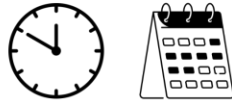




# Intelligenter Digitaler Zwilling für die Abwärmenutzung aus Rechenzentren

Kick-off DC2HEAT –KI für Abwärmenutzung aus  
Rechenzentren

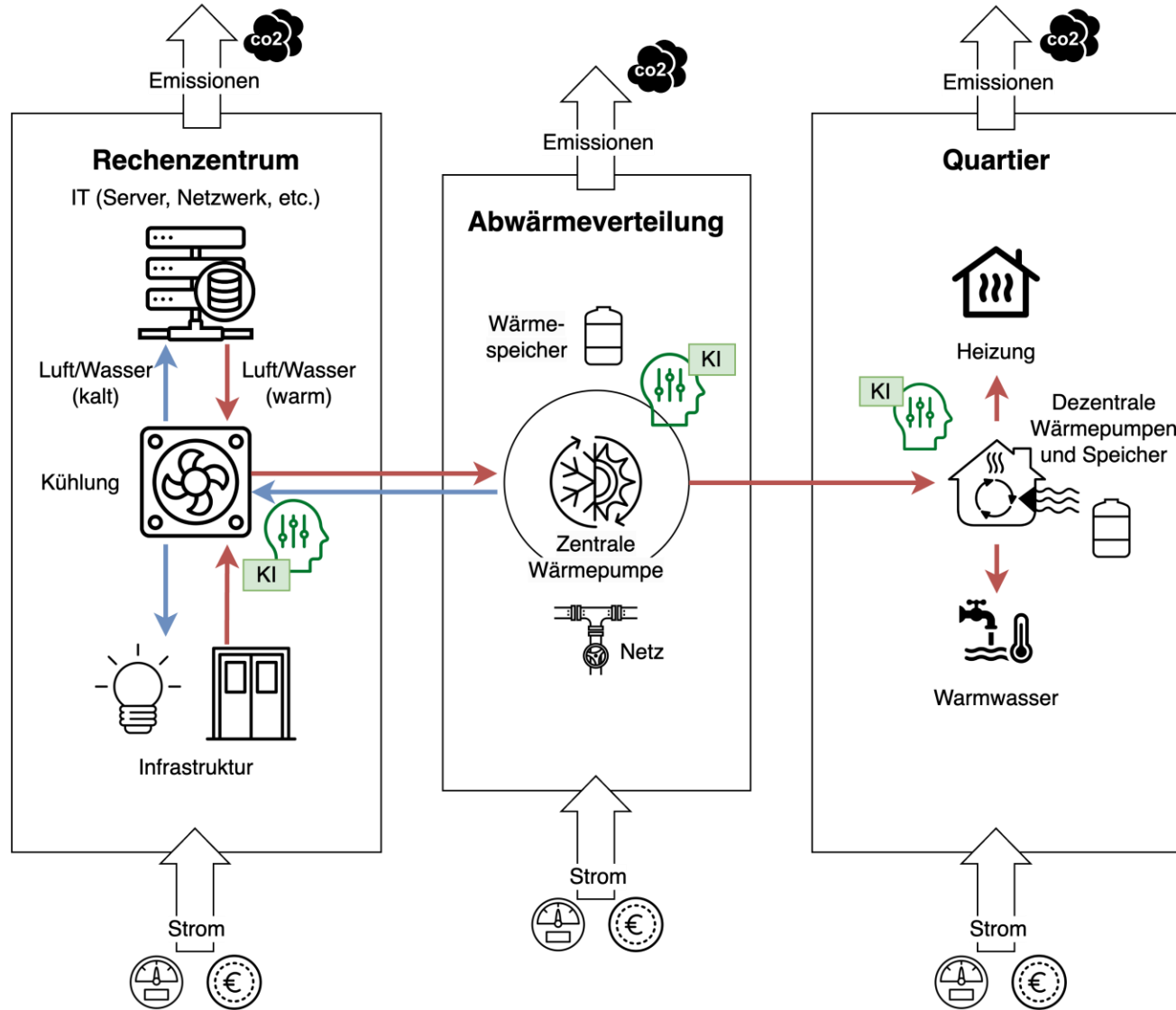
Prof. Dr. Oliver Müller, Prof. Dr. Henning Meschede · 15. Dezember 2023



Zeit (z.B. Tageszeit, Wochentag, Jahreszeit)

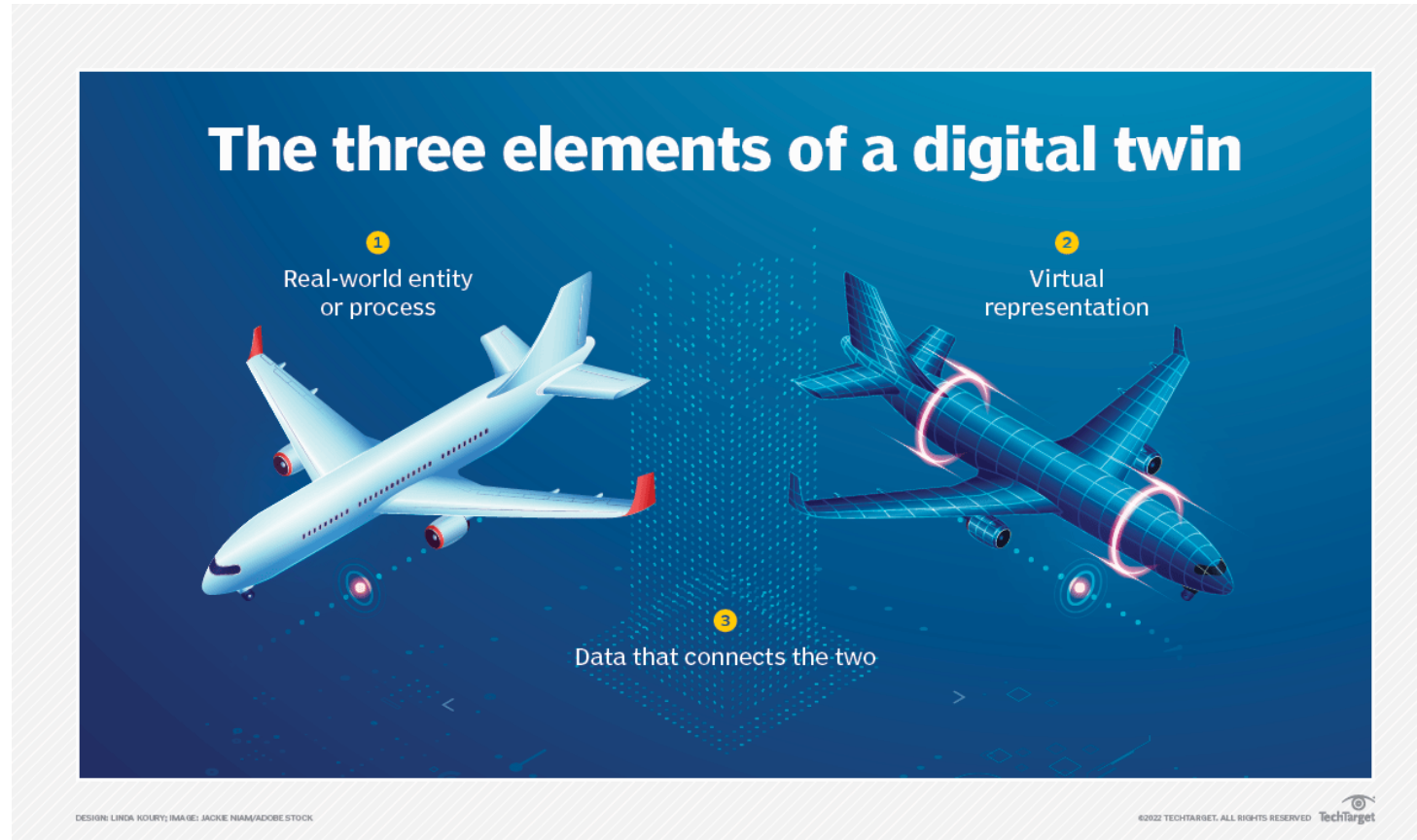


Wetter (z.B. Außentemperatur, Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit)





# Die Idee des Digitalen Zwillings

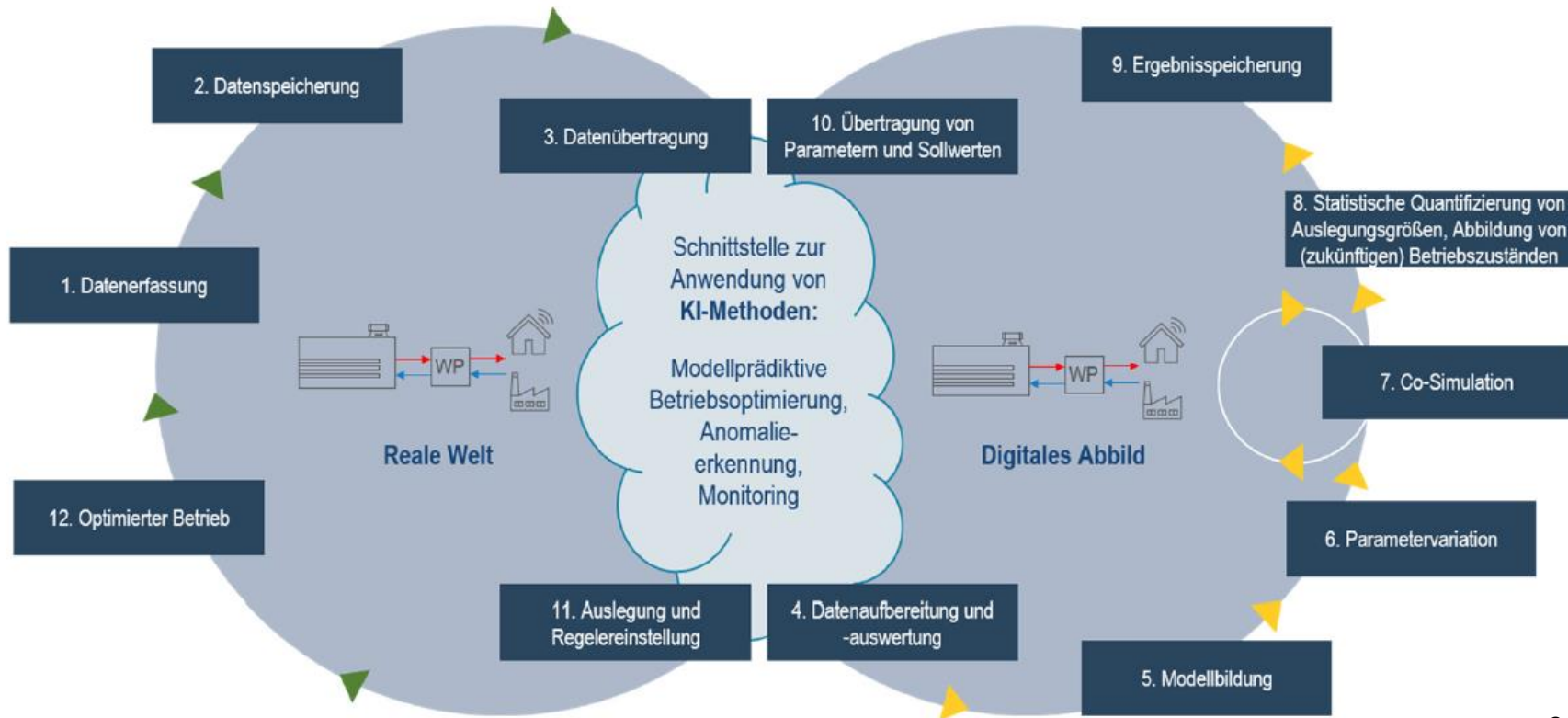


Quelle: TechTarget (2022)





# Intelligenter Digitaler Zwilling

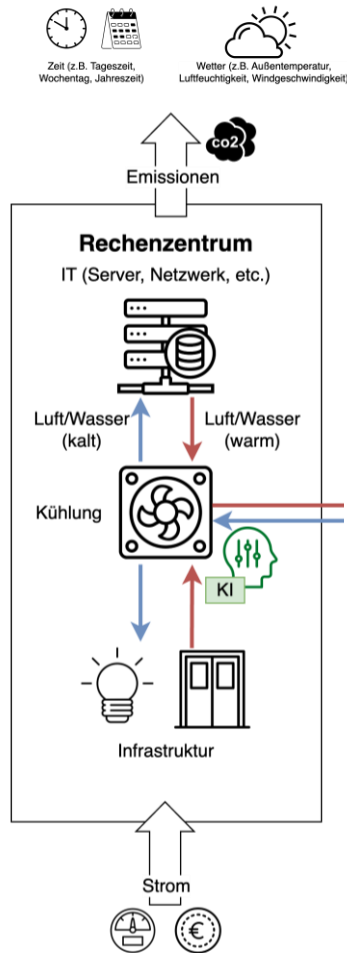


Quelle: in Anlehnung an Döring (2019)





# Datenflüsse (1/3)



## Eingangsgrößen

- IT-Last
- Bedarf elektrische Leistung
- Wetter

## Ausgangsgrößen

- Abwärmeleistung RZ (Menge und Temperatur)
- Direkte und indirekte Emissionen

## Störgrößen

- Energiekosten (Elektrizität und Wärme)
- Stromausfälle (Einsatz von USV, NEA, Notfallbetrieb)

## Stellgrößen

- Kühlleistung (Temperatur, Volumenstrom)
- [IT-Last → Projekt ESN4NW]

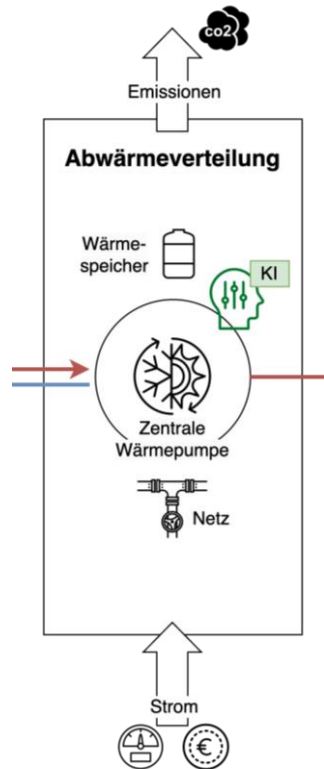
## Rahmenbedingungen und Anforderungen

- Infrastruktur: Räumlichkeiten, Einhausung, Kühlsystem, Verrohrung, unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV), Netzersatzanlagen (NEA), Netzteile & Server, etc.
- Status Quo: Leistung, Betriebsführung
- Sicherheitsaspekte: Grenzen für Stellgrößen, Service Level Agreements
- ...





## Datenflüsse (2/3)



### Eingangsgrößen

- Abwärmeleistung RZ (Menge und Temperatur)
- Wärmebedarf Quartier

### Ausgangsgrößen

- Wärmeleistung ZWP (Menge und Temperatur)
- Bedarf elektrische Leistung ZWP
- Direkte und indirekte Emissionen

### Störgrößen

- Energiekosten (Elektrizität und Wärme)
- Stromausfälle (Einsatz von USV, NEA, Notfallbetrieb)

### Stellgrößen

- Betrieb zentrale Wärmepumpe
- Volumenströme Umwälzpumpen
- Vorlauftemperatur Netz
- Rücklauftemperatur Rechenzentrum
- Speicherstand und -betrieb

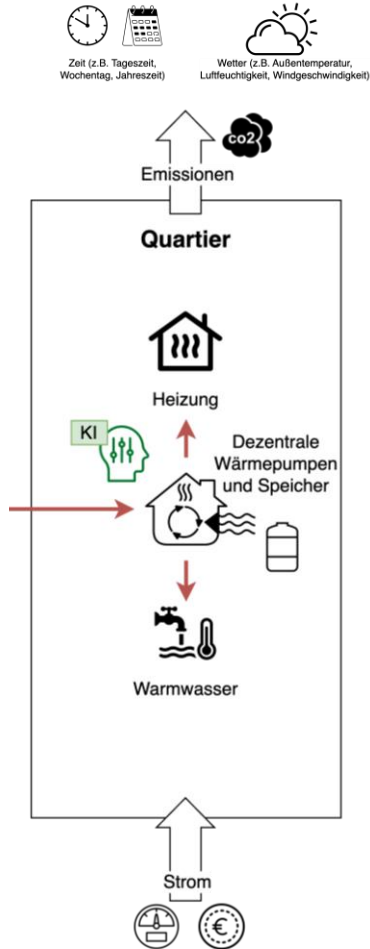
### Rahmenbedingungen und Anforderungen

- Technische Daten Wärmepumpe (Größe, Kennlinien, etc.)
- Technische Daten Wärmespeicher
- Eigenschaften Wärmenetz (Alter, Generation, Länge, Wirkungsgrade, etc.)
- Infrastruktur (Räumlichkeiten, Verrohrung, Entfernung etc.)





## Datenflüsse (3/3)



### Eingangsgrößen

- Wohnsituation (Größe, Anzahl Bewohner, etc.)
- Wetter
- Zeit (Jahr, Tag, Uhrzeit)

### Ausgangsgrößen

- Wärmebedarf Quartier
- Direkte und indirekte Emissionen

### Störgrößen

- Energiekosten (Elektrizität und Wärme)
- (unberechenbares) Nutzerverhalten

### Stellgrößen

- [siehe Abwärmeverteilung, aber auf Gebäudeebene]

### Rahmenbedingungen und Anforderungen

- Energieeffizienz der Gebäude
- Wärmeversorgung im Gebäude
- ...

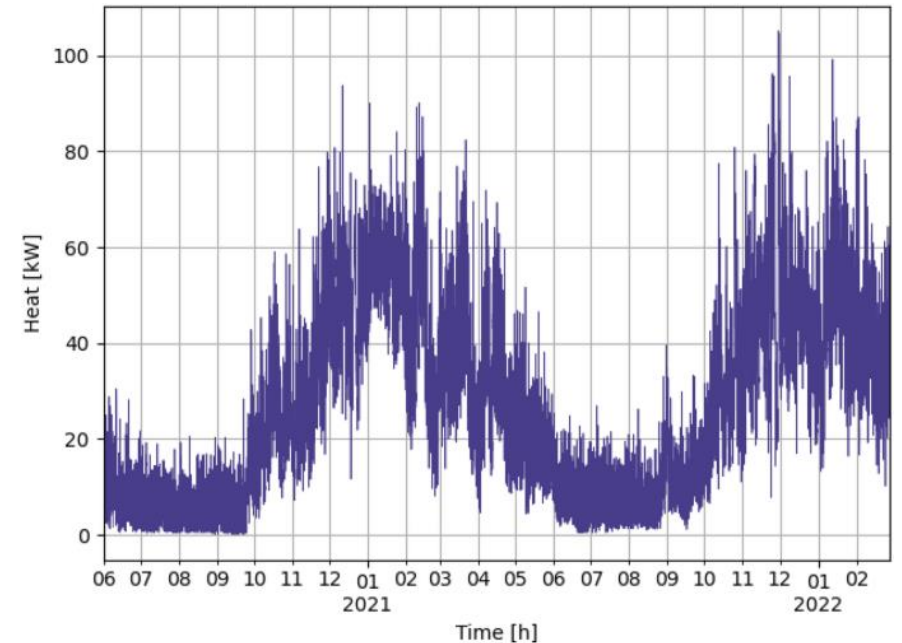




# KI-Modelle zur Vorhersage

## Beispiel: Vorhersage von 'Wärmebedarf Quartier'

- **Zeitreihenprognose**
  - Autoregressive Modelle ohne exogene Variablen
  - Multiple saisonale Komponenten (z.B. Jahreszeit, Wochentag vs. Wochenende, Tageszeit)
  - Beispiel: ARIMA
- **Machinelles Lernen**
  - Vorhersage von  $Y$  auf Basis von  $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$  (z.B. Wohnungsgröße, Anzahl Bewohner, Außentemperatur, Windgeschwindigkeit, Luftfeuchtigkeit)
  - Beispiel: Lineare Regression, Random Forest, XGBOOST
- **Hybride Modelle**
  - Zeitreihenprognose mit exogenen Variablen (z.B. LSTM)
  - Ensemble aus Zeitreihenprognose und maschinellem Lernen



Quelle: Kemper et al. (2023)



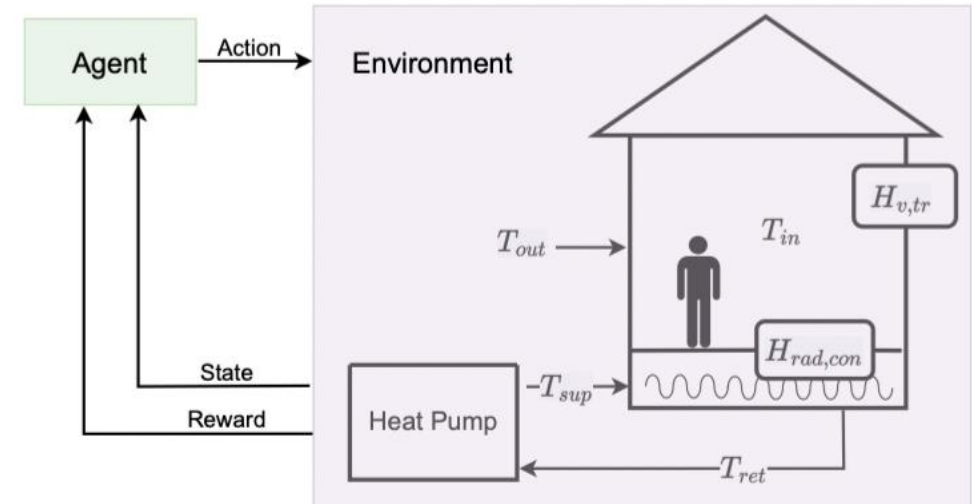


# KI-Modelle zur Steuerung

## Beispiel: Steuerung der Wärmepumpe

- **Reinforcement Learning**

- Agent führt in einer Umgebung Aktionen aus, die seine Belohnung maximieren.
  - Umgebung: Wärmepumpe mitsamt Wärmequelle und Wärmesenke (ausgewählte Zustandsvariablen)
  - Aktion: Wärmepumpe an- und ausschalten, Leistung der Wärmepumpe variieren
  - Belohnung: Wärmeleistung, Energiekosten, Emissionen
- Der Agent lernt durch Interaktion mit der Umgebung.
  - Agent sammelt Daten über die Auswirkungen seiner Aktionen auf die Belohnung
  - Agent verwendet diese Daten, um seine Aktionen im Laufe der Zeit anzupassen

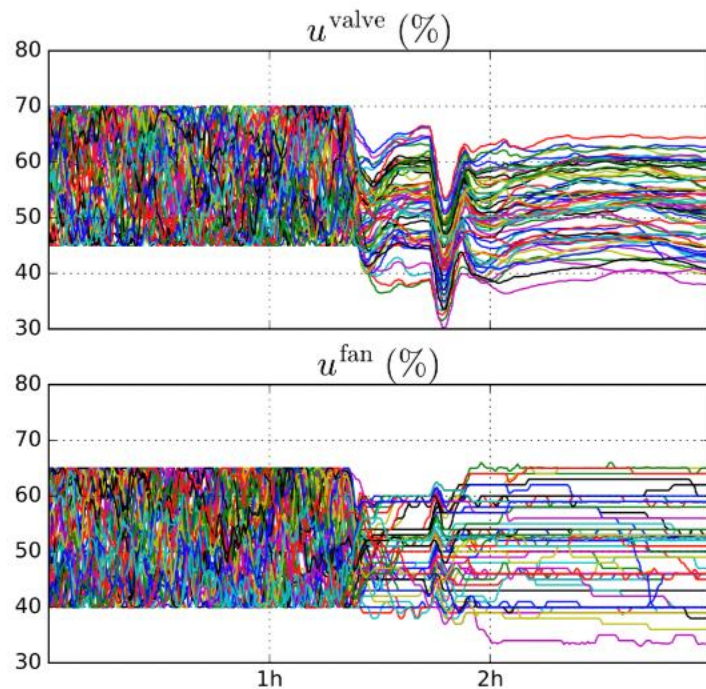


Quelle: Rohrer et al. (2022)





# Beispiel: Reinforcement Learning für die Wasserkühlung von Rechenzentren bei Google



Entering water temperature (C)	Server load (frac. max)	Local controllers cost (% data)	Model 1 cost (% data)
$\leq 20.5$	$\leq 0.7$	<b>95.3</b> (19.8 %)	106.4 (22.6 %)
$> 20.5$	$\leq 0.7$	107.9 (13.8 %)	<b>104.9</b> (15.0 %)
$\leq 20.5$	$> 0.7$	170.3 (20.1%)	<b>130.5</b> (18.8 %)
$> 20.5$	$> 0.7$	187.8 (20.4 %)	<b>128.7</b> (18.0 %)
any	any	142.2 (74.4%)	<b>116.7</b> (74.1%)

Quelle: Lazic et al. (2018)

