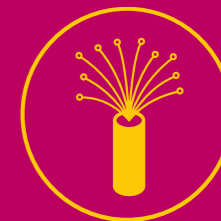
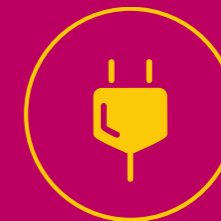
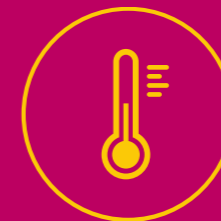


# ANWENDUNG VON MODELLEN DES MASCHINELLEN LERNENS FÜR DIE STROMTRAGFÄHIGKEITSBERECHNUNG EINES 400 KV KABELSYSTEMS UND DEREN VALIDIERUNG

Dr. Florian Ainhirn

---

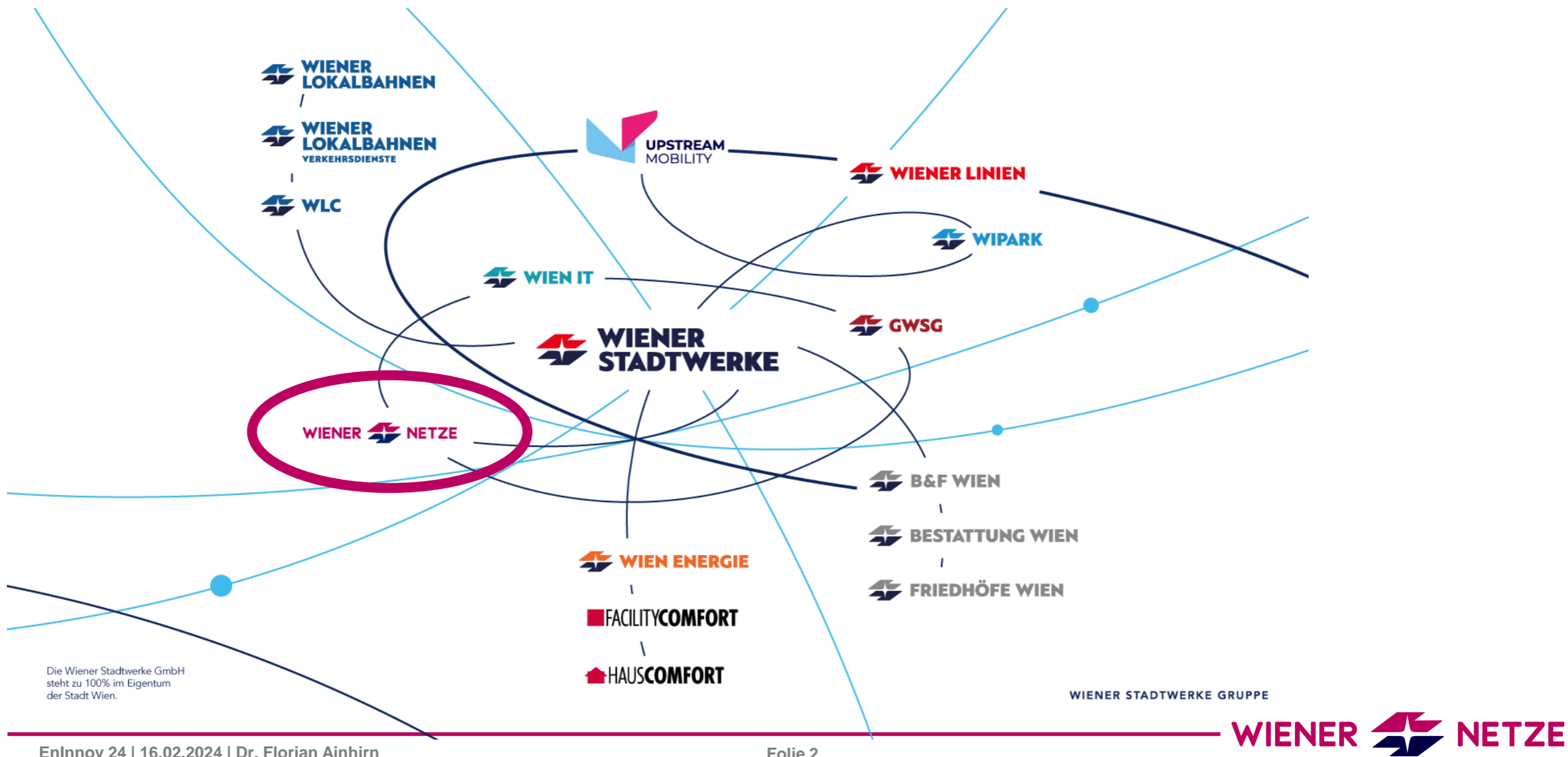
EnInnov 2024 | 16.02.2024



# AGENDA



# VORSTELLUNG



Die Wiener Stadtwerke GmbH steht zu 100% im Eigentum der Stadt Wien.

# VORSTELLUNG



**2.400 MITARBEITERINNEN** – Die Wiener Netze sind **DAS** Infrastrukturunternehmen Wiens. Die Wiener Netze sind Teil der Wiener Stadtwerke, die zu 100 Prozent im Eigentum der Stadt Wien stehen.



**> 28.500 KM LANGES NETZ** – Das entspricht einer ungefähren Länge Wien – Sydney – Wien.  
20.500 km Stromnetz, 4.700 km Gasnetz, 1.250 km Fernwärmenetz, 2.200 km Telekommunikationsnetz.



**INVESTITIONEN VON 300 MILLIONEN EURO PRO JAHR** – in den Ausbau und die Instandhaltung der Netze. 1,5 Milliarden Euro in den nächsten 5 Jahren in das Wachstum der Stadt.



**SICHERHEIT: 99,99 % ZUVERLÄSSIGKEIT** – Eines der besten und sichersten Netze weltweit.



**NACHHALTIGKEIT** – Moderne Grabungs- und Verlegemethoden von Rohren und Leitungen. Erhöhung der Energieeffizienz und Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen. 346 Millionen Euro für Projekte, die maßgeblich zum Klimaschutz und zur Nachhaltigkeit beitragen.

# VORSTELLUNG

## STROMNETZ

	Freileitung	Kabel
380 kV	37,3 km	53,4 km
110 kV	391,0 km	382,6 km
10 + 20 + 30 kV	531,9 km	5.911,4 km
1 kV	1.867,2 km	11.360,1 km
<b>Gesamt</b>	<b>2.827,4 km</b> (14 %)	<b>17.707,5 km</b> (86 %)

**SUMMEN** 20.534,9 km

Umspannwerke	46
Netzumspannerstationen	9.951
Zähler	~ 1.573.000
Durchgeleitete Menge	~ 10,77 TWh
KundInnen	~ 1.301.000

## GASNETZ

Hochdruck	522,2 km
Niederdruck	4.136,7 km

**SUMMEN** 4.658,9 km

Armaturen	152.175
Gasdruckreglerstationen	613
Hausanschlussleitungen	122.749
Zähler	~ 608.000
Durchgeleitete Menge	21,89 TWh
KundInnen	~ 569.000

## FERNWÄRMENETZ

Primär	557,2 km
Sekundär (im Eigentum von Wien Energie)	669 km
Kälte	22 km
Dampf	5,7 km

## TELEKOMMUNIKATIONSNETZ

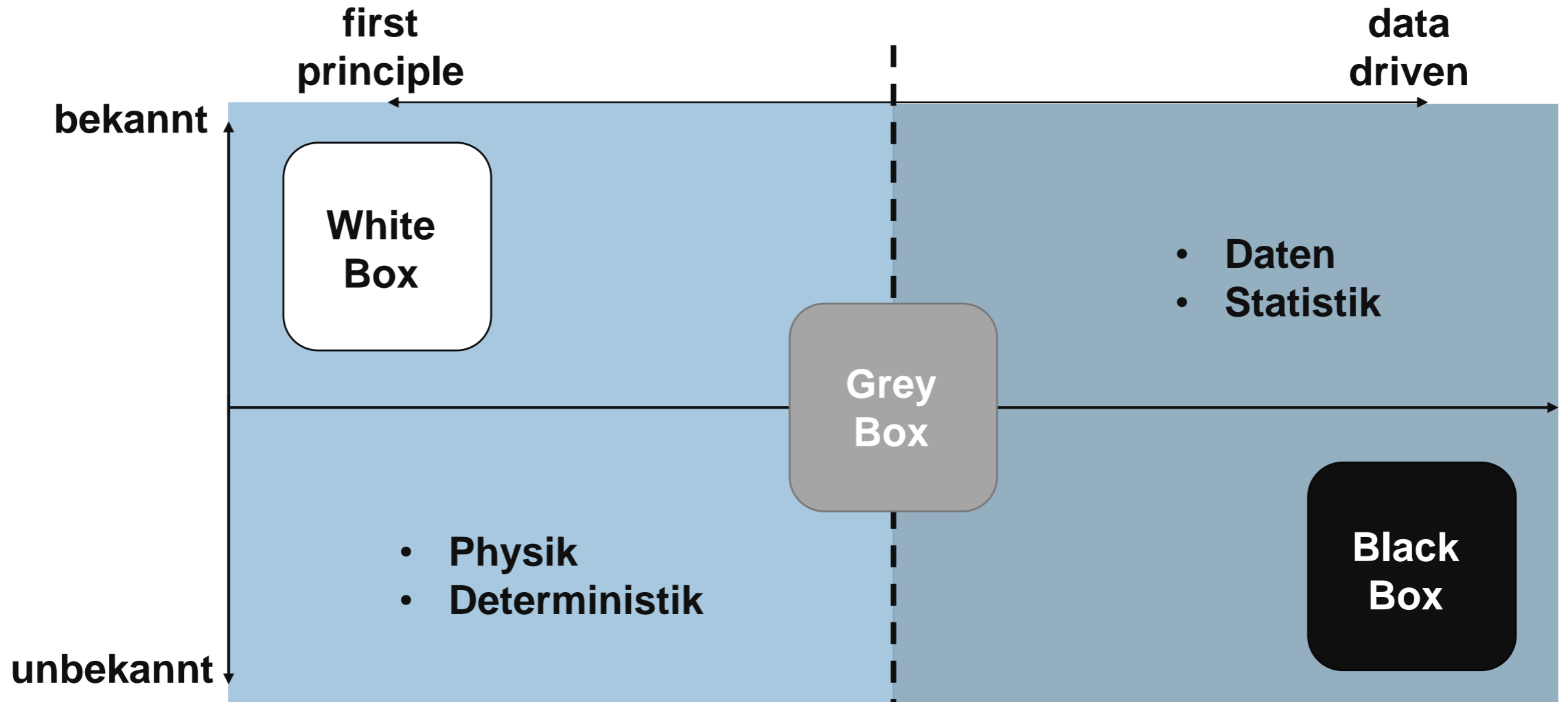
Lichtwellenleiter	2.180 km
-------------------	----------

**SUMMEN** 1.253,9 km 2.180 km

- 46 Umspannwerke
- 9.951 Netzumspannerstationen
- 1,573 Mio. Stromzähler
- 613 Gasdruckregelstationen
- 608.000 Gaszähler
- 567 Gebietsumformerstationen
- 7.329 Schächte (Primärnetz)
- 3.323 LWL-Verteilschränke
- 984 LWL-Schächte

# MOTIVATION

## MODELLIERUNGSKONZEPTE



# MOTIVATION

## MODELLIERUNGSKONZEPTE

first  
principle

data  
driven

Datenabhängigkeit	+	+++
Abhängigkeit von Fachwissen	+++	0 / +
Realitätstreue und Robustheit	++	+
Anpassungs- und Einsatzfähigkeit	+	+++
Interpretation	+++	+

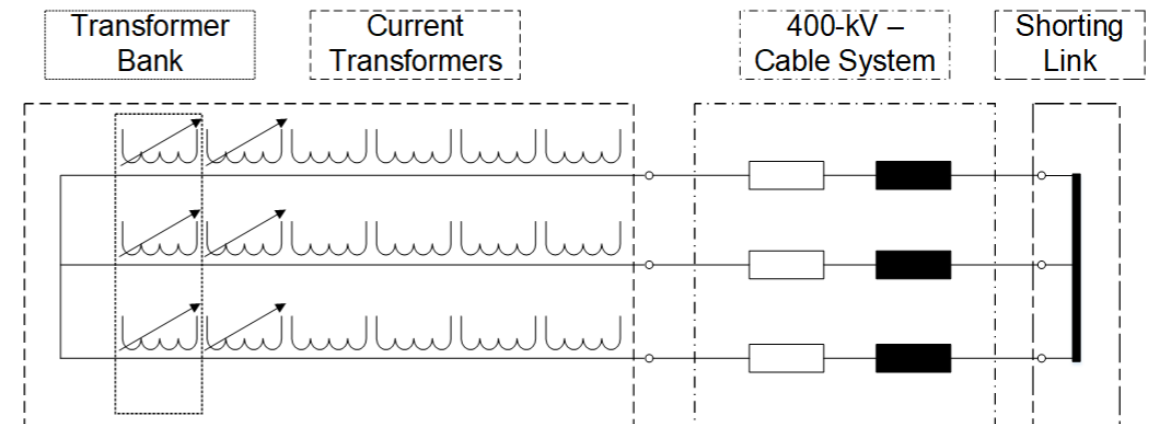
# METHODIK

## VERSUCHSAUFBAU



### 400 kV Kabelsystem

- VPE-Kabel, 2500 mm<sup>2</sup> Cu, Mil
- Verlegung im Dreieck im th. Magerbeton
- Prüfstrom bis 1850 A
- 90+ Sensoren
  - Temperatur (DTS + RTDs)
  - Bodenfeuchte
  - Klima (Strahlung, Wind, etc.)
  - I/U/P/Q
  - etc.





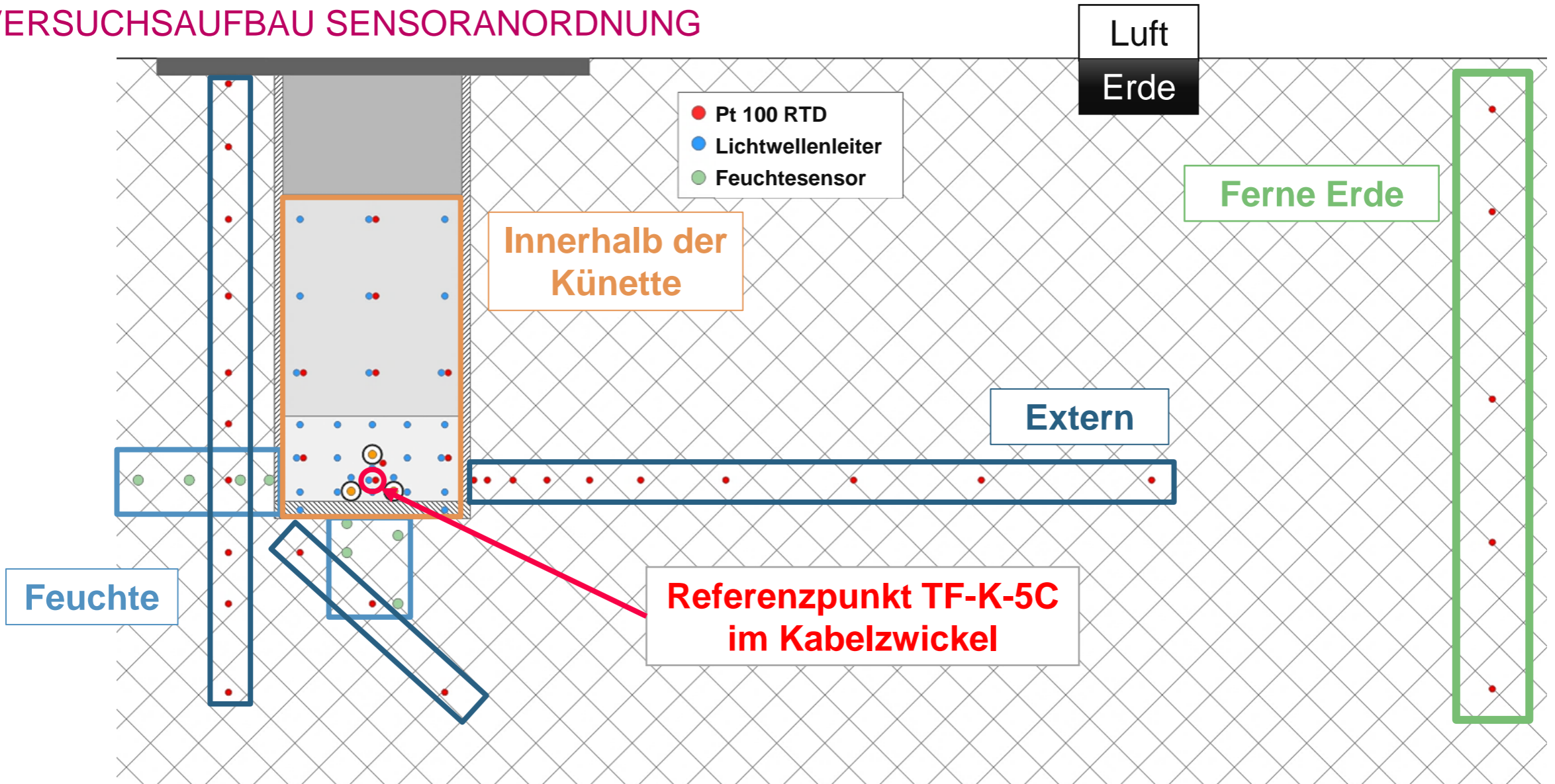
# METHODIK

## VERSUCHSAUFBAU



# METHODIK

## VERSUCHSAUFBAU SENSORANORDNUNG



# METHODIK

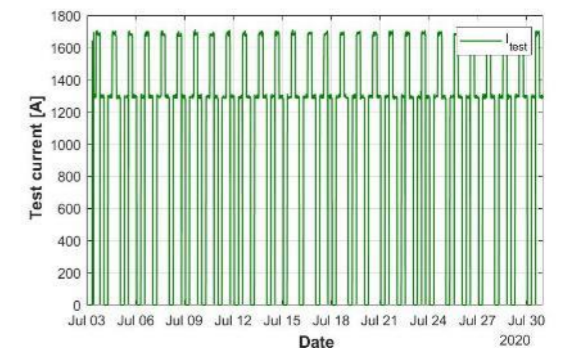
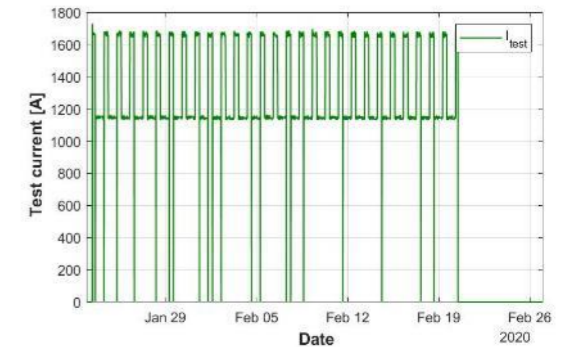
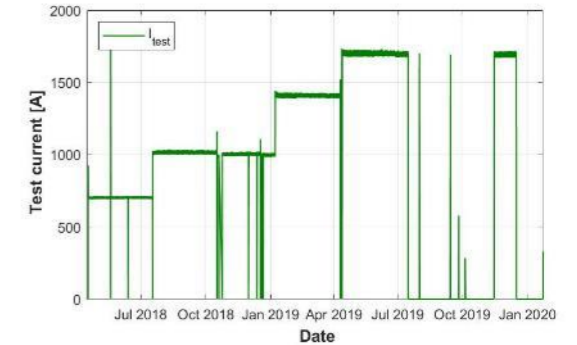
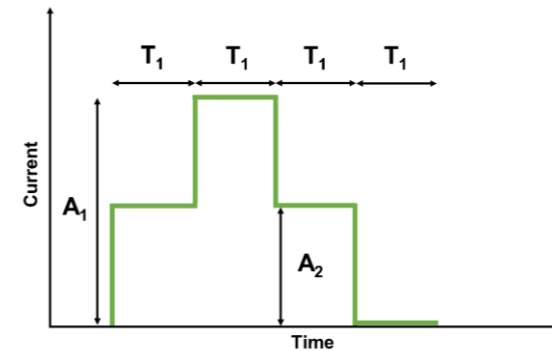
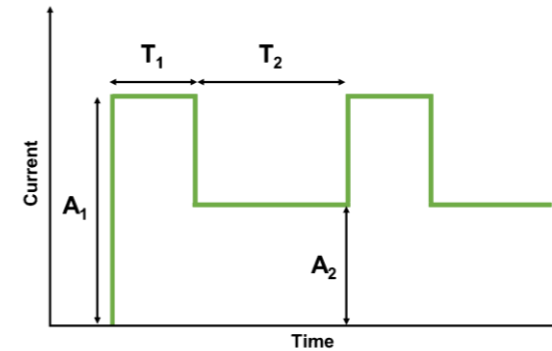
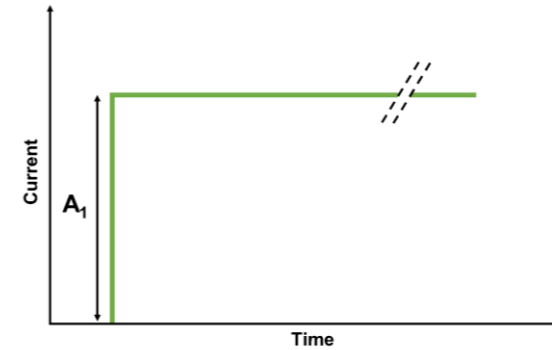
## LASTSZENARIEN

### Stationäre Lasten

- 700 A
- 1000 A
- 1400 A
- 1700 A
- Sprungantwort mit 1700 A

### Dynamische Lasten

- Multiple Stromänderungen in 24 h  
( $m = 0.46/0.63/0.7\dots$ )



# DATENANALYSE UND BERECHNUNGSMODELLE

## DATENANALYSE

Auffinden signifikanter Parameter

- Deskriptive Statistik

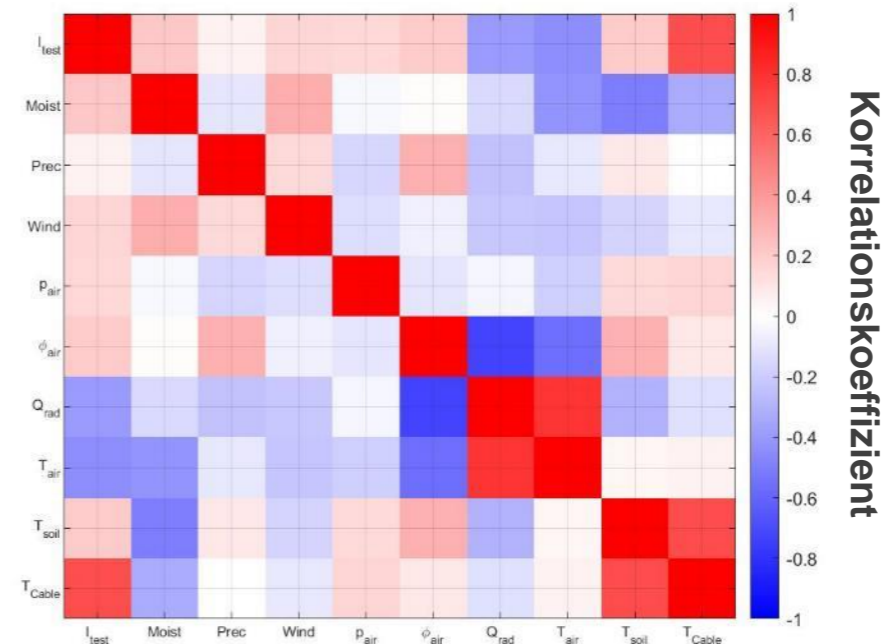
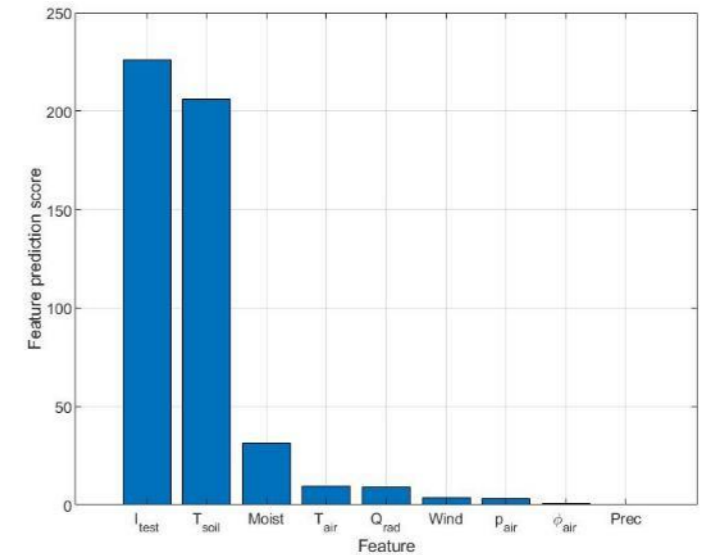
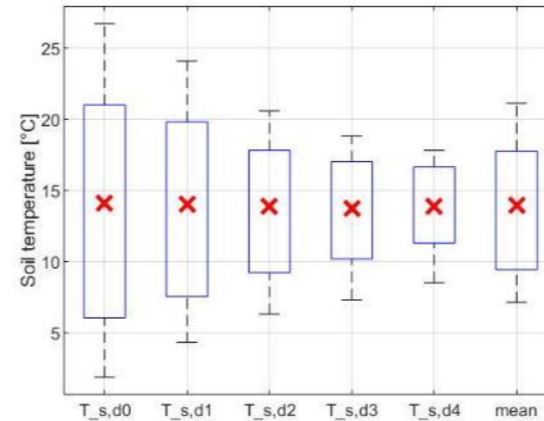
Gewichtung der Parameter

- Methode: Feature Selection

Erweiterung des Informationspools

- Öffentliche Daten, Wetterdienst, etc.

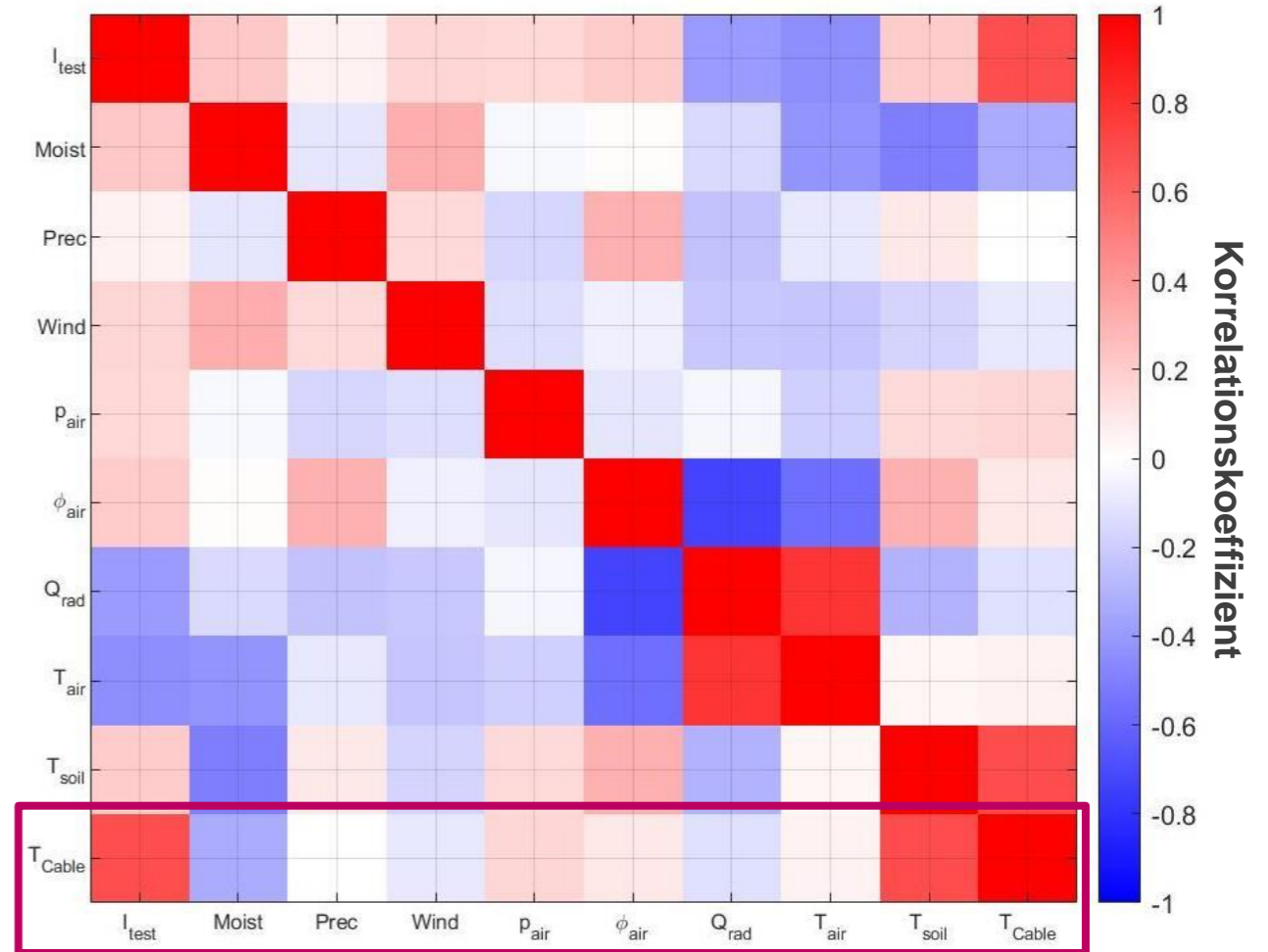
**> 70 Mio. Datenpunkte**  
**„händische“ Untersuchung**  
**schwierig / zeitintensiv**  
**→ maschinelles Lernen**



# DATENANALYSE UND BERECHNUNGSMODELLE

## DATENANALYSE

Abkürzung	Beschreibung	Einheit
$I_{\text{test}}$	Kabelstrom	[A]
Moist	Bodenfeuchte	[%]
Prec	Niederschlagsintensität	[mm/h]
Wind	Windgeschwindigkeit	[m/s]
$p_{\text{air}}$	Absoluter Luftdruck	[hPa]
$\phi_{\text{air}}$	Relative Luftfeuchte	[%]
$Q_{\text{rad}}$	Globalstrahlung	[W/m <sup>2</sup> ]
$T_{\text{air}}$	Lufttemperatur	[°C]
$T_{\text{soil}}$	Bodentemperatur	[°C]
$T_{\text{cable}}$	Kabeloberflächentemperatur	[°C]



# DATENANALYSE UND BERECHNUNGSMODELLE

## BIG DATA

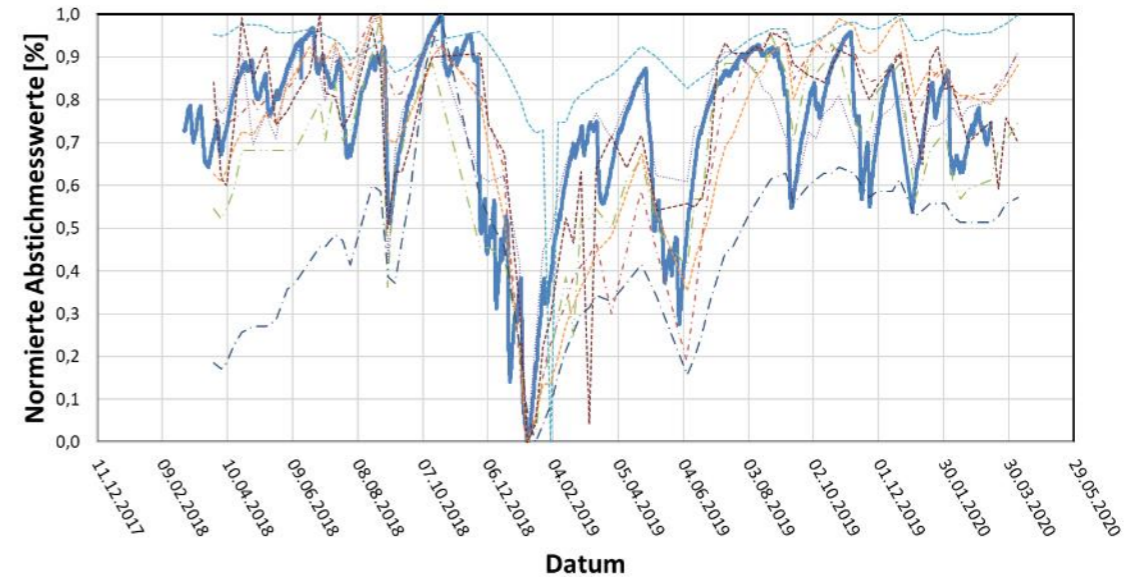
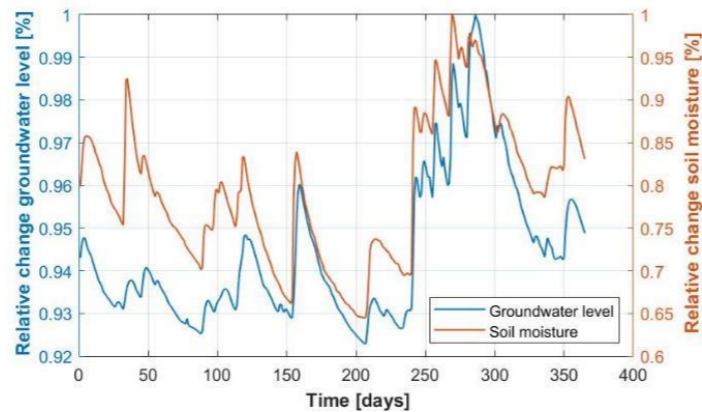
Einfluss der Bodenfeuchte auf Kabeltemperatur  
→ in kommerzieller Installation schwer zu messen

- Substituieren

Datnanalyse zeigte schwache Korrelation zu  
Umwelteinflüssen an der Erdoberfläche

- Analyse verfügbarer Untergrunddaten

Korrelation gefunden in Daten des hydrologischen Dienstes  
Wiens (MA 45) → Grundwasserspiegel



# DATENANALYSE UND BERECHNUNGSMODELLE

## KABELTEMPERATURMAPPING (NOWCASTING)

### Verwendete Algorithmen

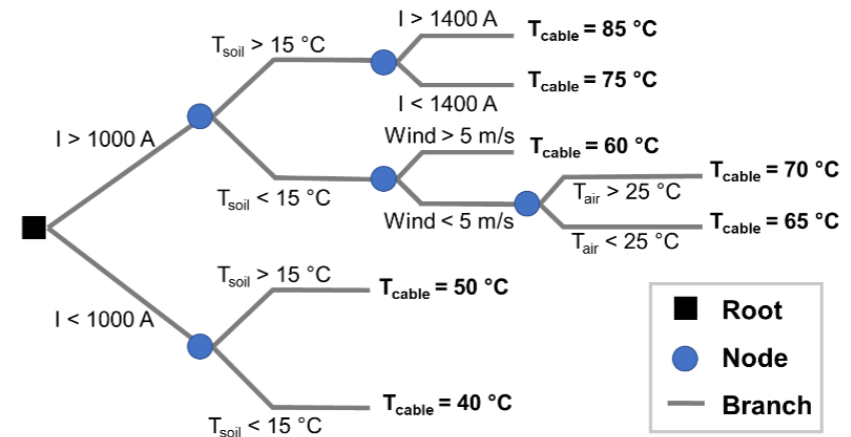
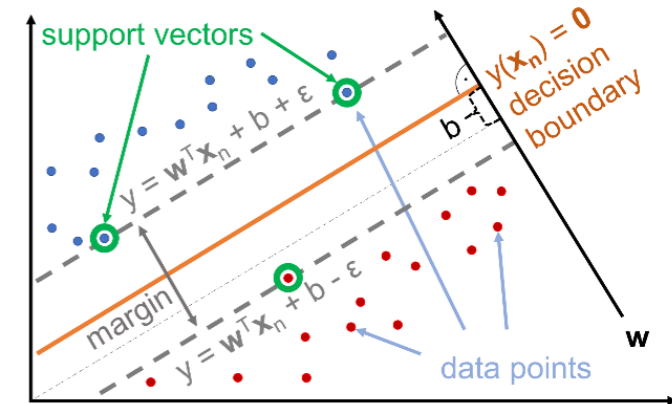
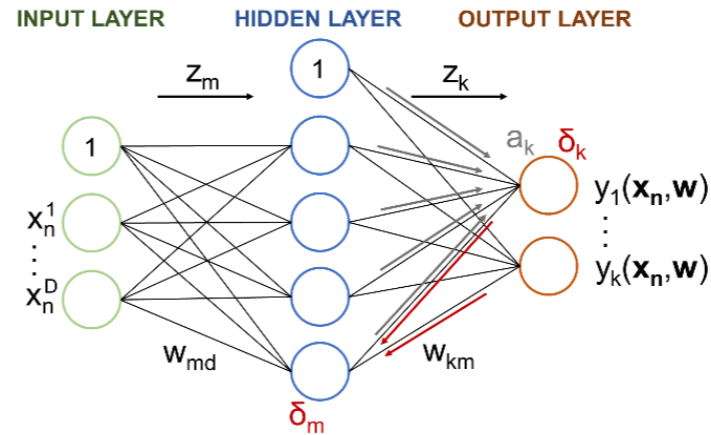
- Decision Trees
- Support Vector Machines
- Neural Networks

### Merkmale für Training

- Klimatische Daten
- Bodendaten
- Belastungsdaten
- Zielwert → Referenzpunkt in Kabelsystemmitte

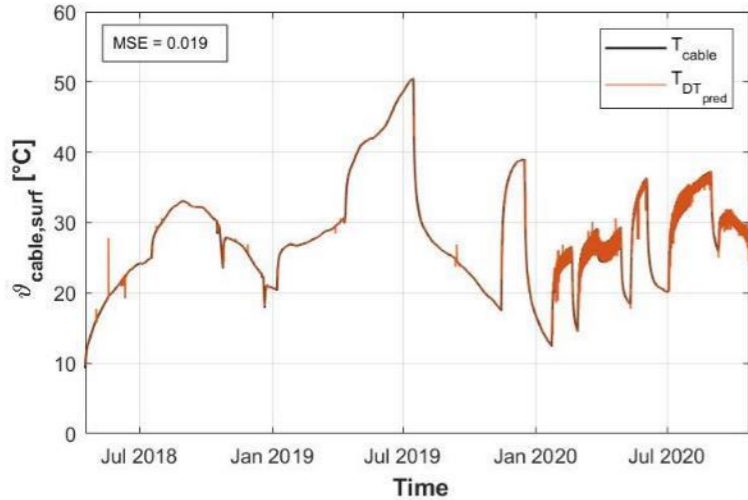
### Merkmale für Prognosen

- Klimadaten
- Bodendaten
- Belastungsdaten

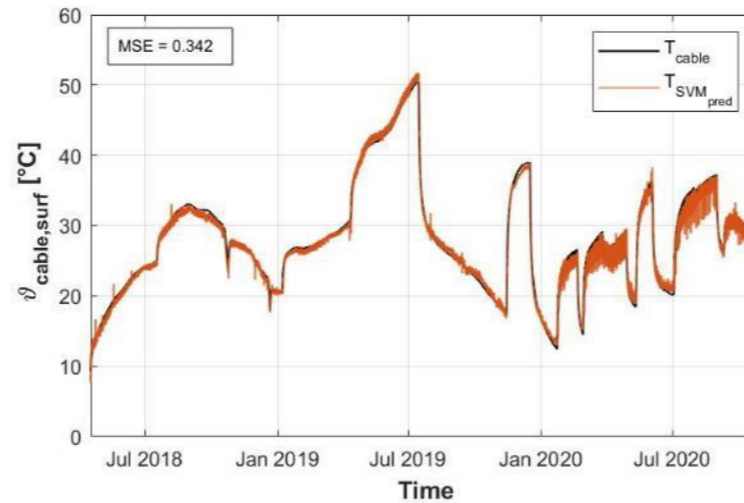
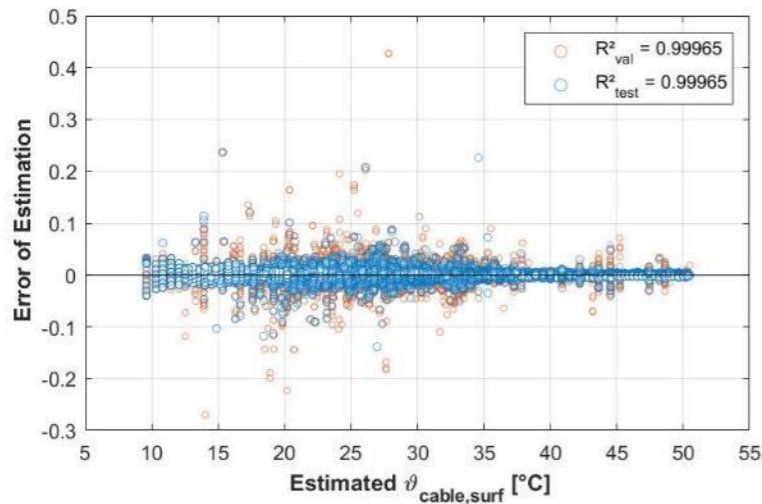


# DATENANALYSE UND BERECHNUNGSMODELLE

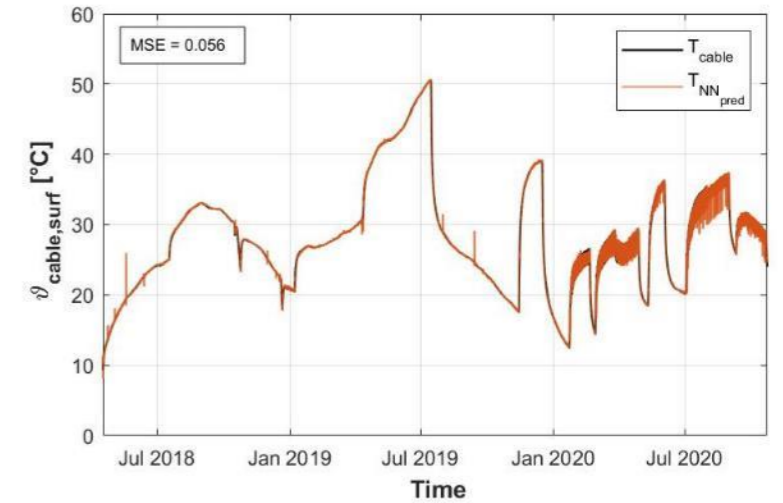
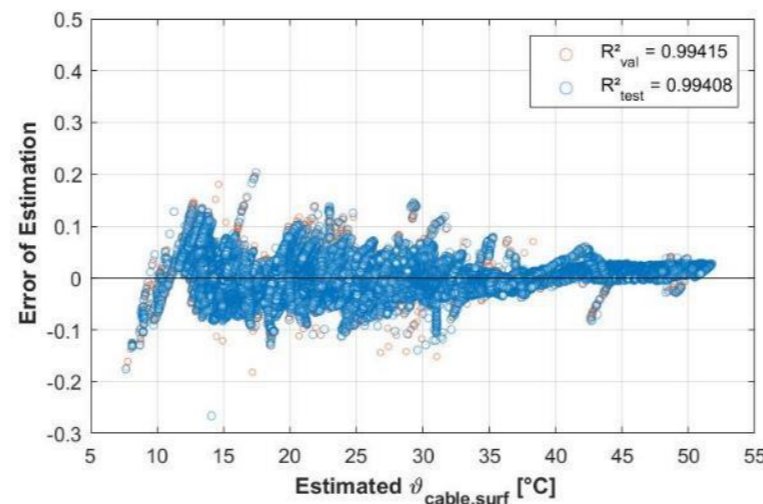
## KABELTEMPERATURMAPPING (NOWCASTING)



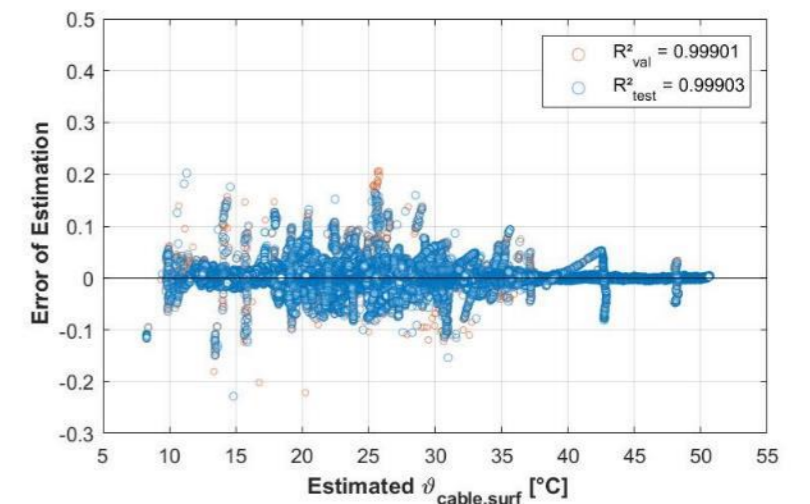
**Decision Tree**



**Support Vector Machine**



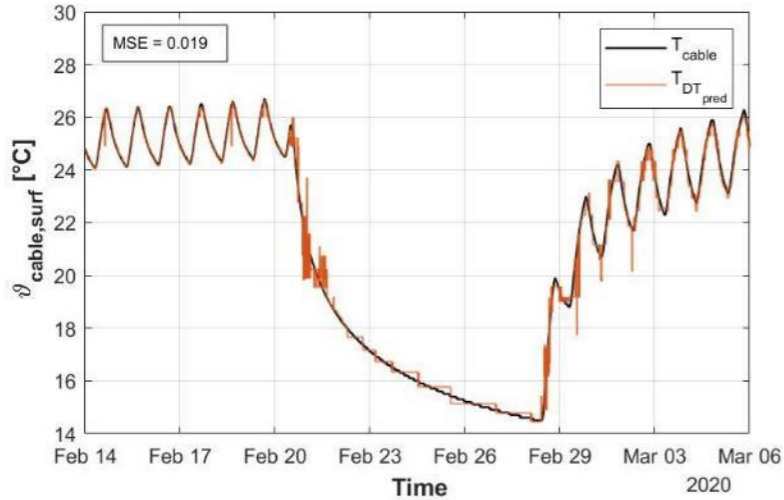
**Neural Network**



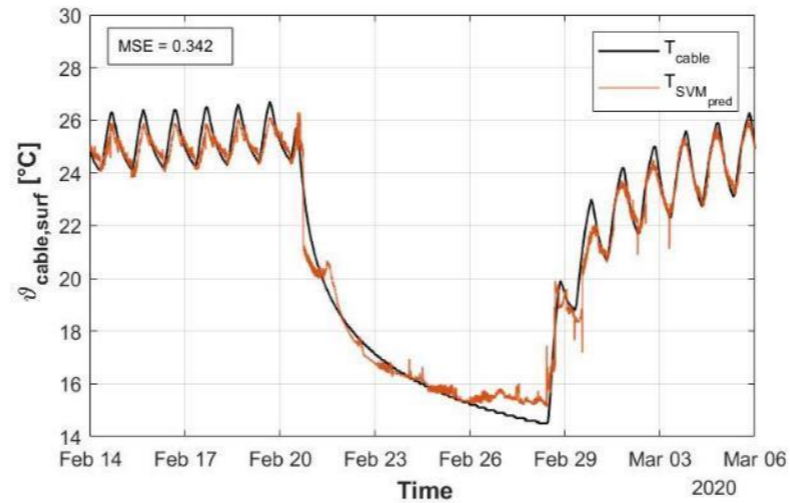


# DATENANALYSE UND BERECHNUNGSMODELLE

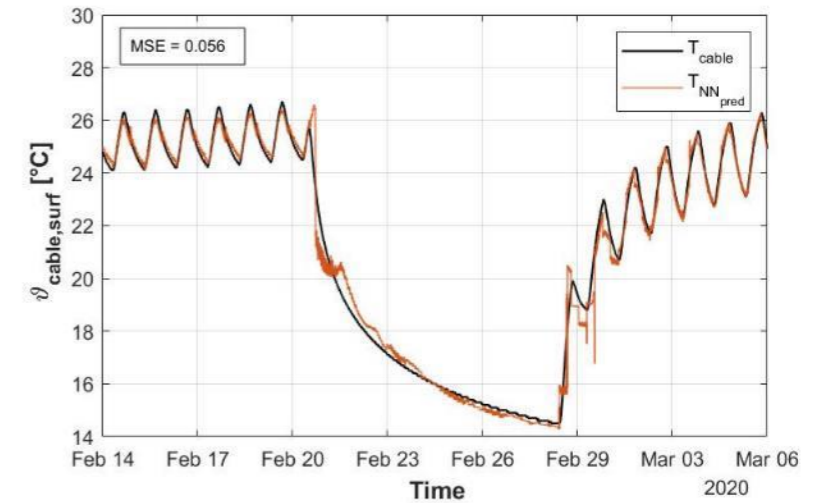
## KABELTEMPERATURMAPPING (NOWCASTING)



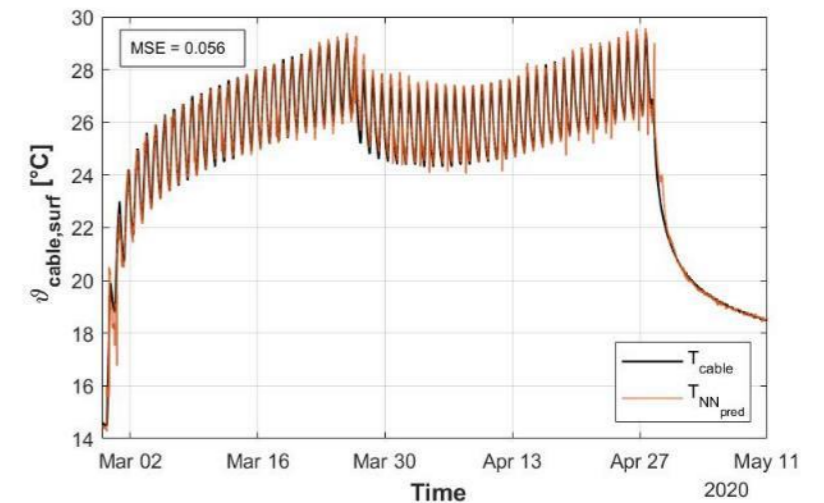
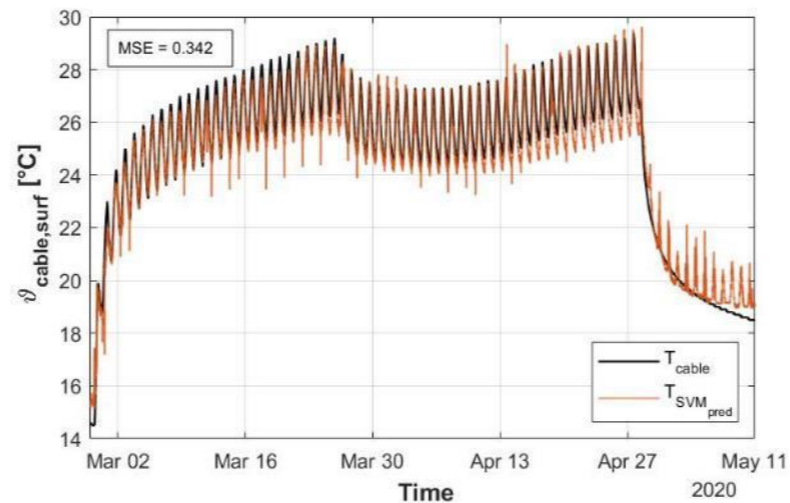
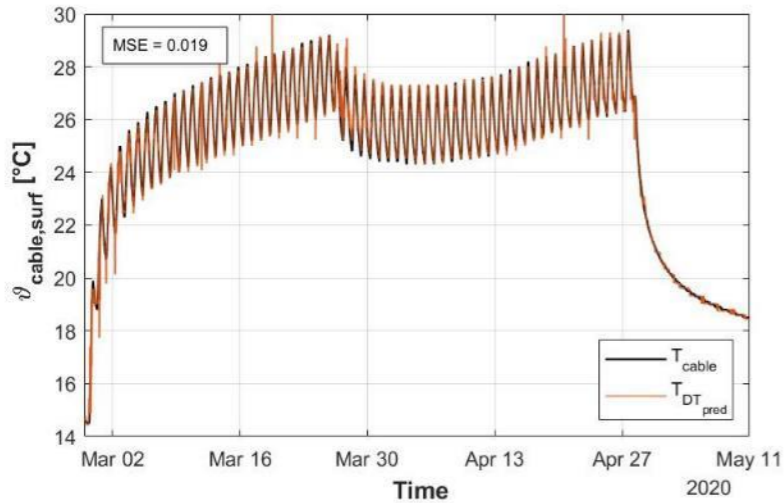
**Decision Tree**



**Support Vector Machine**



**Neural Network**

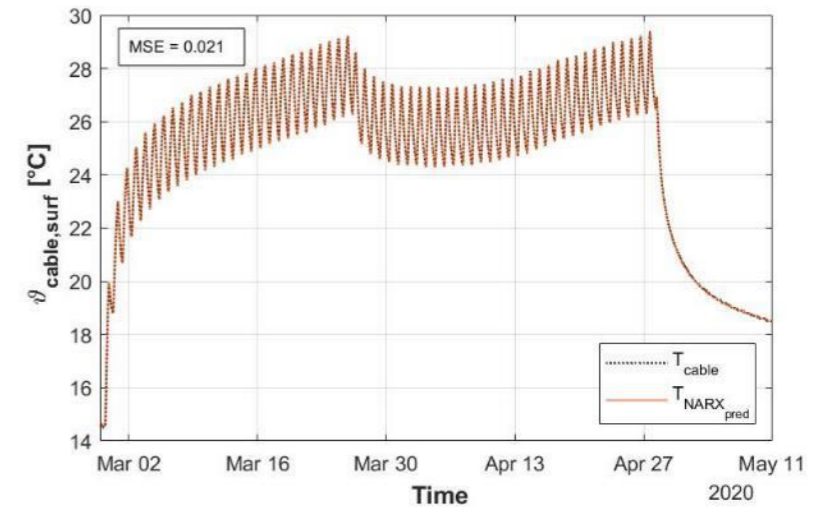
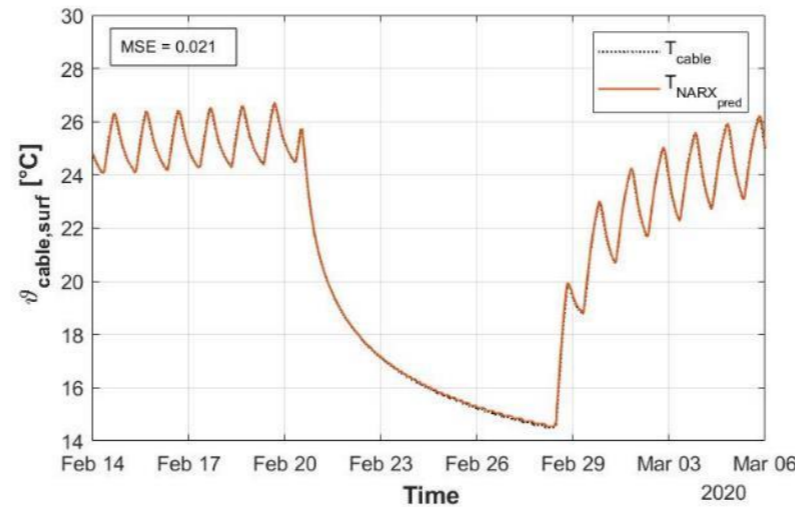
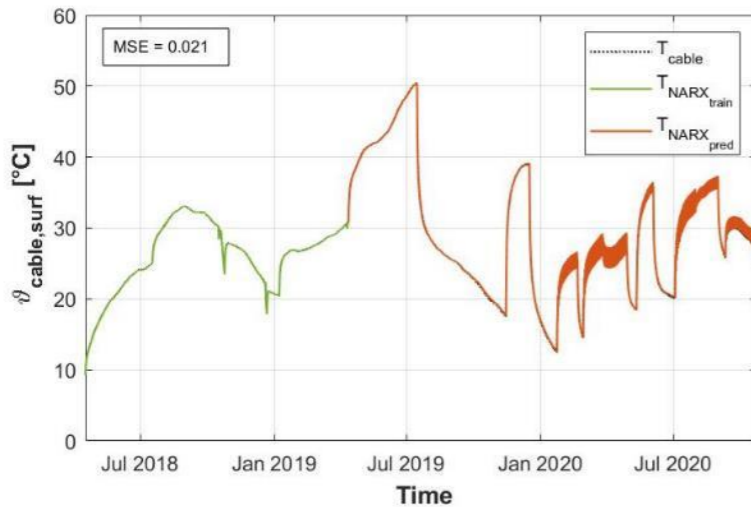
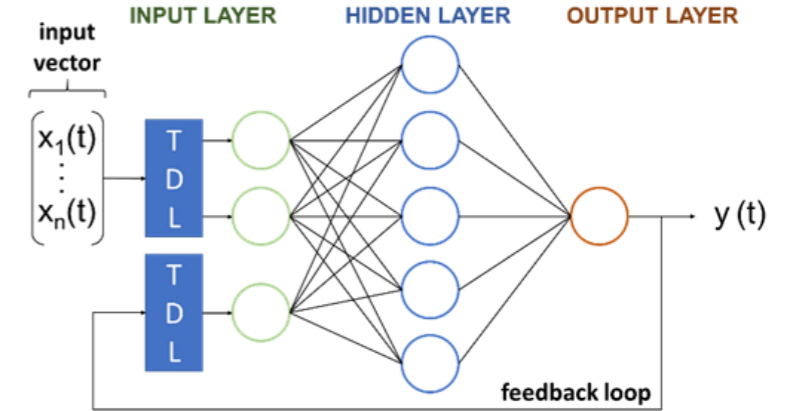


# DATENANALYSE UND BERECHNUNGSMODELLE

## ZEITREIHENMODELLE

Erweiterung des Neuronales Netzwerks um Rückkopplung und Zeitverzögerung (TDL) → Recurrent Neural Network (non-linear autoregressive exogenous neural network)

- Berücksichtigung der temporalen Komponente für alle Eingänge **und** Ausgänge (Zeitreihenmodell)
- Netzwerk lernt mit fortschreitendem Betrieb dazu

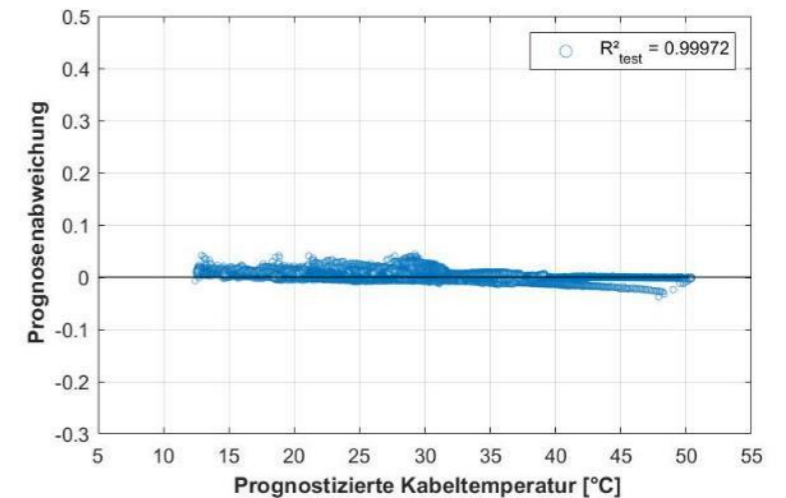
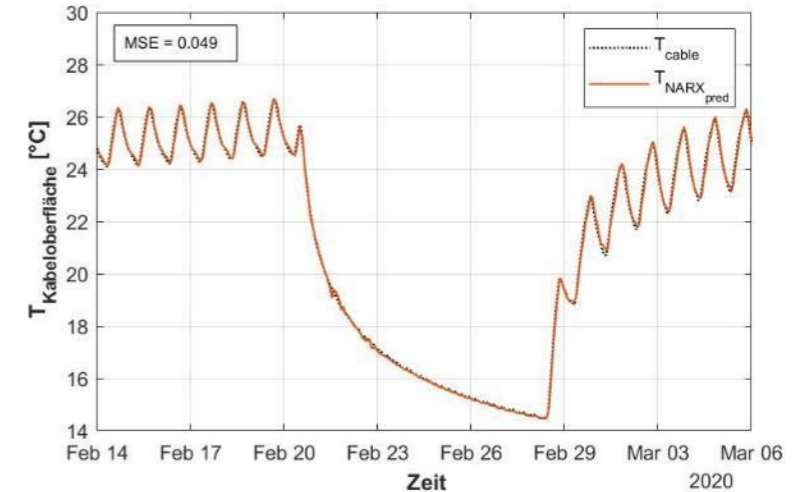
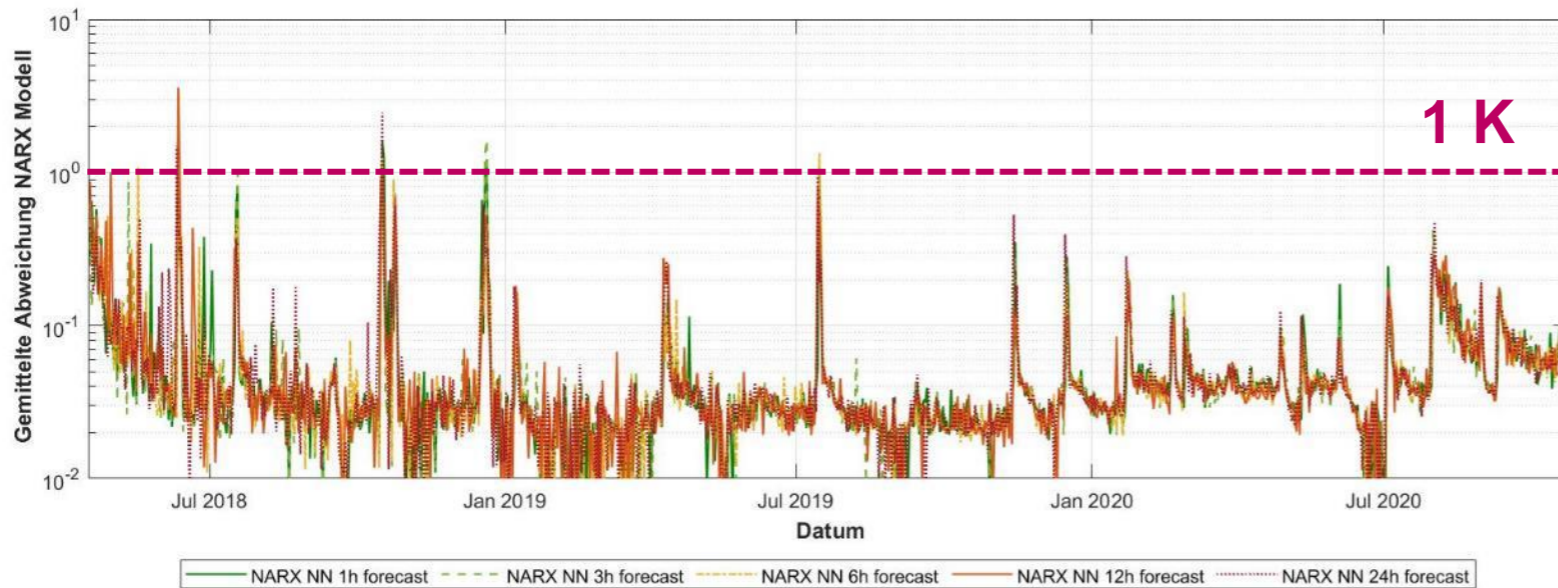


# DATENANALYSE UND BERECHNUNGSMODELLE

## VORHERSAGEMODELLE (FORECASTING)

Vorhersagemodelle für die Kabeltemperatur für die Vorhersagehorizonte von 1, 3, 6, 12 und 24 Stunden (intra-day).

- Diverse Algorithmen untersucht
- 99,67 % der Abweichungen < 1 K mit Neuronalem Netz
- Echtzeitfähig

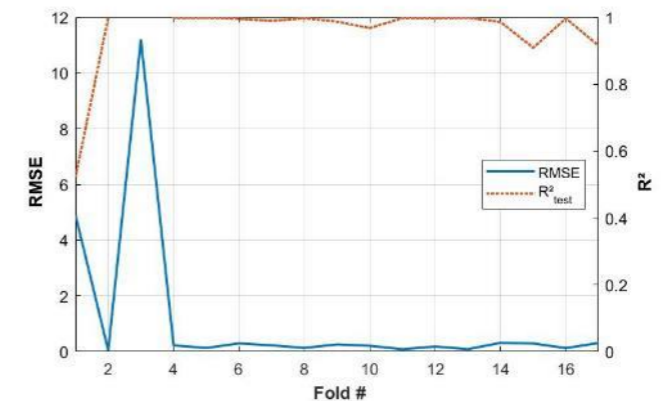
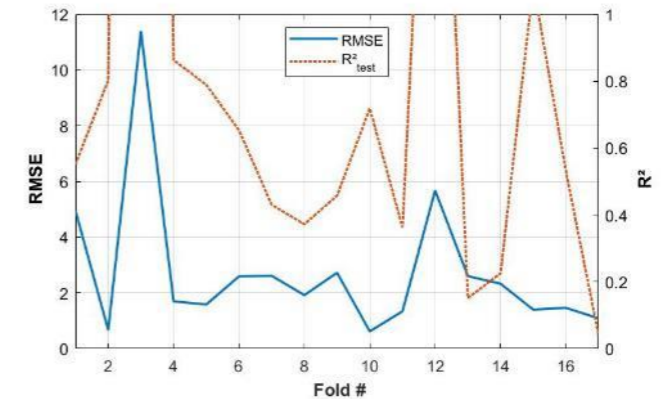


# VALIDIERUNG METHODEN

- 5-fold cross validation
- Rolling origin cross validation
- Variationen der Abtastraten
- Load-Fold validation



Schlechte Performance ohne temporale Komponente



Gute Performance mit temporalen Komponente

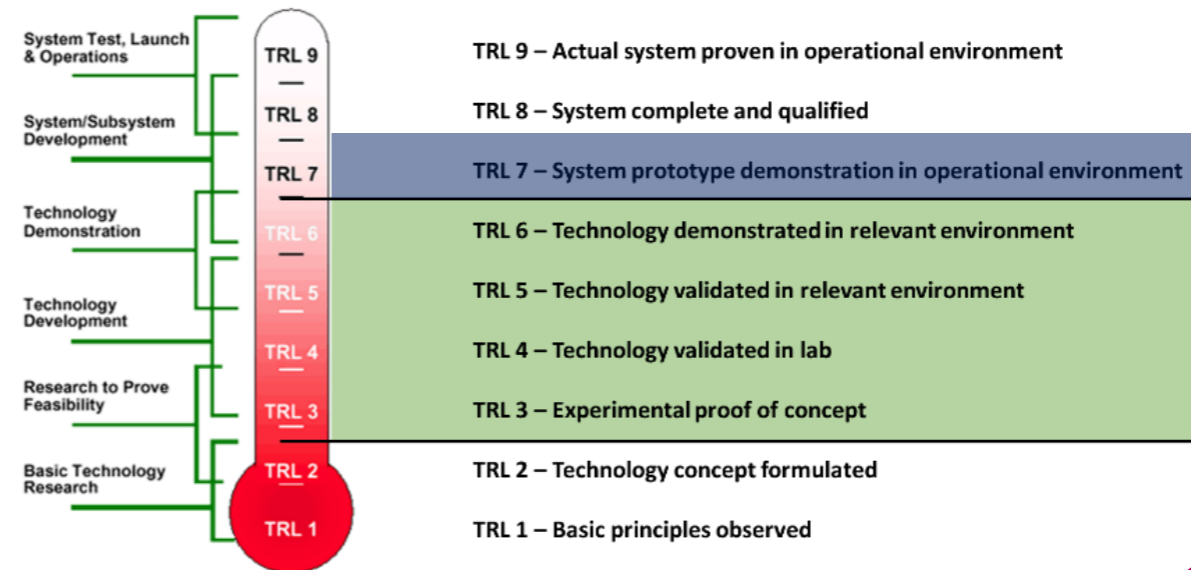
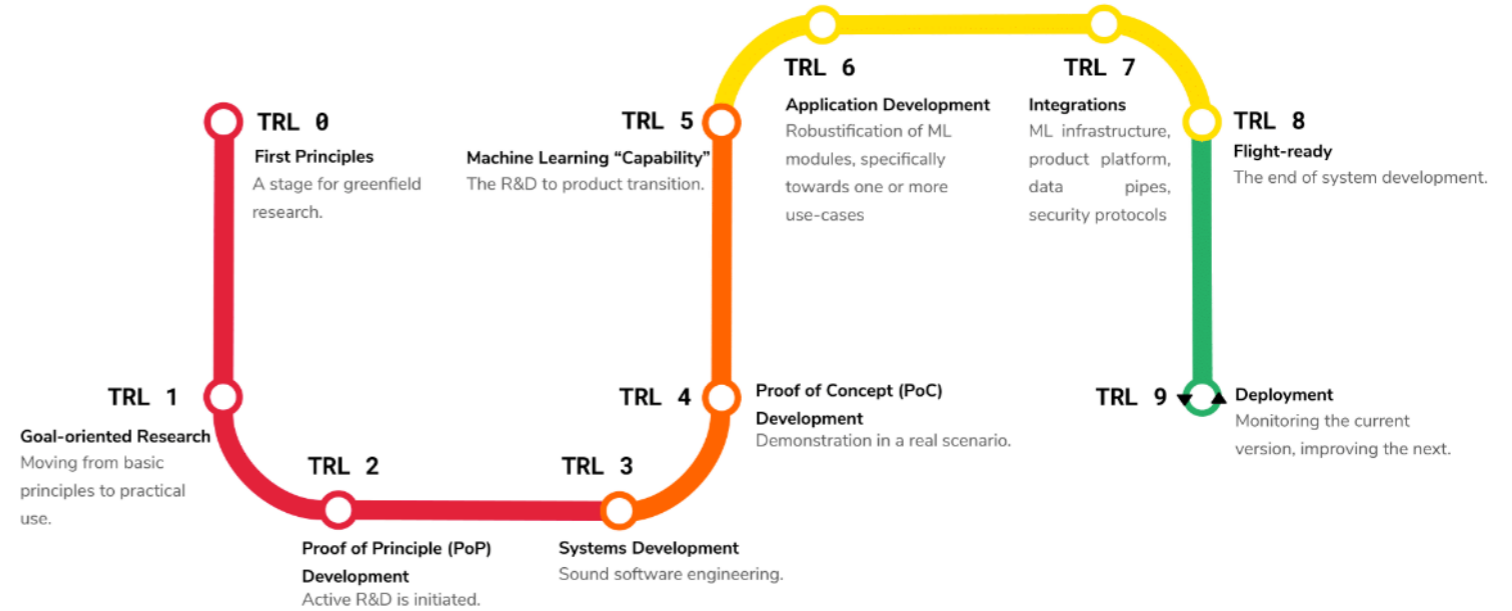
# VALIDIERUNG AUSBLICK

Präsentierte Ergebnisse beschränkt auf:

- eine Verlegeanordnung
- ein einzelnes DTS-Segment
- theoretische Lasten
- kein Deep-Learning

Laufende weiterführende Schritte:

- Installation an operativem 380 kV - System
- 5,2 km DTS-Strecke
- Betriebslasten
- inkl. Deep-Learning



# ZUSAMMENFASSUNG

Ein 380 kV Kabelsystem wurde von den Wiener Netzen unter realen Verlegebedingungen mehrere Jahre betrieben, wobei stationäre und dynamische Belastungen durchgeführt wurden. In dieser Zeit erfolgte

- Aufzeichnung von über 90 Parameter wie Temperaturen, elektrischen Größen und Klimadaten.
- Einbindung externer Datenquellen → Wetterdaten, hydrologische Daten, etc.
- Datenanalyse der Parameter im Hinblick auf die resultierende Kabeltemperatur
  - Identifizierung und Gewichtung der Einflussfaktoren für Stromtragfähigkeit
- Erstellung diverser datengetriebener Modelle auf Basis des maschinellen Lernens
  - Kabeltemperaturmapping (Nowcasting), Zeitreihen- und Vorhersagemodelle (Forecasting)
  - Erzielte Genauigkeit > 99% sogar für Intraday Forecasts bis 24 h
- Eigene Validierungsmethodik
  - Temporale Komponente entscheidend, aber auch in Nicht-Zeitreihenmodelle integrierbar

# ANWENDUNG VON MODELLEN DES MASCHINELLEN LERNENS FÜR DIE STROMTRAGFÄHIGKEITSBERECHNUNG EINES 400 KV KABELSYSTEMS UND DEREN VALIDIERUNG

**Dr. Florian Ainhirn** | Experte Hochspannungskabeltechnologie

[florian.ainhirn@wienernetze.at](mailto:florian.ainhirn@wienernetze.at)

---

EnInnov 2024 | 16.02.2024

