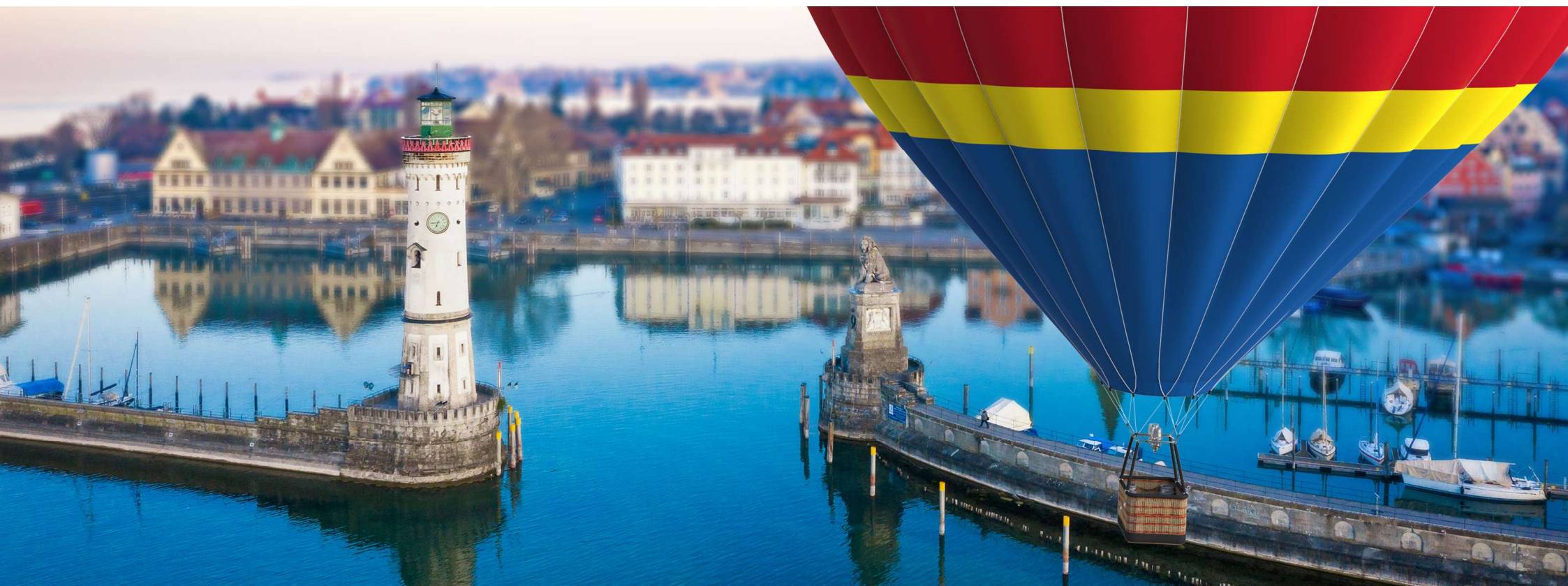




OMICRON FACHTAGUNG Diagnostik

Analyse großer Datenmengen der Elektroenergiequalität

Max Domagk, TU Dresden

14. – 16. Oktober 2025, Lindau

► Agenda

- ▶ Motivation
- ▶ Analyse der Elektroenergiequalität
- ▶ Praxisbeispiele aus dem Übertragungsnetz
 1. Beispiel: Einhaltung von Grenzwerten
 2. Beispiel: Saisonale Variationen
 3. Beispiel: Trenderkennung
- ▶ Zusammenfassung

► Motivation

Ausgangssituation

- ▶ Integration erneuerbarer Energien und neuer Technologien (z.B. HGÜ)
- ▶ Potentielle Auswirkungen auf Elektroenergiequalität (z.B. Oberschwingungen)
- ▶ Stetig wachsende Datenmengen aus Messkampagnen
- ▶ Viele Informationen in den Messdaten ungenutzt („dark data“)

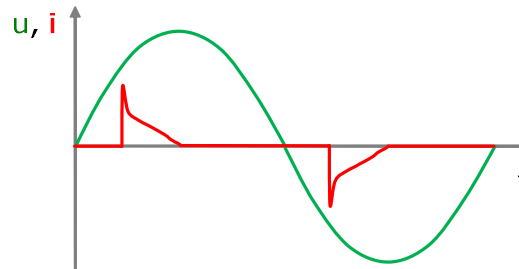
Ziele

- ▶ Entwicklung von Analysemethoden:
Messdaten in verwertbare Informationen umwandeln
- ▶ Nutzung der Erkenntnisse:
Optimierung des Netzbetriebs und Verbesserung der Elektroenergiequalität

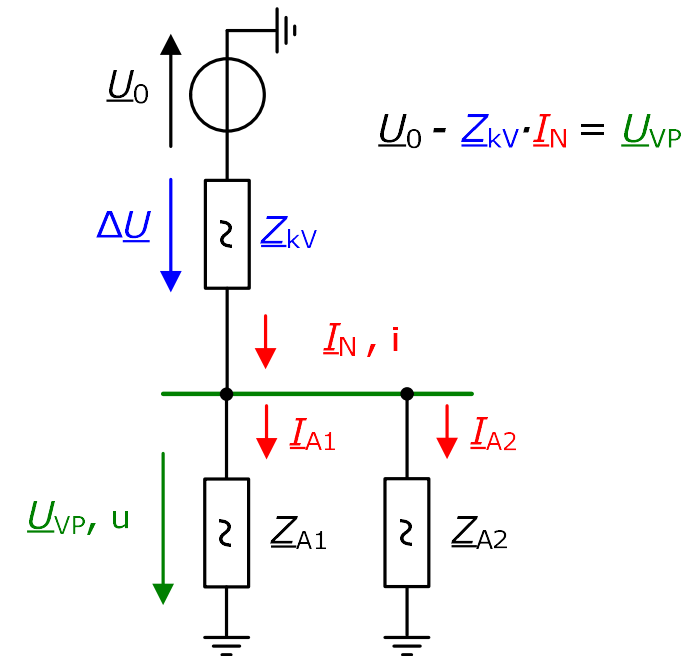
► Analyse der Elektroenergiequalität

Elektroenergiequalität

- ▶ **Spannungsqualität**
als Qualität der Versorgung
(Verteil- und Übertragungsnetzbetreiber)
- ▶ **Stromqualität**
als Qualität des Verbrauchs/Erzeugung
(Geräte- / Anlagenhersteller)
- ▶ Charakterisierung durch Merkmale
der zeitlichen Verläufe
(z.B. Form, Amplitude oder Frequenz)
- ▶ Quantifizierung durch Qualitätskenngrößen
(z.B. Verzerrung, Flicker oder Unsymmetrie)



Prinzip der Netzurückwirkungen



► Analyse der Elektroenergiequalität

Datenumfang

- Messung der Qualitätskenngrößen (Strom & Spannung) an einem Messort:

Messwerte	alle 10 min	pro Tag	pro Woche	pro Jahr
bis 2,5 kHz	324	46.656	326.592	ca. 17 Mill.
bis 150 kHz	4.767	686.016	ca. 5 Mill.	ca. 250 Mill.

- Resultierende Datenmengen häufig nicht mehr manuell auswertbar
- Zunehmende Anzahl großer Messkampagnen:
 - Übertragungs- und Verteilnetze (200+ stationäre Messungen, jährlich 700+ mobile Messungen)
 - Anwendungen in Industrienetzen (2.000+ Messungen in produktionskritischer Infrastruktur)
 - Smart Meter mit PQ-Funktionalität (künftig Niederspannungsnetze und Haushalte)

► Analyse der Elektroenergiequalität

Analyseziele

- ▶ Einhaltung von Grenzwerten
- ▶ Anomalieerkennung
- ▶ Emissionsprofile
- ▶ Korrelation und Ausbreitung
- ▶ Saisonale Variationen
- ▶ Trenderkennung
- ▶ Trendprognosen
- ▶ ...

Analyseschritte

1. Analyseziel definieren
2. Datenerhebung
3. Datenvorverarbeitung
4. Analysemethoden
5. Visualisierung und Informationsgewinnung

► Praxisbeispiele aus dem Übertragungsnetz

Messkampagne

- Übertragungsnetz in Estland (2021 bis 2024)
- 15 Messorte in Hoch- und Höchstspannung
- 27 Kenngrößen der **Spannungsqualität**
 - Verzerrung (Uthd) und Harmonische (U02 – U25)
 - Unsymmetrie (UNB)
 - Flicker (Upst)

Datenvorverarbeitung

- Berechnung wöch. 95-%-Quantile auf Basis der 10-min-Mittelwerte
- Vergleich mit Grenzwerten (Planungspegel)
- Datenumfang:
 - 145.541 wöchentl. 95-%-Quantile
 - 1.086 verschiedene Zeitreihen

	Spannungs- ebene	Nenn- spannung in kV	Daten- verfügbarkeit in %
M01	HöS	330	96.2
M02	HöS	330	98.9
M03	HS	110	99.8
M04	HS	110	99.9
M05	HS	110	99.9
M06	HS	110	99.9
M07	HS	110	100
M08	HS	110	99.9
M09	HS	110	99.8
M10	HS	110	99.7
M11	HS	110	99.8
M12	HS	110	39.2
M13	HS	110	39.2
M14	HS	110	98.2
M15	HS	110	98.3

► Einhaltung von Grenzwerten

Wie verhält sich die Spannungsqualität im Verhältnis zu den Grenzwerten?

Methodik

- Qualitätsreserve (QR) als normierter Leistungsindex
- Vergleich von Messwerten mit festgelegten Grenzwerten
- Ermöglicht flexible Auswertung über verschiedene Kenngrößen, Messorte und Zeiträume

$$QR = \left(1 - \frac{\text{Messwert}}{\text{Grenzwert}}\right) \cdot 100 \%$$

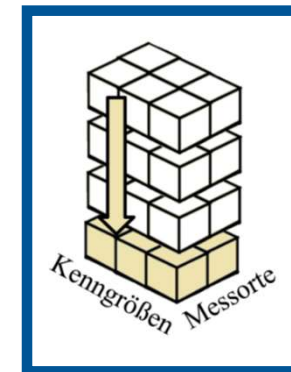
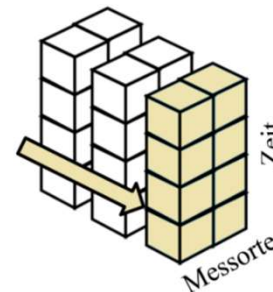
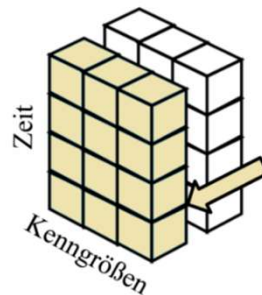
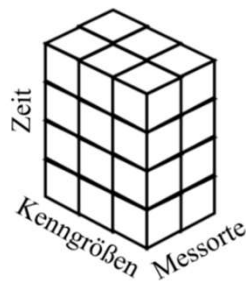
$$50\% < QR \leq 100\%$$

$$25\% < QR \leq 50\%$$

$$0\% < QR \leq 25\%$$

$$QR \leq 0\%$$

Flexible Aggregation der Qualitätsreserve



► Einhaltung von Grenzwerten

Auswertung

- Aggregation über alle Wochen
- Minimale Reserve je Kenngröße und Messort

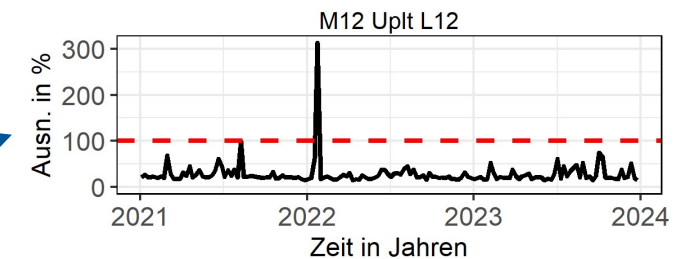
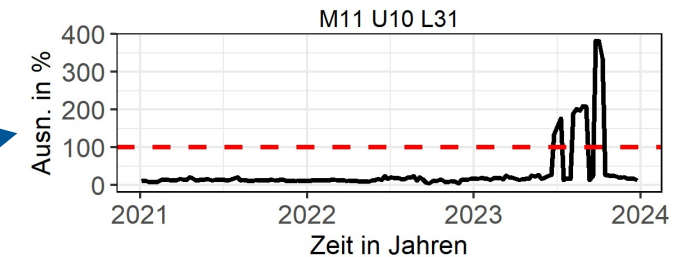
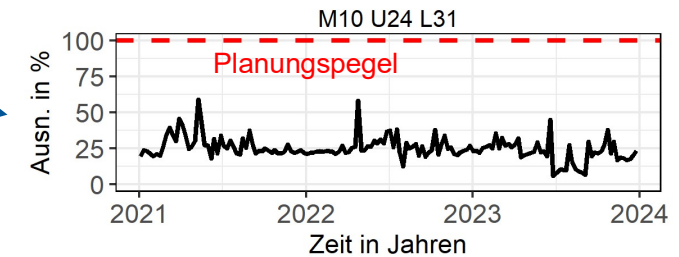
Kenngröße	Messort														
	M01	M02	M03	M04	M05	M06	M07	M08	M09	M10	M11	M12	M13	M14	M15
U25	77	81	82	95	95	76	81	81	85	-6	94	88	87	97	97
U24	93	98	96	99	99	88	91	91	92	41	98			99	99
U23	81	82	88	96	96	72	75	73	82	-27	87	82	82	98	98
U22	94	96	97	99	99	88	84	90	93	44	95			99	99
U21	53	94	88	98	98	74	75	80	87	-54	83			97	97
U20	86	94	97	98	98	86	85	94	92	11	84			98	98
U19	84	97	93	97	97	61	49	86	89	-205	60	58	59	96	96
U18	81	97	97	98	98	89	87	96	95	36	71			98	98
U17	81	97	95	97	97	73	75	94	93	-48	29	67	66	97	97
U16	86	91	96	98	98	93	90	97	94	55	29			98	98
U15	-5	96	81	88	88	84	78	92	88	31	7			92	92
U14	83	90	92	93	93	94	89	96	95	69	44			95	95
U13	63	91	75	77	77	89	86	92	77	42	33	83	85	84	85
U12	46	92	66	69	69	91	89	92	93	80	34			82	85
U11	42	71	81	82	82	88	90	90	81	69	57	78	78	95	94
U10	0	43	-26	0	0	62	70	52	83	74	-282			17	2
U09	-11	92	87	89	89	96	94	93	91	95	89			86	87
U08	-29	-7	8	13	13	63	25	18	81	66	21			1	3
U07	10	71	69	69	70	82	70	67	-21	80	76	35	34	65	65
U06	5	17	38	37	38	40	24	16	-33	50	29			36	36
U05	47	39	60	66	66	62	51	51	34	70	67	21	20	68	68
U04	77	80	76	76	76	79	77	76	81	84	84			74	74
U03	54	62	71	79	79	78	76	77	72	82	76			79	79
U02	91	96	93	93	93	95	95	95	97	92	97			93	93
Uthd	68	84	51	58	58	61	51	49	-20	-46	50	4	3	54	54
UpIt		71	54	58	58	-90	43	40	47	60	59	-213	-209	81	81
UNB	49	42	10	57	54	-77	52	50	63	52	67	55	35	67	64

► Einhaltung von Grenzwerten

Auswertung

- Aggregation über alle Wochen
- Minimale Reserve je Kenngröße und Messort
- Einhaltung der Grenzwerte für 99,5% aller Wochen
- Identifikation auffälliger Messorte und Kenngrößen
 - Messort M10
 - Harmonische U10

U25	77	81	82	95	95	76	81	81	85	-6	94	88	87	97	97
U24	93	98	96	99	99	88	91	91	92	41	98			99	99
U23	81	82	88	96	96	72	75	73	82	-27	87	82	82	98	98
U22	94	96	97	99	99	88	84	90	93	44	95			99	99
U21	53	94	88	98	98	74	75	80	87	-54	83			97	97
U20	86	94	97	98	98	86	85	94	92	11	84			98	98
U19	84	97	93	97	97	61	49	86	89	-205	60	58	59	96	96
U18	81	97	97	98	98	89	87	96	95	36	71			98	98
U17	81	97	95	97	97	73	75	94	93	-48	29	67	66	97	97
U16	86	91	96	98	98	93	90	97	94	55	29			98	98
U15	-5	96	81	88	88	84	78	92	88	31	7			92	92
U14	83	90	92	93	93	94	89	96	95	69	44			95	95
U13	63	91	75	77	77	89	86	92	77	42	33	83	85	84	85
U12	46	92	66	69	69	91	89	92	93	80	34			82	85
U11	42	71	81	82	82	88	90	90	81	69	57	78	78	85	94
U10	0	43	-26	0	0	62	70	52	83	74	-282			17	2
U09	-11	92	87	89	89	96	94	93	91	95	89			86	87
U08	-29	-7	8	13	13	63	25	18	81	66	21			1	3
U07	10	71	69	69	70	82	70	67	-21	80	76	35	34	65	65
U06	5	17	38	37	38	40	24	16	-33	50	29			36	36
U05	47	39	60	66	66	62	51	51	34	70	67	21	20	68	68
U04	77	80	76	76	76	79	77	76	81	84	84			74	74
U03	54	62	71	79	79	78	76	77	72	82	76			79	79
U02	91	96	93	93	93	95	95	95	97	92	97			93	93
Uthd	68	84	51	58	58	61	51	49	-20	-46	50	4	3	51	54
Uplt		71	54	58	58	-90	43	40	47	60	59	-213	-209	81	81
UNB	49	42	10	57	54	-77	52	50	63	52	67	55	35	67	64
	M01	M02	M03	M04	M05	M06	M07	M08	M09	M10	M11	M12	M13	M14	M15

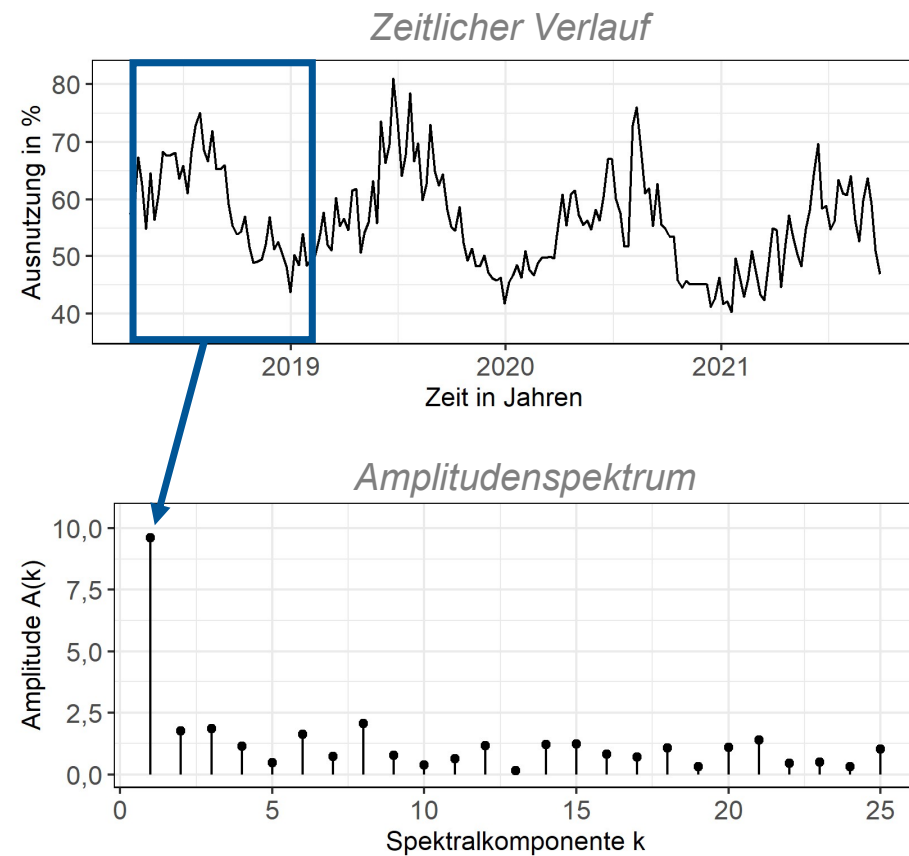


► Saisonale Variationen

Wie beeinflussen saisonale Emissionsmuster die Spannungsqualität im Netz?

Methodik

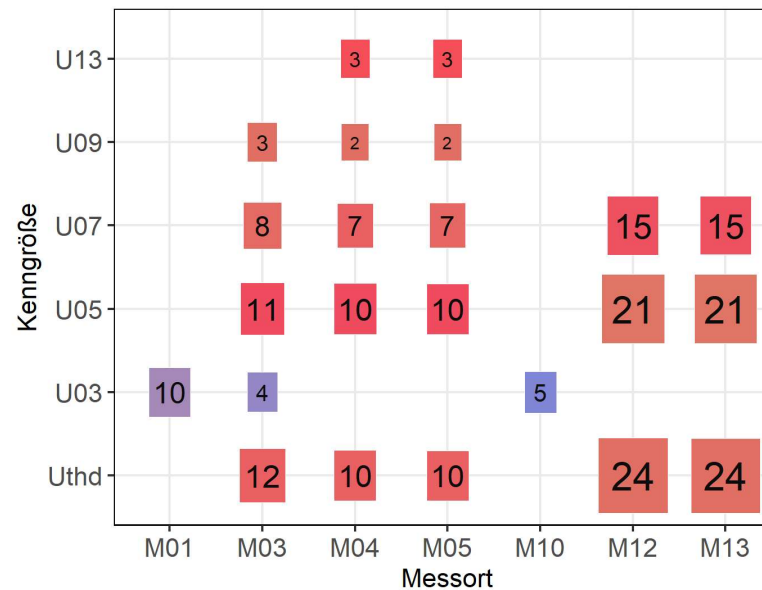
- Untersuchung saisonaler Variationen im Frequenzbereich
- Analyse der „Jahresschwingung“ (Spektralkomponente mit einer Periodendauer von 52 Wochen)
- Amplitude = Stärke der saisonalen Unterschiede
- Phasenwinkel = Kalenderwochen mit höchsten Emissionen



► Saisonale Variationen

Auswertung

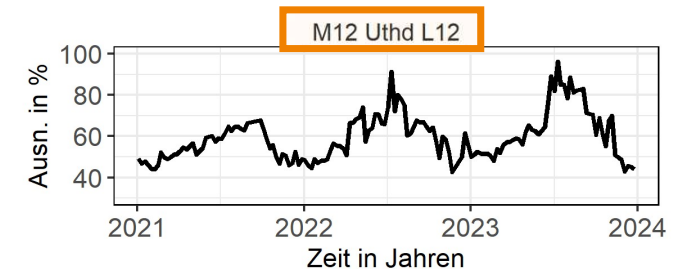
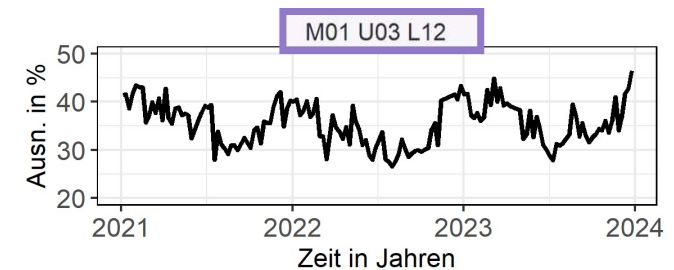
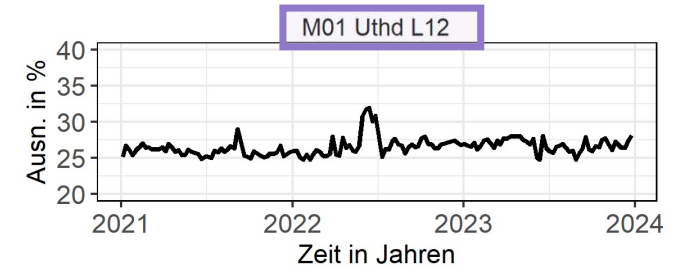
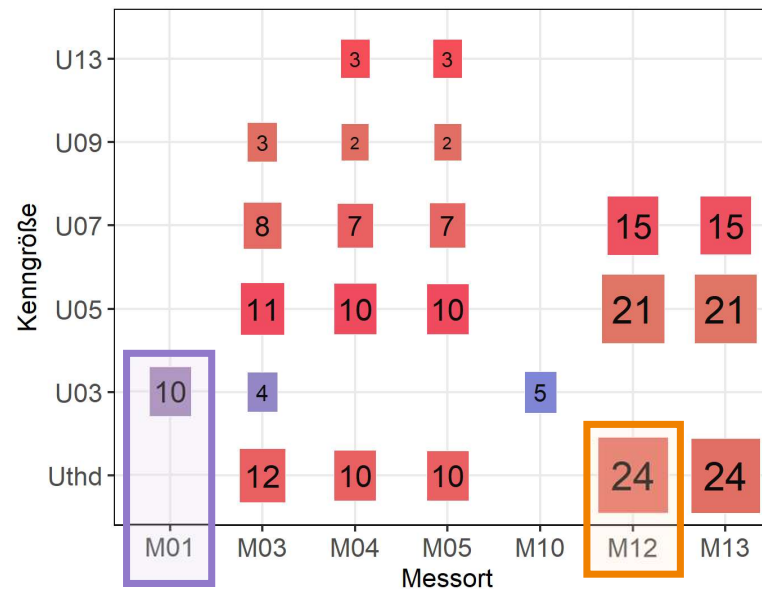
- Berechnung der mittleren saisonalen Variation
- $\text{Variation} = 2 \cdot \text{Amplitude}$
- Saison mit höheren Pegeln:
 - ▷ Sommer (Jahresmitte)
 - ▷ Winter (Jahreswechsel)



Saisonale Variationen

Auswertung

- ▶ Berechnung der mittleren saisonalen Variation
- ▶ Variation = 2 · Amplitude
- ▶ Saison mit höheren Pegeln:
 - ▶ Sommer (Jahresmitte)
 - ▶ Winter (Jahreswechsel)
- ▶ 5% der Zeitreihen mit saisonalen Variationen (7 Messorte, 6 Kenngrößen)
- ▶ Nur U03 zeigt ausgeprägte Wintersaison
- ▶ Emissionen überwiegend höher in den Sommermonaten



► Trenderkennung (1)

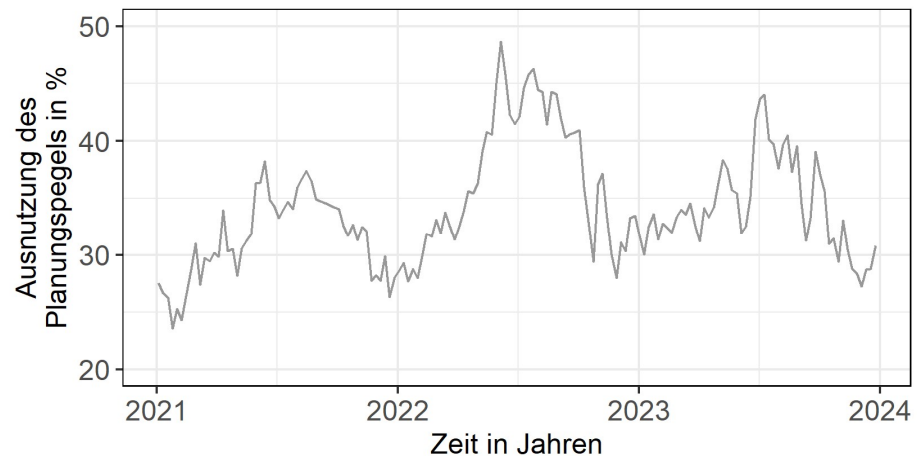
Sind aktuelle Trendentwicklungen erkennbar, und wenn ja, in welcher Richtung?

Methodik

► Additives Zeitreihenmodell:

Zeitreihe =

- + Trendkomponente
- + Saisonkomponente
- + Restkomponente



► Trenderkennung (1)

Sind aktuelle Trendentwicklungen erkennbar, und wenn ja, in welcher Richtung?

Methodik

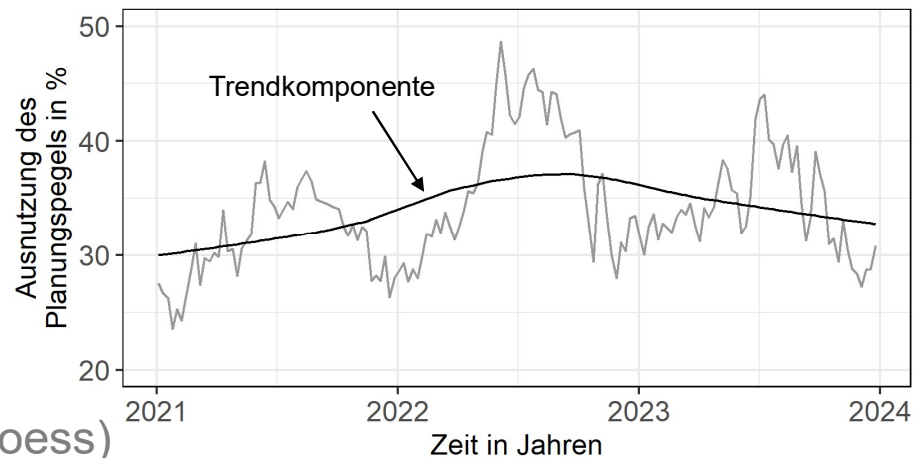
► Additives Zeitreihenmodell:

Zeitreihe =

+ Trendkomponente
+ Saisonkomponente
+ Restkomponente

► Zeitreihenzerlegung mittels STL-Verfahren (Seasonal and Trend decomposition using Loess)

► Extrahierung der Trendkomponente



► Trenderkennung (1)

Sind aktuelle Trendentwicklungen erkennbar, und wenn ja, in welcher Richtung?

Methodik

► Additives Zeitreihenmodell:

Zeitreihe =

+ Trendkomponente
+ Saisonkomponente
+ Restkomponente

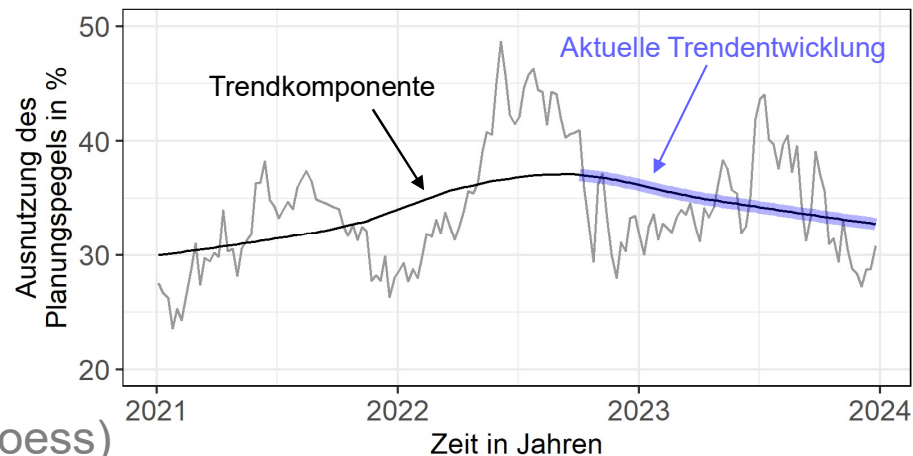
► Zeitreihenzerlegung mittels STL-Verfahren (Seasonal and Trend decomposition using Loess)

► Extrahierung der Trendkomponente

► Analyse der aktuellen Trendentwicklung

(Verlauf von der jüngsten Woche bis zum letzten erkennbaren Wendepunkt)

- Trendanstieg $G = -4,7\%$
- Trenddauer $d = 65$ Wochen
- Jährlicher Trendanstieg $g = -3,8\% / y$

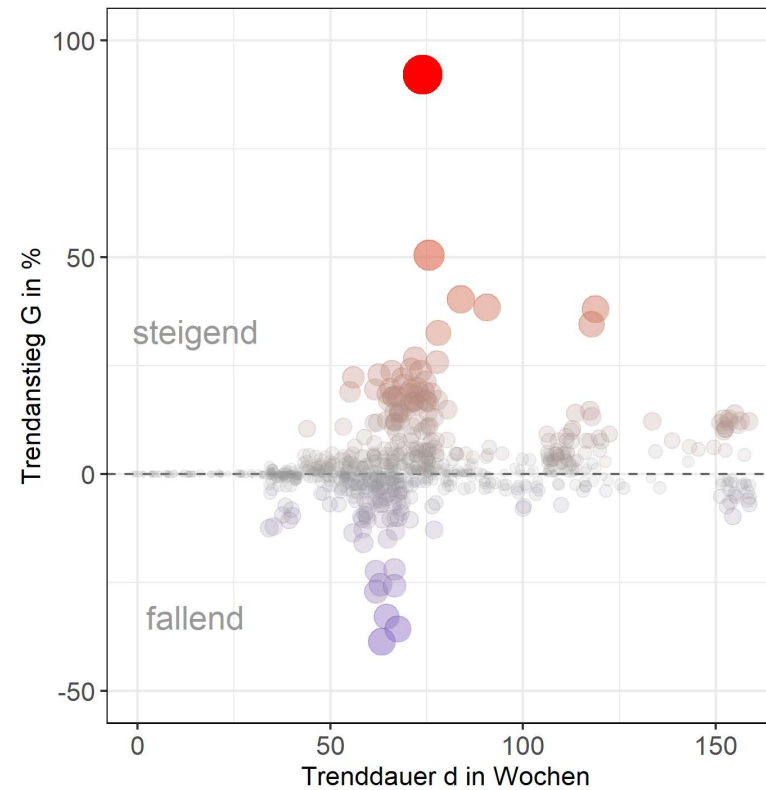


► Trenderkennung (1)

Auswertung

► Trenddauer

- ▷ 75%: ca. 1 Jahr
- ▷ 25%: ca. 2-3 Jahre



► Trenderkennung (1)

Auswertung

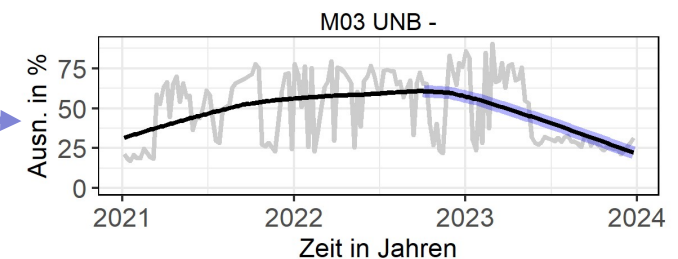
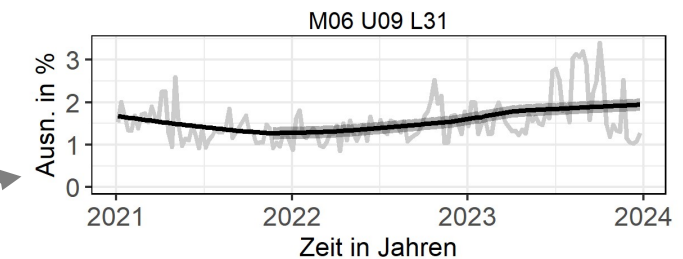
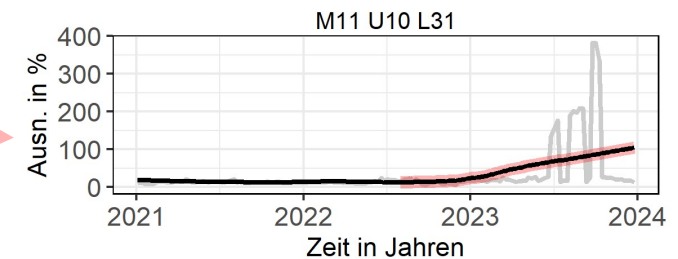
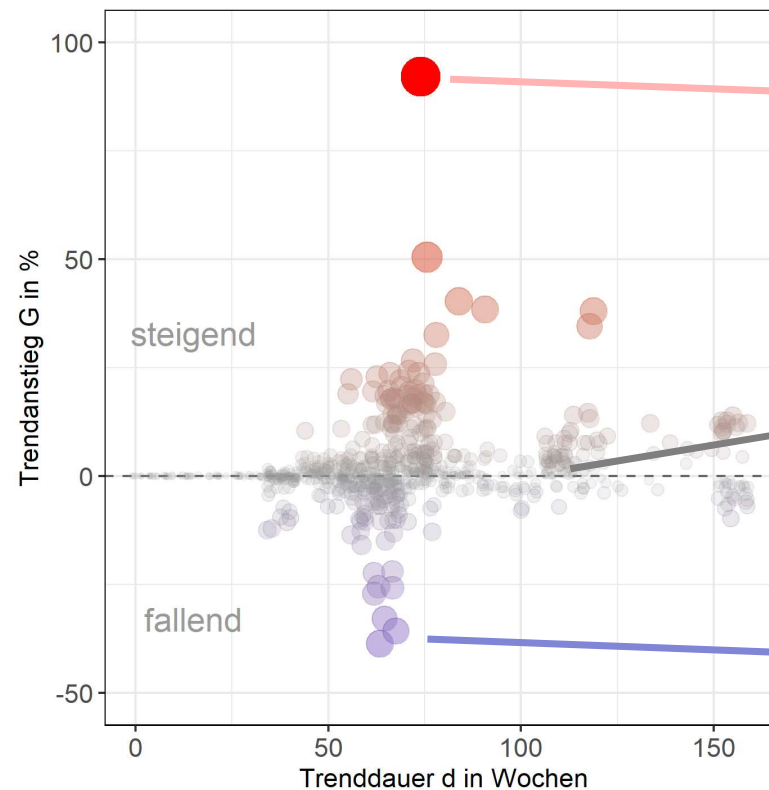
► Trenddauer

- ▷ 75%: ca. 1 Jahr
- ▷ 25%: ca. 2-3 Jahre

► Trendanstiege

- ▷ Überwiegend geringe oder keine Tendenz
- ▷ 7%: fallend ($G < -5\%$)
- ▷ 15%: steigend ($G > +5\%$)

► Signifikante Anstiege insbesondere für Harmonische (z.B. U10)

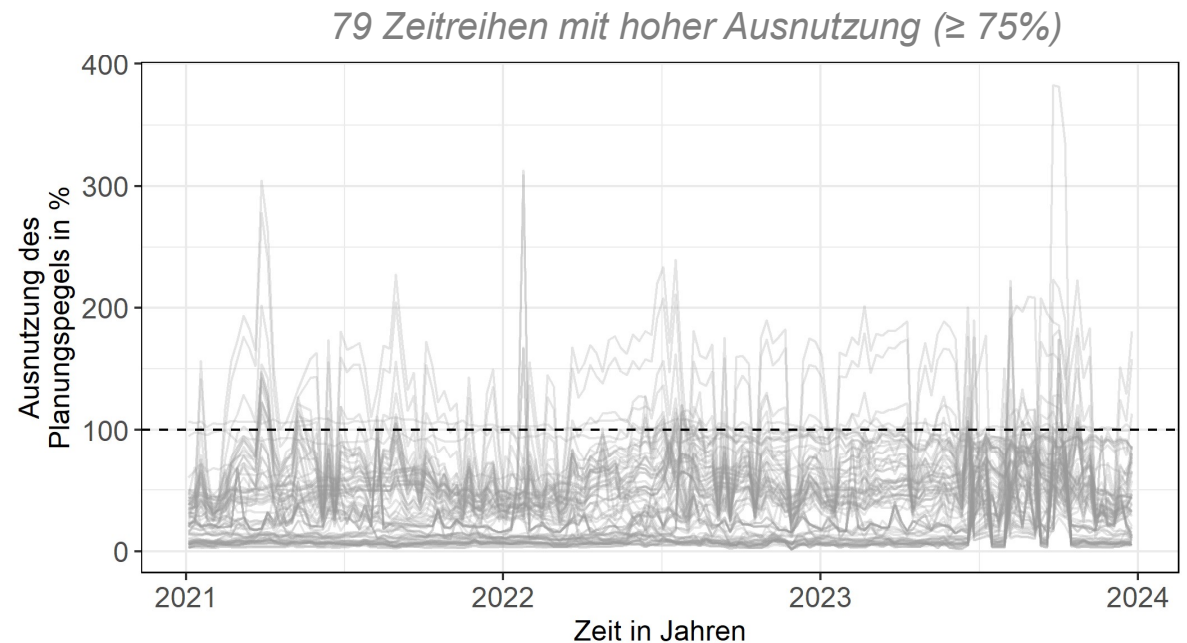


► Trenderkennung (2)

Existieren unterschiedliche Trendmuster?

Methodik

- Dimensionreduktion von Zeitreihen (152 Wochen = 152 Dimensionen)
- Projektion auf 2D/3D zur Visualisierung
- Vereinfachte Analyse und Interpretation (z.B. Cluster- und Anomalieerkennung)

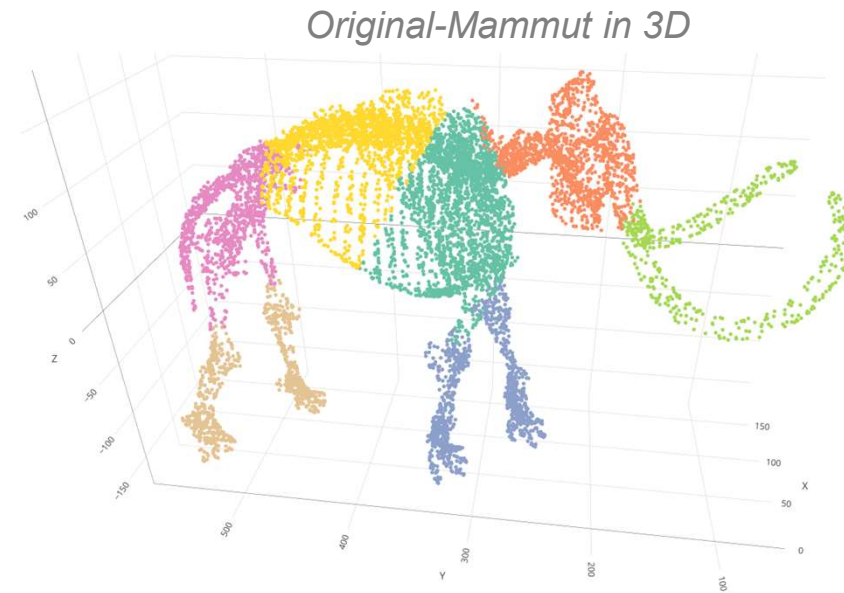


► Trenderkennung (2)

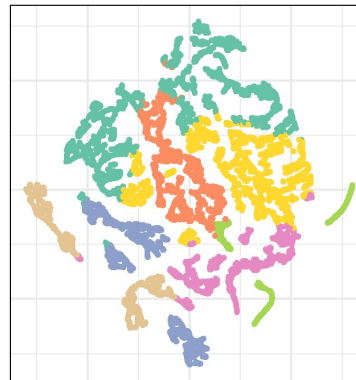
Existieren unterschiedliche Trendmuster?

Methodik

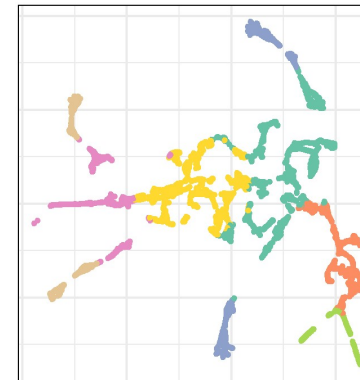
- Dimensionreduktion von Zeitreihen (152 Wochen = 152 Dimensionen)
- Projektion auf 2D/3D zur Visualisierung
- Vereinfachte Analyse und Interpretation (z.B. Cluster- und Anomalieerkennung)
- Verfahren zur Dimensionsreduktion:
 - **t-SNE** (t-distributed stochastic neighbor embedding)
 - **UMAP** (Uniform Manifold Approximation and Projection)
 - **PaCMAP** (Pairwise Controlled Manifold Approximation and Projection)



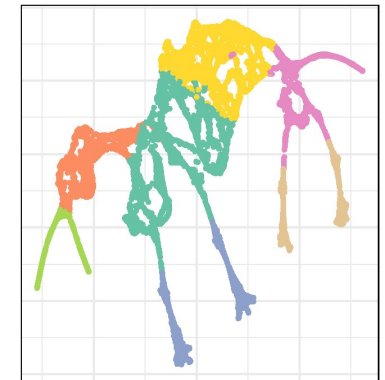
t-SNE in 2D



UMAP in 2D



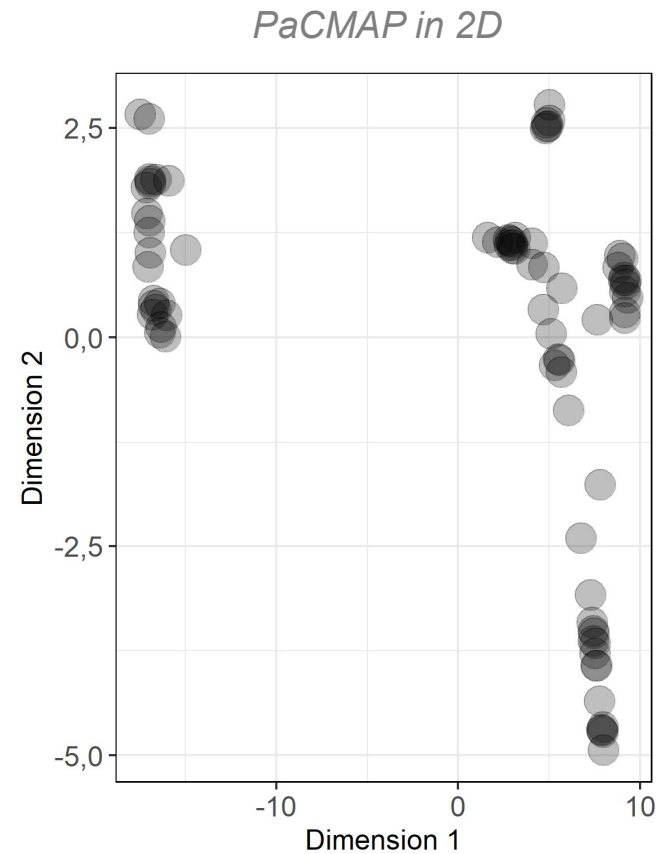
PaCMAP in 2D



► Trenderkennung (2)

Auswertung

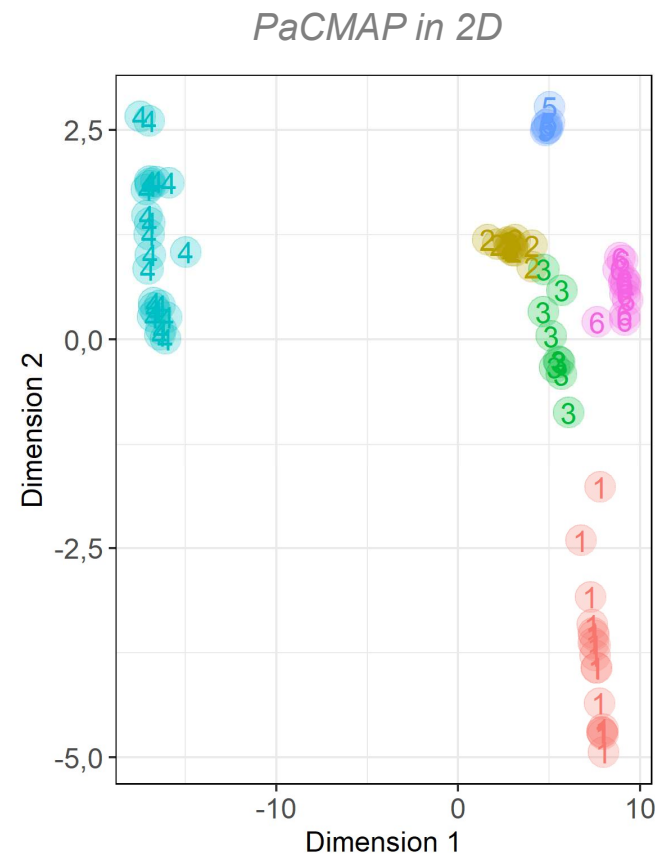
- Dimensionsreduktion der Zeitreihen
(79 Zeitreihen mit 152 Wochen)
- Projektion in 2D mittels PaCMAP



► Trenderkennung (2)

Auswertung

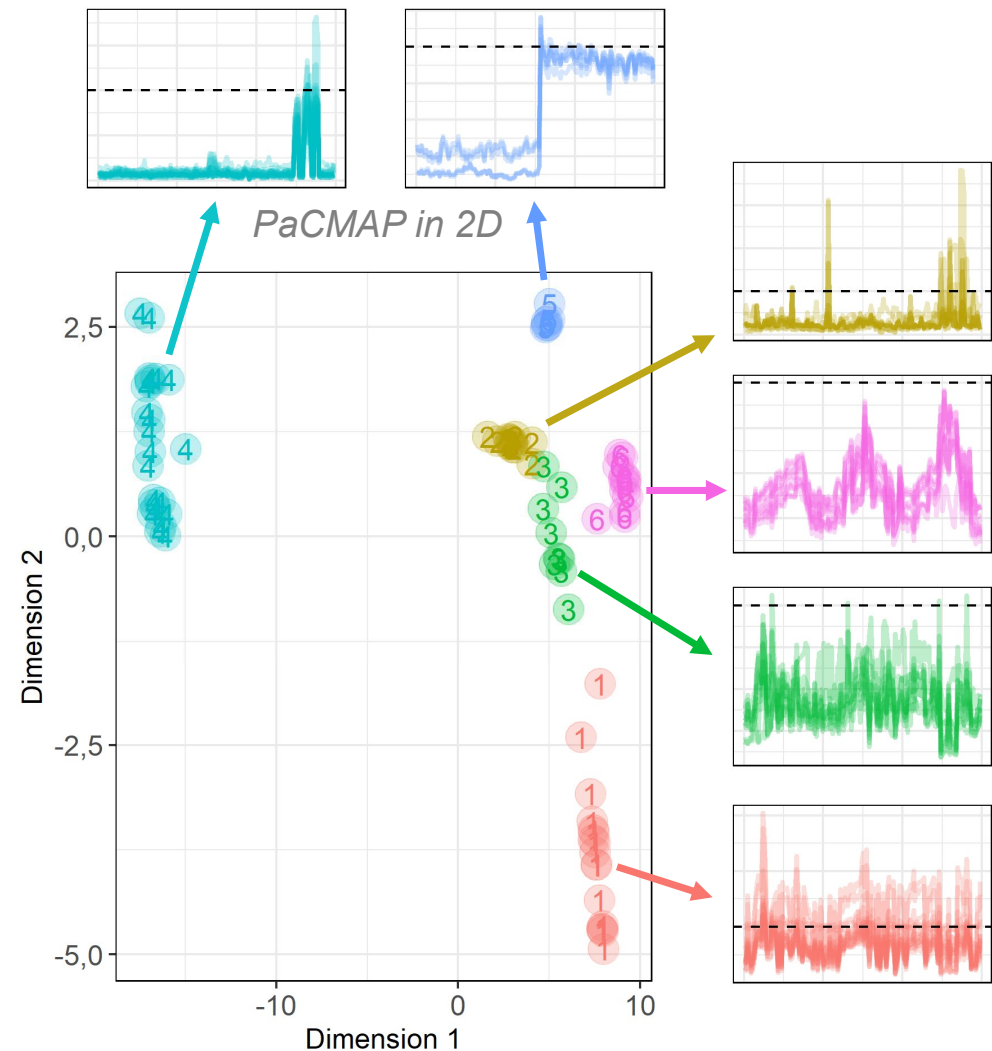
- Dimensionsreduktion der Zeitreihen
(79 Zeitreihen mit 152 Wochen)
- Projektion in 2D mittels PaCMAP
- Gruppierung durch Clusteralgorithmen
(z.B. *k*-means mit 6 Clustern)



► Trenderkennung (2)

Auswertung

- Dimensionsreduktion der Zeitreihen
(79 Zeitreihen mit 152 Wochen)
- Projektion in 2D mittels PaCMAP
- Gruppierung durch Clusteralgorithmen
(z.B. *k*-means mit 6 Clustern)
- 1: **Hohe Ausnutzung** (u.a. M10)
- 3: **Mittlere Ausnutzung** (M10)
- 6: **Saisonale Variationen** (M12, M13)
- 2: **Überwiegend Flicker**
- 5: **Messort M09** (Uthd, U05)
- 4: **Ungeradz. Harmonische** (U06, U08, U10)



► Zusammenfassung

- ▶ Einhaltung von Grenzwerten
 - ▷ Fast alle Wochen innerhalb der Grenzwerte (99,5%)
 - ▷ Einzelne Messorte und Kenngrößen mit Überschreitungen identifizierbar
- ▶ Saisonale Variationen
 - ▷ Wenige Kenngrößen/Messorte mit saisonalen Schwankungen (ca. 5%)
 - ▷ Überwiegend höhere Emissionspegel im Sommer, vereinzelt im Winter
- ▶ Trenderkennung
 - ▷ Mehrheitlich geringe oder keine Tendenz (78%)
 - ▷ Signifikante Anstiege für geradzahlige Harmonische und einzelne Messorte
- ▶ Aktuelle Forschung
 - ▷ Trendprognosen
 - ▷ Multivariate Analysen (Zusammenhänge)



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

 max.domagk@tu-dresden.de

 +49 351 463 35223

 maxdomagk.de