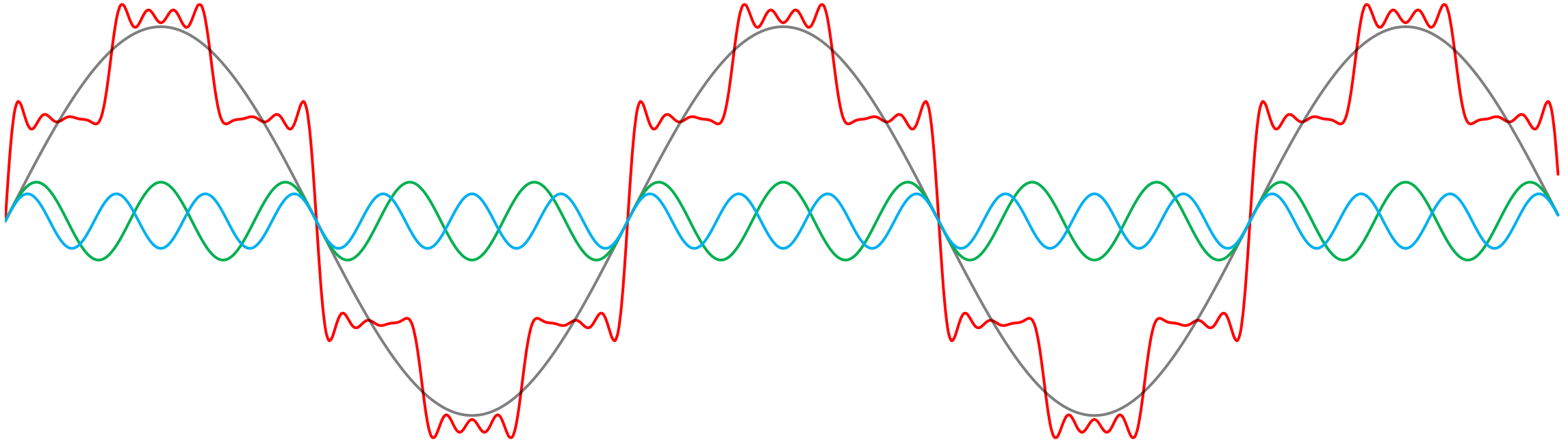
Berner Fachhochschule
Haute école spécialisée bernoise
Bern University of Applied Sciences



Stromoberschwingungen in Verteilnetzen

Masterarbeit

Tyler Bacciarini, Master Student BFH

Biel, 11.08.2021

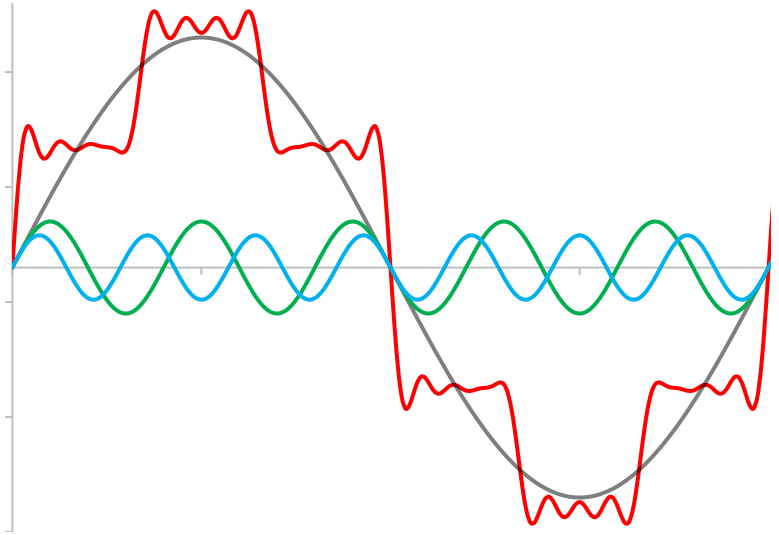
Agenda

1. Ausgangslage und Ziele
2. Zustand der Stromoberschwingungen in Verteilnetzen
3. Untersuchung der Stromverzerrung in einem Mittelspannungsnetz
4. Fazit

1 Ausgangslage und Ziele

Ausgangslage

- Oberschwingungen: Schwingungen, deren Frequenzen einem Vielfachen der Grundschwingung entsprechen
  - Spannung: Grenzwerte an der Übergabestelle (EN50160)
  - Strom: Grenzwerte der Stromharmonischen nur für einzelne Geräte/Anlage (EN61000-3-2/-12)

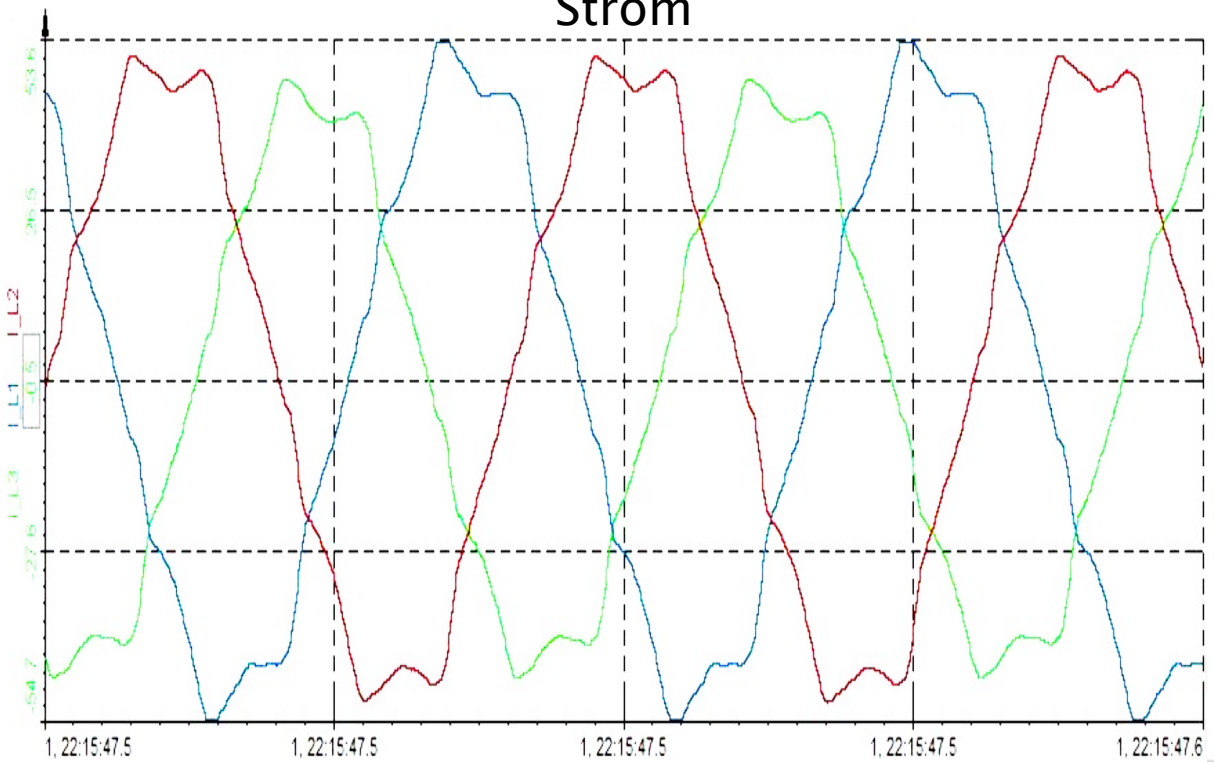


- Verteilnetzbetreiber ESB
  - Langzeit-Messkampagne in TS und UW zur Spannungsanalyse
  - Bisher keine Untersuchung im Hinblick auf Stromoberschwingungen

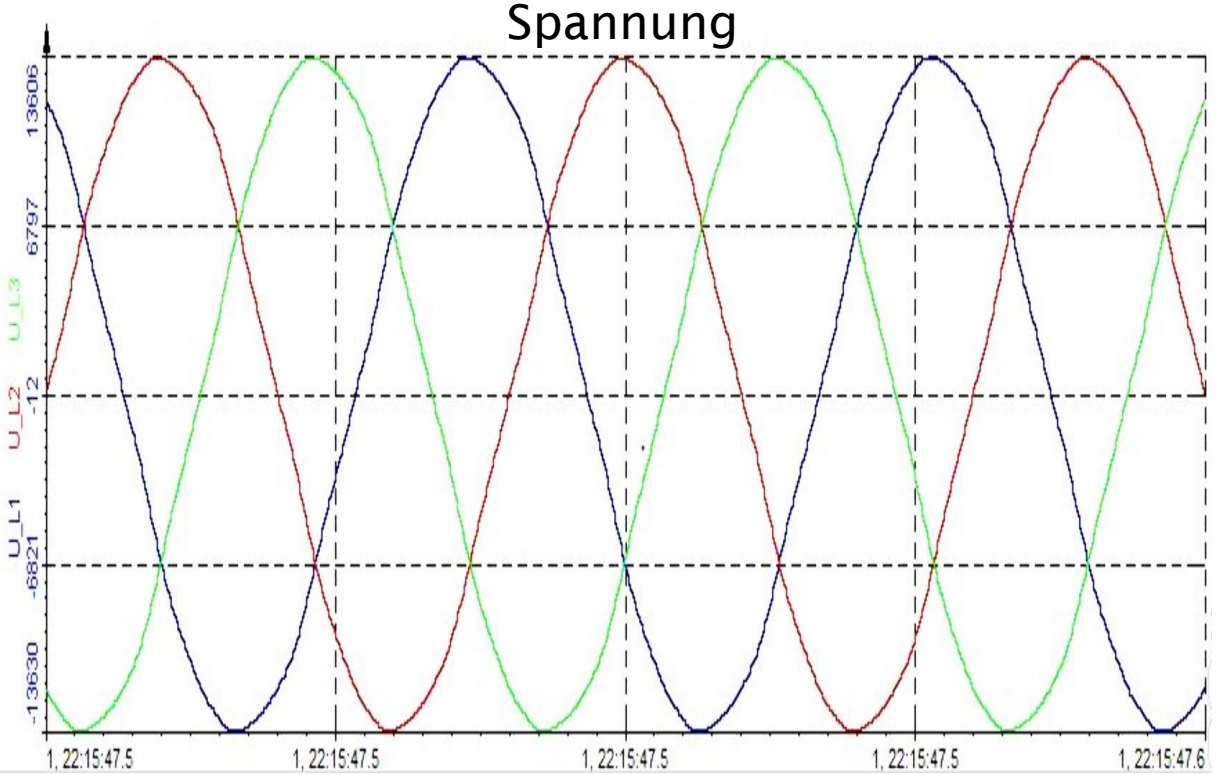
Ausgangslage

- Verteilnetzbetreiber AEW
  - Stark verzerrter Strom gemessen in einer Mittelspannungsleitung (16 kV-Netz)

Strom



Spannung



Quelle: AEW-Messbericht

Ziele

- Verteilnetzbetreiber ESB
  - Untersuchung der PQ-Langzeitdaten (über 4 Jahren)
  - Feststellung des aktuellen Zustands im Hinblick auf die Stromoberschwingungen

- Verteilnetzbetreiber AEW
  - Untersuchung einer Stromverzerrung in einem MS-Netz
  - Untersuchung der Auswirkungen in den NS-Netzen und Identifizierung der Quelle

2 Zustand der Stromoberschwingungen in Verteilnetzen

Zustand der Stromoberschwingungen in Verteilnetzen
Einführung

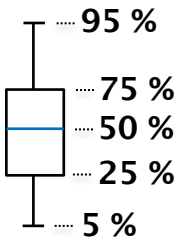
- Langzeitdaten aus der Messkampagne von ESB
- Verfügbare Daten

Parameter	
Spannung	✓
Strom	✓
Leistung	✓
Flicker	✓
THDu	✓
THDi	✓
Gerade u-OS	✗
Ungerade u-OS (bis 25 Ordnung)	✓
Gerade i-OS	✗
Ungerade i-OS (bis 25 Ordnung)	✓

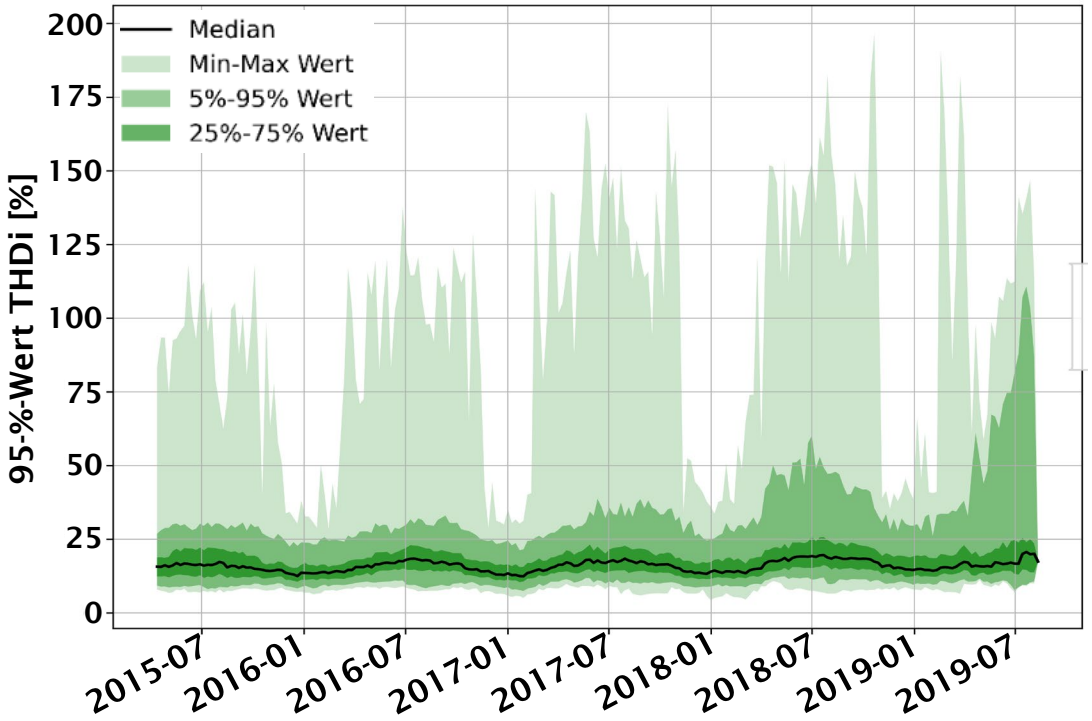
Messort	Anzahl Messpunkte	Zeitraum
Unterwerk (NE4)	6	11.04.2015 - 05.08.2019
Wohngebiet	4	
Industriegebiet	2	
Trafostation (NE6)	71	
Wohngebiet	63	
Industriegebiet	8	

Zustand der Stromoberschwingungen in Verteilnetzen

THDi und Stromoberschwingungen

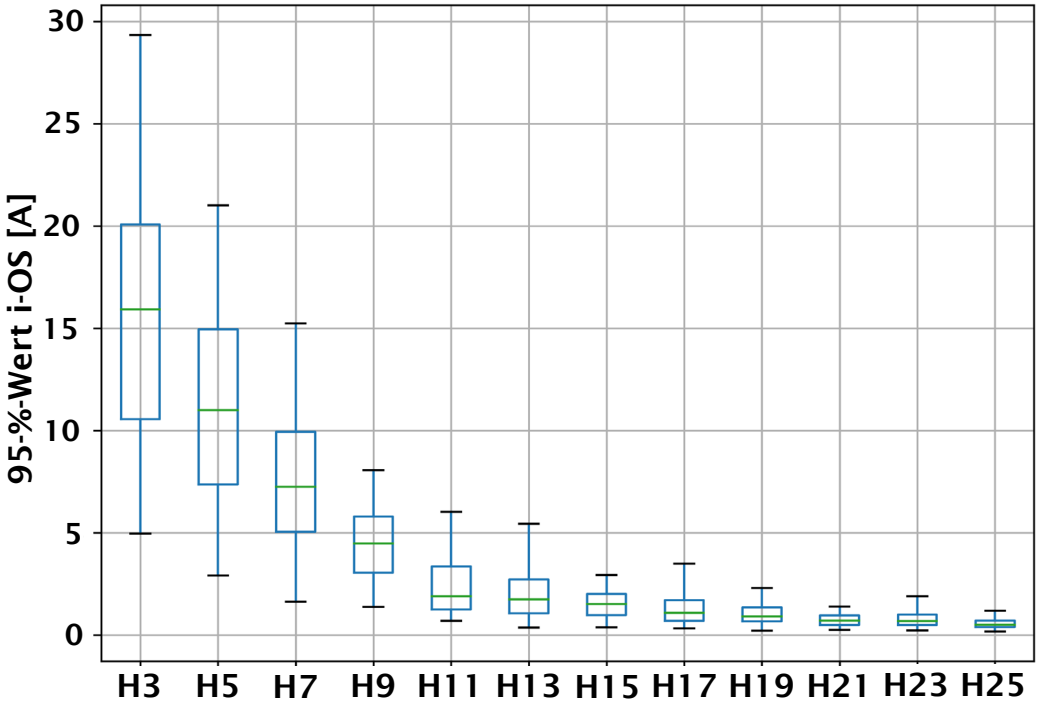


THDi-Wert



- THDi erreicht 200 %
- Median zwischen 12 und 20 %
- Schwanken und Zunahme

Stromoberschwingungen

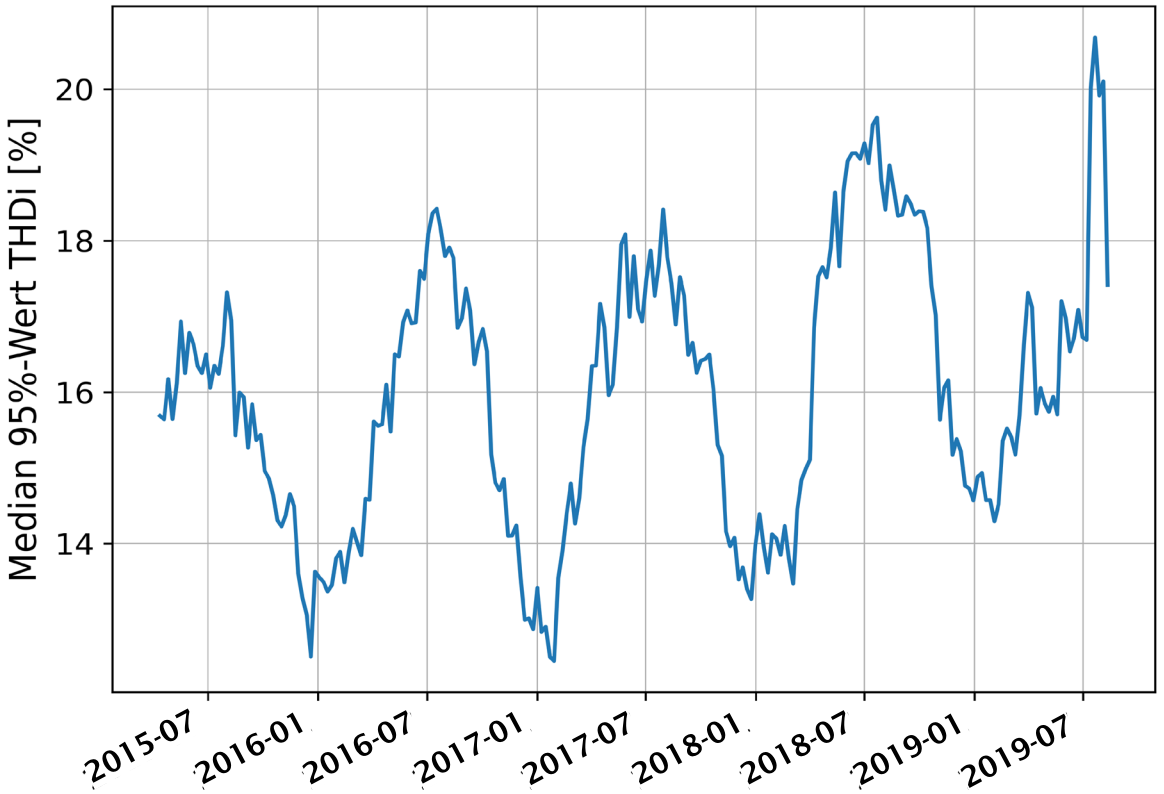


- Abnehmendes Verhalten
- 95 % der Werte unter 30 A (21 %)
- Maximalwert 110 A

Zustand der Stromoberschwingungen in Verteilnetzen

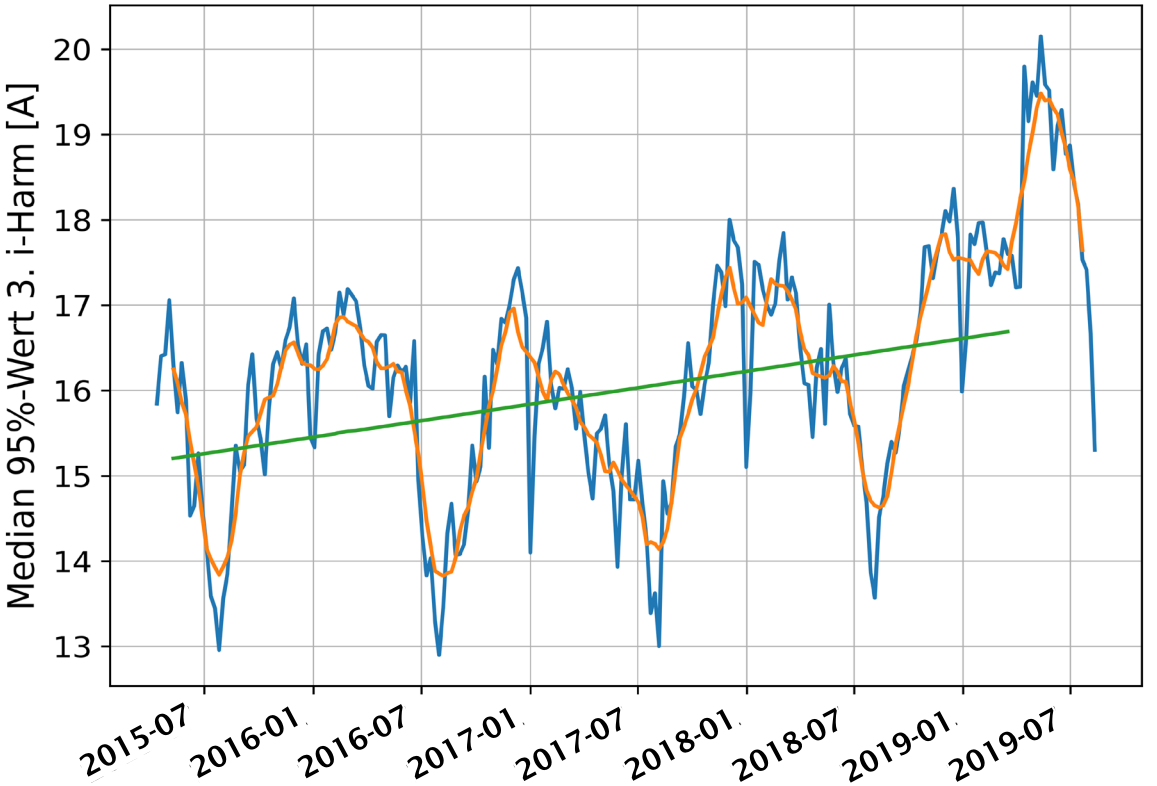
Pegeländerung zwischen Winter und Sommer und Zunahme

Pegeländerung Winter-Sommer



- Schwanken zwischen 12 und 20 %
- Ohmsche Lasten und Kompensation

Zunahme Stromoberschwingungen

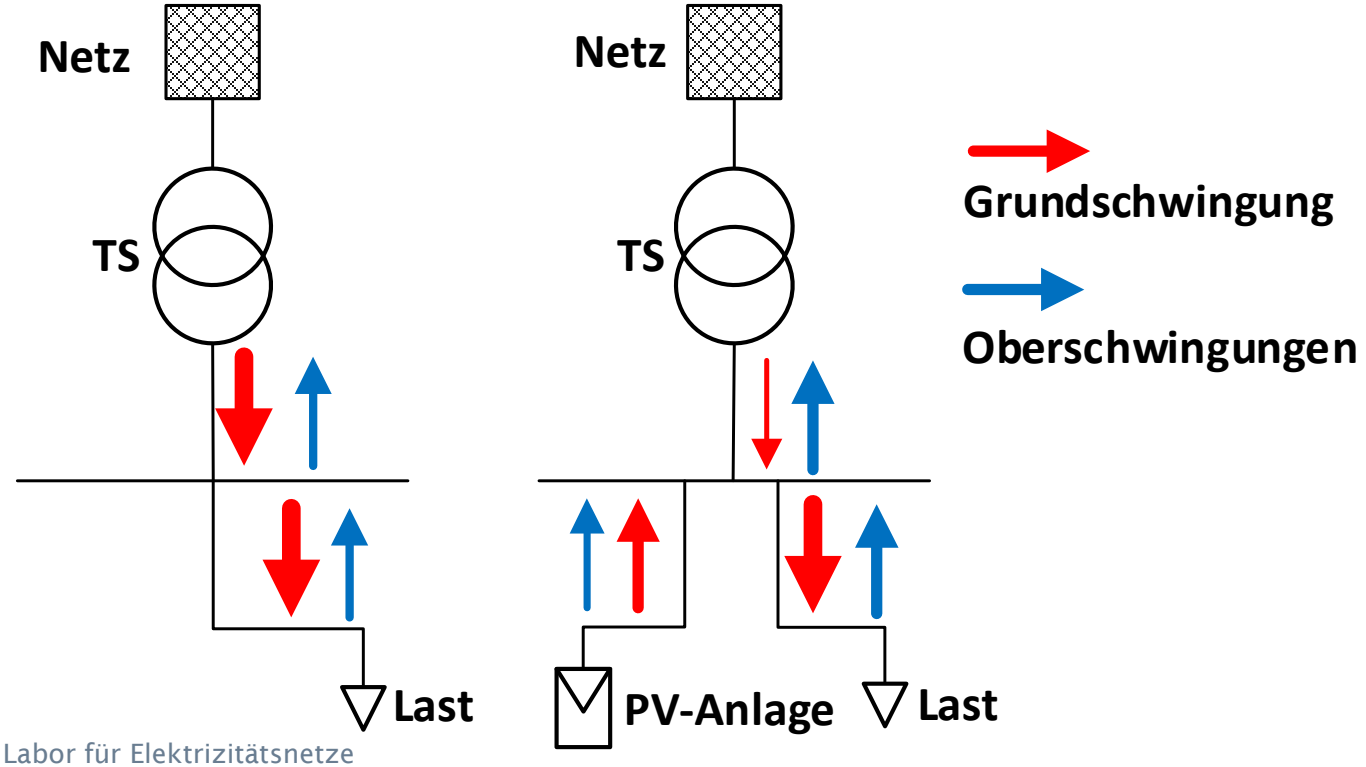


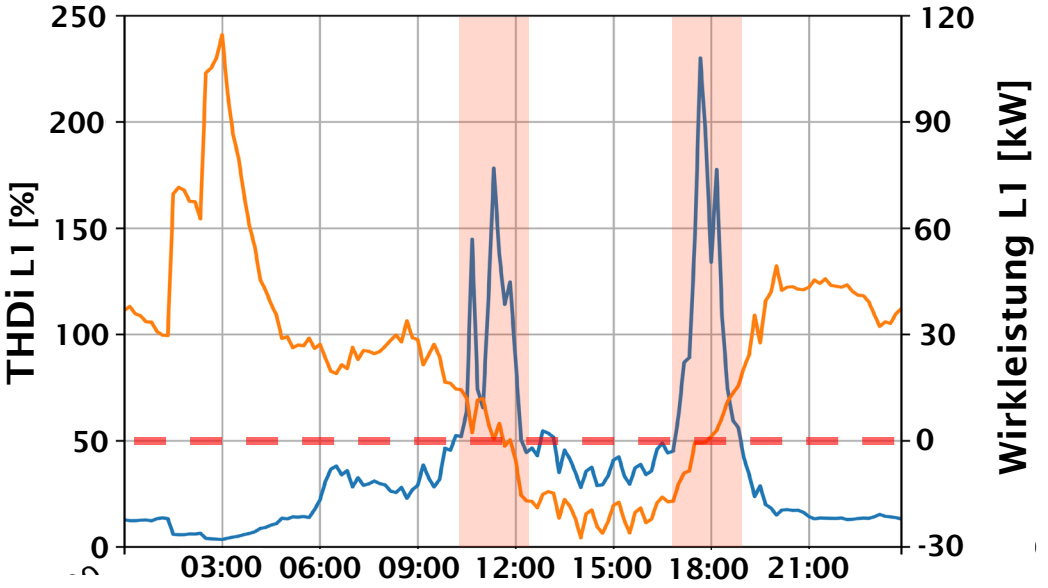
- 3. Harmonische: + 0.4 A/Jahr
- Zunahme nichtlinearer Lasten/Geräte

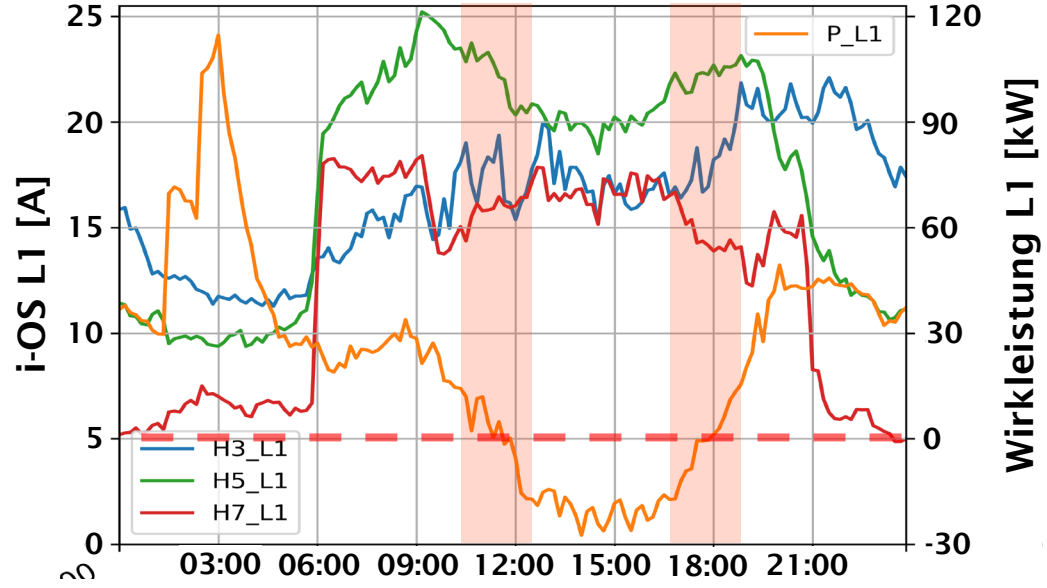
Zustand der Stromoberschwingungen in Verteilnetzen

Kompensation der Grundschwingung durch PV-Anlagen

- THDi-Spitzen am Vor- und Nachmittag
- Keine Spitzen bei den Oberschwingungen
- Lokale PV-Produktion kompensiert die Grundschwingung



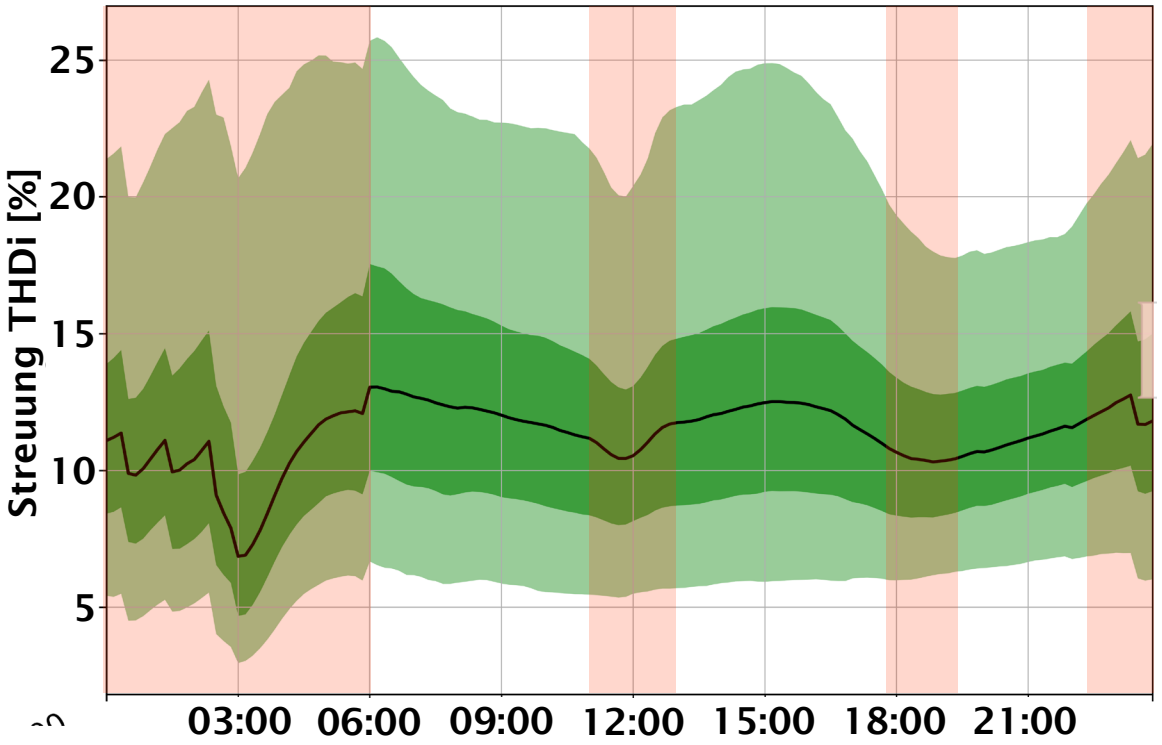




Zustand der Stromoberschwingungen in Verteilnetzen

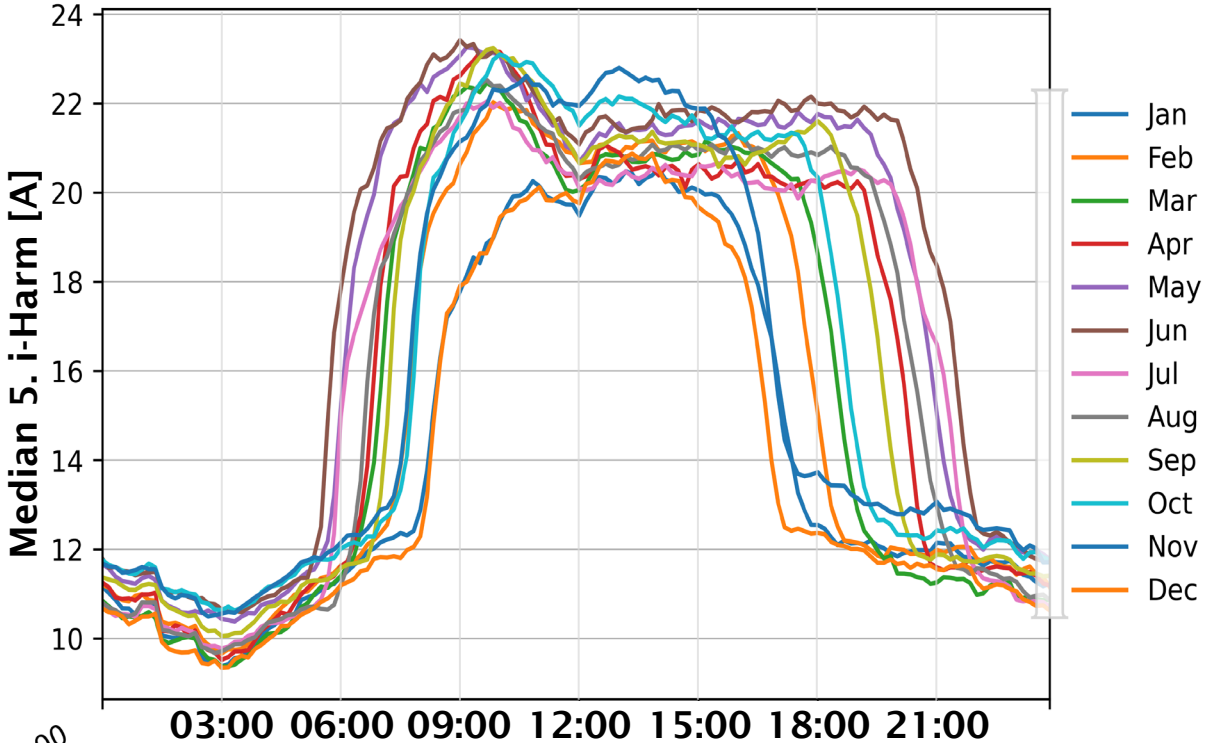
Absenkung THDi-Werts und Anstieg 5. und 7. Stromharmonischen

Absenkung THDi durch ohmsche Lasten



- Betrieb des Boiler und Kochherde
- Geräte mit ohmschen Anteil

Anstieg 5. und 7. Stromharmonischen

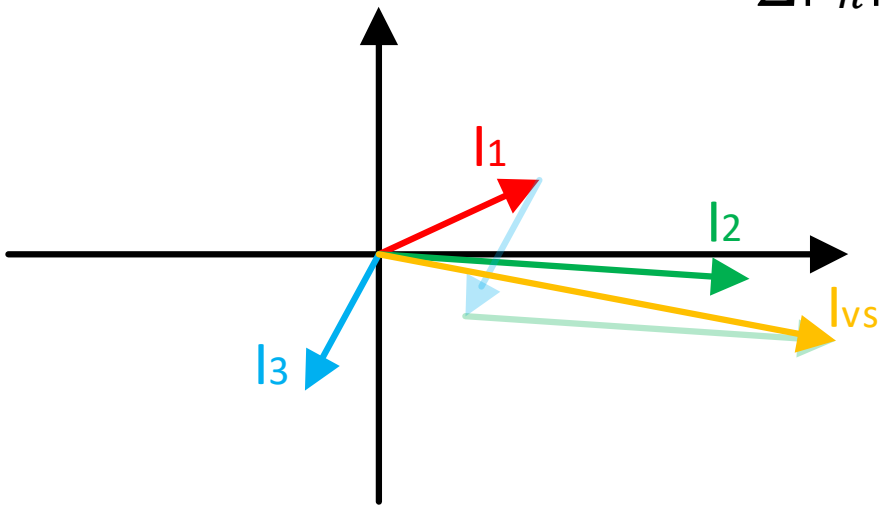


- Beobachtet in TS mit hoher PV-Leistung
- Klare Korrelation mit PV-Produktion

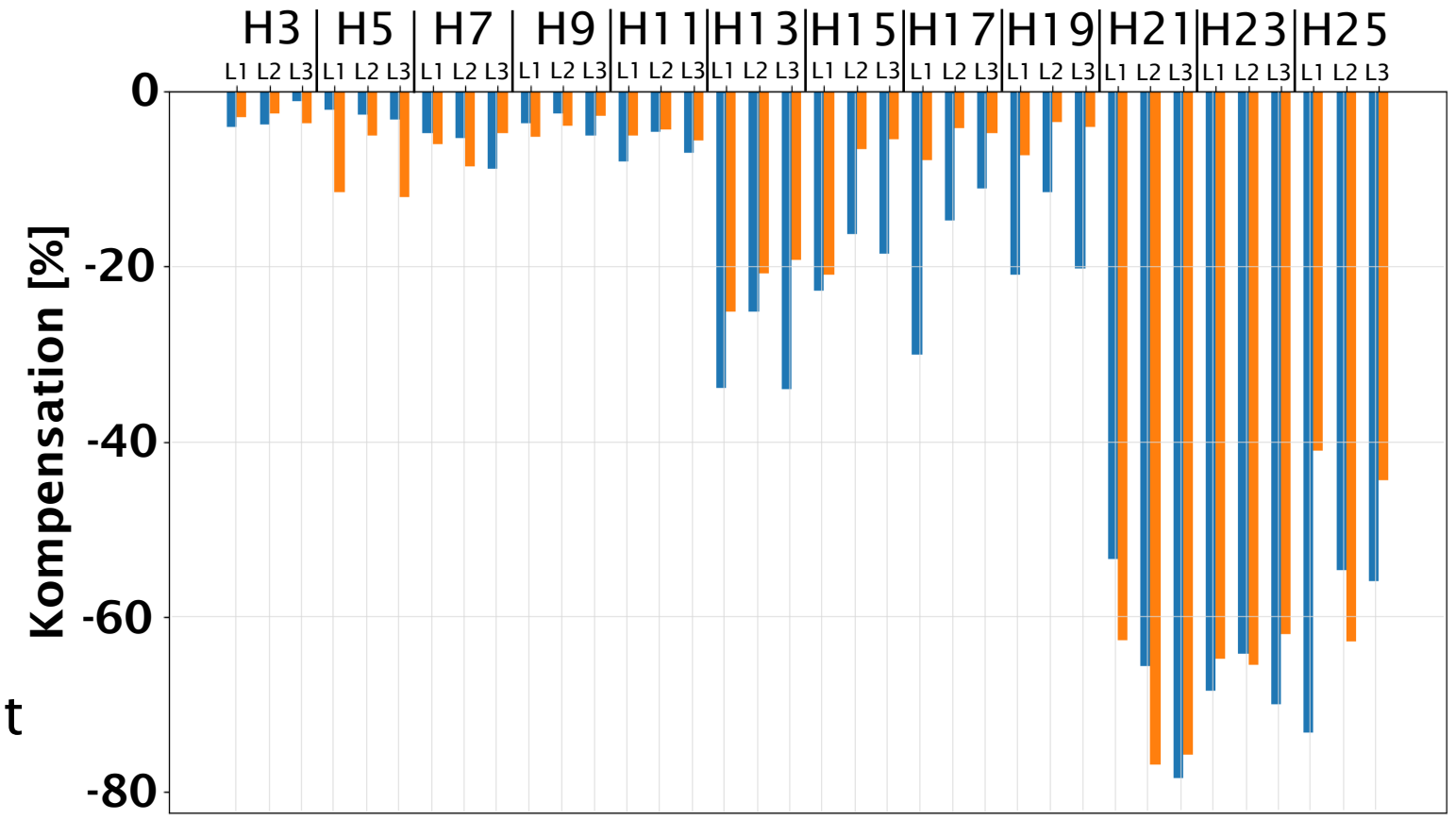
Zustand der Stromoberschwingungen in Verteilnetzen

Kompensation der Stromoberschwingungen in der Trafostation

- Kompensation: $K = 1 - \frac{\sum \overrightarrow{I_n}}{\sum |I_n|}$



- Bis 11. Ordnung: K < 12 %
- Winkelstreuung vergrössert mit zunehmender Ordnungszahl



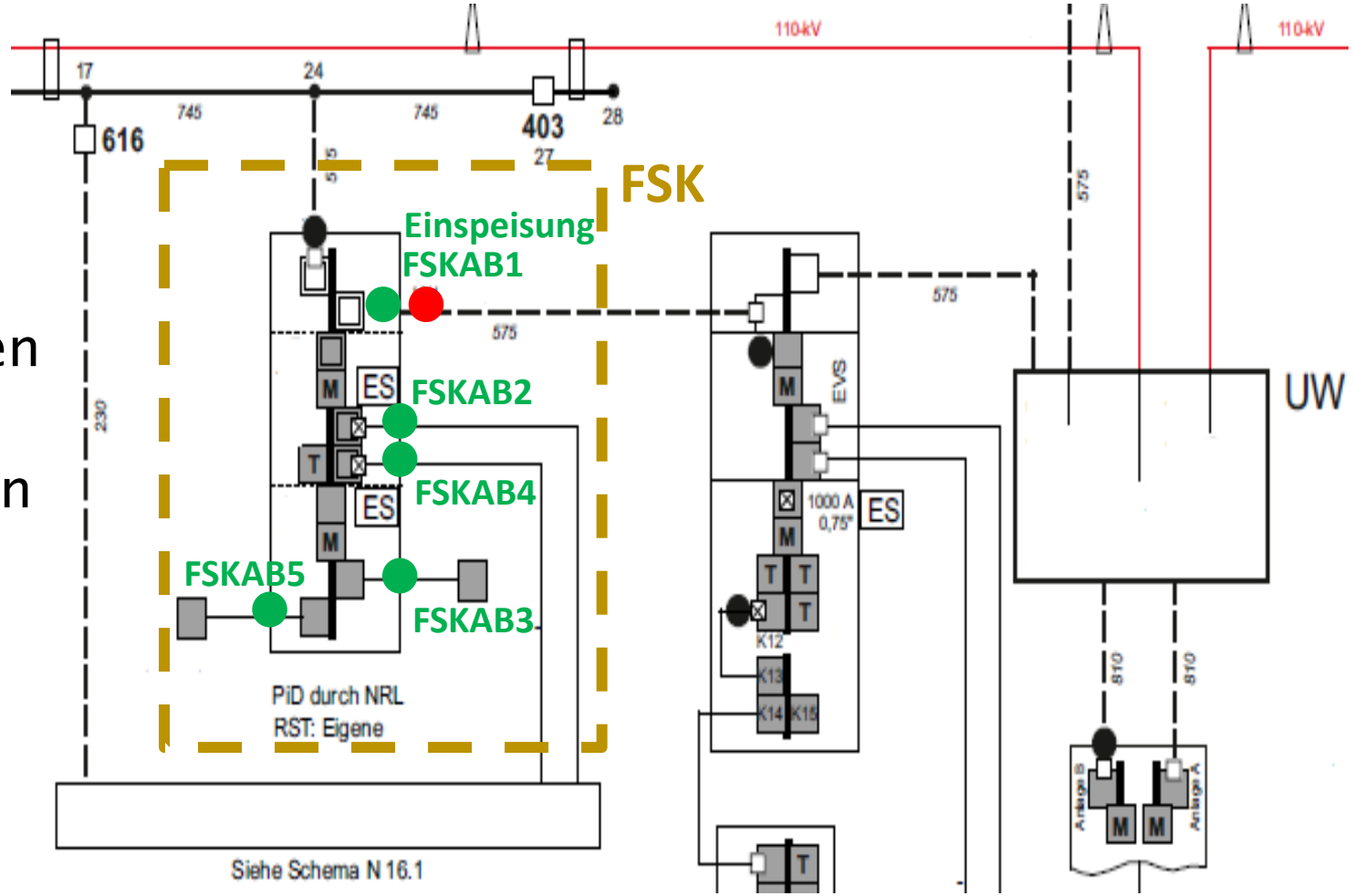
3 Untersuchung der Stromverzerrung in einem MS-Netz

Untersuchung der Stromverzerrung in einem MS-Netz

Verfahren

- Die Stromverzerrung wurde von AEW in der Einspeiseleitung zu einer 16 kV-Schaltkabine (FSK) festgestellt

- Verfahren:
  1. Messungen in der FSK
  2. Identifizierung der verzerrten Abgänge
  3. Messungen in den NS-Netzen
  4. Untersuchung der Auswirkungen und Identifizierung der Quelle



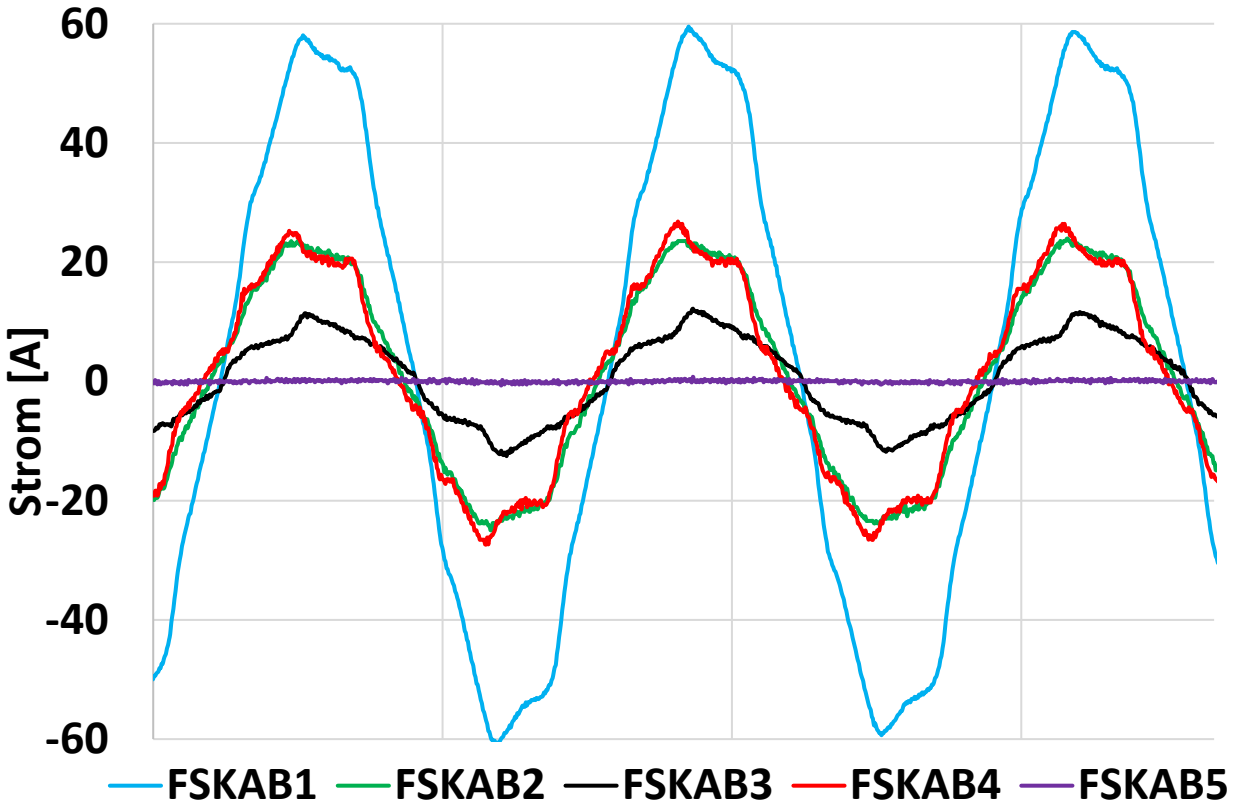
Messungen AEW Messungen Masterarbeit

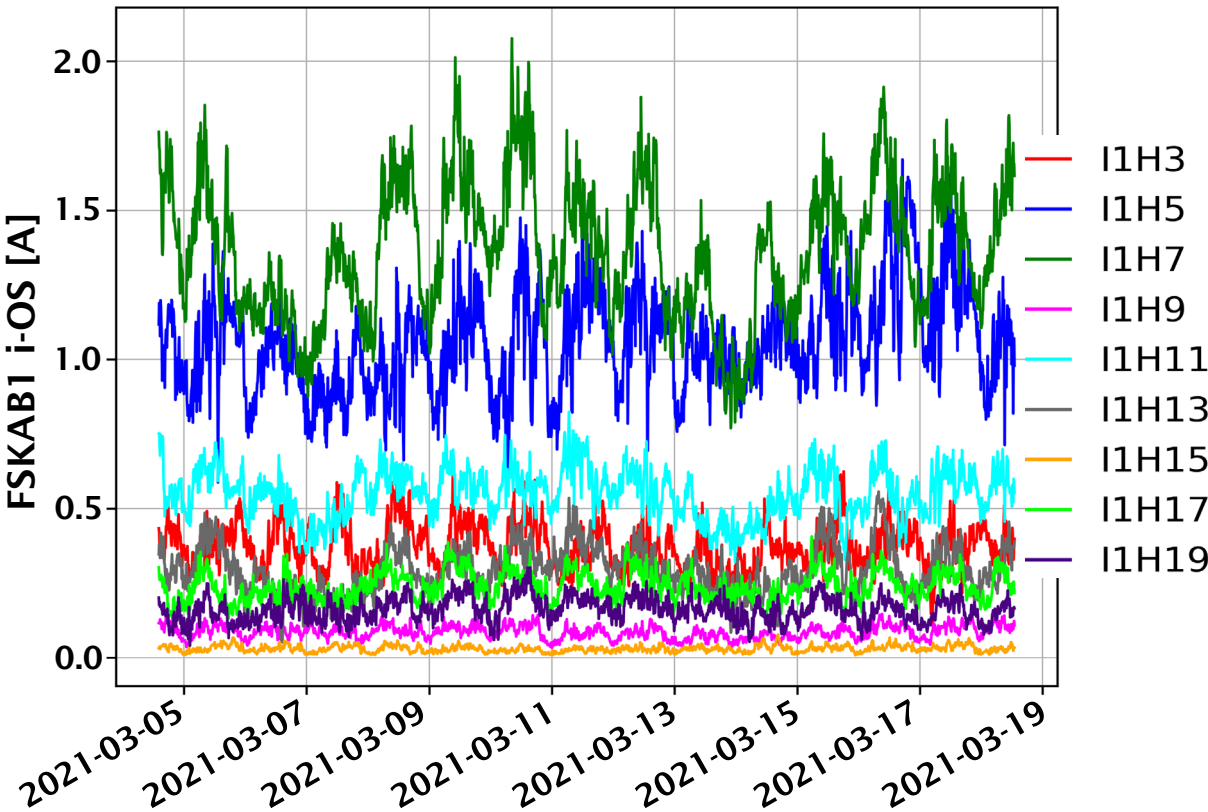
Quelle: AEW

Untersuchung der Stromverzerrung in einem MS-Netz

Messungen in der FSK

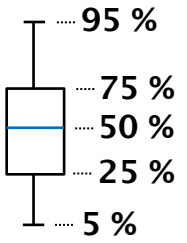
- Reserve der Spannungsqualität > 65 %
- Ähnliche Verzerrung der Kurvenform und Pegel wie bei der Messung von AEW



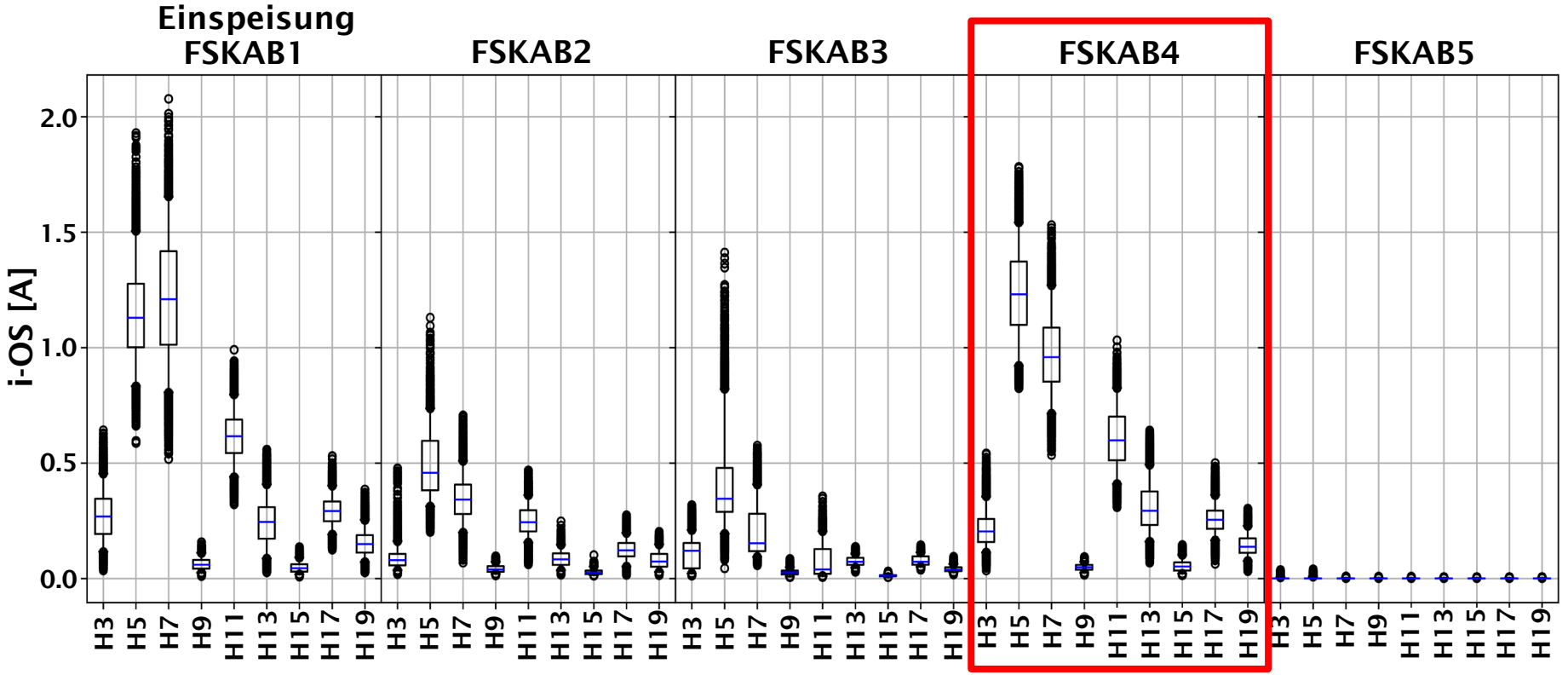


Untersuchung der Stromverzerrung in einem MS-Netz

Messungen in der FSK



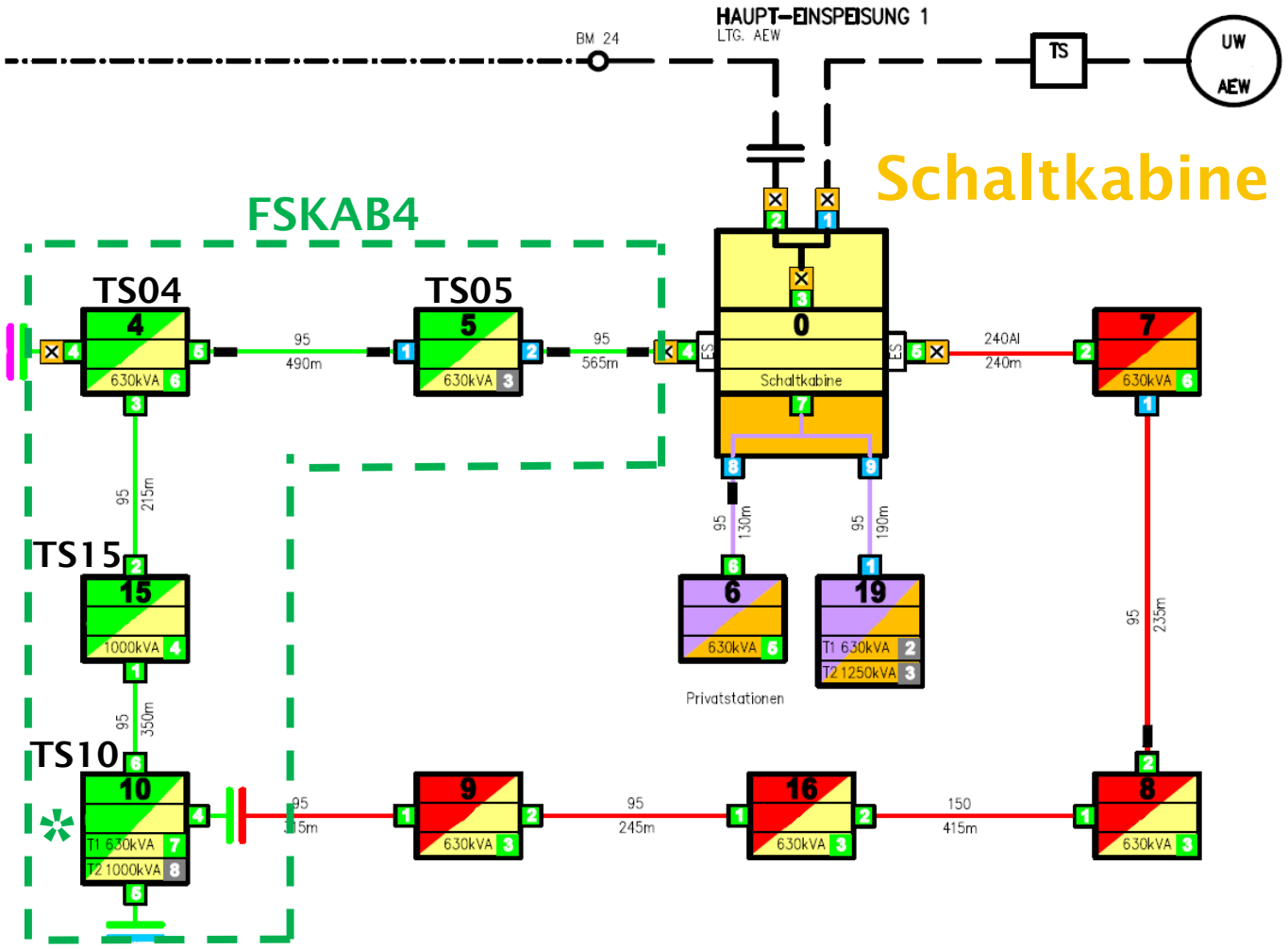
- Bei der Einspeisung sind die 5. und 7. Ordnung am höchsten
- Abgang 2 und 3 geringere Werte
- Abgang 4 weist sehr ähnlichen Wertebereich wie Einspeisung



Untersuchung der Stromverzerrung in einem MS-Netz

Messungen in den NS-Netzen

- 4 Trafostationen angeschlossen
- Wohn- und Industriegebieten
- Messung auf die NS-Seite der Trafo

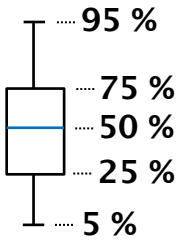


* TS mit 2 Transformatoren

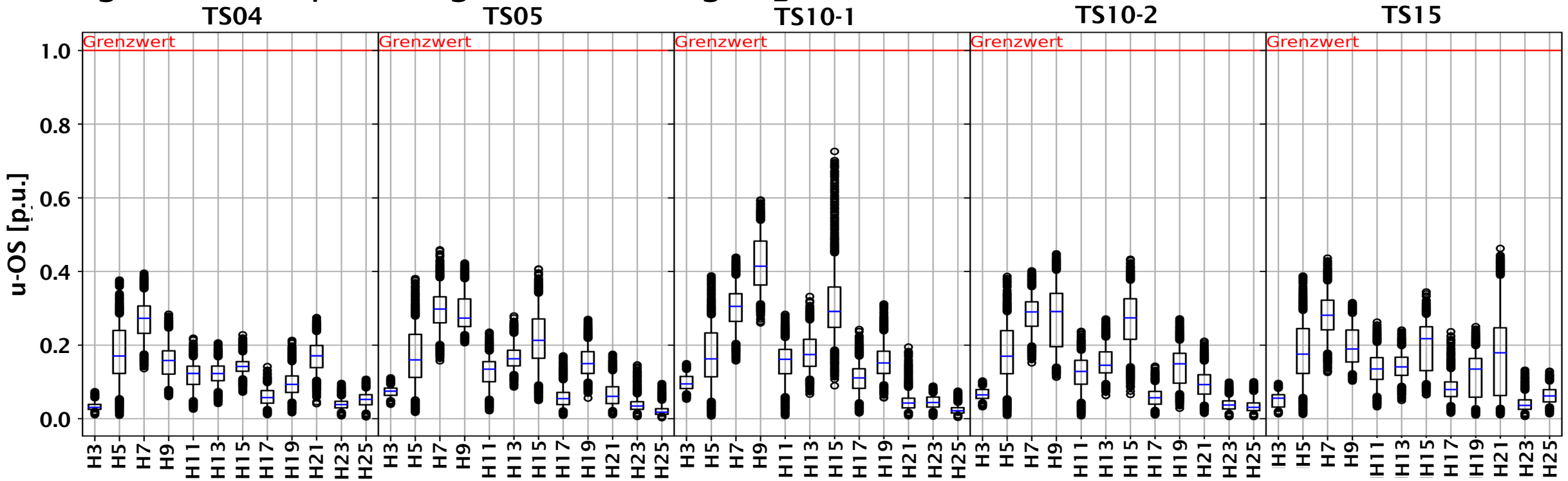
Quelle: AEW

Untersuchung der Stromverzerrung in einem MS-Netz

Messungen in den NS-Netzen



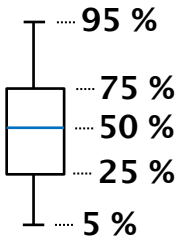
- Vergleich der Spannungsoberschwingungen



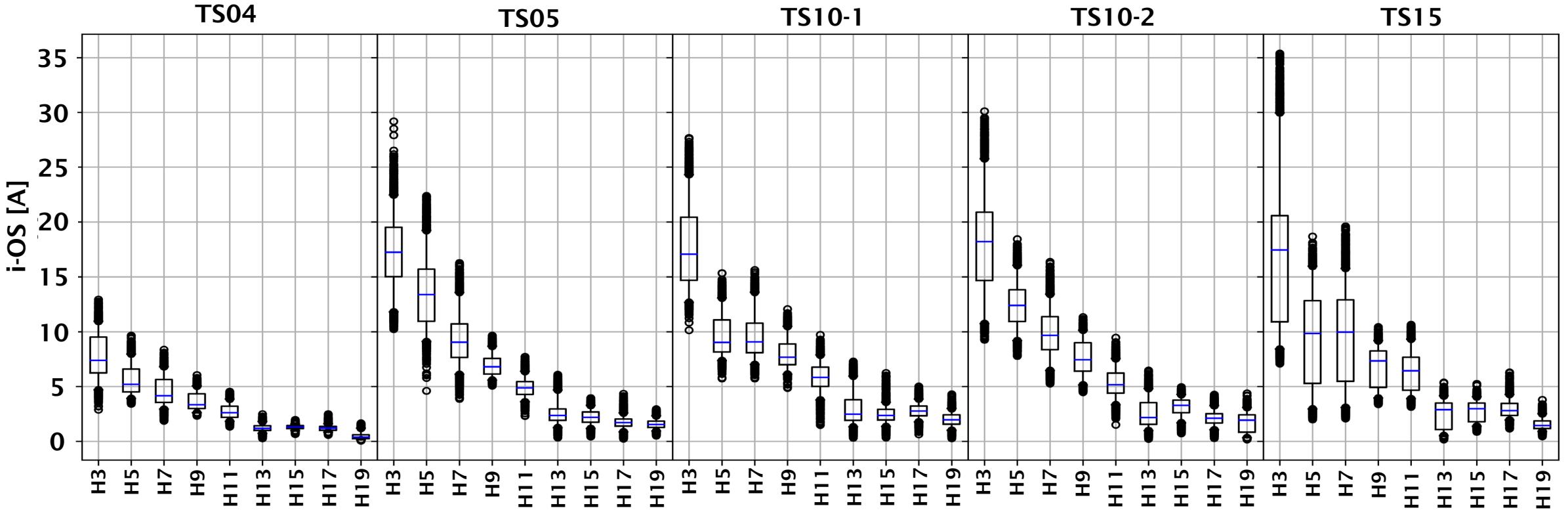
- 7. und 9. Harmonischen begrenzen
- TS10-1 geringste Reserve (45 %)
- Andere TS weisen sehr ähnliche Werte auf (Reserve > 60 %)

Untersuchung der Stromverzerrung in einem MS-Netz

Messungen in den NS-Netzen



- Vergleich der Stromoberschwingungen



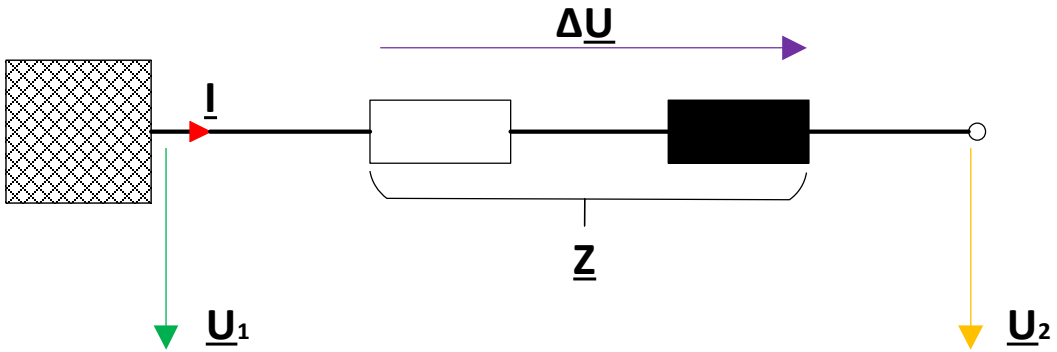
- Gleiches abnehmendes Verhalten
- 3. Ordnung am höchsten
- Sehr ähnliche Pegel für 4 von 5 TS

Untersuchung der Stromverzerrung in einem MS-Netz

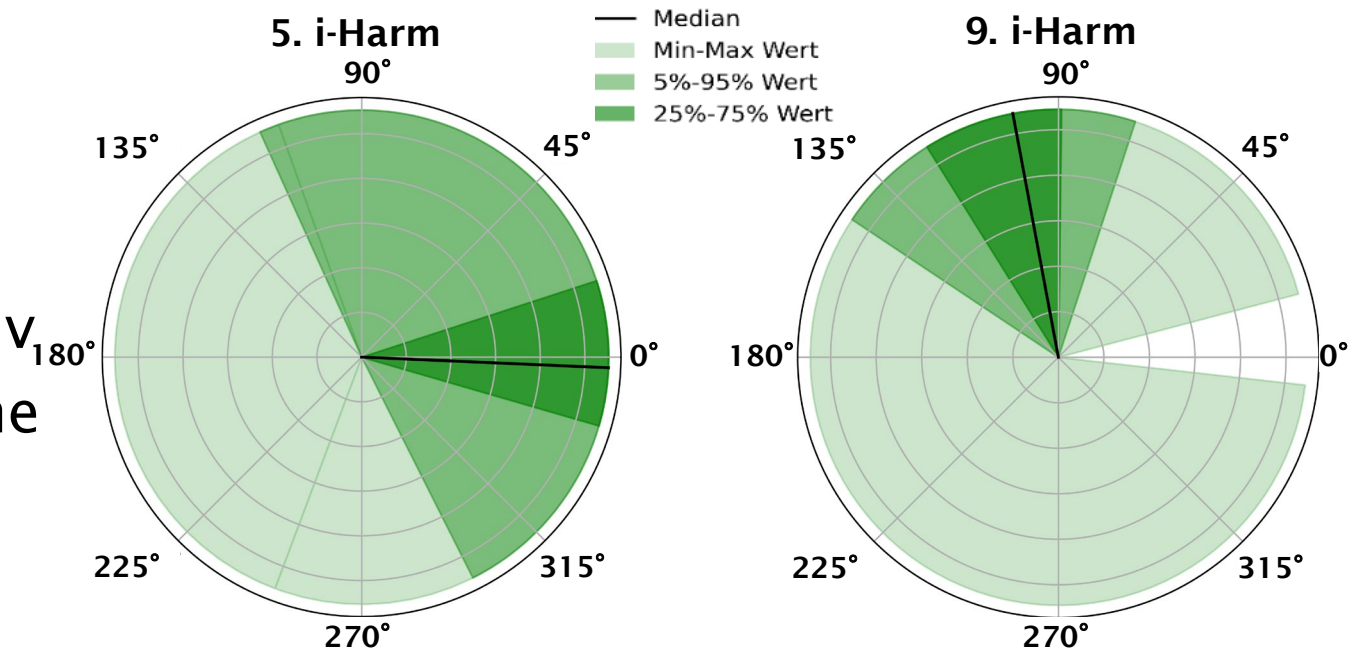
Messungen in den NS-Netzen

- TS10-1: niedrigste PQ-Reserve (9. Spannungsharmonische)
- TS05: höchste Werte der 5. Stromharmonische

- Berechnungen und Messungen: Grenzwerte eingehalten
- 9. Spannungsharmonische geringste Reserve
- Phasenwinkel
  - Stromharmonischen meist kapazitiv
  - 5. Stromharmonische sehr ohmsche Ströme



$$\underline{U}_2 = \underline{U}_1 - \Delta\underline{U} = \underline{U}_1 - \underline{I} \cdot \underline{Z}$$

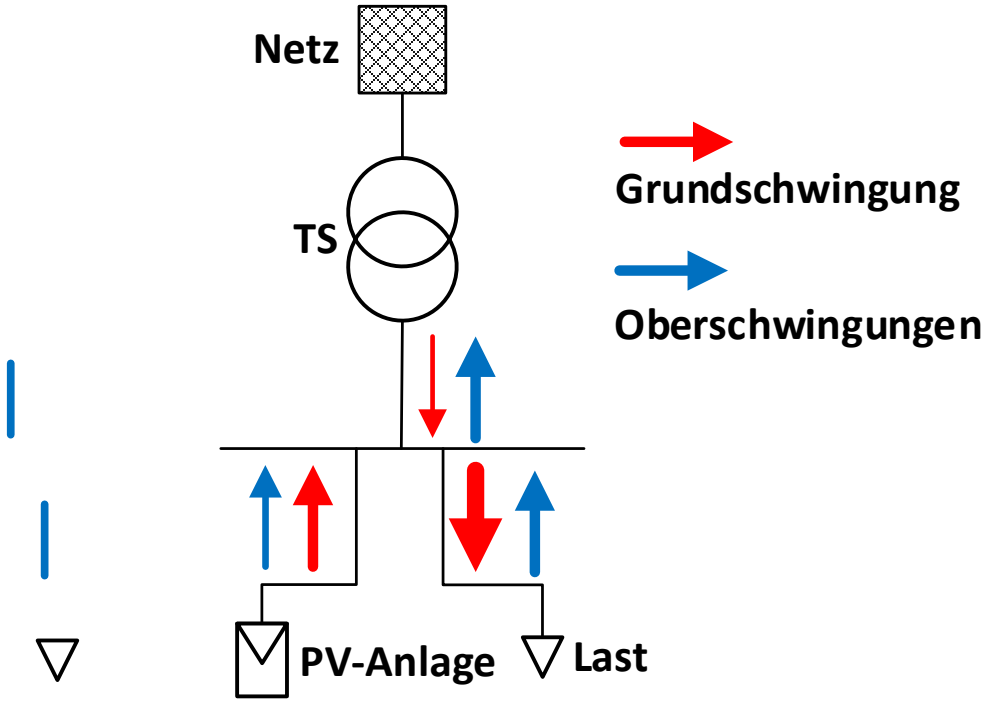


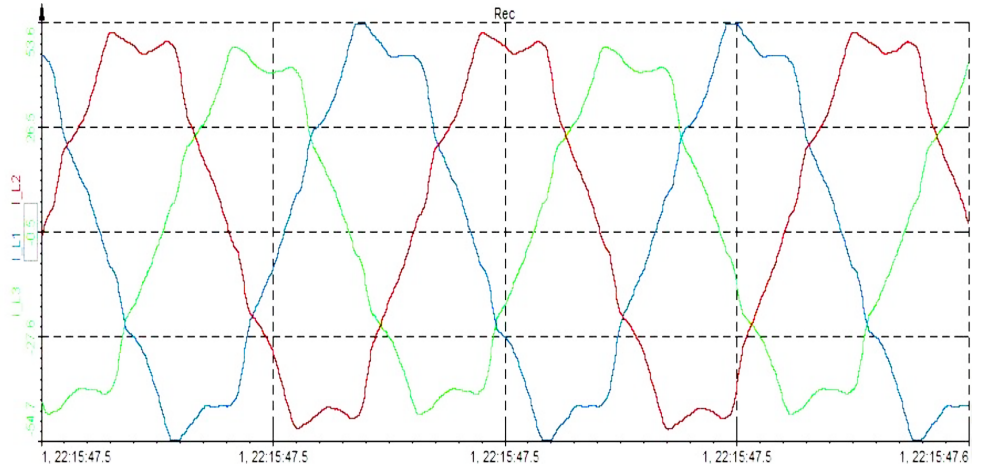
4 Fazit

Fazit

- Zustand der i-OS in TS
  - THDi < 200 %, 95-%-Quantil bei 60 %
  - i-OS < 110 A, 95-%-Quantil bei 30 A
- Diverse Phänomene beobachtet
  - Saisonalität und Zunahme
  - Kompensation der Grundschwingung

- Verzerrung in einem MS-Netz
  - Verzerrter Abgang ermittelt
  - Verzerrungsquelle: Summe der TS
  - Grenzwerte in den NS-Netzen eingehalten





Vielen Dank für die Aufmerksamkeit!

Bildquelle: Pixabay

BFH-Zentrum Energiespeicherung
Labor für Elektrizitätsnetze
Aarbergstrasse 46
CH-2503 Biel

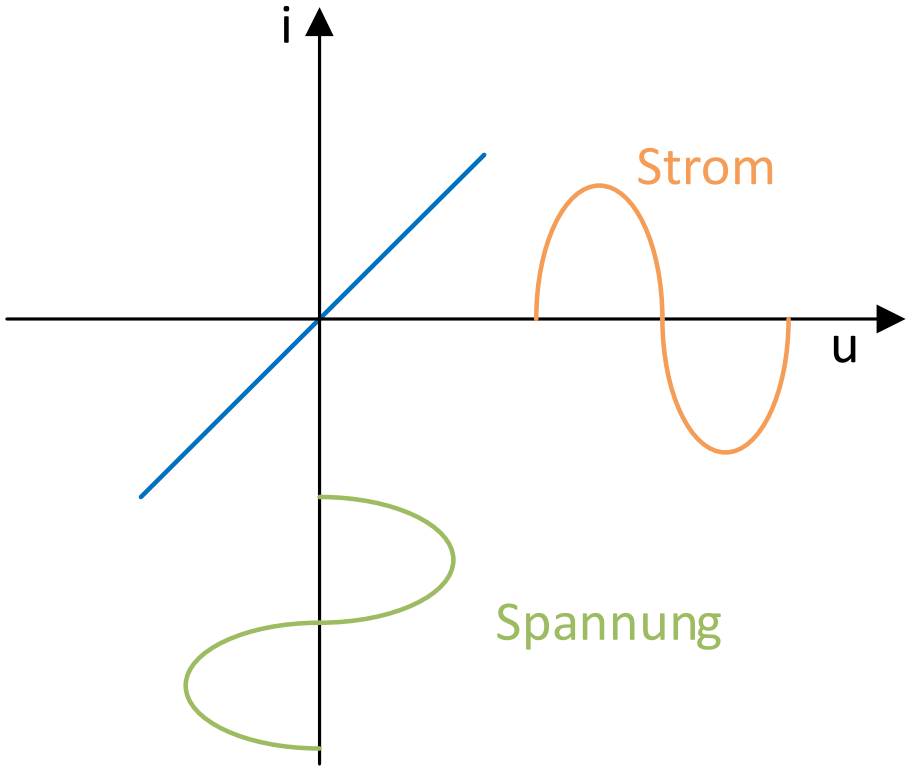
Tyler Bacciarini bacct1@bfh.ch
tyler.bacciarini@gmail.com

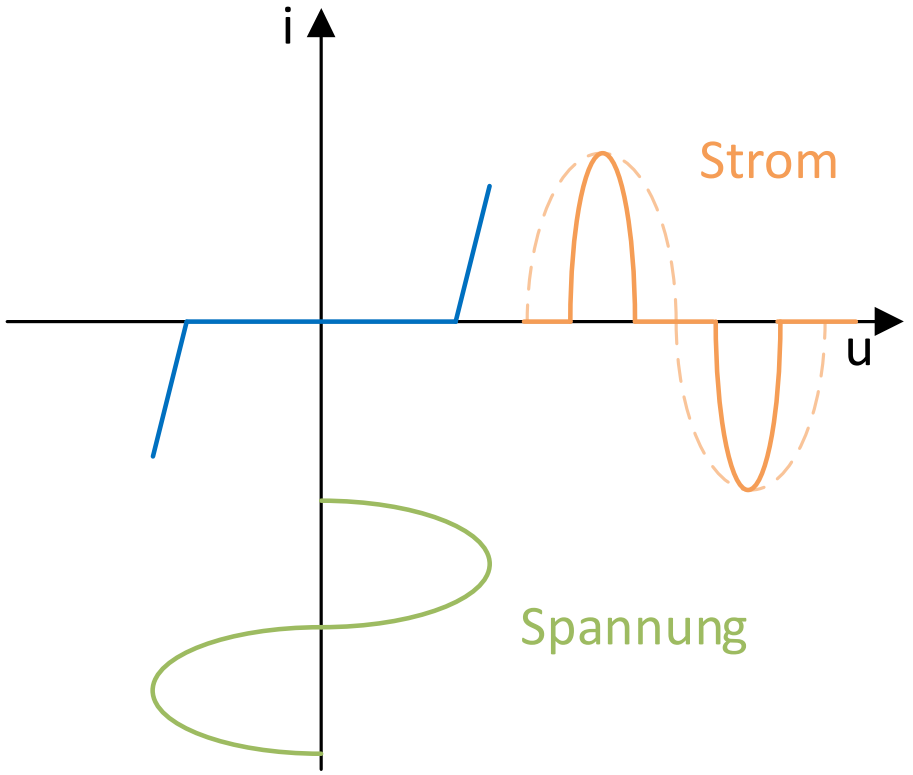
Michael Höckel hkm1@bfh.ch

Backup

Stromoberschwingungen
Nichtlineare Geräte

- U-I Kennlinie

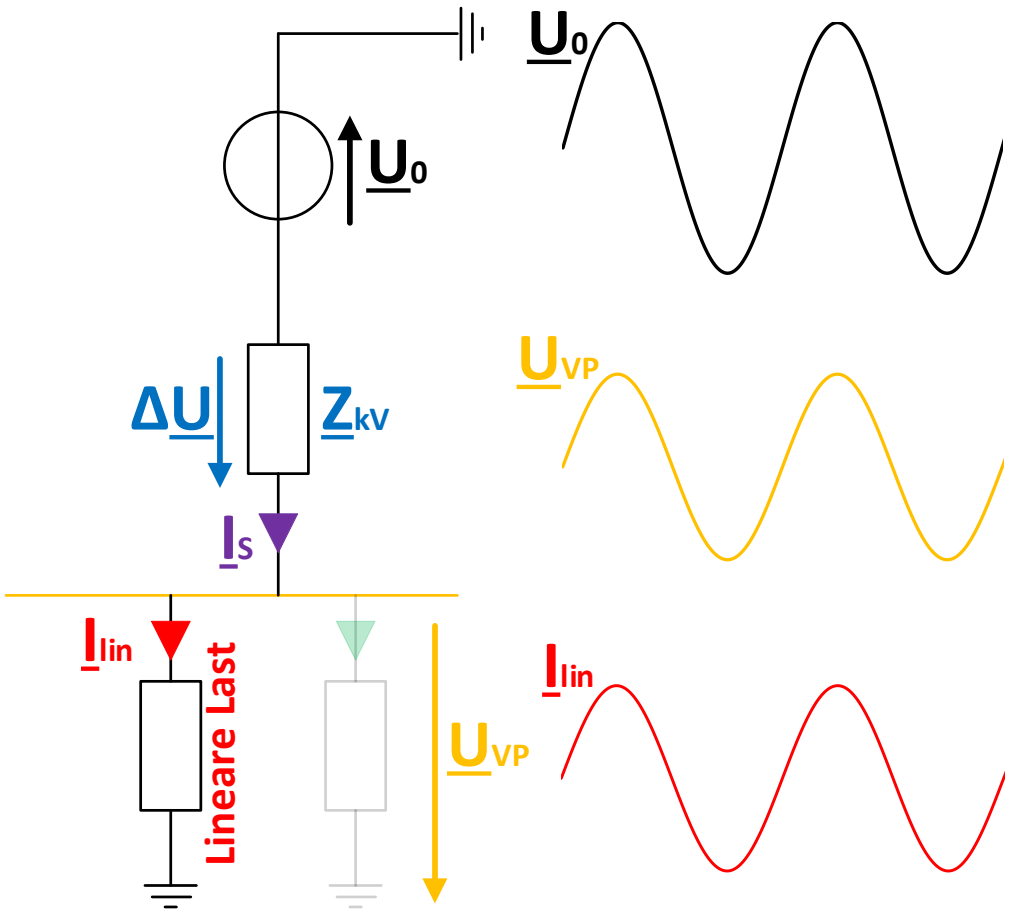




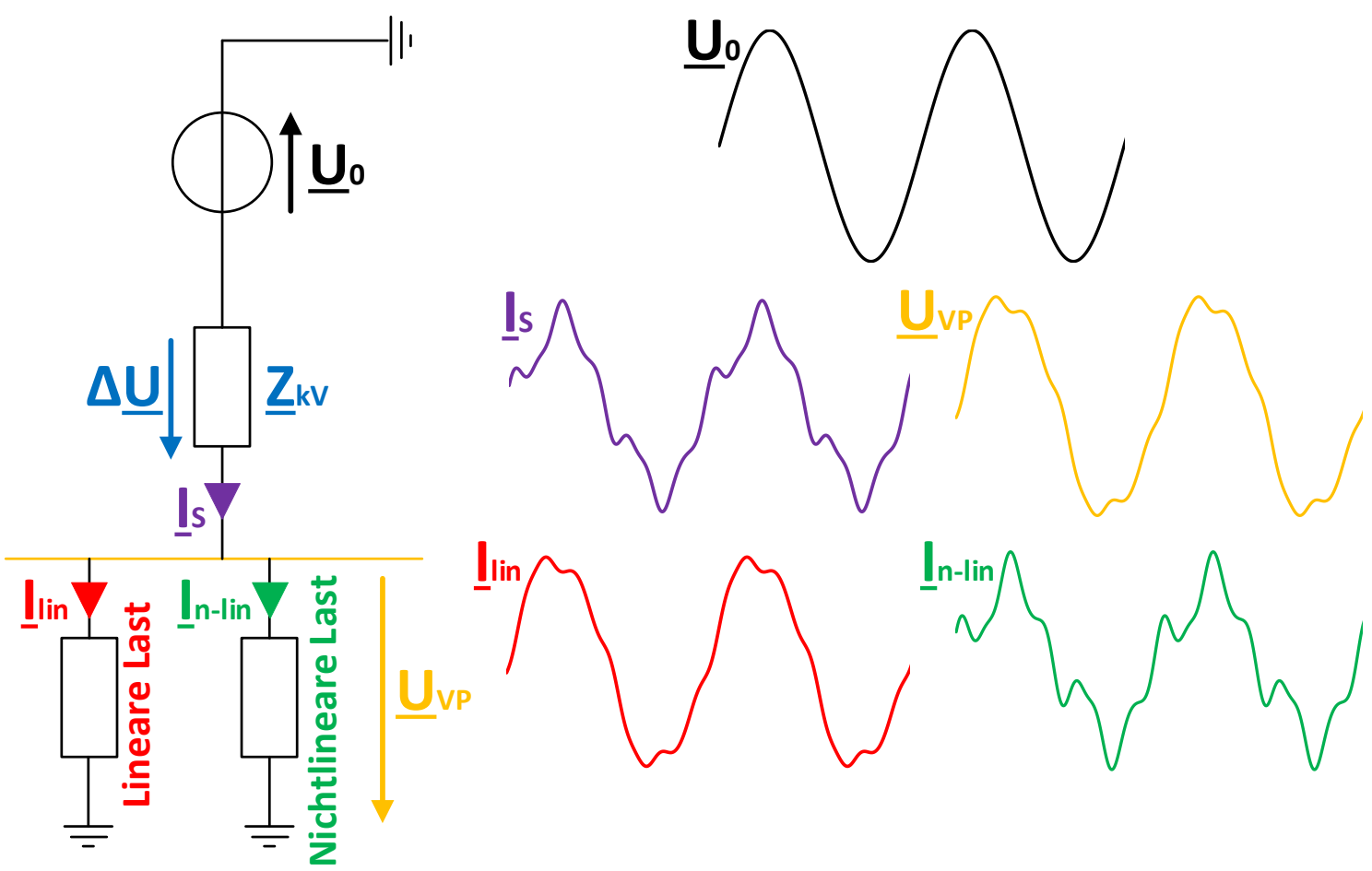
Stromoberschwingungen

Beispiel im Netz

Fall 1

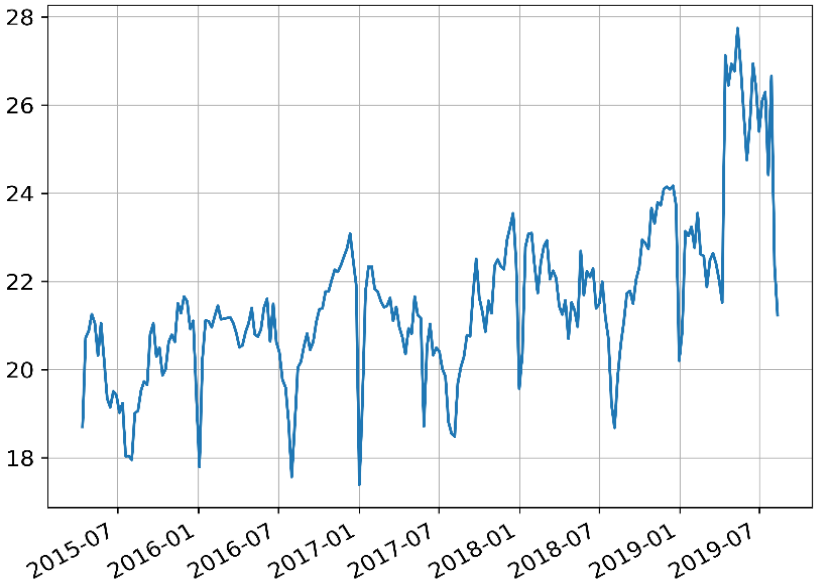


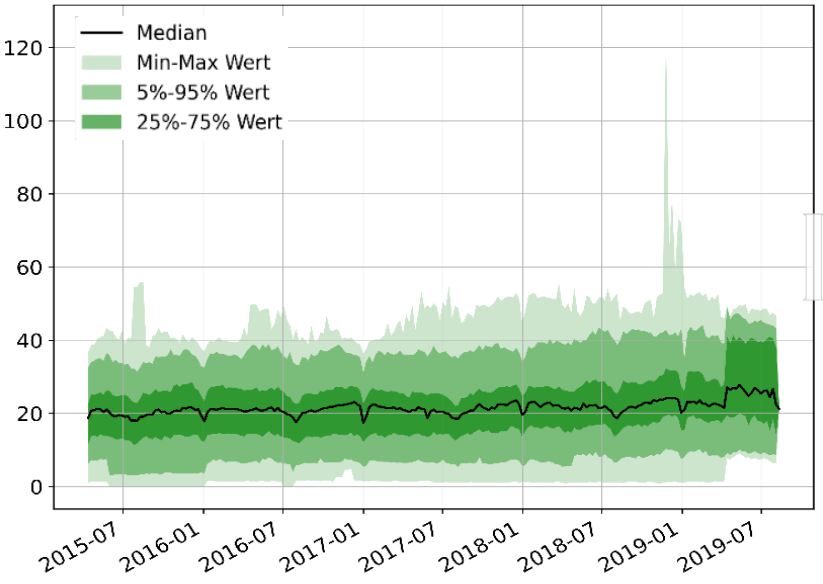
Fall 2



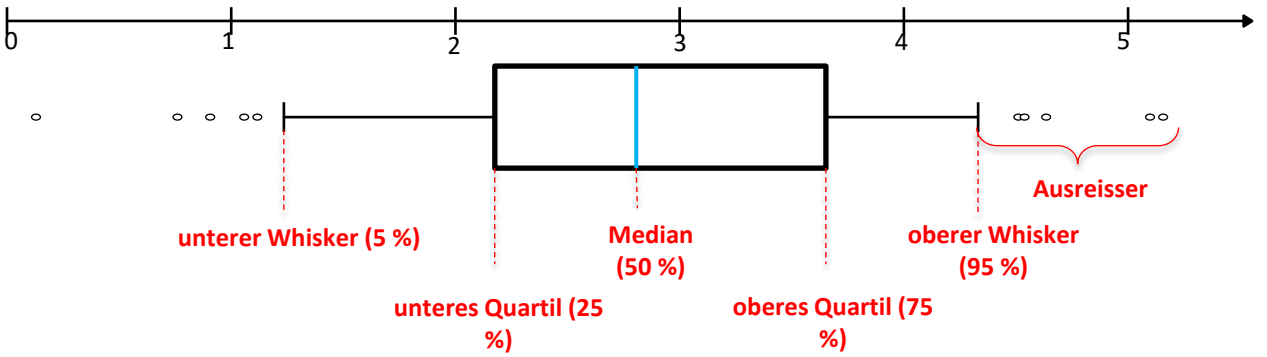
Tool zur Auswertung

- Zeitverlauf und Streuung





- Boxplot



Stromoberschwingungen

Bewertung der Stromoberschwingungen

- Stromoberschwingungen

$$I_v(\%) = \frac{I_v\ (A)}{I_1\ (A)} \cdot 100$$

- THD: Total Harmonic Distortion

$$THD = \sqrt{\sum_{v=2}^{40} (I_v(\%))^2} = \sqrt{\sum_{v=2}^{40} \left(\frac{I_v\ (A)}{I_1\ (A)}\right)^2}$$

- THC: Total Harmonic Current

$$THC = \sqrt{\sum_{v=2}^{40} (I_v(A))^2} = THD \cdot I_1\ (A)$$

Stromoberschwingungen

Bewertung der Stromoberschwingungen

- TDD: Total Demand Distortion

$$TDD = \sqrt{\sum_{v=2}^{40} \left(\frac{I_v\,(A)}{I_{VL}\,(A)} \right)^2} = THD \cdot \frac{I_1\,(A)}{I_{VL}\,(A)} = \frac{THC}{I_{VL}\,(A)}$$

Stromoberschwingungen

Bewertung der Stromoberschwingungen

- Auswirkungen
  - Spannungsoberschwingungen
  - Verluste und Alterung der Transformatoren

$$P_T = P_{NL} + P_{LL}$$

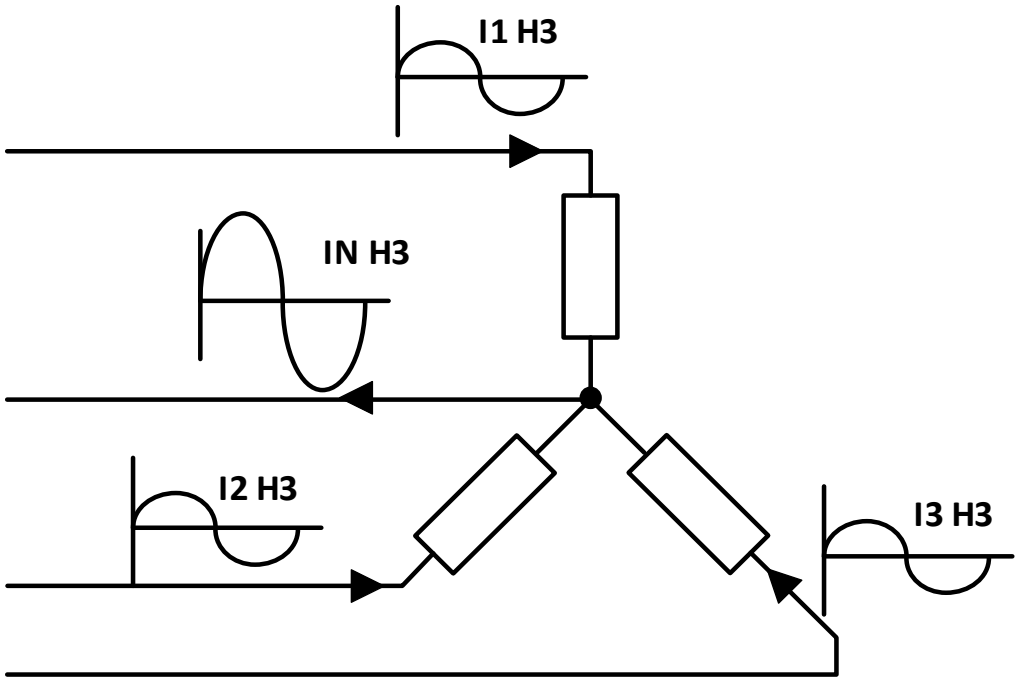
$$P_{LL} = R_W \cdot I^2 + F_{HL} \cdot P_{EC} + F_{HL_OSL} \cdot P_{OSL}$$

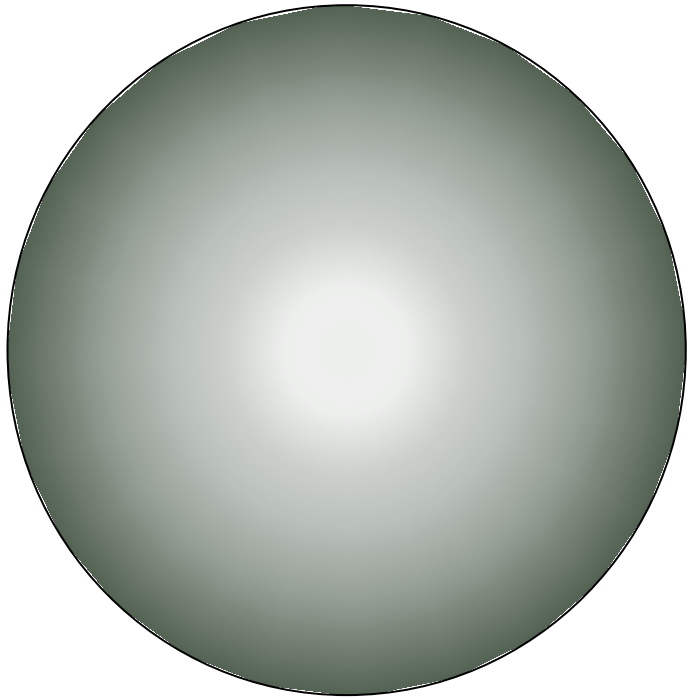
$$F_{HL} = \frac{\sum_{h=1}^{h_{max}} \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2 \cdot h^2}{\sum_{h=1}^{h_{max}} \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2}$$

Stromoberschwingungen

Bewertung der Stromoberschwingungen

- Auswirkungen
  - Alterung der Leitungen

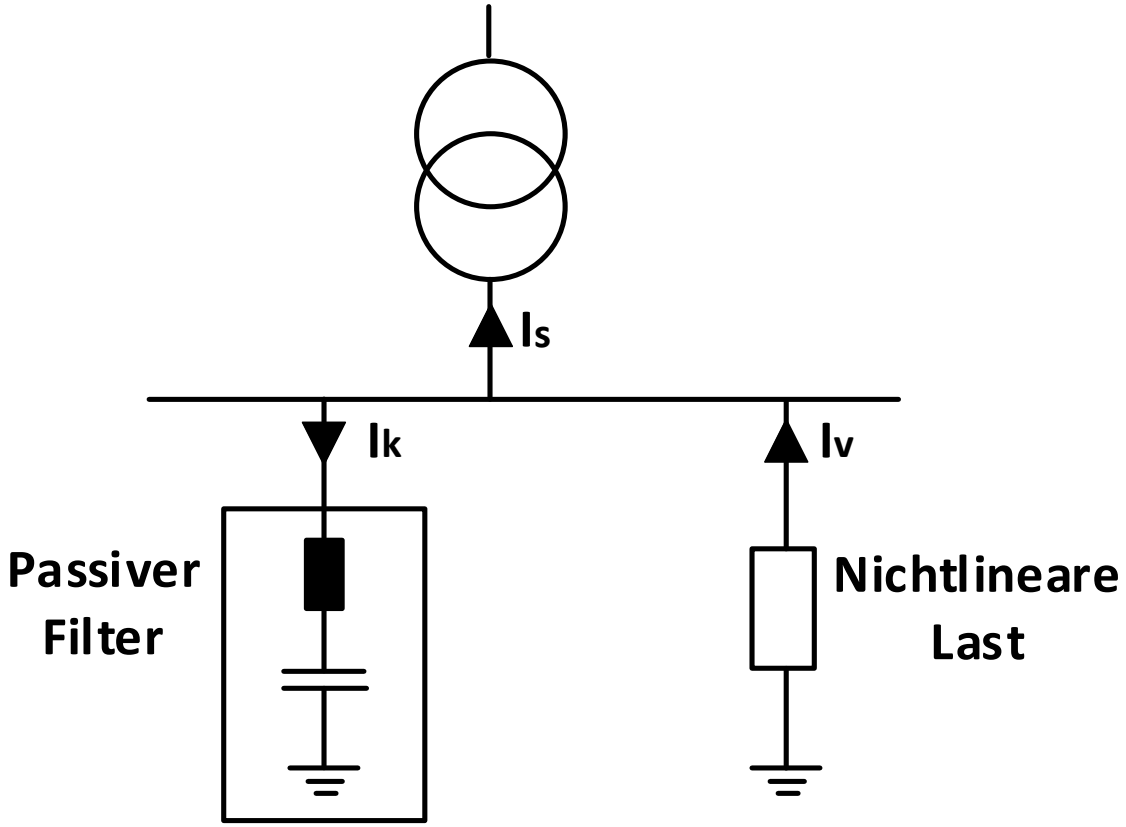




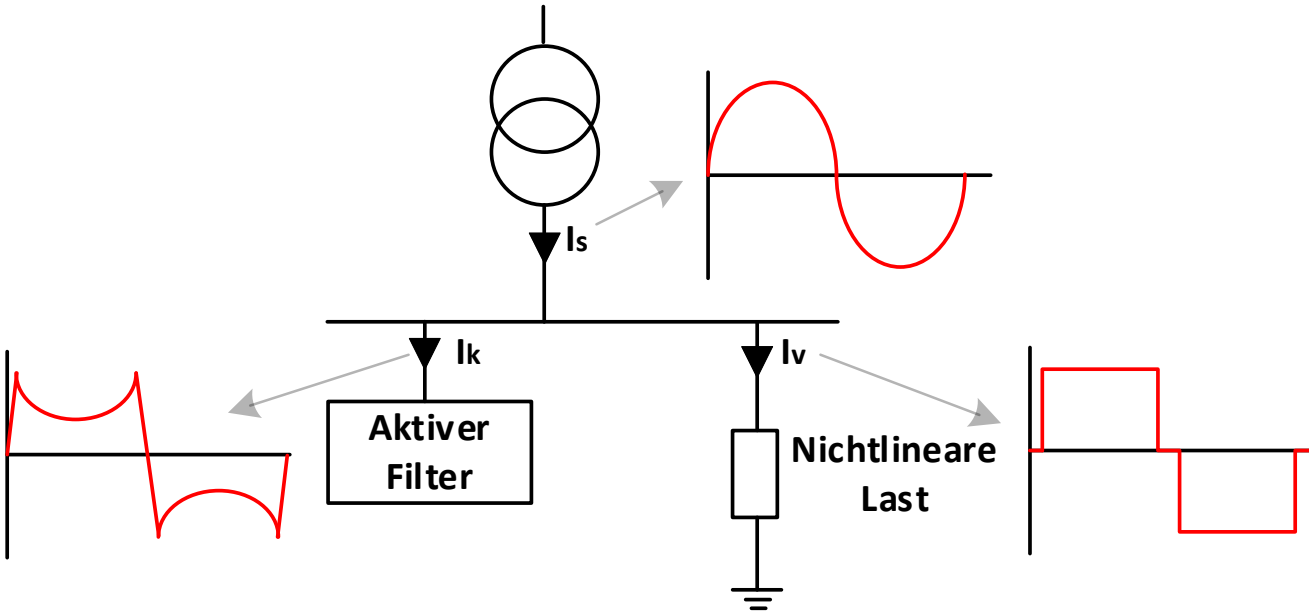
  - Alterung der elektrischen und elektronischen Betriebsmittel

Stromoberschwingungen
Gegenmassnahmen

Passiver Filter

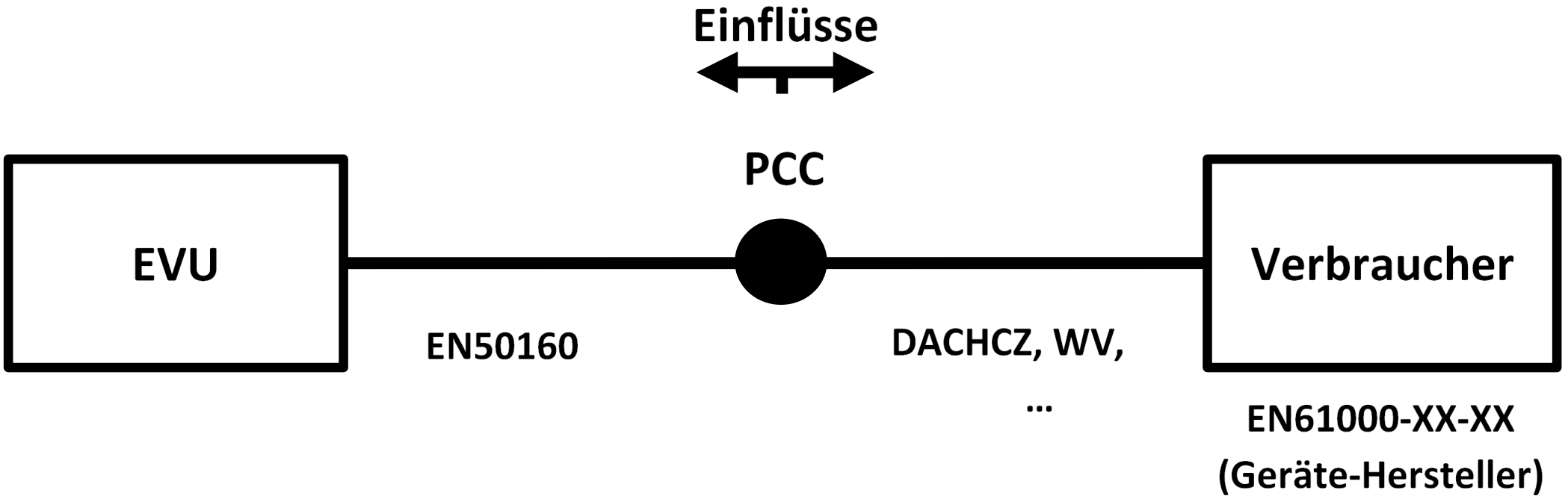


Aktiver Filter



Stromoberschwingungen
Normen und TR

- Darstellung der Normen



Stromoberschwingungen

Normen und TR

- EN50160

	Werte / Toleranzen	Integrationsintervall	Beobachtungszeit	Anteil der Werte, der die Toleranzen einhalten muss
Netzfrequenz bei Netzen mit synchroner Verbindung zu einem Verbundnetz	50 Hz +/- 1 % 50 Hz + 4 % / - 6 %	10 s	1 Jahr permanent	99.5 % 100 %
Langsame Spannungsänderungen	U_n +/- 10 % U_n + 10 % / - 15 %	10 min	1 Woche permanent	95 % 100 %
Schnelle Spannungsänderungen	U_n +/- 5 % (max. +/- 10 %)	10 ms	1 Tag	100 %
Langzeit-Flicker	P_{lt} <= 1	2 h	1 Woche	95 %
Oberschwingungsspannung (Bezugswert U_n bzw. U_c)	gemäss Tabelle, Gesamtoberschwingungsgehalt THD_u <= 8 %	10 min	1 Woche	95 %
Zwischenharmonische Spannung	Werte in Beratung			
Unsymmetrie der Versorgungsspannung (Verhältnis Gegen- zu Mitsystem)	U_2/U_1 <= 2 % (3 %)	10 min	1 Woche	95 %
Spannungseinbrüche (<= 1 min)	einige 10 bis 1'000 pro Jahr (unter 85 % U_c)	10 ms	1 Jahr	100 %
Kurze Versorgungsunterbrechungen (<= 3 min)	einige 10 bis mehrere 100 pro Jahr (unter 1 % U_c)	10 ms	1 Jahr	100 %
Zufällige lange Versorgungsunterbrechungen (> 3 min)	einige 10 bis 50 pro Jahr (unter 1 % U_c)	10 ms	1 Jahr	100 %
Zeitweilige netzfrequente Überspannungen (Aussenleiter - Erde)	meist < 1.5 kV	10 ms	keine Angabe	100 %
Transiente Überspannungen (Aussenleiter - Erde)	meist < 6 kV	kein	keine Angabe	100 %
Signalübertragungsspannungen (Bezugswert U_n bzw. U_c)	gemäss Grafik, Bereich 0.1 - 95 kHz	3 s	1 Tag	99 %

Stromoberschwingungen

Normen und TR

- EN50160

Ungerade u-OS				Gerade u-OS	
Ordnungszahl	Grenzwert [%]	**Ordnungszahl**	Grenzwert [%]	**Ordnungszahl**	Grenzwert [%]
5	6.0	3	5.0	2	2.0
7	5.0	9	1.5	4	1.0
11	3.5	15	1.0	6…24	0.5
13	3.0	21	0.75		
17	2.0				
19	1.5				
23	1.5				
25	1.5				

Stromoberschwingungen
Normen und TR

- EN50160
  - *''Diese Europäische Norm definiert, beschreibt und spezifiziert die wesentlichen Merkmale der Versorgungs-spannung an der Übergabestelle zum Netznutzer in öffentlichen Nieder-, Mittel- und Hochspannungs-Wechselstrom-Versorgungsnetzen unter normalen Betriebsbedingungen.''*
  - *''Diese Norm beschreibt die Grenzen oder Werte, innerhalb derer die Merkmale der Spannung an beliebigen Übergabestellen in öffentlichen europäischen Elektrizitätsversorgungsnetzen zu erwarten sind''*

Stromoberschwingungen

Normen und TR

- EN61000-3-2
  - Klasse A

Grenzwerte für Geräte der Klasse A	
Oberschwingungsordnung *n*	**Zulässiger Höchstwert des Oberschwingungsstromes [A]**
Ungeradzahlige Oberschwingungen	
3	2.30
5	1.14
7	0.77
9	0.40
11	0.33
13	0.21
$15 \leq n \leq 39$	$0.15 \times 15/n$
Geradzahlige Oberschwingungen	
2	1.08
4	0.43
6	0.30
$8 \leq n \leq 40$	$0.23 \times 8/n$

Stromoberschwingungen

Normen und TR

- EN61000-3-2
  - Klasse C

Grenzwerte für Geräte der Klasse C	
Oberschwingungsordnung *n*	Zulässiger Höchstwert des Oberschwingungsstromes in Bezug auf die Grundschwingung [%]
2	2
3	30 λ
5	10
7	7
19	5
$11 \leq n \leq 39$	3

Stromoberschwingungen
Normen und TR

- EN61000-3-2
  - Klasse D

Grenzwerte für Geräte der Klasse D		
Oberschwingungsordnung *n*	**Zulässiger Höchstwert des Oberschwingungsstromes je Watt [mA/W]**	**Zulässiger Höchstwert des Oberschwingungsstromes in Bezug auf die Grundschwingung [A]**
3	3.4	2.30
5	1.9	1.14
7	1.0	0.77
9	0.5	0.40
11	0.35	0.33
$13 \leq n \leq 39$ (ungerade)	$3.85 / n$	Siehe Klasse 1

Stromoberschwingungen

Normen und TR

- EN61000-3-12

Mindestwert von R_{SCE}	Zulässige einzelne Oberschwingungsströme I_h/I_{ref} [%]						Zulässige Oberschwingungsstrom-Kennwert	
	I_3	I_5	I_7	I_9	I_{11}	I_{13}	THC/I_{ref}	PWHC/ I_{ref}
33	21.6	10.7	7.2	3.8	3.1	2	23	23
66	24	13	8	5	4	3	26	26
120	27	15	10	6	5	4	30	30
250	35	20	13	9	8	6	40	40
≥ 350	41	24	15	12	10	8	47	47

Stromoberschwingungen

Normen und TR

- TR DACHCZ

Ungeradzahlige Oberschwingungen				Geradzahlige Oberschwingungen	
Keine Vielfache von 3		Vielfache von 3			
v	Oberschwingungsspannung [%]	v	Oberschwingungsspannung [%]	v	Oberschwingungsspannung [%]
5	6.0	3	5.0	2	2.0
7	5.0	9	1.5	4	1.0
11	3.5	15	0.4	6	0.5
13	3.0	21	0.3	8	0.5
$17 \leq v \leq 49$	$2.27 \cdot \left(\frac{17}{v}\right) - 0.27$	$21 < v \leq 45$	0.2	$10 \leq v \leq 50$	$0.25 \cdot \left(\frac{10}{v}\right) + 0.25$

Stromoberschwingungen

Normen und TR

- TR DACHCZ
  - Emissionsgrenzwerte

$$\frac{I_v}{I_A} = \frac{p_v}{1000} \cdot \sqrt{\frac{S_{kV}}{S_A}}$$

- Proportionalitätsfaktor:

v	3	5	7	11	13	17	19	>19
p_v	6	15	10	5	4	2	1.5	1

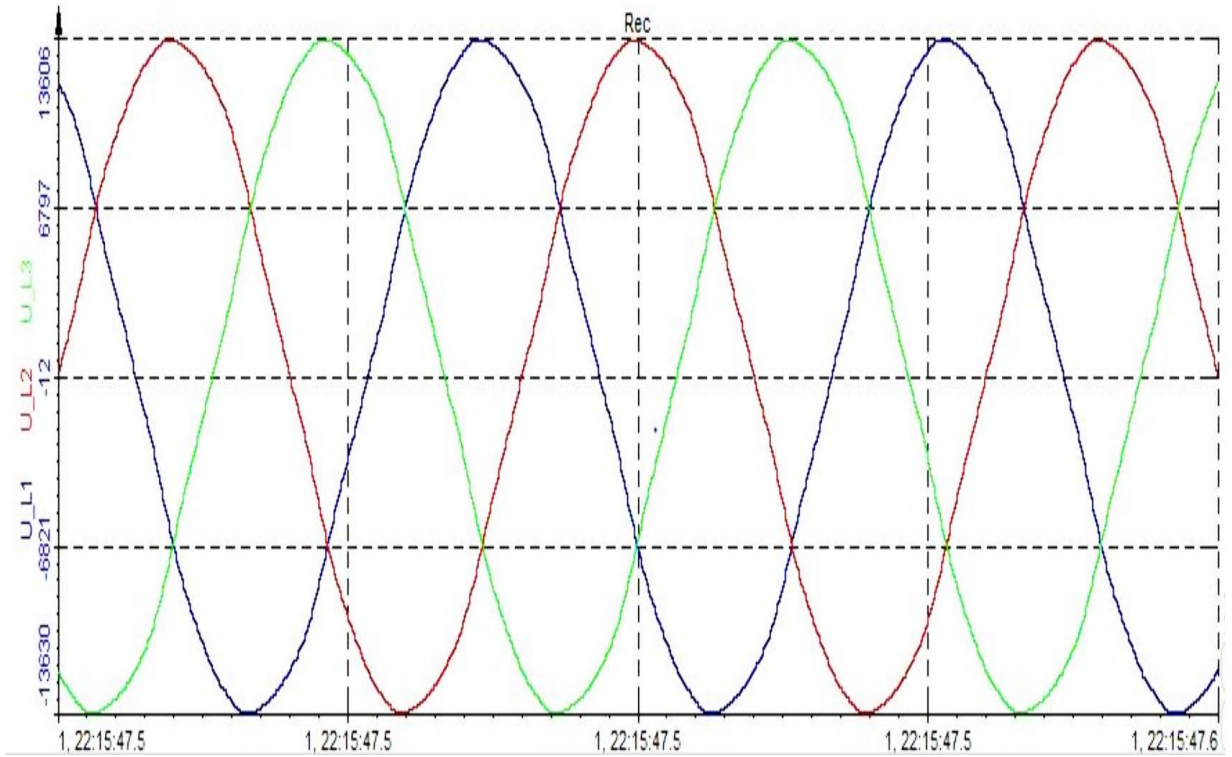
- Oberschwingungsgehalt

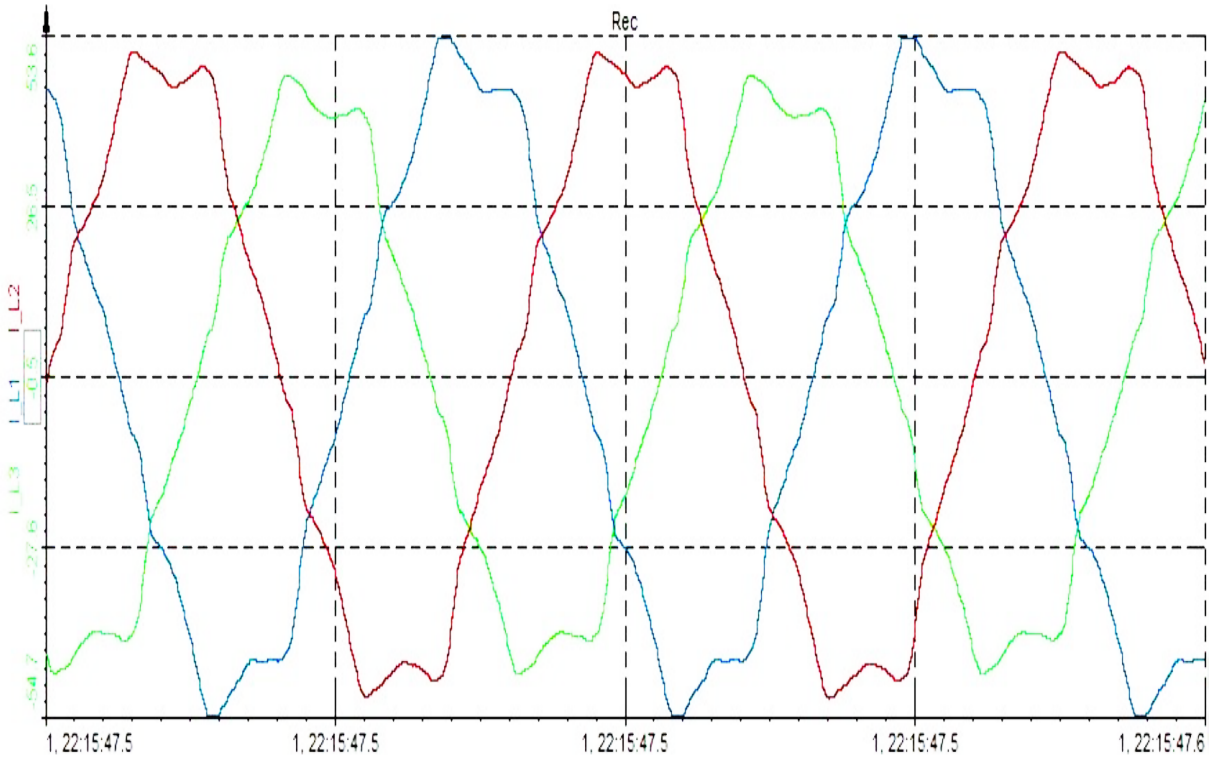
$$THDi_A = \frac{\sqrt{\sum_{v=2}^{50} I_v^2}}{I_A} \leq \frac{20}{1000} \cdot \sqrt{\frac{S_{kV}}{S_A}}$$

Untersuchung der Stromverzerrung in einem MS-Netz

Messung von AEW

- Kurvenform

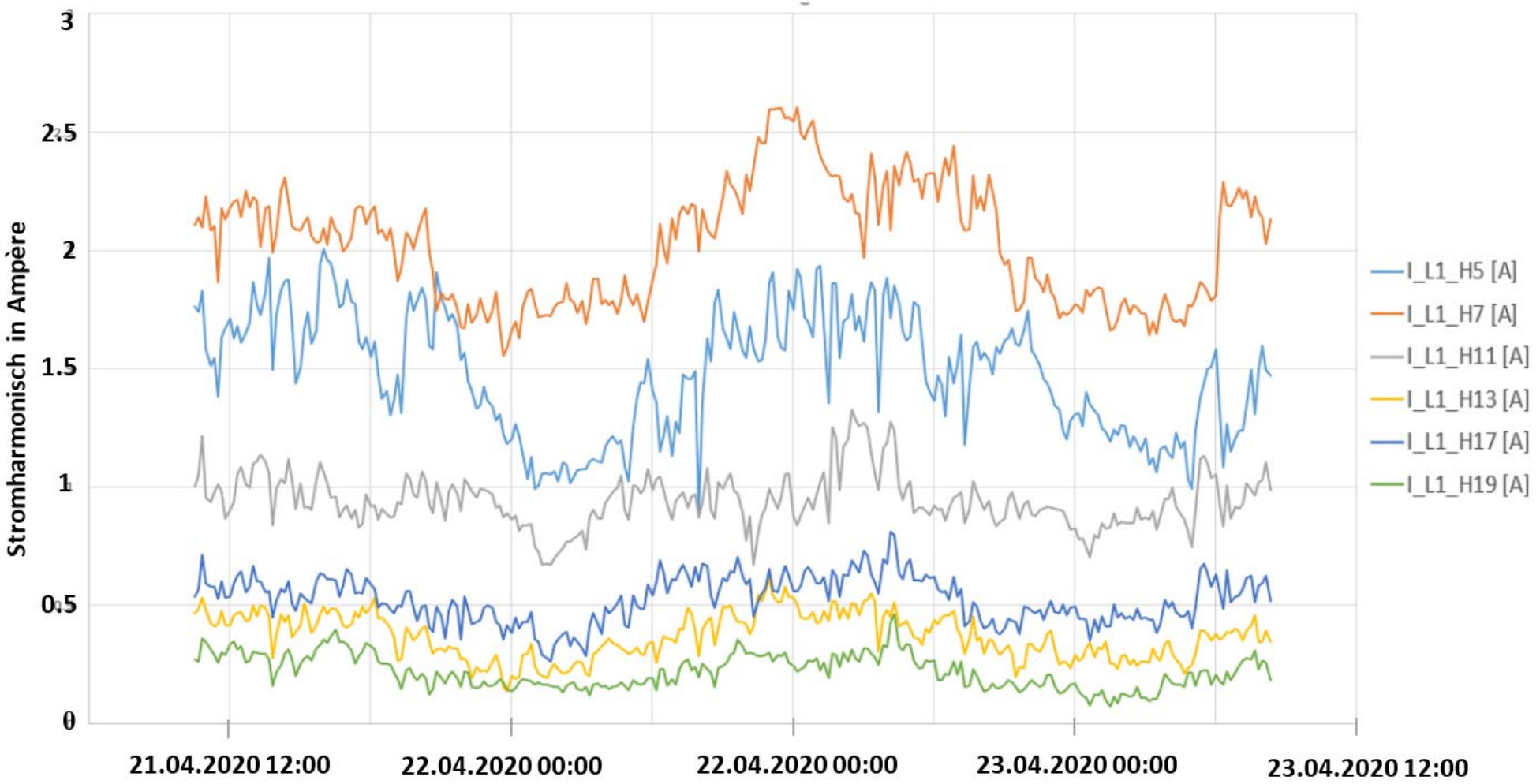




Untersuchung der Stromverzerrung in einem MS-Netz

Messung von AEW

- Stromoberschwingungen



Untersuchung der Stromverzerrung in einem MS-Netz
Schaltkabine

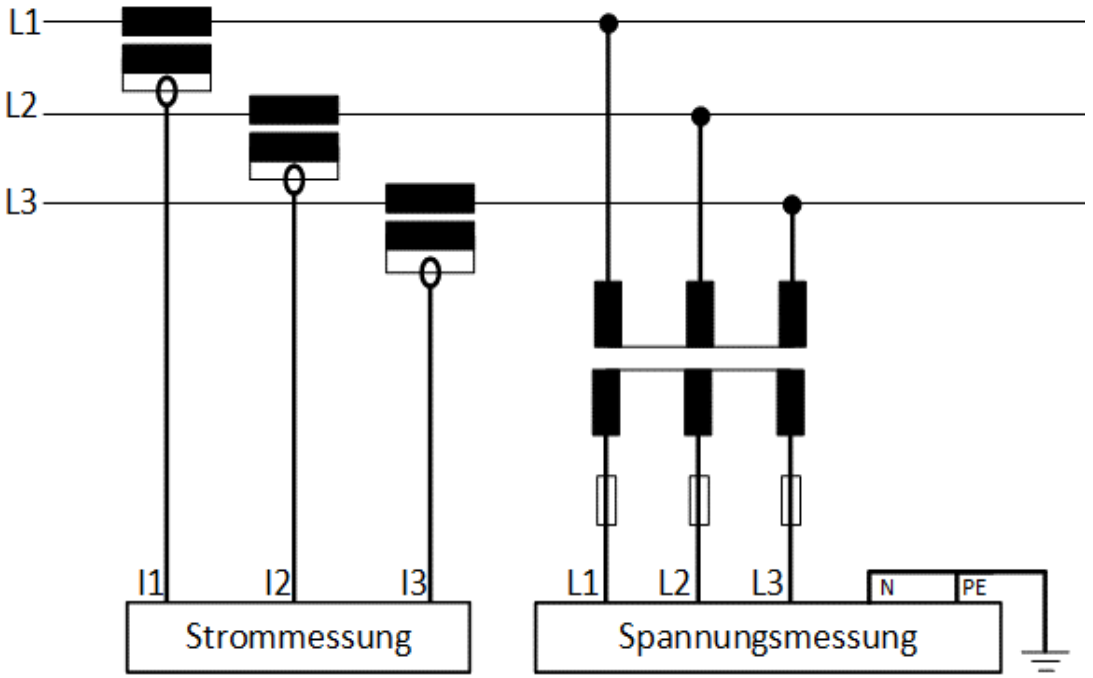
- Eigenschaften

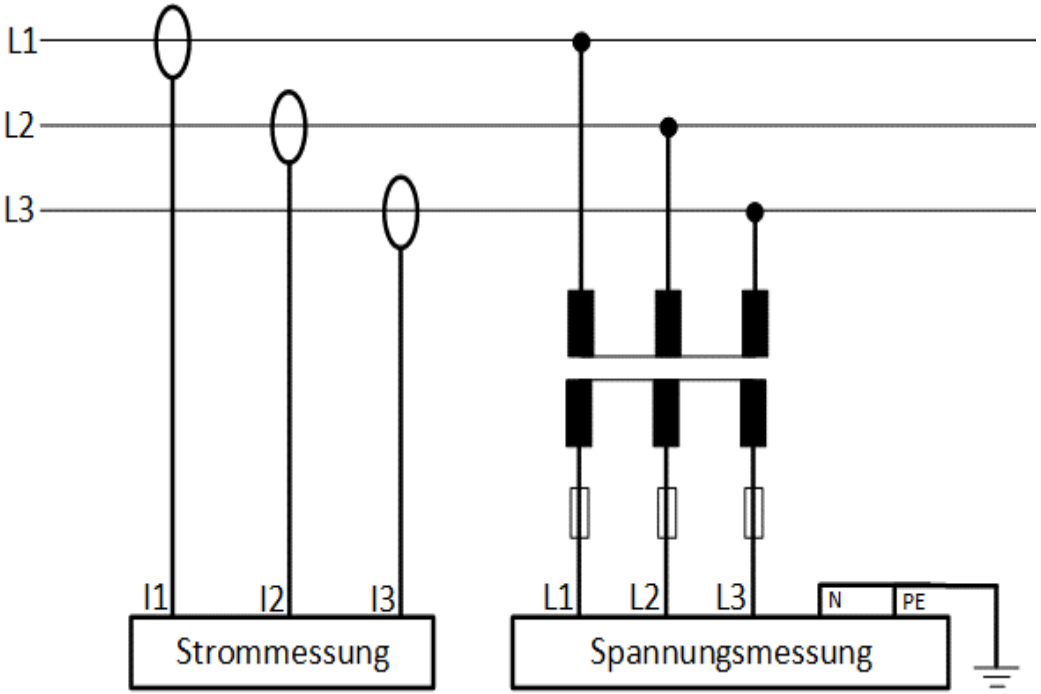
Objekt	Parameter	Wert/Eigenschaft
Netz	Nennspannung	16 kV
	Kurzschlussleistung	248 MVA
	Netzimpedanz	1.032 Ω
Schaltanlage	Hersteller	Siemens
	Typ	8DJH 24.0 kV
	Anzahl Abgänge	7 (davon 2 ausser Betrieb)
	Verfügbarkeit Spannungswandler	Ja
	Verhältnis Spannungswandler	16 kV / 100 V
	Typ des Spannungswandlers	Induktiv
	Verfügbarkeit Stromwandler	Teilweise, nur für FSKAB2 und FSKAB4
	Verhältnis Stromwandler	400 A / 1 A
	Typ des Stromwandlers	Induktiv

Untersuchung der Stromverzerrung in einem MS-Netz

MS-Messungen

- Messschema





Untersuchung der Stromverzerrung in einem MS-Netz

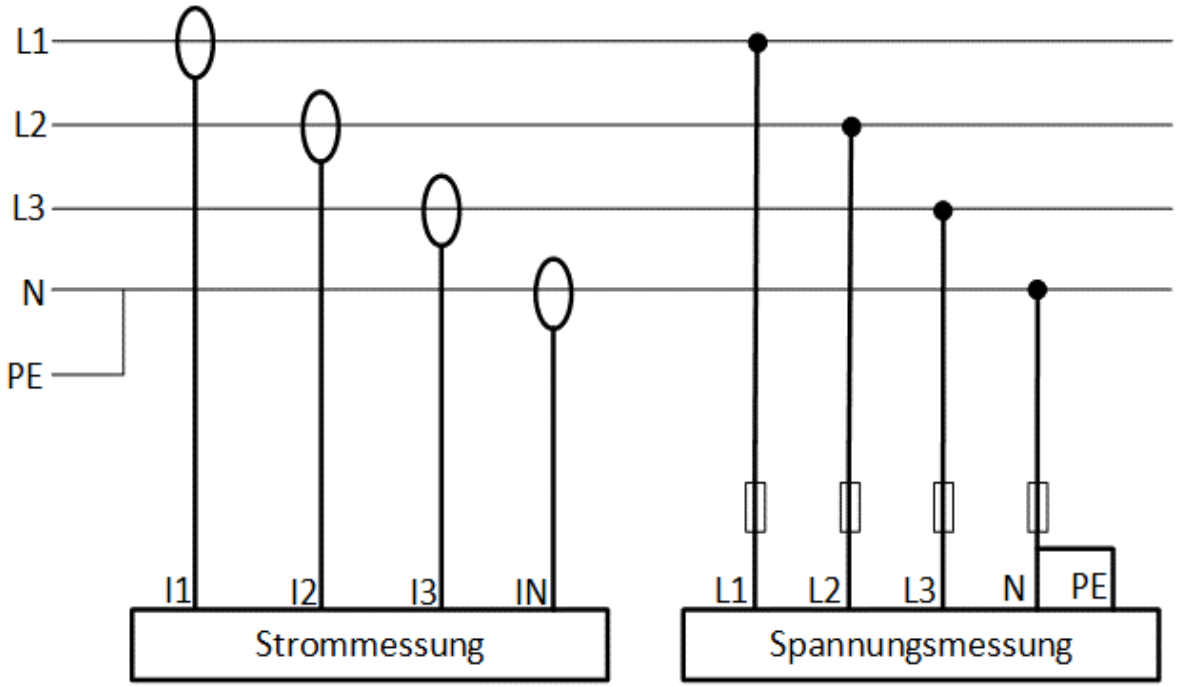
MS-Messungen

- Messstelle

Untersuchung der Stromverzerrung in einem MS-Netz

MS-Messungen

- Messschema



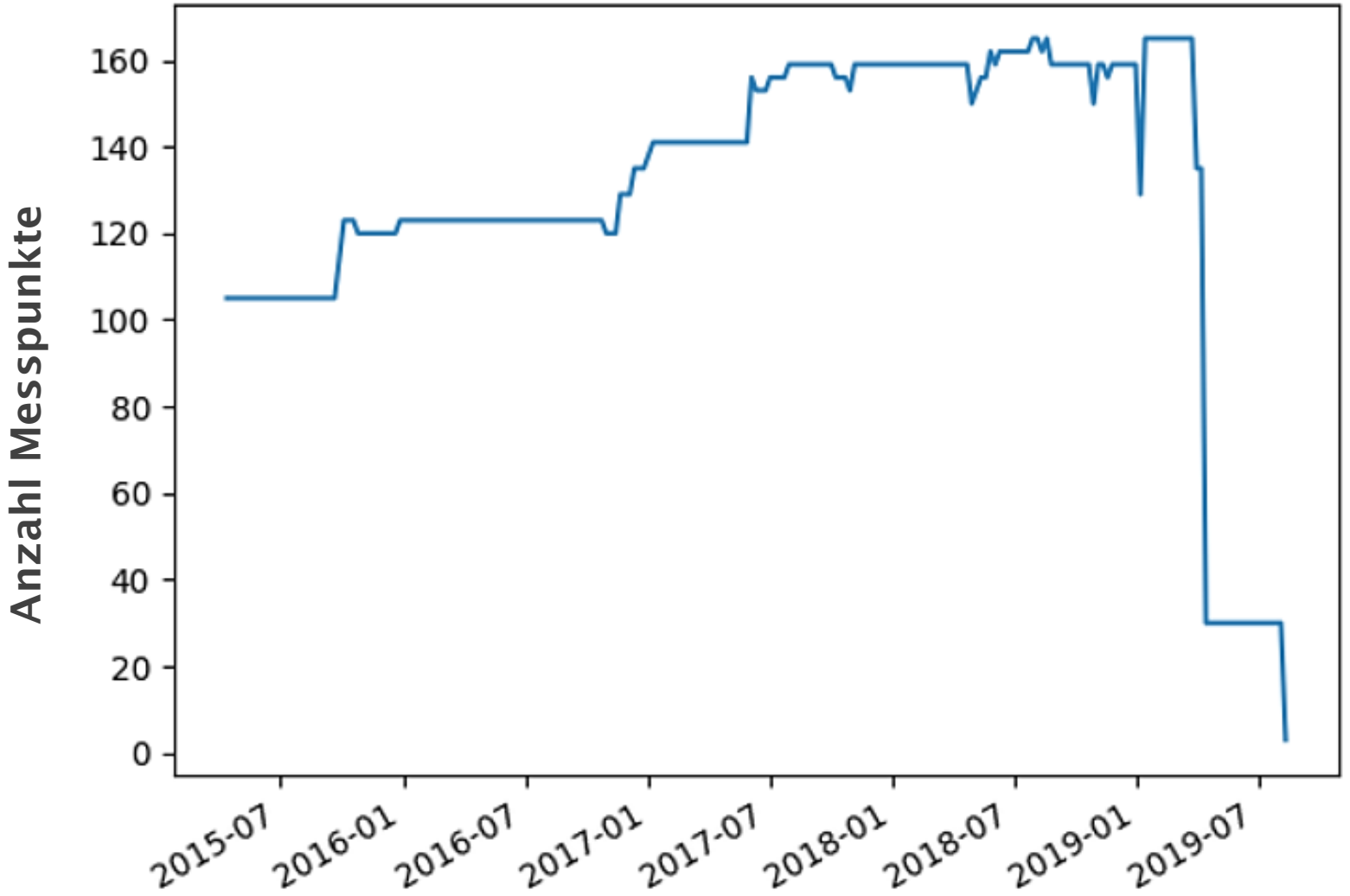
Untersuchung der Stromverzerrung in einem MS-Netz

MS-Messungen

- Messstelle

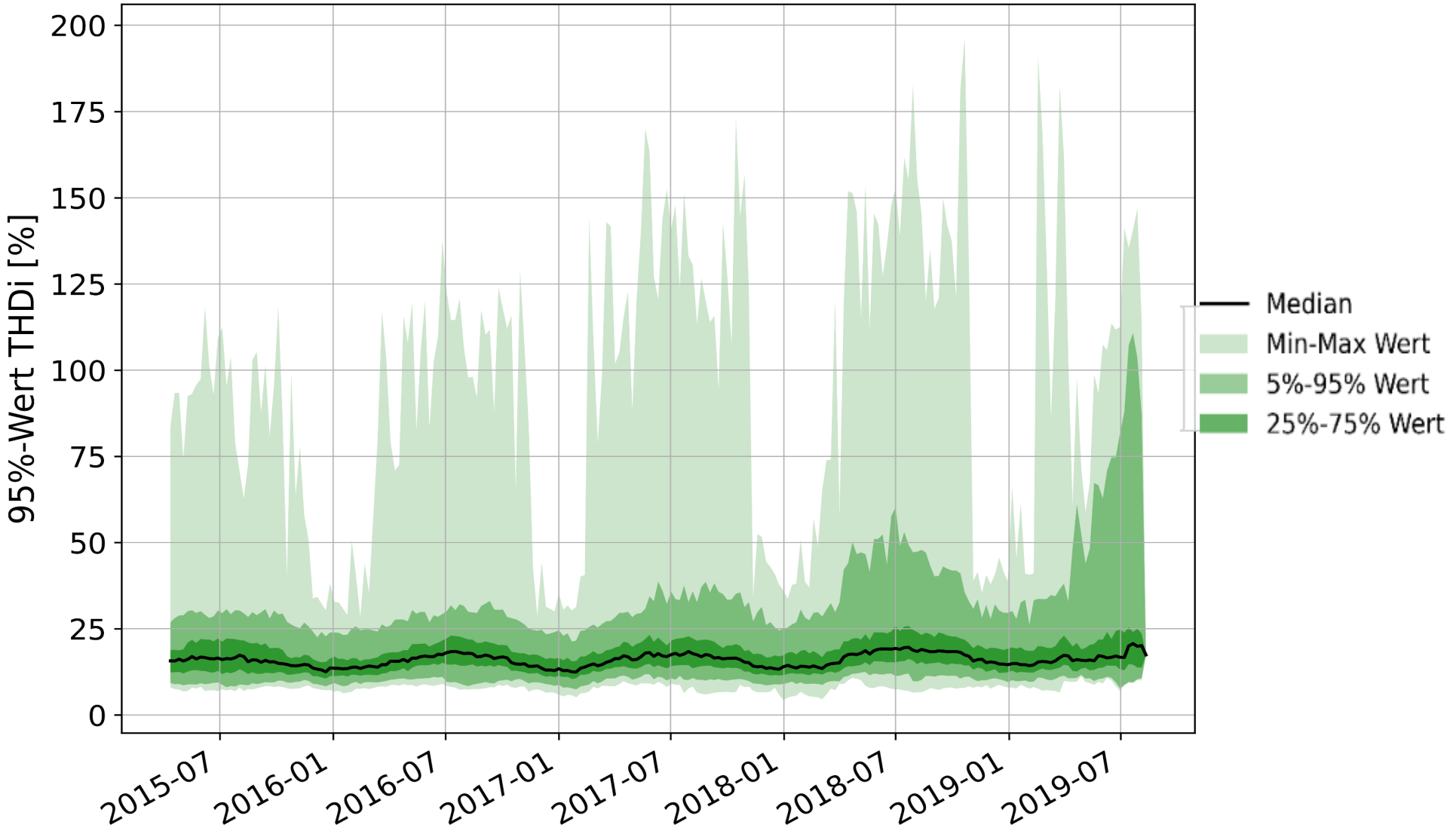
PQ-Langzeitdaten ESB

Anzahl Messpunkte



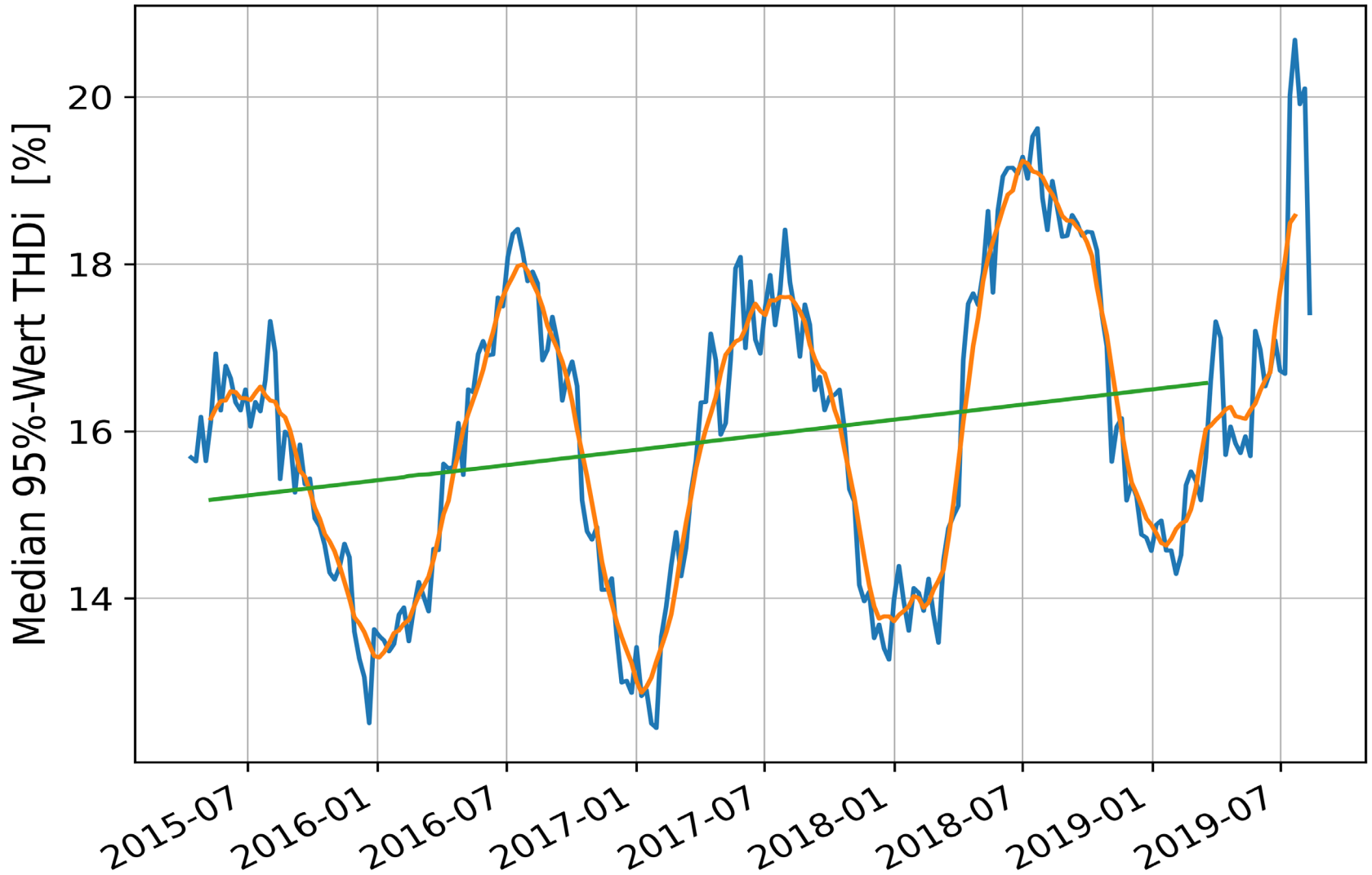
PQ-Langzeitdaten ESB

Streuung THDi



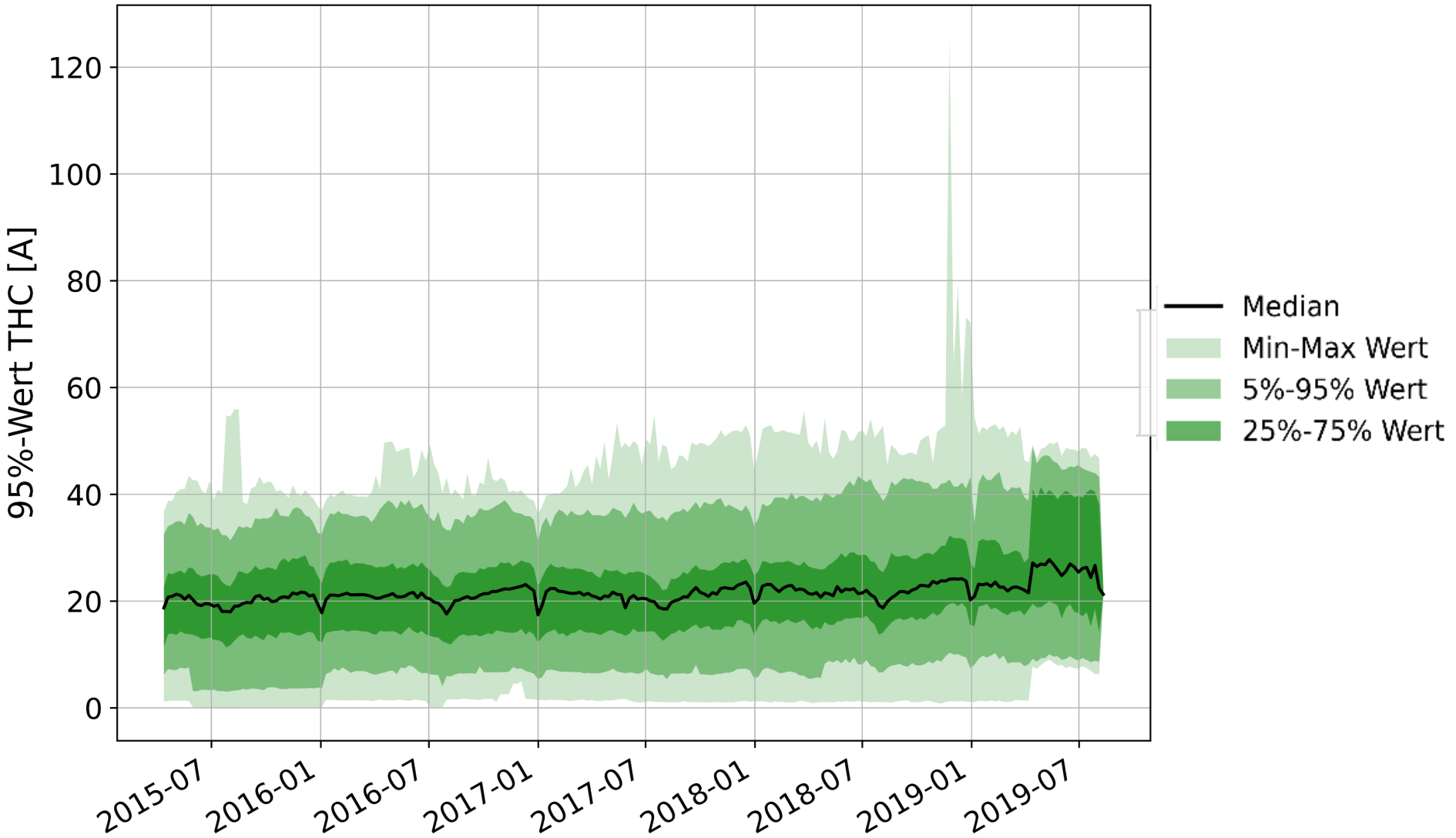
PQ-Langzeitdaten ESB

Median THDi



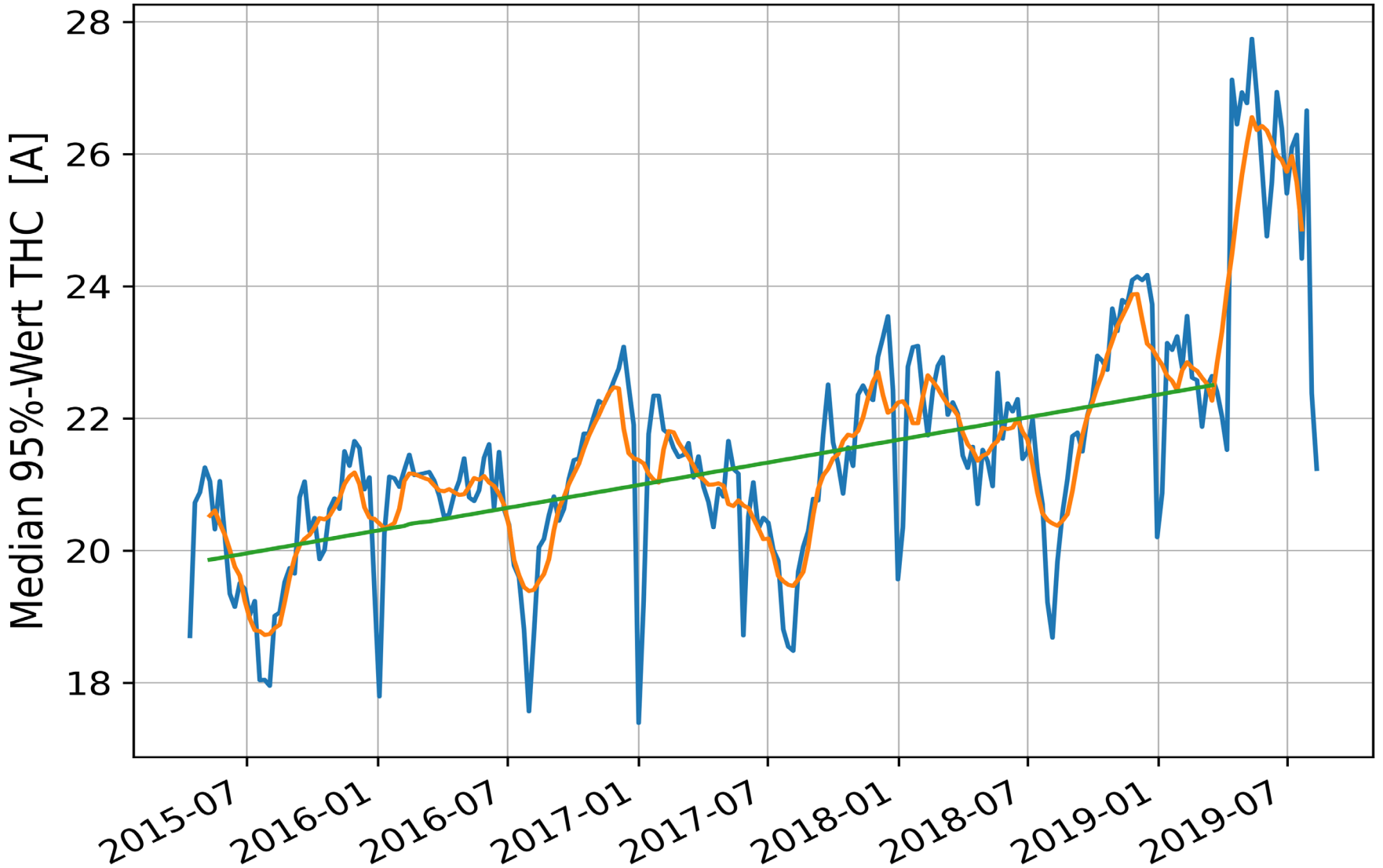
PQ-Langzeitdaten ESB

Streuung THC



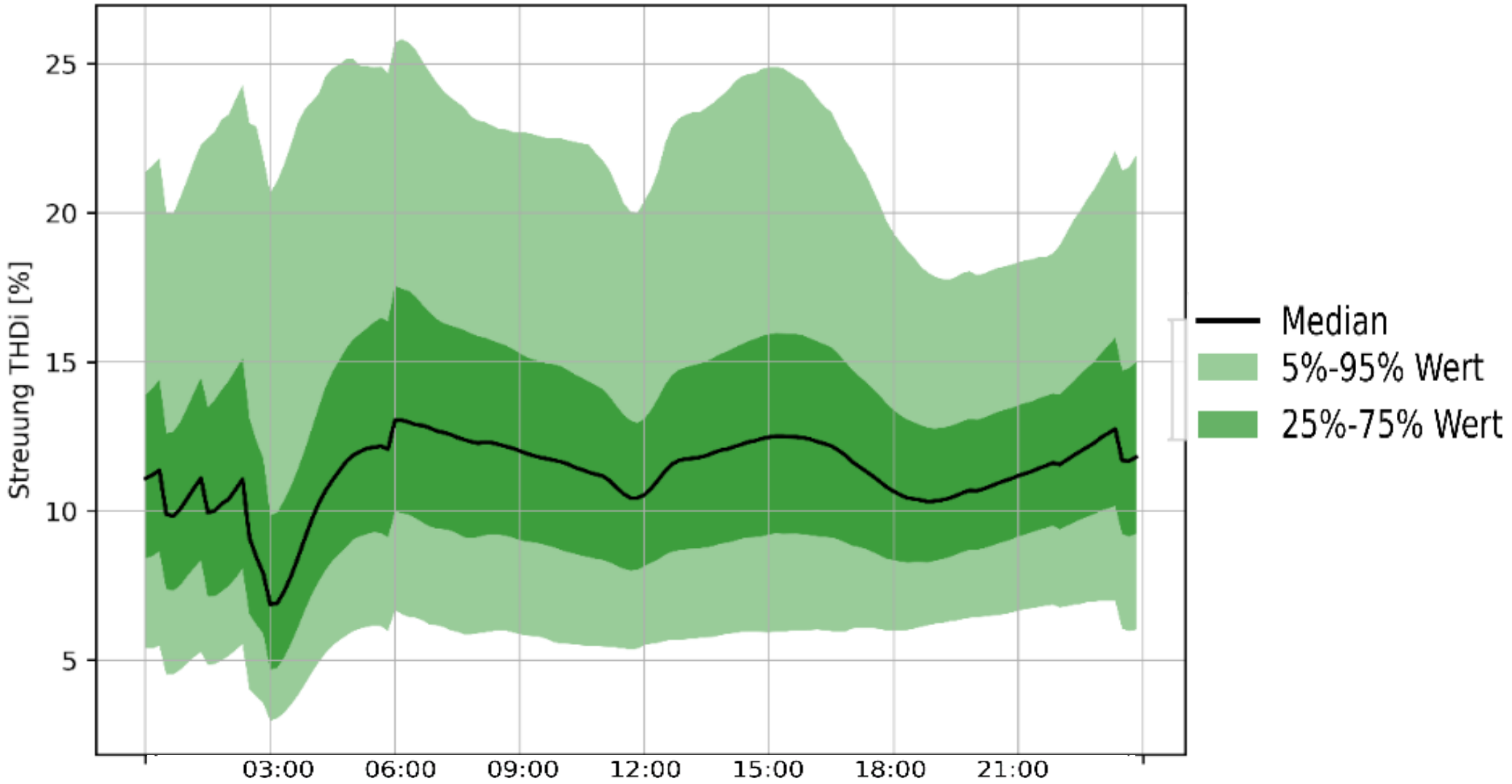
PQ-Langzeitdaten ESB

Median THC



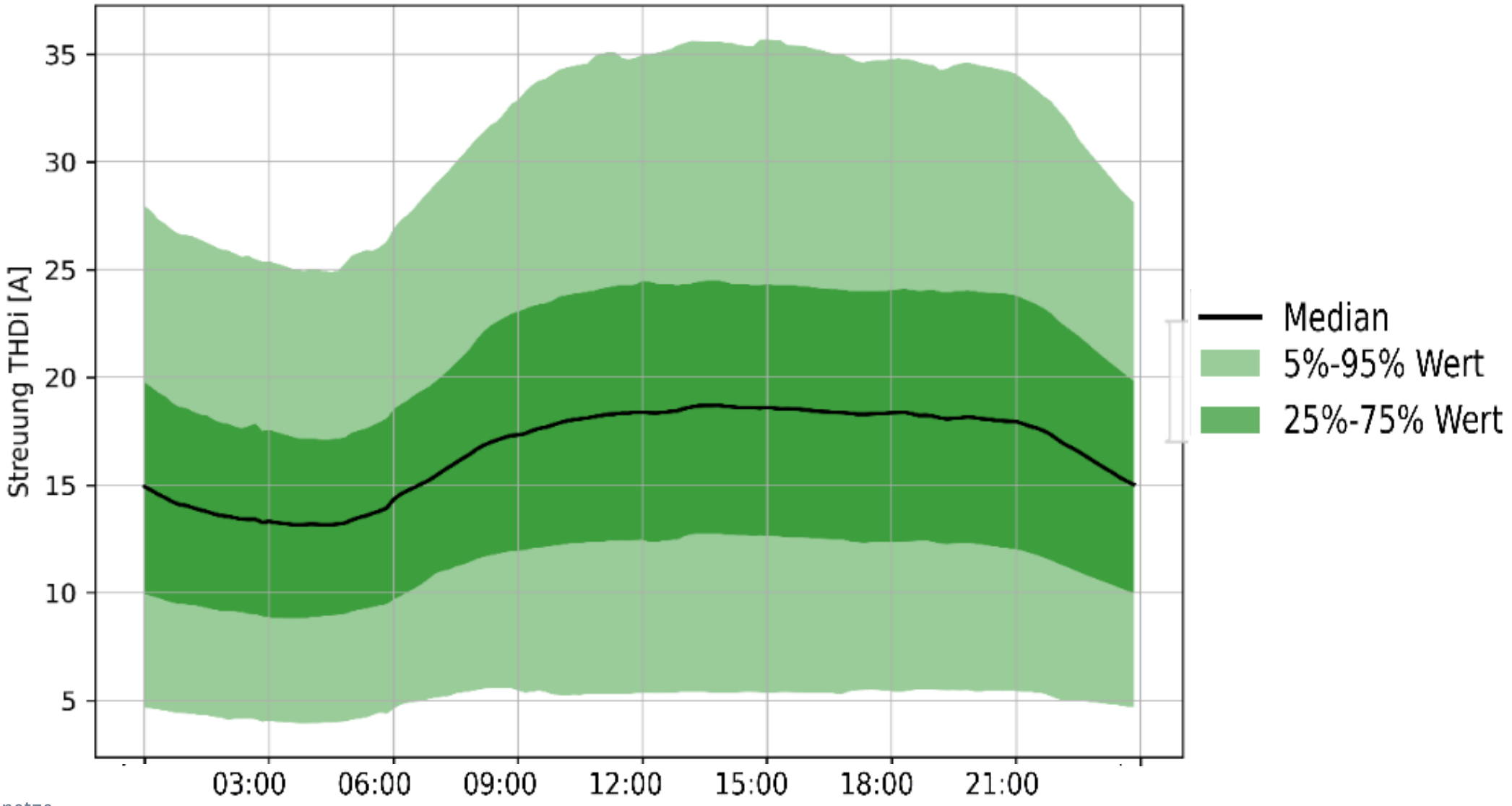
PQ-Langzeitdaten ESB

Tagesverlauf THDi



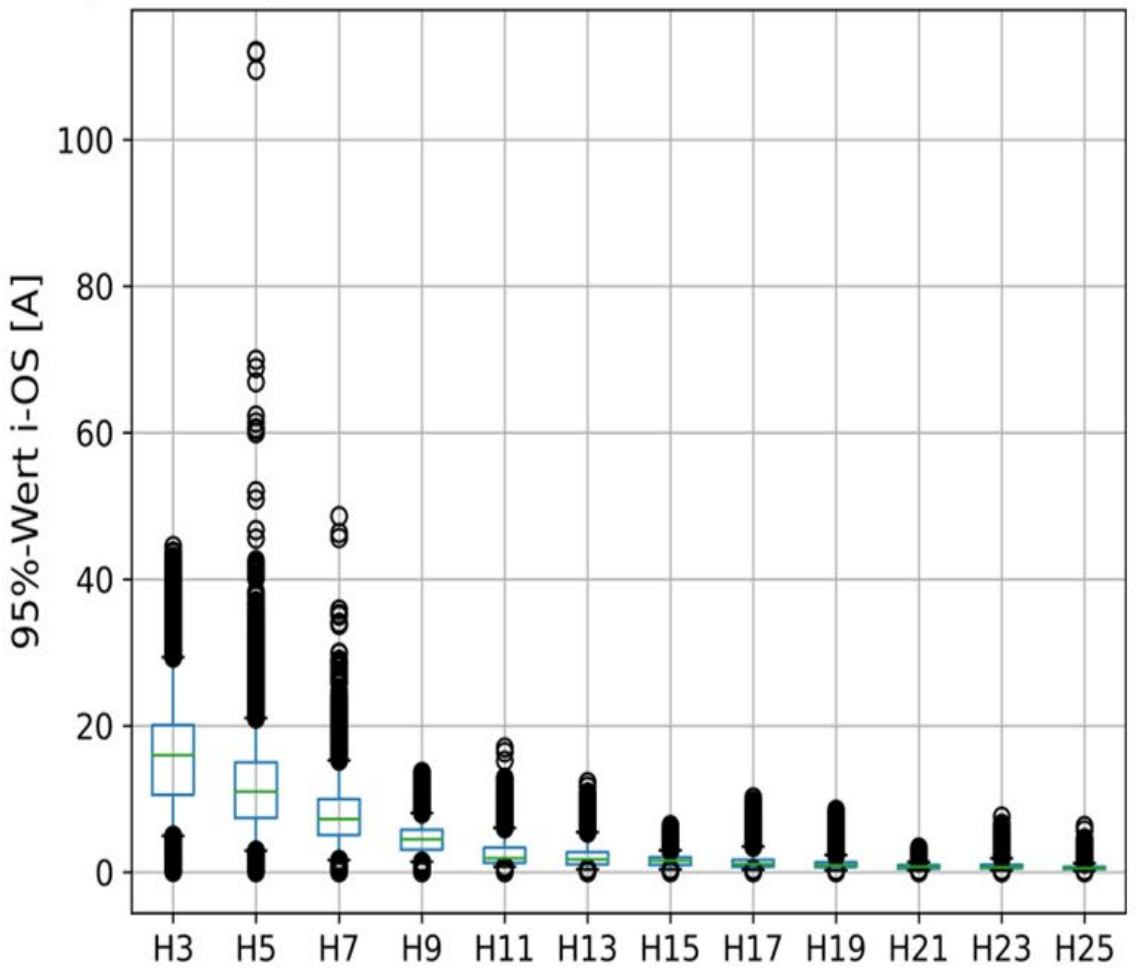
PQ-Langzeitdaten ESB

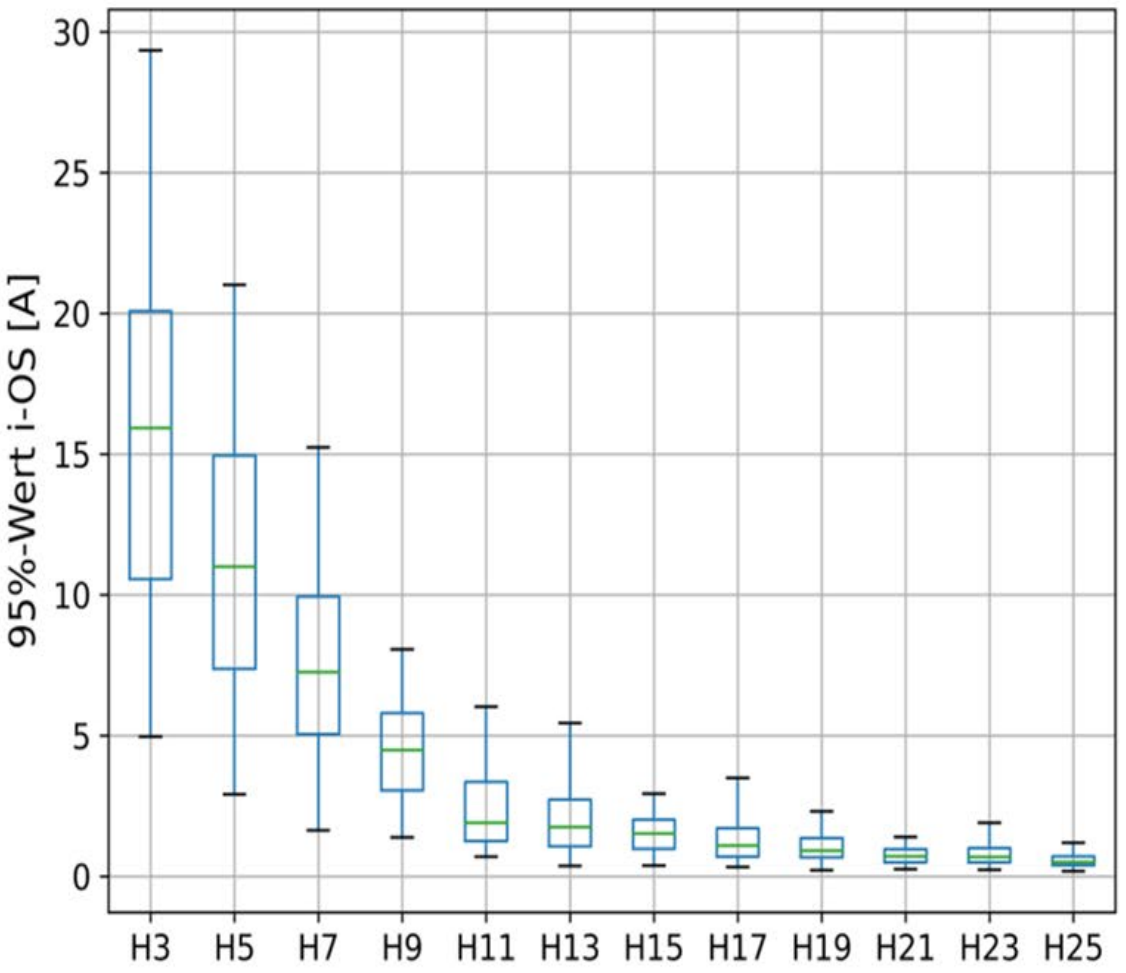
Tagesverlauf THDi



PQ-Langzeitdaten ESB
Stromoberschwingungen

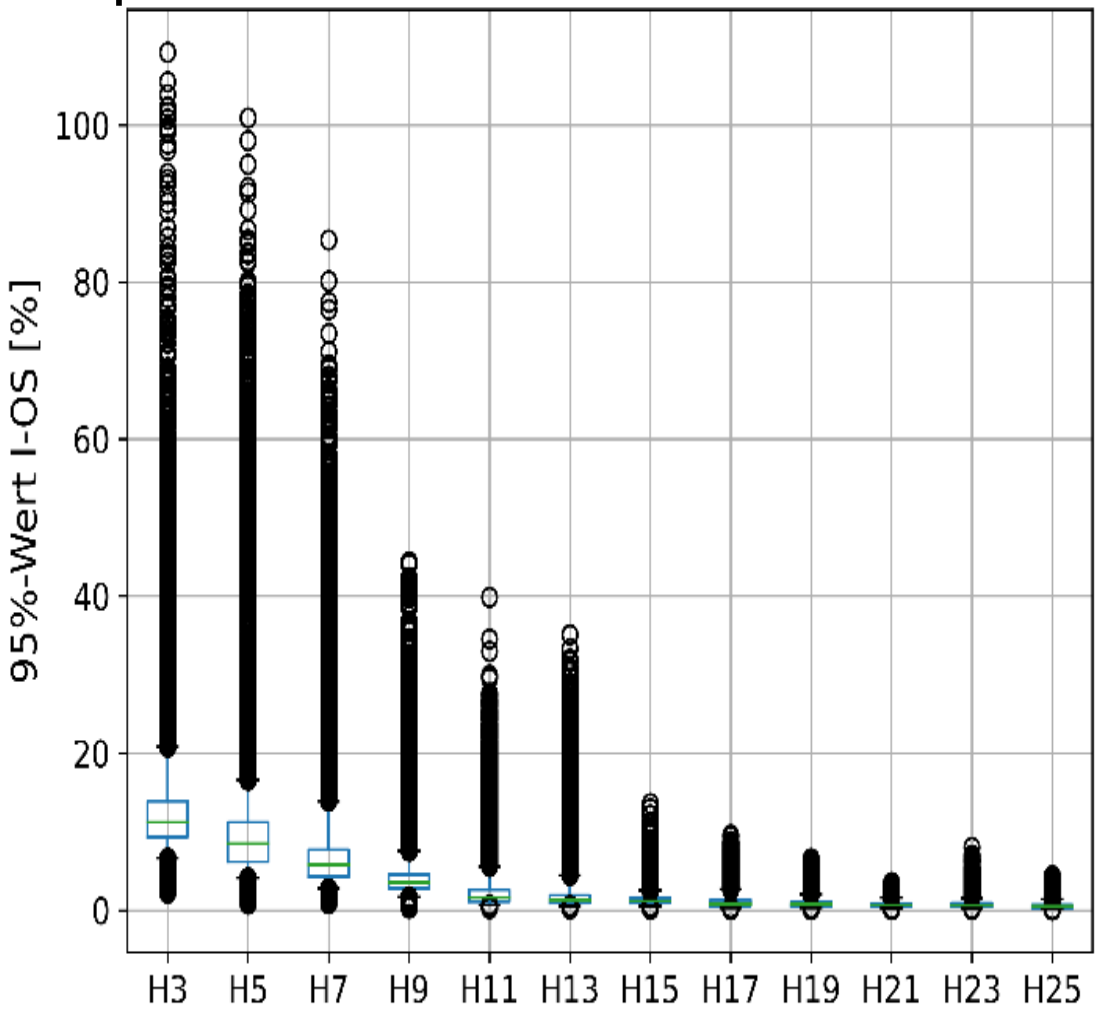
- Boxplot in Ampere

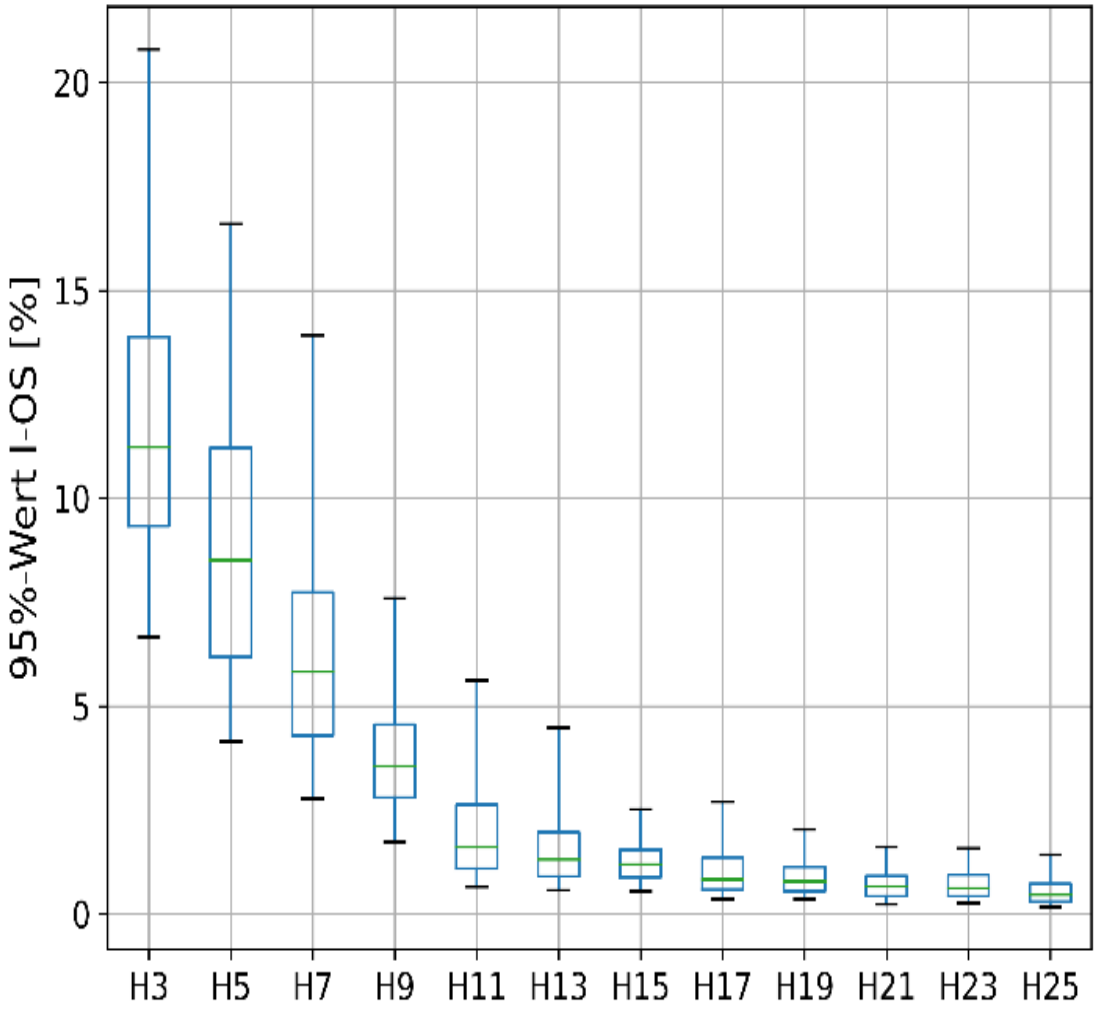




PQ-Langzeitdaten ESB
Stromoberschwingungen

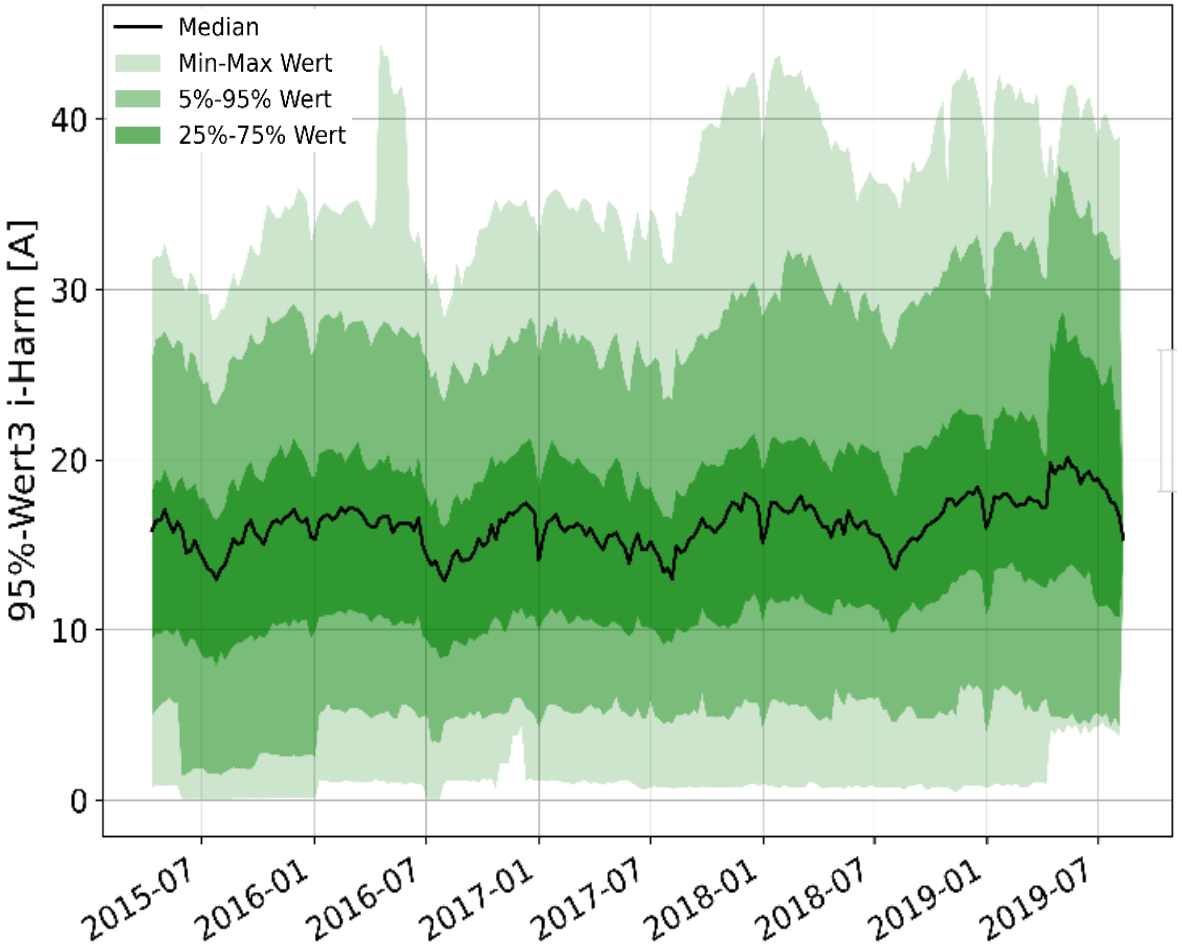
- Boxplot in Prozent

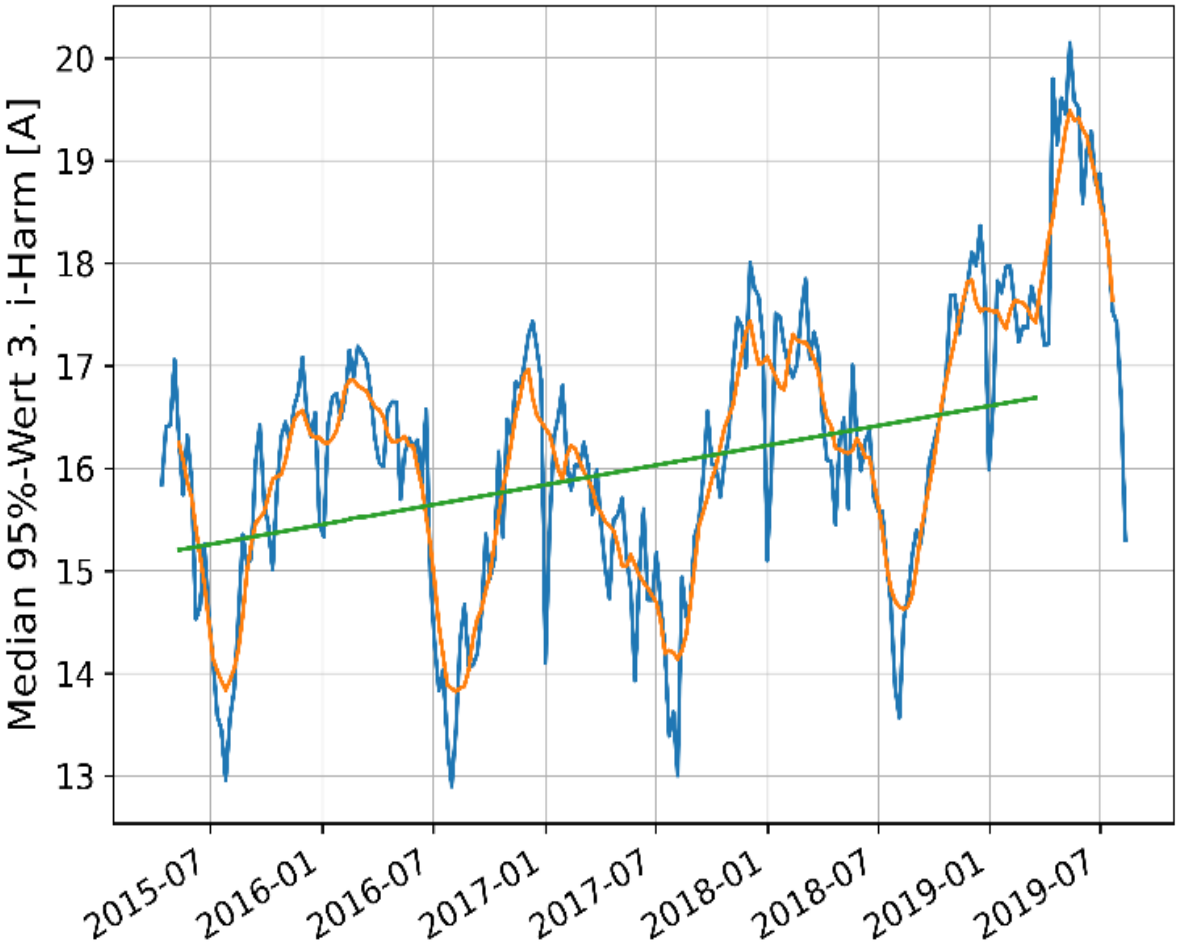




PQ-Langzeitdaten ESB
Stromoberschwingungen

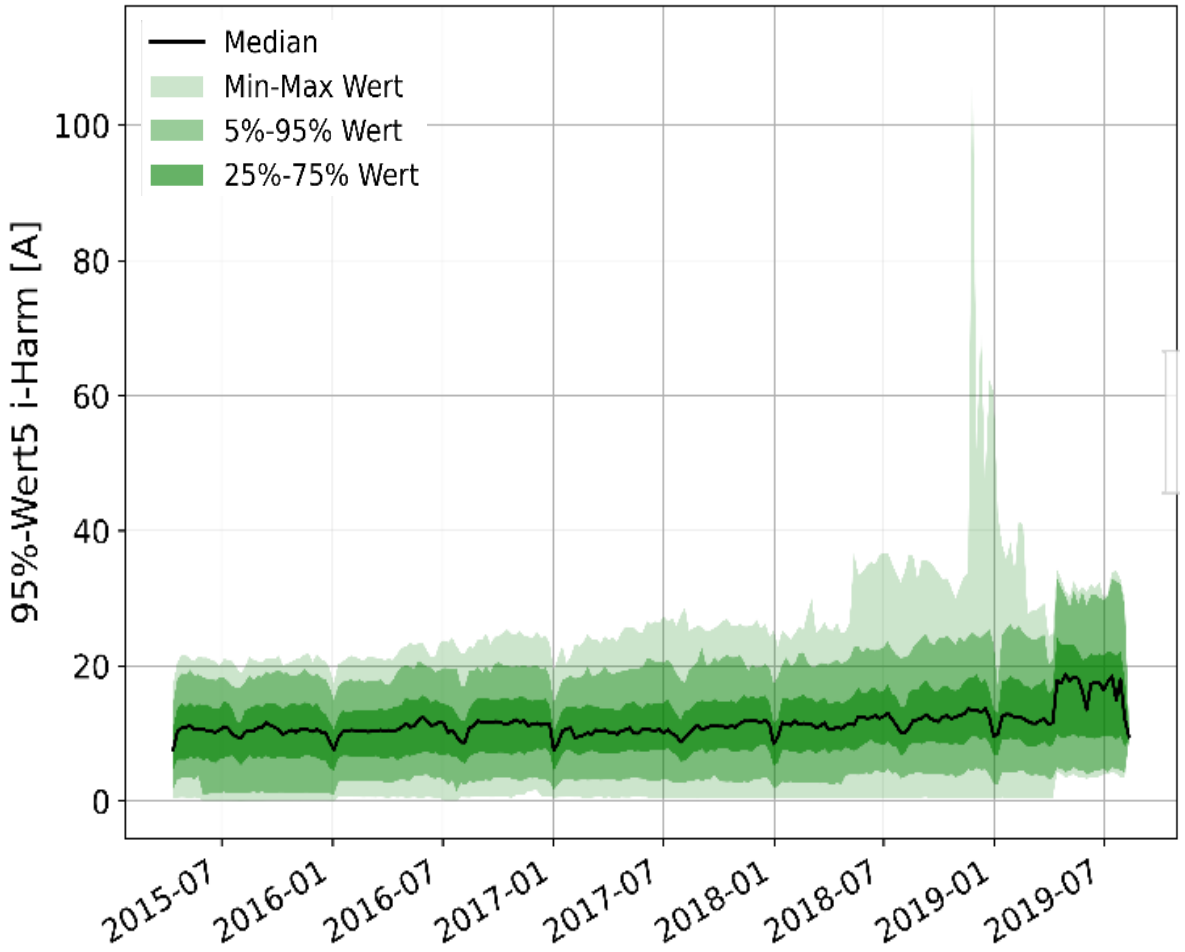
- Streuung und Median der 3. i-Harm in A

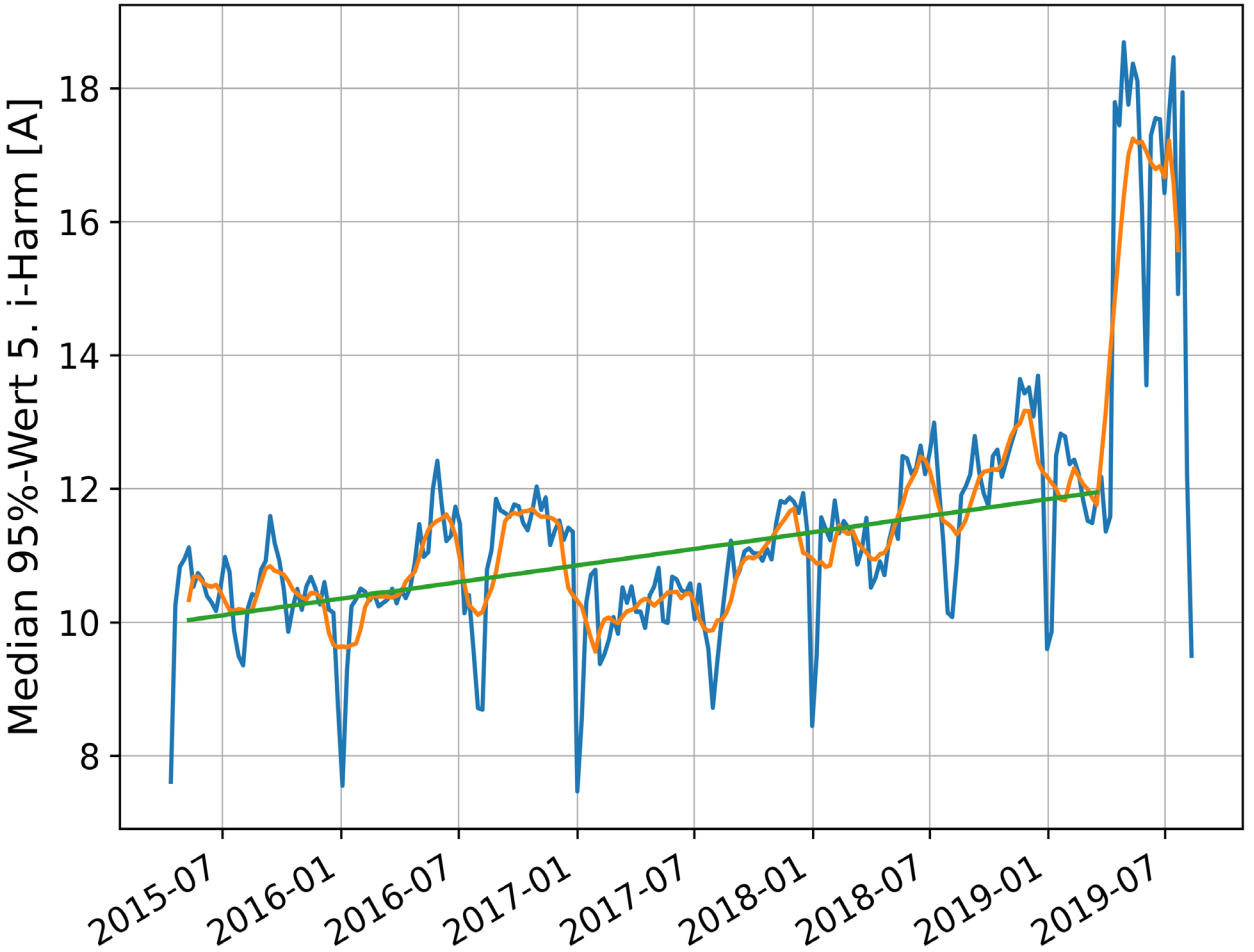




PQ-Langzeitdaten ESB
Stromoberschwingungen

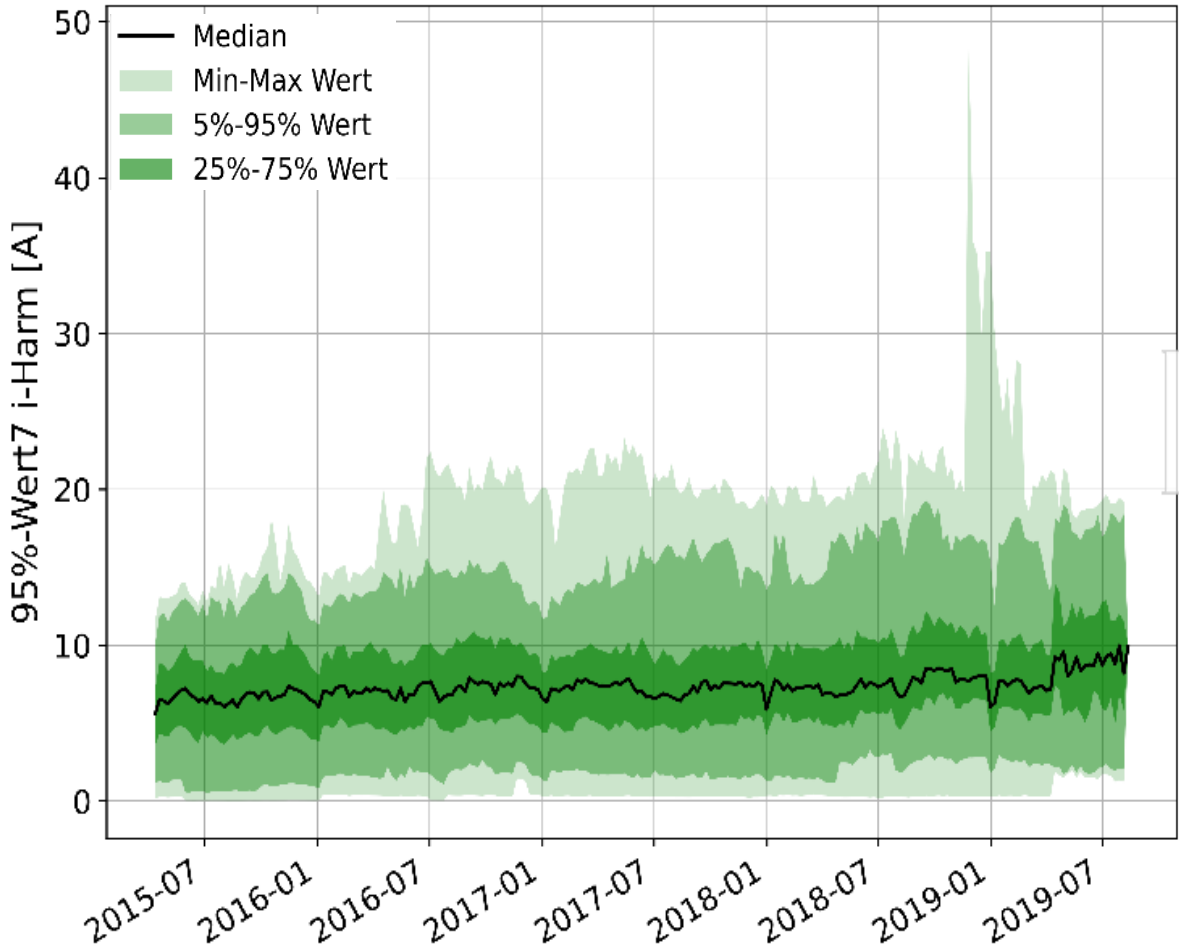
- Streuung und Median der 5. i-Harm in A

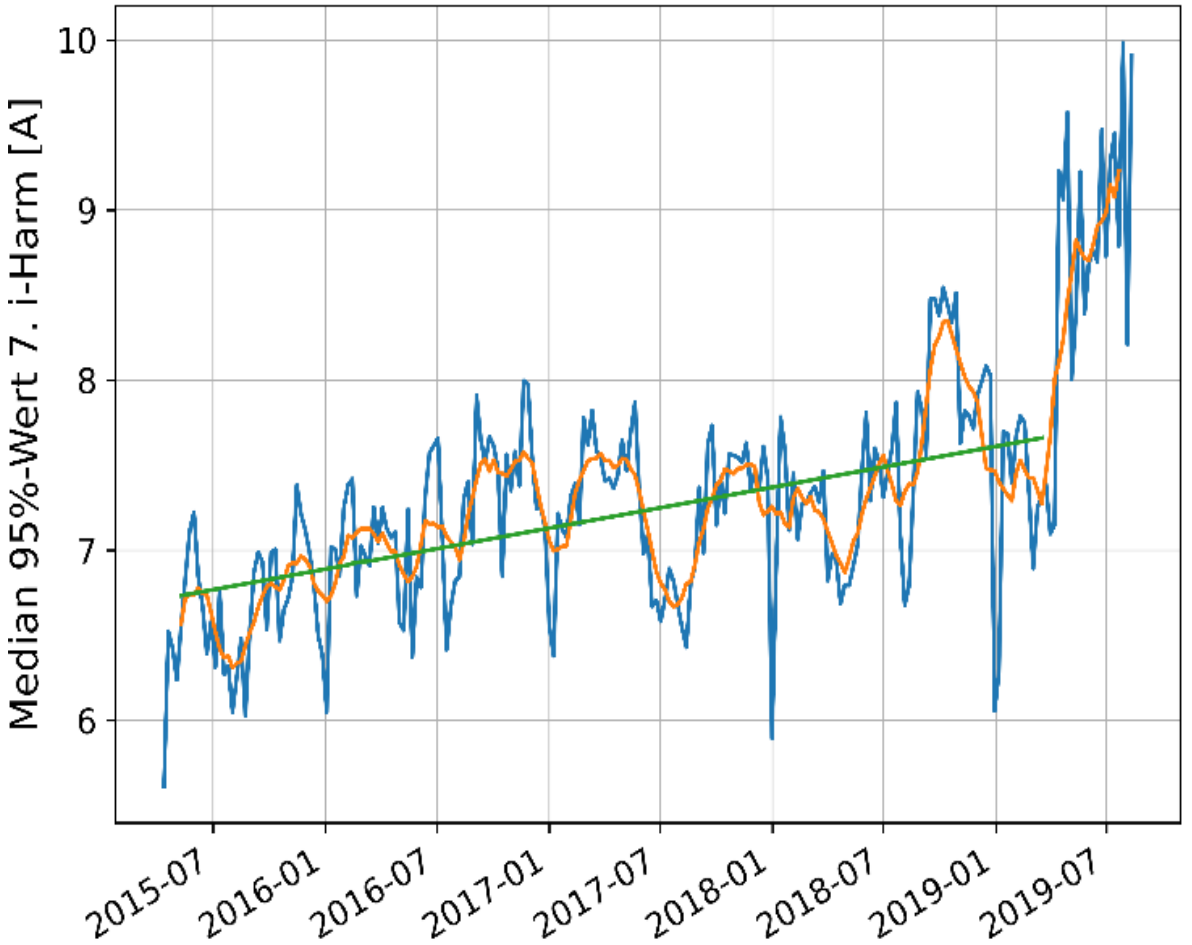




PQ-Langzeitdaten ESB
Stromoberschwingungen

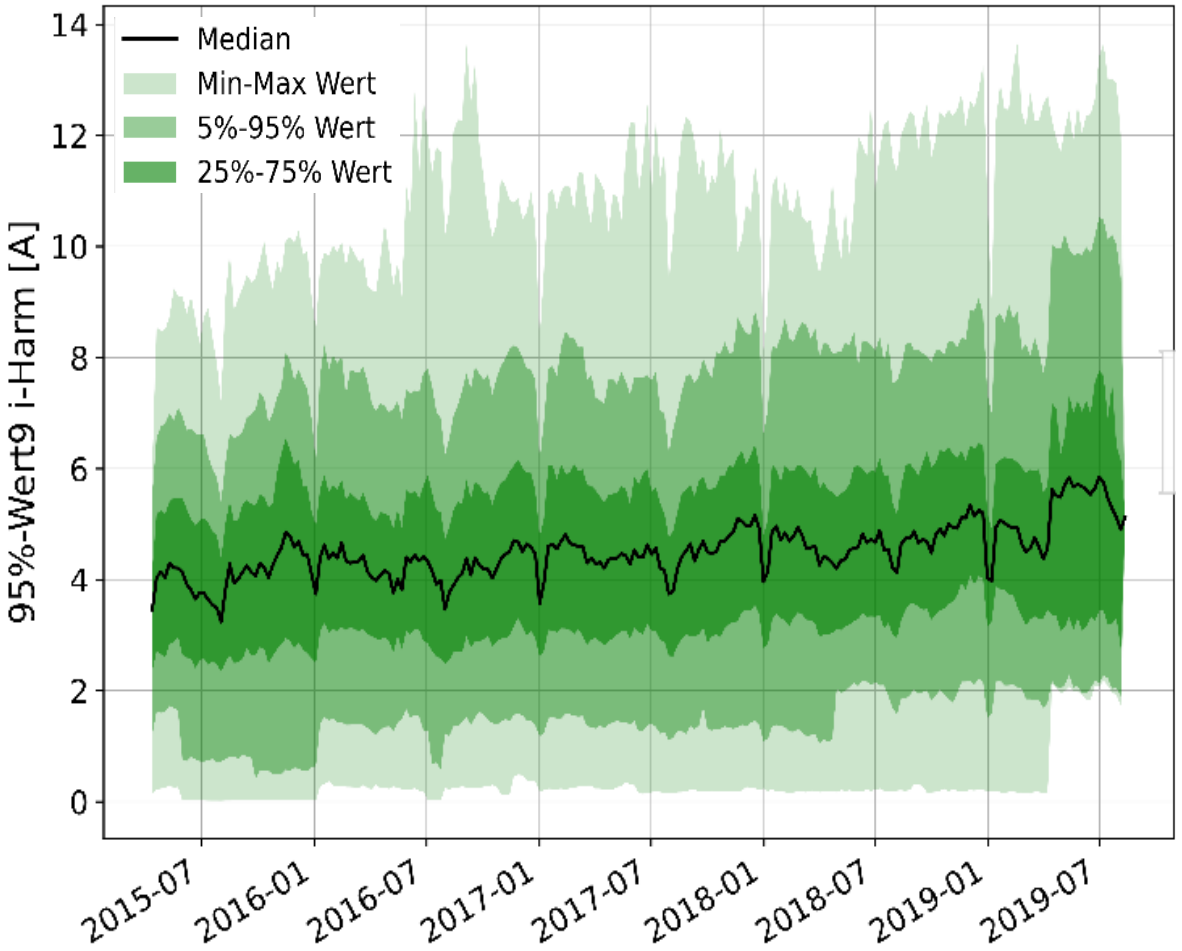
- Streuung und Median der 7. i-Harm in A

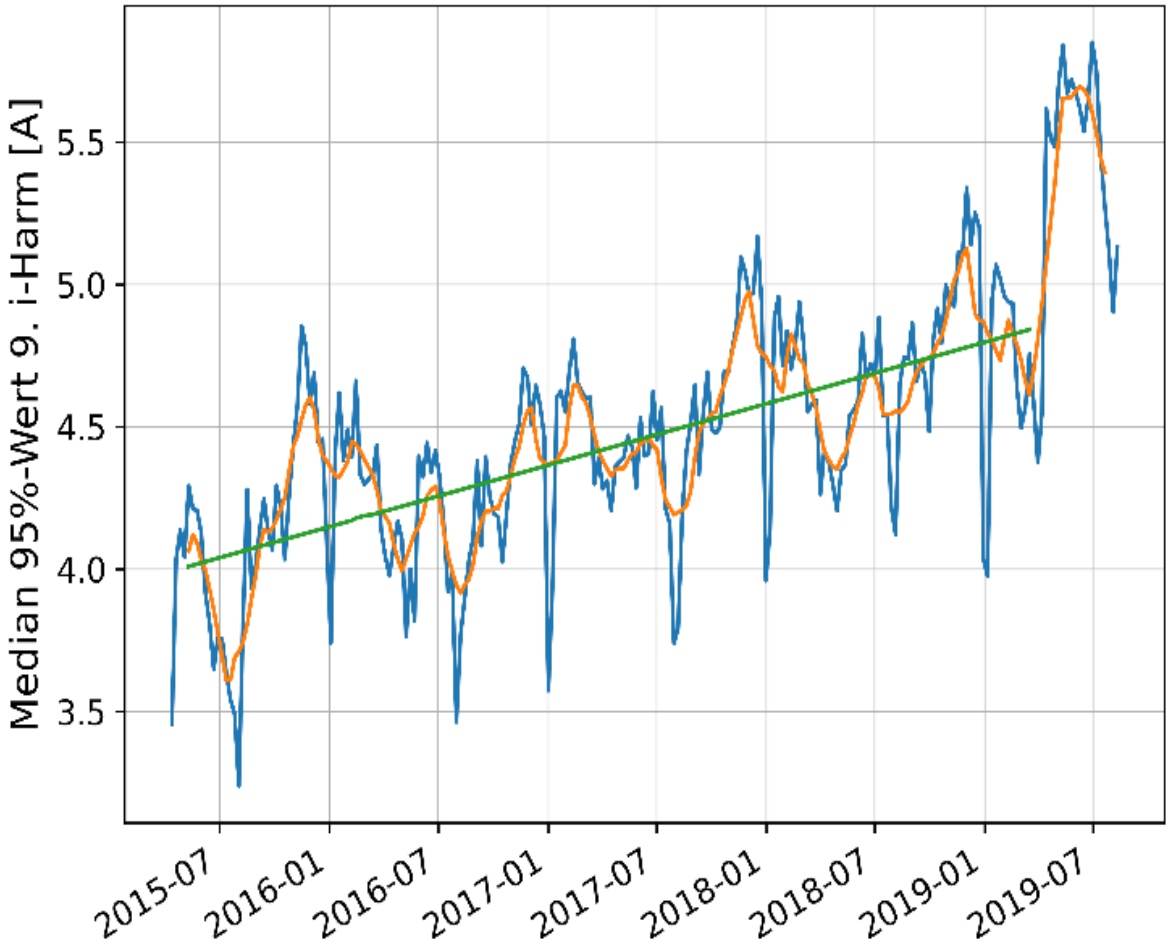




PQ-Langzeitdaten ESB
Stromoberschwingungen

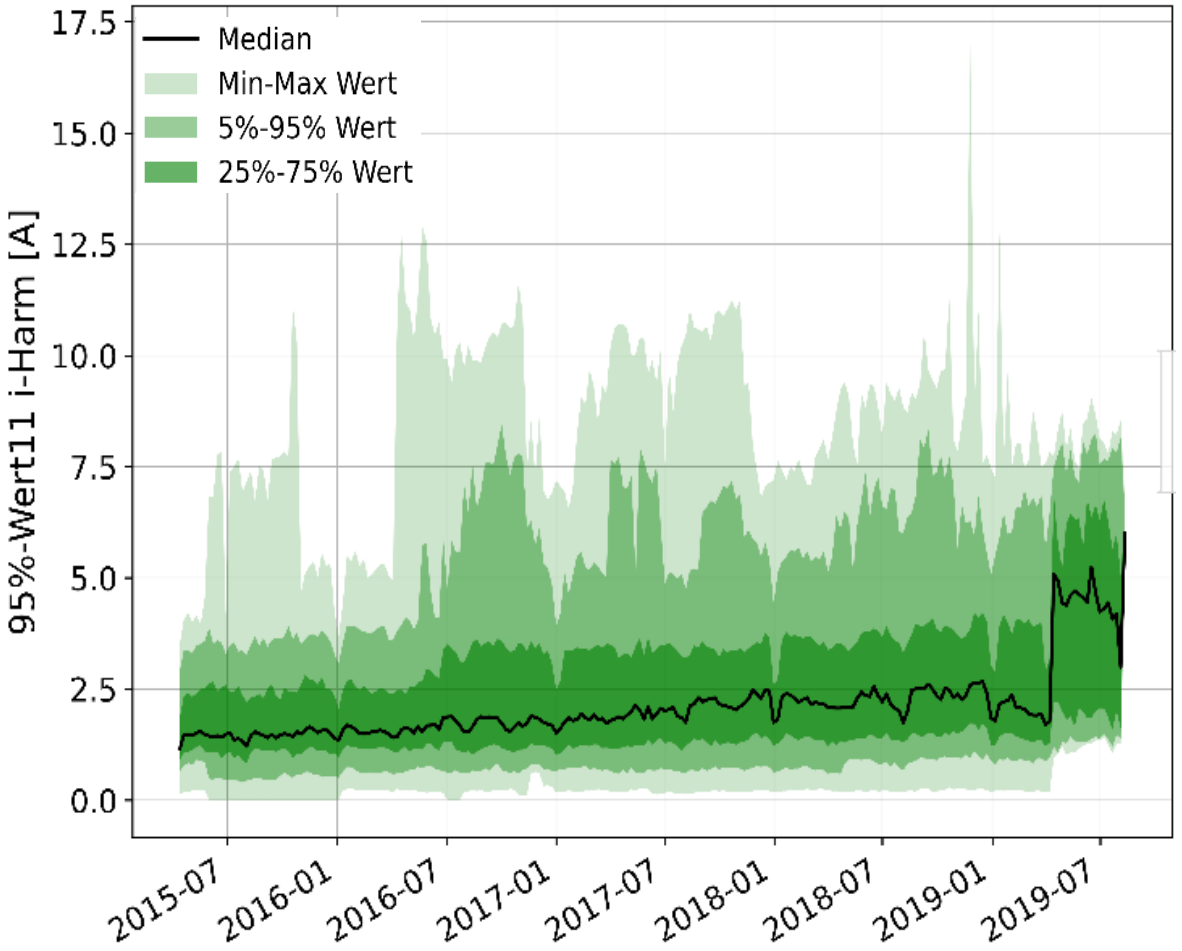
- Streuung und Median der 9. i-Harm in A

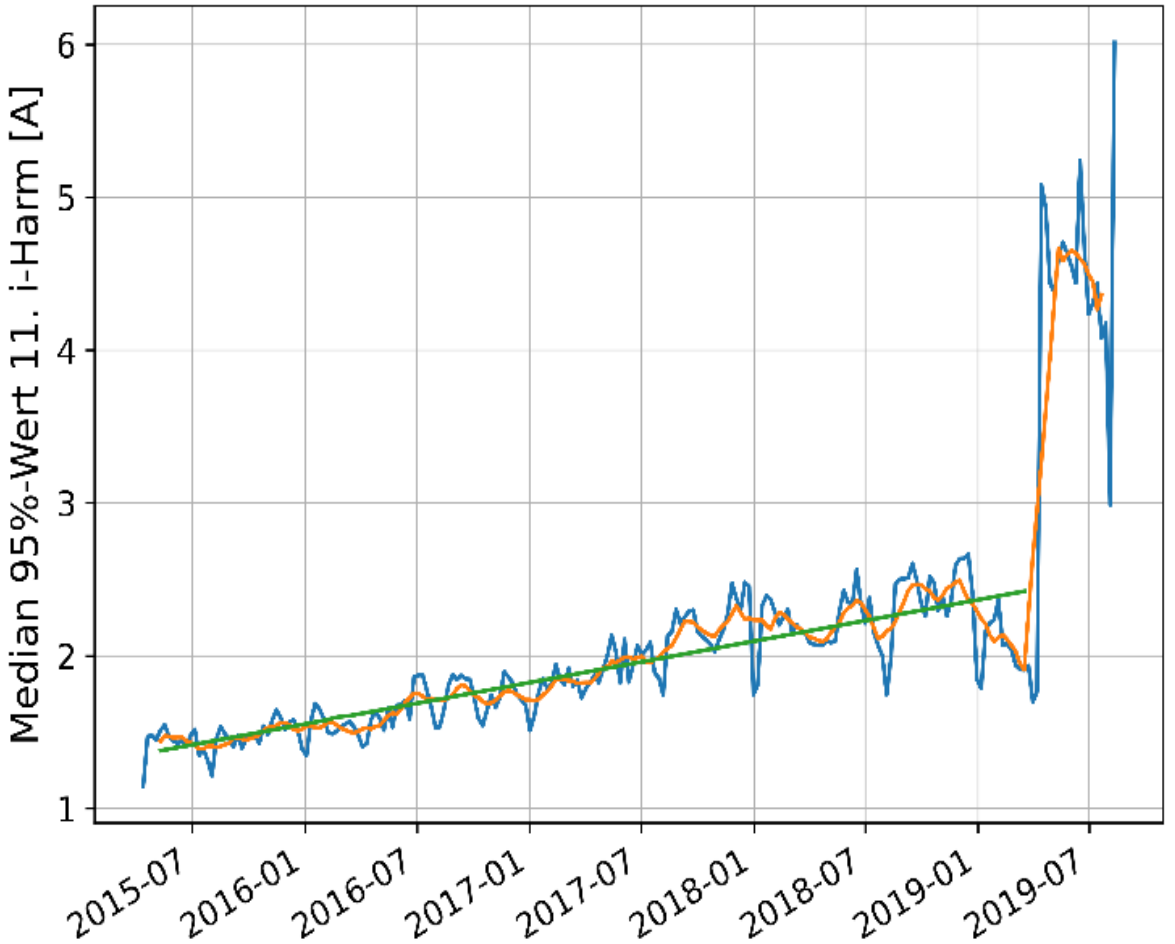




PQ-Langzeitdaten ESB
Stromoberschwingungen

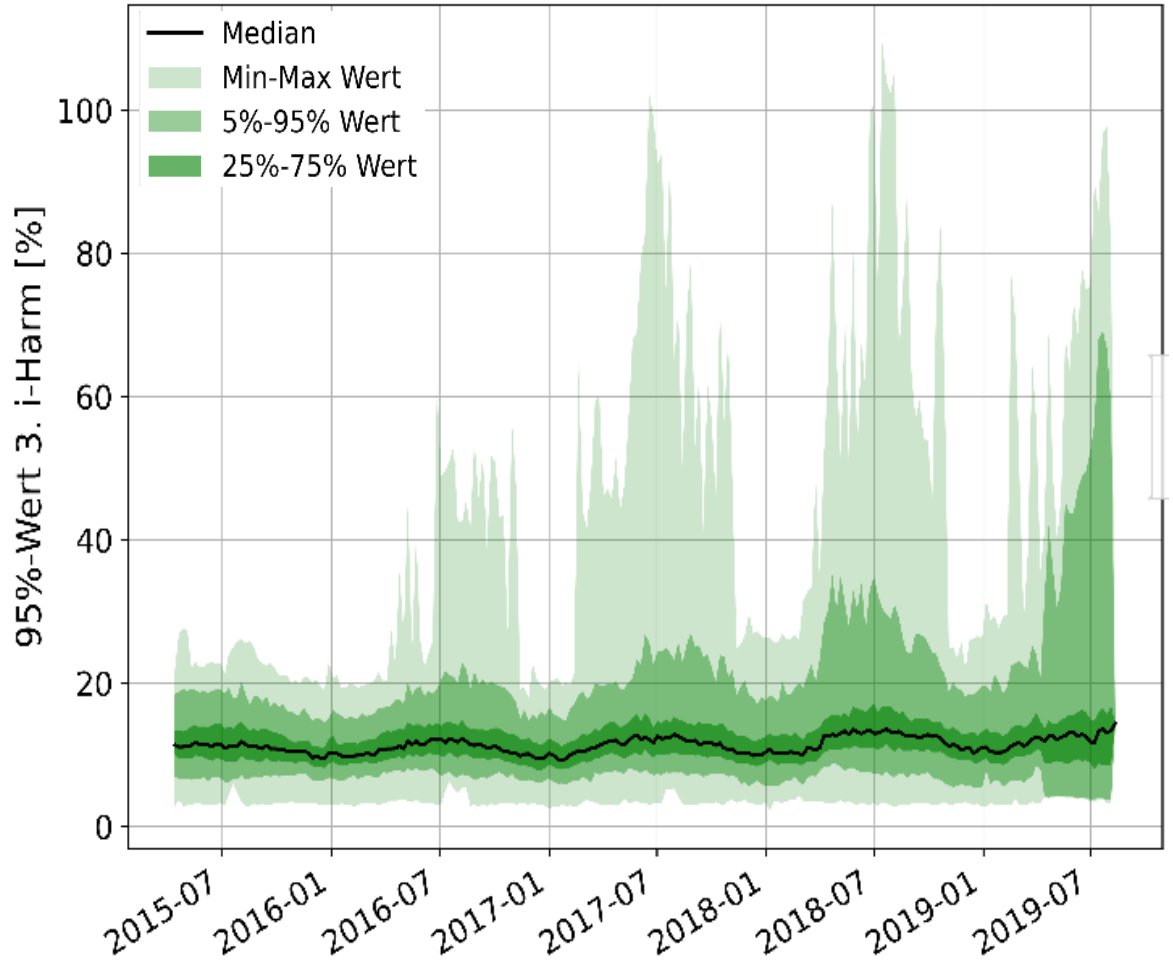
- Streuung und Median der 11. i-Harm in A

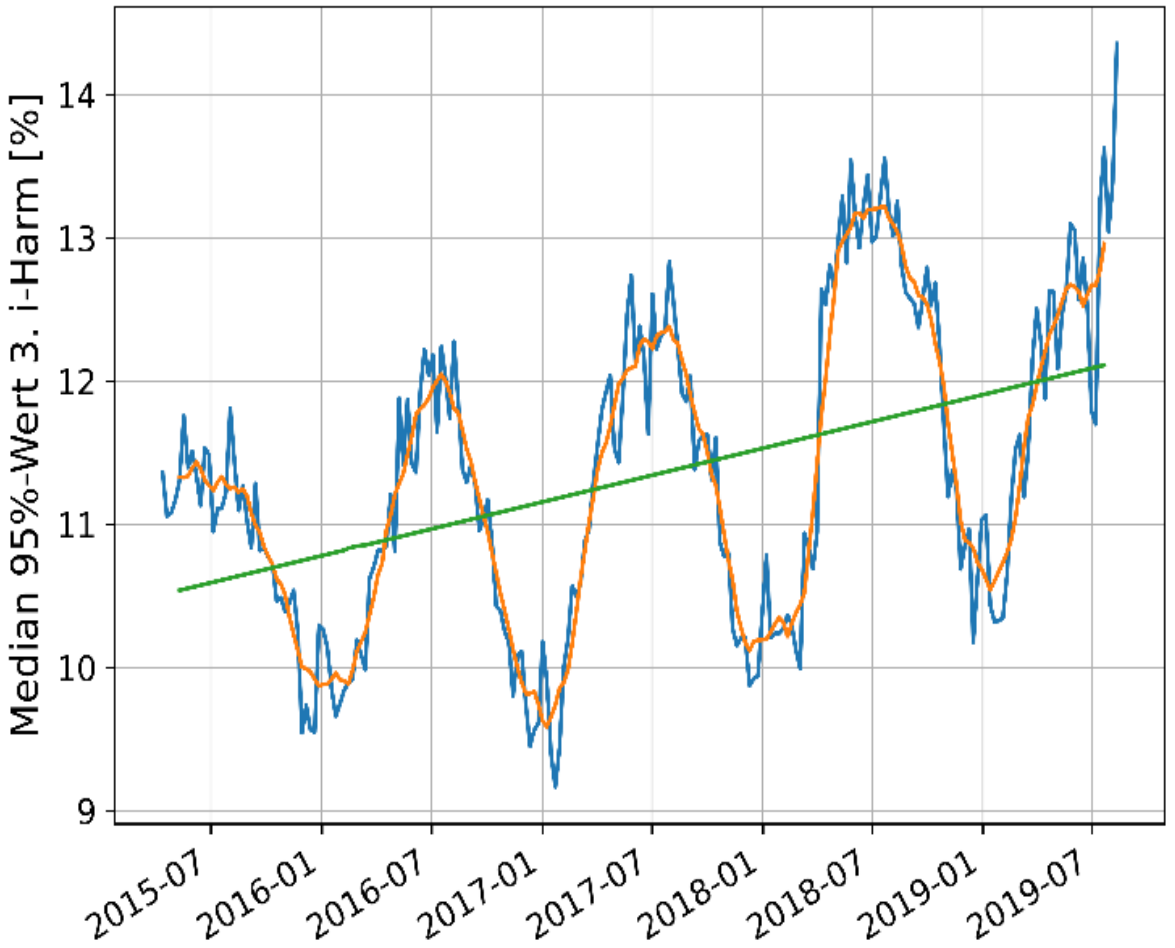




PQ-Langzeitdaten ESB
Stromoberschwingungen

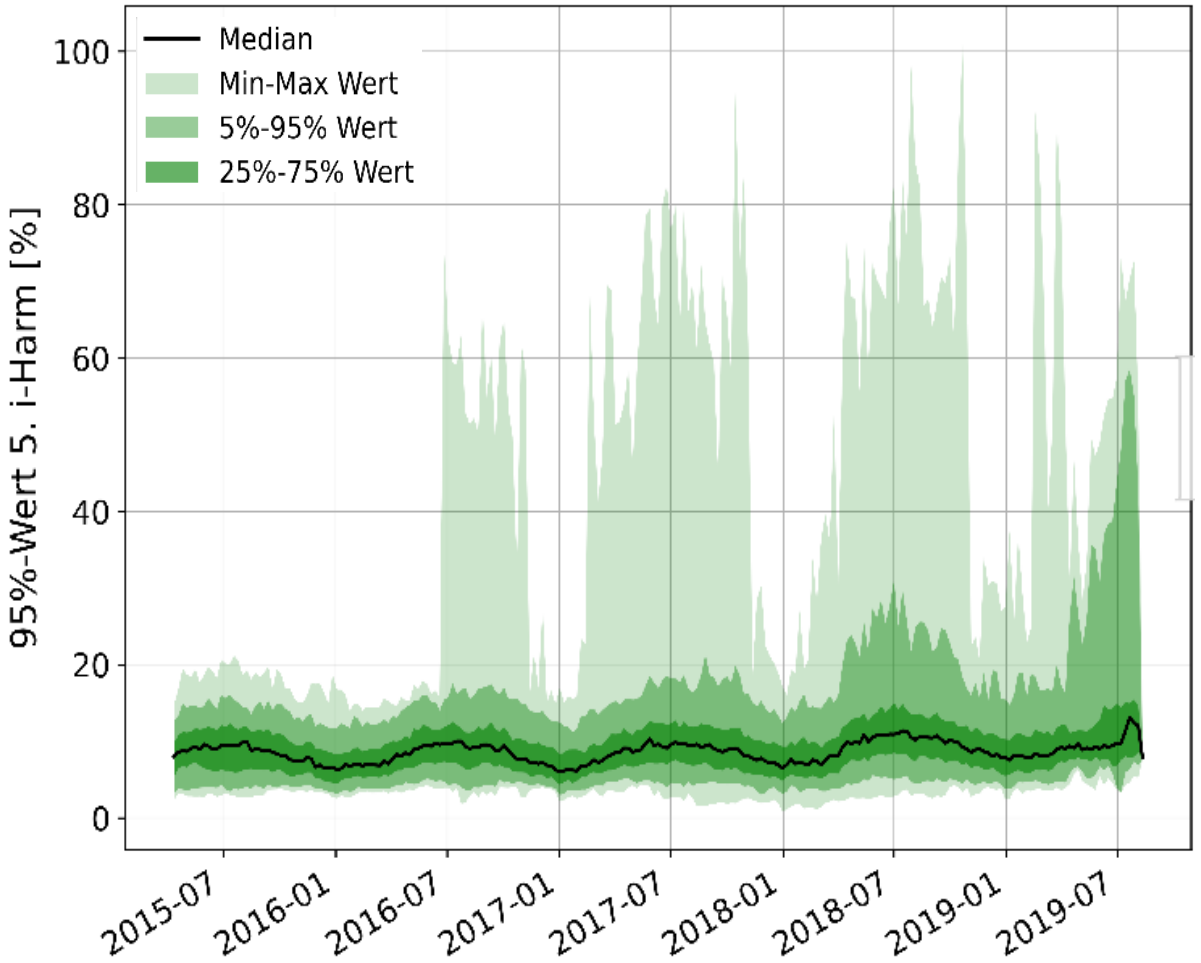
- Streuung und Median der 3. i-Harm in %

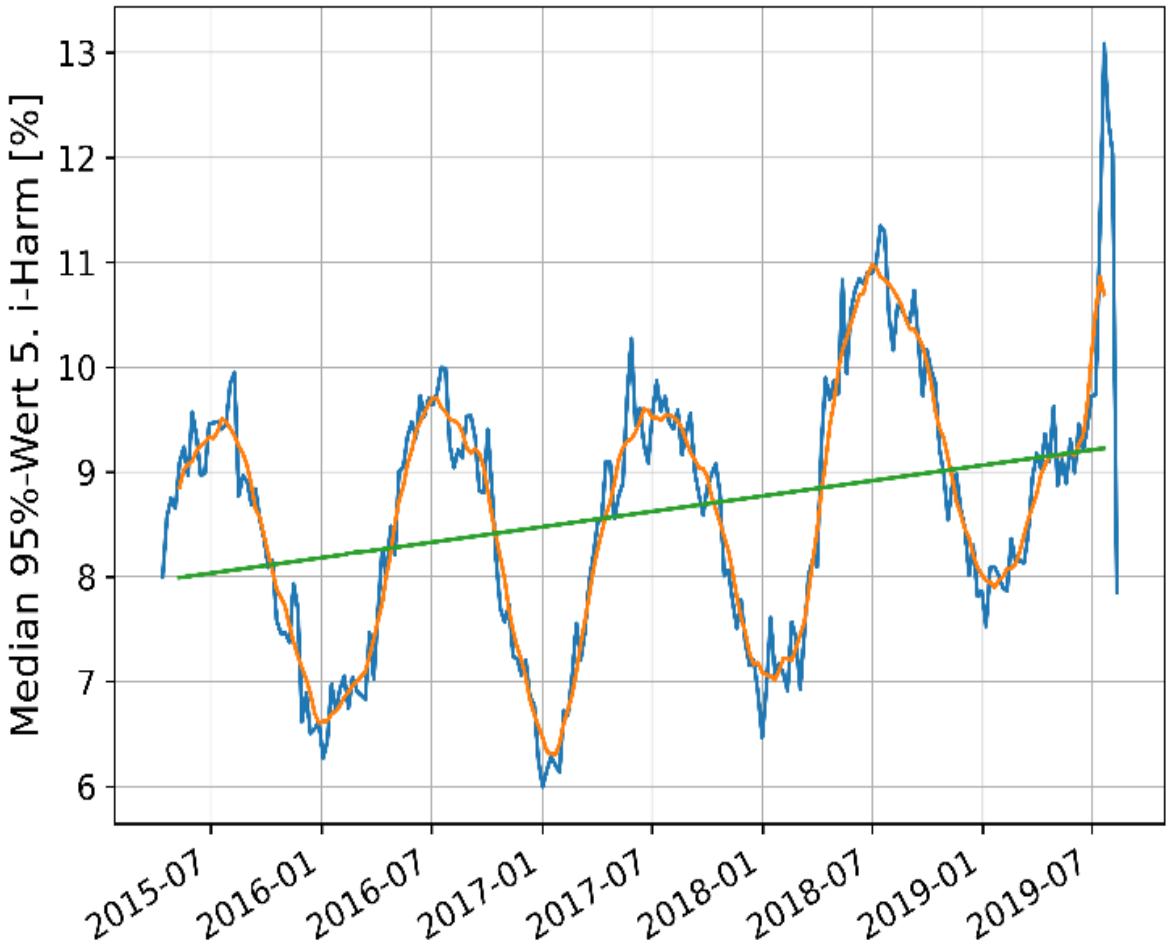




PQ-Langzeitdaten ESB
Stromoberschwingungen

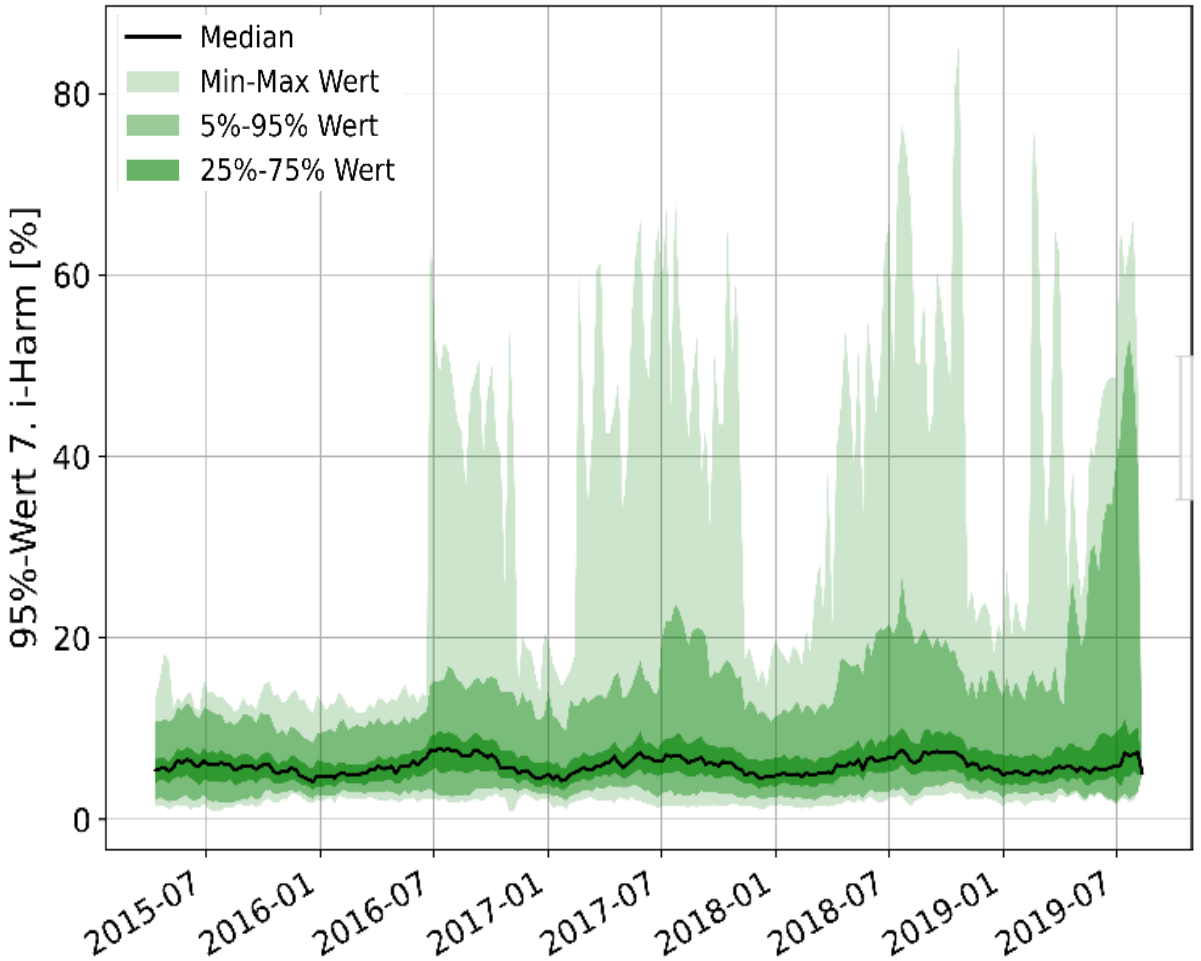
- Streuung und Median der 5. i-Harm in %

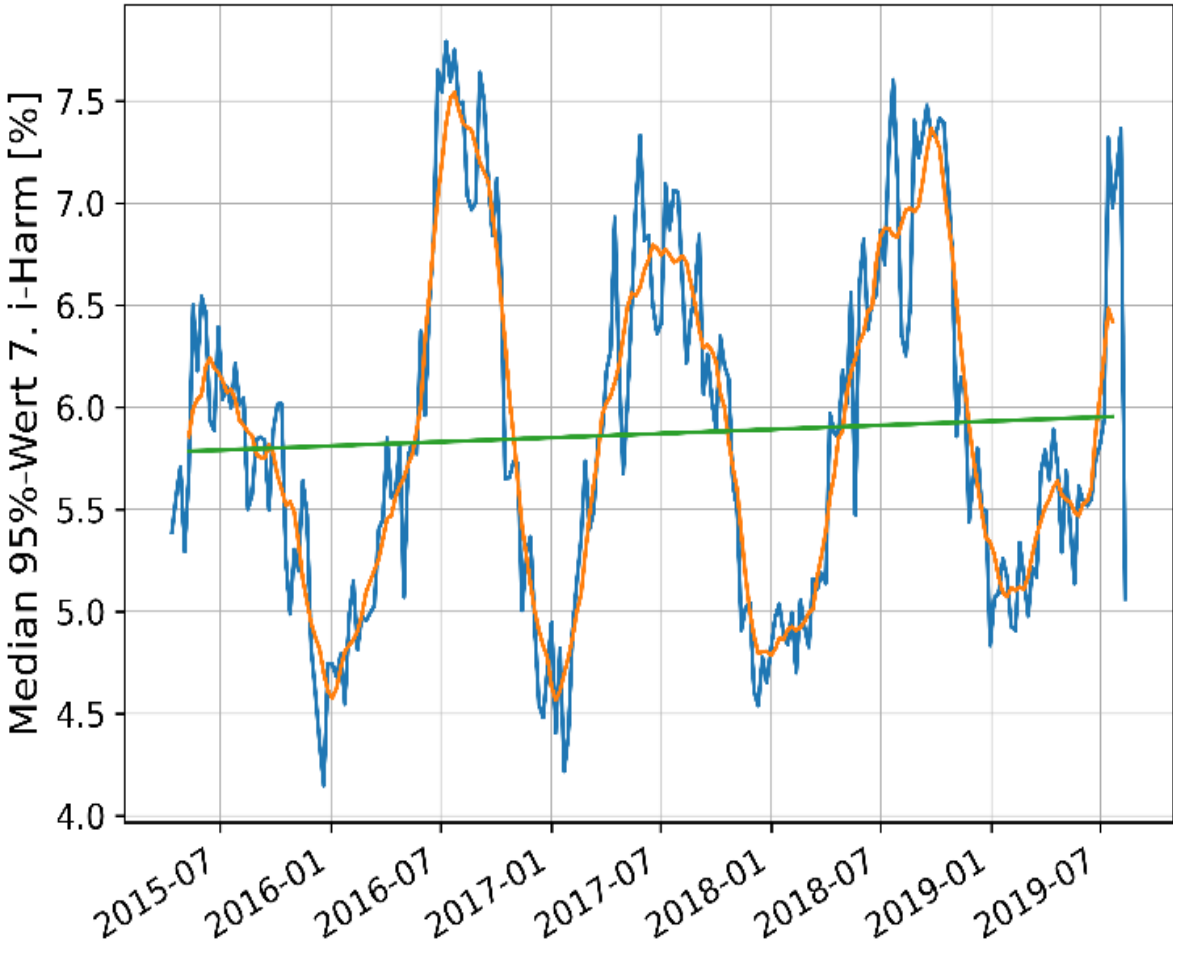




PQ-Langzeitdaten ESB
Stromoberschwingungen

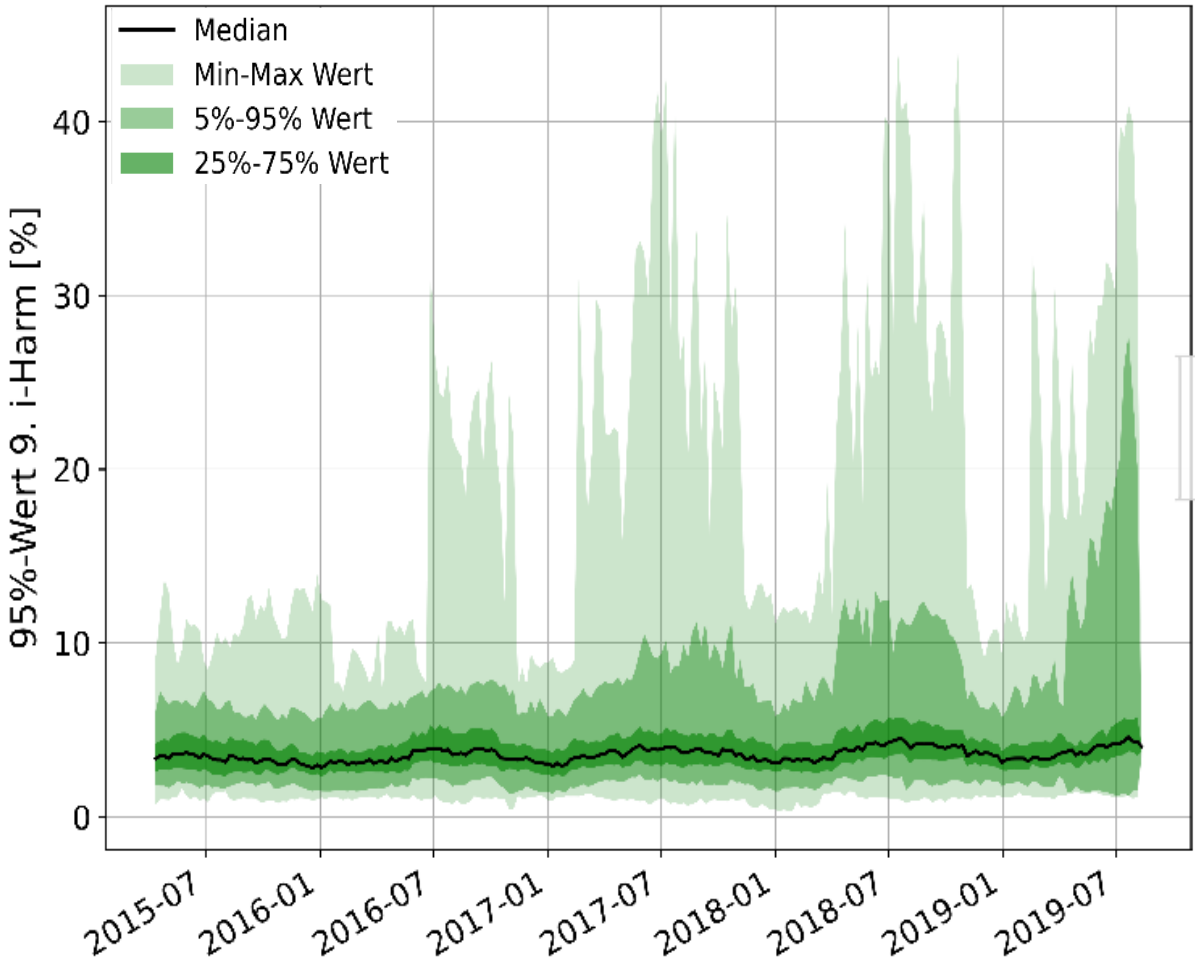
- Streuung und Median der 7. i-Harm in %

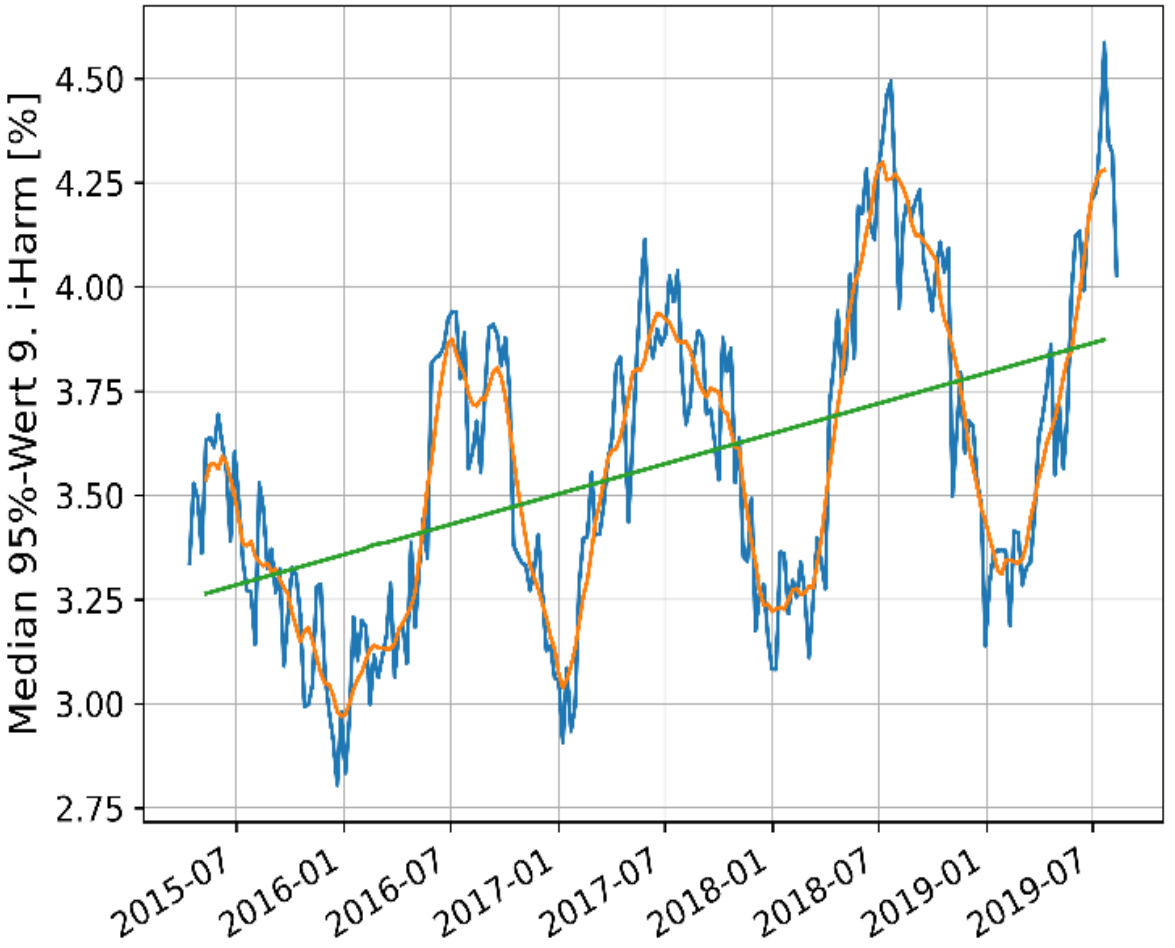




PQ-Langzeitdaten ESB
Stromoberschwingungen

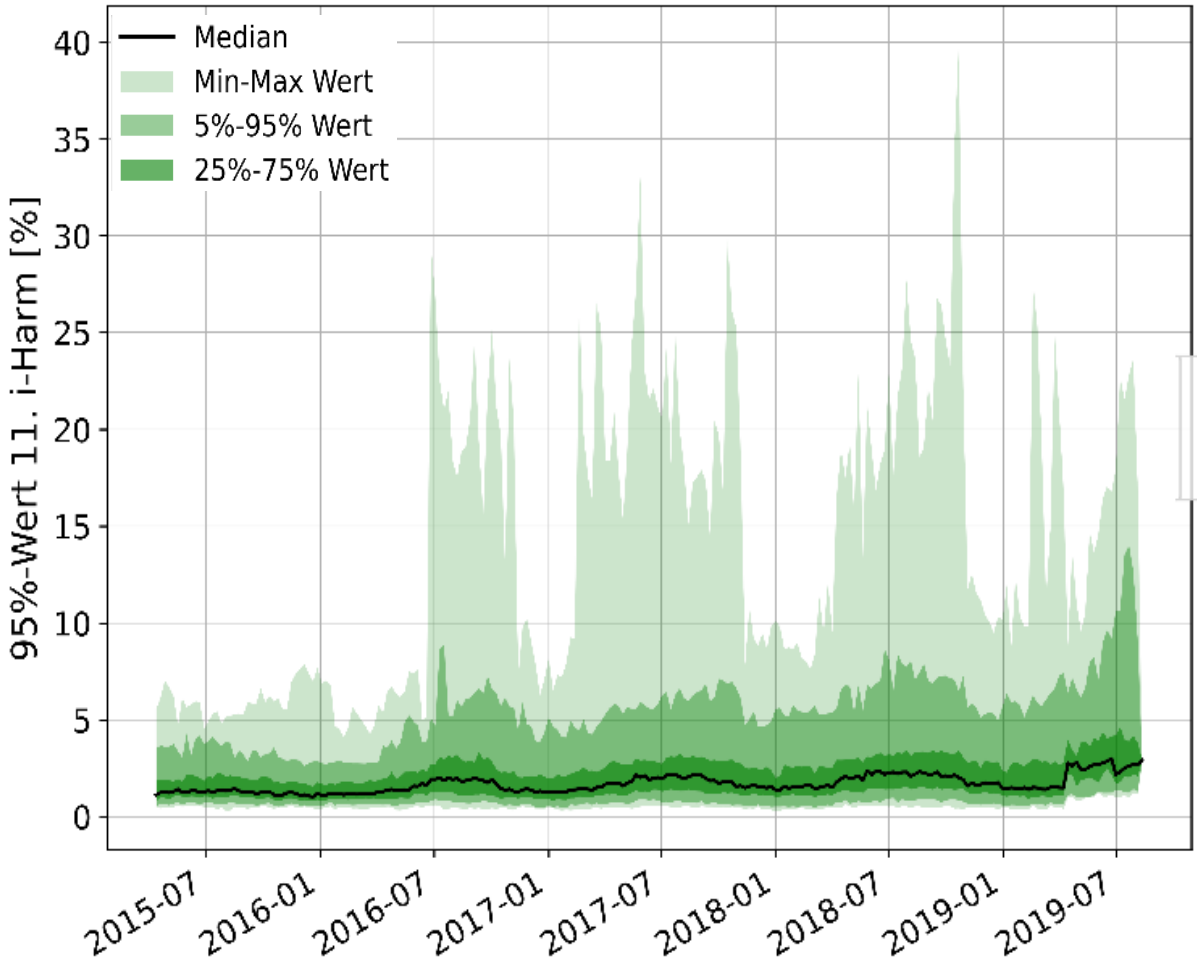
- Streuung und Median der 9. i-Harm in %

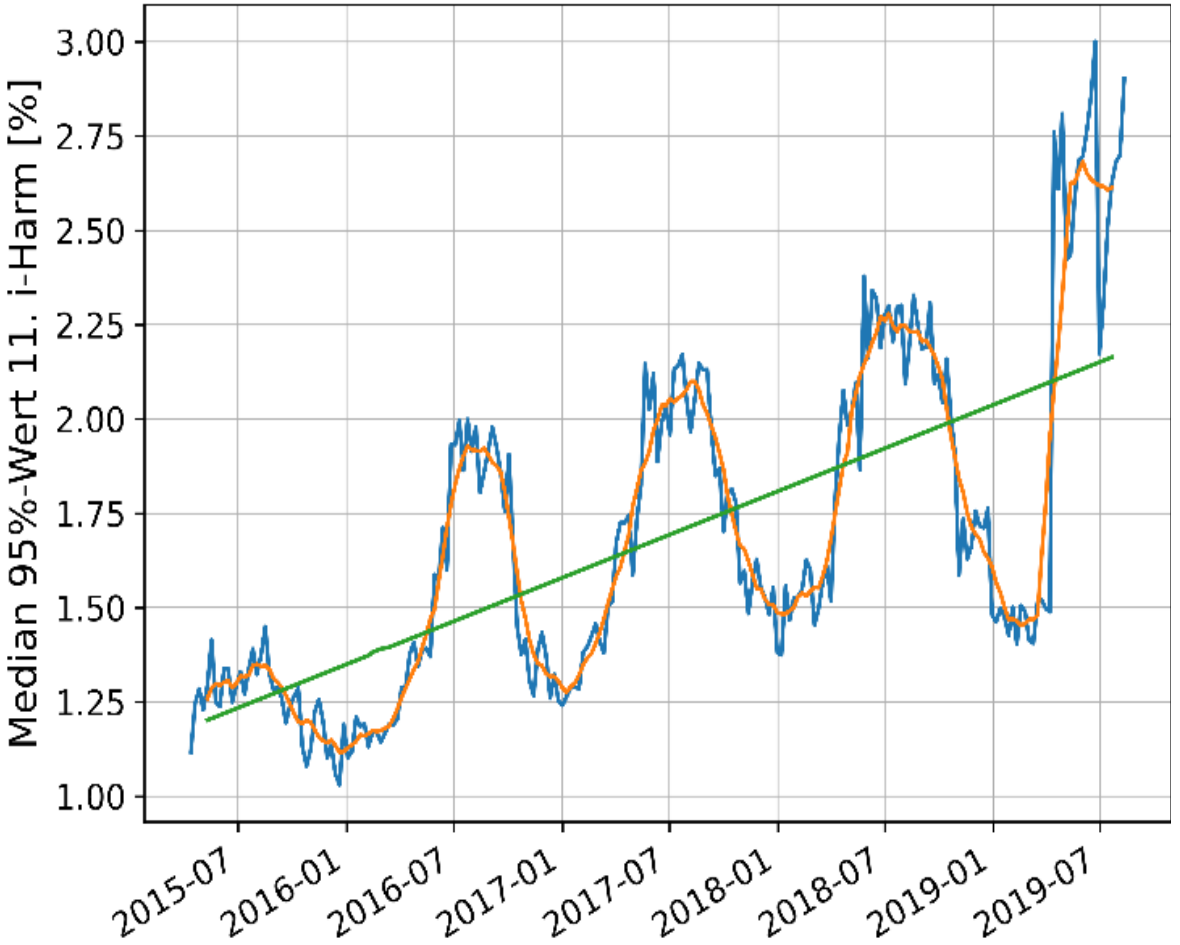




PQ-Langzeitdaten ESB
Stromoberschwingungen

- Streuung und Median der 11. i-Harm in %

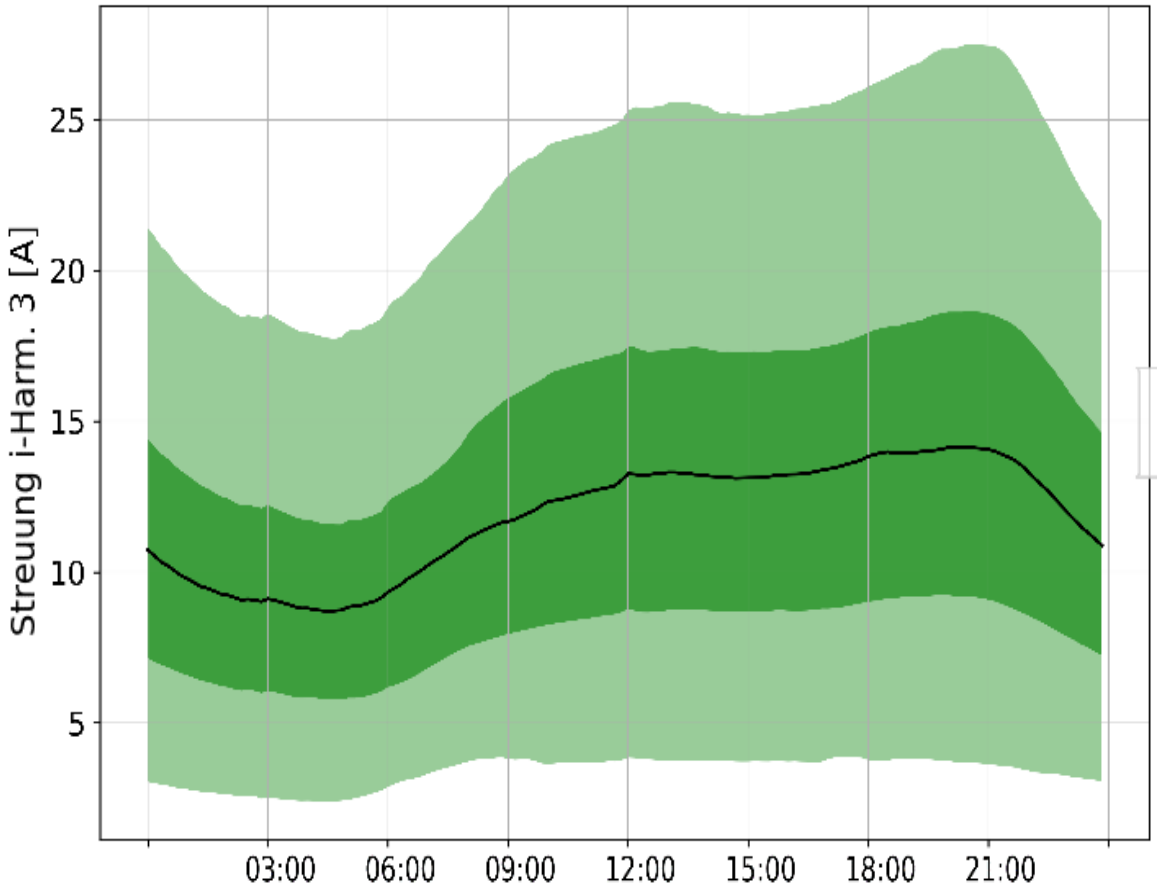


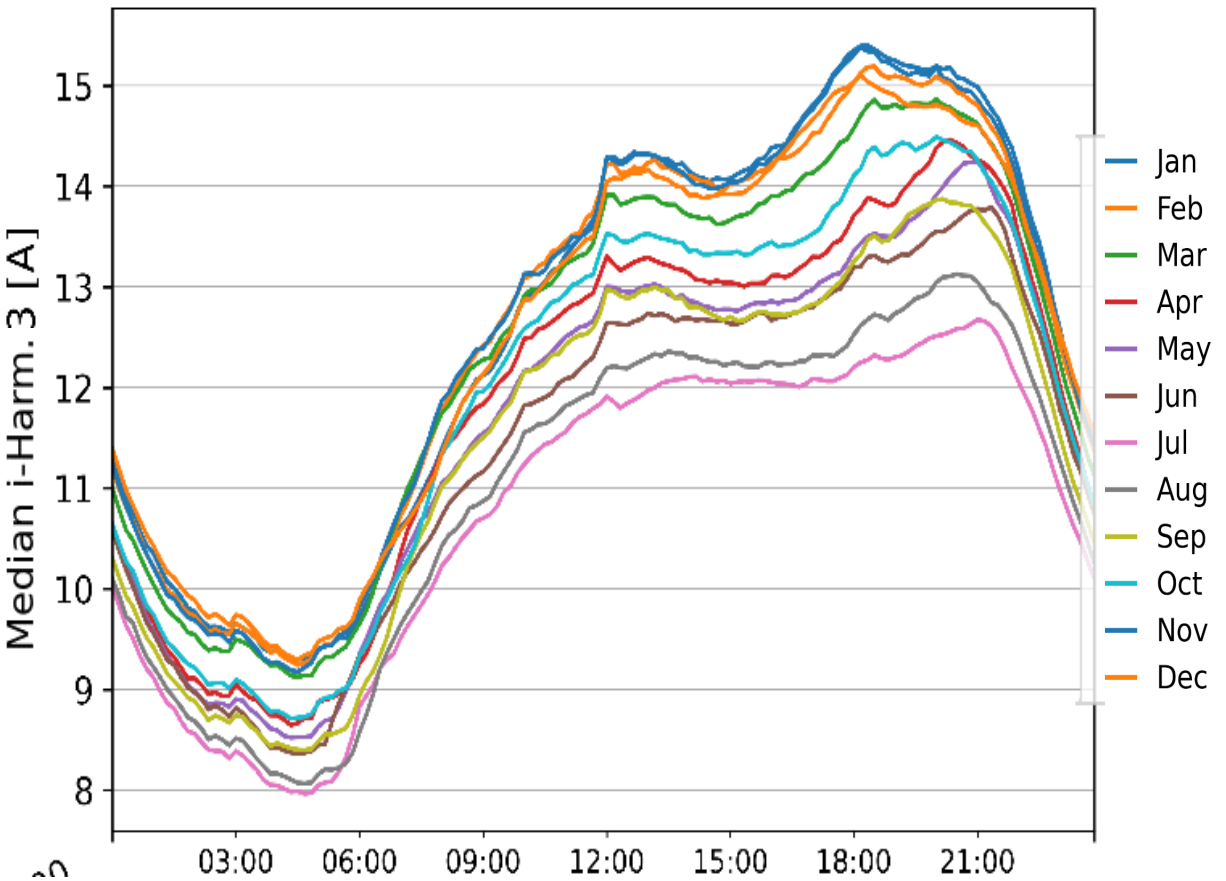


PQ-Langzeitdaten ESB

Stromoberschwingungen Tagesverhalten

- Streuung und Median 3. i-Harm in A

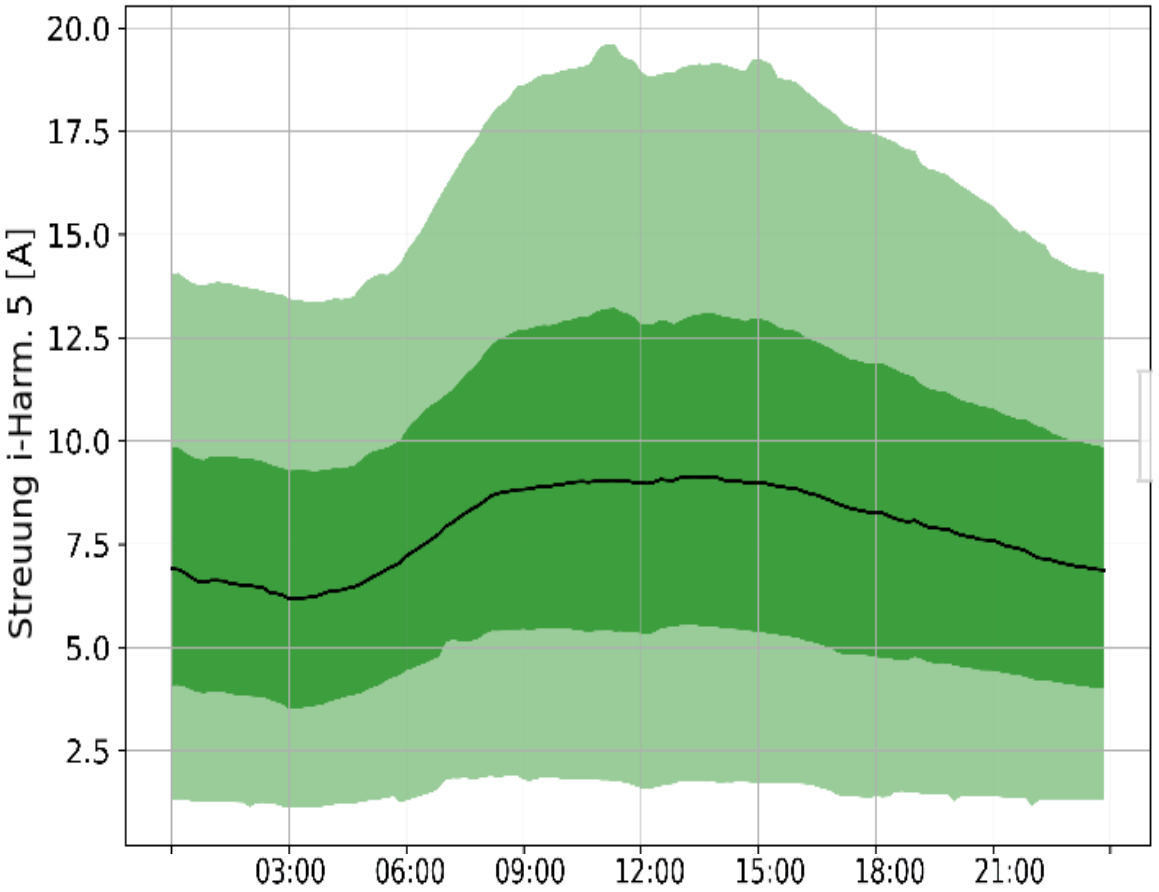


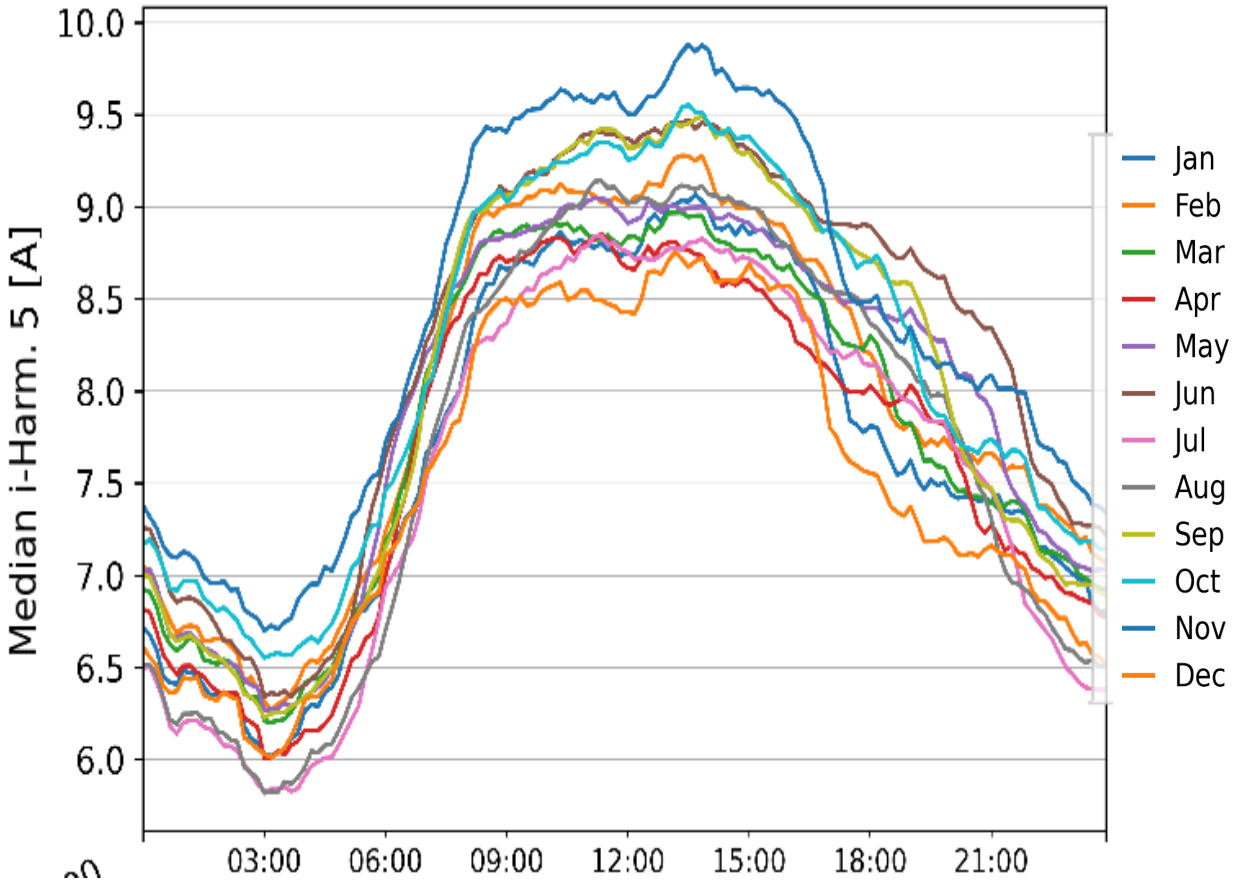


PQ-Langzeitdaten ESB

Stromoberschwingungen Tagesverhalten

- Streuung und Median 5. i-Harm in A

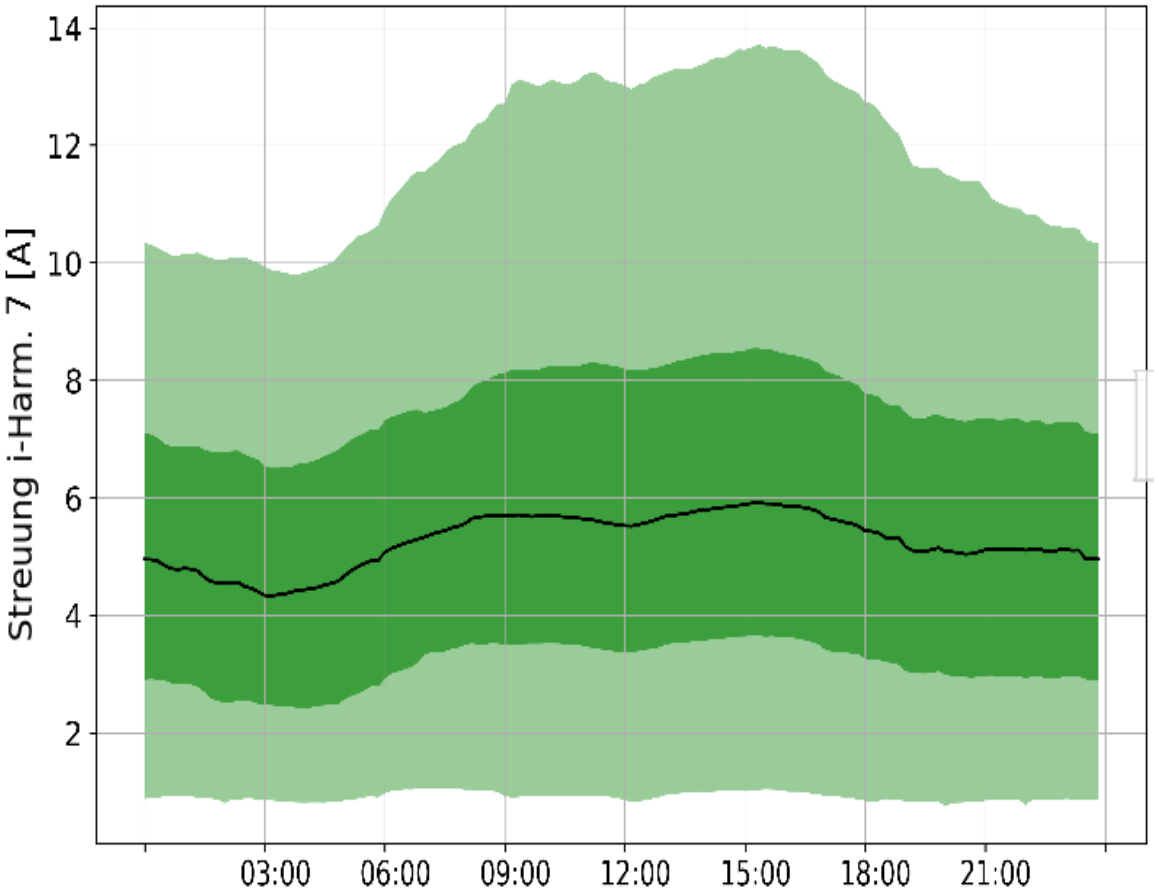


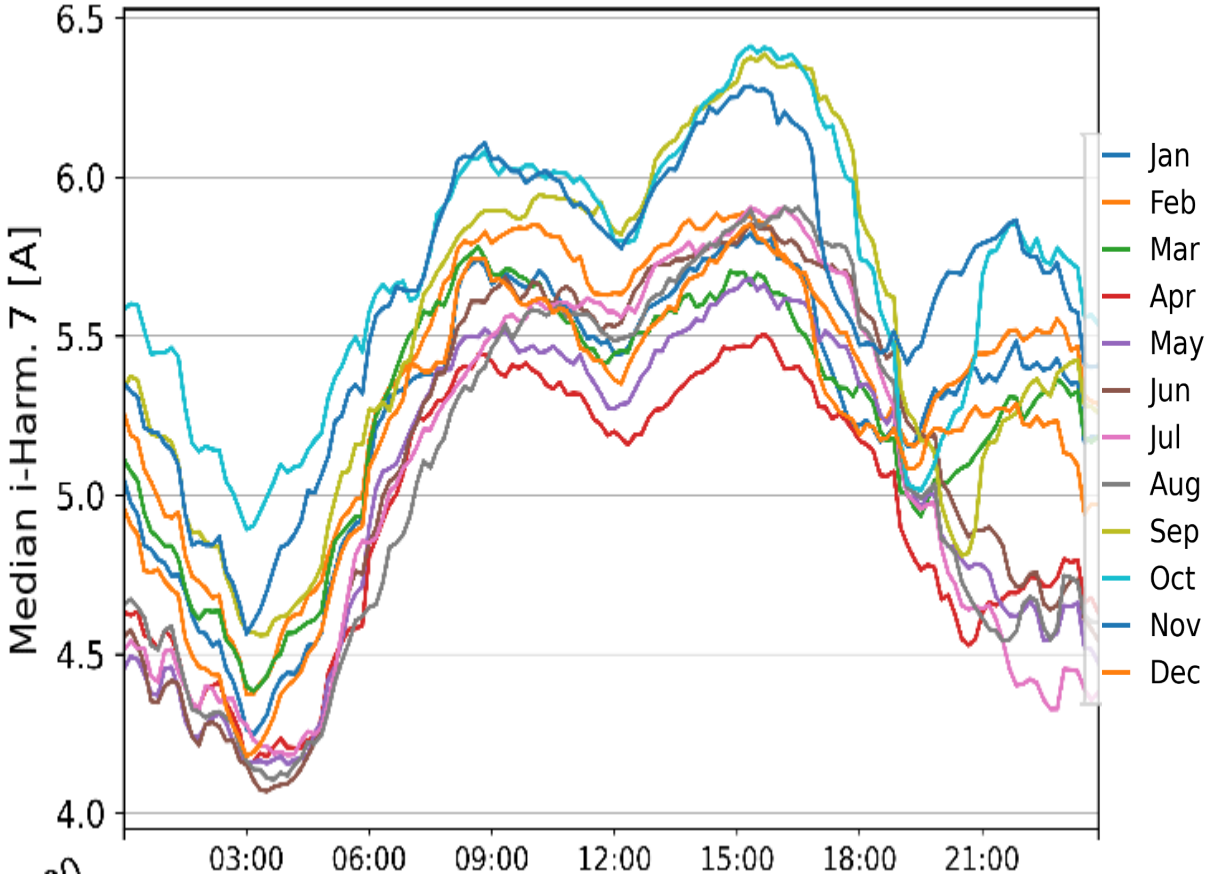


PQ-Langzeitdaten ESB

Stromoberschwingungen Tagesverhalten

- Streuung und Median 7. i-Harm in A

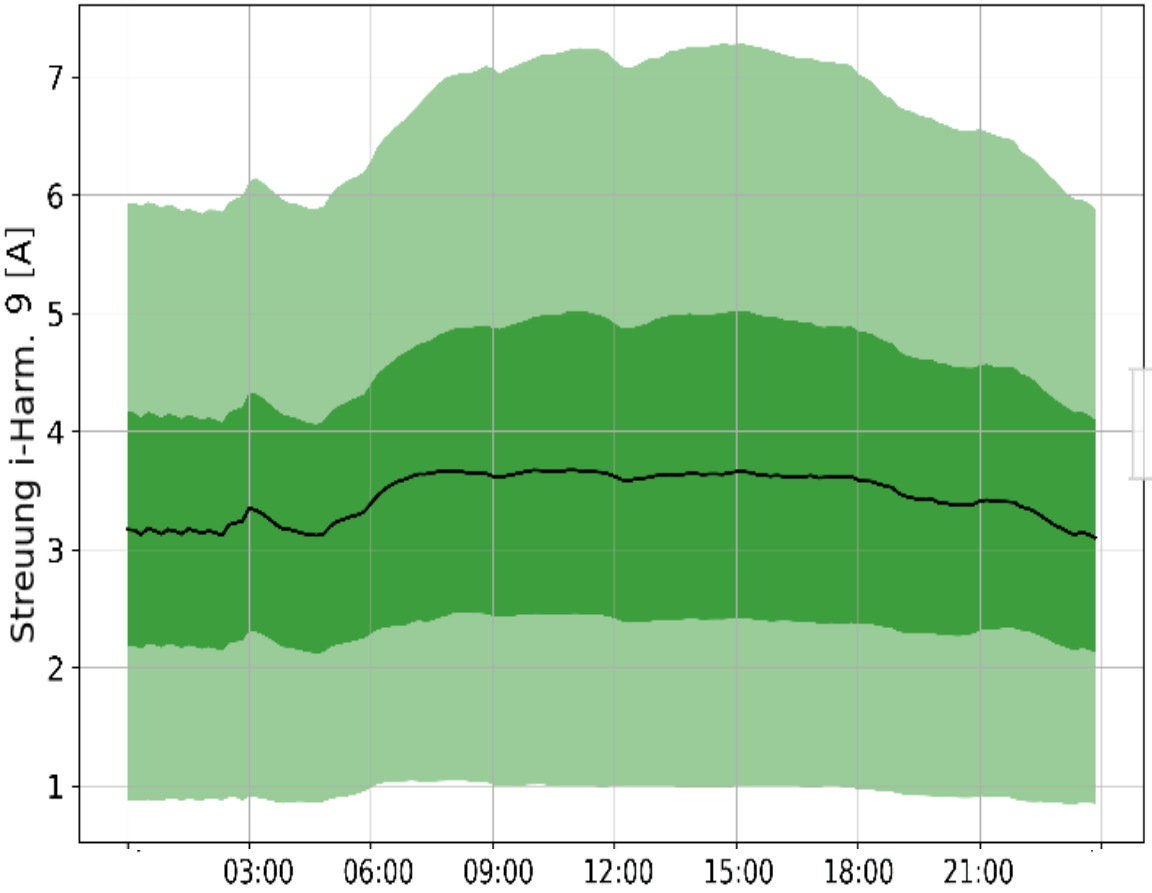


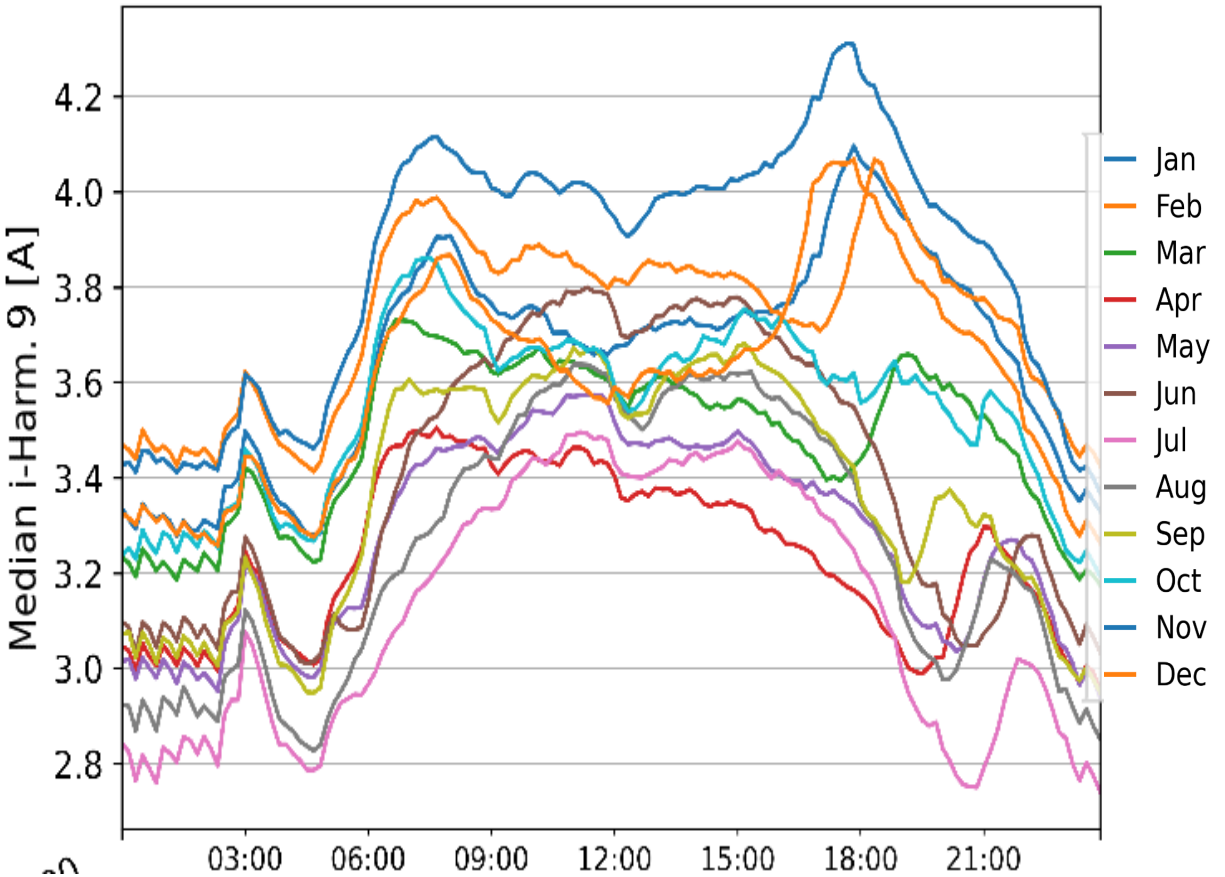


PQ-Langzeitdaten ESB

Stromoberschwingungen Tagesverhalten

- Streuung und Median 9. i-Harm in A

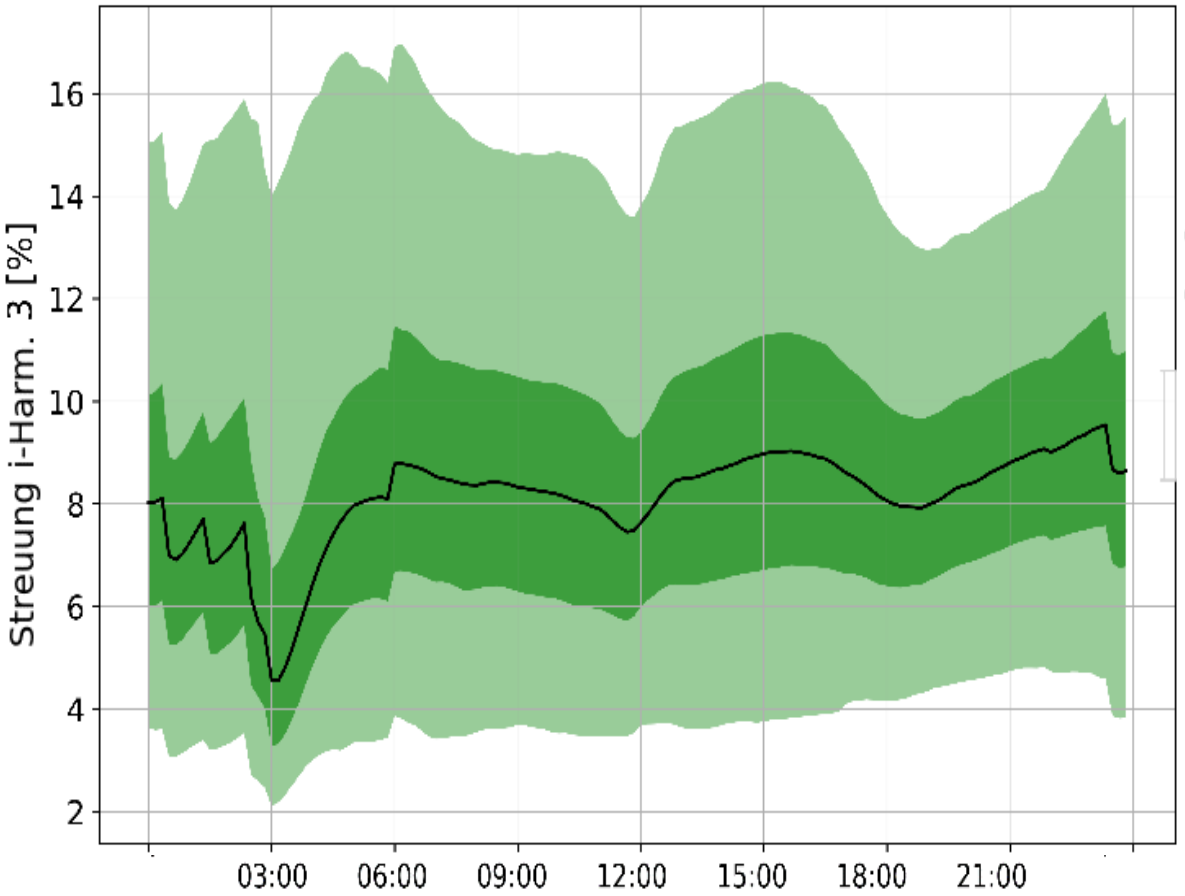


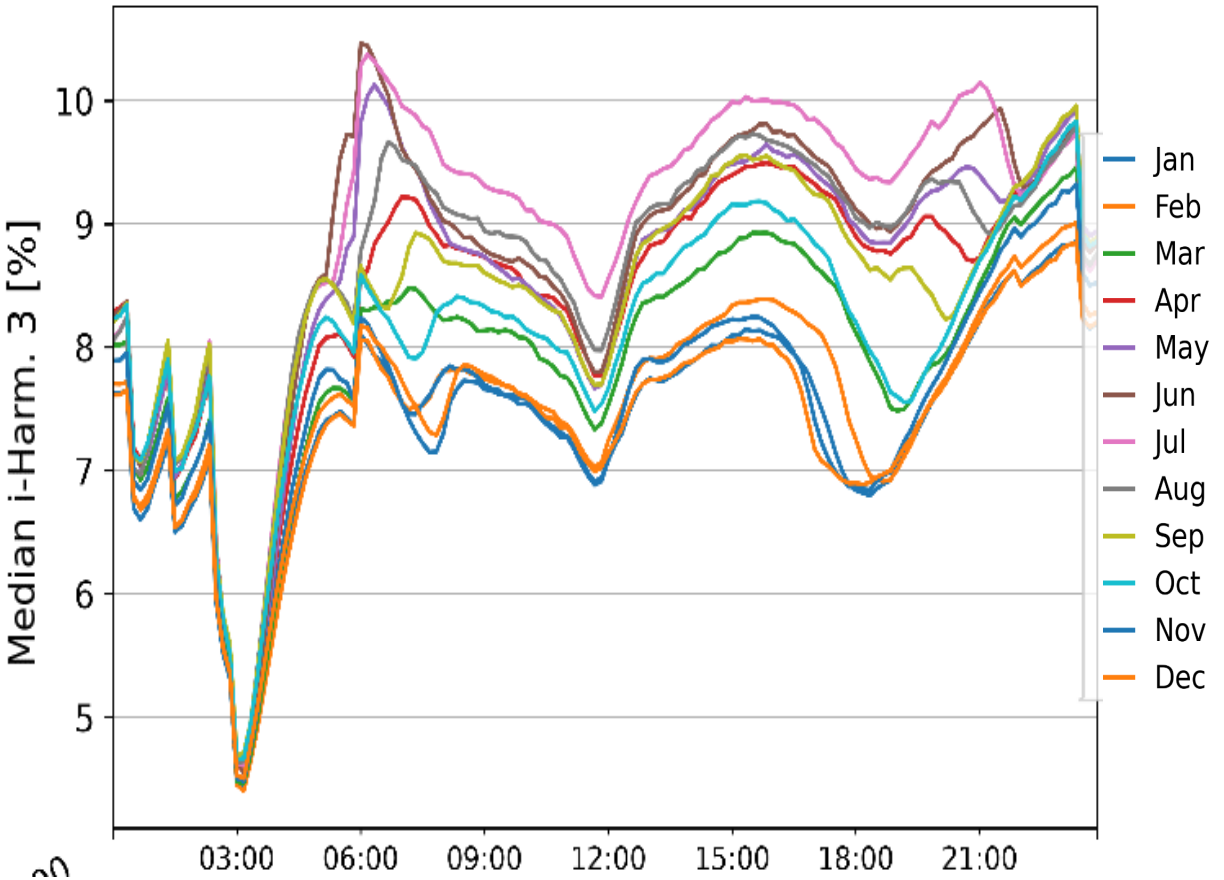


PQ-Langzeitdaten ESB

Stromoberschwingungen Tagesverhalten

- Streuung und Median 3. i-Harm in %

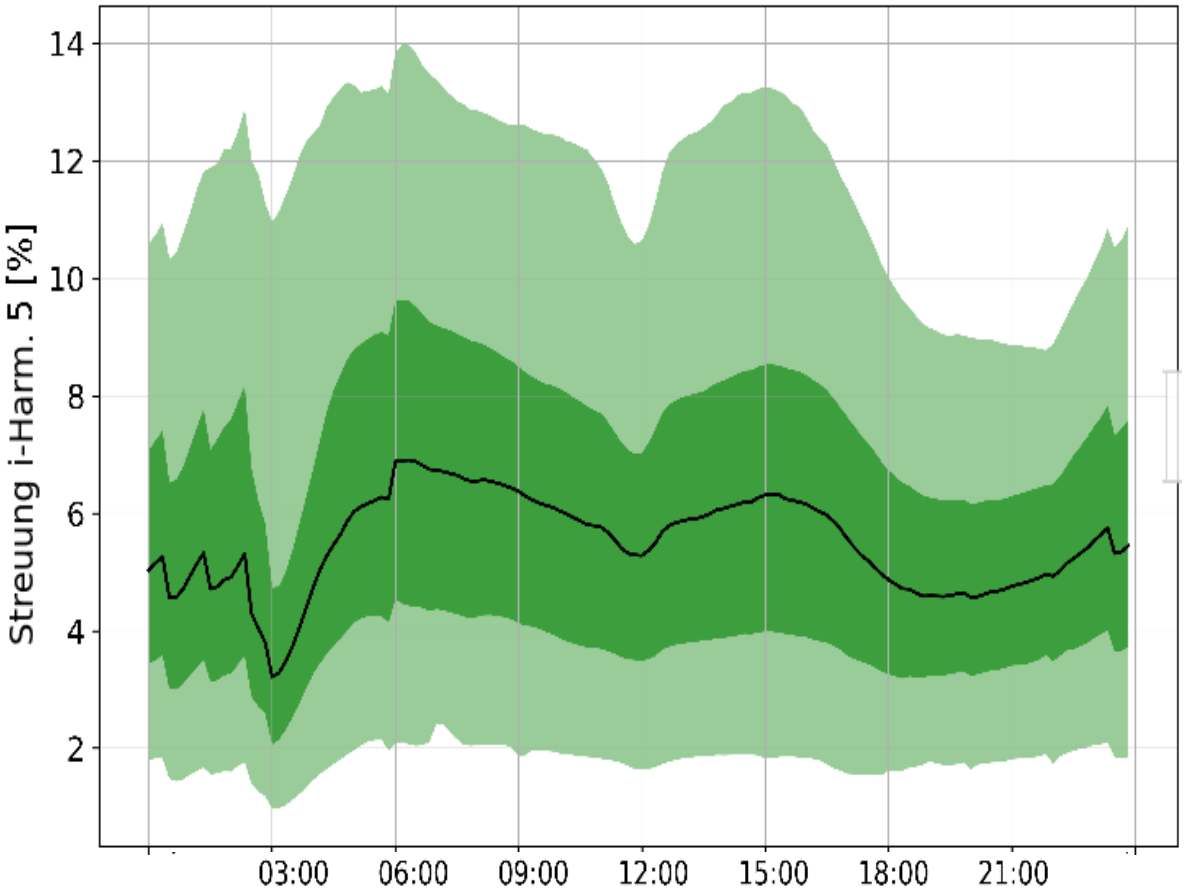


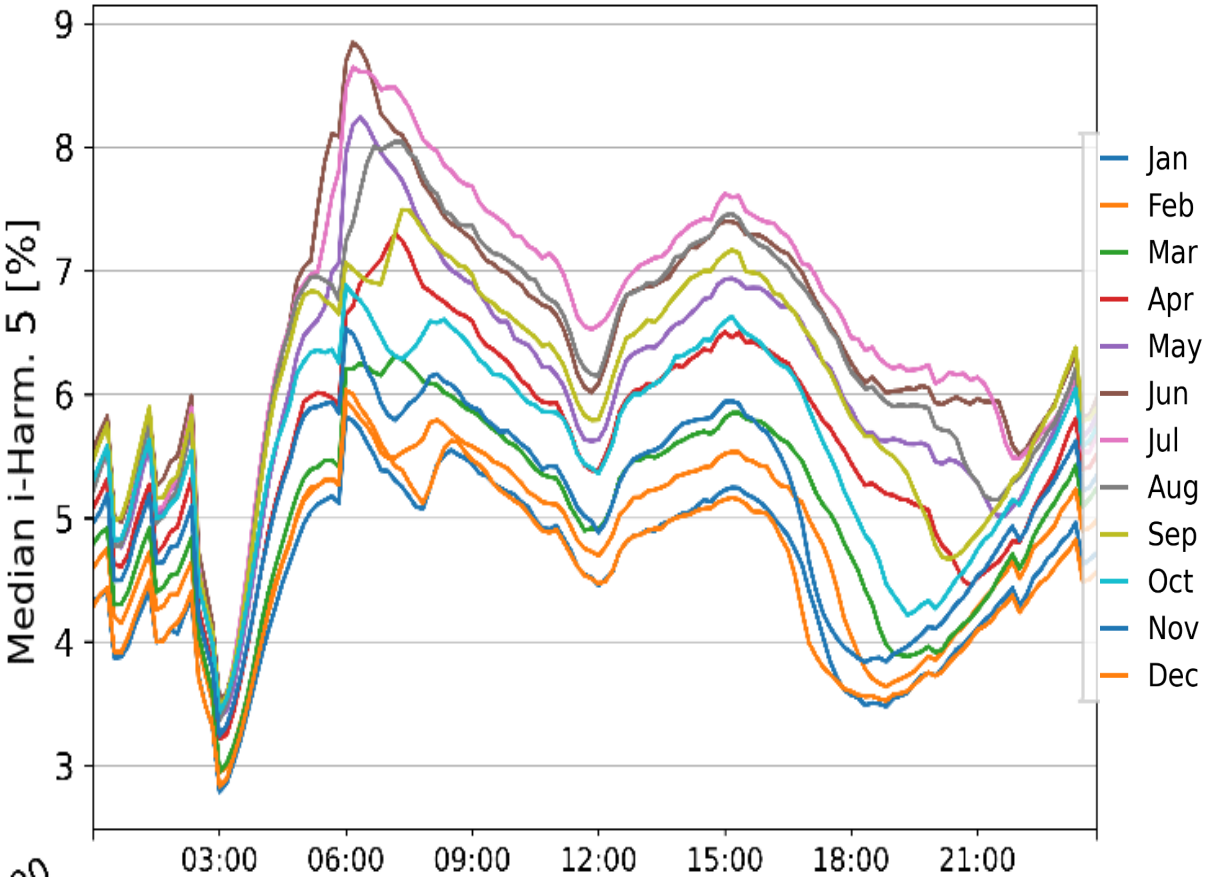


PQ-Langzeitdaten ESB

Stromoberschwingungen Tagesverhalten

- Streuung und Median 5. i-Harm in %

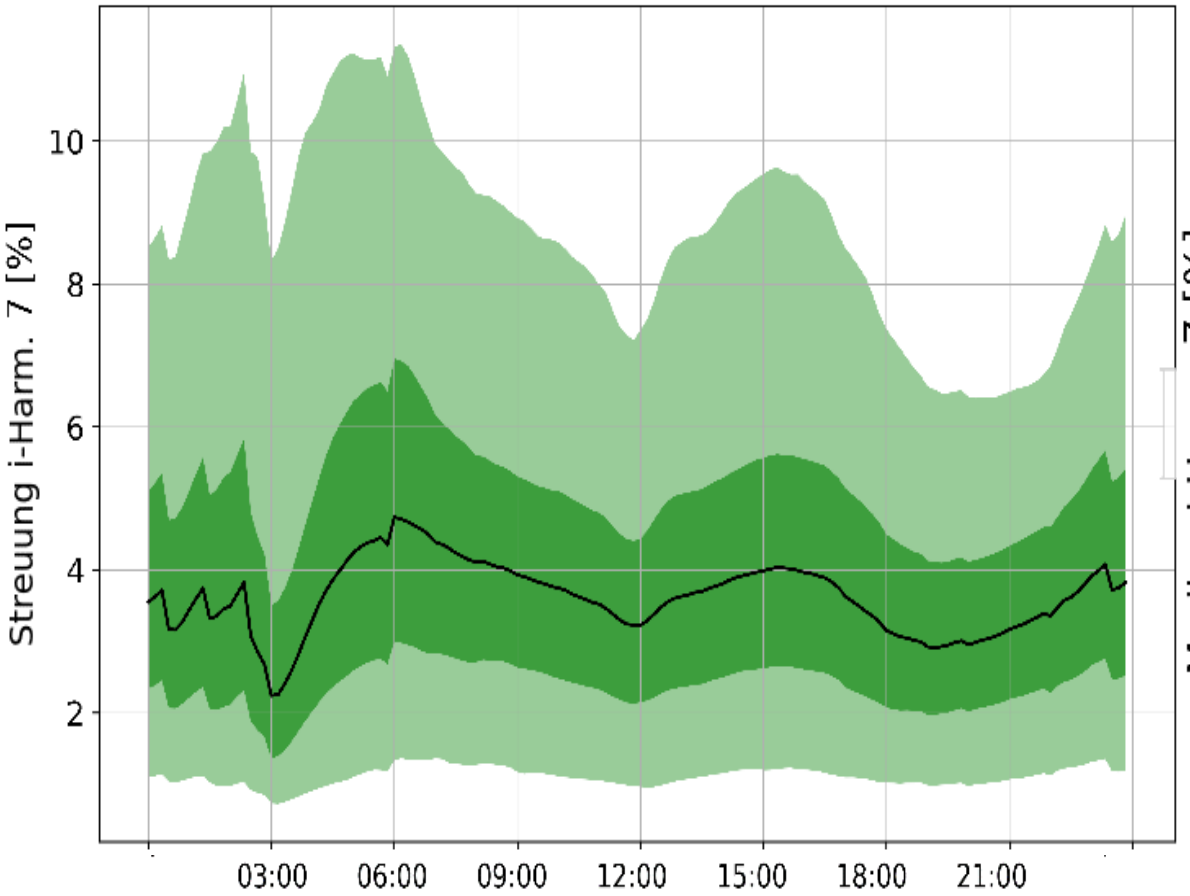


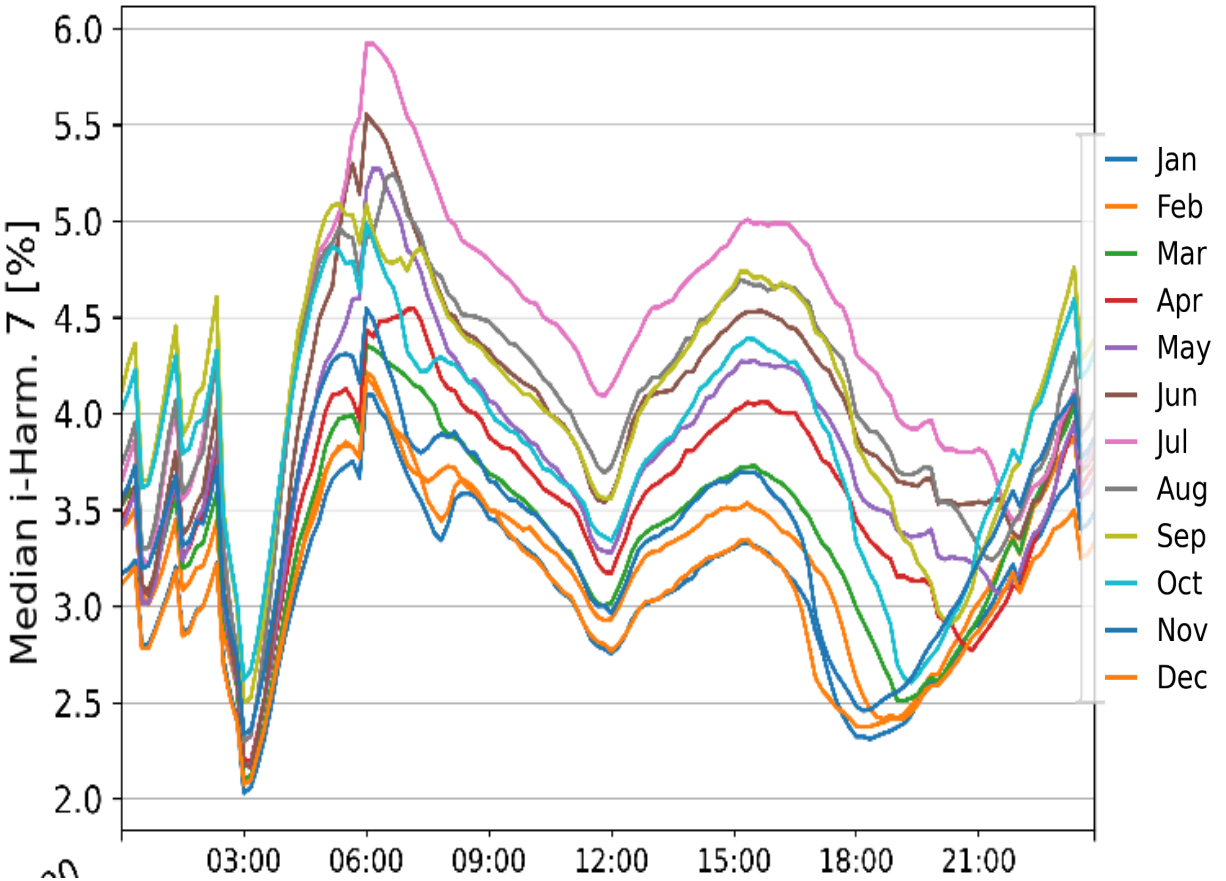


PQ-Langzeitdaten ESB

Stromoberschwingungen Tagesverhalten

- Streuung und Median 7. i-Harm in %

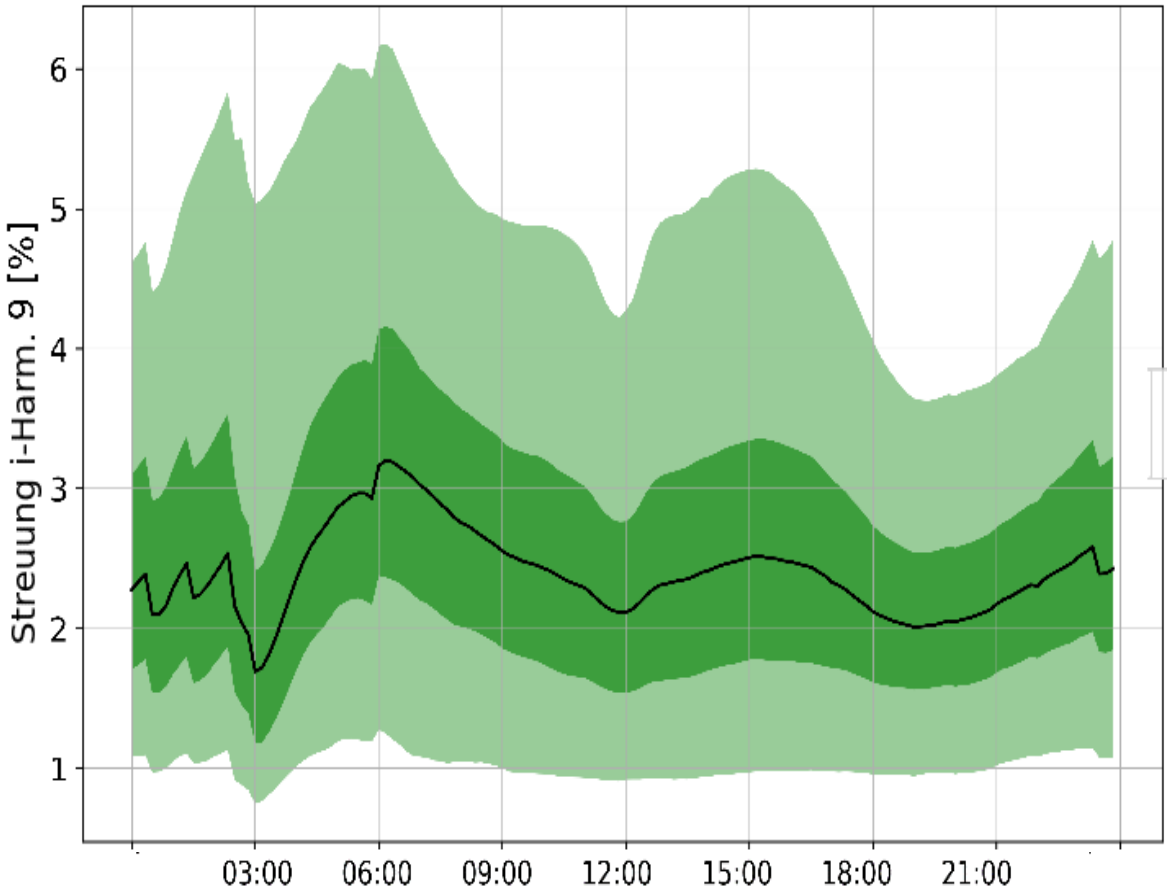


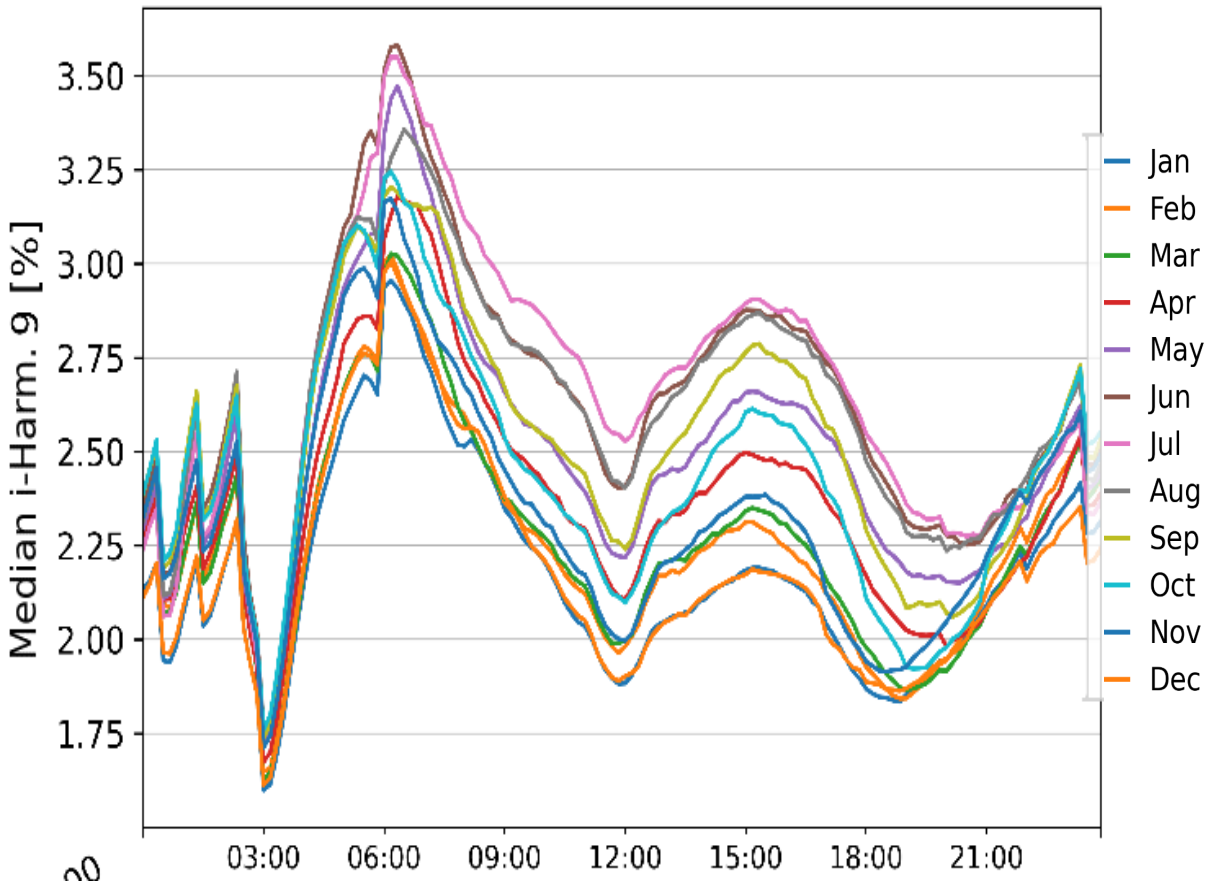


PQ-Langzeitdaten ESB

Stromoberschwingungen Tagesverhalten

- Streuung und Median 11. i-Harm in %

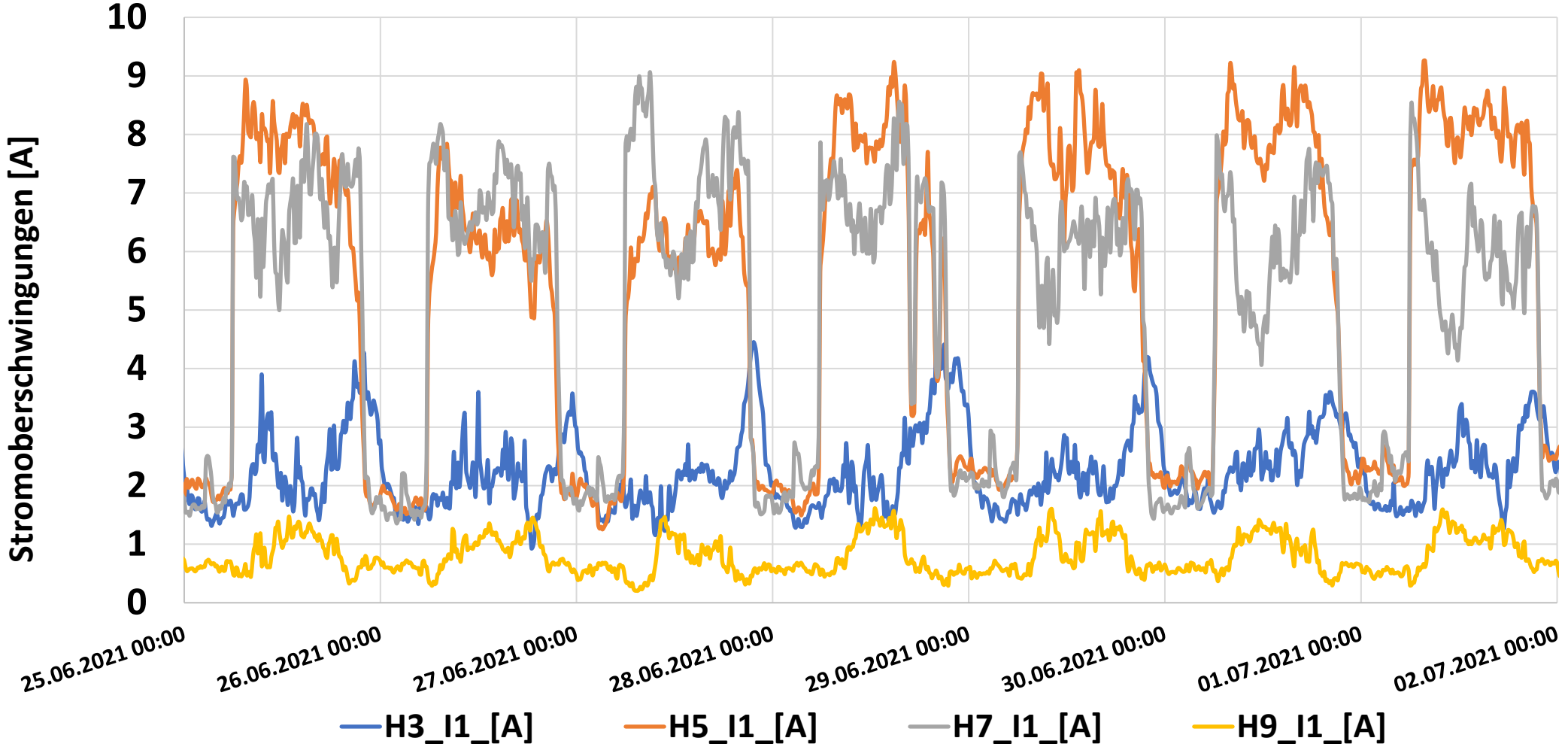




PQ-Langzeitdaten ESB

Anstieg 5. und 7. i-Harm aufgrund der PV-Anlagen

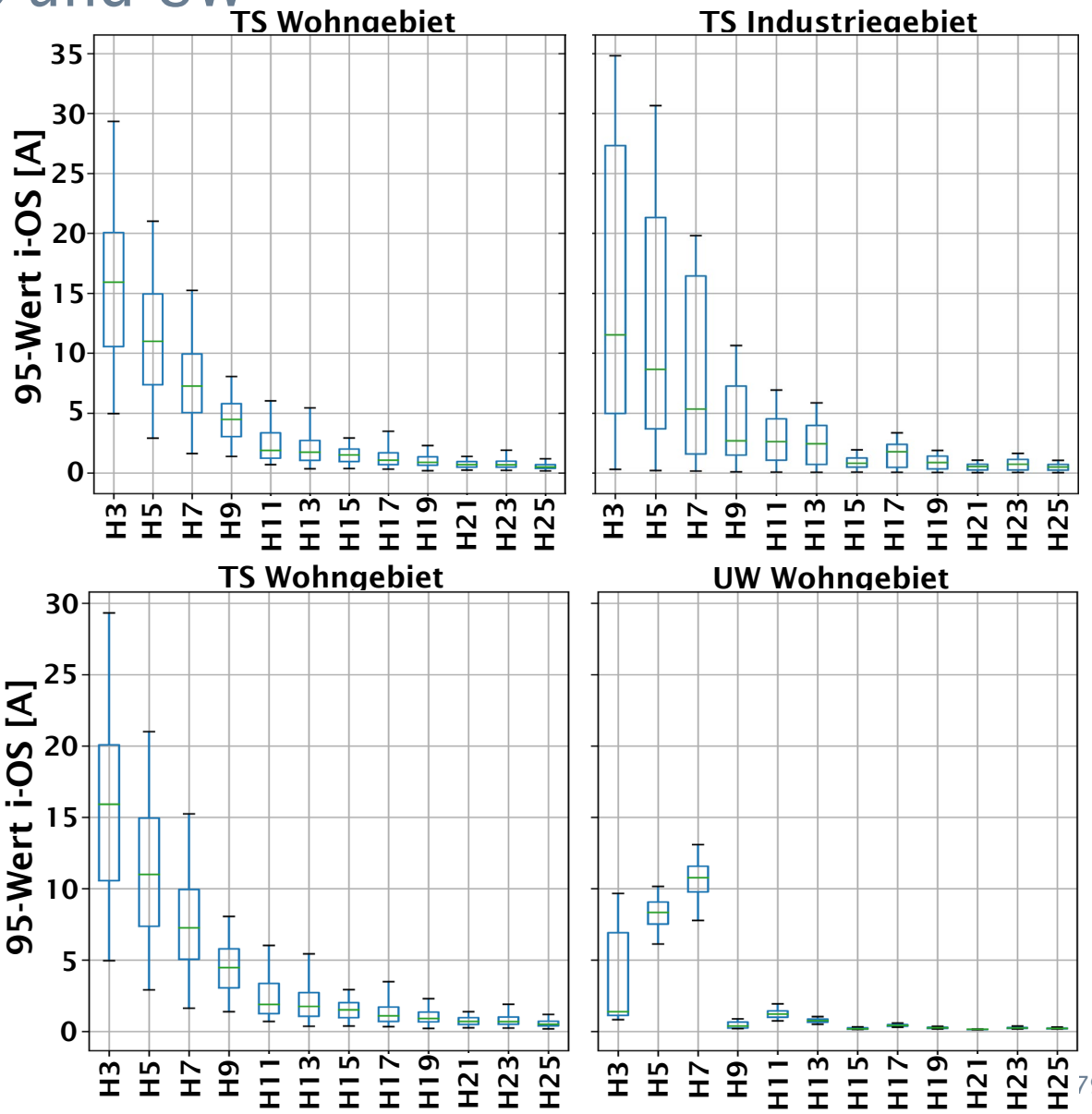
- Abgang mit hoher Durchdringung von PV



PQ-Langzeitdaten ESB

Vergleich Wohn- und Industriegebiet, TS und UW

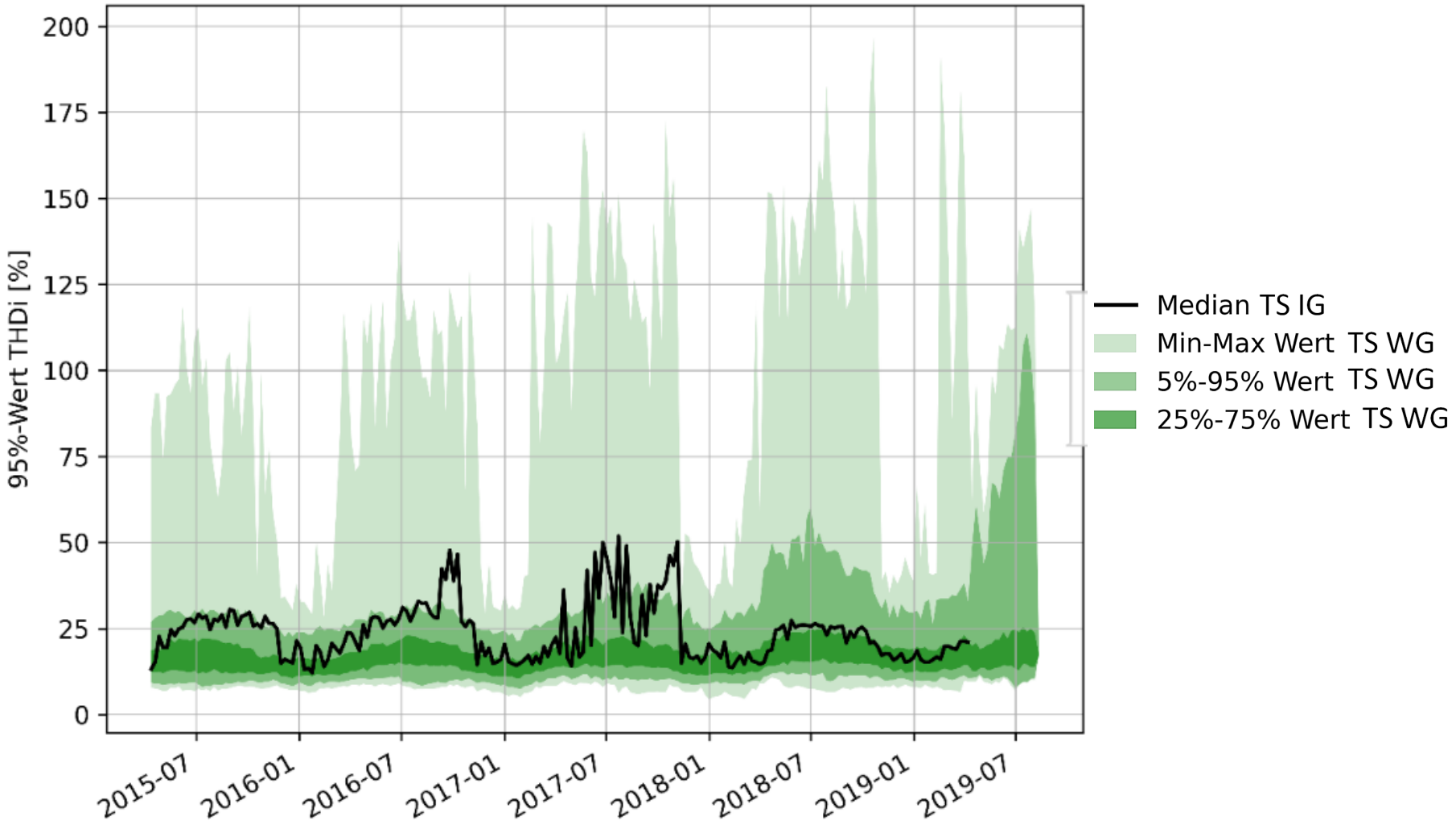
- Wohn- vs. Industriegebiet
  - THDi höher in Industriegebiet
  - Stromharmonischen in Industriegebiet grösser Wertebereich
- TS vs. UW
  - THDi und Stromoberschwingungen kleiner in UW
  - Andere Spannungsebene und Triplen-Harmonischen gefiltert



PQ-Langzeitdaten ESB

Vergleich Wohn- und Industriegebiet, TS und UW

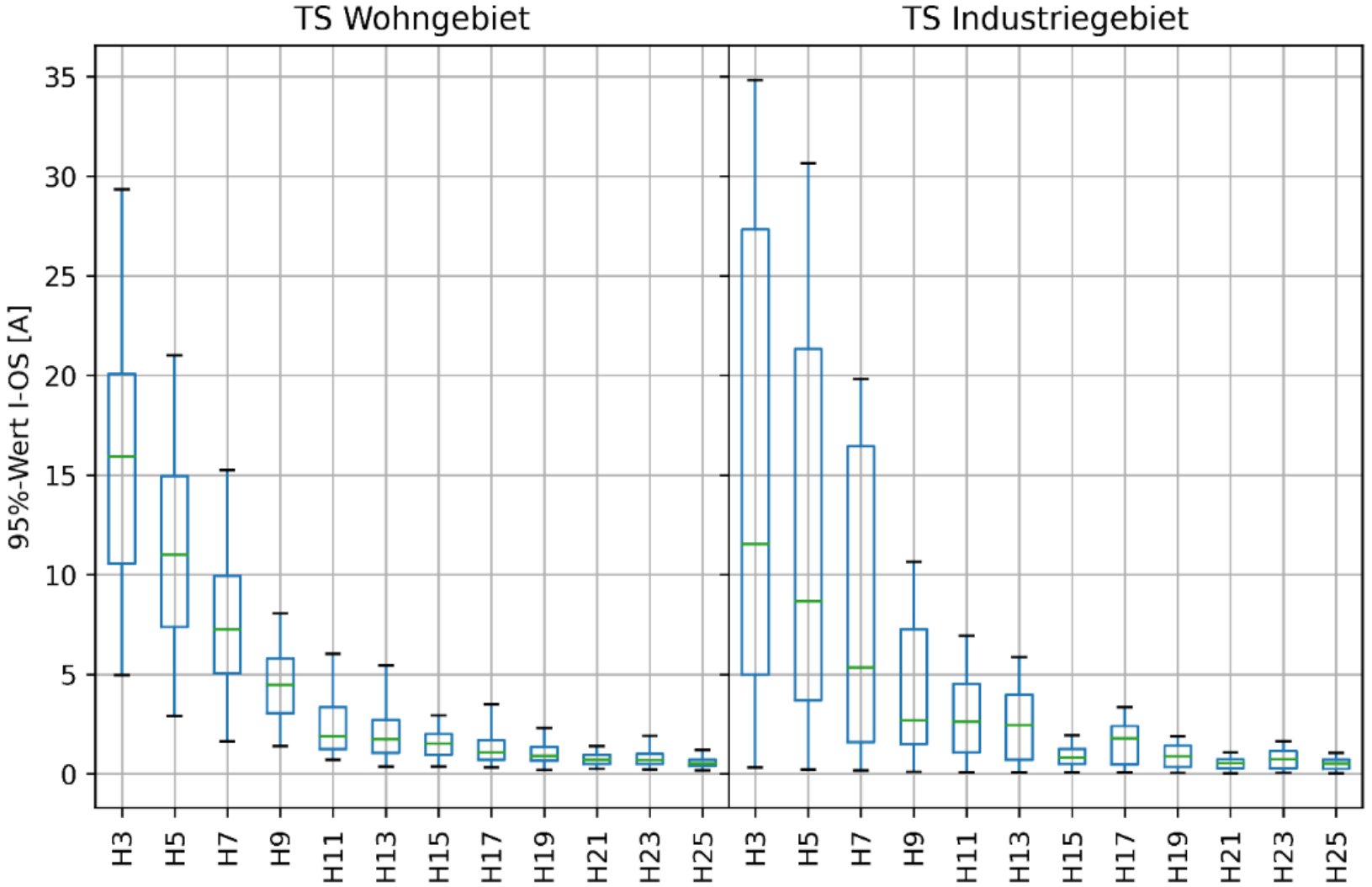
- TS Wohngebiet vs. TS Industriegebiet



PQ-Langzeitdaten ESB

Vergleich Wohn- und Industriegebiet, TS und UW

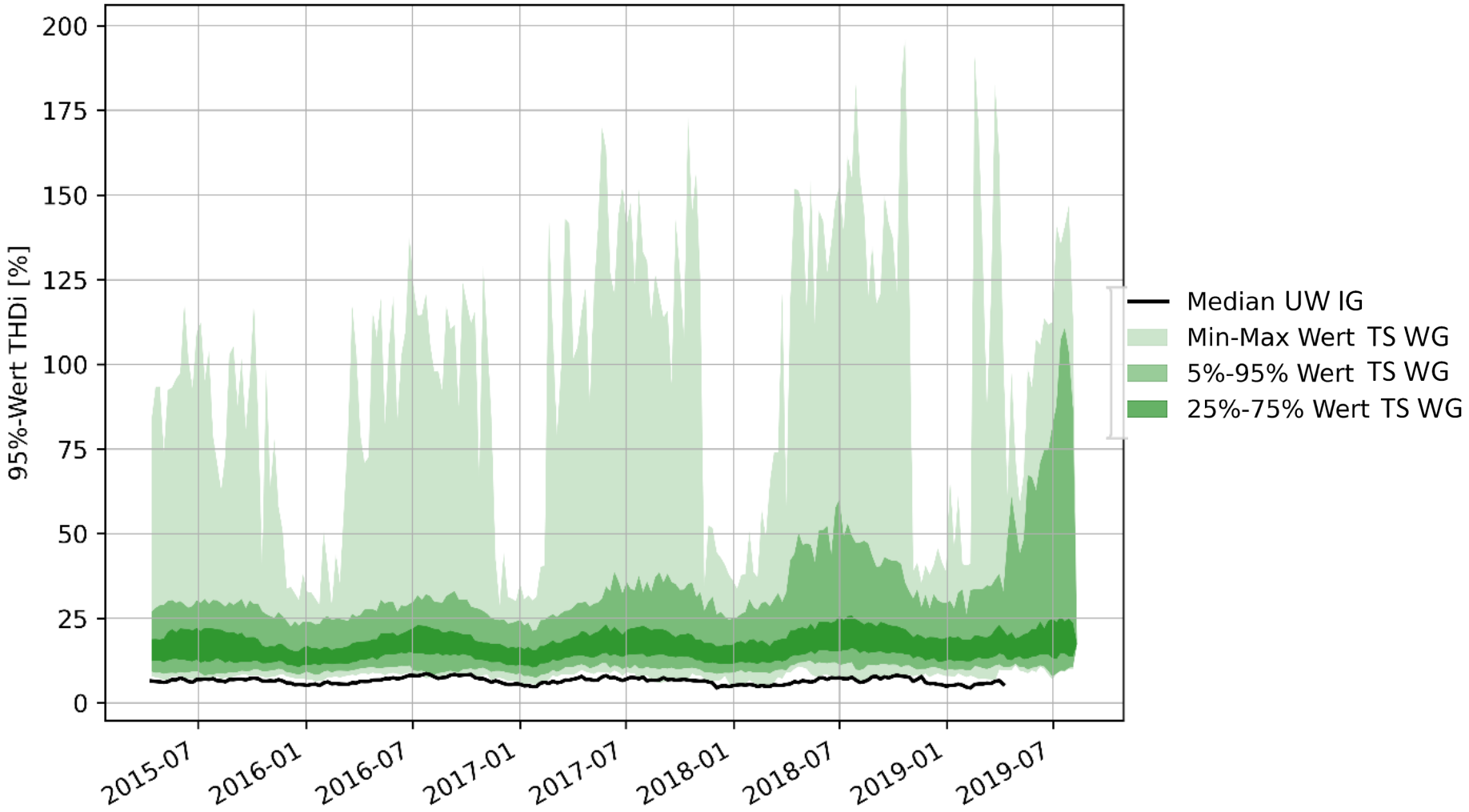
- TS Wohngebiet vs. TS Industriegebiet



PQ-Langzeitdaten ESB

Vergleich Wohn- und Industriegebiet, TS und UW

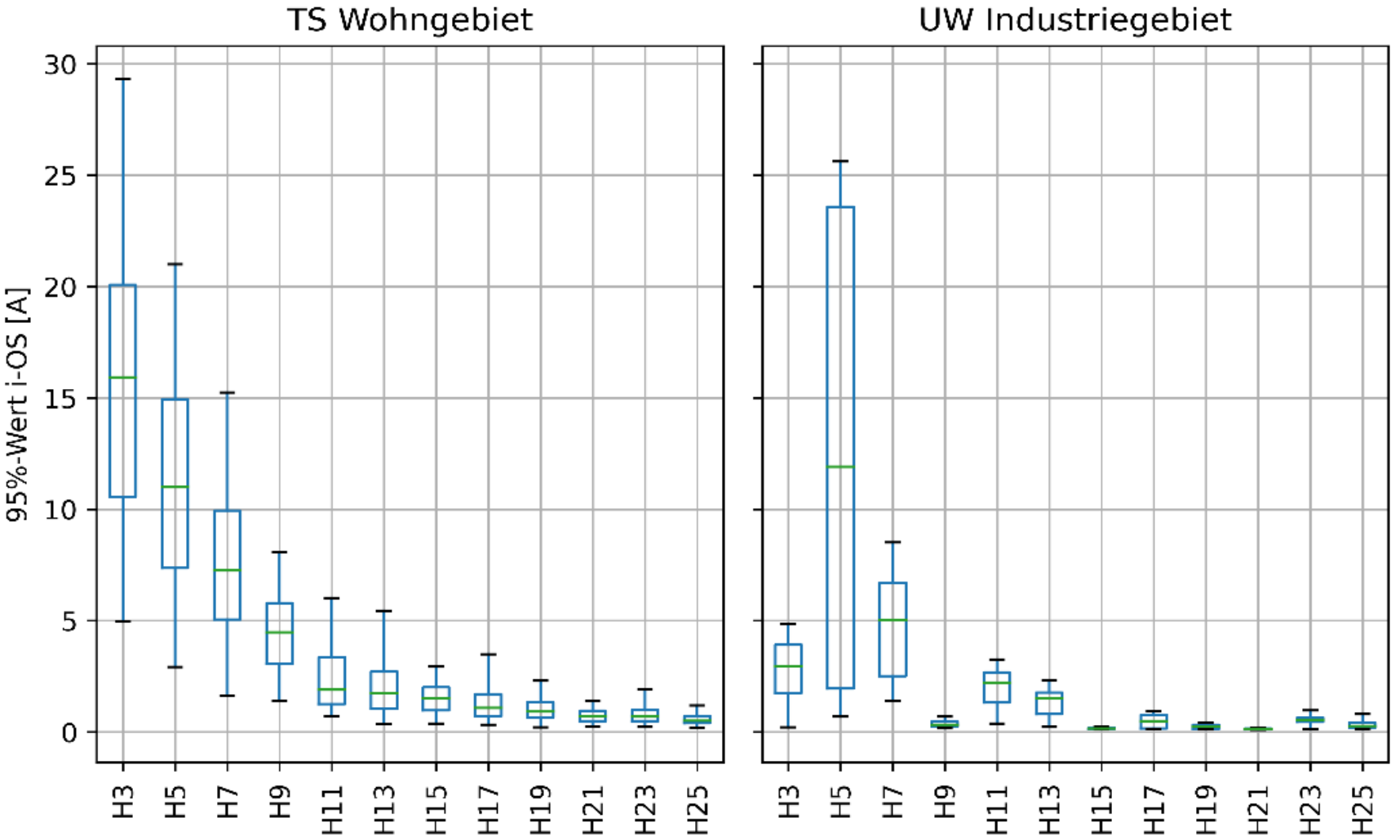
- TS Wohngebiet vs. UW Industriegebiet



PQ-Langzeitdaten ESB

Vergleich Wohn- und Industriegebiet, TS und UW

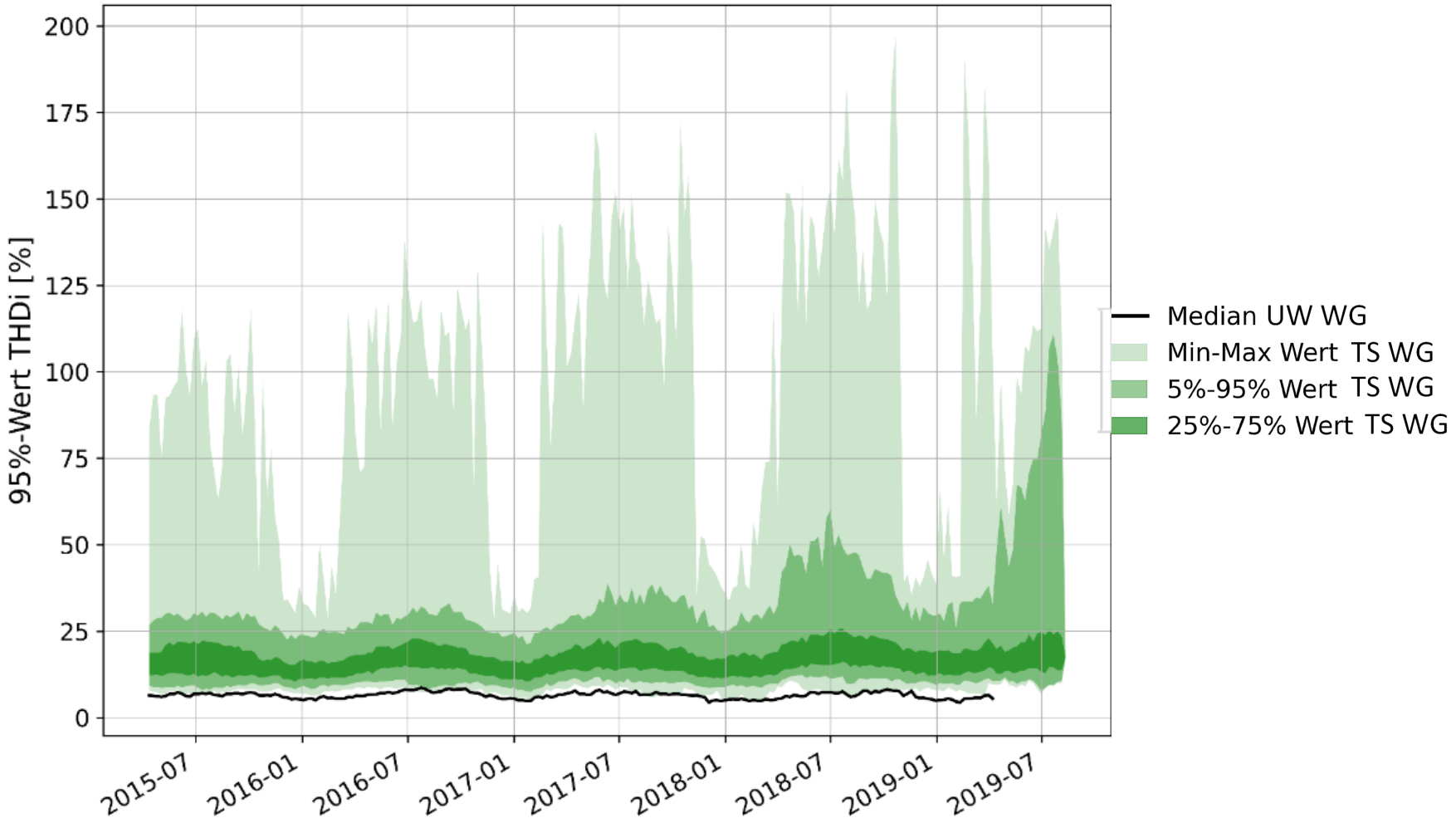
- TS Wohngebiet vs. UW Industriegebiet



PQ-Langzeitdaten ESB

Vergleich Wohn- und Industriegebiet, TS und UW

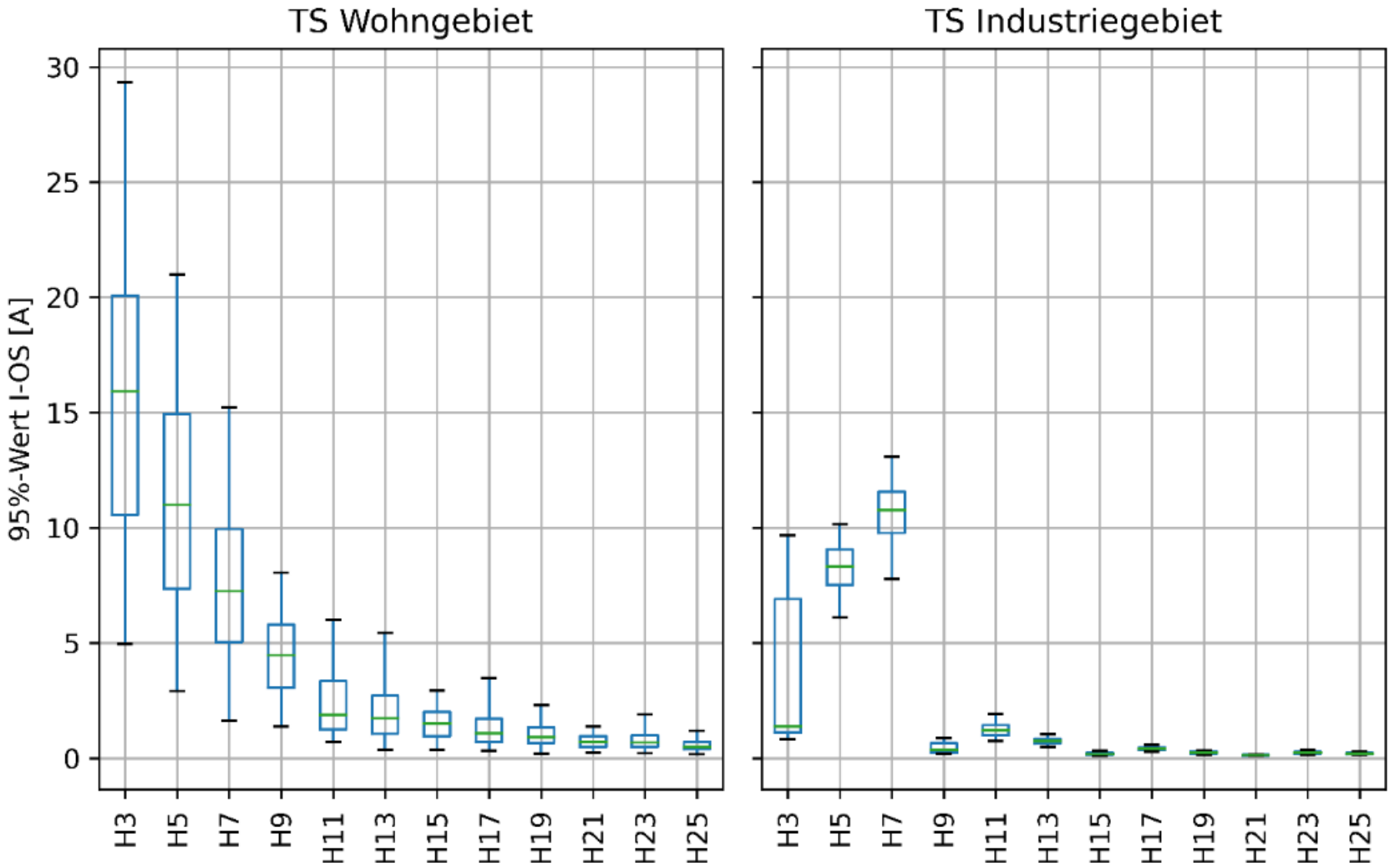
- TS Wohngebiet vs. UW Industriegebiet



PQ-Langzeitdaten ESB

Vergleich Wohn- und Industriegebiet, TS und UW

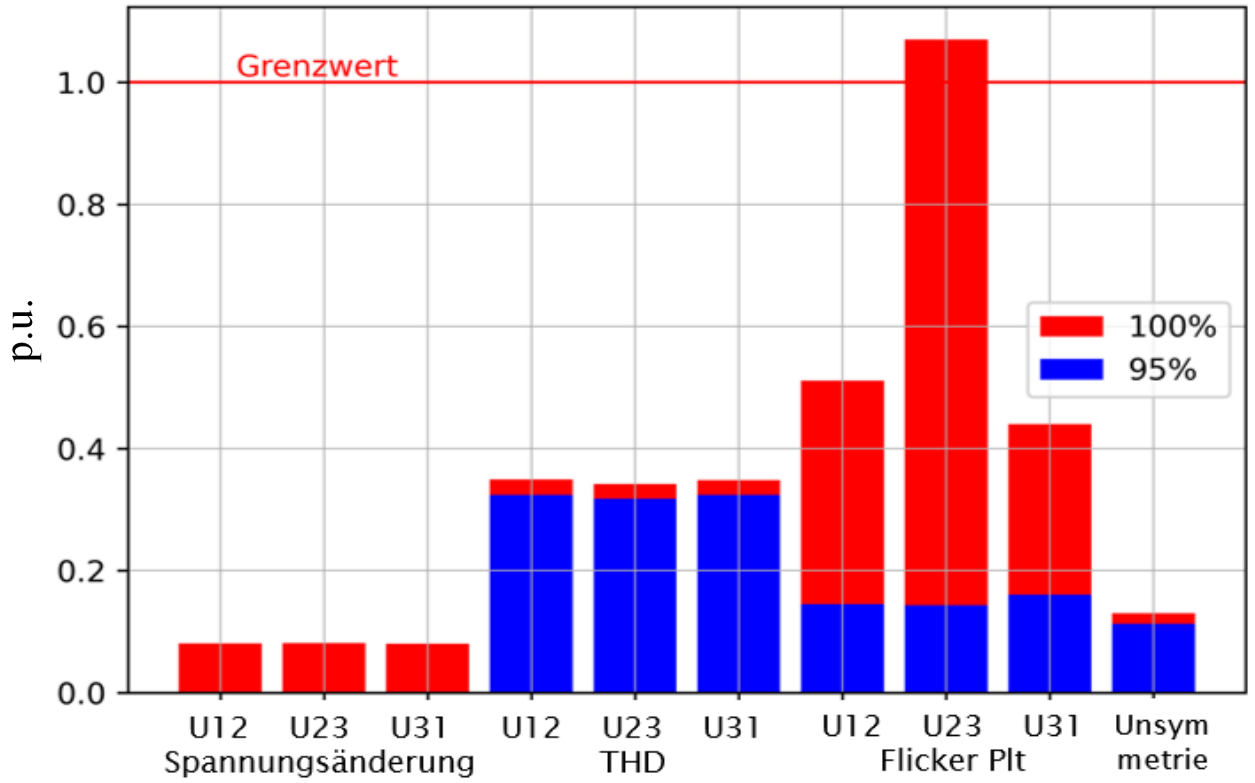
- TS Wohngebiet vs. UW Industriegebiet

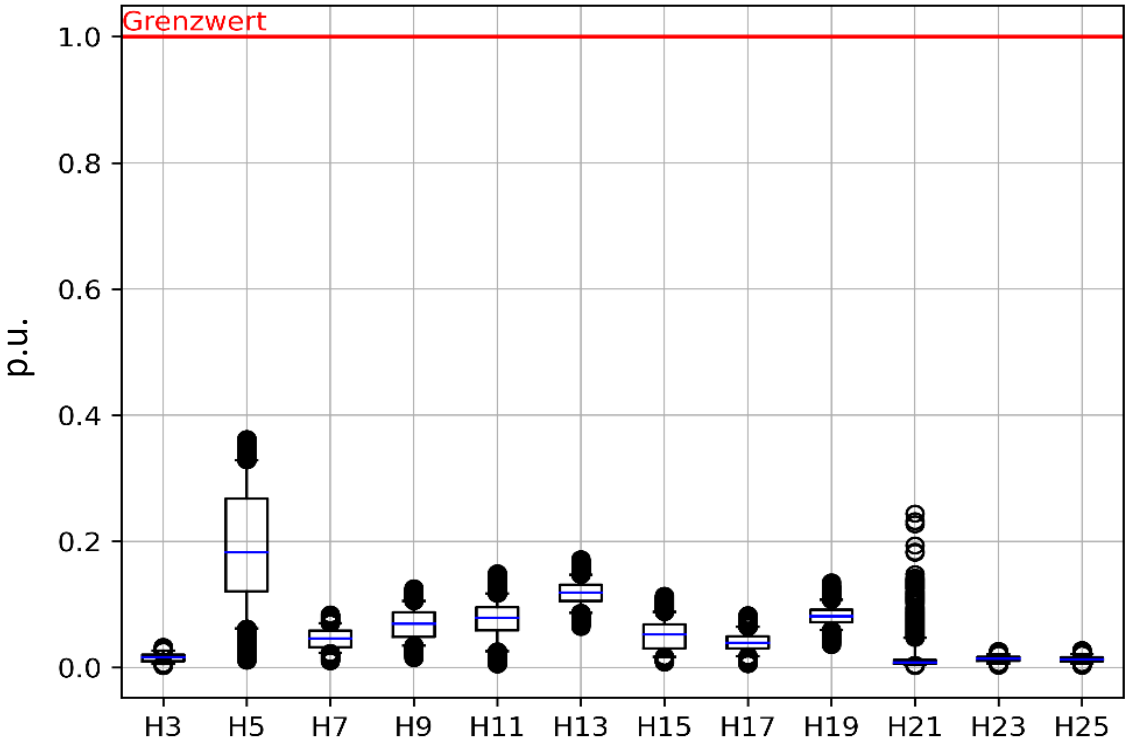


Stromverzerrung in einem MS-Netz

MS-Netz: Spannungsqualität

- Gemäss EN50160

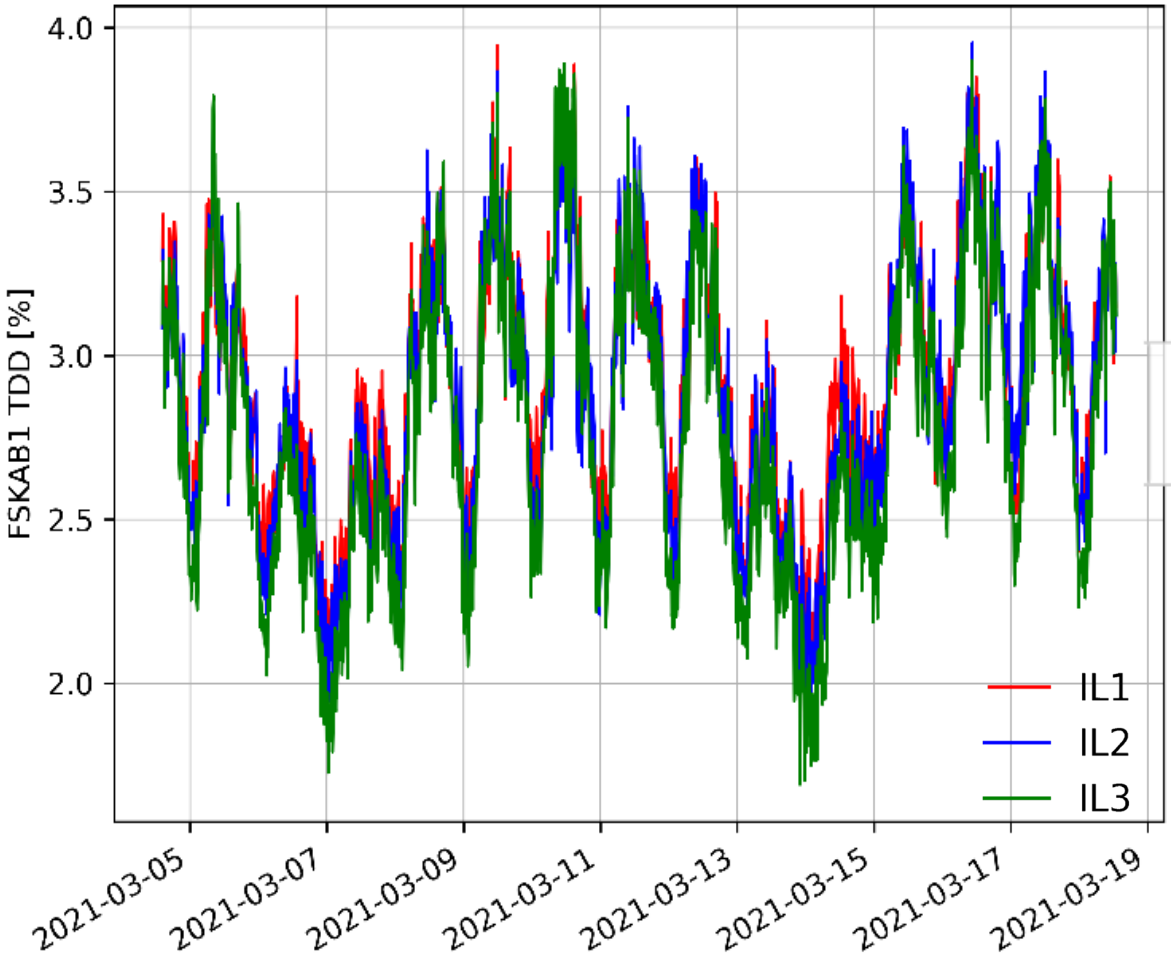


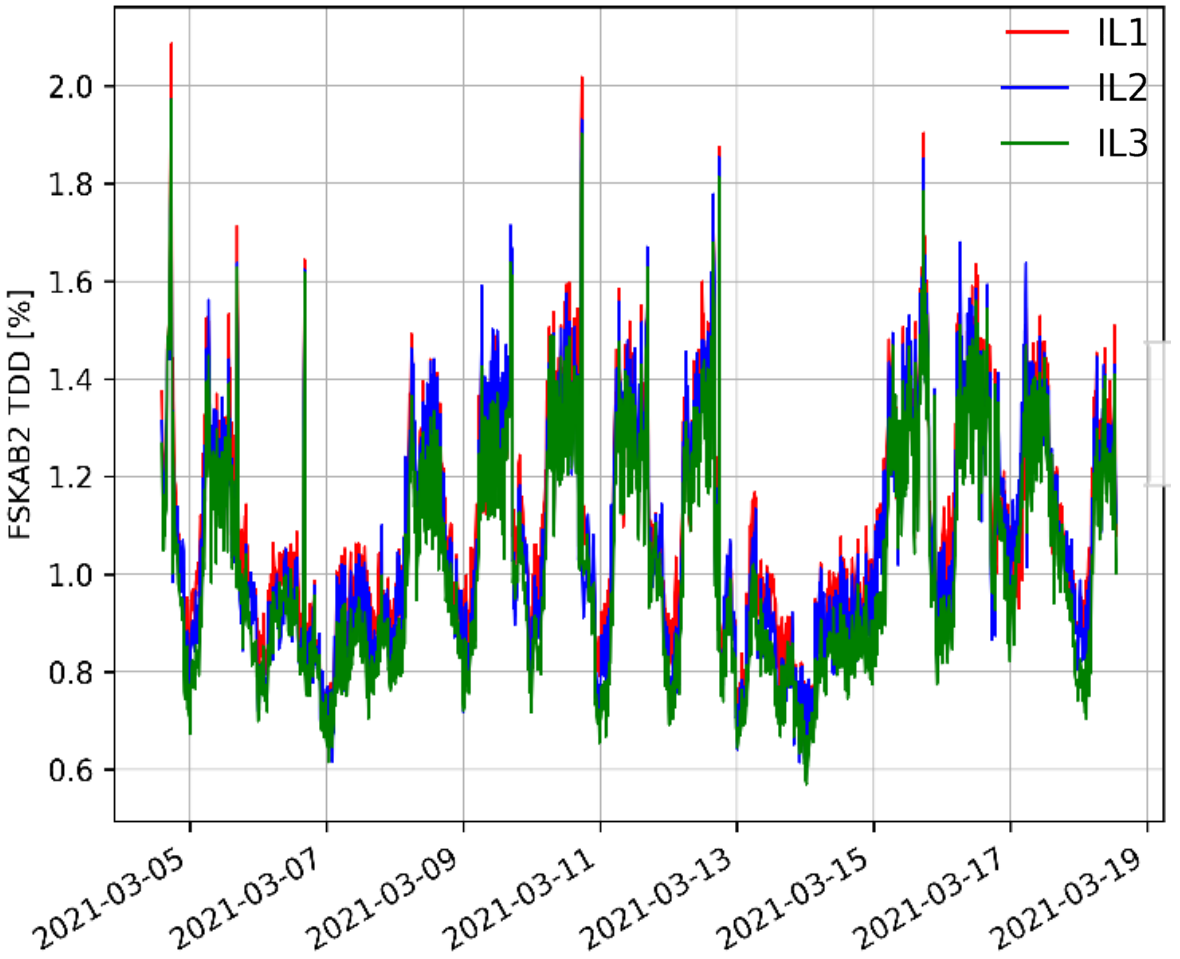


Stromverzerrung in einem MS-Netz

MS-Netz: TDD-Wert

- Zeitverlauf TDD FSKAB1 und FSKAB2

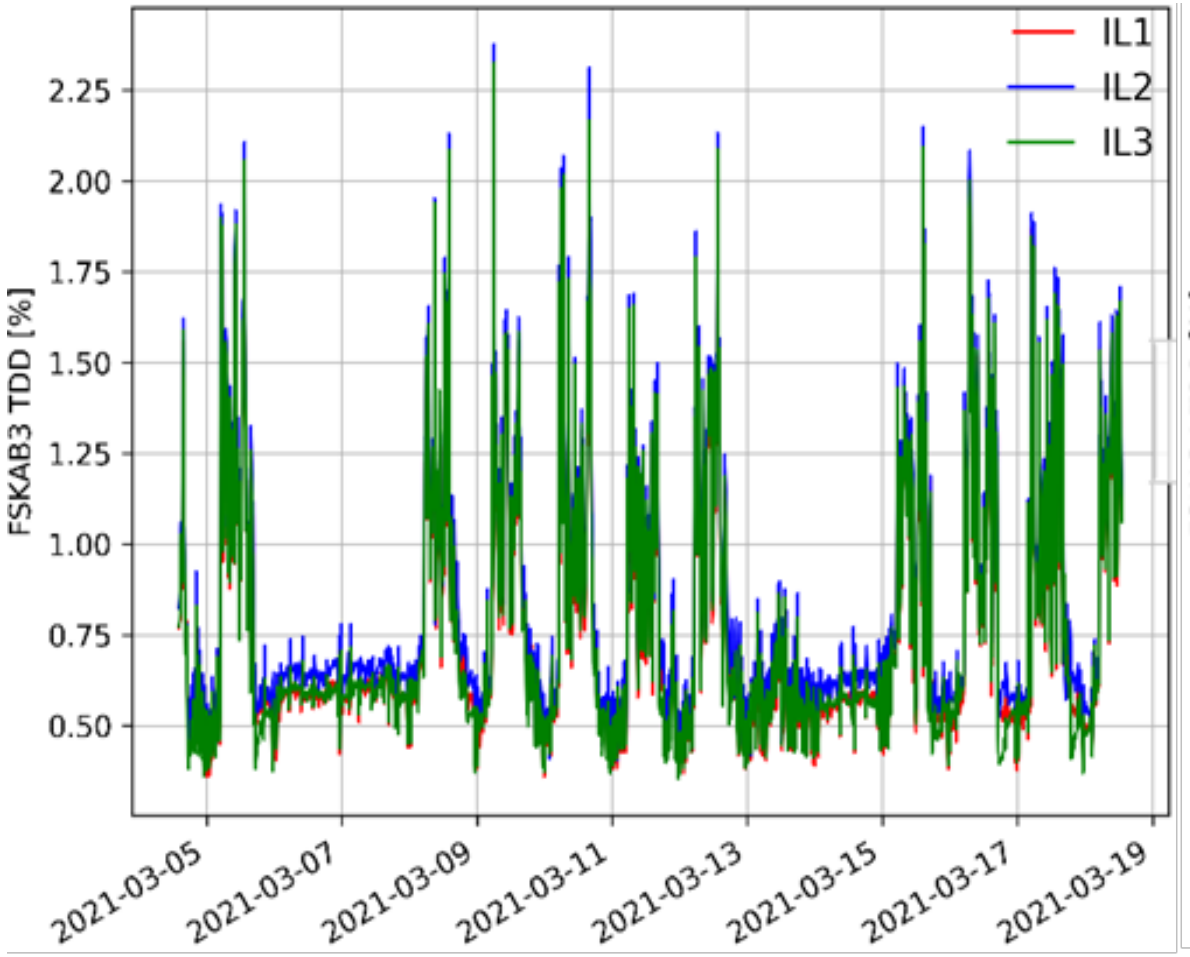


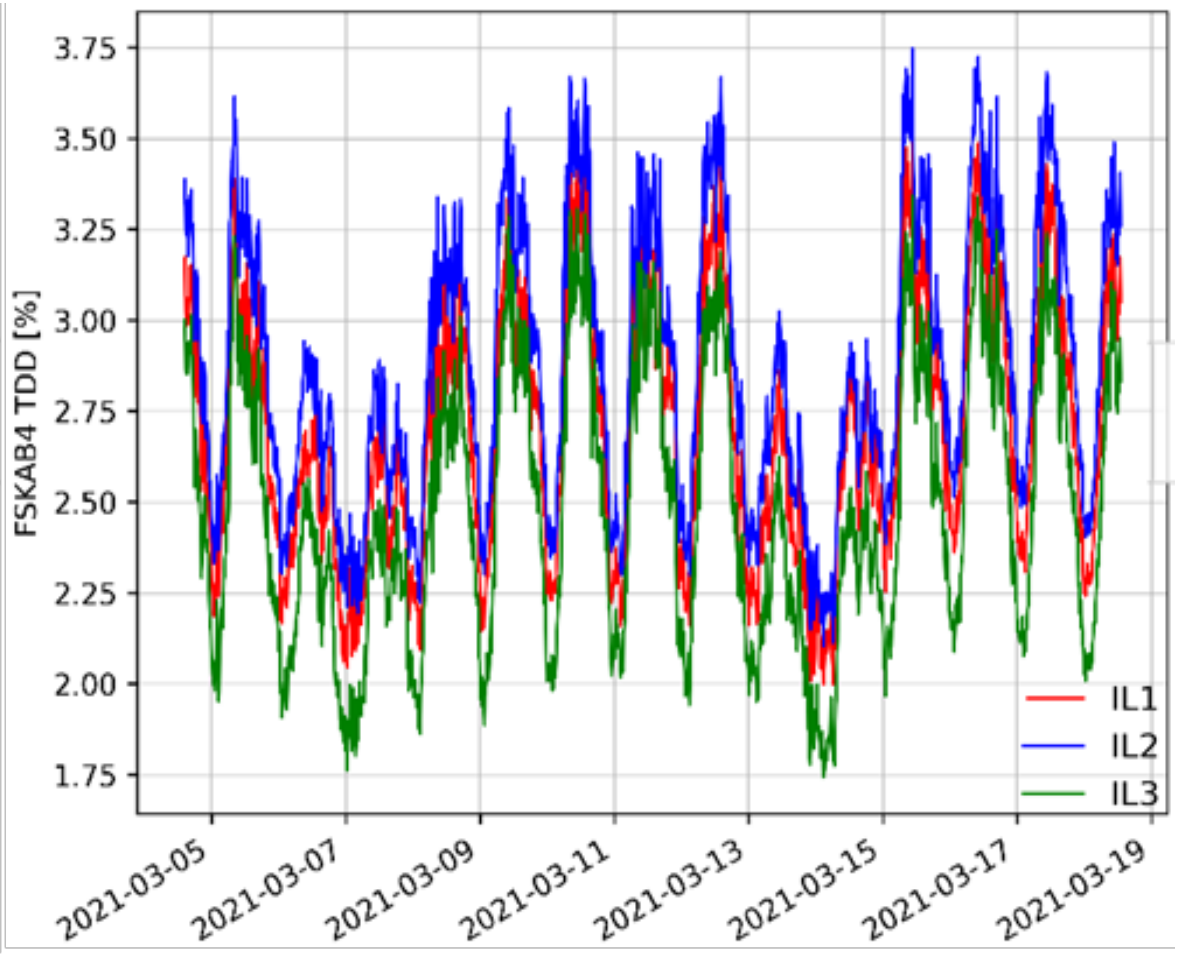


Stromverzerrung in einem MS-Netz

MS-Netz: TDD-Wert

- Zeitverlauf TDD FSKAB3 und FSKAB4

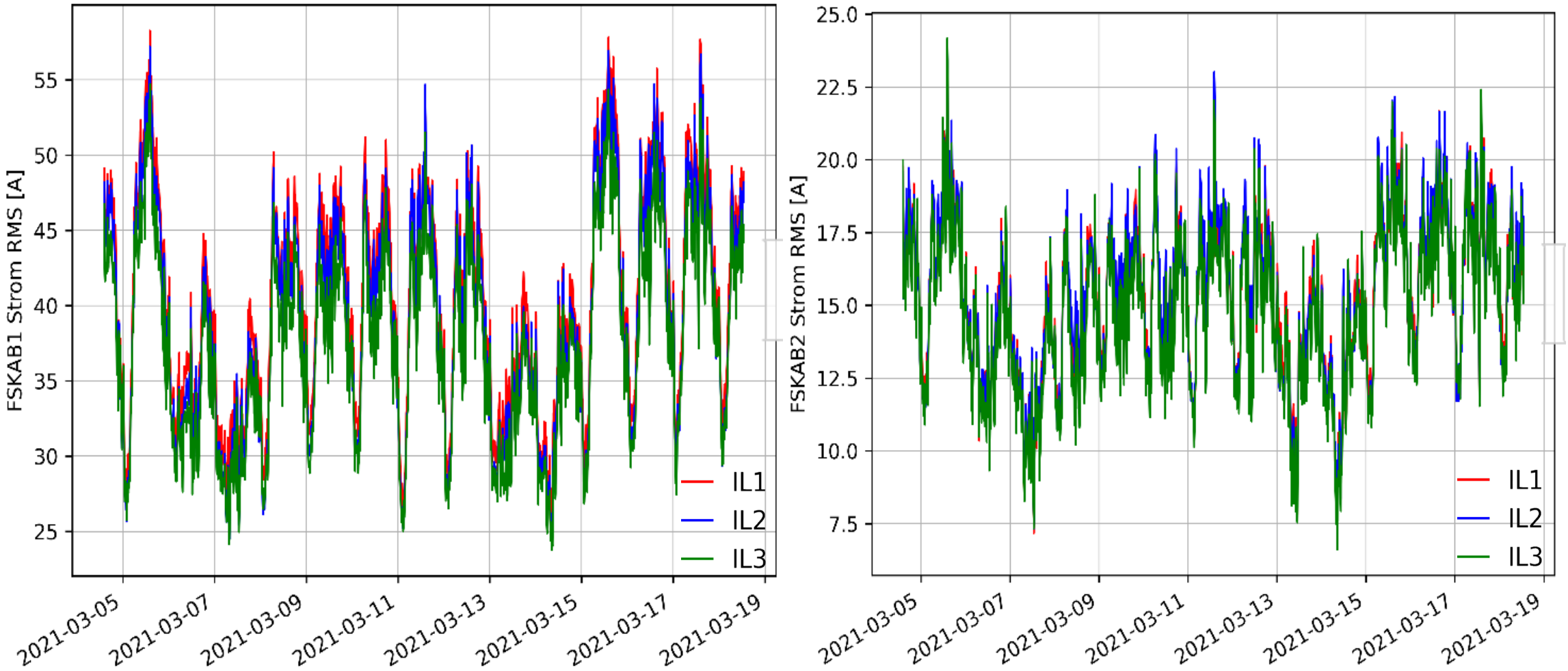




Stromverzerrung in einem MS-Netz

MS-Netz: TDD-Wert

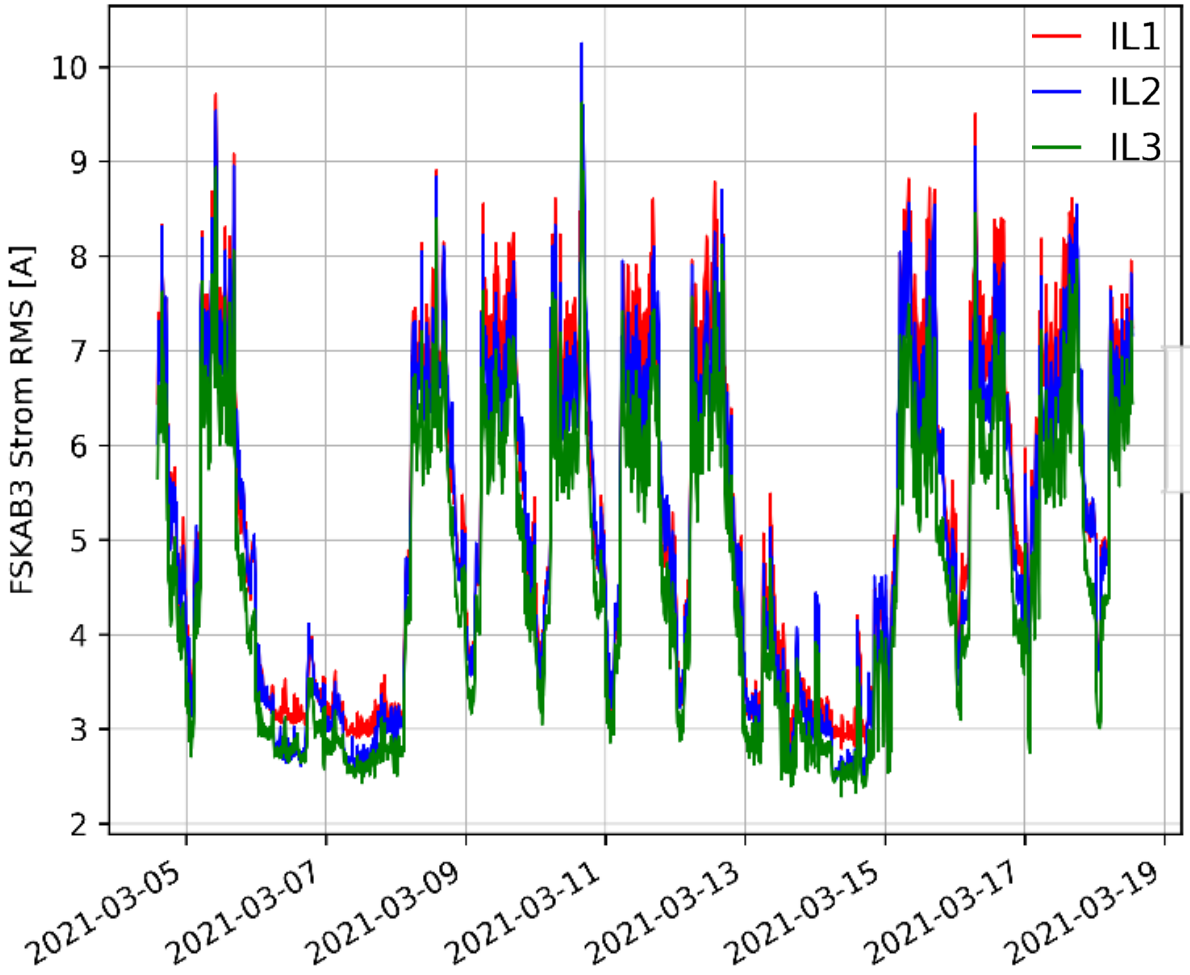
- Zeitverlauf Effektivwert des Stroms FSKAB1 und FSKAB2

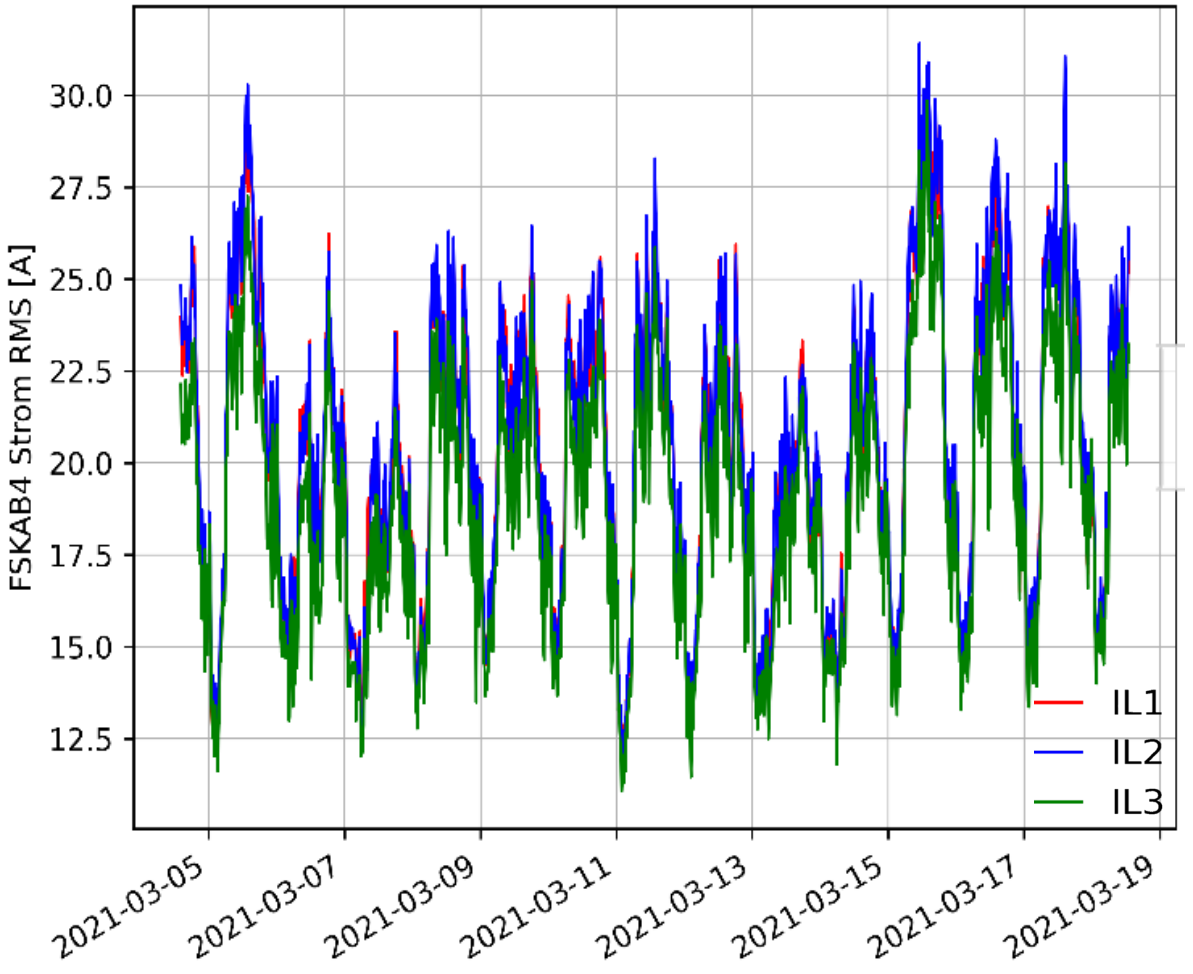


Stromverzerrung in einem MS-Netz

MS-Netz: TDD-Wert

- Zeitverlauf Effektivwert des Stroms FSKAB3 und FSKAB4

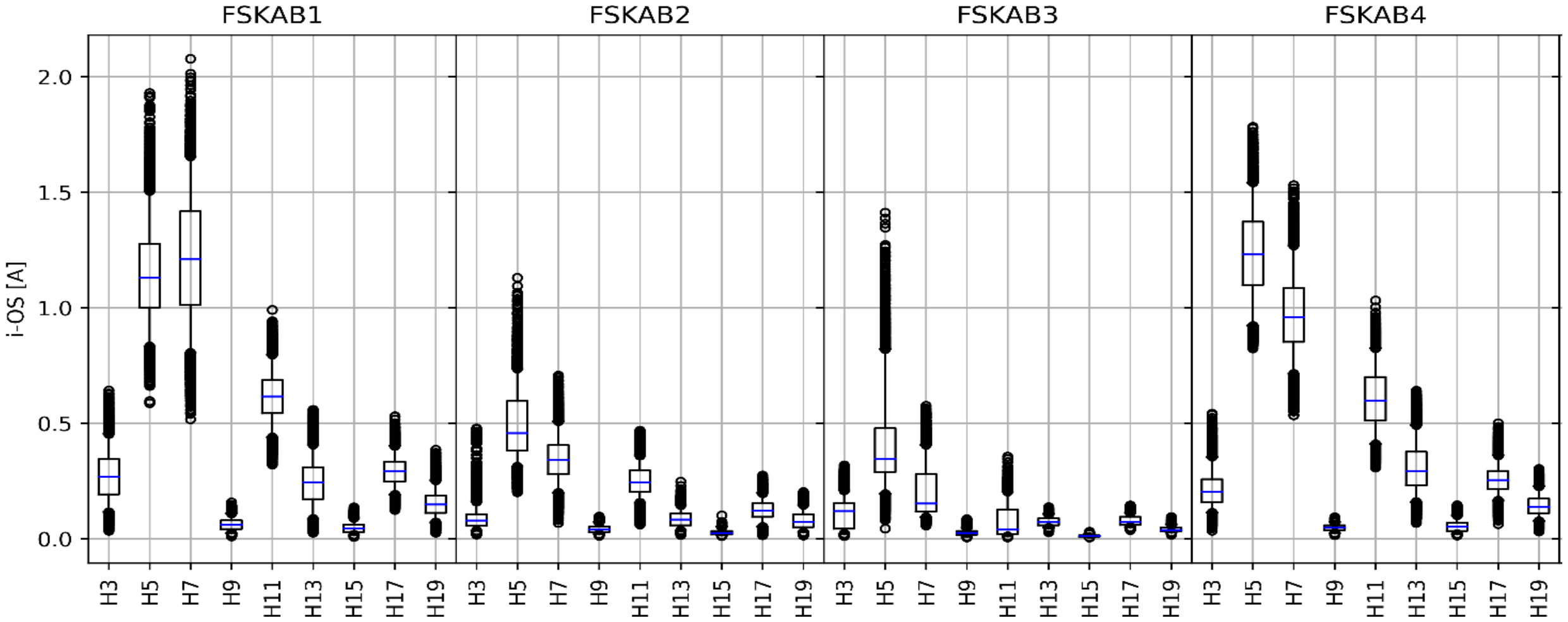




Stromverzerrung in einem MS-Netz

MS-Netz: Stromoberschwingungen

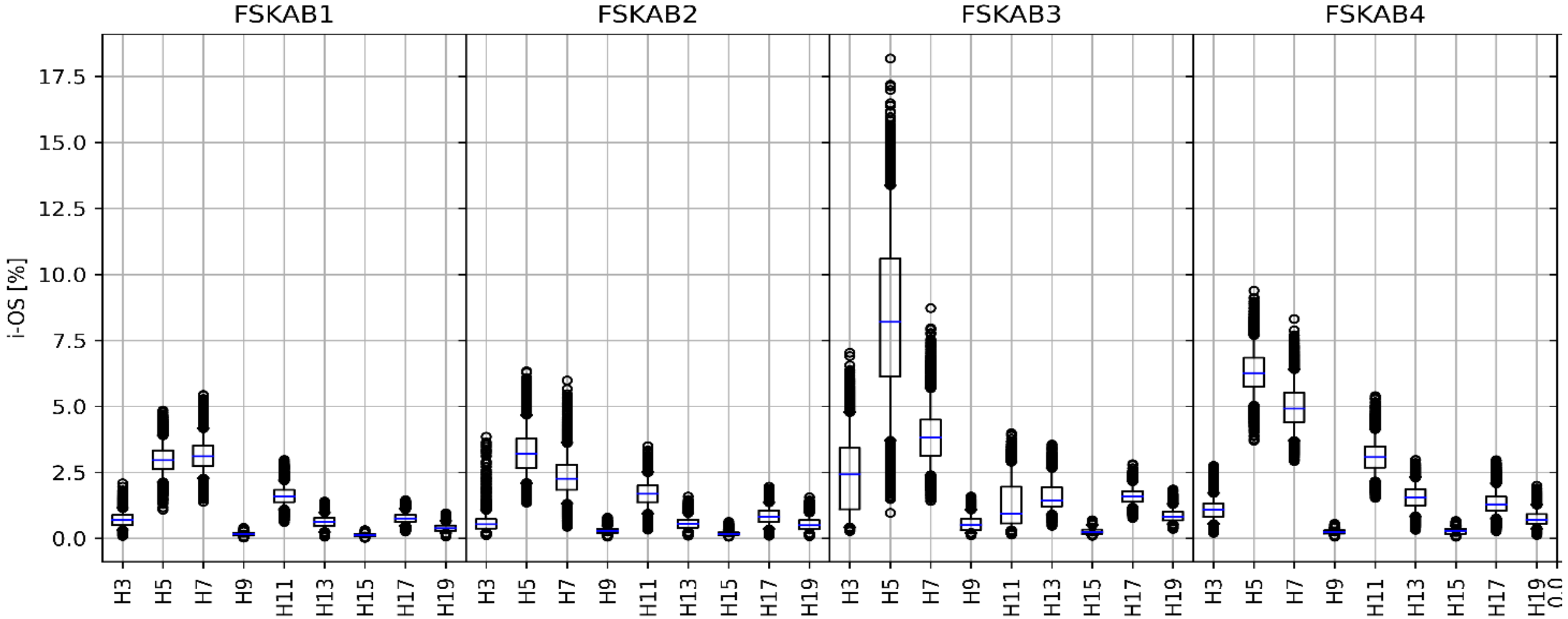
- Boxplot der Stromoberschwingungen in Ampere



Stromverzerrung in einem MS-Netz

MS-Netz: Stromoberschwingungen

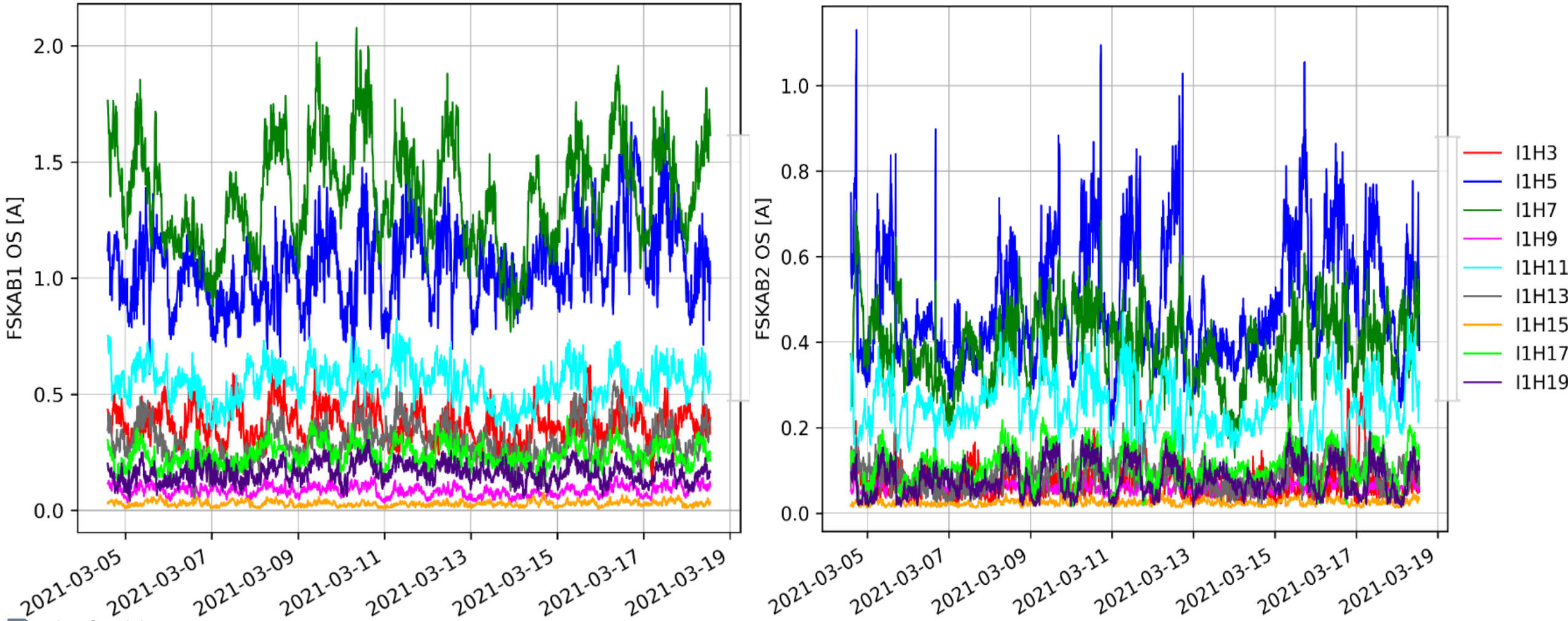
- Boxplot der Stromoberschwingungen in Prozent des Effektivwerts



Stromverzerrung in einem MS-Netz

MS-Netz: Stromoberschwingungen

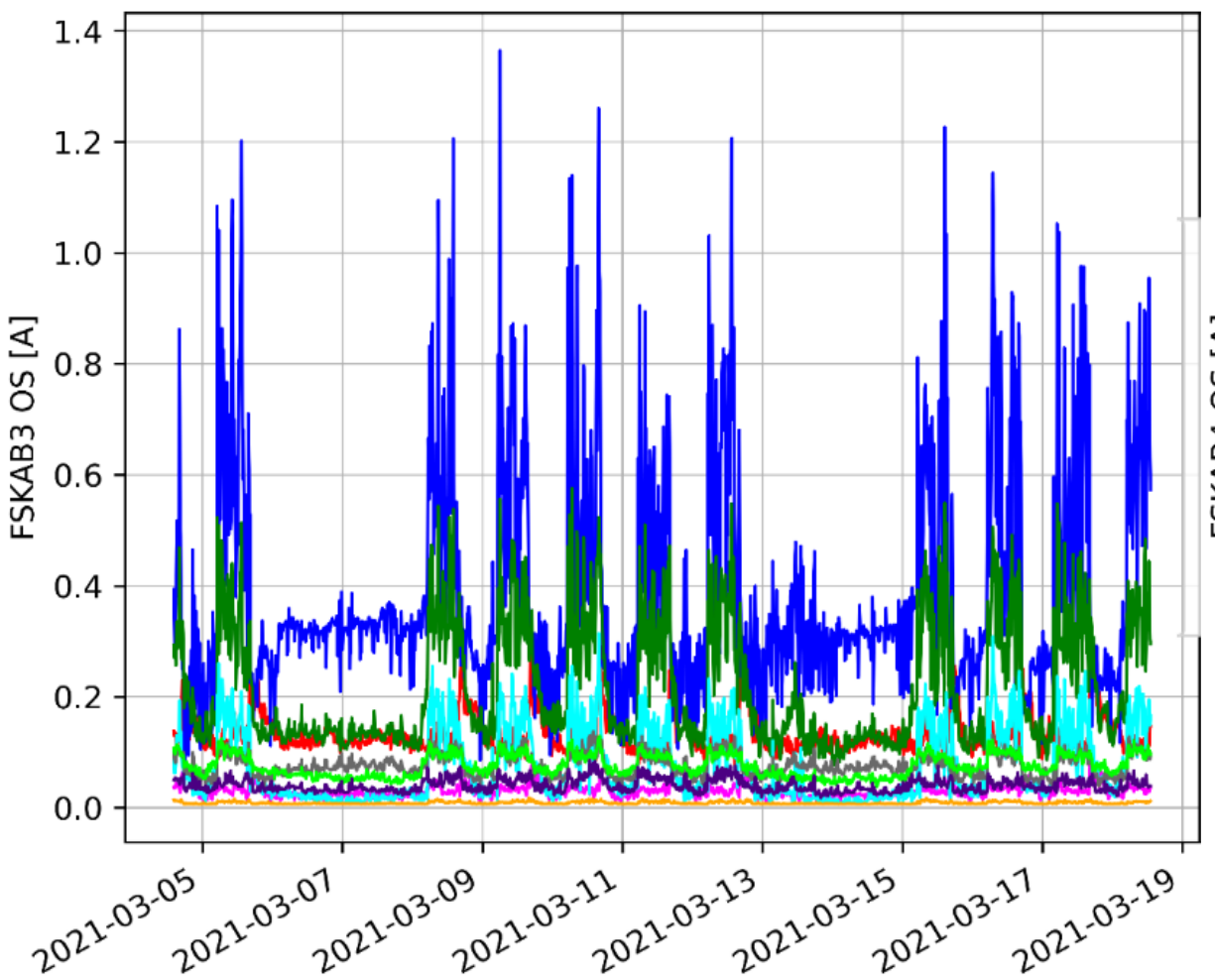
- Zeitverlauf der Stromoberschwingungen in Ampere

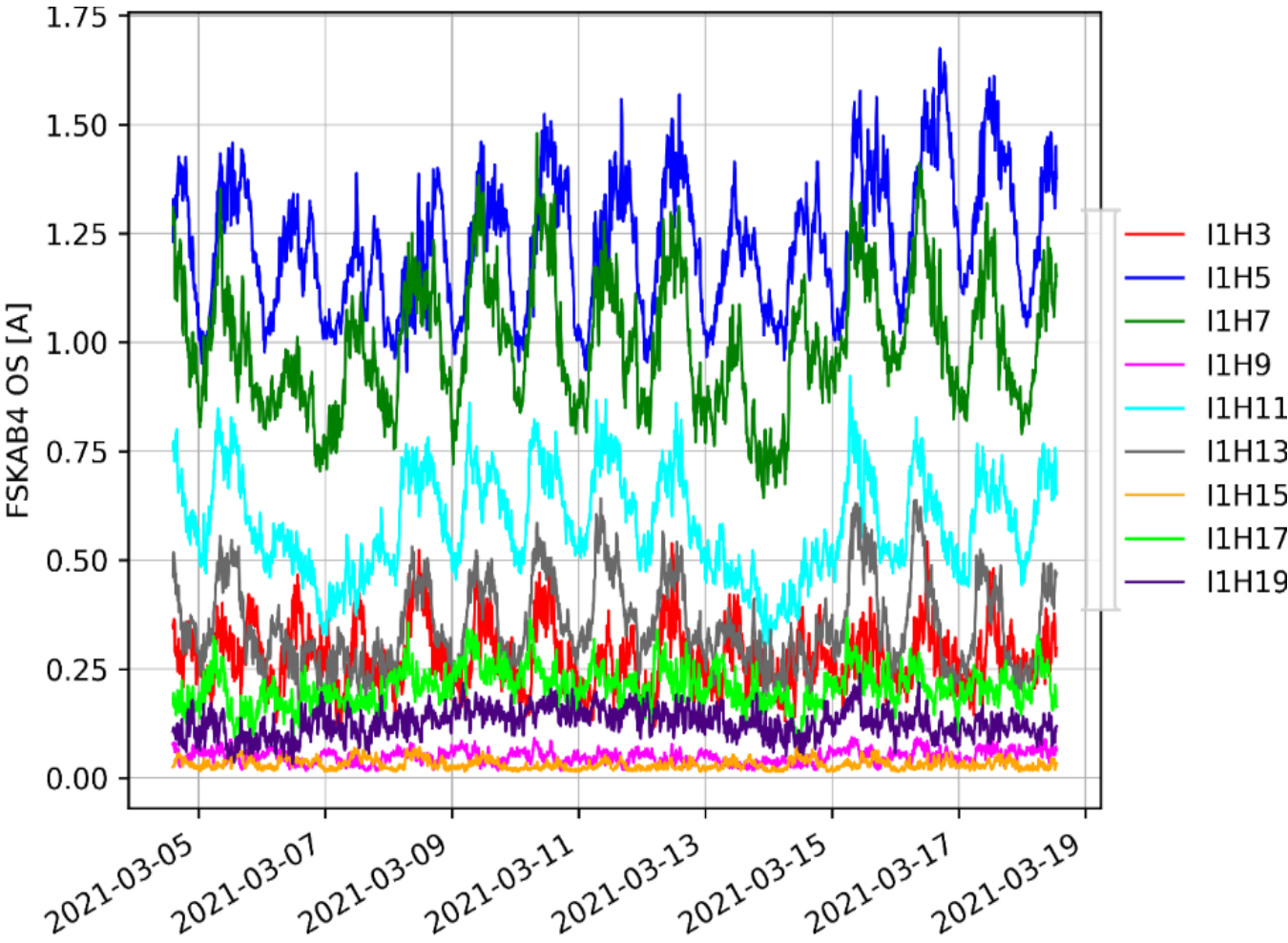


Stromverzerrung in einem MS-Netz

MS-Netz: Stromoberschwingungen

- Zeitverlauf der Stromoberschwingungen in Ampere

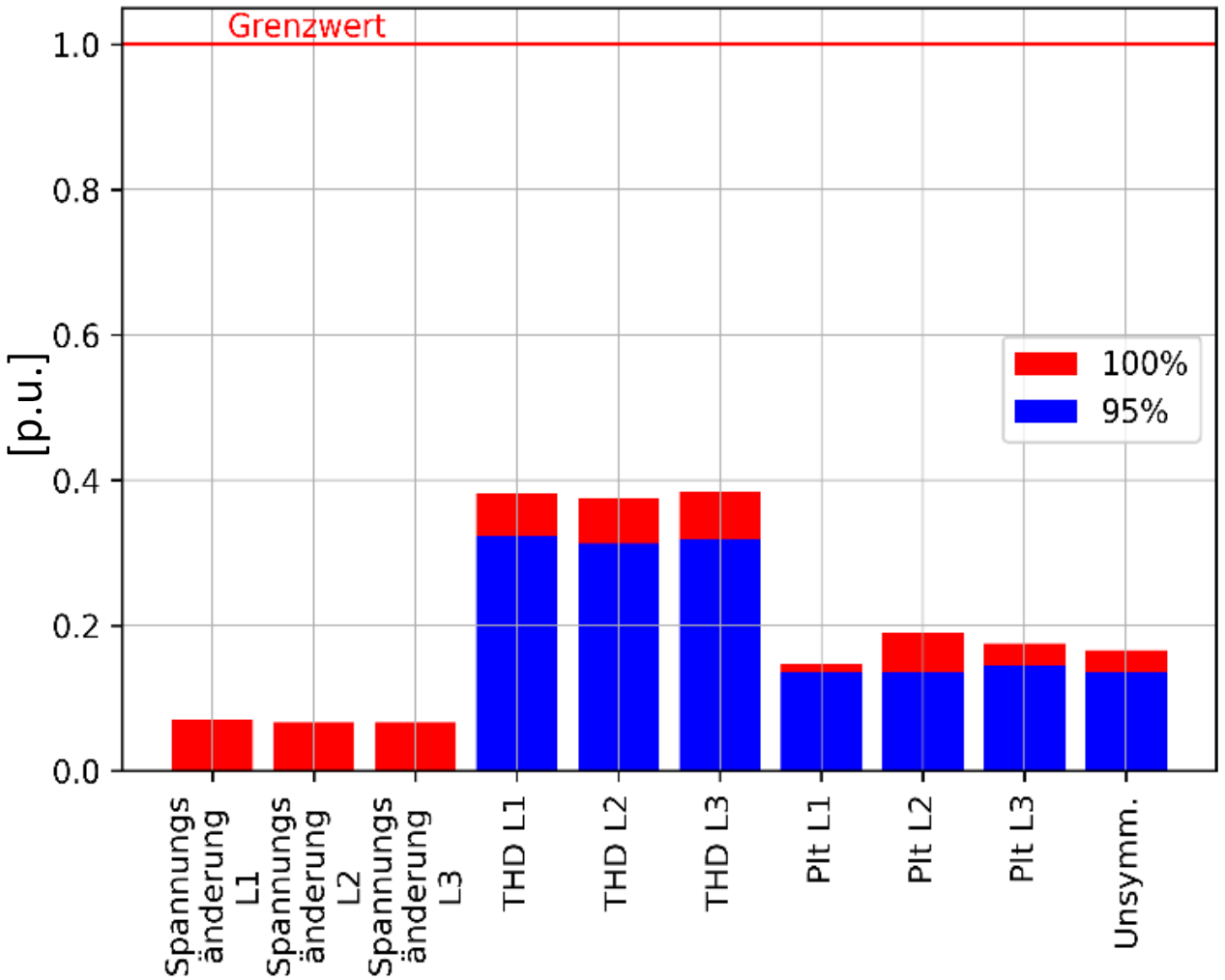


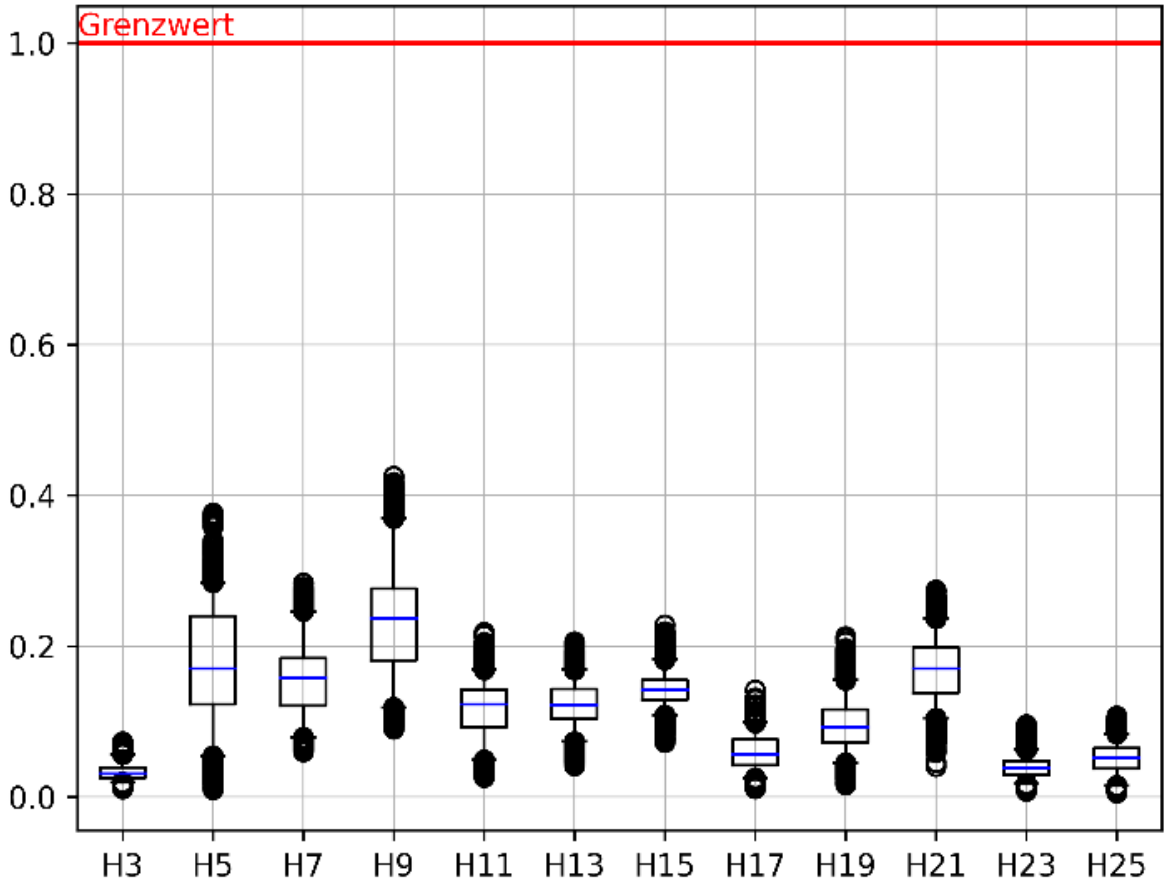


Stromverzerrung in einem MS-Netz

NS-Netz: Spannungsqualität

- TS04

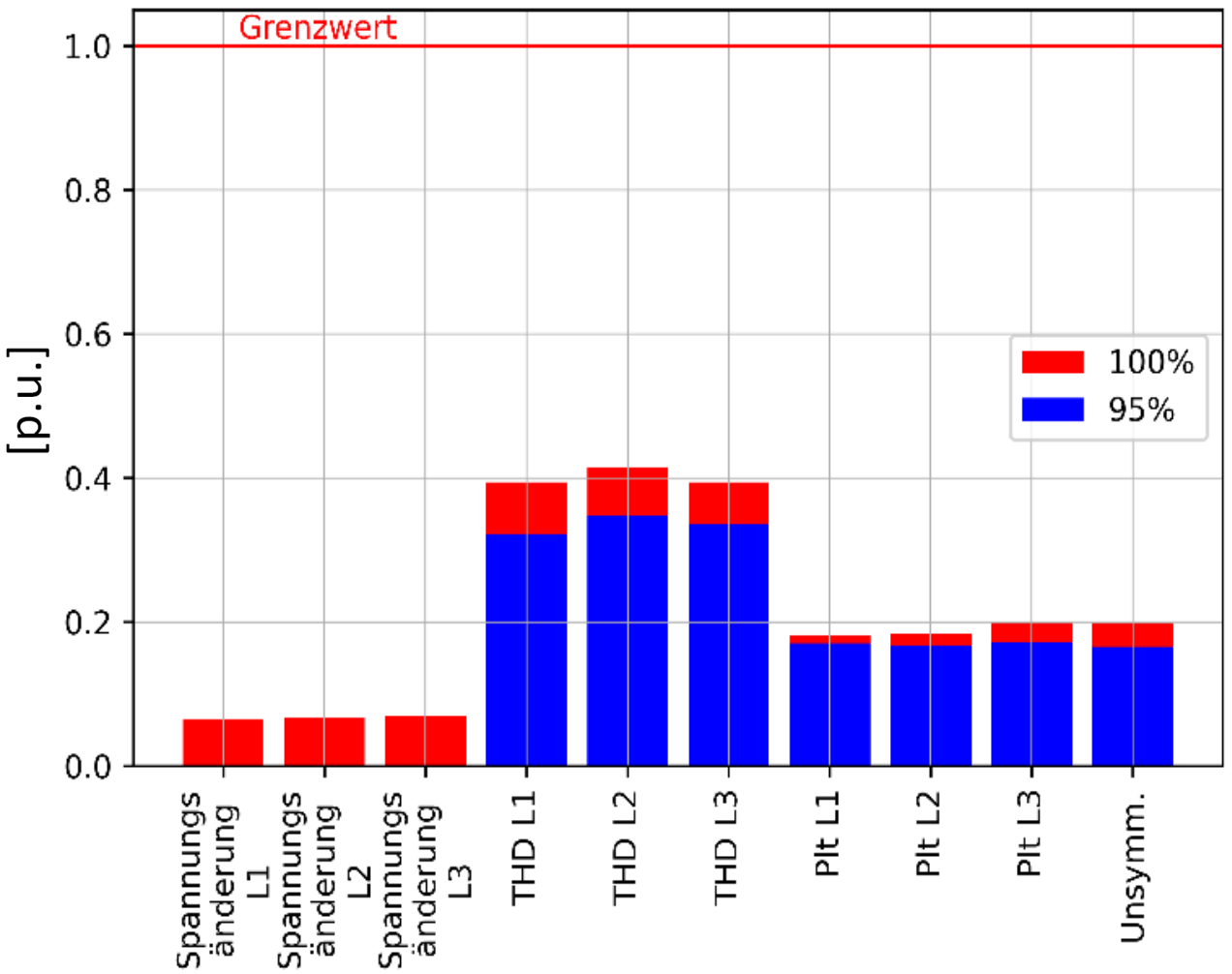


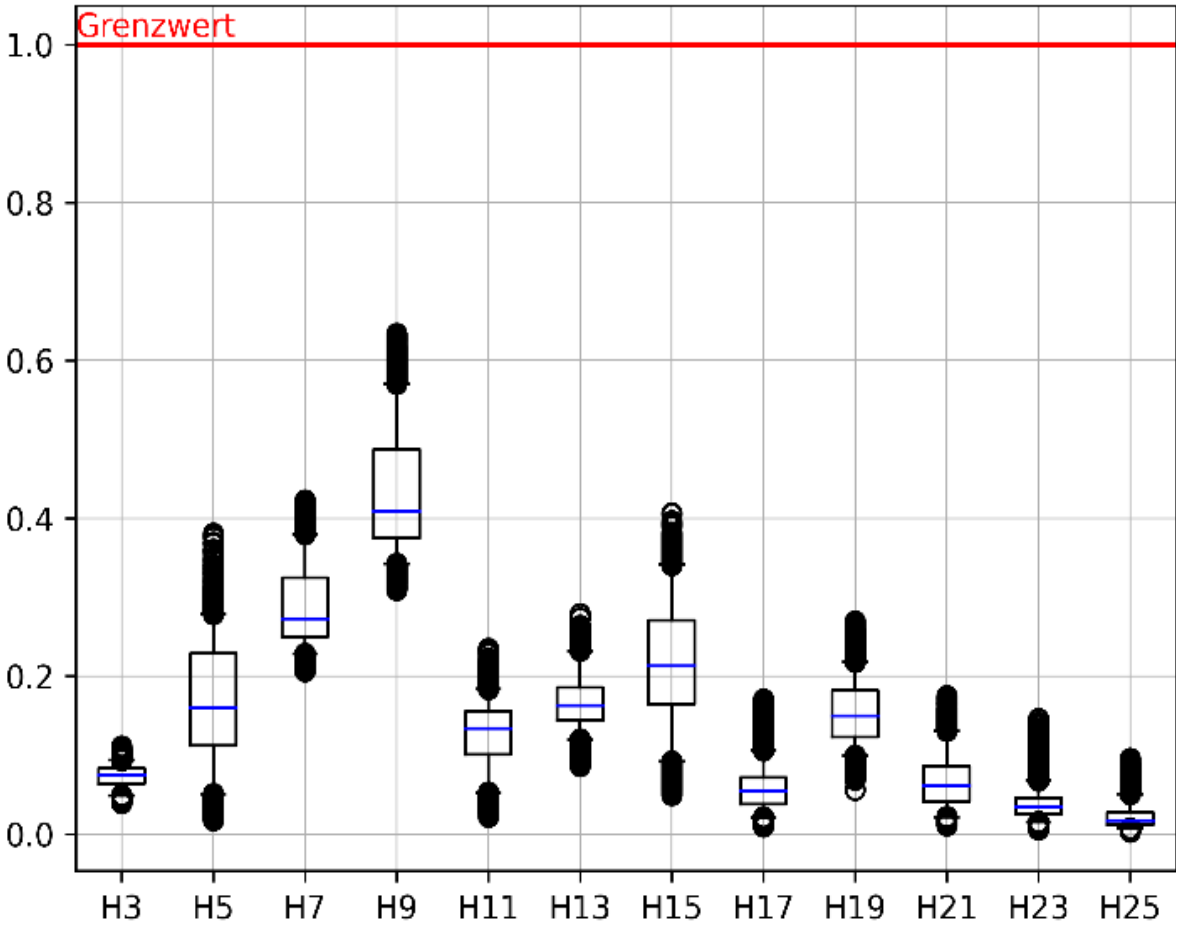


Stromverzerrung in einem MS-Netz

NS-Netz: Spannungsqualität

- TS05

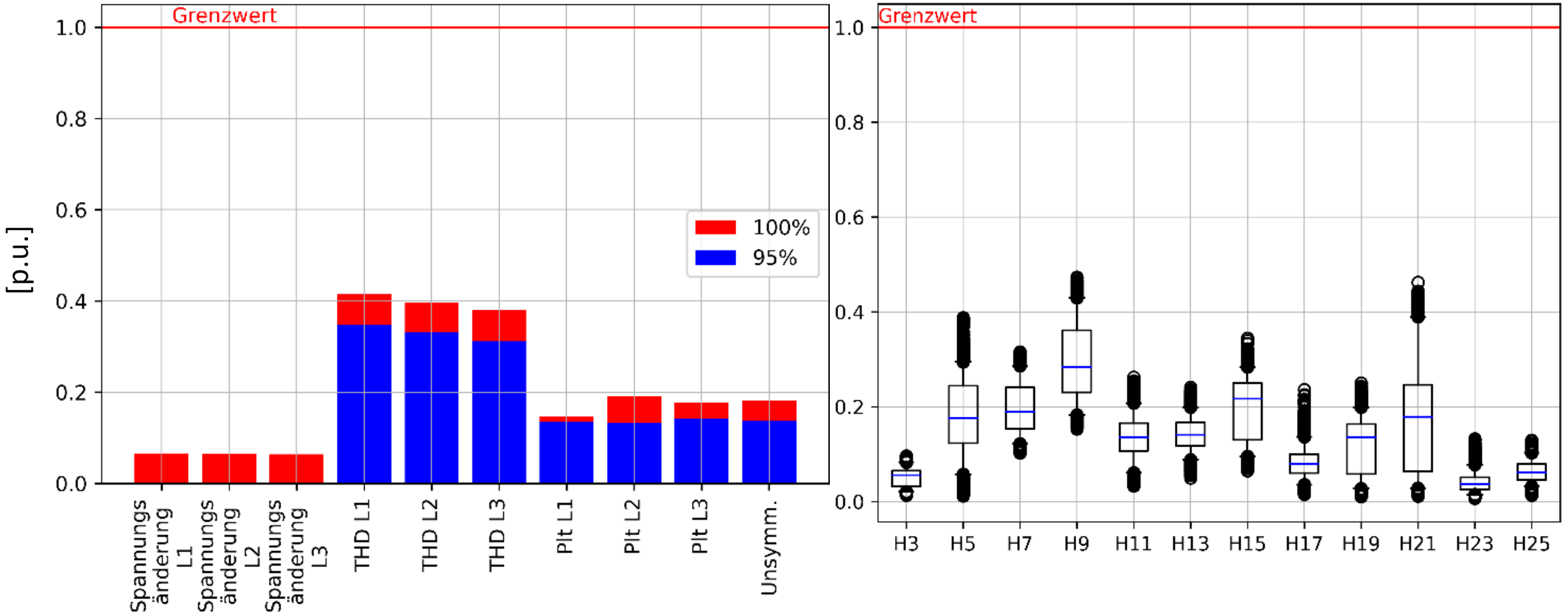




Stromverzerrung in einem MS-Netz

NS-Netz: Spannungsqualität

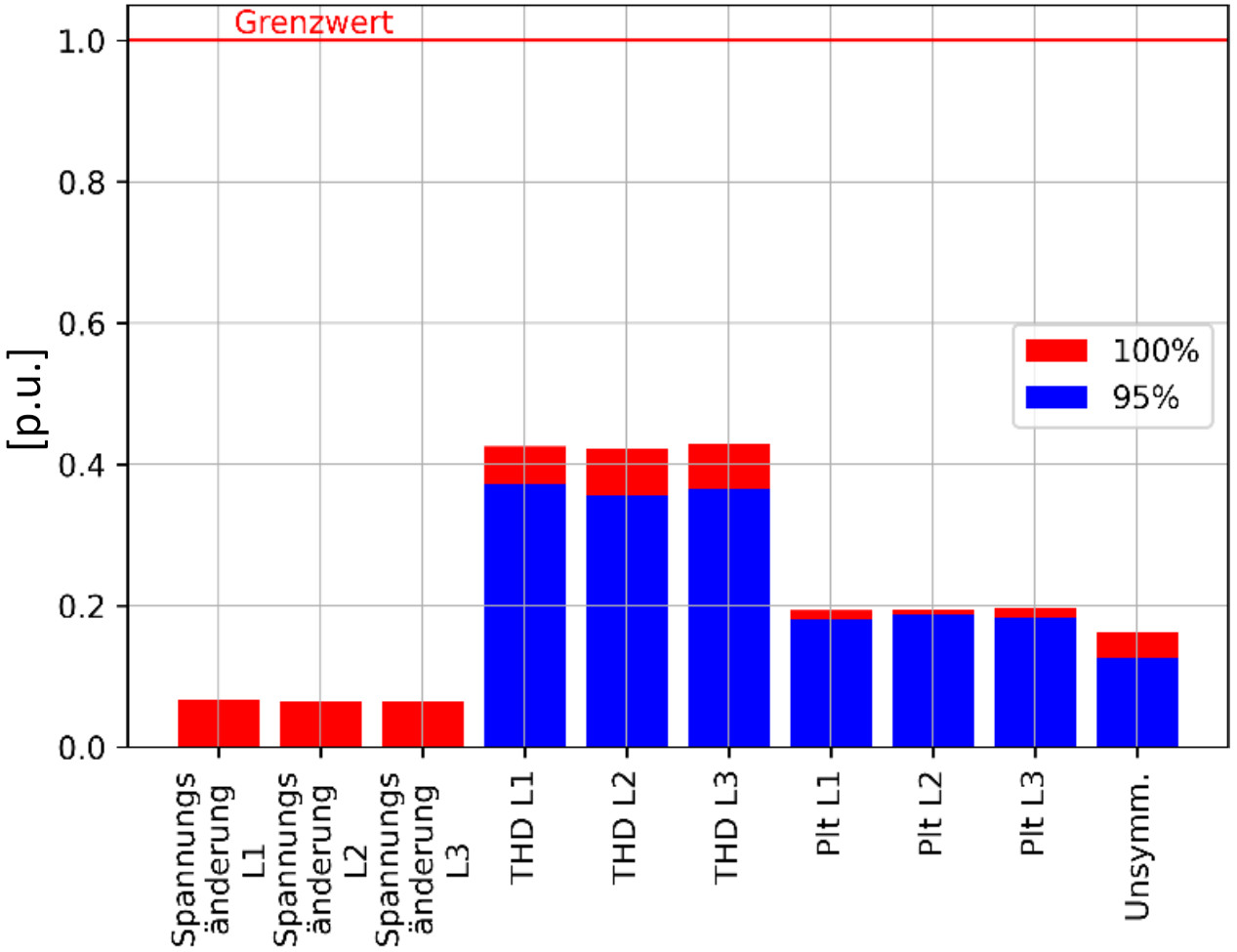
- TS15

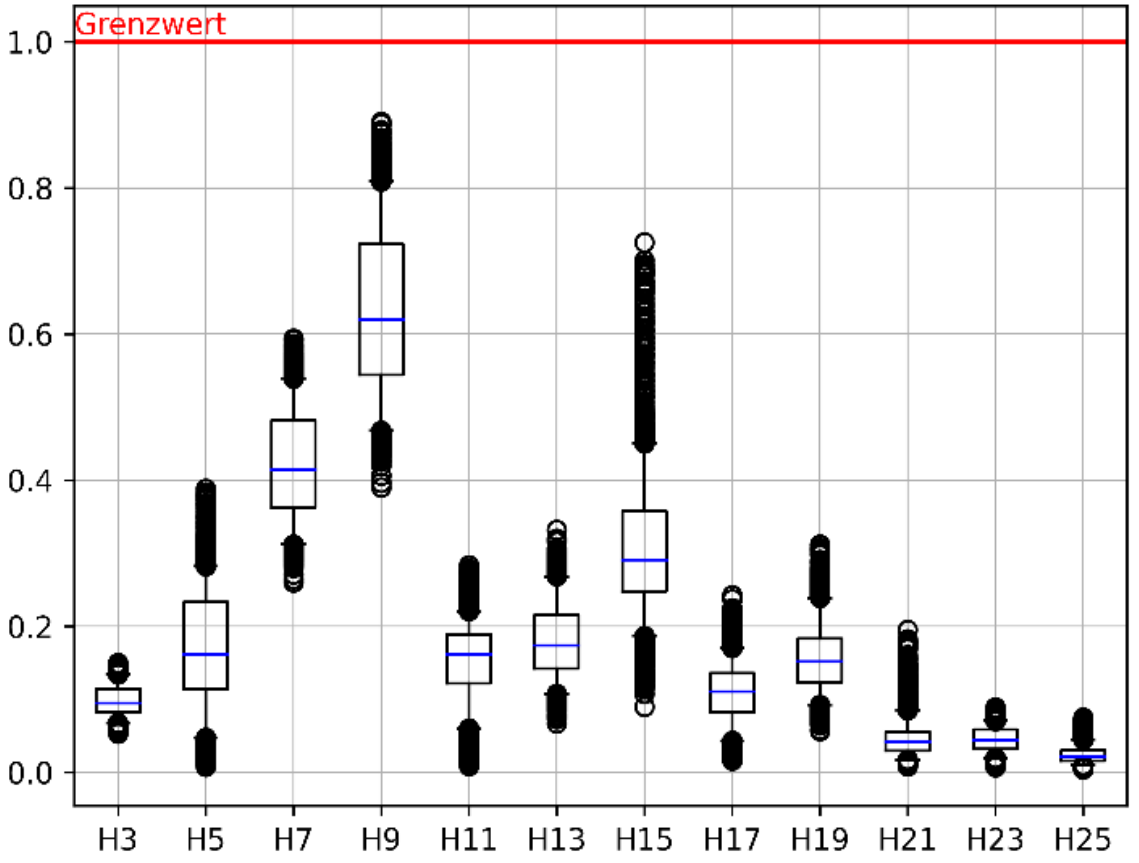


Stromverzerrung in einem MS-Netz

NS-Netz: Spannungsqualität

- TS10-1

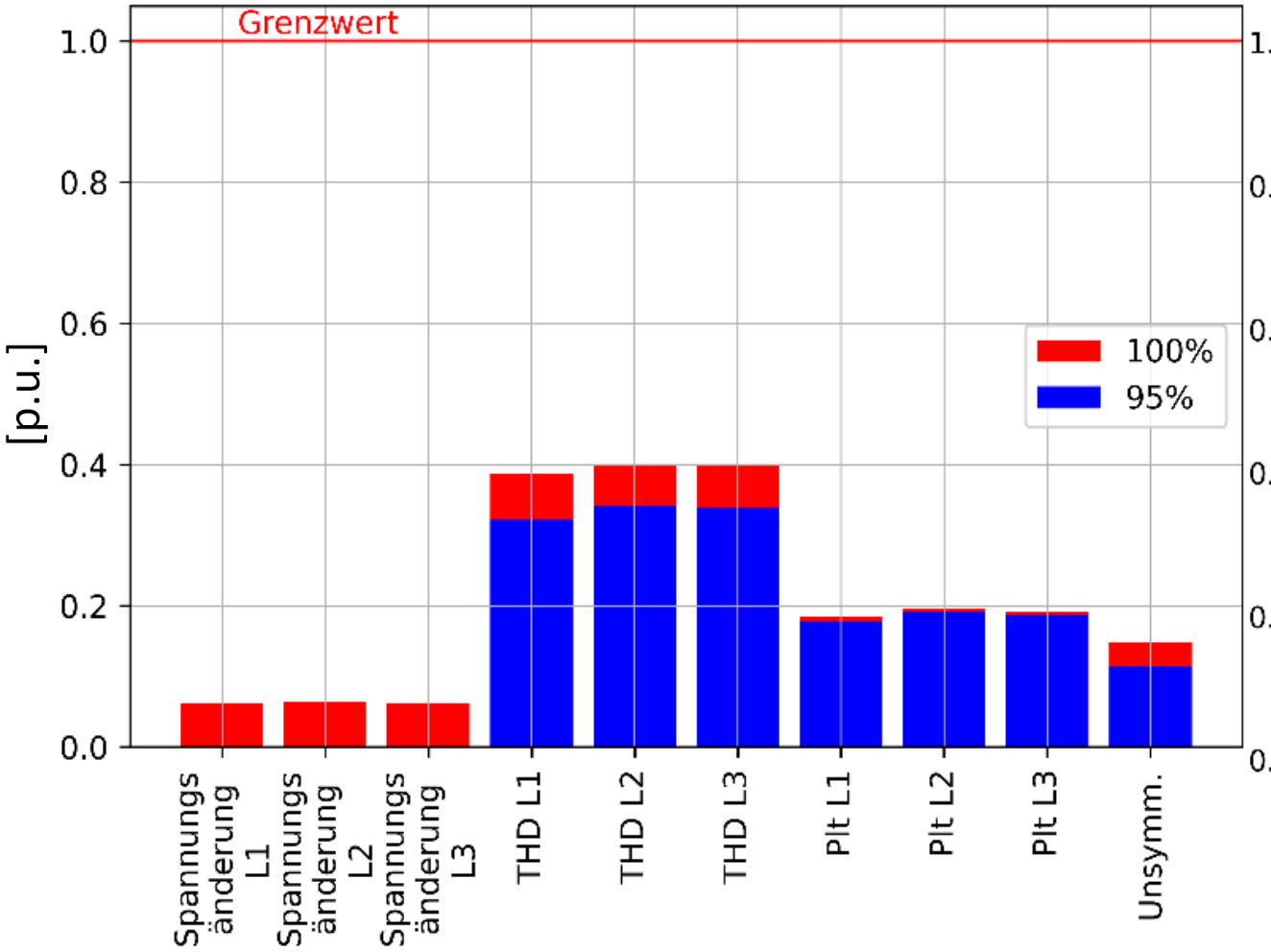


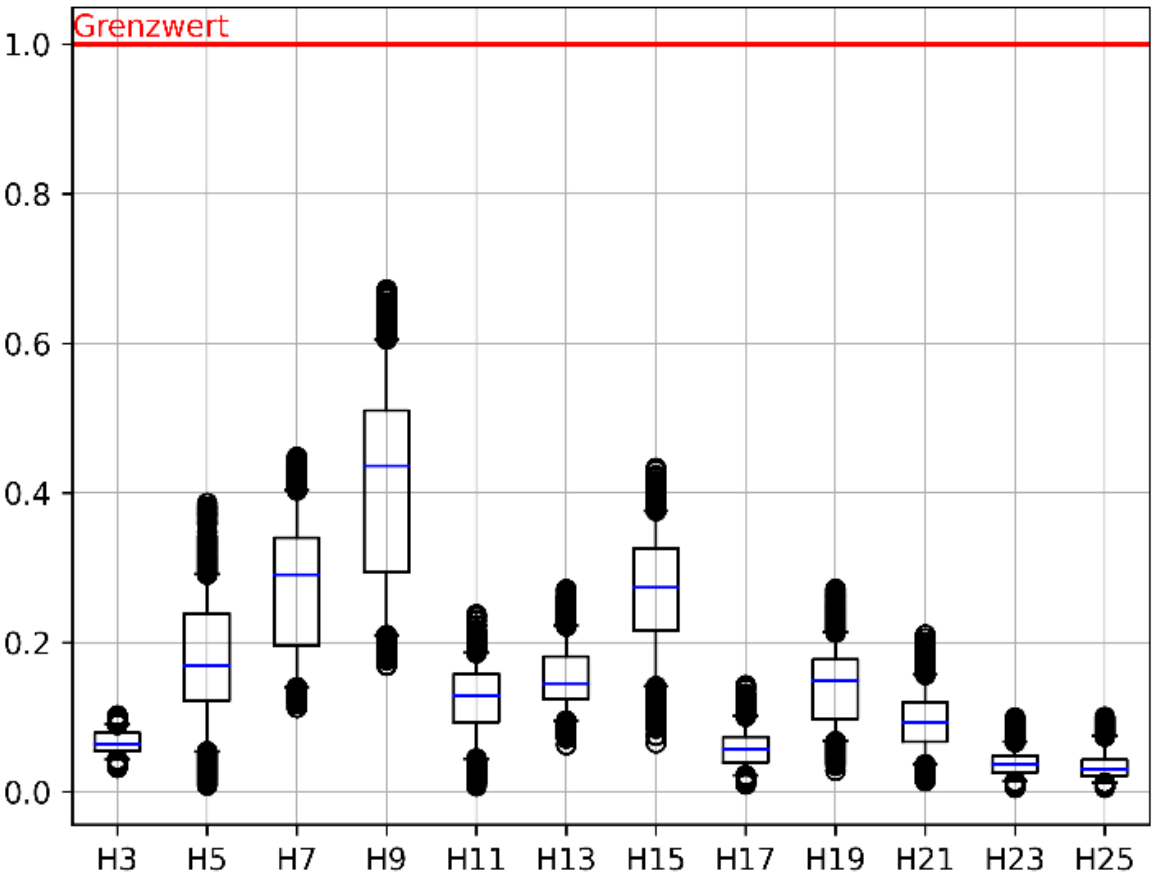


Stromverzerrung in einem MS-Netz

NS-Netz: Spannungsqualität

- TS10-2

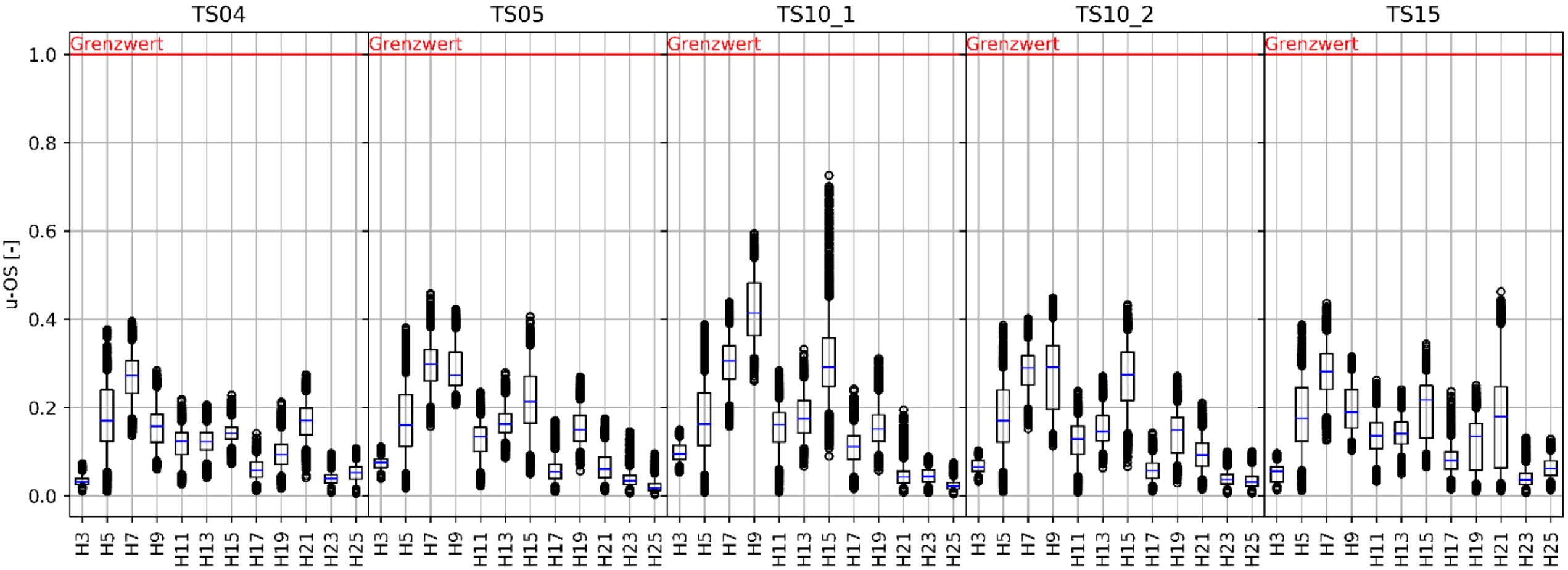




Stromverzerrung in einem MS-Netz

NS-Netz: Spannungsqualität

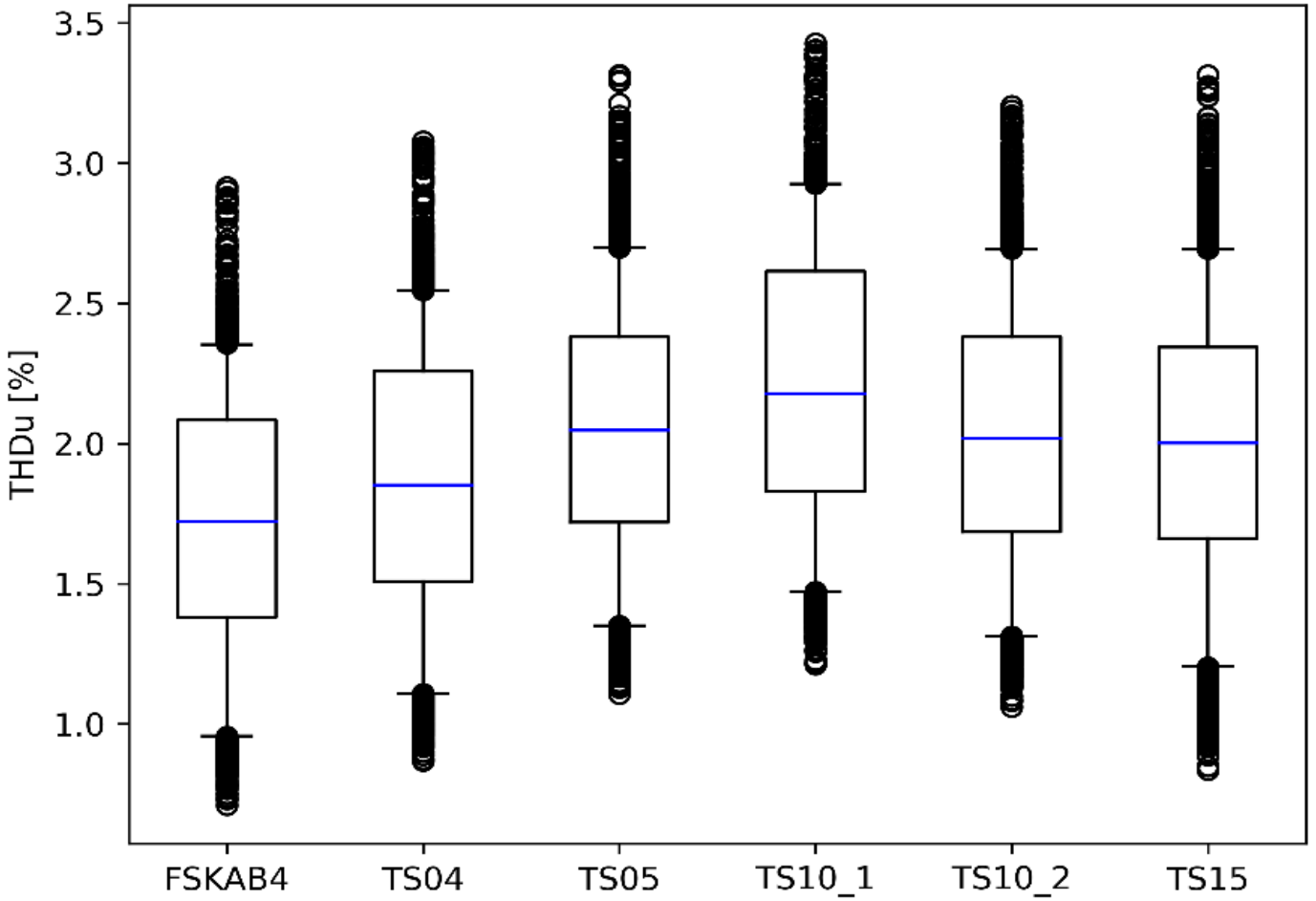
- Vergleich Spannungsoberschwingungen



Stromverzerrung in einem MS-Netz

NS-Netz: Spannungsqualität

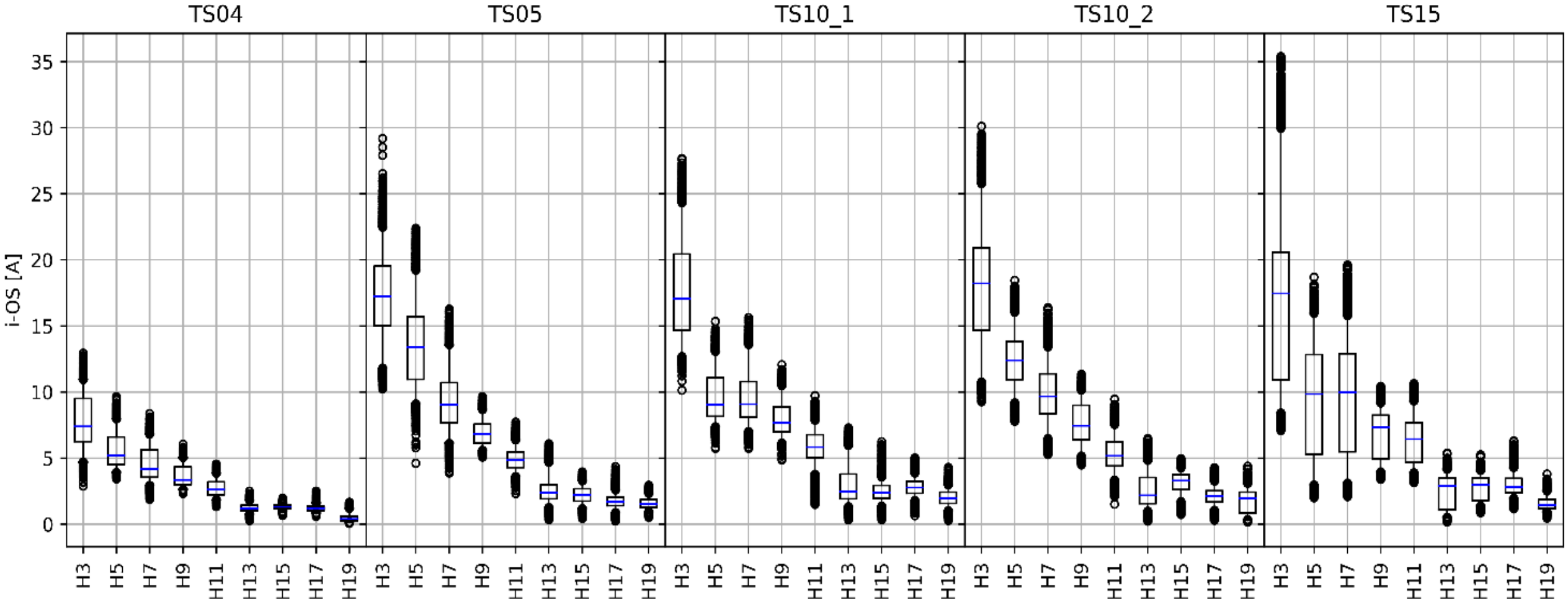
- Vergleich THDu



Stromverzerrung in einem MS-Netz

NS-Netz: Stromoberschwingungen

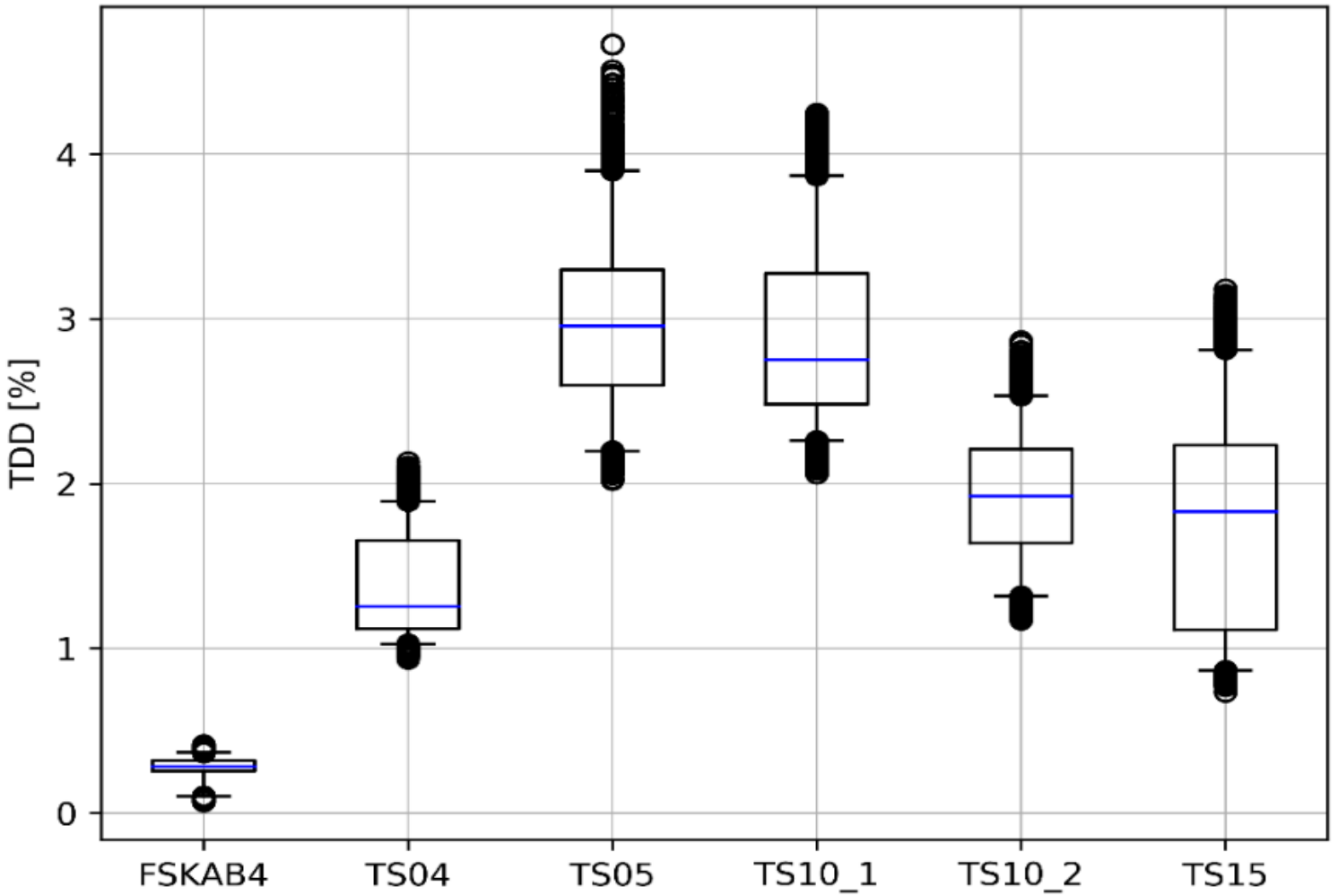
- Vergleich i-OS



Stromverzerrung in einem MS-Netz

NS-Netz: Stromoberschwingungen

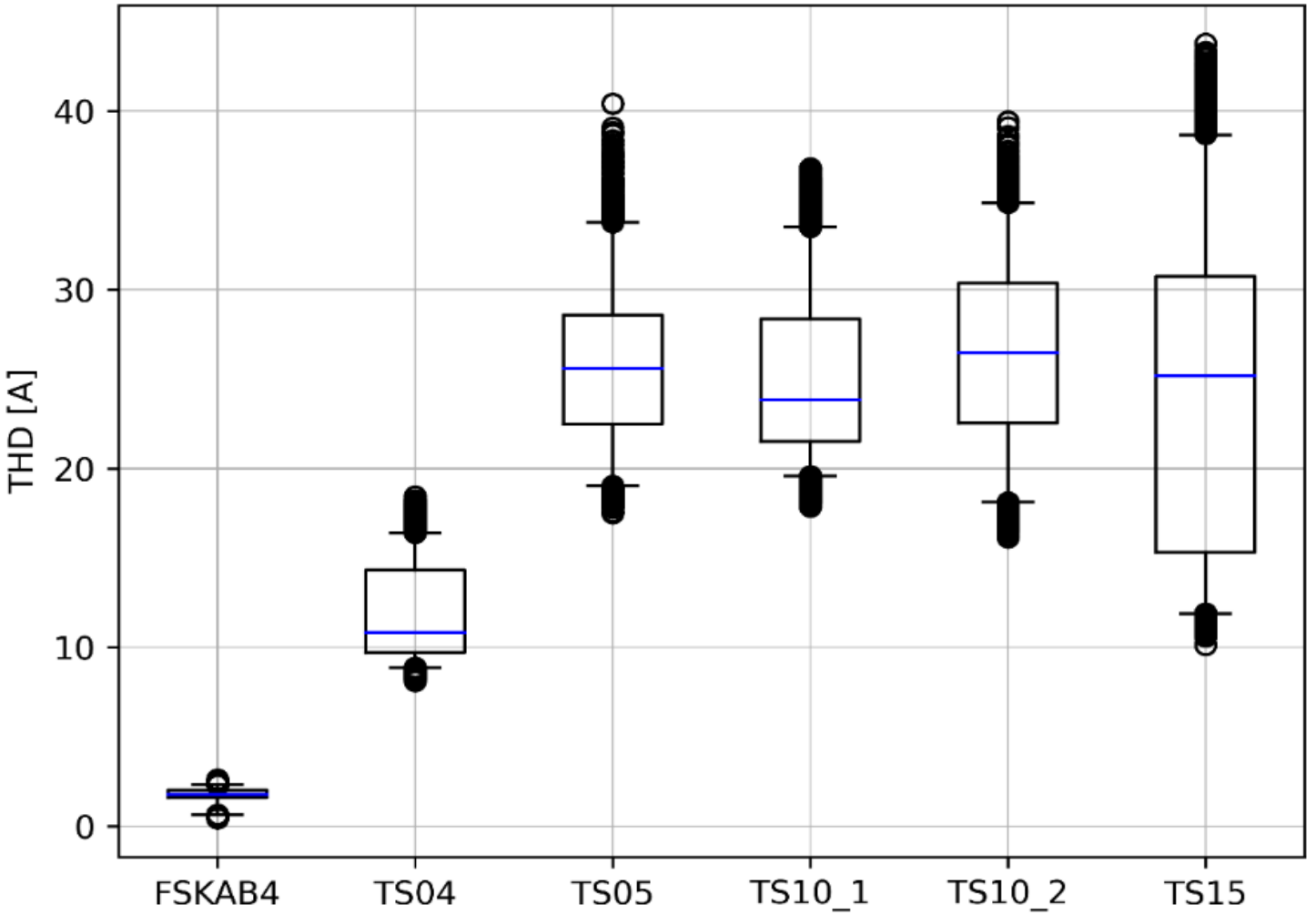
- Vergleich TDD



Stromverzerrung in einem MS-Netz

NS-Netz: Stromoberschwingungen

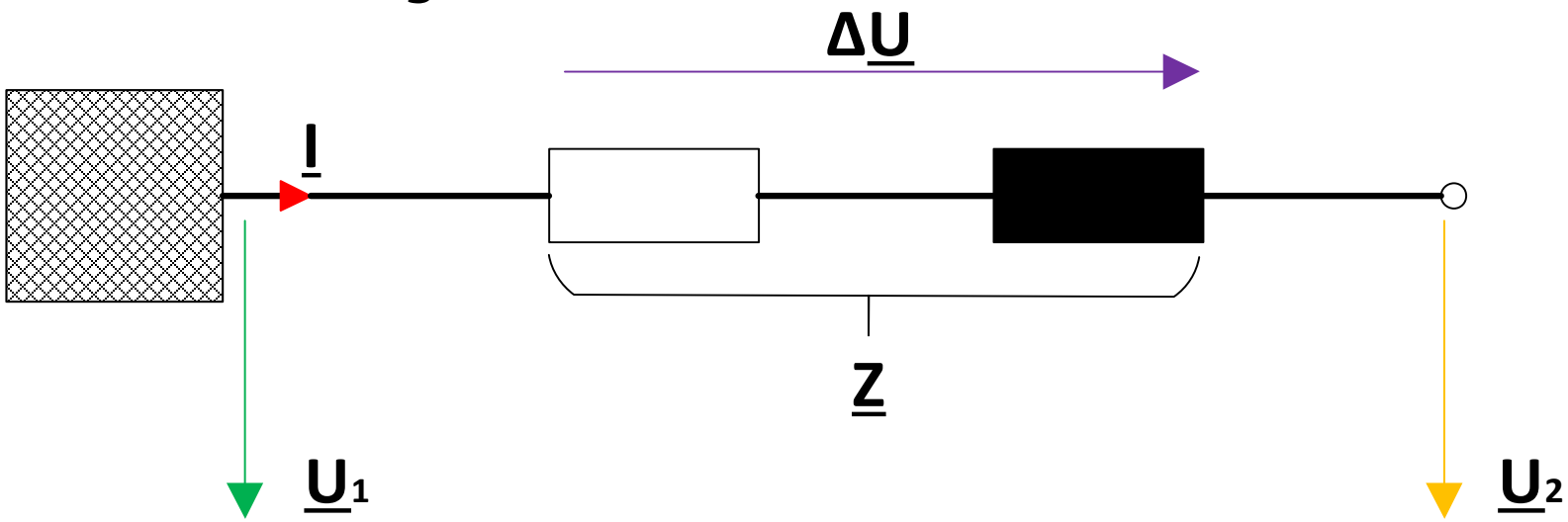
- Vergleich THC



Stromverzerrung in einem MS-Netz

NS-Netz: Auswirkungen

- PQ-Reserve im NS-Strang



$$\underline{U}_2 = \underline{U}_1 - \Delta\underline{U} = \underline{U}_1 - \underline{I} \cdot \underline{Z}$$

Stromverzerrung in einem MS-Netz

NS-Netz: Auswirkungen

- PQ-Reserve TS10-1 [%]

	TS	Ab 4	Ab 6	Ab 7	Ab 8	Ab 10	Ab 11	Ab 12	Ab 13
H3	86	86	85	86	85	85	85	86	86
H5	65	65	65	65	65	65	65	65	65
H7	57	57	56	57	57	56	56	57	57
H9	43	42	37	43	42	40	38	42	43
H11	78	78	77	78	77	77	77	78	78
H13	72	71	69	72	72	70	69	72	72
H15	54	51	51	54	53	51	47	53	54
H17	85	84	83	85	84	83	83	84	85
H19	76	75	74	76	75	73	73	75	76
H21	91	90	89	91	91	90	89	90	91
H23	93	93	92	93	93	92	91	93	93
H25	95	95	95	95	95	94	94	95	95

Stromverzerrung in einem MS-Netz

NS-Netz: Auswirkungen

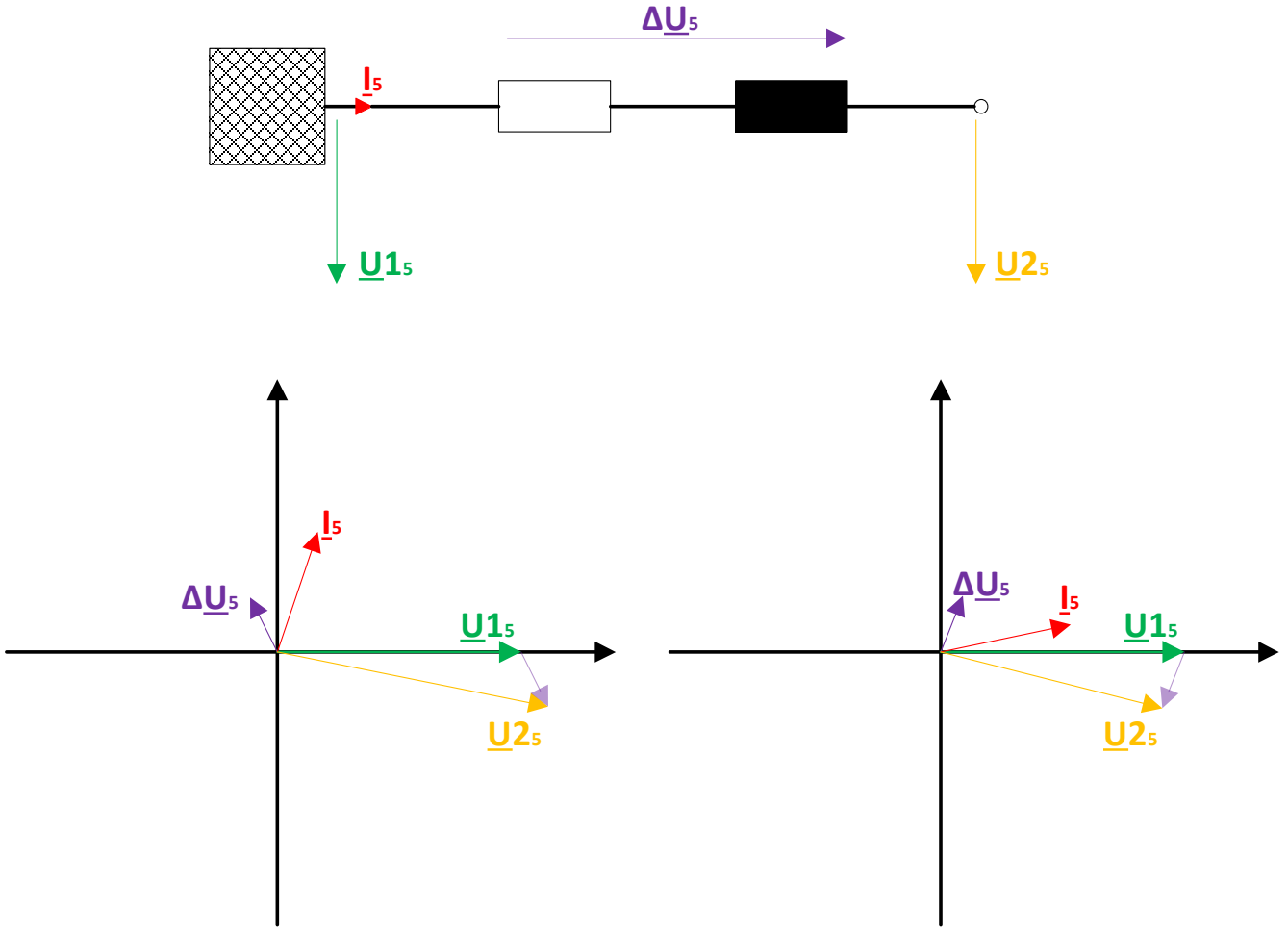
- PQ-Reserve TS05 [%]

	TS	Ab 3	Ab 4	Ab 5	Ab 8	Ab 9	Ab 10	Ab 11	Ab 12	Ab 13	Ab 14	Ab 15
H3	90	85	86	86	83	86	86	86	86	86	84	85
H5	65	66	65	65	65	65	65	65	65	65	66	65
H7	59	57	57	58	54	58	57	57	57	57	56	57
H9	59	43	44	44	35	44	41	41	43	43	37	40
H11	82	79	79	79	76	79	78	78	78	79	78	78
H13	77	72	72	72	67	72	72	71	72	72	70	72
H15	64	53	54	54	43	54	52	52	53	53	51	52
H17	90	85	85	85	82	85	84	84	85	85	83	84
H19	78	75	76	76	69	76	75	75	76	76	73	75
H21	85	91	91	91	83	91	90	90	91	91	90	90
H23	94	93	93	93	90	93	93	93	93	93	90	93
H25	93	95	95	95	92	95	95	95	95	95	93	95

Stromverzerrung in einem MS-Netz

NS-Netz: Auswirkungen

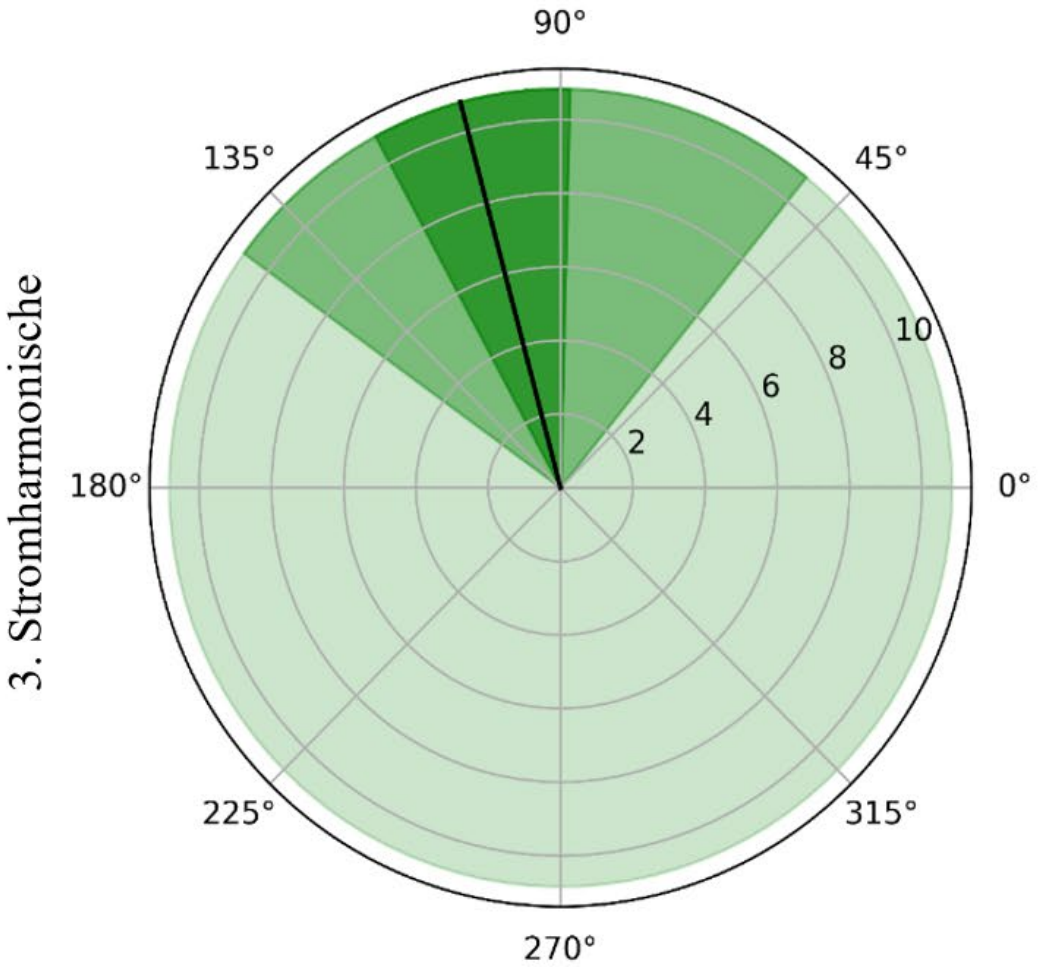
- Spannungsabfall durch Netzimpedanz

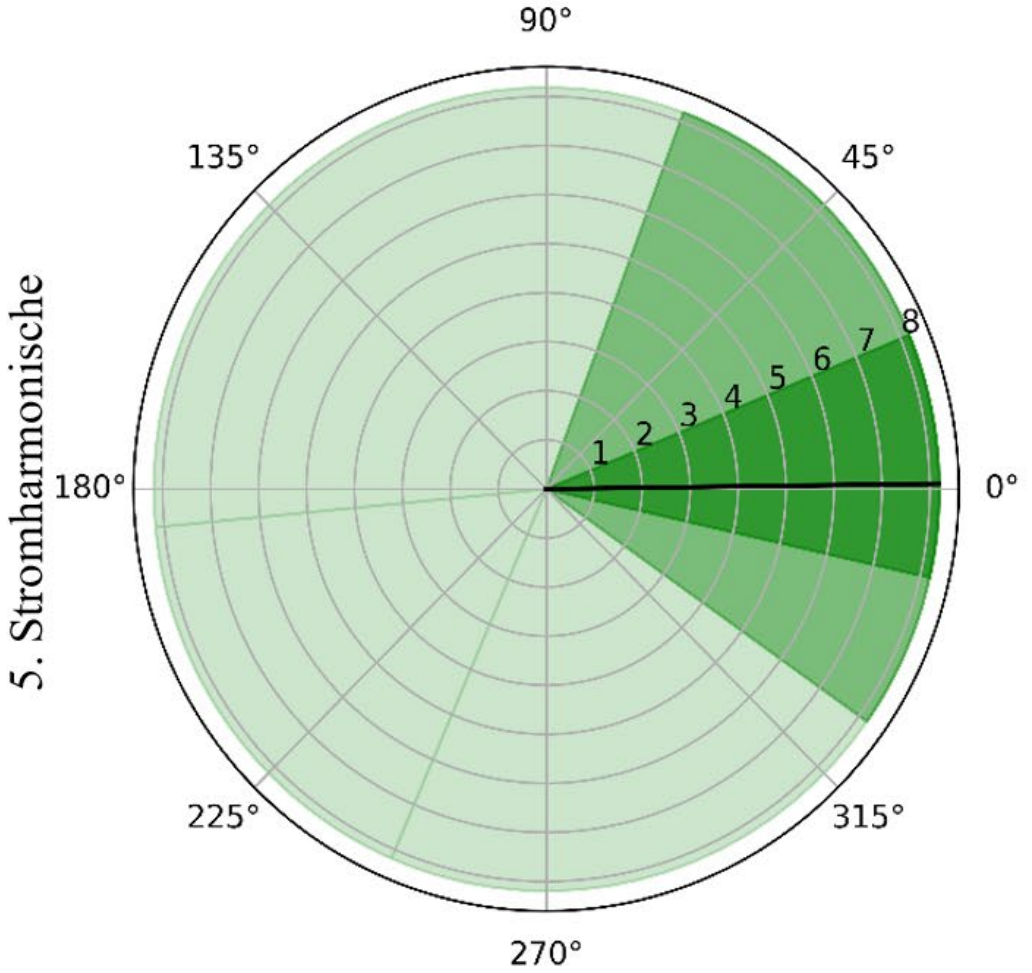


Stromverzerrung in einem MS-Netz

NS-Netz: Auswirkungen

- Winkel der Stromoberschwingungen

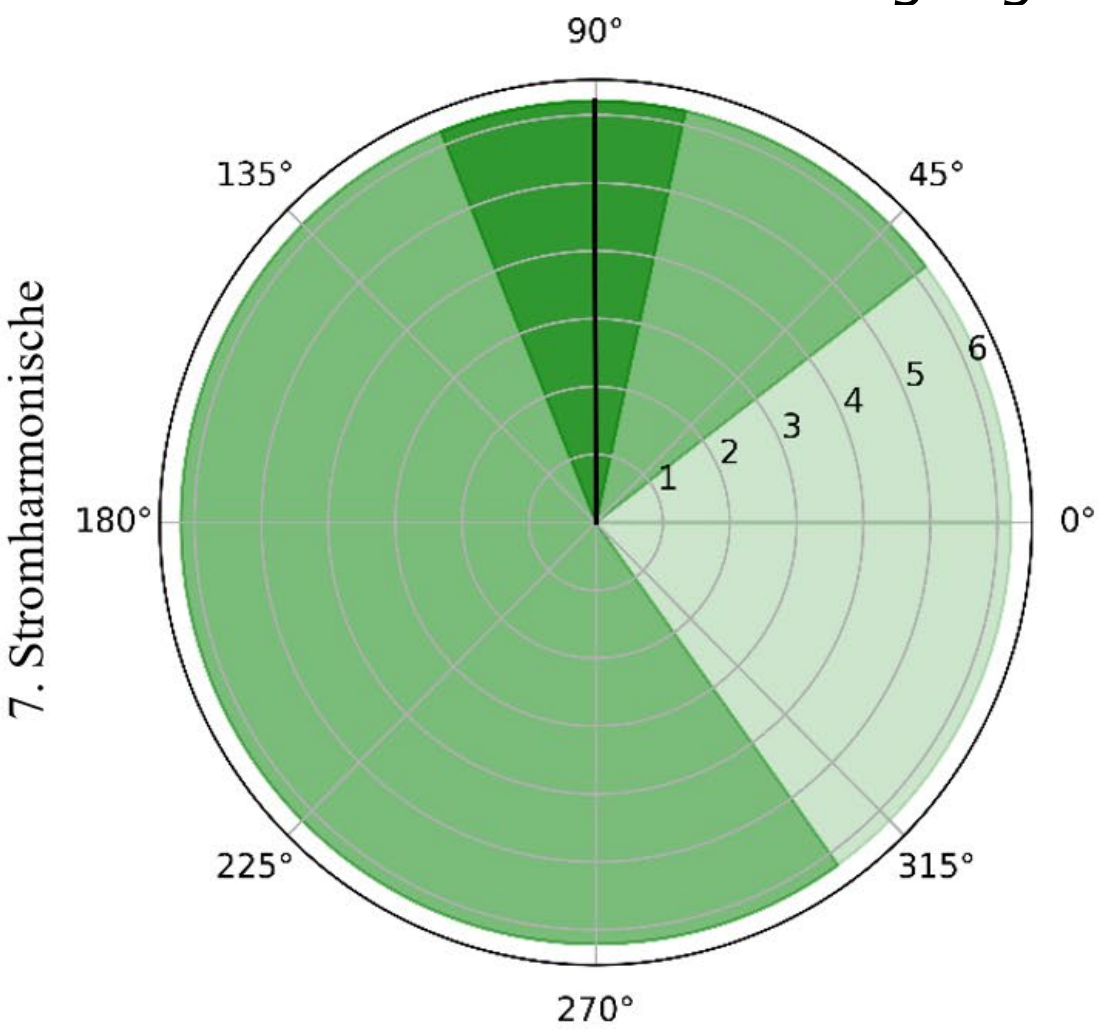


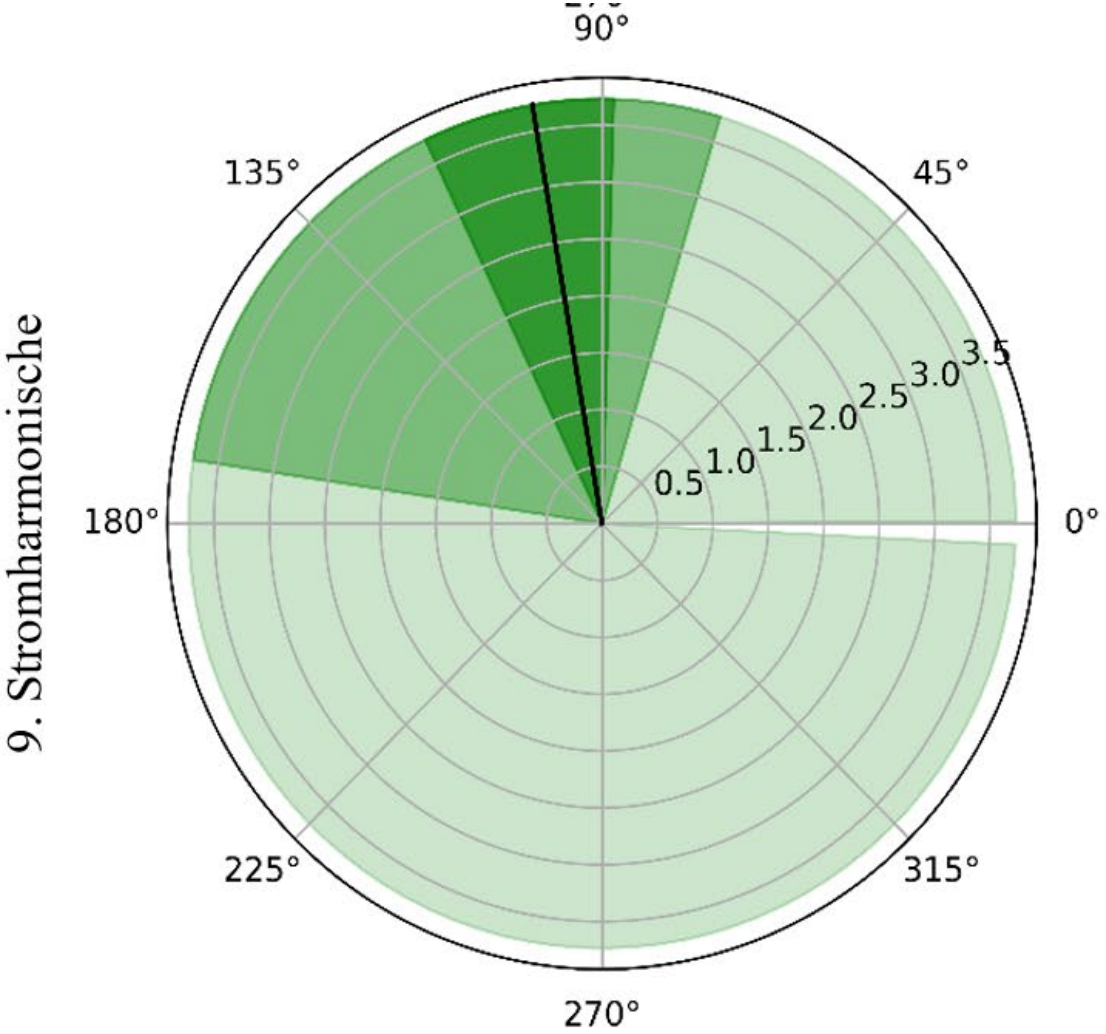


Stromverzerrung in einem MS-Netz

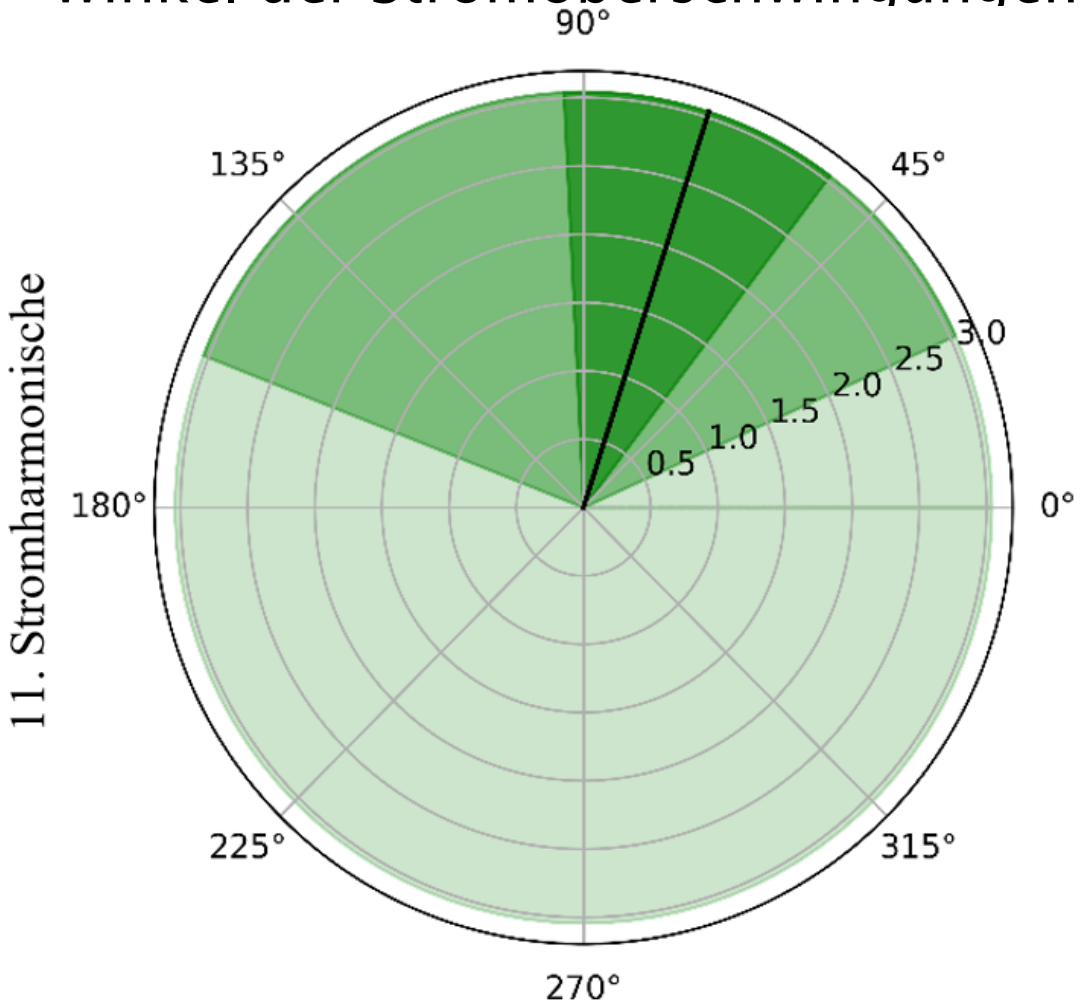
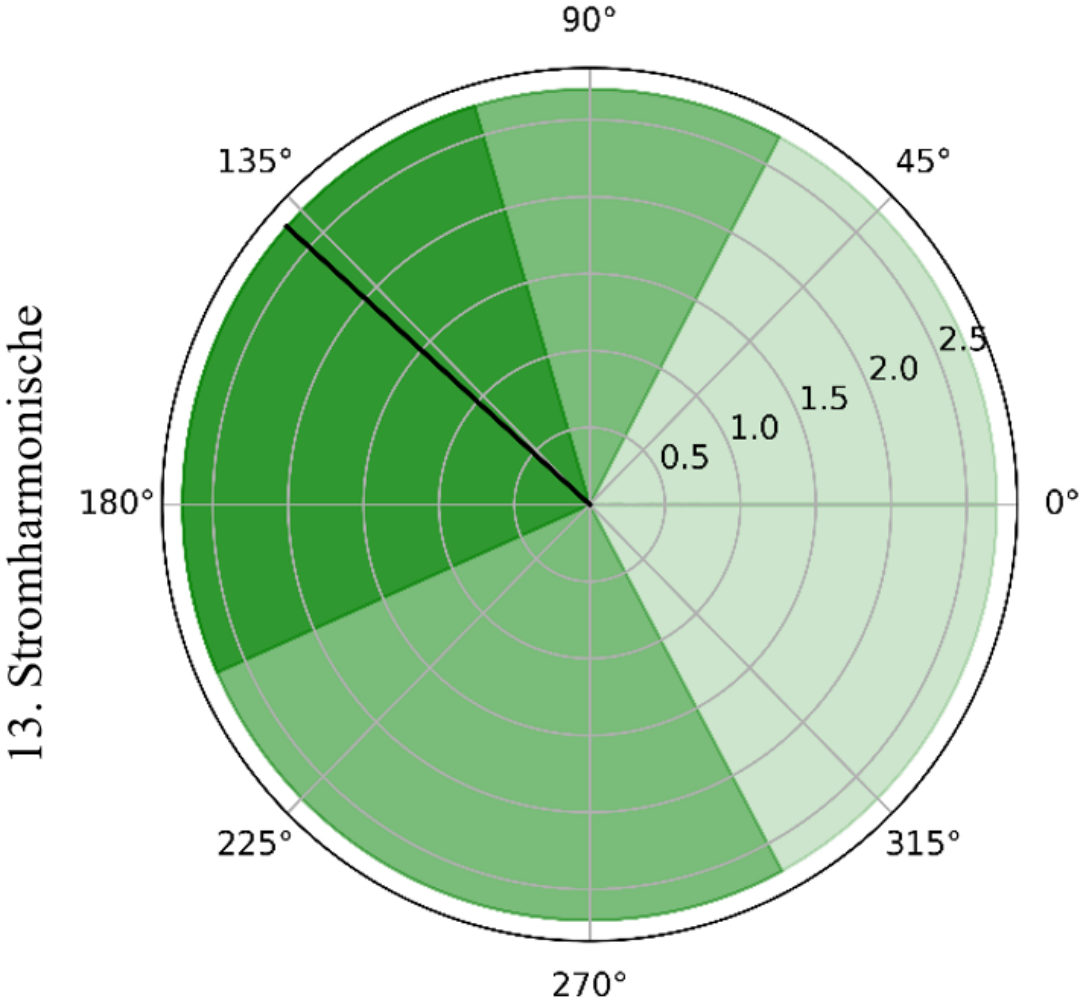
NS-Netz: Auswirkungen

- Winkel der Stromoberschwingungen





Stromverzerrung in einem MS-Netz

NS-Netz: Auswirkungen

- Winkel der Stromoberschwingungen