

Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik
Lehrstuhl für Elektroenergieversorgung

Jan Meyer,
Friedemann Möller, Sascha Müller,
Robert Stiegler, Matthias Klatt

Power Quality in Niederspannungsnetzen – Neue Gerätetechnologien, neue Herausforderungen

Was ist Qualität ?

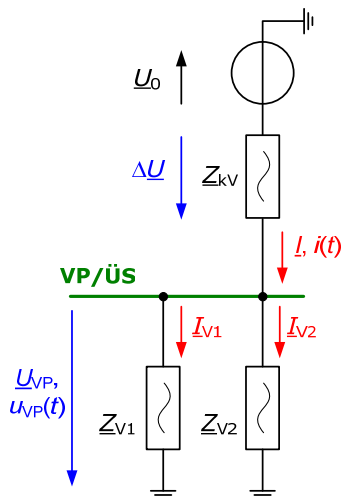


*Merkmale ... ausgedrückt
durch ... Referenzwerte*

623. Elektrotechnisches Kolloquium
des VDE Dresden e.V.
Dresden, 17. April 2019

Grundlagen

Was sind Netzurückwirkungen ?



Gerät 1 bezieht „nicht idealen“ Strom

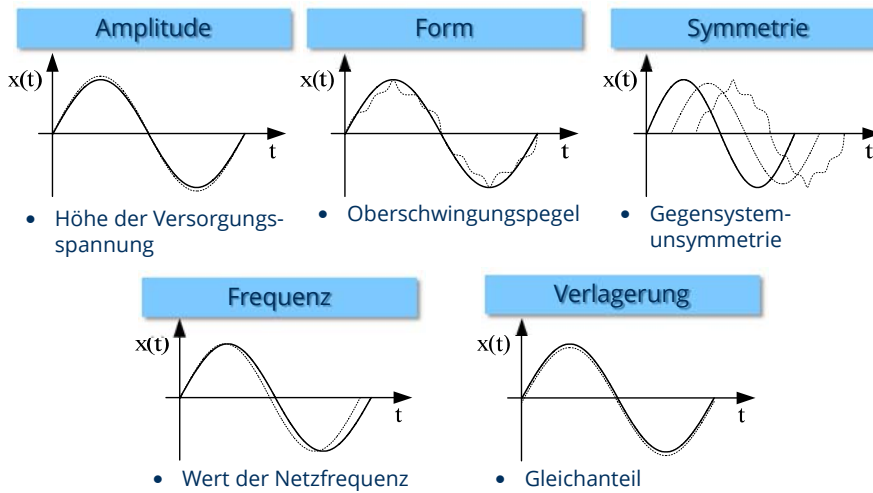
„Nicht idealer“ Spannungsfall über der Netzimpedanz

„Nicht ideale“ Spannung am Verknüpfungspunkt

Beeinflussung von Gerät 2

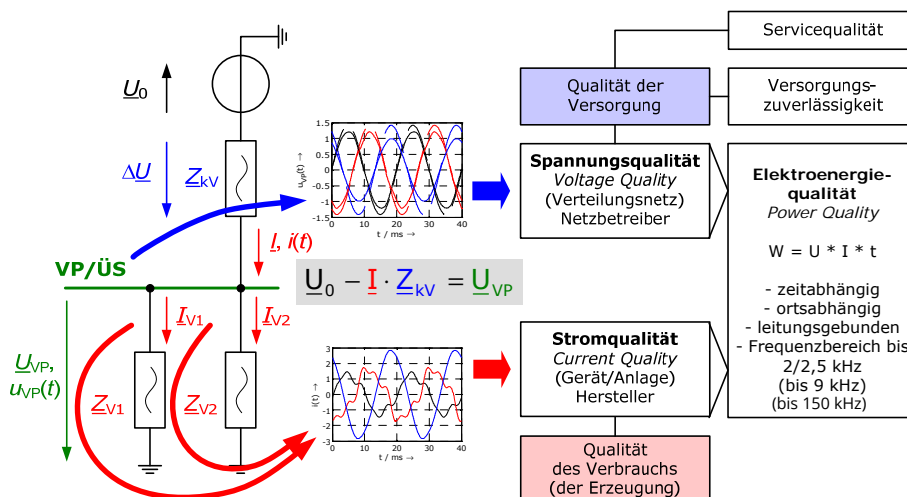
Grundlagen

Wichtige Qualitätsmerkmale und -kenngößen



Grundlagen

Begrifflichkeiten

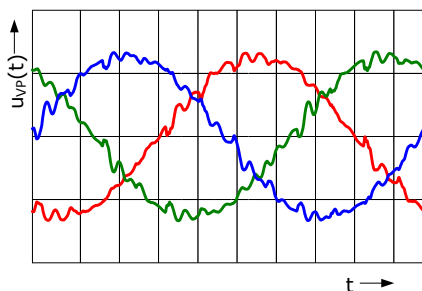


Grundlagen

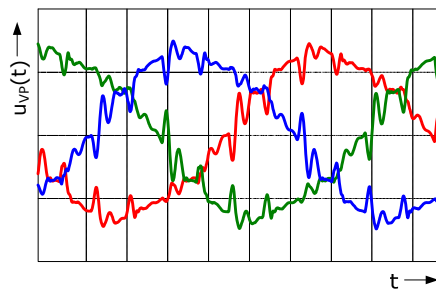
Beispiel zum Einfluss der Netzimpedanz

- Messungen an der NS-Einspeisesammelschiene eines Industriekunden bei näherungsweise konstanter Abnahme

Einspeisung aus dem leistungsstarken Netz (S_{KV} hoch)



Einspeisung aus der Netzersatzanlage (S_{KV} gering)

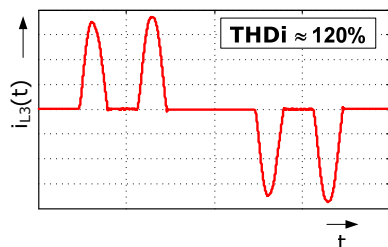


Grundlagen

Beispiel zum Einfluss der Ladetechnologie

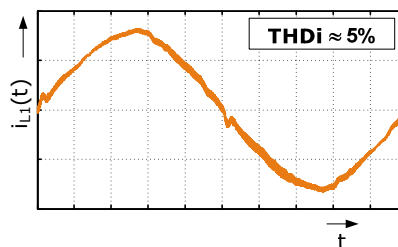
Ladegleichrichter mit klassischer Gleichrichtung

- Hoher Anteil an Harmonischen (kleiner 2 kHz)
- Praktisch keine Emission von Supraharmonischen größer 2 kHz



Ladegleichrichter mit aktiver Leistungsfaktorkorrektur

- Starke Reduktion der Harmonischen kleiner 2 kHz
- Erhebliche supraharmonische Emission größer 2 kHz (Schaltfrequenz bei 45 kHz)



Grundlagen

Elektromagnetische Verträglichkeit

Definition gemäß IEC

Die Fähigkeit einer Einrichtung oder eines Systems, in ihrer/seiner elektromagnetischen Umgebung **zufriedenstellend** zu **funktionieren**, ohne diese Umgebung, zu der auch andere Einrichtungen gehören, **unzulässig** zu **beeinflussen**.

Gesetzlich geregelt durch

Richtlinie 2014/30/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 26. Februar 2014 zur Harmonisierung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über die elektromagnetische Verträglichkeit

Erfordernis der Koordinierung von **Störfestigkeit** und **Störaussendung** auf Basis von **Verträglichkeitspegeln**

Angemessen begrenzte
Störaussendung

<

Verträglichkeits-
pegel

<

Angemessen hohe
Störfestigkeit

u.a. in AR-N 4100

Grundlagen

Rahmenbedingungen zur Begrenzung der Störaussendung

- Kleingeräte:
 - Einhaltung entsprechender Normen und Vorschriften
 - Konformitätsvermutung durch den Hersteller als Grundlage für die CE – Kennzeichnung



"Conformité Européenne"



"China Export"

Quelle: Wikipedia

Nicht jedes CE-Kennzeichen ist echt.

Nicht jedes Gerät mit (echtem) CE-Kennzeichen hält Grenzwerte ein.

- Großgeräte und Anlagen:
 - Einhaltung der relevanten TAB/TAR

Die vergleichsweise geringe Zahl an Störungen durch Netzzrückwirkungen zeigt, dass das Konzept der wahrscheinlichkeitsorientierten Verträglichkeitskoordination derzeit gut funktioniert.

Grundlagen

Produktqualität nach EN 50160

Gesetzlich geregelt durch

Richtlinie 85/374/EWG des Rates vom 25. Juli 1985
zur Angleichung der Rechts- und Verwaltungsvorschriften der
Mitgliedsstaaten über die Haftung für fehlerhafte Produkte

EN 50160 ist einzuhalten

- unter normalen Betriebsbedingungen an jeder Übergabestelle zwischen öffentlichem Netz und Kundenanlage

EN 50160

- ist **keine EMV-Norm** und darf damit nicht für die Konformitätsvermutung (CE-Kennzeichnung) entsprechend EMV-Direktive herangezogen werden
- gilt nicht innerhalb von Kundeninstallationen
- kann durch gesonderte vertragliche Vereinbarungen ganz oder teilweise außer Kraft gesetzt werden

Bei erfolgreicher Verträglichkeitskoordination ist die Wahrscheinlichkeit sehr hoch, dass auch die Randwerte nach EN 50160 eingehalten werden.

Herausforderungen

Übersicht

- Zunehmende Durchdringung mit verteilter Erzeugung (PV-Anlagen, Klein-BHKW, ...)
 - Anschluss über einphasige/dreiphasige Wechselrichter
- Zunehmende Nutzung elektrischer Speicheranlagen
 - Anschluss über einphasige/dreiphasige Umrichter
- Einführung neuer Gerätetechnologien (Ladegeräte für Elektrofahrzeuge, LED-Beleuchtung, ...) mit verbesserter Energieeffizienz
 - Zunahme von elektronischen Eingangsschaltungen mit aktivem Frontend bzw. aktiver Leistungsfaktorkorrektur



Herausforderungen

Potentieller Einfluss auf die Strom- und Spannungsqualität

1. Leistungsstarke einphasige Geräte mit langen Nutzungsdauern
 - Zunehmende **Unsymmetrien** und weniger effiziente Ausnutzung des Netzes
2. Anstieg der Anzahl von Netzfiltern mit kapazitivem Charakter
 - Erhöhung der Wahrscheinlichkeit von **Resonanzen** bei niedrigen Harmonischen
3. Zuschaltung einfacher leistungselektronischer Schaltungen
 - Hohe **Einschaltströme** bei gleichzeitiger Schaltung einer großen Anzahl gleichartiger Geräte (z.B. LED-Beleuchtung)
4. Leistungselektronik mit Schaltfrequenzen größer 2 kHz
 - Deutliche Zunahme der Verzerrung im Frequenzbereich 2 - 150 kHz (**Supraharmonische**)
 - Nicht zu vernachlässigende Emission bzw. Sensitivität im Frequenzbereich kleiner 2 kHz (**Harmonische**, Subharmonische, Gleichanteile)

Herausforderungen - Unsymmetrie

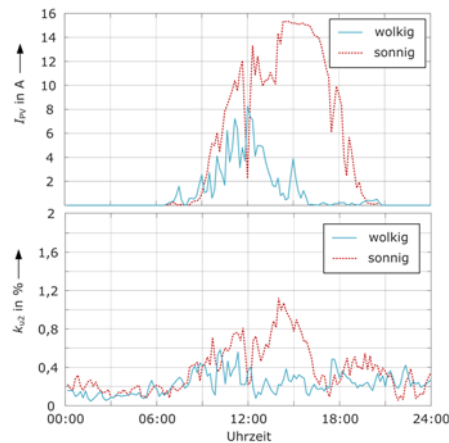
Typische Auswirkungen

- Erhöhung der Strombelastung und der Verluste in Leitungen und Transformatoren
 - Reduktion der Ausnutzung der Betriebsmittel um Faktor 2 bis 3
- Verluste in elektrischen Maschinen
 - Erhöhte thermische Beanspruchung und Verkürzung der Lebensdauer
- Rüttelmomente in elektrischen Maschinen
 - Erhöhte mechanische Beanspruchungen.
- Zusätzliche (nichtcharakteristische) harmonische Ströme bei netzgeführten Umrichtern

Herausforderungen - Unsymmetrie

Einfluss verteilter PV-Anlagen kleiner Leistung

- EFH-Siedlung mit 92 Hausanschlüssen und 43 PV-Anlagen (vornehmlich einphasige Anlagen unterschiedlicher Leistung)
- Gleichmäßige Verteilung der einphasigen PV-Leistung durch den Netzbetreiber
- Abgang mit Kabellänge von 500 m und 64 kVA installierter PVA-Leistung (16 Anlagen)

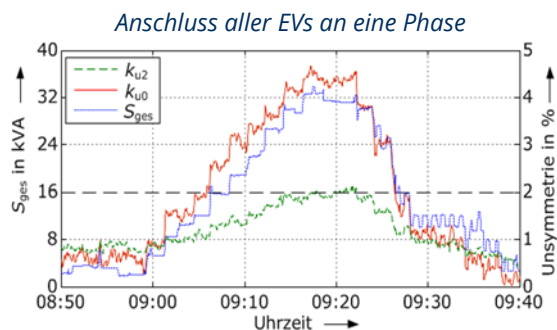


- Deutliche Erhöhung der Spannungsunsymmetrie am sonnigen Tag

Herausforderungen - Unsymmetrie

Einfluss von Elektrofahrzeugen (1)

- Zuschaltung von 9 EVs verteilt auf 5 Zweifamilienhäuser (eine gemeinsame Leitung vom Kabelverteiler)
- Städtisches NS-Netz mit sehr guten Kurzschlussleistungsverhältnissen

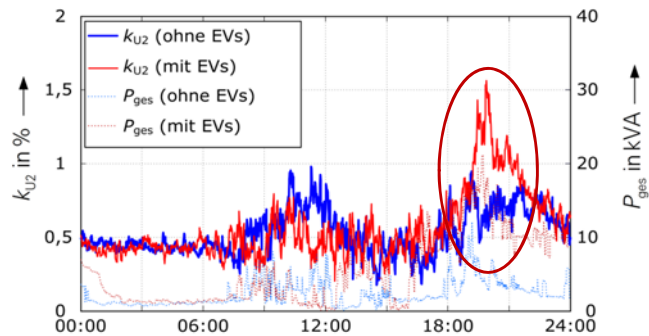


- Grenzwertüberschreitung bereits bei 9 EVs

Herausforderungen - Unsymmetrie

Einfluss von Elektrofahrzeugen (2)

Gleichmäßige Aufteilung der Ladepunkte auf alle Phasen,
Zufällige Zu-/Abschaltung entsprechend Nutzerverhalten



- Deutlicher Anstieg der Spannungsunsymmetrie in den Abendstunden trotz gleichmäßiger Phasenaufteilung der 9 Ladepunkte

Herausforderungen - Verzerrung

Definitionen

Niederfrequente Verzerrung (kleiner 2 kHz)

Ganzzahlige bzw. nichtganzzahlige
Vielfache der Netzfrequenz

- Subharmonische
- Harmonische
(Oberschwingungen)
- Zwischenharmonische

Höherfrequente Verzerrung (2 kHz .. 150 kHz)

Unabhängig von
der Netzfrequenz

- Supraharmonische
 - *Supra = beyond (jenseits)*
 - *Erstmalige Erwähnung zum IEEE PES GM 2013*



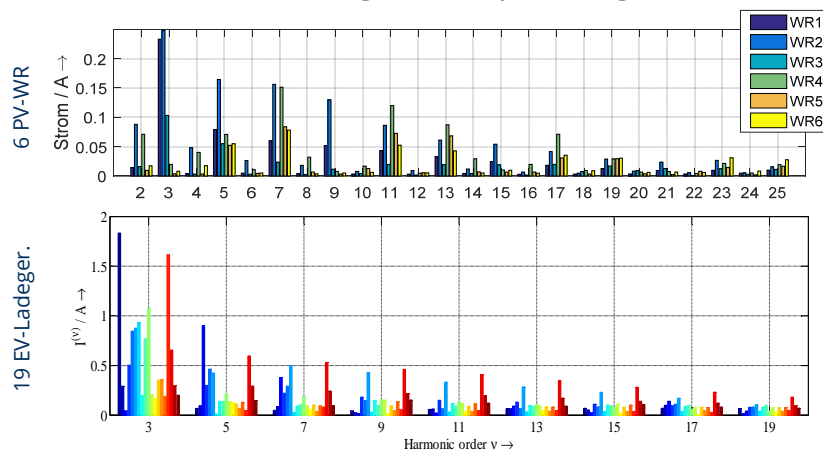
Herausforderungen - Harmonische Typische Auswirkungen

- Verkürzung der Lebensdauer von Kondensatoren und Motoren infolge thermischer Zusatzlast
- Akustische Störungen bei Betriebsmitteln mit elektromagnetischen Kreisen (Drosseln, Transformatoren und Motoren)
- Einkopplung in nachrichten- und informationstechnische Einrichtungen
- Höhere Neutralleiterbelastung, erhöhte Netzverluste
- Funktionsstörungen bei elektronischen Geräten (z.B. durch doppelte Nulldurchgänge)
- Fehlfunktion von Schutzeinrichtungen
- Erschwerung der Erdschlusskompensation in RESPE-Netzen



Zerstörter Zwischenkreis-kondensator einer USV

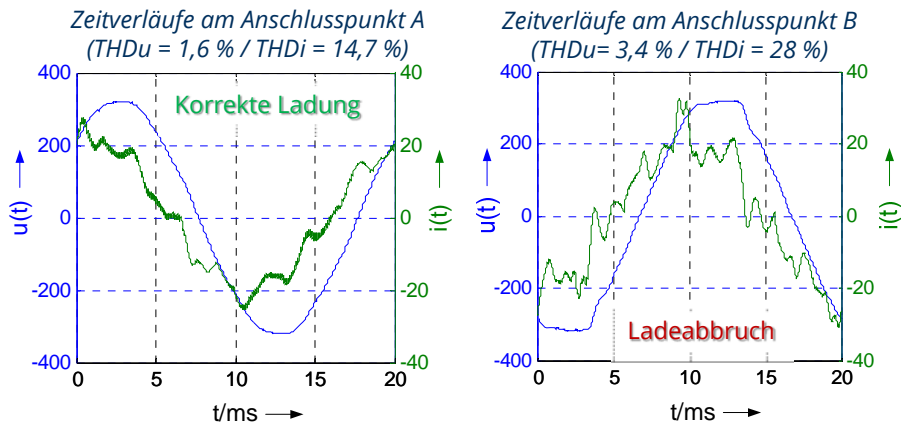
Herausforderungen - Harmonische Emission bei sinusförmiger Netzspannung



- Zumeist geringe, aber signifikante Pegel
- Höhere Pegel bei (On-Board) Ladegeräten für Elektrofahrzeuge

Herausforderungen - Harmonische

Einfluss verzerrter Netzspannung (Elektrofahrzeug)

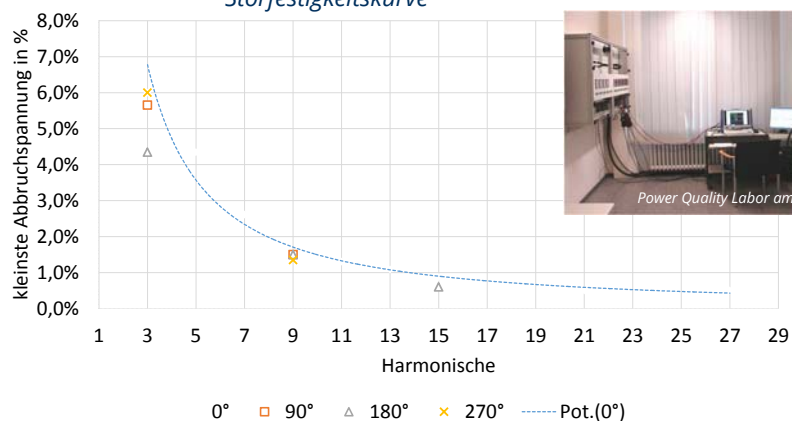


Deutliche Abhängigkeit der Emission von der Spannungsverzerrung

Herausforderungen - Harmonische

Einfluss verzerrter Netzspannung (Elektrofahrzeug)

Störfestigkeitskurve



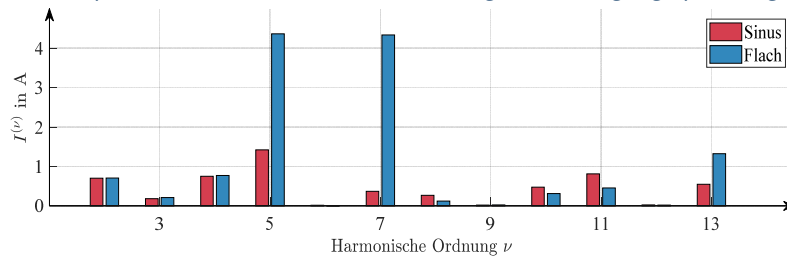
- Erzeugung einzelner nullsystembildender Harmonischer im Labor
- Störfestigkeit nimmt ungefähr proportional zu $1/f$ ab

Herausforderungen - Harmonische

Einfluss verzerrter Netzspannung (Schnellladesäule)

- Messung einer Schnellladesäule ($S_r = 75 \text{ kW}$) gemessen bei ca. 25 kW

Spektrum bei verschiedener Verzerrung der Versorgungsspannung



- Deutliche Anteile bei geradzahigen Harmonischen
- Hohe Sensitivität gegenüber der Netzverzerrung

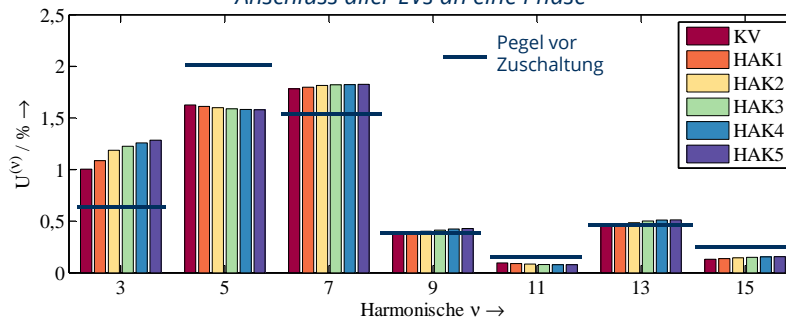
“Neue” Emissionscharakteristika
“Alte” Methoden der Grenzwertsetzung noch geeignet?

Herausforderungen - Harmonische

Ergebnisse einer Feldstudie zur verteilten Ladung

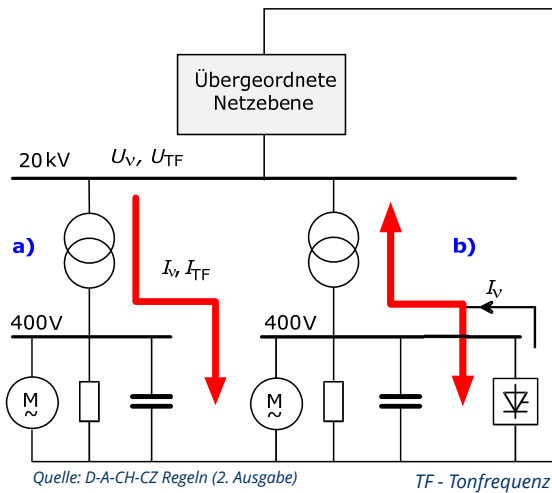
- Zuschaltung von 9 EVs verteilt auf 5 Zweifamilienhäuser (eine gemeinsame Leitung von einem Kabelverteiler)
- Absolute Dominanz der Stromharmonischen durch die EVs
- Vergrößerung oder Verringerung je nach Charakter der vorhandenen Emission durch weitere Geräte

Anschluss aller EVs an eine Phase



Herausforderungen - Resonanzen

Typische Resonanzsituationen



a) Reihenresonanz

- Anregung durch resonanzfrequente Spannungen im MS-Netz

b) Parallelresonanz

- Anregung durch resonanzfrequente Ströme im NS-Netz

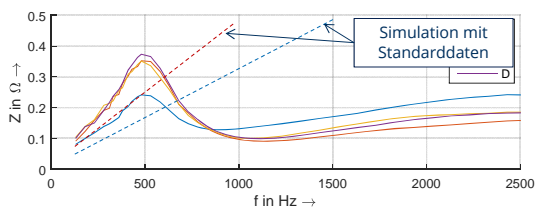
Typische Auswirkungen

- Hohe Oberschwingungsströme durch Kondensatoren
- Hohe Oberschwingungsspannungen im NS-Netz

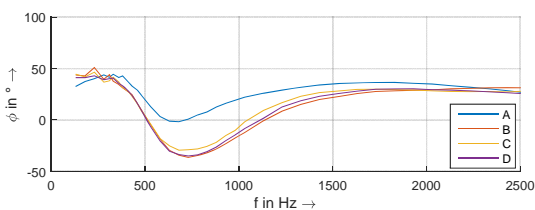
Herausforderungen - Resonanzen

Resonanzerscheinungen in einem öffentlichen NS-Netz

Frequenzabhängige Netzimpedanz in einem städtischen NS-Netz



- Modernes Wohngebiet mit 430 Wohneinheiten
- Ausgeprägte Parallelresonanz bei ca. 500 Hz (Serienresonanz aus Sicht des MS-Netzes)



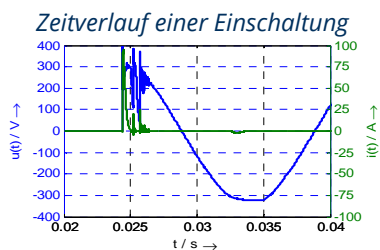
- Standardlastmodelle für Oberschwingungsanalyse ungeeignet

Herausforderungen - Einschaltströme Ausgangssituation

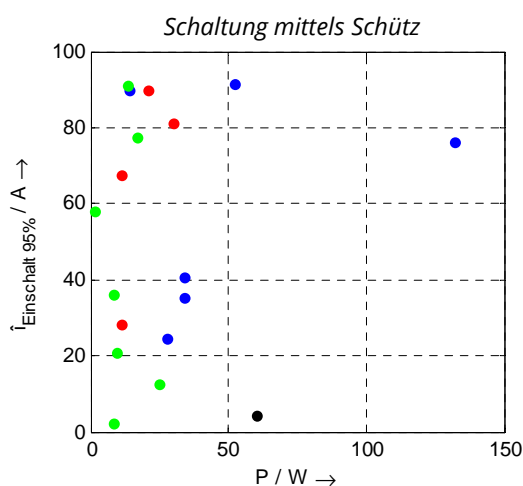
- Sicherungsauslösungen bei Zuschaltung nach Wechsel auf LED-Beleuchtung
- Verschweißen von Schaltkontakten bei Lebensdauer-untersuchungen an LED-Lampen



- Vergleich des Einschaltverhaltens verschiedener Lampentechnologien
- Automatisierte Zu-/Abschaltung (100 Schaltungen je Prüfling)



Herausforderungen - Einschaltströme Statistische Auswertung der Spitzenwerte

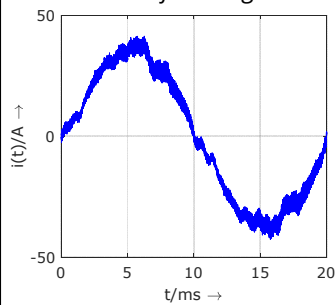


- „Schalterprellen“ führt meist zu höheren Spitzenwerten des Einschaltstromes
- Deutliche Abhängigkeit von Netzimpedanz, Einschaltmoment, Hersteller
- Sehr niedrige Einschaltströme der „klassischen“ Glühlampe

Glühlampe
Kompaktleuchtstofflampen
LED-Lampen (retrofit)
LED-Leuchten (zur Installation)

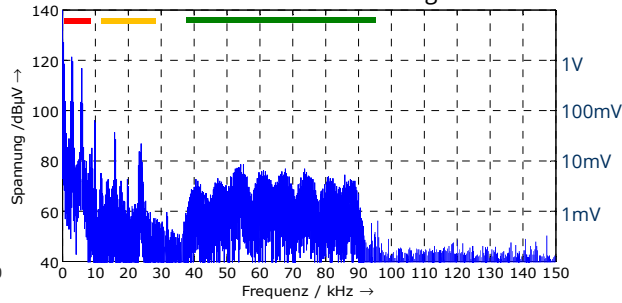
Herausforderungen - Supraharmonische Typische Verursacher

Ladevorgang eines
Elektrofahrzeugs



Emission bei Schalt-
frequenz deutlich
erkennbar
(ca. 1,6 A bei 10 kHz)

Spannung am Anschlusspunkt einer
1 MW Photovoltaik-Anlage



9 große
Wechselrichter
($S_r = 100 \text{ kW}$)

10 kleine
Wechselrichter
($S_r < 10 \text{ kW}$)

Schmalband-
PLC für Zähler-
auslesung

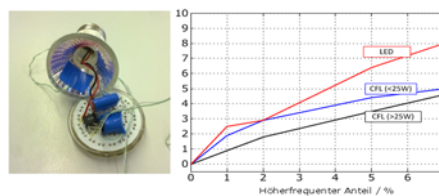
Herausforderungen - Supraharmonische Typische Auswirkungen

- Unerwünschte Geräusche durch mechanische Resonanzen
(z.B. in Schaltnetzteilen, Herdplatten, Ladegeräten von Elektrofahrzeugen)
- Reversible Funktionsstörungen an Geräten, vornehmlich mit Touchbedienung
(z.B. Kochfelder, Touchdimmer-Lampen, ...)
- Fehlerhafte Energiezählung durch Smartmeter
- Zusätzliche thermische Belastung von Bauelementen
(z.B. Zwischenkreiskondensatoren in Energiesparlampen)
- Störende Beeinflussung von Schmalband PLC-Kommunikation

Akustische Geräusche
bei Fahrzeugladung



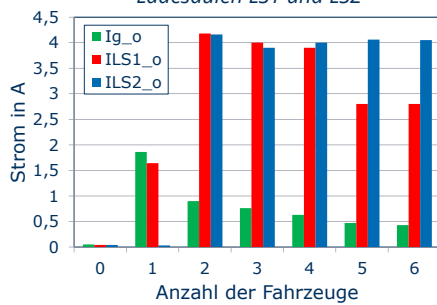
Temperaturerhöhung bei Lampen



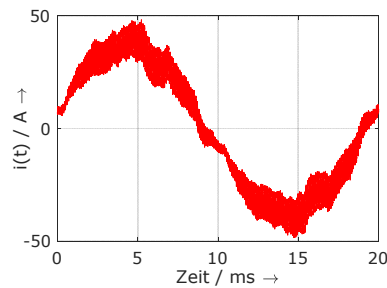
Herausforderungen - Supraharmonische Interaktion bei zentraler Ladung von Elektrofahrzeugen

- Schrittweise Zuschaltung von 6 Elektrofahrzeugen (EV) gleichen Typs an nebeneinander angeordneten Ladesäulen (Schaltfrequenz: 10 kHz)

Gesamtstrom (Abgang) und Ströme der Ladesäulen LS1 und LS2



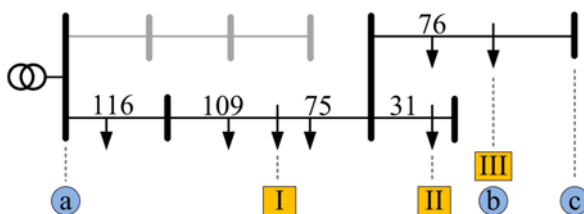
Zeitverlauf des Stromes der Ladesäule LS1 (2 EV)



- Erhebliche Abhängigkeit des Stromes bei 10 kHz von der Anzahl gleichzeitig ladender Fahrzeuge

Herausforderungen - Supraharmonische Fallstudie: Problemstellung

- Kleinstadt mit ca. 7000 Einwohnern
- Plötzlich auftretende Kundenbeschwerden:
 - I. Kaffeemaschine mahlt Kaffee, gibt aber nur heißes Wasser
 - II. Haartrockner beim Friseur schalten unwillkürlich (40x/Tag)
 - III. Steuerung einer CNC-Fräse zeigt Fehlfunktionen
 ? Unangenehme Geräuschentwicklung bei einem LCD-TV
- Messungen gemäß EN 50160: Spannungsqualität eingehalten

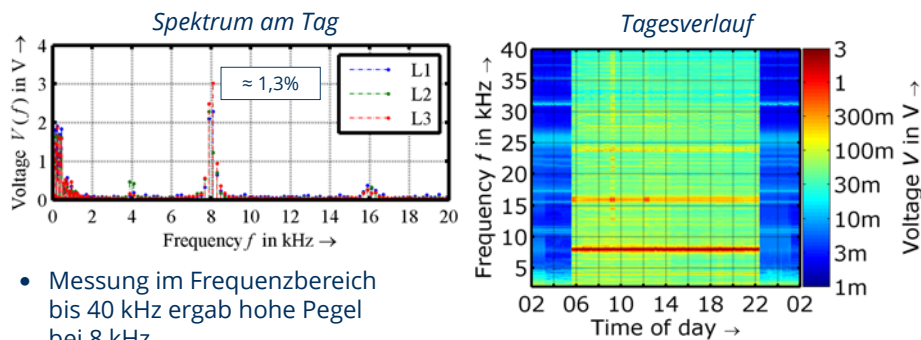


Messorte:

- a) NS-Sammelschiene
- b) Anschlusspunkt der CNC-Fräse
- c) Verteilerkasten am Abgangsende

Herausforderungen - Supraharmonische

Fallstudie: Messergebnisse



- Messung im Frequenzbereich bis 40 kHz ergab hohe Pegel bei 8 kHz
- Indikativer Grenzwert von $u = 0,3\%$ deutlich überschritten
- Emission nur wochentags zwischen 6:00 Uhr und 22:00 Uhr

Quelle ist der ungefilterte Umrichter einer CNC-Fräse

Fazit

Wichtige Erkenntnisse

1. Neue Gerätetechnologien haben einen nachweisbaren Einfluss auf die Strom- und Spannungsqualität.
2. Der Einfluss kann positiv oder negativ sein. Dies kann sich langfristig jedoch ändern!
3. Planungsgrundsätze sollten zukünftig Strom- und Spannungsqualität angemessen berücksichtigen!
4. Die (praktisch) störungsfreie Koexistenz mit anderen, bereits vorhandenen, Geräten ist zu beachten.

Kein akuter Grund zur Sorge.
JEDOCH: Konstruktive Diskussion zur angemessenen Begrenzung der Netzurückwirkungen neuer Gerätetechnologien ist notwendig!

Fazit

Handlungsempfehlungen

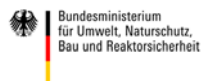
1. Unsymmetrie:
 - Begrenzung der Einzelleistungen für einphasig anzuschließende Geräte auf 3,7 kVA
2. Harmonische:
 - Überlegungen zur zusätzlichen Vorgabe von Bereichen einer günstigen Eingangsimpedanz (positive Auswirkung auch hinsichtlich Resonanzen)
3. Supraharmonische:
 - Fertigstellung des Normungsrahmens mit angemessenen Grenzwerten

Wenn sich jedes Gerät/jede Anlage netzverträglich verhält sind keine teuren Zusatzaufwendungen für die nachträgliche Reduktion unangemessener Störemissionen notwendig.

(Vorbeugen ist besser als Heilen)

Vielen Dank für die Aufmerksamkeit !

Gefördert durch:



In Kooperation mit:



Kontakt:
Dr.-Ing. Jan Meyer
TU Dresden - IEEH
+49 351 463 35102
jan.meyer@tu-dresden.de

