

HOWAFLEX2MARKET  
**DIGITALER ZWILLING**  
Deliverable 3.2

Seragiotto Clovis, Carlo Corinaldesi, Regina Hemm  
**AIT Austrian Institute of Technology GmbH**

**Projektleitung:**

Regina Hemm  
regina.hemm@ait.ac.at  
+43 664 88335515



01.04.2025



## INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung und Zielsetzung.....	3
2	Annahmen und Methodik.....	4
2.1	Verlustrate .....	4
2.2	Wirkungsgrad .....	5
2.3	Lücken in den Rohdaten.....	5
2.4	Heizungs- und Wasserentnahmeprofil .....	5
2.5	Modellvalidierung und Korrekturfaktoren .....	6
3	Szenarien und Ergebnisse.....	10
4	Abkürzungsverzeichnis.....	11
5	Abbildungsverzeichnis.....	12

## 1 EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG

Das Projekt HoWaFlex2Market hat zum Ziel, den Nutzen von über tausend im Feld installierten Boilern für die Bereitstellung von Flexibilität für unterschiedliche Anwendungsfälle zu testen. Diese umfassen unter anderem Eigenverbrauchserhöhung im Rahmen einer gemeinschaftlichen Erzeugungsanlage, Regereservebereitstellung und Tests von neuartigen Lastverschiebeprodukten. Bei der Entwicklung der Ladestrategien wird ein Fokus auf die Robustheit der Steuerung gelegt, und Fairnessaspekte bei verschiedenen Aufteilungsschlüsseln, rechtliche und regulatorische Rahmenbedingungen, sozioökonomische Faktoren sowie das Nutzer:innenerleben bzw. Motivation berücksichtigt. Dadurch soll die Massentauglichkeit der Flexibilitätsbereitstellung von intelligenten Haushaltsverbrauchern erhöht und in ein breientaugliches Produkt überführen werden.

Der in diesem Deliverable beschriebene digitale Zwilling ist das Simulationsmodell, das den Live-Betrieb der Boiler nachahmt und die Möglichkeit bietet, die Anwendung verschiedener Ladestrategien auszuprobieren. Mithilfe der historischen Daten aus den Boiler-Sensoren wird das Modell kalibriert und dessen Genauigkeit geprüft; das Modell kann im Anschluss dazu verwendet werden, Referenzszenarien zu berechnen und zu vergleichen dank der Auswertung von KPIs (Key Performance Indikatoren), die der digitale Zwilling berechnet. Auch für neue Gebäudesetups lässt sich das Modell adaptieren und parametrieren, um die bestmögliche Ladestrategie in einem Ein- oder Mehrfamilienhaus zu definieren.

Dieses Dokument beschreibt die Vorgehensweise, Ergebnisse und Lehren, die aus dem digitalen Zwilling gezogen wurden.

## 2 ANNAHMEN UND METHODIK

Im ersten Schritt werden pro Boiler anhand seiner historischen Sensor-Daten die thermophysikalischen Parameter berechnet, die für die Simulation erforderlich sind: *Verlustrate der thermischen Energie* und *Wirkungsgrad*. Aus den Sensor-Daten lässt sich dann auch ein *Heizungs-* und ein *Wasserentnahmepprofil* pro Boiler erstellen, die für die Modellvalidierung und die Simulation notwendig sind. Vor der Profilerstellung müssen aber die Lücken in den Daten gefüllt werden.

Ursprünglich wurde versucht, gemeinsame thermophysikalische Parameter für alle Boiler zu bestimmen. In der Analyse zeigte sich jedoch, dass die individuellen Unterschiede zwischen den Boilern – etwa in Bezug auf Aufstellungsort oder Nutzungsverhalten – zu deutlich abweichenden Verlust- und Effizienzkennwerten führten. Daher wurden die Parameter (Verlustrate der thermischen Energie und Wirkungsgrad) individuell pro Boiler berechnet, um eine realitätsnahe Modellierung und Simulation zu ermöglichen.

Hinweis: Leistung und thermische Energiemenge sind die einzigen relevanten Sensoren, um das Simulationsmodell aufzubauen. Die erhaltenen Sensor-Daten hatten eine Frequenz von 30 Sekunden; für das Modell wurde zuerst ein Downsampling ausgeführt, um Zeitreihen mit einer Frequenz von einer Minute zu bekommen.

### 2.1 Verlustrate

Um die Verlustrate zu berechnen, wird ein einfaches lineares Regressionsmodell mit zwei Größen verwendet: die thermische Energiemenge zu einem gewissen Zeitpunkt (Einflussgröße:  $E$ ) und der Energieverlust bis zum nächsten Zeitpunkt (Zielgröße:  $\Delta E$ ). Ziel ist, die Koeffizienten  $\alpha$  und  $\beta$  zu bestimmen, die erlauben, den Energieverlust als eine lineare Funktion  $\Delta E = \alpha \cdot E + \beta$  möglichst gut zu modellieren.

Für die lineare Regression werden einige Punkte [das heißt, Paare ( $E$ ,  $\Delta E$ )] aus der Punktwolke ausgeschlossen, die man als nicht relevant, verzerrend, oder Rausch betrachten kann. Ignoriert werden Punkte:

- Mit Energiemenge kleiner als 1,5 kWh oder größer als 4 kWh.
- Mit Energieverlust größer als 0,0102 kWh/s – größere Werte werden als Verbrauch (und nicht nur Verlust) betrachtet.
- In einem Bereich, wo die Leistung größer ist als 1 kW. Diese Bereiche werden betrachtet als Aufheizungsphasen.

Die Grenzwerte (1,5 kWh, 4 kWh, 0,0102 kWh/s, 4 Stunden, 1 kWh) wurden empirisch bestimmt. Abbildung 1 zeigt das Ergebnis für einen der Boiler.

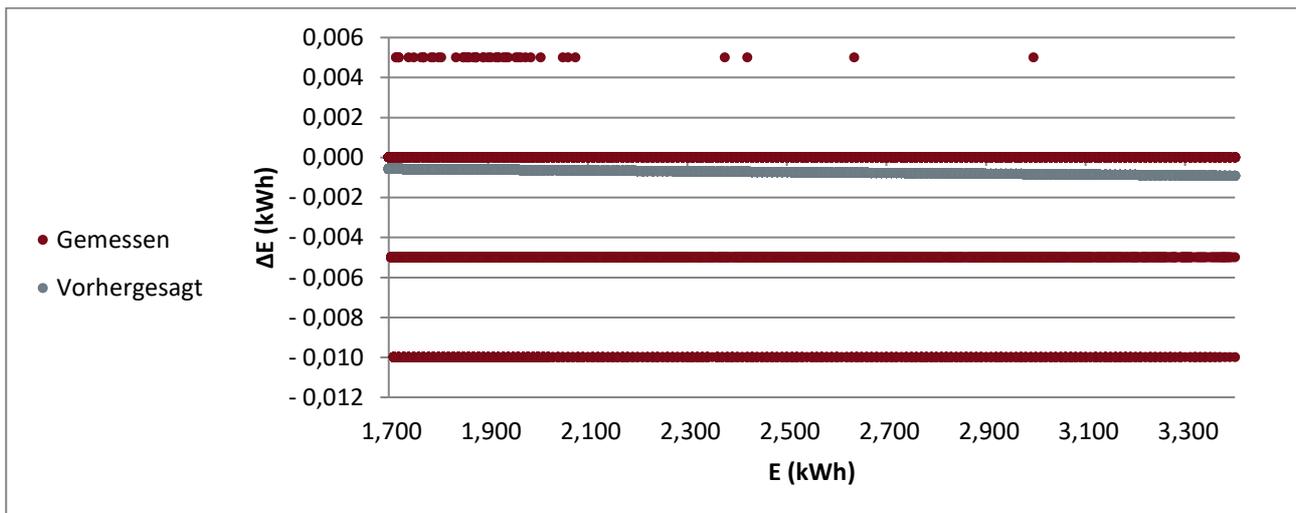


Abbildung 1: Energieverlust als Funktion der Energiemenge, gemessen und durch die lineare Regression vorhergesagt

## 2.2 Wirkungsgrad

Um den Wirkungsgrad zu bestimmen, werden ausschließlich die Aufheizphasen der Boiler verwendet. In jeder Phase wird die zugeführte Energie berechnet und anschließend der vorhergesagte Verlust in dieser Zeit abgezogen. Das Verhältnis zwischen diesem Wert („Soll-Energie“) und dem tatsächlichen Wert am Ende der Aufheizphase („Ist-Energie“) wird für jede Phase berechnet und der Mittelwert ergibt den Wirkungsgrad.

## 2.3 Lücken in den Rohdaten

Lücken in den Rohdaten müssen gefüllt werden, bevor man die Profile erstellt. Gefüllt werden Lücken in den Energiewerten mithilfe der linearen Funktion für die Verlustrate (siehe 2.1), während Lücken in den gemessenen Leistungen zunächst einfach 0 bekommen. Ist der erste Energiewert nach der Lücke kleiner als erwartet, muss man nichts mehr machen: man kann davon ausgehen, eine (eventuell große) Wasserentnahme findet zu diesem Zeitpunkt statt.

Ist der erste Energiewert nach der Lücke dagegen größer als erwartet, muss die Leistung sukzessiv korrigiert und die Energiewerten entsprechend angepasst werden. Da alle Boiler nur mit einer Leistung von 2,4 kW arbeiten können (und der Wert darf nicht überschritten werden), wird diese Leistung allen Schritten zugewiesen, vom Ende der Lücke bis zum Anfang bzw. bis ein Energiewert erreicht wird, der nicht mehr größer ist als erwartet.

## 2.4 Heizungs- und Wasserentnahmeprofil

Das Heizungsprofil besteht aus Paaren (Zeitstempel, zugeführte Energie) und wird ausschließlich für die Modellvalidierung benötigt. Das Entnahmeprofil besteht aus Paaren (Zeitstempel, entnommene Energie) und ist wichtig sowohl für die Validierung als auch für die Simulationen von Lade-strategien.

Die zugeführte Energie lässt sich als  $Leistung \times \frac{1}{60}$  einfach berechnen (da mit einer Frequenz von 1 Minute gearbeitet wird); verwendet werden aber nur Zeitstempel mit Leistung größer als 1 kW. Die

entnommene Energie wird berechnet mit  $\Delta E$  – *Energieverlust* – *zugeführte Energie*, und nur Werte größer als 0,0102 werden übernommen, andere Werte werden verworfen.

## 2.5 Modellvalidierung und Korrekturfaktoren

Gegeben der initialen Energiemenge, das Wasserentnahme- und das Heizungsprofil eines Boilers (2.4) vergleicht die Modellvalidierung die echte Energiemenge in den Boilern im Laufe der Zeit mit den Werten, die die modellierte Verlustrate (2.1) und der Wirkungsgrad (2.2) vorhersagen. Anschließend wird die lineare Funktion, die den Verlust modelliert, schrittweise geändert, um die Abweichung zwischen echten und vorhergesagten Werten zu reduzieren:

- Der Zeitstempel mit der größten quadratischen Differenz zwischen echtem und modelliertem Wert wird ausgewählt; der Quotient von dieser Differenz und der Anzahl von Zeitstempeln ist der *Korrekturfaktor*  $\epsilon$ .
- Wird mit der Funktion  $\Delta E = \alpha \cdot E + \beta - \epsilon$  die Summe der quadratischen Fehler (oder: Summe der Quadrate der Restabweichungen, SQR) kleiner, übernimmt man den Korrekturfaktor definitiv ins Modell.
- Diese Schritte werden so lange wiederholt, bis entweder die neue SQR größer wird oder die Differenz zwischen der vorherigen und der neuen SQR kleiner wird als 0,0001 (aber insgesamt nicht mehr als 1000 Male).

Ist die SQR mit dem letzten berechneten  $\epsilon$  größer geworden, werden kleinere Korrekturfaktoren  $\epsilon'$  in  $[0,1 \cdot \epsilon, 0,01 \cdot \epsilon, 0,001 \cdot \epsilon, \dots]$  ausprobiert. Wird die SQR mit einem kleineren Korrekturfaktor  $\epsilon'$  und der Funktion  $\Delta E = \alpha \cdot E + \beta - \epsilon'$  kleiner, übernimmt man den Korrekturfaktor definitiv ins Modell und wiederholt man den Schritt mit demselben Korrekturfaktor; sonst probiert man den nächsten, noch kleineren Korrekturfaktor. Das wird wiederholt, bis die Verbesserung kleiner wird als 0,0001 (aber nicht mehr als 1000 Male).

Der Vergleich für einen Boiler in einer leeren Wohnung (das heißt, *ohne* Wasserentnahme) wird unten gezeigt. Abbildung 2 und Abbildung 3 zeigen die 7 ersten (und Abbildung 4 und Abbildung 5 die 7 letzten) Tage des Vergleichs zwischen gemessenen und vorhergesagten Energiemengen, ohne und mit Korrekturfaktor. Gleich danach kommt der Vergleich für einen Boiler *mit* Wasserentnahme für 10 Tage.

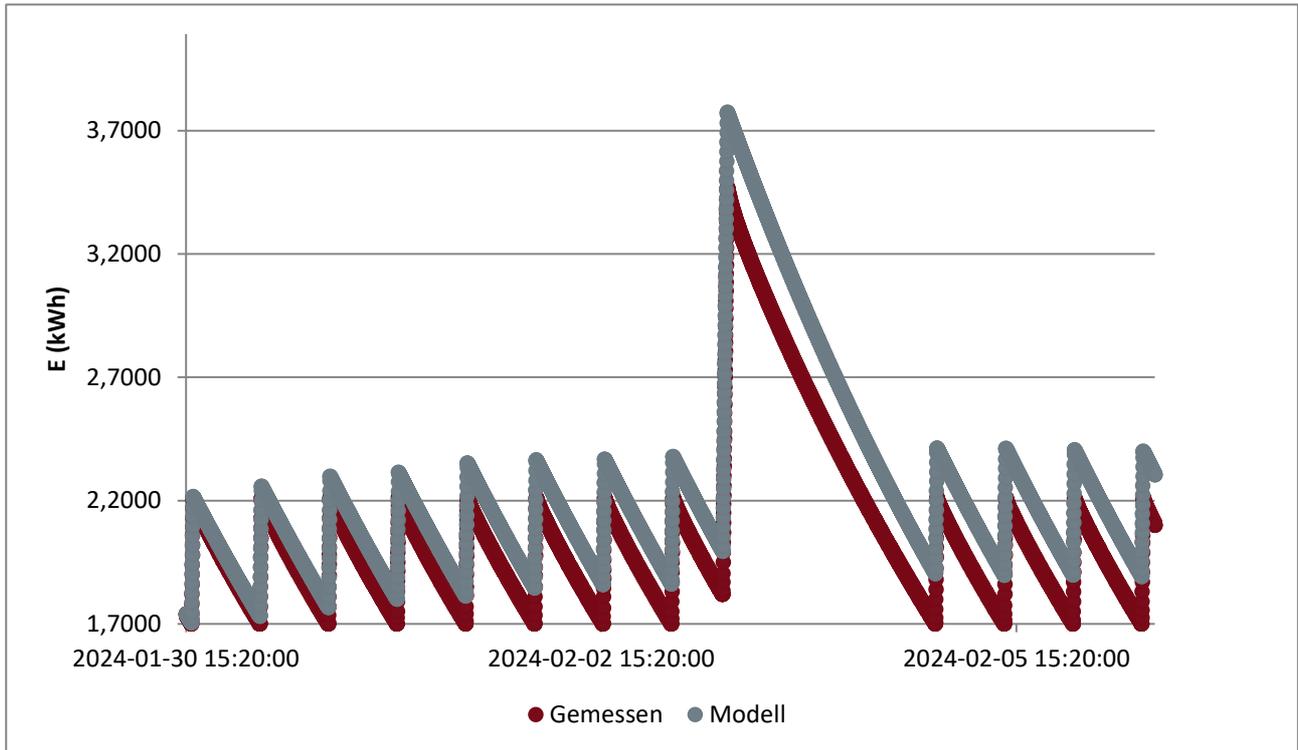


Abbildung 2: Vergleich zwischen gemessenen und vorhergesagten Werten für einen Boiler ohne Entnahme während der ersten 7 Tage (ursprüngliches Modell ohne Korrekturfaktor, SQR = 6709)

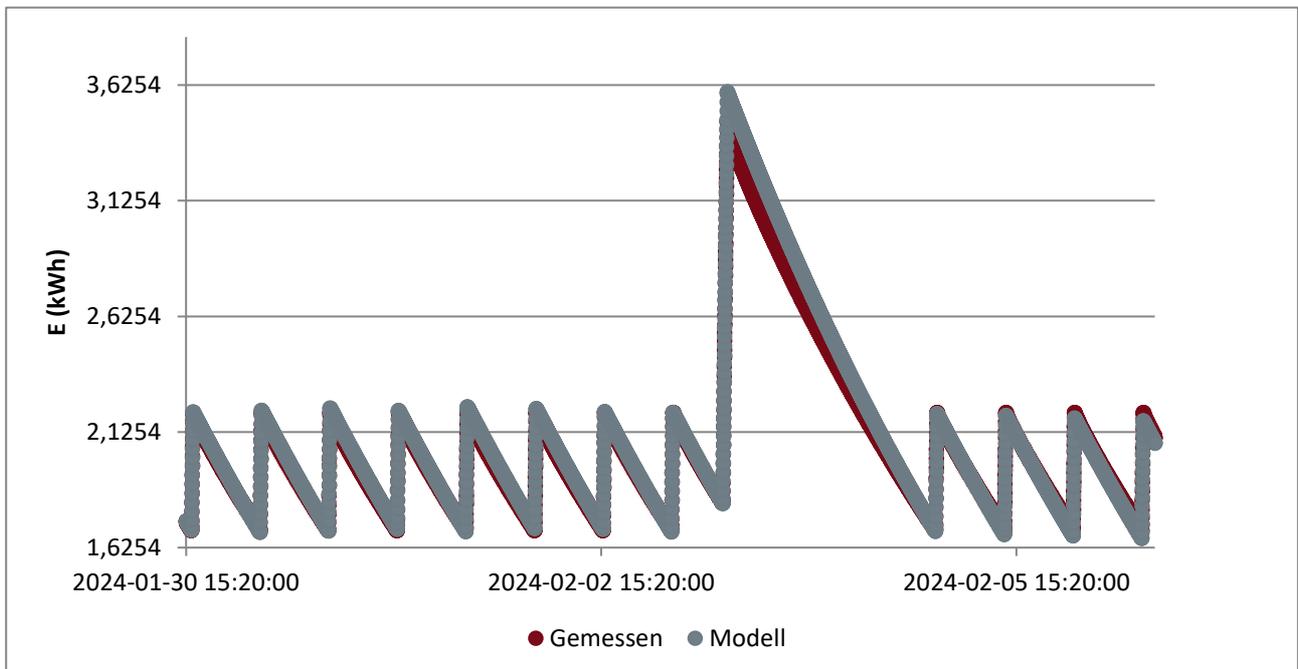


Abbildung 3: Vergleich zwischen gemessenen und vorhergesagten Werten für einen Boiler ohne Entnahme während der ersten 7 Tage (Modell mit Korrekturfaktor, SQR = 279,5)

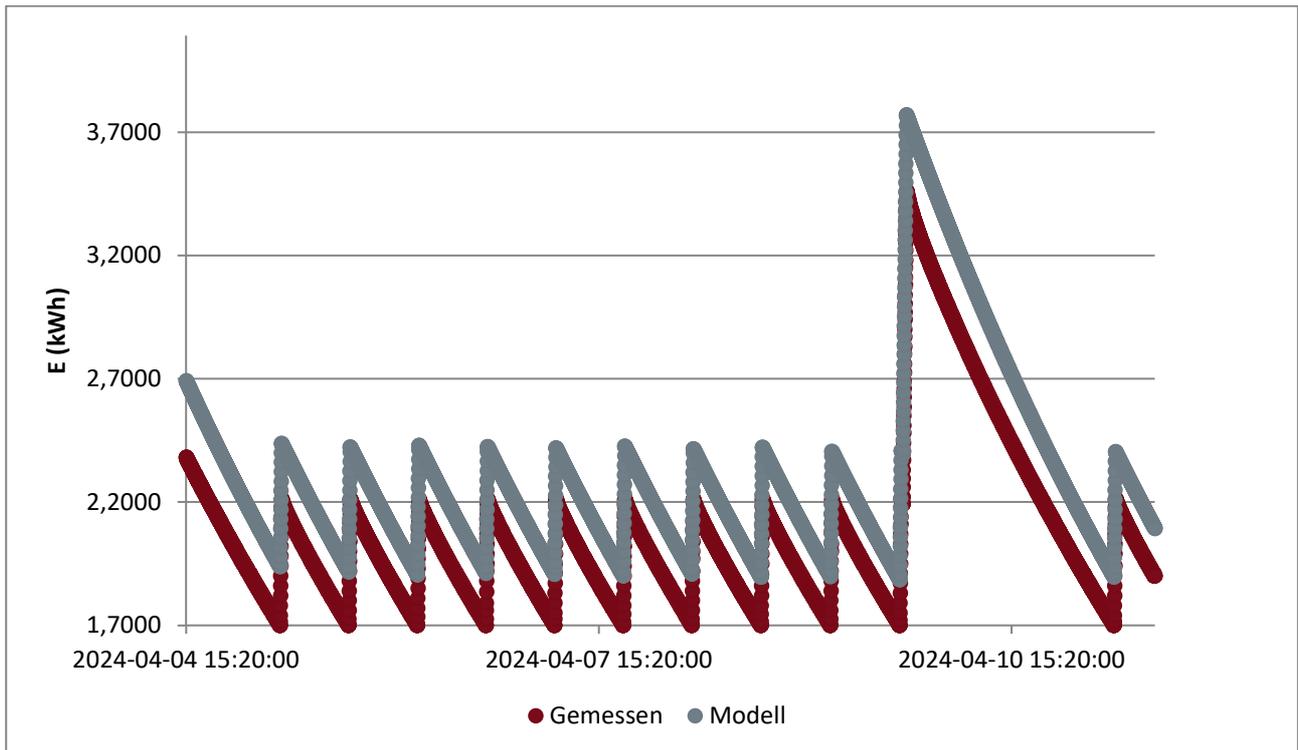


Abbildung 4: Vergleich zwischen gemessenen und vorhergesagten Werten für einen Boiler ohne Entnahme während der letzten 7 Tage (ursprüngliches Modell ohne Korrekturfaktor, SQR = 6709)

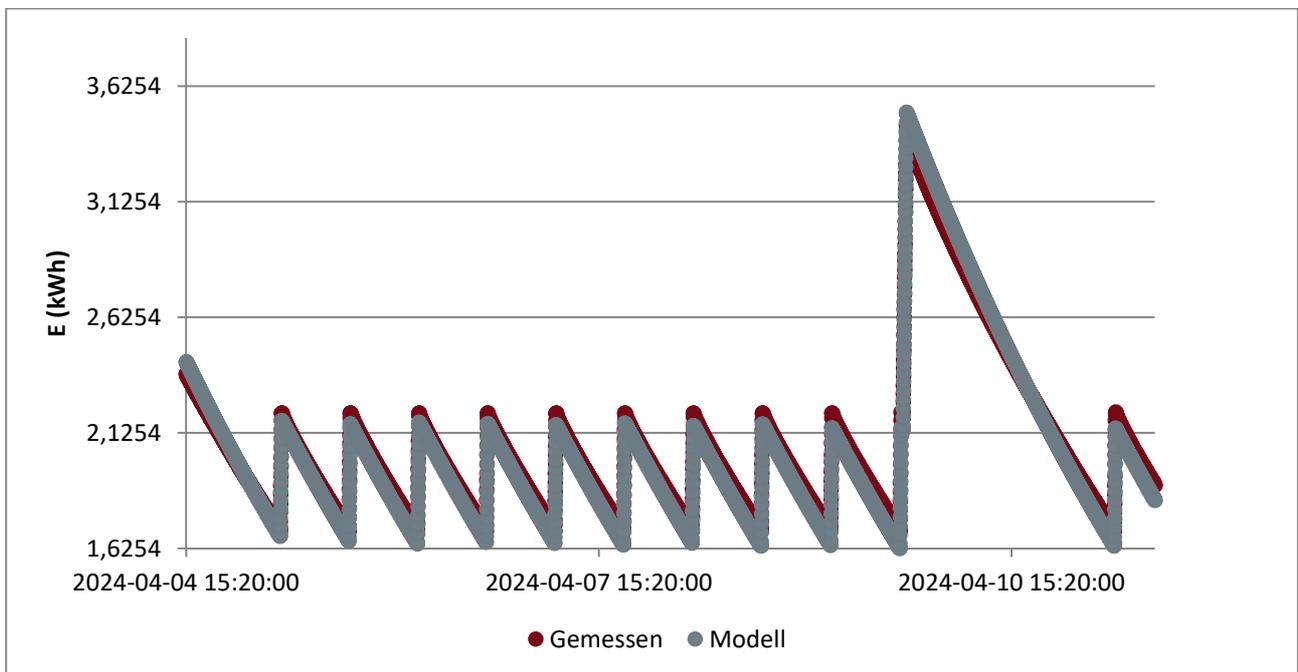


Abbildung 5: Vergleich zwischen gemessenen und vorhergesagten Werten für einen Boiler ohne Entnahme während der ersten 7 Tage (Modell mit Korrekturfaktor, SQR = 279,5)

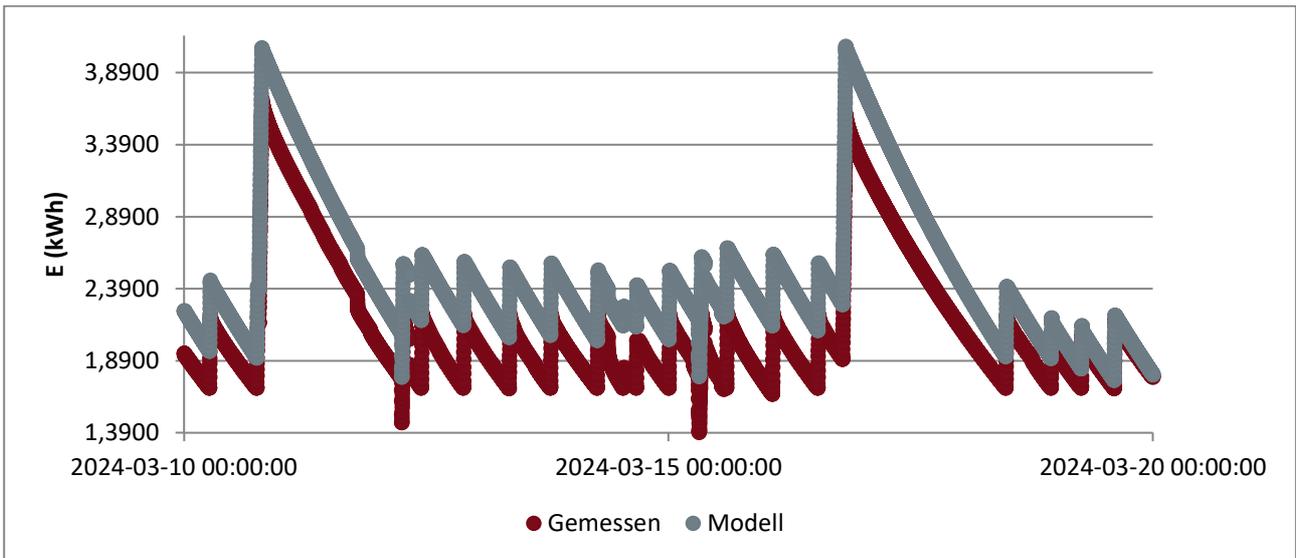


Abbildung 6: Vergleich zwischen gemessenen und vorhergesagten Werten für einen Boiler mit Wasserentnahme während 10 Tagen (ursprüngliches Modell ohne Korrekturfaktor, SQR = 14033,5)

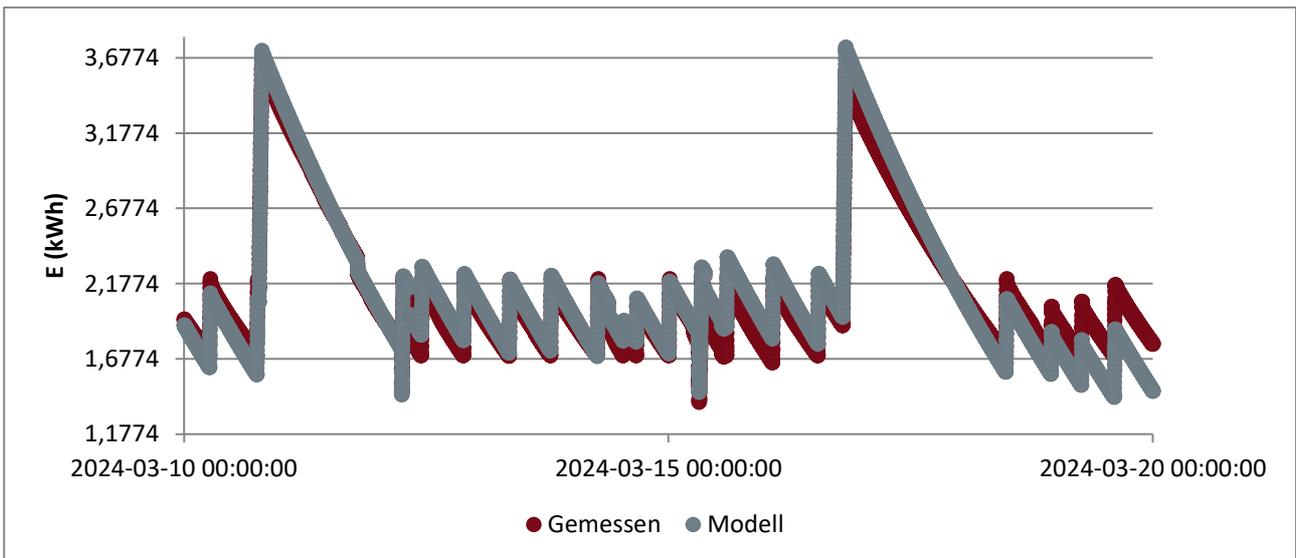


Abbildung 7: Vergleich zwischen gemessenen und vorhergesagten Werten für einen Boiler mit Wasserentnahme während 10 Tagen (Modell mit Korrekturfaktor, SQR = 3432,9)

### 3 SZENARIEN UND ERGEBNISSE

Die in *Deliverable 3.1* beschriebenen Ladestrategien wurden im Framework des digitalen Zwillings implementiert. Sobald ausreichend Felddaten vorliegen, werden verschiedene Szenarien simuliert, um die geeignetsten Ladestrategien zu identifizieren sowie die realen Strategien und den digitalen Zwilling zu validieren. Die Ergebnisse werden im Anschluss in *Deliverable 4.2* dokumentiert.

## 4 ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

Abkürzung	Beschreibung
KPI	Key performance indicator
SQR	Summe der Quadrate der Restabweichungen (oder: „Residuen“)

## 5 ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Energieverlust als Funktion der Energiemenge, gemessen und durch die lineare Regression vorhergesagt.....	5
Abbildung 2: Vergleich zwischen gemessenen und vorhergesagten Werten für einen Boiler ohne Entnahme während der ersten 7 Tage (ursprüngliches Modell ohne Korrekturfaktor, SQR = 6709)	7
Abbildung 3: Vergleich zwischen gemessenen und vorhergesagten Werten für einen Boiler ohne Entnahme während der ersten 7 Tage (Modell mit Korrekturfaktor, SQR = 279,5) .....	7
Abbildung 4: Vergleich zwischen gemessenen und vorhergesagten Werten für einen Boiler ohne Entnahme während der letzten 7 Tage (ursprüngliches Modell ohne Korrekturfaktor, SQR = 6709)	8
Abbildung 5: Vergleich zwischen gemessenen und vorhergesagten Werten für einen Boiler ohne Entnahme während der ersten 7 Tage (Modell mit Korrekturfaktor, SQR = 279,5) .....	8
Abbildung 6: Vergleich zwischen gemessenen und vorhergesagten Werten für einen Boiler mit Wasserentnahme während 10 Tagen (ursprüngliches Modell ohne Korrekturfaktor, SQR = 14033,5) .....	9
Abbildung 7: Vergleich zwischen gemessenen und vorhergesagten Werten für einen Boiler mit Wasserentnahme während 10 Tagen (Modell mit Korrekturfaktor, SQR = 3432,9) .....	9