

Whitepaper

Digitales Engineering mit XperiDesk

Version 1.1

Dr. Dirk Ortloff, Dr. Jens Popp

26. Juni 2020



© DO-IT-Service GmbH

<https://www.do-it-service.de/>

Die Technologieentwicklung in vielen High-Tech-Branchen wie Halbleiter, Photovoltaik und MEMS wird von Tag zu Tag komplexer. Gleichzeitig müssen die Entwicklungszyklen immer kürzer werden. Aufgrund der erforderlichen Geschwindigkeitssteigerung stellt sich die Frage, wie Unternehmen mit diesem immer höheren Tempo zureckkommen und durch Digitalisierung im Engineering Effizienzgewinne erzielen können. Denn nach der allgemeinen Bewegung zur Digitalisierung der Fertigung ist der nächste logische Schritt die Digitalisierung der Forschung & Entwicklung.

In diesem DigitalEngineering beschreiben wir einen Ansatz für den nächsten Schritt zur Verbesserung der Engineering-Effizienz. Der intelligente Einsatz von Software ermöglicht Effizienzsteigerungen durch Digitalisierung und Automatisierung verschiedener Aufgaben, die traditionell von Ingenieuren manuell ausgeführt werden. Diese Gewinne werden durch die Virtualisierung von Experimenten mit Hilfe von Simulation und Emulation und durch die ganzheitliche Erfassung und Verwaltung aller Informationen, die durch virtuelle und physische Experimente erzeugt werden, ermöglicht.

Inhaltsverzeichnis

1 Einführung	3
2 Lösungsansatz	5
3 Software-gesteuerter Ansatz	6
4 Schlussfolgerungen	10
Literatur	10

Abbildungsverzeichnis

1 Wertschöpfungskette und Geschäftsmodelle in der MEMS and MNT Industrie	4
2 Hierarchisches Modell des MNT Geschäfts	5
3 Beispiel eines sehr frühen Emulationsergebnisses	7
4 Beispiel starker physikalisch basierten Simulation	7
5 XperiDesk Entwicklungszyklus	8
6 Kostenkurve des Verifikationsflusses	9

1 Einführung

Die Nachfrage nach Halbleiter- und MEMS-Produkten (Micro Electrical Mechanical Systems) ist in den letzten Jahren erheblich gestiegen und wird voraussichtlich auch in den kommenden Jahren weiter steigen [Anysilicon 2018], [Forum 2017]. Diese wachsende Nachfrage bringt neue technische und organisatorische Herausforderungen mit sich. Einerseits müssen die Entwurfszyklen kürzer werden, um den Marktanforderungen gerecht zu werden und dem zunehmenden Wettbewerb standzuhalten. Auf der anderen Seite hat die Produktkomplexität zugenommen, da jede neue Produktgeneration anspruchsvollere Spezifikationen und Leistungsanforderungen hat. Eine Möglichkeit, diesen sich ändernden Randbedingungen zu begegnen, besteht darin, dass sich Unternehmen auf ihre Kernkompetenzen konzentrieren und beginnen, mit anderen Organisationen entlang der Lieferkette zusammenzuarbeiten. Die Kehrseite dieses Ansatzes ist, dass die Koordination zwischen den Partnern die Entwicklungsumgebung noch komplexer macht und es zu einer Herausforderung wird, alle Teilnehmer der Projekte unter einen Hut zu bringen. Um in immer größer werdenden Ökosystemen schneller und kosteneffizienter zusammenarbeiten zu können, sind neue Ansätze und neue Technologien erforderlich.

Nach dem Hype um Industrie 4.0 und der allgemeinen Digitalisierung der Fertigung ist der nächstes logische Schritt in der gesamten Digitalisierungsbewegung die Digitalisierung und Effizienzsteigerung in der Konstruktion und Entwicklung. Die Technologieentwicklung wird in vielen Branchen durch physikalische Experimente vorangetrieben. Leider erfolgt die Datenspeicherung in Silos nach Abteilungen oder Systemen. Die allgegenwärtige Vielfältigkeit von MS Excel oder teilweise sogar die Verwendung von Stift und Papier verschlimmern das Problem noch. In diesem Bereich birgt die intelligente Digitalisierung der technischen Infrastruktur einige mögliche Effizienzgewinne. Nicht offen zu sein für die unvermeidlichen Bewegungen hin zu mehr digitalisierter Forschung und Entwicklung und bei den traditionellen Ansätzen zu bleiben, ist ein gefährlicher Ansatz, wie mehrere Beispiele aus dem Fertigungsbereich zeigen. Neue und effizientere kollaborative Produkt-Engineering-Ansätze (Collaborative Product Engineering, PE) in Verbindung mit einer erweiterten Digitalisierung im technischen Bereich sind unerlässlich, um mit dem gestiegenen Innovationsniveau Schritt zu halten. Mögliche Ansätze bestehen darin, neue oder reifere Softwaretechnologien zu nutzen und effektivere Methoden des Digital Engineering einzusetzen. Beides ist erforderlich, um alle beteiligten Parteien aufeinander abzustimmen, den Informationsaustausch zu fördern und die Innovationsrate zu verbessern.

Charakteristisch für die Mico und Nano Technologien (MNT) Industrien (Halbleiter, MEMS, Nano-materialien, etc.) sind die verschiedenen Anwendungsbereiche, die Vielfalt der Technologien und die beträchtliche Anzahl von kleinen und mittleren Unternehmen, die in diesen Industrien tätig sind. Die Entwicklung neuer Produkte, ihr geometrisches Design und ihre Herstellungsschritte sind voneinander abhängig (d.h. die Herstellungsprozesse sind in der Regel anwendungsspezifisch). Dies muss bei der gemeinsamen Entwicklung neuer Produkte mit mehreren Partnern in einem Ökosystem berücksichtigt werden. Um auf einem Markt zu überleben, der von Tag zu Tag wettbewerbsfähiger wird, müssen diese Marktteilnehmer einen kooperativen und verteilten Entwicklungsansatz verfolgen.

Zusammenarbeit und Arbeitsteilung besteht aus zwei Ebenen oder Dimensionen. Zunächst einmal sind die internen Entwicklungsteams in den meisten Fällen multidisziplinär. Sie müssen zum Beispiel die Bereiche Verfahrenstechnik sowie Bauteil-/Maschinenbau abdecken. Während der Hintergrund der ersten Gruppen typischerweise Physik oder Elektrotechnik ist, haben die Bauteilingenieure

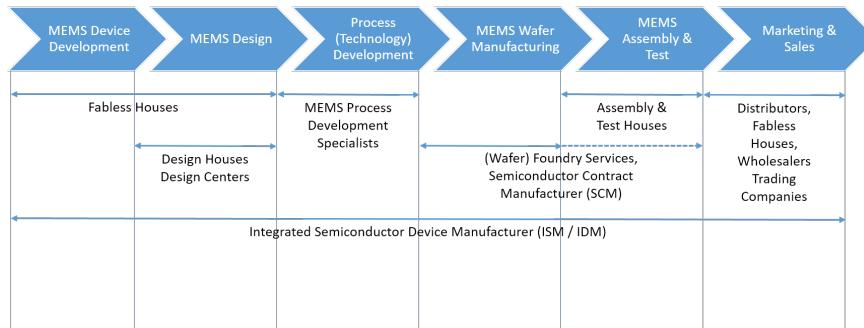


Abbildung 1: Wertschöpfungskette und Geschäftsmodelle in der MEMS and MNT Industrie

oft ihren Hintergrund in Maschinenbau, Biologie oder Chemie. Die Unterschiede im Wortschatz und in der Denkweise lassen sich nur schwer überwinden, da diese Unterschiede im Hintergrund begründet sind. Erschwerend kommt hinzu, dass verteilte Teams, möglicherweise über mehrere Kontinente verteilt, die Komplexität am Arbeitsplatz erhöhen. Abbildung 1 zeigt die gesamte Wertschöpfungskette am Beispiel der MEMS- und MNT-Lieferkette. Es ist leicht zu erkennen, dass die Wertschöpfungskette mehrere rechtliche Einheiten umfassen kann. Die zweite Dimension der Komplexität könnte als Zusammenarbeit und Arbeitsteilung zwischen verschiedenen juristischen Einheiten gesehen werden, was die Herausforderung, neue MNT-Produkte schnell und kostengünstig zu entwickeln, noch erhöht. Zur erfolgreichen Bewältigung dieser Probleme ist ein Digital Engineering-Ansatz erforderlich.

Eine umfassende Methodik des Digital Engineering muss dem "Kunden" (als Käufer der gewünschten Bauteile oder Produkte) eine zentrale, steuernde Rolle zuweisen. Der Kunde muss in diesem Zusammenhang in einem sehr engen Rahmen interpretiert werden. Ein Kunde kann ein Endkunde oder Benutzer sein, oder es kann das interne Produktmanagement, der Vertrieb, der CTO usw. sein. Der Digital Engineering-Ansatz muss dem Kunden die Kontrolle über die Spezifikation, den Design-Flow und andere Schritte geben und einen agilen Entwicklungsansatz ermöglichen. Darüber hinaus muss das Digital Engineering schnelle Entwicklungszykluszeiten bieten und dem Kunden eine frühe Vorstellung von dem potenziellen zukünftigen Produkt vermitteln. Daher muss die Stimme des Kunden während des Entwicklungsprozesses sorgfältig berücksichtigt werden, und seine Beteiligung an der Entwicklung muss mit dem Digital Engineering-Prozess eng verzahnt werden. Eine Übersicht über die Vision des Integrationsmodells aller beteiligten Interessengruppen ist in [Abbildung 2](#) dargestellt.

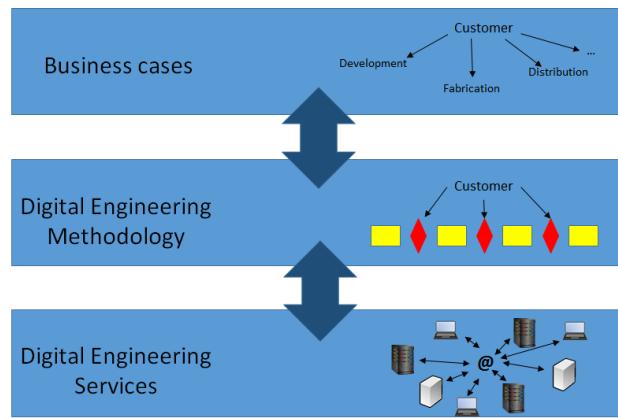


Abbildung 2: Hierarchisches Modell des MNT Geschäfts

2 Lösungsansatz

Die Frage ist, wie diese Kundenbeteiligung verbessert werden kann, ohne in ein Mikromanagement-Szenario zu geraten. Eine Lösung besteht in digital gesteuerten Kooperationsprozessen, bei denen der Kunde regelmäßig einbezogen wird, aber nur, wenn vereinbarte Meilensteine erreicht werden. Diese Meilensteine sind ziemlich fein granuliert, wie Mini-Genehmigungstore für alle abgeschlossenen Aufgaben. Dies folgt der Stage-Gate-Produktentwicklungsmethodik [[Stage-Gate.com o.D.](#)], jedoch auf einer viel feinkörnigeren Ebene. Weitere Einzelheiten zu diesem Ansatz, eine vollständige Geschäftsprozesslandkarte mit Stufen- und Gate-Kriterien und Indikatoren für die erforderliche Software-Landschaft sind in [[Orloff u. a. 2014](#)] zu finden.

Da die komplette Beschreibung der Prozesslandkarte den Rahmen dieses Papiers sprengen würde, wollen wir uns hier auf die kritische Frage der regelmäßigen Interaktion mit dem Kunden konzentrieren. Es ist wichtig, den Fortschritt zu kommunizieren und sich auf die Vision, das Ziel und die Zwischenschritte auszurichten. Mit diesem Papier schlagen wir vor, die sich ständig verbessende Fertigungsemulation zu nutzen, durch Surrogatmodelle, vereinfachte Simulation [[Wikipedia 2020b](#)] und Simulationssoftwaresysteme wie Technology CAD (TCAD) [[Wikipedia 2020c](#)]. Mit TCAD-Werkzeugen können 2D- oder 3D-Strukturen erzeugt werden, die mehr oder weniger realistische Annäherungen von Schichten, Strukturen und Bauelementen darstellen, als ob sie in einer realen Anlage hergestellt würden.

Das aktuelle Problem bei diesem Ansatz besteht darin, dass jede Emulations- oder Simulationssoftware einen Experten benötigt, um sie richtig zu benutzen, und dass jedes Software-Tool seine eigene Beschreibungssprache hat. Dies führt zu der herausfordernden Aufgabe, alles synchron zu halten. Es könnte z.B. eine Excel-Tabelle mit dem prinzipiellen Prozessablauf, eine Beschreibung für das Emulationswerkzeug, eine Eingabedatei für den TCAD-Simulator und schließlich die Ergebnisbilder der Verarbeitung geben. Oftmals sind Änderungen an einer Stelle (z.B. wenn eine zusätzliche Isolierschicht erforderlich ist) an den anderen zu ändernden Stellen nur schwer wiederzugeben. Und Experten für die Werkzeuge sind eine seltene Ressource, wo das Warten auf diese den Prozess verlängern oder dazu führen, dass Projekte diese wichtigen Schritte zugunsten einer schnelleren Durchführung einiger Experimente "überspringen". Der eigentliche Schlüssel zu einer erfolgreichen digitalen Entwicklungsumgebung mit virtuellen Entwicklungsschritten ist also das Datenmanagement und die Unterstützung mehrerer Werkzeuge aus derselben Datenquelle.

Neue Ansätze, die sogar über die Emulations- und Simulationswerkzeuge geschichtet sind, müssen es jedem Prozessingenieur ermöglichen, Simulationen ohne detailliertes Wissen über die Fähigkeiten des Emulators / Simulators durchzuführen. Dies wird die breitere Einführung und Übernahme von Simulations-/Emulationstechniken ermöglichen. Sie können dem Kunden eine frühe Vorstellung von dem Bauteil vermitteln, das in Zukunft hergestellt werden soll, und können dazu verwendet werden, eine beabsichtigte Struktur und ein beabsichtigtes Verhalten iterativ zu verfeinern und zu spezifizieren. Dieser Ansatz bindet den Kunden tiefer in den Entwicklungsprozess ein und verhindert ein Abweichen von den Anforderungen und Absichten. Er hilft, Fehler frühzeitig zu erkennen, bevor teure Serienproduktionen durchgeführt werden.

Um einen solchen Ansatz zu erleichtern, werden die verschiedenen Software-Ansätze von Process Development Execution Systems (PDES) [Wikipedia 2020a], Technologie-CAD (TCAD)-Simulationsmöglichkeiten und Rapid Virtual Manufacturing / Digital Engineering Tools kombiniert, um die Kommunikation zwischen allen Beteiligten (z.B. Prozessingenieure, Bauteilingenieure, Kunden, ...) zu erleichtern. Zusammen mit einer passenden Methodik kann eine umfassende Entwicklungskoordination zwischen allen beteiligten Parteien erreicht werden. Darüber hinaus wird ein kollaboratives Wissensmanagement ermöglicht.

3 Software-gesteuerter Ansatz

Die Kombination von Software-Werkzeugen der oben genannten Kategorien hat mehrere Vorteile. Ein PDES, kann wie XperiDesk [camLine GmbH 2020] als zentrales und einziges Front-End für die Rezepturverwaltung, den Fertigungsablaufentwurf, Simulations- und Emulationswerkzeuge und ganzheitliche Versuchsverfolgung und Rückverfolgung sowie Informationsmanagement. Es ist in der Lage, Emulationen zu verwalten und auszuführen / Simulationen parallel mit verschiedenen Ansätzen oder sogar verschiedenen Emulatoren/Simulatoren aus dem gleichen Fertigungsablaufentwurf heraus zu steuern und koordinieren. Der nahtlose Wechsel zwischen den Berechnungswerkzeugen erlaubt sogar die Verwendung von Konzepten wie abstraktem Design. Ein solcher Entwurfsansatz beginnt schon in sehr frühen Design-Iterationen, wenn nur prinzipiell schrittbasierte Prozessabläufe möglich sind. Diese Abläufe, auf der Ebene Abscheidung, Strukturierung, Ätzen, kann bereits emuliert werden (zusammen mit dem beabsichtigten Maskendesign) mit dem Ergebnis rechteckiger/kubischer Strukturen für einen allerersten Eindruck / eine erste Herstellungsemulation. Ein Beispiel für eine solche frühe Emulation ist in Abbildung 3 dargestellt. Spätere Iterationen im Entwicklungszyklus würden immer mehr physikalische Simulationen einsetzen, die genauere Vorhersagen von real gefertigten Strukturen unter Berücksichtigung von Effekten wie z.B. Unterätzungen etc. ermöglichen. Ein Beispiel für eine physikalischere Simulation ist in Abbildung 4 dargestellt.

Darüber hinaus ermöglichen Abstraktionen wie Modelle, die je nach verwendeter Maschine und ihrer Zuordnung zu Prozessabläufen variieren, die Erstellung komplexer Simulator-Eingabedateien mit einem einzigen Knopfdruck. Dieser Ansatz hat den großen Vorteil, dass Prozessingenieure verschiedene Emulations- und Simulationswerkzeuge ohne intime Kenntnisse des Emulators / Simulators verwenden können.

Ein weiterer Vorteil des Integrationsansatzes ist die umfassende Sammlung von Informationen zu Prozessrezepten und -abläufen, Designabsicht, Simulationsergebnissen und experimentellen Ergebnissen in einem zentralisierten PDES. Dies ermöglicht nahtlose Iterationen über alle Domänen

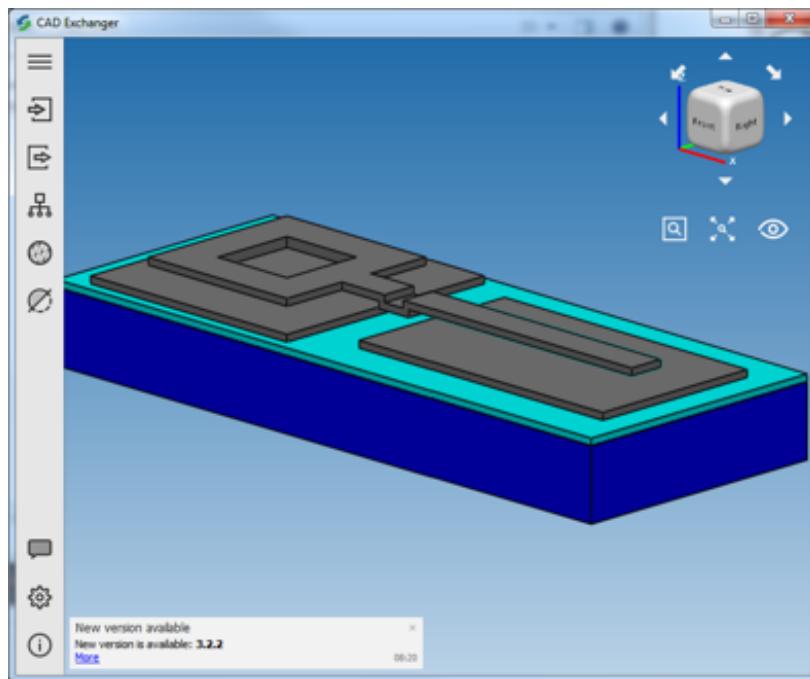


Abbildung 3: Beispiel eines sehr frühen Emulationsergebnisses

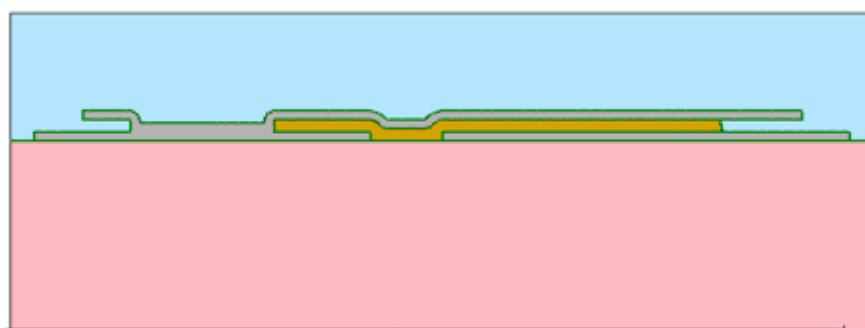


Abbildung 4: Beispiel starker physikalisch basierten Simulation



Abbildung 5: XperiDesk Entwicklungszyklus

hinweg. Dadurch können Optimierungsschleifen der Simulation (z.B. Rezepte) durchgeführt werden, da der volle Kontext eines Produktionsprozesses zur Verfügung steht. Dies wird durch die PDES-Werkzeuge gewährleistet, die den gesamten in [Abbildung 5](#) dargestellten Entwicklungszyklus abdecken.

Zusammen mit anderen Verifizierungswerkzeugen kann der in [Abbildung 6](#) dargestellte neue Digital Engineering Workflow etabliert werden:

1. Verifizierung des Prozessablaufs durch eine Regelprüfung (z.B. sind alle Reinigungsschritte enthalten, wird das Temperaturbudget eingehalten). Fehler bei der Gestaltung von Prozessabläufen werden frühzeitig erkannt.
2. Eine erste Validierung des Bauteils und des Prozesses wird mit schnellen Emulationswerkzeugen wie LAM's SEMulator3D oder SoftMEMS MEMSPro durchgeführt, die aus dem gleichen Prozessablauf wie in Schritt 1 zusammen mit dem entsprechenden Maskensatz angesteuert werden (siehe [Abbildung 3](#)). Das Maskenlayout kann in Verbindung mit dem Prozessablauf verifiziert werden. Die Fähigkeit, dreidimensionale Modelle schnell und einfach zu erzeugen und gemeinsam zu nutzen, ermöglicht eine qualitativ hochwertige Kommunikation zwischen Prozessingenieuren, Bauteilentwicklern, Produktbesitzern und insbesondere dem Kunden. Konstruktions- und Verarbeitungsfehler können in diesem Stadium abgefangen werden.
3. Detaillierte Verifizierung des Bauteils mit physikalischen Simulatoren wie Silvaco Victory oder Synopsys Sentaurus. Es wird die gleiche Informationsbasis wie bei den Schritten eins und zwei verwendet! Diese Simulationen erfordern mehr Rechenzeit, können aber mehr Einblicke liefern und mehr physikalische Effekte berücksichtigen (siehe [Abbildung 4](#)). Auch hier können in diesem Stadium Konstruktions- und Konfigurationsfehler erkannt werden.
4. Herstellung und Verifizierung von Prototypen mit anschließenden, detaillierten Messungen. Die

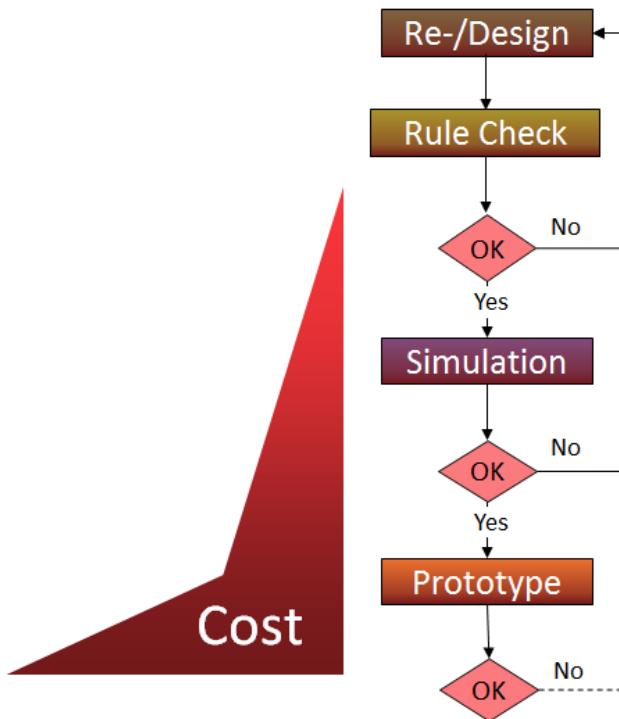


Abbildung 6: Kostenkurve des Verifikationsflusses

Ergebnisse werden auch in dem PDES gespeichert, um eine Referenzbasis für weitere Projekte zu schaffen.

In den heute verwendeten Arbeitsabläufen wird Schritt eins manuell von Experten oder, falls verfügbar, durch das Manufacturing Execution System (MES) durchgeführt. Mit zunehmender Komplexität der Prozessabläufe wird die manuelle Analyse und Freigabe immer fehleranfälliger. Zusätzlich kann ein abwesender Experte durch Urlaub oder Krankheit den Fortschritt des gesamten Projekts behindern. Die in diesem frühen Stadium verwendeten Prozessrezepte werden oft neu erstellt und sind keine bekannten guten Herstellungsschritte mit dokumentierten resultierenden Eigenschaften. Das PDES-System fungiert als Bibliothek bekannter Rezepte, die schnell identifiziert und mit der Foundry oder Entwicklungsfabrik verknüpft werden, in der das Rezept derzeit ausgeführt wird. Durch die Verwendung einer Hierarchie, können neue Prozessschritte leicht aus vorhandenen bekannten guten Rezepten erstellt werden, wodurch die Wahrscheinlichkeit falscher Prozessschritte verringert wird.

Die Schritte zwei und drei werden heute unabhängig von der Prozessentwicklung durchgeführt. So muss ein geänderter Parameter wie eine Schichtdicke manuell in das Emulations- oder Simulationsmodell übertragen werden. Geschieht dies nicht (z.B. durch fehlende Kommunikation) ist die gesamte Ausführung der Simulation sinnlos.

Ein neuartiger Aspekt des vorgeschlagenen Arbeitsablaufs beim Digital Engineering ist die Fähigkeit, schnell Prototypen von Bauteilen und Prozessen virtuell in einer 3D-Softwareumgebung mit Hilfe der Prozessemulation zu erstellen (Schritt 2). Diese Techniken ermöglichen es den Prozessingenieuren, einige der Vorteile der virtuellen 3D-Fertigung zu realisieren, ohne die Schwierigkeiten und Kosten, die mit dem Einsatz herkömmlicher Prozesssimulationswerkzeuge (TCAD) verbunden sind. 3D-Modelle können zur Validierung von Prozessabläufen und Bauteil-Layouts und, was noch wichtiger ist, zur Kommunikation von Ideen und Anforderungen zwischen Prozessingenieuren, Bau-

teiltechnikern und Kunden verwendet werden. Heutzutage erfolgt eine solche Kommunikation in der Regel über skizzierte 2D-Querschnitte oder abstrakte Darstellungen von Bauteilen. Ein interaktives, genaues 3D-Modell ermöglicht eine viel hochwertigere Kommunikation zwischen den Beteiligten und stellt sicher, dass wichtige Details nicht übersehen oder missverstanden werden. Darüber hinaus kann dasselbe 3D-Modell, sobald ein Prozess und ein Bauteildesign ausgewählt wurden, an Ausbeutemanagement-Ingenieure, Prozessdokumentationsgruppen und Fehleranalyse-Ingenieure weitergegeben werden. Die Fähigkeit, die Prozessemulation von einem umfassenden PDES aus zu steuern sowie 3D-Modelle in diesem System zu speichern und zu verbreiten, stellt sicher, dass jeder einfachen Zugang zu denselben hochwertigen 3D-Modellen hat.

Schritt 3 des oben skizzierten Ablaufs bezieht sich auf eine gründlichere, traditionelle, aber optionale TCAD-Analyse. Im Vergleich zu Schritt zwei führt dieser Schritt mehr physikalisch basierte Simulationen durch, jedoch zu den Kosten höherer Lizenzpreise sowie wesentlich längerer Simulationslaufzeiten. Daher haben sowohl die Emulations- als auch die Simulationsschritte ihre eigene Existenzberechtigung.

Im vierten Schritt schließlich werden die meisten Daten, wie Rasterelektronenmikroskopbilder und andere Messergebnisse, erzeugt. Obwohl sie nicht Teil der virtuellen Fertigung sind, sondern Teil des digitalen Engineering-Workflows, können sie wertvolle Informationen für die Verbesserung von Rezepten, Fertigungsabläufen sowie für Modelle und Simulationsschritte liefern. Außerdem können aus diesen Ergebnissen neue Regeln für den ersten Schritt des Designverifikationsprozesses abgeleitet werden, wodurch die nächste Anwendung der Regelprüfung noch umfassender wird und die Grundlage für ein lernendes System geschaffen wird.

4 Schlussfolgerungen

Digitales Engineering kann beschleunigt und robuster gestaltet werden, indem Medienbrüche beseitigt und ähnliche Informationen in mehrere verschiedene (Berechnungs-)Werkzeuge eingespeist werden. Da das Digital Engineering auf realen Rezepten für den Fertigungsprozess basieren kann, wird die Zeit bis zur Übergabe an die Fertigung minimiert. Wertvolle Ressourcen an Zeit, Material und Geld können durch den Einsatz mehrstufiger virtueller Verifikation von Verarbeitungsprojekten eingespart werden. Dies ermöglicht es den Ingenieuren, schneller über stabile Prototypen zu verfügen und Produkte schneller auf den Markt zu bringen.

Literatur

Anysilicon (6. Juni 2018): *MEMS market will experience a 17.5% growth in value between 2018 and 2023.* In: url: <https://anysilicon.com/mems-market-will-experience-17-5-growth-value-2018-2023> (siehe S. 3).

camLine GmbH (26. Juni 2020): *XperiDesk – Streamlining Technology Development.* In: url: <https://xperidesk.com> (siehe S. 6).

Forum, Semiconductor (17. Mai 2017): *Automotive Semiconductor Market Demand is Increasing Rapidly in Recent Years*. In: url: <https://www.semiconductorforu.com/automotive-semiconductor-market-demand-increasing-rapidly-recent-years/> (siehe S. 3).

Ortloff, D. u. a. (Mai 2014): *MEMS Product Engineering*. Springer-Verlag Wien. **isbn:** 978-3-7091-0706-5 (siehe S. 5).

Stage-Gate.com (o.D.): *New Product Development Processs*. In: url: <https://www.stage-gate.com/new-product-development-process/> (siehe S. 5).

Wikipedia (26. Juni 2020a): *Process Development Execution System*. In: url: https://en.wikipedia.org/wiki/Process_development_execution_system (siehe S. 6).

Wikipedia (26. Juni 2020b): *Surrogate model*. In: url: https://en.wikipedia.org/wiki/Surrogate_model (siehe S. 5).

Wikipedia (26. Juni 2020c): *Technology CAD*. In: url: https://en.wikipedia.org/wiki/Technology_CAD (siehe S. 5).