

Max Domagk

Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik  
Lehrstuhl für Elektroenergieversorgung

# Prognose von Langzeitmessungen der Elektroenergiequalität

AK Netzurückwirkungen // 25. März 2023

# Inhalt

**Motivation**

**Grundlagen**

**Prognoseverfahren**

**Anwendung**

# Motivation

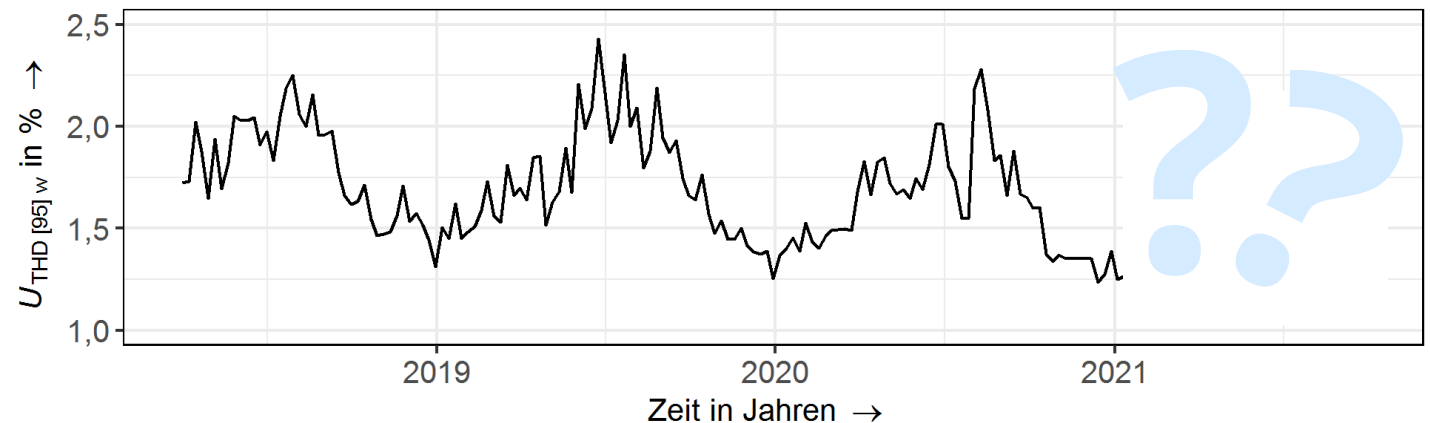
## Langzeitmessungen der Elektroenergiequalität

- Qualitative Hinweise auf zukünftige Entwicklungen der Qualitätskenngrößen

### Zielstellung

- Belastbare Prognosen über zukünftige Entwicklung der Strom- und Spannungsqualität

*Spannungsverzerrung (wöch. 95%-Quantile der 10-Minuten-Mittelwerte)*



## Herausforderungen

- Flexible und robuste Verfahren für zuverlässige Anwendung
- Große Datenmengen (z.B. Messdaten für 100+ Messungen und 30+ Qualitätskenngrößen)
- Geringer manueller Aufwand (u.a. automatisierte Parametrierung der Verfahren)
- Aufbereitung und Interpretation der Ergebnisse

# Grundlagen

# Grundlagen

## Zeitreihen

### Zeitreihe

$$y_t = y_1, y_2, \dots, y_N$$

als zeitliche geordnete Folge von Messwerten für die gilt, dass

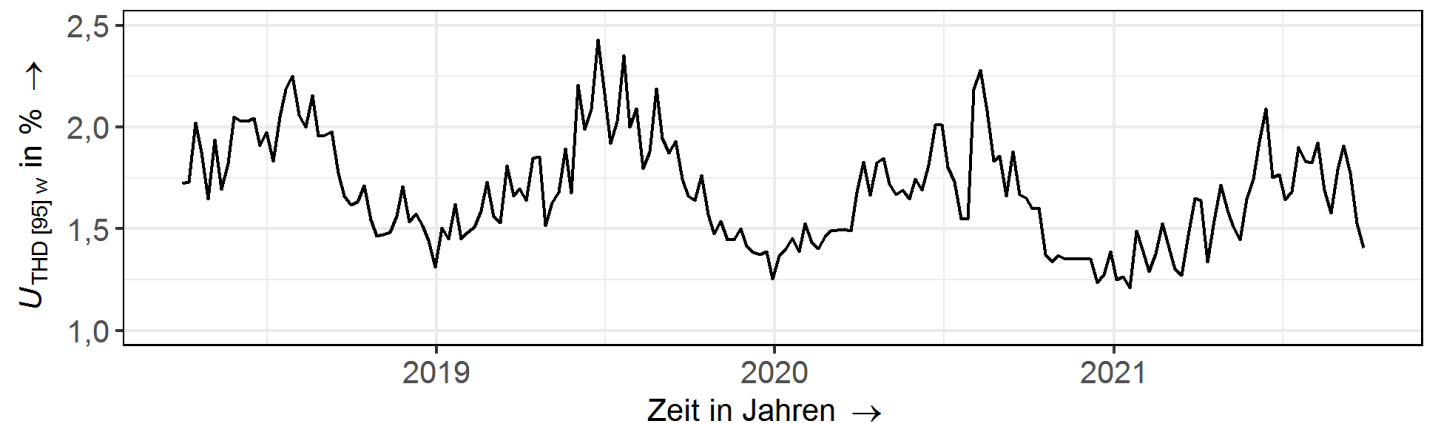
- zu jedem Zeitpunkt ( $t = 1, 2, \dots, N$ ) ein Messwert existiert und
- die Zeitpunkte äquidistant verteilt sind.

### Beispiele

Kontinuierlich erfasste  
Qualitätskenngrößen

- Erfassung der  
**10-Perioden-Messwerte**
- Aggregation zu  
**10-Minuten-Mittelwerten**
- Bewertung der  
**wöch. 95%-Quantile**

*Spannungsverzerrung (wöch. 95%-Quantile der 10-Minuten-Mittelwerte)*



# Grundlagen

## Additives Komponentenmodell

**Berücksichtigung verschiedener Einflüsse** in der klassischen Zeitreihenanalyse:

- Trendkomponente (mehrere Jahre)
- Konjunkturkomponente (mehrere Monate bis Jahre)
- Saisonkomponente (mehrere Wochen bis Monate)
- Periodische Komponente (mehrere Tage bis Wochen)
- Restkomponente (z.B. Ausreißer, Unregelmäßigkeiten)
- ...

**Vereinfachtes Komponentenmodell** für wochenweise berechnete Werte:

$$y_t = T_t + S_t + R_t$$

$T_t$  ... Trendkomponente

$S_t$  ... Saisonkomponente

$R_t$  ... Restkomponente

# Grundlagen

## Zeitreihenzerlegung

### STL-Verfahren

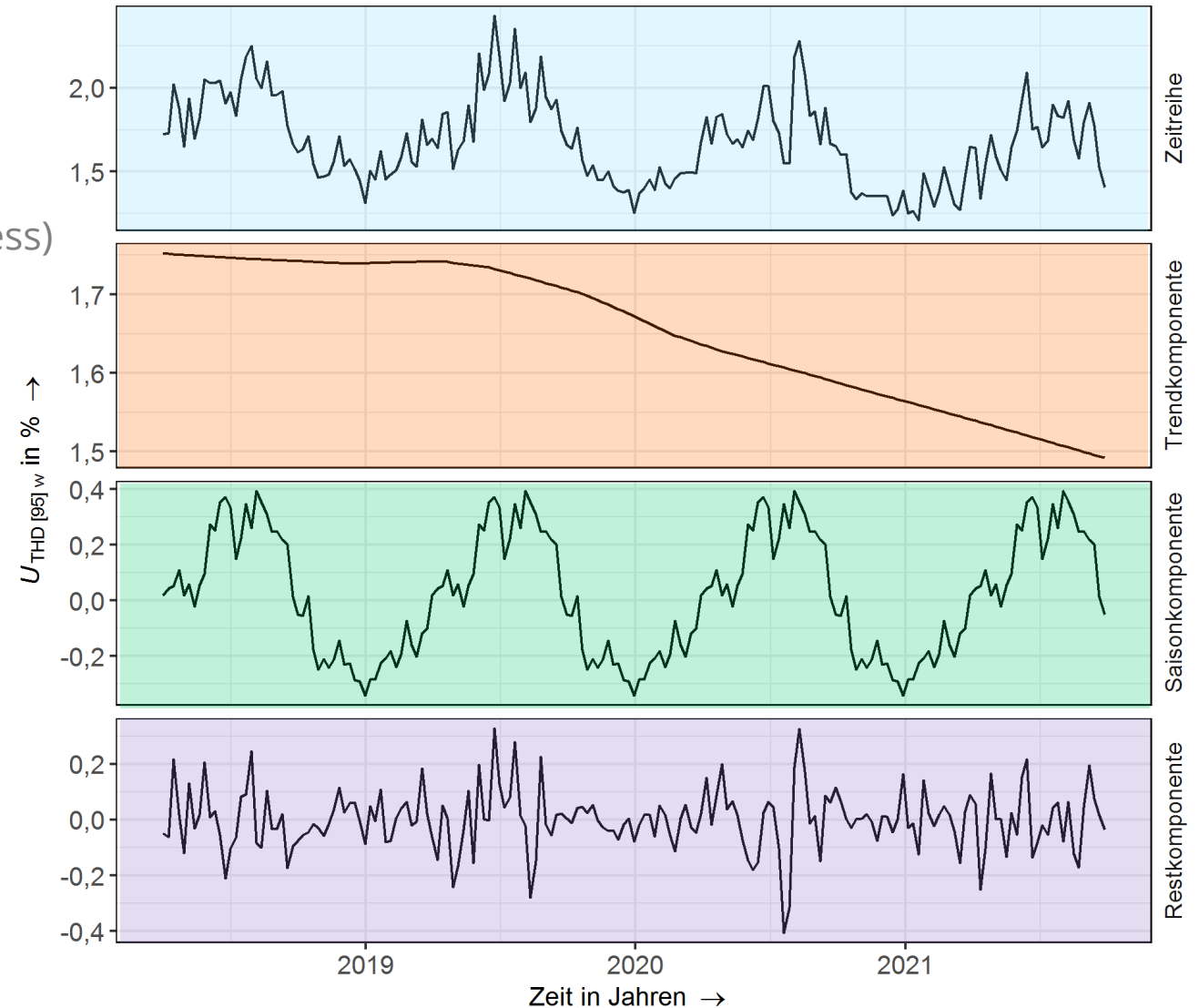
(engl. Seasonal and Trend decomposition using Loess)

Zerlegung der **Zeitreihe** in:

- **Trend-**,
- **Saison-** und
- **Restkomponente**

durch zweifache Glättung mittels  
lokal gewichteter Regression (LOESS):

1. Eliminierung der Saisonkomponente
2. Glättung der Trendkomponente



# Grundlagen

## Begriffe und Definitionen

### Zeitreihenprognose

Prozess der Vorhersage auf Grundlage vergangener und aktueller Daten

### Prognosehorizont

Zeitraum für den künftige Werte zu den Zeitpunkten

$$h = 1, 2, \dots, H$$

vorhergesagt werden

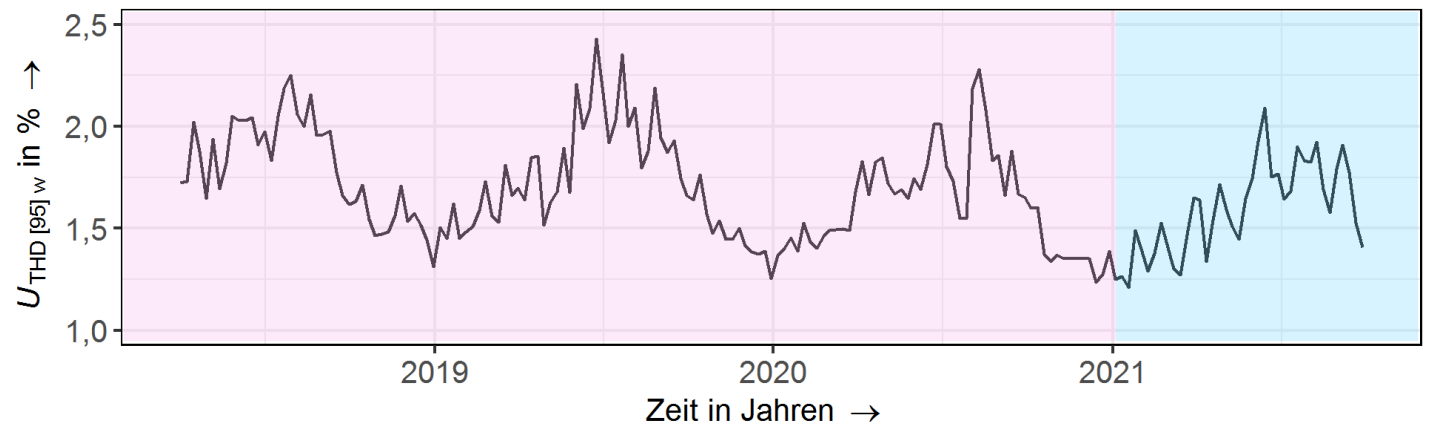
### Prognosefehler

Differenz zwischen

- beobachtetem Wert  $y_{T+h}$
- vorhergesagtem Wert  $\hat{y}_{T+h|T}$

Unterteilung in **Trainings-** und **Testdaten**

$$y_t = y_1, y_2, \dots, y_T, y_{T+1}, \dots, y_{T+H}$$



### Prognosegenauigkeit

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{h=1}^H (y_{T+h} - \hat{y}_{T+h|T})^2}$$

$$SMAPE = 200 \cdot \frac{1}{H} \sum_{h=1}^H \left| \frac{y_{T+h} - \hat{y}_{T+h|T}}{y_{T+h} + \hat{y}_{T+h|T}} \right|$$



# Prognoseverfahren

# Prognoseverfahren

## Übersicht

### Zeitreihenprognose (engl. Forecasting)

- eigener Fachbereich der Statistik mit Vielzahl an Modellen und Verfahren

### Prognoseverfahren

- **Einfache Verfahren** z.B. Regressionsverfahren
- **Zeitreihenzerlegung** zur Prognose der Einzelkomponenten
- **Exponentielle Glättung** (engl. Exponential Smoothing) z.B. Holt-Winters-Verfahren
- **ARIMA** (engl. Auto-Regressive Integrated Moving Average) z.B. Saisonale ARIMA-Modelle (benötigen stationäre Zeitreihen, Parameterbestimmung u.U. nicht trivial)
- **Dedizierte Verfahren**  
u.a. Quantile Regression (Regressionmodelle für Quantile), Maschinelles Lernen (z.B. Neuronale Netze)
- ...

# Prognoseverfahren

## Einfache Verfahren (1)

### Naiver Ansatz

Alle prognostizierten Werte werden auf die letzte Beobachtung gesetzt

### Mittelwert

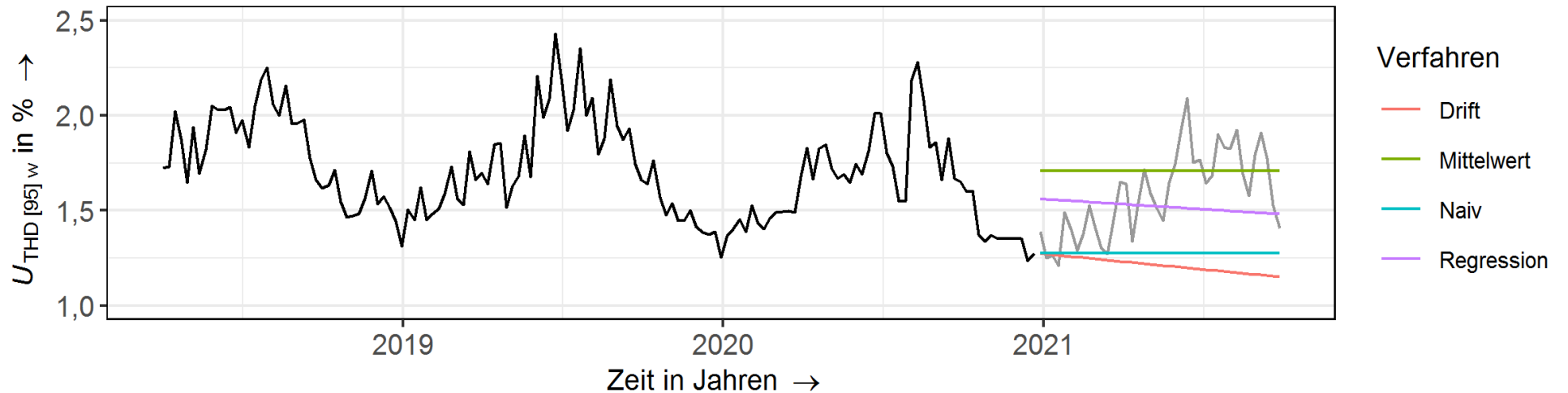
Alle zukünftigen Werte entsprechen dem Mittelwert historischer Daten

### Drift

Variante der naiven Prognose mit Extrapolation der Linie zwischen erster und letzter Beobachtung

### Regression

Extrapolation einer Geraden



# Prognoseverfahren

## Einfache Verfahren (2)

### Naiver Ansatz

Alle prognostizierten Werte werden auf die letzte Beobachtung gesetzt

### Mittelwert

Alle zukünftigen Werte entsprechen dem Mittelwert historischer Daten

### Drift

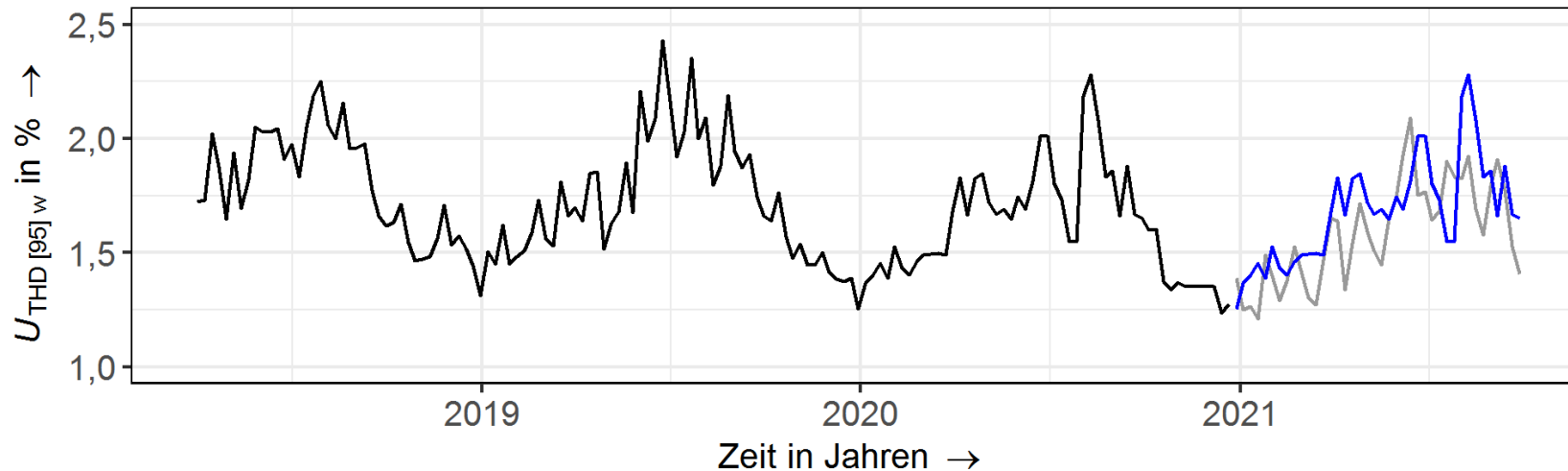
Variante der naiven Prognose mit Extrapolation der Linie zwischen erster und letzter Beobachtung

### Regression

Extrapolation einer Geraden

### Saisonal naiver Ansatz

Prognosewert entspricht der letzten Beobachtung aus derselben Jahreszeit (z.B. derselben Woche des Vorjahres)



# Prognoseverfahren

## Zeitreihenzerlegung (1)

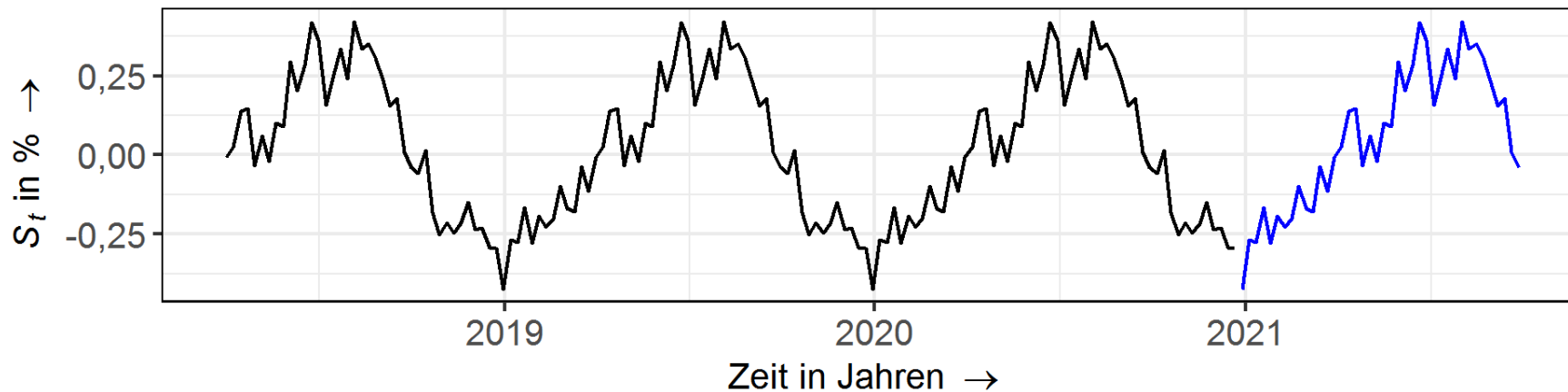
### 1. Zeitreihenzerlegung in Einzelkomponenten mittels STL-Verfahren

# Prognoseverfahren

## Zeitreihenzerlegung (2)

### 1. Zeitreihenzerlegung in Einzelkomponenten mittels STL-Verfahren

### 2. Prognose der Saisonkomponente z.B. mit saisonal naivem Ansatz



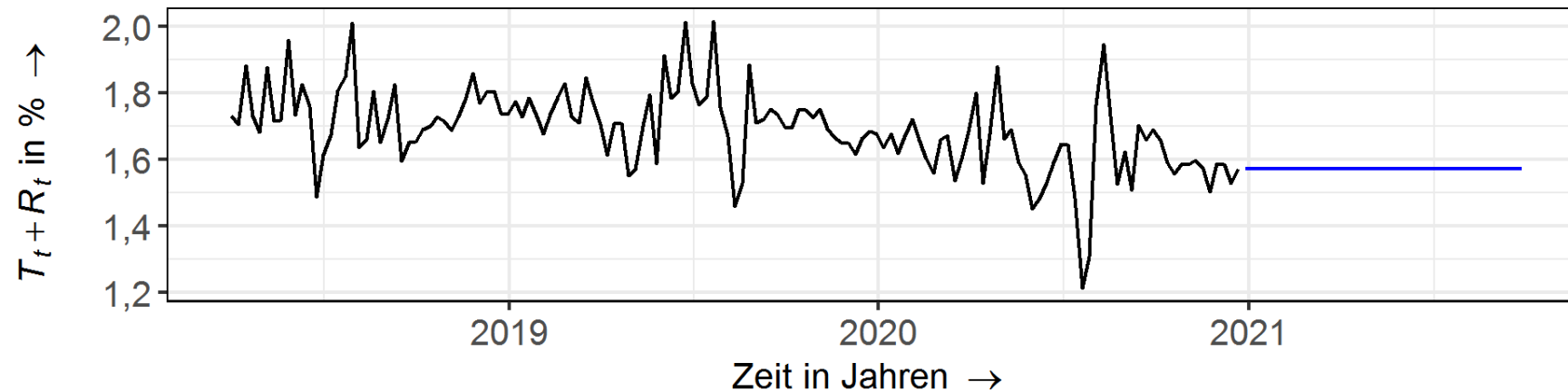
# Prognoseverfahren

## Zeitreihenzerlegung (3)

**1. Zeitreihenzerlegung in Einzelkomponenten**  
mittels STL-Verfahren

**2. Prognose der Saisonkomponente**  
z.B. mit saisonal naivem Ansatz

**3. Prognose der saisonbereinigten Komponente**  
(Trend- und Restkomponente)  
z.B. mit naivem Ansatz



# Prognoseverfahren

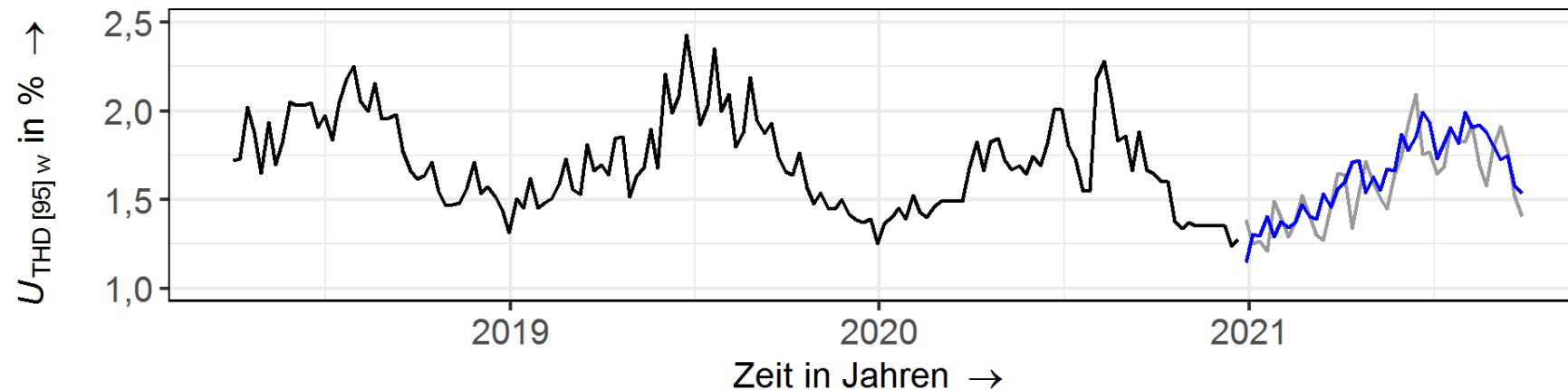
## Zeitreihenzerlegung (4)

**1. Zeitreihenzerlegung in Einzelkomponenten**  
mittels STL-Verfahren

**2. Prognose der Saisonkomponente**  
z.B. mit saisonal naivem Ansatz

**3. Prognose der saisonbereinigten Komponente**  
(Trend- und Restkomponente)  
z.B. mit naivem Ansatz

**4. Kombination der Einzelprognosen zur Gesamtprognose**



Vielzahl an Kombinationsmöglichkeiten für Prognose der Einzelkomponenten

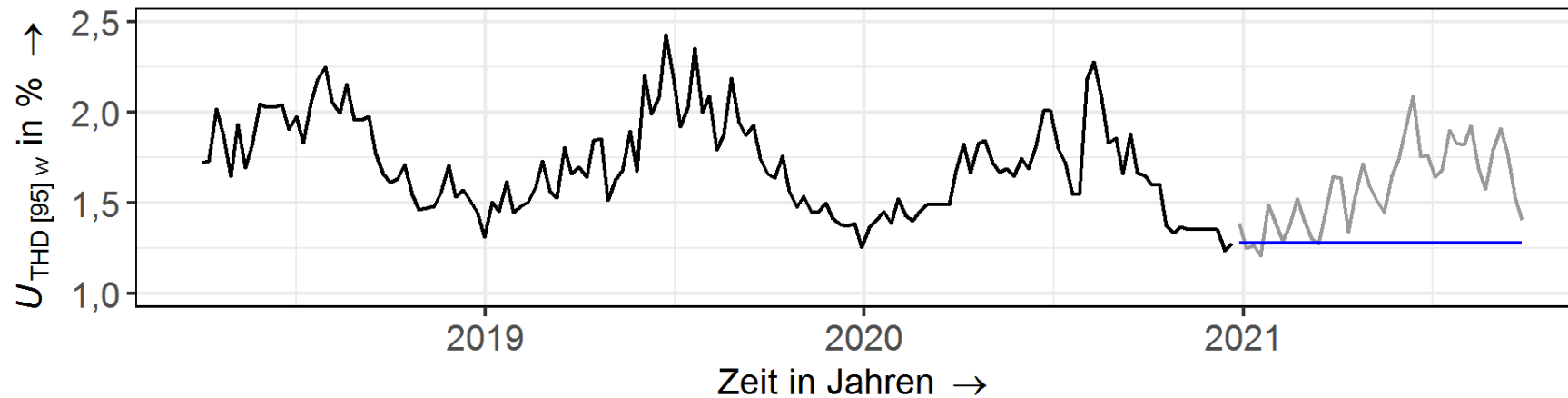


# Prognoseverfahren

## Exponentielle Glättung (1)

### Einfache exponentielle Glättung (ES)

„Niveau“ mit Gegenwartsorientierung  
(jüngere Beobachtungen stärker gewichtet als ältere)



# Prognoseverfahren

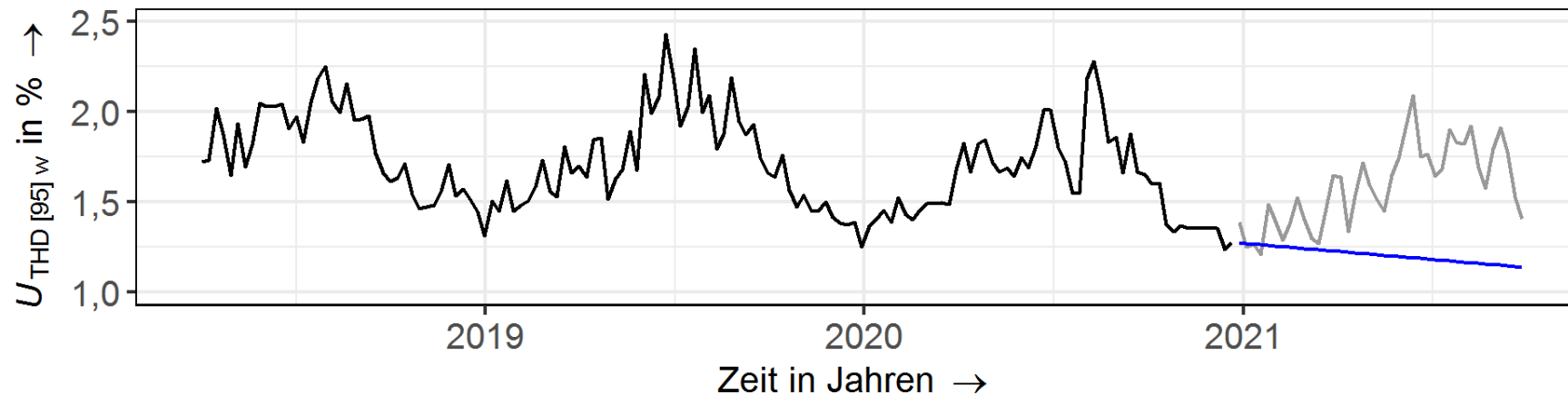
## Exponentielle Glättung (2)

### Einfache exponentielle Glättung (ES)

„Niveau“ mit Gegenwartsorientierung  
(jüngere Beobachtungen stärker gewichtet als ältere)

### Holt-Verfahren

Erweiterung von ES  
um „Trend“ mit  
Gegenwartsorientierung



# Prognoseverfahren

## Exponentielle Glättung (3)

### Einfache exponentielle Glättung (ES)

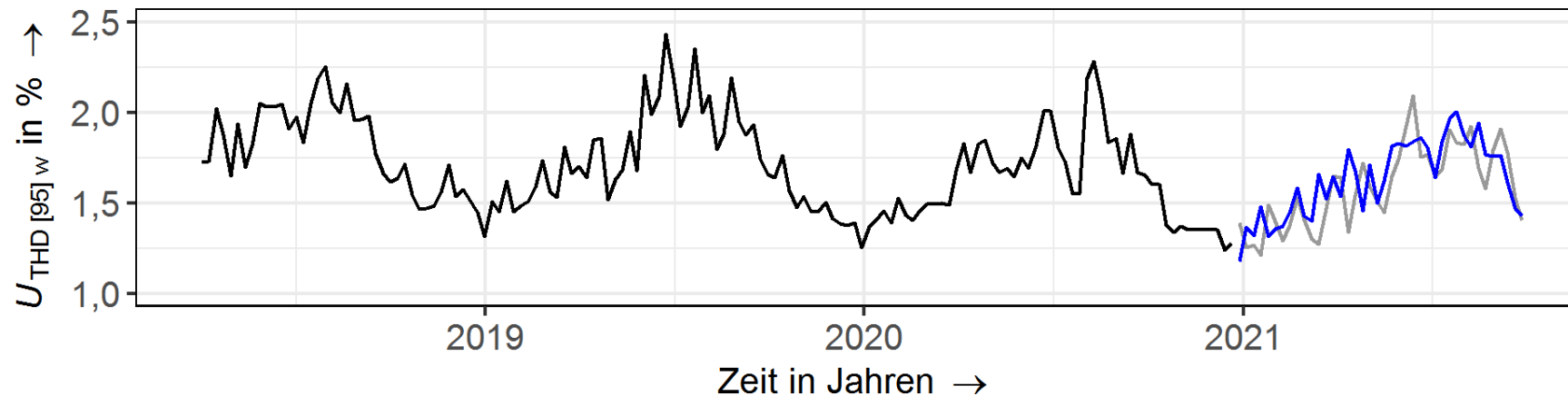
„Niveau“ mit Gegenwartsorientierung  
(jüngere Beobachtungen stärker gewichtet als ältere)

### Holt-Verfahren

Erweiterung von ES  
um „Trend“ mit  
Gegenwartsorientierung

### Holt-Winters-Verfahren

Erweiterung des Holt-Verfahrens  
um „Saison“ mit  
Gegenwartsorientierung



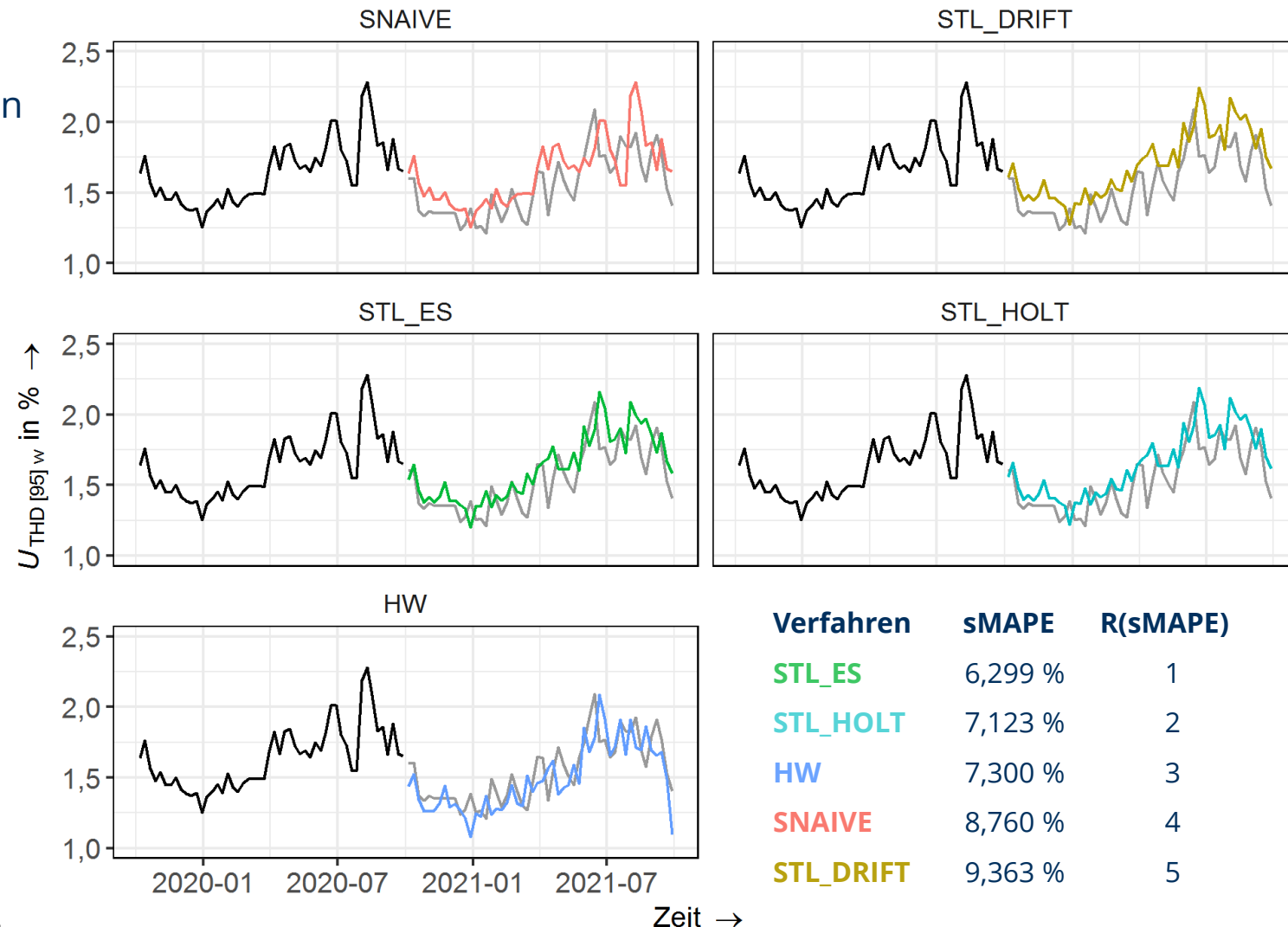
# Anwendung

# Anwendung

## Identifikation geeigneter Verfahren

Zusammenstellung ausgewählter Verfahren

- **SNAIVE** (Referenzverfahren)  
Saisonal naiver Ansatz
- **STL\_DRIFT**  
Zeitreihenzerlegung mit Drift-Verfahren
- **STL\_ES**  
Zeitreihenzerlegung mit exponentieller Glättung
- **STL\_HOLT**  
Zeitreihenzerlegung mit Holt-Verfahren
- **HW**  
Holt-Winters-Verfahren

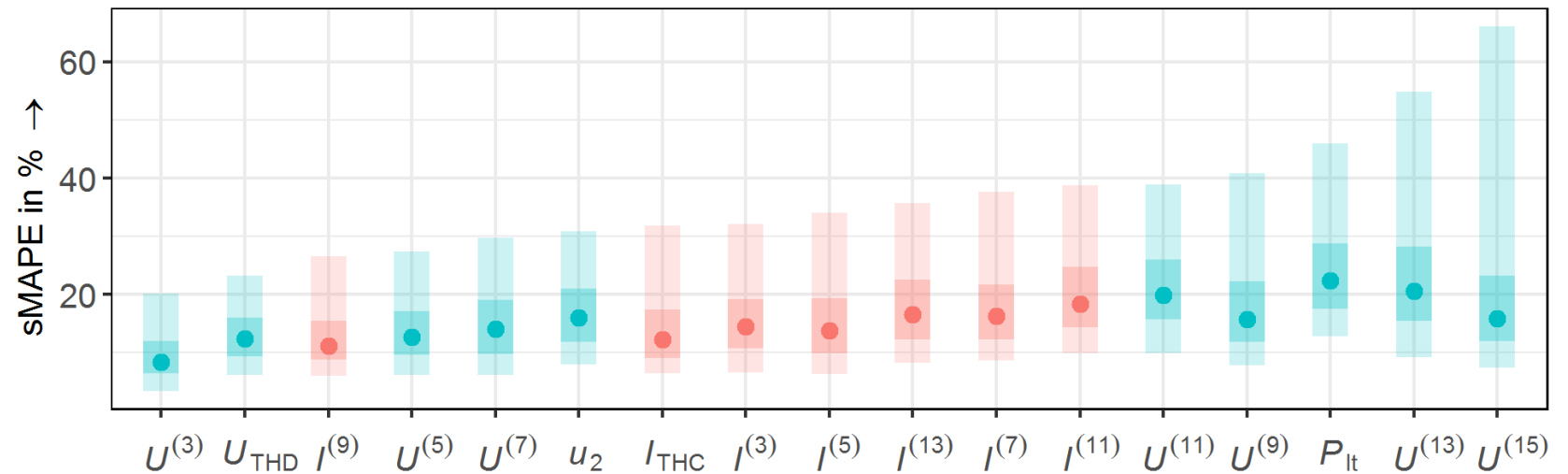


# Anwendung

## Einflussgrößen auf Prognosegenauigkeit (1)

- Prognosehorizont  
(Fehler größer je größer Horizont)
- Qualitätskenngrößen  
(genaue Prognosen mgl.  
u.a. für Verzerrung)

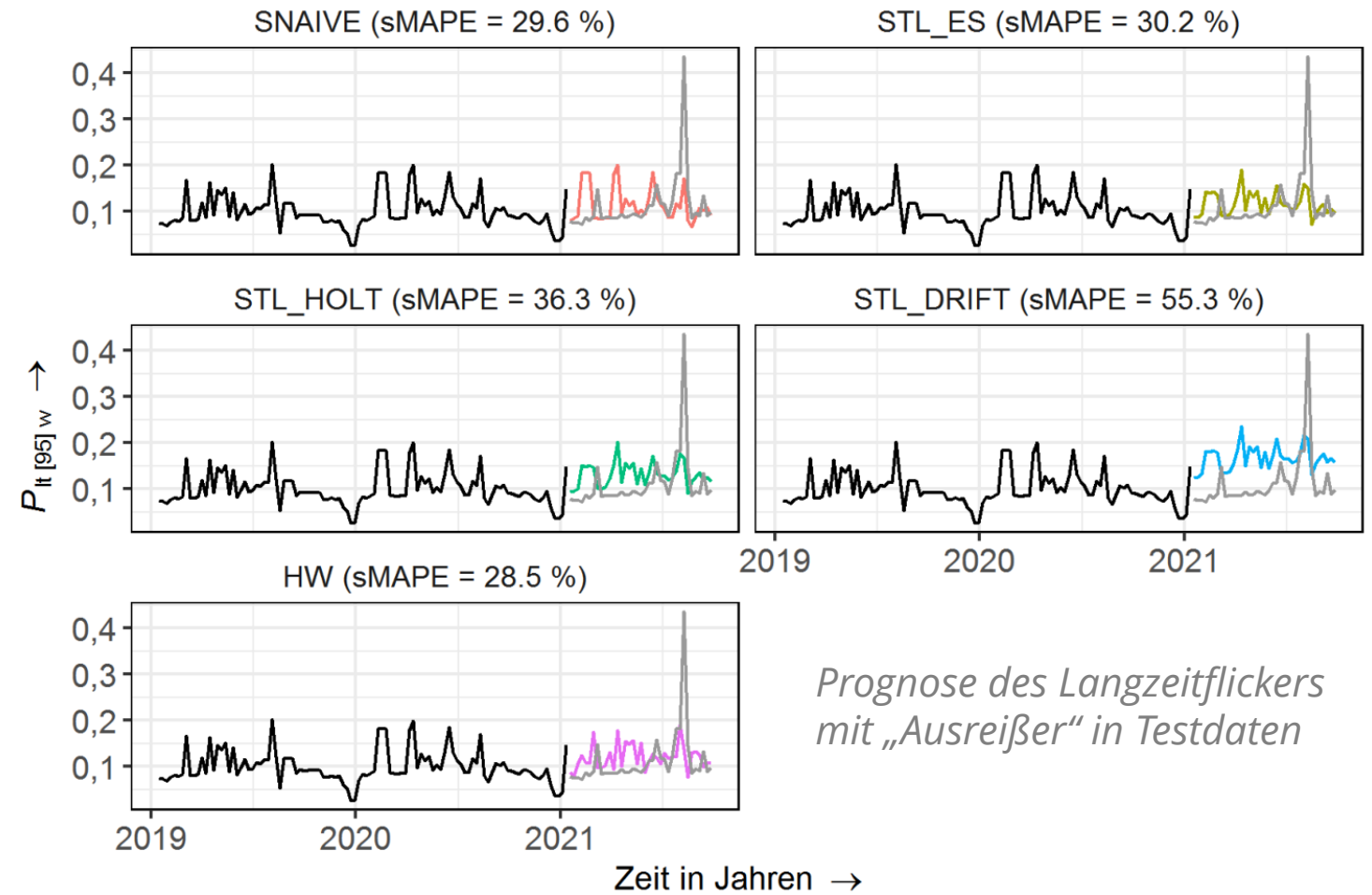
Mittlerer Prognosefehler aller Verfahren für  
verschiedene *Spannungs-* und *Stromqualitätskenngrößen*



# Anwendung

## Einflussgrößen auf Prognosegenauigkeit (2)

- Prognosehorizont  
(Fehler größer je größer Horizont)
- Qualitätskenngrößen  
(genaue Prognosen mgl.  
u.a. für Verzerrung)
- Trainings- vs. Testdaten  
(Signifikante Änderungen in  
Testdaten nicht prognostizierbar)



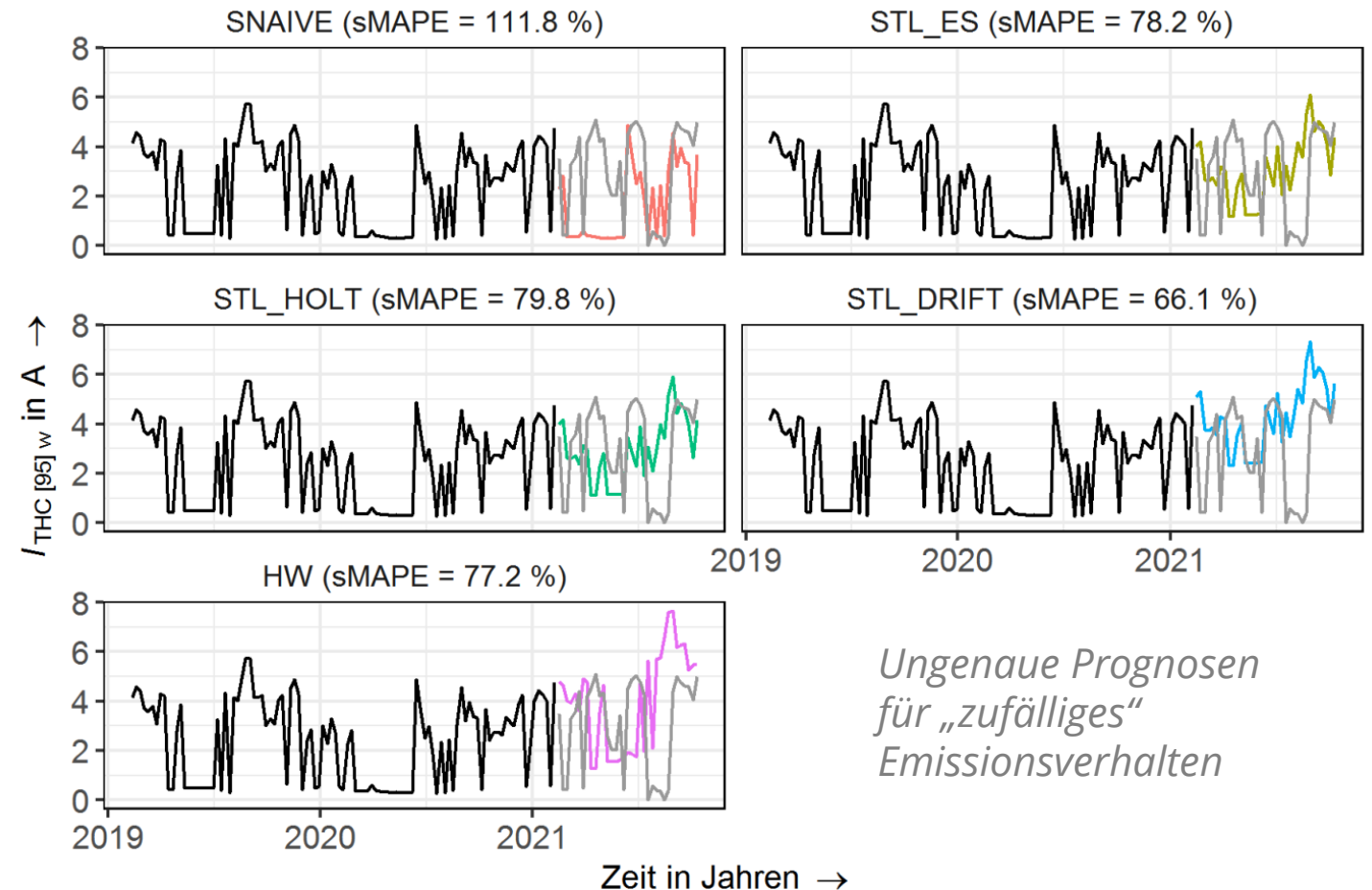
# Anwendung

## Einflussgrößen auf Prognosegenauigkeit (3)

- Prognosehorizont  
(Fehler größer je größer Horizont)
- Qualitätskenngrößen  
(genaue Prognosen mgl.  
u.a. für Verzerrung)
- Trainings- vs. Testdaten  
(Signifikante Änderungen in  
Testdaten nicht prognostizierbar)

### Zukünftige Forschung

- Prognostizierbarkeit  
(z.B. statistische Parameter zur  
Abschätzung einer guten bzw.  
schlechten Prognostizierbarkeit)
- Erprobung weiterer Verfahren  
(u.a. Ensemble-Prognosen)





# Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit



✉ [max.domagk@tu-dresden.de](mailto:max.domagk@tu-dresden.de)

☎ +49 351 463 35223

🌐 [maxdomagk.de](http://maxdomagk.de)

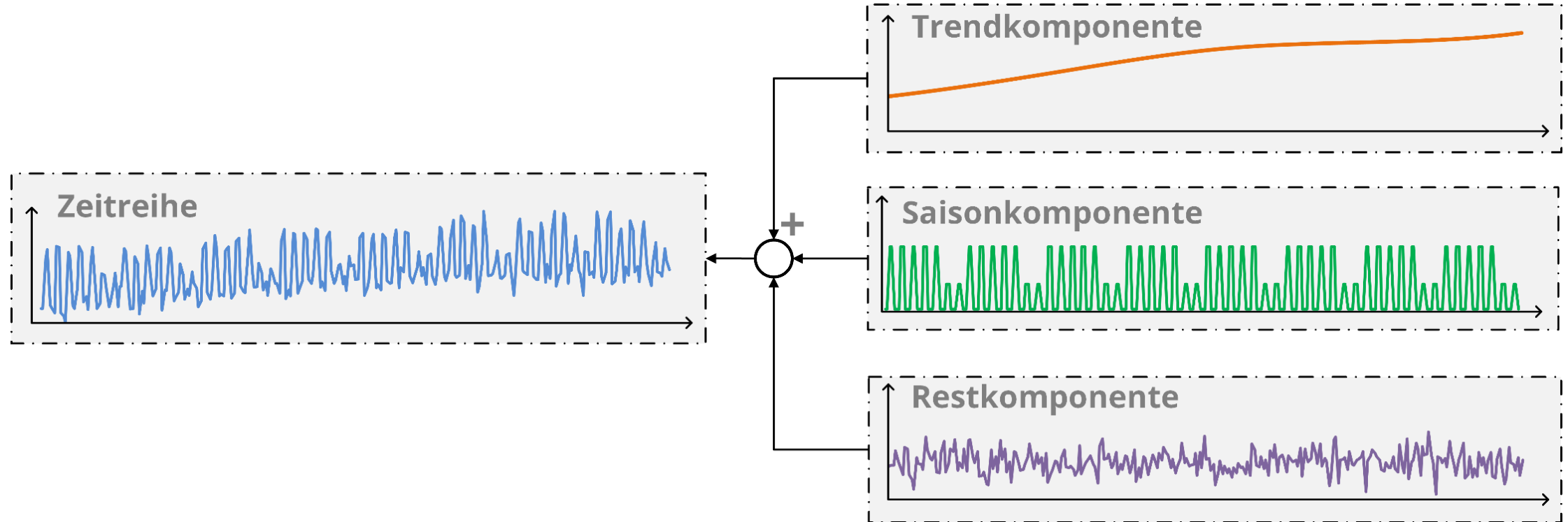
# Grundlagen

## Zeitliche Variationen

		KB - kurze Beobachtungsdauer (Tage bis Wochen)	MB - mittlere Beobachtungsdauer (Wochen bis Monate)	LB - lange Beobachtungsdauer (Monate bis Jahre)
Einfluss der elektrischen Umgebung	Abnehmer- struktur	<b>hoch</b> (Abnehmerverhalten)	<b>mittel bis hoch</b> (z.B. saisonale Unterschiede im Abn.-Verhalten)	<b>mittel</b> (z.B. Einsatz neuer Gerätetechnologien)
	Erzeuger- struktur	<b>hoch</b> (Erzeugungsverhalten)	<b>mittel bis hoch</b> (z.B. saisonale Unterschiede im Erz.-Verhalten)	<b>mittel</b> (z.B. Einsatz neuer Gerätetechnologien)
	Netz- struktur	<b>praktisch nicht vorhanden</b>	<b>niedrig</b> (z.B. verschiedene Schaltzustände)	<b>niedrig bis mittel</b> (z.B. Änderungen in der Betriebsführung)

# Grundlagen

## Additives Komponentenmodell



# Prognoseverfahren

## Vorhersageintervall

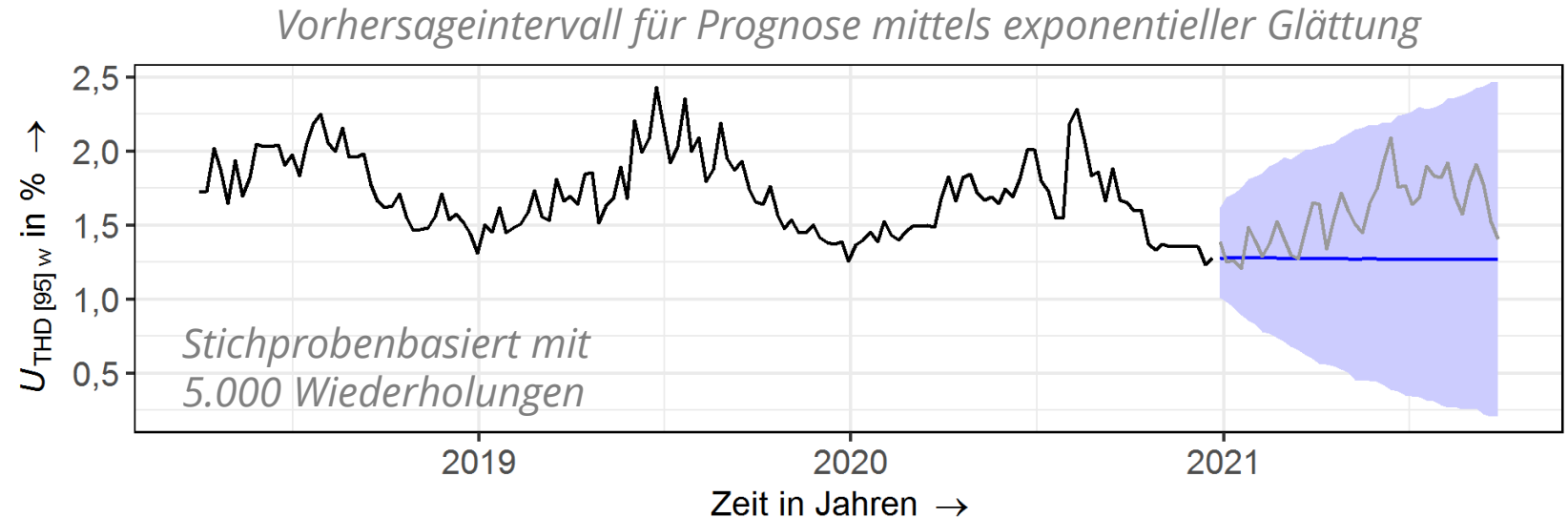
**Vorhersageintervall** um Unsicherheit der Prognose einzuschätzen  
(z.B. Wahrscheinlichkeit, dass z.B. 95% aller prognostizierten Werte innerhalb des Intervalls liegen)

### Verteilungsbasiert

- Annahme: prognostizierte Werte sind normalverteilt
- Schätzung der Standardabweichung

### Stichprobenbasiert

- Annahme:  
Prognosefehler unkorreliert  
und in Varianz konstant
- Wiederholtes Ziehen aus  
historischen Fehlern der  
Trainingsdaten



# Anwendung

## Einflussgrößen auf Prognosegenauigkeit

- Prognosehorizont  
(Fehler größer je größer Horizont)

*Prognosegenauigkeit in Abhängigkeit des Prognosehorizonts*

