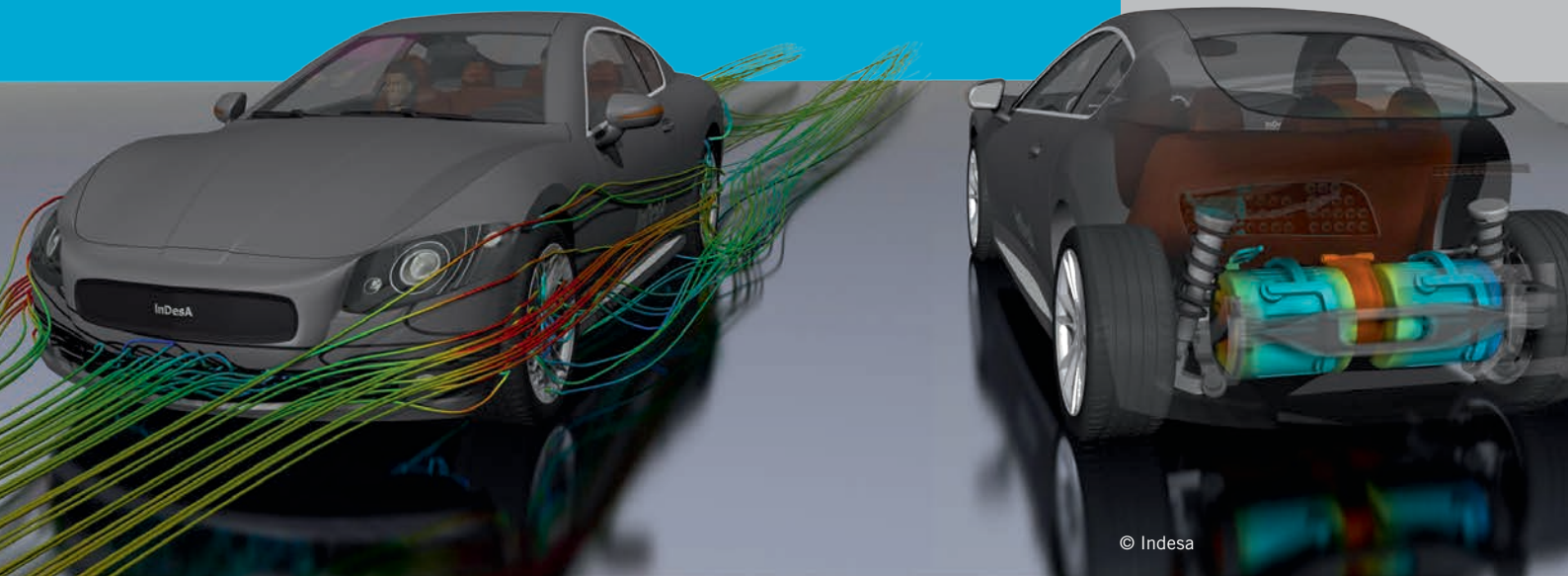


Konzeption eines Digital Twins für das Wärme- und Energiemanagement



© Indesa

Der Digital Twin wird gerne als virtuelles Abbild des realen Fahrzeugs verstanden. Aber so wie das reale Fahrzeug vor dem Versuchsingenieur steht, wird sich ein Digital Twin dem Berechnungsingenieur nicht als eine Einheit präsentieren. Igel und Indesa zeigen, dass sich der Digital Twin vielmehr aus aufeinander abgestimmten CAD- und Berechnungsmodellen sowie Algorithmen zusammensetzen wird und nur bestimmte Funktionsumfänge des Fahrzeugs repräsentieren kann.

VIRTUELLES KONZEPTFAHRZEUG

Um die Konzeption eines Digital Twins für das Energie- und Wärmemanagement eines Elektrofahrzeugs vollumfänglich zu demonstrieren, dient das von Indesa und Igel entwickelte virtuelle Konzeptfahrzeug Pandora. Es handelt sich dabei um ein Fahrzeug der Klasse Sport GT, das alle relevanten Bauteile und Funktionen aufweist, um einerseits Simulationsmethoden und andererseits neue Konzepte zum Wärme- und Energiemanagement zu verifizieren. Metho-

den sowie Konzepte finden dann bei den Kunden Anwendung.

DIGITAL TWIN IM ENTWICKLUNGSPROZESS

Der digitale und der reale Zwilling unterscheiden sich im Entwicklungsprozess bezüglich der Entwicklungsreife deutlich voneinander, **BILD 1**. Während die ersten Modelle für den Digital Twin bereits in der Initial- und Konzeptphase entstehen und maßgebend für die Konzeptfindung sind, sollten die ersten realen Prototypen

AUTOREN



Dr. Gerald Seider
ist Geschäftsführer
der Indesa GmbH in München.



Dr. Fabiano Bet
ist Geschäftsführer
der Indesa GmbH in München.



Dipl.-Ing. Christian Kunz
ist Leiter Kompetenzentwicklung
bei der Igel AG in München.

erst in der Serienentwicklung bei entsprechendem Reifegrad der Konstruktion aufgebaut werden.

Sobald die ersten CAD-Modelle generiert sind, wird der Digital Twin mithilfe von 3-D-Simulationsmodellen auf einen höheren Reifegrad gehoben. Die ersten Baustufen werden rein virtuell analysiert und weiterentwickelt, bevor die ersten Prototypenteile für den Fahrzeugversuch ausgelöst werden; dies ist die Geburtsstunde des realen Zwillingings. Zu diesem Zeitpunkt ähneln sich die Zwillinge nur entfernt, da der digitale Zwilling aufgrund der aktuelleren CAD-Modelle bereits um mindestens eine Baustufe vorausseilt. Igel und Indesa haben die Zielsetzung, die Funktionsbestätigung alleine durch den Digital Twin darzustellen. Begleitend können gezielt Komponentenversuche eingesetzt werden, um den Digital Twin nachzuschärfen. Der Fahrzeugversuch mit dem realen Prototyp kann dann deutlich später und in reduziertem Umfang erfolgen.

In die Vorbereitung des Fahrzeugversuchs müssen die Erkenntnisse einfließen, die am Digital Twin gewonnen wurden. Dadurch lässt sich einerseits das Versuchsprogramm verschlanken. Andererseits müssen Erkenntnisse aus Messungen am Prototyp der alten Baustufe in den Digital Twin der aktuellen Baustufe zurückfließen. Auch diese Interaktion wird durch entsprechende Prozesse begleitet.

Gegen Ende des Entwicklungszeitraums werden die Zwillinge allmählich

in ihrem Aussehen und Verhalten ähnlicher. Schließlich übersteigt der Reifegrad des realen Prototyps den des Digital Twins. In der späten Entwicklungsphase ist es erforderlich, dass das virtuelle Abbild des Fahrzeugs ein letztes Update erfährt, damit sich der digitale und der reale Zwilling tatsächlich gleichen. Wird das versäumt, steht für die Weiterentwicklung von Derivaten oder Nachfolgefahrzeugen kein digitaler Zwilling in angemessener Qualität zur Verfügung.

WAS DER DIGITAL TWIN LEISTEN MUSS

Elektrofahrzeuge der neuesten Generation bieten Reichweiten, die von einem zunehmend breiteren Kundenkreis akzeptiert werden. Um den Aktionsradius stetig zu steigern, muss die Entwicklung weiter in Richtung Gewichtsreduzierung und Energieeffizienz getrieben werden.

Eine wesentliche Stellgröße zur Verbesserung der Energieausbeute ist das Thermomanagement des Gesamtfahrzeugs, da zum einen der Wirkungsgrad von Batterie und Elektromotor von den thermischen Verhältnissen in den Bauteilen abhängt. Zum anderen belasten Heizungs- und Klimaanforderungen für die Fahrgastzelle die Energiebilanz in erheblichem Maße, insbesondere bei extremen Umgebungsbedingungen bezüglich Temperatur und Luftfeuchte.

Somit muss der Digital Twin alle Funktionalitäten beinhalten, die den

Zielkonflikt zwischen Reichweite, Klimakomfort und Fahrzeugdynamik physikalisch abbilden. Mithilfe intelligenter Steuerungsstrategien soll der Digital Twin die Optimierung des Energie- und Wärmemanagementkonzepts ermöglichen. Dabei muss der digitale Zwilling von der Konzeptphase bis zur Serienreife mutationsfähig bleiben, um dem erforderlichen Reifegrad mit steigender Modellierungsqualität gerecht zu werden.

KONZEPTION DES DIGITAL TWINS

Der Kern eines Digital Twins für das Thermomanagement sollte so konzipiert werden, dass der komplette Kühlmittel- und Kältemittelkreislauf mit allen Komponenten, die als Wärmequellen und -senken dienen, in einem Simulationsmodell dargestellt werden können, das heißt mit einem Softwarepaket, das typischerweise auf der Lösung der eindimensionalen Strömungs- und Wärmeleitungsgleichungen basiert. Der Kühlmittel- und Kältemittelkreislauf ist vor allem bei Elektrofahrzeugen so eng miteinander verzahnt, dass abzuraten ist, mit unterschiedlichen Softwarepaketen und über Schnittstellen zu arbeiten.

Um das Kernmodell bezüglich Energiemanagement zu erweitern, müssen die elektrischen Hoch- und Niederspannungskreisläufe mit Verbrauchern und Speichern in das Gesamtmodell integriert werden, **BILD 2**. Dabei ist zu beachten, dass die thermische und elektrische

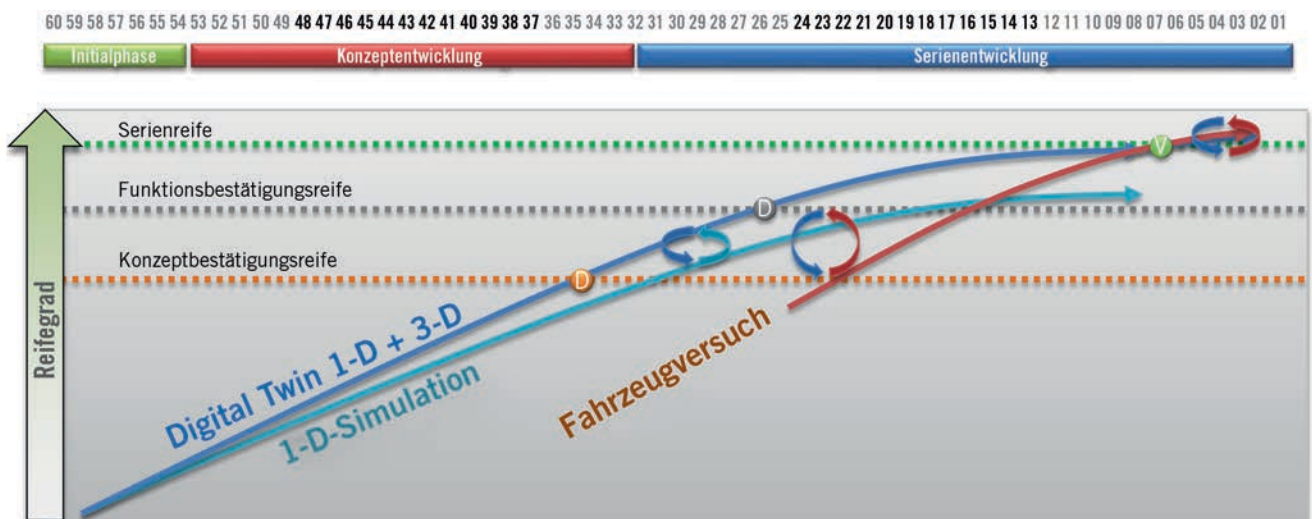


BILD 1 Interaktion des Digital Twins mit dem Fahrzeugversuch im Produktentstehungsprozess (© Indesa)

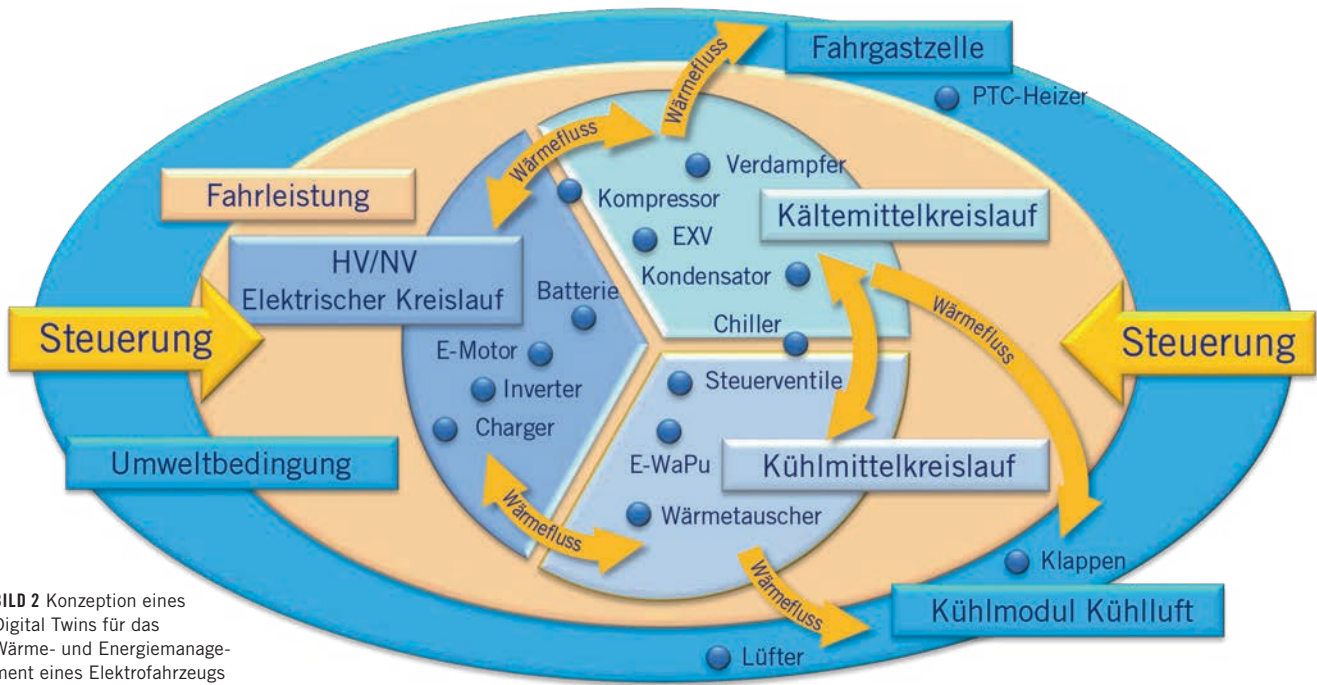


BILD 2 Konzeption eines Digital Twins für das Wärme- und Energiemanagement eines Elektrofahrzeugs (© Indesa)

Wechselwirkung in den Komponentenmodellen für Batterie und Elektromotor erfasst werden.

In das Kernmodell sollte des Weiteren ein Fahrleistungsmodell für das zu simulierende Fahrzeug integriert werden, sodass der aktuelle Leistungsbedarf des Elektromotors für beliebige Fahrzyklen und bei entsprechenden Umweltbedingungen ermittelt werden kann.

Um das Gesamtsystem für das Wärme- und Energiemanagement vollständig zu erfassen, muss das Modell um Module

für die Klimatisierung des Fahrgastraums und für die Durchströmung des Kühlmoduls im Fahrzeug-Frontend erweitert werden. Schließlich müssen die Sensorik und Funktionslogik zur Steuerung der verschiedensten Aktuatoren wie Lüfter, Kompressor, Ventile und Klappen implementiert werden.

DIGITAL TWIN IM WANDEL

Die Modellierung des Digital Twins muss über den Entwicklungszeitraum

ständig an die aktuellen Fragestellungen und an die Verfügbarkeit von Daten und Ressourcen angepasst werden; dabei ist auch die Modellierungsqualität stets zu steigern. Zur Bewertung und Findung der besten Architektur für das Wärme- und Energiemanagement muss in der frühen Entwicklungsphase eine Vielzahl von Konzepten simuliert und analysiert werden. Hierfür kommt ein Softwarepaket zum Einsatz, das im Kern auf der Lösung der eindimensionalen Strömungs- und Wärmeleitungsgleichungen

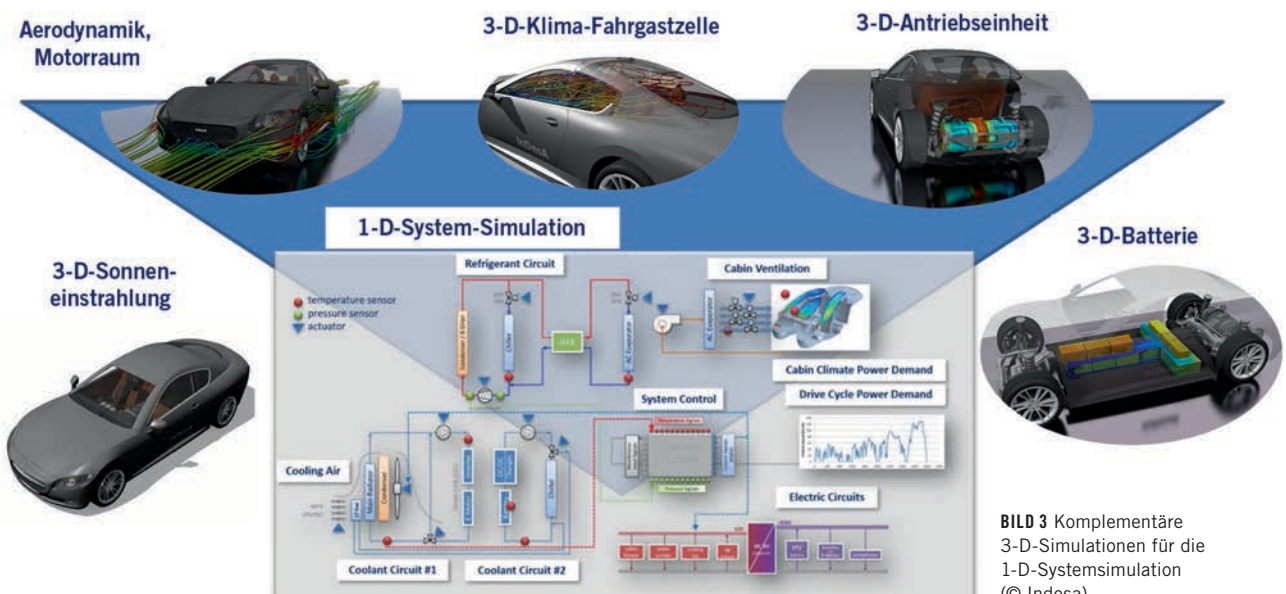


BILD 3 Komplementäre 3-D-Simulationen für die 1-D-Systemsimulation (© Indesa)

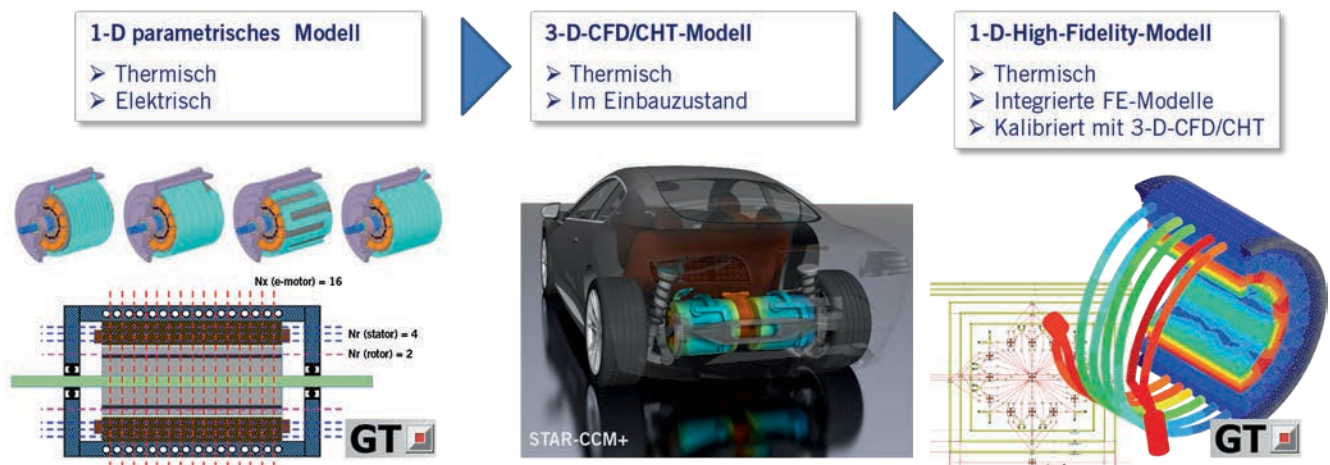


BILD 4 Modellentwicklung für den Elektromotor; vom einfachen, parametrischen (links) zum systemintegrierten, High-Fidelity-Modell (rechts) (© Indesa)

basiert sowie zusätzlich die erwähnten Module und Erweiterungen für die integrierte Systemsimulation bereitstellt. Für das Pandora-Projekt wird das Gesamtsystem mit der Software GT-Suite dargestellt. Fallweise können auch Matlab/Simulink-Modelle für gewisse Steuer- und Regelumfänge integriert werden.

Sobald die ersten Module und Komponenten ausgelegt und in das Gesamtkonzept integriert werden, kommen vermehrt 3-D-Modelle und Simulationen zum Einsatz. Randbedingungen stehen dann bereits aus dem 1-D-Digital-Twin zur Verfügung, sodass zielgerichtete Untersuchungen zur thermischen Absicherung von Grenzzuständen für die Bauteile und Module erfolgen können.

Die 3-D-Simulationsmethoden basieren auf der Lösung der dreidimensionalen Navier-Stokes-Gleichungen für die Strömung mit direkter Kopplung an die angrenzende Struktur für die Wärmeleitung. Somit lassen sich ganze Antriebsmodule (EDUs) mit Motor, Getriebe und Inverter im Verbund thermisch bewerten und die Randbedingungen für Kühlmittel- und Ölkühlung verifizieren. Für das Pandora-Projekt kam die Software Star-CCM+ zur Anwendung.

Die folgenden 3-D-Modelle wurden erstellt und in den Digital Twin mit einbezogen, **BILD 3**:

- Fahrzeug-Aerodynamik und Frontend-Durchströmung
- Antriebseinheit (EDU) im Fahrzeug-Einbauzustand

- Klima-Modell für die Fahrzeugkabine
- Elektromagnetisches Modell für den E-Motor
- Batteriekühlung mit Wassermantel und Cold Plate
- Kühlmittelkreislauf mit Befüll- und Entlüftungsanalyse.

Die Analyse durch die 3-D-Simulation hat zum Ziel, die Objekte der 1-D-Modellierung zu überprüfen. Diese können nachkalibriert oder durch höherwertige Modellierungsansätze in der Systemsimulation ersetzt werden [1].

In der Regel ist die Ergebnisqualität sehr stark von der geometrischen Auflösung der Komponenten abhängig, sodass eine einfache Kalibrierung der 1-D-Objekte oft nicht zufriedenstellende



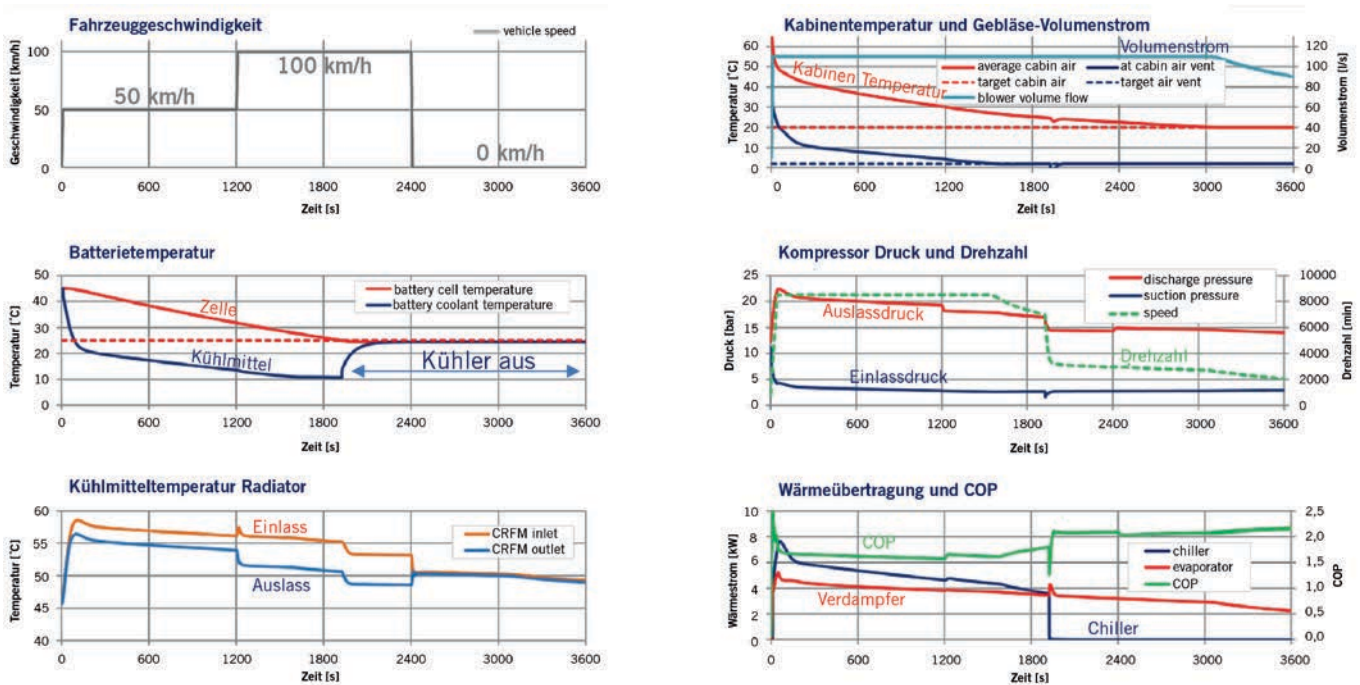


BILD 5 Sensorsignale am Digital Twin für einen Standard-Pull-Down-Test für Batterie und Fahrgastzelle (© Indesa)

Ergebnisse liefert. Eine Anpassung im Sinne von Optimieren der Objekte verbietet sich, denn die Physik der Modellierung geht in diesem Moment verloren und der Digital Twin ist nicht mehr prädiktiv. Dies ist aber der Anspruch des Digital Twins und essenziell, wenn Derivate analysiert werden sollen. In diesem Fall ist es geboten, auf höher auflösende 1-D-Modelle überzugehen. Im Fall der Batterie oder der Antriebs-einheit können dies Mehrmassenmodelle sein. In der hier verwendeten Software GT-Suite stehen darüber hinaus Finite-Element-Objekte zur Verfügung, **BILD 4**, die zwar nicht dieselbe hohe Auflösung der 3-D-Simulation aufweisen, aber direkt in die 1-D-Systemsimulation integriert werden können.

Die Vakuum-Befüllung und Entlüftung des Kühlmittelkreislaufs lässt sich allerdings nur mit der 3-D-Option und 2-Phasen-Modellierung darstellen und stellt somit einen eigenen Digital Twin zum entsprechenden Prüfstand dar [2].

ABGLEICH MIT REALEM PROTOTYP

Liegen erste Ergebnisse aus dem Versuch am realen Prototyp vor, müssen sie mit dem Digital Twin der gleichen Baustufe abgeglichen werden. Diskrepanzen in den Ergebnissen sind zu plausibilisieren.

Zweckdienlich ist hierfür der Abgleich anhand von Signalen, die funktional miteinander in Beziehung stehen und die Einhaltung von Grenzwerten bezeugen. **BILD 5** zeigt beispielhaft die wichtigsten Größen für einen sogenannten Pull-Down-Test, der die Abkühlung eines von der Sonne aufgeheizten Fahrzeugs für ein bestimmtes Fahrprofil simuliert. Hier müssen verschiedenste Signale miteinander abgeglichen werden, die in der Vollständigkeit nur der Digital Twin liefern kann. Unplausible Signale aus dem Versuch können damit schnell identifiziert werden. Sind hingegen Unzulänglichkeiten in der Modellierung des Digital Twins ursächlich für die Diskrepanzen, muss die Modellierung nachgebessert werden und die Änderungen in die aktuelle Baustufe des Digital Twins übertragen werden.

Der konsequente und wiederholte Abgleich der Ergebnisse von Digital Twin und dem realen Prototyp ist ein wichtiger Bestandteil des Entwicklungsprozesses und führt dazu, dass sich das Serienfahrzeug und sein virtuelles Abbild immer weiter annähern.

FAZIT

Der Digital Twin für das Energie- und Wärmemanagement eines Elektrofahr-

zeugs ist mit einer gut aufeinander abgestimmten Folge von 1-D- und 3-D-Simulationsmodellen vollumfänglich darstellbar. Dennoch wird die Leistungsfähigkeit des Digital Twins in der späten Entwicklungsphase noch vielfach unterschätzt und stattdessen auf aufwendige und teure Versuche zurückgegriffen. Hier fehlt den freigebenden Stellen häufig noch das Vertrauen, den Digital Twin als belastbares Instrument zu nutzen. Die Versuche sollten deshalb so genutzt werden, dass die Messergebnisse gezielt zurückfließen, um das Vertrauen in den Digital Twin aufzubauen. Letztlich werden Kostendruck und Time-to-Market-Ziele den Weg des Digital Twins zum gleichberechtigten Dasein mit dem realen Fahrzeug verhelfen.

LITERATURHINWEISE

- [1] Seider, G.; Bet, F.: An Integrated Simulation Strategy for Thermal Design and Analysis of Electric Vehicles. VTMS 14 Conference. London, 2019
- [2] Bet, F.; Seider G.; Hüllsiep, M.; Van Dyck, L.; Palienko, D.: Thermal Design and Analysis of Battery Electric Vehicles. Simcenter Conference, Prag, 2018



DIESER BEITRAG IST IM E-MAGAZIN VERFÜGBAR UNTER:

www.emag.springerprofessional.de/atx