

Berlin, 07.05.2025

Verbundvorhaben H2Giga_QT4.2_FertiRob: Fertigung und Robotik Teilvorhaben: Simulationsmodelle als Teil des Digitalen Produktzwillings

Sachbericht zum Verwendungsnachweis

Stand:	07.05.2025
Einreichungsdatum TIB (Teil I+II):	07.05.2025
Partner:	inpro Innovationsgesellschaft für fortgeschrittene Produktionssysteme in der Fahrzeugindustrie mbH
Autor:	Dr. Kim Kose
Fördertitel:	Verbundvorhaben H2Giga_QT4.2_FertiRob: Fertigung und Robotik, Teilvorhaben: Simulationsmodelle als Teil des Digitalen Produktzwillings
Laufzeit:	01.04.2021 bis 31.03.2025
Förderkennzeichen:	03HY113N
Disclaimer:	Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei dem Autor.

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



Finanziert von der
Europäischen Union
NextGenerationEU

Teil I – Kurzbericht

1. Ursprüngliche Aufgabenstellung sowie wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Innerhalb dieses Projektes sollten die Voraussetzungen einer Modellierung durch digitale Zwillinge sowohl für die Modellierung des Produktes Elektrolyseur und seiner Komponenten als auch der Produktionsanlage geschaffen werden. Mit Hilfe eines digitalen Zwillings wird die Datenkonsistenz und Datenvollständigkeit abgesichert. Obwohl an Konzepten von digitalen Zwillingen vor Projektbeginn schon über 20 Jahre gearbeitet wurde, fehlten immer noch Werkzeuge zur Erstellung und offene, nicht anbietergebundene Sprachen, für deren Beschreibung. Eine weitere Aufgabenstellung, die hier behandelt wurde, betraf die Interaktion von Luft und Bauteil mit dem Ziel, Schädigungen insbesondere der sehr empfindlichen Membran bei der Montage zu vermeiden. Alle diese Aufgabenstellungen unterstützen am Ende die virtuelle Inbetriebnahme von Anlagen, die der tatsächlichen Inbetriebnahme vorangeht.

Daraus folgten für das hier dokumentierte Teilprojekt „Simulationsmodelle als Teil des Digitalen Produktzwillings“ die Aufgabenstellungen, die Modelle für DPZ (Digitaler Produkt Zwilling) und DAZ (Digitaler Anlagen Zwilling) auf Basis eines etablierten Standards so weiterzuentwickeln, dass damit die Planung und Konfiguration von Anlagen dargestellt werden können, sowie ein Werkzeug zur Nutzung des DPZ bereitzustellen. Zusätzlich sollten Ersatzmodelle für die VIBN (virtuelle Inbetriebnahme) als Teil des DPZ, z.B. durch gekoppelte FE-CFD-Simulation von biegeschlaffen Teilen, entwickelt werden.

2. Ablauf des Vorhabens

Der Ablauf des Vorhabens war vor allem im ersten Projektjahr davon geprägt, dass das Projektstarttreffen in Bochum erst im September 2021 stattfand und für die geplanten Entwicklungen bezüglich einer roboterbasierten Fertigung von Elektrolyseuren keine realen, bzw. zukünftigen Elektrolyseure zugrunde gelegt werden konnten. Mit dieser neuen Situation wurde pragmatisch umgegangen. Für die Arbeiten der inpro beschränkten sich die Änderungen darauf, dass für numerische Simulationen geschätzte Werte verwendet wurden und nicht echte Bauteilgrößen und Materialdaten. Insgesamt wurde das Projekt dadurch nicht behindert, sondern es konnten, ausgehend von einem durch die RUB gekauften Elektrolyseur, ein Planungs- und Fertigungskonzept für fertigungsoptimierte Elektrolyseure erstellt werden. Das erfolgreiche Umsetzen der Projektziele erforderte eine intensive Zusammenarbeit zwischen den Projektpartnern, dadurch wurde auch die Praxistauglichkeit der bei inpro erarbeiteten Werkzeuge abgesichert.

3. Wesentliche Ergebnisse

Seitens inpro wurde die Beschreibungssprache für digitale Zwillinge, AutomationML (AML), so prototypisch weiterentwickelt, dass neue Rollenklassenbibliotheken und Attribute zur Verfügung stehen. Damit wurde eine Komponentenbeschreibung entwickelt, die eine Modellierung von Elektrolyseuren und deren Komponenten möglich macht. Diese Erweiterungen der AML-Sprache werden beim AML-Trägerverein eingereicht, so dass sie in Zukunft möglichst der Allgemeinheit zur Verfügung stehen werden. Für die Planung von Komponenten von Elektrolyseuren sowie Fertigungsanlagen wurde ein grafischer DPZ-Editor entwickelt, mit dem alle benötigten Informationen über eine GUI gesammelt werden können und danach als AML-Dokument zur Verfügung stehen. Ebenfalls lassen sich mit diesem DPZ-Editor

Templates für Produktklassen erstellen. Diese Arbeiten unterstützen das Ziel eines durchgehenden Datenaustausches im Gesamtprojekt.

Eine genaue numerische Simulation der Bewegung von flächigen biegeschlaffen Bauteilen, wie Membranen mit Luftkontakt war durch die sich ergebenden numerischen Schwierigkeiten der gekoppelten FE-CFD-Simulation, hier mit dem Programmsystem LS-DYNA, aufgrund der sehr dünnen Membran nicht möglich. Eine Physics-Simulation mit dem Programm BLENDER lieferte glaubwürdige Ergebnisse hinsichtlich der sich ergebenden Deformationen, kann aber die Spannungen im Bauteil nicht bestimmen.

Insgesamt konnten alle geplanten Aufgaben des Teilprojektes erfolgreich bearbeitet werden und somit wesentliche Bausteine für eine beschleunigte VIBN an die Projektpartner geliefert werden.

4. Zusammenarbeit mit anderen (Forschungs-)Einrichtungen

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde die Zusammenarbeit mit den Verbundpartnern in Form regelmäßiger halbjährlicher Projekttreffen sowie mit ebenfalls regelmäßigen Videokonferenzen realisiert.

An den jährlichen H2Giga-Konferenzen wurde seitens inpro durch Zuarbeit zum Verbundkoordinator und Teilnahme (2022, 2023, 2024) sowie Beteiligung an der Präsentation (2023) partizipiert. Ebenfalls wurde an den jährlichen Transfermeetings „Transfermeeting QT 4.2: FertiRob“ teilgenommen.

5. Teil II. Eingehende Darstellung

1. Eingehende Darstellung der durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse

Der vorliegende Sachbericht dokumentiert die Ergebnisse des Teilvorhabens „Simulationsmodelle als Teil des Digitalen Produktzwilling“ des Verbundvorhabens „H2Giga_QT4.2_FertiRob: Fertigung und Robotik“, das vom 01.04.2021 bis 31.03.2025 durchgeführt wurde. Die Projektleitung des Verbundvorhabens lag beim Lehrstuhl für Produktionssysteme der Ruhr-Universität Bochum, inpro war einer von 15 Projektpartnern.

Das Projekt FertiRob

Das Ziel des Verbundvorhabens „FertiRob“ war die Entwicklung von Automatisierungslösungen für verschiedene Teilprobleme bei der Herstellung und Montage von Stacks und Elektrolyseuren. Zentral waren dafür im Projekt die neuen digitalen Entitäten „digitaler Produktzwilling (DPZ)“ und „digitaler Anlagenzwilling (DAZ)“, mit denen alle benötigten Informationen über ein Produkt bzw. eine Anlage vorgehalten und verwaltet werden können, dies wird in Abbildung 1 veranschaulicht. Es sei hier angemerkt, dass auch eine Komponente einer Anlage immer ein (Vor-)Produkt ist.

Zu diesen Informationen gehören nicht nur Informationen zum Hersteller, sondern auch alle Informationen, die im Engineering benötigt werden, wie CAD-Zeichnungen. Im Engineering von Anlagen werden diese aus einzelnen Produkten von Vorlieferanten zusammengebaut, die dann allerdings auch wieder als Komponente bezeichnet werden. Daher können mit dem weiter unten vorgestellten DPZ-Editor ebenso einzelne Komponenten beschrieben werden.

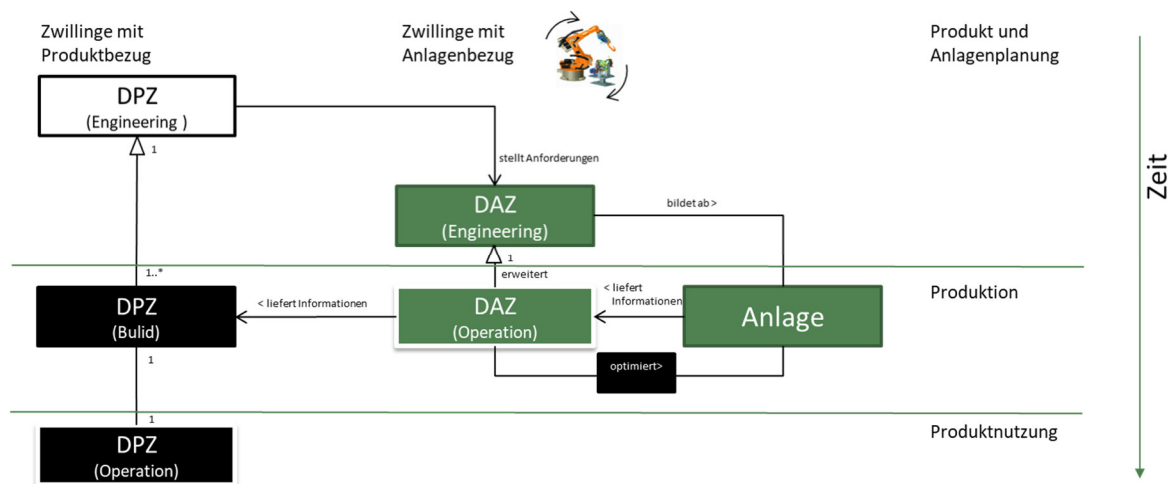


Abbildung 1: Systematik von DPZ und DAZ während Planung und Betrieb einer Anlage

Teilprojekt „Simulationsmodelle als Teil des Digitalen Produktzwilling“

Innerhalb des Verbundvorhabens „FertiRob“ war inpro mit dem Teilprojekt „Simulationsmodelle als Teil des Digitalen Produktzwilling“ für das AP 5 „Digitaler Produktzwilling“ verantwortlich. Weiterhin hat sich inpro an der Bearbeitung von AP 1 „Anforderungen und Geschäftsmodelle“, AP2 „Modularisierung und

Schnittstellen“, AP 6 „Digitaler Anlagenzwilling“, AP 7 „Demonstrator“ und AP 8 „Koordination, Plattformarbeit, Öffentlichkeitsarbeit“ beteiligt. Das Projekt FertiRob beschränkte sich auf das Engineering von Produkt und Fertigungsanlagen, alle anderen Aspekte wurden anderweitig innerhalb des H2GIGA-Leitprojektes zur Entwicklung serieller Produktion von Elektrolyseuren abgebildet.

Digitaler Produktzwilling

Die Entwicklung eines digitalen Produktzwillings (DPZ) war das zentrale Element aller Arbeiten von inpro in diesem Projekt.

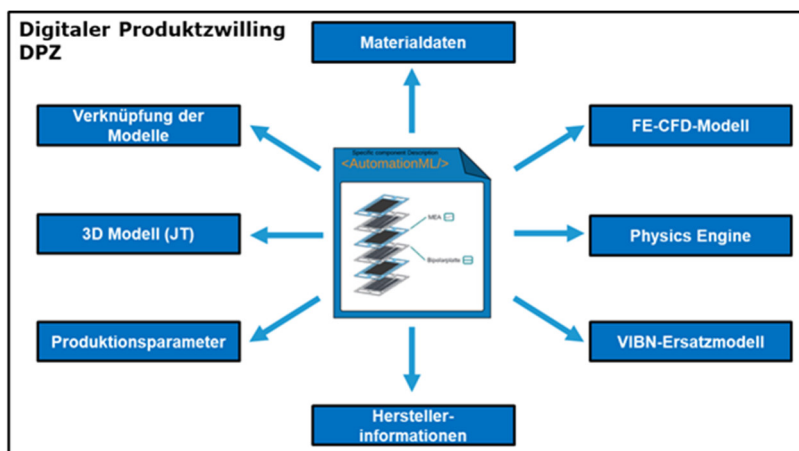


Abbildung 2: Datenzugriff während des Engineerings vor Projektbeginn

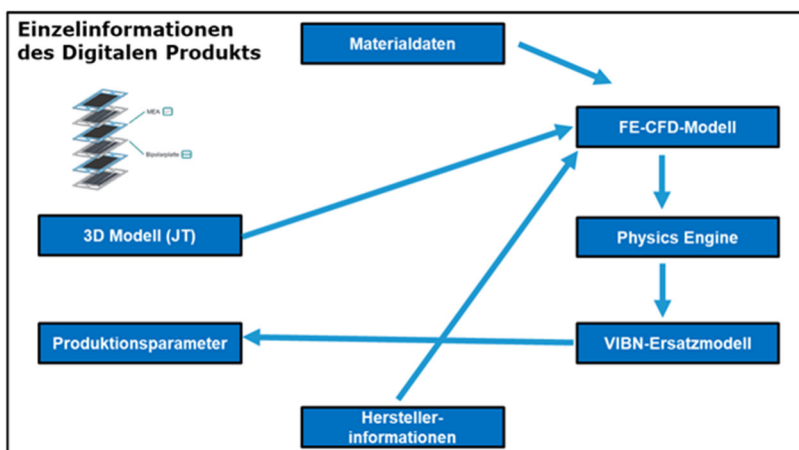


Abbildung 3: Datenzugriff während des Engineerings mit DPZ nach Projektende

Mit Hilfe des digitalen Produktzwillings, der als übergeordnetes Datenobjekt Zugriff auf vorher völlig verstreute Daten, Bilder und andere Informationen eines Produktes oder einer Komponente verschafft, siehe dazu Abbildung 2 und 3, wird die Datenverwaltung und Informationsbeschaffung innerhalb der Konstruktion und Entwicklung von Produkten erheblich vereinfacht. Ebenso können die Daten aus der Produkt-Konstruktion, die für Design und Erstellung einer Fertigungsanlage wichtig sind, mit Hilfe dieser

Daten-Entität einfach übernommen werden und machen so eine doppelte Datenerfassung überflüssig. Der DPZ wird dadurch zur einzigen benötigten Informationsquelle, der Single-Source of Truth.

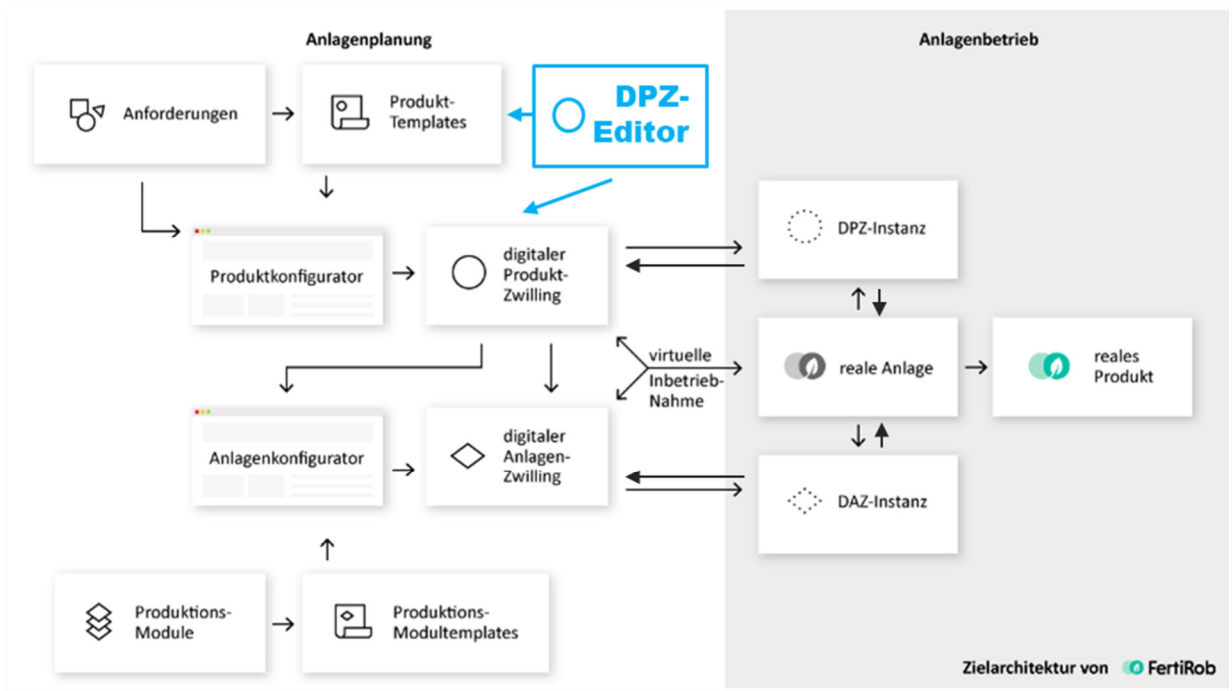


Abbildung 4: Rolle des DPZ-Editors für den digitalen Produktzwilling innerhalb des Projektes

Da ein digitaler Produktzwilling nicht automatisch während des Designs entsteht, wurde bis Ende 2023 innerhalb des Teilprojektes ein prototypischer DPZ-Editor, siehe Abbildung 4, entwickelt, der über eine grafische Oberfläche verfügt und daher sehr einfach in der Bedienung ist. Die Schnittstellen des mit dem DPZ-Editor erzeugten DPZ sind Abbildung 5 zu entnehmen.

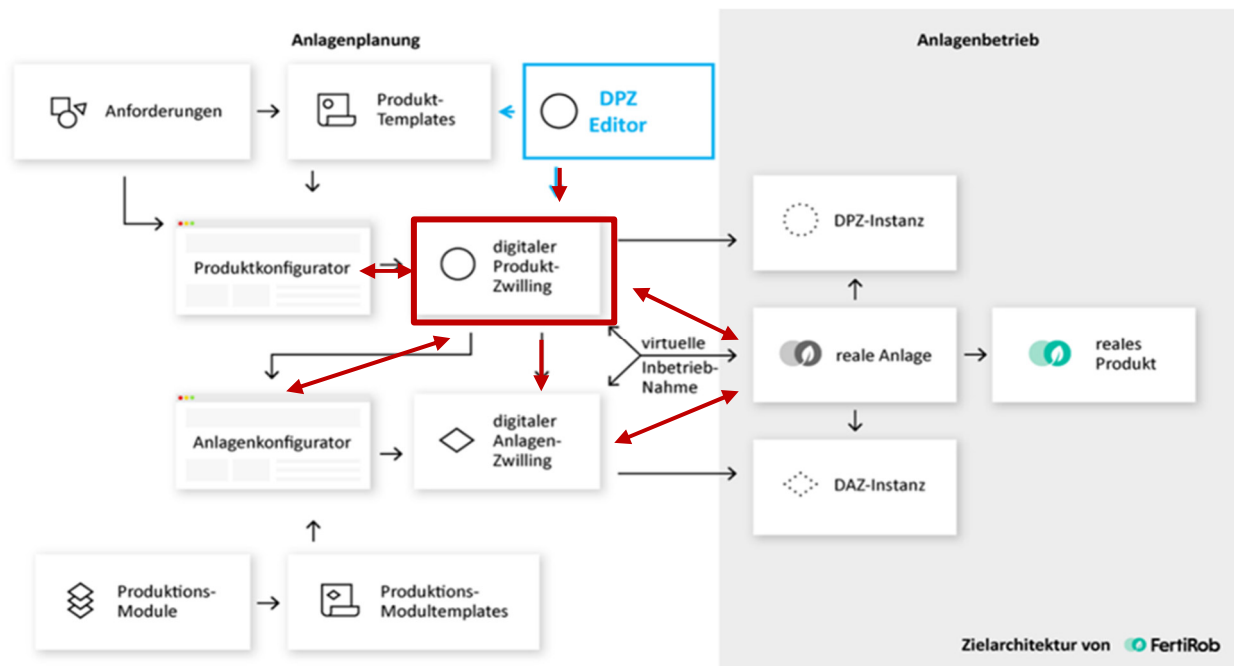


Abbildung 5: Der digitale Produktzwilling im Kontext des FertiRob-Projektes

Um die Ziele einer wesentlich besseren Vernetzung von Informationsquellen und -strömen zu erreichen, wurde innerhalb von AP 1 eine Aufgabenklärung hinsichtlich der Anforderungen an einen DPZ bei dem Entwurf eines Elektrolyseurs und seiner Fertigung vorgenommen. Dazu gehören:

- Sammlung und Beschreibung von möglichen Entwurfsprozessen für technische Systeme (insbesondere Produktionssysteme bzw. produktionsnahe Systeme) und Aggregation generischer Entwurfsszenarien,
- Identifikation relevanter Datenmodelle für den DPZ und ihrer Charakteristika,
- Identifikation relevanter Sichten auf den DPZ, die bei verschiedensten Engineeringaufgaben und Simulationen benötigt werden,
- Identifikation relevanter Simulationstechniken zur Erstellung der Simulationsmodelle für das Produkt,
- Identifikation von Anwendungsfällen für den Informationsaustausch mittels des DPZ, sowie
- Diskussion von Anwendungsfällen und Eigenschaften mit anderen Verbundpartnern.

Die so gesammelten Anforderungen wurden bei der Entwicklung des DPZ-Editors berücksichtigt.

Mit diesem DPZ-Editor können nun nicht nur der zentrale digitale Zwilling erstellt werden, sondern auch Produkttemplates, mit denen dann wiederum ein spezifisches Produkt mit seinem spezifischen DPZ konfiguriert werden kann, siehe Abbildung 5.

Zum Design des hier erstellten DPZ gehörten folgende Aufgaben:

- Analyse und Auswahl bestehender Datenmodelle und Technologien für den Aufbau des DPZ,
- Erweiterung der Strukturen zur Integration von Simulationsmodellen,
- Definition von Schnittstellen des DPZ zum DAZ

Für die Optimierung von Handling und Montage der einzelnen Bauteile eines Elektrolyseurs und insbesondere der Membranen beim Stacking ist es sinnvoll, Finite Elemente Simulationen mit Computational Fluid Dynamics Simulationen gekoppelt (FE-CFD) durchzuführen, um die statischen und

dynamischen Kräfte sowie die aeroelastischen Effekte mit dem Ziel der Vermeidung plastischer Deformationen und Schädigungen der Bauteile bestimmen zu können sowie eine Minimierung von Transport-, Handling- und Montagezeiten zu erreichen. Damit kann dann auch eine Bewertung und Ermittlung von optimierten Greiferpositionen von Robotern und anderen Transporteinrichtungen erfolgen.

Da auch die virtuelle Inbetriebnahme (VIBN) unterstützt werden soll, mit der der Übergang der fertig gebauten Anlage in den produktiven Betrieb erleichtert wird, werden auch Ergebnisse aus dynamischen Simulationen benötigt.

Hierzu gehörten im Teilprojekt folgende Schritte zum Aufbau von Simulationen:

- Auswahl einer Technologie zum Aufbau der Simulationsmodelle des DPZ (Physics Engine, FMU etc.),
- Spezifikation der Architektur der Softwaremodule zur Erzeugung von Ersatzmodellen,
- Implementierung der einzelnen Module im Kontext des DPZ,
- Erzeugen und Testen von Simulationsmodellen für ausgewählte Produkte und
- Definition von Schnittstellen zum DAZ (z. B. Greiferpunkte, Auflageflächen, weitere Parameter etc.).

Zusätzliche Unterziele im Projekt waren:

- Entwicklung des Workflows zur Nutzung der Simulationsmodelle mit dem DPZ,
- Ableitung von Simulationsparametern für die nachgelagerte Simulation,
- Erzeugung von reduzierten Physikmodellen für die VIBN auf Basis von vollständig bedateten FE-CFD-Simulationen,
- Erzeugung von FE-Eingabedatensätzen auf Basis der VIBN-Daten,
- Abstimmung mit Partnern zur Realisierung der Softwaredemonstratorumgebung,
- Modularisierung der Modelle sowie
- SW-Architektur zum Export der DPZ (z. B. als Functional Mock-up Interface (FMI)-Modelle in Kombination mit AutomationML (AML)).

In diesem Projekt stand die Fertigung von Elektrolyseuren im Fokus. Da aber sowohl die Fertigungsanlage eines Elektrolyseurs als auch der Elektrolyseur selbst beides produzierende Anlagen sind, die aus einzelnen Vor-Produkten zusammengesetzt werden, sind auch die im Projekt entwickelten Lösungen nicht nur auf die Fertigung des Elektrolyseurs und seiner Komponenten anwendbar, sondern häufig auch auf die fertigende Anlage.

Darstellung von Produkten und Komponenten als AutomationML (AML)-Struktur

AML ist eine XML-basierte objektorientierte Modellierungssprache für technische Komponenten im Engineering. Mit ihr wird eine vollständige Dokumentation eines Systems möglich, dazu gehören Bilder, Lieferantenadresse, technische Dokumentation etc., siehe Abbildung 6. AML unterscheidet sich damit auch von der Verwaltungsschale (AAS), die zwar auch etwa die Lieferantenadresse oder die Übergabedokumentation umfasst, aber ansonsten mehr auf den Betrieb einer Komponente bzw. Anlage fokussiert.

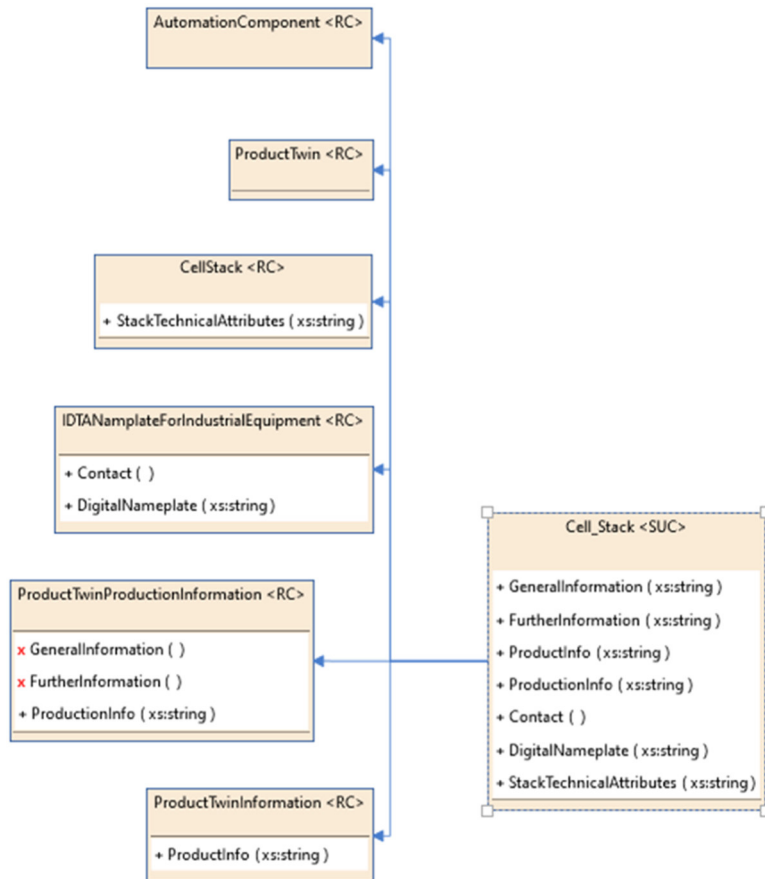


Abbildung 6: Informationsstruktur für einen Cell-Stack

In Abbildung 7 wird ein Teil der Elemente von AML gezeigt, die für die Modellierung einer technischen Komponente benötigt werden. Hier wurden die Sprachelemente erweitert, um eine Modellierung des Elektrolyseurs und insbesondere des Stacks zu ermöglichen. Diese erweiterte prototypische Komponentenbeschreibung für eine zukünftige Version von AutomationML bietet auch die nötigen Schnittstellen zwischen den einzelnen Engineering-Abschnitten. Die erweiterte Komponentenbeschreibung in AML wird im Nachgang zum Projekt dem Trägerverein von AutomationML zur Verfügung gestellt, mit dem Ziel, eine allgemeine Erweiterung und Änderung des Sprachstandards zu erreichen.

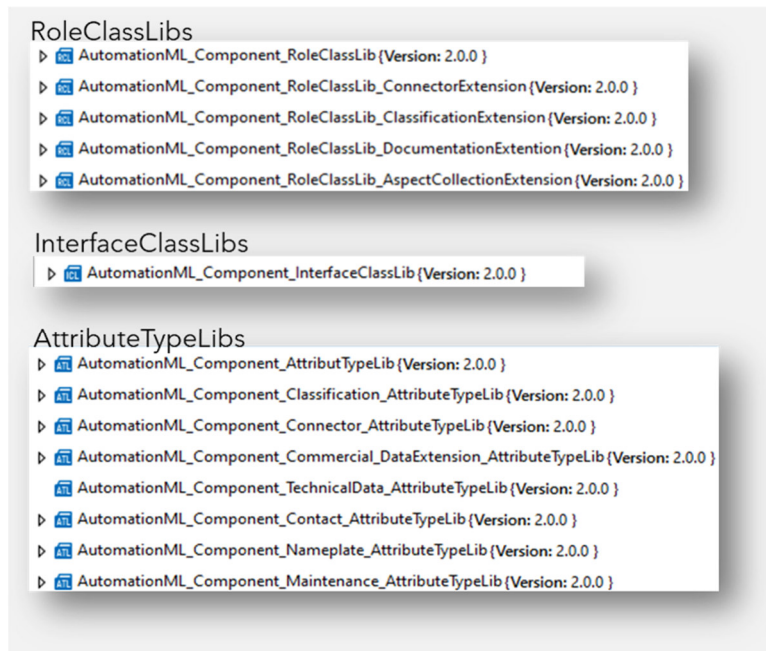


Abbildung 7: Neue, noch prototypische Version der AML-Sprachelemente zur Modellierung von Elektrolyseuren und deren Komponenten, hier zur Unterscheidung vom Standard Version 2.0.0 genannt.

DPZ-Editor

Für die Erstellung eines DPZ mit der hier gewählten Modellierungssprache AutomationML kann zwar über den AML-Verein ein AutomationML-Editor (<https://www.automationml.org/download-archive/>) frei heruntergeladen werden, dieser ist aber nicht hinreichend einfach in der Nutzung und setzt gute Kenntnisse der Sprache voraus. Zusätzlich ist dieser AutomationML-Editor nicht für die Generierung von Komponentenbeschreibungen ausgelegt und eine 3D-Visualisierung ist nicht möglich. Deshalb wurde innerhalb des Projektes ein DPZ-Editor geschaffen, der bislang als Prototyp vorliegt.

Dieser DPZ-Editor wird in Abbildung 8 bis Abbildung 13 mit seiner Bedienung vorgestellt. Das dabei entstandene AML-File zeigt Abbildung 14 in der Ansicht des AutomationML-Editors. Der DPZ-Editor lässt sich nicht nur zum Zusammenstellen von Informationen für ein Produkt oder eine Komponente nutzen, sondern ebenso für die Sichtung der hinterlegten Daten. Dies ist insbesondere dann notwendig, wenn von einem Produkt- oder Anlagenhersteller die bestgeeigneten Komponenten eines anderen Herstellers ausgesucht werden müssen. Dafür kann der DPZ-Editor dann im reinen Betrachtungsmodus genutzt werden.

Zusätzlich können mit dem DPZ-Editor Produkttemplates erstellt werden, die das Ableiten von Varianten wesentlich erleichtern. Im Projekt FertiRob wurde die Entwicklung des DPZ-Editors innerhalb des AP 5 Ende 2023 abgeschlossen, nachdem alle an den DPZ-Editor gestellten Ziele erreicht waren.

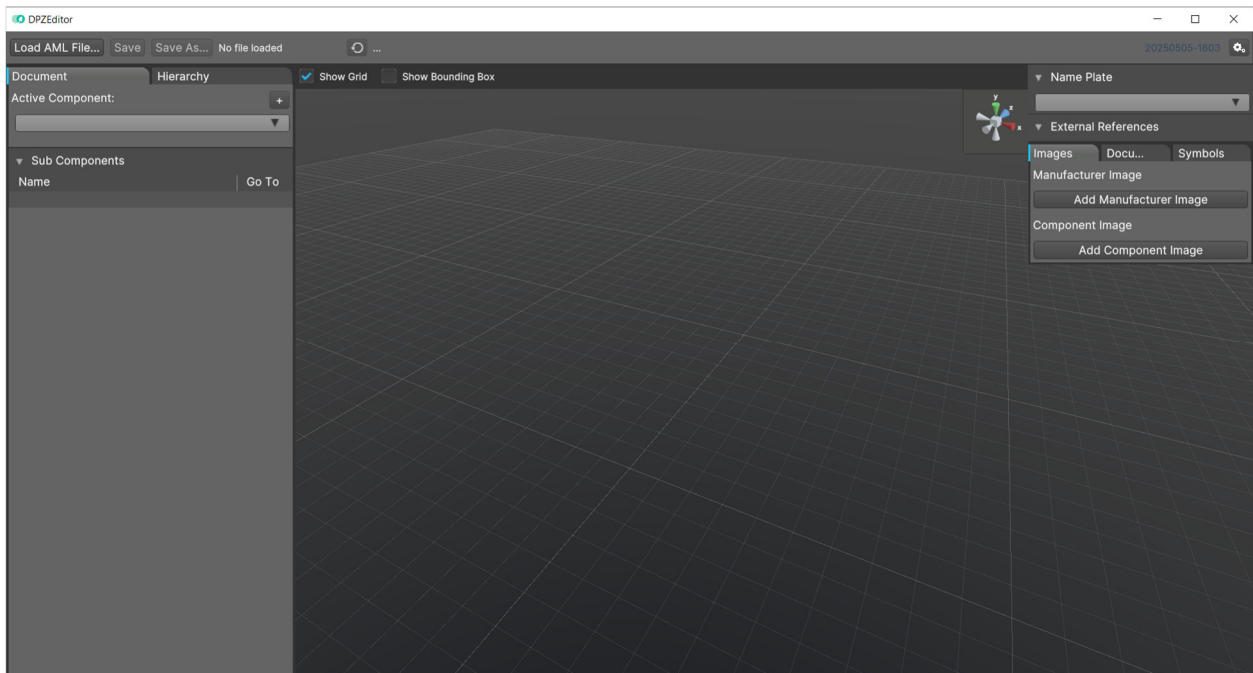


Abbildung 8: Startfenster des DPZ-Editors

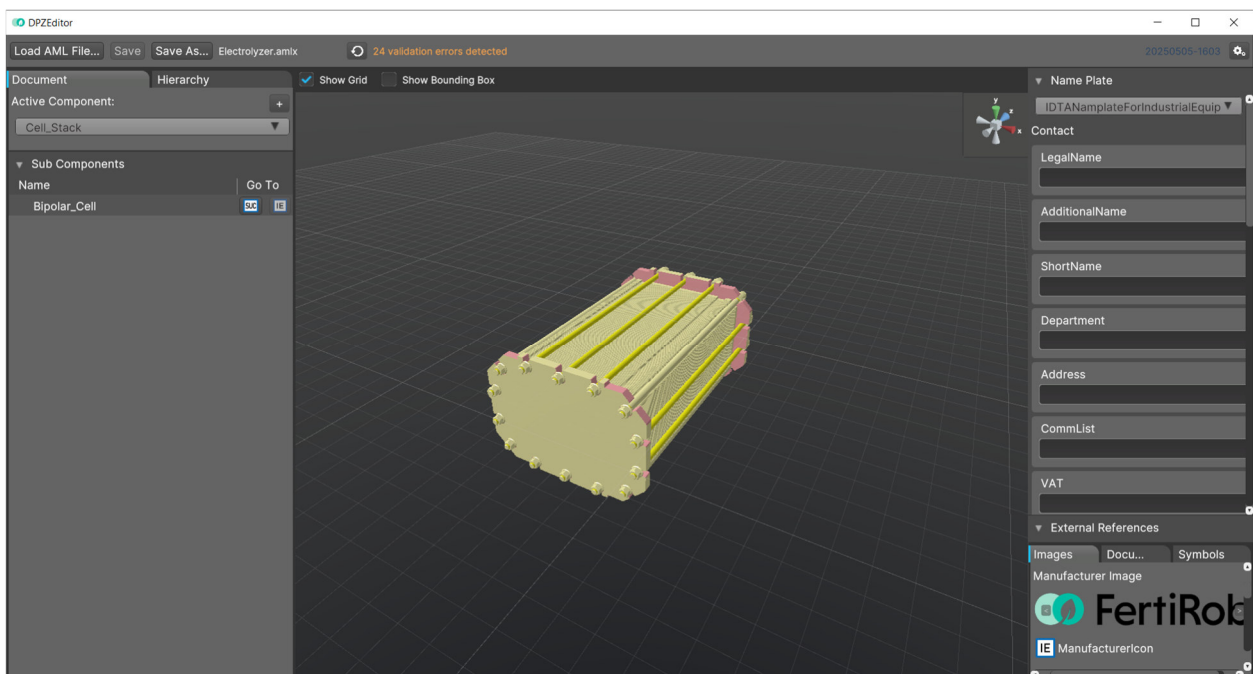


Abbildung 9: Produkt in den DPZ-Editor geladen

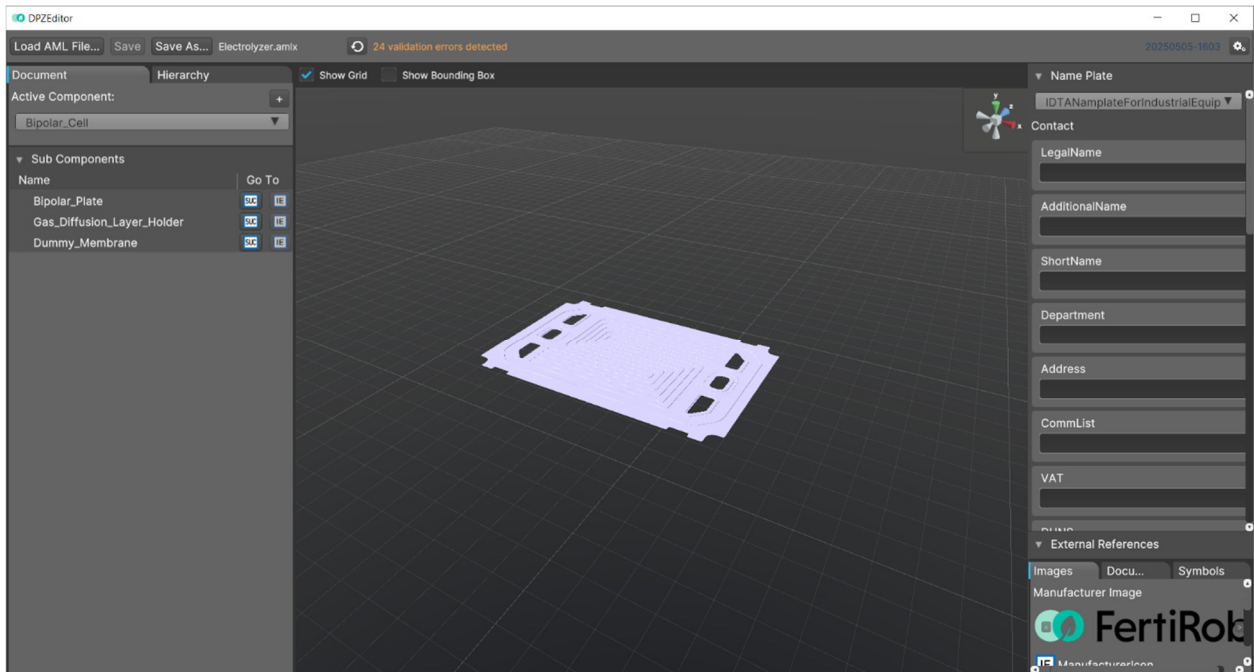


Abbildung 10: Subkomponenten eines Stacks

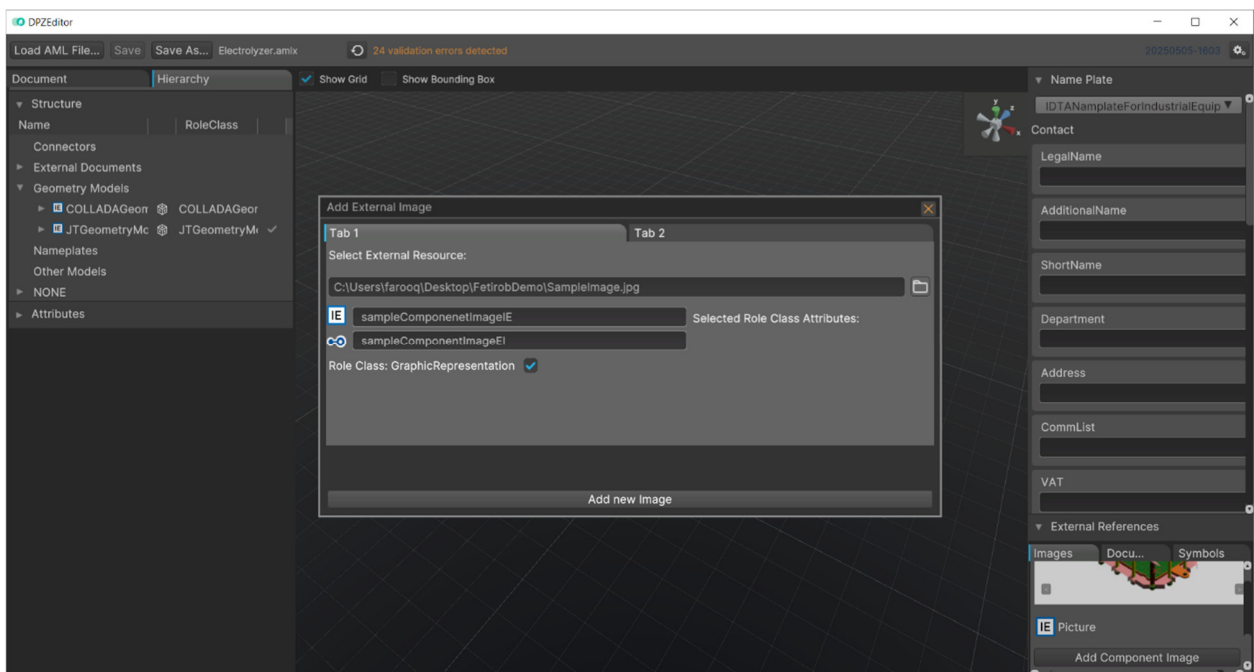


Abbildung 11: Einfügen einer bislang externen Ressource als Internal Element

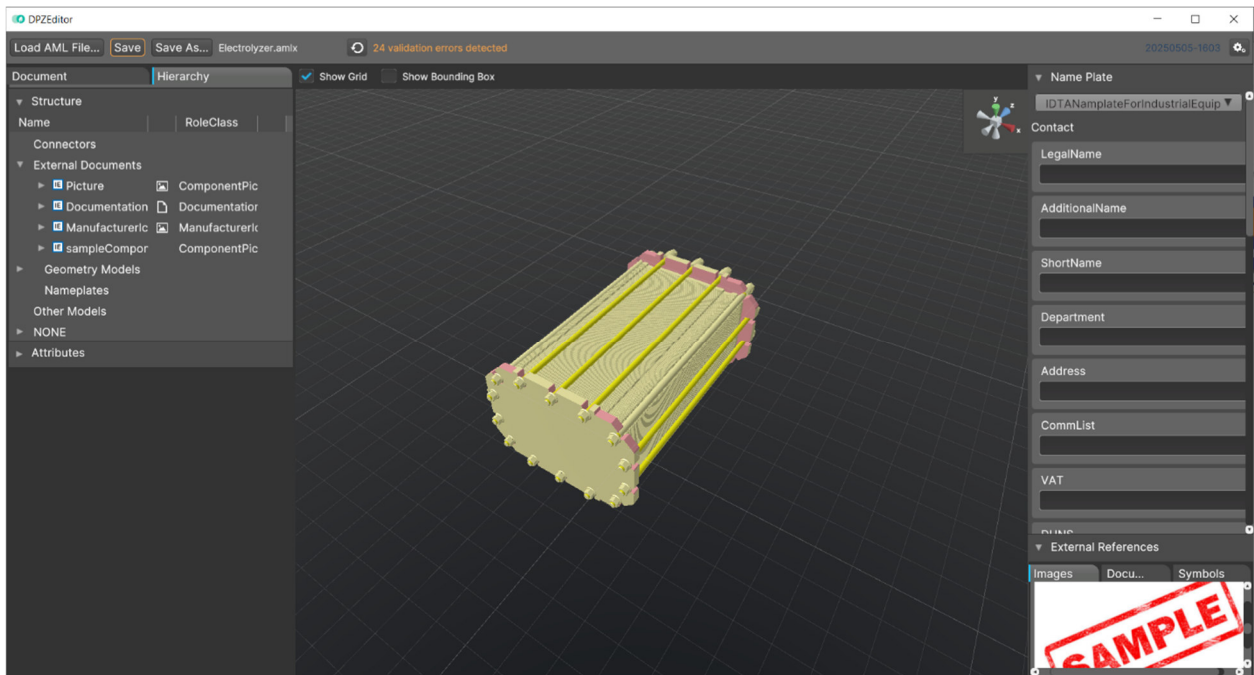


Abbildung 12: Die externe Ressource ist in diesem Fall eine Grafik, daher wird das Grafik-Format als Role Class zugefügt

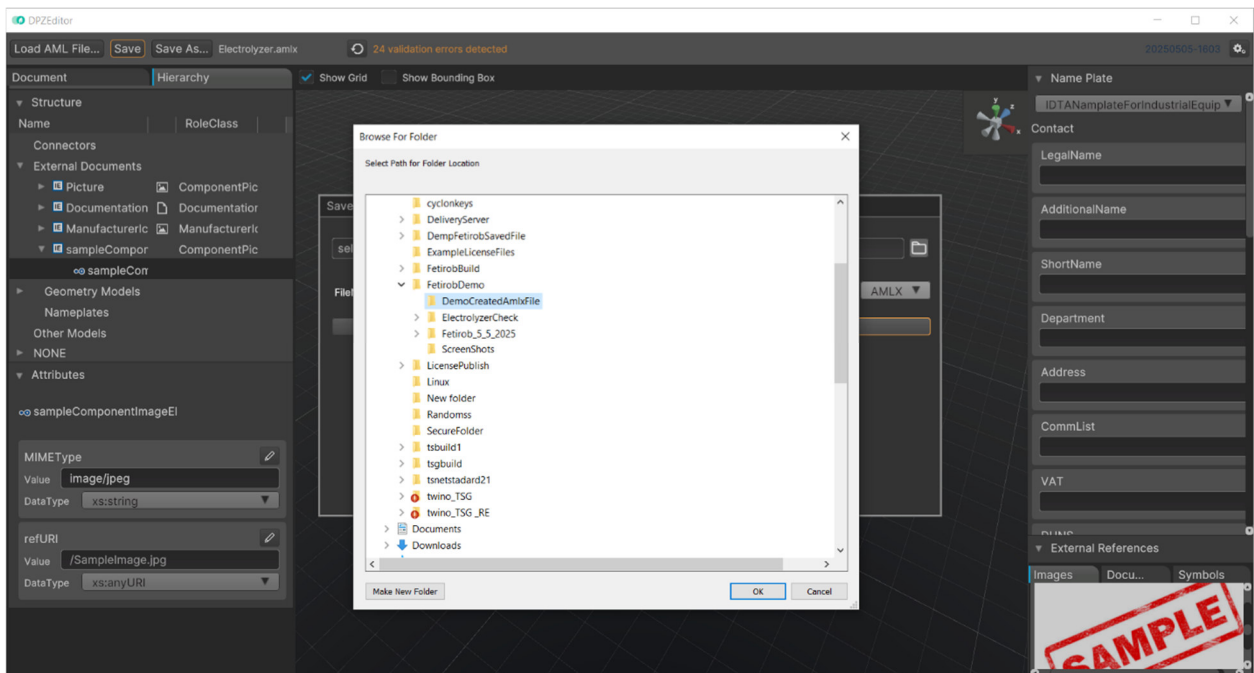


Abbildung 13: Sichern des DPZ

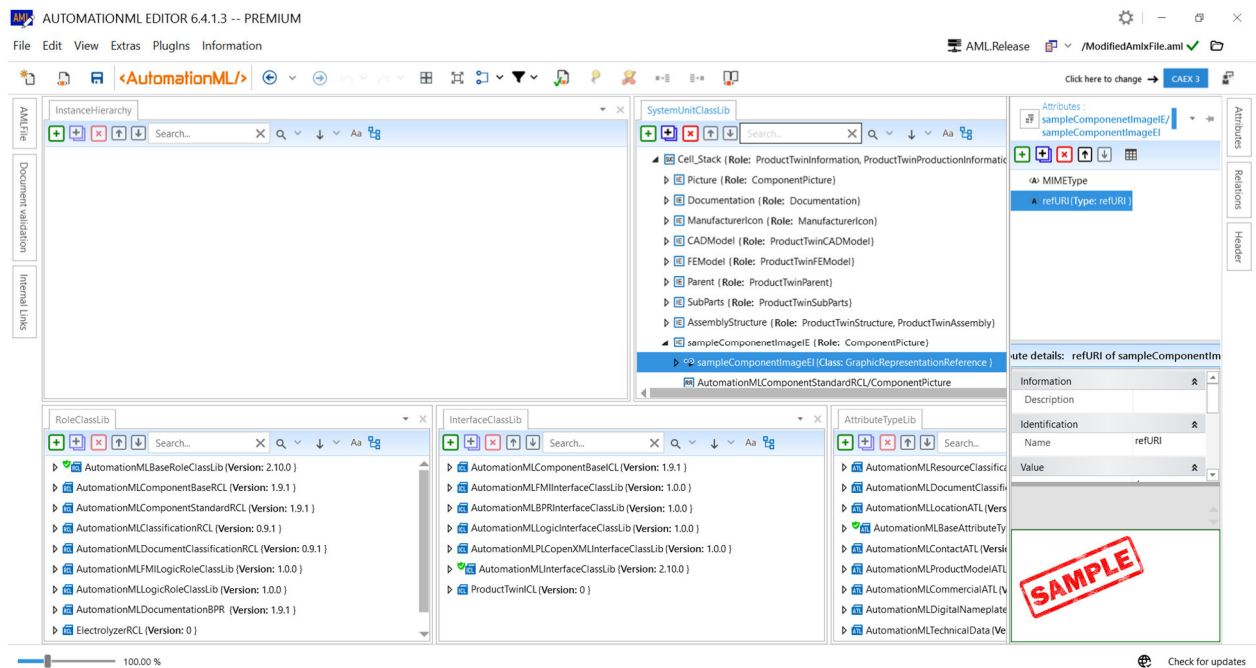


Abbildung 14: Ergebnis im AutomationML-Editor

Arbeiten mit dem DPZ-Editor

Das Arbeitsmodell mit dem DPZ-Editor ist im UML-Diagramm, siehe Abbildung 15 dargestellt. Deutlich wird auch, dass der DPZ-Editor erweitert werden muss, falls er bestimmte Anforderungen, z.B. betreffend der Art der Objekte die sich mit ihm modellieren lassen, nicht erfüllt.

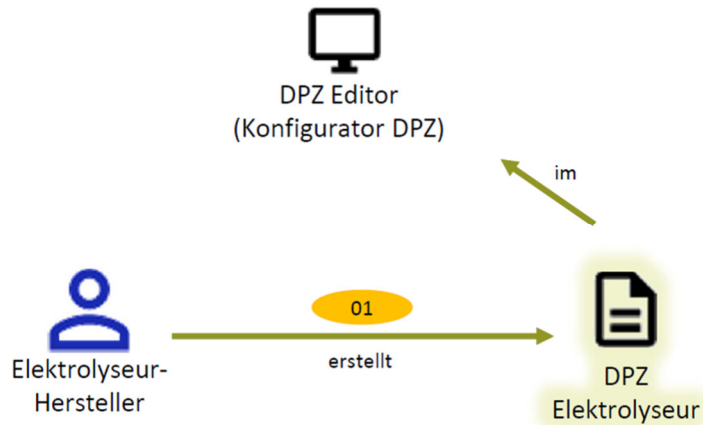


Abbildung 15: Beziehung zwischen Elektrolyseur-Hersteller, dem DPZ des Elektrolyseurs und dem DPZ-Editor als UML-Diagramm

Zusammenhang von DPZ und DAZ

Ein wichtiger Schritt in der Fertigung von Produkten ist der Transport der Bauteile. Dieser Transport wird unter anderem in der VIBN so optimiert, dass sich eine kollisionsfreie, den Zeitaufwand minimierende Bewegung ergibt. Durch diese Transportbewegungen werden allerdings auch Lasten auf die bewegten Bauteile ausgeübt, die im Extremfall zur Zerstörung empfindlicher Komponenten wie z.B. der Membran führen können.

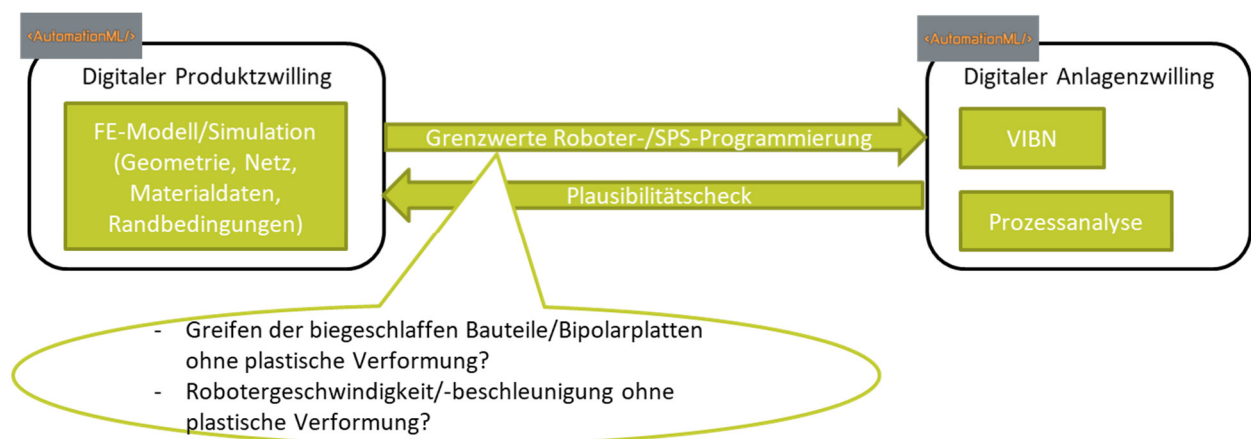


Abbildung 16: Vom DPZ zum DAZ

Um eine ganzheitliche Betrachtung in der VIBN zu ermöglichen, können im DPZ die entsprechenden Berechnungsmodelle (FE, CFD) gespeichert werden und in der VIBN auf Reaktionen auf statische und dynamische Lasten hin ausgewertet werden, siehe Abbildung 16.

So können kritische Deformationen und Spannungen, die im Extremfall zur Zerstörung empfindlicher Komponenten wie z.B. der Membran führen können, vermieden werden. Selbstverständlich können diese Reaktionen auch für verschiedene Beschleunigungen, Geschwindigkeiten, die ein Bauteil während der Produktion erfahren kann, vorab berechnet und beispielsweise tabuliert werden, so dass bei einer Änderung der Anlagen-Betriebsparameter während der VIBN die Reaktionen der Bauteile einfach abgefragt werden können. In Abbildung 17 ist dieses Vorgehen skizziert.

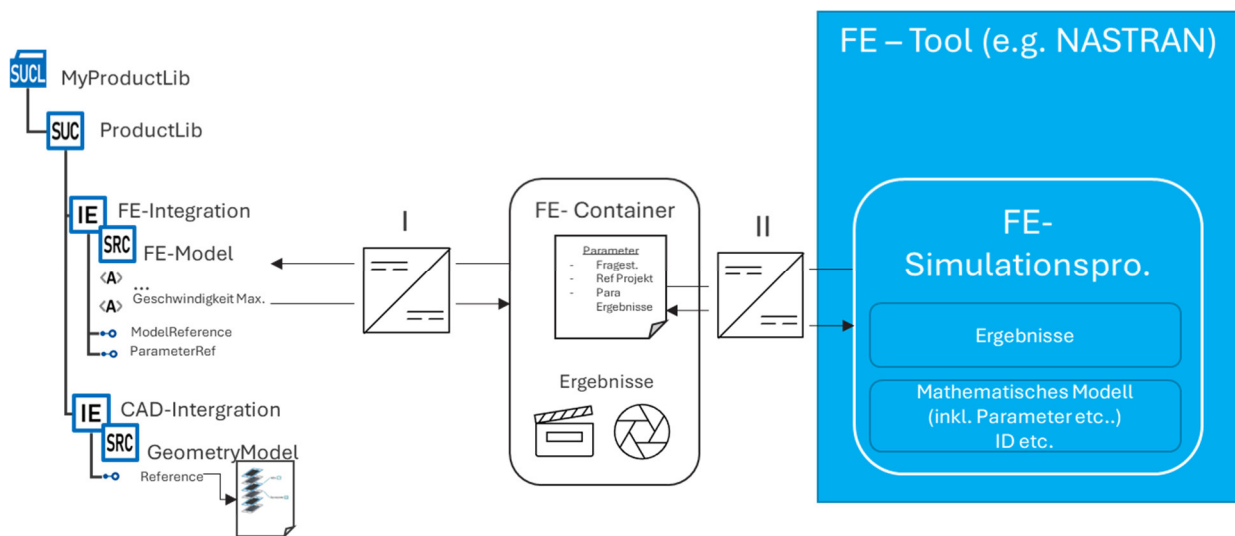


Abbildung 17: Containerisiertes FE-Modell mit Ergebnissen als Bestandteil des DPZ

Integration von Berechnungsmodellen in den DPZ

Wenn eine Anlage aus mehreren Vor-Produkten (Komponenten) zusammengesetzt wird, dann bedeutet das auf der digitalen Ebene, dass ein DAZ erstmal aus mehreren DPZ zusammengestellt wird, bevor noch weitere Informationen, die sich aus dem Zusammenbau ergeben, hinzugefügt werden. Diese Zusammenstellung der Daten für die DAZ wird wesentlich einfacher, wenn die einzelnen DPZ möglichst viele Informationen bereithalten. Für die Membran eines Elektrolyseur-Stacks, die auch ein einzelnes Produkt ist, heißt das, dass die Deformationen, die sie bei einem Transport erfährt, bereits vorab bestimmt und im DPZ gespeichert werden können.

Die Realisierung dieser Unteraufgabe des DPZ wurde auf zwei Wegen durchgeführt. Einerseits wurde eine Kopplung von FE- zu CFD-Modell genutzt, andererseits wurde eine Physics Engine für eine schnellere Berechnung eingesetzt. Bei dem ersteren Verfahren werden jeweils die Rand- und Ausgangsbedingungen des einen Programms in das andere überführt, dann eine Lösung erzeugt und die Ergebnisse wieder als Startpunkte in das erste Programm eingegeben. Anschließend beginnt der neue Zyklus FE->CFD->FE, nunmehr allerdings einen kleinen Zeitschritt weiter, siehe Abbildung 18. Hier wurde dies mit LS-DYNA der Firma ANSYS im Programmstand 2023 realisiert. Der große rosafarbene Bereich deutet die berücksichtigte, mit Luft gefüllte Umgebung, an. Hier soll die Membran auf dem Tisch abgelegt werden. Durch den Luftwiderstand wird die Membran deformiert. Da sie ein sehr empfindliches Bauteil ist, müssen diese Deformationen unterhalb eines vom Hersteller vorgegebenen Grenzwerts bleiben.

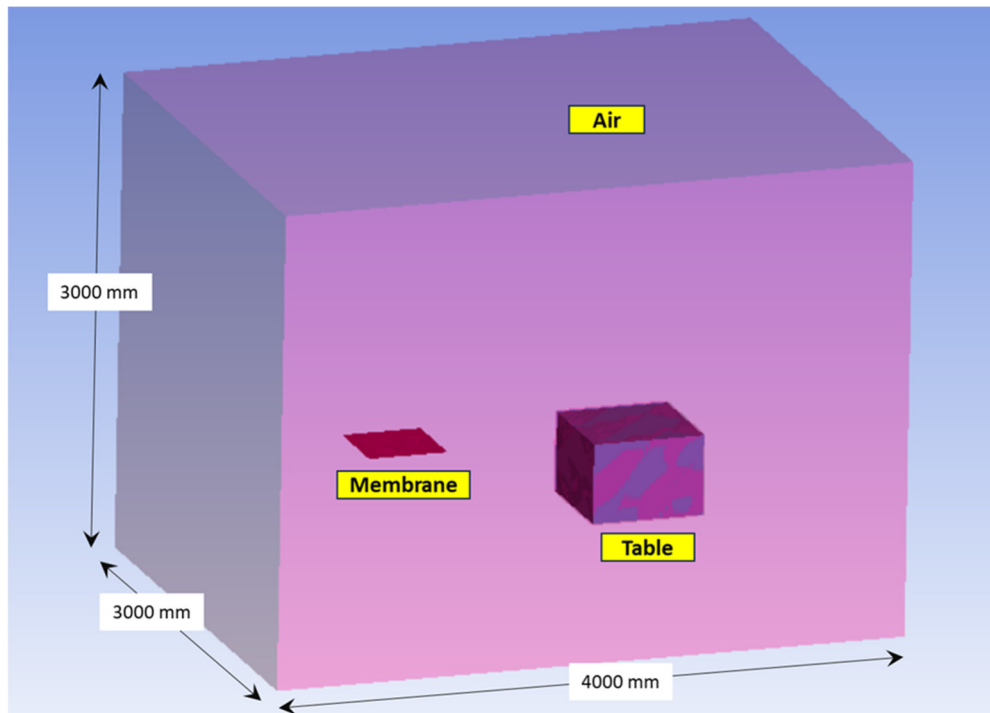


Abbildung 18: Aufbau einer gekoppelten FE-CFD-Simulation, um die Effekte des Luftwiderstands auf das bewegte Bauteil bestimmen zu können

Es zeigte sich, dass die Simulation dieses Transportprozesses einer sehr dünnen Membran, deren Unter- und Oberseite bei LS-DYNA nicht flächengleich elementiert werden müssen, eine sehr feine Elementierung notwendig machte. Dadurch war eine numerische Lösung in einem praktisch nützlichen Zeitraum hier nicht möglich. Prinzipiell allerdings können mit diesem Verfahren die Einflüsse von Transport und Handling auf Bauteile sehr gut erfasst werden.

Eine andere Methode, um zu einer Bestimmung der Deformation während des Handlings zu gelangen, sind Physics Engines. Hier wurde auf das Programm Blender im Programmstand 2024 (Versionen 4.0 und 4.1) zurückgegriffen, das nicht nur kostenfrei installier- und nutzbar ist, sondern auch über weitreichende Simulationsfähigkeiten verfügt. Aufgrund der vereinfachten Berechnung sind Physics Engines zudem sehr schnell, so dass sich bei einer sorgfältigen Parametrierung der Aufgabe mit wenig Rechenzeit ein gut abgeschätztes Ergebnis erhalten lässt. In Abbildung 19 ist das optische Ergebnis dieser Berechnung für eine durch einen Rahmen gehaltene Membran zu sehen. Abbildung 20 zeigt dann das Endergebnis des Transports. Als Nachteil ist zu nennen, dass die Zielanwendungen von Physics Engines nicht numerische Fragestellungen sind und daher weder das verwendete numerische Verfahren noch die Genauigkeitskriterien wirklich transparent sind.

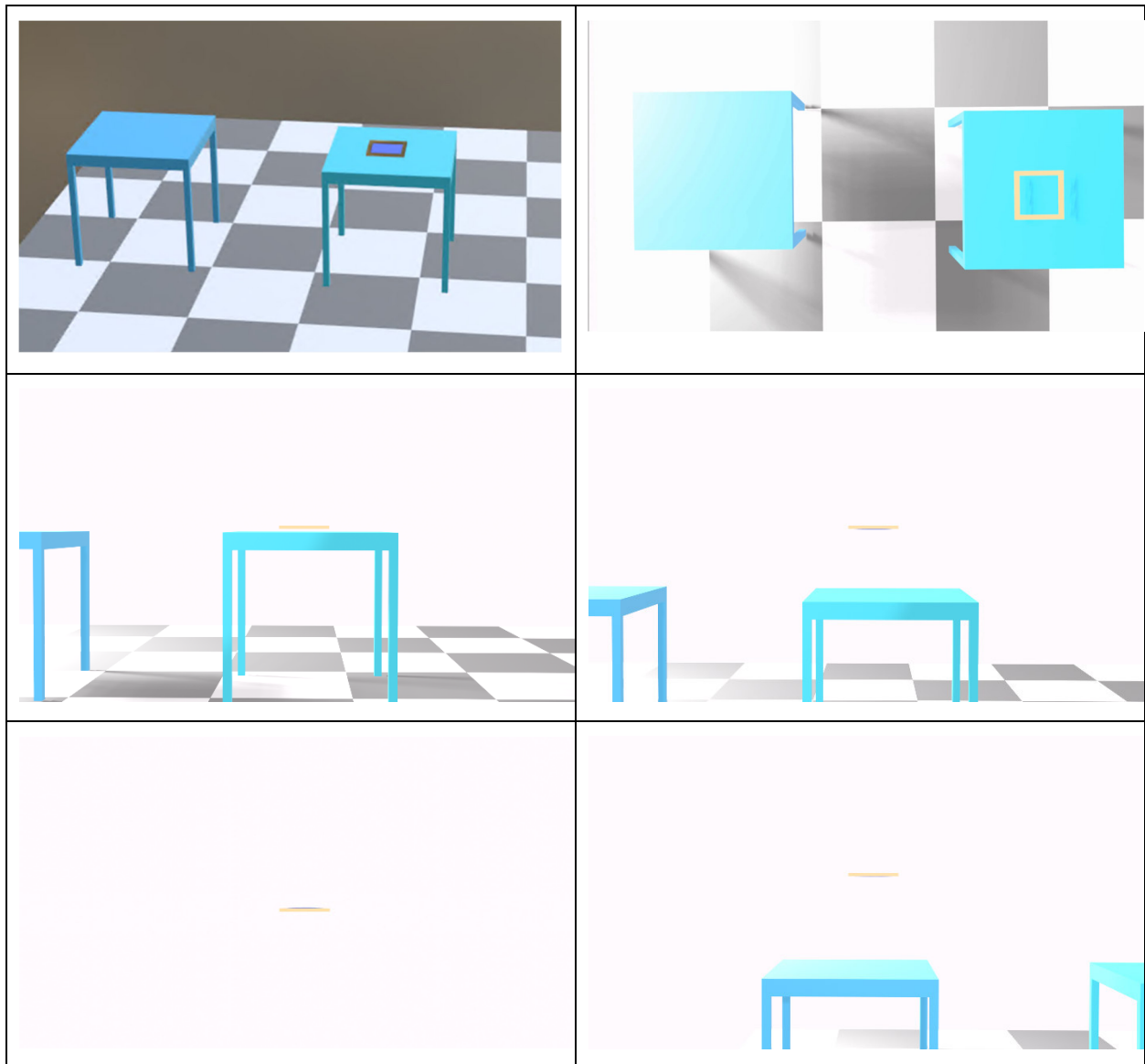


Abbildung 19: Transport einer in einem Rahmen gehaltenen Membran zwischen zwei Tischen, zeilenweise von oben nach unten

Als Resultat dieser Arbeiten stehen modellierte DPZ für ausgewählte Produkte zur Verfügung. Diese beinhalten die FE-CFD-Modelle sowie die Ersatzmodelle für die VIBN, basieren auf einem definierten Datenmodell und sind in der ausgewählten Technologie, hier also AutomationML, realisiert. Weiterhin existieren Softwaremodule zur Erzeugung von Teilmodellen des DPZ sowie zum Aufbau des gesamten DPZ.

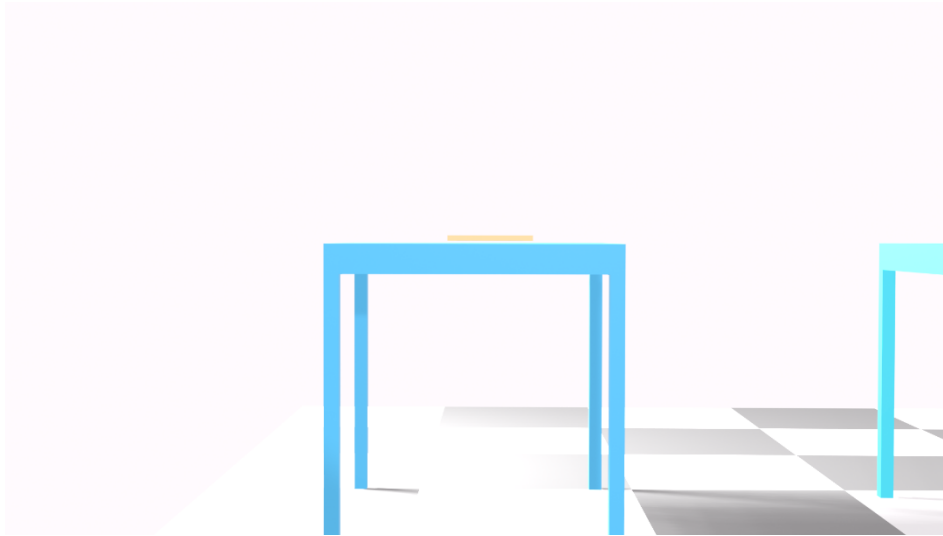


Abbildung 20: Schlusssituation nach Transport der Membran

Alternativ können auch in Produkttemplates bereits Templates für Simulationen abgelegt werden, die dann nur noch mit aktuellen Daten aufgefüllt werden müssen. Für Membranen hieße das, dass die Vernetzung parametrisch erfolgt, also immer gleich ist, nur der Längenmaßstab in Länge, Breite, Dicke wird für eine spezielle Simulation angepasst. In Abbildung 21 wird als Konzept gezeigt, wie so ein Arbeiten mit einem parametrisierten Simulationsmodell aus dem DPZ-Editor heraus aussehen könnte.

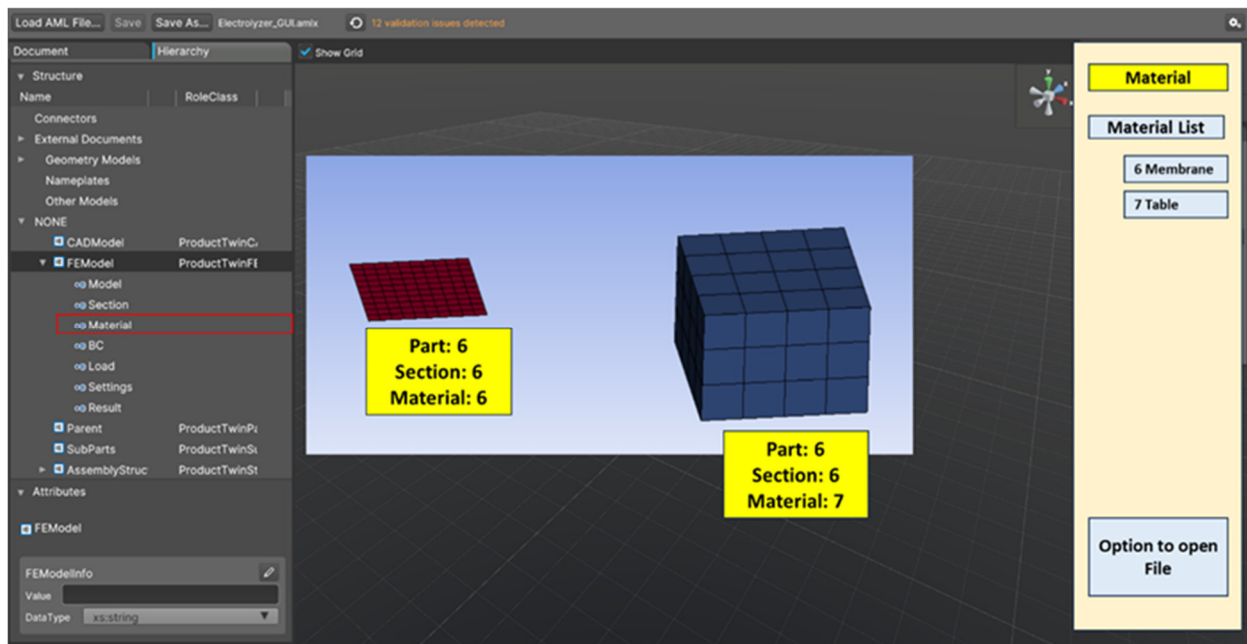


Abbildung 21: Arbeiten mit einem parametrisierten Simulationsmodell aus dem DPZ-Editor heraus.

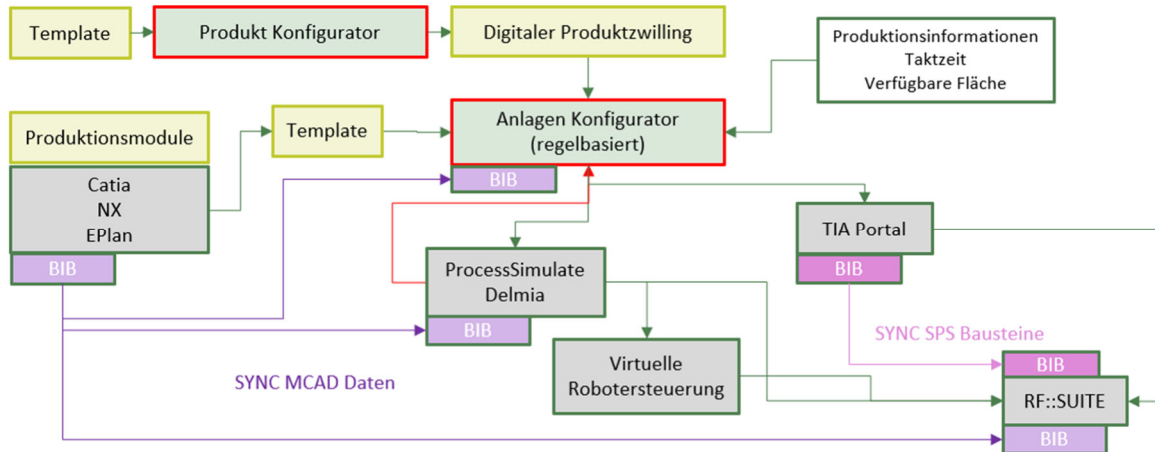


Abbildung 24: Detaillierter Ablauf einer Anlagenrealisierung auf digitaler Ebene aus vielen einzelnen Produkten

Vergleich mit den Zielen des Teilvorhabens

Die im Antrag für dieses Teilvorhaben formulierten Ziele:

- Konzipierung eines Modells für DPZ auf Basis von etablierten Standards,
- Integration von Simulationsmodellen in den DPZ,
- Entwicklung eines Workflows zur Nutzung des DPZ bei der Planung und Konfiguration von Anlagen zur Fertigung von Elektrolyseuren,
- Absicherung der Fertigung durch FE-CFD-Simulation von biegeschlaffen Teilen,
- Entwicklung von Ersatzmodellen für die VIBN als Teil des DPZ,
- Aufbau einer Werkzeugkette zur Nutzung des DPZ,

sind, wie dieser Bericht zeigt, erreicht worden. Nur für das Teilziel der physikalisch genauen, gekoppelten FE-CFD-Simulation biegeschlaffer Bauteile muss gesagt werden, dass hier ein größerer Fortschritt in den vom Software-Anbieter bereitgestellten Programmfunktionen gegenüber bisherigen, vor mehreren Jahren gemachten Erfahrungen, erwartet worden war. Aber auch hierfür konnte eine, wenn auch eingeschränkte, Ersatzlösung gefunden werden.

2. Darstellung der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Der Beginn des Projektes war noch von der Coronazeit geprägt, wodurch die Reisekosten um ca. 1/3 geringer ausfielen als geplant. Auch bestand im ersten Viertel des Projektes ein unerwartet hoher Abstimmungsaufwand zwischen den Partnern des Projektes FertiRob, da sie ohne konkrete Daten über zu fertigende Elektrolyseure einen Entwurf einer Fertigung gestalten mussten. Dieser gesteigerte Abstimmungsaufwand sowie die unerwartet hohen (und deutlich über der Planziffer von 2% der ECB liegenden) Inflationsraten in den Jahren 2021 – 2023 führten zu ca. 20% höheren Personalkosten

gegenüber der Planung. Der Personalaufwand im Projekt wurde zusätzlich durch Personalwechsel auf allen Positionen der Projektmitarbeiter erhöht.

3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

In dem Verbundprojekt wurden Synergieeffekte zwischen der anwendungsorientierten Expertise der Industriepartner und den wissenschaftlich-methodischen Kompetenzen der Forschungsinstitute produktiv genutzt, so dass die geleisteten Aufwände zu sehr guten Ergebnissen führten. Die geleistete Arbeit entspricht in vollem Umfang der Vorhabenbeschreibung und war daher für die Durchführung des Projektes notwendig und angemessen. Insgesamt waren die durchgeführten Arbeiten zur Erreichung der einzelnen Ziele innerhalb der Arbeitspakete wie auch zur Erreichung der übergeordneten Ziele des Forschungsprojektes erforderlich.

Das Hauptziel des Forschungsvorhabens war es, die Informationsflüsse, die für die Planung von Produkt und Produktion notwendig sind, so neuzugestalten, dass die Datenintegrität und Datenvollständigkeit vereinfacht abgesichert werden können. Die dafür geschaffenen Entitäten DPZ und DAZ helfen entscheidend, die Voraussetzungen für eine mit Robotern hochautomatisierte Fertigung von Elektrolyseuren vorzubereiten. Diese digitalen Werkzeuge sind für eine durchgehende, digitale und fehlerarme Planung notwendig und unterstützen die virtuelle Inbetriebnahme. Vor Beginn des Projektes waren sie jeweils noch in verschiedenen Konzeptstadien und mit Hilfe der Förderung für dieses Projekt konnten die digitalen Zwillinge DPZ und DAZ weiter definiert und ausgestaltet werden, was aufgrund des hohen finanziellen Risikos sonst nicht stattgefunden hätte.

4. Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit des Ergebnisses – auch konkrete Planungen für die nähere Zukunft - im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

inpro ist eine der führenden Institutionen in der Software-Entwicklung von Prozesskettenmodellierungen für Fertigungsverfahren insbesondere im Automobilbau. Die Basis dafür bilden u. a. proprietäre Programme zur Übertragung von Simulationsergebnissen zwischen verschiedenen Simulationsprogrammen. Mit Hilfe von DPZ und DAZ können nun diese Informationen wesentlich besser zusammengestellt und mit einer Modellierungssprache wie AML auch einheitlich modelliert werden. So können sie auch in weiteren Arbeitsschritten zur Verfügung gestellt werden. Damit sind auch die in diesem Projekt entwickelten Technologien für eine durchgehende digitale Planung von Fertigungsanlagen für Elektrolyseure in verschiedenen Industrien anwendbar.

So kann der von inpro entwickelte DPZ-Editor für die Planung und Dokumentation verschiedenster Produkte unterschiedlicher Branchen genutzt werden. Dies ermöglicht inpro weitere Märkte, unabhängig der Automobilbranche, zu erreichen. Auch sind Gespräche mit dem AutomationML e.V. geplant bzgl. einer gemeinsamen Vermarktung des DPZ-Editors. Zusätzlich wird seit 2024 in dem Projekt „Digitale Anlagenmodellierung mit neutralen Datenformaten (DIAMOND)“, Teilvorhaben „Komponenten-Beschreibungen“⁴⁴, gefördert vom BMWK unter dem Förderkennzeichen 13IK011I, der DPZ-Editor auf der Basis der in diesem Projekt entwickelten Ergebnisse wesentlich erweitert, z.B. um einen Konverter und Export zur Verwaltungsschale (Asset Administration Shell mit dem Datenformat AASX).

Das gleiche gilt für die hier verwendete und erweiterte Beschreibungssprache AutomationML. Die Umsetzungsszenarien sind hier eher mittel- bis langfristig und auch abhängig von der Produkt- und Produktionsplanung der Kunden. Die Verwertung der Projektergebnisse durch inpro ist abgesehen vom DPZ-Editor, der zu einem Produkt weiterentwickelt werden könnte, wesentlich im Consulting für das

Engineering bei der Einführung von DPZ, DAZ und der Nutzung verbundener Technologien wie AML zu sehen. Hierfür sind Abstimmungen mit Partnern in der Automobilindustrie geplant.

5. Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Keine.

Während der Bearbeitung des geförderten Projektes hat inpro abgesichert, dass an anderen Stellen keine parallelen Entwicklungen stattfinden. inpro hat während der Projektarbeit insbesondere die Weiterentwicklung der Modellierungssprache AutomationML beobachtet, um konkurrierende Entwicklungen zu vermeiden

Liste der erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr. 5 der NKBF/NABF

Datum	Art der Veröffentlichung	Titel, Quelle/Zitat (Journal, Konferenz)	Autoren	Link
21.09.2023	Vortrag	QT 4.2 FertiRob Fertigung und Robotik, 2. Statuskonferenz: H2 Giga	B. Kuhlenkötter; R. Egel; L. Hundt	