

Erweiterung der MID-Produktentwicklung um ein optisches Partialmodell

Christian Fischer und Jörg Franke
*Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS)
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg*

In this paper, the typical product development process for spatial Molded Interconnect Devices (3D-MID), the underlying product model as well as the addition of an optical partial model are presented. The methodology of integrating mechanical and electronic layout design will be discussed. At this juncture, it will be shown which specific steps are necessary for the development of products made in MID technology. This is followed by a description of the extension of electromechanical CAD data by an optical data model. The methodology of data collection for the optical partial model is also explained.

1 Einleitung

Ein Großteil der derzeit umgesetzten Innovationen in technischen Fachdisziplinen wie dem Maschinenbau wird durch mechatronische Produkte dargestellt. Dies führt dazu, dass eine stetig wachsende Zahl mechanischer Produkte zusätzlich mit Elektronik bestückt werden muss. Auf Grund der räumlichen Enge in den daraus resultierenden komplexen Systemen wird zunehmend eine räumliche Integration mechanischer und elektrischer bzw. elektronischer Funktionen in einer einzigen Baugruppe angestrebt. Dies betrifft Bereiche wie die Kommunikations- und Medizintechnik ebenso wie die Automobilindustrie. Durch die Reduzierung der Einzelteile im Vergleich zum klassischen Ansatz wird einerseits die Produktion kostengünstiger und andererseits die Gestaltungsfreiheit dieser speziellen Klasse mechatronischer Produkte erhöht. Zahl-

reiche Serienprodukte werden bereits als sogenannte Molded Interconnect Devices (3D-MID) gefertigt. [2]

In der universitären Forschung wird stetig über eine Erweiterung der MID-Technologie nachgedacht. Da die aktuelle Entwicklung der Elektronik in Richtung Optoelektronik tendiert, ist die Übertragung der Ansätze auf räumliche elektronische Baugruppen zu prüfen. Am Lehrstuhl FAPS wird deshalb die Integration optoelektronischer Bauelemente, verbunden durch polymere Lichtwellenleiter, in 3D-MID angestrebt. Die Vorteile dieser Kombination aus elektronischer Datenverarbeitung und optischer Signalübertragung liegen in der Unempfindlichkeit gegenüber elektromagnetischen Störfeldern, in einer überlegenen Bandbreite verglichen mit Leiterbahnen aus Kupfer [9] sowie in dem, in Zukunft an Bedeutung gewinnenden, niedrigeren Energieverbrauch. Durch die Integration der Optik als weitere Fachdisziplin in die Produktentwicklung von 3D-MID entsteht die Notwendigkeit, die Methodik entsprechend anzupassen bzw. zu erweitern. In diesem Beitrag wird zunächst die interdisziplinäre Produktentwicklung von 3D-MID in den einzelnen Vorgehensweisen und in der softwaretechnischen Umsetzung vorgestellt und im Anschluss auf die ersten Schritte zur Erweiterung um die neue Fachdisziplin Optik eingegangen.

2 Rahmenbedingungen und Lösungsansätze für die Produktentwicklung von 3D-MID

Die Produktentwicklung von 3D-MID erfordert neue Ansätze, um die erforderliche domänenübergreifende Rolle annehmen zu können. Da für die MID-Technologie noch kein einheitliches systematisches Vorgehen existierte, wurden die klassischen Vorgehensweisen zur mechanischen und elektronischen Produktentwicklung analysiert, die für 3D-MID relevanten Entwicklungsprozesse identifiziert und in einer integrierten Entwicklungsumgebung zusammenfasst. Bei den folgenden Erläuterungen liegt das Modell von Pahl/Beitz [7] zur Produktentwicklung zu Grunde.

2.1 Fertigungstechnische Anforderungen an 3D-MID

Die Planungsphase mit der Erstellung von Lasten- und Pflichtenheft bleibt durch den Einsatz der MID-Technologie unberührt. Jedoch wirkt sich deren Verwendung bei der Lösungsfindung in der Konzeptphase aus, da gezielt die Integration von Mechanik und Elektronik in einem Produkt betrachtet werden muss. Das Rationalisierungspotential der MID-Technologie entfaltet sich nur, wenn das Produkt von Beginn an als 3D-MID konzipiert wird. Ein Redesign auf

Basis der klassischen Aufteilung Mechanik/Elektronik führt selten zum Erfolg [6].

In der Entwurfsphase ist auf die fertigungsgerechte Auslegung des Produkts zu achten, bedingt durch die enge Verzahnung von Produkt und Produktionsverfahren bei der MID-Technologie [4]. Die Manufacturing Rule Checks (MRC) hängen stark von den verwendeten Strukturierungs- und Metallisierungsverfahren sowie von der Aufbau- und Verbindungstechnik, z. B. in Form der 3D-Bestückung, ab. Als anschauliches Beispiel dienen die Laser-Direkt-Strukturierung (LDS) [5] und das 2K-Spritzgussverfahren [2]. Beim LDS findet während des Spritzgusses eine Dotierung des flüssigen Kunststoffes mit Metallatomen statt. Auf der Oberfläche des ausgehärteten thermoplastischen Grundkörpers wird per Laser der Leiterbahnverlauf strukturiert. Der Laserstrahl fokussiert durch eine aufwändige Optik innerhalb eines quaderförmigen Volumens auf der Bauteiloberfläche und raut diese auf. Mittels der Dotierung werden die oben erwähnten Metallatome ebenfalls an den rauen Stellen freigelegt, so dass sich bei der anschließenden Galvanisierung Kupfer abscheidet. Die Fertigungsvorbereitung für das LDS liegt in der virtuellen Abtastung des räumlichen Leiterbahnverlaufs mit der Laserstrahlbreite unter Berücksichtigung potentieller Abschattungen durch die Bauteilgestalt. Beim 2K-Spritzguss dagegen handelt es sich um eine Abwandlung des Kunststoffspritzgusses, der die Leiterbahnstruktur im Spritzgusswerkzeug abbildet. Beim ersten Schuss wird der räumliche Schaltungsträger erzeugt und beim zweiten ein stromleitender Kunststoff in den zuvor freigelassenen Leiterbahnverläufen eingeleitet. Für diesen Prozess ist die Eignung zur Fertigung durch die Anbindung an eine Spritzgussimulation, also an ein FEM-Tool, zu prüfen. Diese beiden Beispiele zeigen, dass die Herstellungsverfahren sowohl Auswirkungen auf das 3D-Modell des Schaltungsträgers und die Leiterbahnrepräsentation als auch auf die Ableitung von Fertigungsinformationen und damit die bereitzustellenden CAD-Daten haben.

Schon frühzeitig im Entwicklungsprozess muss neben den Produktionsverfahren auch die Materialwahl für das Substrat des thermoplastischen Grundkörpers in die Überlegungen miteinbezogen werden. Das Material muss einerseits für den jeweiligen Herstellungsprozess geeignet sein (Design for Manufacturing), wie am Beispiel des LDS gut nachzuvollziehen ist, und andererseits eine ausreichende Haftfestigkeit für Lot und Metalle aufweisen, so dass diese den geplanten Produktlebenszyklus unbeschadet überstehen. [4]

2.2 Adaption von CAD-Systemen für die integrierte Entwicklung von MID-Produkten

Die bisherige klassische Aufteilung zwischen mechanischer Konstruktion und elektronischem Layout, repräsentiert durch MCAD-Systeme und Tools für die Electronic Design Automation (EDA), scheitert an der Layoutgestaltung räumlicher elektronischer Baugruppen [3]. Der Grund liegt in den Unterschieden der Entwicklungsumgebungen und deren Datenmodellen. In der Konstruktion können zwar 3D-Modelle des räumlichen Schaltungsträgers sowie der elektronischen Bauelemente erzeugt werden, jedoch fehlt die Angabe der elektrischen Belegung der Pins an den Bauelementen. Dementsprechend er mangelt es MCAD-Systemen an der Erkennung der elektrischen Verbindungen. Diese können nur aufwändig in manuellem Vorgehen als Volumenmodelle konstruiert werden, jedoch werden Änderungen in den elektrischen Netzen nicht registriert und übernommen. Vergleichbar ist die Situation im elektronischem Layout, dessen 2D-Entwicklungsumgebung sich auf das Layout flacher Leiterplatten (Printed Circuit Boards, PCB) bzw. mehrlagiger Boards beschränkt und dem es an einer Unterstützung für räumliche Schaltungsträger fehlt. Dies verhindert sowohl die Platzierung elektronischer Bauelemente und die Entflechtung der Leiterbahnen zwischen diesen als auch die Design Rule Checks (DRC).

Am Lehrstuhl FAPS wurde dem erkannten Handlungsbedarf mit der schwerpunktmäßigen Betrachtung der Ausarbeitungsphase bezüglich Konstruktion und Layoutgestaltung begegnet. Dabei hat sich die im Folgenden dargestellte Systematik herauskristallisiert (vgl. Bild 1). Der räumliche thermoplastische Grundkörper wird in einem 3D-MCAD-System unter Einbeziehung einer fertigungsgerechten Auslegung durch die Spritzgusssimulation konstruiert. Ebenso erfolgt die 3D-Modellierung der elektronischen Bauelemente. Da diese ähnlich wie Normteile als Standardbauteile regelmäßig Verwendung finden, bietet sich die Speicherung in einer datenbankbasierten Bauteilbibliothek an. Hierbei wird die Querverbindung zur Elektronik hergestellt, indem die elektrischen Belegungen der Pins und die Bauteilbezeichnungen aus der entsprechenden ECAD-Bibliothek zusätzlich hinterlegt werden. Dies erfordert eine Erweiterung der typischen MCAD-Datenstruktur um ein elektrisches Partialmodell (vgl. Bild 3). Weiterhin werden das Importieren von Netzlisten aus der klassischen Schaltungssynthese und das Laden der elektronischen Bauelemente aus der Bauteilbibliothek ermöglicht.

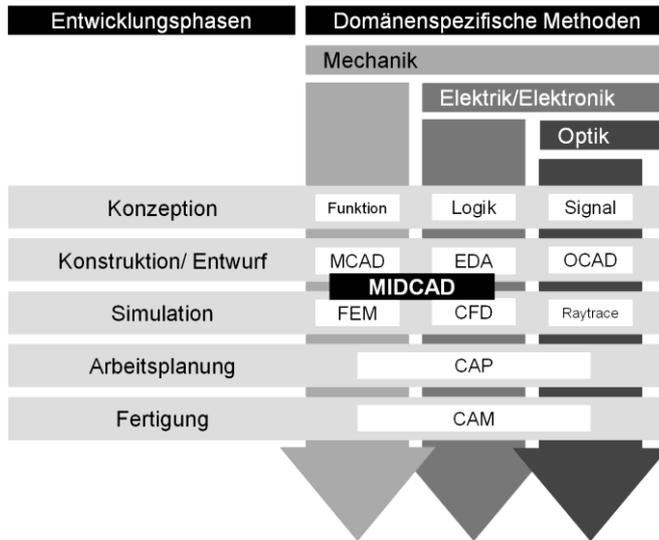


Bild 1: Einordnung von MIDCAD in die Produktentwicklung von 3D-MID als spezielle mechatronische Produkte

Da die elektrischen Verbindungen zwischen den Bauelementen bereits aus der Netzliste entnommen werden, können die Bauelemente unter Berücksichtigung möglichst kurzer und überschneidungsfreier Leiterbahnen platziert werden. Somit wird die Entflechtung erleichtert, wobei für diese spezielle Routingfunktionen aus ECAD nach MCAD übernommen wurden. Diese Routingfunktionen bilden einerseits die Pin-zu-Pin-Verbindungen graphisch ab und assistieren dem Konstrukteur basierend auf einem Oberflächengitter bei der Verlegung der Leiterbahnen. In diesem Zusammenhang sind MID-spezifische DRC und MRC einzusetzen, um eine hohe Produktqualität zu gewährleisten. [1]

2.3 Software-Demonstrator MIDCAD

Die Basis eines Tools für die Konstruktion von 3D-MID muss technologiebedingt eine 3D-Entwicklungsumgebung bieten. Deshalb wurde am Lehrstuhl FAPS das Plug-In MIDCAD für das CAD-System Pro/Engineer Wildfire konzipiert und implementiert (vgl. Bild 2). In der MID-spezifisch erweiterten Entwicklungsumgebung stehen Funktionen für die 3D-Modellierung des Schaltungsträgers, für den Import von Netzlisten aus der Schaltungssynthese, für die Platzierung elektronischer Bauelemente, für das Routing der Leiterbahnen, für Design-Rule-Checks (DRC) sowie für die Fertigungsanbindung zur Verfü-

gung. Ebenso ist die direkte Integration der Spritzgussimulation und die Anbindung der thermischen Simulation in Form von Computational Fluid Dynamics (CFD) realisiert. [8]

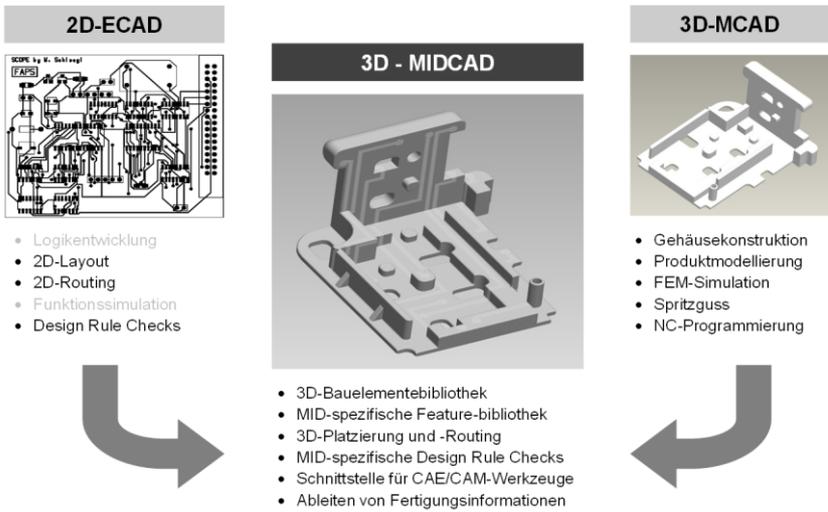


Bild 2: MIDCAD integriert die erforderlichen Funktionen aus ECAD und MCAD in das CAD-System Pro/Engineer Wildfire

3 Bedarf für die Ergänzung MID-spezifischer Partialmodelle um die Optik

Nach der erfolgreichen Demonstration der integrierten Entwicklung für Mechanik und Elektrik in MIDCAD wird im Folgenden die Ausrichtung der MID-Technologie auf die Optoelektronik dargelegt. Die gesteigerten Anforderungen für die Produktentwicklung optoelektronischer 3D-MID bezüglich der optischen Signalübertragung sowie der Unterstützung entsprechend neuer bzw. adaptierter Fertigungsverfahren erfordern das Einbeziehen fachspezifischer Vorgehensweisen aus der Optik. Den bereits vorhandenen Layouttools für optoelektronische Baugruppen auf flachen Leiterplatten fehlt, genauso wie den klassischen EDA-Systemen, jedoch die Voraussetzung zur Gestaltung von 3D-MID. Da eine Erweiterung der genannten Werkzeuge bezüglich räumlicher Schaltungsträger auf Grund der Ermangelung einer 3D-Entwicklungs-umgebung nicht möglich ist, verbleibt die Integration eines optischen Partialmodells in die oben beschriebene Methodik zur Konstruktion von 3D-MID und insbesondere in MIDCAD als Lösungsansatz (vgl. Bild 3).

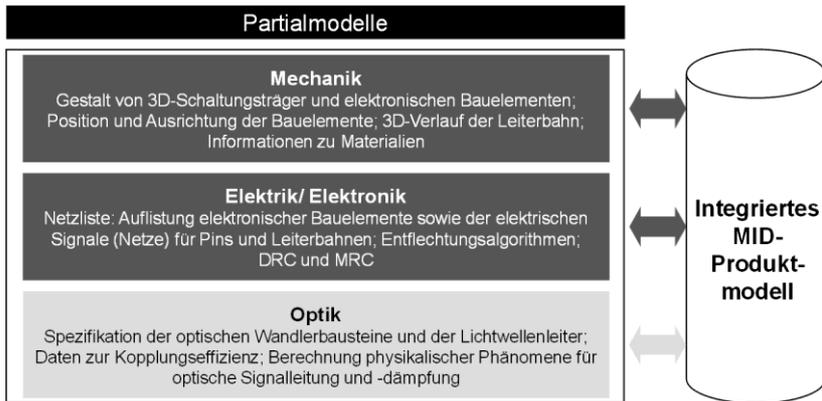


Bild 3: Die Partialmodelle enthalten domänenspezifische Informationen für MID-Produkte

4 Konzeption und Erstellung eines optischen Partialmodells

Etlche, in der MID-Konstruktionsmethodik bereits vorliegende Daten können auch zur Beschreibung optischer Elemente und Signalleitung dienen. Dazu zählt z. B. die Angabe von Materialien sowie deren Eigenschaften. Die Herausforderung liegt darin, die fehlenden Informationen zu identifizieren und eine geeignete Struktur zu deren Speicherung und Verwendung zu finden. Bei Betrachtung der Unterschiede zwischen elektronischen und optoelektronischen Baugruppen werden entscheidende Erkenntnisse gewonnen. Die optische Signalleitung in Wellenleitern hängt enorm von deren Gestalt in Form von Querschnitt und Verlauf entlang der Substratoberfläche ab, bedingt durch physikalische Phänomene wie Reflexion oder Brechung. Somit ist die Gestalt besonders für das funktionsgerechte Design zu berücksichtigen. Elektrische Leiterbahnen hingegen gewährleisten bei ununterbrochener Oberflächenführung stets einen Signalfluss. Gemeinsam ist beiden Signalleitern die Abhängigkeit vom eingesetzten Material und dessen Einfluss auf die Signaldämpfung bezüglich der Leiterlänge. Bei Lichtwellenleitern (LWL) unterscheiden sich allerdings Singlemode- und Multimodeleiter im Material und insbesondere in den zu Grunde liegenden physikalischen Gesetzen. Entscheidend ist zudem, ob die Lichtausbreitung mit dem Modell der Strahlen- oder Wellenoptik beschrieben und berechnet werden kann. Haben die Multimode-Lichtwellenleiter Ausmaße im zweistelligen Mikrometerbereich, genügt die strahlenoptische Betrachtung. Nähern sich die Maße der Wellenleiter jedoch dem einstelligen Mikrometerbereich und damit der Lichtwellenlänge an, müssen wellenoptische Phänomene wie die Beugung berücksichtigt werden. Auch hinsichtlich der

Kopplung an Signalquellen und -empfänger sind LWL diffiziler handzuhaben. Speziell die Lichtausbreitungsrichtung sowie die Kopplungseffizienz zu angrenzenden optischen Bausteinen müssen berücksichtigt werden. [9]

4.1 Grundlagen für die Inhalte des optischen Partialmodells

Als Quellen zur Ermittlung notwendiger Daten für das optische Partialmodell stehen u. a. Fertigungsverfahren zur Verfügung. Aktuell wird die Herstellung optoelektronischer Printed Circuit Boards (EOPCB) weitestgehend beherrscht, da es sich um Prozesse handelt, die sich an die Herstellung flacher elektronischer Leiterplatten anlehnen. Um LWL auch auf räumlichen Schaltungsträgern applizieren zu können, werden am Lehrstuhl FAPS bewährte Metallisierungsverfahren aus dem MID-Bereich wie das Aerosol Jetting adaptiert. Auch in Bezug auf die Bestückung optoelektronischer Bauelemente stehen modifizierte Montageprozesse aus der Elektronikproduktion zur Verfügung. Die genannten Verfahren und deren Fertigungssteuerung erfordern als Grundlage geeignete 3D-CAD-Daten unter Berücksichtigung von fertigungs-spezifischen Grenzen wie minimale Lichtwellenleiterbreiten oder Justagetoleranzen. Die gewonnenen Erkenntnisse sind im optischen Partialmodell als Datenquelle für MRC zu hinterlegen.

Neben dem fertigungsgerechten optischen Design muss auch die Funktion der Signalübertragung gewährleistet werden. Die Anforderungen an geeignete DRC müssen sowohl von den Ingenieurwissenschaften als auch von den Naturwissenschaften, allen voran dem Forschungsfeld Optik in der Physik, abgeleitet werden. Dies begründet sich in der Notwendigkeit des Aufbaus einer fundierten wissenschaftlichen Grundlage für die Betrachtung der optischen Elemente. Durch optische Modelle des optoelektronischen Layouts können die Gesetze der Physik einbezogen und die davon abhängenden Phänomene berechnet werden. Besonders das funktionsgerechte Design wird durch die optische Simulation des Signalgangs ermittelt. Bisher wurden im Vergleich zu räumlichen Baugruppen relativ einfache Designs für LWL auf bzw. in flachen Leiterplatten umgesetzt. Ein Beispiel für die Sicherstellung ihrer optischen Funktion ist die Simulation der optischen Signale mittels der beim Cooperative Computing & Communication Laboratory (C-LAB) in Paderborn entwickelten speziellen Simulations- und Entwurfsumgebung „OptoBoard Designer“ für leiterplattenbasierte optische Multimode-Wellenleiter-Verbindungen. Diese Software wurde am Lehrstuhl FAPS getestet und für die zukünftigen Einsatzmöglichkeiten in Verbindung mit MIDCAD evaluiert. Zur Auslegung räumlich angeordneter LWL ist allerdings eine Strategie bzw. Funktionserweiterung für die Anwendung in einer 3D-Entwicklungsumgebung zu ergänzen.

Durch das funktionsgerechte Design erweitert sich die Struktur des optischen Partialmodells um Design Rules und Simulationsmodelle.

4.2 Konzept zur Integration des optischen Partialmodells in das MID-Produktmodell

Der Identifizierung der relevanten Aspekte für ein optisches Partialmodell folgen die Überlegungen zu deren Integration in das bereits bestehende MID-Datenmodell. Analog zu den elektronischen Bauelementen müssen elektrooptische Wandlerbausteine samt Angabe der Lichtausbreitungs- bzw. Lichtempfangsrichtung und der Koppelleffizienz in die Bauteilbibliothek aufgenommen werden. Bei deren Platzierung sind strenge Vorgaben für die Verbindung mit LWL einzuhalten, um das anschließende Routing zu unterstützen bzw. nicht durch kreuzende Verbindungen zu verhindern. Ebenso ist auf eine niedrige Justagetoleranz zu achten, um die Ein- und Auskopplung zu den LWL zu gewährleisten, was eine erhöhte Positionsgenauigkeit in 3D-CAD erfordert.

Neben den Wandlerbausteinen sind auch die LWL in Gestalt und Funktion in das Modul für elektrische Leiterbahnen zu integrieren. Das Entflechten von LWL erfordert die Überprüfung der oben erwähnten Design Rules, die zusätzlich zu den bereits vorhandenen elektronischen gespeichert werden und als Input für die DRC dienen. Hierbei ist auch die bidirektionale datentechnische Einbindung optischer Simulationsprogramme vorzusehen, die abhängig von den Querschnitten der LWL entweder strahlenoptische oder wellenoptische Modelle verwenden, um Abweichung von bereits verifizierten Designs absichern zu können. Daneben werden auch MRC für optische Verfahren aufgenommen, so dass die Volumenmodellierung der LWL prozessspezifische Querschnitte der Lichtleiter berücksichtigt.

5 Ausblick

Geplant ist neben der Erweiterung der Designs von Lichtwellenleitern in große Flächen durch räumlich angeordnete optomechatronische Baugruppen auch die Simulation funktionsgerechter Designelemente mit einem anwendungsspezifisch adaptierten Raytracing-Tool. Die Beschränkung auf eine strahlenoptische Simulationsmethode genügt in diesem Fall, da lediglich Multimode-Lichtwellenleiter mit Ausmaßen im zweistelligen Mikrometerbereich zum Einsatz kommen.

Das fertigungsgerechte Design wird an Hand weiterer optischer Auftragsverfahren, deren Prozessparameter am Lehrstuhl FAPS untersucht werden, verfeinert. Zu den typischen Designelementen werden die jeweils relevanten

Prozesseinstellungen als auch die Materialkombinationen aus Auftragsmedium und Substrat in MIDCAD gespeichert.

Literatur

- [1] Feldmann, K.; Alvarez, C.; Zhuo, Y.: "Horizontal and Vertical Integration of Product Data for the Design of Molded Interconnect Devices", in: Proceeding of the 5th International Conference on Digital Enterprise Technology, Bath, 2007.
- [2] Forschungsvereinigung Räumliche Elektronische Baugruppen 3-D MID Technologien (Hrsg.): "3D-MID Technologie: Räumliche Elektronische Baugruppen; Herstellungsverfahren, Gebrauchsanforderungen, Materialkennwerte", Carl Hanser Verlag, München, 2004.
- [3] Franke, J.: "Integrierte Entwicklung neuer Produkt- und Produktionstechnologien für räumliche spritzgegossene Schaltungsträger (3-D MID)", Carl Hanser Verlag, München, 1995.
- [4] Franke, J.; Goth, C.; Fischer, C.; Pfeffer, M.: "Effiziente rechnergestützte Produktentwicklung für räumliche elektronische Baugruppen (3D-MID)", in: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 104 (2009) 11, S. 925-930.
- [5] Heininger, N.: "LDS macht 2K-Spritzguss überflüssig", in: Sonderdruck aus der K-Zeitung, Giesel Verlag GmbH, Isernhagen, 2004.
- [6] Maier, R.: "Strategien für einen produktorientierten Einsatz räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID)", Meisenbach Verlag, Bamberg, 2002.
- [7] Pahl, G.; Beitz, W. et al.: "Konstruktionslehre, Methoden und Anwendungen", Springer-Verlag, Berlin, 2007.
- [8] Zhuo, Y.: "Entwurf eines rechnergestützten integrierten Systems für Konstruktion und Fertigungsplanung räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3D-MID)", Meisenbach Verlag, Bamberg, 2007.
- [9] Ziemann, O.; Krauser, J.; Zamzow, P. E.; Daum, W.: "POF-Handbuch – Optische Kurzstrecken-Übertragungssysteme", Springer-Verlag, Berlin, 2007.