunkt, sondern innerhalb der Anlage auf Einheitenebene. Die Frequenzschwellenwerte sind gleichmäßig verteilt im Frequenzbereich von 49,0 Hz bis 48,1 Hz zu wählen.

Wirkleistungsanpassung bei Über- und Unterfrequenz

Bei **Überfrequenz** steht ein Überschuss an Erzeugungsleistung einem Defizit an Bezugslast gegenüber. Daher müssen auch Elektrolyseanlagen in der Lage sein, bei Überfrequenz bis maximal 51,5 Hz ihren Wirkleistungs-Arbeitspunkt anzupassen. Der Frequenzwert für den Beginn der Erhöhung dieses frequenzabhängigen Wirkleistungsbezugs muss von 50,2 Hz bis 50,5 Hz einstellbar sein. Sofern der Netzbetreiber keine anderweitige Vorgabe macht, ist der Beginn auf 50,2 Hz einzustellen. Die Statik des frequenzabhängigen Wirkleistungsbezugs ($s = \frac{\frac{\Delta f}{f_n}}{\frac{\Delta P}{P_{mom}}}$) muss von 2 % bis 12 % einstellbar sein.

Anmerkung 1: Dies entspricht einem Leistungsgradienten von 16,67 % von P_{mom} je Hertz ($s = 12 \%$) bis 100 % von P_{mom} je Hertz ($s = 2 \%$).

Sofern der Netzbetreiber keine anderweitige Vorgabe macht, ist ein Gradient von 40 % von P_{mom} je Hertz ($s = 5 \%$) einzustellen. Die Erhöhung des frequenzabhängigen Wirkleistungsbezugs bewirkt, dass sich die Elektrolyseanlage in dem Frequenzbereich zwischen 50,2 Hz (sofern keine anderweitige Vorgabe der Netzbetreibers erfolgt) und 51,5 Hz hinsichtlich ihrer maximal möglichen Wirkleistungsaufnahme permanent auf der Frequenz-Kennlinie auf und ab bewegt („Fahren auf der Kennlinie“).

Oberhalb von 51,5 Hz sollen die Elektrolyseanlagen in der Lage sein, für mindestens weitere 5 s am Netz zu bleiben. Dabei ist möglichst weiter auf der Kennlinie zu fahren, wobei eine Reduktion des Wirkleistungsbezugs bei steigender Netzfrequenz nicht zulässig ist.

Bei Netzfrequenzen $f > 51,5$ Hz dürfen sich die Elektrolyseanlagen aus Gründen des Eigenschutzes vom Netz trennen.

Bei **Unterfrequenz** steht ein Defizit an Erzeugungsleistung einem Überschuss an Bezugslast gegenüber.

Daher müssen auch Elektrolyseanlagen in der Lage sein, bei Unterfrequenz ihren Wirkleistungs-Arbeitspunkt anzupassen. Der Frequenzwert für den Beginn der Reduzierung dieses frequenzabhängigen Wirkleistungsbezugs muss von 49,5 Hz bis 49,8 Hz einstellbar sein. Sofern der Netzbetreiber keine

anderweitige Vorgabe macht, ist der Beginn auf 49,8 Hz einzustellen. Die Statik des frequenzabhängigen Wirkleistungsbezugs ($s = \frac{\frac{\Delta f}{f_n}}{\frac{\Delta P}{P_{\text{mom}}}}$) muss von 2 % bis 12 % einstellbar sein.

Anmerkung 2: Dies entspricht einem Leistungsgradienten von 16,67 % von P_{mom} je Hertz ($s = 12 \%$) bis 100 % von P_{mom} je Hertz ($s = 2 \%$).

Sofern der Netzbetreiber keine anderweitige Vorgabe macht, ist ein Gradient von 40 % von P_{mom} je Hertz ($s = 5 \%$) einzustellen.

Die Reduzierung des frequenzabhängigen Wirkleistungsbezugs bewirkt, dass sich die Elektrolyseanlage auch in dem Frequenzbereich zwischen 49,8 Hz (sofern keine anderweitige Vorgabe der Netzbetreibers erfolgt) und 47,5 Hz hinsichtlich ihres minimal möglichen Wirkleistungsbezugs permanent auf der Frequenzkennlinie auf- und ab bewegt („Fahren auf der Kennlinie“).

Bei Netzfrequenzen $f < 47,5$ Hz dürfen sich die Elektrolyseanlagen vom Netz trennen.

Die Reduktion der Wirkleistungsaufnahme muss mindestens bis zum Erreichen der technischen Mindestleistung der Elektrolyseeinheiten erfolgen.

Für den zeitlichen Verlauf der frequenzabhängigen Anpassung der Wirkleistung sind folgende Bedingungen bzgl. der anfänglichen Zeitverzögerung T_V und der Anschwingzeit $T_{\text{an}_90\%}$ einzuhalten:

- Nach Ablauf von $T_V + 0,1 \cdot (T_{\text{an}_90\%} - T_V)$ sind mindestens 9 % der erforderlichen Leistungsanpassung ΔP erbracht.
- 90 % der Leistungsanpassung ΔP sind nach Ablauf der Anschwingzeit $T_{\text{an}_90\%}$ erbracht.

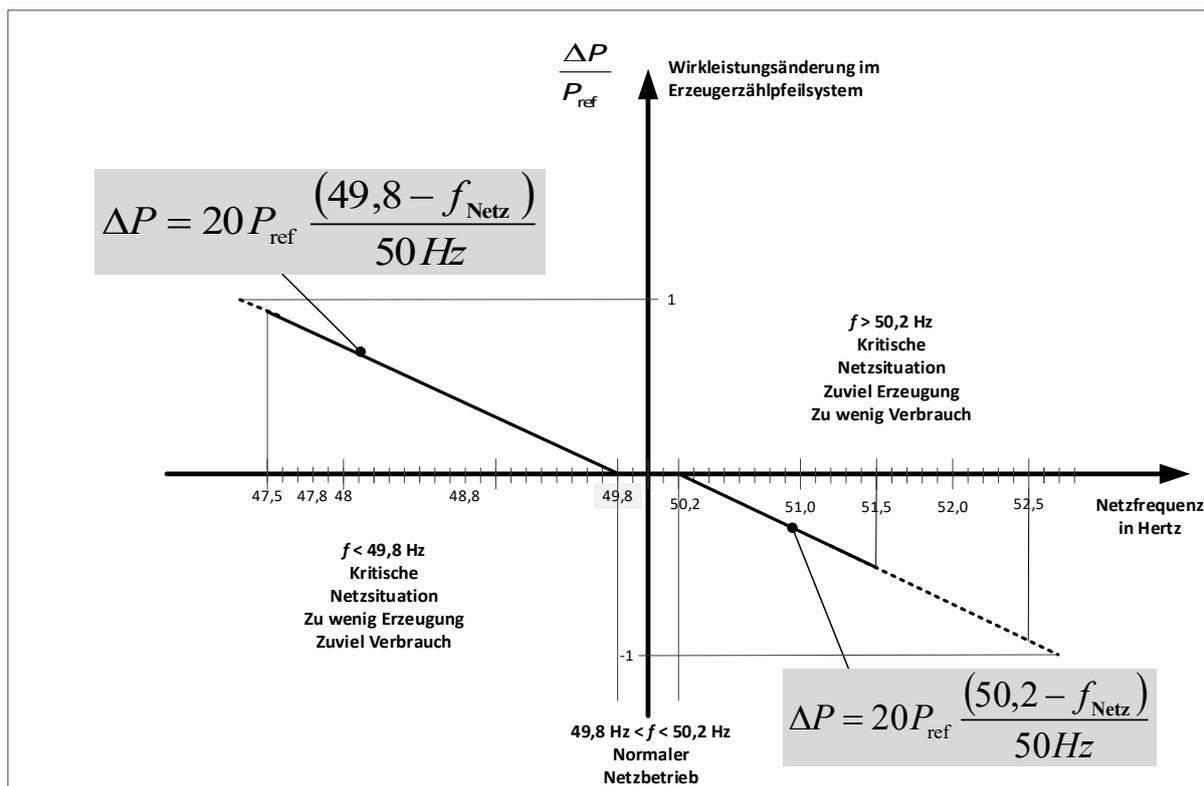


Abbildung 2: Wirkleistungsanpassung stufenlos steuerbarer Elektrolyseanlagen bei Über- und Unterfrequenz mit einer Statik von 5 % und Frequenzgrenzwerten von 49,8 Hz und 50,2 Hz für den Beginn der Wirkleistungsanpassung

Die anfängliche Zeitverzögerung der frequenzabhängigen Anpassung der Wirkleistungsabgabe bei Über- und Unterfrequenz muss möglichst kurz sein. Der Anlagenbetreiber teilt dem Netzbetreiber den Wert der anfänglichen Zeitverzögerung T_V mit. Beträgt diese Zeitverzögerung mehr als 2 s, muss der Betreiber der Elektrolyseanlage die Verzögerung unter Vorlage technischer Nachweise gegenüber dem Netzbetreiber begründen.

Bei der Regelung (Fahren auf der Kennlinie) gilt, dass die Elektrolyseanlage auf Änderungen der Netzfrequenz nach den folgenden aufgeführten Anschwing- und Einschwingzeiten bei Über- und Unterfrequenz reagieren muss.

- Leistungserhöhung: Anschwingzeit ≤ 10 s und Einschwingzeit ≤ 30 s für ein $\Delta P \leq 50$ % von P_{inst}
- Leistungsreduktion: Anschwingzeit ≤ 2 s und Einschwingzeit ≤ 20 s für ein $\Delta P \leq 50$ % von P_{inst}

Können nur längere An- und Einschwingzeiten realisiert werden, muss der Betreiber der Elektrolyseanlage die Verzögerung unter Vorlage technischer Nachweise gegenüber dem Netzbetreiber begründen.

Bei Frequenzabweichungen, die zu größeren Leistungsänderungen ΔP führen gilt:

- Für den angegebenen Anteil der Leistungsänderung ΔP sind die angegebenen Zeiten einzuhalten.
- Für den darüberhinausgehenden Anteil der Leistungsänderung ΔP ist ein möglichst schnelles Regelverhalten umzusetzen (nach Können und Vermögen entsprechend Herstellerangaben).

Grundsätzlich ist bei der Frequenzmessung der FNN Hinweis „Ermittlung und Bewertung der Netzfrequenz – Auswirkungen netzseitiger Störeinflüsse“ [16] zu beachten.

ANMERKUNG 3 Es sind die technisch schnellstmöglichen Anschwing- und Einschwingzeiten zu realisieren.

2.6. Zuschalten nach Auslösung durch Schutzeinrichtung

Erfolgt eine Netztrennung der Kundenanlage durch eine Schutzauslösung, darf eine Wiedereinschaltung nur nach Klärung der Störungsursache und nach Freigabe durch die netzführende Stelle des Netzbetreibers erfolgen. Eine automatische Wiederzuschaltung der Elektrolyseanlage ist nicht vorgesehen.

Nach Trennung einer **Einheit** innerhalb einer Elektrolyseanlage aufgrund von Auslösungen durch Entkopplungsschutzeinrichtungen (Überfrequenz, Unterfrequenz, Spannungsrückgang, Spannungssteigerung) ist eine Zuschaltung ohne Freigabe durch die netzführende Stelle nur dann zulässig, wenn die Spannung am Netzanschlusspunkt mindestens 95 % U_{ref} beträgt und die Frequenz zwischen 49,9 Hz und 50,1 Hz liegt. Der Spannungswert bezieht sich dabei auf den kleinsten Wert der drei verketteten Netzspannungen (siehe Abbildung 4).

Die Zuschaltung ohne Freigabe durch die netzführende Stelle darf erst dann erfolgen, wenn Netzspannung und Netzfrequenz für eine einstellbare Zeit stabil innerhalb der vorgenannten Grenzwerte für Spannung und Frequenz gelegen haben (Funktionsschema siehe Abbildung 5). Diese Zeit muss gleichmäßig verteilt für die Einheiten von 10 min bis 30 min eingestellt werden.

ANMERKUNG 1 Für die Spannungsabfrage am Netzanschlusspunkt bedarf es der Bildung eines entsprechenden Signals am Netzanschlusspunkt und der Weiterleitung an die einzelnen Einheiten (Kommunikationsverbindung notwendig). Dieses Signal muss in die Bedingungen für die Wiederzuschaltung implementiert werden. Bezüglich der Anordnung der Spannungswandler am Netzanschlusspunkt bestehen diesbezüglich keine Anforderungen.

ANMERKUNG 2 Für das Zuschalten der Einheit ist neben dem Signal „Zuschaltbedingungen Kuppelschalter erfüllt“ das Vorhandensein der Netzspannung an der Einheit notwendig. Hierzu ist immer die Spannung netzseitig am Kuppelschalter auszuwerten. Es müssen Spannungshöhe und Frequenz ausgewertet und in die Zuschaltung einbezogen werden.

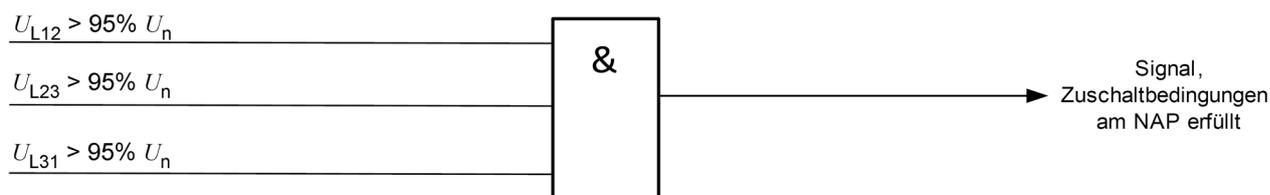


Abbildung 3: Bildung des Signals für die Zuschaltbedingungen am Netzanschlusspunkt.

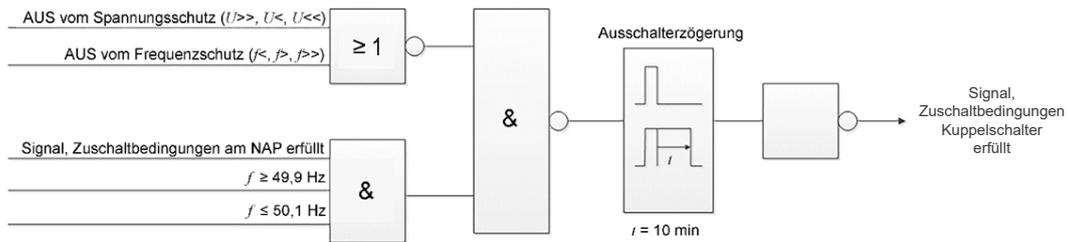


Abbildung 4: Funktionsschema Zuschaltung eines Kuppelschalters.

2.7. Netzsicherheitsmanagement

Anpassung der Wirkleistungsfahrweise

Elektrolyseanlagen müssen ihre Wirkleistung auf einen vom Netzbetreiber am Netzanschlusspunkt vorgegebenen Leistungswert ohne Trennung vom Netz anpassen können. Die Leistungsanpassung muss aus jedem Betriebspunkt möglich sein.

Leistungsänderungen infolge von Vorgaben durch den Netzbetreiber müssen mit mindestens 20 %/min erfolgen.

ANMERKUNG 1 Bei einem vorgegebenen Leistungswert von 0 % PAV,B ist eine Trennung vom Netz nicht zwingend notwendig.

ANMERKUNG 2 Die Vorgaben können sowohl eine Leistungserhöhung, als auch eine Leistungsreduktion betreffen.

ANMERKUNG 3 Das Signal zur Leistungsanpassung durch den Netzbetreiber ist als separates Eingangssignal aufzunehmen und entsprechend der Priorisierung nach Kapitel 3 zu behandeln.

Systemautomatiken (Emergency Power Control – EPC)

Die Elektrolyseanlagen müssen eine Emergency-Power-Control-Funktion (EPC) gemäß den Anforderungen des Netzbetreibers bieten.

Die Anpassung des Wirkleistungsbezugs im Rahmen von EPC-Funktionen muss dabei im Rahmen der technischen Möglichkeiten mit einer von relevanten ÜNB vorgegebenen Dynamik erfolgen.

Ist die Anlage nicht in der Lage die genannte zeitliche Anforderung zu erfüllen, muss der Anschlussnehmer die technischen Grenzen der Dynamik der Wirkleistung im Hinblick auf die EPC-Funktion beschreiben und begründen.

Die Elektrolyseanlage muss in der Lage sein, bis zu fünf Binärsignale zur schnellen Wirkleistungsanpassung (EPC-Signale) zu empfangen und zu verarbeiten.

ANMERKUNG 4 EPC-Signale haben eine Schutzfunktion für das Netz und werden vom Netzbetreiber mit automatischen Verfahren erzeugt.

Werden durch ein EPC-Signal die technischen Grenzen der Anlage erreicht, muss die jeweils erreichte Leistung beibehalten werden, solange das EPC-Signal anliegt.

Eine Priorisierung verschiedener EPC-Signale muss möglich sein. Ohne Priorisierung müssen die EPC-Funktionen nacheinander nach ihrem Eingang ausgeführt werden, unabhängig davon, ob das Eingangssignal zwischenzeitlich zurückfällt oder länger ansteht, als der Prozess dauert.

Der Anschlussnehmer muss die Implementierungsdetails der EPC-Funktion im Studienbericht beschreiben.

Alternativ hat der Netzbetreiber das Recht einzelne EPC-Funktionen als Mitnahmeschaltung umzusetzen.

2.8. Regelgeschwindigkeit der Wirkleistungsanpassung

Leistungsänderungen infolge von Vorgaben durch Dritte (zum Beispiel Fahrplanfahrweise) dürfen mit höchstens 10 %/min von P_{AV} erfolgen.

ANMERKUNG 1 Für die Beteiligung am Engpassmanagement, EPC-Funktionen und andere Systemdienstleistungen können höhere Leistungsgradienten angefordert sein.

Es ist ein gleichmäßiger Verlauf der Leistungssteigerung bzw. -reduzierung während des Hoch- bzw. Abfahrens der Kundenanlage und damit ein möglichst lineares Verhalten zu realisieren.

2.9. Dynamische Netzstützung

Der Netzbetreiber entscheidet über den Einsatz der Dynamische Blindstromeinspeisung oder der kontinuierlichen dynamische Netzstützung.

Der Netzbetreiber kann standortspezifisch festlegen, dass keine dynamisch Netzstützung erforderlich ist.

ANMERKUNG 1 Die Dynamische Blindstromeinspeisung ist veraltet und wird für die Anwendung in Neuanlagen voraussichtlich aus den Anwendungsrichtlinien entfernt werden.

Allgemeines zur Dynamischen Netzstützung

Das geforderte Verhalten zur dynamischen Netzstützung wird hier in symmetrischen Komponenten beschrieben und stellt diesbezüglich keine Realisierungsvorgabe dar. Die Spannungsänderung im Mitsystem Δu_1 bzw. im Gegensystem Δu_2 ist die Abweichung des Betrages der Netzspannung (50-Hz-Grundschwingung) von einer Referenzspannung im Mit- bzw. Gegensystem. Die Spannungsänderung wird auf die Netznennspannung U_n bezogen:

$$\Delta u_{1,2} = \frac{\Delta U_{1,2}}{U_n / \sqrt{3}} = \frac{U_{1,2} - U_{\text{ref } 1,2}}{U_n / \sqrt{3}}$$

Im Mitsystem ist die Referenzspannung im Regelfall der Mittelwert der Spannung vor dem Fehlerfall über eine Minute. In Abstimmung mit dem Netzbetreiber kann die Vorgabe dieser Referenzspannung auch durch die Q(U)-Regelung erfolgen. Im Gegensystem ist die Referenzspannung gleich Null.

ANMERKUNG 1 Das Regelziel der dynamischen Spannungsregelung im Gegensystem ist immer die Reduktion der vom Netz herrührenden Gegensystemspannung.

Die dynamische Netzstützung hat bei unsymmetrischen Spannungsänderungen nicht nur im Mitsystem sondern auch im Gegensystem zu erfolgen.

ANMERKUNG 2 Es ist zulässig, dass diese Eigenschaften nicht in der Elektrolyseeinheit, sondern durch andere Komponenten (z. B. durch FACTS oder andere geeignete Betriebsmittel) erbracht werden.

Elektrolyseeinheiten müssen in der Lage sein, bei der dynamischen Netzstützung in jedem Leiter einen Strom / von mindestens 100 % der Höhe des Bemessungsstromes (Umrichterseite) der Elektrolyseeinheit einzuspeisen.

Bei einer sprunghaften Änderung der Klemmenspannung werden folgende Anforderungen an die Dynamik des sich aus der Spannungsregelung ergebenden Blindstromes gestellt:

a) Anschlagzeit: $T_{\text{an},90\%} \leq 30 \text{ ms}$

b) Einschwingzeit: $T_{\text{ein},\Delta x} \leq 60 \text{ ms}$

Eine Ungenauigkeit bezüglich Betrag und Phasenlage vor Ablauf der Anschlagzeit ist zulässig.

Durch Einwirkung der Elektrolyseanlage darf die festgelegte obere Grenze des Spannungsbandes bzw. das FRT-Profil zu keinem Zeitpunkt verletzt werden, auch nicht während der vorgegebenen Einschwingzeit, sodass das die Elektrolyseanlage keine Schutzabschaltung durchführt.

Der Blindstrom darf zugunsten eines Wirkstrombezugs abgesenkt werden, wobei auch während des Fehlers nach Möglichkeit der bisher bezogene Wirkstrom zu beziehen ist (nach Können und Vermögen entsprechend Herstellerangaben).

Für Fehler mit Restspannungen $< 30 \% U_{ref}$ am Netzanschlusspunkt bestehen keine Anforderungen an den Strom.

Eine ggf. erforderliche Begrenzung des Blindstromes erfolgt vorzugsweise durch gleichmäßige Absenkung des Mit- und Gegensystemstromes.

Es sind zwei Verfahren zur dynamischen Netzstützung zulässig: einerseits die dynamische Blindstromeinspeisung und andererseits die kontinuierliche dynamische Netzstützung.

Dynamische Blindstromeinspeisung

Das Ziel der dynamischen Blindstromeinspeisung ist, einer kurzzeitigen hohen Änderung der Amplitude der Mit- und Gegensystem-Grundschiwingung durch Einspeisung eines den Netzverhältnissen angepassten Stromes entgegenzuwirken und im Störfall zur Begrenzung der Spannungsänderung beizutragen.

Ab Fehlerbeginn bis Fehlerende müssen die Elektrolyseeinheiten die Spannung durch Anpassung (Erhöhung oder Absenkung) des Blindstromes I_B (durch einen zusätzlichen Blindstrom ΔI_B) stützen:

- Als Zeitpunkt für den Fehlerbeginn wird das Auftreten des ersten der beiden folgenden Ereignisse definiert:
 - Auftreten einer sprunghaften Spannungsänderung (mindestens 5 % Toleranzband) oder
 - Leiter-Leiter-Spannungen $> 110 \%$ oder $< 90 \%$ der Betriebsspannung, auf die der Spannungsregler des Netztransformators der Elektrolyseanlage regelt.

ANMERKUNG 2 Dies ist eine Definition des Fehlerbeginns, keine technische Realisierungsvorgabe für die Aktivierung der dynamischen Blindstromeinspeisung.

- Als Kriterium für das Fehlerende wird das frühere der beiden folgenden Ereignisse festgelegt:
 - Wiedereintritt aller Leiter-Leiter-Spannungen in den Bereich von $< 110 \%$ und $> 90 \%$ der Betriebsspannung, auf die der Spannungsregler des Netztransformators der Elektrolyseanlage regelt;
 - 5 s nach dem Beginn des Fehlers.

ANMERKUNG 3 Dies ist eine Definition des Fehlerendes, keine technische Realisierungsvorgabe für die Deaktivierung der dynamischen Netzstützung.

ANMERKUNG 4 Führt eine sprunghafte Spannungsänderung zu einer Rückkehr aller Leiter-Leiter-Spannungen in den Bereich $> 110 \%$ oder $< 90 \%$ der Betriebsspannung, auf die der Spannungsregler des Netztransformators der Elektrolyseanlage regelt, sollte dies nicht als ein erneuter Fehlerbeginn gewertet werden.

ANMERKUNG 5 Nach Fehlerklärung sind die Spannungen zwar in der Regel weitgehend symmetrisch, sie können jedoch höher oder niedriger als vor dem Fehler sein. Insofern bedeutet die Fehlerklärung nicht notwendigerweise das Fehlerende für die Elektrolyseanlage oder die Elektrolyseeinheiten.

ANMERKUNG 6 Die Einspeisung eines zusätzlichen Blindstromes vor Ablauf der Anschlagzeit im Sinne der Spannungsstützung ist ausdrücklich gewünscht.

Die wirksame Statik k der Spannungsregelung an den Klemmen der Einheit beschreibt die Änderung des Mitsystem-Blindstromes bei Änderung der Mitsystem-Spannung an den Klemmen der Einheit ggü. dem Sollwert:

$$\Delta I_{B1} = \Delta u_1 \cdot k$$

Die Statik muss mindestens im Bereich zwischen 2 und 6 einstellbar sein. Sofern der Netzbetreiber nichts anderes vorgibt, ist der Wert von 4 einzustellen.

Für die Regelung im Gegensystem gilt die gleiche Statik wie im Mitsystem, die Regelung erfolgt unter Berücksichtigung eines Totbandes. Dieses Totband muss mindestens im Bereich von 0 % bis 5 % U_{NS} in Schritten von mindestens 0,5 % U_{NS} einstellbar sein. Sofern der Netzbetreiber keinen anderen Wert vorgibt, ist das Totband auf 3 % einzustellen.

- Für die Mit- und die Gegensystemkomponente des Blindstromes gelten dieselben Anforderungen an die An- und Einschwingzeiten. Die Ermittlung des Arbeitspunktes auf der Kennlinie in Abbildung 6 ist kontinuierlich bis zum Fehlerende fortzuführen. Damit reagiert die Elektrolyseeinheit auf alle fehlerbedingten Spannungsänderungen, z. B. auch auf Fehlerwechsel. Bei allen fehlerbedingten Spannungsänderungen gelten die oben genannten An- und Einschwingzeiten.
- Die Ermittlung der fehlerbedingten Spannungsänderung und die daraus folgende Bereitstellung des zusätzlichen Blindstromes ΔI_B erfolgt in der Regel an den Klemmen der Elektrolyseeinheit.
- Der Netzbetreiber gibt am Netzanschlusspunkt den k -Faktor k_{soll} vor. Der an jeder einzelnen Elektrolyseeinheit einzustellende k -Faktor k_i ist zu ermitteln:
 - Es werden nur die wesentlichen Impedanzen betrachtet. Dies sind die Kurzschlussimpedanzen der Netz- und Einheitentransformatoren, beide werden als reine Reaktanzen angenommen.
 - Kabel- bzw. Leitungsimpedanzen werden bei kleinen Mittelspannungsnetzen vernachlässigt, bei einem ausgedehnten Mittelspannungsnetz können diese pauschal mit einem Zuschlagfaktor c_K berücksichtigt werden. In diesem Fall wird $c_K = 1,1$ empfohlen.
- Das Verhalten der Elektrolyseeinheiten ist dann derart zu wählen, dass sich am Netzanschlusspunkt das vom Netzbetreiber geforderte Verhalten ergibt. Sofern die Berechnungen zeigen, dass an der Elektrolyseeinheit ein höherer k -Faktor als 6 einzustellen wäre, ist es ausreichend, einen k -Faktor von 6 an den Elektrolyseeinheiten einzustellen, sofern diese eine Einstellung eines höheren k -Faktors nicht zulassen. Wenn vom Netzbetreiber keine Vorgaben gemacht werden, gilt $k = 5$ an der Elektrolyseeinheit.
- Nach Fehlerende erfolgt der Übergang in die statische Spannungshaltung. Die oben genannten An- und Einschwingzeiten bzgl. der Regelung des Blindstromes sind dabei nicht gefordert. Die Wirkstromwiederkehr hat bei Erreichen der Scheinstromgrenze Priorität.

Ein wiederholtes Aktivieren der dynamischen Netzstützung in Folge der Deaktivierung der dynamischen Netzstützung („Klappern“) ist konzeptionell zu vermeiden.

ANMERKUNG 7 Eine zeitlich (z. B. 1 s) oder über eine Hysterese (z. B. $\pm 2\% U_n$) verzögerte Abschaltung der dynamischen Blindstromstützung ist zulässig.

Geforderter zusätzlicher Blindstrom

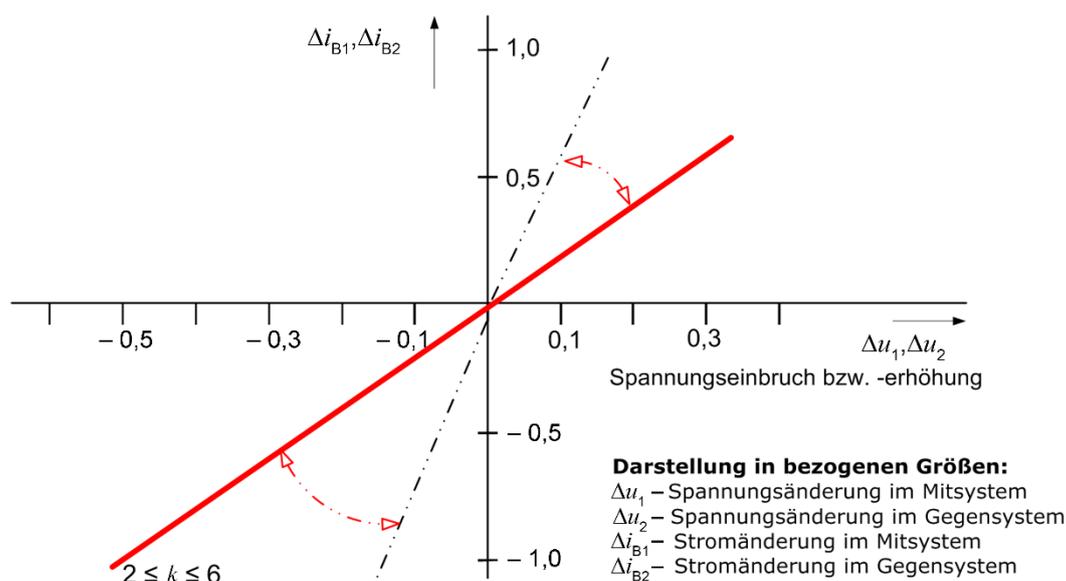


Abbildung 5: Prinzip der Spannungsstützung bei Netzfehlern

Die Realisierung der Blindstromeinspeisung darf direkt an den Klemmen der Elektrolyseeinheiten erfolgen. Bei der Ermittlung der relativen Spannungsänderung $\Delta u_{1,2}$ wird davon ausgegangen, dass $\Delta u_{1,2}$ an den Klemmen der Elektrolyseeinheit identisch ist mit der relativen Spannungsänderung am Netzanschlusspunkt.

ANMERKUNG 8 Abbildung 6 stellt Spannungsabweichungen und zusätzliche Ströme ausschließlich in symmetrischen Komponenten dar. Es kann nicht verwendet werden, um Grenzen der Leiter-Leiter-Spannungen oder der Leiterströme abzuleiten.

Kontinuierliche dynamische Netzstützung

Das Ziel der kontinuierlichen dynamischen Netzstützung ist, einer kurzzeitigen Änderung der Amplitude der Mit- und Gegensystem-Grundschwingung durch Einspeisung eines den Netzverhältnissen angepassten Stromes entgegenzuwirken und somit permanent zur Begrenzung der Spannungsänderung beizutragen.

ANMERKUNG 9 Die kontinuierliche dynamische Netzstützung für schnelle Spannungsänderungen und die Blindleistungsregelung für langsame Spannungsänderungen müssen permanent und gleichzeitig aktiv sein.

Als Bezugspunkt für die Spannungsregelung und die dazu notwendige Einspeisung eines Blindstromes gelten die Klemmen der Elektrolyseeinheiten.

Die Spannungsregelung ist so auszulegen, dass die Anforderungen auch im Verbund mit mehreren Einheiten parallel an einem Netzanschlusspunkt erfüllt werden können. Dies ist durch ein adäquates Design für eine stabile Spannungsregelung zu gewährleisten. Dabei ist insbesondere zu beachten, dass die Sollwerte in jedem Betriebszustand so zu begrenzen sind, dass sie nicht zu Schutzauslösungen führen können.

ANMERKUNG 10 Die Regelung der Spannung an der Einheitenklemmen soll auch im Kleinsignalbereich wirken und erfolgt daher mit einer Proportionalregelung ohne Totband. Die Eingangsgröße für die Regelung kann z.B. ein Spannungs-, Blindleistungs- oder Blindstromsollwert sein.

Verfügt die Einheit über einen dedizierten Einheitentransformator, darf das gewünschte Verhalten durch eine Konstanzspannungsregelung auf der Unterspannungsseite des Einheitentransformators realisiert werden. In diesem Fall besteht keine Anforderungen an die Höhe der Statik.

ANMERKUNG 11 Bei einer Konstanzspannungsregelung ergibt sich die Statik an den Einheitenklemmen aus der physischen Impedanz des Einheitentransformators.

Ebenfalls zulässig sind Verfahren, bei denen sich die Elektrolyseeinheit wie eine Spannungsquelle hinter einer virtuellen, einstellbaren Impedanz verhält. Falls ein Einheitentransformator vorhanden ist, ist dieser Teil der virtuellen Impedanz.

Bei einer Änderung des Sollwertes für die kontinuierliche dynamischen Netzstützung der Einheit darf die Anschlagzeit innerhalb des vom Netzbetreiber angegebenen Kurzschlussleistungsbereiches maximal 1 s betragen.

2.10. Blindleistung

Jede Elektrolyseanlage muss in der Lage sein, bei maximalem Wirkleistungsbezug aller in Betrieb befindlichen Einheiten P_{inst} die Anforderungen bzgl. der technischen Fähigkeit zur Blindleistungsabgabe bzw. -bezug am Netzanschlusspunkt ohne vorherige Anpassung des Wirkleistungsbezugs zu erfüllen.

Die Anforderungen bezüglich der technischen Fähigkeit zu Blindleistungsabgabe bzw. -bezug am Netzanschlusspunkt werden in Abbildung 7 dargestellt.

Neben den Anforderungen für die Blindleistungsbereitstellung im Betriebspunkt P_{inst} der Elektrolyseanlage ($P_{mom} = P_{inst}$) bestehen auch Anforderungen an den Betrieb mit einer momentanen Wirkleistung P_{mom} die kleiner als P_{inst} ist.

Der Netzbetreiber kann standortspezifisch festlegen, dass keine Anforderungen an die Blindleistungsbereitstellung erforderlich sind. In diesem Fall gelten die Anforderungen nach VDE-AR-N 4120/30 Kapitel 5.

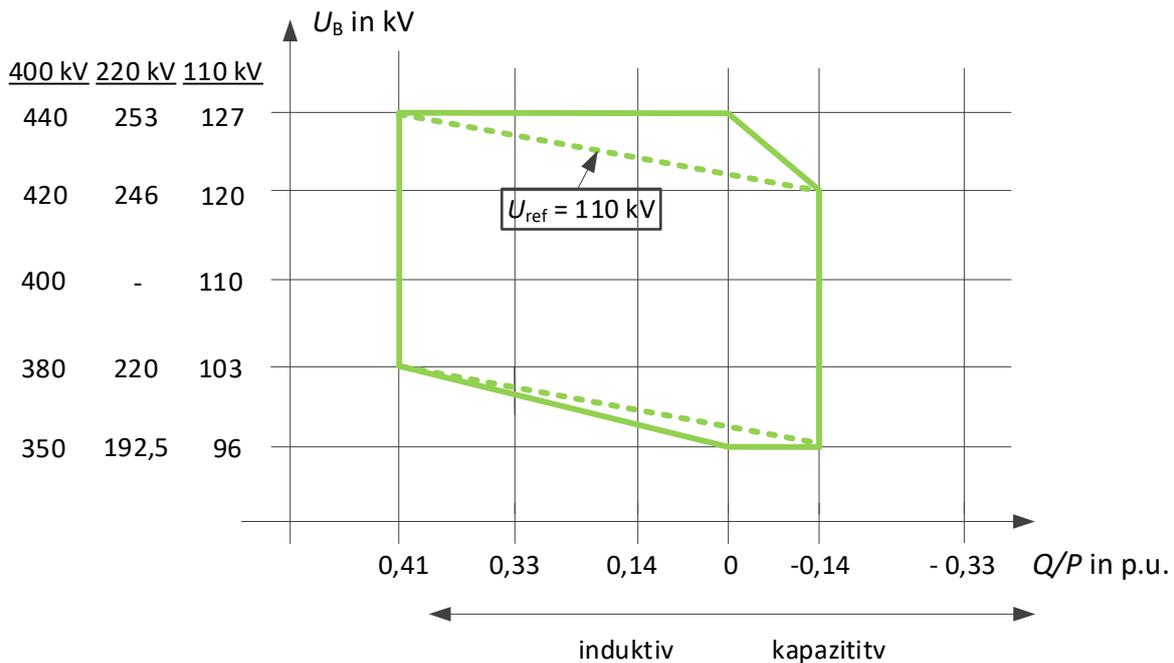


Abbildung 6 Anforderungen zu Blindleistungsabgabe bzw. -bezug am Netzanschlusspunkt

Abbildung 8 zeigt als PQ -Diagramm die Anforderung an die Blindleistungsbereitstellung von Elektrolyseanlagen im Teillastbetrieb ($0 \leq P_{mom}/P_{inst} < 1$) am Netzanschlusspunkt.

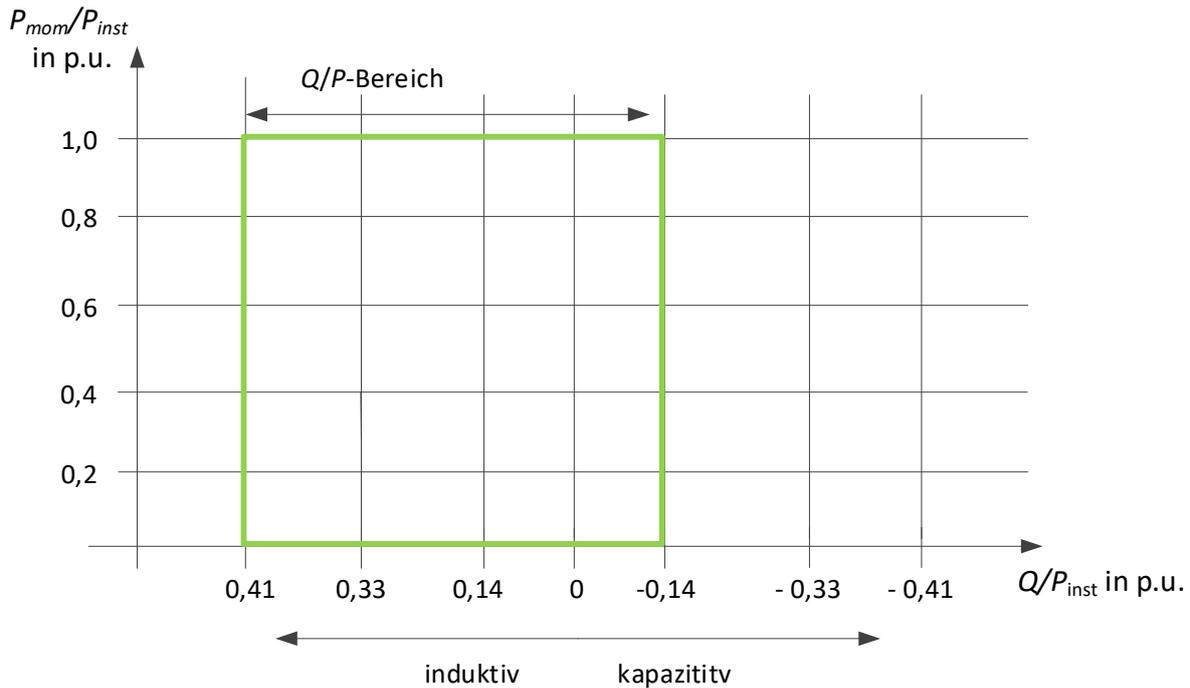


Abbildung 7 Anforderung an die Blindleistungsbereitstellung von Elektrolyseanlagen im Teillastbetrieb

ANMERKUNG 1 Es besteht keine Anforderung an die Blindleistungsbereitstellung für den Leistungsbereich zwischen STATCOM-Betrieb ($P=0$) und Betrieb bei technischer Mindestleistung.

ANMERKUNG 2 Die Blindleistungsregelung gemäß Kapitel 2.10 (langsame Blindleistungsregelung) bestimmt den Blindleistungsbetriebspunkt. Parallel dazu muss die dynamische Netzstützung gemäß nach Kapitel 2.9 aktiv sein (schnelle Spannungsregelung).

Die Sollwerte für die Blindleistungsregelung müssen sich auf den NAP beziehen.

Der Netzbetreiber gibt dem Anschlussnehmer im Rahmen der Planung des Netzanschlusses eines der folgenden Verfahren zur Blindleistungsbereitstellung am Netzanschlusspunkt vor:

- Blindleistungs-Spannungskennlinie $Q(U)$;
- Blindleistung mit Spannungsbegrenzungsfunktion;

Eine fernwirktechnische und/oder manuelle Umschaltung zwischen den Regelverfahren a) und b) und muss ermöglicht werden.

Zudem gibt der Netzbetreiber im Rahmen der Planung des Netzanschlusses genau eine der folgenden Varianten der Sollwertvorgabe vor:

- fester Sollwert,
- variabel einstellbarer Sollwert per Fernwirkanlage (oder anderer Steuertechniken).

a) Blindleistungs-Spannungskennlinie $Q(U)$

Ziel dieses Verfahrens ist es, dass die Elektrolyseanlage in Abhängigkeit von der aktuellen Betriebsspannung am Netzanschlusspunkt Blindleistung mit dem Netz austauscht ($Q = f(U)$).

Dabei gibt der Netzbetreiber die Kennlinie vor. Die bezogene Referenzspannung U_{Q0}/U_{ref} kann per Fernwirkanlage vorgegeben werden, alle weiteren Größen (Steigung, Totband) sind in der Elektrolyseanlage gemäß Vorgabe einzustellen. Der Blindleistungswert, den die Elektrolyseanlage am Netzanschlusspunkt austauschen muss, ergibt sich aus der tatsächlich am Netzanschlusspunkt gemessenen Spannung und den Parametern der Kennlinie (inklusive ihres Totbandes). Wenn seitens des Netzbetreibers

ein anderer Blindleistungsaustausch gewünscht ist, so wird dafür die bezogene Referenzspannung U_{Q0}/U_{ref} verändert.

Die am Netzanschlusspunkt gemessene Spannung darf geeignet gemittelt oder gefiltert werden. Die Spannungsmessung darf einen Messfehler von maximal 0,25 % bezogen auf den Nennwert nicht überschreiten.

Die maximal zulässige Anschlagzeit für das Erreichen des Blindleistungswerts muss von der Elektrolyseanlage zwischen 1 s und 5 s eingestellt werden können. Wird vom Netzbetreiber hierzu kein konkreter Wert vorgegeben, gilt ein Wert von 5 s. Die maximal zulässige Einschwingzeit für das Erreichen des Blindleistungswerts wird vom Netzbetreiber im Bereich zwischen 5 s und 60 s vorgegeben, wobei die Toleranz für die Blindleistungsabgabe im stationären Zustand höchstens 5 % der maximalen Blindleistungsabgabe beträgt.

Diese Zeitangaben gelten für die vom Netzbetreiber angegebene Kurzschlussleistung am Netzanschlusspunkt S_{kv} unter der Annahme, dass andere Spannungsregler benachbarte Anlagen außer Betrieb sind. Die Signallaufzeit vom Netzanschlusspunkt zu den Elektrolyseeinheiten ist in diesen Zeiten genauso enthalten wie die Erfassung der Netzspannung bzw. der Wirk- und Blindleistung.

b) Blindleistung mit Spannungsbegrenzungsfunktion

Ziel ist es, dass die Elektrolyseanlage nach Abbildung 7 weitestgehend unabhängig vom Wirkleistungsbezug vom Netzbetreiber vorgegebene Blindleistung in das Netz einspeist ($Q = \text{const}$).

Um konträre Auswirkungen zwischen Blindleistungsvorgaben des Netzbetreibers einerseits und Einhaltung von Spannungsgrenzen andererseits zu vermeiden, muss in definierten Bereichen der Spannung eine spannungsabhängige Blindleistungsbereitstellung erfolgen.

Das Verfahren wird damit in Form einer Kennlinie abgebildet. Die Kennlinie wird durch Vorgabe folgender 4 Wertepaare definiert (siehe Bild 9):

$$P1 (U_{P1}/U_{ref}; Q_{P1}/P_{inst})$$

$$P2 (U_{P2}/U_{ref}; Q_{ref}/P_{inst})$$

$$\rightarrow \text{Steigung des Kennlinienabschnittes } m_A = (Q_{P1}/P_{inst} - Q_{ref}/P_{inst}) / (U_{P1}/U_{ref} - U_{P2}/U_{ref})$$

$$P3 (U_{P3}/U_{ref}; Q_{ref}/P_{inst})$$

$$P4 (U_{P4}/U_{ref}; Q_{P4}/P_{inst})$$

$$\rightarrow \text{Steigung des Kennlinienabschnittes } m_B = (Q_{ref}/P_{inst} - Q_{P4}/P_{inst}) / (U_{P3}/U_{ref} - U_{P4}/U_{ref})$$

Aus Stabilitätsgründen sind Steigungen größer als $m = 24$ unzulässig.

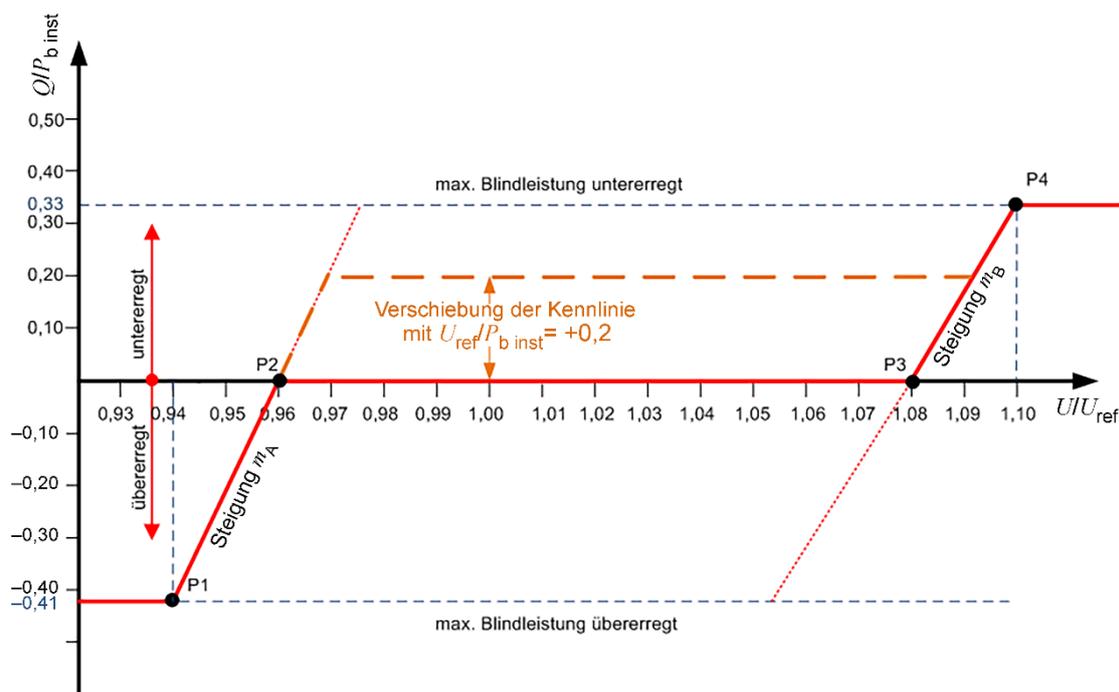


Abbildung 8: Beispiel für eine Q-Vorgabe

Der Blindleistungswert, den die Elektrolyseanlage am Netzanschlusspunkt austauschen muss, ergibt sich aus der tatsächlich am Netzanschlusspunkt auf Höchstspannungsebene gemessenen Spannung und den Parametern der Kennlinie.

Durch fernwirktechnische Vorgabe des Blindleistungswertes Q_{ref}/P_{inst} in Schritten von 1 % P_{inst} kann der Bereich der Kennlinie zwischen P2 und P3 unter Berücksichtigung der Steigungen m_A und m_B vertikal verschoben werden.

Nach einer Anpassung von Q_{ref}/P_{inst} ist der resultierende Sollwert entsprechend der Regelvorgabe innerhalb von maximal 4 min anzufahren.

Die am Netzanschlusspunkt gemessene Spannung darf geeignet gemittelt oder gefiltert werden. Die Spannungsmessung darf einen Messfehler von maximal 1 % bezogen auf den Nennwert nicht überschreiten.

Die Kennliniendefinition und ob eine fernwirktechnische Vorgabe des Blindleistungswertes erfolgt, wird durch den Netzbetreiber im Rahmen der Planung vorgegeben. Diese Werte sind auf Anforderung des Netzbetreibers bei netztechnischer Notwendigkeit in Abstimmung mit dem Anlagenbetreiber anzupassen.

Falls vom Netzbetreiber nichts anderes vorgegeben wird, gelten folgende Wertepaare:

P1 ($U_1/U_n = 0,94$; $Q_A/P_{inst} = -0,33$)

P2 (0,96; 0)

P3 (1,04; 0)

P4 ($U/U_n = 1,06$; $Q/P_{inst} = +0,33$)

Die Einschwingzeit darf maximal Anschlagzeit plus 1 min betragen.

2.11. Interaktionen

Zusätzlich zu den Regelungen der VDE-AR-N 4120/4130, Kapitel 5.6 gelten die nachfolgenden Regelungen hinsichtlich Interaktionen der Elektrolyseanlage mit anderen Elektrolyseanlagen, dem Netz sowie anderen Anlagen und Betriebsmittel. Diese Interaktionen umfassen die folgenden Frequenzbereiche

- Netzfrequenzschwingungen bzw. - Pendelungen im Bereich 0,1 Hz bis 2,0 Hz,
- Torsionsinteraktionen (SSTI) im Bereich 4 Hz bis 45 Hz im elektrisch ortsfesten Koordinatensystem,

- Interaktionen im harmonischen Frequenzbereich oberhalb von 50 Hz.

Die Elektrolyseanlage hat als Grundanforderung keine nachteiligen Interaktionen mit anderen Elektrolyseanlagen, dem Netz sowie mit anderen Anlagen und Betriebsmitteln aufzuweisen.

Sollte der Kunde im Betrieb eine unerwünschte Interaktion feststellen, ist der Netzbetreiber hierüber in Kenntnis zu setzen. Dieser leitet einen Austauschprozess der betroffenen Parteien ein, mit dem Ziel gemeinsam Gegenmaßnahmen zu entwickeln. Diese können zum Beispiel eine Reparametrierung bestimmter Regelungsfunktionen auf Elektrolyseeinheiten bzw. auf Anlagenebene erfordern.

3 Priorisierung

Während des Betriebs der Kundenanlage können Netzsituationen eintreten, in denen die Anforderungen dieses Dokuments nicht gleichzeitig widerspruchsfrei erfüllt werden können.

Es gilt die Priorisierung nach VDE-AR-N 4120/4130 Abschnitt 8.1 mit folgenden Verweisen des vorliegenden Dokuments:

- Vermeidung bzw. Begrenzung etwaiger Schäden an Anlagen und Betriebsmitteln, für die die jeweilige Schutzeinrichtung nach VDE-AR-N 4120/4130 6.3.3 und VDE-AR-N 4120/4130 10.3 den Hauptschutz darstellt;
- Einhaltung der Festlegungen bzgl. Systemautomatiken (EPC-Funktionen) nach Kapitel 2.7;
- Einhaltung der Anforderungen an die dynamische Netzstützung nach Kapitel 2.9;
- Einhaltung der Anforderungen an das Verhalten bei Über- und Unterfrequenzen nach Kapitel 2.5;
- Vorgaben durch das Netzsicherheitsmanagement des Netzbetreibers nach Kapitel 2.7;
- max. Wirkleistungsgradienten nach Kapitel 2.8;
- Einhaltung der Anforderungen an die Blindleistungsfahrweise zur statischen Spannungshaltung nach Kapitel 2.10;
- betriebliche Sollwertvorgaben für Wirk- und Blindleistung.

4 Modellanforderungen

4.1. Allgemeines

Der Netzbetreiber ist berechtigt, Daten der Elektrolyseanlage für stationäre Netzberechnungen und Modelle für dynamische Simulationen vom Anlagenbetreiber zu verlangen. Es können sowohl detaillierte Modelle für Konformitätssimulationen und lokale Netzstudien des Netzbetreibers (sog. „detailliertes Simulationsmodell“), als auch vereinfachte Modelle z. B. für Systemstudien, bei denen ggf. Elektrolyseeinheiten zu einer Elektrolyseanlage aggregiert sind (sog. „aggregiertes Simulationsmodell“), verlangt werden. In beiden Fällen ist das Verhalten der gesamten Elektrolyseanlage am Netzanschlusspunkt nachzubilden. Details muss der Netzbetreiber mit dem Anlagenbetreiber im Rahmen des Netzanschlussprozesses gemeinsam vereinbaren.

- Es muss sichergestellt sein, dass Modelle über die gesamte Lebensdauer der für die vereinbarten Simulationsumgebungen, einschließlich neuerer Softwareversionen sowie bei relevanten Änderungen des Anlagenverhaltens am NAP, verfügbar sind. Es sind alle relevanten Schutzfunktionen und Systemautomatiken zu implementieren, die für die typischen Stabilitätsbetrachtungen relevant sind. Die Schutzfunktionen und Systemautomatiken können auch vereinfacht modelliert werden.

Tabelle 1: Modellanforderungen zur simulativen Abbildung der in diesem Dokument geforderten Fähigkeiten der Elektrolyseanlage.

Fähigkeit des Modells zur Abbildung der Anforderungen nach	Detailliertes Modell		Aggregiertes Modell	
	EMT-Modell	RMS-Modell	Harmonisches Modell	RMS-Modell
2.1 Netzmerkmale	✓	✓	–	✓
2.2 Robustheit gegenüber Frequenzgradienten	✓	✓	–	✓
2.3 Robustheit gegenüber temporären Spannungsänderungen	✓	✓	–	✓
2.4 Wiederkehr der Wirkleistung nach einem Fehler	✓	✓	–	✓
2.5 Lastabwurf und Frequenzschutz	✓	✓	–	✓
2.6 Zuschaltung nach Auslösung durch Schutzeinrichtung	✓	✓	–	✓
2.7 Netzsicherheitsmanagement (EPC)	✓	✓	–	✓
2.8 Regelgeschwindigkeit der Wirkleistungsanpassung	✓	✓	–	✓
2.9 Dynamische Netzstützung	✓	✓	–	✓
2.10. Blindleistung(sverhalten)	✓	✓	–	✓
2.11 Interaktionen	POD (0,1 Hz bis 2 Hz)	✓	–	✓
	SSTI (4 Hz bis 45 Hz)	✓	–	–

	Harmonische (bis 2,5 kHz)	✓	–	–	–
	Höherfrequente (ab 2,5 kHz)	✓	–	–	–
	VDE-AR-N 4130/4120 Kapitel 5.3 Spannung und Frequenz am Netzanschlusspunkt	✓	✓	–	✓
	VDE-AR-N 4130/4120 Kapitel 5.4 Netzurückwirkungen	✓	–	✓	–
	VDE-AR-N 4130/4120 Kapitel 5.5 Blindleistungsverhalten	✓	✓	–	✓

4.2. Detaillierte Simulationsmodelle

Die Voraussetzung für eine hinreichend genaue Bewertung der elektrischen Eigenschaften ist ein detailliertes Simulationsmodell inklusive sämtlicher Komponenten, die einen nennenswerten Einfluss auf das Verhalten des Gesamtsystems haben. Das detaillierte Simulationsmodell muss dabei die erforderliche Genauigkeit aufweisen, so dass ein Nachweis der geforderten Eigenschaften anhand dieses Simulationsmodells am Netzanschlusspunkt möglich ist.

Ein detailliertes Simulationsmodell muss Wirk- und Blindströme sowie Wirk- und Blindleistungen in symmetrischen Komponenten (Mit-, Gegen- und Nullsystem) im Zeitbereich berechnen und ausgeben können. Das Modell muss geeignet sein, das Verhalten der Elektrolyseanlage ausgehend von einem beliebigen Arbeitspunkt im quasistationären Betrieb abzubilden.

In der Modelldokumentation sind notwendige variable Einstellgrößen des Modells (z. B. FRT-Schwellen, Schutzeinstellungen usw.) zusammen mit den zulässigen Einstellbereichen aufzuführen. Für diese Einstellgrößen des Modells sind zudem die zugehörigen Einstellgrößen in Steuerungs- und Schutzsystemen der Bezugsanlage zu dokumentieren.

- Das detaillierte Simulationsmodell kann als herstellerspezifisches Simulationsmodell („Herstellerspezifisches Simulationsmodell“), das ggf. verschlüsselt (sog. „Black Box Modell“) bereitgestellt werden kann.
- Das detaillierte Simulationsmodell kann alternativ vollständig in Form von Blockschaltbildern und Parametereinstellungen für eine Modellierung der Elektrolyseanlage auf Basis generischer Bibliothekselemente der Simulationsprogramme („generisches Simulationsmodell“) bereitgestellt werden.
- Die definierten Schnittstellen zwischen DLL und Simulationssoftware (z. B. PSCAD, PowerFactory) müssen in Form eines offenen Wrappers abgebildet werden. Die Schnittstellen (Funktionen und Übergabeparameter) der DLL-Dateien sind in einem Header definiert und unmissverständlich dokumentiert.
- Eine Mehrfachinstanziierung der Modelle und Bibliotheken muss möglich sein.
ANMERKUNG 1 Die Instanzen der Bibliotheken dürfen sich keine Arbeitsspeicheradressen teilen.
- Die definierten Schnittstellen zwischen DLL und Simulationssoftware sollten grundsätzlich mit Hardware-In-the-Loop-(HIL)-Anwendungen kompatibel sein.

4.3. Aggregierte Simulationsmodelle

Das aggregierte Simulationsmodell muss als ein generisches Simulationsmodell bereitgestellt werden (z. B. keine DLL).

In diesem generischen Simulationsmodell sind alle Netztransformatoren und Maschinentransformatoren bei Elektrolyseanlagen als einzelne Elemente abzubilden und alle Elektrolyseeinheiten ähnlichen Typs zu einer Elektrolyseanlage zu aggregieren.

Für diese generischen Simulationsmodelle ist die jeweils am besten geeignete Modellstruktur auf Basis generischer Elemente auszuwählen. Die Modellstruktur muss vollständig dokumentiert werden, z. B. in Form von Blockschaltbildern. Parametereinstellungen für generische Simulationsmodelle müssen entsprechend dem realen Verhalten der Elektrolyseanlage gewählt werden und den Modellelementen eindeutig zugeordnet werden können. Parametereinstellungen müssen frei zugänglich und einstellbar sein.

Eine Weitergabe der generischen Simulationsmodelle im Rahmen von Netzbetreiber-übergreifenden Netzstudien ist zu gestatten.

Details werden vom Netzbetreiber projektspezifisch vorgegeben.

4.4. RMS-Modelle

Im Folgenden werden die Anforderungen an dynamische Effektivwert-Simulationen (sog. RMS-Simulationsmodelle) von Elektrolyseanlagen beschrieben:

RMS-Simulationsmodelle müssen die folgenden Eigenschaften besitzen:

1. Die vollständige und korrekte Initialisierung des Modells ist abhängig vom Betriebsmodus und erfolgt über die eingebaute interne Initialisierungsfunktion und nicht durch Anwendung eines externen Skriptes.
2. Die zeitliche Auflösung des Modells der Elektrolyseanlage liegt im Millisekundenbereich. Die Zeitschritte sind bis max. 10 ms einstellbar, niedrigere Auflösungen sind unzulässig.
3. Das Simulationsmodell bildet das Verhalten der Elektrolyseanlage im Mit-, Gegen- und Nullsystem ab.
4. Das Simulationsmodell ist geeignet, um System- und Stabilitätsstudien durchzuführen (sog. „aggregiertes Simulationsmodell“). Diese Eigenschaft impliziert die Forderung nach kurzen Rechenzeiten, eine Abstraktion des Simulationsmodells und die Fähigkeit für automatisierte Rechenabläufe (keine Initialisierung über externe Skripte, vgl. Punkt 1).
5. Die automatische Initialisierung des Modells ist für alle zulässigen Betriebspunkte und Betriebsarten anwendbar. Die Initialisierung erfolgt ohne ein Einschwingen des Simulationsmodells in alle Betriebspunkte. Ein Einschwingen bei Start des Simulationsmodells ist unzulässig.
6. Alle einstellbaren Parameter, wie z. B. Arbeitspunkte, Regelungskennlinien, Schutz, Rampen etc. müssen leicht zugänglich und in der Simulationsumgebung einstellbar/veränderbar sein. Ein maschinenlesbarer Parametersatz muss mitgeliefert werden.
7. Für RMS-Simulationen wird das Simulationsmodell in einem toolunabhängigen Format zur Verfügung gestellt.

RMS-Simulationsmodelle müssen den folgenden Funktionsumfang besitzen:

1. Elektrische Nachbildung aller erforderlichen Komponenten zur adäquaten Beschreibung des Systemverhaltens im RMS-Bereich.
2. Vollständige Abbildung der relevanten Regelungsfunktionen und Regelungsmodi. Sofern Regelungsfunktionen nicht oder nur vereinfacht wiedergegeben werden, sind diese geeignet zu dokumentieren.
3. Abbildung der Modelle für Drehstromkomponenten, u. a. Netzäquivalente, HS/MS-Transformator, Schalter, Einschaltwiderstände, ggf. Filter.
4. Berücksichtigung der Transformatoren zur Eigenbedarfsversorgung mit Erfassung der Netzspannung.
5. Abbildung der relevanten Schutzsysteme, z. B. Über-/ Unterspannung, Frequenzschutz, die im RMS-Bereich Auswirkungen zeigen. Das Schutzverhalten von nicht detailliert berücksichtigten Schutzsystemen muss korrekt wiedergegeben werden, z. B. im Hinblick auf Verzögerungszeiten.
6. Abbildung der spannungsabhängigen Leistungsreduktion und Wirkleistungswiederkehr (Rampe) nach Eintritt eines Fehlers (technologieabhängige Dynamik).
7. Für jedes relevante Regelungssystem müssen Sollwerte vom Benutzer sprunghaft geändert werden können.

Das detaillierte und aggregierte RMS-Simulationsmodell der Elektrolyseanlage ist dem Netzbetreiber vom Anlagenbetreiber zur Verfügung zu stellen.

4.5. EMT-Modelle

Im Folgenden werden die Anforderungen an EMT-Simulationsmodelle von Elektrolyseanlagen beschrieben:

- Die Modellgültigkeit für Untersuchungen im Frequenzbereich 0 kHz bis 9 kHz ist zwingend erforderlich.
- Die Regelungsimplementierung im Modell verwendet den originalen Regelungscode (ggf. ohne Redundanzen und vereinfachte/beschleunigte Hoch- und Herunterfahrsequenzen) unter Berücksichtigung der Eigenschaften der realen Hardware.

- Der Aufbau der EMT-Modelle muss gewährleisten, dass die Modelle bei variabel einstellbarer Netzfrequenz ausführbar und in einem definierten Einstellbereich variabler Simulationsschrittweite gültig sind. Typische Schrittweiten liegen im Bereich 1 μ s bis 20 μ s. Der DLL-Aufruf erfolgt entsprechend dem realen Regelungszyklus und muss unabhängig von der Simulationsschrittweite der Simulationssoftware sein.
- Der Regelungscode darf verschlüsselt werden, während primärtechnische Betriebsmittel und Anlagenkomponenten nicht verschlüsselt sein dürfen.
- Die Dokumentation der Schnittstellen verschlüsselter Modelle muss bereitgestellt werden.

Das detaillierte EMT-Simulationsmodell der Elektrolyseanlage ist dem Netzbetreiber vom Anlagenbetreiber zur Verfügung zu stellen.

4.6. Harmonische Modelle

Im Folgenden werden die Anforderungen an Simulationsmodelle zur Analyse von stationäre Oberschwingungsuntersuchung von Elektrolyseanlagen beschrieben:

- Die Modellgültigkeit für Untersuchungen im Frequenzbereich 0 kHz bis 9 kHz ist zwingend erforderlich.
- Das Modell muss in einem maschinenlesbaren Format (z. B. einem Textdokument oder einer Exceltabelle) und einer Schrittweite der Frequenz von 1 Hz bereitgestellt werden.
- Das Modell muss das Mit- und Gegensystem abbilden können und als Thevenin-Äquivalent abgebildet werden.
- Die Spannungsquelle und die Impedanz des Thevenin-Äquivalents sollen frequenzabhängig ausgeführt werden.
- Folgende Betriebs- und Schaltzustände sind bei der Erstellung des Modells zu berücksichtigen:
 - Wirkleistungsarbeitspunkte: 0 % bis 100 % der Nennwirkleistung bei einer maximalen Schrittweite von 10 % der Nennwirkleistung
 - Blindleistungsarbeitspunkte: Q_{\min} bis Q_{\max} in Schritten von 10 % von maximal induktiver bis zu maximal kapazitiver Blindleistung
 - Betriebsspannungen: min. 90 %...110 % der Betriebsspannung oder darüber hinaus, sofern möglich
 - Schaltzustände: Schaltzustände nach Vorgabe des Netzbetreibers, die einen Einfluss auf die frequenzabhängige Impedanz haben
 - Betriebsarten: Sollten verschiedene Betriebsarten einen Einfluss auf das Modell haben, müssen separate Modelle erstellt werden
 - Regelungsmodi: Sollten verschiedene Regelungsmodi einen Einfluss auf das Modell haben, müssen für diese Regelungsmodi separate Modelle erstellt werden.

5 Nachweis (Ausblick)

Der Prozess für den Anschluss einer Elektrolyseanlage an das Hoch- und Höchstspannungsnetz ist in VDE-AR-N 4120/4130 Kapitel 4.2 beschrieben.

Die Nachweise für die Anforderungen im Kapitel 2 erfolgen auf vier Ebenen:

1. **Test der Einheit:** Tests mit repräsentativen Einheiten auf dem Prüfstand und Validierung von Simulationsmodellen der Elektrolyseeinheiten auf Basis von Messungen auf dem Prüfstand.
2. **Simulation der Anlage:** Simulation des Verhaltens der Elektrolyseanlage am Netzanschlusspunkt
3. **Test der Anlage:** Tests des Verhaltens der Elektrolyseanlage am Netzanschlusspunkt und Validierung von Simulationsmodellen der Elektrolyseanlage auf Basis dieser Messungen
4. **Herstellereklärung:** Für ausgewählte Anforderungen sind Herstellereklärung als Konformitätserklärung ausreichend.

Tabelle 2: Tabellarische Zuordnung der Anforderungen und dafür vorgesehene Nachweise.

Anforderung	1. Test der Einheit (Prüfstand/Feldtest)	2. Simulation Anlage	3. Test der Anlage (Inbetriebnahmetest)	4. Herstellereklärung
2.1 Kurzschlussleistungsbe- reich	–	✓	–	✓
2.2 Robustheit gegenüber Frequenzgradienten	–	✓	–	✓
2.3 Robustheit gegenüber temporären Spannungsän- derungen	✓	✓	–	✓
2.4 Wiederkehr der Wirkleis- tung nach einem Fehler	✓	–	–	–
2.5 Lastabwurf und Fre- quenzschutz	✓	✓	–	✓
2.6 Zuschaltung nach Auslö- sung durch Schutzeinrich- tung	–	–	–	✓
2.7 Netzsicherheitsmanage- ment (EPC)	✓	–	✓	✓
2.8 Regelgeschwindigkeit der Wirkleistungsanpassung	✓	–	✓	–
2.9 Dynamische Netzstüt- zung	✓	✓	–	–
2.10. Blindleistung(sverhal- ten)	✓	✓	✓	–
2.11 Interaktionen	–	✓	–	–
VDE-AR-4130 Kapitel 5.3 Spannung und Frequenz am Netzanschlusspunkt	–	✓	–	✓

VDE-AR-4130 Kapitel 5.4 Netzurückwirkungen	✓	✓	✓	–
VDE-AR-4130 Kapitel 5.5 Blindleistungsverhalten	–	✓	✓	–

Die Nachweise dürfen vollständig oder in Teilen auch auf Basis von Anlagen-, Einheiten- und Komponentenzertifikaten durch eine akkreditierten Zertifizierungsstelle erfolgen.