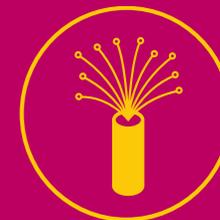
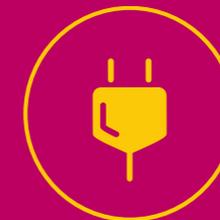
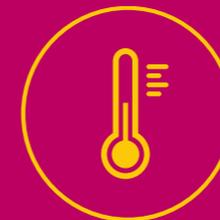


ANWENDUNG VON MODELLEN DES MASCHINELLEN LERNENS FÜR DIE STROMTRAGFÄHIGKEITSBERECHNUNG EINES 400 KV KABELSYSTEMS UND DEREN VALIDIERUNG

Dr. Florian Ainhirn

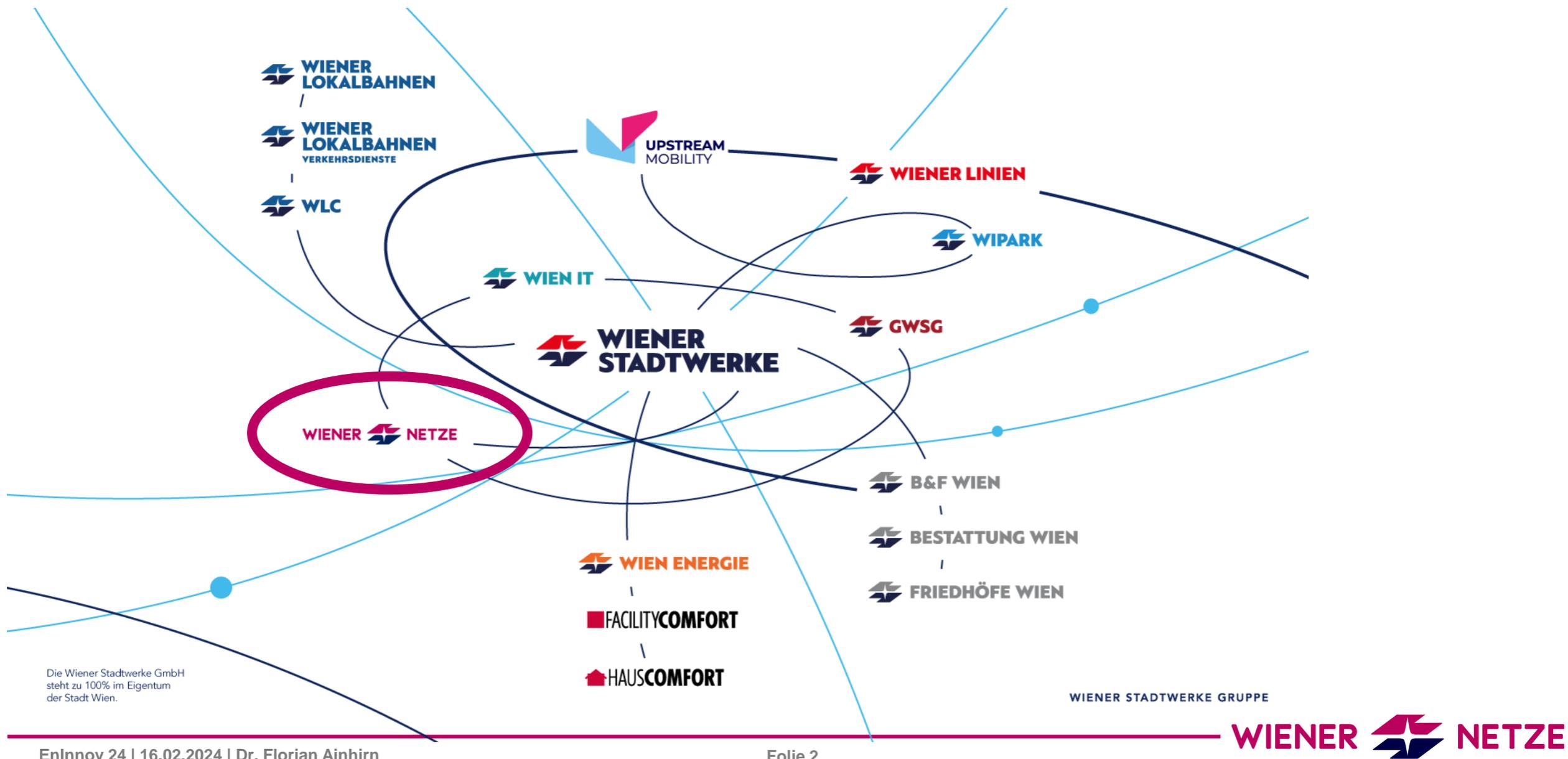
EnInnov 2024 | 16.02.2024



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 CO₂-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
Gesamt	2.827,4 km (14 %)	17.707,5 km (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

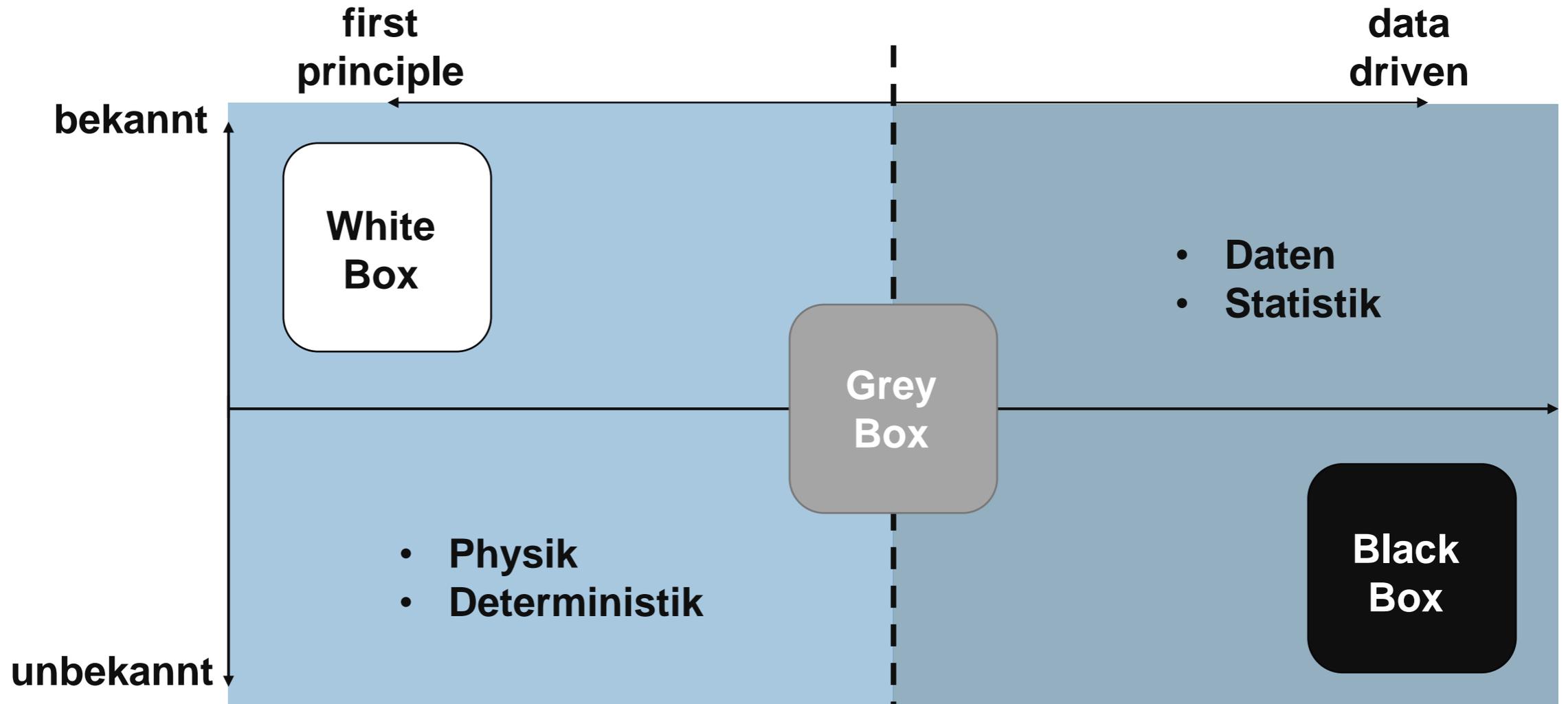
Lichtwellenleiter	2.180 km
-------------------	----------

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	+++	+

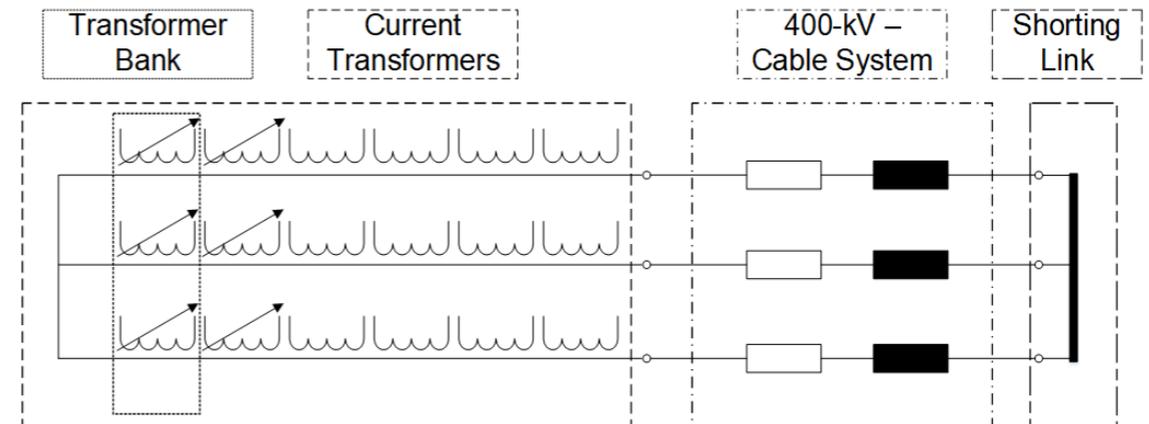
METHODIK

VERSUCHSAUFBAU



400 kV Kabelsystem

- VPE-Kabel, 2500 mm² 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.



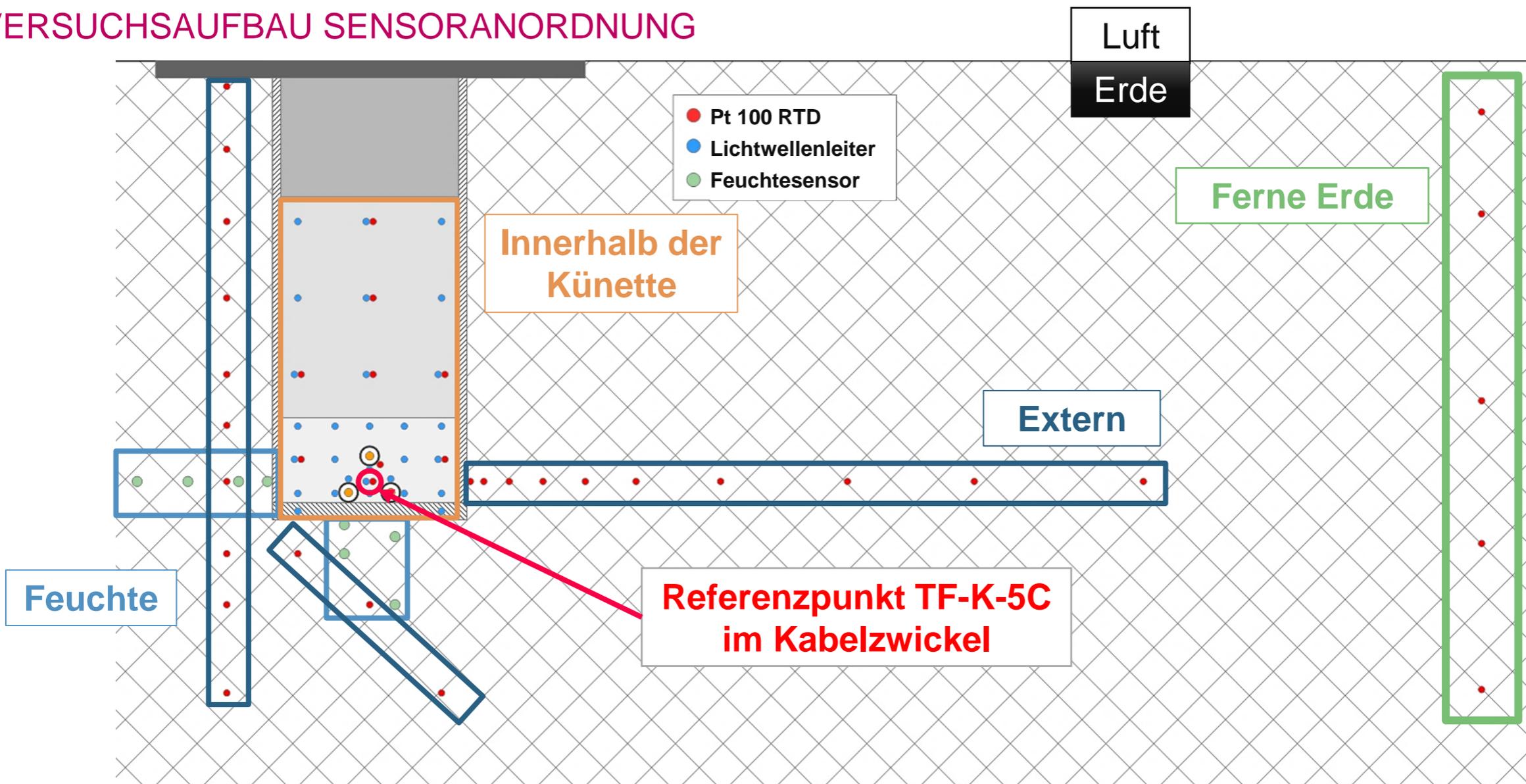
METHODIK

VERSUCHSAUFBAU



METHODIK

VERSUCHSAUFBAU SENSORANORDNUNG



METHODIK

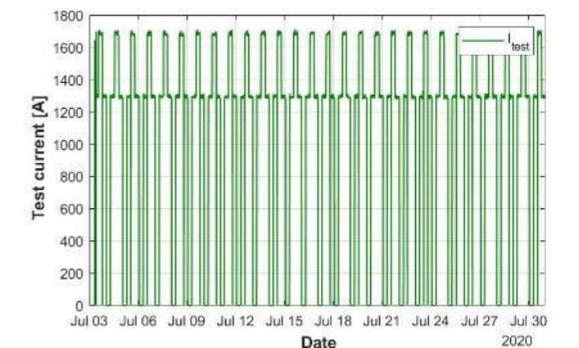
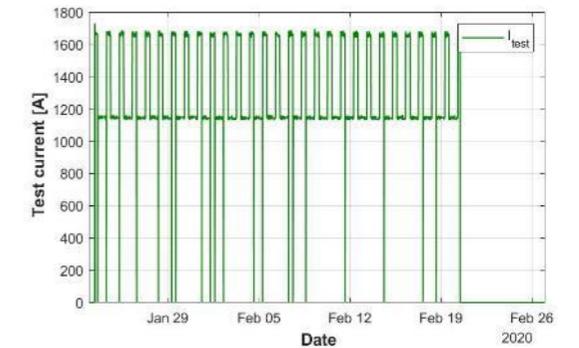
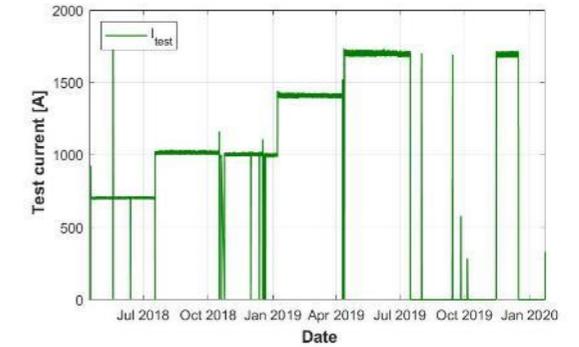
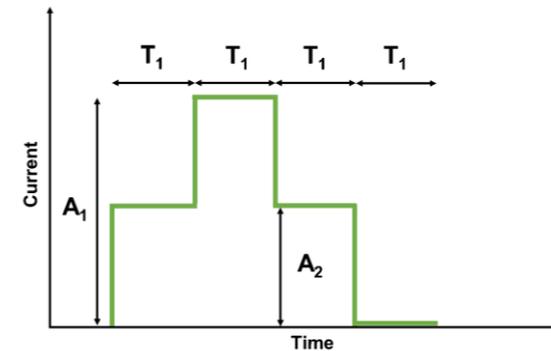
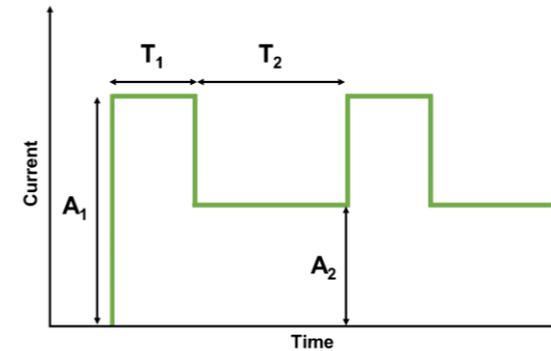
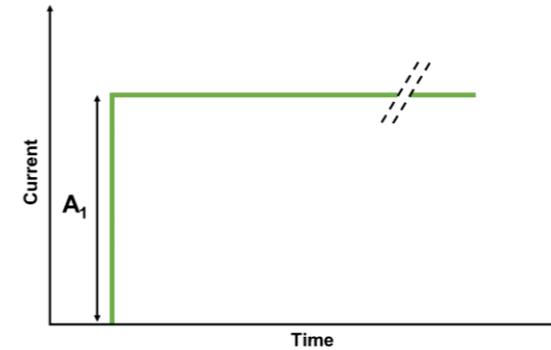
LASTSZENARIEN

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

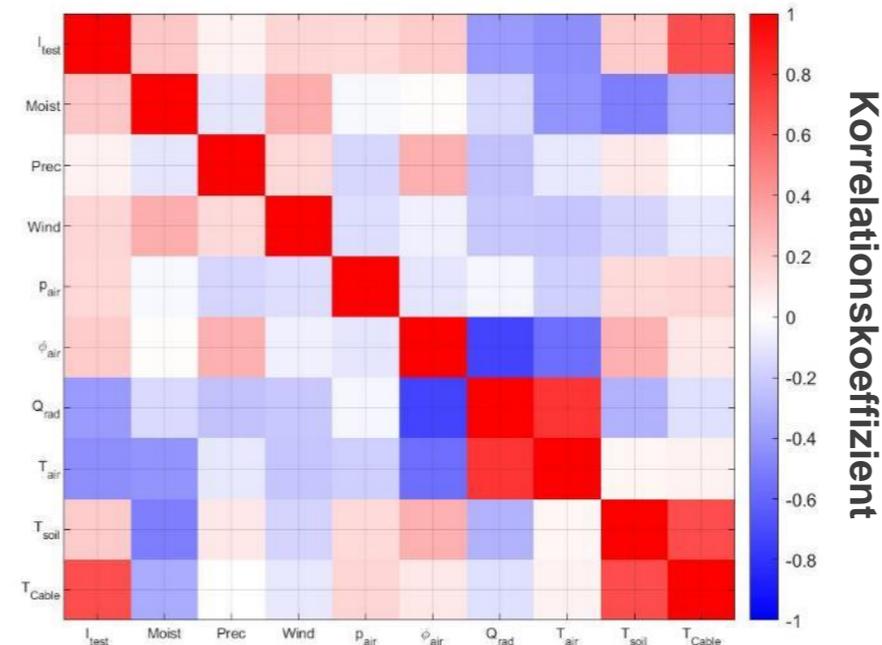
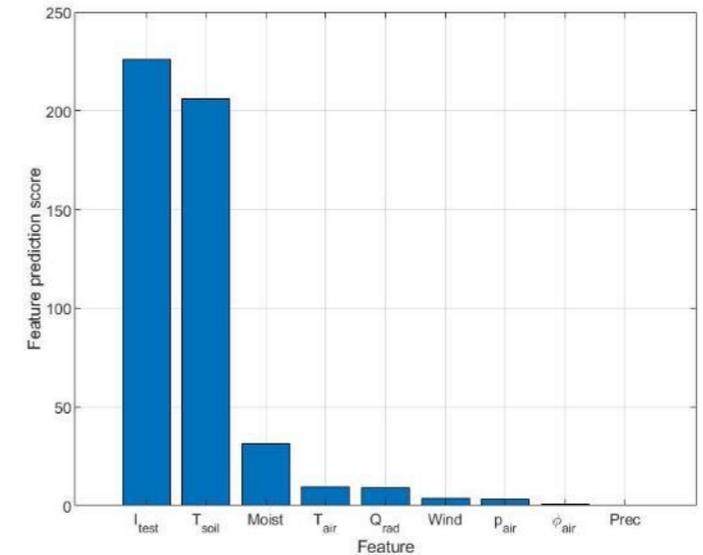
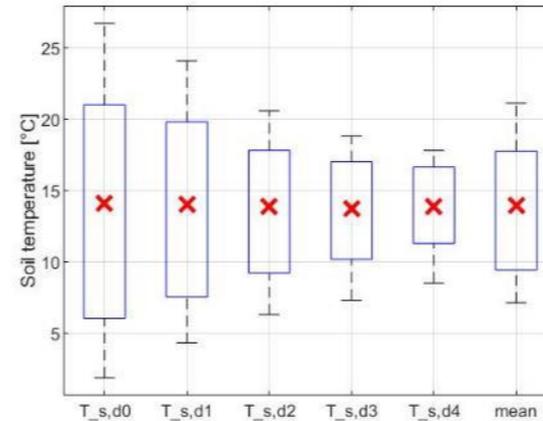
Gewichtung der Parameter

- Methode: Feature Selection

Erweiterung des Informationspools

- Öffentliche Daten, Wetterdienst, etc.

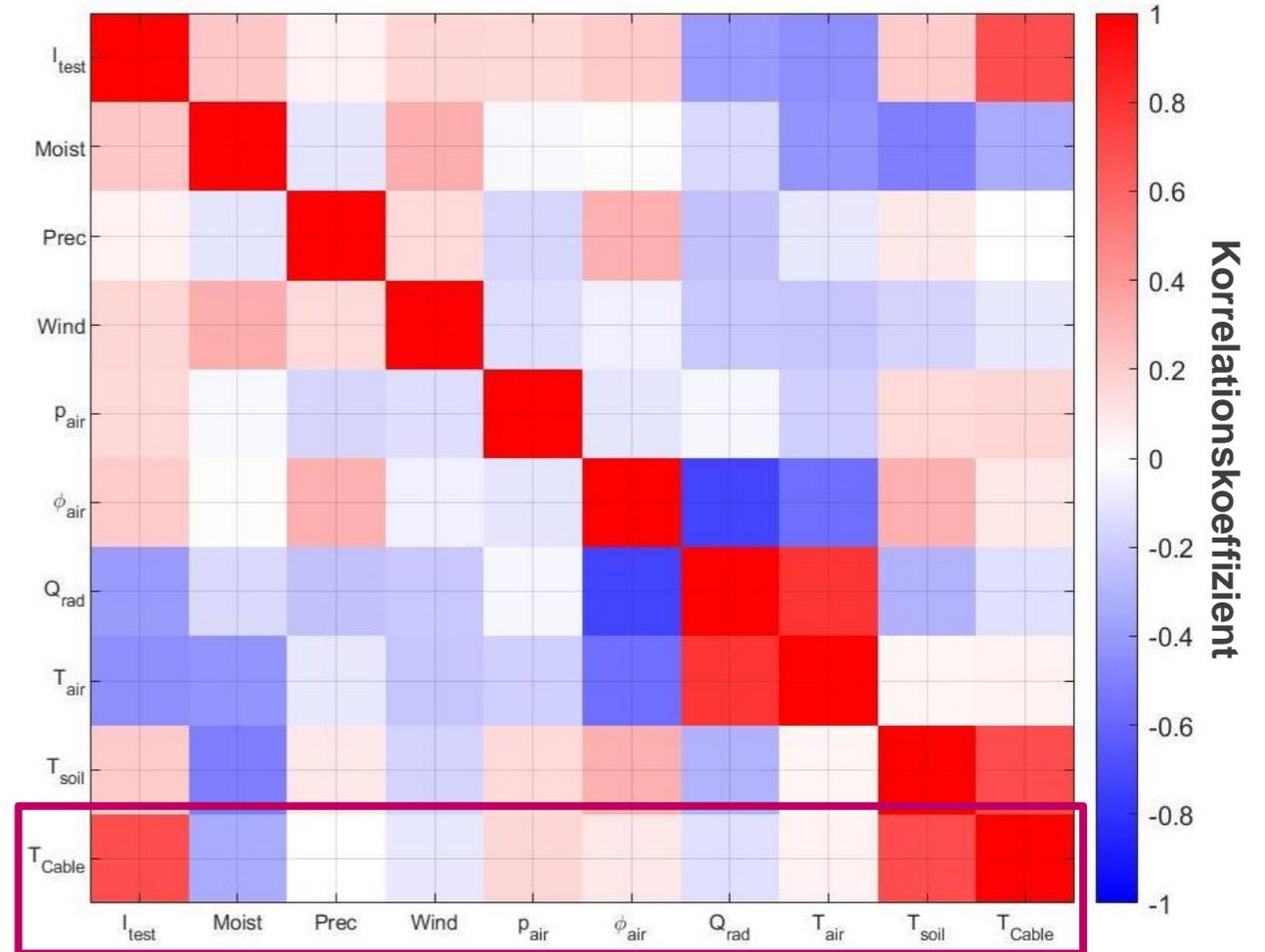
> 70 Mio. Datenpunkte
„händische“ Untersuchung
schwierig / zeitintensiv
→ maschinelles Lernen



DATENANALYSE UND BERECHNUNGSMODELLE

DATENANALYSE

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



DATENANALYSE UND BERECHNUNGSMODELLE

BIG DATA

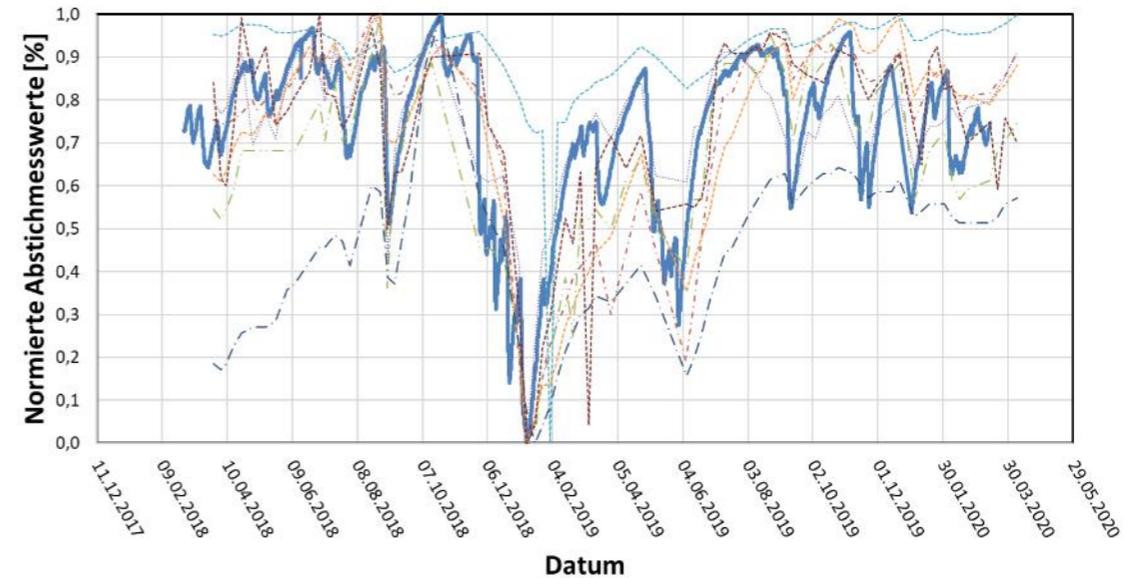
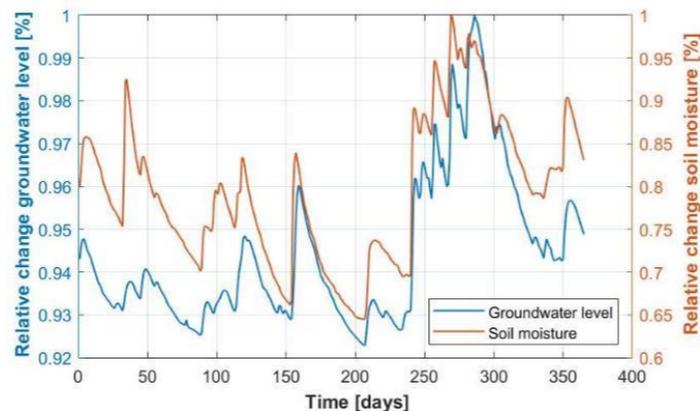
Einfluss der Bodenfeuchte auf Kabeltemperatur
→ in kommerzieller Installation schwer zu messen

- Substituieren

Datanalyse 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

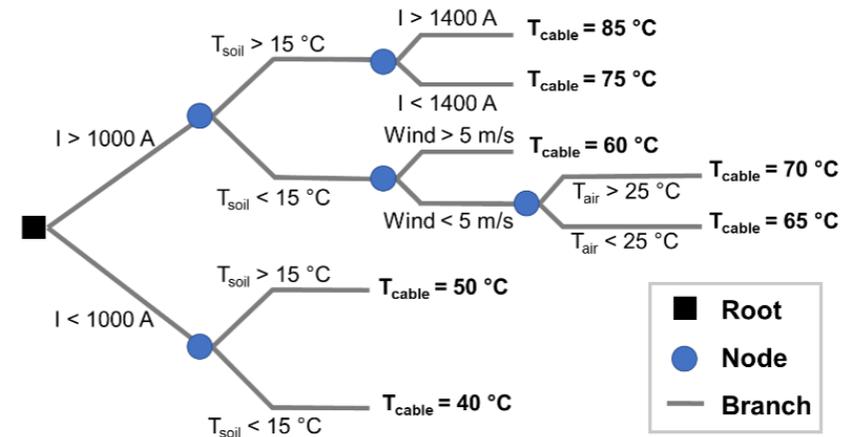
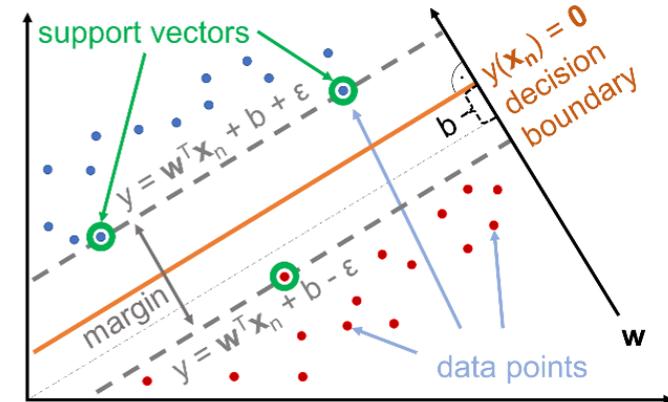
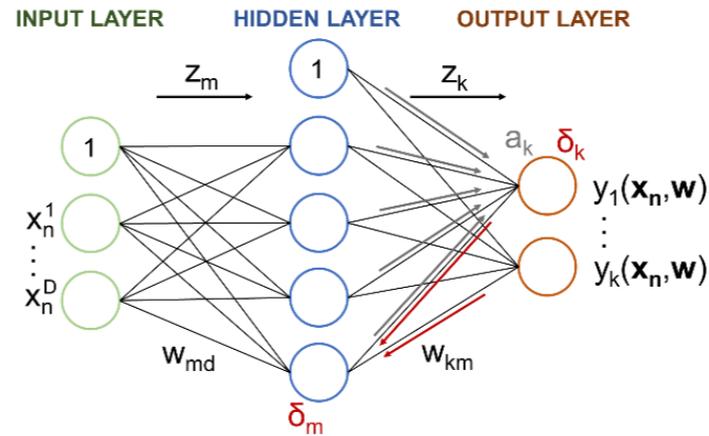
- Decision Trees
- Support Vector Machines
- Neural Networks

Merkmale für Training

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

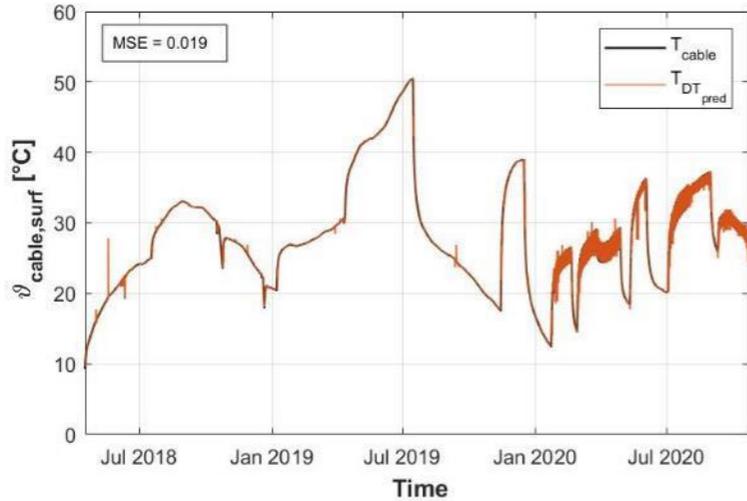
Merkmale für Prognosen

- Klimadaten
- Bodendaten
- Belastungsdaten

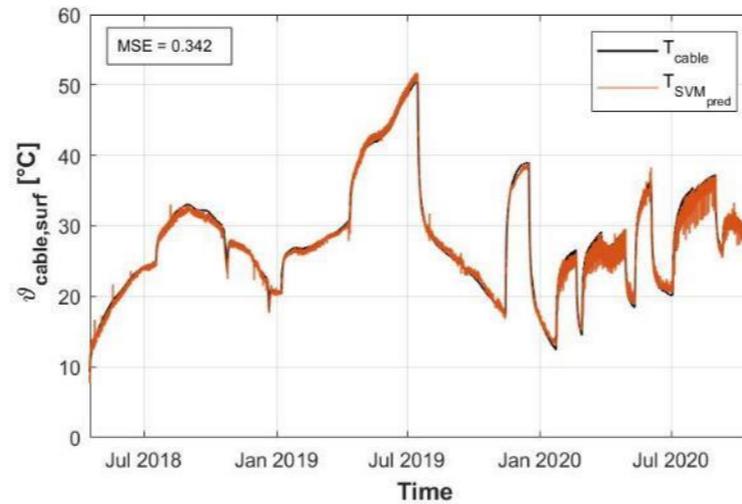
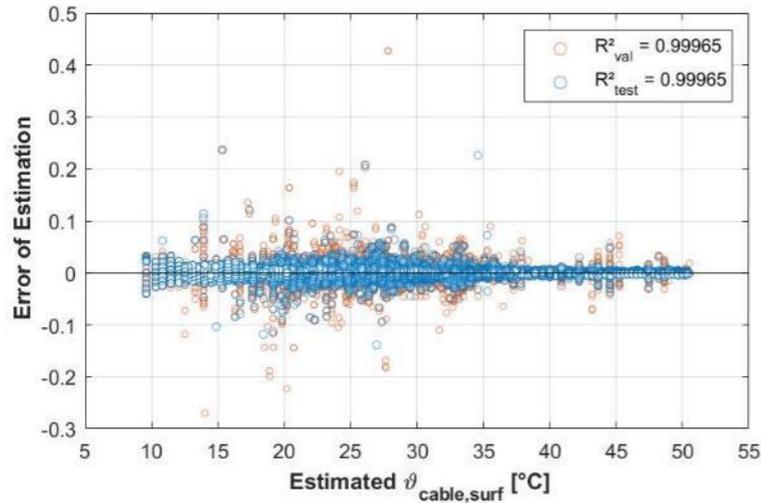


DATENANALYSE UND BERECHNUNGSMODELLE

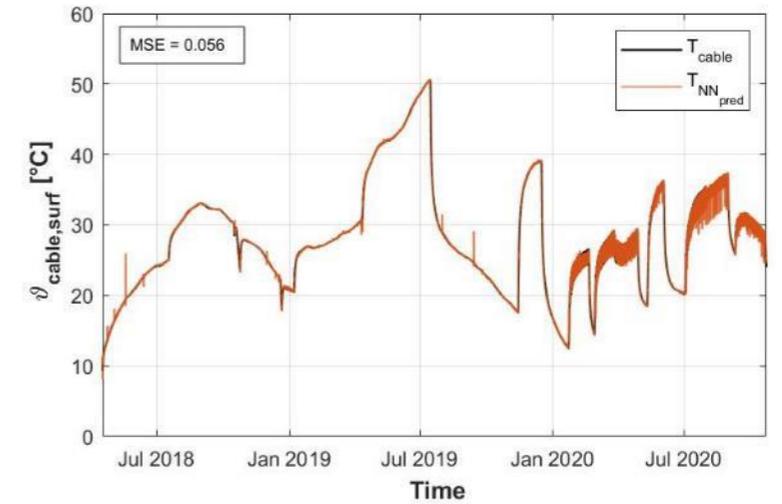
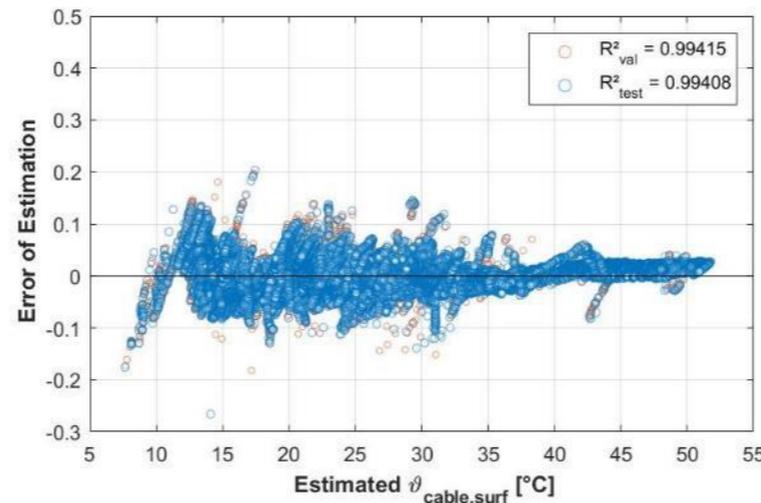
KABELTEMPERATURMAPPING (NOWCASTING)



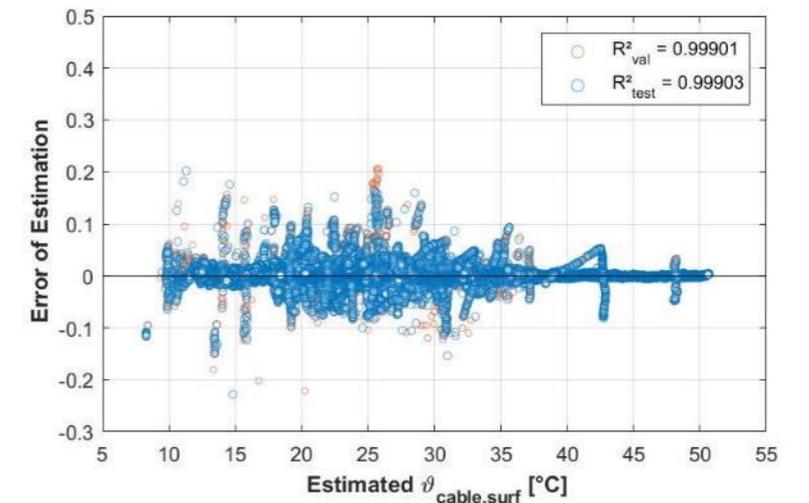
Decision Tree



Support Vector Machine

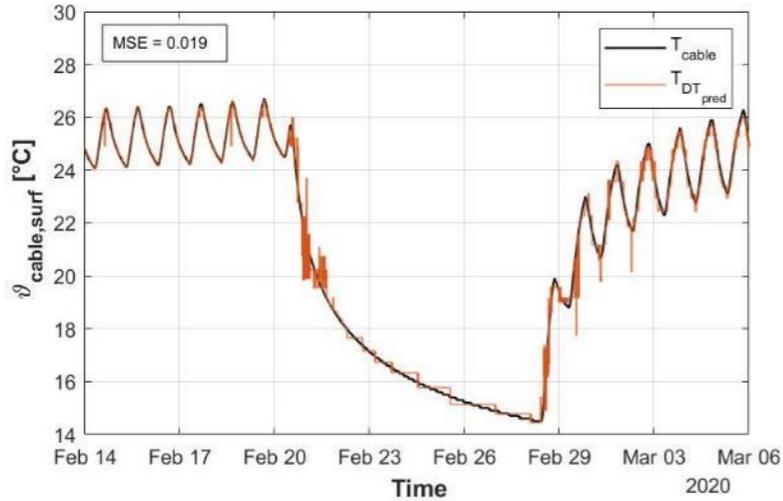


Neural Network

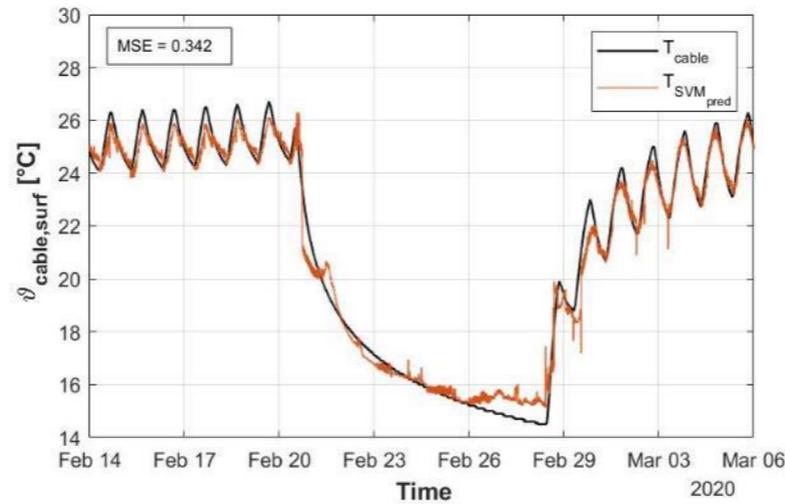
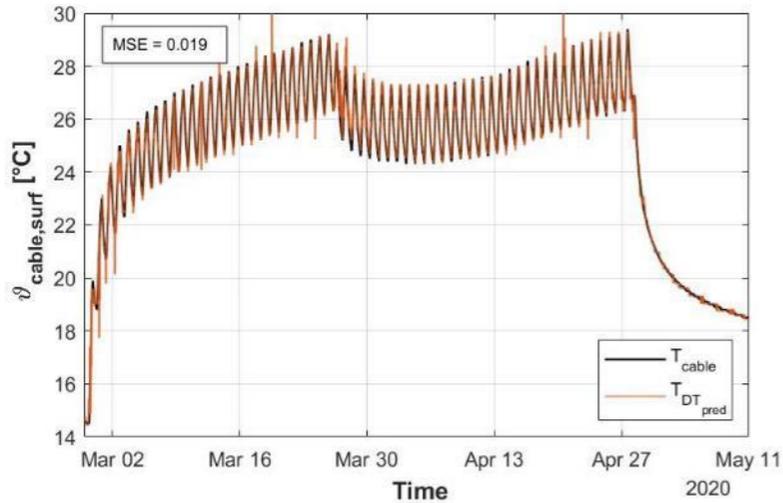


DATENANALYSE UND BERECHNUNGSMODELLE

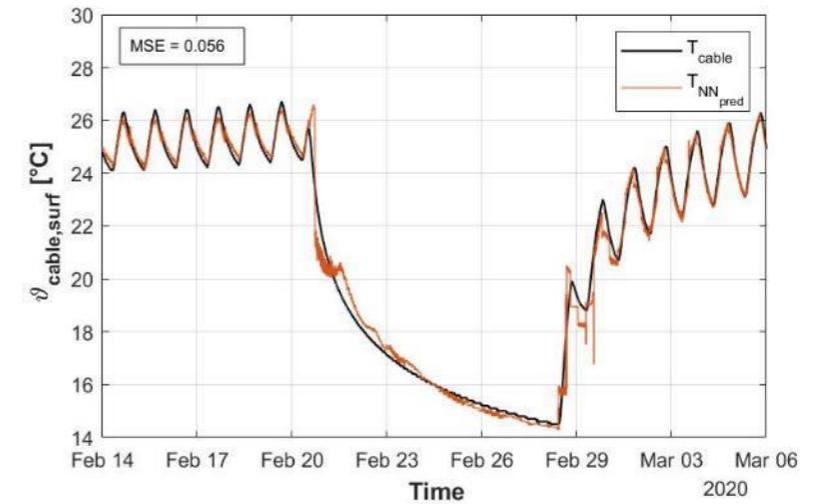
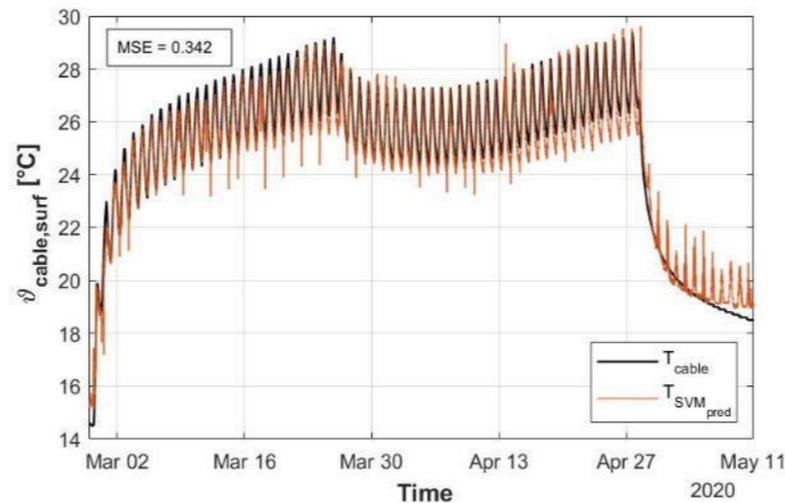
KABELTEMPERATURMAPPING (NOWCASTING)



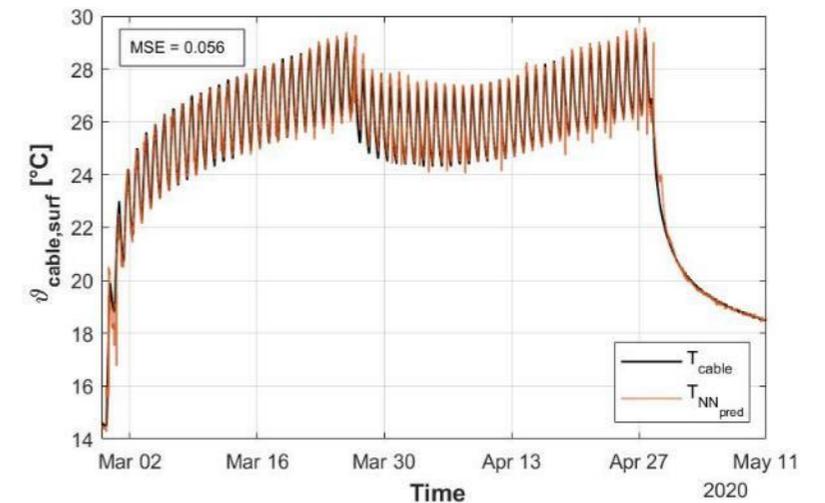
Decision Tree



Support Vector Machine



Neural Network

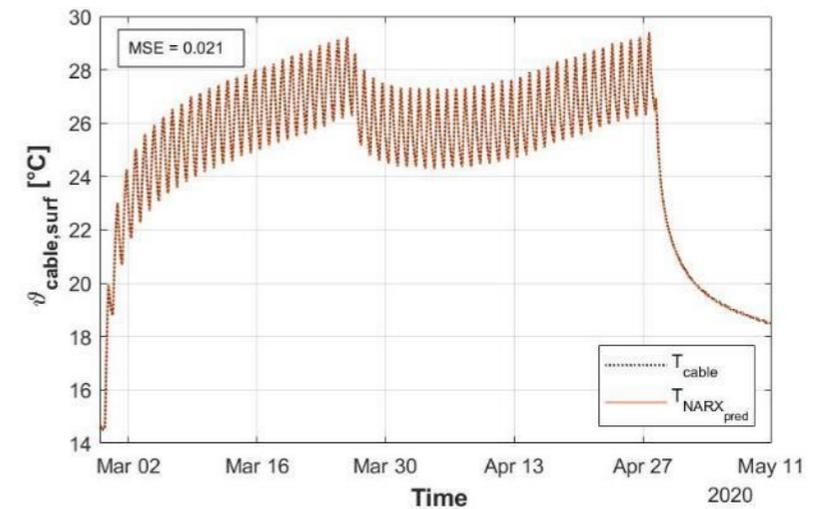
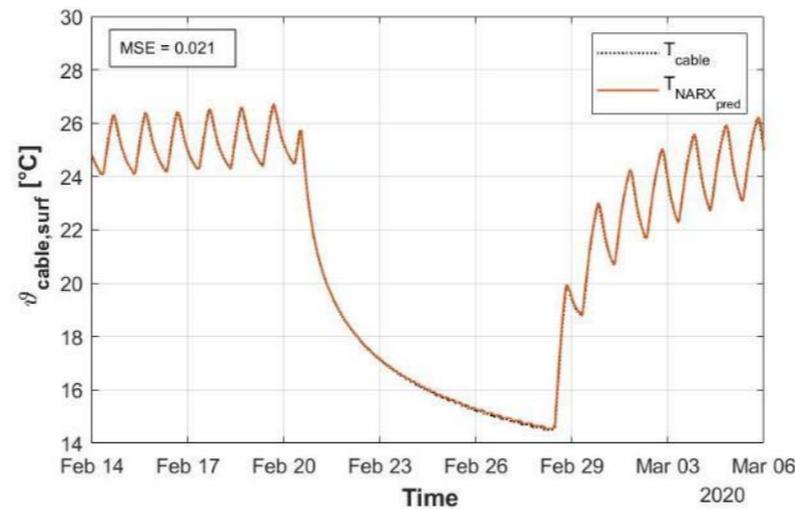
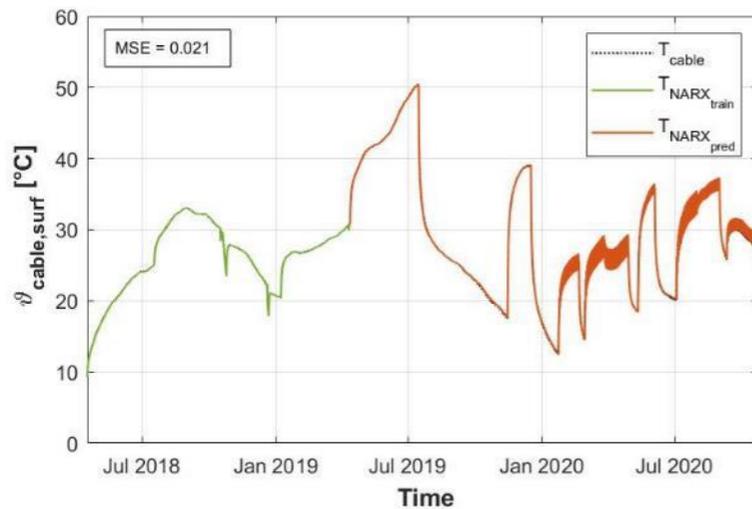
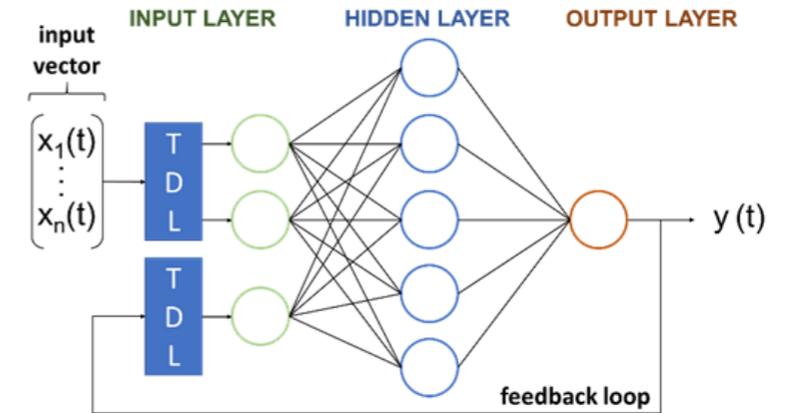


DATENANALYSE UND BERECHNUNGSMODELLE

ZEITREIHENMODELLE

Erweiterung des Neuronalen 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

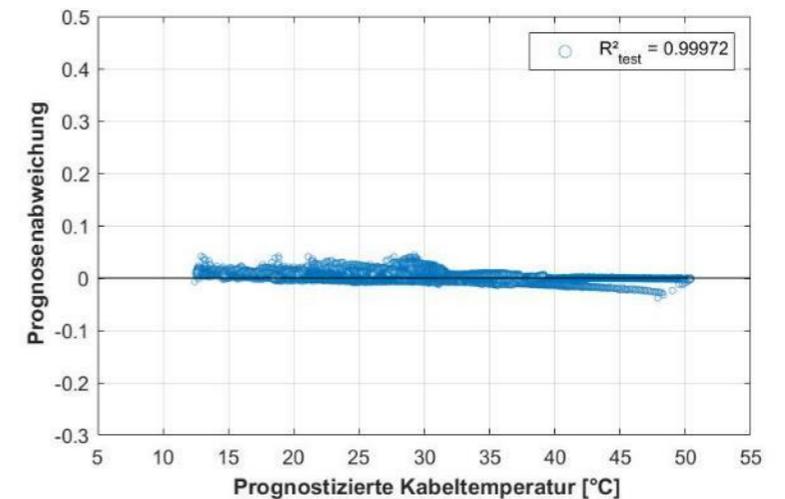
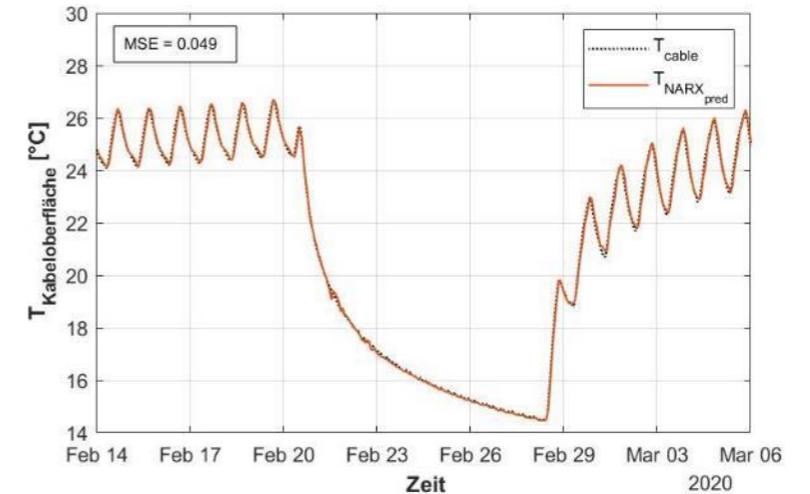
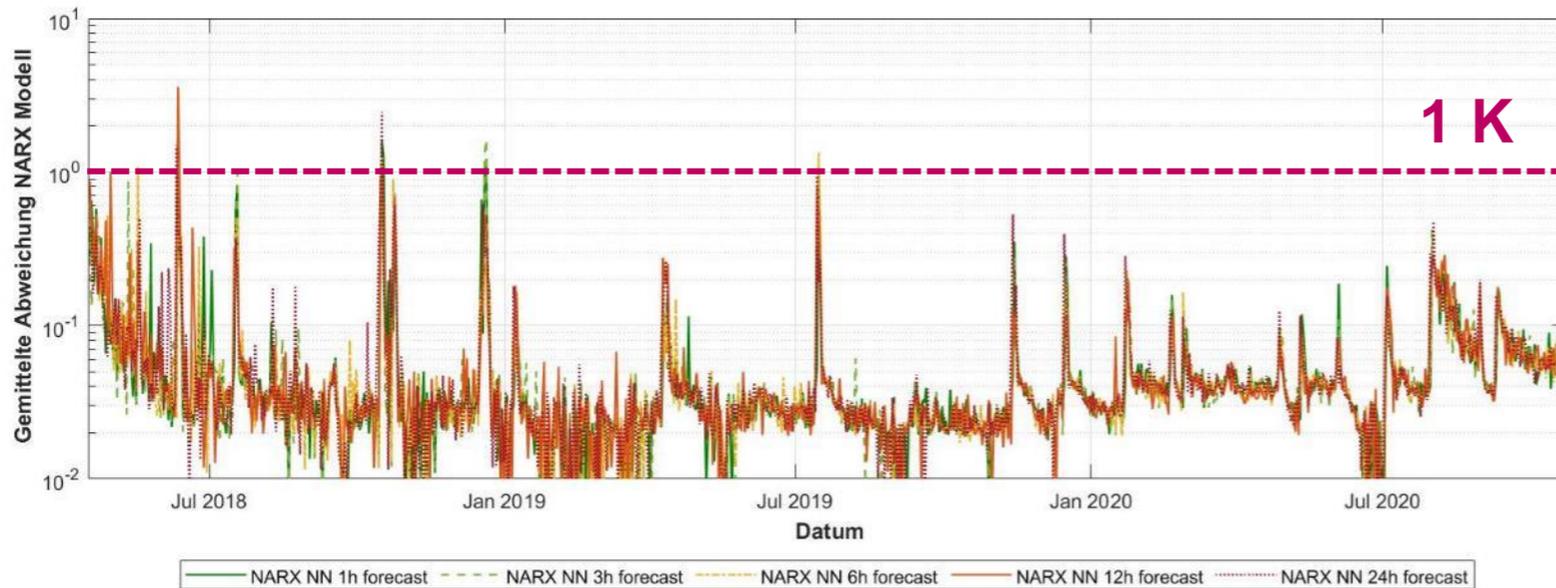


DATENANALYSE UND BERECHNUNGSMODELLE

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

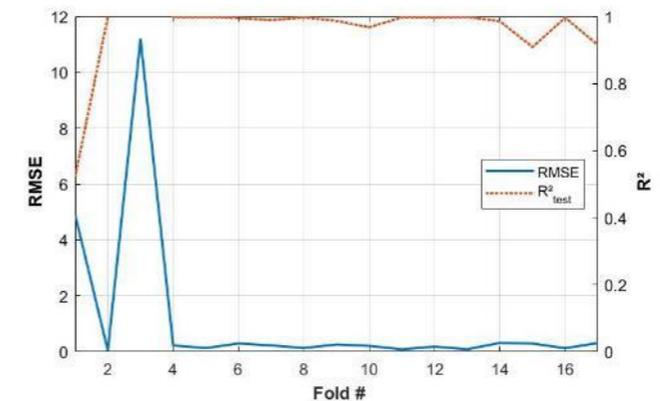
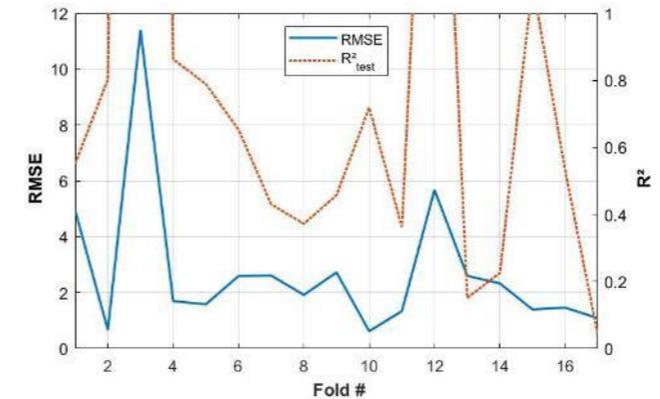


VALIDIERUNG METHODEN

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



Schlechte Performance ohne temporale Komponente



Gute Performance mit temporalen Komponente

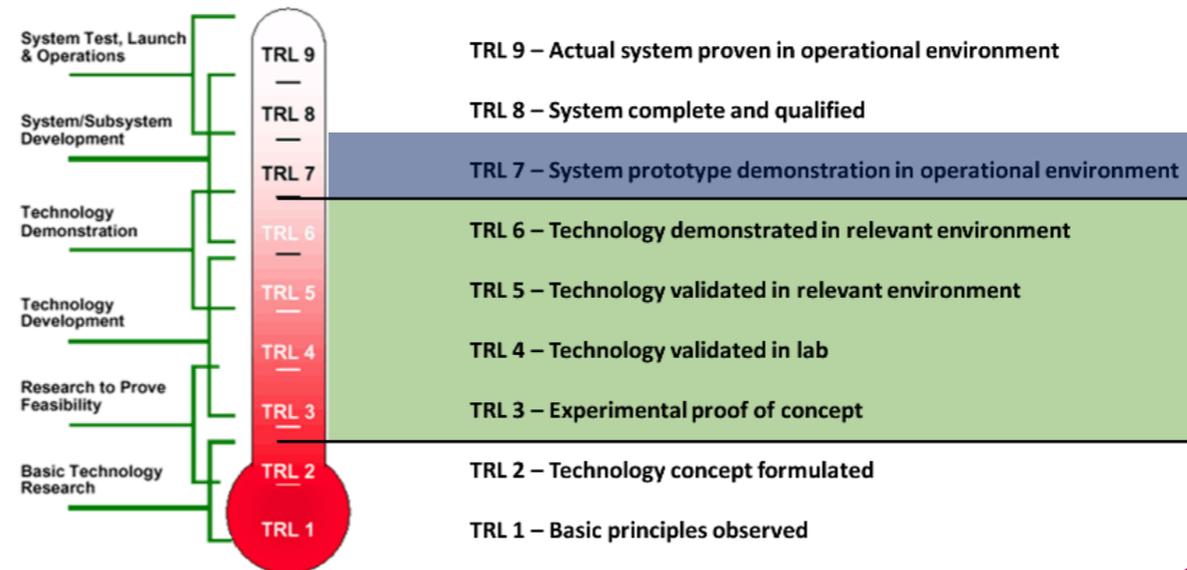
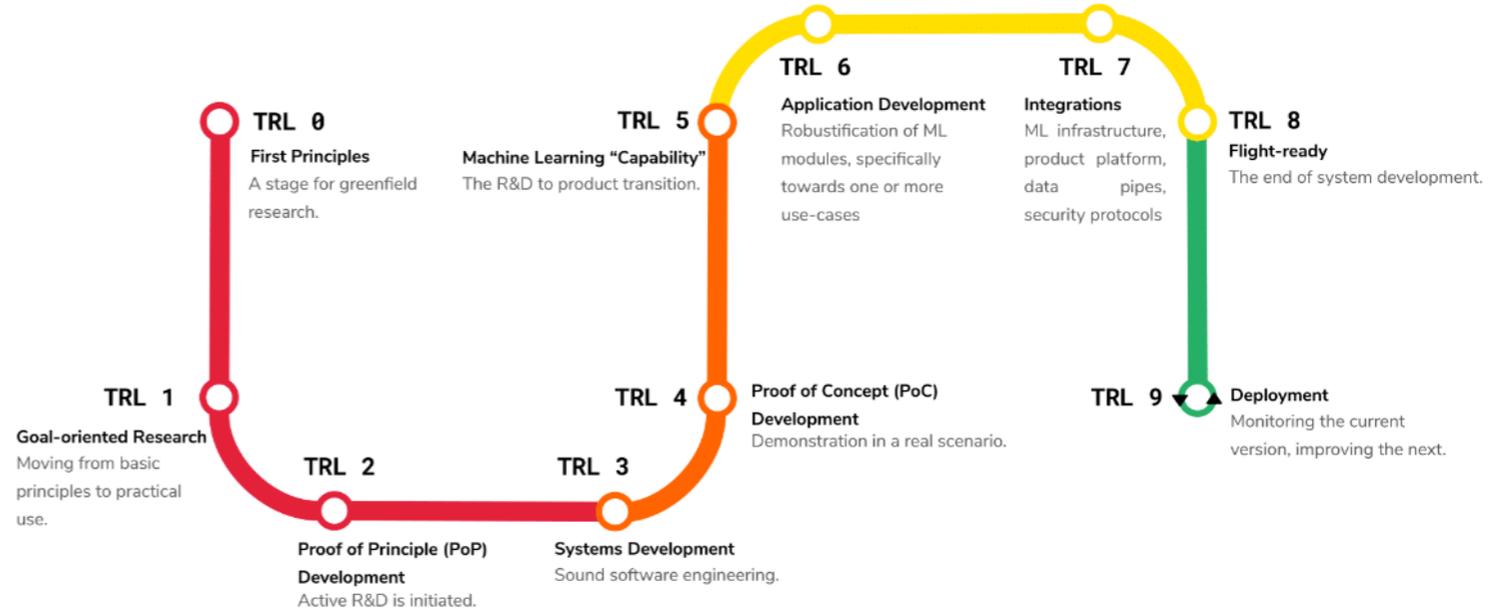
VALIDIERUNG AUSBLICK

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

EnInnov 2024 | 16.02.2024

