

Technische Anforderungen für den Anschluss von Rechenzentren

Technical requirements for the connection of data centers

Inhalt

1	EINLEITUNG	3
1.1.	Anwendungsbereich	3
1.2.	Bedarf für zusätzliche Anforderungen an Rechenzentren	3
1.3.	Referenzen	4
2	TECHNISCHE ANFORDERUNGEN AN RECHENZENTREN	5
2.1.	Kurzschlussleistungsbereich	5
2.2.	Robustheit gegenüber Frequenzgradienten	5
2.3.	Robustheit gegenüber temporären Spannungsänderungen (FRT)	6
2.4.	Wiederkehr der Wirkleistungsaufnahme nach einem Fehler	8
2.5.	Lastabwurf und Wirkleistungsanpassung bei Unterfrequenz	8
2.6.	Begrenzung von kurzzeitigen Leistungsänderungen	10
2.7.	Blindleistung	11
2.8.	Interaktionen	12
2.9.	Beobachtbarkeit von hochfrequenten Vorgängen	12
3	SIMULATIONSMODELLE	13
4	NACHWEISE UND STUDIEN	13

1 Einleitung

In diesem Dokument werden diejenigen Anforderungen an Rechenzentren 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 zum aktuellen Stand und der VDE-AR-N 4130 mit dem Stand von November 2018 zu verstehen. Die Kapitel 1 bis 9 der VDE AR-N 4120/4130, insbesondere Kapitel 5 (Netzanschluss) enthalten bereits Anforderungen an Bezugsanlagen, die auch für Rechenzentren gelten.

Das vorliegende Dokument gliedert sich in technische Anforderungen an Rechenzentren, 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, NETZRÜCKWIRKUNGEN, BLINDELEISTUNGSVERHALTEN SOWIE RESONANZEN UND REGLERINTERAKTIONEN.

1.1. Anwendungsbereich

Die Anwendung dieses Dokuments für den Anschluss von Rechenzentren obliegt dem betreffenden Netzbetreiber. Die Anforderungen gelten für die Gesamtheit des Rechenzentrums inklusive aller zur Aufrechterhaltung des Betriebs erforderlichen Nebenanlagen (z.B. Kühlung, Kompressoren, Erzeugungseinheiten, unterbrechungsfreie Stromversorgung).

Dieses Dokument legt die Systemanforderungen für die Planung, die Errichtung, den Betrieb und die Änderung von Rechenzentren fest, die am Netzanschlusspunkt an ein Hoch- oder Höchstspannungsnetz der allgemeinen Versorgung angeschlossen werden oder innerhalb einer Mischanlage oder einem geschlossenen Verteilungsnetz mit Anschluss an einem Hoch- oder Höchstspannungsnetz 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.

ANMERKUNG 2: FINDET DIESES DOKUMENT FÜR SPANNUNGSEBENEN KLEINER ALS 110 KV ANWENDUNG, SIND ÄQUIVALENTE SPANNUNGSGRENZEN DURCH DEN NETZBETREIBER VORZUGEBEN.

1.2. Bedarf für zusätzliche Anforderungen an Rechenzentren

Dieses Dokument beschreibt die zentralen systemrelevanten Anforderungen an Rechenzentren:

Bei Kurzschlussereignissen schalten Rechenzentren in den Inselbetrieb, um ihre laufenden Prozesse aufrechtzuerhalten. Ohne spezifische Anforderungen kehren sie erst nach einigen Minuten in den Netzparallelbetrieb zurück. Aus Sicht des Übertragungsnetzes entspricht dies einem dauerhaften Verlust von Bezugsleistung, wodurch sich eine erhebliche Reduzierung der lokalen Netzlast ergibt. Das resultierende Leistungsungleichgewicht gefährdet die Systemstabilität unter anderem durch Frequenzinstabilität, unzulässige Spannungsüberhöhungen, eine Verschärfung des Auseinanderlaufens der Spannungswinkel sowie eine Beeinträchtigung der (N-0)-Sicherheit.

- Um bei Störungen, wie z.B. Netzfehlern nicht vom Netz getrennt zu werden, müssen Rechenzentren **Robustheitsanforderungen** erfüllen. Dazu zählen insbesondere die Fähigkeit, temporäre Spannungsänderungen zu durchfahren (**Fault-Ride-Through, FRT**), sowie die Robustheit gegenüber ausgeprägten Frequenzgradienten (**Rate of Change of Frequency, RoCoF**).

- Nach einem Netzfehler müssen Rechenzentren eine **schnelle (rampenförmige) Leistungswiederkehr in den Netzparallelbetrieb** zeigen, sobald die Netzspannung die regulären Betriebsgrenzen erreicht hat.

Ohne entsprechende Vorgaben für das Betriebsverhalten kann der Bezug von Wirk- und Blindleistung von Rechenzentren sehr stark variieren.

- Daher muss eine **Begrenzung der Lastvolatilität im Kurzzeitbereich** erfolgen, um die Systemstabilität und den ungestörten Betrieb paralleler Anlagen sicherzustellen.
- Da der stark variierende Blindleistungsbezug die Spannung am Netzanschlusspunkt des Rechenzentrums maßgeblich beeinflusst, ist eine **Regelbarkeit der Blindleistung** erforderlich.

Die zunehmende Durchdringung des Übertragungsnetzes mit leistungselektronischen Betriebsmitteln erhöht das Risiko für **unerwünschte Interaktionen sowie die Anregung von Resonanzen**. Vor allem KI-Rechenzentren weisen periodische und ausgeprägte Leistungsänderungen auf ("load-induced forced oscillation"), die zu unerwünschten Rückwirkungen führen können.

- Es sind negative Rückwirkungen auf die folgenden Effekte zu begrenzen:
 - **überregionale (inter-area) und lokale Schwingungen** von Generatorgruppen,
 - **subsynchrone Interaktionen** mit benachbarten Kraftwerken und Umrichtern (SSTI, SSCI),
 - und **hochfrequente Interaktionen**.

Es sind belastbare Aussagen zum konformen Verhalten sowie zur sicheren lokalen und regionalen Integration von Rechenzentren anhand geeigneter Simulationmodelle (**RMS- und EMT-Modelle, harmonisches Modell**), **Nachweise** und **Studien** erforderlich.

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 Rechenzentren

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

Rechenzentren müssen als dreiphasige Drehstromanlagen ausgeführt werden. Das bedeutet, dass Rechenzentren 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} des Rechenzentrums 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, das Rechenzentrum vom Netz zu trennen, wenn die vorgegebenen netzverträglichen Grenzen im stationären Betrieb (nach VDE-AR-N 4120/4130), wie beispielsweise die vereinbarte Anschlussleistung S_{AV} überschritten werden.

2.1. Kurzschlussleistungsbereich

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

Das Rechenzentrum 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 das Rechenzentrum unter der vom Netzbetreiber vorgegebenen Mindestanforderung betrieben werden kann. Die Ergebnisse sind dem Netzbetreiber mitzuteilen.

2.2. Robustheit gegenüber Frequenzgradienten

Rechenzentren 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)

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

ANMERKUNG 3: 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.

Rechenzentren müssen eine FRT-Fähigkeit aufweisen. Dies bedeutet, dass Rechenzentren 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.
- Rechenzentren 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 Rechenzentren erforderlich ist, kann in begründeten Fällen die Folge der zu durchfahrenden 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 Rechenzentren in der Lage sein mindestens drei aufeinanderfolgende Unterspannungsereignissen innerhalb von 30 Minuten nacheinander zu durchfahren. Rechenzentren müssen in der Lage sein, eine beliebige Folge von 3-poligen Überspannungsereignisse nacheinander zu durchfahren.

ANMERKUNG 4: DIREKTE SCHUTZANFORDERUNGEN DURCH DEN NETZBETREIBER SIND HIERVON AUSGENOMMEN.

ANMERKUNG 5: 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. Rechenzentren dürfen sich bei einpoligen Fehlern (Erdkurzschluss) im Netz, die vom Netzschutz geklärt werden, konstruktionsbedingt nicht vom Netz trennen.

ANMERKUNG 6: DIE FRT-GRENZKURVEN BESCHREIBEN DIE GRUNDANFORDERUNGEN AN DAS VERBLEIBEN DES RECHENZENTRUMS AM NETZ. SIE SIND NICHT DAFÜR KONZIPERT, EINEN ÜBER- BZW. UNTERSpannungSSCHUTZ ZU PARAMETRIEREN.

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

Abweichend von den zuvor beschriebenen Grundanforderungen dürfen sich Rechenzentren 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 Netzennspannung) 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.

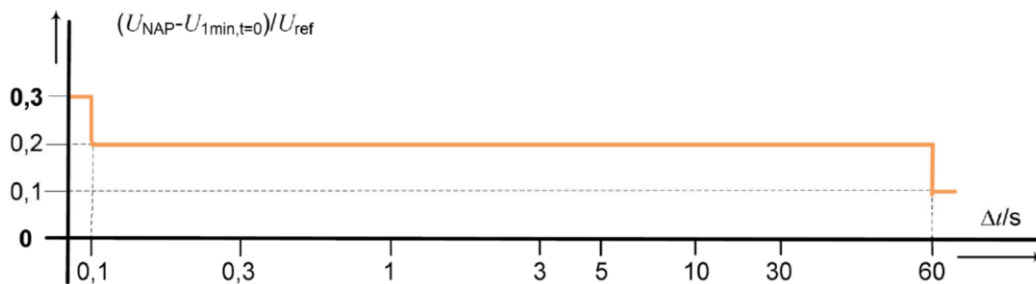


Abbildung 1: Grenzkurve für relative Spannungserhöhungen

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 des Rechenzentrums und nicht zu einer Trennung vom Netz kommen.

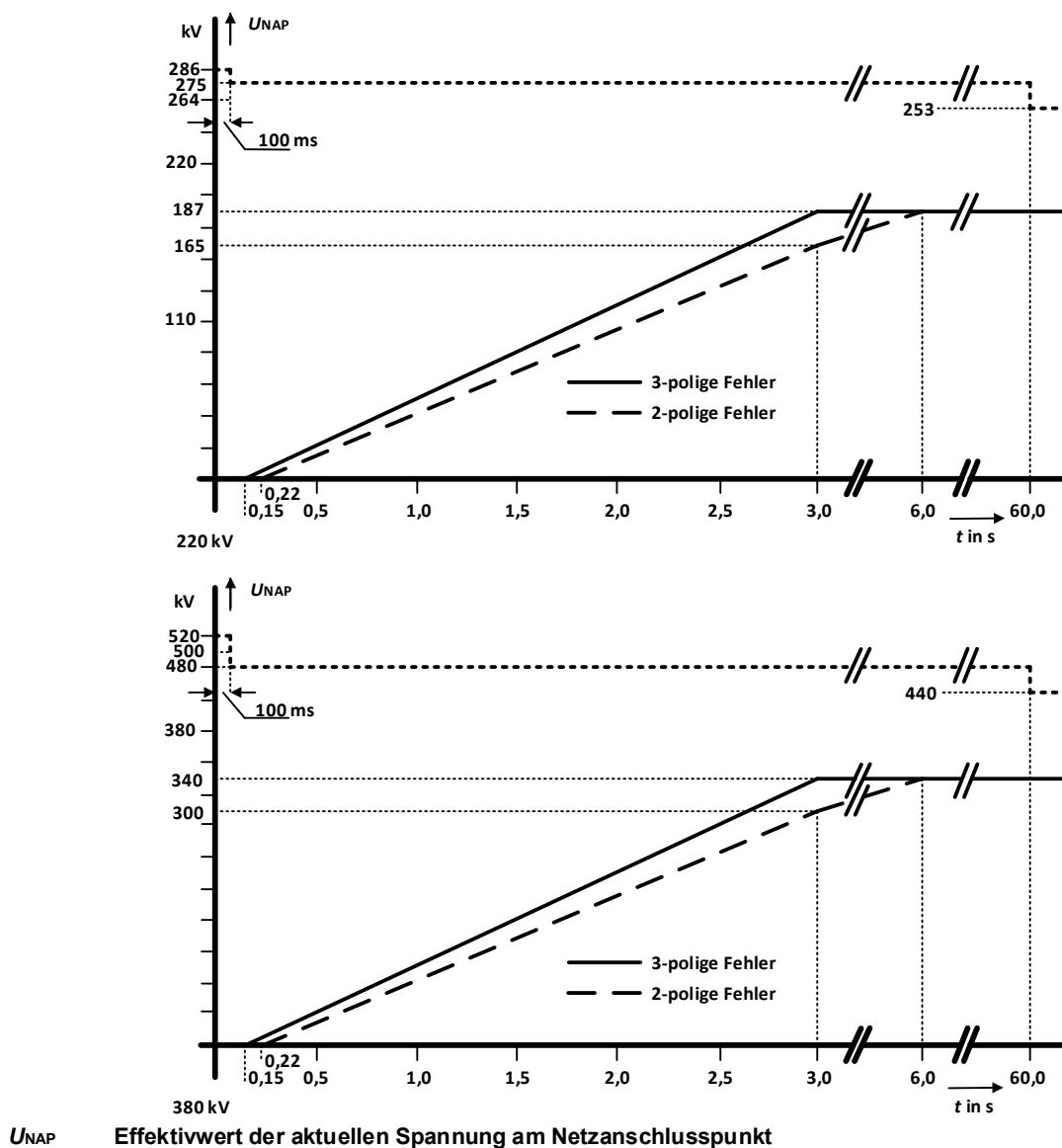


Abbildung 2 Fault-Ride-Through-Grenzkurve (FRT) für den Spannungsverlauf am Netzanschlusspunkt. U_{NAP} ist der Effektivwert der aktuellen Spannung am Netzanschlusspunkt.

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

ANMERKUNG 7: DIE „FAULT-RIDE-THROUGH“-KURVEN (FRT) SIND WIE FOLGT ZU INTERPRETIEREN: BEI $T = 0 \text{ s}$ TRITZT EIN FEHLER (KURZSCHLUSS) IM NETZ EIN. DIE SPANNUNG AM NETZANSCHLUSSPUNKT DES RECHENZENTRUMS BRICHT AUF EINEN WERT U_{NAP} EIN. NACH DER FEHLERKLÄRUNGSZEIT T_F IST DER FEHLER DURCH DIE SCHUTZEINRICHTUNGEN ABGESCHALTET, DIE SPANNUNG „SPRINT“ AUF EINEN HÖHEREN WERT. DIE GRENZKURVEN IN DEN ABBILDUNGEN STELLEN EINHÜLLENDE EINER MÖGLICHEN KURVEN SCHAR 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 VOM NETZFEHLER, DER NETZTOPOLOGIE UND ELEKTROMECHANISCHEN SCHWINGUNGEN BETROFFENER BEZUGSEINHEITEN AB, UND IST DAHER NICHT EXAKT VORHERSEHBAR.

Beim Durchfahren von Fehlern (temporäre Spannungsänderung) kann ein Blockieren des Umrichters kurzzeitig zulässig sein.

Überspannungsereignisse müssen ohne Blockieren des Umrichters durchfahren werden.

2.4. Wiederkehr der Wirkleistungsaufnahme nach einem Fehler

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

Die Anschwingzeit darf maximal 1 s betragen. Ein temporäres Überschwingen der Wirkleistung um 10 % des vereinbarten Anschlusswirkleistung P_{AV} ist zulässig.

2.5. Lastabwurf und Wirkleistungsanpassung bei Unterfrequenz

Rechenzentren müssen am Lastabwurfkonzept des Netzbetreibers teilnehmen.

Wenn eine Beteiligung an der Wirkleistungsanpassung bei Unterfrequenz (LFSM-UC) durch die Änderung des frequenzabhängigen Wirkleistungsbezugs möglich ist, kann eine Befreiung vom Lastabwurf mit dem zuständigen Übertragungsnetzbetreiber vereinbart werden.

2.5.1. Lastabwurf

Die Beteiligung am Lastabwurf ist in VDE-AR-4130 Kapitel 6.3.3.2 geregelt. Die Beteiligung von Rechenzentren am Lastabwurf erfolgt nicht durch die Trennung der Anlage am Netzanschlusspunkt, sondern innerhalb der Anlage auf Einheitenebene.

2.5.2. Wirkleistungsanpassung bei Unterfrequenz (LFSM-UC)

Bei Unterfrequenz steht ein Defizit an Erzeugungsleistung einem Überschuss an Bezugslast gegenüber. Wenn Rechenzentren in der Lage dazu sind, bei Unterfrequenz ihren Wirkleistungs-Arbeitspunkt anzupassen, gelten die folgenden Anforderungen:

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 ($s = (\Delta f / f_n) / (\Delta P / P_{\text{mom}})$) muss von 2 % bis 12 % einstellbar sein.

ANMERKUNG 8: DIES ENTSPRICHT EINEM LEISTUNGSGRADIENTEN VON 16,67 % VON P_{MOM}/Hz ($S = 12 \%$) BIS 100 % VON P_{MOM}/Hz ($S = 2 \%$).

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

Die Reduzierung des frequenzabhängigen Wirkleistungsbezugs bewirkt, dass sich das Rechenzentrum 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 Rechenzentren vom Netz trennen.

Die Reduktion der Wirkleistungsaufnahme muss mindestens bis zum Erreichen der technischen Mindestleistung einer Einheit des Rechenzentrums 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 $T_V + 0,1 (T_{\text{an},90\%} - T_V)$ sind mindestens 9 % der erforderlichen Leistungsanpassung ΔP erbracht.
- 90 % der Leistungsanpassung ΔP sind nach Ablauf der Anschwingzeit $T_{\text{an},90\%}$ erbracht.

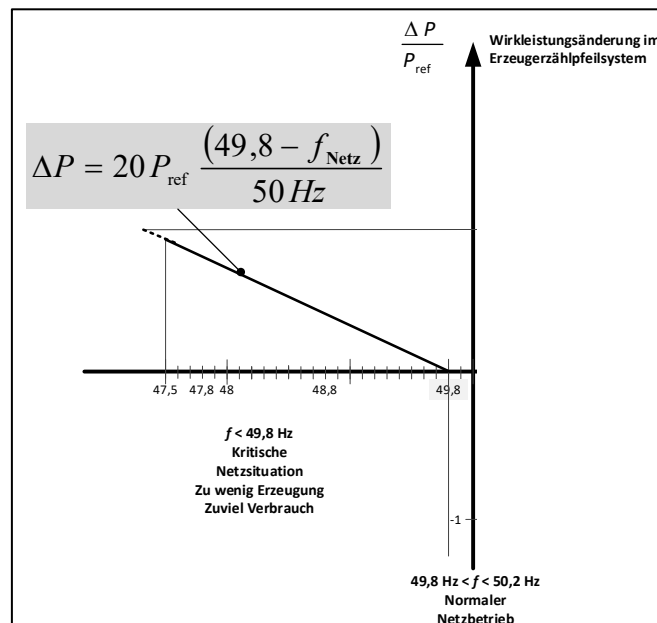


Abbildung 3: Wirkleistungsanpassung eines Rechenzentrums bei Unterfrequenz mit einer Statik von 5 % und Frequenzgrenzwerten von 49,8 Hz und 50,2 Hz für den Beginn der Wirkleistungsanpassung

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 des Rechenzentrums die Verzögerung unter Vorlage technischer Nachweise gegenüber dem Netzbetreiber begründen.

Bei der Regelung (Fahren auf der Kennlinie) gilt, dass das Rechenzentrum auf Änderungen der Netzfrequenz nach den folgenden aufgeführten Anschwing- und Einschwingzeiten bei 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 des Rechenzentrums 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 9: ES SIND DIE TECHNISCH SCHNELLSTMÖGLICHEN ANSCHWING- UND EINSCHWINGZEITEN ZU REALISIEREN.

2.6. Begrenzung von kurzzeitigen Leistungsänderungen

Es ist ein gleichmäßiger Verlauf der Leistungssteigerung bzw. -reduzierung während des Hoch- bzw. Abfahrens sowie im regulären Betrieb der Kundenanlage und damit ein möglichst lineares Verhalten zu realisieren. Der Anschlussnehmer muss die charakteristischen Muster der aggregierten Lastprofile aus der Perspektive des Netzverknüpfungspunktes ermitteln und dem Netzbetreiber bereitstellen.

ANMERKUNG 10: ES KÖNNEN BETRIEBLICHE VEREINBARUNGEN MIT DEM NETZBETREIBER ERFORDERLICH SEIN, IN DENEN SPEZIFISCHE RAMPENVORGABEN DEFINIERT UND EINGEHALTEN WERDEN MÜSSEN (Z.B. IN BEZUG AUF DAS VOLLSTÄNDIGE RUNTER- UND HOCHFahren VON RECHENAUFTRÄGEN SOWIE WIEDERKEHRENDE LEISTUNGSÄNDERUNGEN MIT PERIODENDAUER > 10S).

2.6.1. Begrenzung von transienten Leistungsänderungen

Der transiente Momentanleistungsbezug ist auf einen maximalen Wert von $1,1 \times P_{AV,B}$ zu begrenzen. Es dürfen keine plötzlichen transienten Änderungen des Leistungsbezugs von mehr als 50 MW je 10 s oder $\pm 10 \% \times P_{AV,B}$ je 10 s (kleinerer Wert) auftreten. Dies gilt auch für geplante und ungeplante stationäre Arbeitspunktänderungen. Die definierten Grenzwerte beziehen sich auf den gemessenen Momentanleistungsbezug am Netzanschlusspunkt des Rechenzentrums.

2.6.2. Begrenzung von periodischen Leistungsänderungen

Das Rechenzentrum darf am Netzanschlusspunkt keine erzwungene Schwingung der Leistungsaufnahme aufweisen, die folgende Grenzwerte überschreiten (Analogie zu Forced Oscillations):

- ± 10 MW oder $1 \% \times P_{AV,B}$ (kleinerer Wert) in einem Frequenzbereich von 0,1 Hz bis 2,0 Hz
- ± 5 MW oder $0,5 \% \times P_{AV,B}$ (kleinerer Wert) in einem Frequenzbereich von 2,0 Hz < f_0

Diese Frequenzbereiche sind bezogen auf die Nennnetzfrequenz ($f_0 = 50\text{Hz}$). Der relevante Netzbetreiber darf projektspezifische Frequenzbereiche definieren, in dem die oben genannten Grenzwerte weiter reduziert werden dürfen.

2.6.3. Runter- oder Hochfahren von Rechenaufträgen bzw. der Leistungsaufnahme

Für das Runter- bzw. Hochfahren von Rechenaufträgen bzw. der Leistungsaufnahme muss eine durch den Netzbetreiber vorgegebene Rampenvorgabe eingehalten werden.

2.7. Blindleistung

Jedes Rechenzentrum 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 4 dargestellt.

Der Netzbetreiber kann standortspezifisch festlegen, dass keine Anforderungen an die Blindleistungsbereitstellung erforderlich sind. In diesem Fall gelten die Anforderungen nach dem Kapitel 5 der VDE-AR-N 4130 bzw. der VDE-AR-N 4120.

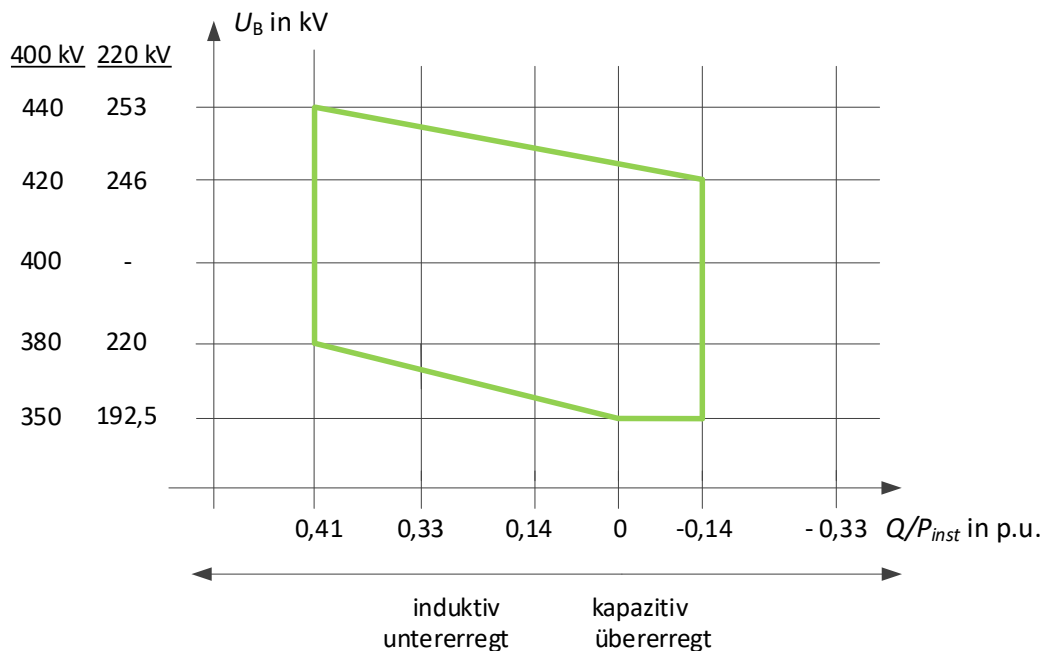


Abbildung 4 – Varianten der Anforderungen an Rechenzentren an die Blindleistungsbereitstellung am Netzanschlusspunkt für die 380-kV- und 220-kV-Ebene

Neben den Anforderungen für die Blindleistungsbereitstellung im Betriebspunkt P_{inst} des Rechenzentrums ($P_{mom} = P_{inst}$) bestehen auch Anforderungen an den Betrieb mit einer momentanen Wirkleistung P_{mom} die kleiner als P_{inst} ist. Abbildung 5 zeigt als PQ-Diagramm die Anforderung an die Blindleistungsbereitstellung von Rechenzentren im Teillastbetrieb ($0 \leq P_{mom}/P_{inst} < 1$) am Netzanschlusspunkt. Das darüberhinausgehende tatsächliche Vermögen am Netzanschlusspunkt ist dem Netzbetreiber anzugeben und kann durch diesen betrieblich abgerufen werden.

ANMERKUNG 12: DAS TATSÄCHLICH VERFÜGBARE BLINDLEISTUNGSVERMÖGEN KANN IM RAHMEN DER MARKTGESTÜTZTEN BESCHAFFUNG VON BLINDLEISTUNG (NF-SDL BLINDLEISTUNG) VERGÜTET WERDEN.

ANMERKUNG 13: DAS TATSÄCHLICH VERFÜGBARE VERMÖGEN KANN DURCH DIE FRT-FÄHIGKEIT EINGESCHRÄNKT SEIN.

Diese Blindleistungsbereitstellung muss per Fernsteuerbefehl auch aus dem Stillstand (Standby-Betrieb) der Kundenanlage anforderbar sein und darf nicht vom Leistungsbezug des Rechenzentrums abhängig sein.

ANMERKUNG 14: DER STANDBY-BETRIEB BEINHÄLTET KEINE BETRIEBSZUSTÄNDE IN DENEN DIE ANLAGE Z.B. FÜR WARTUNG UND INSTANDHALTUNG AUSSER BETRIEB GENOMMEN WIRD.

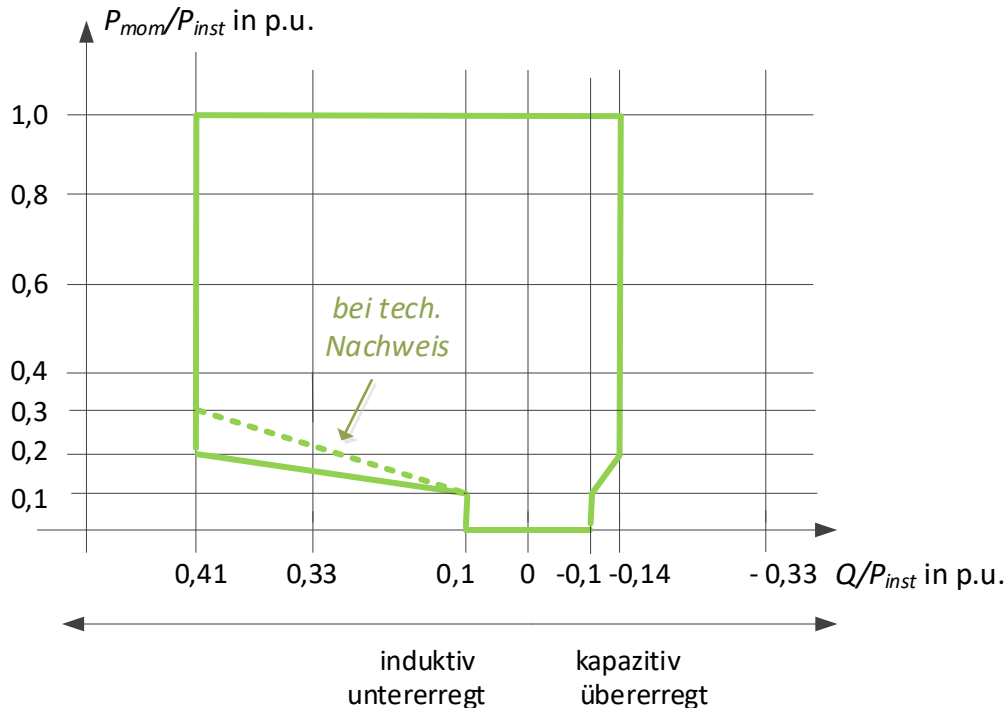


Abbildung 5 – Varianten der PQ-Diagramme der Rechenzentren am Netzanschlusspunkt im Verbrauchszählfeilsystem

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;

Zu den zuvor genannten Regelungsverfahren a. und b. gelten die in Kapitel 10.2.2.4 der VDE-AR-N 4130 (für die HöS) bzw. VDE-AR-N 4120 (für die HS) beschriebenen Anforderungen.

2.8. Interaktionen

Rechenzentren dürfen gemäß VDE-AR-N 4130 in Kapitel 5.6 keine Resonanzen und Reglerinteraktionen verursachen. Um dies zu gewährleisten, kann der relevante Netzbetreiber projektspezifisch eine detaillierte Interaktionsstudie durchführen, um unzulässige Netzurückwirkungen und Interaktionen auszuschließen. Zu diesem Zweck bestimmt der Netzbetreiber die erforderlichen Studien, definiert deren Umfang und informiert über die Festlegung. Der Anschlussnehmer hat darauf aufbauend eine Mitwirkungspflicht bei der Behebung unerwünschter Netzurückwirkungen und Interaktionen.

2.9. Beobachtbarkeit von hochfrequenten Vorgängen

Dem Netzbetreiber ist die Möglichkeit zu geben, eigene Messeinrichtungen in dem Rechenzentrum zu installieren (bspw. für hochgenaue, breitbandige Strommessungen). Es besteht aber auch die Möglichkeit, dass der Betreiber des Rechenzentrums die durch den Netzbetreiber projektspezifischen definierten Messdaten zur Verfügung stellt. Der Datenaustausch muss automatisiert und elektronisch erfolgen.

ANMERKUNG 15: DIESE MESSDATEN KÖNNEN ZUR BEWERTUNG DER KONFORMITÄT DER ANLAGE IM BETRIEB GENUTZT WERDEN.

3 Simulationsmodelle

Rechenzentren müssen die für Elektrolyseanlagen geforderten Modellanforderungen entsprechend der aktuellen Version der „Technische Anforderung für den Anschluss von Elektrolyseanlagen“ (Abschnitt 4) der deutschen Übertragungsnetzbetreiber erfüllen.

ANMERKUNG 16: WEITERE INFORMATIONEN SIND UNTER WWW.NETZTRANSPARENZ.DE/DE-DE/ÜBERUNS/STUDIEN-UND-POSITIONSPAPIERE/ANFORDERUNGEN-AN-ELEKTROLYSEANLAGEN ZU FINDEN.

Die bereitgestellten RMS-, EMT- und harmonischen Modelle müssen das netzseitige Verhalten des gesamten Rechenzentrums, einschließlich aller für den Nachweis erforderlichen Nebenanlagen, am Netzanschlusspunkt mit ausreichender Genauigkeit nachbilden.

Um das netzseitige Anlagenverhalten in den Nachweis- und Interaktionsstudien abbilden zu können, müssen die gemäß Kapitel 2.6 gelieferten charakteristischen Muster und aggregierten Lastprofile in enger Rücksprache mit dem Netzbetreiber in die Entwicklung der Simulationsmodelle (u.a. EMT, RMS) einfließen. Die Modelle müssen das charakteristische zeitliche Lastverhalten des Rechenzentrums angemessen abbilden, inklusive schneller Leistungsänderungen und periodischer Lastschwankungen.

Die Modelle müssen dazu geeignet sein, um die Einhaltung der in diesem Dokument definierten Anforderungen sowie die Auswirkungen des Rechenzentrums auf das Netz im Rahmen von Netzanschluss-, Nachweis- und Interaktionsstudien nachzuweisen. Dies umfasst unter anderem die Nachbildung des Verhaltens bei stationären und dynamischen Netzereignissen, wie beispielsweise Kurzschlüssen, temporären Spannungsänderungen, Frequenzabweichungen, Frequenzgradienten, Wirkleistungs- und Blindleistungsregelungen sowie möglichen Interaktionen und Resonanzphänomenen.

Die bereitgestellten Simulationsmodelle sind anhand geeigneter Messungen oder Herstellernachweise zu validieren. Der Netzbetreiber kann projektspezifisch zusätzliche Validierungsnachweise verlangen.

4 Nachweise und Studien

Der Ablauf und die Anforderungen an den Nachweis der technischen Anforderungen für den Anschluss von Rechenzentren an das Hoch- und Höchstspannungsnetz ist im Dokument „Anlagenspezifisches Nachweisverfahren für Kundenanlagen“ der deutschen Übertragungsnetzbetreiber beschrieben.

ANMERKUNG 17: WEITERE INFORMATIONEN SIND UNTER WWW.NETZTRANSPARENZ.DE/DE-DE/ÜBERUNS/STUDIEN-UND-POSITIONSPAPIERE/ANLAGENSPEZIFISCHES-NACHWEISVERFAHREN-FÜR-KUNDENANLAGEN-16042026 ZU FINDEN.