

Verbundvorhaben: EnOB: Verbundprojekt: Digitale Prüfplattform für die Fahrzeug- und Zuliefererindustrie (**DigiPrüF**) - Teilvorhaben: Erforschung Vorhersagemodelle für die Produktion und Aufbau virtuelle Prüfplattform

Projekt-träger: VDI Technologiezentrum GmbH
VDI-Platz 1
40468 Düsseldorf

Zu-wendungs-Empfänger: **ATR Software GmbH**
Marlene-Dietrich-Straße 5
89231 Neu-Ulm

Förder-kenn-zeichen: 13IK024A

Projekt-partner: msg systems AG
Hochschule Aalen Technik, Wirtschaft und Gesundheit
Hahn-Schickard-Gesellschaft für angewandte Forschung e.V.
Schmidlin Labor + Service GmbH & Co. KG
Universität Ulm
ADZ NAGANO GmbH Gesellschaft für Sensortechnik
PlanB. GmbH

Laufzeit des Vorhabens: 01.01.2023 – 31.12.2025

Gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages" und „Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor"

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

Inhaltsverzeichnis

I.	Kurzbericht	3
1.	Aufgabenstellung	3
2.	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	3
3.	Planung und Ablauf des Vorhabens	3
4.	Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde, insbesondere Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt werden	4
5.	Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste	4
6.	Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	4
II.	Eingehende Darstellung:	5
7.	Eingehende Darstellung der Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele	5
	Datenerfassung zur Verschleißmodellierung mittels einer Zugprüfvorrichtung.....	5
	Entwicklung eines Greybox-Modells zur Verschleißprognose	6
	Entwicklung eines Whitebox-Modells zur universellen Verschleißprognose.....	8
	Die Fischer-Lernfabrik als Referenzproduktionsanlage.....	10
	Modellierung der Produktionsanlage mittels Dynamic Bayesian Networks	11
	Datengenerierung mittels Diskreter Event-Simulation (DES)	11
	Entwicklung eines Blackbox-Modells zur Qualitätsvorhersage	12
	Anwendung des Blackbox-Modells bei einem Pilotkunden.....	13
	Die Virtuelle Prüfplattform (DigiPrüF)	14
	Integration der Modelle via OPC UA.....	15
	Konzeption der Benutzeroberfläche durch Goldschnitt Interaktion	15
	Technische Umsetzung der dynamischen Dashboards und Widgets	15
	Verarbeitung von Daten über Rechenkanäle	16
	Abbildung hierarchischer Strukturen.....	17
	Automatisierte Dashboard-Generierung und hierarchische Navigation.....	17
	Verwaltungsaspekte und Benutzerberechtigungen	18
8.	Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....	19
9.	Die Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	19
10.	Der voraussichtliche Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans	19
11.	Der während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordene Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	20
12.	Die erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses	20

I. Kurzbericht

1. Aufgabenstellung

Die Kernaufgabe des Teilvorhabens bestand darin, Digitalisierungslösungen für den Mittelstand praktisch umsetzbar zu machen. Das Ziel war eine wirtschaftliche Produktion durch die Vernetzung von Fertigung, Versuch und Qualitätssicherung.

Arbeitsschwerpunkte waren:

- Digitale Zwillinge: Entwicklung physikalisch basierter Abbilder von Produktionslinien als technologische Basis.
- PHM-System: Implementierung einer automatisierten Zustandsüberwachung zur frühzeitigen Fehlerprognose und Wartungsplanung.
- Predictive Quality: Nutzung KI-basierter Methoden zur Vorhersage der Produktqualität und proaktiven Prozessoptimierung.
- Virtuelle Prüfplattform: Aufbau einer Cloud-Infrastruktur mit Microservices, Echtzeit-Datenanbindung und dynamischer Visualisierung.

2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Die Durchführung des Vorhabens stützte sich auf die etablierte Expertise und die technologische Infrastruktur der ATR Software GmbH:

- Wissenschaftliche Vorarbeit: Langjährige Kooperationserfahrung mit der Universität Ulm, insbesondere durch Transferprojekte und eine Promotion im Bereich Predictive Maintenance und Machine Learning.
- Domänenwissen: Fundierte Kenntnisse in der Optimierung von Produktionsprozessen (MES, IoT, KI) sowie in der visuellen Analyse komplexer Maschinendaten.
- Technologische Basis: Bestehende Erfahrung mit industriellen Kommunikationsstandards (OPC/UA, MQTT), der Implementierung von Microservices (Docker) sowie moderner UI-Entwicklung auf Basis von Open-Source-Frameworks.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Vorhaben der ATR Software GmbH war auf die Erforschung von PHM- und Predictive-Quality-Systemen sowie den Aufbau einer virtuellen Prüfplattform ausgerichtet. Der Ablauf folgte einem strukturierten Phasenmodell, das planmäßig zur erfolgreichen Erreichung der Ziele des Verbundmeilensteins im Projektmonat 18, sowie des Projektendes nach 36 Monaten führte:

- Modellbildung der Digitalen Zwillinge (AP4): Nach Voruntersuchungen und Schnittstellendefinition (bis Monat 9) wurde jeweils eine valide Datenbasis für die Zugmaschine und die Lernfabrik erstellt. Ab Monat 13 erfolgte die physikalische Simulation der Zugmaschine (White-Box). Die Überführung in Grey-Box-Modelle durch Kombination mit empirischen Daten erfolgte parallel dazu. Ab Monat 18 wurde eine Blackbox-Lösung für die Lernfabrik ausgearbeitet.
- Datenbasis für PHM und Predictive Quality (AP8): Basierend auf realen Versuchen wurde bis Monat 18 die Datenbasis für die Modellentwicklung finalisiert. Darauf aufbauend wurde die Modellierung des PHM-Systems auf Basis der Zugmaschinen-Modelle und die datenbasierte Entwicklung der Predictive-Quality-Algorithmen auf Basis der Lernfabrik-Modelle durchgeführt.
- Virtuelle Prüfplattform (AP10): Die Systemarchitektur wurde bis Monat 12 entworfen, gefolgt vom Aufbau der Cloud-Infrastruktur (Monat 15). Nach dem Abschluss des UI-Konzepts in Monat 18 konnte die Implementierung der Microservices sowie die Integration der KI- und Machine-Learning-Dienste für den Echtzeit-Datenaustausch durchgeführt werden.

Das Teilprojekt erreichte alle terminierten Arbeitsziele und lieferte fristgerecht die Grundlage für die weitere Verbundarbeit und die Überführung in ein verwertbares Produkt nach Projektende.

4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde, insbesondere Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt werden

Das Vorhaben knüpfte an etablierte wissenschaftliche Verfahren an und überführte diese in die Anwendung für komplexe Produktionslinien:

- **Modellreduktion:** Als Basis für die Digitalen Zwillinge diente die Methode der Modellreduktion. Sie ermöglichte es, hochkomplexe physikalische Modelle so zu vereinfachen, dass Simulationen ganzer Linien in Echtzeit berechenbar wurden.
- **Singularwertzerlegung (SVD):** Für das PHM-System wurde die mathematische Singularwertzerlegung genutzt. Dieses bewährte Verfahren zur Abhängigkeitsanalyse in Big-Data-Anwendungen bildete die Grundlage, um verschleißkritische Parameter zu identifizieren.
- **Machine Learning & Optimierung:** Im Bereich Predictive Quality wurde auf bekannte Machine-Learning-Ansätze und Algorithmen zur Lösung NP-schwerer Probleme aufgesetzt. Ziel war die Beherrschung von Nichtlinearitäten bei der rechnergestützten Optimierung von Produktionsparametern.
- **Cloud- & Web-Standards:** Technisch bildeten plattformunabhängige Cloud-Infrastrukturen und Responsive Webdesign den Stand der Technik, an den für die Entwicklung der virtuellen Prüfplattform und der dynamischen Benutzeroberflächen angeknüpft wurde.

5. Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste

Model Order Reduction (MOR):

- Peter Benner, Mario Ohlberger, Albert Cohen, and Karen Willcox. Model reduction and approximation: theory and algorithms. SIAM, 2017.
- Willy Haik, Yvon Maday, and Ludovic Chamoin. "A real-time variational data assimilation method with data-driven model enrichment for time-dependent problems". In: Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 405 (2023), p. 115868.

Singular Value Decomposition (SVD):

- Golub, H. G. and F. C. Van Loan: Matrix computations. The Johns Hopkins University Press, 2013.

Machine Learning:

- Funahashi, K.: On the Approximate Realization of Continuous Mappings by Neural Networks. Neural Netw., 2(3):183–192, may 1989.
- Blum, A., J. Hopcroft and R. Kannan: Foundations of Data Science. Cambridge University Press, 2020.

6. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Der Erfolg des Vorhabens basierte auf der engen Kooperation mit Projektpartnern aus Wissenschaft und Industrie, um den Transfer von Forschungsergebnissen in die Anwendung sicherzustellen:

- **Universität Ulm:** Fokus auf der Entwicklung und Integration der Modelle für die **Digitalen Zwillinge**, das **PHM** sowie die **Predictive-Quality-Lösung**. Gemeinsam wurden zudem die Algorithmen zur **Optimierung** der Produktionsparameter erarbeitet.
- **Hahn-Schickard:** Enge Abstimmung hinsichtlich der technologischen **Cloud-Infrastruktur**, um eine skalierbare Basis für die Bereitstellung der Dienste zu schaffen.
- **Hochschule Aalen & Schmidlin:** Die Zusammenarbeit konzentrierte sich auf die **Integration ihrer Projektergebnisse** in die von ATR entwickelte Cloud-Plattform. Dies sicherte die Zusammenführung verschiedener Datenquellen und Modelle in einer zentralen, virtuellen Prüfumgebung.

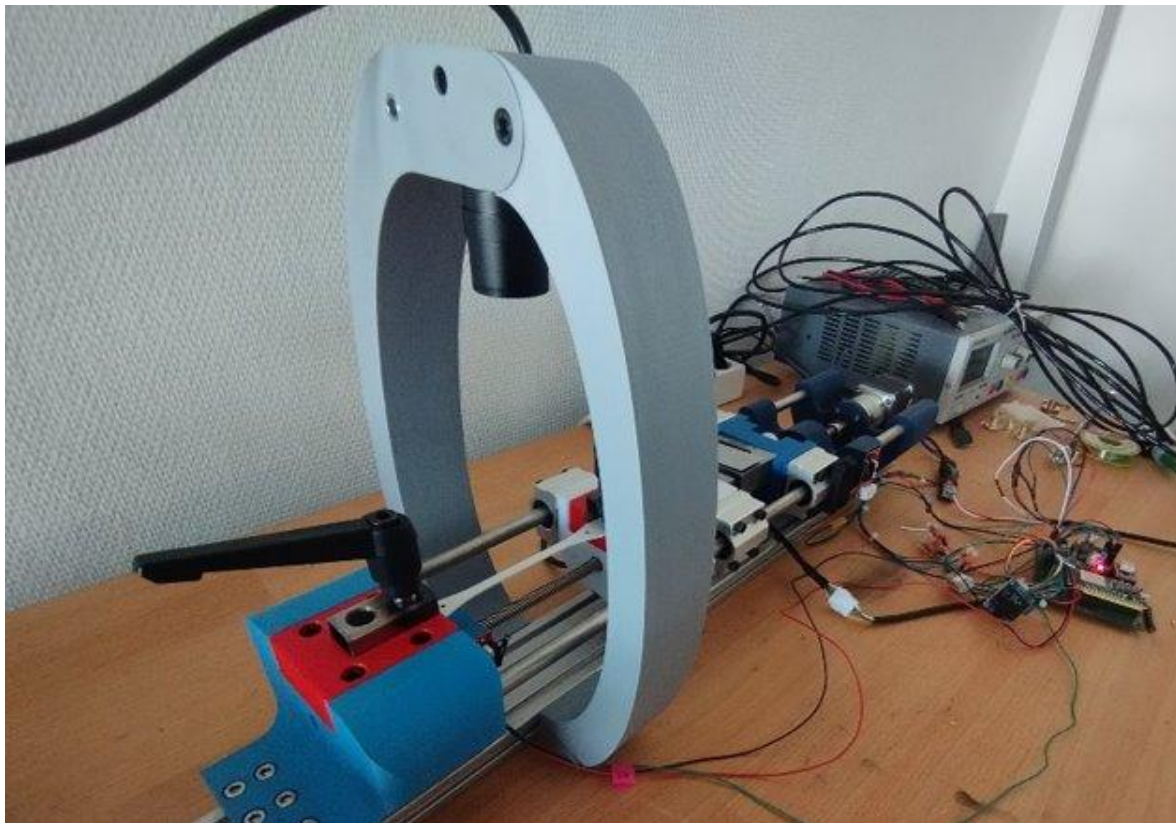
Durch diesen Verbund wurden die Schnittstellen zwischen Modellbildung, Infrastruktur und praktischer Anwendung erfolgreich geschlossen.

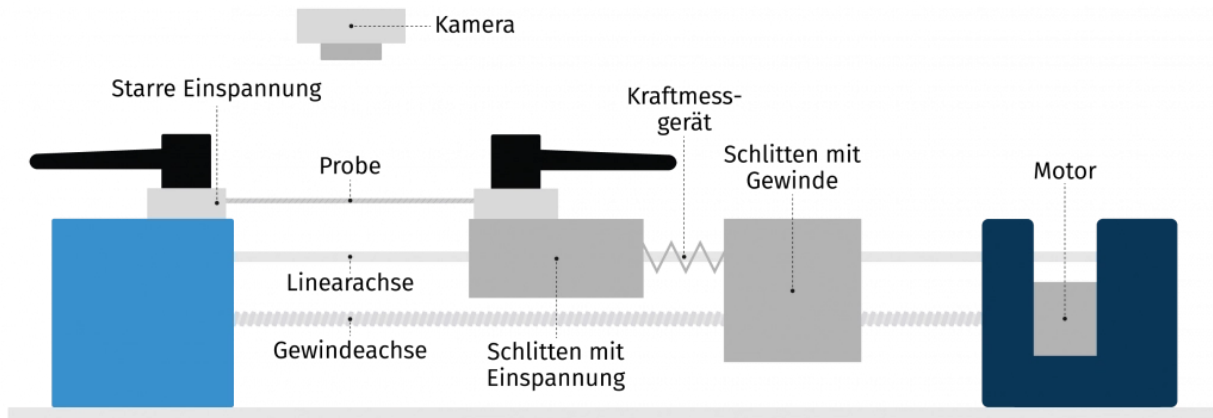
II. Eingehende Darstellung:

1. Eingehende Darstellung der Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Datenerfassung zur Verschleißmodellierung mittels einer Zugprüfvorrichtung

Zur realitätsnahen Abbildung des Verschleißes von Komponenten im Produktionsumfeld wurde eine spezifische Zugprüfvorrichtung konstruiert. Mit diesem System wurden konfigurierbare Belastungsszenarien auf 3D-gedruckte Zugproben angewendet, bis deren strukturelles Versagen eintrat. Die Eigenkonstruktion wurde dabei so ausgelegt, dass über standardisierte Testverfahren hinaus flexible, applikationsspezifische Lastprofile realisiert werden konnten.





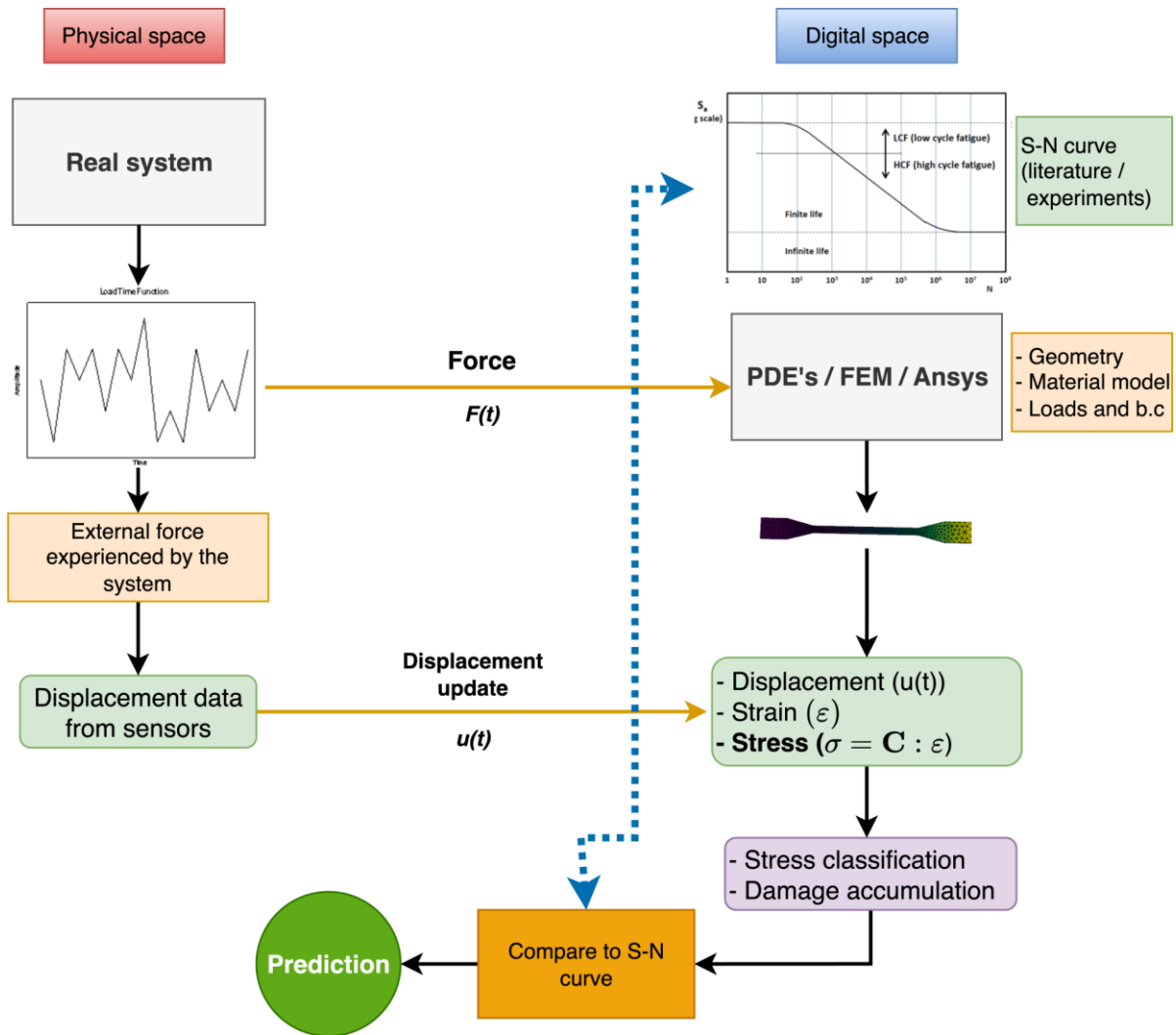
Der technische Aufbau wurde so umgesetzt, dass ein Elektromotor über eine Gewindespindel einen Führungsschlitten entlang einer Linearachse bewegte. Mit diesem Schlitten wurde über eine integrierte Kraftmesstechnik ein zweiter, frei gelagerter Schlitten gekoppelt. Die entsprechende Zugprobe wurde zwischen einer starren Einspannung und dem beweglichen Schlitten fixiert. Durch die präzise Steuerung der Motorbewegung konnte die auf die Probe wirkende Zugkraft (Stress) variabel angepasst und kontrolliert werden.

Parallel zur Kraftmessung wurde ein optisches Kamerasystem eingesetzt, mit welchem Marker auf den Zugstäben kontinuierlich verfolgt wurden. Auf Basis dieser Tracking-Daten wurde die resultierende Dehnung (Strain) der Proben präzise bestimmt. Im Rahmen verschiedener Versuchsreihen wurden mit dieser Vorrichtung umfangreiche Datensätze generiert. Diese dienen als Grundlage, um unterschiedliche Modelle für Digitale Zwillinge zu entwickeln und hinsichtlich ihrer Prognosegüte zu evaluieren.

Entwicklung eines Greybox-Modells zur Verschleißprognose

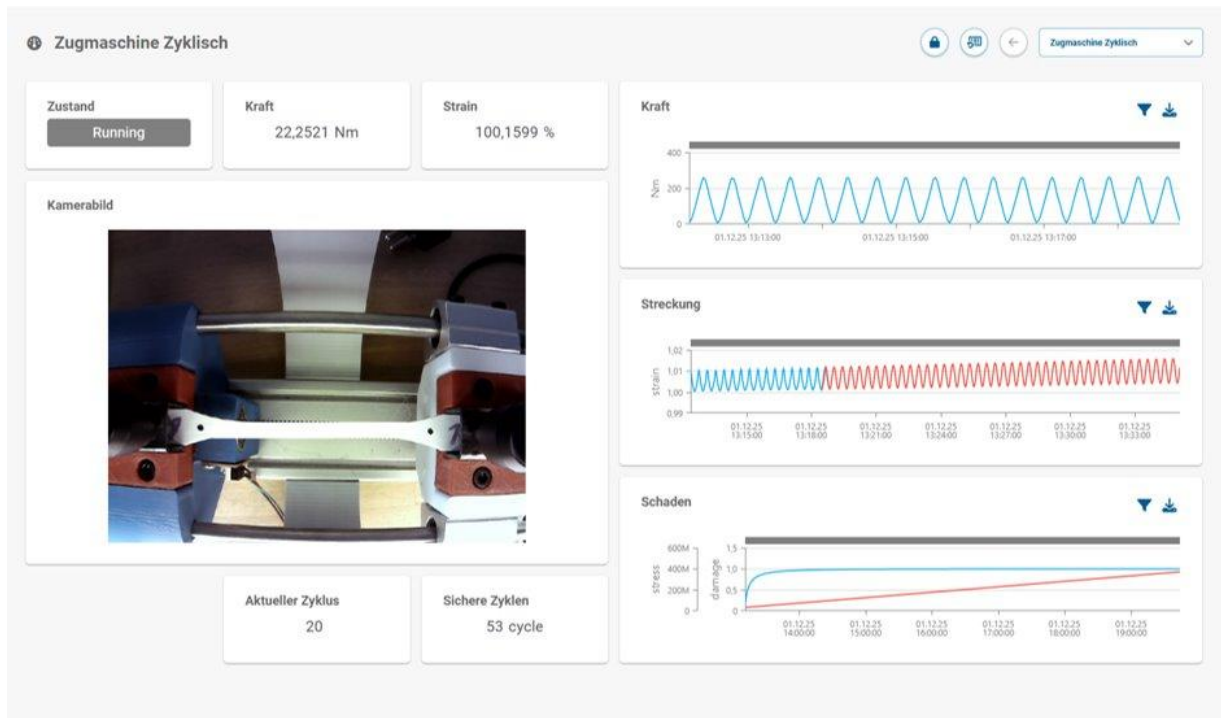
Im ersten Entwicklungsschritt wurde ein Modell entworfen, welches die Verformung und die Schädigungsakkumulation eines Zugstabes unter zyklischer Belastung abbildete. Hierzu wurden die Geometrie sowie die physikalischen Eigenschaften des Prüflings mittels der Finiten-Elemente-Methode (FEM) hinterlegt. Zur Reduktion der rechnerischen Komplexität wurde zunächst eine lineare Elastizität angenommen. Da das reale Ermüdungsverhalten jedoch viskoelastische Charakteristika aufweist, resultierte daraus eine Abweichung zum realen Verhalten.

Um diesen systematischen Fehler auszugleichen, wurden empirische Daten zur Berechnung einer S-N-Kurve (Wöhlerkurve) herangezogen. Mittels der *Parameterized-Background Data-Weak* (PBDW) Methode wurde das Modell um die Ermüdungsinformationen dieser S-N-Kurve erweitert. Durch diese Kombination entstand ein Greybox-Modell, welches eine präzise Approximation des realen physischen Verhaltens ermöglichte. Da die ursprüngliche Berechnung dieses Modells eine hohe zeitliche Komplexität aufwies, wurde eine *Model Order Reduction* (Modellordnungsreduktion) angewandt. Dadurch konnte die für den Betrieb als Digitaler Zwilling erforderliche Echtzeitfähigkeit erreicht werden.



Die Integration des Modells als **Digitaler Zwilling** erfolgte direkt mit der Zugprüfvorrichtung. Die Initialisierung des Modells wurde dabei durch die Hinterlegung der S-N-Kurve sowie der geometrischen Repräsentation in Form eines CAD-Modells realisiert. Auf dieser Basis konnte der Kräfteverlauf einer realen Zugprobe zu jedem beliebigen Zeitpunkt in das Modell eingespeist werden, um Informationen über die erwartete Verformung zu generieren. Durch den Abgleich mit dem real gemessenen Verformungsverlauf wurde die interne Spannung (Stress) innerhalb des Bauteils ermittelt, aus welcher wiederum die akkumulierte Schädigung (Damage) abgeleitet wurde.

Während des Betriebs wurden diese Informationen kontinuierlich mit der S-N-Kurve verglichen, um eine Feinabstimmung für den spezifischen Prüfling vorzunehmen. Als Ergebnis der Simulation wurden Zeitreihen ausgegeben, welche die Dehnung, die Spannung sowie die akkumulierte Schädigung des Prüflings enthielten. Das Modell ist aufgrund der zugrunde liegenden S-N-Kurve auf zyklische Belastungsszenarien spezialisiert.



Das System wurde als **PHM-System (Prognostics and Health Management)** eingesetzt, indem ein Schwellenwert für die maximal zulässige Schädigung definiert wurde. Durch den Abgleich dieses Schwellenwertes mit dem vorhergesagten Verlauf der Schädigungsakkumulation wurde die verbleibende Zyklenzahl ermittelt, für die ein sicherer Betrieb gewährleistet werden konnte. Dieser Ansatz ermöglicht die Optimierung von Wartungsintervallen, sodass Verschleißteile bis zum Ende ihrer sicheren Lebensdauer genutzt werden können, bevor ein unvorhersehbares Versagen eintritt. Aufgrund der Spezialisierung auf zyklische Lasten und der Abhängigkeit von der S-N-Kurve als Eingangsparameter ist eine weiterführende Optimierung der Materialparameter oder des Gesamtprozesses mit diesem spezifischen Modell nur eingeschränkt möglich.

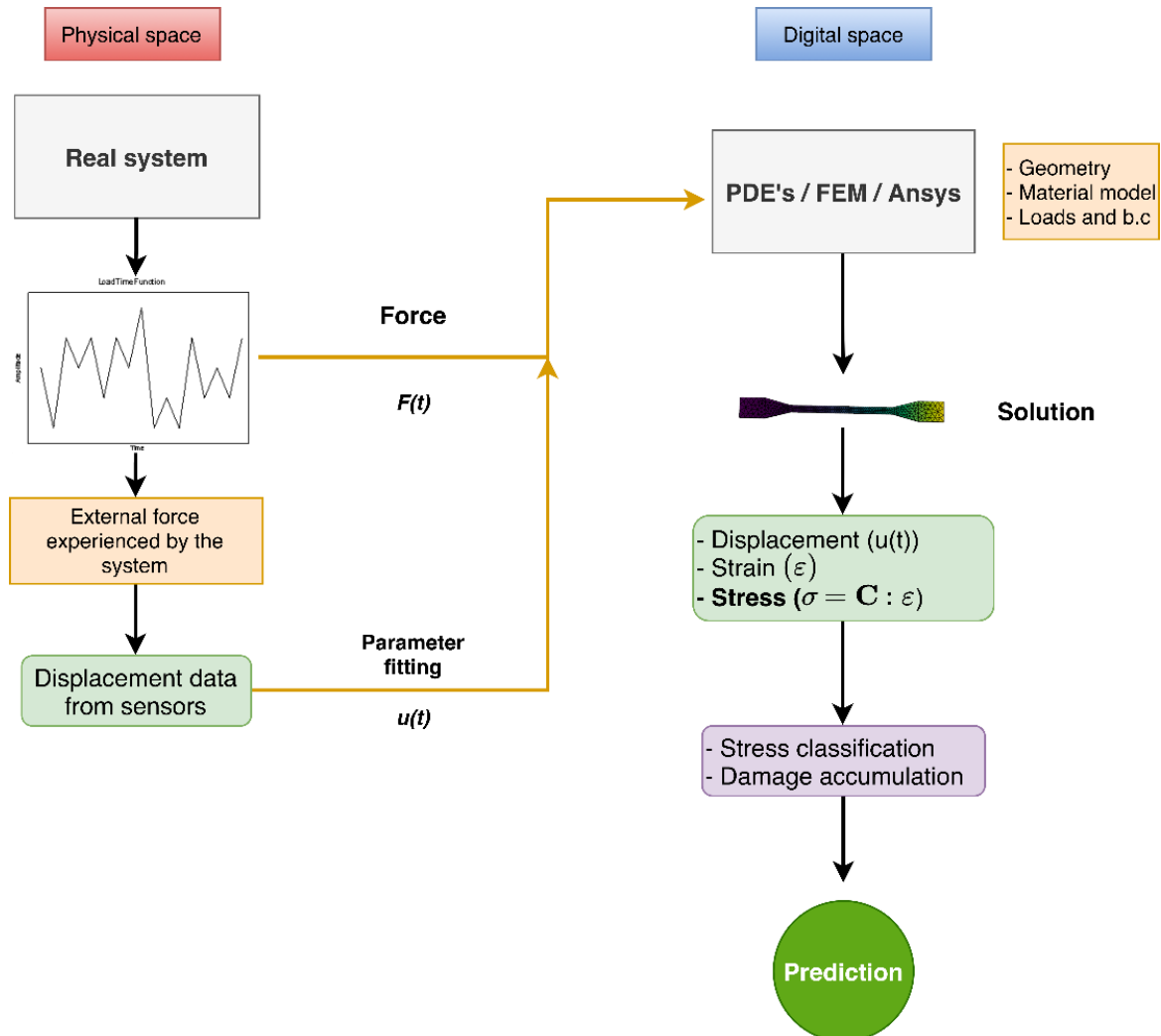
Entwicklung eines Whitebox-Modells zur universellen Verschleißprognose

Im zweiten Ansatz wurde ein Modell entwickelt, welches die Abbildung beliebiger Belastungsszenarien auf unterschiedlichen Prüflingen ermöglichte. Analog zum ersten Vorgehen wurden die Geometrie und die physikalischen Eigenschaften mittels der Finiten-Elemente-Methode hinterlegt. Im Gegensatz zur Greybox wurde dieses Modell jedoch konsequent auf Basis physikalischer Erkenntnisse über das viskoelastische Materialverhalten aufgebaut. Obwohl dieser Ansatz eine deutlich höhere Komplexität und Rechenintensität als die lineare Elastizität aufwies, bildete er das reale Verhalten der Zugproben wesentlich präziser ab.

Zur Steigerung der Effizienz wurde auch auf dieses Modell eine Modellordnungsreduktion angewandt. Bis zum Projektende seitens der ATR Software GmbH konnte die Rechenzeit jedoch noch nicht ausreichend verringert werden, um die für einen Digitalen Zwilling erforderliche Echtzeitfähigkeit zu gewährleisten. Dieser Optimierungsprozess wurde im Rahmen der Projektverlängerung von den Projektpartnern der Universität Ulm

übernommen, um die verbleibenden Hürden in der Berechnungsgeschwindigkeit zu überwinden.

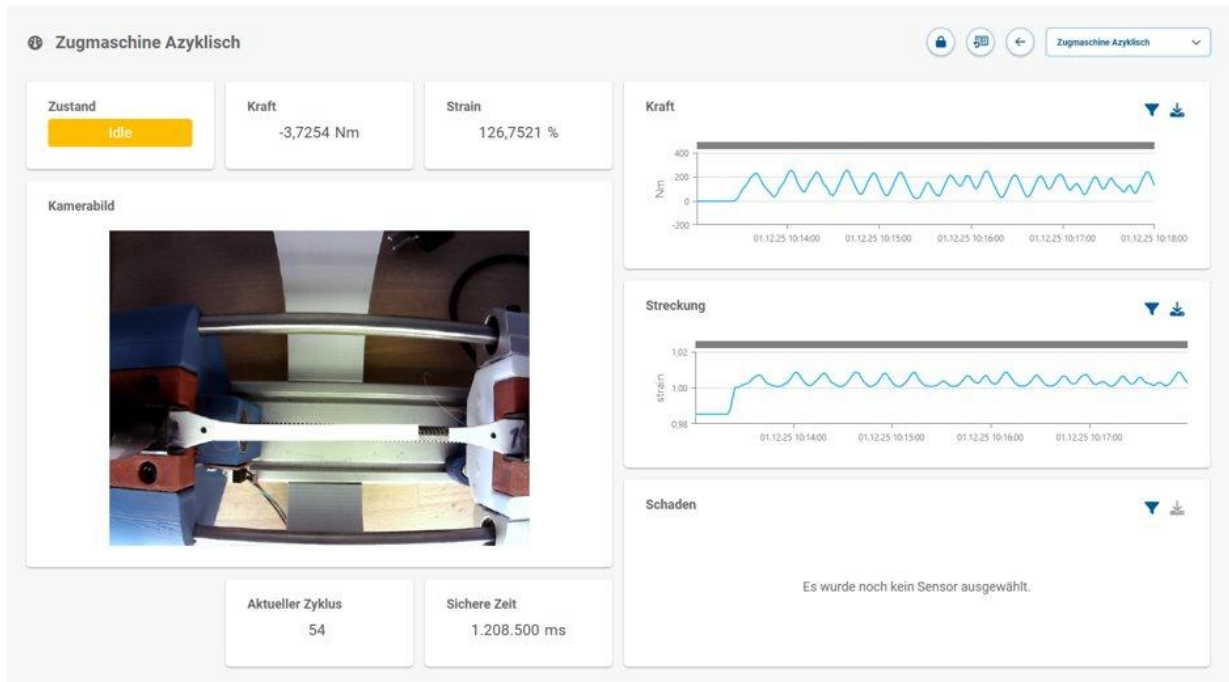
Durch die korrekte physikalische Abbildung der Verhaltensweise wurde das Ermüdungsverhalten direkt aus den akkumulierten Energien innerhalb der Probe abgeleitet. Hieraus resultierte ein Whitebox-Modell, welches das physische Verhalten bei beliebigen Belastungsszenarien darstellte. Die Integration dieses Modells als **Digitaler Zwilling** wurde analog zur Greybox vorbereitet, sodass eine Kopplung mit der Hardware jederzeit nach erfolgter Optimierung der Rechenzeiten realisiert werden kann.



Für die geplante Integration des Whitebox-Modells erfolgt die Initialisierung über die Geometrie des Prüflings in Form eines CAD-Modells. Als Eingangsgrößen dienen der bisherige Kräfte- und Dehnungsverlauf. Da im Gegensatz zum Greybox-Modell keine Annahmen über rein zyklische Belastungen getroffen werden, wird der Input der Messwerte um eine Zeitreihe der erwarteten zukünftigen Belastung erweitert. Im Falle unbekannter oder stochastischer Belastungswerte innerhalb eines definierten Intervalls wird als Approximation wieder eine zyklische Belastung mit identischem Intervall eingespeist.

Das Modell liefert analog zur Greybox Zeitreihen bezüglich Dehnung, Spannung und akkumulierter Schädigung zurück. Für den Einsatz als **PHM-System** wird ein Schwellenwert

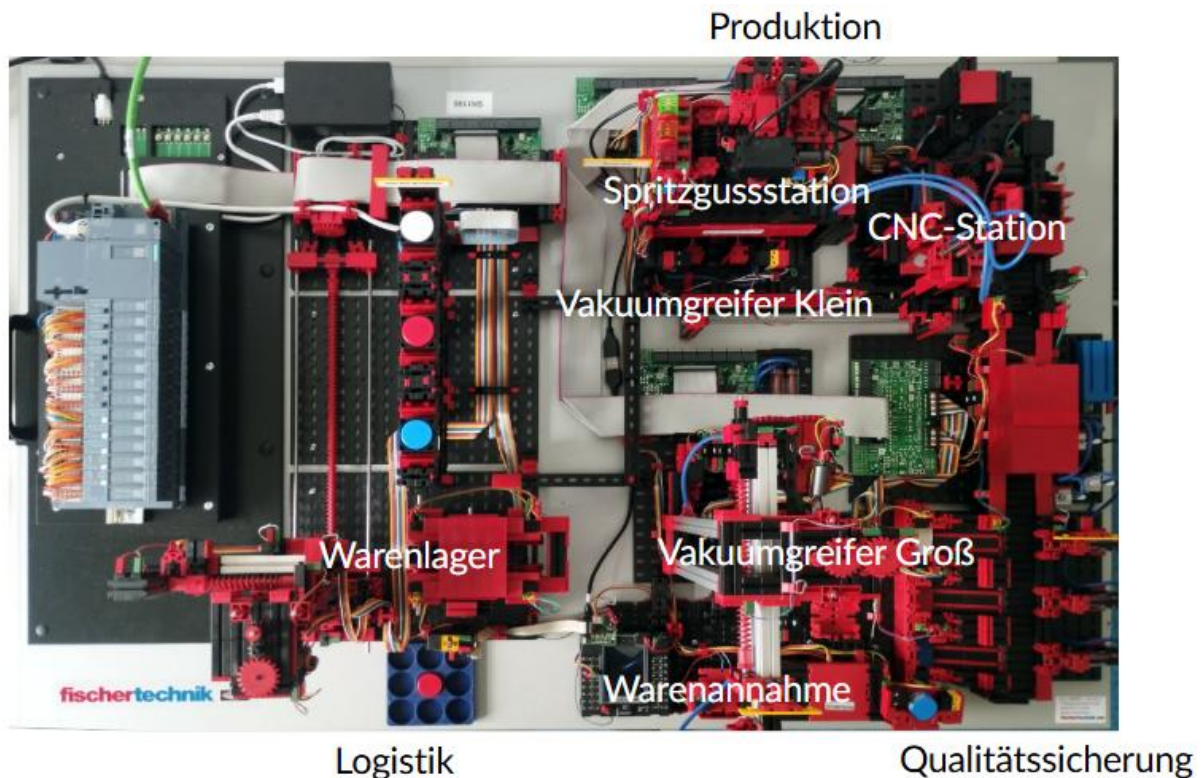
für die Schädigung definiert, durch dessen Abgleich mit der Vorhersage der Zeitpunkt für ein sicheres Ende der Nutzung bestimmt werden kann.



Sofern anstelle eines einzelnen Kräfteverlaufs mehrere Szenarien simuliert werden, lässt sich ein optimierter Belastungsverlauf bestimmen, der die maximale sichere Nutzungsdauer verspricht. Aktuell wird der Zusammenhang zwischen Prozessparametern und Kräften aus dem Prozesswissen abgeleitet. Zukünftig könnte dies um ein Modell erweitert werden, welches die einstellbaren Prozessparameter direkt mit dem Kräfteverlauf korreliert, um auf dieser Basis die gesamte Prozessführung zu optimieren. Durch diese Optimierung der Parameter lässt sich nicht nur die Standzeit der Komponenten verlängern, sondern auch die Effizienz des gesamten Produktionszyklus steigern.

Die Fischer-Lernfabrik als Referenzproduktionsanlage

Zur Abbildung eines industriellen Produktionsprozesses wurde eine Fischer-Lernfabrik implementiert, wobei das Szenario einer Spritzgussanlage für Bremsscheiben als Referenz gewählt wurde. Da die Hardware der Lernfabrik primär Sensorwerte zur Materialbewegung liefert – beispielsweise über Vakuumgreifer –, welche nur einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Produktqualität haben, wurde die Generierung prozessrelevanter Daten über alternative Wege realisiert. Hierfür wurden sowohl modellierte Sensorverläufe als auch spezifische Auftrittswahrscheinlichkeiten für prozesskritische Ereignisse herangezogen.



Modellierung der Produktionsanlage mittels Dynamic Bayesian Networks

Im ersten Projektjahr wurde zur Modellierung der Anlage zunächst der Ansatz der *Dynamic Bayesian Networks* (DBN) verfolgt. Dieser ermöglichte es, auf Basis von Einzelwahrscheinlichkeiten für jedes Ereignis innerhalb des Prozesses die Gesamtwahrscheinlichkeiten für definierte Szenarien abzuleiten. Mit Beginn der Kooperation mit der Universität Ulm im zweiten Projektjahr wurde dieser Ansatz jedoch verworfen. Die Entscheidung begründete sich in der hohen Spezifität des Netzwerks, welches für jeden Anwendungsfall individuell angepasst werden müsste und zudem ein übermäßig tiefes sowie vielfältiges Prozesswissen voraussetzt. Stattdessen wurde die Entwicklung einer Blackbox auf Basis von *Machine Learning* forciert.

Datengenerierung mittels Diskreter Event-Simulation (DES)

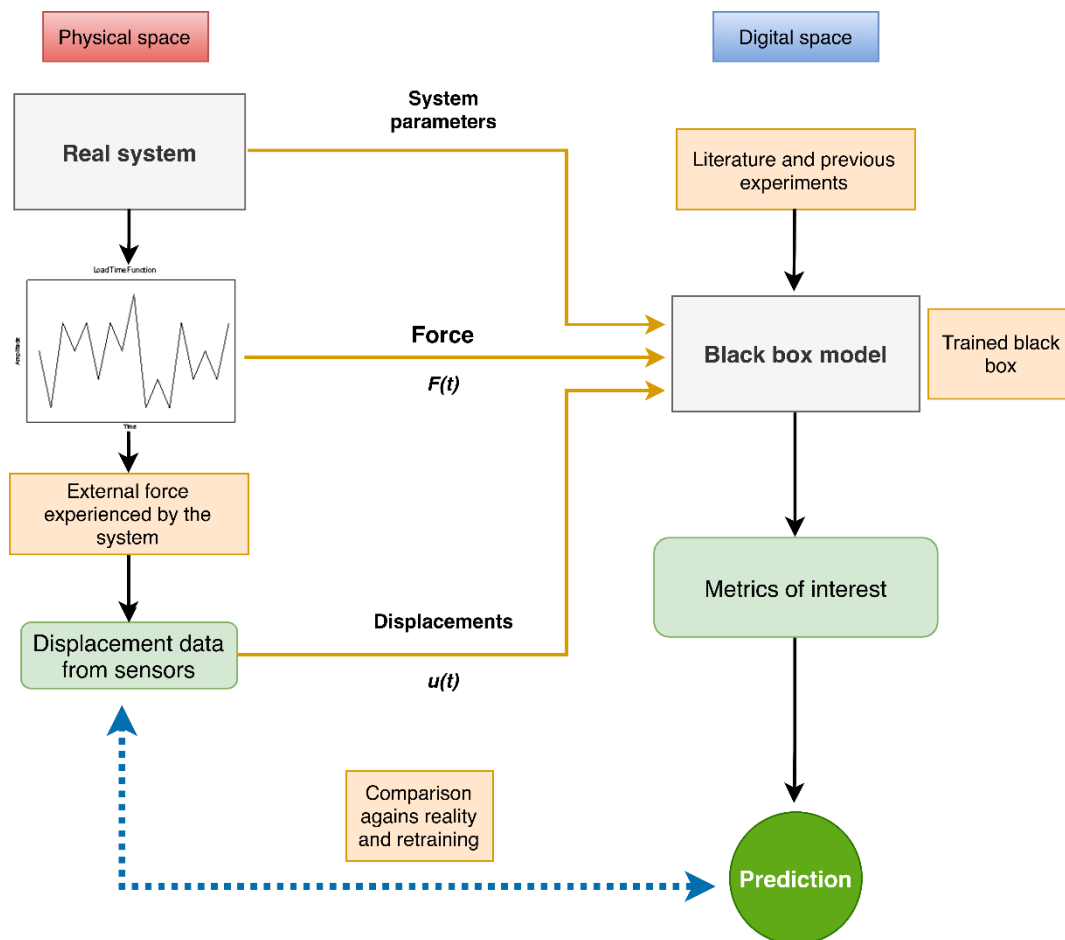
Um die Generierung hochwertiger Trainingsdaten für die Qualitätsvorhersage der Gussteile zu realisieren, wurde eine Diskrete Event-Simulation (DES) entwickelt. Diese Simulation bildet jeden einzelnen Produktionsschritt – von der Einlagerung bis zur abschließenden Qualitätsbewertung und Auslagerung – als kontinuierlichen Prozess ab. Innerhalb dieser Abläufe werden stochastische Verteilungen eingesetzt, um die realen Prozessschritte realitätsgetreu abzubilden. Die Werte der virtuellen Sensoren werden dabei an den jeweiligen Prozessstellen kontinuierlich generiert und fortgeschrieben.

Zur Abbildung der Abhängigkeiten zwischen den Qualitätsstufen und den Produktionsabläufen wurden vorab definierte Einflussfaktoren als Material- und Produkteigenschaften integriert. Diese wurden während der Simulation dynamisch an die stochastisch modellierten Prozessverläufe angepasst. Zur Sicherstellung der Datenvalidität wurden die resultierenden Einflüsse des gesamten Produktionsprozesses bis zur finalen

Qualitätsbewertung mittels Korrelationsanalysen überprüft. In einem iterativen Prozess wurden die Einflussfaktoren sowie die Verteilungsarten und -parameter kalibriert, bis die Simulation das angestrebte realistische Systemverhalten und die entsprechenden Kausalzusammenhänge präzise widerspiegelte.

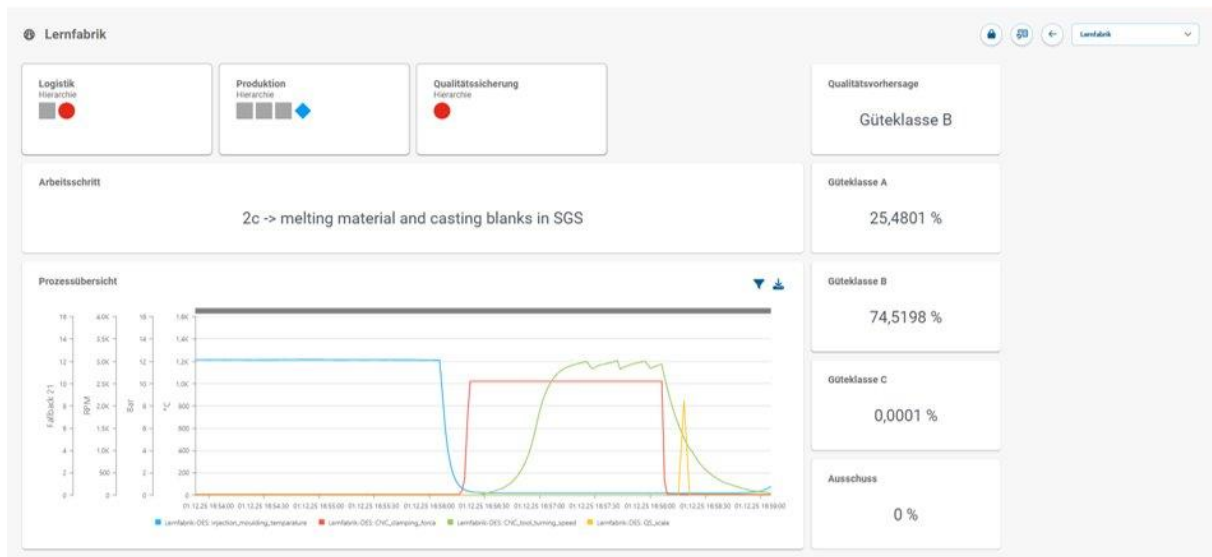
Entwicklung eines Blackbox-Modells zur Qualitätsvorhersage

Auf Basis der durch die diskrete Event-Simulation generierten Datensätze wurde ein Fully Connected Feed-Forward Neural Network trainiert. Das daraus resultierende Modell verarbeitet Zeitreihendaten eines vollständigen Produktionsprozesses als Eingangsgröße und bestimmt daraus eine Wahrscheinlichkeitsverteilung für die Güteklasse des entstandenen Produktes.



Um dieses Netzwerk als Digitalen Zwilling im Bereich **Predictive Quality** einzusetzen, werden die Zeitreihendaten eines laufenden Prozesses bis zum aktuellen Zeitpunkt erfasst und für den verbleibenden Prozessverlauf mit erwartbaren Durchschnittsdaten ergänzt. Das Ergebnis dieser Berechnung stellt eine Prognose der Wahrscheinlichkeitsverteilung für die Güteklasse dar, sofern der restliche Prozess einem durchschnittlichen Verlauf folgt. Alternativ zu den Durchschnittswerten können Daten verwendet werden, die einer spezifischen Parametrisierung des Prozesses entsprechen. Durch die Simulation des zukünftigen Prozessverlaufs mit variierenden Parametrisierungen kann ein Parametersatz identifiziert werden, welcher die Wahrscheinlichkeit für eine höhere Güteklasse maximiert. Hierdurch wurde die Funktionalität geschaffen, den Produktionsprozess individuell an die

Anforderungen des aktuell gefertigten Werkstücks anzupassen und potenzielle Mängel, die durch Abweichungen im bisherigen Prozessverlauf entstanden sind, durch eine gezielte Anpassung des Restprozesses zu kompensieren.



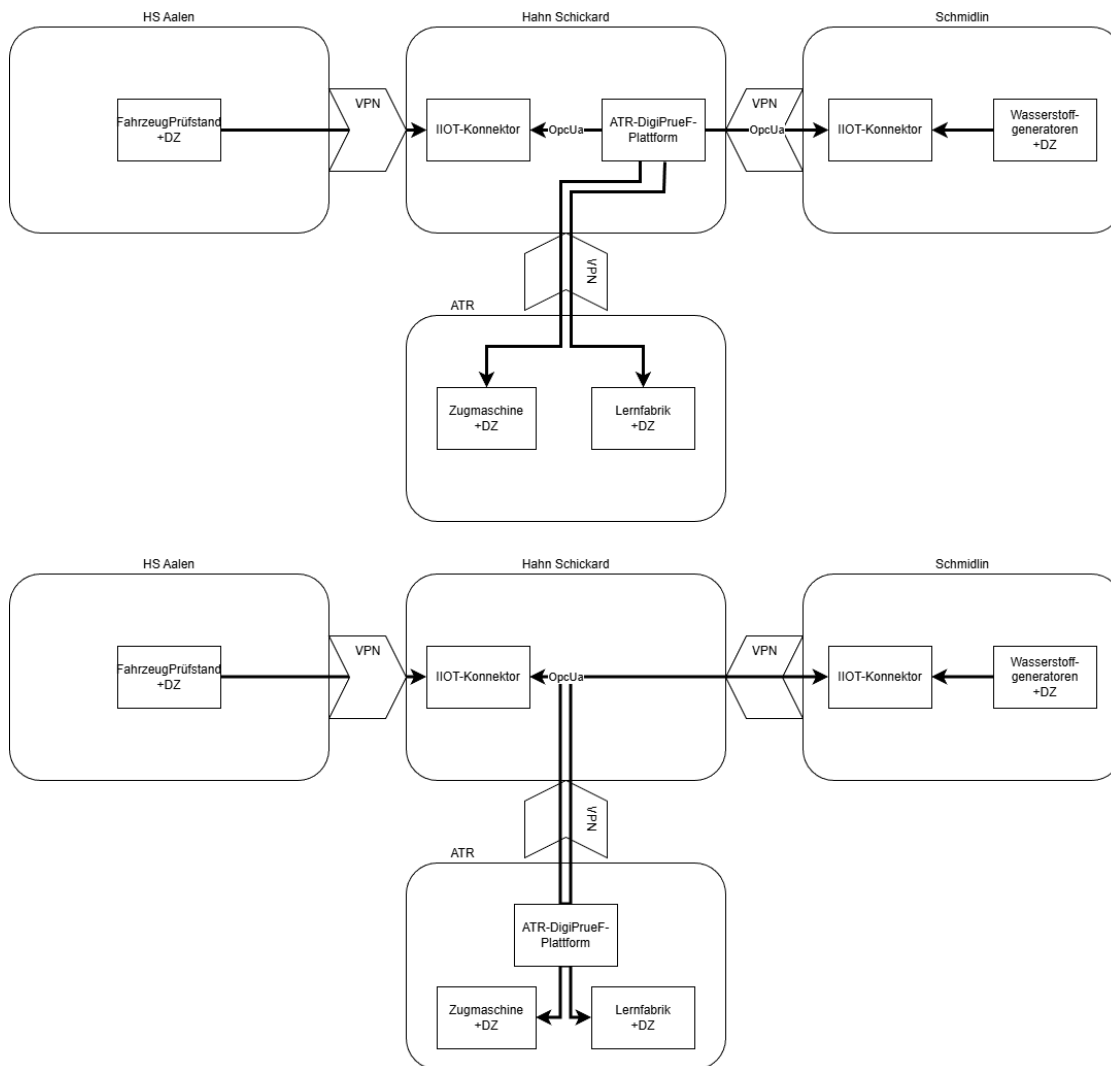
Anwendung des Blackbox-Modells bei einem Pilotkunden

Im Rahmen der Validierung wurden Daten einer realen Produktionsanlage bei einem Pilotkunden gesammelt. Dabei wurde die Anwendung des für die Lernfabrik entwickelten Blackbox-Modells mittels Transfer Learning auf die Realdaten angestrebt. Es stellte sich jedoch heraus, dass seitens des Kunden kein individuelles Labeling der Daten hinsichtlich der Produktqualität bereitgestellt werden konnte, da eine Prüfung der Qualität nicht unmittelbar nach der Fertigung jedes einzelnen Werkstücks erfolgt. Stattdessen wird lediglich die Verteilung der Qualitätsstufen innerhalb eines produzierten Batches erfasst. Infolgedessen konnten die aufgezeichneten Zeitreihendaten nicht direkt spezifischen Qualitätsmerkmalen einzelner Teile zugeordnet werden; stattdessen konnte nur ein längerer Betrachtungszeitraum in Korrelation mit dem Gesamtergebnis eines Batches gebracht werden.

Im weiteren Projektverlauf besteht für die Partner der Universität Ulm die Möglichkeit, eine Datenanalyse mittels Clustering der gesammelten Daten durchzuführen. Ziel ist die Identifikation von Clustern, welche den bekannten Mengenanteilen der Qualitätsstufen innerhalb eines Batches entsprechen. Daraus ließe sich eine automatisierte Zuordnung der Datensätze ableiten. Auf Basis eines solchen Clusterings könnte anschließend ein Transfer Learning des Blackbox-Modells realisiert werden. Dies würde den Aufbau eines Predictive Quality-Systems ermöglichen, über welches die Prozessparameter zur Steigerung der Durchschnittsqualität optimiert werden könnten. Bei einer direkten Einbindung in die Prozesssteuerung ließe sich der Prozess sogar für jedes individuelle Werkstück hinsichtlich der erwarteten Qualität optimieren.

Die Virtuelle Prüfplattform (DigiPrüF)

Für die Integration der Digitalen Zwillinge sämtlicher Projektpartner wurde eine modulare Systemarchitektur ausgearbeitet, welche die Einbindung der jeweiligen Ergebnisse als eigenständige Services ermöglicht. Zur Bereitstellung der Prozessdaten wurden von Hahn-Schickard IIoT-Adapter implementiert, welche Informationen der Anwendungsfälle sowie deren Digitale Zwillinge über eine OPC UA-Schnittstelle zur Verfügung stellen. Innerhalb der DigiPrüF-Plattform wurde die Möglichkeit geschaffen, Verbindungen zu diesen Servern herzustellen und die Daten der einzelnen Anwendungsfälle zu integrieren.



Ursprünglich wurde die Bereitstellung der Plattform als Cloud-Lösung innerhalb der Infrastruktur von Hahn-Schickard geplant. Da jedoch ersichtlich wurde, dass bei Hahn-Schickard keine Verlängerung der Projektlaufzeit wie bei anderen Partnern erfolgen würde und somit im Zeitraum nach deren Projektende kein Support mehr für die Infrastruktur gewährleistet werden konnte, wurde die finale Bereitstellung als Cloud-Service innerhalb des Netzwerks der ATR Software GmbH umgesetzt. Dies sicherte den kontinuierlichen Betrieb und die technische Unterstützung der Plattform über die gesamte Projektdauer aller Partner hinweg ab. Die Infrastruktur von Hahn-Schickard wurde fortan zur Vernetzung der Partnerstandorte via VPN genutzt.

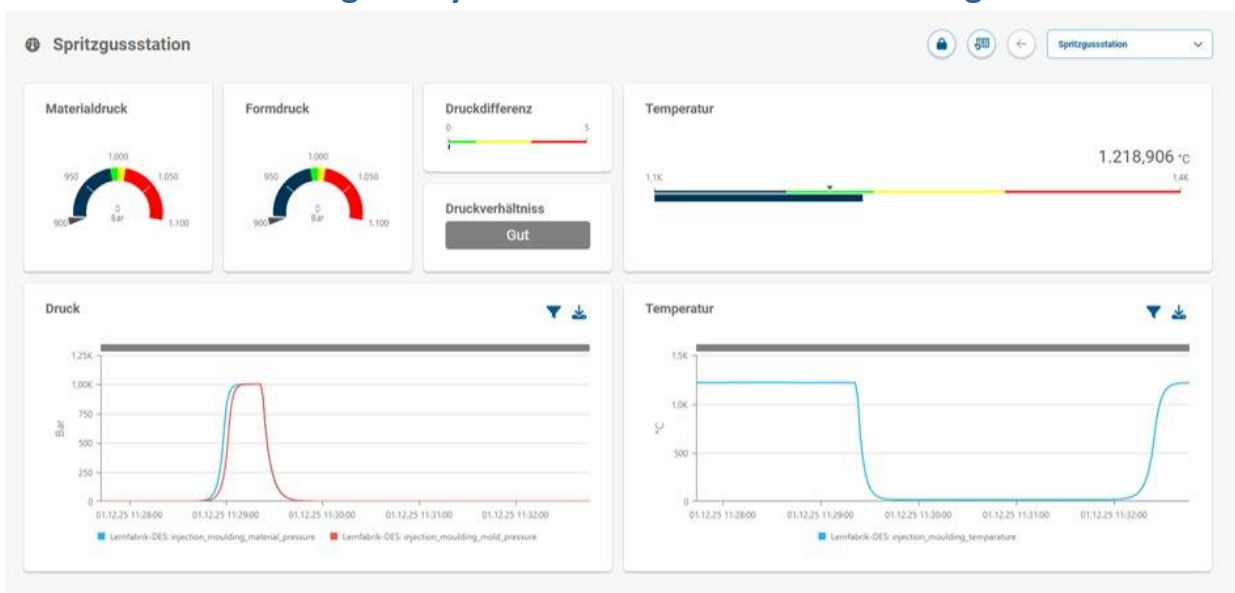
Integration der Modelle via OPC UA

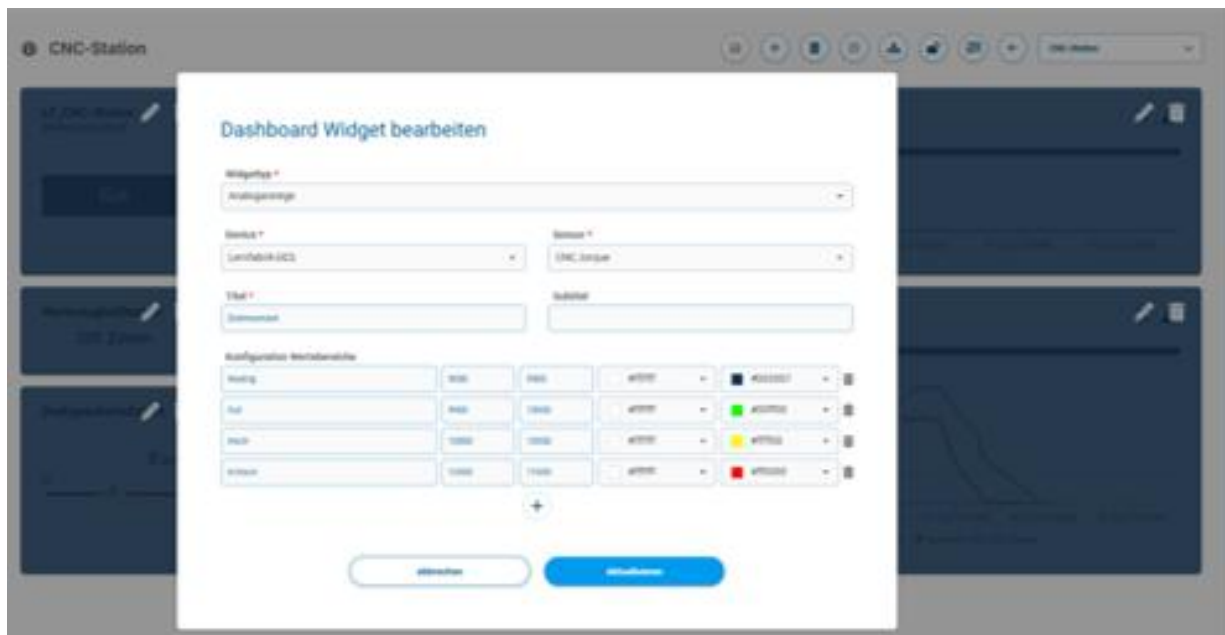
Innerhalb der Plattform wurde eine dedizierte Ansicht zur Verwaltung der OPC UA-Verbindungen implementiert. Nach dem Aufbau einer Verbindung kann durch die vom Server bereitgestellte Knotenstruktur navigiert werden, wobei eine Echtzeit-Vorschau der aktuellen Daten die Auswahl unterstützt. Die Einbindung erfolgt durch das Subscriben der gewünschten Knoten, welche anschließend als Datenquellen innerhalb der Plattform registriert werden. Im Zuge dieser Registrierung werden die Knoten einem Zielgerät zugeordnet, wobei sie einen internen Namen erhalten und der jeweilige Datentyp, wie beispielsweise Integer, String oder Zeitreihe, spezifiziert wird. Damit wurde eine flexible Basis geschaffen, um externe Datenmodelle nahtlos in die Plattformumgebung einzubinden.

Konzeption der Benutzeroberfläche durch Goldschnitt Interaktion

Um eine flexible Visualisierung der heterogenen Anwendungsfälle zu gewährleisten, wurde das Büro Goldschnitt Interaktion mit der Erarbeitung von Visualisierungskonzepten beauftragt. Im Fokus stand die Entwicklung eines Komponentenkonzepts, welches hierarchische Strukturen, Statusinformationen und komplexe Abläufe konfigurierbar darstellt. Diese theoretischen Konzepte bildeten die methodische Grundlage für die anschließende technische Realisierung der dynamischen Benutzeroberfläche innerhalb der Plattform.

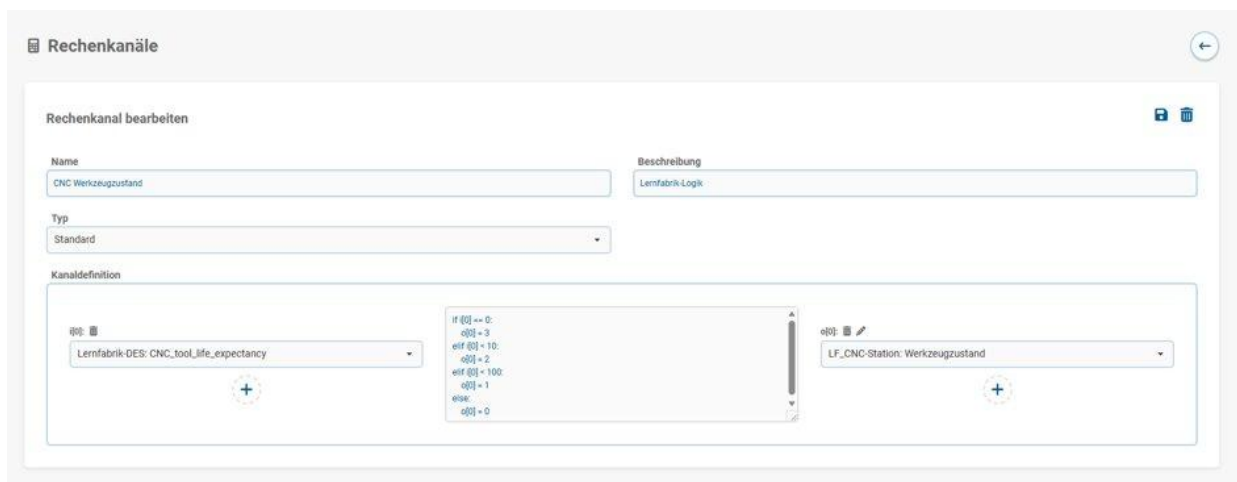
Technische Umsetzung der dynamischen Dashboards und Widgets





Die Visualisierung der Sensordaten wurde über konfigurierbare Dashboards realisiert, in denen verschiedene Widgets zum Einsatz kommen, welche individuelle Einstellungsmöglichkeiten für Titel, Farbgestaltung und Fixpunkte bieten. Es wurden Informations-Widgets zur direkten Textausgabe der Sensorwerte inklusive Einheit sowie Zustands-Widgets zur Diskretisierung numerischer Werte für die visuelle Darstellung definierter Zustände implementiert. Zudem wurden Analog-Widgets zur Darstellung numerischer Werte über eine Messbereichsanzeige mit farblich kodierten Intervallen sowie Balken-Widgets zur horizontalen Balkenanzeige mit optionalen Fixpunkten und Grenzwertmarkierungen entwickelt. Ergänzend dazu ermöglichen Linien-Widgets die Visualisierung von Zeitreihen und numerischen Verläufen mit flexiblen Zeitfiltern. Dashboards können vom Benutzer individuell erstellt, positioniert und verwaltet werden, wobei ein integriertes Dropdown-Menü den schnellen Wechsel zwischen verschiedenen Dashboards ermöglicht.

Verarbeitung von Daten über Rechenkanäle

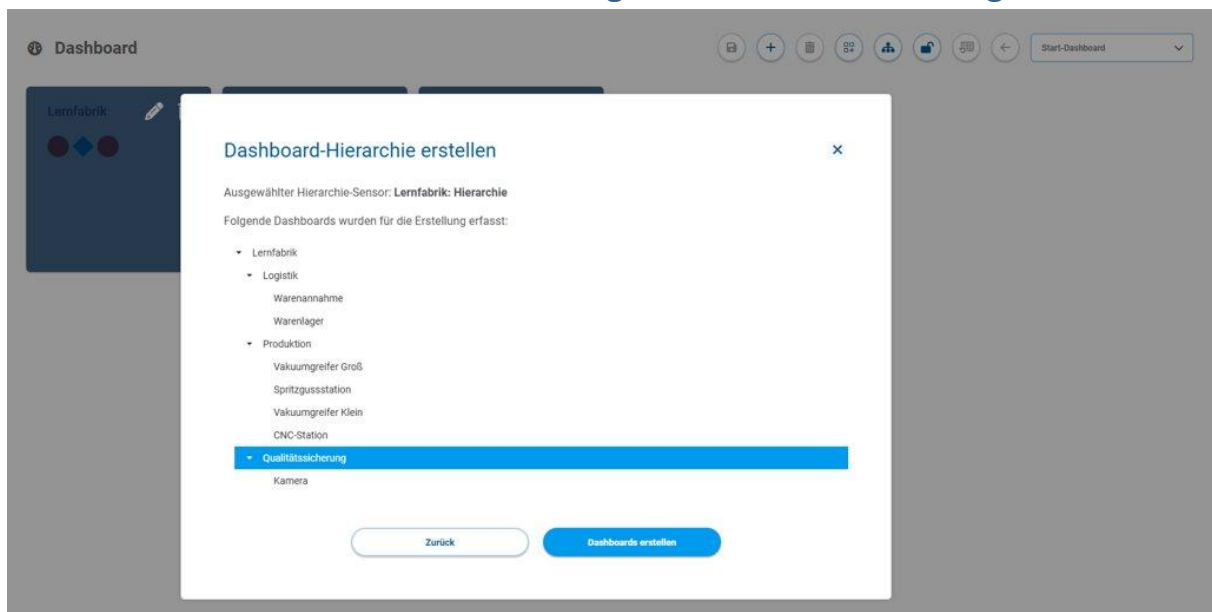


Zur Erstellung virtueller Sensoren wurde der Bereich der Rechenkanäle implementiert. Ein Rechenkanal fungiert als Objekt, welches Eingangsdaten verarbeitet und über definierte Funktionen neue Ausgangswerte generiert. Es wurden zwei Haupttypen unterschieden, wobei Standard-Rechenkanäle die freie Definition von Evaluierungsfunktionen mittels Python-Code ermöglichen. Auf diese Weise können komplexe Logiken zwischen beliebig vielen Eingabe- und Ausgabesensoren abgebildet werden, ohne dass Einschränkungen bei der Wahl der Sensortypen bestehen. Eintreffende Sensorwerte werden dabei in die Evaluierungsfunktion übergeben, welche anschließend jeweils den neuen Wert für jeden definierten Ausgabesensor bestimmt.

Abbildung hierarchischer Strukturen

Hierarchie-Rechenkanäle dienen der Aggregation von Zustandssensoren, indem sie einen Gesamtzustand sowie eine hierarchische Konkatenation der Zustände in einem Array bestimmen. Die Abbildung komplexer Hierarchien wurde durch einen mehrstufigen Prozess realisiert, bei dem zunächst physische Sensoren über Standard-Rechenkanäle in diskrete Zustandswerte überführt wurden. Ein Zustand nimmt dabei explizit einen der vier Werte "Undefiniert", "Info", "Warnung" oder "Fehler" an. Die so generierten Zustandssensoren bildeten anschließend die Basis für die Hierarchie-Rechenkanäle, wodurch der Gesamtzustand eines Moduls als Maximum aller Eingangszustandswerte definiert werden konnte.

Automatisierte Dashboard-Generierung und hierarchische Navigation



Ein wesentliches Merkmal der Plattform ist die automatisierte Erstellung hierarchischer Dashboards. Über einen Assistenten kann ein Benutzer einen Hierarchie-Sensor als Startpunkt wählen, woraus das System automatisch den gesamten aufgespannten Baum als verknüpfte Dashboard-Struktur generiert. Dabei wurde eine spezielle Visualisierungslogik integriert, die den Zustand der hierarchisch unterliegenden Elemente über entsprechende Kacheln darstellt. Diese Kacheln spiegeln nicht nur den aktuellen Status des jeweiligen Teilprozesses oder Moduls wider, sondern dienen gleichzeitig als interaktive

Navigationselemente. Durch einen Klick auf eine Kachel wird der Nutzer direkt auf das zugehörige Dashboard des unterliegenden Elements weitergeleitet, wodurch eine intuitive Navigation durch die gesamte Anlagenstruktur ermöglicht wurde. Da jeder Knoten des Baums als eigenes Dashboard repräsentiert wird und die Kanten durch die Abhängigkeiten der Rechenkanäle definiert sind, lässt sich so die gesamte Komplexität der Produktionsanlage übersichtlich abbilden.

Verwaltungsaspekte und Benutzerberechtigungen

Zur Absicherung der Plattform wurde ein umfassendes Berechtigungsmanagement implementiert. Es wurde die Funktionalität geschaffen, mehrere Benutzer innerhalb der Plattform anzulegen und diese mit individuellen Rollen auszustatten. Dabei können sowohl schreibende als auch lesende Berechtigungen zugewiesen werden, um administrative Zugriffe von der reinen Datenbeobachtung zu trennen. Diese Verwaltung ermöglichte es, die Verantwortlichkeiten innerhalb des Projektes klar zu definieren und den Datenschutz sowie die Integrität der konfigurierten Dashboards und Rechenkanäle sicherzustellen.

2. Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Das Projekt wurde am Standort der ATR Software GmbH (ATR) in Neu-Ulm bearbeitet. Der größte Teil der eingesetzten Fördermittel entfiel wie geplant auf die Personalkosten. Die Entwicklungstätigkeiten wurden hier zum größten Teil wie geplant durchgeführt und entsprachen von Ihren Aufwänden und deren Gewichtung im Wesentlichen der ursprünglichen Planung. Alle wichtigen geplanten Ergebnisse konnten im Rahmen der Projektlaufzeit erfolgreich erzielt werden.

Lediglich in den Bereichen der Voruntersuchungen, Schnittstellendefinition, Erstellung der Datenbasis und Konzeption der Modellansätze wurden im ersten Projektjahr, ausgelöst durch das zu dieser Zeit fehlende Personal der Universität Ulm, mehr Anteile durch das Personal von ATR übernommen. Dies wurde gegen Projektende bei der Finalisierung der Optimierungsaspekte bei PHM und Predictive Quality damit ausgeglichen, dass die Uni Ulm mehr Anteile bei der Implementierung und der Feinabstimmung der Modelle sowie bei der Parameteroptimierung übernommen haben.

Insgesamt waren die FuE-Tätigkeiten personell etwas aufwändiger als ursprünglich geplant und gleichzeitig wurden weniger Material-, Reise-, Abschreibungs- und sonstige unmittelbare Vorhabenkosten benötigt, sodass ein Teil dieser Kosten auf Personalkosten umgewidmet wurde. Insgesamt betrug dieser Anteil aber weniger als 20% der Personalkosten. Eine formelle Umwidmung wurde daher nicht beantragt.

3. Die Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Durch die geleistete Arbeit konnten die geplanten Forschungsfragen im Rahmen des Projektes erfolgreich bearbeitet werden. Die geplanten Aufgaben wurden während der Projektlaufzeit regelmäßig evaluiert und nur notwendige Ressourcen eingesetzt. Da alle Aufgaben aufgrund der vorhandenen Expertise und Zusammenarbeit mit den Projektpartnern durch eigene personelle Ressourcen umgesetzt werden konnten, konnte die Effizienz aufgrund wissenschaftlicher zielgerichteter Arbeitsweise und die Wirtschaftlichkeit dieser Tätigkeiten sichergestellt werden. Die Arbeiten waren daher notwendig und angemessen und führten wie geplant zu Ergebnissen, die perspektivisch zu neuen Produkten, Dienstleistungen und neuen Möglichkeiten in der Produktion und Erprobung führen können.

4. Der voraussichtliche Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

ATR konnte im Rahmen des Projekts alle wesentlichen Ergebnisse wie geplant umsetzen. Die im Rahmen des Projektes als Forschungsdemonstrator aufgebaute webbasierte Benutzeroberfläche für die Interaktion des Endanwenders mit der Plattform und Visualisierung der Digitalen Zwillinge und generierten Daten wird nun nach Projektende zu einem vermarktungsfähigen eigenständigen Produkt weiterentwickelt und zum Produktivbetrieb geführt. Zusätzlich wird ATR die Projektergebnisse zum PHM im Produktionsumfeld und zur Predictive Quality von Produkten weiterentwickeln und anschließend als Dienstleistungen über die virtuelle Prüfplattform zur Verfügung stellen. Anhand der im Vorhaben entwickelten Methodik und Expertise kann die Entwicklung

Digitaler Zwillinge der Produktionsumgebung als zusätzliche Dienstleistung angeboten werden. Die Modelle sollen hierzu zur Anwendung in Kundenprojekten erweitert werden. Zusätzlich sollen die Ergebnisse in die bestehende ATR.SmartFactory.Plattform integriert werden, wobei diese über den IIoT-Konnektor wiederum in das digitale Umfeld integriert werden kann, sodass sich auch hierfür neue cloudbasierte Verwertungsmöglichkeiten ergeben. Dadurch kann ATR neben der bisherigen eher starren, auf die Optimierung von Ressourcen bezogenen, Produktionsplanung zukünftig auch eine auf die Erhöhung der Produktqualität und der Vermeidung von Anlagenstörungen bezogene Produktionsplanung anbieten und die Abbildung von Maschinen und Prüfständen als digitale Zwillinge deutlich vereinfachen und deren Funktionsumfang deutlich erhöhen. Das im Projekt gewonnene zusätzliche Knowhow wird auch im Beratungsbereich zu deutlichen Mehrwerten und Umsatzsteigerungen führen.

Lfd. Nr.	Konkrete Verwertung	Zeithorizont
1	Integration in bestehende Produkte	6 Monate nach Projektende
2	Integration bestehender Produkte in digitales Umfeld u.a. mittels IIoT-Konnektor	12 Monate nach Projektende
3	Dienstleistung PHM über die Plattform	1-3 Jahre nach Projektende
4	Dienstleistung Predictive Quality über die Plattform	1-3 Jahre nach Projektende
5	Dienstleistung Erstellung Digitaler Zwillinge der Produktionsumgebung	18 Monate nach Projektende

Die durch das Projekt zusätzlich generierten Aufträge und ermöglichten Umsätze bedingen zudem auch weitere Mitarbeiter, die bereits während der Projektlaufzeit, aber auch vor allem in der Zeit nach dem Projekt eingestellt werden sollen. Schon zum Start des Projekts wurde ein neuer Entwickler eingestellt. Zur Verwertung sollen nun perspektivisch drei neuen Stellen für die Bereiche Entwicklung und Vertrieb aufgebaut werden.

5. Der während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordene Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Während der Durchführung des Vorhabens sind uns keine Fortschritte auf dem Gebiet bekannt geworden.

6. Die erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses

ATR hat zusammen mit der Universität Ulm eine Veröffentlichung getätigt:

- Aylwin, Beranek, Budihala, Mettenleiter, Oruc, Urban, Building a Digital Twin for Material Testing: Model Reduction and Data Assimilation, 2025

Weitere Veröffentlichungen, bei denen ATR direkt involviert ist, sind nicht geplant, jedoch gab es von der anderen Projektpartnern Veröffentlichungen, die die Forschung und Ergebnisse von ATR mit umfassen und es werden noch weitere solche Veröffentlichungen folgen. ATR wird die Ergebnisse des Projektes im Zusammenhang mit der geplanten Verwertung auf Messen und potenziell in Vorträgen weiter vorstellen.