



Abschlussbericht Studie Unsymmetrie in der Niederspannungsebene

Maximal zulässiger Unsymmetrie-Grenzwert der Bemessungsscheinleistung beim Anschluss und Betrieb von elektrischen Verbrauchsmitteln, Ladeeinrichtungen für Elektrofahrzeuge, Erzeugungsanlagen und Speichern für Kundenanlagen am öffentlichen Niederspannungsnetz

November 2021

Autoren:

**Forschungsgemeinschaft für Elektrische Anlagen
und Stromwirtschaft e.V. (FGH e.V.)**

Alexander Vanselow
Dr.-Ing. Simon Krahl

**RWTH Aachen University
Institut für Elektrische Anlagen und Netze,
Digitalisierung und Energiewirtschaft (IAEW)**

Marian Meyer
Sandor Simon
Markus Stroot
Univ.- Prof. Dr. Ing. Albert Moser
Univ.- Prof. Dr. sc. Andreas Ulbig

**Technische Universität Braunschweig
elenia Institut für Hochspannungstechnik
und Energiesysteme**

Cornelius Biedermann
Till Garn
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Bernd Engel

**Technische Universität Dresden
Institut für Elektrische Energieversorgung
und Hochspannungstechnik IEEH**

Dr.-Ing. Jan Meyer
Friedemann Möller

**Technische Universität München
TUM School of Engineering and Design
Professur für Elektrische Energieversorgungsnetze**

Joachim Przibylla
Mateo Lippich Golobart
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Rolf Witzmann

Inhalt

I. Vorwort	13
II. Management Summary	15
1. Motivation & Zielsetzung	17
2. Begriffsdefinitionen	18
3. Auswahl der Auswertekenngrößen	19
3.1 Stromkenngrößen.....	19
3.2 Spannungskenngrößen	19
4. Grundlagen der Spannungsunsymmetrie	22
4.1 Koordinierung	22
4.2 Beziehung zwischen unsymmetrischem Leistungsanteil und Spannungsunsymmetrie ..	24
4.3 Überlagerung und Bewertung der Beiträge zur Spannungsunsymmetrie	24
4.3.1 Symmetrische Bedingungen / ohne Hintergrundpegel.....	24
4.3.2 Unsymmetrischen Bedingungen / mit Hintergrundpegel	24
5. Inhalt & Aufbau der Studie	26
6. Metastudie Unsymmetrie	28
6.1 Vorgehen.....	29
6.2 Ergebnisse	29
6.2.1 Allgemeine Analyse und Schlussfolgerungen für die Studie	29
6.2.2 Allgemeine Erkenntnisse zur Unsymmetrie	30
6.2.3 Elektromobilität.....	32
6.2.4 Wärmepumpen.....	33
6.2.5 Photovoltaik und Heimspeicher	33
6.3 Leistungsgrenzwerte International	34
7. Messung zur Untersuchung unsymmetrisch betriebener Geräte	35
7.1 Charakterisierung unsymmetrisch betriebener Geräte- Gerätecatalog.....	35
7.2 Lastprofilmessung	36
7.2.1 Erzeuger	36
7.2.2 Messung von Elektrofahrzeugen	37
7.2.3 Messung von Haushaltsgeräten	39
8. Analyse der aktuellen Pegel der Unsymmetrie	42
8.1 Vorgehensbeschreibung.....	42
8.2 Kategorisierung der untersuchten Niederspannungsnetze.....	42
8.3 Auswertung der Sommermessung.....	44
8.3.1 Strombasierte Kenngrößen	44
8.3.2 Spannungsbasierte Kenngrößen.....	49
8.4 Vergleich zwischen Sommer- und Wintermessung.....	53
8.4.1 Strombasierte Kenngrößen	53
8.4.2 Spannungsbasierte Kenngrößen.....	55
8.5 Zusammenfassung	56

9. Dokumentation der Erfahrungen von Netzbetreibern	57
9.1 Netze mit hohem Anteil unsymmetrisch angeschlossener Geräte.....	57
9.2 Beobachtete Auffälligkeiten hinsichtlich der Unsymmetrie	57
9.3 Maßnahmen zur Reduzierung negativer Auswirkungen durch Unsymmetrie	58
9.4 Beobachtete Auffälligkeiten anderer Netzrückwirkungen	58
10. Einfluss typischer Kombinationen unsymmetrisch betriebener Geräte	59
10.1 Vorgehensbeschreibung	59
10.2 Auswertung von Elektrofahrzeugmessungen.....	60
10.2.1 Strombasierte Kenngrößen	61
10.2.2 Spannungsunsymmetrie.....	64
10.3 Auswertung von Feldmessungen	65
10.3.1 Auswahl an Kategorien	65
10.3.2 Strombasierte Kenngrößen	66
10.3.3 Spannungsunsymmetrie.....	69
10.4 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen.....	71
11. Netzimpedanzmessungen	72
11.1 Messsystem und Messprinzip	72
11.2 Auswahl der Niederspannungsnetze	72
11.3 Messergebnisse	73
12. Simulationen	76
12.1 Eingangsdaten	76
12.1.1 Lastprofilgenerator	76
12.1.2 Synthetische Erzeugung der Elektromobilität Ladezeitreihen und Standzeiten...78	
12.1.3 Modellierung der Wärmepumpenzeitreihen	80
12.1.4 Erweiterung und Plausibilisierung der Musternetze	81
12.2 Durchdringungsfaktoren	86
12.3 Methodik	87
12.3.1 Variation unsymmetrische Anschlussleistung.....	87
12.3.2 Heimspeicher	88
12.3.3 Phasenverteilung	89
12.3.4 Durchführung der Monte-Carlo-Simulationen	89
12.4 Gleichzeitigkeitsfaktoren	90
12.4.1 Wärmepumpen.....	91
12.4.2 Elektrofahrzeuge	92
12.5 Einfluss von unsymmetrischen Ladevorgängen.....	93
12.5.1 Optimierung durch intelligente Phasenverteilung.....	100
12.5.2 Zusammenfassung.....	102
12.6 Einfluss von Wärmepumpen.....	103
12.7 Einfluss von unsymmetrischer PV-Einspeisung.....	104
13. Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen.....	108
13.1 Anpassung des zulässigen Unsymmetrie-Grenzwertes der Bemessungsscheinleistung beim Anschluss und Betrieb von elektrischen	

Verbrauchsmitteln, Erzeugungsanlagen und Speichern für Kundenanlagen am öffentlichen Niederspannungsnetz.....	108
13.2 Weitere Handlungsempfehlungen	110
13.2.1 Netzbetreiber.....	110
13.2.2 Gerätehersteller	111
13.2.3 Sonstiges	112
14. Ausblick.....	113
Literaturverzeichnis.....	114
Anhänge	118
A. Anhang.....	118
A.I. Quellenliste Metastudie Unsymmetrie.....	118
A.II. Ergänzende Abbildungen zur Analyse des aktuellen Pegels der Unsymmetrie.....	120
A.III. Formular zur Erfassung von Auffälligkeiten hinsichtlich der Strom- und Spannungsqualität.....	123
A.IV. Tabelle Übersicht der Anzahl angeschlossenen Haushalte, Ladepunkte und PV-Anlagen bei KVS und TSS.....	124
A.V. Im LPG verwendete Ausstattungsgrade	124
A.VI. Boxplot der Null- zu Mitsystem Verhältnisse der mittels Netzimpedanzmessung untersuchten Niederspannungsnetze	125
A.VII. Interpolation der Simualtionsergebnisse Tabelle 12-13 auf abweichende Durchdringungsgrade und ableitung eines kritischen Grenzszenarios	126