



Digital Twin: Spitzenleistung in der Produktion durch virtuelle Fabriknachbildung

Das folgende White Paper stellt den Begriff des „Digital Twins“ vor, eines virtuellen Ebenbilds des tatsächlich gefertigten Produkts. Durch den Vergleich des Digital Twins mit den Konstruktionsvorgaben lassen sich Abweichungen zwischen dem realen und dem gewünschten Ergebnis leichter erkennen, wodurch Design und Umsetzung enger aufeinander abgestimmt werden.

Ein White Paper von Dr. Michael Grieves

Einleitung

Die Idee eines virtuellen, digitalen Ebenbilds eines physischen Produkts, also des Digital Twins, wurde 2003 erstmals in meinem Führungskräfte-Kurs über Product Lifecycle Management (PLM) an der University of Michigan vorgestellt. Damals waren digitale Abbildungen realer physischer Produkte noch relativ neu und unausgereift. Außerdem lagen nur begrenzte Angaben über das physische, tatsächlich gefertigte Produkt vor; diese wurden manuell und zumeist beleggebunden erfasst.

Im darauffolgenden Jahrzehnt entwickelte sich die Informationstechnologie zur Erstellung und Aktualisierung des virtuellen Produkts sowie der Konstruktion und Herstellung des physischen Erzeugnisses rasant weiter.

Virtuelle Produkte sind detailgetreue Abbildungen von Erzeugnissen, die sich von ihren physischen Gegenständen fast nicht unterscheiden. Der verstärkte Einsatz von Manufacturing-Execution-Systemen in der Produktion hat dazu geführt, dass große Mengen an Daten über die Herstellung und die Form physischer Produkte erfasst und gespeichert werden. Zudem werden diese Daten nicht mehr manuell und beleggebunden, sondern digital erhoben, und zwar mit Hilfe vielfältiger physikalischer zerstörungsfreier Messtechnologien wie Sensoren, (Koordinaten-) Messgeräten, Laser, Bildverarbeitungssystemen und Weißlichtscannern.

Angesichts dieser Fortschritte erscheint es nun angebracht, zu untersuchen, wie sich der Digital Twin von einem interessanten und möglicherweise nützlichen Gedanken- spiel, das zu einem besseren Verständnis

der Beziehung zwischen einem physischen Erzeugnis und den zugrundeliegenden Informationen beiträgt, zu dem fehlenden Glied in der Kette eines unternehmensweiten, lückenlosen Produktlebenszyklus weiterentwickeln kann. Hierdurch lassen sich sowohl Kosten senken als auch die Herstellung innovativer hochwertiger Produkte fördern.¹

Grundkonzept des Digital Twins

Das Grundkonzept des Digital Twins ist in *Abbildung 1* dargestellt. Es besteht aus drei Hauptbestandteilen: a) physischen Produkten in der realen Welt, b) virtuellen Produkten in der virtuellen Welt und c) Daten und Informationen als Bindeglied zwischen den virtuellen und realen Produkten.

Seit der Entstehung dieses Modells vor zehn Jahren ist die Menge, Detailgenauigkeit und Zuverlässigkeit der Informationen über physische wie auch virtuelle Produkte enorm gestiegen.

Auf der virtuellen Seite ist zum einen die Menge der verfügbaren Angaben gewachsen. Zum anderen kamen zahlreiche Verhaltensmerkmale hinzu, sodass das Produkt nicht nur visualisiert, sondern auch auf seine Leistungsfähigkeit hin getestet werden kann.

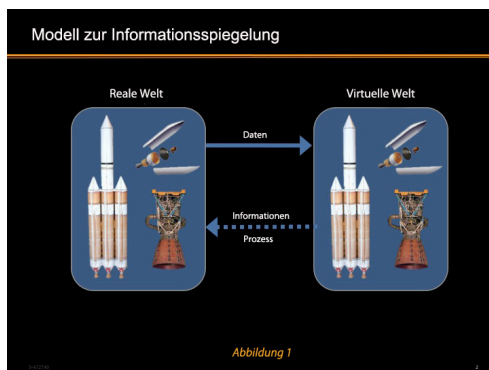
¹ Dieses White Paper befasst sich zwar vor allem mit der Produktionsphase, doch die Verwendung des Digital Twins erstreckt sich über den gesamten Produktlebenszyklus. Somit liefert er dem Hersteller tatsächliche Leistungskennziffern. Diese weiter gefasste Verwendung wird in *Virtually Perfect: Driving Innovative and Lean Products through Product Lifecycle Management* erläutert.

Ebenso ist es möglich, vereinfachte Versionen des virtuellen Modells zu erstellen. Dies beschränkt sich dann etwa auf die geometrische Form und die benötigten Eigenschaften und Attribute, wohingegen unnötige Details außer Acht gelassen werden. Hierdurch wird die Größe der Modelle erheblich verringert, wodurch sich die Verarbeitung beschleunigt.

Anhand solcher vereinfachten Modelle können moderne Simulationsprodukte komplexe Systeme sowie Systeme von Systemen visualisieren und simulieren, einschließlich ihres physischen Verhaltens, und zwar in Echtzeit und bei vertretbaren IT-Kosten.

Auch der Aufwand für die elektronische Übertragung wird durch vereinfachte Modelle erheblich verringert. Somit können sie nicht nur innerhalb des Unternehmens, sondern sogar innerhalb des Zuliefernetzwerks verbreitet werden. Dies erleichtert die Zusammenarbeit und sorgt für ein besseres und schnelleres Verständnis von Produktinformationen und Änderungen.

Ebenso kann die Fertigungsumgebung des jeweiligen Produkts simuliert werden, einschließlich der automatischen oder manuellen Abläufe des Produktionsprozesses wie Montage, robotergestütztes Schweißen, Formen oder Fräsen.



Auf der physischen Seite werden heutzutage immer mehr Informationen über die Merkmale des realen Produkts erfasst. Hierzu zählen physikalische Messgrößen von automatischen Qualitätsüberwachungsstationen wie Koordinatenmessgeräten. Ebenso liefern die Maschinen, mit denen die Erzeugnisse bearbeitet werden, Informationen. Es ist also genau bekannt, welche Tätigkeiten in welcher Geschwindigkeit und welcher Stärke durchgeführt wurden. So wird etwa das Drehmoment jedes Bolzens, mit dem eine Kraftstoffpumpe an einen Motor angebracht wird, erfasst, um zu gewährleisten, dass die Befestigung aller Kraftstoffpumpen ordnungsgemäß durchgeführt wird.

Modelle mit längerer Lebensdauer – die Brücke zwischen der virtuellen und der realen Welt

Wenngleich die Menge und Qualität der Informationen über das virtuelle und physische Produkt im vergangenen Jahrzehnt sprunghaft angestiegen ist, hinkt die wechselseitige Verbindung zwischen beiden Welten deutlich hinterher.

Globale Produktionsunternehmen arbeiten heute entweder mit dem physischen oder dem virtuellen Produkt. Da die Verbindung zwischen den beiden Produkten fehlt, ist es nicht möglich, beide gleichzeitig heranzuziehen.

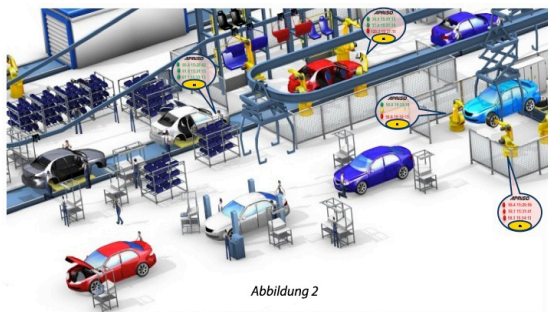
Üblicherweise wird zunächst ein vollständig beschriebenes 3D-Modell erstellt. Anschließend wird ein Herstellungsprozess zur Umsetzung dieses Modells erarbeitet, der auf einer Bill of Process (BOP) und einer Manufacturing Bill of Materials (MBOM) beruht. Fortschrittlichere Produktionsunternehmen

simulieren den Herstellungsprozess anschließend digital.

An dieser Stelle werden BOP und MBOM jedoch einfach auf die Fertigung übertragen, während die virtuellen Modelle außer Acht gelassen werden. Oftmals wird sogar ein Rückschritt vollzogen, indem die Produktionsmitarbeiter lediglich zwei-dimensionale Pläne erhalten.

Manche Hersteller arbeiten zwar mittels Terminals, die in den Arbeitszellen stationiert sind, mit 3D-Modellen in der Produktion. Doch selbst hier liegt keine wahre Integration und Verbindung zwischen dem virtuellen Modell und dem aktuell bearbeiteten physischen Erzeugnis vor. Das Modell auf dem Terminal dient lediglich als Vorlage, doch die Umsetzung des virtuellen Modells in ein tatsächliches Produkt muss ad hoc von einem Mitarbeiter vorgenommen werden.

Wie *Abbildung 2* zeigt, könnte ein 3D-Modell aber nicht nur auf dem Bildschirm erscheinen, sondern sogar die tatsächlichen Abmessungen des physischen Produkts enthalten. Diese Angaben könnten dann beim virtuellen Produkt eingeblendet werden und auf Abweichungen hinweisen, die eine Überprüfung erfordern.



Eine solche Simultanansicht und der Abgleich zwischen realem und virtuellem Produkt bringt zahlreiche Vorteile mit sich, insbesondere in der Fertigungsphase.

Voraussetzungen für Digital Twins

Um einen solchen Nutzen erzielen zu können, böte sich etwa ein einheitliches Repository als Bindeglied zwischen virtuellem und physischem Produkt an.

Dieses Repository würde sowohl durch die virtuellen Entwicklungs- als auch die physischen Datenerfassungswerkzeuge gespeist. So entsteht eine wechselseitige Verbindung zwischen dem virtuellen und dem physischen Produkt.

Seitens des virtuellen Tools würden während der Design- und Konstruktionsphase Vorgaben wie Abmessungen, Toleranzen, erforderliches Drehmoment, Härtemessungen usw. festgelegt und im virtuellen Modell ausgewiesen. Diese Kennzeichnung dient als Platzhalter für die tatsächlichen Werte, enthielte aber auch die Soll-Vorgaben.

Sobald das Design für die Produktion freigegeben wird, könnten die Kennzeichnungen aus dem virtuellen Produktmodell ausgelesen und in das einheitliche Repository übernommen werden. Ebenso würde ein vereinfachtes Modell mit den Vorgaben sowie den geometrischen Angaben erstellt.

Auf der physischen Seite würden diese Vorgaben im MES und bei der Erstellung der Prozessliste (Bill of Process) im jeweiligen Prozessschritt berücksichtigt. Nach Abschluss der Produktionsprozesse würde das MES die erfassten Werte an das einheitliche Repository übermitteln.

Schließlich würden diese Angaben wieder in die Fabriksimulation übernommen. Hierdurch dient diese der Nachbildung der Fabrik. Anstatt zu simulieren, was in der Fabrik vonstattengehen *sollte*, würde also

vielmehr dargestellt, was bei jedem Schritt mit jedem einzelnen Produkt tatsächlich geschieht.

Die Anwendung zur Fabriknachbildung stünde in ständigem Austausch mit dem einheitlichen Repository und erhielte so stets die neuesten Daten aus der tatsächlichen Produktion.

Anwender könnten also (nahezu) in Echtzeit ersehen, was sich in der Produktion wirklich abspielt, und die Merkmale der Produkte, die die Arbeitsstationen durchlaufen, erkennen.

Eine solche Funktion kann vielerlei praktische Anwendung finden.

Anwendungsmöglichkeiten für Digital Twins

Digital Twins unterstützen einige der wichtigsten Strategien des menschlichen Denkens und Wissenserwerbs, nämlich Konzeptbildung, Vergleich und Zusammenarbeit. Miteinander kombiniert bringen sie wiederum neue Problemlösungen und Innovation hervor.

Konzeptbildung

Im Gegensatz zu Computern verarbeiten Menschen Informationen nicht, zumindest nicht schrittweise der Reihe nach. Vielmehr erfassen sie einen Sachverhalt und machen sich eine Vorstellung des Problems und seines Zusammenhangs.

Dabei werden alle Angaben über den Sachverhalt, an denen sie interessiert sind, aufgenommen. Dann wird die Situation konzeptualisiert und aus verschiedenen Blickwinkeln betrachtet. Dies kann zwar durch das Studieren von Tabellen, Zahlen, Berichten und sonstigen Informationen erfolgen, doch der wichtigste Aufnahme-

kanal mit der größten Bandbreite ist die visuelle Wahrnehmung.

Derzeit nehmen Menschen visuelle Informationen auf, pressen sie in vereinfachte Zeichen wie Buchstaben und Zahlen und bilden daraus wiederum eine bildliche Vorstellung. Hierbei gehen viele Informationen sowie wertvolle Zeit verloren.

Digital Twins hingegen lassen uns die Situation direkt optisch erfassen und ersparen uns die ineffizienten und kontraproduktiven Denkschritte, die Informationen zuerst zu vereinfachen und aus visuellen in symbolische Informationen zu übertragen und sie anschließend wieder in visuelle konzeptionelle Informationen umzuwandeln.

Der Digital Twin als einheitliche Betrachtungsweise gestattet eine direkte Einsichtnahme der physischen und der virtuellen Produktinformationen zugleich. Anstatt einen Bericht über die Fabrikleistung zu lesen und sich anhand dessen bildlich vorzustellen, wie das Produkt die verschiedenen Stationen durchläuft, kann man mit Hilfe der simulierten Digital Twins den Fortschritt des bearbeiteten physischen Produkts sowie seine tatsächlichen Merkmale direkt erkennen.

Anstatt lange Listen von Toleranzmessungen zu studieren, kann man die Produkte in der virtuellen Fabrik der Reihe nach anschauen. Anhand tatsächlicher Trendverläufe können sich anbahnende Probleme erkannt werden.

Da die Produkte mit den Designvorgaben gekennzeichnet sind, kann man sich die Soll- und die Ist-Parameter gleichzeitig anzeigen lassen.

Vergleich

Des Weiteren greifen Menschen bei der Einschätzung von Situationen auf das Mittel des Vergleichens zurück. Unbewusst vergleichen wir ständig das gewünschte mit dem erzielten Ergebnis und prüfen, ob diese voneinander abweichen. Anschließend überlegen wir, wie wir diese Abweichung beseitigen. Das Vergleichen ist eines der stärksten intellektuellen Instrumente, die wir besitzen.

Selbst wenn die Angaben über das physische und das virtuelle Produkt völlig getrennt voneinander vorliegen, können wir einen solchen Abgleich vornehmen. Dies ist jedoch ineffizient, da das physische Produkt betrachtet, die virtuelle Entsprechung gefunden und die Abweichung errechnet werden muss.

Mit Hilfe des Digital Twins erkennt man hingegen die idealen Werte, den Toleranzbereich sowie die tatsächliche Trendentwicklung und kann ersehen, ob bei verschiedenen Produkten die Zielvorgaben erreicht werden. Unter einem Toleranzbereich versteht man Abweichungen nach oben und unten, die hinnehmbar sind.

Je nach Umsetzung können solche Abweichungen mit Farben gekennzeichnet werden. Grün bedeutet dann „keine Abweichung“, gelb „innerhalb des Toleranzbereichs“ und rot „außerhalb des Toleranzbereichs“. Anhand dessen können sofortige Entscheidungen getroffen werden.

Möglich ist dies für Messwerte, Zugfestigkeit, erfasstes Drehmoment und nahezu alle übrigen Werte, die in irgendeiner Form gemessen werden können, sei es quantitativ oder sogar qualitativ. Ebenso ist dies für einzelne wie auch für mehrere Produkte möglich. Im Falle der erwähnten Trendentwicklung könnte etwa

der ideale dem tatsächlichen Trend gegenübergestellt werden.

Mit Hilfe solcher Funktionen können Vergleiche vorgenommen und künftige Vorgänge angepasst werden. Weichen die Messungen z. B. nach oben vom idealen Wert ab, können Parameter in vorausgehenden Arbeitsschritten nach unten korrigiert werden, wodurch sie eventuell zu niedrig ausfallen. Um jedoch Toleranzstapel zu vermeiden, könnte man dafür sorgen, dass sich die Toleranzen um einen Mittelwert verteilen.

Schließlich steht uns noch das Mittel der Zusammenarbeit zur Verfügung.

Zusammenarbeit

Das effektivste Werkzeug, über das Menschen verfügen, ist die Zusammenarbeit mit anderen, um in einen Sachverhalt mehr Intelligenz, vielseitigere Betrachtungsweisen, Innovation und eine bessere Problemlösung einzubringen. Das Problem bei der Konzeptbildung ohne Digital Twins besteht darin, dass sie auf jeden einzelnen beschränkt ist. Mit dem Digital Twin hingegen steht die bildliche Darstellung allen gemeinsam in identischer Form zur Verfügung, ganz gleich, um wie viele Personen es sich handelt und ob sie sich verschiedenen Orten befinden.

Mit Hilfe von Digital Twins können alle physischen Produkte in jedem Stadium der Fertigung betrachtet und unmittelbar mit dem virtuellen Produkt verglichen werden. Virtuelle Produkte können auf unterschiedliche Produktionsstandorte ausgedehnt werden. Somit können Mitarbeiter in aller Welt nicht nur die Produktionsleistung ihres eigenen Werks einsehen, sondern diese auch laufend mit anderen Standorten vergleichen. Ein Problem, das in einem Werk auftritt, kann daher nicht nur dort behoben werden, sondern die

Lösung kann sofort an allen übrigen Fabriken in aller Welt übermittelt und dort implementiert werden.

Bislang hatten Werksleiter von ihrem Büro aus einen Blick auf die Werkshalle, um einen Eindruck von den Vorgängen in der Produktion zu bekommen. Mit dem Digital Twin steht nicht nur der Werksleitung, sondern allen Produktionsverantwortlichen ein identisches virtuelles Fenster zur Verfügung, und zwar für viele Standorte weltweit.

Anstatt einfach eine Fabriksimulation zu betrachten, die aufzeigt, was im Werk geschehen sollte, macht eine Fabriknachbildung deutlich, was tatsächlich in der Produktion vor sich geht und wie die Bauteile die Arbeitsstationen und Prüfstände durchlaufen.

Wie *Abbildung 2* zeigt, ist dies weitaus besser, als lediglich den Produktionsfortschritt und die Fertigstellung der Erzeugnisse zu verfolgen. Auch die für uns wichtigsten Konstruktionsvorgaben werden angezeigt, ebenso wie die Ist-Werte und die jeweiligen Abweichungen.

Dank der Konzeptbildung, des Vergleichs und der Zusammenarbeit heben Digital Twins die physischen Grenzen auf, innerhalb derer Menschen relativ ineffizient arbeiten. Vielmehr bewegen wir uns nun im virtuellen Raum, in dem der physische Standort keine Rolle spielt. Mitarbeiter in aller Welt können auf ein und dieselbe Visualisierung zugreifen, Vergleiche zwischen Soll und Ist vornehmen und mit anderen zusammenarbeiten. Dies bringt einen enormen Nutzen und funktioniert nur, wenn physische und virtuelle Produkte einander zugeordnet werden.

Schlussfolgerung

In den letzten zehn Jahren waren rasante Fortschritte bei den Technologien und Möglichkeiten der Datenerfassung des physischen Produkts und der Erstellung und Darstellung des virtuellen Produkts, also des Digital Twins, zu verzeichnen. Allerdings ist die Datenmenge in diesen zwei Bereichen zwar enorm gestiegen, doch die Verbindungen zwischen beiden Datenquellen hinkt dieser Entwicklung noch hinterher.

Dieses White Paper spricht sich für eine Synchronisation der Angaben über das physische und das virtuelle Produkt aus. Dies wird eine ganze Bandbreite neuer Anwendungsmöglichkeiten eröffnen.

Insbesondere die Verknüpfung zwischen den virtuellen Produktangaben (Soll-Werten) und den Ist-Werten zeigt auf einen Blick, inwieweit das Erzeugnis die Konstruktionsvorgaben erfüllt.

Anhand dieser Informationen kann eine digitale Fabriksimulation, die dazu dient vorherzusagen, wie das Produkt gefertigt werden soll, für eine digitale Nachbildung der Fabrik genutzt werden. Diese zeigt wiederum an, wie das Produkt zum aktuellen Zeitpunkt tatsächlich gefertigt wird. Dies kann dann mit den Konstruktionsvorgaben abgeglichen werden, und zwar (nahezu) in Echtzeit. Somit kann jedermann jederzeit und überall Einblick in die Produktionstätigkeit nehmen.

Die Stärkung der Verbindung zwischen physischem und virtuellem Produkt ermöglicht uns die Konzeptbildung, den Vergleich und die Zusammenarbeit. Zum einen kann ein visuelles Konzept des tatsächlichen Fertigungsprozesses gebildet werden. Ebenso kann das entstehende physische Erzeugnis mit dem virtuellen

Produkt abgeglichen werden, wodurch sichergestellt wird, dass wir auch tatsächlich das gewünschte Ergebnis erhalten. Schließlich können wir mit anderen innerhalb des Unternehmens und sogar der Lieferkette zusammenarbeiten, um stets über die in der Produktion befindlichen Erzeugnisse auf dem Laufenden zu sein.

All dies trägt zu einer Steigerung der Produktivität, der Einheitlichkeit der Erzeugnisse und zu höchster Qualität bei.

Der Autor

Dr. Michael Grieves ist ein weltweit renommierter Fachmann und gefragter Redner im Bereich Product Lifecycle Management (PLM) und hat sich bereits in zahlreichen Vorträgen und Publikationen mit diesem Thema beschäftigt. Zu seinen Werken zählen grundlegende Arbeiten über PLM wie Product Lifecycle Management: Driving the Next Generation of Lean Thinking (McGraw-Hill, 2006) und Virtually Perfect: Driving Innovative and Lean Products through Product Lifecycle Management (SCP, 2010)

Herr Dr. Grieves ist als Berater für zahlreiche internationale Fertigungsunternehmen sowie staatliche Organisationen wie die NASA tätig.

Dr. Grieves ist Kodirektor des Center for Lifecycle and Innovation Management (CLIM) am Florida Institute of Technology und Forschungsprofessor am College of Business und am College of Engineering.

Dr. Grieves ist emeritierter Vorsitzender des Beirats der School of Business an der Oakland University. Er lehrte in den Vereinigten Staaten, China und Europa (im Hauptstudium und auf Graduierten-ebene) und hat Managementweiterbildungen entwickelt und geleitet. Dr. Grieves lehrt ebenfalls im Auslandsstudienprogramm der University of Iowa in Asolo, Italien.

Dr. Grieves besitzt über 45 Jahre Erfahrung in der IT- und Datenkommunikationsbranche. Er war im Lauf seiner Karriere sowohl bei neu gegründeten Firmen als auch im höheren Management von Fortune-1000-Unternehmen tätig. Er gründete ein nationales Systemintegrationsunternehmen und fungierte dort anschließend als Vorsitzender des Prüfungs- und Vergütungsausschusses.

Dr. Grieves verfügt über langjährige Vorstandserfahrung, einschließlich bei börsennotierten Unternehmen in China und Japan.

Dr. Grieves studierte an der Michigan State University (Bachelor of Science) und an der Oakland University (Master of Business Administration). Er promovierte an der Weatherhead School of Management der Case Western Reserve University.

Der Sponsor

Dassault Systèmes, die **3DEXPERIENCE®** Company, bedient 190.000 Kunden in 140 Ländern und bietet eine virtuelle Welt, in der Ideen zur nachhaltigen Innovation keine Grenzen gesetzt sind. Die Marke DELMIA von Dassault Systèmes stellt Apps an der Schnittstelle von virtueller Welt und Realität bereit. Als Bestandteil von DELMIA unterstützt das Apriso-Lösungsportfolio mit seiner Anwendungssuite für das operative Fertigungsmanagement produzierende Unternehmen dabei, ihre Fertigungsprozesse dauerhaft leistungsfähiger zu gestalten und weltweit zu standardisieren.

Weitere Informationen stehen unter apriso.de oder www.apriso.com/blog bereit, oder folgen Sie uns auf [@Apriso](https://twitter.com/Apriso).

Version 1411.1