

Anhang 2: **Dezember 2003**

Zunahme der dezentralen Energieerzeugungsanlagen in elektrischen Verteilnetzen

Rahmenbedingungen

ausgearbeitet durch

Dr. G. Schnyder, P. Mauchle
Schnyder Ingenieure AG
Bösch 23
6331 Hünenberg

mitfinanziert durch

Bundesamt für Berufsbildung und Technologie, KTI; KTI P-Nr: 5840.2;
ABB Schweiz AG; Projekt- und Studienfonds der Elektrizitätswirtschaft PSEL;
AEK Energie AG; Elektrizitätswerk Davos AG; ewz Verteilnetz

Diese Arbeit ist im Auftrag des Bundesamtes für Energie entstanden. Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor dieses Berichts verantwortlich.

Weitere Informationen über das Programm „Elektrizität“ des Bundesamts für Energie stehen auf folgender Web-Seite zur Verfügung:

www.electricity-research.ch

INHALTSVERZEICHNIS

Zusammenfassung	1
 1. Einleitung	 2
 2. Elektrische Rahmenbedingungen	 2
2.1. Generell	2
2.2. Spannungs- und Frequenzgrenzen	3
2.2.1. Grenzen für die Wirkleistungsabgabe.....	3
2.2.2. Merkmale der Spannung in öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen (EN50160)	4
2.3. Synchronisierung auf das Verteilnetz.....	5
2.4. Schutzeinrichtungen	5
2.5. Blindleistung	5
2.6. Inselbetrieb	5
2.7. Empfehlung für die Beurteilung von Netzurückwirkungen (VSE 2.72d-97).....	6
2.7.1. Allgemeines	6
2.7.2. Begriffe.....	6
2.7.3. Beurteilung	6
2.8. Empfehlung zur Vermeidung unzulässiger Rückwirkungen auf die Tonfrequenz- Rundsteuerung (VSE 2.66d)	7
2.8.1. Motoren und Generatoren	7
2.8.2. Erzeugungsanlagen.....	8
 3. Simulationen im Verteilnetz	 9
3.1. Netzan Kopplungen von dezentralen Energieerzeugungsanlagen	9
3.2. Netzkonfigurationen	10
 4. Normen, Empfehlungen und Richtlinien	 10

ZUSAMMENFASSUNG

Die dezentralen Energieerzeugungsanlagen (DEA), die auf ein öffentliches Verteilnetz aufgeschaltet werden sollen, müssen die Rahmenbedingungen für den Betrieb dieser Verteilnetze einhalten. Diese Rahmenbedingungen sind bei den einzelnen Netzbetreiber in Reglementen unterschiedlich festgelegt. All diesen unterschiedlichen Reglementen liegen jedoch die von der Branche festgelegten Normen, Empfehlungen und Richtlinien zu Grunde.

Die Spannung und die Frequenz eines Verteilnetzes sind im Verbundbetrieb wie auch im Inselbetrieb die primären Merkmale deren Toleranzbänder von einer DEA eingehalten werden müssen. Auf der NS-Ebene sind diese Grenzwerte in der EN50160 im Detail festgelegt. Die Grenzwerte auf der MS-Ebene sind teilweise von der jeweiligen Nennspannung und der Sternpunktbehandlung abhängig.

Eine DEA muss eine Synchronisationseinrichtung besitzen, um synchron auf das Verteilnetz aufgeschaltet werden zu können. Ebenfalls sind Schutzeinrichtungen notwendig, um das Verteilnetz vor unzulässigen Rückwirkungen oder ein Zuschalten auf ein geerdetes Netz zu vermeiden, sowie um die DEA vor Störungen aus dem Verteilnetz zu schützen.

Die von einer DEA zu beziehende oder abzugebende Blindleistung muss mit dem Netzbetreiber vereinbart werden.

Soll eine DEA einen Inselbetrieb aufbauen, so muss die DEA ein Netz unter Spannung setzen, unter Teillast oder Schwachlast betrieben werden und stossartige Lastzuschaltungen ausregeln können. Soll ein Netz unterbrechungsfrei aus dem Inselbetrieb in den Verbundnetzbetrieb zurückgeführt werden, so ist eine Synchronisation aufs Netz im Teillastbetrieb erforderlich.

Die DEA müssen bezüglich den erzeugten Netzzrückwirkungen, d.h. der durch die DEA verursachten Spannungsänderungen, Oberschwingungen und der Beeinflussung von Tonfrequenzsteuerungen, die Grenzwerte gemäss der VSE-Empfehlung 2.72d-97 einhalten. Zur Vermeidung von unzulässigen Rückwirkungen auf die Tonfrequenzrundsteuerung gibt es zudem die VSE-Empfehlung 2.66D. Motoren und Generatoren sowie Erzeugungsanlagen müssen anhand dieser Empfehlung beurteilt werden. Die Erzeugungsanlagen werden dabei in die Gruppen derjenigen, die über statische Umrichter und derjenigen, die direkt ans Netz angeschlossen werden unterteilt.

Bei den im Projekt „Zunahme der DEA in elektrischen Verteilnetzen“ durchzuführenden Simulationen mit verschiedenen Verteilnetzen und unterschiedlichen Arten der Ankopplung der DEA ans Verteilnetz dienen die aufgeführten Rahmenbedingungen als Beurteilungskriterien.

1. EINLEITUNG

Die Zunahme der dezentralen Energieerzeugungsanlagen (DEA) wird den Ausbau und den Betrieb der Verteilnetze auf den verschiedenen Spannungsebenen der Verteilnetze nachhaltig beeinflussen. Die durch die DEA verursachten Beeinflussungen müssen jedoch Rahmenbedingungen für den Betrieb eines Verteilnetzes einhalten. Diese im folgenden aufgezeigten Rahmenbedingungen basieren auf den in der Branche üblichen Normen, Empfehlungen und Richtlinien.

Die Einhaltung der Rahmenbedingungen ist mittels Simulationen von DEA im Verteilnetz zu überprüfen, resp. die kritischen Grössen, die zu einer Überschreitung der Rahmenbedingungen führen, sind zu ermitteln. Bei den Simulationen werden unterschiedliche Ankopplungen der DEA in verschiedene Netzkonfigurationen betrachtet.

2. ELEKTRISCHE RAHMENBEDINGUNGEN

2.1. GENERELL

Für die Einbindung von Erzeugungseinheiten und somit auch von DEA bestehen bei den einzelnen Netzbetreiber unterschiedliche Reglemente, also Rahmenbedingungen. All diesen unterschiedlichen Reglementen liegen folgende Normen, Empfehlungen und Richtlinien zu Grunde:

- GridCode CH Kapitel 2.3 Technische Betriebliche Bestimmungen (TBB) Netzbetreiber – Erzeuger (Maschinen < 5 MW) [1];
- Merkmale der Spannung in öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen (EN50160) [2];
- Empfehlung für die Beurteilung von Netzzrückwirkungen (VSE 2.72d-97) [3].
- Empfehlung zur Vermeidung unzulässiger Rückwirkungen auf die Tonfrequenz-Rundsteuerung (VSE 2.66d) [4];

Im folgenden werden daraus die für die Beurteilung der Zunahme von DEA relevanten Punkte aufgezeigt.

2.2. SPANNUNGS- UND FREQUENZGRENZEN

2.2.1. Grenzen für die Wirkleistungsabgabe

Die Erzeugungseinheiten müssen im Bereich der im Bild 1 angegebenen Werte der Netzspannungen und der Netzfrequenz betrieben werden können. Einschränkungen sind nur nach spezieller Absprache mit dem Netzbetreiber möglich.

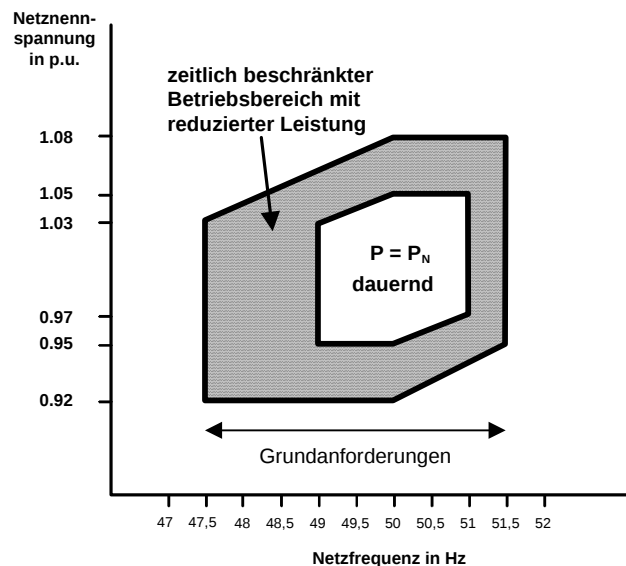


Bild 1: Spannungs- und Frequenzgrenzen für Erzeugungseinheiten (quasistationäre Betrachtung; IEC 34-1 / SEV 3009)

Diese Spannungs- und Frequenzgrenzen müssen auch bei einem Inselbetrieb eingehalten werden.

2.2.2. Merkmale der Spannung in öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen (EN50160)

Für die Verteilnetze gelten gemäss EN50160 die folgenden Werte bzw. Wertebereiche, welche auch durch die Zunahme von dezentralen Erzeugungseinheiten nicht überschritten werden dürfen:

Merkmal der Versorgungsspannung	Werte und Wertebereiche		Bemerkungen
	Niederspannung	Mittelspannung	
Frequenz (bei Verbindung zu einem Verbundnetz)	49.5 Hz bis 50.5 Hz 47.0 Hz bis 52.0 Hz		während 95 % einer Woche; dauernd
Langsame Spannungsänderung	230 V +/- 10 %	U_c +/- 10 %	während 95 % einer Woche
Schnelle Spannungsänderung	5 % max. 10 %	4 % max. 6 %	
Flicker (Festlegung nur für Langzeitflicker)	$P_R = 1$		während 95 % einer Woche
Spannungseinbrüche (≤ 1 Min.)	einige 10 bis 1000 pro Jahr (unter 85 % U_c)		
Kurze Versorgungsunterbrechungen (≤ 3 Min.)	einige 10 bis mehrere 100 pro Jahr (unter 1 % U_c)		
Zufällige lange Versorgungsunterbrechungen (> 3 Min.)	einige 10 bis 50 pro Jahr (unter 1 % U_c)		
Zeitweilige netzfrequente Überspannungen (Aussenleiter – Erde)	meist < 1.5 kV	1.7 bis 2.0 (je nach Sternpunktbehandlung)	
Transiente Überspannungen (Aussenleiter – Erde)	meist < 6 kV	entsprechend der Isolationskoordination	
Spannungsunsymmetrie (Verhältnis Gegen zu Mitsystem)	meist 2 % in Sonderfällen bis 3 %		während 95 % einer Woche
Oberschwingungsspannungen (Bezugswert U_n bzw. U_c)	Gesamtüberschwingungsgehalt (THD) 8 %		während 95 % einer Woche
Zwischenharmonische Spannung	Werte in Bearbeitung		
Signalspannungen (Bezugswert U_n bzw. U_c)	Bereich 9 bis 95 kHz in Bearbeitung		während 99 % eines Tages

EN50160 Kurzform

2.3. SYNCHRONISIERUNG AUF DAS VERTEILNETZ

Die DEA müssen synchron auf das Verteilnetz zugeschaltet werden können. Dieses Zuschalten im Normalbetrieb beinhaltet das Anfahren der Erzeugungseinheit und die Zuschaltung auf ein unter Spannung stehendes Netz.

2.4. SCHUTZEINRICHTUNGEN

Bezüglich dem Schutz des Verteilnetzes und der DEA sind folgende Stör- resp. Fehlerfälle zu beherrschen:

- Äussere Kurzschlüsse
- Schiefast
- Stator- und Rotorüberlast
- unzulässige Untererregung
- Über- und Unterfrequenz
- Asynchronlauf
- Torsionsbeanspruchungen
- Antriebsausfall (motorischer Betrieb)

2.5. BLINDLEISTUNG

Die Lieferung oder der Bezug von Blindleistung darf sich nur im Rahmen des mit dem Netzbetreiber vereinbarten $\cos\phi$ bewegen.

Allenfalls kann die Lieferung oder der Bezug von Blindleistung gezielt zur Spannungshaltung eingesetzt werden.

2.6. INSELBETRIEB

Soll eine DEA einen Inselbetrieb aufbauen und betreiben können, so müssen die folgenden Bedingungen erfüllt werden:

- Zuschalten der DEA auf ein spannungsloses Teilnetz, um dieses unter Spannung zu setzen.
- Beim Aufbau eines Inselnetzes ist die Last abweichend von der Nennleistung der Erzeugungseinheiten. Daher muss die Regelung der Erzeugungseinheit derart ausgelegt sein, dass ein Teillastbetrieb ebenso sicher beherrscht wird wie das Abfangen auf Eigenbedarf. Eine zeitliche Begrenzung ist möglichst zu vermeiden. Ein derartiger Inselbetrieb muss mehrere Stunden oder, falls keine physikalische Verbindung zu einem Verteilnetz besteht, dauernd aufrecht erhalten werden können.
- Bei Betrieb der Erzeugungseinheit mit Belastung durch den Eigenbedarf oder einer Teillast muss die Erzeugungseinheit in der Lage sein, stossartige Lastzuschaltungen bis 10 % der Nennleistung auszuregulieren.

Für eine unterbrechungsfreie Rückkehr vom Inselbetrieb in den Betrieb im Verteilnetz müssen die folgenden Bedingungen erfüllt werden:

- Synchronisieren auf das Netz im Teillastbetrieb oder nach einem Abfangen auf Eigenbedarf.
- Umschaltung von der Spannungs- und Frequenzregelung für die Rücksynchronisation auf die Leistungsregelung, nachdem die Insel wieder aufs Verteilnetz aufgeschaltet ist.

2.7. EMPFEHLUNG FÜR DIE BEURTEILUNG VON NETZRÜCKWIRKUNGEN (VSE 2.72D-97).

2.7.1. Allgemeines

Beim Parallelbetrieb von Kleinkraftwerken und Eigenerzeugungsanlagen können folgende Netzurückwirkungen auftreten:

- Spannungsänderungen
- Oberschwingungen
- Beeinflussung von Tonfrequenzsteuerungen

2.7.2. Begriffe

Kleinkraftwerke sind Kraftwerke mit einer Jahresarbeit bis etwa 10 GWh und ausschliesslicher Einspeisung in das regionale oder lokale Verteilnetz mit einer Spannung zwischen 35 kV und 400 V.

Eigenerzeugungsanlagen sind Kleinkraftwerke, die von den Endverbrauchern hauptsächlich zur Grund- und Spitzenlastabdeckung der eigenen Anlagen betrieben werden.

Der **Lastabwurf** ist eine sprunghafte Änderung des Energieflusses, unabhängig davon ob Lieferung oder Bezug, durch einen plötzlichen Ausfall der Erzeugung oder der Kundenanlage.

2.7.3. Beurteilung

Durch den Netzparallelbetrieb von Kleinkraftwerken und Eigenerzeugungsanlagen hervorgerufene Spannungsänderungen dürfen die Höchstwerte entsprechend VSE 2.72d-97 Punkt 4.4.2 (Emissionsgrenzkurve für Spannungsänderungen) nicht überschreiten.

2.7.3.1. Asynchrongenerator

Asynchrongeneratoren machen in vielen Fällen den gleichzeitigen Betrieb einer Kompensationsanlage zur Bereitstellung von Blindleistung erforderlich.

Die Beurteilungskriterien für den Parallelbetrieb mit dem Verteilnetz sind:

- Spannungsänderungen durch:
Motorischen Hochlauf z.B. bei Biogasmotoren;
Generator-Zuschaltung (Zuschaltstrom bis 7-facher Nennstrom!);
Kondensator-Zuschaltung;
Lastabwurf.

- Tonfrequenz-Impedanz (siehe 2.8.1)

2.7.3.2. Synchrongenerator

Synchronisieren und Stillsetzen sind ohne nennenswerte Spannungsänderungen möglich.

Das Beurteilungskriterium für den Parallelbetrieb mit dem Verteilnetz ist:

- Seltene Spannungsänderungen durch Lastabwurf

2.7.3.3. Wechselrichter und Frequenzumformer

Beim Parallelbetrieb von Eigenerzeugungsanlagen mit dem Netz des EVU werden oft Betriebsmittel der Leistungselektronik eingesetzt. In das Niederspannungsnetz einspeisende Wechselrichter und Frequenzumformer sind in gleicher Weise zu beurteilen wie elektronische Betriebsmittel für allgemeine Anwendungen (siehe VSE 2.72d-97).

Die Beurteilungskriterien für den Parallelbetrieb mit dem Verteilnetz sind:

- Spannungsänderungen durch Lastabwurf;
- Oberschwingungen;
- Kommutierungseinbrüche;
- Zwischenharmonische

Liegt der Verknüpfungspunkt im Mittelspannungsnetz, dann sind hinsichtlich Oberschwingungen nur 50% der Emissionsgrenzwerte gemäss VSE 2.72d-97 Kapitel 5 zulässig.

2.8. EMPFEHLUNG ZUR VERMEIDUNG UNZULÄSSIGER RÜCKWIRKUNGEN AUF DIE TONFREQUENZ-RUNDSTEUERUNG (VSE 2.66D)

2.8.1. Motoren und Generatoren

Direkt angeschlossene rotierende Maschinen, d.h. Motoren und Generatoren - ohne vorge-schaltete Leistungssteuerung - stellen für die Rundsteuerfrequenz eine induktive Belastung dar.

Diese Induktivität bewirkt besonders bei tiefen Rundsteuerfrequenzen eine nicht unwesentli-che Belastung der Sendeanlage. Demzufolge dürfen bei tiefen Rundsteuerfrequenzen derar-tige Belastungen einer Kundenanlage nicht vernachlässigt werden.

Für die Impedanz bei der Steuerfrequenz ist die Anfangsreaktanz x'' massgebend. die nur ei-nen Bruchteil der 50 Hz Impedanz beträgt und auch zur Ermittlung des Anlauf- und Kurz-schlussstromes eingesetzt wird. Die Anfangsreaktanz x'' der Motoren und Generatoren hängt stark von der Bauweise ab.

Die Werte für eine grobe Abschätzung der Tonfrequenzimpedanz sind aus der Empfehlung VSE 2.66d zu entnehmen.

2.8.2. Erzeugungsanlagen

Rundsteueranlagen werden für eine Belastung dimensioniert, die der 50 Hz Last des Versorgungsnetzes entspricht, in das die Einspeisung der Steuerspannung erfolgt. Eigenerzeugungsanlagen wie z.B. Wasser-, Wind- und Photovoltaikanlagen oder durch Wärmekraftmaschinen angetriebene Generatoren beeinflussen die Rundsteuerung durch

- eine mögliche Erhöhung der im Versorgungsbereich des Netztrafos angeschlossenen Netzlasten
- eine hohe Belastung der Rundsteuersendeanlagen
- unzulässige Steuerpegeländerungen am Verknüpfungspunkt

2.8.2.1. Eigenerzeugungsanlagen, die über statische Umrichter an das Netz angeschlossen werden

Eigenerzeugungsanlagen, die über statische Umrichter ohne Filterkreise an das elektrische Versorgungsnetz angeschaltet werden, verursachen i.d.R. keine unzulässigen Rückwirkungen auf die Rundsteuerung.

Aus Sicht der Rundsteuerung sind daher im allgemeinen auch keine Leistungsbegrenzungen für den Anschluss dieser Eigenerzeugungsanlagen erforderlich. Allerdings sind die zulässigen Grenzwerte hinsichtlich der Störspannungen von Kundenanlagen im Bereich der Rundsteuerfrequenz einzuhalten (siehe VSE 2.66d Kapitel 3.4).

Anmerkung:

Auch wenn derartige Eigenerzeugungsanlagen im allgemeinen aus Sicht der Rundsteuerung unkritisch sind, ist mit dem Netzbetreiber eine Abstimmung notwendig. So können z.B. durch zusätzliche Netzlasten, die durch Eigenerzeugungsanlagen gespeist werden, Beeinflussungen entstehen.

Statische Umrichter mit Filterkreisen sind im Einzelfall zu prüfen.

2.8.2.2. Eigenerzeugungsanlagen, die direkt an das Netz angeschlossen werden

Eigenerzeugungsanlagen, die direkt (ohne statische Umrichter) an das elektrische Versorgungsnetz angeschaltet werden, können die Tonfrequenz-Rundsteuerung überproportional beeinflussen. Das Maß der Beeinflussung ist dabei abhängig von

- dem Typ der Eigenerzeugungsanlage und deren Bemessungsleistung;
- der Blindstromkompensation, falls vorhanden;
- dem Netzanschluss, z.B. der Anschaltung des Generators über einen Maschinentrafo, sowie dem vorgelagerten Netz;
- den Betriebsmitteln der Kundenanlage;
- der Rundsteuerfrequenz.

Ein direkter Anschluss solcher Eigenerzeugungsanlagen ist aus Sicht der Tonfrequenz-Rundsteuerung bis zu den in der folgenden Tabelle aufgeführten Bemessungsleistungen ohne besondere Massnahmen, wie z.B. Tonfrequenz-Sperrkreise, zulässig.

Verknüpfungspunkt	Summenleistung von Eigenerzeugungsanlagen	
	am jeweiligen Verknüpfungspunkt	im betrachteten Versorgungsgebiet
MS-Netz	500 kVA	1 MVA
NS-Netz	5 kVA	10 kVA

Anmerkungen:

- Die Summenleistung von Eigenerzeugungsanlagen am jeweiligen Verknüpfungspunkt umfasst die gesamte Eigenerzeugungsanlage, ggf. auch mehrere Generatoren der Kundenanlage.
- Die Summenleistung von Eigenerzeugungsanlagen im betrachteten Versorgungsbereich umfasst alle Eigenerzeugungsanlagen im jeweiligen Netz, d.h. das Mittel- oder Niederspannungs-Netz.
- Bei Überschreitung der in oben aufgeführten Grenzwerte können aus Sicht der Rundsteuerung besondere Massnahmen erforderlich werden. Diese sind mit dem jeweiligen Netzbetreiber abzustimmen.

3. SIMULATIONEN IM VERTEILNETZ

3.1. NETZANKOPPLUNGEN VON DEZENTRALEN ENERGIEERZEUGUNGSANLAGEN

Die aufgeführten elektrischen Rahmenbedingungen müssen mittels der Simulation von verschiedenen Arten von Ankopplung unterschiedlicher dezentralen Energieerzeugungsanlagen überprüft werden. Dabei sind jeweils die Produktionsgrenzen für die Einhaltung der Rahmenbedingungen zu ermitteln. Bei der Simulation ist weniger die Produktionsart, als die Ankopplung ans Verteilnetz zu untersuchen. Bezüglich der Ankopplung sollen die folgenden prinzipiellen Varianten betrachtet werden:

- Asynchrongenerator
- Synchrongenerator
- Elektronische Ankopplung mittels DC/AC-Konverter oder AC/AC-Konverter.

3.2. NETZKONFIGURATIONEN

Für die Simulationen sollen die folgenden Netzkonfigurationen betrachtet werden:

- Niederspannungs- und Mittelspannungsnetze
- Sternförmig betriebene Netze
- Im geschlossenen Ring betriebene Netze
- Vermascht betriebene Netze
- Dezentrale Energieerzeugungsanlagen am Ende einer lange Stichleitung
- Betrieb von dezentralen Energieerzeugungsanlagen in elektrischen Inseln ohne galvanische Verbindung mit einem regionalen Verteilnetz

4. NORMEN, EMPFEHLUNGEN UND RICHTLINIEN

- [1] GridCode CH TBB Kap. 2.3 Netzbetreiber – Erzeuger (Maschinen < 5 MW), Etrans, Version 0.0 vom 12.07.01
- [2] Merkmale der Spannung in öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen; EN 50160
- [3] Empfehlungen für die Beurteilung von Netzzrückwirkungen; VSE 2.72d–97
- [4] Empfehlung zur Vermeidung unzulässiger Rückwirkungen auf die Tonfrequenz-Rundsteuerung; VSE 2.66d