



# Netzanschluss von Photovoltaikanlagen

Regelung – Immunität – Schutz

# Netzanschluss von PV-Anlagen: Inhalt

- ▶ Einleitung: Eine PV-Anlage geht ans Netz
  - ▶ Crashkurs Blindleistung
- ▶ Das 50.2-Hertz-Problem
- ▶ Aufgaben der PV-Anlage im Stromnetz
  - ▶ Regelung
  - ▶ Immunität
  - ▶ Schutz
- ▶ Normatives Framework
- ▶ Normenprojekt am PV-Labor der BFH

# Der Referent: Prof. Dr. Christof Bucher



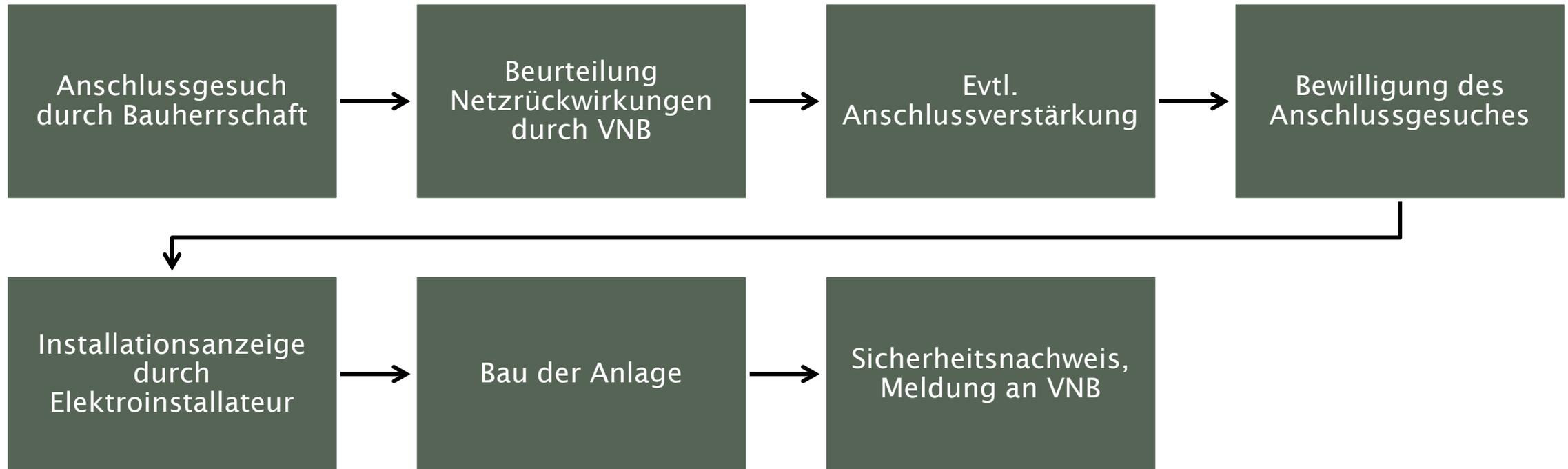
- ▶ Elektroingenieur ETH Zürich
- ▶ Dissertation ETH Zürich: Netzeinspeisung von Solarstrom
- ▶ 12 Jahre PV-Planer bei Enecolo / Basler & Hofmann
- ▶ Seit Sommer 2020: Professor für PV-Systeme BFH

## **Mandate**

- ▶ Vorsitzender CES TK 8 (Systemaspekte der elektrischen Energieversorgung)
- ▶ Mitglied IEC TC 8 / 8A / 8B / 82 (Photovoltaik)
- ▶ IEA PVPS Task 14 (PV in the 100% RES)

# Einleitung: Eine PV-Anlage geht ans Netz

# Prozess Netzanschluss



# Grundlagen, Vorschriften

- ▶ Gesetze (Elektrizitätsgesetz, Stromversorgungsgesetz, ...)
- ▶ Verordnungen (Stark- und Schwachstromverordnung, StromVV, ...)
- ▶ Verteilnetzbetreiber: Werkvorschriften (WV)
- ▶ Normen (SN EN 50160, SN EN 50549-1/2, IEC 62109-x, IEC 62116, ...)
- ▶ Weisungen (z. B. ESTI-Weisung 233, ...)
- ▶ Branchenempfehlungen (VSE NA/EEA, Swissolar NA/EEA, ...)

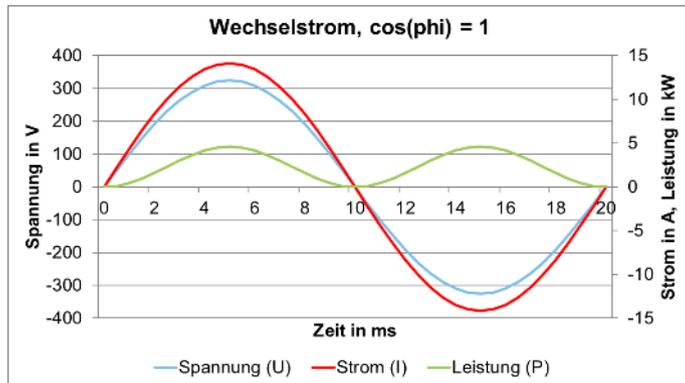
## **Verteilnetzbetreiber:**

- ▶ Muss die PVA anschliessen
- ▶ Ist verantwortlich für Netzqualität
- ▶ Trägt Netzkosten

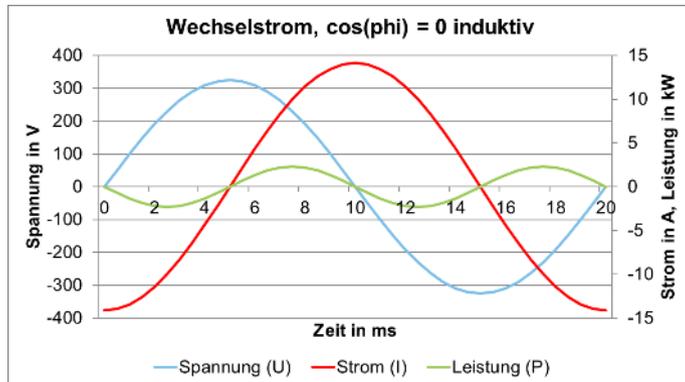
## **Produzent:**

- ▶ Muss störende Einwirkungen verhindern
- ▶ Trägt Anschlusskosten

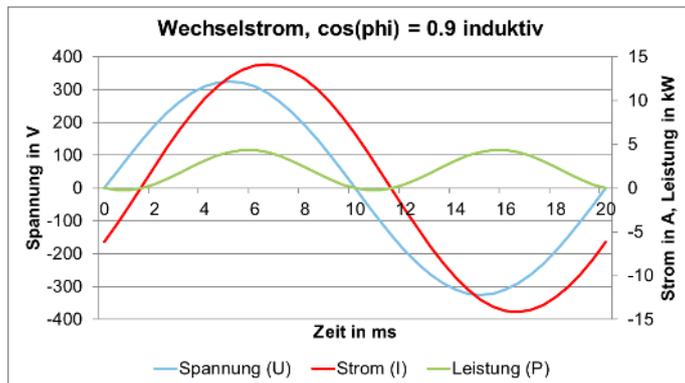
# Wechselstrom, Wirkleistung, Blindleistung, cos(phi)



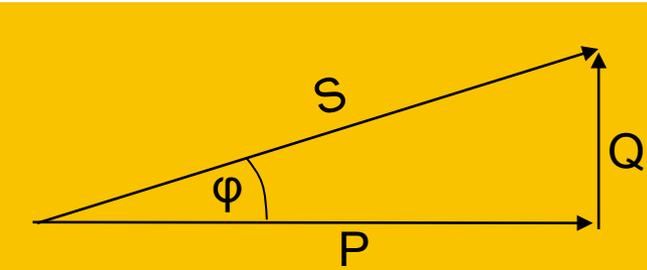
▶ Wechselstrom,  $\cos(\phi) = 1$ : Strom und Spannung sind in Phase, die Leistung fließt in eine Richtung. Es fließt nur **Wirkleistung**, keine Blindleistung.



▶ Wechselstrom,  $\cos(\phi) = 0$ : Strom und Spannung sind  $90^\circ$  phasenverschoben, die Leistung oszilliert. Es fließt nur **Blindleistung**, keine Wirkleistung.



▶ Wechselstrom,  $\cos(\phi) = 0.9$ : Strom und Spannung sind nicht ganz in Phase, ein Teil der Leistung oszilliert. Es fließt 90% Wirkleistung und 10% Blindleistung.



Scheinleistung:

$$S^2 = P^2 + Q^2$$

Wirkleistung:

$$P = S \cdot \cos(\phi)$$

Blindleistung:

$$Q = S \cdot \sin(\phi)$$

# Warum Blindleistung?

## Grund 1: Die Physik erzwingts

- ▶ Wie bei der Wirkleistung muss auch bei der Blindleistung Produktion und Verbrauch jederzeit im **Gleichgewicht** sein. Weil praktisch alle Verbraucher von Natur aus einen gewissen Blindleistungsanteil verbrauchen oder produzieren, müssen Kraftwerke oder Kompensationseinrichtungen dies **kompensieren**.

## Grund 2: Netzspannung senken

- ▶ Der Verbrauch von Blindleistung **reduziert die Netzspannung**. PV-Anlagen, die Blindleistung verbrauchen (=induktiv = untererregt = lagging), wirken dem Spannungsanstieg entgegen.

# Das 50.2-Hertz-Problem

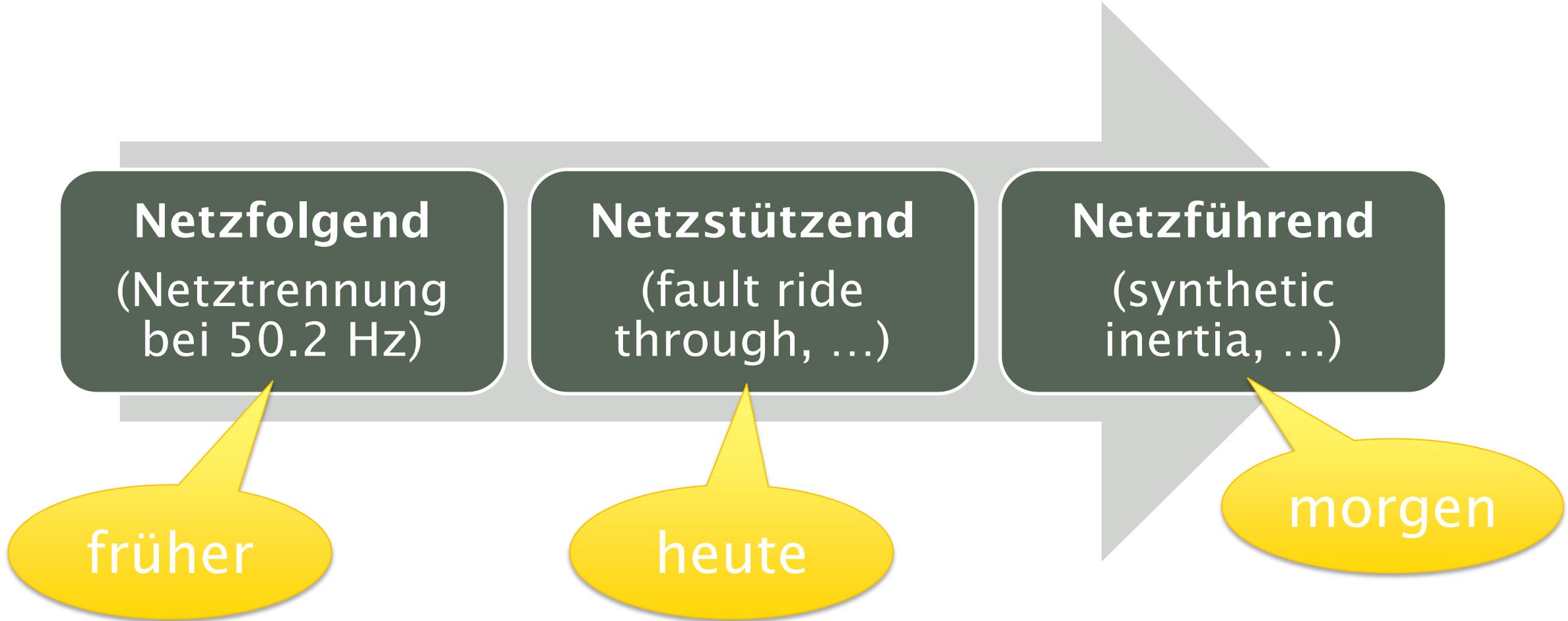
# Eine tickende Zeitbombe wird entschärft

- ▶ Das europäische Verbundnetz verkraftet den Ausfall des grössten Kraftwerks am Netz: Reserveleistung (Primär-Regelreserve) für ganz Europa: **3 GW**
- ▶ Vorschrift bis 2012: PV-Anlagen sollen sich bei 50.2 Hz vom Netz trennen.
- ▶ Problem: 2011 sind bereits **52 GW PV-Anlagen** am europäischen Netz.
- ▶ Folge: Wäre die Netzfrequenz an einem sonnigen Tag über 50.2 Hz gestiegen, hätte dies zu einem europaweiten Blackout geführt.
- ▶ Konsequenz:
  - ▶ Neue Netzanschlussnormen
  - ▶ Teures Retrofit an PV-Anlagen (bis heute nicht abgeschlossen)



# Aufgaben der PV-Anlage im Stromnetz

# Anforderung an den Wechselrichter im Lauf der Zeit



# Anforderungen an die Wechselrichter von morgen



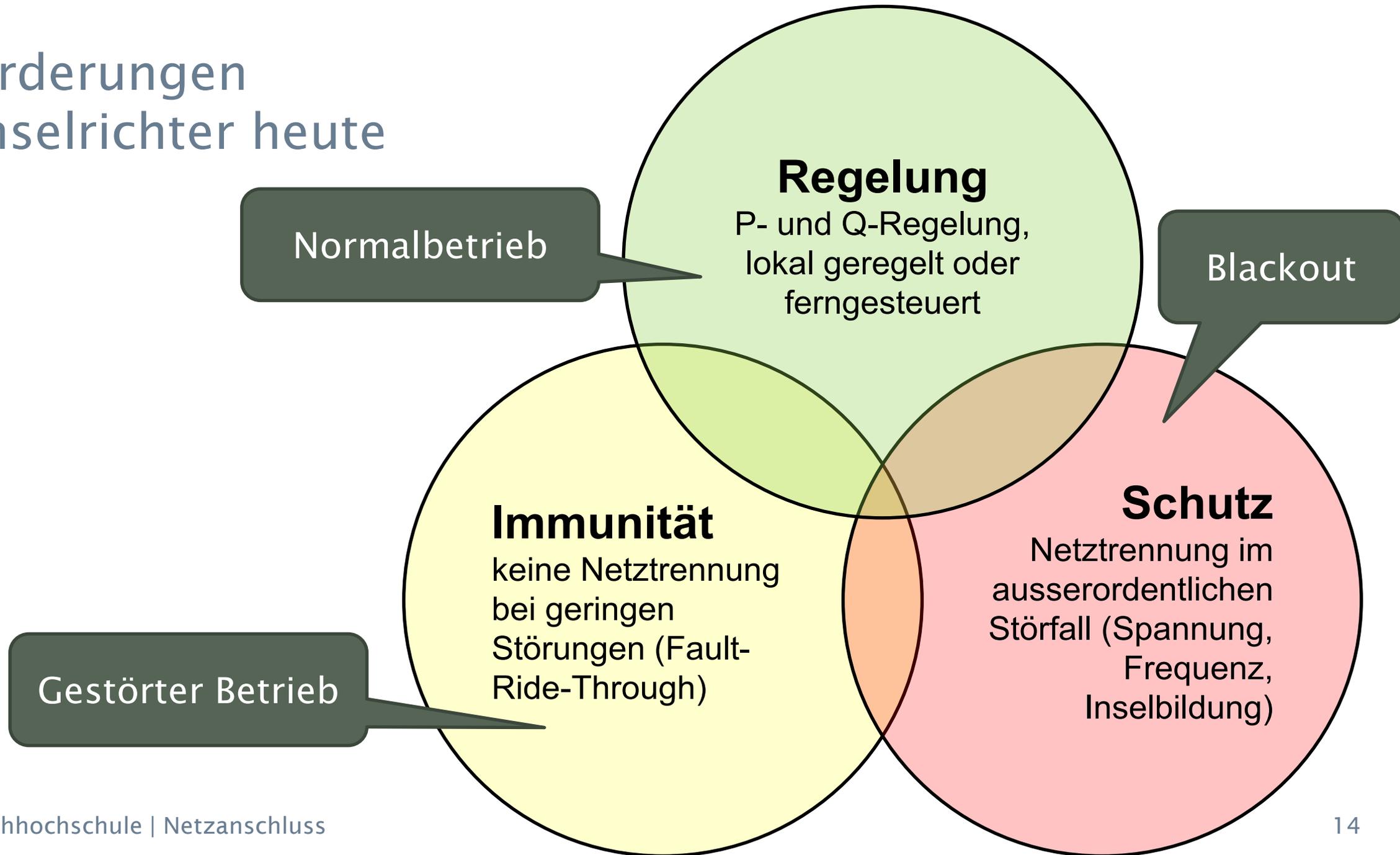
Sieben von der ENTSO-E identifizierte Anforderungen an künftige Wechselrichter:

1. Systemspannung bilden (nicht nur folgen)
2. Fehlerströme einspeisen können
3. Synthetic inertia
4. Erhöhte Anforderungen an Fault ride through
5. Netzstabilisierende Unterstützung (z. B. Unterdrückung subsynchroner Schwingungen)
6. Aktiv Oberwellen filtern
7. Spannungs-Asymmetrien ausgleichen

Diese Anforderungen müssen erfüllt werden, wenn das Stromnetz **mehr als 60%-70% von Wechselrichtern gespeist** wird (Wegfallen der Grosskraftwerke).

<https://www.publishingblog.ch/blick-in-die-zukunft/>

# Anforderungen Wechselrichter heute



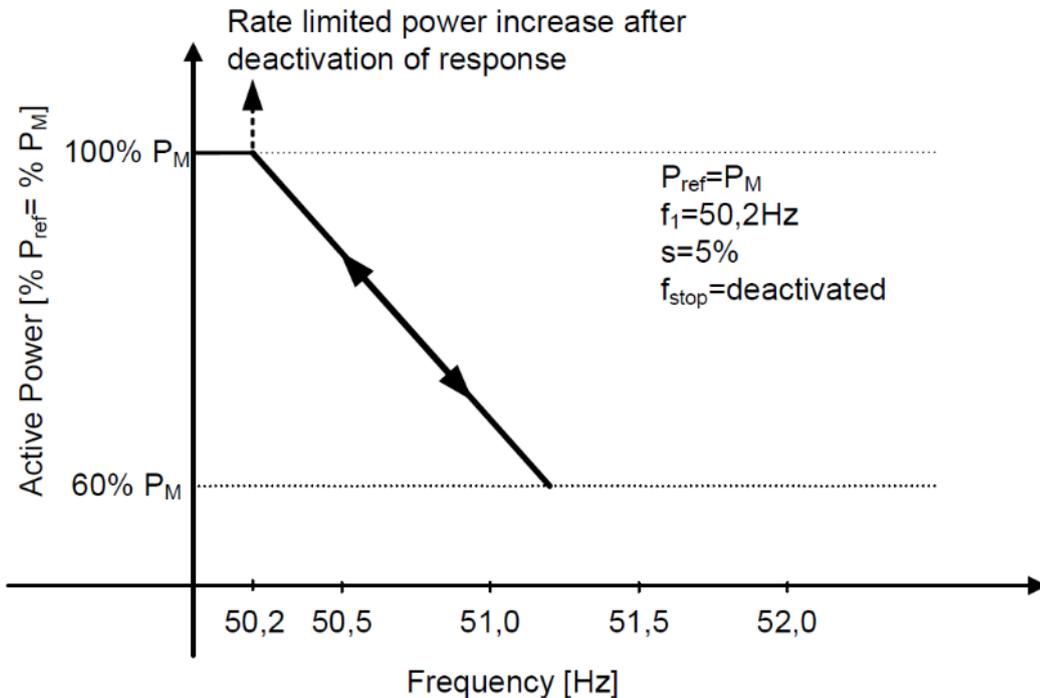
## Regelung

P- und Q-Regelung,  
lokal geregelt oder  
ferngesteuert

## Regelung

- ▶ Wirkleistung
- ▶ Blindleistung

# Wirkleistungsregelung als Funktion der Frequenz: $P(f)$

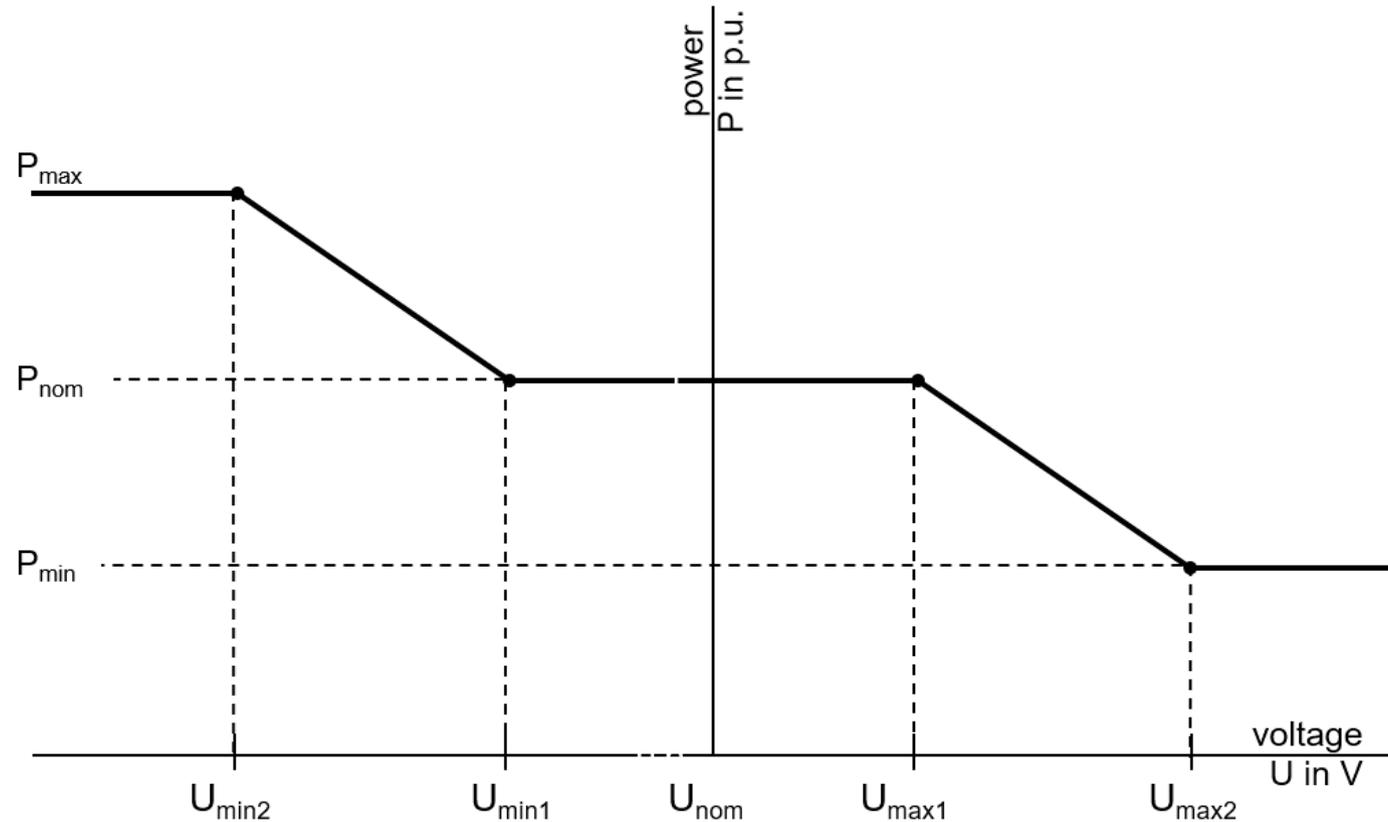


- ▶ Reduktion der Wirkleistung bei Überfrequenz.
- ▶ Entspricht einer Primärregelung.
- ▶ Wird teils in Inselanlagen verwendet (z. B. bei SMA).

## Hinweis:

Frequenzabweichungen von 0.2 Hz sind im europäischen Verbundnetz bereits ein erheblicher Störfall. Diese Regelung greift erst dann.

# Wirkleistungsregelung als Funktion der Spannung: $P(U)$



- ▶ Je höher die Spannung, desto tiefer die Leistung.
- ▶ Teils für Spannungen  $>110\%$  eingestellt.
- ▶ Diese Regelung wird heute allgemein nicht gefordert.

# Blindleistungsregelung: $\cos\varphi(P)$

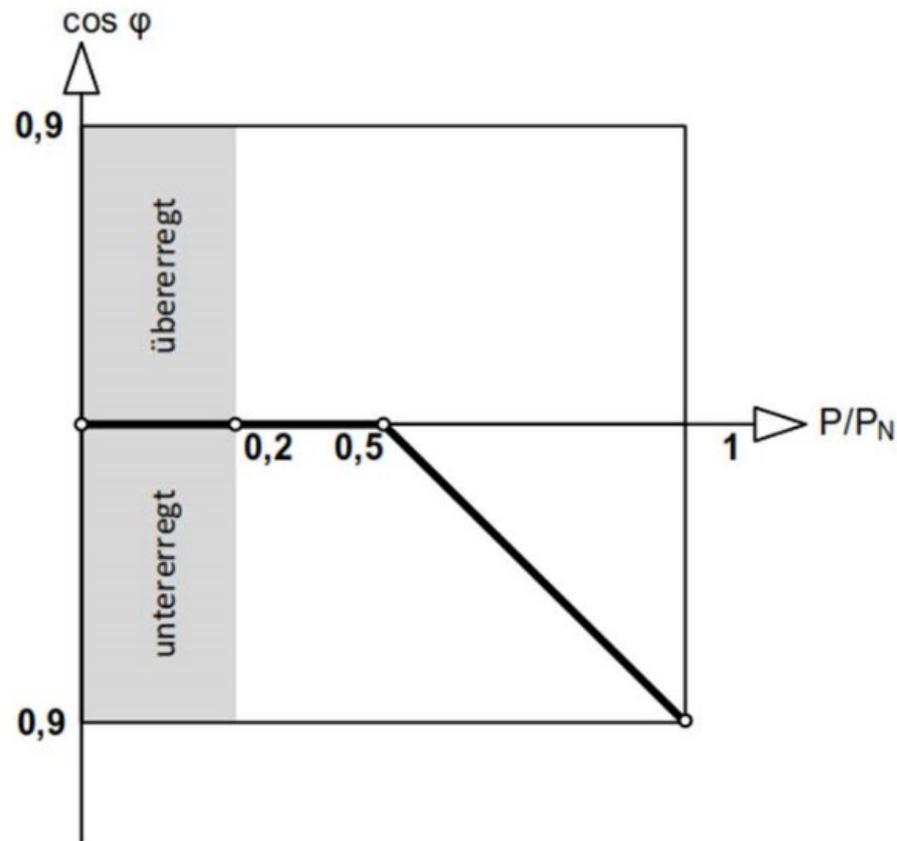


Bild:  $\cos\varphi(P)$  (Standard in Deutschland).  
Grundlegende Annahme: Wenn  $P$  hoch ist, ist die Spannung zu hoch, folglich soll Blindleistung verbraucht werden.

Weitere mögliche Regelungen:

- ▶  $\cos\varphi = \text{konstant}$
- ▶  $Q = \text{konstant}$
- ▶  $Q(U)$  (siehe nächste Folie)
- ▶  $\cos\varphi(U)$

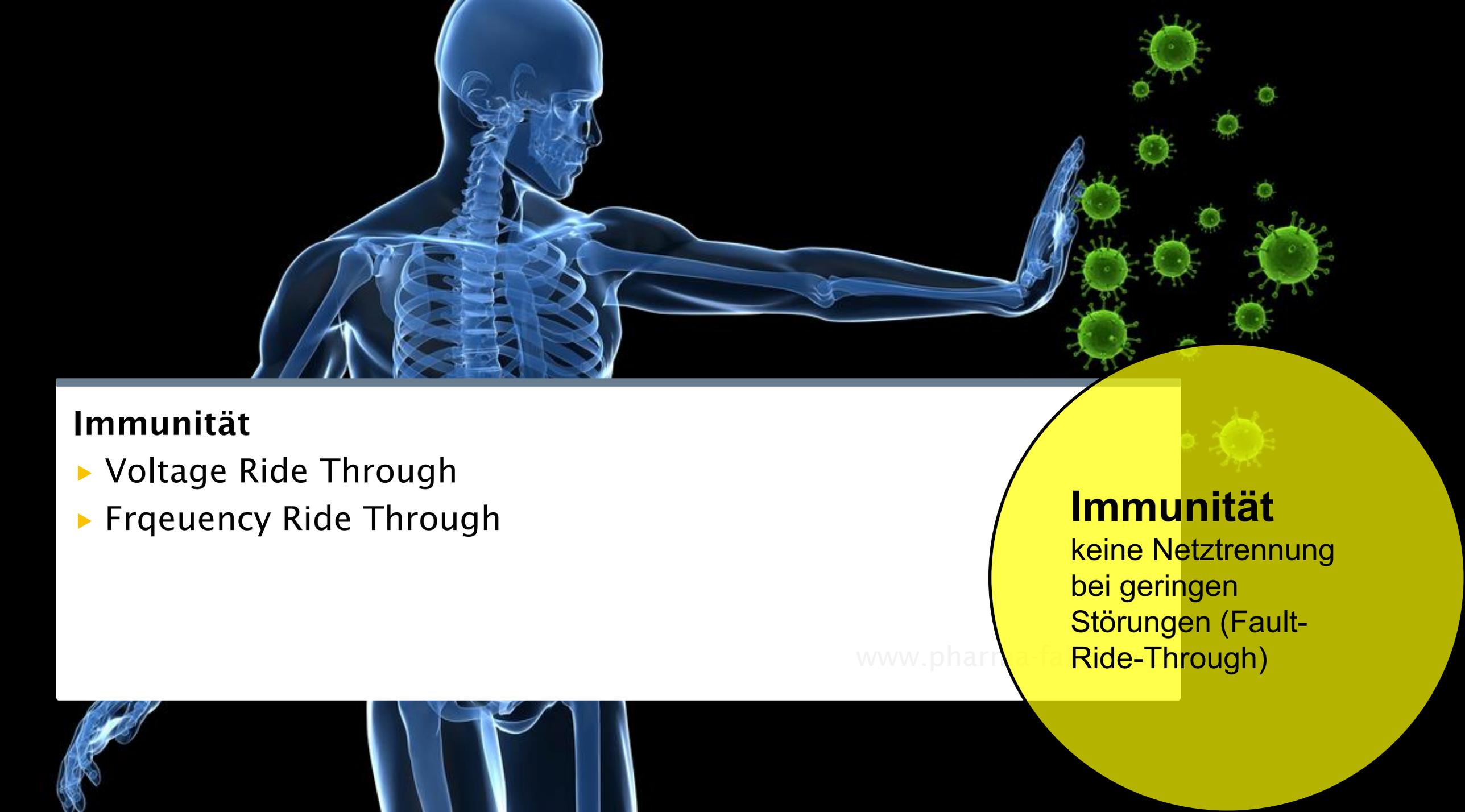
# Fernsteuerung von PV-Anlagen

Je nach Anforderungen des Netzbetreibers müssen PV-Anlagen ferngesteuert werden. Typische Anforderungen sind:

- ▶ Kleinanlagen (bis 30 kVA?): Ein/Aus
- ▶ Mittlere Anlagen (bis 250 kVA?): 0% / 30% / 60% / 100%
- ▶ Grossanlagen (ab 250 kVA?): Wie mittlere Anlagen plus Rückmeldung plus Blindleistung

Die Signalübertragung erfolgt i. d. R. mittels 2/4/8 potentialfreier Kontakte (Rundsteuerung oder Lastschaltgerät PLC), die Rückmeldung über den Stromzähler.

Hinweis: Diese Möglichkeiten zur Fernsteuerung werden zwar teils gefordert und eingebaut, jedoch im Betrieb nicht verwendet.



## Immunität

- ▶ Voltage Ride Through
- ▶ Frequency Ride Through

[www.pharmazie.de](http://www.pharmazie.de)

## Immunität

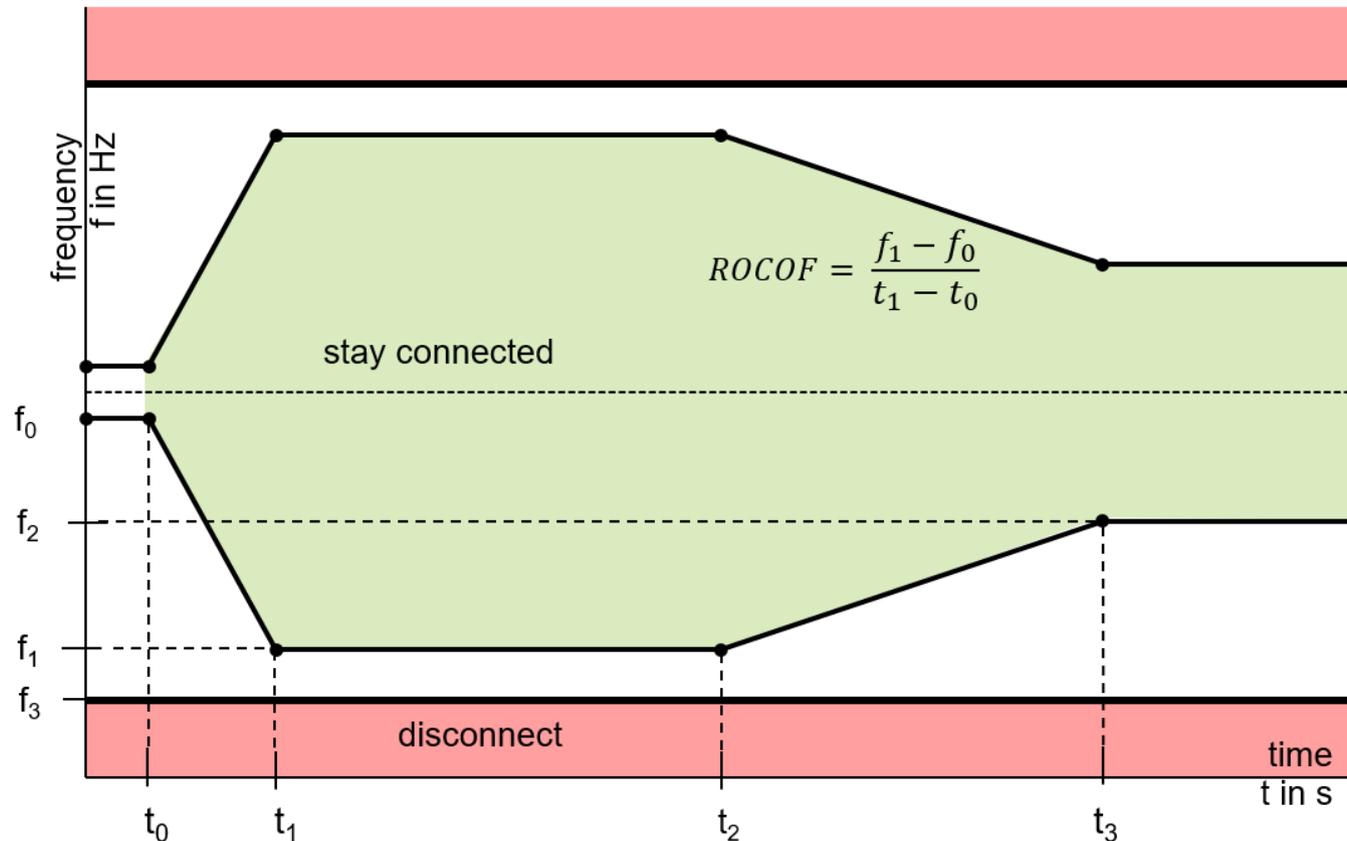
keine Netztrennung  
bei geringen  
Störungen (Fault-  
Ride-Through)

# Betrieb bei Frequenzabweichungen

Frequency Range	Time period for operation Minimum requirement
47,0 Hz – 47,5 Hz	not required
47,5 Hz – 48,5 Hz	30 min <sup>a</sup>
48,5 Hz – 49,0 Hz	30 min <sup>a</sup>
49,0 Hz – 51,0 Hz	Unlimited
51,0 Hz – 51,5 Hz	30 min <sup>a</sup>
51,5 Hz – 52,0 Hz	not required

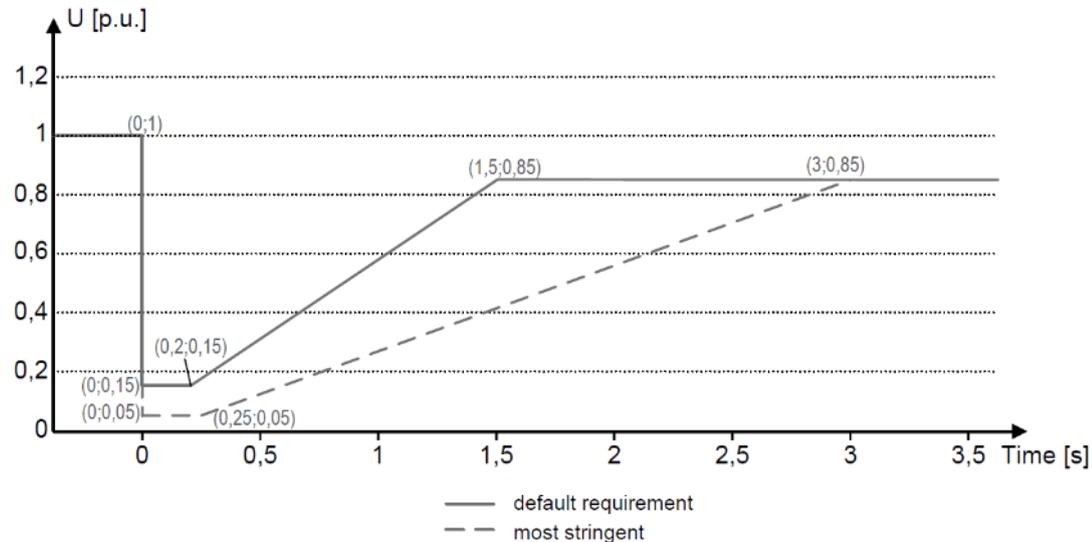
Grafik: Minimale Anforderungen zum Betrieb von Wechselrichtern bei Über- oder Unterfrequenzen.

# Immunität vor Frequenzänderungen

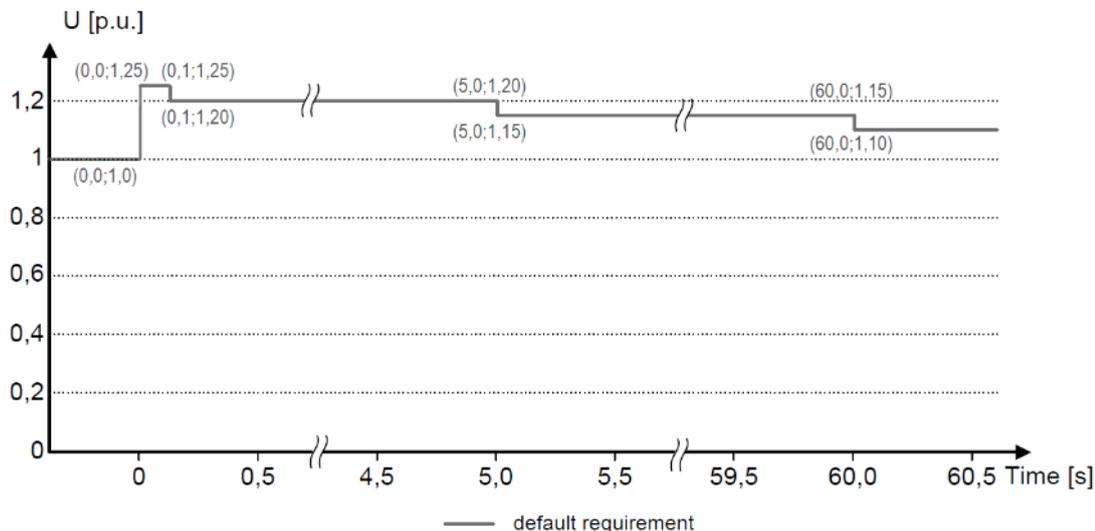


- ▶ Rate of change of frequency, ROCOF: Wechselrichter müssen bei Frequenzänderungen von bis zu 2 Hz/s am Netz bleiben können.
- ▶ «Vector Jump» (Sprünge in der Phase, z. B. bei einem Kraftwerksausfall).
- ▶ Diese Anforderungen werden teils auch «Frequency Ride Through» (FRT) genannt.

# Immunität vor Spannungseinbrüchen (UVRT / OVRT)



- ▶ Under Voltage Ride Through (UVRT)
- ▶ Over Voltage Ride Through (OVRT)
- ▶ Wechselrichter dürfen sich bei kurzen Spannungseinbrüchen /- überhöhungen nicht vom Netz trennen. Diese Anforderung wird allgemein auch «Fault ride through» (FRT) genannt.





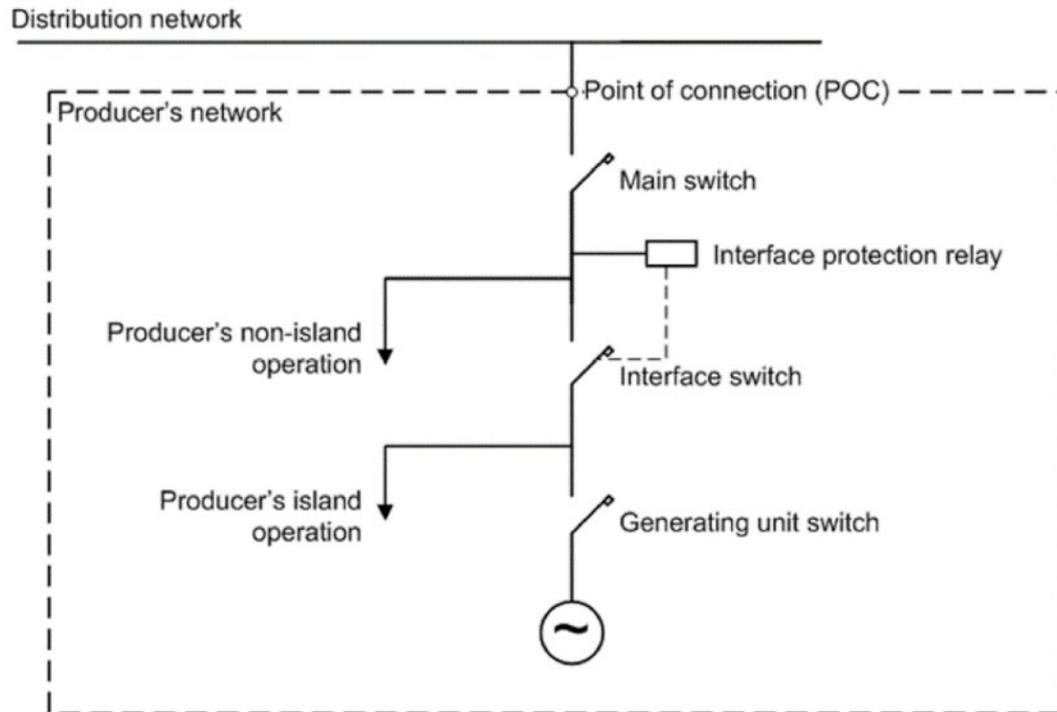
## Schutz (Netz-Anlagenschutz, NA-Schutz)

- ▶ Unter- und Überfrequenz
- ▶ Unter- und Überspannung
- ▶ Ungewollte Inselnetzbildung

### **Schutz**

Netztrennung im  
ausserordentlichen  
Störfall (Spannung,  
Frequenz,  
Inselbildung)

# Zweck und Aufgaben des NA-Schutzes

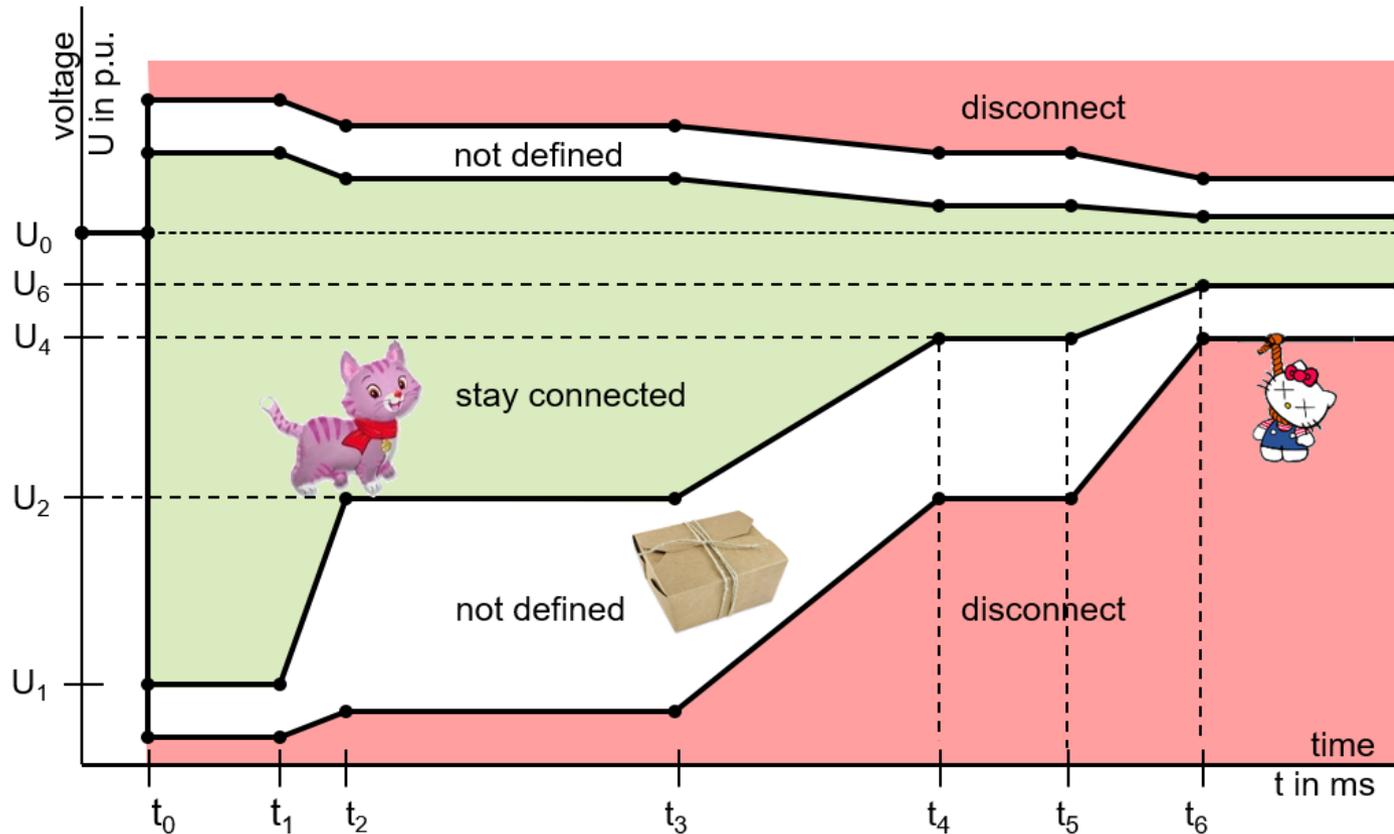


Schutz des Netzes vor der Einspeisung der PV-Anlage und Schutz der PV-Anlage vor dem Stromnetz in folgenden Fällen:

- ▶ **Netzausfall («Anti-Islanding»)**
- ▶ **Grosse Über- oder Unterspannungen**
- ▶ **Grosse Über- oder Unterfrequenzen**

Ein PV-Wechselrichter braucht unabhängig seiner Leistung einen NA-Schutz um sich selber zu schützen. Der NA-Schutz ist deshalb in jedem WR integriert und nicht deaktivierbar.

# NA-Schutz versus Immunität

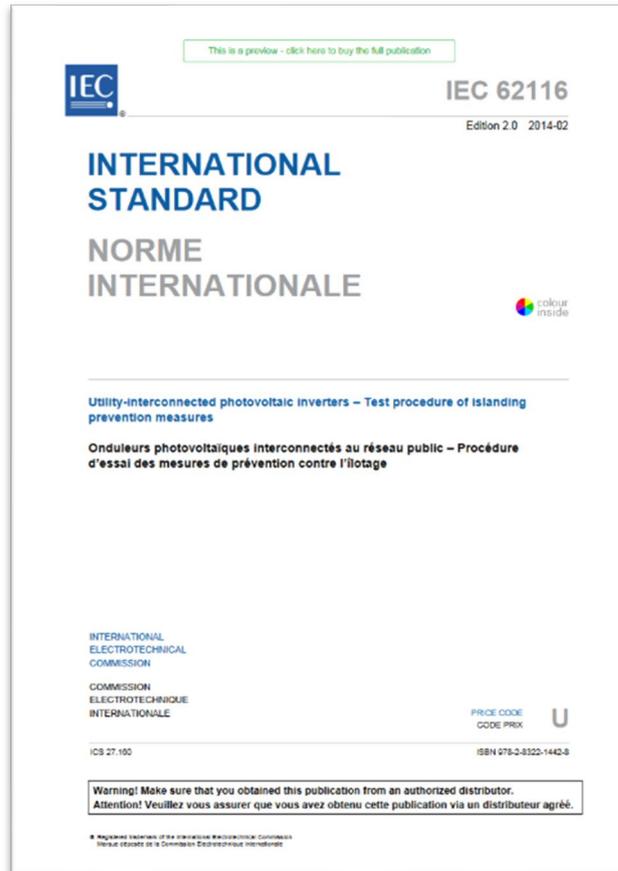


NA-Schutz und FRT verfolgen gegenteilige Interessen (VNB vs. ÜNB) und müssen sorgfältig aufeinander abgestimmt sein.

Stand heute: Gemäss gewissen Dokumenten müssen sich PV-Anlagen in gewissen Situationen vom Netz trennen, in denen sie sich gemäss FRT-Anforderungen nicht vom Netz trennen dürften.

→ Klärung ist nötig!

# Inselnetzerkennung (Anti-Islanding)



[https://webstore.iec.ch/preview/info\\_iec62116%7Bed2.0%7Db.pdf](https://webstore.iec.ch/preview/info_iec62116%7Bed2.0%7Db.pdf)

Wechselrichter müssen erkennen, ob sie an einem stabilen Stromnetz angeschlossen sind oder nicht. Dazu müssen sie nach SN EN 62116 (Utility-interconnected photovoltaic inverters - Test procedure of islanding prevention measures) getestet sein.  
Methoden:

- ▶ **Passive Methoden:** Phasensprung, Sprünge in den Oberwellen, Frequenzänderungen
- ▶ **Aktive Methoden:** Frequenzshift mit ROCOF-Messung, Spannungsmessung auf Wirkleistungsschwankungen, Spannungsmessung auf Blindleistungsschwankungen, Frequenzmessung bei Frequenzerhöhung, Messung der Reaktion auf interharmonische Einspeisung

**Ein externer NA-Schutz kann keinen Inselbetrieb detektieren!**

# Kontroverse um den NA-Schutz



Die Wichtigkeit des NA-Schutzes ist unbestritten. Kontrovers diskutiert wird die Umsetzung.

- ▶ Der VSE (Arbeitsgruppe NA/EEA) fordert einen externen NA-Schutz ab 30 kVA / 100 kVA.
- ▶ Swissolar fordert die Akzeptanz des internen NA-Schutzes bei Wechselrichtern unabhängig der Leistung.

## Fachartikel:

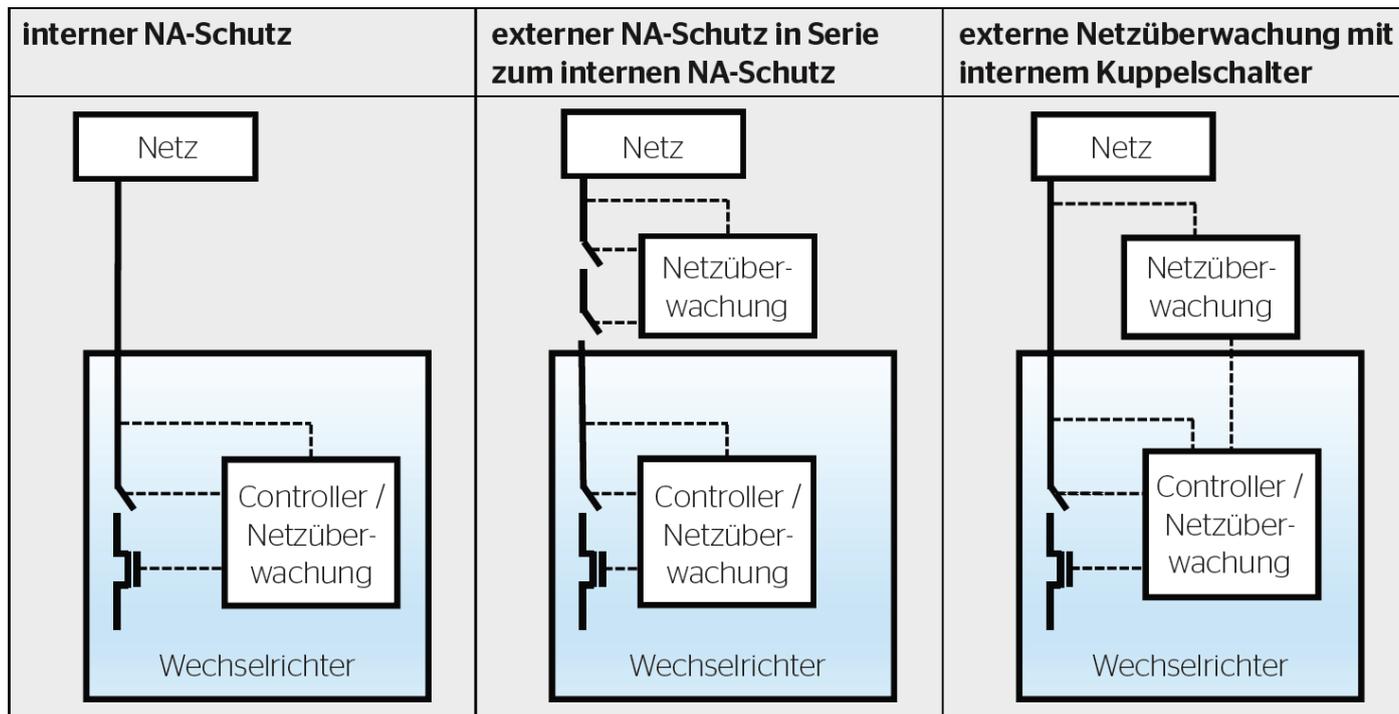
<https://www.bulletin.ch/de/news-detail/netz-und-anlagenschutz-bei-pv-anlagen.html>

## VSE-Branchendokument:

[www.strom.ch/naeea](http://www.strom.ch/naeea)

Bulletin VSE electrosuisse, Christof Bucher

# Umsetzungsvarianten NA-Schutz



## Interner NA-Schutz

- ▶ Ist in jedem Wechselrichter implementiert und deckt alle geforderten Funktionalitäten ab.

## Externer NA-Schutz

- ▶ Wird von vielen VNB zusätzlich ab 30 kVA gefordert.

## Externe Überwachung

- ▶ Problematisch, unsicher

# Vor- und Nachteile der drei Varianten

## **Interner NA-Schutz**

- ▶ Standard, überall drin, nicht abschaltbar (Eigenschutz WR)
- ▶ Einstellung aufeinander abgestimmt. Alle Einstellungen an einem Ort
- ▶ Noch nicht alle Funktionen international geprüft
- ▶ (noch) keine Testfunktion vor Ort

## **Intern + externer NA-Schutz**

- ▶ Redundante Schutzeinstellungen, nicht aufeinander abgestimmt
- ▶ Kann Regelung und Immunität unterwandern
- ▶ Testfunktion prüft nur Schalter, nicht Einstellung
- ▶ Teuer

## **Externes Relais, interner Schalter**

- ▶ Komponenten nicht aufeinander abgestimmt
- ▶ System nicht geprüft, nicht sicher

# NA-Schutz: Was gilt nun?

- ▶ Grundproblem: Verteilnetzbetreiber haben kein ausreichendes Verständnis für die Technologien und setzen deshalb die Empfehlung VSE um. Misstrauen besteht bezüglich:
  - ▶ Technologie (funktioniert der Schutz?)
  - ▶ Einstellungen (sind diese korrekt vorgenommen?)
  - ▶ Betrieb (wird während dem Betrieb etwas manipuliert?)
- ▶ Branchenempfehlung VSE: Externer NA-Schutz ab 30 kVA / 100 kVA
- ▶ Branchenempfehlung Swissolar: Nur interner NA-Schutz für alle Anlagen
- ▶ Netzbetreiber: Heterogene Haltung
  
- ▶ Das letzte Wort hat immer der lokale Verteilnetzbetreiber.

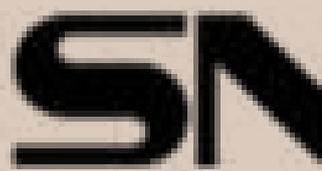
1627:2011

EN 1191:2012

EN 14351-1+A2:

 Schweizer Norm  
Norme Suisse  
Norma Svizzera

Schweizer Norm  
Norme Suisse  
Norma Svizzera 

Schweizer Norm  
Norme Suisse  
Norma Svizzera 

2217:2015

EN 1363-1:2012

EN 15269-3:201

er Norm  
Suis  
Svizi

Schweizer Norm

 Schweizer  
Norme Sui  
Norma Svi

## Normatives Framework

- ▶ Spezialfall Stromnetze
- ▶ Internationale / Europäische / Schweizer Normen

[www.riwag.ch/de/service/normen](http://www.riwag.ch/de/service/normen)

1634-1+A1:2018

EN 1634-3:2004

EN 1125:20

# Normen

## **Produktenormen sind international**

- ▶ IEC 62109-1 Sicherheit von Wechselrichtern zur Anwendung in photovoltaischen Energiesystemen
- ▶ IEC 61215-1 Terrestrische Photovoltaik-(PV-) Module – Bauarteignung und Bauartzulassung

## **Netznormen sind national / regional**

- ▶ Requirements for Generators (RfG), ENTSO-E (Europa)
- ▶ SN EN 50549-1/2: Anforderungen für zum Parallelbetrieb mit einem Verteilnetz vorgesehene Erzeugungsanlagen
- ▶ AR-N-4105 (Deutschland)
- ▶ IEEE 1547 (USA)

# Herausforderung

- ▶ Netzanschlussnormen sind *international und für die Schweiz* nur teilweise geprüft.
- ▶ Netzbetreiber trauen insbesondere den Schutzfunktionen der Wechselrichter nicht vollständig:
  - ▶ Misstrauen in die Technologie
  - ▶ Misstrauen in die Prozesse (Inbetriebnahme, Reparaturen / Austausch)



► Normenprojekt am PV-Labor der BFH

# Netzanschluss: standardisiert und sicher nachgewiesen

Projekte in Zusammenarbeit mit Verteilnetzbetreiber (VNB)

- ▶ Schritt 1: Identifizieren fehlender Prüfnormen
- ▶ Schritt 2: Schreiben fehlender Prüfnormen auf IEC-Ebene
- ▶ Schritt 3: Prüfung von Wechselrichtern für / mit VNB
  - ▶ Vertrauen in die Technologie stärken
  - ▶ White-List als Übergangslösung
- ▶ Finales Ziel: Wechselrichter können dank Typenprüfung ohne zusätzliche Anforderungen ans Netz angeschlossen werden.

# IEC-Normensituation Netzanschluss

## Vorhandene Prüfnormen (IEC)

- ▶ Sicherheit der Wechselrichter
- ▶ Diverse Anforderungen Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)
- ▶ Anti-Islanding (Schutz vor ungewolltem Inselbetrieb)
- ▶ In Arbeit: Immunität, Voltage Ride Through (UVRT / OVRT)
- ▶ In Arbeit: Weitere Anforderungen EMV

## Fehlende Prüfnormen (IEC)

- ▶ Spannungs- und Frequenzschutz
- ▶ Immunität vor Frequenzstörungen
- ▶ Wirkleistungsregelung
  - ▶  $P(U)$ ,  $P(f)$
- ▶ Blindleistungsregelung
  - ▶  $\cos\phi(U)$ ,  $\cos\phi(P)$
- ▶ Ferngesteuerte Abregelung



Besten Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Dr. Christof Bucher – Professor für Photovoltaiksysteme