

Max Domagk

Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik
Lehrstuhl für Elektroenergieversorgung

Ergebnisse aus aktuellen Studien

Unsymmetrie, Harmonische und Emissionen von Kundenanlagen

6. Fachtagung Netzurückwirkungen // 21. September 2023

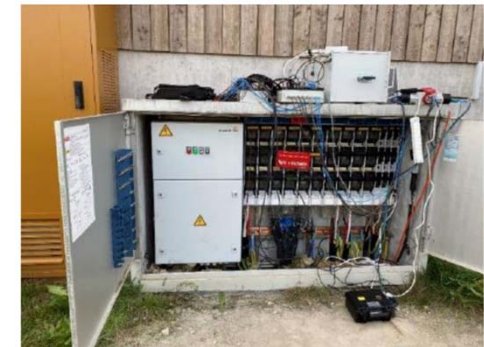
Einleitung

Weiterentwicklung von Normen und Richtlinien auf Basis von Messungen (u.a. Deutschland und D-A-CH-CZ)

Durchführung und Auswertung vieler Messkampagnen zu verschiedensten Fragestellungen
(u.a. Gleichzeitigkeit/Diversität von Emissionen, Ausnutzung von Grenzwerten, Einfluss neuer Technologien, ...)

Ergebnisse aus aktuellen Studien:

- Unsymmetrie
- Harmonische
- Emission von Kundenanlagen



Unsymmetrie

Unsymmetrie

FNN-Studie „Unsymmetrie“

Motivation:

- Analyse aktueller Pegel der Spannungsunsymmetrie in deutschen Niederspannungsnetzen
- Bewertung des **tatsächlichen Beitrags** zur Unsymmetrie für verschiedene Kombinationen aus Geräten/Anlagen

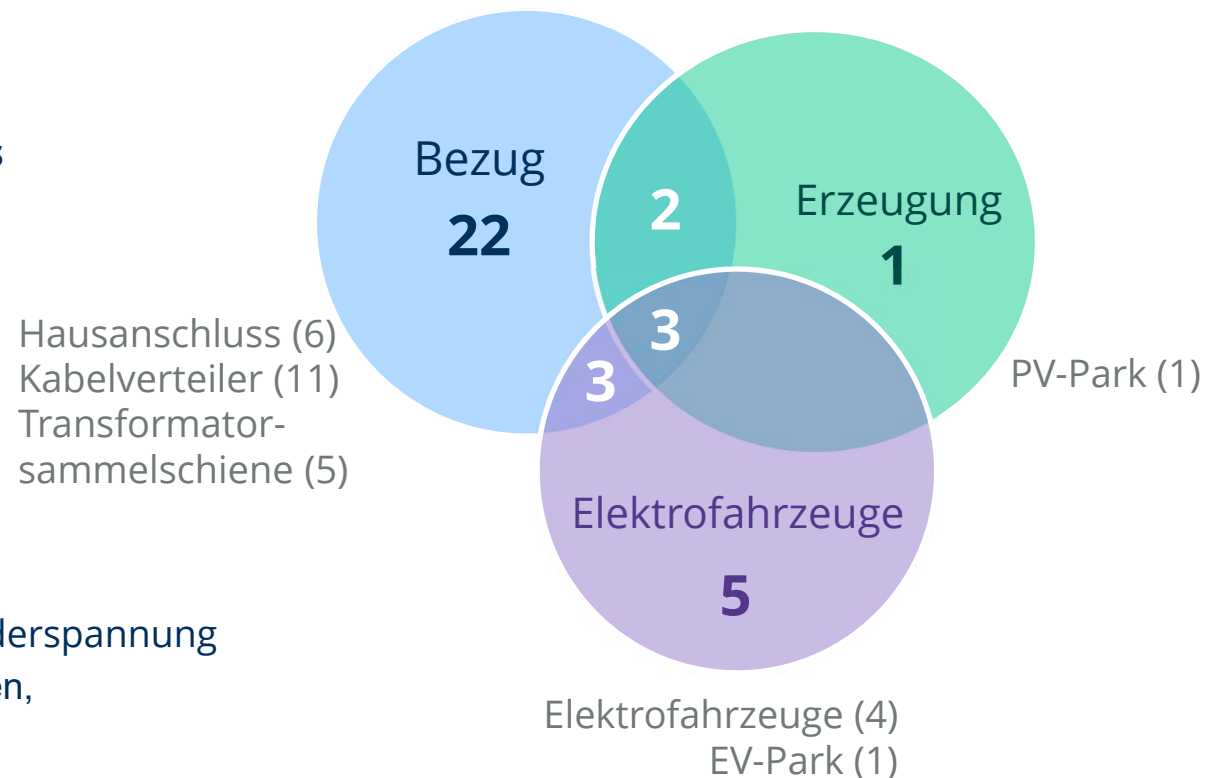
Umfang:

- 32 Netzbetreiber
- 150 Messungen (92 Sommer und 58 Winter)

Bewertung des tatsächlichen Beitrags:

- Analyse des Einflusses unsymmetrisch betriebener Geräte/Anlagen in der Niederspannung
- **36 Feldmessungen** an Elektrofahrzeugen, PV-Park, zentraler Ladeinfrastruktur

Feldmessungen unsymmetrisch betriebener Geräte/Anlagen



Unsymmetrie

Beitrag zur Spannungsunsymmetrie

Anforderungen

- Bewertung der Stromunsymmetrie
- Beitrag zur Spannungsunsymmetrie
- Vergleich mit dem Grenzwert nach AR-N 4100
- *(Gleitender) 1-Minuten-Mittelwert*
- 95-%-Quantil und 99-%-Quantil über den gewählten Messzeitraum (z. B. Ladevorgang bzw. 1 Woche)

Ausgewählte Kenngrößen

- Unsymmetrischer Leistungsanteil
- Symmetrischer Leistungsanteil
- Beitrag zur Spannungsunsymmetrie
 - Ohne Hintergrundpegel
(keine anderen Geräte/Anlagen, symmetrische Versorgungsspannung)
 - Mit Hintergrundpegel
(Berücksichtigung möglicher Kompensationseffekte)

$$S_{un2}$$

$$S_{bal}$$

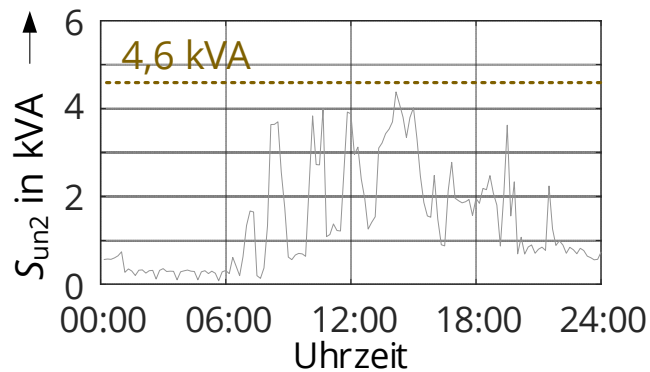
$$k_{u2i} = \frac{S_{un2}}{S_{kV}}$$

$$k_{u2i\text{ant}}$$

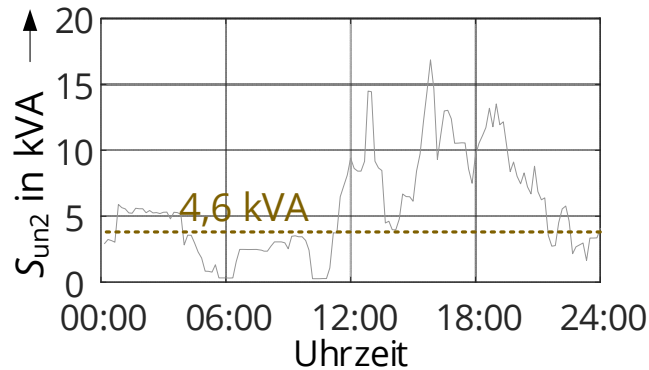
Unsymmetrie

Unsymmetrischer Leistungsanteil

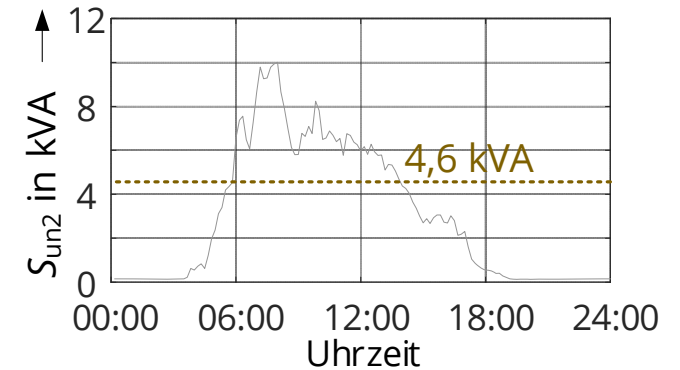
Tagesgänge des unsymmetrischen Leistungsanteils ausgewählter Kategorien



Hausanschluss mit PV-Anlage



EV-Park
($S_{kV} = 1,25 \text{ MVA}$)

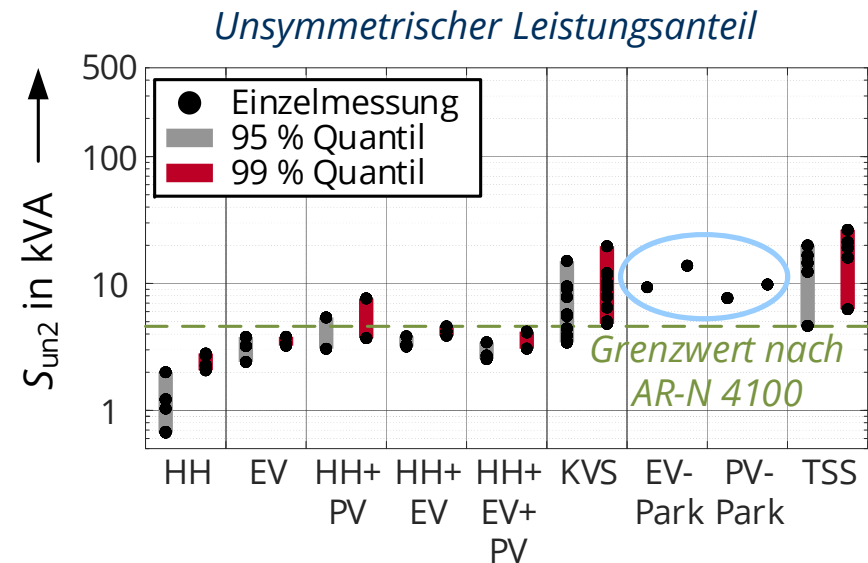
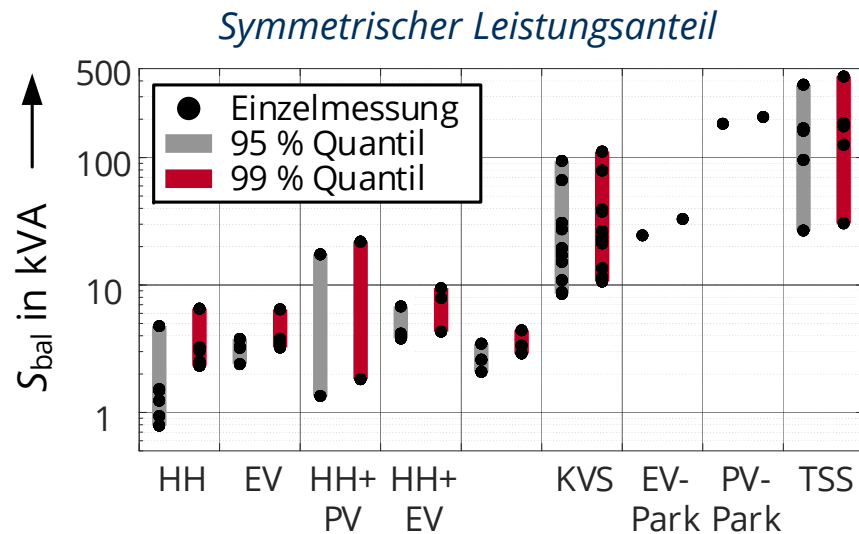


PV-Park
($S_{kV} \approx 14 \text{ MVA}$)

- Signifikanter Einfluss der Tageszeit auf den unsymmetrischen Leistungsanteil
- Kombination von Haushalt und PV-Anlage: PV-Anlage dominiert unsymmetrischen Leistungsanteil
- Überschreitung des **Schieflast-Grenzwertes** (VDE AR-N 4100) bei EV-Park und PV-Park

Unsymmetrie

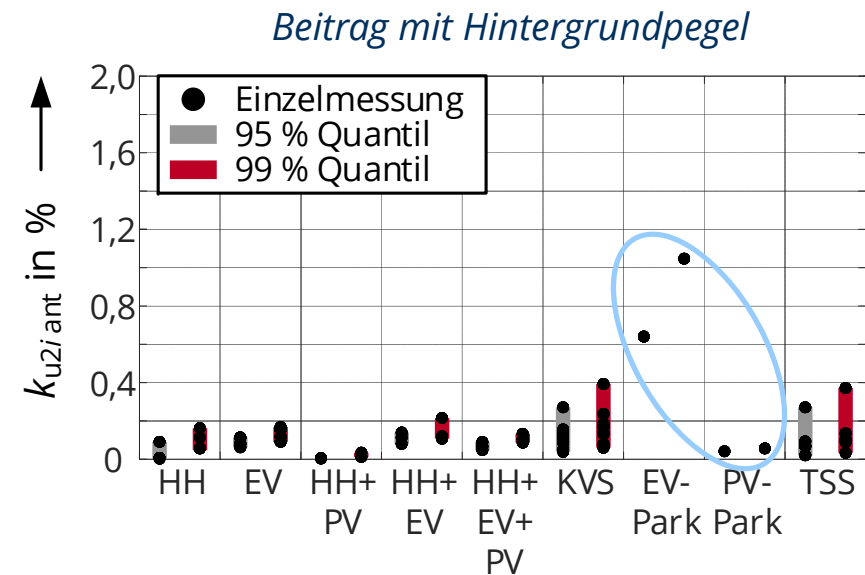
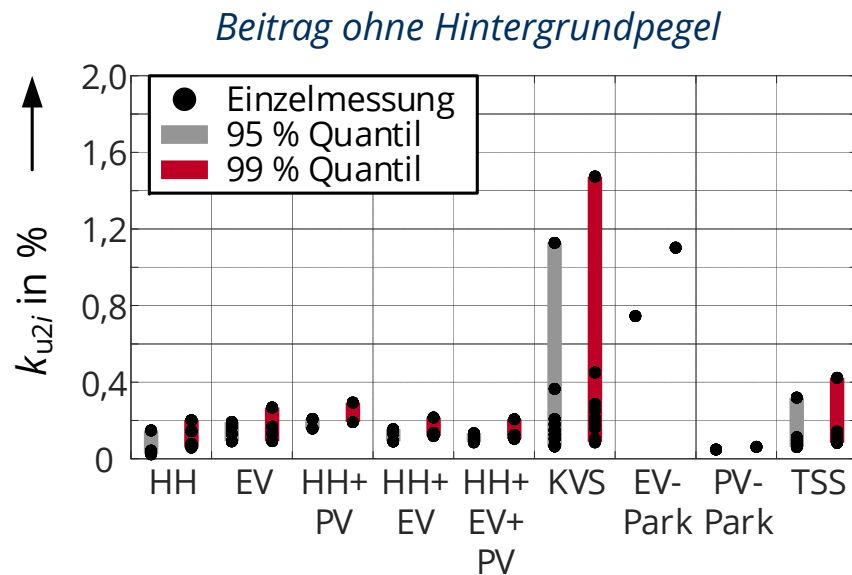
Symmetrischer und unsymmetrischer Leistungsanteil



- Symmetrischer und unsymmetrischer Leistungsanteils nehmen mit der Anzahl an Anlagen/Geräten zu
- Bei Kombination HH+PV sowie HH+EV teilweise Überschreitung des Grenzwertes nach VDE AR-N 4100

Unsymmetrie

Beitrag zur Spannungsunsymmetrie



- Zufällige Kompensationseffekte bei einzelnen Messungen nachweisbar
- Geringer Beitrag zur Spannungsunsymmetrie bei PV-Park, hoher Beitrag bei EV-Park bei ähnlichem S_{un2} (und deutlich unterschiedlicher KSL für EV-Park = 1,25 MVA und PV-Park \approx 14 MVA)

Unsymmetrie

Zwischenfazit

- Der tatsächliche Beitrag zur Spannungsunsymmetrie ist von der Kurzschlussleistung am Anschlusspunkt abhängig.
- Zufällige Kompensationseffekte zwischen Hintergrundpegel und Beitrag eines Gerätes / einer Anlage zur Spannungsunsymmetrie sind selten.
- Für eine bessere Ausnutzung der Aufnahmekapazität des Netzes wird empfohlen, Grenzwerte für den unsymmetrischen Leistungsanteil bei größeren Anlagen (z.B. PV-Park, EV-Park) in Abhängigkeit der Kurzschlussleistung am Anschlusspunkt festzulegen.

Harmonische

Harmonische

FNN-Studie „Anwendungsregeln“

Motivation:

- Weiterentwicklung der Anwendungsregeln (VDE AR-N 4100/4110/4120)
- Annahmen auf Realitätsnähe prüfen (u.a. Gleichzeitigkeit, Überlagerung, Ausbreitung)

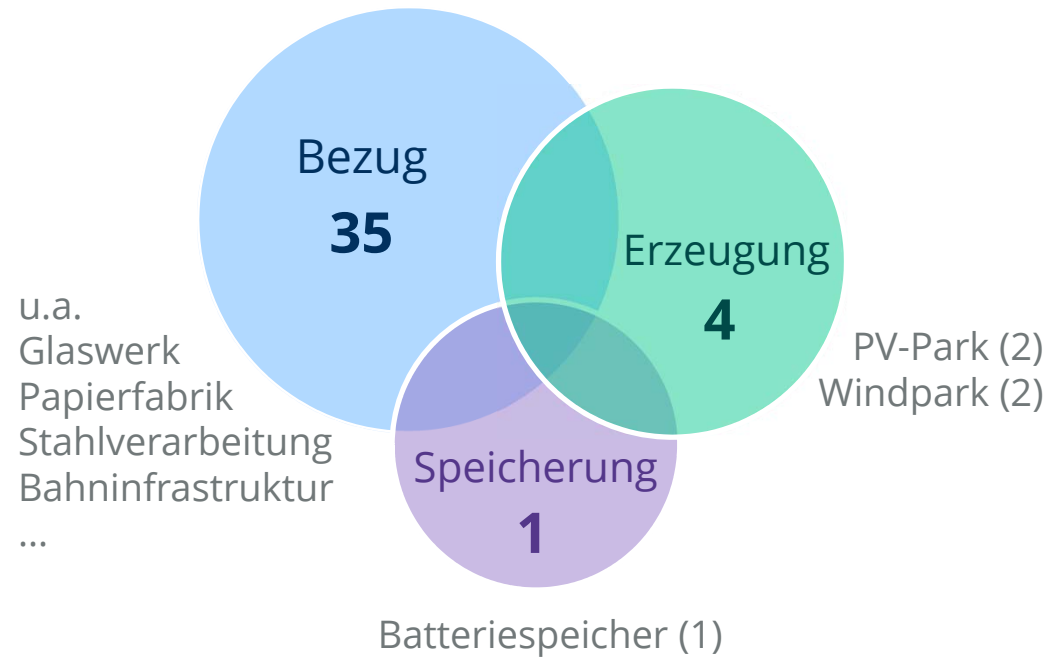
Umfang:

- 3 Messkampagnen (von 2020 bis 2023)
- 32 Netzbetreiber
- 104 Messorte

Messungen:

- Mittelspannung (MS): 40 Kundenanlagen
- Niederspannung (NS): 66 unterlagerte Netze

Arten der MS-Kundenanlagen



Harmonische Planungspegel

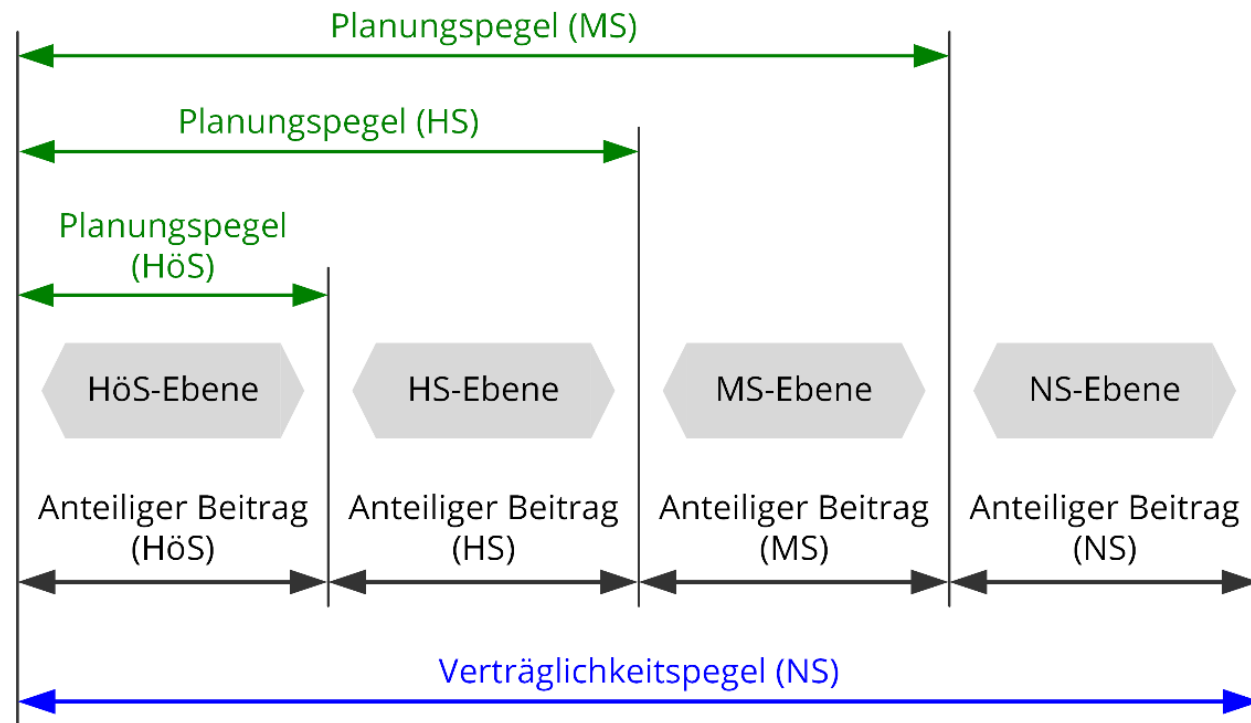
Prinzip der **Aufteilung des Verträglichkeitspegels** auf die Netzebenen

HöS ... Höchstspannung

HS ... Hochspannung

MS ... Mittelspannung

NS ... Niederspannung



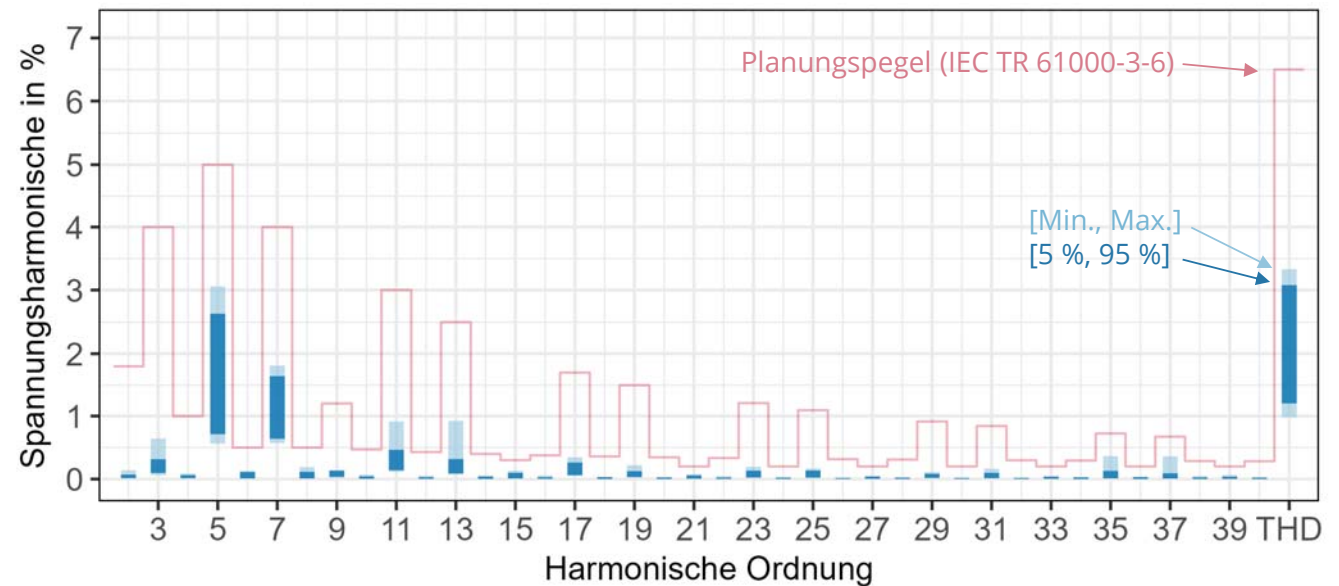
- Einhaltung der **Planungspegel** bei den Messungen der harmonischen Spannungen ist wichtig, um die erforderliche Reserve zur Koordination der elektromagnetischen Verträglichkeit in unterlagerten Netzebenen zu gewährleisten.

Harmonische

Ausnutzung der Planungspegel

- Messung an Anschlusspunkten von **40 MS-Kundenanlagen**
- Bewertung der Spannungsharmonischen (wöchentliche 95%-Quantile der 10-Minuten-Mittelwerte)
- Keine Überschreitungen des Planungspegels

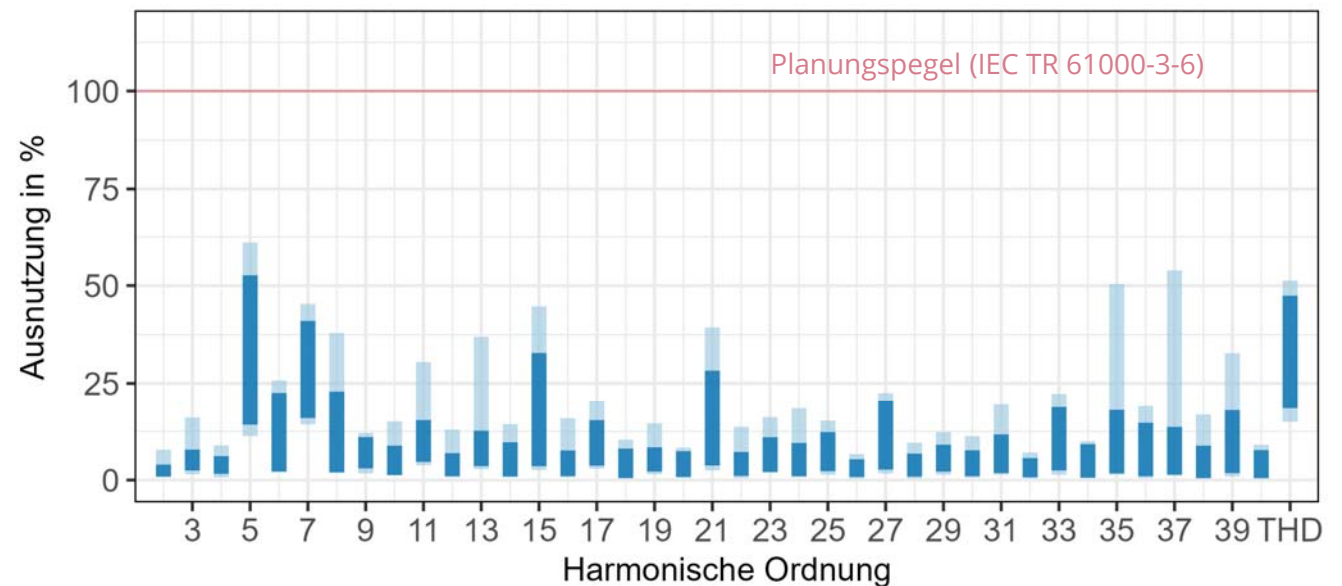
Spannungsharmonische am Anschlusspunkt der MS-Kundenanlagen



Harmonische Ausnutzung der Planungspegel

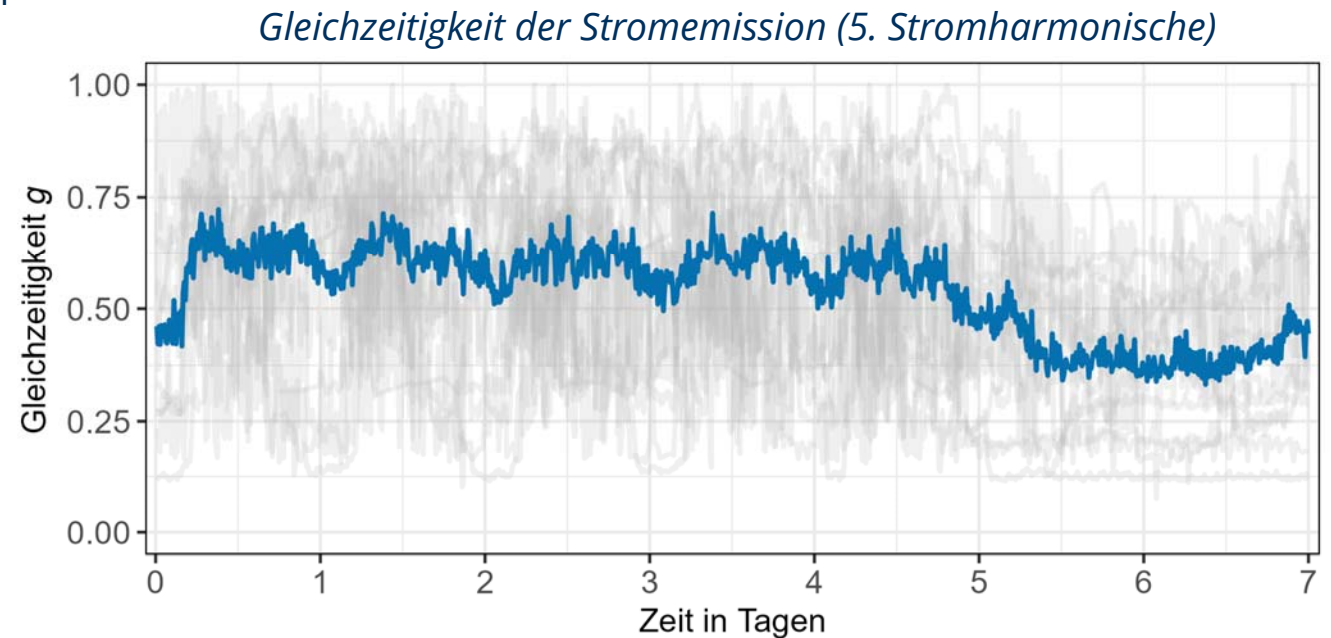
- Messung an Anschlusspunkten von **40 MS-Kundenanlagen**
- Bewertung der Spannungsharmonischen (wöchentliche 95-%-Quantile der 10-Minuten-Mittelwerte)
- Keine Überschreitungen des Planungspegels
- Großteil aller Ordnungen mit sehr geringer Ausnutzung (durchschnittlich 7 % Ausnutzung)
- Höhere Ausnutzung für 5. Spannungsharmonische und Gesamtverzerrung (THD) (meist < 50 % Ausnutzung)

Spannungsharmonische am Anschlusspunkt der MS-Kundenanlagen



Harmonische Gleichzeitigkeit der Emission

- Wahrscheinlichkeit des gleichzeitigen Auftretens von Stromemissionen mehrerer Anlagen im MS-Netz
- Empirische Berechnung der Gleichzeitigkeit g
 1. Min-Max-Normierung der Ströme je Anlage
→ Wertebereich $[0, 1]$
 2. Mittelwert normierter Ströme
→ Gleichzeitigkeitsfaktor
- Beispiel der 5. Harmonischen zeigt geringe Gleichzeitigkeit (im Mittel 0,5 und meist $< 0,7$)
- Vergleichbare Ergebnisse für ungeradzahlige Ordnungen ($h = 3, 7, 11, 13, 17$ und 19)



Harmonische Zwischenfazit

- Häufig ist aktuelle Leistung der Anlagen geringer als die vertraglich vereinbarte Anschlussleistung. Für diesen Fall ist die Ausnutzung der Planungspegel tendenziell gering.
- Potential zur Variation des Gleichzeitigkeitsfaktors ohne zu „überbuchen“, sofern die Ausnutzung der vereinbarten Anschlussleistung gering bleibt bzw. nicht zeitgleich erfolgt.
- Reduzierung des Gleichzeitigkeitsfaktors würde allen Anlagen höhere Emissionsgrenzwerte zugestehen und zu einer besseren Ausnutzung der Planungspegel führen.

Emissionen von Kundenanlagen

Emissionen von Kundenanlagen

Projekt „iREFGrid“

Motivation:

- Bestimmung des Beitrages einzelner Kundenanlagen zur Spannungsverzerrung
- Entwicklung einer Methodik zusammen mit Messgerätehersteller Camille Bauer

Umfang:

- 9 Netzbetreiber
- 25 Messorte

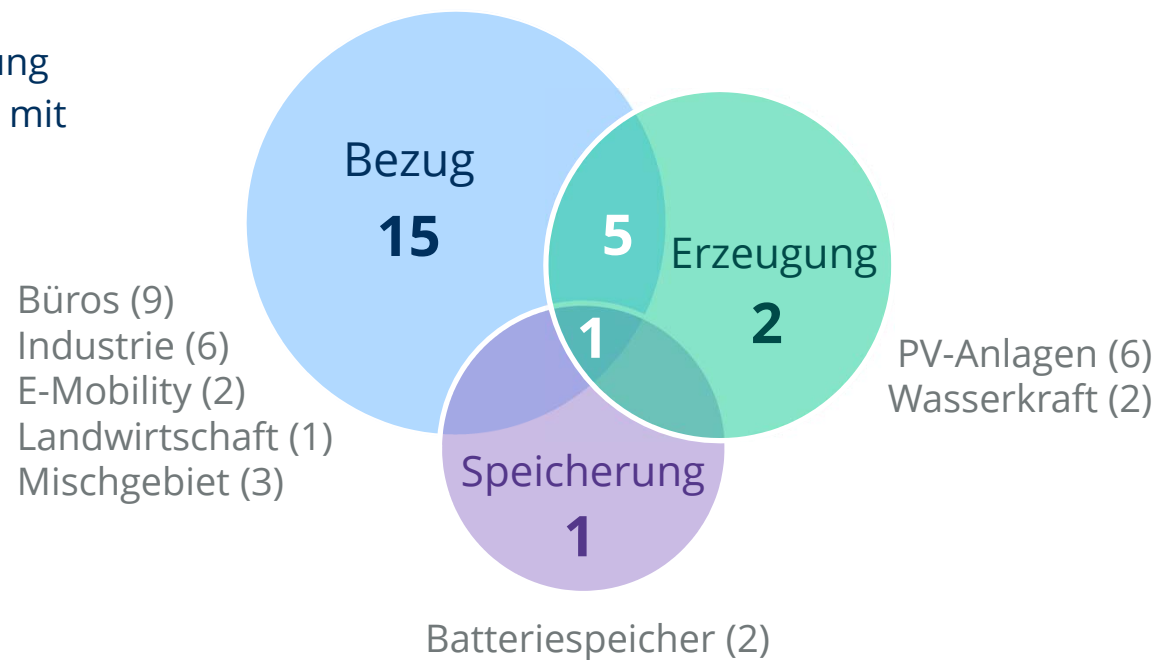
Messzeitraum:

- 09.2020 bis 06.2021
- 1 bis 5 Wochen je Messort
- insgesamt 47 Wochen

Netzebenen:

- Niederspannung (NS): 16
- Mittelspannung (MS): 8

Arten der Kundenanlagen (NS/MS)



Emissionen von Kundenanlagen

Nachweisverfahren

Stufe A (Stromharmonische)



Stufe B (Spannungsharmonische)

Emissionen von Kundenanlagen

Anschlussleistung

16 NS-Kundenanlagen:

- an Sammelschiene (SS): 11
- im Netz (N): 5

Kurzschlussleistung:

- 1,7 MVA ... 24,6 MVA

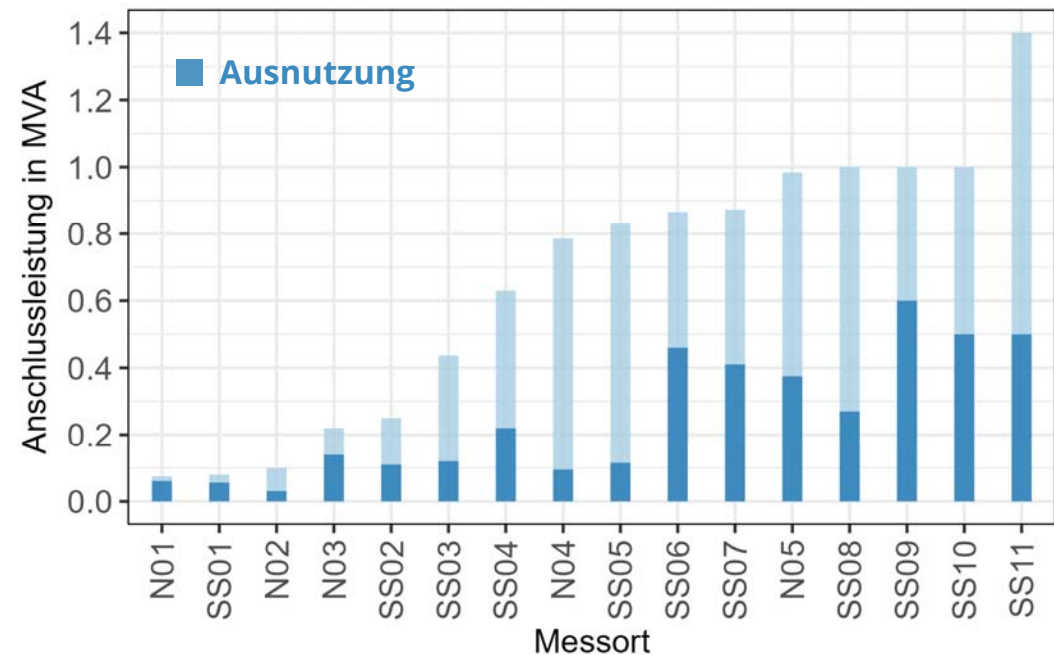
Vereinbarte Anschlussleistung:

- 75 kVA ... 1,5 MVA

Ausnutzung der Anschlussleistung:

- 12 % ... 81 %
- durchschnittlich 42 %

Ausnutzung der Anschlussleistung



Emissionen von Kundenanlagen

Bewertung (1) - Stromharmonische

Stromharmonische

Nachweisverfahren (Stufe A)

Geradzahlige Ordnungen:

- sehr geringe Ausnutzung

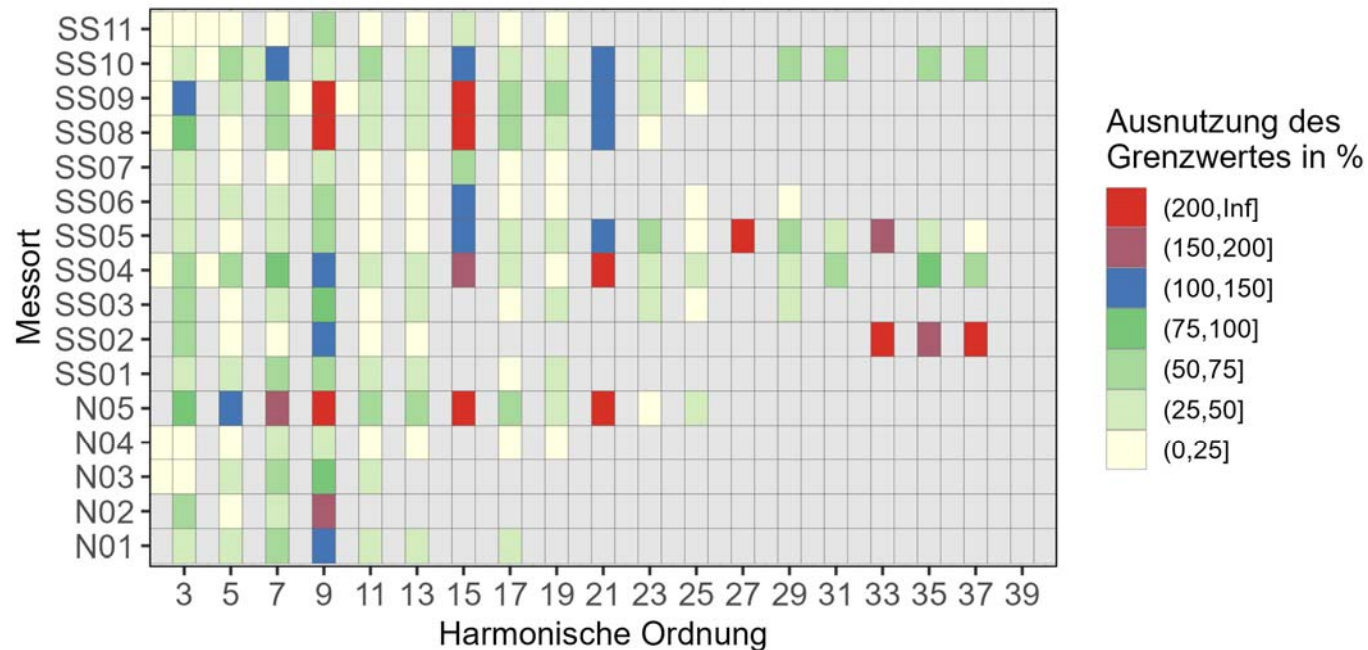
Ungeradzahlige Ordnungen:

- höhere Ausnutzung
- teilweise Überschreitungen

Durch drei teilbare Ordnungen:

- größte Überschreitungen
- niedrige Verträglichkeitspegel
- zusätzliche Reduktion der Grenzwerte aufgrund Neutralleiter

Stromharmonische (D-A-CH-CZ)



Emissionen von Kundenanlagen

Bewertung (2) - Spannungsharmonische

Spannungsharmonische Nachweisverfahren (Stufe B)

Geradzahlige Ordnungen:

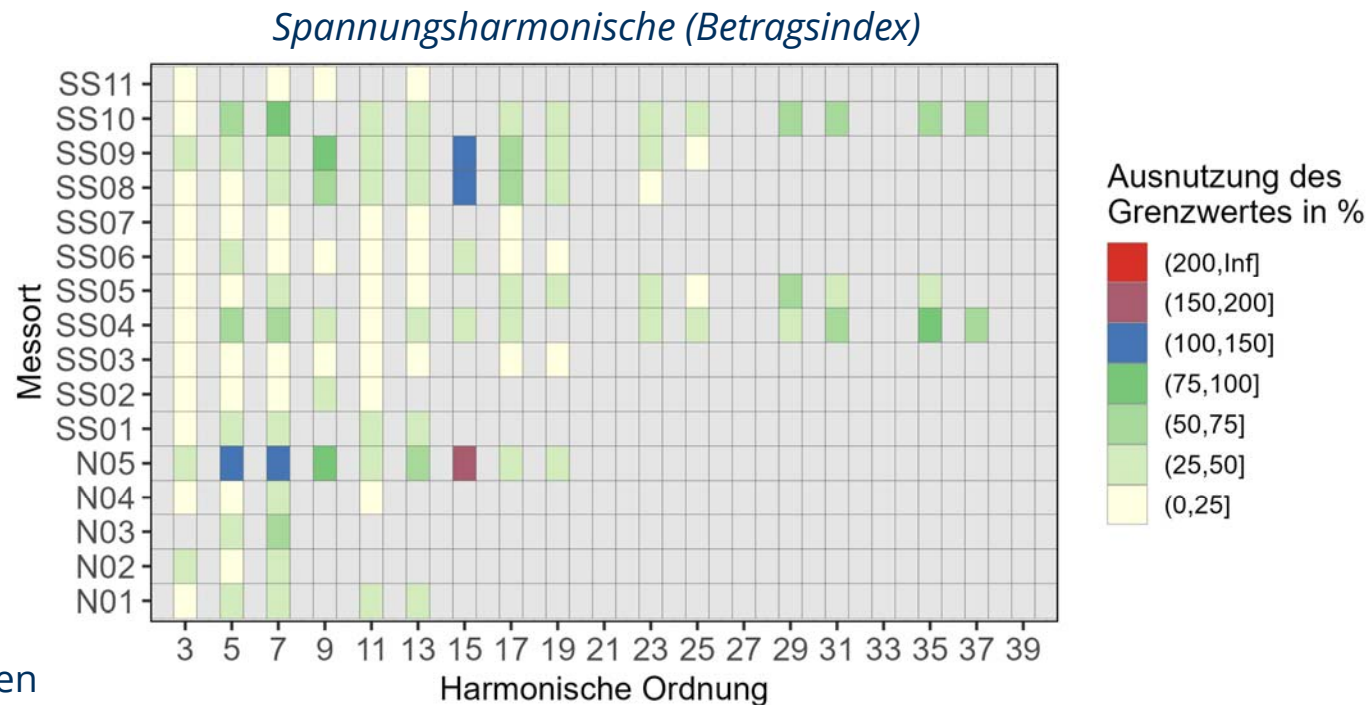
- Messwerte < Messunsicherheit

Ungeradzahlige Ordnungen:

- geringere Ausnutzung
- nur wenige Überschreitungen

Durch drei teilbare Ordnungen:

- deutlich weniger Überschreitungen
- insbesondere für Installationen an Sammelschienen



Emissionen von Kundenanlagen

Zwischenfazit

- Tendenziell nutzt Großteil der Anlagen die Grenzwerte nicht aus, ABER auch vereinbarte Anschlussleistung wird oft nicht ausgenutzt.
- Niedrige Verträglichkeitspegel für durch drei teilbare Ordnungen und zusätzlicher Reduktion der Emissionsgrenzwerte aufgrund der Neutralleiterimpedanz
- Potential zur Erhöhung der Stromgrenzwerte der durch drei teilbare Ordnungen für Kundenanlagen mit Anschlusspunkt nahe NS-Sammelschiene

Zusammenfassung

Unsymmetrie

- Tatsächliche Beitrag zur Spannungsunsymmetrie von Kurzschlussleistung am Anschlusspunkt abhängig
- Möglichkeit zur Berücksichtigung der Kurzschlussleistung bei Festlegung von Grenzwerten für unsymmetrischen Leistungsanteil bei größeren Anlagen

Harmonische

- Geringe Ausnutzung der MS-Planungspegel im Falle aktuelle Leistung $<$ vereinbarter Anschlussleistung und reduzierte Gleichzeitigkeit der Stromemissionen
- Möglichkeit der Reduzierung des Gleichzeitigkeitsfaktors für bessere Ausnutzung des Planungspegels bei geringer Ausnutzung der vereinbarten Anschlussleistung

Emission von Kundenanlagen

- Niedrige Planungspegel für durch drei teilbare Ordnungen und zusätzlicher Reduktion der Emissionsgrenzwerte aufgrund der Neutralleiterimpedanz
- Möglichkeit zur Berücksichtigung des Anschlusspunktes von Kundenanlagen nahe NS-Sammelschiene bei Festlegung der Stromgrenzwerte für durch drei teilbare Ordnungen

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!



 max.domagk@tu-dresden.de

 +49 351 463 35223

 maxdomagk.de