

Center for Applied Energy Research



04.03.2026

SoC4PCM

Data-Driven Thermophysics:

Mittels Macro-DSC und Machine Learning zur akustischen Zustandsbestimmung in PCM-Wärmespeichern

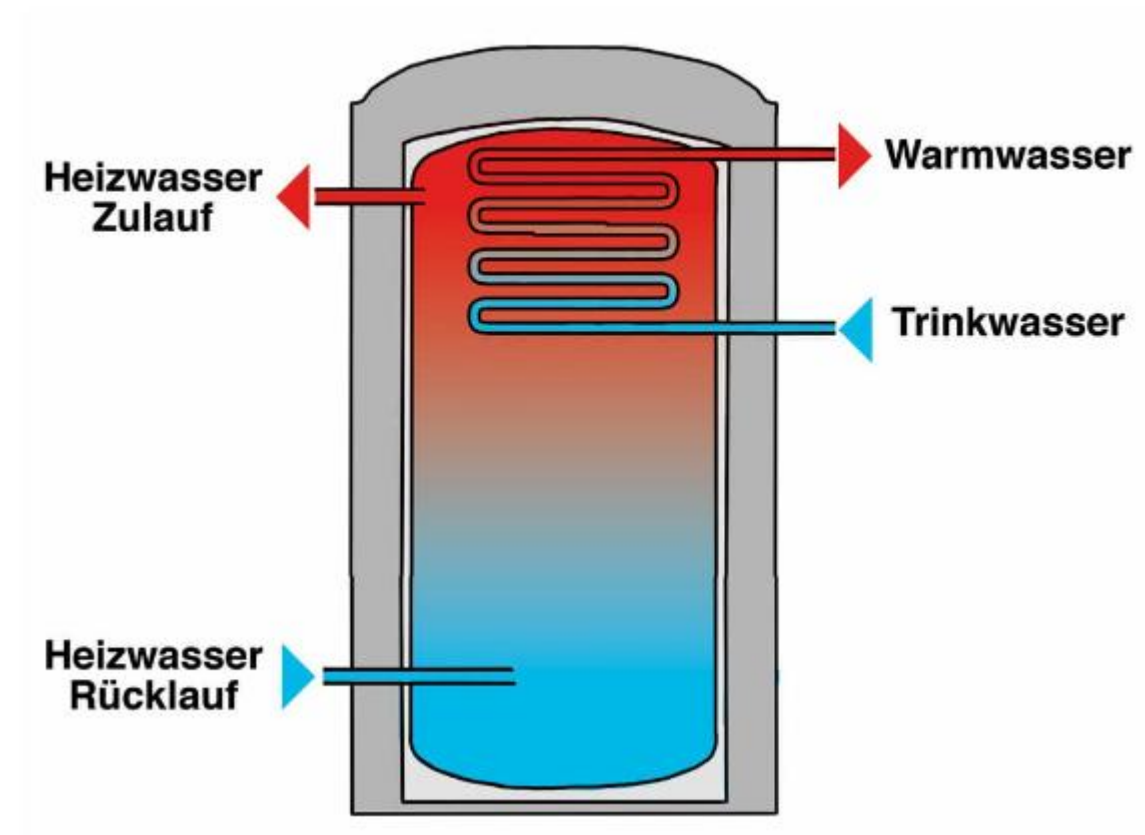
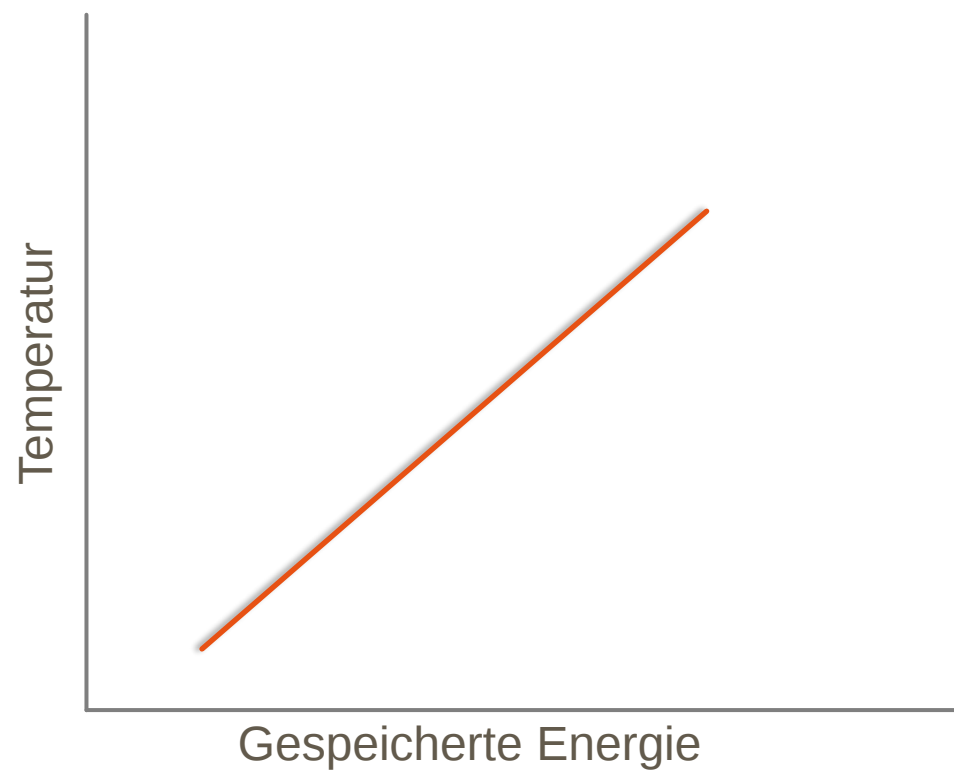
Michael Brütting
Sitzung des AK-Thermophysik
04.03.2026

Was sind PCM?

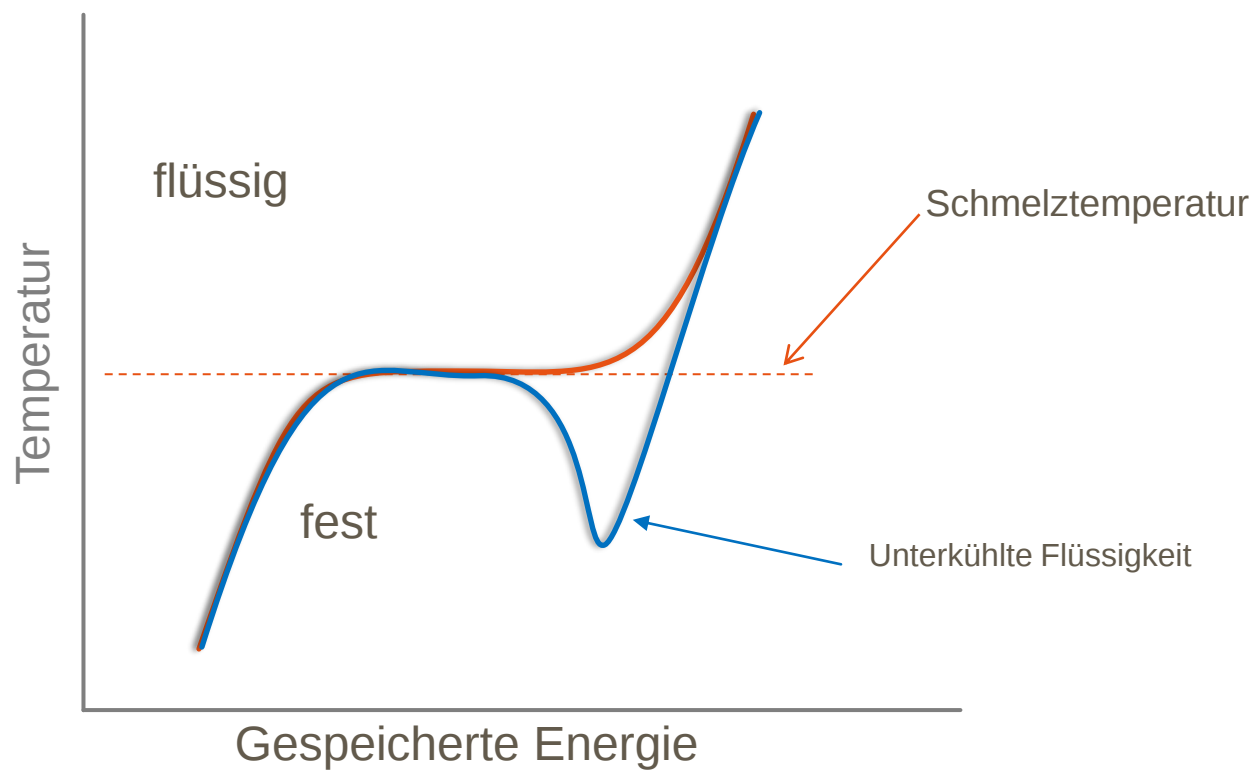
- **Phase Change Materials**
- **Speicherung von Wärme oder Kälte im Phasenübergang** von fest zu flüssig (Latentwärmespeicher)
- Unterschiedliche **Materialklassen**:
 - **Organisch**: Paraffine, Fettsäuren, Fettalkohole, ...
 - **Anorganisch**: Salze, Salzhydrate, Metalle
- Kommerziell im Einsatz in unterschiedlichsten Bereichen



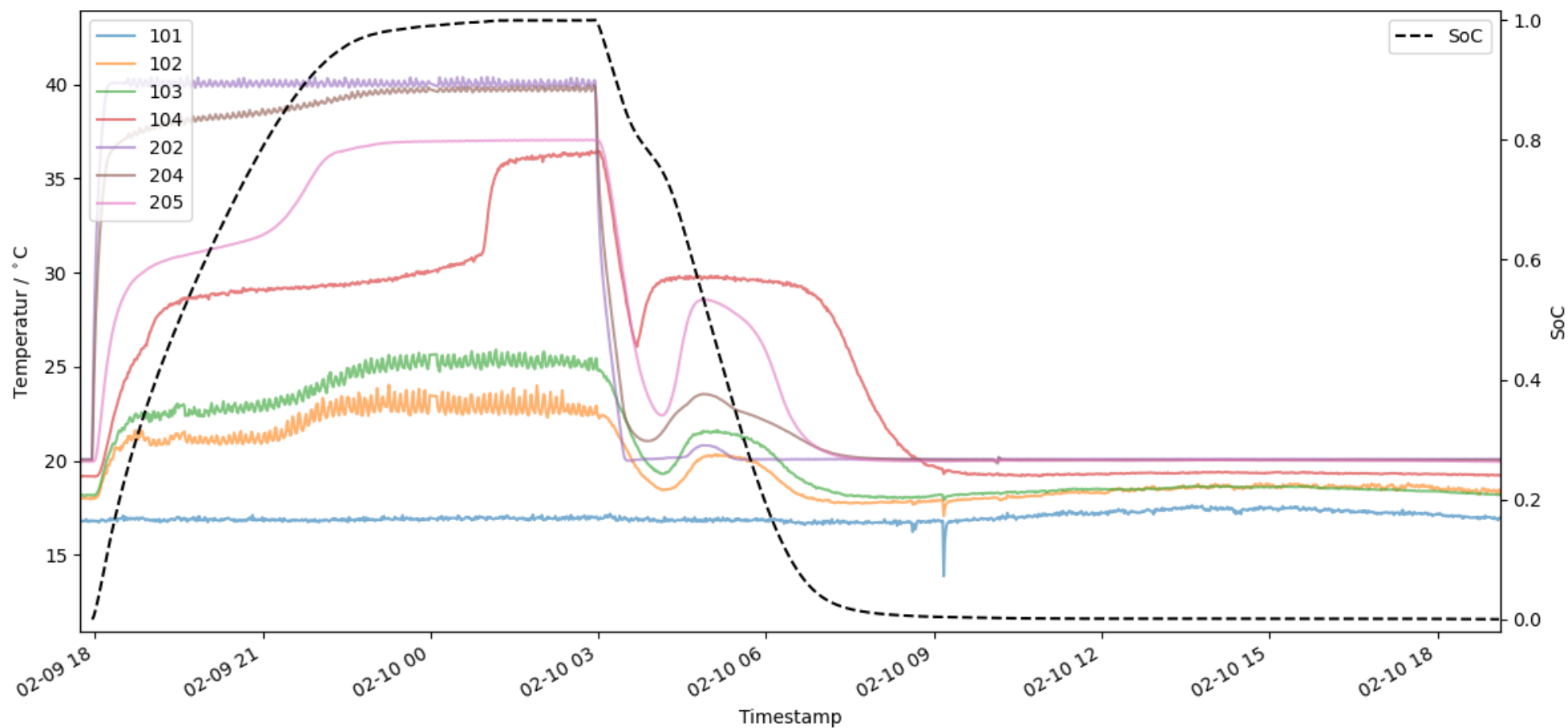
Speicherprinzip: Fühlbare Wärme



Speicherprinzip: Latente Wärme



Vergleich: lokale Temperaturmessung - SoC



Grundlagen Latentwärmespeicher SoC

- Der **State of Charge (SoC)** von Wärmespeichern ist essentiell für die Steuerung und Regelung von angebundenen Systemen.
- Bisher bekannte **Methoden** zur Bestimmung des Ladezustands:
 - **Temperaturmessung** (Problem: Nur Information über einen definierten Ort; Temperatur im Phasenübergang bleibt annähernd konstant → keine genaue Aussage möglich)
 - **Volumenausdehnung / Druckänderung**
 - Messung der zu- und abgeführten **Wärmemenge** + Abschätzung der Wärmeverluste
 - **(Ultra)schallgeschwindigkeit**, -dämpfung, -spektrometrie
 - **Projekt 0327370F**: Entwicklung eines Messverfahrens zur Bestimmung des thermischen Beladungsgrades von PCM-Paraffin-Speichern. (2008)



Ultraschallmessung



Bild 2-24: Messküvette mit flüssigem Paraffin



Bild 2-25: Echoimpulse zu Bild 2-24



Bild 2-33: Messküvette: Paraffin im Inneren noch dickflüssig



Bild 2-34: Echoimpulse zu Bild 2-33

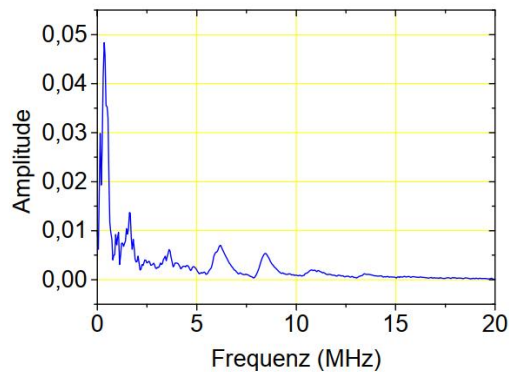


Bild 2-26: Frequenzverteilung (Fouriertransformierte) des Empfangsimpulses von Bild 2-25

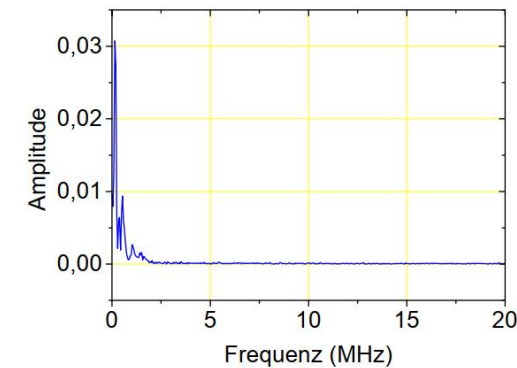


Bild 2-35: Frequenzverteilung (Fouriertransformierte) des Empfangsimpulses von Bild 2-34

Fischer, U.R., et al., *Entwicklung eines Messverfahrens zur Bestimmung des thermischen Beladungsgrades von PCM-Paraffin-Speichern : Schlussbericht zum BMWi-Projekt 0327370F ; Verbundprojekt Energie Optimiertes Bauen (EnOB), Thematischer Verbund LowEx. 2008, BTU, Lehrstuhl Angewandte Physik/Thermophysik; Cottbus.*

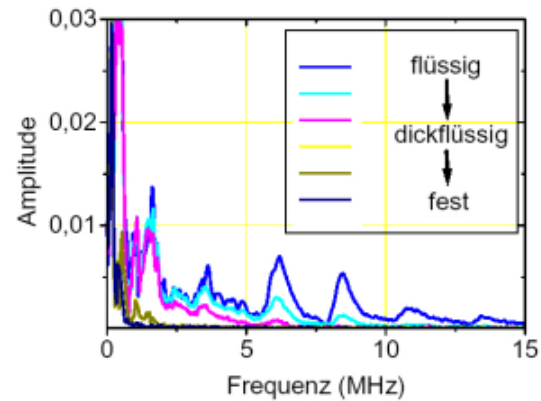


Bild 2-39: Frequenzverteilungen der transmittierten Echopulse bei erstarrendem Paraffin

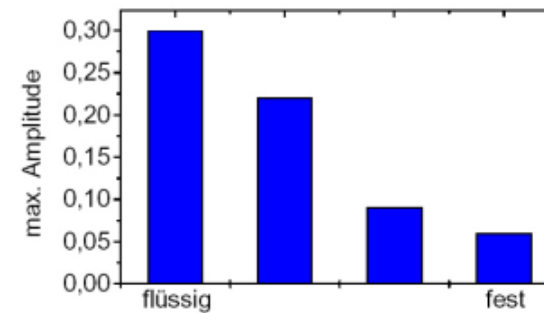
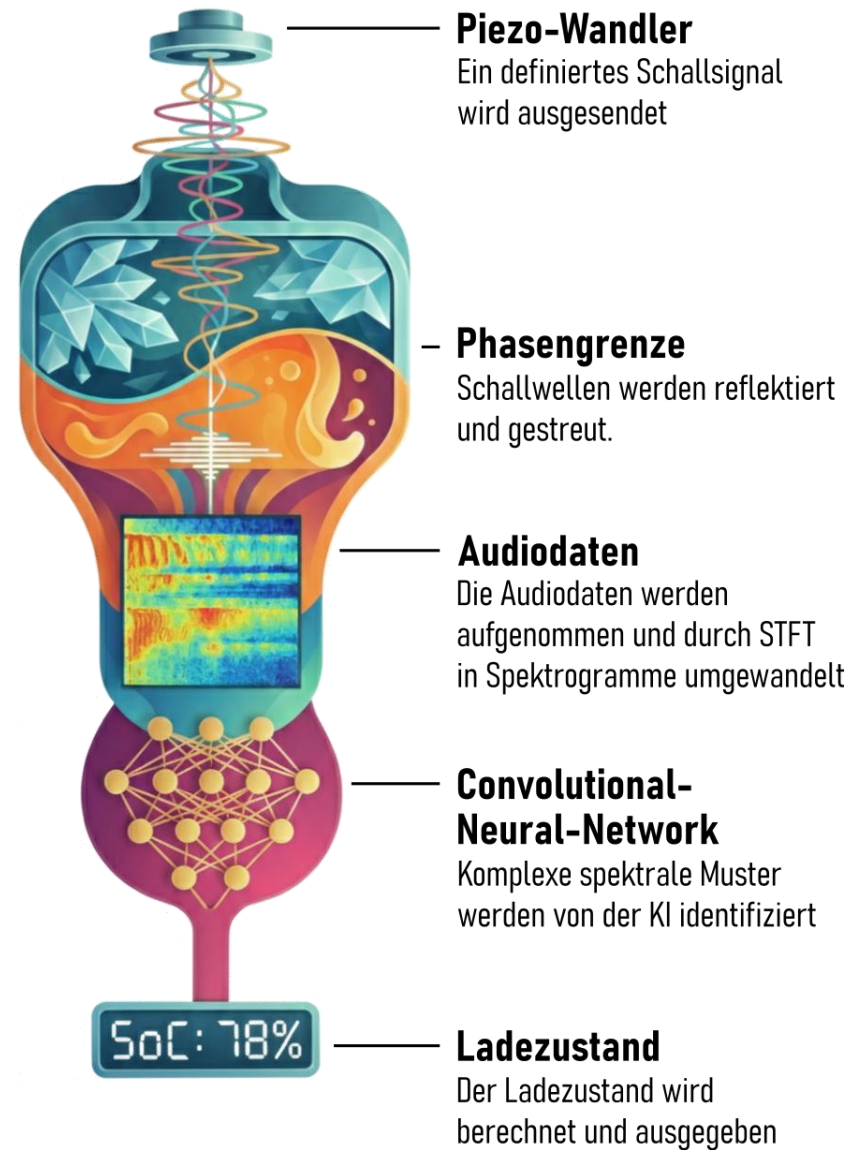


Bild 2-40: Abnehmende maximale Amplituden der transmittierten Echopulse bei erstarrendem Paraffin

Fischer, U.R., et al., *Entwicklung eines Messverfahrens zur Bestimmung des thermischen Beladungsgrades von PCM-Paraffin-Speichern : Schlussbericht zum BMWi-Projekt 0327370F ; Verbundprojekt Energie Optimierte Bauen (EnOB), Thematischer Verbund LowEx. 2008, BTU, Lehrstuhl Angewandte Physik/Thermophysik; Cottbus.*

Grundlagen Machine Learning



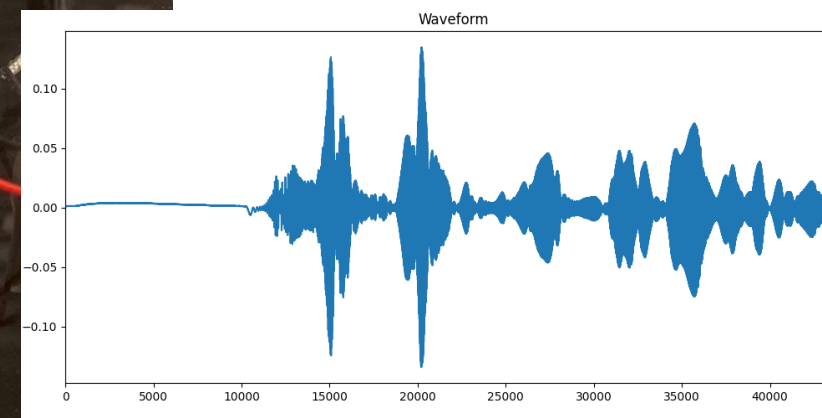
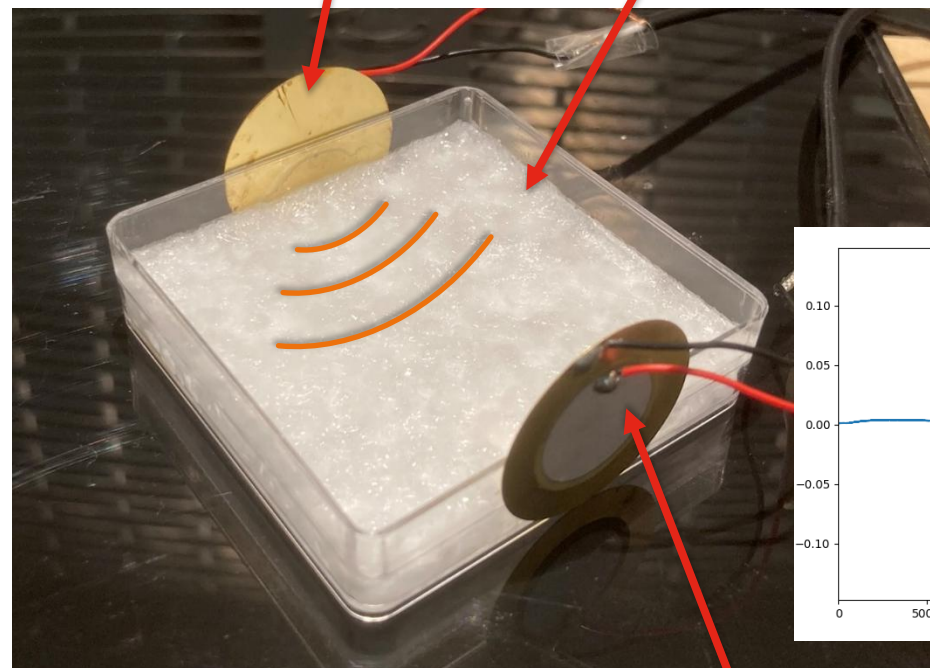


Proof of Concept

- Anregung mit Sinus-Signal mit linear ansteigender Frequenz von 50 Hz bis 15 kHz

Piezo Sender

Paraffin



Piezo Empfänger

Trainingsdaten generieren

0 %



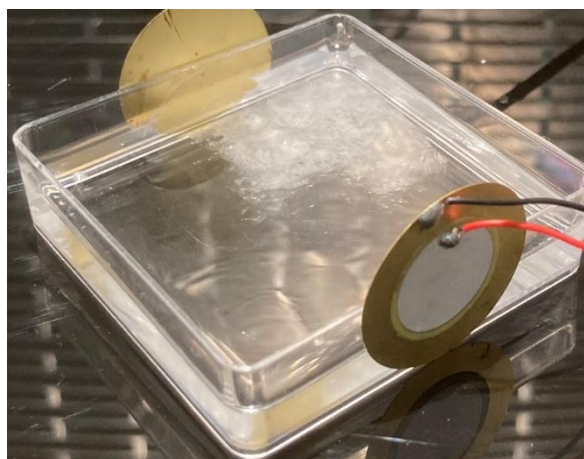
20 %



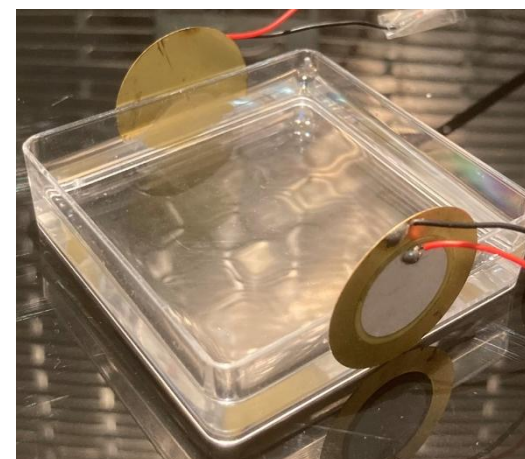
60 %



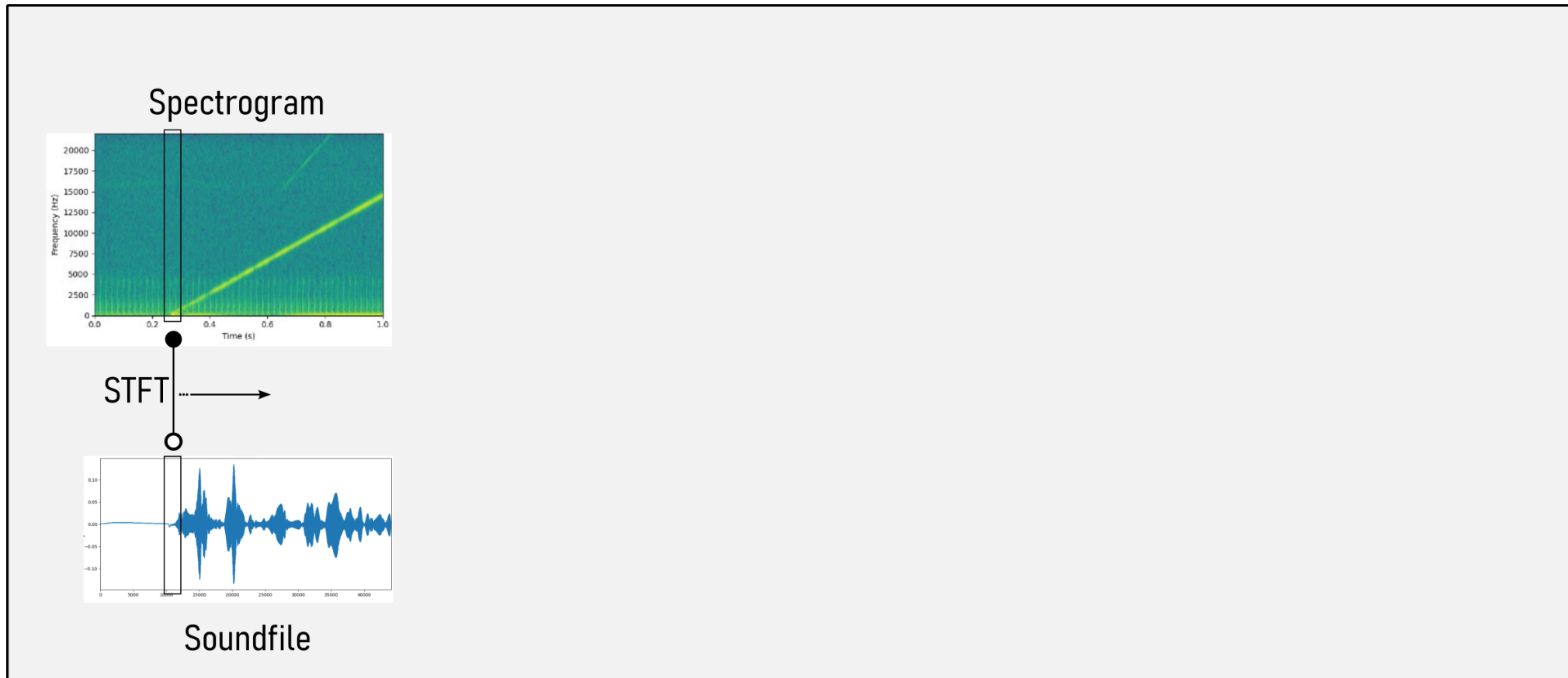
90 %



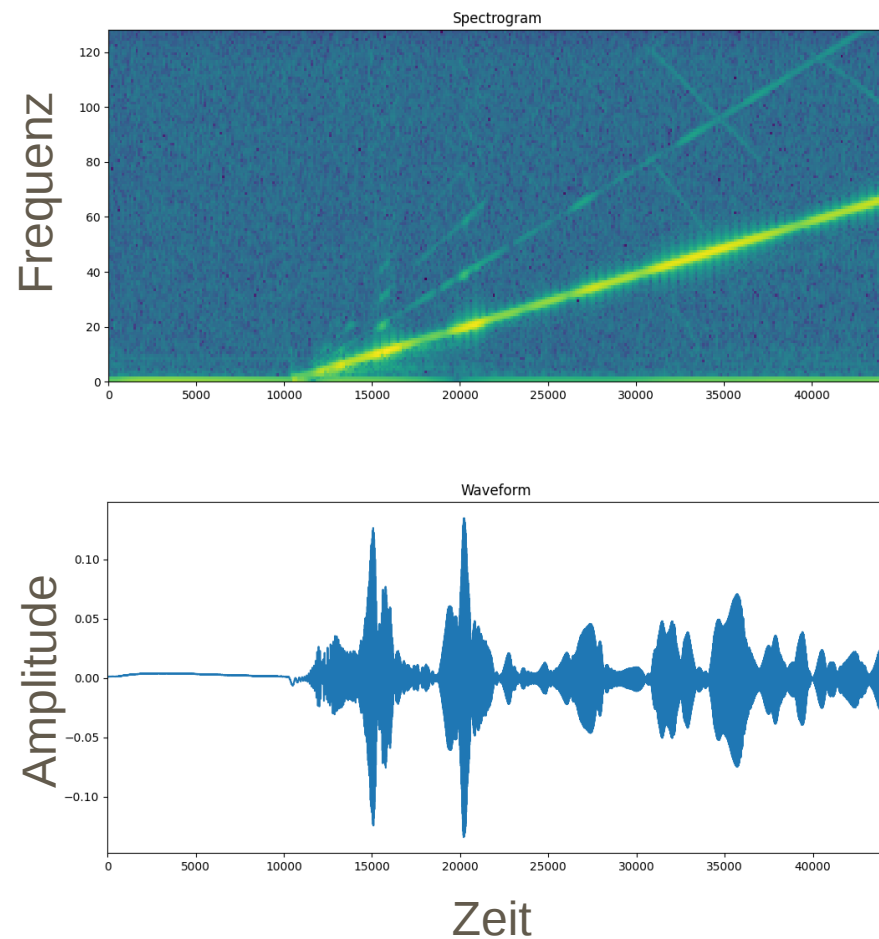
100 %



CNN-Model



Short Time Fourier Transform



Matrix

0.4	0.1	0.9	0	1
0	0.2	0.8	0	0.5
0.5	0.5	0.7	0.6	0.8
0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
0	0.1	0.2	0.3	0.4

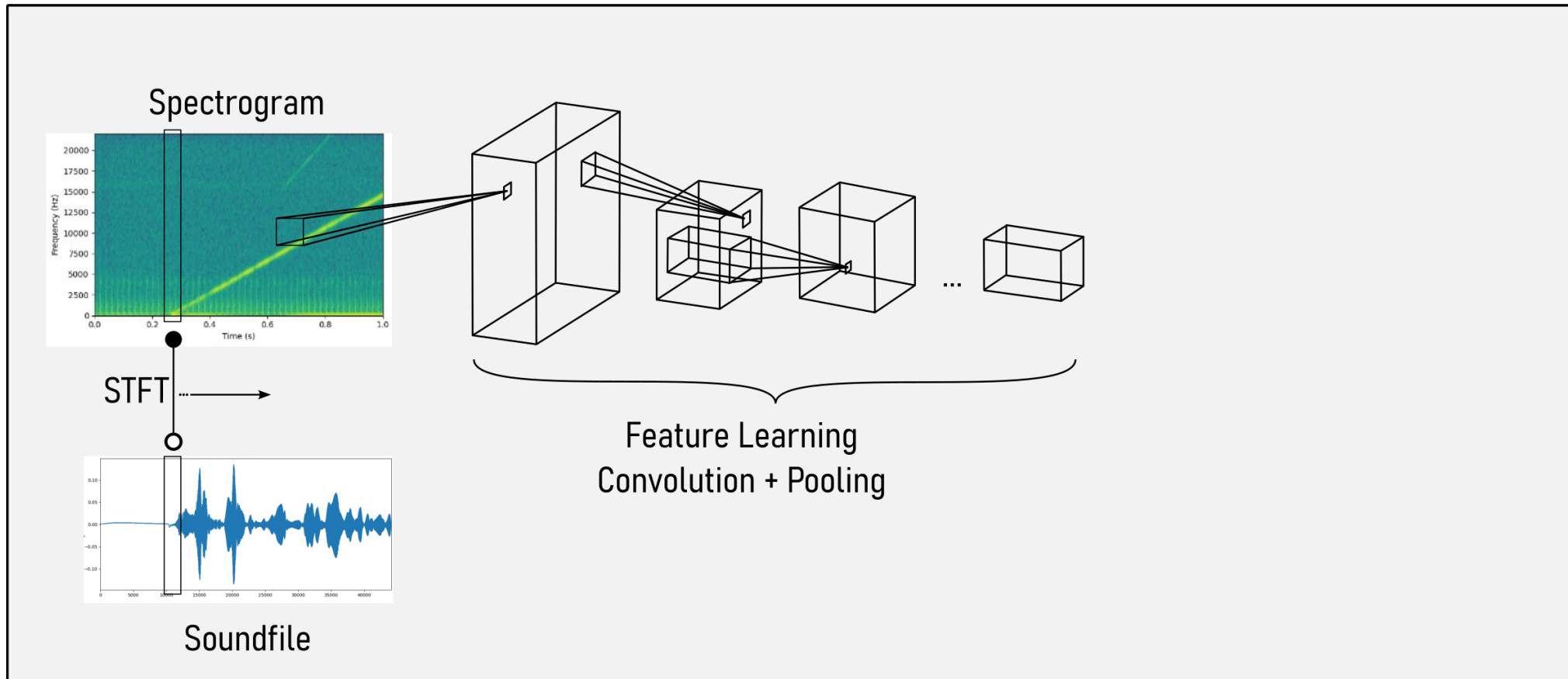
$$X(m, \omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n]w[n-m]e^{-j\omega n}$$

0	-0.2	2.1	2	-2.3	0.8	0.6	-1.1	1.5
---	------	-----	---	------	-----	-----	------	-----

Zeilenvektor



CNN-Model



Convolutions



1	1	1	0	0
0	1	1	1	0
0	0	1	1	1
0	0	1	1	0
0	1	1	0	0

Kernel/Filter,
 $K = \begin{matrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \end{matrix}$

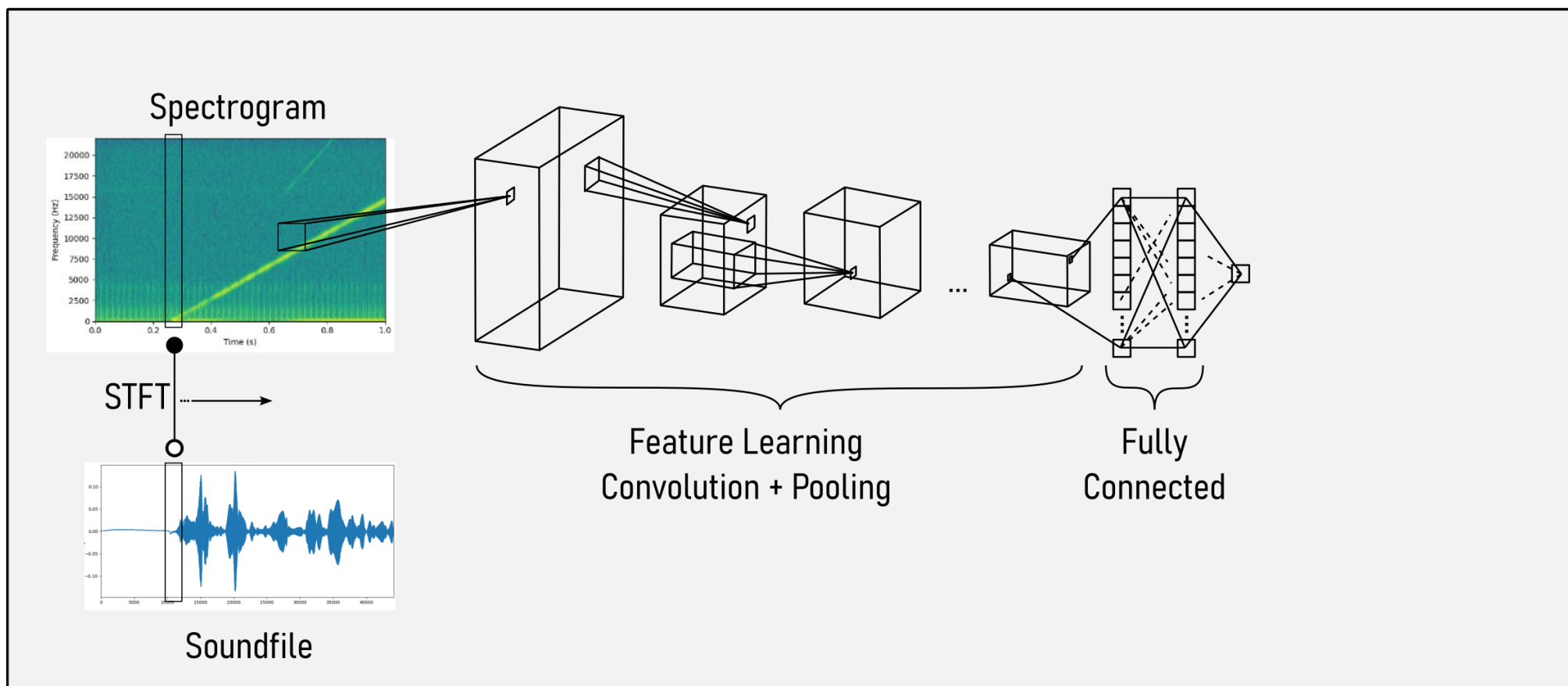
1 _{x1}	1 _{x0}	1 _{x1}	0	0
0 _{x0}	1 _{x1}	1 _{x0}	1	0
0 _{x1}	0 _{x0}	1 _{x1}	1	1
0	0	1	1	0
0	1	1	0	0

Image

4		

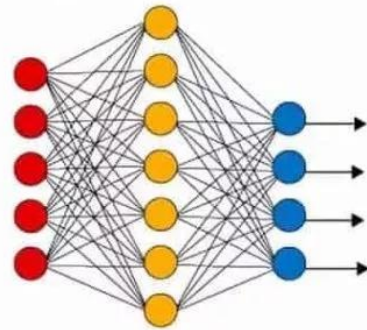
Convolved
Feature

CNN-Model

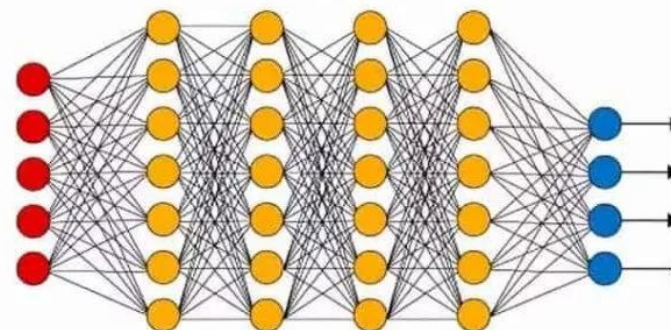


Neuronales Netzwerk

Simple Neural Network



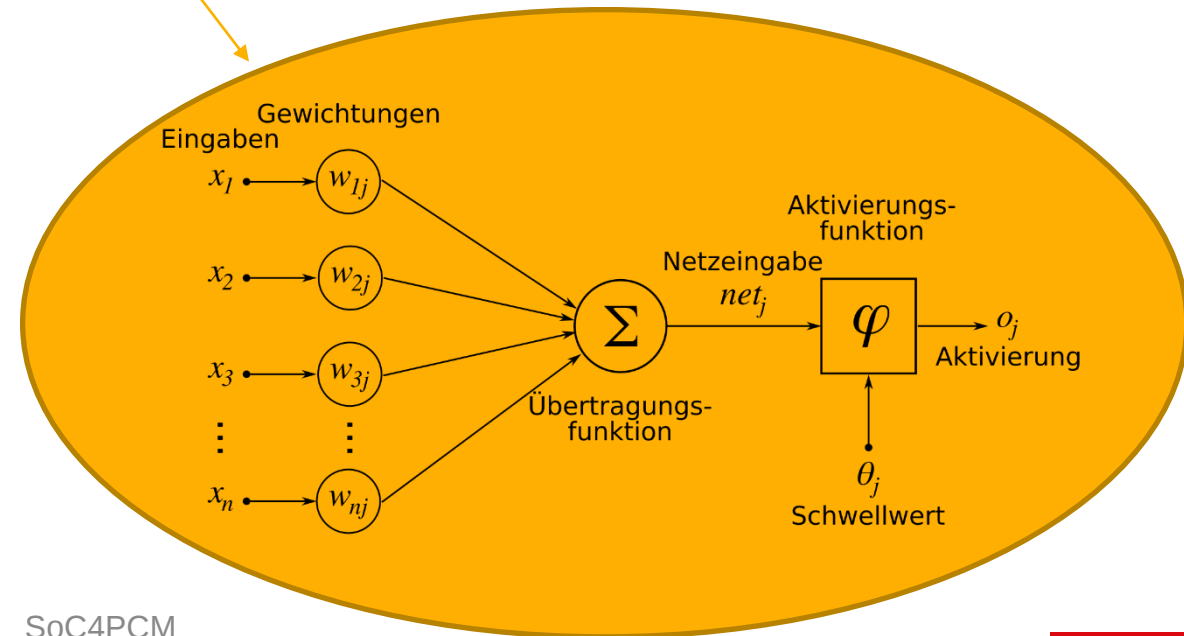
Deep Learning Neural Network



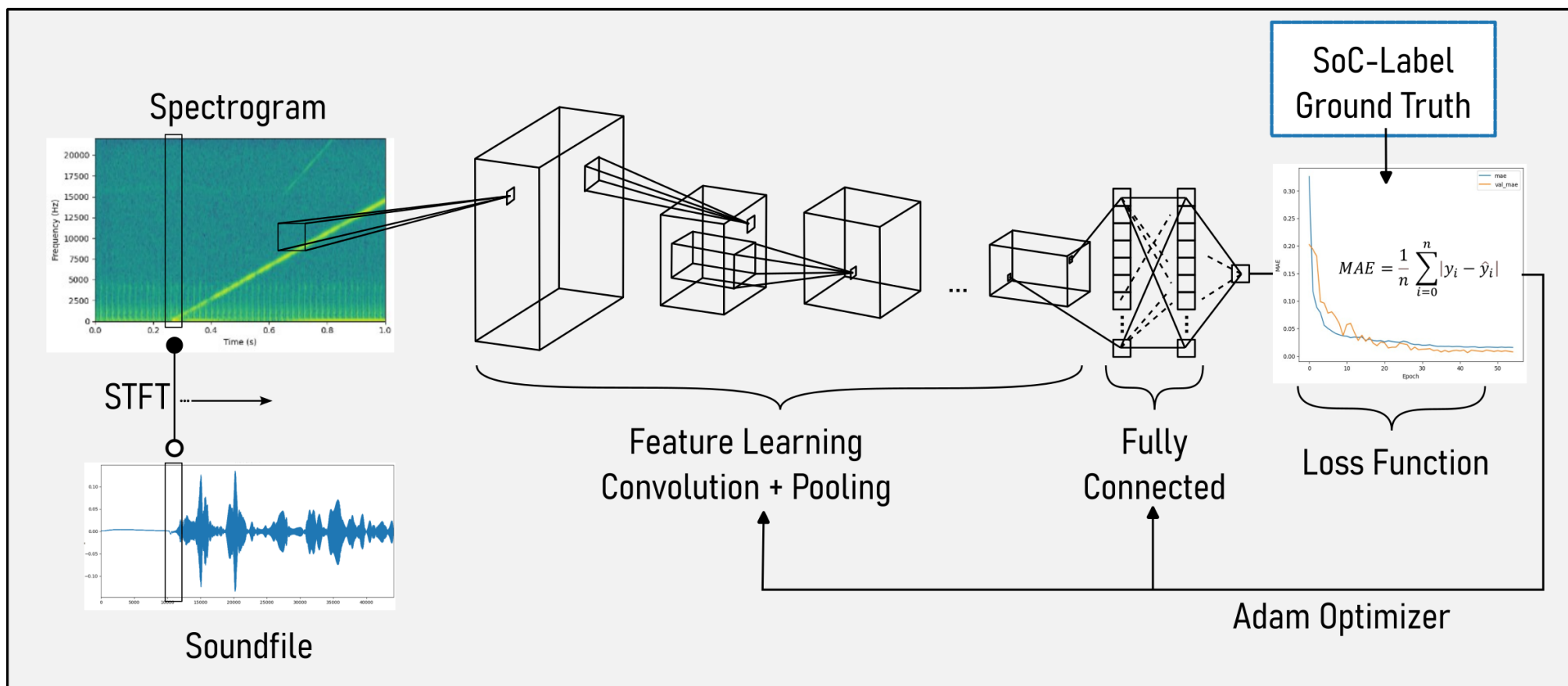
● Input Layer

● Hidden Layer

● Output Layer

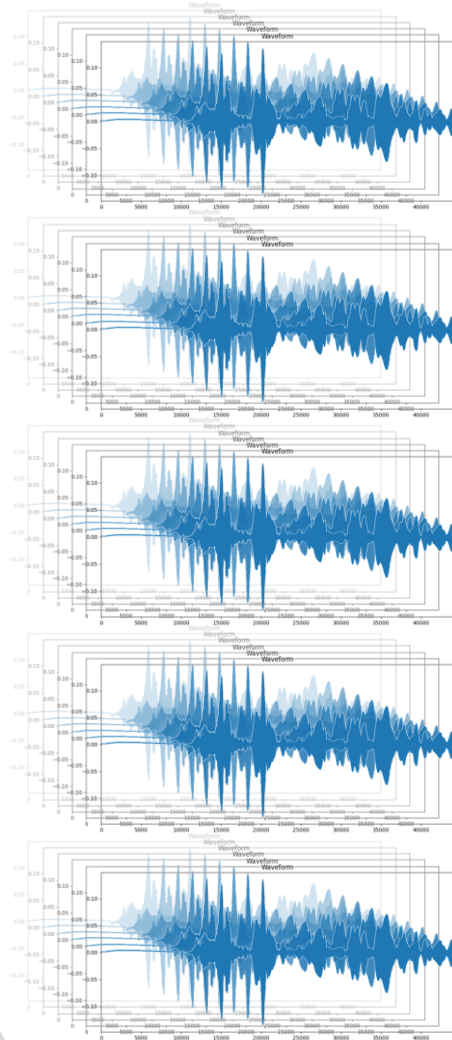


CNN-Model

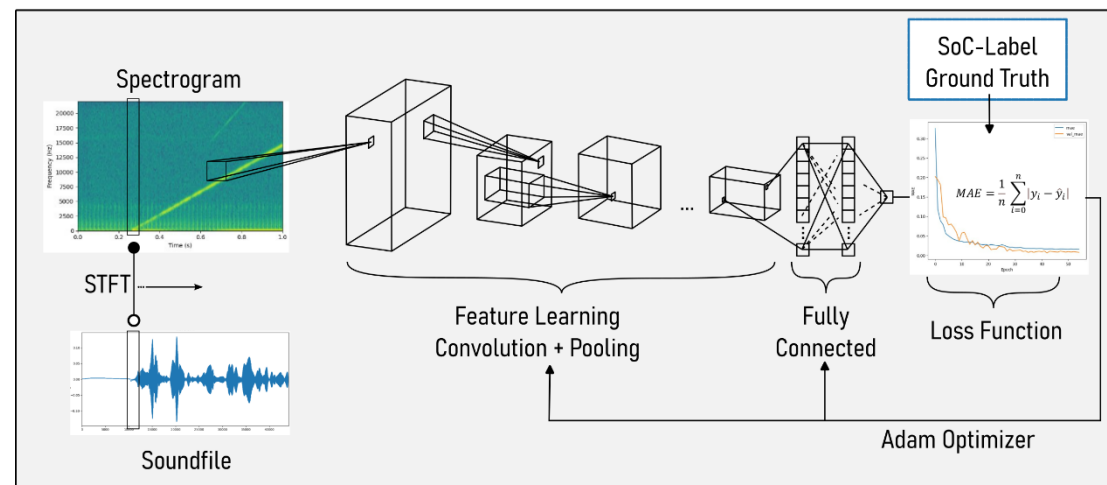


Trainingsdatensatz

Audiodaten



CNN-Model



Aufteilung 3 Datensätze:
Training, Validation, Test

SoC-Werte („Antworten“)

0 %



20 %



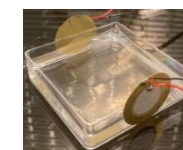
60 %



90 %

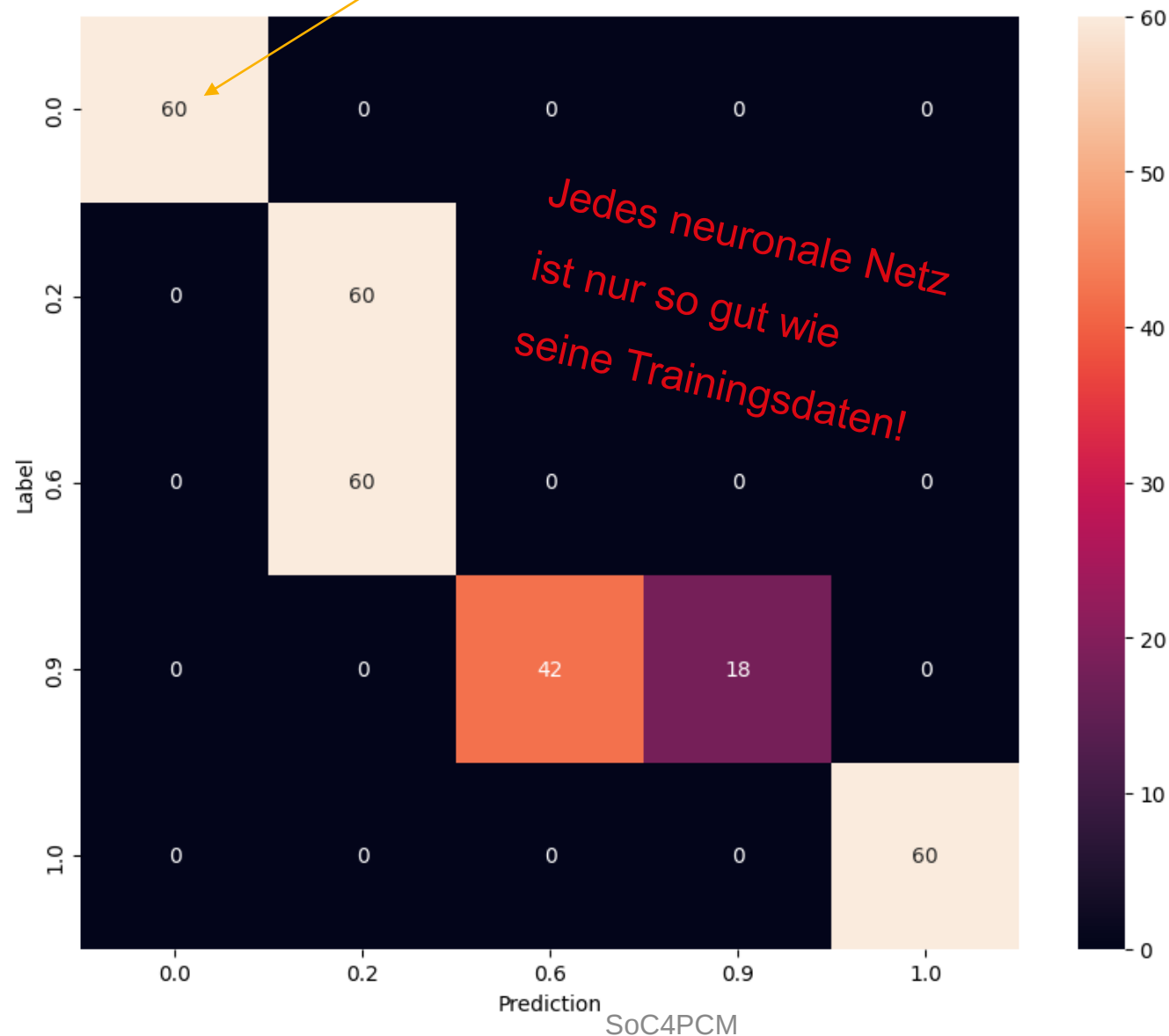
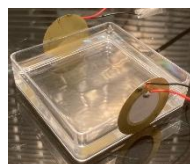
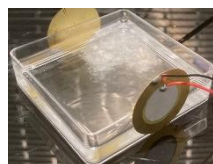


100 %



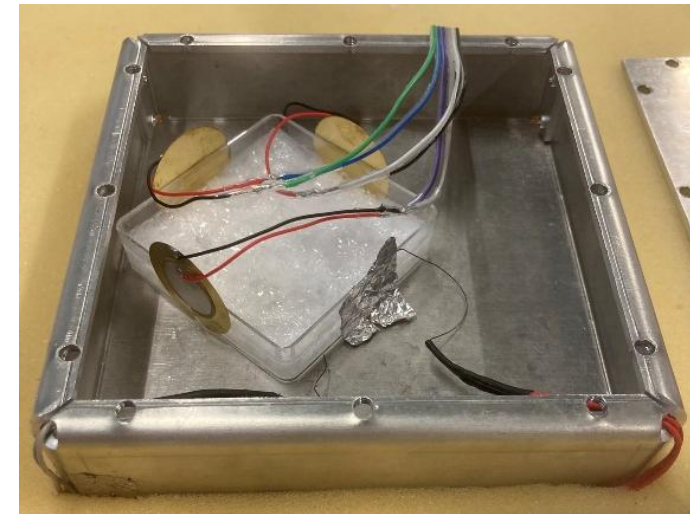
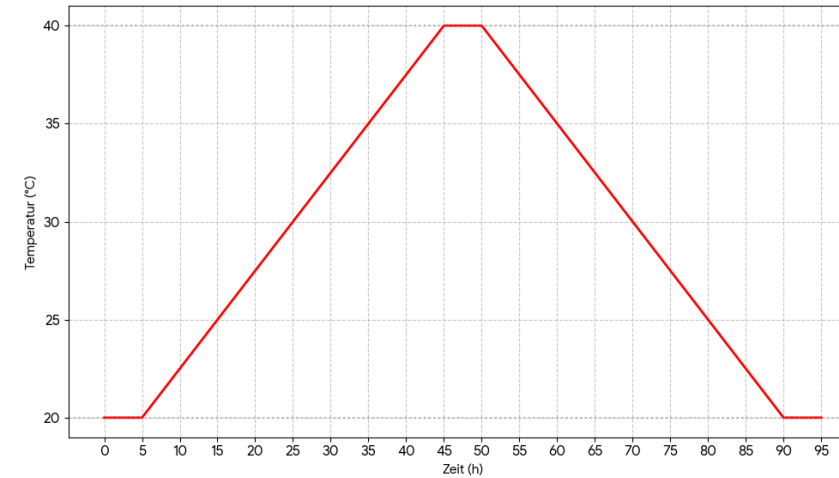
Confusion Matrix

Anzahl der Vorhersagen

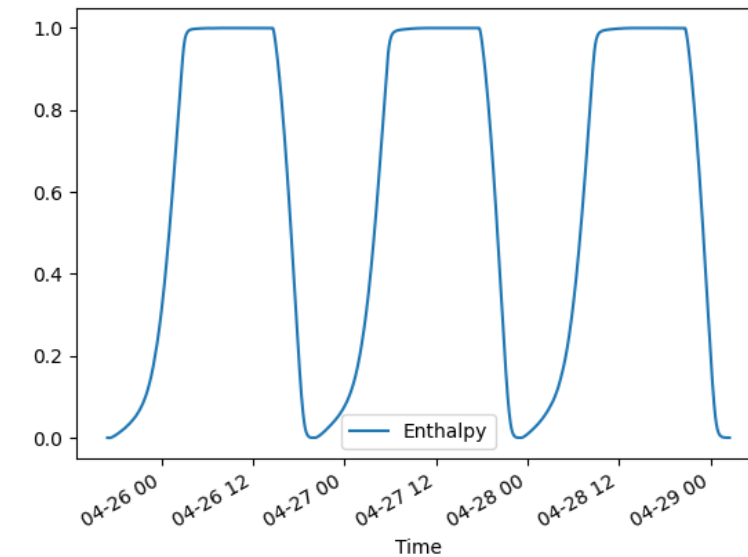
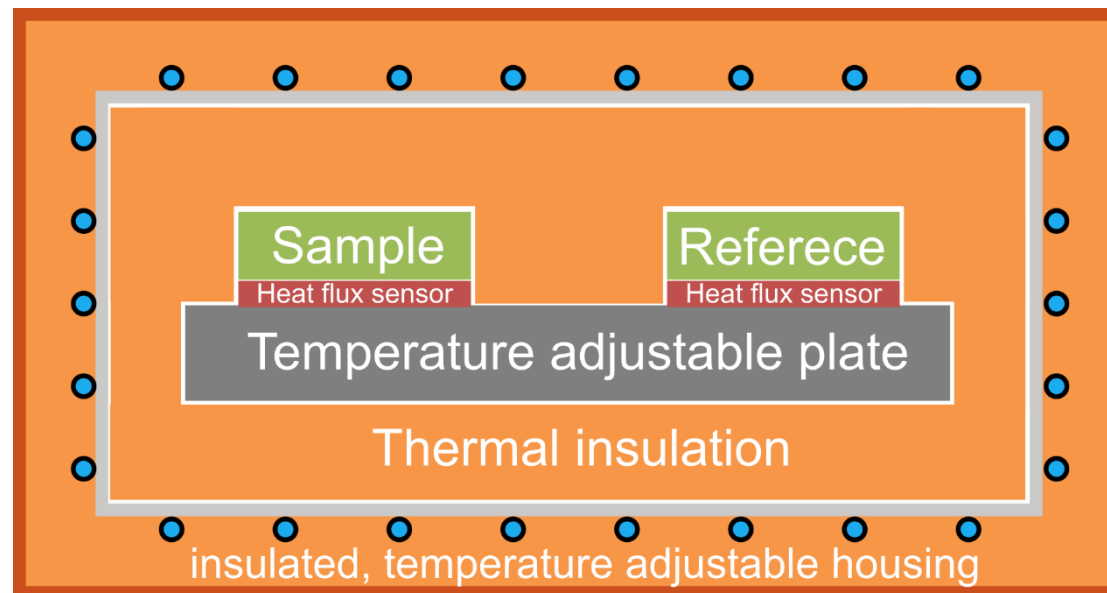


Trainingsdaten mittels MacroDSC

- Über die MacroDSC Messung ist die gespeicherte Energie genau bekannt.
- Der Phasenanteil lässt sich einfach bestimmen

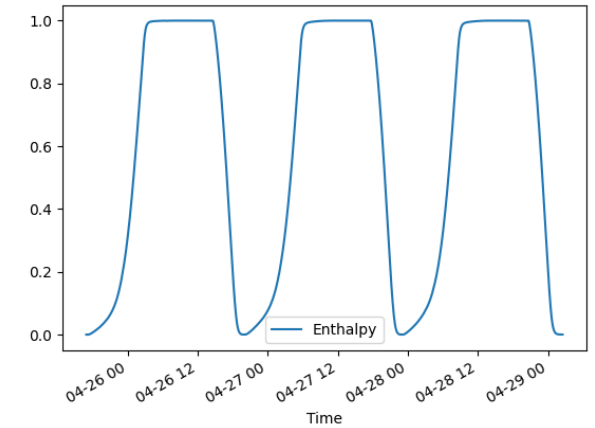


Bestimmung des SoC mittels MacroDSC

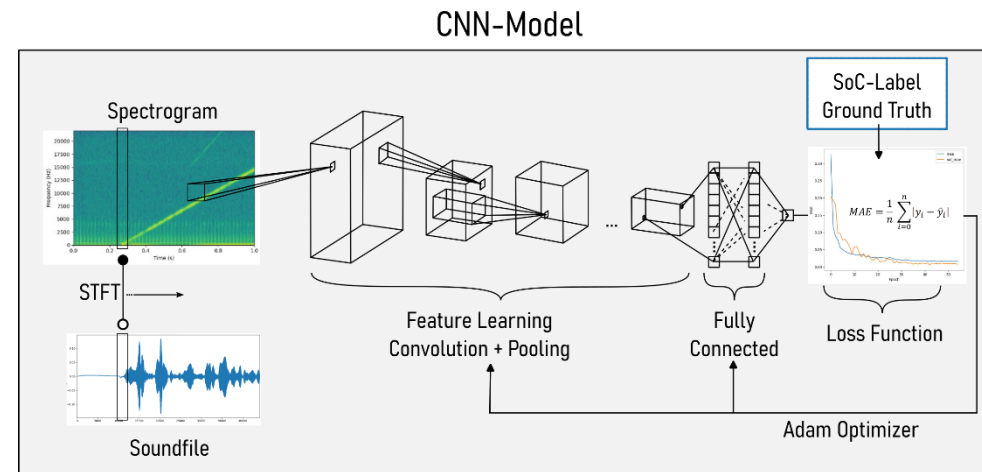
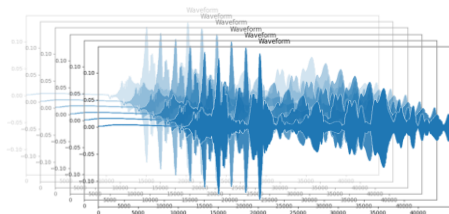


Trainingsdatensatz

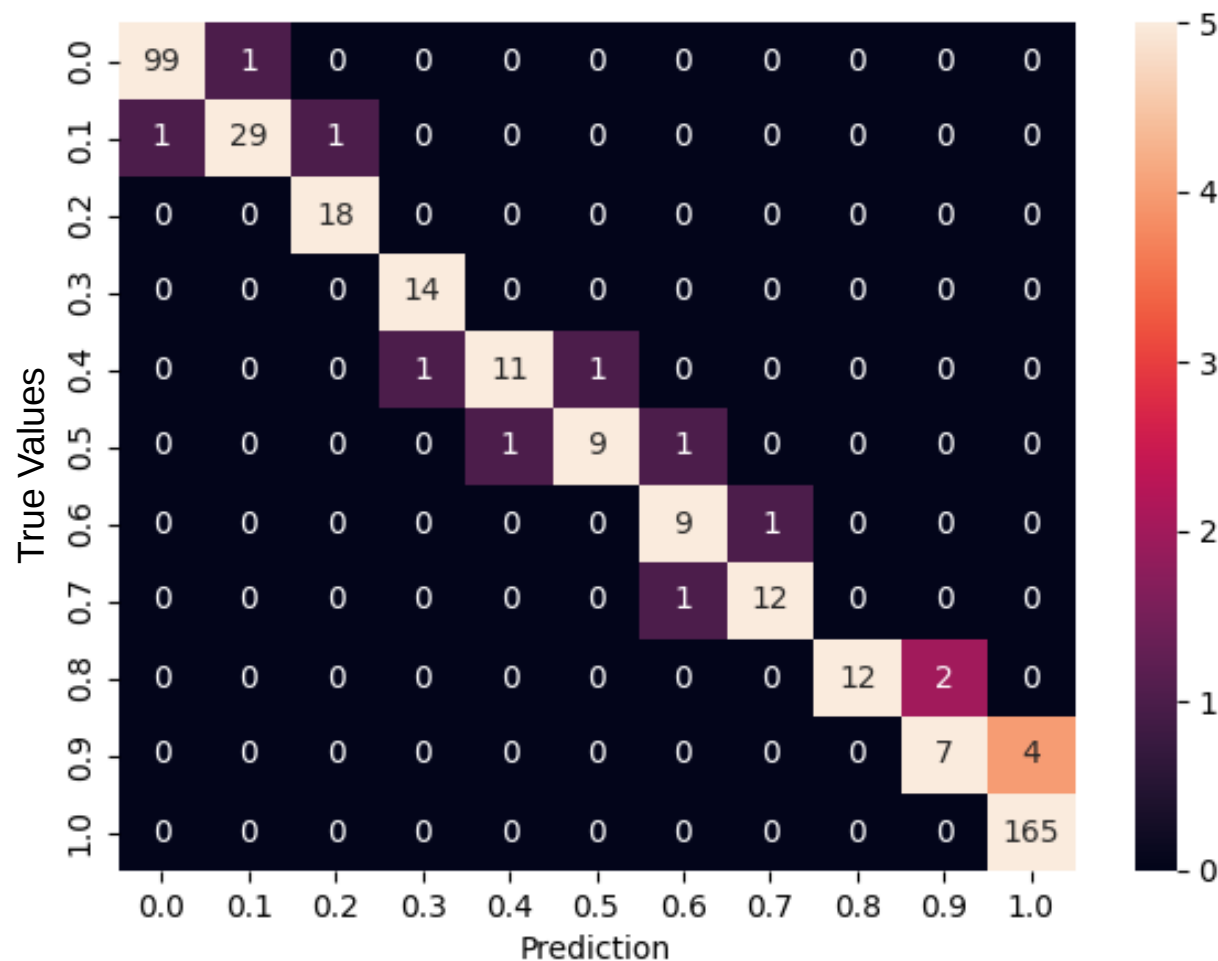
SoC-Werte („Antworten“)



Audiodaten

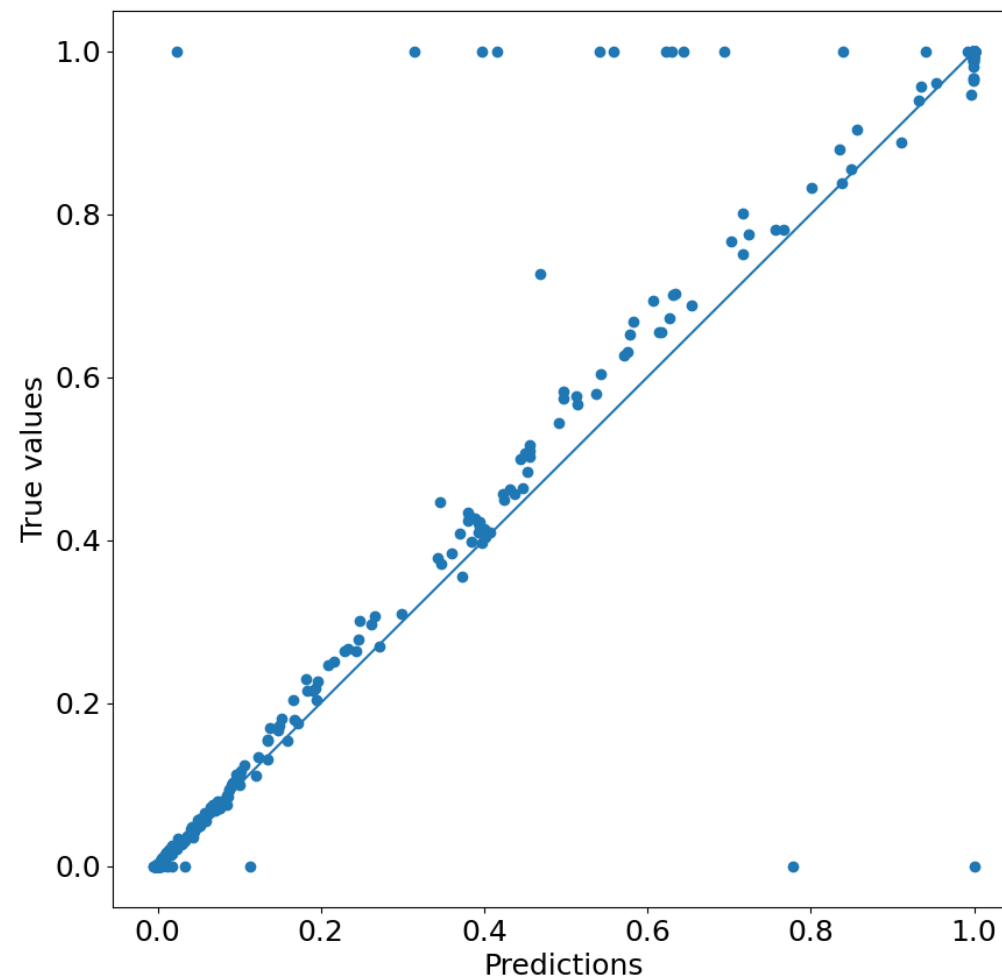


Ergebnisse mit Datensatz aus MacroDSC

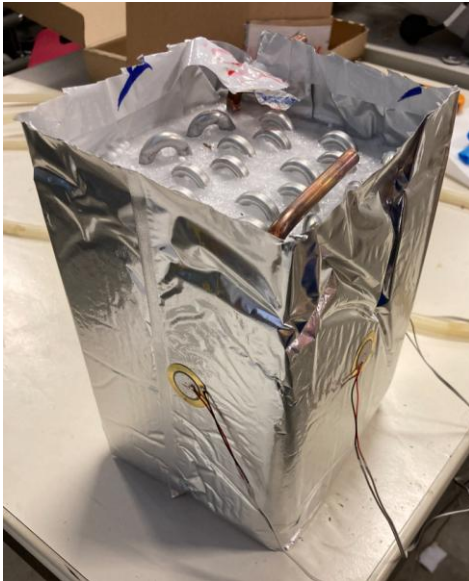


- Kontinuierliche Daten zwischen 0 und 1
- Regression ist sinnvoller als Kategorisierung

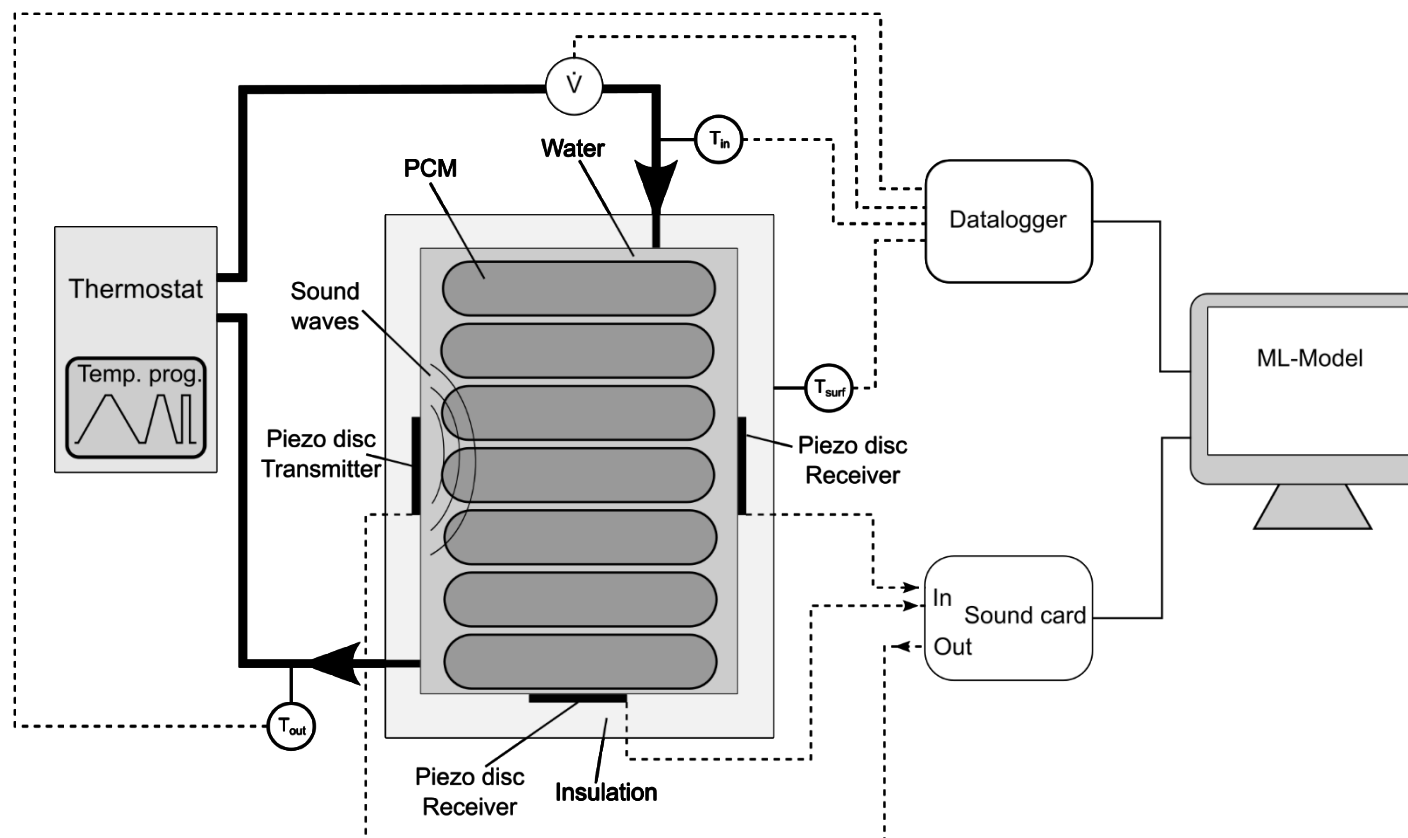
MacroDSC Ergebnisse Regressionsalgorithmus



Speicher mit Wärmeübertrager

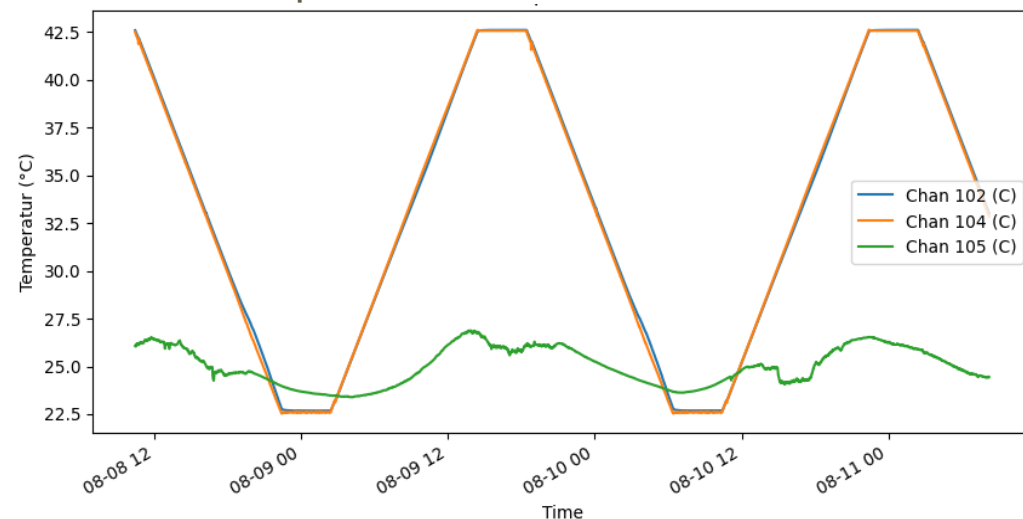


Trainingsdaten für größere Speicher

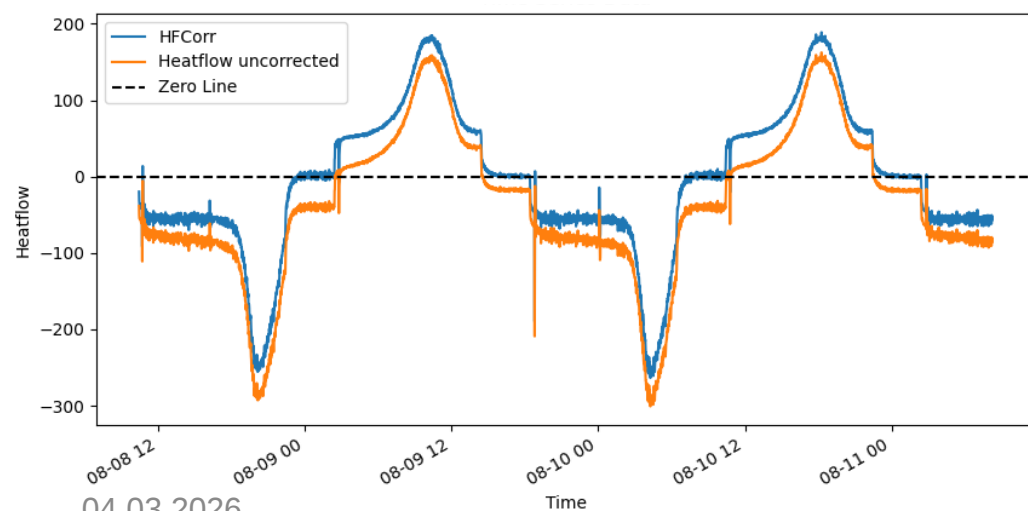


Berechnung des SoC

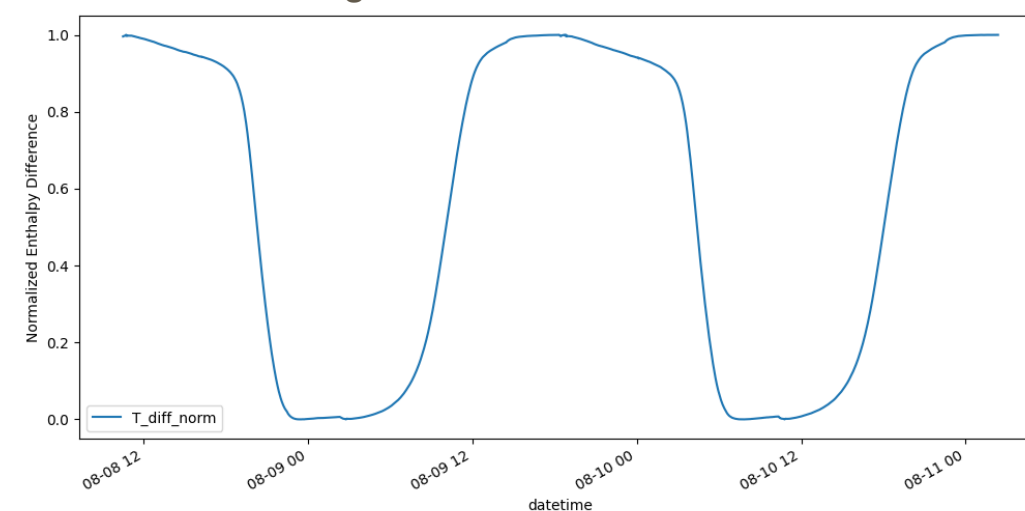
Temperatures: inlet, outlet, surface



Calulation of heatflow and correction of heat loss

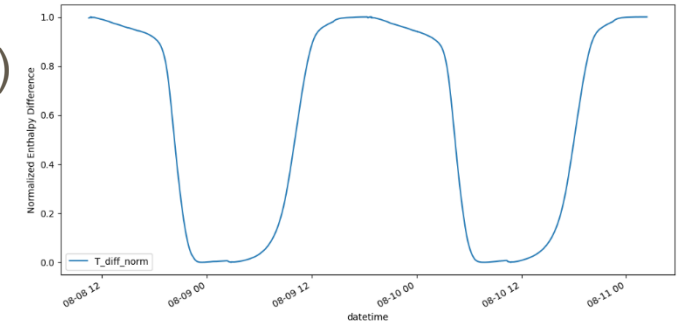


Integration and normalization

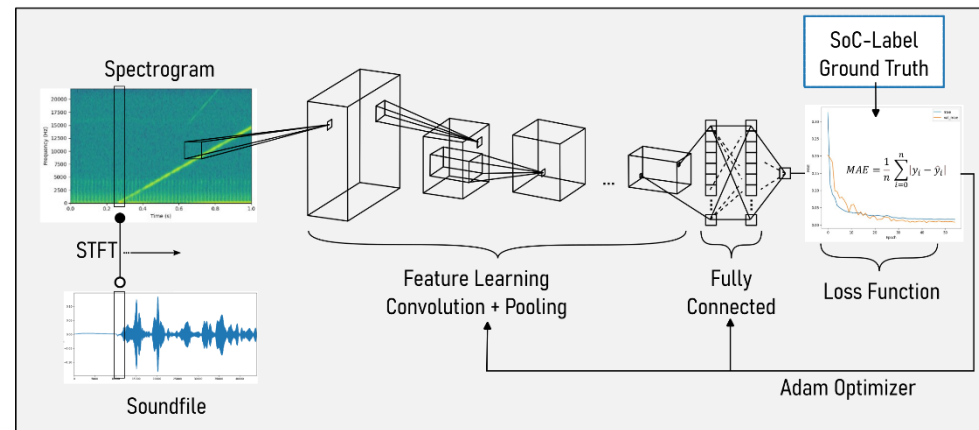


Trainingsdatensatz

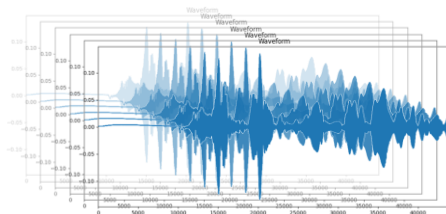
SoC-Werte („Antworten“)



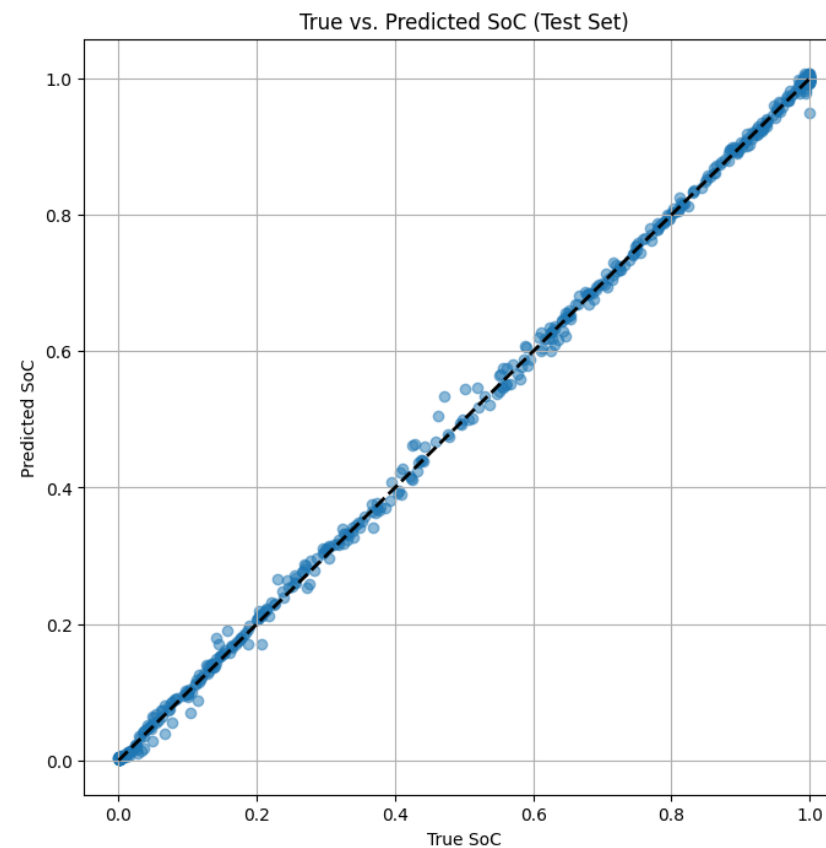
CNN-Model



Audiodaten

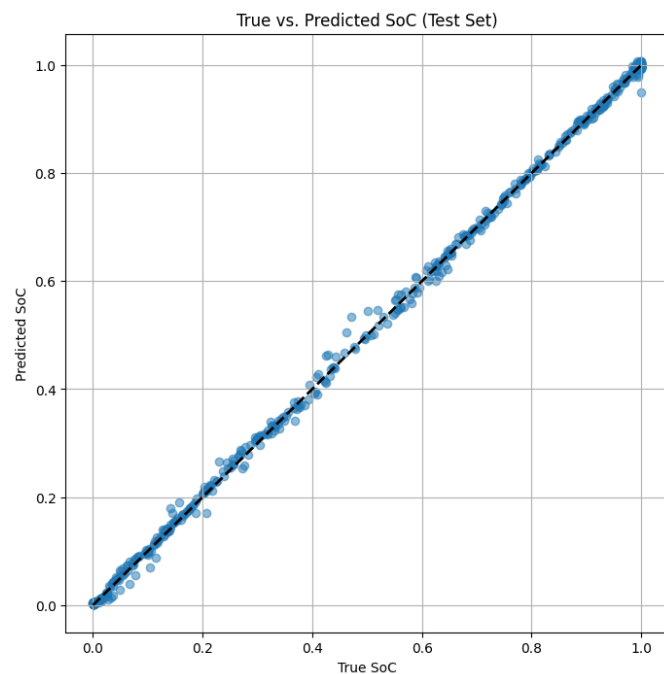


Modelltraining und Vorhersagegenauigkeit

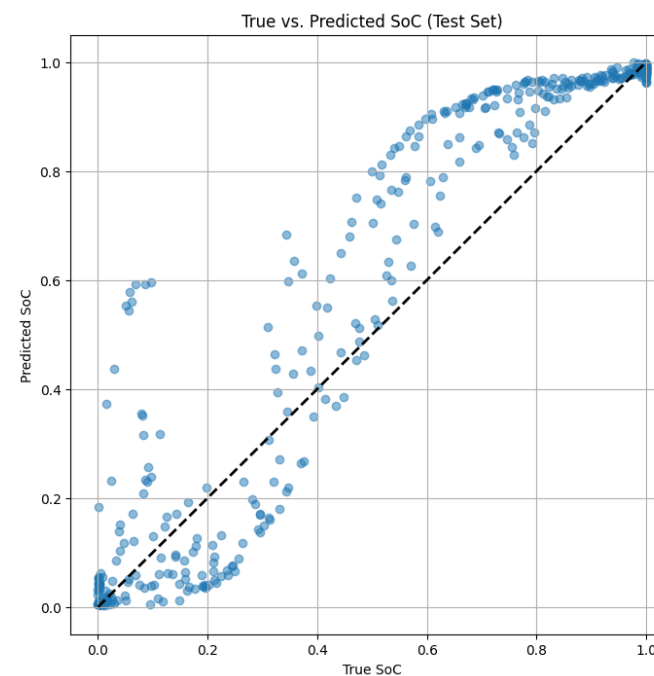


Einfluss der Heizrate

12 h Rampe

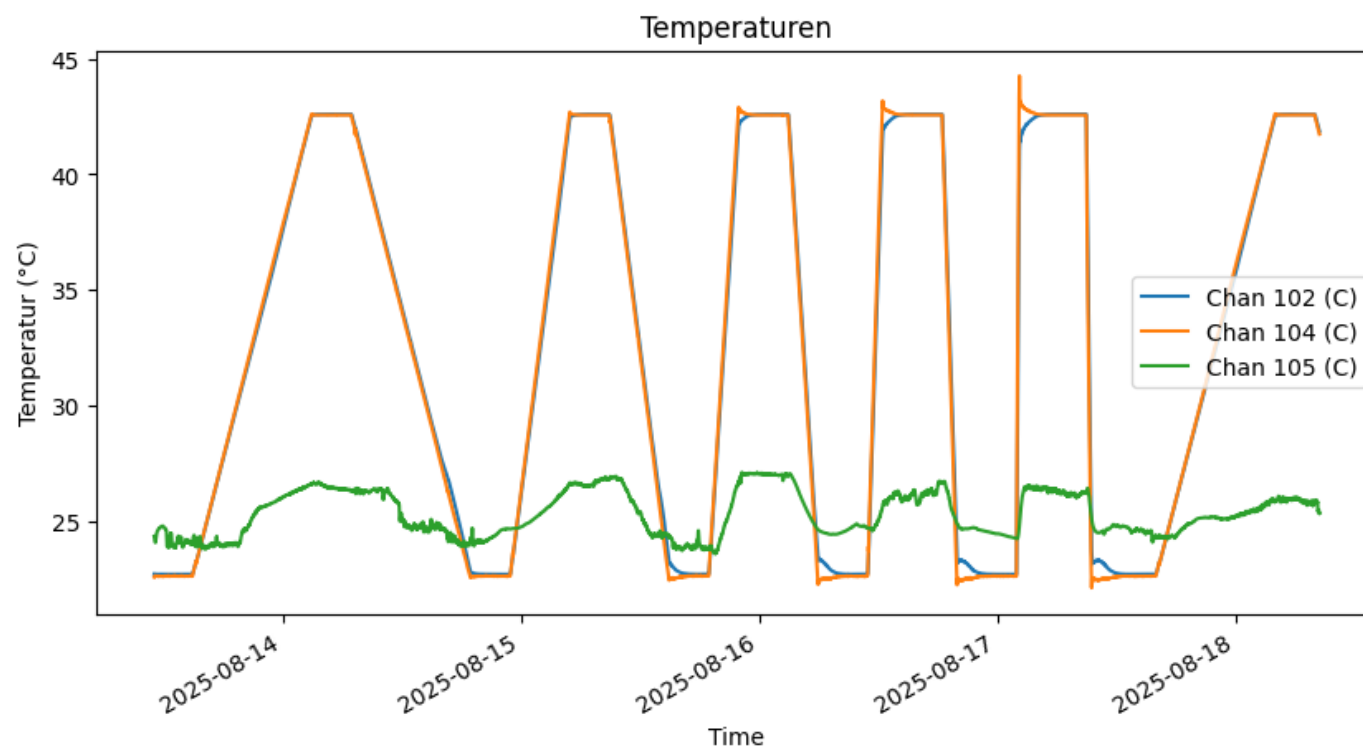


6 h Rampe

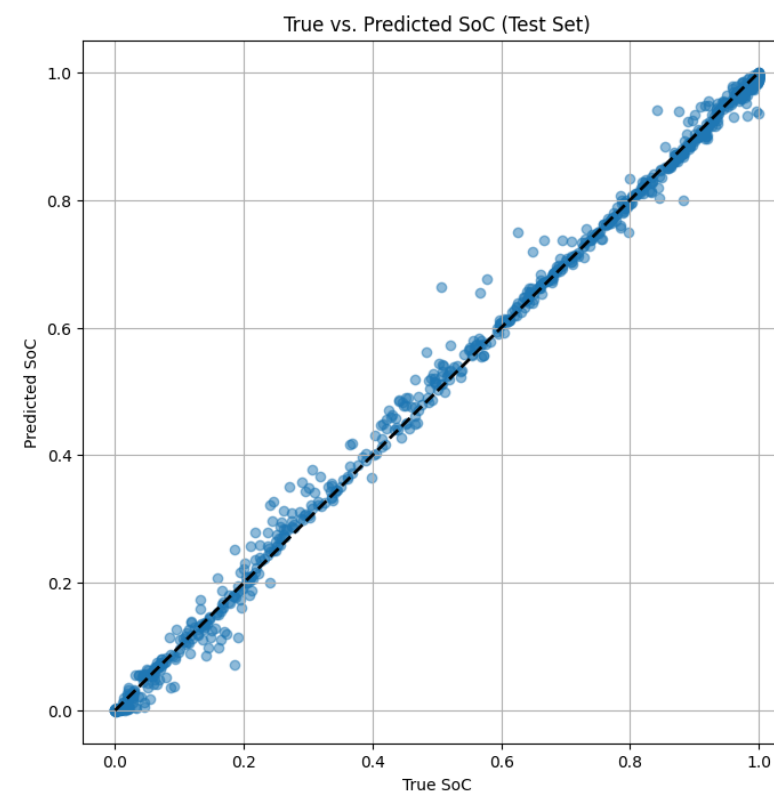


Einfluss der Heizrate

Variierende Rampendauer:
12 h – 6 h – 3 h – 1.5 h – 0 h

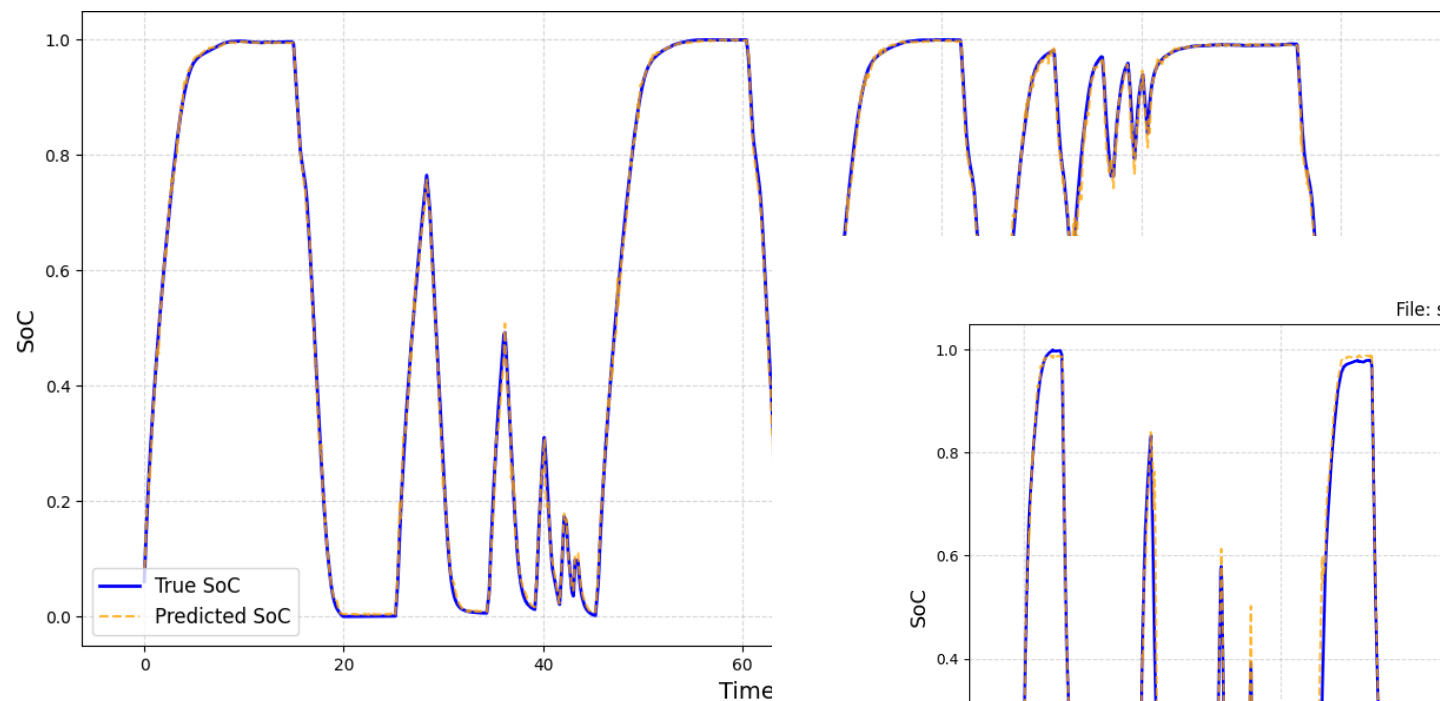


MAE: 1.1 %

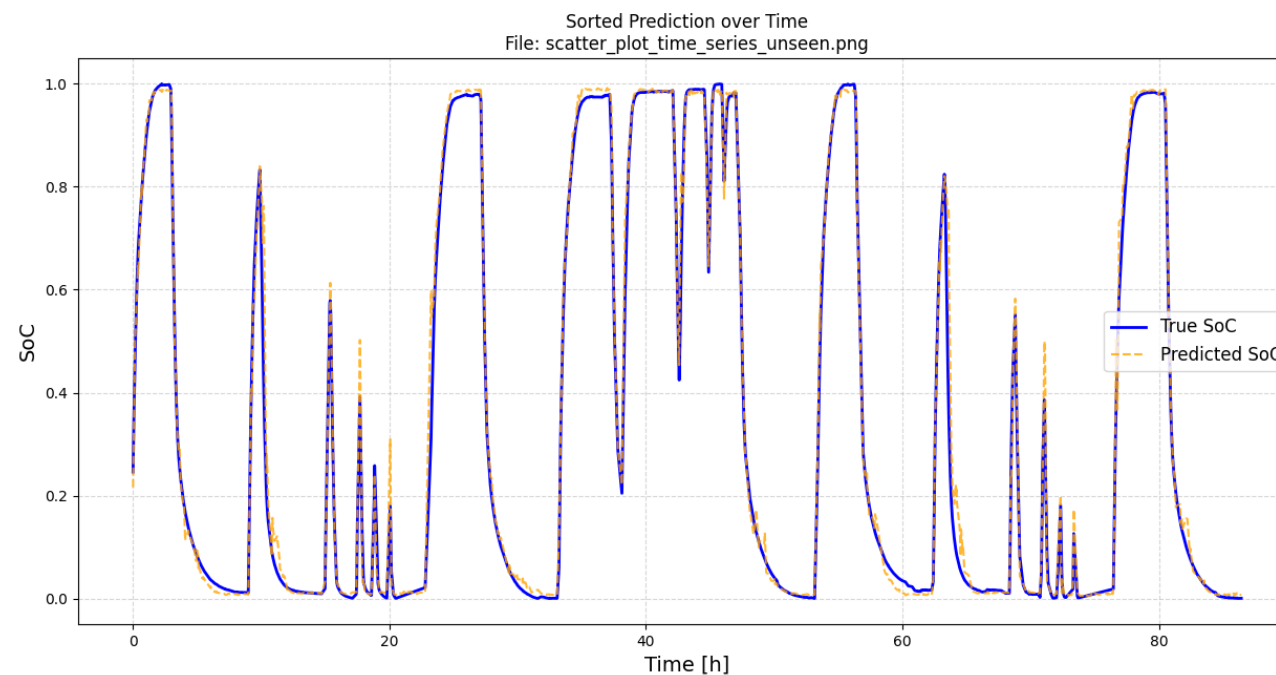


Unvollständige Zyklen

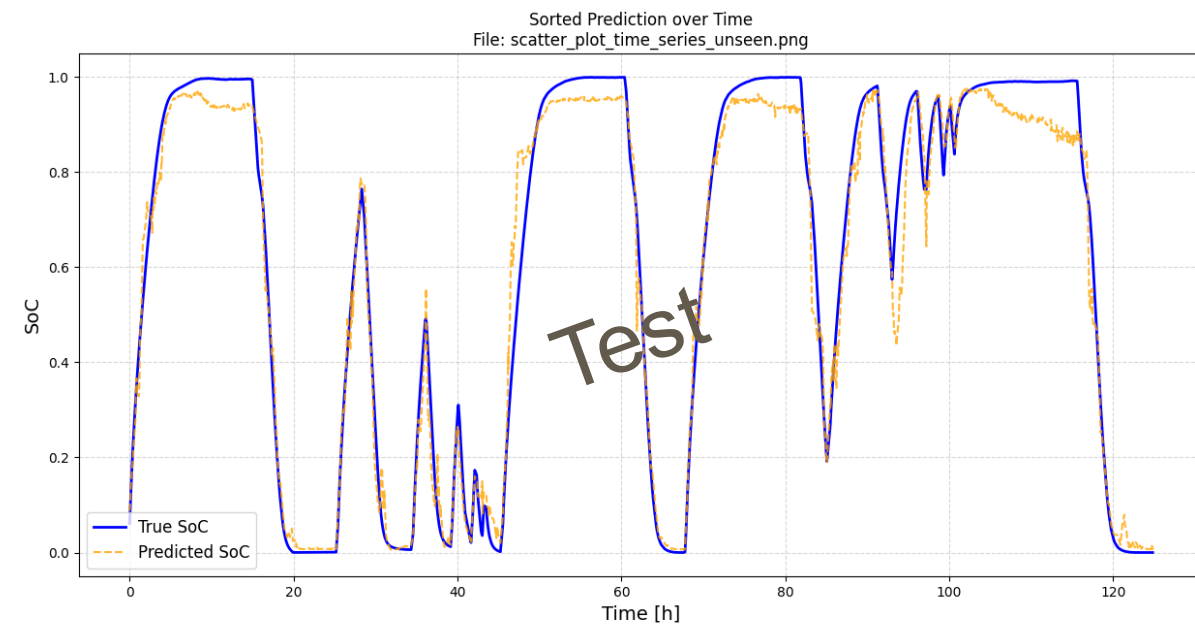
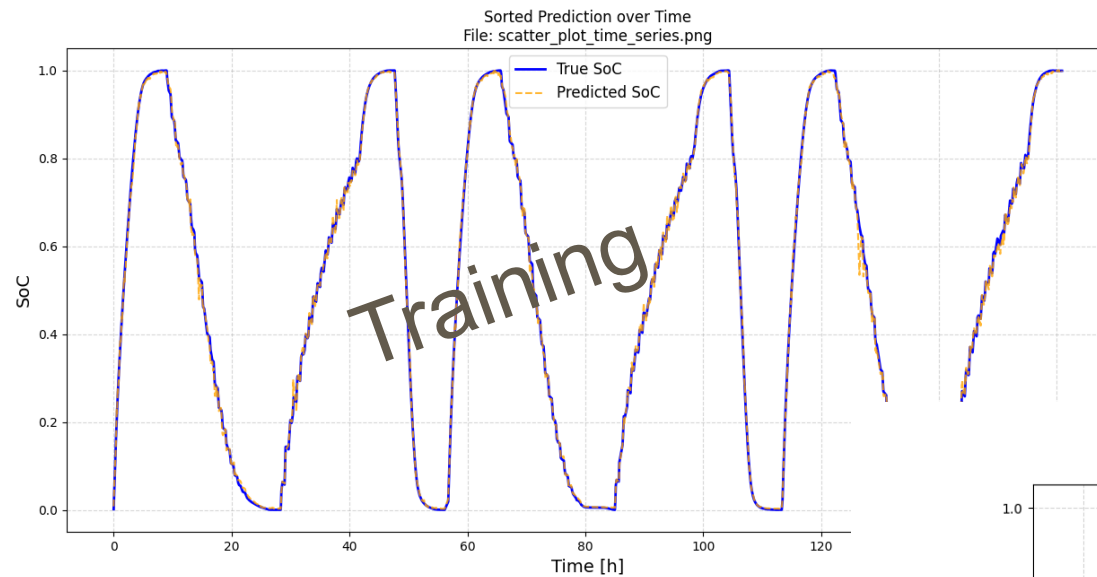
MAE 0.73 %



MAE 0.90 %

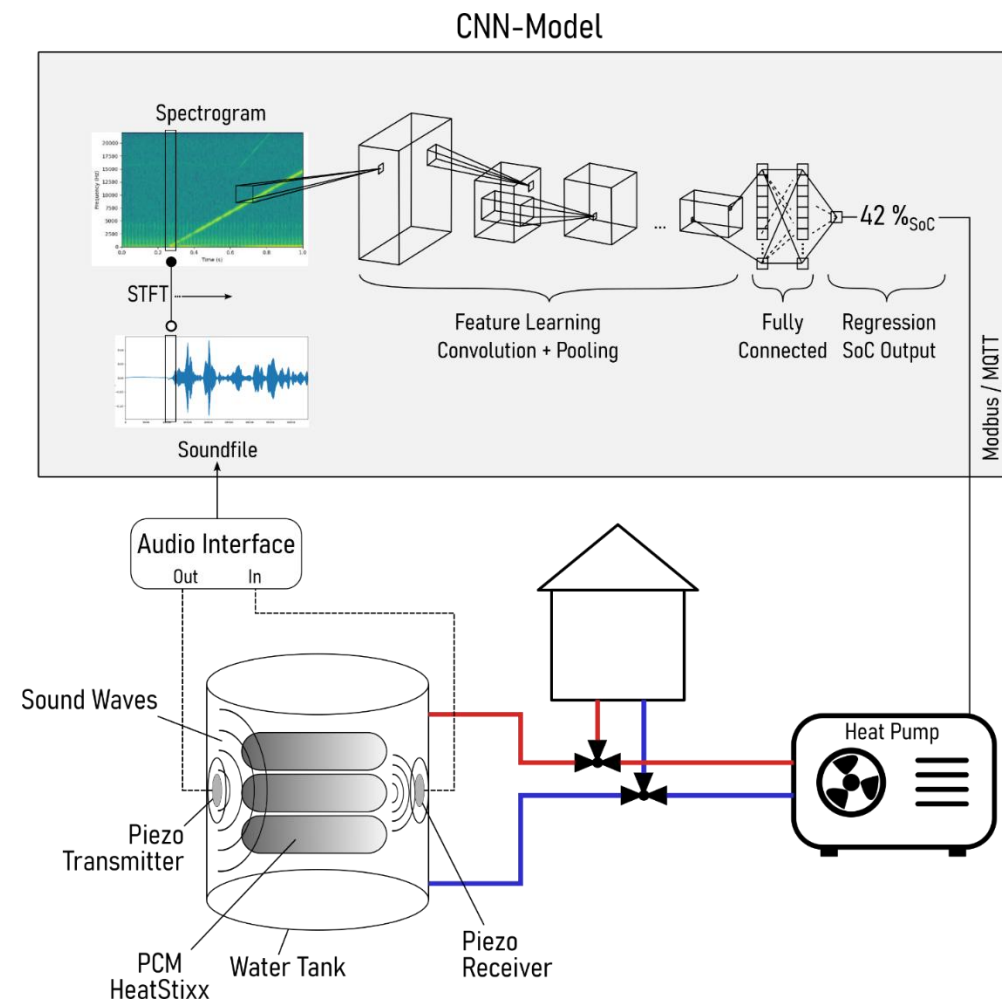


Aktuelle Grenzen des Systems



Fazit

- SoC Bestimmung mittels Schallsensoren ist möglich
- Einfache und preisgünstige Sensortechnologie
- Robust gegenüber Störsignalen
- Dynamik des Systems beeinflusst die Ergebnisse
 - Heiz- / Kühlrate
 - Unvollständige Zyklen
 - → Muss bei Training berücksichtigt werden!
- Auch komplizierte Speichergeometrien mit Wärmeübertrager sind messbar
- Übertragbar auf unterschiedliche Materialien
- Es muss ein Trainingsdatensatz / Temperaturprogramm gefunden werden, der möglichst viele Zustände beinhaltet, die auch im Betrieb vorkommen!



Vielen Dank für die Aufmerksamkeit!

Michael Brütting
Tel.: +49 931 70564-323
michael.bruetting@cae-zerocarbon.de



Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages