

FAU Studien aus dem Maschinenbau 385

Jochen Zeitler

Konzeption eines rechnergestützten
Konstruktionssystems für
optomechatronische Baugruppen

Jochen Zeitler

Konzeption eines rechnergestützten Konstruktionssystems für
optomechatronische Baugruppen

FAU Studien aus dem Maschinenbau

Band 385

Herausgeber der Reihe:

Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke

Prof. Dr.-Ing. Nico Hanenkamp

Prof. Dr.-Ing. habil. Tino Hausotte

Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein

Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt

Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack

Jochen Zeitler

Konzeption eines rechnergestützten Konstruktionssystems für optomechatronische Baugruppen

Dissertation aus dem Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung
und Produktionssystematik (FAPS)

Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke

Erlangen

FAU University Press

2022

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Bitte zitieren als

Zeitler, Jochen. 2022. *Konzeption eines rechnergestützten Konstruktionssystems für optomechatronische Baugruppen*. FAU Studien aus dem Maschinenbau Band 385. Erlangen: FAU University Press. DOI: 10.25593/978-3-96147-500-1

Das Werk, einschließlich seiner Teile, ist urheberrechtlich geschützt.
Die Rechte an allen Inhalten liegen bei ihren jeweiligen Autoren.
Sie sind nutzbar unter der Creative-Commons-Lizenz BY-NC.

Der vollständige Inhalt des Buchs ist als PDF über den OPUS-Server der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg abrufbar:
<https://opus4.kobv.de/opus4-fau/home>

Verlag und Auslieferung:

FAU University Press, Universitätsstraße 4, 91054 Erlangen

Druck: docupoint GmbH

ISBN: 978-3-96147-499-8 (Druckausgabe)
eISBN: 978-3-96147-500-1 (Online-Ausgabe)
ISSN: 2625-9974
DOI: 10.25593/978-3-96147-500-1

**Konzeption eines rechnergestützten
Konstruktionssystems für
optomechatronische Baugruppen**

Der Technischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg

zur
Erlangung des Doktorgrades Dr.-Ing.

vorgelegt von

Jochen Tobias Zeitler, M.Sc.

aus Lauf an der Pegnitz

Als Dissertation genehmigt
von der Technischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Tag der mündlichen

Prüfung: 22.06.2021

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke
Prof. Dr.-Ing. Roman Dumitrescu,
Universität Paderborn

Vorwort und Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS) der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU).

Mein besonderer Dank gilt dem Lehrstuhlinhaber und meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke für das in mich gesetzte Vertrauen und die Möglichkeit in einem inspirierenden Umfeld die vorliegenden Forschungsergebnisse niederzuschreiben. Ebenfalls gilt mein Dank auch Herrn Prof. Roman Dumitrescu für die Übernahme des Zweitgutachtens, Herrn Prof. Wartzack für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes sowie Herrn Prof. Stamminger als weiteres Mitglied der Prüfungskommission.

Diese Dissertation beruht zu Teilen auf Forschungsergebnissen, die im Rahmen der eng vernetzten DFG-Forschergruppe OPTAVER entstanden sind. Die intensive und fachlich fundierte Zusammenarbeit war ein wertvoller Baustein für meinen wissenschaftlichen Fortschritt. Aus diesem Grund gilt mein Dank auch allen an diesem Projekt beteiligten Personen.

Herzlich bedanke ich mich auch bei allen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern, mit denen ich zusammenarbeiten durfte. Namentlich hervorheben möchte ich hier insbesondere meine Kollegen und Freunde Florian Faltus, Hannah Riedle, In Seong Yoo, Jonathan Fuchs, Thomas Reiterberger, Eike Schäffer, Jupiter Bakakeu, Eva Russwurm, Hans Fleischmann, Johannes Kohl, Christian Fischer und natürlich meinen Forschungsbereichsleiter Matthias Brossog.

Auch allen Studierenden, deren Arbeiten wertvolle Beiträge zu den durchgeführten Forschungsaktivitäten geleistet haben, danke ich vielmals. Insbesondere möchte ich mich aber bei Andreas Reichle bedanken, dessen herausragende Talente, Fähigkeiten und Interessen den Rahmen des Möglichen erweitert haben und stets ein wertvoller Diskussionspartner für die vielen spannenden Fragestellungen war.

Meiner Familie möchte ich für die Unterstützung und für den stetigen Rückhalt in allen Lebenslagen danken, die mich auf meinen Weg gebracht haben. Besonderer Dank gilt außerdem meiner Partnerin Tamara für die bedingungslose und aufopferungsvolle Unterstützung während dieser Zeit.

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis.....	ix
Abbildungsverzeichnis.....	xiii
Tabellenverzeichnis.....	xix
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	4
1.2 Zielstellung und Anspruch.....	6
2 Aufbau optomechatronischer Baugruppen	9
2.1 Grundlagen zur Lichtführung in optischen Leitern und optischen Technologien.....	9
2.1.1 Überblick zur Physik des Lichts.....	10
2.1.2 Lichtausbreitung in optischen Wellenleitern	13
2.1.3 Dämpfung und Dispersion.....	15
2.2 Technologie elektrooptischer und optomechatronischer Baugruppen	18
2.3 Additiv gefertigte Lichtwellenleiter.....	23
3 Methoden der domänenorientierten Produktentwicklung ...	27
3.1 Allgemeine Vorgehensweisen	27
3.1.1 VDI-Richtlinie 2221 – Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme	28
3.1.2 VDI-Richtlinie 2206 – Entwicklungsmethodik für mechatronische Produkte	29
3.1.3 Modellbasiertes Systems Engineering (MBSE).....	31
3.2 Entwurf von elektronischen und elektrooptischen Schaltungen sowie von MID	33
3.2.1 Generelle Vorgehensweisen für elektronische und elektrooptische Baugruppen	33
3.2.2 Vorgehen im Elektronikentwurf.....	35
3.2.3 Vorgehen für räumliche elektronische Baugruppen (3D-MID)	37
3.2.4 Vorgehen im elektrooptischen Entwurf	39
3.3 Bewertung.....	40
4 Funktionsweise von softwarebasierten grafischen Ingenieurssystemen.....	41
4.1 Grundlegender Aufbau.....	41

4.2	CAD-Systeme	42
4.3	3D-Modelle	44
4.3.1	Constructive Solid Geometry	45
4.3.2	Boundary Representation.....	46
4.3.3	Hybride Modelle	48
4.4	Besonderheiten der Bearbeitung von 3D-Modellen im CAD ..	49
4.4.1	Splines und NURBS	49
4.4.2	Lineare Algebra in der Computergrafik	50
4.5	Zusammenfassung	53
5	Handlungsbedarf für die rechnergestützte Modellierung von 3D-Opto-MID	55
5.1	Allgemeine funktionale Anforderungen für ein 3D-Opto-Mechatronik-CAD-System	55
5.2	Übergreifende Aspekte	56
5.2.1	Aspekte des Designs	57
5.2.2	Aspekte resultierend aus der Fertigung	58
5.2.3	Aspekte eingesetzter Softwaresysteme	58
5.3	Zusammenfassung	59
6	Konzeption zum Aufbau und Ablauf eines 3D-Opto-Mechatronik-CAD-Systems (OMCAD).....	61
6.1	Konzept einer domänenübergreifenden Methodik für optomechatronische Bauteile	61
6.2	Technische Ansätze für die Integration der Funktionsbausteine.....	63
6.2.1	Stand-Alone-System	64
6.2.2	Schnittstellenbasiertes System	64
6.2.3	Modulares System (Plug-In)	65
6.2.4	Vergleich der Ansätze und Fazit.....	65
6.3	Überlegungen zum Aufbau und Ablauf eines rechnergestützten 3D-Opto-MID-Systems.....	67
6.3.1	Schichtenmodell	67
6.3.2	Programmablauf	70
7	Untersuchungen zu Entflechtungsstrategien für Leiterstrukturen	73
7.1	Kürzeste wegbasierte Algorithmen	74
7.1.1	Dijkstra's Algorithmus.....	75

7.1.2	A* Algorithmus	77
7.2	Rasterbasierte Verfahren.....	78
7.2.1	Der Lee-Algorithmus.....	78
7.2.2	Soukup's Algorithmus	80
7.2.3	Der Hadlock-Algorithmus.....	81
7.3	Rasterlose Verfahren.....	83
7.3.1	Hightower-Algorithmus	83
7.3.2	Mikami-Tabuchi's Algorithmus.....	86
7.3.3	Algorithmus für die Rechteck- und Linienexpansion	86
7.4	Topologische Verfahren	89
7.5	3D-Routing	90
7.5.1	Kombiniertes B-Rep-Planarisierungsrouting.....	91
7.5.2	Algorithmus für manuelles 3D-Routing und Oberflächenschnitte	93
7.6	Zusammenfassung und Bewertung	95
8	Prototypische Integration optomechatronischer Funktionen in ein 3D-Opto-MID Designsystem	101
8.1	Allgemeines Anwendungsdesign und Aufbau	101
8.2	Schaltungsträger- und Substratmodellierung	105
8.3	Schaltungssynthese.....	106
8.4	Wellenleitermodellierung, Entflechtung und Verdrahtung.....	115
8.5	Design- und Fertigungsrichtlinien	127
8.6	Absicherung des Designs mittels optischer Simulationsverfahren	135
8.6.1	Methode zur Simulation optischer Systeme	135
8.6.2	Raytracing-Methode	135
8.6.3	Optische Simulation mittels des Systems RAYTRACE	137
8.6.4	Aufbereitung von CAD-Daten für die nicht-sequentielle strahlenoptische Simulation.....	139
8.7	Generierung von Fertigungsdaten.....	143
8.8	Bewertung der Arbeiten	143
9	Zusammenfassung und Ausblick.....	147
10	Summary and outlook.....	151
	Literaturverzeichnis.....	155

Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Ausgeschriebene Bedeutung
2D	Zweidimensional
3D	Dreidimensional
3D-Opto-MID	3D-Optomechatronic Integrated Devices
ACC	Adaptive Cruise Control
ALU	Arithmetisch-logische Einheit (engl.: arithmetic logic unit)
API	Application Programming Interface
ASME	American Society of Mechanical Engineers
BFS	Breadth-First Search
BGA	Ball Grid Array
b-rep	boundary representation
B-Spline	Basis-Spline
CAD	Computer-Aided Design
CAE	Computer-Aided Engineering
CAM	Computer-Aided Manufacturing
CAX	Computer-Aided X
CFD	Computational Fluid Dynamics
CISC	Complex Instruction Set Computer
cm	Zentimeter
CSG	Constructive Solid Geometry
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
DFS	Depth-First Search
DIN	Deutsches Institut für Normung
DLL	Dynamic Link Library
DRC	Design Rule Check
ECAD	electrical CAD
EDA	Electronic Design Automation
EOCB	Electro Optical Circuit Board
FAPS	Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik
FDTD	Finite Difference Time Domain
FEM	Finite Elemente Methode
HDL	Hardware Description Language

IC	Integrated Circuit
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IGES	Initial Graphics Exchange Specification
IKT	Informations- und Kommunikationstechnologie
INCOSE	International Council on Systems Engineering
IoT	Internet of Things
IP	Internet Protocol
ISO	Internationale Organisation für Normung
LD	Laserdiode
LED	light-emitting diode
LWL	Lichtwellenleiter
MAS	Mikroarchitektur-Spezifikation
MBSE	Modellbasiertes Systems Engineering
MVPE	Modellbasierte Virtuelle Produktentwicklung
MCAD	Mechanical CAD
MCM	Multi-Chip-Modul
MID	Mechatronic Integrated Devices
mm	Millimeter
MM	Multimode
MRC	Manufacturing Rule Check
NA	Numerische Apertur
NAND	not and
NC	Numerical Control
NURBS	non-uniform rational B-Spline
OCAD	Optical CAD
ODA	Optical Design Automation
OFL	overfilled launch bandwidth
OPTAVER	Optische Aufbau- und Verbindungstechnik für baugruppenintegrierte Bussysteme
PCB	Printed Circuit Board
PCF	Polymer Cladded Fiber
PEP	Produktentwicklungsprozess
PLM	Product-Lifecycle-Management
PMMA	Polymethylmethacrylat
POF	polymeroptische Faser
RFID	radio-frequency identification

RISC	Reduced Instruction Set Computer
RTL	Register Transfer Level
SM	Singlemode
SMD	surface-mounted device
STEP	Standard for the exchange of product model data
THD	through-hole device
UI	User Interface
UV	Ultraviolett
VCSEL	vertical-cavity surface-emitting laser
VDE	Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik
VDE	Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VIA	vertical interconnect access
VLSI	very-large-scale integration
ZVEI	Zentralverband der Elektronikindustrie

Symbol	Einheit	Beschreibung
∇		Nabla-Operator (Vektor dessen Komponenten partielle Ableitungsoperatoren $\frac{\partial}{\partial x_1} \dots \frac{\partial}{\partial x_n}$ sind)
\vec{E}	$\frac{V}{m}$	Magnetische Feldstärke
$\vec{\rho}$	$\frac{As}{m^2}$	Ladungsdichte
\vec{D}	$\frac{As}{m^2}$	Dielektrische Verschiebung
\vec{J}	$\frac{A}{m^2}$	Stromdichte
\vec{B}	$\frac{Vs}{m^2}$	Magnetische Induktion
\vec{H}	$\frac{A}{m}$	Magnetische Feldstärke
ε	$\frac{As}{Vm}$	Dielektrische Funktion
μ	$\frac{Vs}{Am}$	Magnetische Permeabilität
σ	$\frac{A}{m}$	Spezifische elektrische Leitfähigkeit
c	$\frac{m}{s}$	Lichtgeschwindigkeit
L	m	Länge
P	W	Leistung

Abbildungsverzeichnis

Bild 1:	Globaler Marktanteil und globale Entwicklung in der Elektronik (angelehnt an [1])	1
Bild 2:	Verschiedene Beispiele für MID-Bauteile (Bildquellen: HARTING Mitronics, LDK, mechatronic) [8] ...	3
Bild 3:	Exemplarische Darstellung eines 3D-Opto-MID inklusive seiner Bestandteile	4
Bild 4:	Domänenübergreifende Entwicklungsabläufe von optomechatronischen Komponenten.....	6
Bild 5:	Die elektromagnetische Welle [20, 22]	11
Bild 6:	Beschreibung des Strahlengangs.....	12
Bild 7:	Prinzip der Reflexion (links), Refraktion (mitte) und Totalreflexion (rechts).....	13
Bild 8:	Ausbreitung des Lichts in einer zylindrischen Stufenindexfaser	14
Bild 9:	Planarer Wellenleiter mit einer Schichtdicke von d und Stufenindexprofil	15
Bild 10:	Dispersionsmechanismen bezüglich Ausbreitungspfad und Wellenlänge	17
Bild 11:	Aufbau einer optischen Faser (in Anlehnung an [27])	18
Bild 12:	Varianten von unterschiedlichen Wellenleiterbauformen nach [31]	19
Bild 13:	Topologie einer optischen Übertragungsstrecke nach [32]	20
Bild 14:	Schema einer elektrooptischen Leiterplatte (angelehnt an [33]).....	20
Bild 15:	Prinzipdarstellung der Prozessketten zur Herstellung planarer Lichtwellenleiter in Anlehnung an [33, 36, 37].....	22
Bild 16:	Prinzipaufbau einer 3D-Opto-MID Baugruppe	23
Bild 17:	Vier mögliche Konfigurationen von gedruckten Wellenleitern nach [38]	24

Bild 18: Aufbau eines gedruckten polymeren Lichtwellenleiters mittels Aerosoljetdruck.....	24
Bild 19: Aerosol-Jet Funktionsprinzip nach [47] [40].....	26
Bild 20: Vorgehen nach VDI 2221 [52].....	28
Bild 21: V-Modell der VDI 2206 für den mechatronischen Produktentwicklungsprozess (PEP) [56].....	30
Bild 22: Vorgehensmodell der modellbasierten virtuellen Produktentwicklung nach [61]	32
Bild 23: Allgemeiner Entwurfsprozess elektrischer-, optischer und elektrooptischer Schaltungen (in Anlehnung an [64])	34
Bild 24: Wichtige Schritte des digitalen Entwurfsprozesses mit dessen Zweck und Ergebnis basierend auf [71]	37
Bild 25: Iterationen im Entwicklungsprozess zwischen EDA/ECAD und MCAD nach [8]	38
Bild 26: Integrierter Entwurfsprozess elektrooptischer Leiterplatten in Anlehnung an [72].....	39
Bild 27: Funktionsbausteine eines Volumenmodelliersystems basierend auf [74]	42
Bild 28: Beispiel der Benutzeroberfläche zur EDA-Software CADSTAR PCB Layout der Firma Zuken [70]	43
Bild 29 Beispiel der MCAD-Oberfläche für für das PLM-System Siemens NX	44
Bild 30: Klassifizierung von 3D-Modellen	45
Bild 31: Halbraum eines begrenzten Zylinders und CSG-Modell bestehend aus einem Basisquader und einem Zylinder	46
Bild 32: Dekomposition eines Volumenkörpers in die Elemente einer B-Rep Beschreibung.....	47
Bild 33: Datenstruktur des B-Rep Modells	48
Bild 34: Beispiele für unterschiedliche B-Spline-Flächen (links – ändernde Steigung in u-Richtung, rechts – ändernde Steigung in u- und v-Richtung).....	50
Bild 35: Rotation um eine beliebige Achse im 3D-Euklidischen Raum	51

Bild 36: Entwurfsverfahren für integrierte optomechatronische Bauteile auf [95] basierend und erweitert in [P7]	62
Bild 37: Vor- und Nachteile verschiedener Systeme für eine 3D-Opto-MID-Anwendung	65
Bild 38: Architektur eines konzeptionellen OMCAD-Systems.....	68
Bild 39: Typischer Entwicklungsablauf einer 3D-Opto-MID-Applikation (am Beispiel von NX und RAYTRACE)	70
Bild 40: Allgemeine Übersicht zu Vorgehensparadigmen im Routing in Anlehnung an [102]	74
Bild 41: Beispiel für Dijkstra's kürzester Pfad Algorithmus.....	76
Bild 42: Beispiel für die Wegfindung mit dem A*-Algorithmus im Raster	77
Bild 43: Darstellung des LEE-Algorithmus.....	79
Bild 44: Vergleich von Lee- (links) und Soukup-Algorithmus (rechts) ...	80
Bild 45: Pfadfindungsbeispiel unter Verwendung des Hadlock-Algorithmus für orthogonales Routing.....	82
Bild 46: Beschreibung der vom Hightower-Algorithmus verwendeten Definitionen (nach [113])	83
Bild 47: Beispiel für die Wegfindung mit dem Algorithmus von Hightower.....	85
Bild 48: Beispiel für die Pfadsuche mit dem Algorithmus von Mikami-Tabuchi.....	86
Bild 49: Beispiel für eine Rechteck-Expansion.....	87
Bild 50: Beispiel für die Linien-Expansion und den daraus abgeleiteten Suchbaum	88
Bild 51: Beispiel für topologisches Routing mittels Delaunay-Triangulation mit möglichem (l.) und endgültigem (r.) Routingpfad [120, 122]	89
Bild 52: Kombiniertes B-Rep Planarisierungsrouting - Planarisierung, Abhängigkeitsgraph, Routing und Rücktransformation [P6]	91
Bild 53: Algorithmus für manuelles 3D-Routing und Oberflächenschnitte	94

Bild 54: Abhängigkeiten und Ordnerhierarchien der OMECAD Applikation.....	102
Bild 55: dreistufiges Modell der Software (Benutzeroberfläche, Programmlogik und Datentypen)	103
Bild 56: Benutzeroberfläche der 3D-Opto-MID-Applikation	104
Bild 57: Benutzerdefinierte Menü-Definition der 3D-Opto-MID-Applikation.....	104
Bild 58: Beispiel für Definition von Foliensubstraten	105
Bild 59: Schema einer Netzliste laut .sch-Datenformat	107
Bild 60: Struktur einer Bauteilbibliothek	110
Bild 61: Algorithmus für den Netzlistenimport	111
Bild 62: Dialogfeld Netzlistenimport	112
Bild 63: Beispiel für eine importierte 3D-Netzliste (die blauen Linien spiegeln die logischen Verknüpfungen zwischen den Bauteilen wider)	113
Bild 64: Dialog zur Platzierung der Komponenten	114
Bild 65: Algorithmus für den Platzierungsdialog	115
Bild 66: Interaktive Platzierung der Bauteile mit integrierter DRC-Prüfung und Erhalt der Schaltungsinformationen durch Rubberlines	115
Bild 67: Beispiele für verschiedene Oberflächentypen anhand zweier prototypischer Demonstratoren	116
Bild 68: Dialogfenster Route on Surface	118
Bild 69: Erstellung von Krümmungsradien im Layout	119
Bild 70: Manuelles Layout mit eingefügten Kurvensegmenten.....	120
Bild 71: Routing-Dialog in NX	121
Bild 72: Funktionsweise des Rasterexpansionsalgorithmus	122
Bild 73: Beispiel für Auto-Interaktives Routing	124
Bild 74: Dialog zur Definition der Wellenleiterparameter	125
Bild 75: Erstellung einer Volumengeometrie für Wellenleiter	126

Bild 76: Beispiel für ein Layout mit platzierten Komponenten, Foliensubstrat und optischen Leitern im 3D-Opto-MID Tool ..	127
Bild 77: Ergebnisse für zulässige Krümmungsradien nach [128, P13]	129
Bild 78: Bedienoberfläche zur Durchführung der Design Rule Checks ...	131
Bild 79: Ergebnis der Stetigkeitsanalyse	132
Bild 80: Durchführung des Distance Checks	133
Bild 81: Übersicht der möglichen Ergebnisse zum Radius Check Werkzeug (ausschließliche Berücksichtigung von Minima bei Krümmungen)	134
Bild 82: Radius-Check-Werkzeug (Analyse von Radien bei sich ändernden Kurvenverläufen)	134
Bild 83: Schnittpunkt einer kugelförmigen Oberfläche mit einem Strahl	137
Bild 84: Aufbau eines Wellenleitersegments nach RAYTRACE-Topologie	138
Bild 85: Numerische Apertur der Eingangslinse	139
Bild 86: Vergleich der Darstellungsformen von CAD (links) und optischen Simulationssystem (rechts)	140
Bild 87: RAYTRACE-Export-Dialog	141
Bild 88: Simulation von unterschiedlichen Wellenleitertypen in RAYTRACE	142

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Funktionale Anforderungen für eine 3D-Opto-MID-Applikation	59
Tabelle 2: Aspekte zur exemplarischen Integration eines 3D-Opto-MID Softwaresystems.....	60
Tabelle 3: Ablauf des Dijkstra Algorithmus	75
Tabelle 4: Ablauf des LEE-Algorithmus.....	79
Tabelle 5: Hadlock Algorithmus	82
Tabelle 6: Hightower Algorithmus	84
Tabelle 7: Klassifizierung und Bewertung der Eigenschaften der untersuchten Routingverfahren	95
Tabelle 8: Vor- und Nachteile der untersuchten Routingverfahren.....	97
Tabelle 9: Physikalische und fertigungstechnische Einflüsse auf die Güte der Wellenleiter	128
Tabelle 10: Spezifikation der exportierten Segmente.....	142
Tabelle 11: Gegenüberstellung von Anforderungen und Erfüllungsgrad ..	144

1 Einleitung

Laut dem Zentralverband der Elektronikindustrie (ZVEI) ist die Elektrobranche einer der weltweit größten Industriezweige mit einem Produktionsvolumen von rund 4,4 Billionen Euro (Stand: 2018). Bemerkenswert ist dabei vor allem das Wachstum von über 125% zwischen 2003 und 2018 (siehe Bild 1). Insbesondere die asiatischen Märkte profitieren von der enormen Nachfrage nach integrierter Elektronik. Obwohl der Markt für Elektronik in Europa stetig wächst, kann er mit der Entwicklung in Asien bei weitem nicht Schritt halten. Um sich vom Billigmarkt abzugrenzen, der sich vor allem in Niedriglohnländer verlagert, ist es unvermeidlich, sich verstärkt um die Entwicklung neuer Schlüsseltechnologien zu bemühen. [1]

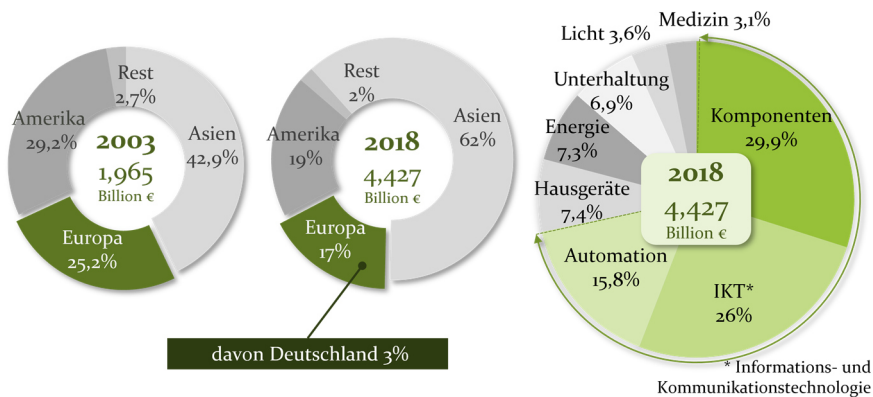


Bild 1: Globaler Marktanteil und globale Entwicklung in der Elektronik (angelehnt an [1])

Die Entwicklung neuer ressourcen- und energieeffizienter Produkte wird durch tiefergehende und stärkere Vernetzungen von Anwendern, Maschinen und intelligenten Systemen ermöglicht. Als Beispiel werden im Automobilbereich Fahrassistenzsysteme sicherer, Bordrechner senken den Energieverbrauch und Infotainmentsysteme steigern den Komfort während der Fahrt [2, 3]. Zusätzliche integrierte Videokameras, Radarsysteme oder 3D-Laser zur Abstandsmessung senken die Belastung für den Fahrer und vermindern die Reaktionszeit [4].

Als Folge dieser Vernetzung werden technische Anwendungen immer komplexer und vereinen eine große Zahl an Baugruppen auf begrenztem Raum. Gleichzeitig steigen die Aufgaben, die elektrische Schaltungen erfüllen müssen. Hinzu kommt der Effekt, dass sich Bandbreitenanforderungen durch die Masse an zu übertragenden Daten stetig erhöhen. So ist zu erwarten, dass sich der Datenverkehr über IP v4/v6 in den kommenden

Jahren bis zum Jahr 2022 im Vergleich zu 2017 nahezu vervierfachen wird [5]. Im privaten Bereich haben sich Techniken und Angebote wie File Sharing, Video on demand oder Videokonferenzen in immer höherer Qualität durchgesetzt und tragen zu einem wesentlichen Teil des aufkommenden Datenverkehrs bei. Hinsichtlich der zukünftigen Entwicklung der weltweit generierten Datenmengen wird in einer Studie des Festplattenherstellers Seagate in Zusammenarbeit mit dem Marktforschungsinstitut IDC, eine Steigerung um das Zehnfache bis zum Jahr 2025 prognostiziert. [6]

Dabei betrifft diese Entwicklung nun zunehmend auch die Industrie. Beispielhafte Bereiche sind die Übertragung von Mobil- und Echtzeitdaten, das Internet der Dinge und Machine Learning. In einer modernen vernetzten Fabrik erzeugen Maschinen und Anlagen permanent große Datenmengen. Mit deren Hilfe können beispielsweise Fehler frühzeitig erkannt oder die Effizienz der Anlagen gesteigert werden [7]. Im Gegensatz zu den bisherigen, aus dem privaten Umfeld kommenden Datenquellen, wird der Zuwachs im nächsten Jahrzehnt durch Datenverkehr aus der Produktion geprägt sein. Diese Entwicklung betrifft z.B. die Automation und Machine-to-Machine-Technologien [6].

Mit der steigenden Anzahl neuer Anwendungen steigen auch die Anforderungen höhere Datenmengen zu verarbeiten. Dies lässt sich darüber erklären, dass insbesondere im industriellen Umfeld Maschinen intelligenter werden und mehr Funktionalitäten in sich vereinen. Um diese Entwicklung abzusichern, ist der Einsatz von Techniken aus verschiedenen Ingenieursdisziplinen notwendig. Waren einst Automaten rein maschinenbauliche Erzeugnisse, so entwickelten sich diese zu hochintegrierten elektromechanischen Systemen weiter. Eine der wichtigsten Voraussetzungen für diese Entwicklungen war hierbei die Leiterplatte – das Printed Circuit Board (PCB) [8]. Für neuartige Anwendungen haben Leiterplatten jedoch einen entscheidenden Nachteil: Ihre elektromechanische Integration. Durch die planare Bauweise ist die räumliche Gestaltungsfreiheit stark eingeschränkt und stellt zunehmend ein Problem bei komplexen technischen Systemen dar.

Lösungen zu dieser Problemstellung sind jedoch bereits vorhanden: Eine hohe Dichte an Integration bieten die sogenannten Mechatronic Integrated Devices (MID). Dabei wird eine elektrische Schaltung direkt auf Bauteiloberflächen aufgebracht, ohne dass eine zusätzliche Leiterplatte benötigt wird (siehe auch Beispiele in Bild 2).

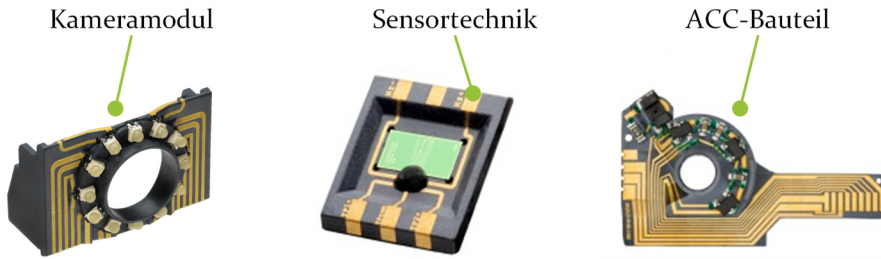


Bild 2: Verschiedene Beispiele für MID-Bauteile (Bildquellen: HARTING Mitronics, LPKF, ze mechatronic) [9]

Für das Verständnis von MID ist zudem entscheidend, dass neben der hohen Dichte an räumlicher Integration auch die stoffliche Verbindung zwischen Komponenten zur Erfüllung der Funktionsvielfalt erfasst wird. Die Vorteile von MID-Bauteilen ergeben sich vor allem durch das Zusammenwirken verschiedener funktionaler Eigenschaften aus unterschiedlichen Disziplinen wie Maschinenbau, Elektrotechnik und Informatik [9–12]. Der Einsatz dieser Bauteile ist für typische Anwendungsszenarien in der Medizintechnik (z.B. Hörgeräte), im Konsumerbereich (z.B. Smartphoneantennen), im Automobilbereich oder in der Industrieautomatisierung (RFID Antennen) relevant [13].

Dennoch bleiben bei diesen elektrisch geprägten Baugruppen und Netzwerken Herausforderungen bestehen. Diese sind z.B.:

- die Emission elektromagnetischer Wellen,
- das vergleichsweise hohe Gewicht,
- die Anzahl an Komponenten,
- sowie der Aufwand zur Isolierung.

Für diese Problemstellungen werden in der aktuellen Forschung erste Lösungsansätze propagiert, wie beispielsweise die Integration optischer Netzwerke in elektromechanische Bauteile. Insbesondere Automobil-, Luftfahrt- und Industrie 4.0 Anwendungen profitieren von höherer elektromagnetischer Verträglichkeit und niedrigerem Gewicht. [14]

Neben diesen Punkten sind besonders die hohe Bandbreiten-Energie-Effizienz ($\frac{\text{Gbit}}{\text{s}\cdot\text{mW}}$) sowie der geringe Platzbedarf ($\frac{\text{Gbit}}{\text{s}\cdot\text{mm}^2}$) optischer Verbindungen hervorzuheben [15]. Die photonenbasierte Erfassung von Informationen mittels Sensorik oder Kameras kann wichtige Datengrundlagen schaffen – sei es für die Überwachung und Steuerung der Produktion, das autonome Agieren von Robotern und Fahrzeugen oder die persönliche Gesundheitsvorsorge. Es ist zu erwarten, dass klassische diskrete Bauelemente von

hochintegrierten photonischen Technologien abgelöst werden [16]. Dabei werden bereits heute kostengünstigere Polymere für die optische Datenübertragung verwendet. Unter diesen Voraussetzungen liegt es nahe, die Entwicklung in diesem Bereich zu fokussieren und mögliche Anwendungen neu zu erdenken. Einher damit geht die Anforderung neue Produktions- und Entwicklungsverfahren zu erforschen, um optisch geprägte Produkte zu realisieren.

1.1 Motivation

Die Integration elektrischer Funktionen in mechanische Bauteile wurde in den letzten 20 Jahren intensiv erforscht. In Anbetracht der Potentiale, welche die Integration der Optik in elektrische bzw. mechatronische Bauteile bietet, liegt deshalb die Erforschung einer neuen Klasse an interdisziplinären Produkten nahe. Bisher basieren Lichtwellenleiter zumeist auf optischen Fasern oder planaren elektrooptischen Leiterplatten. Der Schwerpunkt aktueller Forschung verfolgt das Ziel einer vollständigen Integration optischer Funktionen in dreidimensionale und räumlich komplexe Bauteile. Diese stellen eine Kombination aus bekannter MID-Technologie und dem Applizieren optischer Strukturen dar, sogenannter **3D-Opto-MID** (siehe Bild 3). Um diese Produkte herstellen zu können, werden neue Verfahren und Technologien zur stabilen und effizienten Produktion benötigt.

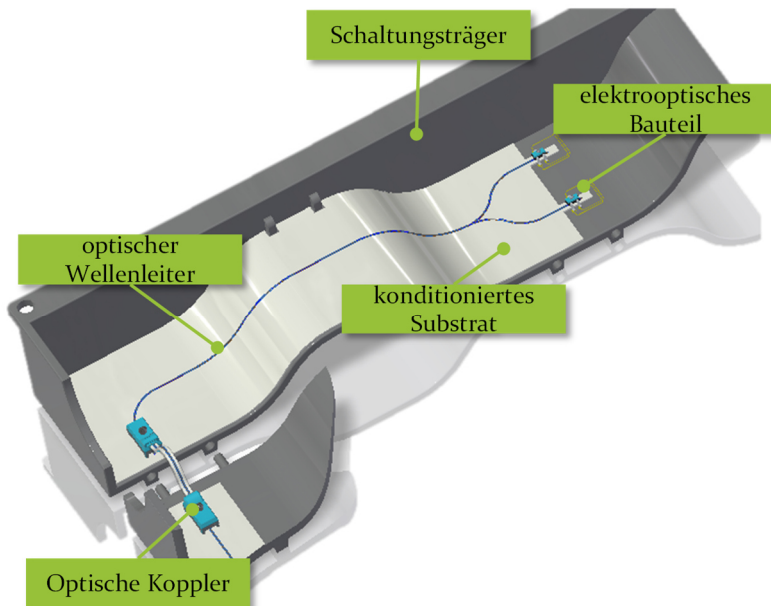


Bild 3: Exemplarische Darstellung eines 3D-Opto-MID inklusive seiner Bestandteile

Entsprechend der produktionstechnologischen Aspekte ist zudem der Planungsprozess für stabile Systeme und Anwendungen entscheidend. Dabei hat sich der Einsatz von Computermethoden zur Lösung wissenschaftlicher und technischer Problemstellungen bereits in Bereichen, wie der mechanischen, elektrischen und mechatronischen Entwicklung, als äußerst wirkungsvoll erwiesen.

Im Planungsprozess neuer Produkte und Produktionsanlagen wird diese Klasse rechnergestützter Werkzeuge als Engineering-Software bezeichnet. Selbige Software basiert auf mathematischen Modellen, die sowohl analytische als auch numerische Verfahren enthalten. Das Ziel dieser Engineering-Software ist, einen oder mehrere Aspekte eines realen oder geplanten Systems zu erfassen. Obwohl moderne Computer über eine enorme Rechenleistung verfügen, wird immer noch auf robuste Algorithmen gesetzt, um die Verarbeitungszeit gering zu halten und fehlerhafte Lösungen zu reduzieren. Wissensbasierte Engineering-Software steigert die Produktivität des Benutzers insbesondere im Konstruktionsprozess, indem sie Daten in explizites Wissen umwandelt. Das kann auf verschiedene Weise geschehen: So können beispielsweise geometrische, elektrische und optische Daten aus der Fertigung erfasst und verwendet werden, um Konstruktionsregeln festzulegen. Diese helfen den Produktentwicklern, indem sie Fehlentwicklungen im Allgemeinen aufdecken. Dabei gilt: je komplexer das System, desto schwieriger ist die Realisierung einer solchen impliziten Argumentation. Hingegen sind in einigen Fällen bereits kurze Benachrichtigungen in der Benutzeroberfläche mit Hinweisen auf Probleme hilfreich, um auf Fehler frühzeitig aufmerksam zu machen [8]. Ein Beispiel findet sich im Entwurf von mechanischen Bauteilen und elektronischen Schaltungen. Diese greifen auf ein großes Portfolio an etablierten Computer-Aided Design (CAD) bzw. Electronic Design Automation (EDA-) Softwaretools zurück. So können z.B. Leiterplatten sowie Produktionsabläufe umfangreich simuliert oder verschiedenste Konfigurationen von Bauteilplatzierungen zur Bauraumausnutzung getestet werden. Im Gegensatz dazu ist für die relativ junge Technologie von MIDs, welche eben diese Integration aus Mechanik und Elektrik beschreibt, nur eine kleine Anzahl an Softwarelösungen vorhanden. Durch die in den Vordergrund tretende Ingenieursdisziplin der Optik erweitern sich diese Herausforderungen zusätzlich.

Daraus lässt sich der zukünftige Bedarf an Werkzeugen ableiten, die eine fertigungs- und funktionsgerechte Konstruktion räumlicher optomechanischer Strukturen erlauben. Diese müssen Funktionen aus dem Mechanical CAD (MCAD), Electrical CAD (ECAD) und Optical CAD (OCAD) vereinen. Da bisher in diesem Bereich keinerlei Lösungen vorhanden sind,

ist eine grundlegende Erforschung dieser neuartigen Systeme zwingend notwendig.

1.2 Zielstellung und Anspruch

Vor diesem Hintergrund soll die Arbeit einen Beitrag für die Entwicklung integrierter optomechatronischer Baugruppen leisten. Ziel ist es optische Gegebenheiten im Zusammenspiel mit der Disziplin der Mechatronik in einem ganzheitlichen Produktentwicklungsprozess zur Entwicklung optomechatronischer Baugruppen zu verwirklichen (siehe auch Bild 4).

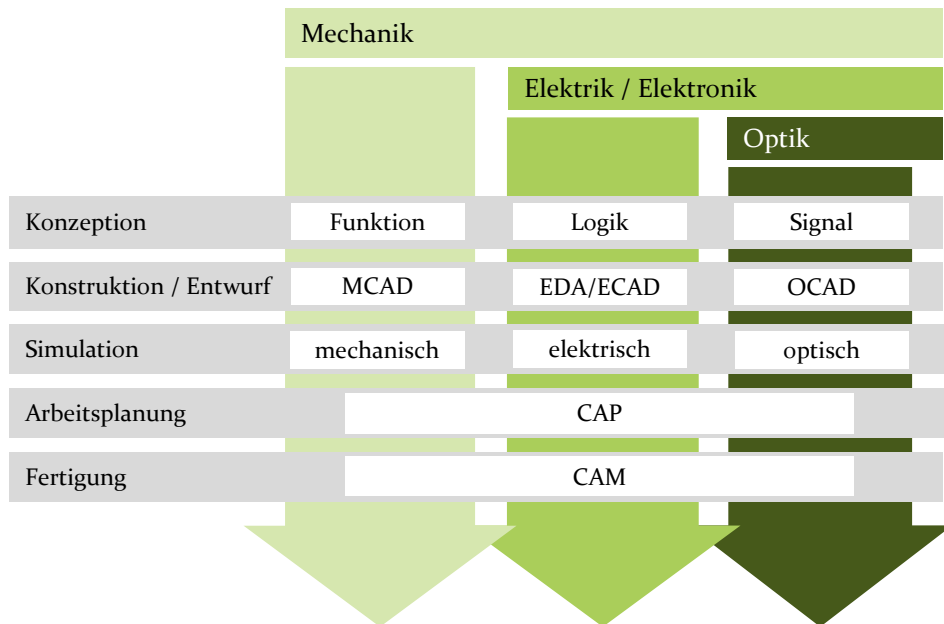


Bild 4: Domänenübergreifende Entwicklungsabläufe von optomechatronischen Komponenten

Dazu müssen Herangehensweisen zum Entwurf solcher Produkte mittels eines rechnergestützten Modellersystems aufgezeigt und evaluiert werden. Letzteres benötigt, wie in einem konventionellen CAD-System, eine entsprechende grafische Entwicklungsumgebung, funktionelle Strukturen zur Integration von elektrischen Schaltungen sowie Funktionalitäten für den Entwurf optischer Netze. Dafür ist es notwendig, relevante Teilaspekte und zu realisierende Komponenten eines solchen Systems zu identifizieren. Basierend auf diesen Ergebnissen soll eine Vorgehensweise zur optomechatronischen Produktentwicklung abgeleitet werden. Es spielen hierbei physikalische und fertigungsbedingte Einflüsse ebenso eine Rolle, wie

die Gegebenheiten bekannter rechnergestützter Konstruktionssysteme. Aus diesem Zusammenwirken von Software und technologischen Randbedingungen sollen Möglichkeiten zur Umsetzung eines neuartigen Systems erarbeitet werden. Der Fokus dieser Arbeit liegt dabei immer auf der rechnergestützten Planung neuer Layouts von optomechatronischen Baugruppen. Aus diesem Grund ist auch ein grundlegendes Verständnis für den Aufbau graphischer Ingenieurssysteme sowie Pfadplanungsstrategien für optische/elektrische Leiter und deren Validierung von besonderer Bedeutung.

Das Resultat dieser Arbeit stellt eine prototypische Softwareimplementierung dar. Dabei ist einerseits die generelle Vorgehensweise beim Entwicklungsprozess, als auch die konkrete Umsetzung von Bedeutung. Hierfür muss auf Methoden der MID-Produktentwicklung als auch auf Modellierungsansätze optischer Leiter sowie deren Entflechtungsmechanismen zurückgegriffen werden. Für die Umsetzung in Form eines Software-Demonstrators sollen vor allem die Integration entsprechender Bauelemente, das Verlegen optischer und elektrischer Leiter sowie die Prüfung ihrer Herstell- und Funktionsfähigkeit durch sogenannte Design Rule und Manufacturing Rule Checks eine gesonderte Rolle einnehmen. Datenstrukturen, die in diesem Zusammenhang entstehen, werden aufgearbeitet, dargestellt und genau erläutert. Somit soll diese Dissertationsschrift weiterhin als grundlegender und konzeptioneller Leitfaden für Implementierungen dienen.

2 Aufbau optomechatronischer Baugruppen

Basierend auf den zuvor genannten Zielen und Forschungsaufgaben sollen zum besseren Verständnis die grundlegenden Begriffe elektrooptischer Schaltungen erläutert werden. Durch optisch basierte Komponenten ist es möglich, mit einem großen Erfassungsbereich aber gleichzeitiger Unempfindlichkeit gegen elektrische Geräusche, sowie mit einer hohen Bandbreite zu arbeiten. Vor allem aus letzterem Grund werden heute elektrooptische Baugruppen beispielsweise in Datencentern eingesetzt [17]. Mit der Einführung mechatronischer Komponenten wurden auch optische Baugruppen mit diesen, vor allem in Hinblick auf Leistungssteigerung, kombiniert. So ergibt sich folgende Definition: Sobald ein System optische, mechanische und elektronische Elemente oder Eigenschaften aufweist, wird dieses als optomechatronisches System bezeichnet. [18] Da im Fokus der Arbeit vor allem optische Zusammenhänge stehen, werden in den Folgekapiteln die grundlegenden Zusammenhänge der Lichtführung in optischen Leitern und optischen Technologien sowie deren Aufbau und Fertigung erklärt.

2.1 Grundlagen zur Lichtführung in optischen Leitern und optischen Technologien

In vielen optischen Systemen wird angenommen, dass nur ein Medium gegenwärtig ist (zumeist Luft). Sich ausbreitendes Licht wird lediglich durch Spiegel, Linsen und Prismen kollimiert oder fokussiert. Um jedoch Licht auf einem Pfad zwischen zwei Punkten zu übertragen, ist es notwendig einen Lichtwellenleiter einzusetzen, der die elektromagnetischen Wellen in sich zusammenhält. Es gibt faseroptische und integrierte Lichtwellenleiter. Beide Formen leiten das Licht nach dem Prinzip der Totalreflexion, unter Verwendung eines dielektrischen Kerns und einer Umhüllung mit unterschiedlichen Brechungsindizes. Aufgrund unterschiedlicher Herstellungsverfahren weisen diese jedoch unterschiedliche Querschnitte auf. Während faserbasierte Lichtwellenleiter typischerweise kreisförmige Querschnitte aufweisen, sind board-integrierte Wellenleiter häufig rechteckig, trapezförmig oder parabolisch. Obwohl in diesem Kapitel gelegentlich auf faserbasierte Lichtwellenleiter Bezug genommen wird (da diese sehr gut erforscht sind und sich in der Praxis seit vielen Jahren bewährt

haben), liegt der Schwerpunkt in erster Linie auf integrierten Lichtwellenleitern, von nun an einfach als Wellenleiter bezeichnet.[19, 9]

In den folgenden Unterkapiteln werden die Grundlagen zur Physik des Lichts, Lichtführung in Wellenleitern sowie Dämpfungs- und Streuungsphänomene erläutert.

2.1.1 Überblick zur Physik des Lichts

James Maxwell war der erste, der zu dem Schluss kam, dass Licht selbst ein elektromagnetisches Phänomen ist und formulierte eine Reihe von vier partiellen Differentialgleichungen in Bezug auf elektrische und magnetische Felder. Im System der SI-Einheiten werden die Formeln in ihrer Differentialform gegeben durch [20]:

$$\nabla \cdot \vec{D}(\vec{r}, t) = \vec{\rho}(\vec{r}, t) \text{ (Gauss's Gesetz),} \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \vec{B}(\vec{r}, t) = 0 \text{ (Gauss's Gesetz des Magnetismus),} \quad (2)$$

$$\nabla \times \vec{H}(\vec{r}, t) = \frac{\partial \vec{D}(\vec{r}, t)}{\partial t} + \vec{J}(\vec{r}, t) \text{ (Ampères Gesetz),} \quad (3)$$

$$\nabla \times \vec{E}(\vec{r}, t) = -\frac{\partial \vec{B}(\vec{r}, t)}{\partial t} \text{ (Faradaysche Gesetz der Induktion),} \quad (4)$$

wobei \vec{E} die elektrische Feldstärke (in V/m) ist, \vec{H} die magnetische Feldstärke (in A/m), \vec{D} die dielektrische Verschiebung (in As/m^2), \vec{B} die magnetische Induktion (Vs/m^2), \vec{J} die Stromdichte (A/m^2) und $\vec{\rho}$ die Ladungsdichte (As/m^2). Die Materialgleichungen für lineare und isotrope Materialien lauten wie folgt [20, 21]:

$$\vec{D}(\vec{r}, t) = \varepsilon(\vec{r})\varepsilon_0\vec{E}(\vec{r}, t), \quad (5)$$

$$\vec{B}(\vec{r}, t) = \mu(\vec{r})\mu_0\vec{H}(\vec{r}, t), \quad (6)$$

$$\vec{J}(\vec{r}, t) = \sigma(\vec{r})\vec{E}(\vec{r}, t), \quad (7)$$

wobei ε die dielektrische Funktion (dimensionslos), μ die magnetische Permeabilität (dimensionslos) und σ die spezifische elektrische Leitfähigkeit (in A/Vm) ist. Darüber hinaus sind $\varepsilon_0 = 8,8542e^{12}As/Vm$ und $\mu_0 = 4\pi e^{-7}Vs/Am$. Schließlich kann die Wellengleichung für homogene Dielektrika ($\vec{\rho} = 0$, $\sigma = 0 \Rightarrow \vec{J} = 0$, $\mu = 1$) wie folgt beschrieben werden [21]:

$$\Delta \vec{E} - \frac{n^2}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0, \quad (8)$$

$$\Delta \vec{H} - \frac{n^2}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} = 0, \quad (9)$$

wobei $\varepsilon_0 \mu_0 = 1/c^2$ mit Lichtgeschwindigkeit c sowie $n := \sqrt{\varepsilon \mu}$ der Brechungsindex ist. Diese partiellen Differentialgleichungen bilden auch die Grundlage für FEM-Simulationen. Generell sind das elektrische Feld und das Magnetfeld einer transversierenden, oszillierenden, sich selbst ausbreitenden elektromagnetischen Welle immer in Phase und 90° zueinander ausgerichtet (siehe Bild 5) [22–24].

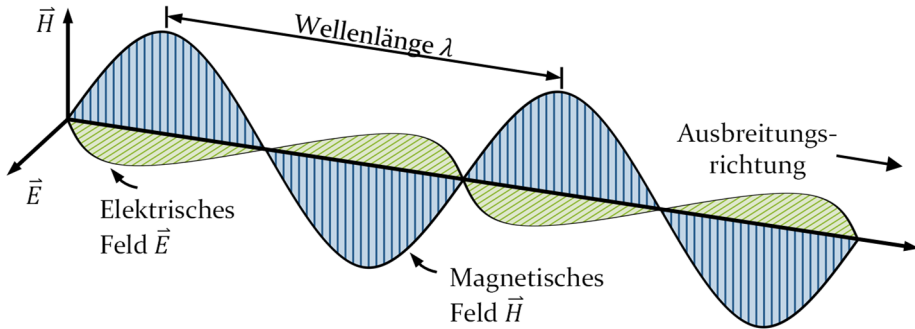


Bild 5: Die elektromagnetische Welle [22, 24]

Die Welle-Teilchen-Dualität besagt, dass sich Licht in einer Weise wie Teilchen und in einer weiteren wie Wellen verhalten kann. Kein Experiment war jemals in der Lage, beide Naturen des Lichts gleichzeitig einzufangen. Der Photoeffekt ist eine gute Möglichkeit, den Partikelcharakter von Licht zu beweisen, der umso deutlicher wird, je kleiner die Wellenlänge ist. Optische Phänomene wie Reflexion, Beugung, Streuung, Interferenz und Polarisation werden dem Wellencharakter des Lichts zugeschrieben [23].

In vielen Fällen, z.B. bei der Beschreibung optischer Abbildungssysteme, ist es genügend präzise, Licht als Lichtstrahlen zu bezeichnen ohne dabei den Wellencharakter des Lichts zu berücksichtigen. Die Eikonale Gleichung stellt eine Verbindung zwischen physikalischer (Wellen-) und geometrischer (Strahlen-) Optik dar und leitet sich aus den bereits erwähnten Maxwell-Gleichungen ab. Unter der Annahme, dass $\lambda \rightarrow 0$, ist die Grundgleichung der geometrischen Optik (in differentieller Form) gegeben durch

$$\frac{d}{ds} \left(n \frac{d\vec{r}}{ds} \right) = \nabla n \quad (10)$$

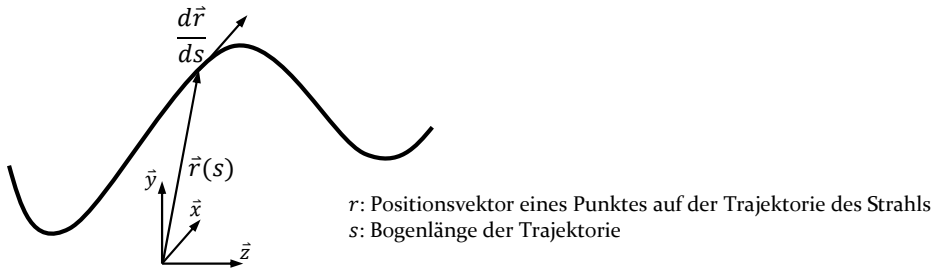


Bild 6: Beschreibung des Strahlengangs

$$\vec{r} = \vec{p} + s\vec{a} \quad (11)$$

wobei \vec{p} der Startpunkt des Strahls ist, ein konstanter Einheitsvektor der in Strahlrichtung zeigt und s die Länge des Strahls. Gleichung (11) ist die Strahlengleichung, welche auch für Raytracing-Simulationen (Strahlverfolgung) verwendet wird. Bei sich ständig ändernden Medien (z.B. Gradientenindexfasern) kann die Gleichung meist nicht analytisch, sondern muss mit numerischen Methoden gelöst werden. Im Folgenden werden einige optische Phänomene kurz beschrieben, die wichtig sind, um das Verhalten des Lichts im Wellenleiter zu verstehen [23]:

1) Diffraction

Beugung bzw. Diffraction ist ein stark wellenlängenabhängiges Phänomen und tritt vor allem dann auf, wenn eine Welle auf ein Hindernis oder einen Spalt trifft, der etwa gleich groß oder aber kleiner als die Wellenlänge ist. In vielen Fällen ist die Beugung ein unerwünschter Effekt, da sie die effektive Ortsauflösung optischer (abbildender) Systeme herabsetzt. Ein technisches Anwendungsgebiet ist die diffraktive Einkopplung in Wellenleiter [22].

2) Interferenz

Die Überlagerung von zwei oder mehr sich ausbreitenden Wellen wird als Interferenz bezeichnet, was auch den Wellencharakter des Lichts belegt. Nach dem Prinzip der Wellenüberlagerung entspricht die resultierende Amplitude am Interferenzpunkt der Vektorsumme der einzelnen Amplituden. Daher treten Maxima (konstruktive Interferenz) und Minima (destruktive Interferenz) auf, wenn die Phasendifferenz zwischen den Wellen

ein gerades Vielfaches von π bzw. ein ungerades Vielfaches ist. Interferenzen spielen eine wichtige Rolle bei der Lichtausbreitung in Wellenleitern (siehe nächstes Kapitel). [25, 22]

3) Polarisierung

Die eindeutige geometrische Ausrichtung der Schwingung des elektrischen Feldvektors einer elektromagnetischen Welle wird als Polarisation bezeichnet. Beispielsweise emittieren Leuchtdioden (LEDs) inkohärentes Licht, das in mehreren Ebenen schwingt, das Licht ist unpolarisiert. Laser hingegen geben polarisiertes Licht ab. Unpolarisiertes Licht kann durch verschiedene Methoden wie Reflexion oder Beugung polarisiert werden. [25]

4) Reflexion, Refraktion und Totalreflexion

An der Grenze zwischen zwei Medien mit unterschiedlichen Brechungsindizes kann man Reflexion und Brechung beobachten. Die einfallende Welle wird teilweise gebrochen und teilweise reflektiert. Die Beziehung zwischen den einfallenden, reflektierten und gebrochenen Strahlen wird durch das Reflexionsgesetz und das Snell'sche Gesetz bestimmt:

$$\theta_i = \theta_r \text{ und } \frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_t} = \frac{n_2}{n_1} = \sqrt{\frac{\epsilon_2 \mu_2}{\epsilon_1 \mu_1}}, \quad (12/13)$$

wobei θ_i der Einfallswinkel und θ_t der Brechungswinkel (t für transmittiert) ist. Wie in Bild 7 dargestellt, wird der einfallende Strahl einer Totalreflexion unterzogen, wenn der Einfallswinkel θ_i den kritischen Winkel θ_c überschreitet. [25]

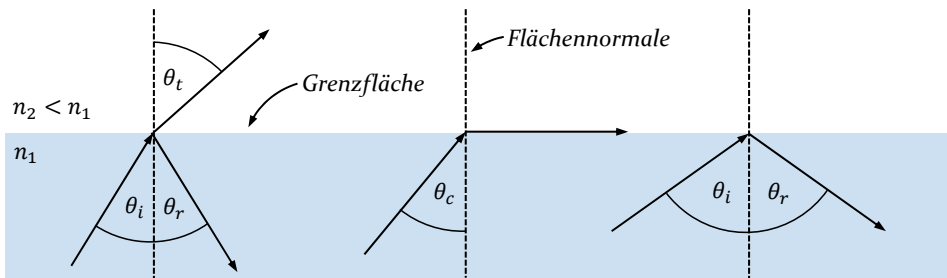


Bild 7: Prinzip der Reflexion (links), Refraktion (mitte) und Totalreflexion (rechts)

2.1.2 Lichtausbreitung in optischen Wellenleitern

Grundsätzlich kann die Ausbreitung von Licht in Form von Strahlen innerhalb eines dielektrischen Leiters durch geometrische Optik beschrieben werden. Trifft der Lichtstrahl in einem Winkel, der größer als der kritische

Winkel θ_c ist, auf die Mediumgrenze auf, so wird er vollständig intern reflektiert, unter der Bedingung, dass der Brechungsindex des Mediums, das den Kern umgibt, niedriger ist ($n_{\text{Kern}} > n_{\text{Mantel}}$). Aufgrund der sich wiederholenden Totalreflexion wandern Lichtstrahlen in einem Zick-Zack-Pfad über eine Stufenindexfaser (Multimode-Faser) – siehe Bild 8. Unter der Annahme, dass Luft ($n_{\text{Luft}}=1$) das umgebende Medium ist, wird nur Licht, das in den Wellenleiter innerhalb des Aufnahmekegels eindringt, einer Totalreflexion ausgesetzt. Lichtstrahlen mit einem größeren Einfallswinkel werden an der Kern-Mantel-Grenzfläche gebrochen und somit nicht auf das andere Ende der Faser übertragen. Der Halbwinkel des Akzeptanzkonus, der Akzeptanzwinkel θ_{max} , ist gegeben durch:

$$\sin\theta_{\text{max}} = \frac{n_{\text{Kern}}}{n_{\text{Luft}}} \sqrt{1 - \sin^2\theta_c}, \quad (14)$$

Die numerische Apertur (NA) beschreibt das Vermögen eines optischen Elements Licht zu fokussieren. Demzufolge ist die Beziehung für die numerische Apertur (NA) definiert als

$$NA = n_{\text{Luft}} \cdot \sin\theta_{\text{max}} = \sqrt{n_{\text{Kern}}^2 - n_{\text{Clad}}^2}. \quad (15)$$

Zu beachten ist, dass die numerische Apertur nur für gerade Wellenleitersegmente gilt. Der Einfallswinkel hängt weiterhin vom Biegeradius r des Wellenleiters ab, woraus sich die folgende Näherung ergibt:

$$NA \approx \sqrt{n_{\text{Kern}}^2 - n_{\text{Clad}}^2} \left(1 - \frac{D}{2r}\right). \quad (16)$$

Für $r \rightarrow \infty$ reduziert sich die Gleichung (15) auf Gleichung (14). [26]

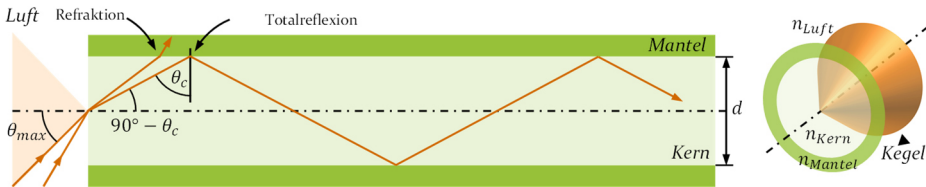


Bild 8: Ausbreitung des Lichts in einer zylindrischen Stufenindexfaser

Je kleiner der Kerndurchmesser des Wellenleiters und je kleiner die Wellenlänge λ , desto deutlicher werden andere optische Phänomene. Bei Kerndurchmessern $d < 10\lambda$ sind starke Interferenzeffekte zu beobachten und die elektrische Feldverteilung im Inneren des Wellenleiters weicht von den Ergebnissen der Strahlenoptik ab. Bild 9 zeigt einen planaren geschichteten

Wellenleiter (auch: Slab-Wellenleiter), der aus drei dielektrischen Schichten ($n_{\text{Kern}} > n_{\text{Mantel}}$) mit einer Kernschichtdicke von d besteht. Hierbei wird von einer Totalreflexion mit Phasenverschiebung in Abhängigkeit vom Einfallswinkel ausgegangen. Dämpfung und Streuung wird ignoriert. Die in Bild 9 dargestellte geschichtete Intensitätsverteilung ergibt sich aus der Interferenz zwischen der einfallenden und der reflektierten Wellenfront. Nach zweimaliger Reflexion muss die Welle wieder phasenrichtig sein ($n \cdot 2\pi$), damit sich das Licht in eine bestimmte Richtung ausbreiten kann. Das wiederum impliziert, dass nicht alle einfallenden Strahlen mit einem Winkel kleiner als θ_{max} zur Ausbreitung fähig sind. Innerhalb der Ummantelung ist das Feld in x -Richtung evaneszent, fällt exponentiell von der mittleren Grenzfläche ab und bewirkt eine kontinuierliche Dämpfung der Feldstärke in z -Richtung. [27, 28]

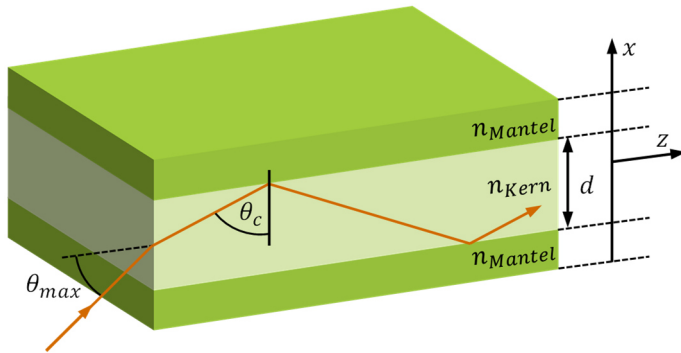


Bild 9: Planarer Wellenleiter mit einer Schichtdicke von d und Stufenindexprofil

2.1.3 Dämpfung und Dispersion

In der Theorie ist die Fähigkeit ein Signal zu übertragen hauptsächlich vom Kontrast der Brechungsindizes von Kern- und Mantelmaterial und dem Querschnitt sowie Größe des Querschnittsprofils abhängig. Dämpfung bedeutet Transmissionsverlust des Strahlungsflusses (Intensität) des Lichtstrahls in Bezug auf die durch das Medium zurückgelegte Wegstrecke. Der Signalverlust wird hauptsächlich durch Absorption (Dämpfung) und Streuung (Dispersion) verursacht. Dämpfung verringert die insgesamt übertragene Energie, während die Dispersion das Signal verteilt und damit die Übertragungsbandbreite begrenzt. Die spektrale Dämpfung α (= wellenlängenabhängige Dämpfung) entlang eines Wellenleiters mit der Länge L ist definiert als

$$\alpha = -\frac{1}{L} \cdot 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P(L)}{P(0)} \right), \quad (17)$$

wobei $P(L)$ die Ausgangs- und $P(0)$ die Eingangsleistung ist. Die Verwendung des Logarithmus des Verhältnisses ergibt für die Dämpfung die Pseudoeinheit $\frac{dB}{km}$ [26]. Die Abnahme der Lichtintensität in einem Wellenleiter wird durch intrinsische und extrinsische Dämpfung verursacht. Intrinsische Absorption tritt auf, wenn Photonen mit dem Kern- und den Hüllmedien auf molekularer Ebene interagieren (Schwingungsübergang durch Infrarotlicht und atomarer Elektronenübergang durch UV-Licht). Darüber hinaus wird das Licht elastisch an Partikeln gestreut, die viel kleiner als die Wellenlänge der Strahlung sind (sog. Rayleigh-Streuung), wodurch die Intensität des besonders kurzwelligen Lichts allmählich abnimmt, da die Menge der Streuung proportional zu λ^{-4} ist. Lokale Inhomogenitäten des Brechungsindex aufgrund von Kompositionsschwankungen im Kern wirken als Streuzentren. Die extrinsische Dämpfung ist mit Materialverunreinigungen wie Metallionen (z.B. Cu^{2+} , Fe^{2+} und Cu^{3+}) oder Hydroxylionen (OH^-) verbunden. Diese Ionen haben spezifische Absorptionsbanden, die die Spitzenabsorption bei bestimmten Wellenlängen zeigen (z.B. $\lambda=2,7 \mu\text{m}$ für OH^- Ionen in Silikat). Daraus folgt, dass das ausgewählte Material die Absorption maßgeblich beeinflusst. Verunreinigungen können durch die Entfernung von Metallionen (einfach) und Hydroxylionen (aufwendiger) weitgehend reduziert werden. [19, 29]

Im Vergleich zu Glasfasern zeigen POF eine deutlich höhere spektrale Dämpfung durch Rayleigh-Streuung und Resonanzabsorption (Frequenz, bei der die Photonenenergie gleich der Quantenanregungsenergie ist) ihrer C-H-Bindungen. Die Art dieser Effekte ist hauptsächlich intrinsisch und kann nur mit Veränderungen der inneren Struktur des Materials bewältigt werden. [19]

Limitierung der Bandbreite durch Dispersion

Dispersion beschreibt alle Prozesse, die zu einer unterschiedlichen Ausbreitungsgeschwindigkeit der Moden in einem Wellenleiter führen. Die verschiedenen auftretenden Dispersionsmechanismen hängen von mehreren Faktoren ab. Bild 10 gibt einen Überblick über die verschiedenen Mechanismen in Bezug auf den Ausbreitungsweg und die Wellenlänge. Der folgende Abschnitt wird sich hauptsächlich auf die Moden- und chromatische Dispersion konzentrieren.

Eine wichtige Rolle spielt die Modendispersion für multimodige POFs. Der Unterschied in der Gesamtdistanz durch den Wellenleiter zwischen Lichtstrahlen die parallel zur optischen Achse in den Wellenleiter eindringen, und solchen, die nahe dem Akzeptanzwinkel θ_{max} stehen, kann erheblich

sein. Die in Bezug auf die optische Achse unterschiedlichen Ausbreitungsgeschwindigkeiten der Moden bewirkt, dass sich das Signal zeitlich verbreitert und trägt zu zusätzlichen Verlusten langsamerer Moden bei (was Teil des Absorptionsprozesses ist). Modale Dispersion tritt bei Singlemode-POFs nicht auf, so dass sich die Signalimpulse nicht erweitern und theoretisch die mögliche Übertragungsbandbreite nicht begrenzen. [29, 30]

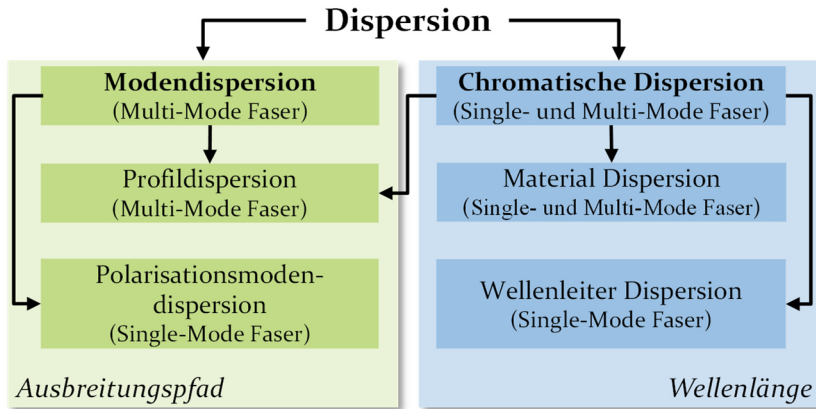


Bild 10: Dispersionsmechanismen bezüglich Ausbreitungspfad und Wellenlänge [S1]

Sowohl die Materialdispersion als auch die Wellenleiterdispersion sind Teil der chromatischen Dispersion und müssen auch bei der Verwendung von Singlemode-Wellenleitern berücksichtigt werden. Der Grund für die Materialdispersion ist die Änderung des Brechungswinkels von Licht mit unterschiedlichen Wellenlängen. Polychromatisches Licht wandert mit unterschiedlichen Ausbreitungsgeschwindigkeiten (z.B. ist rotes Licht schneller als blaues Licht) durch einen Wellenleiter. In der Praxis muss dieser Effekt berücksichtigt werden, da keine Lichtquelle jemals vollständig monochromatisch ist. Die Wellenleiterdispersion wird durch Lichtstrahlen verursacht, die in die Mantelschicht eindringen. Wie tief, hängt von der Wellenlänge des Lichts und den gebundenen Modi ab. Je weniger Moden sich im Wellenleiter bilden, je stärker wird der Mantel durchdrungen, was zu erheblichen Verlusten bei Singlemode-Fasern führt. Wie die modale Dispersion führt auch die chromatische Dispersion zu einer begrenzten Bandbreite. [24, 29]

2.2 Technologie elektrooptischer und optomechatronischer Baugruppen

Dieser Abschnitt gibt einen Überblick über die Technologie elektrooptischer und optomechatronischer Systeme. Auch wenn im Bereich der integrierten optischen Schaltungen noch nicht viele Industriestandards etabliert und die Forschungsansätze zu diesem Thema äußerst heterogen sind, wird in den folgenden Abschnitten versucht, den Stand der Forschung und Technik im Kontext von räumlich integrierten optomechatronischer Schaltungen (**3D-Opto-MID**) zu verdeutlichen. Zunächst sollen Aufbau und herstellungsbedingte Grundlagen vermittelt werden, die für die spätere Modellierung optomechatronischer Baugruppen dienen.

Für das grundlegende Verständnis ist es wichtig, Klassifizierungen optischer Leiter unterscheiden zu können. Bisher erfolgt die optische Datenübertragung fast ausschließlich durch optische Kabel (grundsätzlicher Aufbau siehe Bild 11). Dabei zeichnen geringe Kosten, eine hohe Stabilität, Standardisierung und Übertragungsraten von mehr als 100 Gb/s [31] auf große Distanz dieses optische Übertragungsmedium aus. Ohne die Entwicklung der optischen Leiter wäre die so genannte „digitale Revolution“ nicht möglich gewesen. Vorreiter war hier die Firma Corning Glass die 1970 ein dämpfungsarmes Glasfaserkabel entwickelte, das den Anforderungen für eine kommerzielle Nutzung entsprach [32].

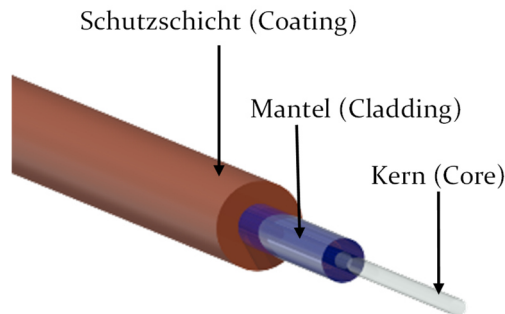


Bild 11: Aufbau einer optischen Faser (in Anlehnung an [29])

So wurde diese Technologie zunächst nur von Telekommunikationsfirmen und dem Militär zur Datenübertragung auf kleinen Distanzen eingesetzt. Bald jedoch führte die zunehmende Verbreitung digitaler Technologien zu einer breiten Durchdringung von optischen Leitern im Massenmarkt, was eine Standardisierung zur Folge hatte. So wird der Aufbau von Lichtwellenleitern in der DIN Norm 60793-1-20 bzw. der VDE Norm 0888-220 [33] beschrieben. Wichtige Parameter, die in den Normen behandelt werden

sind Wellenlänge in *mm*, numerische Apertur, Dämpfungskoeffizient in dB/km, das Bandbreite-Längen-Produkt in MHz*km (OFL - Overfilled Launch Bandwidth), sowie die Faserklasse. In der Industrie werden drei verschiedene Faserarten eingesetzt. Glasfaserkabel, Polymer optische Faser (POF) und Polymer Cladded Fiber (PCF).

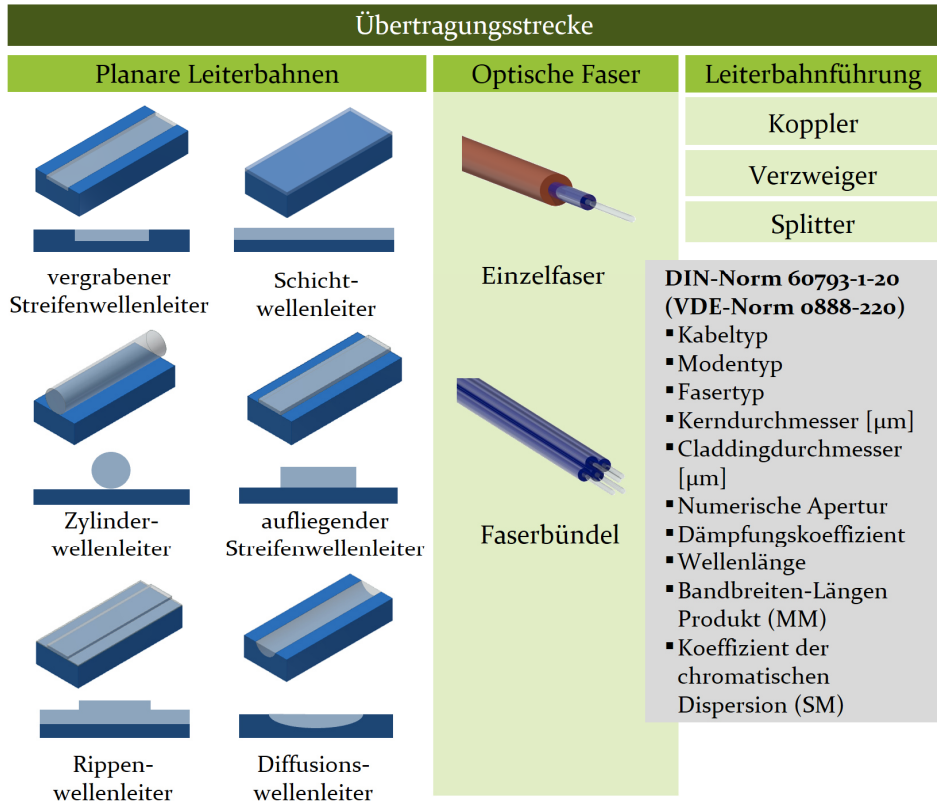


Bild 12: Varianten von unterschiedlichen Wellenleiterbauformen nach [33, S2]

Zusätzlich zu den angesprochenen optischen Fasern existieren auch weitere Bauformen von Lichtwellenleitern, wie in Bild 12 dargestellt. So lassen sich die relevanten Bauformen vor allem in planare Leiterbahnen und optische Fasern unterteilen. Diese werden durch Koppler, Verzweiger oder Splitter in ihrer Signalführung ergänzt. Die bereits angesprochene Norm DIN 60793-1-20 bzw VDE-Norm 0888-220 [33] definiert Aufbauten und Eigenschaften der Übertragungsstrecke wie z.B. Kabeltyp, Fasertyp aber auch Eigenschaften wie die Dämpfungskoeffizienten (siehe Bild 12).

Unabhängig von der Bauform ist eine elektrooptische Übertragungsstrecke generell wie folgt aufgebaut (Bild 13):

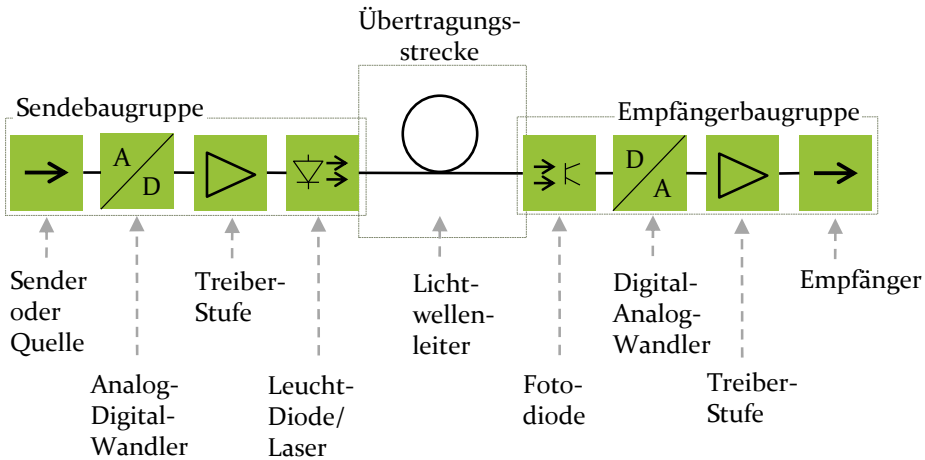


Bild 13: Topologie einer optischen Übertragungsstrecke nach [34]

Grundsätzlich lässt sich ein System zur optischen Datenübertragung aus drei essenziellen Bestandteilen zusammensetzen: Zunächst ist eine Quelle (Sendebaugruppe) notwendig, um ein elektrisches Signal in ein optisches zu wandeln, dem folgt die Übertragungsstrecke, welche aus dem Lichtwellenleiter (LWL) besteht. Am Ende der Übertragungsstrecke findet sich beispielsweise ein Fototransistor oder eine Fotodiode, welche zur Weiterverarbeitung das optische in ein elektrisches Signal wandelt, der sogenannten Empfängerbaugruppe. Falls der Übertragungsweg zu lang für den LWL ist, werden noch Konverter- und Signalaufbereitungsstufen benötigt und zur Überbrückung mit in das System eingebaut. [34]

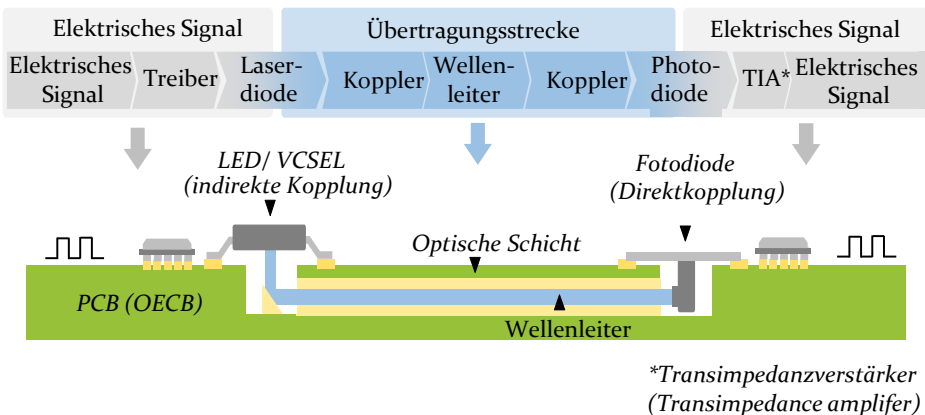


Bild 14: Schema einer elektrooptischen Leiterplatte (angelehnt an [35])

Der Aufbau elektrooptischer Leiterplatten (entsprechend verwendete Leiter in Bild 12 links) ist ohne den Einsatz teurer Hochfrequenzmaterialien möglich. Deshalb können mit planaren Wellenleitern kostengünstige, schnelle Datenübertragungssysteme realisiert werden. Beispielhaft ist ein solcher Aufbau in Bild 14 illustriert. Die optischen Leiter sind über Wandlerbauteile mit elektrischen Schaltungen verbunden. Der Wellenleiter verläuft dann zumeist in einer Zwischenschicht im Substratmaterial der Leiterplatte und wird beispielsweise über ein VCSEL (vertical-cavity surface-emitting laser) mit der elektrischen Schaltung verbunden [35].

Mit Board-to-board Verbindungen, etwa aus Polymerwellenleitern, lassen sich Übertragungsgeschwindigkeiten von mehr als 10 Gbps erzielen [36, 37]. Nach [35] können die dazu notwendigen Herstellungsverfahren in folgende zwei Kategorien eingeteilt werden: die Overlay Technologie und die Inlay Technologie. Dabei wird unterschieden, ob die Leiterbahnen gleichzeitig mit den Kupferleitern erzeugt werden oder erst nachträglich auf die fertige Leiterplatte aufgebracht werden. Bei der Herstellung in Overlay Technologie wird der Lichtwellenleiter nach der Herstellung der elektrischen Schalterplatte auf die Oberfläche aufgebracht. Die optische Lage kann aus einer Polymerfolie, einem Dünnglasmodul oder einer Multiwire-Folie ausgeführt sein. Die Vorteile dieses Verfahrens, die elektrische Schaltung separat testen zu können, ohne dabei durch die Temperatur bei den verwendeten Polymeren im Wellenleiter in der Wahl der Fertigungsverfahren eingeschränkt zu sein, haben zu einer weiten Verbreitung geführt. Bei der Inlay Technologie ist die optische Lage in der Leiterplatte integriert. Dies erfolgt in einem Prozessschritt mit der Integration der elektrischen Kupferleiter. Es sind keine nachträglichen Fertigungsschritte nötig, allerdings werden höhere Anforderungen an das verwendete Material gestellt, da es die Hitze im Herstellungsverfahren überstehen muss. Eine Übersicht zur Herstellung von planaren Lichtwellenleitern ist nachfolgend gemäß Craiovan in Bild 15 dargestellt. [35]

Eine Erweiterung zu diesem planaren Aufbau stellen die bereits erwähnten 3D-Opto-MID (3D-Optomechatronic Integrated Devices) dar. Diese sind als Synthese der genannten Technologien der elektrooptischen Leiterplatten und 3D-MIDs zu verstehen. MIDs besitzen eine große Einsatzvielfalt, Zuverlässigkeit und erfüllen die Anforderung der Miniaturisierung und somit auch der Gewichtseinsparung.

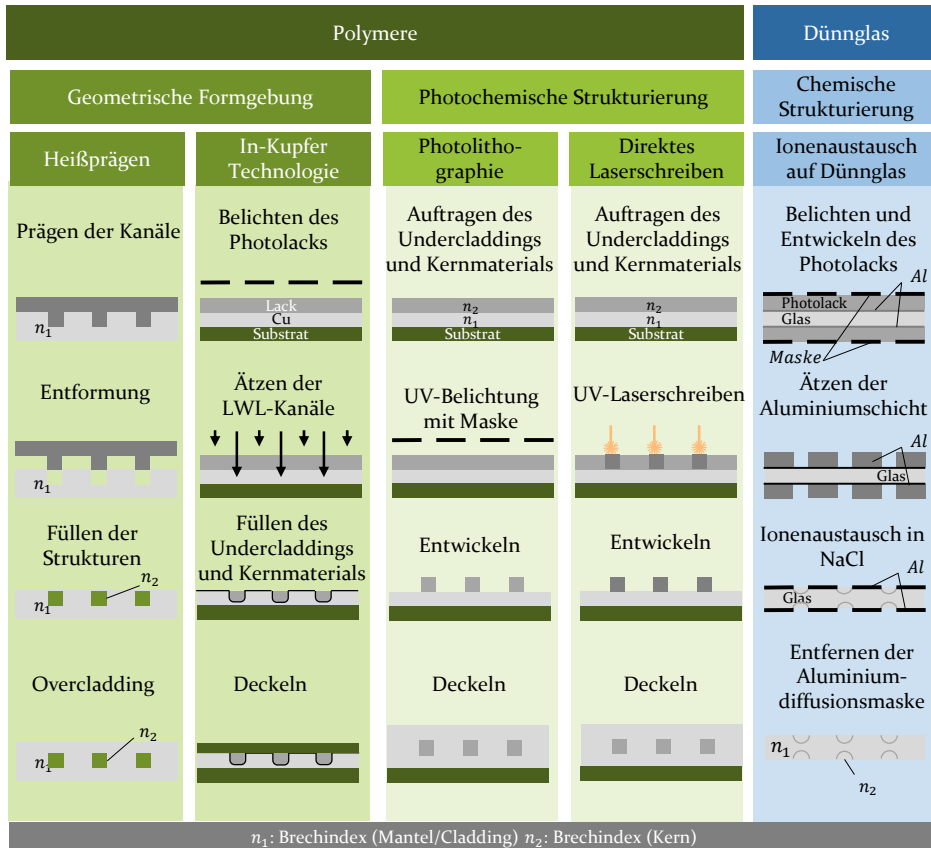


Bild 15: Prinzipdarstellung der Prozessketten zur Herstellung planarer Lichtwellenleiter in Anlehnung an [35, 38, 39]

In aktuellen Forschungsprojekten wird deshalb nach Ansätzen gesucht, diesen Gedanken mit den Vorteilen der optischen Datenübertragung zu verbinden, um so 3D-Opto-MIDs zu ermöglichen [P1, P2]. Dies ist auch Gegenstand der Forschung, der beispielsweise durch die dislozierte DFG-Forschergruppe OPTAVER (Optische Aufbau- und Verbindungstechnik für baugruppenintegrierte Bussysteme) untersucht wird. Hierbei werden Lösungen für die Modellierung und Produktion optischer Schaltungen auf 3D-Substraten untersucht, um weitere Eigenschaften und Funktionen zu integrieren. Zur herkömmlichen elektrooptischen Baugruppe unterscheidet sich das Prinzip vor allem durch räumliche Geometrie der Schaltungsträger und dem darauf aufgebrachtten 3D-Leiterbild (siehe auch Bild 16).

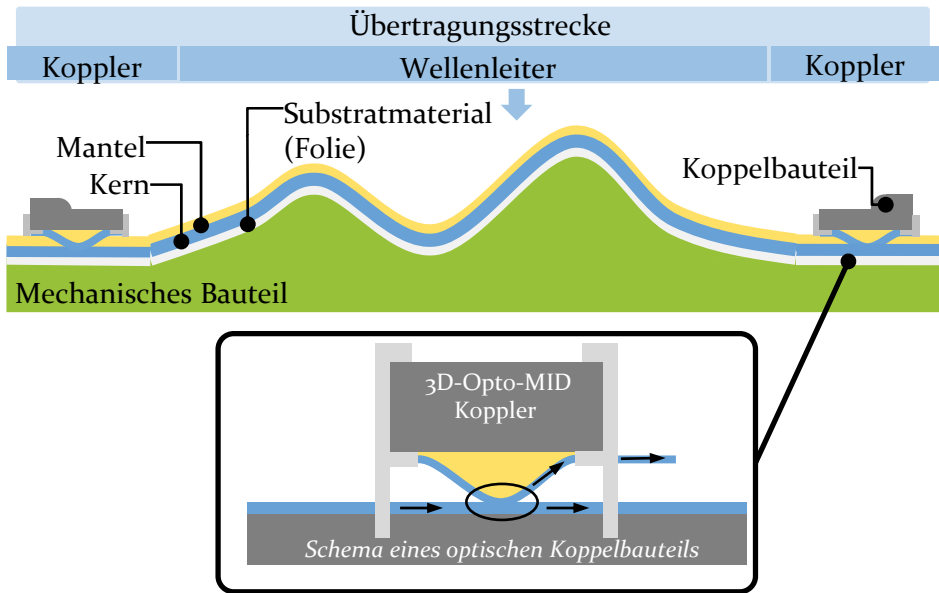


Bild 16: Prinzipaufbau einer 3D-Opto-MID Baugruppe

2.3 Additiv gefertigte Lichtwellenleiter

Neu in dem letztgenannten Ansatz ist vor allem der Einsatz additiver Verfahren zur Herstellung der Lichtwellenleiter. Mittels Inkjet, Flexodruck oder Aerosol-Jet-Druck lassen sich Substrate, meist Polymere, auf die Oberfläche der Schaltungsträger aufbringen. Es gibt verschiedene Konfigurationen für die auf den Schaltungsträger gedruckten Lichtwellenleiter (siehe Bild 17), unterteilt in vier Klassen [40]:

1. Der Kern kann direkt auf dem Substrat gedruckt werden.
2. Es kann ein Lower Cladding verwendet werden, damit der Kern nicht direkt auf dem Substrat liegt.
3. Ein Upper Cladding schützt den Lichtwellenleiter und ermöglicht andere Brechzahlparameter als bei einer Kerngrenze mit Luft wie in 1 und 2.
4. Eine Kombination aus 2 und 3, bei der der Kern durch ein Upper sowie Lower Cladding geschützt wird.

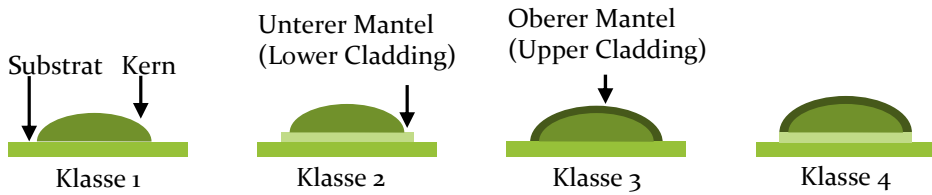


Bild 17: Vier mögliche Konfigurationen von gedruckten Wellenleitern nach [40]

Dabei muss einerseits zwischen der planaren und der räumlichen Geometrieausprägung unterschieden werden. Bei der komplexeren Ausführung räumlicher Geometrien bietet sich vor allem das Druckverfahren Aerosoljet Printing an, wie bereits von Reitberger et al. in [41–43] ausgeführt. Der Aerosol-Jet Druck erlaubt es, optische Wellenleiter mit halbrunden bis parabolischem Profil zu erstellen. Es ist ein Druckverfahren der Klasse 4 mit Upper und Lower Cladding. Der Aufbau des Wellenleiters ist in Bild 18 dargestellt und besteht aus vier Hauptelementen: Kern, Foliensubstrat, Konditionierungslinien und Mantel. Der Kern (z.B. aus EpoCore [44]) hat dabei einen Durchmesser von $50\mu\text{m}$ - $200\mu\text{m}$ und wird auf ein PMMA Substrat gedruckt. Seitlich vom Lichtwellenleiter sind zwei Konditionierungslinien die eine Höhe von $5\mu\text{m}$ und eine Breite von $100\text{--}300\mu\text{m}$ besitzen (siehe auch [42, 43, 45, P2, 41]). Diese dienen dazu, über Oberflächenspannung die Form des Wellenleiters zu beeinflussen. Über dem Kern ist ein Mantelmedium appliziert, um ein Austreten von Licht aus dem eigentlichen Wellenleiter zu gewährleisten.

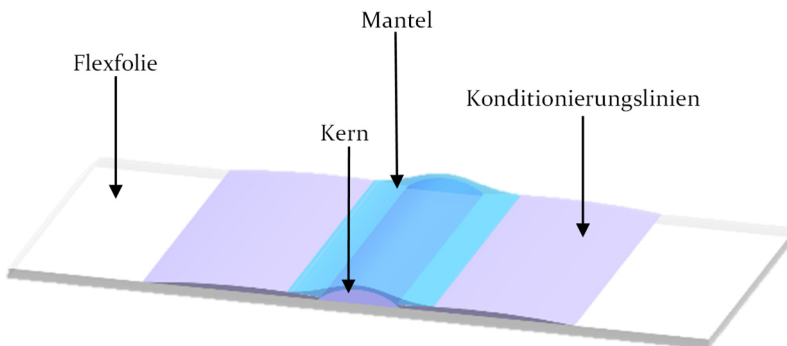


Bild 18: Aufbau eines gedruckten polymeren Lichtwellenleiters mittels Aerosoljetdruck

Für diesen Aufbau wurde ein Verfahren im Rahmen der DFG-Forschergruppe OPTAVER etabliert [P3, P2]. Dieses Verfahren wird folgend als OPTAVER-Prozess bezeichnet. In diesem Prozess wird ein in mehreren Schritten, additives Herstellungsverfahren für polymere optische Wellenleiter angewendet.

Der erste Schritt besteht aus der Fertigung von Konditionierungslinien, die ausgehend auf einem flexiblen, transparenten Foliensubstrat (z.B. PMMA) vorgenommen wird. Durch Anwendung des Flexodruck-Verfahrens, können jeweils zu den abgrenzenden Seiten des späteren Wellenleiters Barrieren mit definiertem Abstand aufgetragen und unter UV-Licht ausgehärtet werden. Dabei weisen die Konditionierungslinien selbst eine niedrige Oberflächenenergie auf, was hydrophobe Materialeigenschaften hervorruft. Dies begünstigt die Erhöhung des Aspektverhältnisses, respektive des Kontaktwinkels, des im nächsten Prozessschritts unter Verwendung des Aerosol-Jet-Verfahrens aufgetragenen Kernmaterials. Das flüssige, zwischen die beiden Konditionierungslinien eingebrachte Polymer, formt aufgrund der Wechselwirkung zwischen der Oberflächenenergie des Festkörpers und der Oberflächenspannung der Flüssigkeit eine kreissegmentförmige Struktur aus, welche in der Folge wiederum durch UV-Licht ausgehärtet wird. [P4, 46]

Da es sich hierbei um eine Solidifizierung einer Flüssigkeit handelt, sind die entstehenden Oberflächenrauheiten äußerst gering ($R_z < 0,8 \mu\text{m}$), was deren spätere optische Eigenschaften verbessert. Abschließend wird das Mantelpolymer wiederum im AJ-Verfahren auf den ausgehärteten Kern aufgetragen und durch UV-Licht ausgehärtet [47].

Die Vorteile dieser Verfahrenskette zeichnen sich durch Kosteneffizienz, niedrigem Gewicht, Flexibilität und 3D-Fähigkeit aus. Aufgrund ihrer polymeren multimodalen Stufenindexprofileigenschaften sind sie besonders für die Kurzstreckenübertragung im Bereich bis 100 m geeignet [P2].

Dabei stellt der Aerosol-Jet-Druck den Kern des OPTAVER-Prozesses dar, welcher eine kontaktlose Drucktechnik darstellt. Dieser ermöglicht die Funktionalisierung dreidimensional geformter Substrate. Neben der Vielzahl der zu verarbeitenden Tinten, wie z.B. Metallnanopartikel-Tinten, Polymere und Biomaterialien, ist es auch möglich, auf eine breite Palette von Substratmaterialien zu drucken. Besondere Bedeutung erhält der Aerosol-Jet-Druck vor allem dadurch, dass nicht nur planare, sondern auch 3D-Strukturen erzeugt werden können. Was für eine Weiterentwicklung konventioneller räumlicher Schaltungen in Form von 3D-MIDs hin zu 3D-Opto-MIDs zwingend notwendig ist. Das Funktionsprinzip ist dabei in Bild 19 dargestellt [48]. In einem Behälter mit flüssiger Funktionstinte wird mittels eines pneumatischen Zerstäuber Trägergas (Stickstoff) geleitet und die Tinte vernebelt. Anschließend wird das erzeugte Aerosol in einem virtuellen Impaktor verdichtet. Das Aerosol passiert anschließend die Druckdüse, wo es durch einen Hüllgasstrom fokussiert wird.

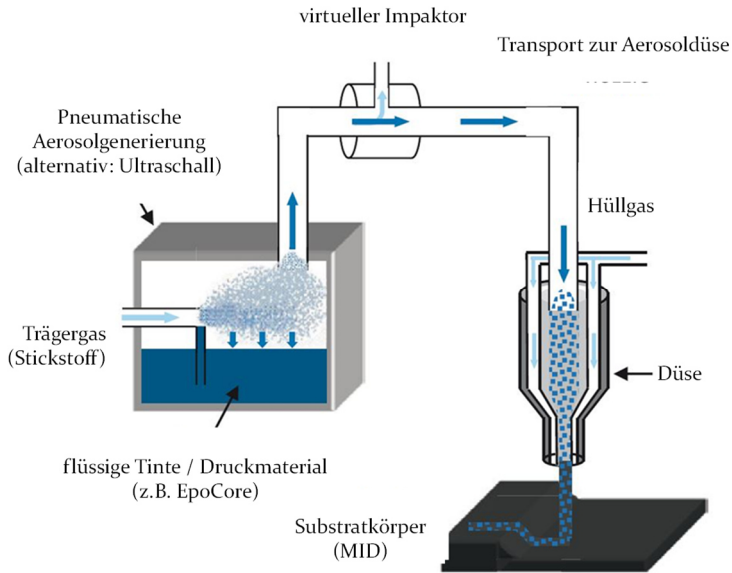


Bild 19: Aerosol-Jet Funktionsprinzip nach [49] [42]

Die aerodynamische Fokussierung erlaubt das Drucken mit hoher Konturschärfe, auch bei einem Abstand zwischen Düsenspitze und Substrat von mehreren Millimetern. [50]

3 Methoden der domänenorientierten Produktentwicklung

Wie bereits in den vorherigen Kapiteln beschrieben, sind komplexe technische Systeme zumeist das Ergebnis des erfolgreichen Zusammenwirkens von Maschinenbau, Elektrik/Elektronik sowie der Softwaretechnik. Dafür steht auch der Begriff der Mechatronik, der vor ca. 45 Jahren in Japan von einem Entwickler der Robotertechnik geprägt wurde. [51] In seiner ursprünglichen Form setzte er sich maßgeblich nur aus den beiden Begriffen Mechanik und Elektronik zusammen, jedoch hat auch zunehmend auch die Informatik Einzug in diese Ingenieursdisziplin gefunden. Laut einer Definition des Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) sowie der American Society of Mechanical Engineer (ASME) wird Mechatronik wie folgt beschrieben [52]:

„Mechatronik ist die synergetische Integration des Maschinenbaus mit der elektronischen und intelligenten Computersteuerung bei der Konstruktion und Fertigung industrieller Produkte und Prozesse.“

Der Begriff der Optomechatronik erweitert diese Definition noch um eine weitere Ingenieursdisziplin - der Optik. Die methodische Entwicklung im Bereich der integrierten optomechatronischen Bauteile ist jedoch ein bisher noch unerforschtes Feld. Insbesondere beim Einsatz rechnergestützter Systeme existieren noch Diskrepanzen zwischen bekannten Vorgehen und den benötigten neuen Vorgehensweisen. Im Folgenden sollen zunächst Ansätze und Methoden vorgestellt werden, die relevant für die multidisziplinäre Entwicklung sind. Dabei werden allgemeine Modelle zur Konstruktion technischer Produkte beleuchtet, die dann weiter aufgegliedert nach spezifischen Vorgehensweisen der jeweiligen rechnergestützten Systeme betrachtet werden. Abschließend werden diese Vorgehensweisen und Methoden bewertet.

3.1 Allgemeine Vorgehensweisen

Bevor auf spezifische Methoden und Abläufe eingegangen werden kann, soll anhand der Beispiele *Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme* als auch der *Entwicklungsmethodik für mechatronische Produkte* des VDI die allgemeine Vorgehensweise der Produktentwicklung beleuchtet und bewertet werden.

3.1.1 VDI-Richtlinie 2221 – Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme

Eine bedeutende Richtlinie, die auf der Entwicklungsmethodik nach Pahl/Beitz [53] basiert, ist die vom Verein Deutscher Ingenieure herausgegebene VDI-Richtlinie 2221 „Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme“ (siehe Bild 20) [54]. Trotz der Zielsetzung, eine branchenübergreifende Methodik zu definieren, orientiert sich der Lösungsansatz stark am Maschinenbau. Dabei beschreibt die Richtlinie den Produktentwicklungsprozess (PEP) detaillierter als Pahl/Beitz [55] und weist auf notwendige Anpassungen in Bezug auf die Herkunft der Aufgabenstellung hin [56].

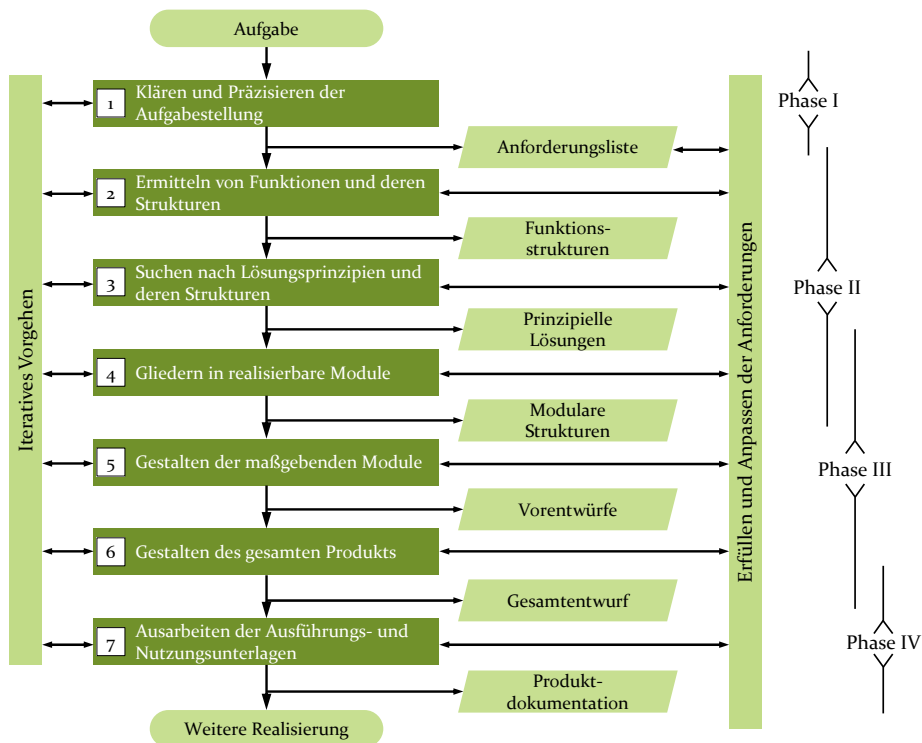


Bild 20: Vorgehen nach VDI-Richtlinie 2221 [54]

Allgemein werden in der VDI 2221 branchen- und produktlebenszyklusübergreifende Aspekte berücksichtigt. Die notwendigen Schritte gliedern sich dabei in sieben Schritte, wie in Bild 20 dargestellt. Es wird ein Bottom-Up-Ansatz verfolgt, der ausgehend vom Klären und Präzisieren der Aufgabenstellung, über die Ermittlung von Funktionen und deren Lösungsprinzipien, bis hin zur Gestaltung und Dokumentation des fertigen

Produkts reicht. Zunächst wird das Produkt in einzelne Module unterteilt, die später zu einem übergeordneten System aggregiert werden.

Die Methodik eignet sich auch zur Entwicklung von Systemen, die über die reine Mechanik hinausgehen. Verschiedene Aspekte des Produktlebenszyklus werden in den Ansatz integriert und das iterative Vorgehen ermöglicht Anpassungen während der Entwicklung. Des Weiteren dient vor allem die Aufstellung der Funktionsstruktur der Parallelisierung und Koordination von Arbeitsschritten während der Ausarbeitung. Ein Trend vom sequentiellen zum Concurrent Engineering ist hier ersichtlich [57]. Die Strukturierung der Arbeitsschritte ermöglicht außerdem ein rechnergestütztes Vorgehen. Dennoch basiert der Ansatz sehr stark auf der Entwicklung mechanischer Systeme und vermisst eine ganzheitliche Systemspezifikation und disziplinunabhängige Funktionsaufstellung. Der Ansatz sieht des Weiteren keine durchgängige Modellierung vor, sondern ist stark dokumentenabhängig.

3.1.2 VDI-Richtlinie 2206 – Entwicklungsmethodik für mechatronische Produkte

Eine weitere bekannte, stärker auf interdisziplinäre Zusammenarbeit ausgelegte, Vorgehensweise bildet die VDI Richtlinie 2206 „Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme“ aus der auch das V-Modell hervorgeht (siehe Bild 21) [58]. Diese ist von Bedeutung, da auch domänenübergreifende Systeme berücksichtigt werden. Die etablierte Richtlinie soll bei der interdisziplinären Entwicklung methodisch unterstützen und kann als Erweiterung der schon beschriebenen VDI-Richtlinie 2221 zum methodischen Entwickeln und Konstruieren gesehen werden [54, 59]. Der gesamte Prozess basiert auf den Anforderungen und Spezifikationen, die bereits im Vorfeld zu klären sind. Dazu zählen unter anderem Funktionen und spezielle Eigenschaften, die vom Produkt erfüllt werden müssen. Ziele für Kosten können ebenso bei den Anforderungen definiert werden, um den wirtschaftlichen Rahmen festzulegen. Grundsätzlich gilt: Je genauer die Anforderungen definiert werden, umso exakter wird das fertige Produkt den vorher festgelegten Punkten entsprechen. Der Entwicklungsprozess lässt sich in drei Hauptbereiche gliedern. Dies ist zum einen der *Systementwurf*, der *domänenspezifische Entwurf* und die *Systemintegration*. Begonnen wird mit dem Systementwurf, der das Ziel eines Lösungskonzepts verfolgt, in welchem die zukünftige Wirkungsweise des Produktes beschrieben werden kann. So werden in dieser Phase die konkreten Anforderungen

zunächst abstrahiert betrachtet. Nachdem dann eine allgemeine Anforderungsliste erarbeitet wurde, kann die Gesamtfunktion erschlossen werden. Anschließend können die Bestandteile und der Zusammenhang zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen spezifiziert werden. [58, 60]

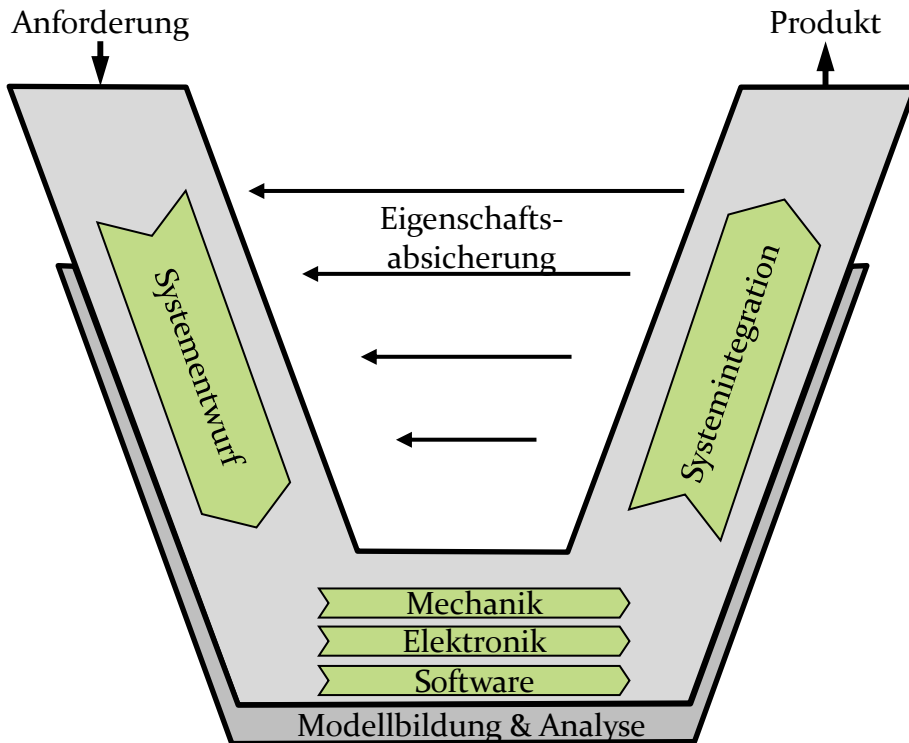


Bild 21: V-Modell der VDI 2206 für den mechatronischen Produktentwicklungsprozess (PEP) [58]

Aufgrund der Komplexität derartiger Systeme ist es ratsam, die Gesamtfunktion in kleinere Teilbereiche zu unterteilen, um sie beherrschen zu können. Für die Teilbereiche muss nun nach passenden Lösungskonzepten gesucht werden. Stehen die Lösungen für die jeweiligen Teilprobleme fest, werden sie zu einem Gesamtkonzept verknüpft. Dadurch kann ein domänenübergreifendes Lösungskonzept festgelegt werden. [58]

In der darauffolgenden Phase des *domänenspezifischen Entwurfs* werden die Wirkprinzipien und Lösungselemente die den Teilfunktionen zugeordnet sind partitioniert. Das bedeutet die prinzipiellen Lösungen werden den Disziplinen der Mechanik, Elektrik/Elektronik und Software/Firmware zugeordnet und weiter konkretisiert bzw. detailliert. Für die Entwicklung stehen domänenspezifische Entwicklungsmodelle, wie die vorgestellte VDI-

Richtlinie 2221 für den Maschinenbau, das Y-Diagramm [61] in der Elektronik bzw. das Spiralmodell [62] oder V-Modell in der Softwareentwicklung zur Verfügung.

In der *Systemintegration* werden Ergebnisse der einzelnen Disziplinen zu Baugruppen, Subsystemen und Gesamtsystem (je nach Reifegrad) integriert. Dabei unterscheidet man die funktionale Integration verteilter Komponenten (Zusammenschluss über Signal- und Energieflüsse), modulare Integration (mechanischer Zusammenbau der einzelnen Module) und räumliche Integration (Zusammenbau von Komponenten zu einer Einheit).

Die Sicherstellung der geforderten Systemeigenschaften erfolgt durch eine stetige Validierung und Verifikation (Eigenschaftsabsicherung) des Entwurfsmodells. Dazu erfolgt eine kontinuierliche Validierung der Ergebnisse des Systementwurfs, der domänenspezifischen Entwicklung und der Systemintegration mit der zuvor definierten Anforderungsliste. Anschließend werden die technischen Entwicklungsergebnisse anhand der Lösungskonzepte verifiziert. Die Eigenschaftsabsicherung erfolgt nach dem Bottom-Up-Prinzip auf verschiedenen Ebenen: Bauteil mit einzelner Anforderungsspezifikation, Baugruppe mit entsprechenden Anforderungsspezifikationen, System mit der Systemanforderungsspezifikation und das Produkt mit den Kundenanforderungen.

Die VDI Richtlinie 2206 stellt eine Methodik zur Umsetzung des Systems Engineering dar. Systeme werden in frühen Phasen des PEP (Produktentwicklungsprozess) ganzheitlich und disziplinunabhängig betrachtet. Positiv anzumerken ist, dass das iterative Vorgehen mit verschiedenen Reifegraden eine Komplexitätsreduktion ermöglicht. Dennoch stellt das V-Modell ein stark sequentielles und somit starres, unflexibles Vorgehen dar. Im Vergleich zu agilen Prozessen kann auf Änderungen nur langsam und mit großem Aufwand reagiert werden. Weitere Agilitätseinschränkungen und Abstimmungsprobleme sind durch eine starke Dokumentenabhängigkeit begründet, da viele Prozessphasen nicht ausreichend digitalisiert sind. Dadurch entstehen Lücken zwischen den einzelnen Prozessphasen und es kann keine Durchgängigkeit im PEP hergestellt werden.

3.1.3 Modellbasiertes Systems Engineering (MBSE)

MVPE (Modellbasierte Virtuelle Produktentwicklung) „ist die durchgehende, rechnergestützte, formale Modellbildung und Dokumentation aller

entwicklungsrelevanten Phasen des Produktlebenszyklus mit der Zielsetzung der Weitergabe des Modells in die nächste Entwicklungsphase, sowie der Weiterverwendung dieser Modelle für Simulation, Validierung und Verifikation“ [63]. In Ergänzung dazu beschreibt das INCOSE das MBSE als „formalisierte Anwendung der Modellierung, um die Aufnahme von Systemanforderungen, -design, -analyse, Verifikation und Validierung ab der Konzeptphase über die Entwicklungsphase bis zu späteren Lebenszyklusphasen zu unterstützen“ [64]. Durch die Erstellung eines Systemmodells, das sämtliche Produktlebenszyklusanforderungen („Design for X“) beinhaltet, kommt der Systementwurfsphase eine besondere Bedeutung zu.

Das MVPE-Vorgehensmodell (siehe Bild 22) ist eine Erweiterung der VDI Richtlinie 2206 und dient der Umsetzung des MBSE [63].

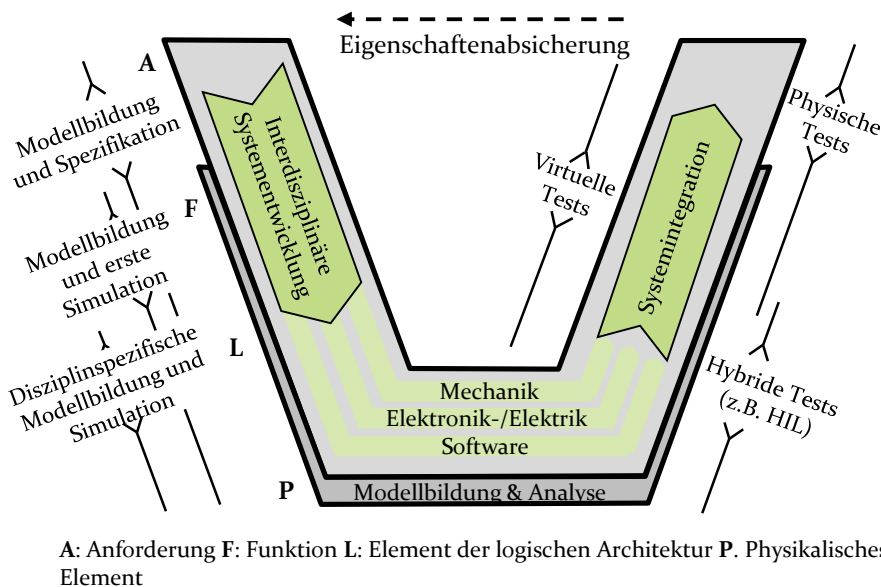


Bild 22: Vorgehensmodell der modellbasierten virtuellen Produktentwicklung nach [63]

Dabei unterscheiden sich die Modelle in drei folgenden Merkmalen: Erstens wird das Verfahren durch verschiedene Modellbildungen und Simulationen unterstützt. Besonders hervorzuheben ist die interdisziplinäre Systementwicklung, die die Spezifikation und Modellierung der Elemente Anforderungen (A), Funktion (F) und Logik (L) umfasst. Zweitens wird das gesamte Vorgehen von virtuellen, hybriden und physischen Tests begleitet. Drittens unterscheidet sich das MVPE-Vorgehensmodell durch die Berücksichtigung sämtlicher Produktlebenszykluselemente, die in einer PLM Software verwaltet werden. [65]

Mit dem MVPE-Vorgehensmodell steht eine Methodik zur Verfügung, die eine durchgängige Modellierung über den gesamten Lebenszyklus unterstützt. Dadurch wird die Komplexität in mechatronischen Entwicklungsprojekten reduziert. Erstens wird iteratives Arbeiten unterstützt, indem das V-Modell mehrfach durchlaufen und der Reifegrad bzw. Umfang des Produktmodells dabei kontinuierlich erhöht wird. Zweitens kann eine inkrementelle, phasenübergreifende Vorgehensweise realisiert werden, da jede Veränderung und deren Auswirkung anhand der Durchgängigkeit nachvollziehbar ist. Drittens werden sämtliche Fortschritte zuerst modelliert, simuliert bzw. virtuell getestet, bevor sie realisiert werden.

3.2 Entwurf von elektronischen und elektrooptischen Schaltungen sowie von MID

In den nächsten Unterabschnitten sollen Entwicklungsvorgehen domänenspezifischer und domänenübergreifender Systeme erläutert werden. Der Fokus liegt hier vor allem auf elektrischen, MID- und elektrooptischen Baugruppen.

3.2.1 Generelle Vorgehensweisen für elektronische und elektrooptische Baugruppen

Der grundlegende Sinn einer Prozesskette für die elektronische und elektrooptische Produktentwicklung ist es, eine funktionale Idee in einen funktionierenden Chip oder eine Leiterplatte (d.h. das Design) mit einem reproduzierbaren Verfahren (der Prozesskette) zu übertragen. Final soll dabei ein funktionsfähiges System entstehen. Auch wenn das Entwerfen einfacher photonischer Komponenten intuitiv möglich ist, ist ein reproduzierbarer Prozess, unterstützt durch effiziente Softwarewerkzeuge, von entscheidender Bedeutung. [66]

Eine übergreifende Vorgehensweise die sich am MBSE bzw. der VDI 2206 anlehnt ist in Bild 23 unter Berücksichtigung der verschiedenen Abstraktionsebenen dargestellt.

Für elektronische wie optische Systeme ist in einem ersten Schritt die Formulierung grundlegender Konzepte oder Ideen auf einem hohen Abstraktionsgrad von Bedeutung. Danach kann in nachfolgenden Schritten logische Zusammenhänge verschiedener Funktionsbausteine erfasst werden. Im Allgemeinen wird in der Literatur dieser erste Schritt unter anderem als *Front-End Design* oder schematische Erfassung bezeichnet. [67, 66]

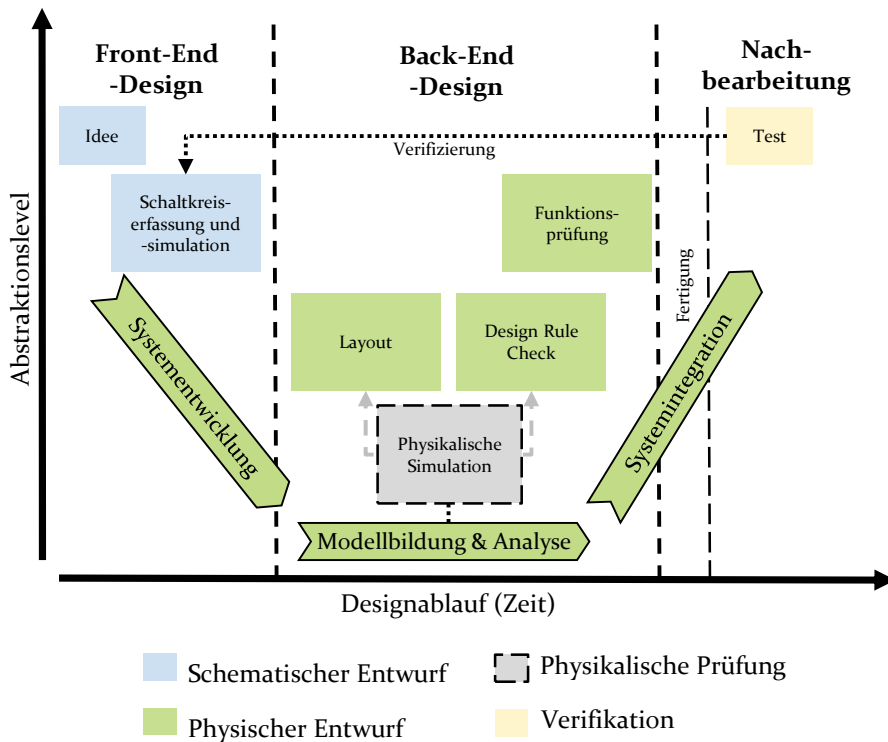


Bild 23: Allgemeiner Entwurfsprozess elektrischer-, optischer und elektrooptischer Schaltungen (in Anlehnung an [66])

Analog hierzu existiert das *Back-End Design* oder Layouting welches im Wesentlichen die Gestaltung der Schaltungsträger, die Platzierung und Entflechtung Bauelemente sowie Funktions- und Designregelprüfungen beinhaltet. Diese können im Falle von elektronischen Leiterplatten, Abstände der Leitbahnen untereinander, zu anderen wichtigen Bauelementen oder aber grundlegende Geometrische Abmaße beinhalten (z.B. Breite der Leiterbahn, Größe und Abstände von Durchkontaktierungen, Abstände zur Leiterplattenkontur). Abschließend findet die Nachbearbeitung statt. Im Detail sind die Schritte wie folgt gegliedert [66]:

- *Designerfassung:* Die Funktionsidee wird in einen Schaltplan aus logischen Bausteinen oder hierarchischen Teilsystemen umgesetzt. Es kann eine Untersuchung verschiedener Schaltungsarchitekturen oder Topologien mit unterschiedlicher Auswahl an Bausteinen geben.
- *Schaltungssimulation:* Die logische Schaltung wird simuliert und ihre Parameter optimiert, damit sie wie vorgesehen funktioniert.

- *Schaltungslayout*: Die logische Schaltung wird in eine Maskenlayoutdarstellung umgewandelt, die für die Fertigung verwendet werden kann.
- *Verifizierung*: Das Layout wird auf Fehler überprüft, um sicherzustellen, dass es mit dem Fertigungsprozess kompatibel ist, und es werden Simulationen durchgeführt, um sicherzustellen, dass das Layout die gewünschte Funktion erfüllt.
- *Herstellung*: Die generierten Layoutdaten durchlaufen eine Reihe von Nachbearbeitungsschritten, um diese in die eigentlichen Formate zu konvertieren. Auf Basis dieser wird die Baugruppe hergestellt.
- *Prüfung*: Das hergestellte Produkt wird getestet, und die Ergebnisse werden mit dem ursprünglichen Entwurf abgeglichen. Bei Bedarf werden Designinformationen aktualisiert, um die nächste Generation von Designs zu verbessern.

Für das bessere Verständnis soll nun in den nächsten drei Abschnitten die spezifischen Entwurfsprozesse für Elektronik, 3D-MID und Elektrooptik fokussiert werden.

3.2.2 Vorgehen im Elektronikentwurf

Very Large-Scale Integration (VLSI) beschreibt den Prozess der Einbettung eines geometrischen Chiplayouts aus einer abstrakten Schaltungsbeschreibung. Dies kann beispielsweise eine Netzliste sein, die in eine physische Ebene, wie z.B. Silizium, übertragen wird [68, 69]. Das Endprodukt ist eine integrierte Schaltung (IC – Integrated Circuit). Auf einer höheren Ebene im Designprozess und in kleinerem Maßstab besteht der Zweck des Designs von Leiterplatten (PCB – Printed Circuit Board) darin, ein geometrisches Layout zu erzeugen, indem VLSI-Komponenten (z.B. Chips) montiert und Leiterbahnen auf einer Leiterplatte verlegt werden. In den ersten Jahren der Halbleitertechnologie wurden Entwürfe manuell auf Papier entworfen. Bald jedoch, bedingt durch den Anstieg der Anzahl der Transistoren auf einem Chip und verbesserte Halbleiterherstellungsprozesse, wurden neue automatisierte Werkzeuge notwendig, um den Designprozess zu erleichtern – EDA-Systeme (Electronic Design Automation). Diese Tools werden hauptsächlich zur Generierung neuer Chips und Schaltungen verwendet [68]. Im VLSI- und PCB-Design gibt es grundlegende Elemente, die gleichzeitig optimiert werden müssen: Fläche, Geschwindigkeit, Verlustleistung, Designzeit und Testbarkeit. Die Partitionierung auf verschiedenen Ebenen

ist ein typisches Beispiel, das die Zerlegung eines Systems in kleinere Subsysteme, bis hin zu den kleinsten logischen Blöcken veranschaulicht. [68]

Laut Gajski und Kuhn [61] gibt es drei Designbereiche, die jeweils eine eigene Hierarchie haben:

- Der erste Bereich ist die Verhaltensdomäne, in der das Design auf funktionaler Ebene durch mathematische Gleichungen oder boolesche Algebra beschrieben wird.
- Der zweite Bereich ist die strukturelle Domäne, die eine Schaltung als die Zusammensetzung von Teilschaltungen definiert (z.B. Transistoren, die auf Chip-Ebene ein NAND-Gate bilden oder elektronische Komponenten, die eine bestimmte Funktion auf PCB-Ebene erfüllen).
- Der dritte Bereich, die physikalische Domäne, gibt Auskunft über die Lage der Schaltungselemente.

Heutzutage ist der Designprozess durch eine Vielzahl von Softwaretools hoch automatisiert. Dazu gehören Algorithmen- und Systementwurfswerkzeuge zur Übersetzung der in Hardware zu implementierenden Algorithmen (z.B. durch den Einsatz von Hardwarebeschreibungssprachen). Struktur- und Logikdesigntools ermöglichen es Designern, Spezifikationen von Schaltungsblöcken (normalerweise Logikgatter wie NAND, D-Flipflops usw.) und deren Verbindungen mittels interaktiver Schaltplaneditoren zu definieren. In einem nachfolgenden Schritt erlauben Editoren oft die Simulation von neu entworfenen Blöcken, um ihr Verhalten zu überprüfen. Layoutdesigntools optimieren die Platzierung von Bauelementen und lösen Routing-Probleme auf einer festgelegten Fläche. Dazu gehört auch Partitionierung und die Einhaltung von Designregeln. Beispiele für solche PCB-Layoutsysteme sind u.a. Allegro PCB Design von Cadence [70], Xpedition Enterprise von Mentor Graphics [71] oder Cadstar der Firma Zuken [72].

Der in Bild 24 dargestellte Prozess zeigt auf verschiedenen Ebenen für IC, MCM (Multi-Chip-Module) und PCB die einzelnen Entwicklungsschritte beim Entwurf elektronischer Schaltungen. Die Korrektheit der erstellten Layouts kann durch verschiedene Verifikationsmethoden überprüft werden. Ein praktischer Ansatz ist das Prototyping, indem ein funktionierendes Design aus diskreten Komponenten auf Breadboards zusammengesetzt wird. Dies wird jedoch bei einer Vielzahl von Komponenten sehr komplex. Simulationswerkzeuge mit Computermodellen analysieren das Ausgangssignal für ein bestimmtes Eingangssignal. Mit dem Wachstum des Layouts mit seinen internen Zuständen und möglichen Eingangssignalen stößt auch die Simulation an ihre Grenzen.

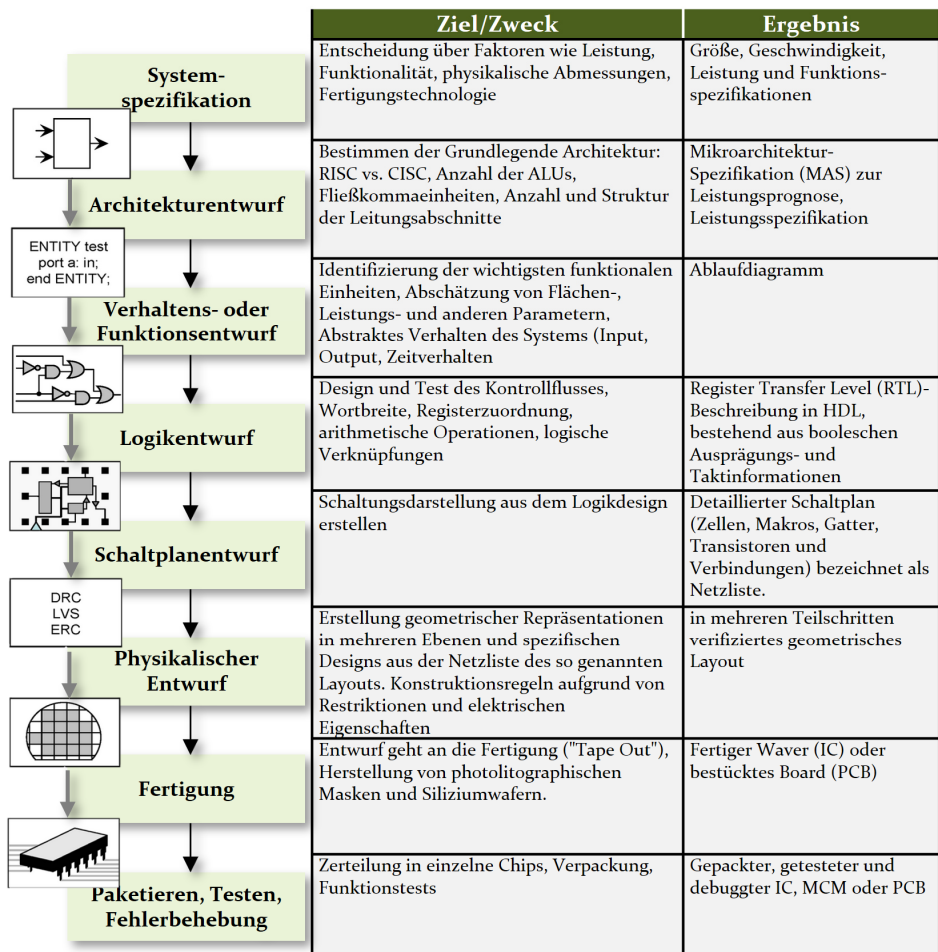


Bild 24: Wichtige Schritte des digitalen Entwurfsprozesses mit dessen Zweck und Ergebnis basierend auf [73, S3]

3.2.3 Vorgehen für räumliche elektronische Baugruppen (3D-MID)

Eine Weiterentwicklung im Gegensatz zum klassischen planaren Schaltungsträger sind 3D-MID. MIDs sind komplexe mechatronische Systeme, welche nicht nur das elektronische Layout in den Vordergrund stellen, sondern auch durch die Funktionsintegration eine enge Zusammenarbeit der Mechanik- und Elektronikentwicklung einfordern. Zahlreiche Unternehmen verwenden jedoch bis heute noch keine MID-spezifische Systematik für die Entwicklung neuer Produkte. Dabei existieren bereits Richtlinien, die alle das Ziel verfolgen die hohe Komplexität der Entwicklung durch ein

Vorgehensmodell zu reduzieren. Neben dem Vorgehen nach PAHL/BEITZ hat vor allem die Richtlinie VDI 2206 aus Abschnitt 3.1.2 als Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme eine hohe Bekanntheit und nimmt wegen ihrer allgemeingültigen Auslegung eine zentrale Rolle ein.

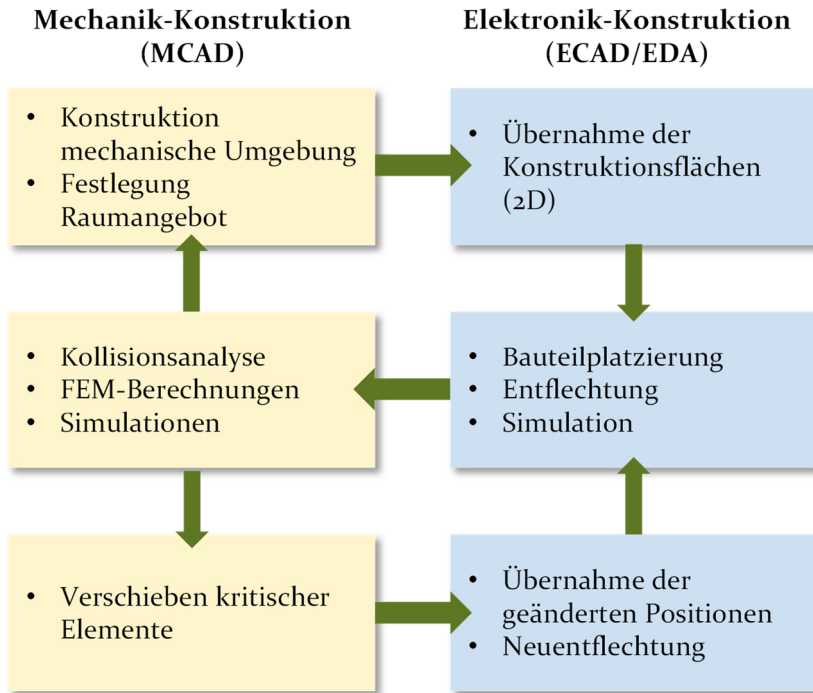


Bild 25: Iterationen im Entwicklungsprozess zwischen EDA/ECAD und MCAD nach [9]

Den Anforderungen an die Entwicklung von MIDs können sowohl herkömmliche MCAD- als auch EDA-Systeme nicht gerecht werden. Bei EDA-Systemen liegt das vor allem daran, dass die Layoutsynthese nur für 2D-Layouts durchgeführt wird und daher ausschließlich die Funktion des Logikentwurfs für ein potenzielles MID-Tool sinnvoll genutzt werden kann. Im Gegensatz dazu bieten MCAD-Systeme keinerlei elektronische Funktionen und konzentrieren sich vollständig auf die geometrische Modellerstellung. Werden nun klassische EDA- und MCAD-Systeme zur Entwicklung von MIDs genutzt, hat dies zur Folge, dass ein ständiger Datenaustausch zwischen dem MCAD-System, welches den Einbauraum vorgibt, und dem EDA-System, welches für den Layoutentwurf zuständig ist, stattfinden muss. Gleichzeitig bedeutet eine Änderung in einem System, dass diese auch parallel im anderen überprüft und abgesichert werden muss (siehe auch Bild 25). Durch diese Änderungen können kosten- und zeitin-

tensive Iterationsschleifen zwischen den Entwicklungsabteilungen Mechanik und Elektronik entstehen. Dies lässt sich vor allem durch möglicherweise inkompatible Anforderungen, Wissensständen und Dateiformaten begründen. Zudem ist die Notwendigkeit unnötig große Toleranzen einzuführen ein zusätzlicher Aspekt, um dem jeweiligen System gerecht zu werden. Diese genannten Punkte führen zu unvermeidbarer zusätzlicher Detailarbeit. [S4, 13]

3.2.4 Vorgehen im elektrooptischen Entwurf

Im Bereich der elektrooptischen Modellierung planarer integrierter Systeme gibt es bis heute keine einheitlichen Vorgehensweisen. Zumeist wird auf Basis einer elektrischen Leiterplatte ein System entworfen bei dem, je nach Anwendungsfall, Komponenten oder Signalleitungen durch optische Zwischenschichten oder Ersatzkomponenten ausgetauscht werden. Hersteller dieser Systeme gehen dabei generell meist wie folgt vor (siehe auch Bild 26):

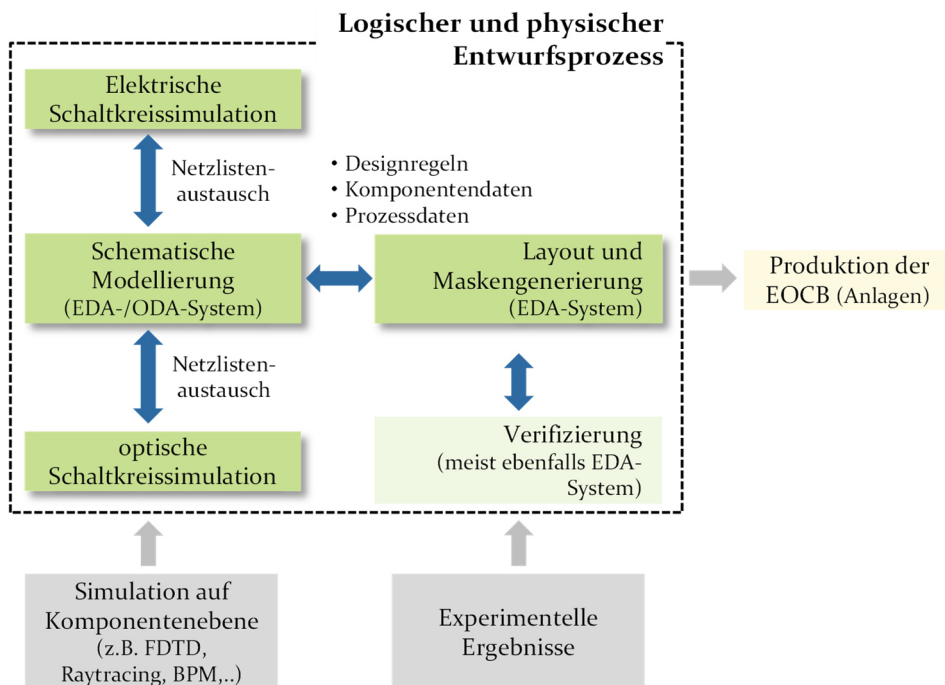


Bild 26: Integrierter Entwurfsprozess elektrooptischer Leiterplatten in Anlehnung an [74]

Auf Basis elektrischer Schaltpläne/Schaltkreissimulationen sowie photonischen Simulationen wird eine schematische Modellierung in einem EDA-/ODA-System ausgearbeitet, das die logische Verdrahtung der Bauteile übernimmt. Dabei können mit einem integrierten Editor hierarchische Blöcke verschachtelt ausgelegt und miteinander verknüpft werden. Das Ergebnis ist, analog zur elektrischen Schaltplanerstellung, Netz- und Stücklisten. Dabei werden parallel Simulationen auf Komponentenebene durchgeführt wie z.B. Raytracing, Beam Propagation oder FDTD, um die Funktionsfähigkeit der Schaltung zu gewährleisten. In einem weiteren Schritt wird aus der schematischen Modellierung, ähnlich dem elektronischem Layoutprozess (siehe Abschnitt 3.2.2), ein elektrooptisches Layout generiert. Dabei ist dieses meist in einem passenden EDA-System realisiert. Hier spielen Designregeln wie Krümmungsradien, Abstände der Bauelemente aber auch Prozess- oder Komponentendaten eine Rolle. Abschließend werden die Layoutdaten für die Fertigung freigegeben.

3.3 Bewertung

Wie dargestellt, existieren Produktentwicklungsmethoden, die für den domänenspezifischen wie auch den domänenübergreifenden Entwurf anwendbar sind. Jedoch basieren diese entweder auf sequentiellen Vorgehen, die den Entwurfsprozess entweder rein mechanisch, elektrisch oder softwaretechnisch betrachten und erst abschließend integrieren. Zudem sind diese Entwicklungsmodelle für mechanische bzw. mechatronische Anwendungen gedacht. So ist der Bereich der Optik in keiner dieser Vorgehensmodelle berücksichtigt. Allgemeingültige Richtlinien für elektrooptische bzw. optomechatronische Anwendungen sind derzeit nicht bekannt. Dennoch existieren neben allgemeinen Vorgehensmodellen konkrete Ansätze für den Bereich der Elektronik/Elektrooptik wie sie in Abschnitt 3.2 vorgestellt wurden. Diese stellen eine Grundlage für einen übertragbaren Leitfaden zur Produktentwicklung optomechatronischer Baugruppen. Da sich jedoch nur auf Elektro- bzw. Optikentwicklung konzentriert wird und zudem im Bereich der Photonikentwicklung nicht die spezifischen Arbeitsschritte des digitalen Entwurfs behandelt werden, ist eine Vorgehensweise hierfür zu erarbeiten, die später auch in Kapitel 6 detailliert vorgestellt wird.

4 Funktionsweise von softwarebasierten grafischen Ingenieurssystemen

Mit den aus Kapitel 3.2 vorgestellten repräsentativen Methoden gehen softwarebasierte Ingenieurssysteme einher, die als Grundlage zu deren Umsetzung dienen. Die bekanntesten Vertreter hierfür sind CAD Programme, die auf Computermodellen mit einer 3D-Visualisierung basieren und deshalb auch für diese Arbeit von Bedeutung sind. Die meisten Probleme, die in Computermodellen dargestellt werden, sind von Natur aus geometrisch. Das ist unter anderem deshalb sinnvoll, da numerisch gesteuerte Produktionsanlagen die geometrischen Formen als Eingabe übernehmen. Da für den weiteren Verlauf der Arbeit das Verständnis von solchen Systemen essentiell ist, soll deren Funktionsweise und Aufbau näher beschrieben werden. Zunächst wird jedoch der grundlegende Aufbau von Modellierungssystemen erläutert.

4.1 Grundlegender Aufbau

Modellierungssysteme werden zumeist mit geometrischen Modellen verknüpft. Dabei kann der Begriff des rein geometrischen Modells auf das sogenannte Objektmodell ausgedehnt werden, indem nicht-geometrische Daten, wie z.B. Materialien, hinzugefügt werden. Diese werden für einen bestimmten Problembereich benötigt (wie z.B. Schattierung, Sichtbarkeit, Farbe). Ein Zweig der geometrischen Modellierung ist die Volumenmodellierung. Sie zielt darauf ab, physikalische Objekte für die allgemeine Anwendbarkeit in einer umfassenden Darstellung zu definieren. Über diese Darstellung können die geometrischen Fragen algorithmisch beantwortet werden. Dies sollte umfassend sein, so dass Modelle möglichst viele Antworten in Bezug auf Vollständigkeit (Eindeutigkeit, konsistente Darstellung), Integrität (Vermeidung nichtzulässiger Schnittmengen, versteckte Linien), Komplexität und geometrische Abdeckung (mathematische Darstellung möglichst vieler Formen), geometrische Berechnungen (algorithmische Antworten auf Fragen aus technischen Anwendungen) liefern können. [75, 76]

Ein Volumenmodellierungssystem, wie in Bild 27 dargestellt, ist in der Lage die oben genannten geometrischen Fragen zu beantworten. Zusammen mit

den Algorithmen, die die Konvertierung von Daten zwischen einer internen und einer externen Darstellung ermöglichen, bilden sie ein geometrisches System. Der Volumenmodellierer (Solid Modeler) bietet eine Beschreibungssprache, die auf verschiedenen Modellierungskonzepten basiert. Die interne Darstellung wird durch eine Übersetzung aus der Objektbeschreibung erzeugt. Um seine Effizienz zu verbessern, sollte der Volumenmodellierer mehrere Darstellungen von Objekten unterstützen [76, 77].

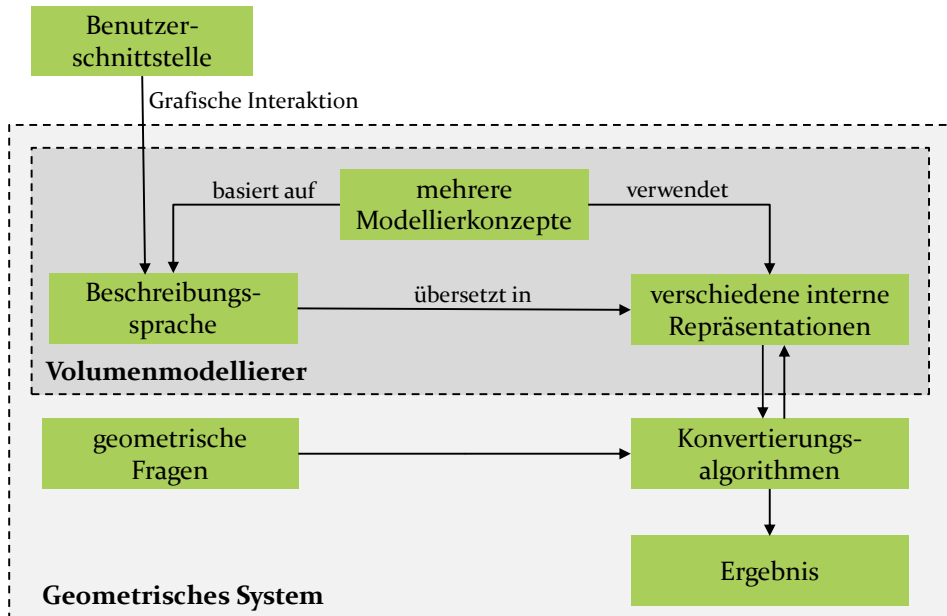


Bild 27: Funktionsbausteine eines Volumenmodellersystems basierend auf [76]

In seiner bedeutendsten Ausprägung, den CAD-Systemen, lässt sich dies durch die Konstruktion von räumlichen Körpern bzw. ganzer Ansammlungen von unterschiedlichen Körpern veranschaulichen.

4.2 CAD-Systeme

Der bekannteste Vertreter von Computer-Aided X - CAx Programmen (x steht als Platzhalter für die verschiedenen Ausprägungen, z.B. CA Engineering, CA Planning, CA Quality) ist die rechnerunterstützte Konstruktion, auch CAD (Computer-Aided Design) genannt. Diese dient der Erfassung und Verarbeitung von geometrischen Elementen zur Erstellung eines dreidimensionalen Modells [78]. In der VDI-Richtlinie 2209/2006 wird laut

[78] der CAD-Begriff anhand seiner 3D-Modellierungsgrundlagen unterschieden bzw. konsekutiv erweitert. Die konventionelle Grundlage, die geometrische Elemente mit festen Werten beschreibt, wird durch die parametrische Grundlage ergänzt. Hier werden geometrische Elemente aufgrund einer editierbaren Modellierhistorie und/oder veränderbaren Gleichungssystemen editierbar. Featurebasiertes CAD fügt den Geometrien zusätzliche Informationen hinzu, beispielsweise über Funktion und Fertigungstechnologie. Es wird wiederum durch wissensbasiertes CAD erweitert, bei dem das CAD-System befähigt ist, aus der momentanen Konstruktionssituation Geometrie- und Hintergrundinformationen zu erschließen.

CAD-Systeme können jedoch, bezogen auf ihren Anwendungszweck, unterschiedlich aufgebaut sein. Für den Entwurf von zweidimensionalen Schaltungslayouts stehen z.B. ECAD-Systeme zur Verfügung, welche auch unter der Bezeichnung Electronic Design Automation Software (EDA-Software) bekannt sind (siehe Bild 28) und üblicherweise rein zweidimensional arbeiten.

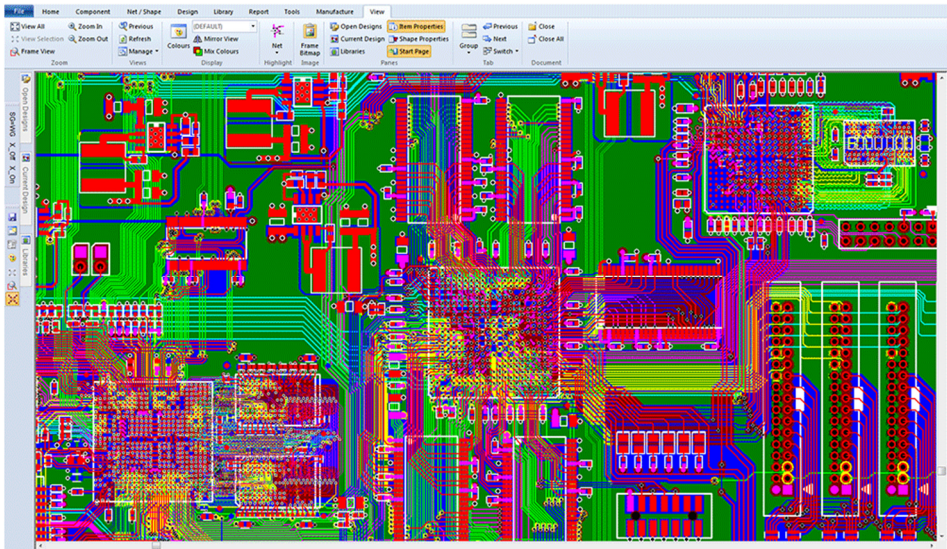


Bild 28: Beispiel der Benutzeroberfläche zur EDA-Software CADSTAR PCB Layout der Firma Zuken [72]

Der bekannteste Vertreter ist jedoch im Mechanikbereich zu verorten, sogenannte Mechanical-CAD Systeme (MCAD - Beispiel siehe Bild 29). Diese bieten oft eine hohe Vielseitigkeit hinsichtlich ihrer Funktionalität, die über die reine Konstruktionsaufgabe hinausgeht (z.B. Mehrkörpersimulationen, Finite-Elemente Methode) und werden deshalb inzwischen oft

auch als PLM-Systeme bezeichnet. Bekannte Vertreter sind u.a. die Systeme SIEMENS NX [79], DASSAULT SYSTEMS CATIA [80], PTC CREO [81] und AUTODESK INVENTOR [82].

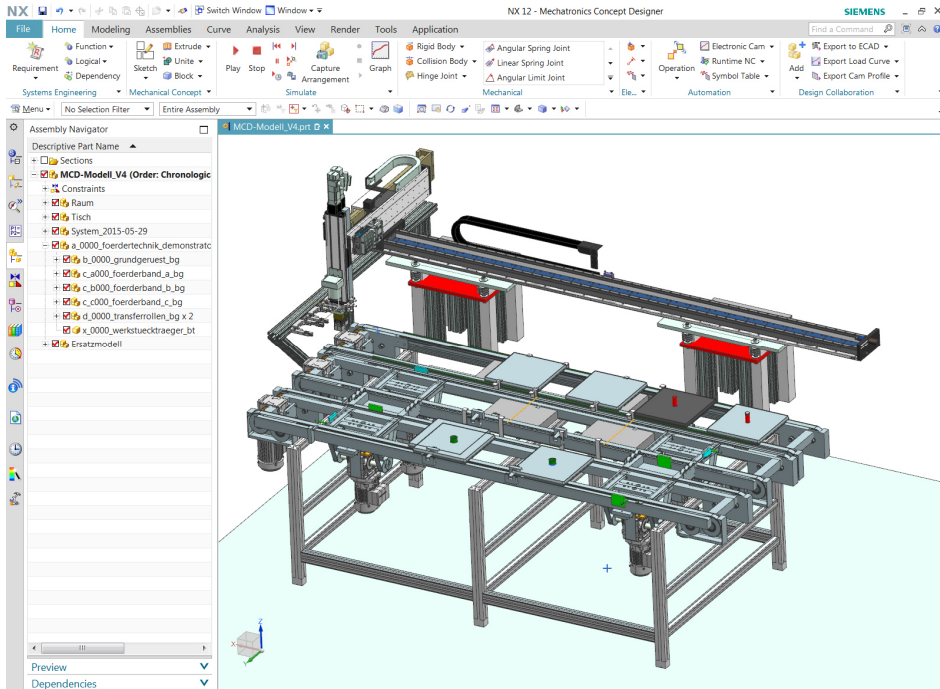


Bild 29: Beispiel der MCAD-Oberfläche für für das PLM-System Siemens NX

Für diese Arbeit sind diese Systeme zum Entwurf optomechatronischer Bauteile von gehobener Bedeutung, da die Eigenschaften von optischen Komponenten direkt von der räumlichen Gestaltung des Schaltkreisträgers abhängen. Einher mit der räumlichen Gestaltung geht die interaktive 3D-Modellierung in diesen Systemen. Aus diesem Grund werden zum allgemeinen Verständnis im nächsten Abschnitt die unterschiedlichen Repräsentationsformen betrachtet.

4.3 3D-Modelle

3D-Modelle untergliedern sich in Drahtgitter-, Flächen-, Volumen- oder Voxelmodelle. Bei 3D-Modellen ist das bereits genannte Volumenmodell (siehe Bild 30) von besonderer Bedeutung. Generell wird hier zumeist zwischen Constructive-Solid Geometry (CSG-Modelle) und der Boundary Representation (B-Rep-Modellen) unterschieden. Meist wird jedoch eine

Mischform in der geometrischen Modellierung angewendet. Auf der obersten Ebene der Darstellung wird dabei eine topologische Repräsentation gewählt, die über boolesche Operatoren die Modelle verbindet.

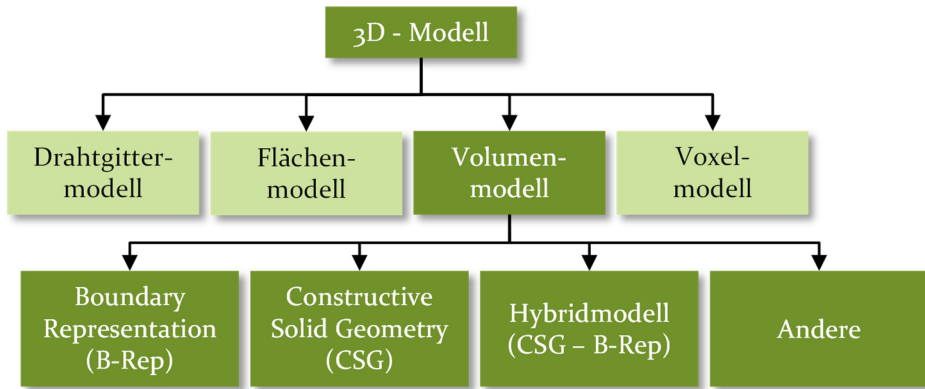


Bild 30: Klassifizierung von 3D-Modellen

Zur Erstellung dieser Volumenmodelle sind üblicherweise dreidimensionale voll parametrische CAD-Programme im Einsatz. Besonders hervorzuheben ist die Flexibilität bezüglich nachträglicher Änderungen der Geometrie. Diese Systeme können nahezu beliebige Geometrien bei einzelnen Bauteilen darstellen und Baugruppen aus mehreren Bauteilen erstellen. [83, 84, 76]

Nachfolgend sollen zum Verständnis die wichtigsten Modellarten, die in CAD-Programmen vorkommen (B-Rep-, CSG- und Hybridmodelle) beschrieben werden.

4.3.1 Constructive Solid Geometry

Durch die Verknüpfung von geometrischen Primitiven mit booleschen Operationen wie Vereinigung (\cup), Schnitt (\cap) und Differenz ($-$) ist es möglich, verschiedene begrenzte Primitive (\triangleq endliche 'feste' Volumen) zu definieren. Ein Beispiel für ein solches geometrisches Primitiv, dass aus mehreren Mengenoperationen kombiniert ist, ist in Bild 31 dargestellt. Da es eine begrenzte Anzahl von analytischen Funktionen zur Beschreibung von Volumen gibt, kann nur ein eingeschränkter Satz von Formen erzeugt werden. Um Modelle der Constructive Solid Geometry (CSG) zu erstellen, werden wiederum boolesche Operationen angewendet, um begrenzte Primitive mit immer komplexeren Formen zu verbinden. Die Verwendung der verfügbaren Mengenoperationen garantiert dabei immer eine Begrenzung. Neben der Anzahl der verfügbaren Flächen hängt die tatsächliche Anzahl

der möglichen Modelle von der Verfügbarkeit starrer Körper (idealisierte Modellvorstellung eines nicht verformbaren Körpers) und der verfügbaren Anzahl von Operationen ab. Darüber hinaus enthalten CSG-Modelle keine topologischen Informationen wie z.B. Konnektivität, sondern existiert als endliche Anzahl von Punkten.

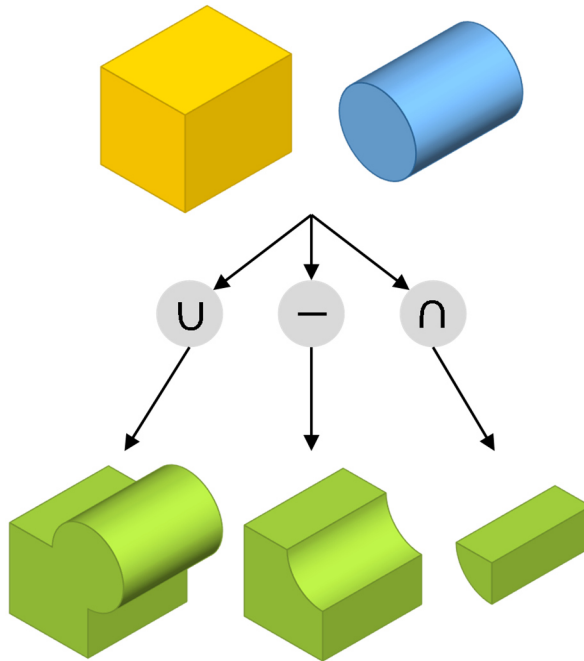


Bild 31: Halbraum eines begrenzten Zylinders und CSG-Modell bestehend aus einem Basisquader und einem Zylinder

4.3.2 Boundary Representation

Begrenzungsflächenmodelle, auch gemeinhin als Boundary Representation (B-Rep) bezeichnet, sind flächenbasierte Modelle. Ein Volumen wird indirekt durch einen Satz von umschließenden Flächen geformt. Somit ermöglichen B-Rep-Modelle eine klar definierte topologische und geometrische Beschreibung. Bild 32 zeigt die typische Unterteilung eines Volumens in Flächen, die in Form ihrer begrenzenden Polygone dargestellt werden. Diese wiederum werden in Form von Kanten und Ecken beschrieben. Die Geometrie wird also durch Flächen- und Kurvengleichungen sowie Knotenkoordinaten definiert. Die Topologie wird durch die Verbindungen zwischen den Einheiten definiert. Die begrenzte Menge von Computerspeicher erfordert eine Vereinfachung der physikalischen Gegebenheiten hin

zu der Annahme, dass reale Volumenkörper eine begrenzte Anzahl von Darstellungsarten haben und somit hingegen genau durch das BRep definiert werden können. Die Struktur der Boundary Representation (B-Rep) in MCAD-Systemen wird (mit leichten Variationen) in der Literatur etwa so angegeben, wie in Bild 32 dargestellt.

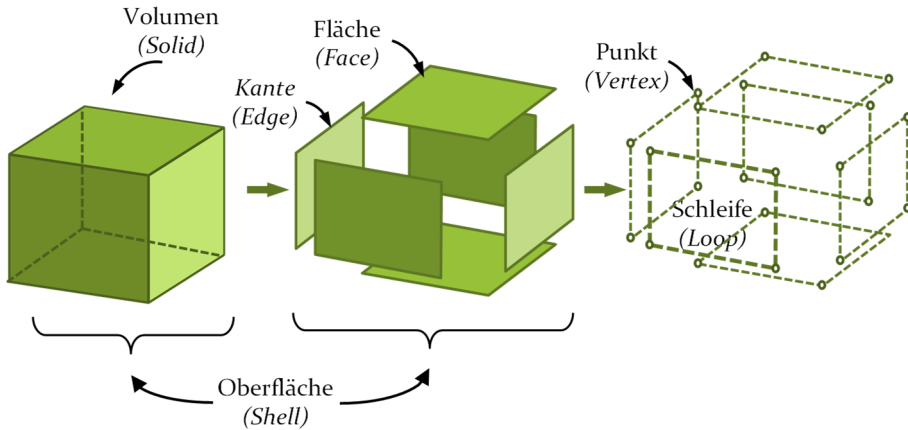


Bild 32: Dekomposition eines Volumenkörpers in die Elemente einer B-Rep Beschreibung

Dabei sind Faces die Flächen bzw. Facetten, Edges die Kanten und Vertices die Knoten bzw. Eckpunkte. Eine Shell beschreibt eine Oberfläche. Ein Volumen (Solid) ohne innere Hohlräume, wie beispielsweise der Kubus in Bild 32, besitzt nur eine einzige Shell. Eventuell vorhandene Hohlräume werden jeweils wiederum durch eine eigene Shell beschrieben. Die verschiedenen Shells werden zu einem Body zusammengefasst der den letztlichen Volumenkörper beschreibt. Eine Szene, die aus mehreren Volumenkörpern besteht, hat demzufolge auch mehrere Bodies. Unter *Loops* wird eine geschlossene Folge von Kanten verstanden, die eine Begrenzung einer Facette darstellen. Jede Facette hat mindestens eine Öffnung, die „Außengrenze“. Hat eine Facette Öffnungen (z.B. bei einer Bohrung), so hat sie für jede existierende Öffnung eine weitere Loop.

Einzelne Faces können als "zweidimensional" betrachtet werden, da jeder Punkt der Oberfläche durch lokale Koordinaten im Raum der Oberfläche beschrieben werden kann. Dementsprechend sind Oberflächen zweistufig nach dem Vorbild eines dreidimensionalen euklidischen Raumes. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass bestimmte Oberflächen, die sich an Punkten oder Kanten "berühren", nicht zweistufig sind und als besondere Topologie behandelt werden müssen. Typische Beispiele sind Zylinderoberflächen, Kugeln oder Tori.

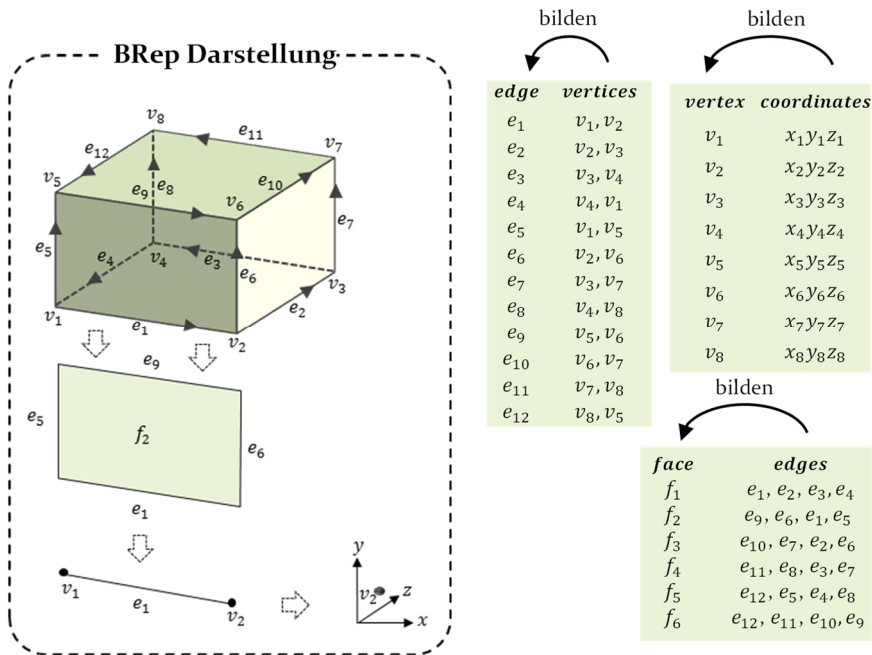


Bild 33: Datenstruktur des B-Rep Modells

Die Implementierung von B-Rep Modellen basiert zumeist auf einer Sammlung von Kanten. Flächenabgrenzungen erfolgen durch in sich geschlossene Orientierungen von Kanten (Loops). Die Datenstruktur des Kubus aus Bild 32 ist in Bild 33 dargestellt. Ein Volumen entsteht hier ausschließlich dann, wenn im B-Rep Modell jede der Kanten zu genau je zwei unterschiedlichen Flächen zugeordnet ist. Verglichen mit der Erstellung korrekt definierter Volumenkörper durch CSG Modelle ist diese Darstellungsweise deshalb bedeutend komplexer. Darüber hinaus erfüllen nur Modelle mit sich nicht kreuzenden Flächen die Bedingungen eines gültigen Volumenkörpers. Diese beiden Fälle müssen entweder durch vergleichsweise aufwändige Tests oder eingeschränkte Modellierungsfunktionalität gewährleistet sein, die ungültige Fälle vermeiden. [85, 76]

4.3.3 Hybride Modelle

Die meisten modernen CAD-Systeme basieren auf Volumenmodellierungskernen. Weit verbreitete proprietäre Kerne sind vor allem die Kerne ACIS (Dassault), Parasolid (Siemens) oder Granite One (PTC), die einen Hybrid aus mehreren nebeneinander existierenden Volumen-Darstellungen verwenden [86]. Durch diese Weise können die Vorteile der Grundansätze von

B-Rep und CSG zu einer für verschiedene Zwecke geeigneten Technik kombiniert werden. CSG-Modelle sind überlegen, wenn es um numerische Algorithmen geht. B-Rep Modelle ermöglichen die präziseste Erzeugung von Volumenkörpern und eignen sich für die grafische Ausgabe. Ein Basismodell kann so intuitiv durch Extrusion (Querschnitt und Dicke), Rotation (Profil und Drehachse) oder Schwenken (Profil und Richtung) erzeugt werden (mittels CSG). Die grafische Ausgabe, die das B-Rep Modell auf dem Bildschirm darstellt, ist eine ergänzende Darstellung (sogenannte Grafikpipeline), die hier nicht näher erläutert wird. Jeder Modellierungsschritt wird in einer sogenannten Modellierungstransaktion gespeichert, die eine unsichtbare Abfolge von Operationen beschreibt, um zwischen zwei konsistenten Zuständen zu wechseln. Eine typische Transaktion wäre: CSG-Modellerstellung durch Mengenoperationen, danach Ableitung von B-Rep und Anzeigedarstellung [76].

4.4 Besonderheiten der Bearbeitung von 3D-Modellen im CAD

Eine weitere Besonderheit moderner dreidimensionaler CAD-Systeme ist die Beschreibung komplexer geometrischer Zusammenhänge. So ist es möglich nicht nur einfache kanten- und flächenorientierte Regelgeometrien wie Kreise, Kreissegmente, Ellipsoide, Sphären oder Liniensegmente zu gestalten, sondern auch weitaus komplexere Freiformflächen oder Polynomzüge n -ten Grades. Zur Darstellung und Konstruktion werden zudem spezielle Regeln der linearen Algebra in der Computergrafik angewendet. Diese Sachverhalte haben auch Bedeutung für die Layoutplanung von 3D-Opto-MID, da diese zum einen zumeist nicht nur aus Regelflächen bestehen und zum anderen auch Komponenten beinhalten, die innerhalb eines CAD Systems dreidimensional platziert werden. Beide Besonderheiten sollen deshalb nachfolgend erläutert werden.

4.4.1 Splines und NURBS

Ein Spline (auch: Polynomzug) der Ordnung n ist eine Polynomfunktion des Grades $n - 1$, die zwischen der Menge von gegebenen unterschiedlichen Argumentwerten x_0, \dots, x_n (sogenannte Knoten) und ihren entsprechenden Funktionswerten y_0, \dots, y_n interpoliert. Splines werden vorzugsweise zur Beschreibung von Freiformflächen eingesetzt, da sie die Beschreibung einer glatten Oberfläche zulassen. Durch die Verwendung von Polynomen mit niedrigem Grad für die Interpolation vermeiden Splines

Schwingungen, die bei der Verwendung von Polynomen mit hohem Grad zwischen den Punkten auftreten würden. Dadurch können Interpolationsfehler in geringem Ausmaß gehalten werden. Grundlegende Anforderungen an Splines sind Punktkontinuität, Tangentialkontinuität und Krümmungskontinuität bei jedem Knoten, d.h. die Kurve von zwei stückweisen Polynomen hat keine Lücken (zwei Kurvenendlagen fallen zusammen), ist tangential (\triangleq identischer Kurvenwinkel) und hat den gleichen Krümmungsradius (\triangleq identischer Kurvenradius) bei einem gemeinsamen Knoten. Um die Bedingung der Krümmungskontinuität zu erfüllen, ist der minimal mögliche Polynomgrad dritter Ordnung. Polynome des Grades drei werden als kubische Splines bezeichnet.

Werden mehrere Splines kombiniert, so entstehen sogenannte NURBS – non-uniform rational B-Splines. Dies sind mathematisch definierte Flächen, die zur Modellierung beliebiger Formen verwendet werden. Bild 34 zeigt zwei Beispiele für verschiedene Arten von B(Basis)-Spline-Oberflächen. [87]

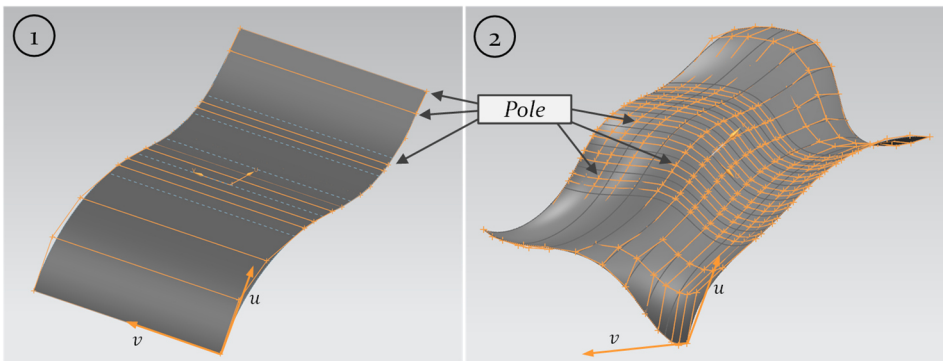


Bild 34: Beispiele für unterschiedliche B-Spline-Flächen (links – ändernde Steigung in u-Richtung, rechts – ändernde Steigung in u- und v-Richtung)

Der Unterschied zwischen den hier gezeigten Spline-Oberflächen besteht darin, dass die linke (1) nur in u-Richtung eine sich ändernde Steigung aufweist (Regelfläche), während die rechte (2) eine sich ständig ändernde Steigung sowohl in u- als auch in v-Richtung aufweist. Die Spline-Oberfläche (1) kann verzerrungsfrei auf eine Ebene abgebildet werden (abwickelbar), während dies die Spline-Oberfläche (2) nicht kann (nicht-abwickelbar).

4.4.2 Lineare Algebra in der Computergrafik

Relevante Funktionen für ein multidisziplinäres CAD-System wie z.B. Netzlistenimport, Bauteilplatzierung und B-Rep-Routing, die noch in

nachfolgenden Kapiteln beschrieben werden, sind grundsätzlich dreidimensionale Operationen. Dieser Abschnitt soll Grundlagen hierfür behandeln. Dabei spielen *affine Transformationen* unter Verwendung homogener Koordinaten im 3D-Euklidischen Raum eine besondere Rolle (siehe Bild 35). [88, 89]

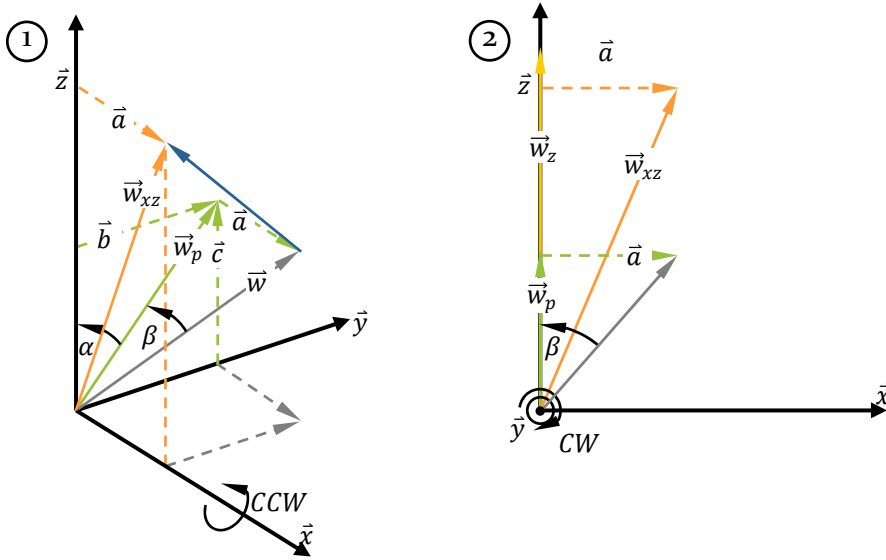


Bild 35: Rotation um eine beliebige Achse im 3D-Euklidischen Raum

Eine Funktion T wird als lineare Transformation bezeichnet, wenn sie für alle Vektoren $\vec{u}, \vec{v} \in \mathbb{R}^3$ und Skalare $c_1, c_2 \in \mathbb{R}$ folgende Anforderungen erfüllt [90]:

$$T(c_1 \vec{u} + c_2 \vec{v}) = c_1 T(\vec{u}) + c_2 T(\vec{v}) \quad (18)$$

Lineare Transformationen im 3D-Euklidischen Raum können durch 3×3 -Matrizen dargestellt werden. Typische lineare Transformationen sind Skalierung, Projektion, Reflexion, Scherung und Drehung [88]. Im Allgemeinen ist jede lineare Transformation affin, aber nicht jede affine Transformation ist linear, da affine Transformationen Übersetzungen beinhalten können. Affine Transformationen werden durch 4×4 homogene Matrizen dargestellt, um die Transformation zu berücksichtigen. Dazu wird die 3×3 -Matrix um eine 4te Dimension erweitert, die den ersten drei Elementen eines Punktes durch Matrixmultiplikation einen konstanten Vektor hinzufügt [90, 91]:

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & x_t \\ 0 & 1 & 0 & y_t \\ 0 & 0 & 1 & z_t \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x + dx_t \\ y + dy_t \\ z + dz_t \\ d \end{pmatrix}. \quad (19)$$

Der konstante Wert d bestimmt, ob eine affine Transformation mit Translation ($d = 1$) oder ohne Translation ($d = 0$) vorgesehen ist. Grundsätzlich wird ein 3D-Punkt (x,y,z) durch einen 4D-Vektor $(x,y,z,1)$ dargestellt, um die Übersetzung des Punktes zu ermöglichen, was in 4D im Wesentlichen eine Scherung ist.

Translationen sind entscheidend, um bestimmte Aufgaben im 3D-Euklidischen Raum auszuführen, wie z.B. die Drehung eines Vektors um eine beliebige Achse (z.B. relevant bei der Platzierung von Komponenten im CAD). Eine Methode, um dies zu erreichen, besteht darin, die affine Transformation zu finden, die die Drehachse auf eine der Koordinatenachsen ausrichtet, dann um diese Achse zu drehen (wie die Rotationsmatrix bekannt ist) und sie schließlich wieder an ihren ursprünglichen Ort zu transformieren.

Angesichts des Vektors

$$\vec{u} = \vec{p} + t\vec{w}, \quad t > 0, \quad (20)$$

und dem Rotationswinkel θ , müssen folgende Schritte ausgeführt werden [91]:

- Translation von \vec{u} in den Ursprung des Koordinatensystems, so dass der Richtungsvektor \vec{w} durch den Ursprung verläuft;
- Rotation von \vec{w} um die x-Achse, um \vec{w} in die x-z-Ebene abzubilden; die Rotation ist dann gegeben als

$$[R_x(\alpha)] = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (21)$$

$\|\vec{w}_p\| = \sqrt{\vec{b}^2 + \vec{c}^2}$ ist die Länge des Vektors \vec{w}_p , welcher die Projektion von \vec{w} in die y-z-Ebene darstellt; für den Sinus und Cosinus des Winkels α , erhalten wir $\sin \alpha = \frac{\|\vec{b}\|}{\|\vec{w}_p\|}$ und $\cos \alpha = \frac{\|\vec{c}\|}{\|\vec{w}_p\|}$. Das Ergebnis ist der Vektor \vec{w}_{xz} , wie in Bild 35 (links) dargestellt.

- Rotation von \vec{w}_{xz} um die y-Achse, um sie an der z-Achse auszurichten. Die Rotation ist gegeben als

$$[R_y(\beta)] = \begin{pmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (22)$$

$\|\vec{w}\| = \sqrt{\vec{a}^2 + \vec{b}^2 + \vec{c}^2}$ ist die Länge des Vektors \vec{w} ; für den Sinus und Kosinus des Winkels β zwischen dem Richtungsvektor \vec{w} und dem projizierten Vektor \vec{w}_p erhalten wir $\sin \beta = -\frac{\|\vec{a}\|}{\|\vec{w}\|}$ (zu beachten ist, dass die Drehung im Uhrzeigersinn (CW) erfolgt, durch das Minuszeichen) und $\cos \beta = \frac{\|\vec{w}_p\|}{\|\vec{w}\|}$. Das Ergebnis ist der Vektor \vec{w}_z , wie in Bild 35 (rechts) dargestellt.

- Rotation um den Winkel θ um die z-Achse:

$$[R_z(\theta)] = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; \quad (23)$$

- Berechnung der Inversen der Rotation um die y-Achse;
- Berechnung der Inversen der Rotation um die x-Achse;
- Berechnung der Inversen der Translation.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Gleichung für die Transformationsmatrix T wie folgt lautet:

$$[T] = [D]^{-1}[R_x(\alpha)]^{-1}[R_y(\beta)]^{-1}[R_z(\theta)][R_y(\beta)][R_x(\alpha)][D] \quad (24)$$

Die affine Transformation des Vektors \vec{u} ist gegeben als

$$\vec{u}' = [T]\vec{u}. \quad (25)$$

Zu beachten ist, dass alle Spalten und Zeilen von Transformationsmatrizen orthogonale Einheitsvektoren bilden und die Umkehrung einer orthogonalen Matrix ihrer transponierten Matrix entspricht.

4.5 Zusammenfassung

Für den weiteren Aufbau dieser Arbeit sind die beschriebenen Grundlagen von besonderer Bedeutung. So sind einerseits für die Konstruktion von 3D-Opto-MID sowohl Kenntnisse der geometrischen Modellierung wie z.B. die Unterscheidung von CSG-, B-Rep- und Hybridmodellen, als auch

Kenntnisse zum grundlegenden Aufbau ebendieser Systeme notwendig. Die spätere Umsetzung eines entsprechenden Konstruktionssystems basiert zudem vor allem auf der in Kapitel 4.4.2 beschriebenen linearen Algebra. So sind unter anderem die Platzierung von Bauelementen ein wesentlicher Bestandteil, der auf diesen Grundlagen basiert. Um mögliche Entflechtungen auf räumlichen Substraten vorzunehmen, ist zudem das Verständnis des topologischen Aufbaus aus Kapitel 4.3.2 und der in Kapitel 4.4.1 beschriebenen NURBS unerlässlich. So verfügen zwar nahezu alle CAD-Systeme über entsprechende Funktionen Freiformflächen zu bearbeiten und zu erstellen, jedoch stellt das geometrisch korrekte Design von Leitern, als auch die Platzierung von Komponenten, unter Berücksichtigung etwaiger Designregeln, auf diesen Flächentypen eine Herausforderung dar. Diese konnten in bekannten Systemen bisher nicht gelöst, bzw. auf domänenübergreifende Anwendungsfälle bisher nur unzureichend angewendet werden.

5 Handlungsbedarf für die rechnergestützte Modellierung von 3D-Opto-MID

Resultierend aus der in den vorherigen Kapiteln vorgestellten Technologiebeschreibung, den Produktentwicklungsmethoden sowie den Grundlagen zu grafischen Ingenieurssystemen, lässt sich ein entsprechender Handlungsbedarf für die Modellierung von 3D-Opto-MID Bauteilen ableiten. Um dieses übergeordnete Ziel zu erreichen, ist eine neue, auf 3D-Opto-MID Bauteile angepasste, Methodik unabdingbar. Einher mit dieser geht die rechnergestützte Modellierung mittels eines domänenübergreifenden Systems. Am Lehrstuhl FAPS wurde bereits durch verschiedene Forschungsarbeiten die prinzipielle Umsetzbarkeit domänenintegrierter Systeme nachgewiesen. Ein Beispiel ist das Konstruktionstool MIDCAD [92, P5, P6] bzw. die kommerziell erhältliche Software NEXTRA der Firma Mecadtron [93] für räumliche elektronische Baugruppen (3D-MID). Diese Arbeiten können jedoch nur als Basis für den Entwurf optomechatronischer Baugruppen dienen, da die essenzielle Komponente der Optik fehlt. Folgend sollen deshalb allgemeine funktionale Aspekte sowie übergreifende Aspekte an ein 3D-Opto-Mechatronik-CAD-System, kurz OMCAD, definiert werden.

5.1 Allgemeine funktionale Anforderungen für ein 3D-Opto-Mechatronik-CAD-System

Dieser Abschnitt beschreibt allgemeine funktionale Anforderungen, welche an ein 3D-Opto-MID System gestellt werden müssen. Schließlich werden die Erkenntnisse in Folgekapiteln genutzt, um ein detailliertes Konzept zu erarbeiten.

Eine der Grundanforderungen ist die realitätsgetreue Modellierung optischer Wellenleiter, Komponenten und Wandlerbausteine mittels einer grafischen Benutzerschnittstelle. Die Umgehung der Einschränkungen spezifischer Ingenieurssoftware, die sich entweder auf 2D- oder 3D-Baugruppen beschränkt, ist hierzu ein gesonderter Aspekt. Dies betrifft insbesondere den Umstand, dass solche Systeme zumeist nur eine oder maximal zwei Ingenieursdisziplinen abbilden können.

Dieser Sachverhalt wird auch durch geometrische und topologische Ungenauigkeiten begleitet, die z.B. aus häufigen Datentransfers zwischen den unterschiedlichen Programmen resultieren. Selbige stellen ein großes

Problem dar, da diese Ungenauigkeiten Auswirkungen auf die Modellierung der optischen Übertragungsstrecken haben. Dabei sind diese von Bedeutung, da sie die Qualität des zu übertragenden Signals bestimmen. Beispiele für solche Ungenauigkeiten sind winzige und kaum, bzw. nicht-sichtbare Lücken an Flächengrenzen, Unstetigkeiten sowie Überlappungen an den Berührungsflächen von Volumenkörpern, die von CAD-Systemen nicht explizit als Fehler erkannt werden [94]. Ein entsprechendes System muss also sowohl in der Lage sein Schaltungsträger zu modellieren als auch eine exakte Beschreibung des darauf befindlichen Layouts.

Weiter ist es für die Signalübertragung wichtig, einen ausreichend definierten Durchgang optischer Leistung zur Signalübertragung zu gewährleisten. Deshalb ist die Verbindung zwischen 3D-Geometriegestaltung optischer Baugruppen und entsprechenden Simulationsverfahren zwingend notwendig. Dazu müssen die unterschiedlichen datentechnischen Repräsentationen der Geometrie für Simulation und Design überbrückt, die logische Schaltungstopologie harmonisiert sowie technologische Zusatzinformationen (wie Toleranzbereiche, Oberflächeninformationen, Übergangsdämpfungen, Materialdaten etc.) übertragen werden.

Da CAD-Daten als Grundlage für eine spätere Prozessregelung dienen, ist ein fertigungsgerechtes Design notwendig. Hierfür sind sogenannte Design- und Manufacturing Rules unabdingbar. Mit Hilfe dieser Richtlinien muss während des Konstruktionsprozesses automatisch und kontinuierlich die Herstellbarkeit des optomechatronischen Layouts überwacht und dabei der Konstrukteur auf Fertigungsprobleme sofort hingewiesen werden.

Ein Werkzeug, das all diese Anforderungen erfüllt, stellt somit eine optimale Lösung dar. Es lassen sich jedoch weitere Aspekte für diese Anforderungen ableiten, die sich für die 3D-Konstruktion, der Integration fertigungstechnischer Aspekte oder der disziplinübergreifenden Modellierung ergeben. Diese sollen im folgenden Abschnitt näher betrachtet werden.

5.2 Übergreifende Aspekte

Basierend auf den Anforderungen müssen übergreifende Aspekte aus den Bereichen des Designs, der Fertigung und rechnergestützter Systeme berücksichtigt werden. So stellt insbesondere die Layout-Gestaltung eine besondere Herausforderung dar, die von allen genannten Bereichen beeinflusst wird. Ein Layout, welches direkt im 3D-Modell erstellt wird, gerät mit Funktionen etablierter Software schnell an seine Grenzen. Insbesondere

lässt sich z.B. der hohe Entwicklungsstand von Routingsystemen aus dem Bereich der Elektronik, welche vor allem im 2D-Bereich zu finden sind, nicht unmittelbar auf ein 3D-Problem übertragen. Dies hängt beispielsweise mit den komplexen Oberflächenstrukturen der Schaltungsträger zusammen. Somit benötigen Routingfunktionalitäten die Fähigkeit mit Körpern höheren topologischen Geschlechts umgehen zu können.

Nachfolgend werden diese Aspekte näher erläutert. Dabei wird in die Kategorien Design, Fertigung und Softwaresysteme unterteilt.

5.2.1 Aspekte des Designs

Schwierigkeiten im Design treten bei mechatronischen Produkten vor allem bei sehr kleinem Bauraum wie Digital-Kameras oder Mobiltelefonen auf, da sich die unterschiedlichen eingesetzten Domänen gegenseitig beeinflussen. Durch den Einsatz optischer Komponenten ist zu erwarten, dass sich dieses Problem zusätzlich verschärft. Dabei lassen sich Aspekte für Designfragen grob in Einschränkungen in Bezug auf elektrische/elektrooptische Schaltpläne, wie auch mechanische Designbeschränkungen untergliedern.

Mechanische Designbeschränkungen betreffen vor allem den Schaltungsträger des 3D-Opto-MID. So können thermische oder mechanische Beanspruchungen oder Dehnungen an bestimmten Stellen in unterschiedlichen Phasen seines Lebenszyklus auftreten. Weiterhin müssen auch Halte- und Montageflächen berücksichtigt werden die z.B. als sogenannte Keep-Out Areas bezeichnet werden. Dies sind Bereiche, an denen keine weiteren Funktionselemente platziert werden dürfen.

Für das elektrische/elektrooptische Design gilt im Allgemeinen, dass mehrschichtige Layouts von komplexen 3D-Opto-MIDs aktuell noch nicht möglich sind. Daher sind in Bezug auf die Erstellung des Leiterlayouts, egal ob elektrisch oder optisch, bestimmte automatisierte Entflechtungsstrategien (wie z.B. das mehrschichtige Escape-Routing von BGAs (Ball-Grid-Arrays)) nicht anwendbar. Darüber hinaus können keine THD-Bauteile verwendet werden. Auch die Platzierung von Bauteilen ist im Allgemeinen nicht auf allen Oberflächen möglich, z.B. aufgrund von Diskontinuität oder starker Oberflächenkrümmung.

5.2.2 Aspekte resultierend aus der Fertigung

Für die Sicherstellung fertigungsgerechter Modelle müssen bereits in der Modellierung relevante Aspekte berücksichtigt werden. Für die Weiterverarbeitung von Designdaten (Post-Processing), um beispielsweise Druckprogramme für den Aerosoljetdruck von 3D-Opto-MID zu erstellen, ist es notwendig auf etablierte und lesbare Datenformate zu setzen.

So ist es im Post-Processing meist zwingend notwendig, dass standardisierte CAD Formate wie STEP [95] oder IGES [96] unterstützt werden. Zudem müssen hier Beschreibungen von Oberflächen, platzierten Komponenten und Leitern exakt definiert sein. Dies ist auch deshalb notwendig, um genaue Druckpfade zu erhalten, welche die Funktionsfähigkeit des fertigen Bauteils zu gewährleisten. Dabei können in der Fertigung der Wellenleiter unterschiedlichste Materialien und Werkzeuge eingesetzt werden, die Einfluss auf die Gestalt des fertigen Produkts nehmen können und auch bereits im Softwaresystem definiert werden müssen. Eine Ausprägung, die sich beispielsweise daraus ergibt, sind Hinterschnitte, die durch die Maschinenkinematik nicht erreicht werden können.

5.2.3 Aspekte eingesetzter Softwaresysteme

Im Bereich der Softwaresysteme, vor allem 3D-CAD-Systemen, können zu berücksichtigende Gesichtspunkte in geometrische sowie algorithmische Aspekte unterteilt werden.

Für geometrische Aspekte gilt, dass komplexe Oberflächen für die Validierung optischer Komponenten eine Herausforderung darstellen. Layouts, die auf 3D-Körpern geplant werden, müssen eine genaue analytische Beschreibung aufweisen. Dies muss berücksichtigt werden, damit diese optisch simuliert und somit validieren werden können. Gerade für Freiformoberflächen spielt dieser Aspekt eine Rolle, da viele CAD-Systeme abgeleitete Geometrien nur approximieren (z.B. bei Leiterstrukturen auf diesen Oberflächen).

Algorithmische Aspekte sind vor allem für die Layoutgestaltung von Bedeutung. So sind Algorithmen, die auf komplexen B-Rep Oberflächen arbeiten, rechenintensiver als auf einem planaren Pendant. Für zu implementierende Algorithmen bedeutet dies hohe Aufwände bezüglich der Implementierung, da ein weites Spektrum an verschiedenen Oberflächentypen und Volumen berücksichtigt werden muss. Weiterhin muss genügend Re-

chenleistung zur Verfügung stehen, da die Datenstrukturen von 3D-Körpern um ein Vielfaches komplizierter sind und zudem bereits 2D-Routingalgorithmen in aktueller Form nur begrenzt parallelisiert werden können.

5.3 Zusammenfassung

Zusammenfassend lassen sich Anforderungen hinsichtlich des Softwaresystems und hinsichtlich zu berücksichtigender Aspekte zur Integration unterteilen. Die grundlegenden Anforderungen sind folgend in Tabelle 1 aufgelistet und beschreiben die grundlegenden Funktionalitäten, die ein solches System erfüllen muss.

Tabelle 1: Funktionale Anforderungen für eine 3D-Opto-MID-Applikation

Nr.	Beschreibung der Anforderung
A-CAD-1	Grafische Benutzerschnittstelle und Visualisierung
A-CAD-2	Möglichkeit zum Entwurf eines Schaltungsträgers und dessen Validierung mittels CAE-Software hinsichtlich der mechanischen und thermischen Eigenschaften
A-CAD-3	Schnittstellen zum logischen Entwurf und Simulation von elektronischen und photonischen Schaltungen
A-CAD-4	Layout-Funktionalität für die Platzierung von Komponenten und das Routing von Leitern
A-CAD-5	Analyse passiver Komponenten (z.B. Wellenleiter) des endgültigen Schaltungslayouts
A-CAD-6	Fähigkeit zur Durchführung von Design Rule Checks um Fertigbarkeit und Funktion der Schaltung zu garantieren
A-CAD-7	Berücksichtigung von fertigungstechnischen Aspekten im frühen Entwurfsprozess
A-CAD-8	Ausleitung von Fertigungszeichnungen und NC-Daten für verschiedene Fertigungsprozesse

Die in den Kapiteln 5.2.1 bis 5.2.3 zusammenfassenden Aspekte sind in Tabelle 2 zusammengefasst. Die größte Herausforderung besteht jedoch in der Schaffung einer robusten softwarebasierten Basis. Diese muss in der

Lage sein, die unterschiedlichen Disziplinen der Optik, Elektronik und Mechanik in einem gemeinsamen Design-/Modellierungsumgebung zu vereinen.

Tabelle 2: Aspekte zur exemplarischen Integration eines 3D-Opto-MID Softwaresystems

	zu berücksichtigende Aspekte	
	elektrisch-/elektrooptisch	mechanisch
Design	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Netzlistenkomplexität begrenzt, da 3D-Opto-MIDs „einlagig“ sind. ▪ Komponenten müssen auf räumlich komplexen Oberflächen platzierbar sein. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Mechanische bzw. thermische Beanspruchung an bestimmten Stellen des Produkts müssen berücksichtigt werden. ▪ Halteflächen für Handhabung und Montage müssen berücksichtigt werden.
	Post-processing	Fertigung
Produktion	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Standardisierte Formate (wie z.B.: STEP, IGES, STL, SAT) sollten unterstützt werden. ▪ Beschreibungen von Kurven und Flächen müssen genau sein. ▪ Die Geometrie muss an die Anforderungen von Nachbearbeitungswerkzeugen angepasst werden. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Unterschiedliche Fertigungsprozesse erfordern unterschiedliche Materialien und haben spezifische Einschränkungen bei der Layoutgestaltung. ▪ Einschränkungen in Bezug auf Leitungsdichte, Leitungsdicke und -abstand. ▪ Geometrische Einschränkungen des 3D-Schaltungsträgers (z.B. Hinterschnitte) durch die Maschinenkinematik.
	Geometrie	Algorithmik
Softwaresysteme	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Algorithmen müssen angepasst werden, um ein breites Spektrum an B-Rep-Volumen mit vielen verschiedenen Oberflächentypen zu verarbeiten. ▪ Die von komplexen Oberflächen abgeleitete Geometrie führt zu einer approximierten Geometrie. ▪ Einige Oberflächen in CAD-Systemen können zu Problemen mit zu großen Toleranzen führen. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Algorithmen, die auf B-Rep-Oberflächen laufen, sind teilweise rechenintensiv. ▪ Zunehmend komplexere Datenstrukturen, die für die Verarbeitung von B-Rep-Formen benötigt werden. ▪ Nur begrenzte Parallelisierungsmöglichkeiten mit Routing-Algorithmen möglich.

6 Konzeption zum Aufbau und Ablauf eines 3D-Opto-Mechatronik-CAD-Systems (OMCAD)

Um den zuvor definierten Handlungsbedarf zu decken, stellt sich nun die essentielle Frage nach der Konzeption einer Lösung, welche die zuvor beschriebenen Anforderungen erfüllt. Zu einer möglichen Umsetzung können unterschiedliche Wege beschritten werden, die aus technischer und wirtschaftlicher Sicht jeweils Vor- und Nachteile mit sich bringen. Zunächst ist es jedoch erforderlich eine Vorgehensweise für solch eine interdisziplinäre Lösung zu erarbeiten. Folgend soll hierfür ein Konzept vorgestellt werden und die jeweiligen Vor- und Nachteile unterschiedlicher Herangehensweisen einer Integration ausführlich diskutiert werden.

6.1 Konzept einer domänenübergreifenden Methodik für optomechatronische Bauteile

Die in Kapitel 3.2 vorgestellten relevanten spezifischen Designprozesse bilden verschiedene Teildomänen des 3D-Opto-MID-Entwurfs ab. Da diese sich vor allem auf planare Baugruppen beziehen und Gegebenheiten der räumlichen Gestalt nicht berücksichtigen oder aber die Domäne der Optik nicht integrieren, ist keine der Methoden umfassend anwendbar.

Aus diesem Grund ist eine Vorgehensweise notwendig, welche die Domänen Elektronik, Mechanik sowie Optik hinreichend abdeckt. Bild 36 stellt exemplarisch einen 3D-Opto-MID-Produktentwicklungsprozess dar, der auf [97] basiert und weiterentwickelt wurde. Dieser Ablauf konzentriert sich in dem dargestellten Beispiel vor allem auf die einzelnen Stufen der rechnergestützten Produktentwicklung und bezieht sich auf die Anforderungen aus Kapitel 5.3. Analog zu elektronischen Baugruppen findet zunächst ein *Elektronik- bzw. Optikdesign* statt, welches aus den Schritten Design-Spezifikation, schematischer Entwurf bzw. elektrooptische Schaltkreissimulation besteht. Diese Schritte umfassen vor allem vorgelagerte Planungsabläufe. Dies beinhaltet das Definieren der Anforderungen bzw. des Produkts, dem Erstellen des elektronischen bzw. photonischen Schaltplans sowie ersten Integritätstests zur Sicherstellung der Funktion. Der Hauptteil des *3D-Layoutdesigns* und der *physikalischen Analyse* beinhaltet die Schritte des Schaltungsträgerdesigns, der räumlichen Platzierung der Bauelemente sowie dem Routing der Wellenleiter/bzw. Leiterbahnen. Im

Abschnitt der *physikalischen Analyse* werden Designregelprüfungen für das fertigungsgerechte Design als auch optische Simulationsmethoden angewandt, welche die Güte der Wellenleiter absichern sollen. Im abschließenden *Post-processing* werden Fertigungszeichnungen bzw. zugehörige CAM-Daten ausgeleitet. Dabei sollen Iterationsschleifen zwischen allen beteiligten Schritten möglich sein.

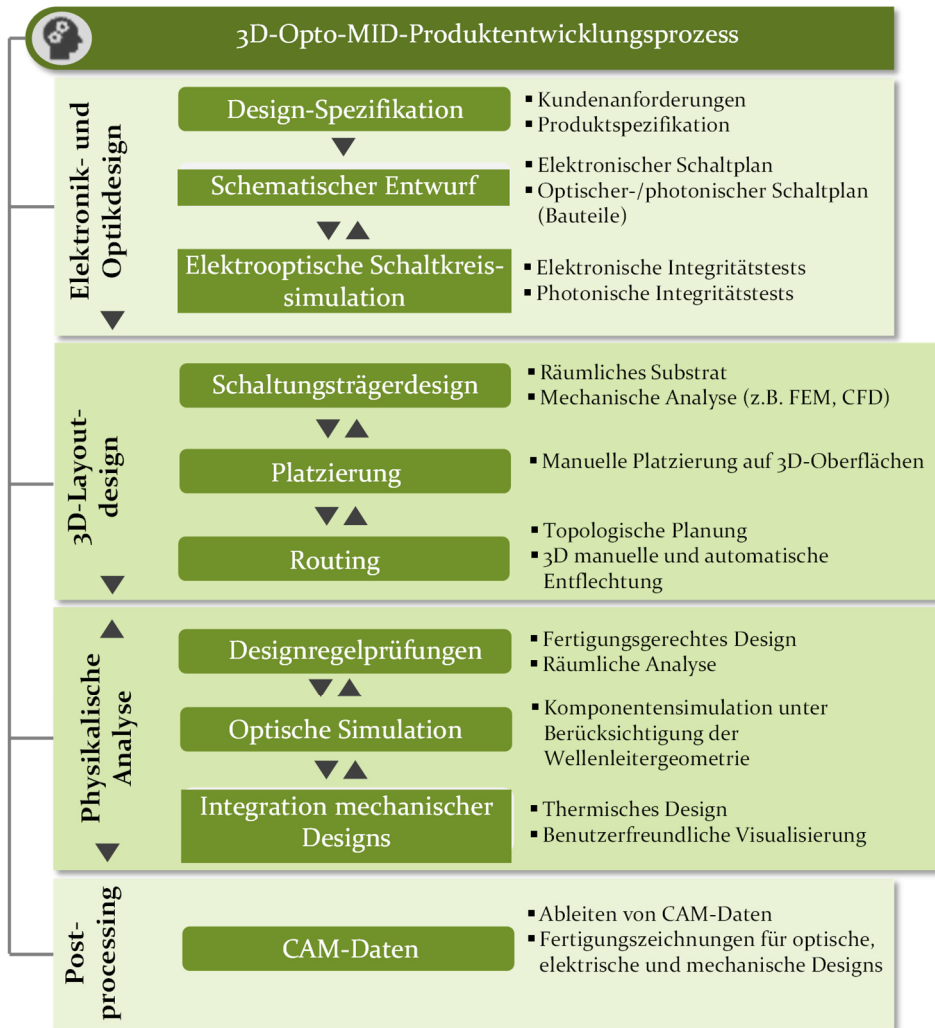


Bild 36: Entwurfsverfahren für integrierte optomechatronische Bauteile auf [97] basierend und erweitert in [P7, S1]

Voraussetzung für die Umsetzung eines solchen Entwicklungsablaufs ist ein entsprechendes rechnergestütztes Designsystem. Dieses muss sowohl den elektrischen und optischen Schaltungsentwurf als auch die Fähigkeit

zur Simulation des Verhaltens passiver und aktiver optischer Komponenten in Kombination mit der elektrischen Schaltung beinhalten. Aktive und passive Komponenten (z.B. Laser, Koppler, Ringmodulatoren, Photodetektoren, Wellenleiter) müssen aus Komponentenbibliotheken mit vordefinierten Parametern (Geometrie, Materialzusammensetzung, Physik, Bauteilgestaltung) zur Verfügung gestellt werden. Wobei diese bereits in anderen Simulationssystemen validiert wurden. Dies ermöglicht es Designern Verhaltenstests (z.B. für Phase, Dispersion, Kopplung, Dämpfung usw.) für Schaltungen durchzuführen, die diese kompakten Modelle beinhalten. Diese Arbeit konzentriert sich auf die in Bild 36 vorgehobenen Abschnitte des vorgestellten Ablaufs, da sich diese im Gegensatz zum Postprocessing und dem logischen Entwurf nicht mit bereits vorhandenen Funktionalitäten bekannter Softwaretools lösen lassen. Diese zwei Prozessschritte sind nachfolgend beschrieben:

- Im Schritt *3D-Layout-Design* ist die Fähigkeit zur Platzierung von Komponenten sowie Routingfunktionalitäten vorgesehen. Weiterhin müssen Design Rule Checks (DRCs) die Fertigbarkeit und Funktionsfähigkeit gewährleisten. Das Layoutdesign hat einen direkten Einfluss auf die geometrischen Parameter des Wellenleiters und anderer Bauteile.
- In der *physikalischen Analyse* müssen auch die parametrisierten optischen Komponenten (z.B. kurvenförmig geformte Wellenleiter) der Schaltung erneut analysiert (z.B. auf Dämpfung und Dispersion) und gegebenenfalls das Layout oder sogar der Schaltplan entsprechend angepasst werden.

Durch letzteren Schritt wird während der Integration der mechanischen Konstruktion ein vollwertiges 3D-Modell des Layouts erstellt, das es Entwicklern ermöglicht, zusätzliche 3D-Raumanalysen durchzuführen oder das thermische Design zu verbessern.

6.2 Technische Ansätze für die Integration der Funktionsbausteine

Im Grunde können drei unterschiedliche Ansätze gewählt werden, um technische Lösungen für ein entsprechendes System umzusetzen. Zunächst besteht die Option der Entwicklung eines völlig neuartigen Softwaresystems, das alle erforderlichen Funktionen unterstützt (Stand-Alone-System). Die zweite Möglichkeit ist durch Bündelung der Funktionen mehrerer verschiedener Software-Tools (schnittstellenbasiertes System) Synergieeffekte zu schaffen. Als dritte Option können auch bestehende Systeme

erweitert werden, die bereits einen Teil der entsprechenden Funktionalitäten mitbringen (Plug-In-System). Folgend werden die drei Möglichkeiten vorgestellt und bewertet.

6.2.1 Stand-Alone-System

Auf den ersten Blick ist ein eigenständiges System die beste Integrationslösung, da es einen schnellen und kontinuierlichen Produktentstehungsprozess verspricht. Es wird keine zusätzliche proprietäre Software benötigt, so dass Schnittstellen nicht gepflegt werden müssen und iterative Aufgaben und Entwicklungsschleifen vermieden werden können. Ein solches System hat jedoch auch Nachteile wie finanzielle Aufwände für eine gesonderte Software, einen hohen Integrationsaufwand oder Schulungen.

Ein Beispiel für ein solches System ist das kommerziell erhältliche 3D-ECAD-System NEXTRA [93, 98], das ein unabhängiges, eigenständiges System darstellt, welches sowohl einen geometrischen Modellierkern, als auch Werkzeuge für die Entwicklung von Layouts zur Verfügung stellt. Dabei werden jedoch nicht alle Anforderungen an ein vollumfängliches Entwicklungstool, wie beispielsweise parametrische 3D-Modellierung, eine direkte Ableitung von Fertigungsdaten und die Erstellung von Schaltplänen, abgedeckt. NEXTRA ist deshalb zusätzlich auch als schnittstellenbasiertes System ausgelegt. So können Schaltungsträgermodelle über das neutrale STEP-Format [95] in das Programm geladen werden. Dieser Umweg muss häufig in Anspruch genommen werden, da die Modellerstellung nicht auf dem Niveau anderer proprietärer MCAD-Systeme durchgeführt werden kann.

6.2.2 Schnittstellenbasiertes System

Ein schnittstellenbasiertes System ist ein eigenständiges System, das bestimmte Entwicklungsaufgaben an Drittsysteme (z.B. OCAD/ODA, ECAD/EDA, MCAD) auslagert und schließlich die vorentwickelten Komponenten zusammenführt. So können die besten funktionierenden verfügbaren Lösungen genutzt und die Entwicklungskosten deutlich reduziert werden. Allerdings müssen die Schnittstellen zu den Drittanwendungen gepflegt werden und iterative Prozesse während der Entwicklung für den Endanwender sind unumgänglich (z.B.: schon bei kleineren Änderungen im Design muss das Layout wieder neu exportiert und importiert werden, um die Änderungen in einem externen System zu übernehmen).

6.2.3 Modulares System (Plug-In)

Unnötige Schnittstellen können durch Plug-In-Systeme vermieden werden, da sie modular auf einem einzigen Fremdsystem aufgesetzt sind. Änderungen am System können entweder durch Bearbeitung des Quellcodes (bei Open-Source-Software) oder durch Erweiterung der Funktionen über eine API vorgenommen werden. So kann das Plug-in-System den aktuellen Entwicklungsstand eines Systems nutzen, was aber auch als Nachteil angesehen werden kann: Das Plug-in ist stark auf den aktuellen Entwicklungsstand der zugrundeliegenden Software angewiesen, da die meisten High-End-Systeme proprietär sind und den Zugriff der Anwender auf den Quellcode einschränken.

6.2.4 Vergleich der Ansätze und Fazit

Jeder vorgestellte Ansatz bietet entsprechende Vor- und Nachteile und ist für bestimmte Einsatzzwecke geeignet, die vor allem durch Flexibilität, Arbeitsaufwand und Kostenfaktoren (wie z.B. Lizenzkosten) bestimmt sind. Die Vor- und Nachteile dieser Systeme sind in Bild 37 zusammenfassend aufgezeigt (in Anlehnung an [S5]).




 Stand-Alone-System	 Schnittstellen-basiertes System	 Plug-in-System
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Erfüllt alle Anforderungen in einem einzigen Softwarepaket ▪ Keine Schnittstellen erforderlich ▪ Keine iterativen Entwicklungsprozesse 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Neutrale Schnittstellen zur Anbindung an MCAD- und OCAD-Systeme ▪ Grad der Implementierung vergleichsweise gering 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Nutzung vorhandener, hoch entwickelter CAD-Software-Systeme ▪ Modellierkern vorhanden ▪ kein Verlust von Modellhistorie
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Grundfunktionen müssen entwickelt werden ▪ Modellierkerne müssen bedient werden können ▪ Hoher Entwicklungsaufwand 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Austausch zwischen unterschiedlichen Systemen ▪ Iterative Entwicklungsprozesse durch Schnittstellen 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Trotzdem Schnittstellen erforderlich ▪ Kein Einfluss auf die Entwicklung proprietärer Software ▪ Meist nicht Open-Source (nur API-Zugriff)

Bild 37: Vor- und Nachteile verschiedener Systeme für eine 3D-Opto-MID-Anwendung

Nahezu alle etablierten Softwarelösungen für ECAD/EDA-, OCAD/ODA- und MCAD-Anwendungen besitzen Programmierschnittstellen mit denen Erweiterungen entwickelt werden können. Aus Sicht einer wirtschaftlich

orientierten Unternehmung ist eine Stand-Alone-Realisierung eine durchaus sinnvolle Herangehensweise. Für Forschungszwecke jedoch bietet sich im Falle der **3D-Opto-MID**-Applikation eine Hybridlösung aus Schnittstellen zwischen verschiedenen domänenspezifischen Systemen, als auch eine Erweiterung bestehender Funktionalitäten durch ein Plug-In-System an. Hier entfallen essenzielle Aufgaben und Aufwände, wie beispielsweise die Entwicklung vollkommen neuer Bedienoberflächen und Interaktionssysteme aufgrund der bereits vorhandenen Funktionalität der jeweiligen Systeme. Da man mit einem Programm, welches als Plug-In eines etablierten MCAD-, ECAD/EDA- oder OCAD/ODA-Systems realisiert ist, meist auf die gesamte Funktionalität dessen zurückgreifen kann, ist es möglich, den hohen Entwicklungsstand des Systems vollständig zu nutzen. Des Weiteren steht dies im Einklang mit der von Franke formulierten These [99, 9], dass das notwendige Konstruktionswerkzeug selbst nicht domänenspezifische Funktionen übernimmt, sondern auf etablierte Lösungen zurückgreift.

Letztlich ergibt sich die Frage, ob der Plug-In-Anteil des Systems an ein MCAD- oder ECAD/EDA- bzw. OCAD/ODA- System angebunden werden soll. Die dreidimensionale Modellierungsumgebung, welche auch parametrisierbare Volumenkörper erlaubt (siehe Kapitel 1), ist die wichtigste der Anforderungen für eine integrierte 3D-Opto-MID-Entwicklung. Die meisten ECAD/EDA- und OCAD/ODA-Systeme sind lediglich mit 2D- oder 2,5D-Umgebungen realisiert. Daher müsste für die Lösung dieses Problems eine 3D-Umgebung implementiert werden. Betrachtet man die Forderungen weiter hinsichtlich der mechanischen Entwicklung und Optimierung, müsste ebenfalls ein 3D-Modellierkern zur Verfügung stehen. Im Gegensatz dazu ist die Anbindung an ein MCAD-System bedeutend sinnvoller. Diese besitzen bereits eine funktionsfähige 3D-Umgebung und unterstützen Standardfunktionen wie z.B. das Erstellen von Baugruppen aus mehreren einzelnen Teilen. Da ein Schaltkreis als eine Baugruppe definiert werden kann, ist auch die Synthese des optoelektronischen Layouts mit der mechanischen 3D-Formgebung einfach zu implementieren. Zur Einbindung von ECAD-Funktionen, wie Schaltungsentwicklung, könnte beispielsweise die Skizzen-Funktion der MCAD-Systeme verwendet werden.

Ein weiterer Vorteil bei der Einbindung in ein MCAD-System ist, dass die Modelle des Schaltungsträgers sowie der elektronischen und optischen Bauteile im nativen Format erhalten bleiben. Da die Modellierungshistorie nicht wie beim Export per STEP [95] verloren geht, ist es einfach möglich nachträglich konstruktive Änderungen vorzunehmen oder Veränderungen beim Layout zu tätigen. Außerdem besitzen die meisten MCAD-Systeme

Schnittstellen zu CAM-Programmen sowie integrierte Simulationswerkzeuge. Dies unterstützt die Verarbeitung der Daten in diesem Bereich, da die MCAD-Daten im nativen Format erhalten bleiben.

Nachteilig ist die Integration der 3D-Opto-MID spezifischen Funktionen in ein MCAD-System bezüglich seiner Abhängigkeit von spezifischen Softwarelösungen. Die vollständige Abhängigkeit von einem einzelnen MCAD System ist nachteilig, da nicht alle 3D-Opto-MID-Funktionen an ein einzelnes System gebunden sein sollten. Dies betrifft insbesondere die Validierung der Übertragungsstrecken, die durch gut ausgereifte Simulationswerkzeuge wie z.B. Optical SPICE [74] oder RAYTRACE [P8], weitgehend gelöst sind. Es ist sinnvoll deshalb einen Ansatz zu wählen, der eine gewisse Flexibilität bietet. Durch Aufteilung von aufwändigen Funktionalitäten auf spezielle Expertensysteme kann dieses Problem umgangen werden. Hierfür ist jedoch eine spezielle Architektur notwendig. Dafür wird ein spezielles Schichtenmodell eingesetzt, welches nachfolgend erläutert wird.

6.3 Überlegungen zum Aufbau und Ablauf eines rechnergestützten 3D-Opto-MID-Systems

Für den Aufbau einer entsprechenden Softwareumgebung ist es notwendig Überlegungen zur Architektur vorzunehmen. Basierend auf den Schlussfolgerungen aus dem vorhergehenden Kapitel wird eine Hybridlösung aus Plug-In-System und Schnittstellensystem angestrebt. Die zugehörige Architektur wird nun konzeptionell in einem Schichtenmodell vorgestellt.

Hierbei ist zu beachten, dass die vorgestellte Architektur sich auf das MCAD-System Siemens NX sowie die Software RAYTRACE [P8, P9] bezieht. Diese Architektur lässt sich jedoch auch auf andere Systeme anwenden und ist somit übertragbar. Es existieren in der späteren Umsetzung auch eine Schnittstelle zu dem EDA-System EAGLE [100], die hier aber nicht weiter ausgeführt wird (siehe hierzu auch [P10, P5, 92]).

6.3.1 Schichtenmodell

Für die Grundstruktur ist es aufgrund der verschiedenen Aufgaben der Funktionen sinnvoll ein Schichtenmodell einzusetzen (siehe Bild 38). Für das zu realisierende System lassen sich die drei Schichten wie folgt aufgliedern:

- **Designschicht** – ist verantwortlich für grundlegende Designfragen, die es zu beantworten gilt.

- **Produktmodellschicht** – notwendig, um Daten zwischen verschiedenen Systemen auszutauschen, zu sammeln und aufzubereiten.
- **Simulationsschicht** – beantwortet Fragen, die nicht in der Designschicht gelöst werden können. In diesem Fall die optische Validierung.

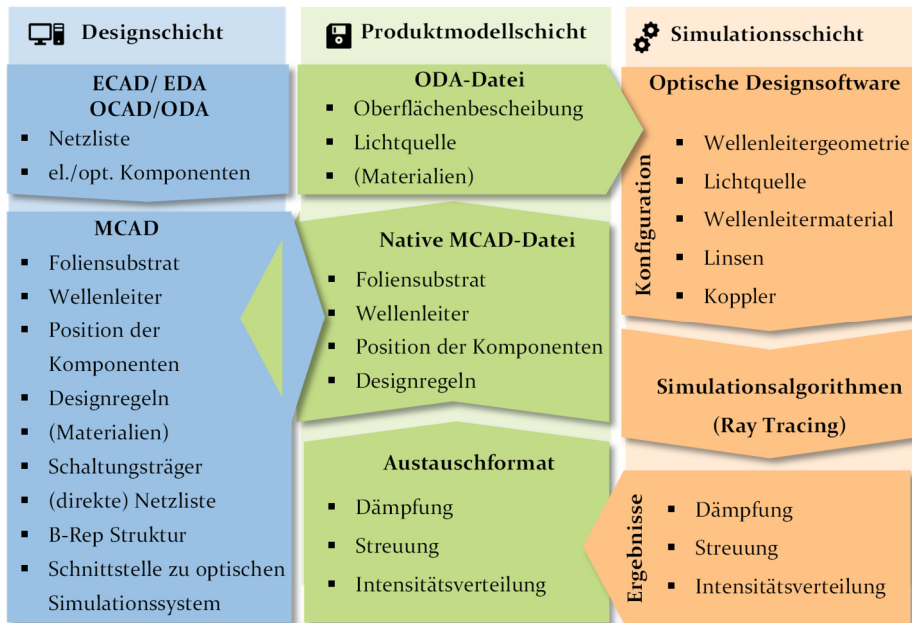


Bild 38: Architektur eines konzeptionellen OMCAD-Systems (untersucht in [S1, S6])

In der *Designschicht* bildet ein MCAD-System den Kern und stellt eine Benutzeroberfläche zur Verfügung, wobei die Befehle, welche für die Konstruktion der optomechatronischen Baugruppen notwendig sind, einer separaten Anwendungsumgebung zugeordnet werden. Theoretisch können komplexe optische oder aber auch elektrische Schaltungen aus vorhandenen OCAD/ODA bzw. ECAD/EDA importiert werden. Es ist dabei vorgesehen, das Layoutdesign bzw. die Layoutsynthese im MCAD-System durchzuführen. Die Befehle zum Entwerfen der Schaltung, zum Routen der Wellenleiter und zum Platzieren optischer Komponenten werden über eine Plug-in-Lösung integriert. Ebenso das Design optischer Foliensubstrate und die Überprüfung von Designregeln. Das Schaltungsträgerdesign wird nicht explizit aufgeführt, da es mit jedem CAD-Modellierungswerkzeug erstellt werden kann und nicht implementiert werden muss.

Die *Produktmodellschicht* dient zur Beschreibung optischer Leiter. Sie resultiert einerseits aus Daten, die aus der Designschicht kommen sowie Resultaten der Simulationsalgorithmen aus der Simulationsschicht. Somit stellt sie den wesentlichen Baustein zum Austausch von Daten der unterschiedlichen Softwaresysteme dar. Die Produktmodellschicht übernimmt den standardisierten Datenaustausch zwischen dem MCAD-System und einem Simulationssystem für optische Komponenten. Standardmäßig wird die optische Baugruppe, welche die geometrischen Daten, optische Eigenschaften, Materialeigenschaften und auch Designregeln enthält, im Dateiformat des nativen MCAD-Systems gespeichert. Für die Produktmodellschicht ist es erforderlich Schnittstellen zu den jeweiligen Systemen zu implementieren. Dabei muss die Struktur des Produktmodells unterschiedlichen Objektdarstellungen genügen (z. B. Hybriddarstellung in MCAD, bzw. analytische Flächendarstellung im optischen Simulationssystem).

Die *Simulationsschicht* hat die Aufgabe optische Komponenten zu validieren. Dabei sind entsprechende Beschreibungen notwendig, die ursprünglich aus dem MCAD-System kommen. Dies sind beispielsweise Oberflächenbeschreibungen, Pfade, Lichtquellen oder Materialien der optischen Leiter. Durch eine entsprechende Konfiguration der optischen Simulationssoftware können Simulationsalgorithmen gestartet werden. Im später verwendeten Beispiel bezieht sich dies vor allem auf eine nicht-sequentielle Raytracing-Methode. Als Ergebnis können Dämpfung, Streuung oder Intensitätsverteilung wieder über die Produktmodellschicht an die Designschicht zurückübertragen werden.

Es sind außerdem visuelle Rückmeldemechanismen bzw. integrierte Designregeln für den Modellierprozess vorgesehen. Im Gegensatz zu Regeln, die sich auf rein optische und Materialeigenschaften beziehen, ergeben sich die zumeist geometrischen Konstruktionsregeln aus dem mechanischen Design. Die Schnittstelle zum optischen Simulationssystem liest die B-Rep-Struktur der Wellenleiter aus und konvertiert sie in ein für das optische Simulationssystem lesbares Datenformat. Die Visualisierung der optischen Design Rule Checks (als Ergebnis der optischen Simulation) erfolgt im MCAD-System.

Ein zentraler Punkt ist die nahtlose Integration der gesamten Anwendung in die 3D-Modellierungsumgebung. Einerseits mit dem Ziel die Benutzerfreundlichkeit zu erhöhen und andererseits, um unnötige Iterationen zu vermeiden.

6.3.2 Programmablauf

In einem ersten Schritt muss eine Benutzeroberfläche entwickelt werden. Einem wissensbasierten Ansatz folgend, sollte diese für die 3D-Opto-MID-Anwendung so intuitiv und selbsterklärend wie möglich sein. Dies muss bei der Entwicklung der Anwendung berücksichtigt werden (z.B. durch Auswahlfilter, Designentscheidungen). Ein wesentlicher Teil besteht darin, Wege zu finden, die optomechatronische Softwareanwendung als integralen Bestandteil zu etablieren und Konflikte mit bestehenden Funktionen zu vermeiden. Dabei ist ein definierter Ablauf ein essentieller Bestandteil zur Realisierung. Die verwendeten Softwaresysteme bestimmen jedoch bereits durch ihr Design den Ablauf bis zu einem gewissen Grad. Die 3D-Opto-MID-Applikation beginnt dabei in ihrer Funktionsweise, sobald die mechanische Konstruktion des 3D-Schaltungsträgers mit den inhärenten CAD-Funktionalitäten abgeschlossen ist.

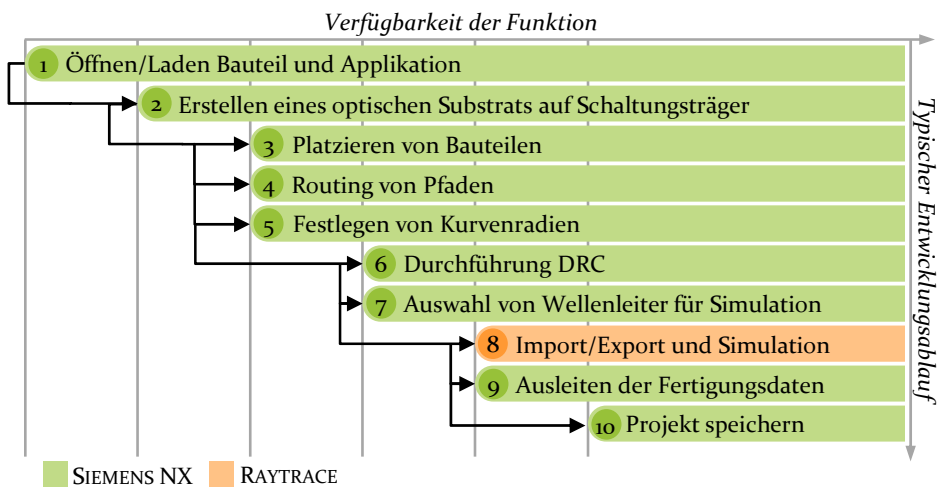


Bild 39: Typischer Entwicklungsablauf einer 3D-Opto-MID-Applikation (am Beispiel von NX und RAYTRACE)

Der typische Workflow aus Benutzersicht ist in Bild 39 dargestellt und beginnt mit dem Aufruf der Anwendung aus einem Anwendungsmenü im CAD (im späteren Beispiel: Siemens NX) (1). Das auf dem 3D-Schaltungsträger extrahierte optische Substrat dient als Basis für die optische Schaltung, auf der Komponenten platziert werden können (2-3). Als nächstes werden optische Pfade und deren Radien festgelegt (4-5). Das Layout kann über Design Rule Checks geprüft werden (6) und entsprechende Segmente

für die optische Simulation definiert werden (7). Danach können Wellenleitersegmente des endgültigen Schaltungslayouts in das optische Simulationssystem (hier: RAYTRACE) exportiert und simuliert werden (8). Schließlich wird das Layout für die Fertigung (technische Zeichnung) vorbereitet (9). Der Arbeitsfortschritt wird im nativen Dateiformat gespeichert. Um ein flexibles und benutzerfreundliches computergestütztes Design zu ermöglichen, müssen die aufgeführten Befehle nicht in der beschriebenen Reihenfolge ausgeführt werden. So ist das Ausführen von z.B. Aufgabe 3, 4 und 5 in beliebiger Reihenfolge möglich.

7 Untersuchungen zu Entflechtungsstrategien für Leiterstrukturen

Wie bereits ausführlich in den vorherigen Kapiteln beschrieben, ist die Integration elektrischer, optischer und mechanischer Elemente und Baugruppen ein zentraler Aspekt aktueller Forschung. Einen wesentlichen Teil nimmt dabei die Planung von Leiter- bzw. Wellenleiterstrukturen ein, ohne die keine Funktionsfähigkeit gegeben wäre. So können beispielsweise bei einem Leiterplattenentwurf tausende Leiterbahnen enthalten sein, die durch ebenso viele Netze miteinander verbunden sind. Sowohl für rein elektrische, optische aber auch für elektrooptische Baugruppen stellt somit die Wegplanung einen zentralen Aspekt der Forschung dar. Insbesondere komplexe räumliche Strukturen sind hierbei eine Herausforderung, die es zu lösen gilt. Zwar wurde in anderen Arbeiten, wie von Zhuo und Alvarez [92, 101] bzw. Franke [102], dieses Problem bereits erkannt, jedoch wurden hier nur Regelflächen wie beispielsweise Ebenen und Kreisflächen behandelt. Aus diesem Grund werden in diesem Kapitel Untersuchungen zu verschiedenen Strategien zur Planung von Pfaden, auch für komplexere Fälle vorgestellt.

Die Problemstellung zur Planung von Pfadstrukturen kann mit manuellen, teilautomatisierten sowie vollautomatischen Routingalgorithmen gelöst werden. Während bei manuellem Routing der Designer selbst über die genaue Pfadplanung entscheidet, wird ihm dieser Entscheidungsspielraum bei vollautomatisierten Mechanismen abgenommen. Eine Zwischenlösung stellt das teilautomatisierte Routing (häufig auch *interaktives Routing* genannt) dar, bei welchem nur bestimmte Pfade zwischen verschiedenen Wegpunkten berechnet werden (grundlegende Konzepte wurden bereits von Cullen et al. beschrieben [103]). Die Routingtechniken lassen sich unabhängig von der Art der Ausführung (manuell, teilautomatisiert, vollautomatisch) oder der verwendeten Algorithmen in nachfolgende Anwendungsfälle unterteilen (in Bild 40 dargestellt).

Während das Flächen Routing hauptsächlich seine Anwendung im PCB-Bereich findet, wird das kombinierte Globale- und Detailrouting insbesondere für das Routing von integrierten Schaltkreisen verwendet. Takt- und Leistungsrouting bezieht sich auf hauptsächlich leistungsfähige ICs (in elektronischen Schaltungen) und wird deshalb nicht näher erläutert.

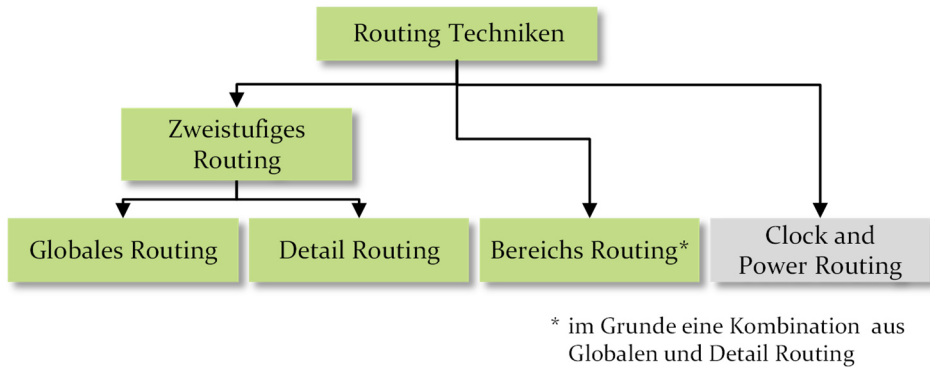


Bild 40: Allgemeine Übersicht zu Vorgehensparadigmen im Routing in Anlehnung an [104]

Im Grunde genommen ist auch das Flächenrouting ein mehrstufiges Verfahren, da hier Oberflächen partitioniert und anschließend über einen Global- und Detailrouting Ansatz aufgelöst werden [104].

Die dargelegten Routingmechanismen haben ihren Ursprung hauptsächlich in der Elektronikentwicklung, aus diesem Grund wird in diesem Kapitel auch häufiger Bezug dazu genommen. Grundsätzlich lassen sich diese Verfahren jedoch auch auf elektrooptische Anwendungsfälle mit entsprechenden technologischen Anpassungen adaptieren.

Die folgenden Abschnitte geben zunächst einen Überblick über verschiedene Routingstrategien. Insbesondere werden dabei rasterbasierte, linienbasierte-, topologische- sowie 3D-Routingverfahren näher dargestellt. Der theoretische Hintergrund zur Lösung der spezifischen Routingprobleme wird folgend in den einzelnen Unterkapiteln erläutert. Die Funktionsweise sowie eine Bewertung für das 3D-Routing, welches auch für 3D-Opto-MID verwendet wird, werden am Ende dieses Kapitels aufgezeigt.

7.1 Kürzeste wegbasierte Algorithmen

Kürzeste wegbasierte Algorithmen können entweder für das globale Routing oder für Detailroutingaufgaben verwendet werden und sind die Verallgemeinerung von Rastertechniken in gewichteten Graphen. Im Falle eines globalen Routings können z.B. die Algorithmen von Dijkstra oder der A*-Algorithmus verwendet werden. Im Folgenden werden diese zwei wichtigen Ansätze beschrieben, die sowohl im Raster als auch für rasterlose Probleme (z.B. Graphen) angewandt werden können.

7.1.1 Dijkstra's Algorithmus

Der Dijkstra-Algorithmus bezieht nur Knoten in die Suche mit ein, wenn sie die geringsten Kosten verursachen. Im Allgemeinen berechnet der Algorithmus den kürzesten Weg zwischen einem Quellknoten und einem Zielpunkt in einem gewichteten Graphen (Single Pair Shortest Path (SPSP)-Algorithmus). In einem gewichteten Graphen können Pfade zwischen zwei Knoten existieren, die über mehrere andere Knoten führen, aber dennoch ein geringeres kumuliertes Gewicht haben als eine direkte Verbindung zwischen zwei benachbarten Knoten. Der Grundalgorithmus berechnet nur die Länge des kürzesten Weges und verfolgt nicht die Wegpunkte. Daher müssen Referenzen auf die vorhergehenden Knoten verwendet und eine zweite Liste für die Pfadknoten gepflegt werden. Der Algorithmus folgt immer dem Pfad, der die aktuell niedrigste Gesamtlänge vom Quellknoten hat (\triangleq vorläufiger Abstand). Die Abstände werden in einer Liste gespeichert, die in nicht abnehmender Reihenfolge sortiert ist (siehe auch Ablauf in Tabelle 3 und Bild 41). [105]

Tabelle 3: Ablauf des Dijkstra Algorithmus

Eingabe:	Gewichteter Graph, Quell- und Zielpunkt
Ausgabe:	kürzester Pfad
Ablauf:	<ol style="list-style-type: none"> 1. Erstellen einer <i>sortierten Liste</i> aller nicht aufgerufenen Knoten. 2. Initialisiere alle Knoten mit einem <i>vorläufigen Entfernungswert</i> (= der aktuell minimale Abstand vom Startknoten). Initialisiert den Quellknoten mit Null und alle anderen Knoten mit unendlich 3. Der kleinste Wert aus der sortierten Liste wird angezeigt und zum aktuellen Knoten erklärt 4. Ermitteln aller benachbarter Knoten v_i des aktuellen Knotens und Berechnen des <i>vorläufigen Entfernungswertes</i> zwischen v_i und dem aktuellen Knoten (= Wert des aktuellen Knotens + Gewicht zwischen dem aktuellen Knoten und v_i) 5. Vergleichen des Distanzwertes mit dem aktuell zugewiesenen Wert von v_i und Zuweisen des kleineren Wertes 6. Markieren des zuletzt besuchten Knotens 7. Falls der Zielknoten bereits als besucht markiert wurde oder der kleinste vorläufige Abstand zwischen den Knoten in der sortierten Liste unendlich ist, STOP; andernfalls wechseln zu 3

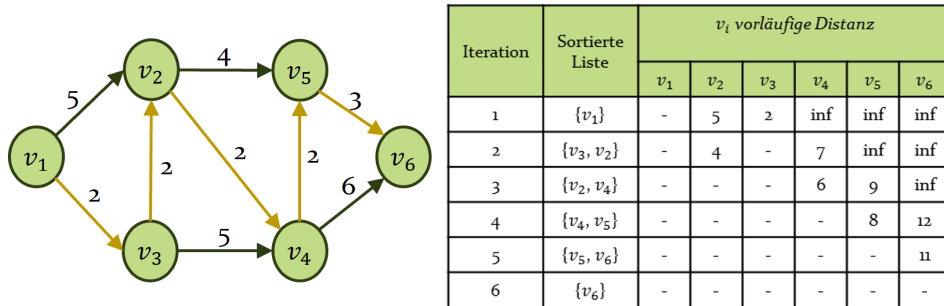


Bild 41: Beispiel für Dijkstra's kürzester Pfad Algorithmus (n=6 Iterationen)

Die folgenden Beschreibungen beziehen sich auf die in Bild 41 dargestellte Grafik. Ein Pfad zwischen v_1 und v_6 kann nach sechs Iterationen gefunden werden. In einer einfachen Implementierung muss die Liste nach jeder Iteration sortiert werden, die eine maximale $O(v)$ Zeit erfordert, wobei v die Anzahl der Knoten ist. Die Komplexität des Algorithmus hängt stark von der für die Implementierung verwendeten Datenstruktur ab. Es gibt viele Implementierungen, die komplexere Datenstrukturen wie Mengen, Prioritätswarteschlangen und Fibonacci-Heaps verwenden, die automatisch die Innenordnung der eingefügten Elemente beibehalten [106].

Der Algorithmus von Dijkstra gehört zu den Algorithmen, welche das globale Optimum finden, da immer der Scheitelpunkt gewählt wird, zu dem es den kürzesten derzeit bekannten Weg gibt. Hier erweist sich die Strategie als globales Optimum, da jeder andere Weg durch den gleichen Knoten länger ist. Somit kann gewährleistet werden, dass der Algorithmus in Graphen mit nicht-negativen Kantengewichten immer den kürzesten Weg zwischen Quelle und Ziel findet. [107]

In einem einheitlichen Raster dehnt sich der Dijkstras Algorithmus gleichmäßig aus, da er keine Heuristik verwendet, die eine bestimmte Expansionsrichtung bevorzugt. Sowohl Hadlock als auch A* berücksichtigen die Entfernung zum Ziel und führen eine sogenannte informierte Suche durch [68, 108].

Ein weiterer Algorithmus, der den kürzesten Weg zwischen einzelnen Paaren findet, ist der **Bellman-Ford Algorithmus**. Es ist das Äquivalent zum Algorithmus von Dijkstra mit dem Unterschied, dass es Graphen mit negativen Kantengewichten verarbeiten kann. Der **Floyd-Warshall-Algorithmus** findet den kürzesten Weg für alle möglichen Paare (all pairs shortest paths, APSP) in einem Graphen. [69, 73].

7.1.2 A* Algorithmus

A* ist ein Algorithmus mit einer bestmöglichen ersten Suche. Dieser berücksichtigt neben der Entfernung zum Quellknoten auch die Entfernung zum Zielpunkt. Dies hat zur Folge, dass so wenige Knoten wie möglich erweitert werden müssen. Der Algorithmus hat so die Fähigkeit, seine Entscheidung, einen bestimmten Weg an einem bestimmten Punkt einzuschlagen, stetig zu überarbeiten. A* wählt dabei immer den Weg, der die Evaluierungsfunktion minimiert:

$$f(v) = g(v) + h(v), \quad (26)$$

wobei v der nächste Knoten auf dem Weg ist, $g(v)$ die angesammelten Kosten vom Quellknoten bis v und $h(v)$ eine *heuristische Funktion*, die den günstigsten Weg von v bis zum Zielpunkt schätzt. Die heuristische Funktion benötigt verfügbare Informationen aus der Problemdomäne und ist problemspezifisch (z.B. kann die Manhattan-Distanz zum Ziel verwendet werden). Der Algorithmus von Dijkstra ist im Grunde genommen ein Sonderfall des A*-Algorithmus, wobei hier $h(v)=0$ angenommen wird.

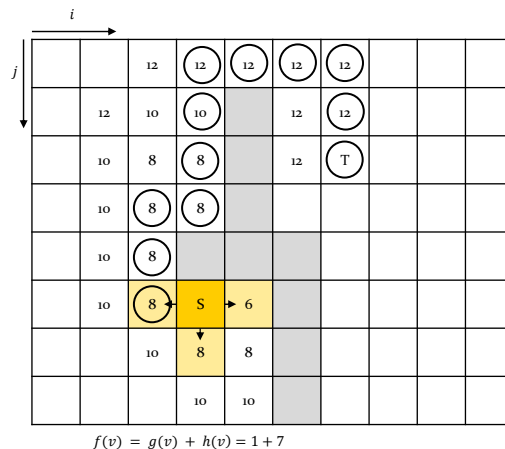


Bild 42: Beispiel für die Wegfindung mit dem A*-Algorithmus im Raster

Das Beispiel in Bild 42 zeigt, dass der A*-Algorithmus den gleichen Pfad wie z.B. ein Hadlock-Algorithmus (wird in Kapitel 7.2.3 erläutert) in einem Rastergraphen findet. Der Manhattan-Abstand zwischen v_{ij} und s sowie v_{ij} und t wird für jede Zelle berechnet und addiert.

7.2 Rasterbasierte Verfahren

Maze-Routing-Algorithmen verwenden Rastergraphen, bei denen die Rastergröße durch das kleinste Merkmal des Schaltungsträgers bestimmt wird. Die kleinste Merkmalsgröße hängt von der Fertigungstechnologie zur Herstellung von Leitern, Komponenten und Pads ab. Maze-Router sind die ältesten Techniken zur Lösung von Routing-Problemen und wurden erstmals von LEE und MOORE [109] eingeführt. Maze-Routing-Algorithmen sind Breadth-First-Search (BFS) Algorithmen. Dabei wird eine Unterscheidung zwischen euklidischer Metrik (diagonales Routing) und Manhattan-Metrik (orthogonales Routing) vorgenommen. In der euklidischen Metrik ist der Abstand d zwischen zwei Punkten A und B definiert als

$$d(A, B) = \sqrt{\sum_i (a_i - b_i)^2}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (27)$$

und in Manhattan-Metrik als

$$d(A, B) = \sum_i |a_i - b_i|, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (28)$$

Da für die vorliegenden Forschungsarbeiten insbesondere rasterbasierte Algorithmen von Bedeutung sind, werden folgend drei wichtige rasterbasierten Verfahren vorgestellt.

7.2.1 Der Lee-Algorithmus

Einer der am häufigsten zitierten und allgemein bekannten Algorithmen wurde von LEE entwickelt und soll ein Paar von Knoten (Quell- und Zielpunkt) in einem Raster verbinden, indem er eine verbesserte Version der Breadth-First Suche verwendet. Ein großer Vorteil ist, dass der Algorithmus immer einen kürzesten Weg (= einer von mehreren möglichen kürzesten Wege) findet, sofern dieser existiert. Hindernisse werden durch Rasterpunkte (=Knoten) dargestellt, die blockiert sind und daher während der Ausbreitung des Wegrasters nicht als Wegpunkt definiert werden können. Wenn das Ziel gefunden wurde, wird ein sogenanntes Backtracing verwendet. Mit diesem wird ein Pfad vom Ziel zum Quellknoten gefunden. In einem letzten Schritt werden die markierten Knoten gelöscht (siehe auch Tabelle 4 und Bild 43) [73, 68, 110].

Tabelle 4: Ablauf des LEE-Algorithmus

Eingabe:	Raster, Quell- und Zielpunkt
Ausgabe:	kürzester Weg
Ablauf:	<ol style="list-style-type: none"> 1. Bereitstellen von zwei Listen: eine mit den zu erweiternden Knoten (Propagierungsliste/p-Liste) und eine Nachbarliste (n-Liste) des aktuell erweiterten Knoten; Füge den Quellknoten zur p-Liste hinzu und markiere ihn mit ,o‘; die n-Liste bleibt leer; erhöhen des Wellenfrontwerts um 1 (n-Liste) 2. Alle sich nicht blockierten Knoten werden ermittelt, die an die aktuellen Knoten angrenzen; 3. Knoten aus der p-Liste werden in die n-Liste geschoben und mit dem aktuellen Wellenfrontwert markiert 4. Wenn einer der benachbarten Knoten das Ziel ist, wird der BACKTRACE durchgeführt. Ansonsten: Tauschen der p-Liste mit der n-Liste und erhöhen des Wellenfrontwert um 1. Leeren der n-Liste. Weitergehen zu Schritt 2.

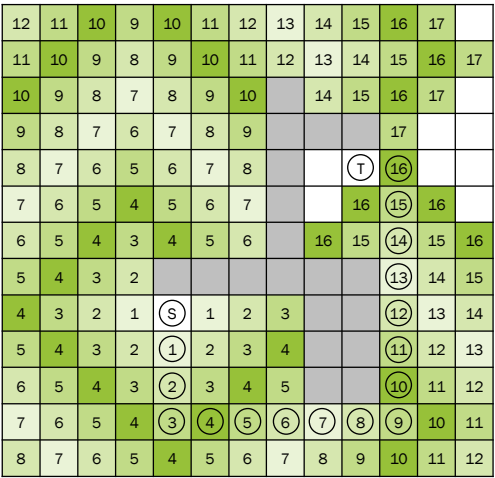


Bild 43: Darstellung des LEE-Algorithmus

Ein großer Nachteil des Lee Algorithmus ist der hohe Rechenaufwand bzw. Speicherverbrauch für den Wellenausbreitungsprozess. Im schlimmsten

Fall ist die Zeitkomplexität des Algorithmus $O(h \times w)$, wenn er auf einem $h \times w$ -Netz arbeitet. Es gibt mehrere Möglichkeiten, den Zeitaufwand zu verringern, was im Allgemeinen durch die Anzahl der zu markierenden Zellen erreicht wird. Dies kann beispielsweise dadurch realisiert werden, indem ein Punkt als Expansionspunkt gewählt wird, der näher am Rand des Routingbereichs liegt. Aber auch durch ein paralleles Propagieren der „Wellen“ vom Quell- als auch vom Zielpunkt (double fan-out) oder innerhalb eines Rechtecks, das etwas größer ist als die künstliche Begrenzung und durch Quell und Zielpunkt konstruiert wurde (framing). Variationen dieses Algorithmus werden häufig in vielen Implementierungen verwendet und für verschiedene Zwecke angepasst. Beispiele hierfür sind das Routing von mehrschichtigen Layouts und Mehrpunktnetzen. [69, 68, 111, 106]

7.2.2 Soukup's Algorithmus

Der Algorithmus von Soukup [112] kombiniert BFS mit der DFS (Depth-First-Search). Mit der DFS wird, ohne die Richtung zu ändern, ein Weg zum Ziel gesucht, bis ein Hindernis auftritt oder das Ziel erreicht wird. Wenn ein Hindernis auftritt, wird eine BFS vom Typ LEE verwendet, um sich um das Hindernis herum zu erweitern. Der Algorithmus von Soukup hat deshalb die gleiche Worst-Case-Zeit- und Raumkomplexität von $O(h \times w)$ für ein Raster der Größe $h \times w$. Dieser kann aber, je nach Layout, schneller als der LEE-Algorithmus berechnet werden [73]. Dabei wird im eigentlichen Sinne ein Linienalgorithmus mit einem rasterbasierten Verfahren kombiniert.

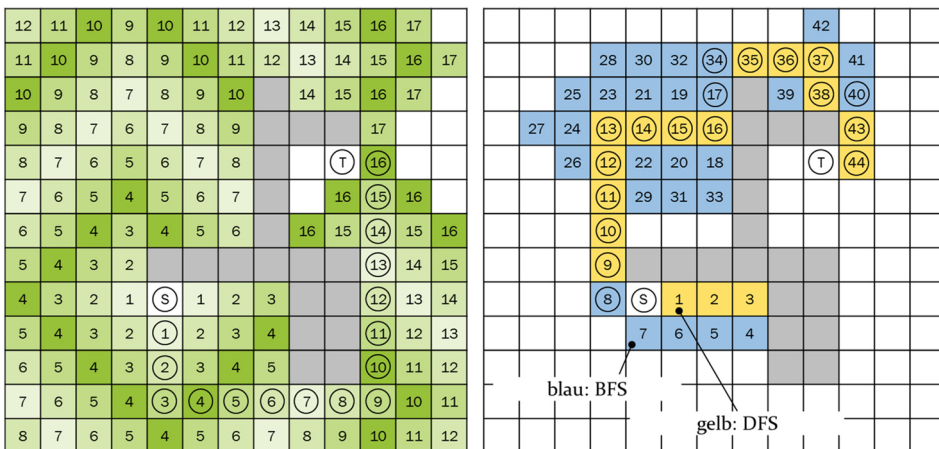


Bild 44: Vergleich von Lee- (links) und Soukup-Algorithmus (rechts)

Bild 44 vergleicht beide Algorithmen in einem Beispiel. Der Geschwindigkeitsvorteil des Algorithmus von Soukup hat jedoch auch einen Nachteil: Es ist nicht zwangsläufig garantiert, dass der Algorithmus den kürzesten Pfad findet. Die Anzahl der verwendeten Knotenpunkte, die nur BFS wie in LEEs Algorithmus verwenden, ist jedoch deutlich höher (hier im Beispiel: 139 vs. 44). Die Zellenbeschriftungen für LEEs Algorithmus sind entsprechend der Beschreibung im vorherigen Abschnitt markiert. Die Zellenbeschriftungen für den Algorithmus von Soukup stellen die Reihenfolge der Suche (Erweiterung) dar.

7.2.3 Der Hadlock-Algorithmus

Der Hadlock-Algorithmus [113] verfolgt einen anderen Ansatz mit einer A*-Suchmethode [114]. Dabei wird die Ausbreitung zum Ziel, entgegen einer Orientierung weg vom Ziel, bevorzugt (wie z.B. bei LEE [110]). Hadlock markiert die Zellen mit der Detour-Nummer (dt.: Umleitungsnummer), wobei entweder die Manhattan-Metrik (die sich nur horizontal oder vertikal von Zelle zu Zelle bewegt) oder die euklidische Metrik (die sich auch diagonal von Zelle zu Zelle bewegt) verwendet wird, um den Abstand zwischen den Zellen zu berechnen [73].

Der Algorithmus führt zwei Listen. Die erste speichert die Position der besuchten Knoten im Raster (Negativliste), die zweite die priorisierten Knoten (Positivliste). D.h. sie sind mit der aktuell kleinsten Detournummer gekennzeichnet. Nur die priorisierten Knoten werden für die weitere Erkundung verwendet. Die Bezeichnungen L der Knoten v_{ij} in einem Raster, die an den aktuellen Knoten (Zelle) c angrenzen, werden wie folgt berechnet [113]:

$$\text{wenn } MD(v_{ij}, t) > MD(c, t), \text{ dann } L(v_{ij}) = L(c) + 1; \quad (29)$$

$$\text{sonst } L(v_{ij}) = L(c), \quad (30)$$

wobei $MD(c, t)$ die Manhattendistanz zwischen dem aktuellen Punkt und dem Ziel und $MD(v_{ij}, t)$ die Manhattendistanz zwischen jedem adjazenten Punkt und dem Ziel beschreibt. Kurz gesagt, für einen Knoten mit der Bezeichnung k werden die benachbarten, nicht blockierten Zellen, die von ihm weg gerichtet sind, mit $k + 1$, ansonsten mit k bezeichnet. Die endgültige Pfadlänge wird berechnet durch:

$$MD(s, t) + 2d(P), \quad (31)$$

wobei $d(P)$ die Anzahl der Zellen auf Pfad P ist, die vom Ziel weg gerichtet sind. Der Algorithmus minimiert $d(P)$, um den kürzesten Weg zwischen Quelle und Ziel zu finden. Der Algorithmus geht gemäß Tabelle 5 vor.

Tabelle 5: Hadlock Algorithmus

Eingabe:	Raster, Quell- und Zielpunkt
Ausgabe:	kürzester Weg
Ablauf:	<ol style="list-style-type: none"> 1. Erstellen zweier Listen, eine positive Liste (p-list) und eine negative Liste (n-list). 2. Der Quellpunkt wird zur p-list hinzugefügt. 3. Für alle freien Nachbarn der Punkte in der p-list wird die Detour-Nummer und in die n-list eingefügt. Die Detour-Nummer wird für einen Nachbarn erhöht der vom Zielpunkt weg zeigt; wenn dies nicht der Fall ist wird die selbe Detour-Nummer eingetragen. 4. Ende und Rückverfolgung (backtrace), wenn einer der Nachbarn der Zielpunkt ist oder die n-list keine Punkte mehr aufweist. 5. Finden der niedrigsten Detour-Nummer in der n-list. 6. p-List leeren und alle Elemente von der n-list in die p-list übertragen, welche die selbe niedrigste Detour-Nummer beinhalten (+ entfernen der selbigen aus der n-list).

Ein Beispiel dazu ist in Bild 45 dargestellt.

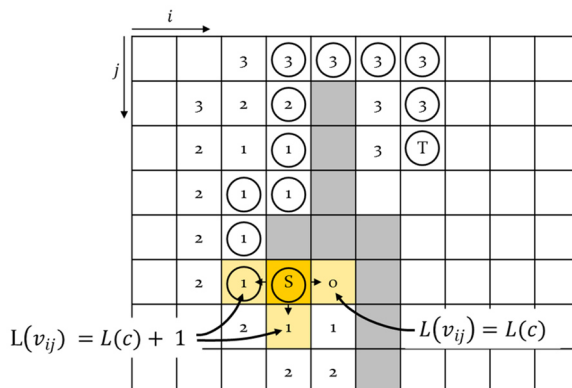


Bild 45: Pfadfindungsbeispiel unter Verwendung des Hadlock-Algorithmus für orthogonales Routing

7.3 Rasterlose Verfahren

Die Grundidee der rasterlosen Routingmethoden besteht darin, die Komplexität von Zeit und Raum zu minimieren, indem Liniensegmente von der Quelle zum Ziel erweitert werden, indem verfügbare Polygonflächen zur Anordnung der Pfade verwendet werden [109]. Durch ihren geringen Speicherbedarf sind sie besonders für große Layouts geeignet. Darüber hinaus erlaubt sie variable Leiterdicken, was die Gesamtdichte von Layouts steigert. Die ersten (rasterlosen) Linienroutingalgorithmen wurden von HIGHTOWER [115] und MIKAMI/ TABUCHI [116] eingeführt. Beide haben einen ähnlichen Ansatz für das Routing-Problem: Wenn eine von der Quelle expandierte Suchzeile mit einem Liniensegment vom Ziel kreuzt, endet die Suche; andernfalls bleiben die Algorithmen bei jeder Iteration in der Explorationsphase und erweitern weitere Liniensegmente (Escape-Linien) von bestimmten Escape-Punkten aus, um das Hindernis zu umgehen, das eine weitere Linienenerweiterung verhindert. Linienprüfalgorithmen sind Depth-First-Search Algorithmen.

7.3.1 Hightower-Algorithmus

Die Algorithmen von Hightower und Mikami-Tabuchi [116] sind sich sehr ähnlich. Der Unterschied besteht darin, dass Hightower [115] nur eine einzige Escape-Linie nach der Erweiterung auf das aktuelle Hindernis erzeugt, welche die vorherige Prüflinie blockiert hat. Dies ist ein Ansatz, der den Speicherbedarf weiter reduziert [115]. Im Allgemeinen wird zwischen horizontalen und vertikalen Abgrenzungen, Escape-Linien sowie Escape-Punkten unterschieden (wie in Bild 46 dargestellt).

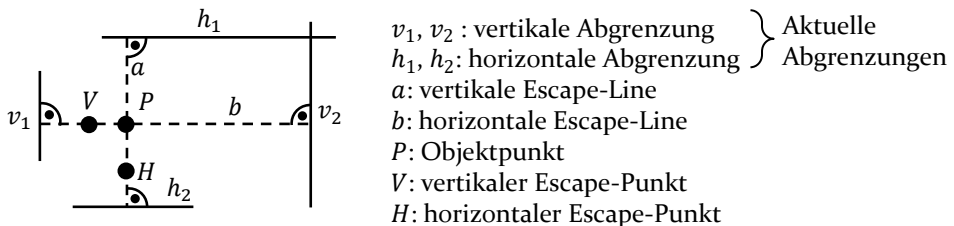


Bild 46: Beschreibung der vom Hightower-Algorithmus verwendeten Definitionen (angelehnt an [115])

Ein Escape-Punkt ist gekennzeichnet als ein Punkt, von dem sich horizontal oder vertikal ausdehnende Linien nicht mit den aktuellen horizontalen oder vertikalen Abgrenzungen (bzw. jedem Liniensegment), das zwischen dem Objektpunkt und der horizontalen oder vertikalen Abdeckung liegt,

schneiden. In Bild 46 ist zu erkennen, dass eine imaginäre vertikale Linie, von V ausgehend, h_1 nicht mehr schneiden würde. V ist also ein Escape-Punkt per Definition. Ein Liniensegment wird als Abgrenzung des Punktes P bezeichnet, wenn die Senkrechte von P zur Linie das Segment schneidet. Eine Abdeckung wird als horizontale oder vertikale Abdeckung bezeichnet, wenn sich keine andere Abdeckung zwischen der Abdeckung und Punkt P [105] befindet. Der Algorithmus wird gemäß Tabelle 6 beschrieben.

Tabelle 6: Hightower Algorithmus

Eingabe:	Geometrisches Layout, Quell- und Zielpunkt
Ausgabe:	Ein möglicher kürzester Pfad
Ablauf:	<ol style="list-style-type: none"> 1. Erzeugen von Escape-Linien für den Start- und Zielpunkt und Einfügen in separate Source- und Target-Listen. 2. Wenn vertikale und horizontale Linien sich gegenseitig überlappen, wird der BACKTRACE (Rückverfolgung) vom Schnittpunkt aus gestartet; sonst TERMINATE (Eliminierung) 3. Finden des Escape-Points: <ol style="list-style-type: none"> a. Escape-Prozess I: Verlassen von mindestens einer der aktuellen horizontalen und/oder vertikalen Abgrenzungen. Wenn kein Escape-Point auf der horizontalen und/oder vertikalen Escape-Linie gefunden wird, muss Escape-Prozess II durchgeführt werden. b. Escape-Prozess II: <ol style="list-style-type: none"> i. Wenn die letzte Escape-Linie durch den Escape-Prozess I erzeugt wurde, wird der Escape-Punkt um eine Einheit (z.B. die Breite des Leiters) weg vom Objektpunkt generiert und erzeugt eine Escape-Linie. Gehe zu Vorgang a. ii. Wenn die letzte Escape-Linie durch den Escape-Prozess II erzeugt wurde, wird die Linie gelöscht. Ein neuer Escape-Punkt wird um eine Einheit näher zum Objektpunkt generiert. iii. Wenn der Objektpunkt gleich dem Escape-Point ist, konnte kein Escape-Point gefunden werden → Abbruch 4. Escape-Linie vom Escape-Point senkrecht zur vorherigen Linie erzeugen, weiter mit 2.

Um bessere Ergebnisse zu erzielen, versucht der Algorithmus abwechselnd Quelle und Ziel zu finden. Wenn durch den Escape-Prozess mehrere Punkte gefunden werden, wird derjenige ausgewählt, der dem aktuellen Objektpunkt am nächsten liegt (Bild 47 zeigt ein Beispiel für den Algorithmus). Der Escape-Prozess wird sowohl vom Quellpunkt S als auch vom Zielpunkt T (1) aus eingeleitet. In (2) werden die Escapepunkte (E_{S2}, E_{S3}) durch den Escape-Prozess I gefunden. Die aktuelle horizontale (rot) und vertikale Abgrenzung (orange) ändern sich entsprechend. Die nächsten Escape-Points (E_{S1}, E_{T1}) auf der Quellseite befinden sich im Escape-Prozess II, während auf der Zielseite die vertikale Abdeckung durch den Fluchtprozess I umgangen wird, was zu E_{T2} (3) führt. Die erzeugten Escape-Linien schneiden sich in Punkt I und der Weg wird zurückverfolgt (4).

Zu beachten ist, dass der Algorithmus nicht den kürzestmöglichen Weg findet. So wäre im Beispiel, durch die Berücksichtigung des Escape-Points der weiter von S entfernt ist, eine bessere Lösung gefunden worden. [105, 115]

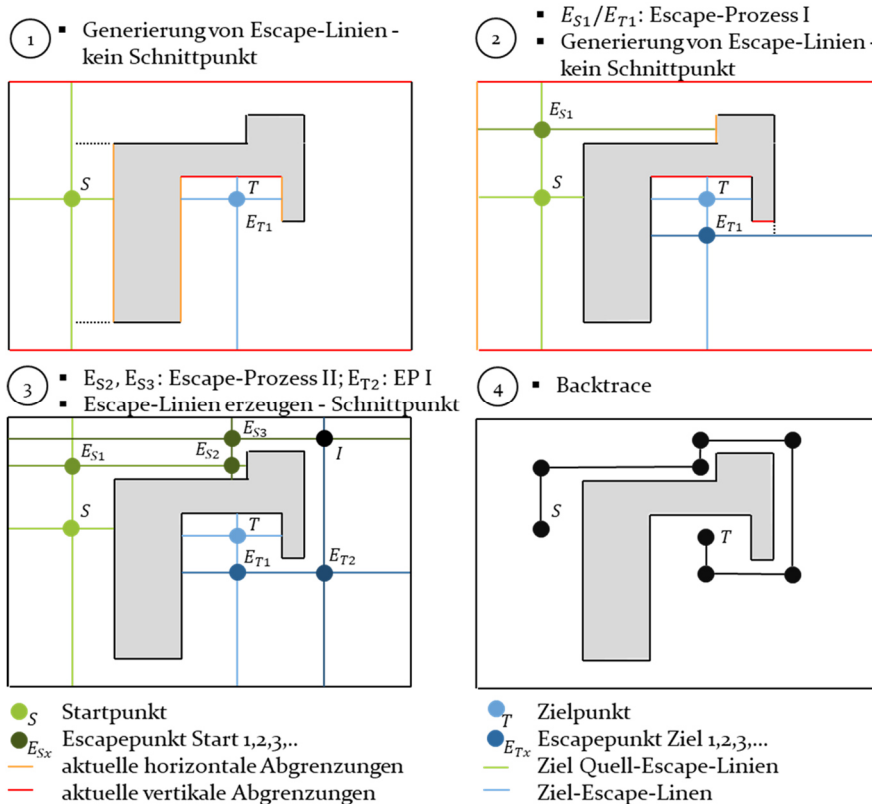


Bild 47: Beispiel für die Wegfindung mit dem Algorithmus von Hightower

7.3.2 Mikami-Tabuchi's Algorithmus

Etwa zur gleichen Zeit wie HIGHTOWER [115] veröffentlichten MIKAMI und TABUCHI [116] ihre Version eines Linienrouting-Algorithmus. Der Unterschied besteht darin, dass jeder Punkt entlang der Escape-Linie ein Ausgangspunkt (Escape-Point) für die Erweiterung einer neuen Prüflinie senkrecht zur aktuellen Linie ist. Dieser Ansatz, eine Kombination aus DFS und BFS, erfordert einen höheren Rechenaufwand, findet aber im Gegensatz zu HIGHTOWER auch garantiert einen (ggf. nicht kürzesten) Weg, sofern dieser vorhanden ist. Auch hier werden die Escape-Linien abwechselnd von Quelle und Ziel erweitert und auf Schnittpunkte überprüft. Der Gesamtalgorithmus ist weniger komplex als der Algorithmus von Hightower, da keine zusätzlichen Regeln für die Tiefensuche festgelegt werden müssen. Bild 48 greift das Beispiel in Bild 47 auf und veranschaulicht den Algorithmus, der auf das gleiche Problem angewendet wird.

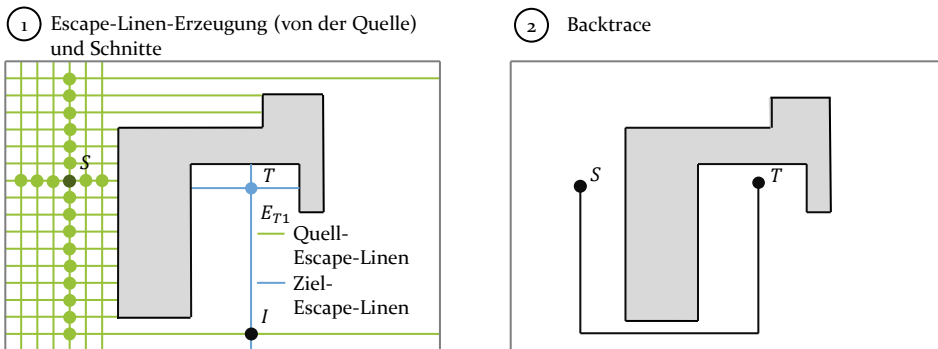


Bild 48: Beispiel für die Pfadsuche mit dem Algorithmus von Mikami-Tabuchi

Beide Linienroutingalgorithmen laufen erwartungsgemäß schneller als Maze-Routingalgorithmen, wenn es eine moderate Anzahl von Hindernissen gibt. Stark belegte Routingbereiche stellen jedoch ein Problem dar, da die Prüfsegmente gegen eine zunehmende Anzahl von Hindernissen (Komponenten, Leiter usw.) getestet werden müssen. [117, 118]

7.3.3 Algorithmus für die Rechteck- und Linienexpansion

Nach der Einführung der Linienroutingalgorithmen wurden zahlreiche modifizierte Versionen entwickelt, um deren Grenzen zu überwinden. Die Grenzen dieser Algorithmen sind insbesondere, dass sie nicht den kürzesten oder manchmal gar keinen Pfad zum Zielpunkt finden. Ein Weg diese Problemstellungen anzugehen, sind Algorithmen zur Rechteck- und Linienexpansion, die folgend vorgestellt werden.

Bei der Rechteckexpansion wird ein Pfad gesucht, indem Kanten zu Rechtecken erweitert werden, die durch Ecken der Hindernisse oder den Arbeitsbereich erzeugt werden. Neue Rechtecke werden von den Kanten, die nicht an Hindernisse oder die Begrenzung des Arbeitsbereichs stoßen, erweitert (sogenannte freie Kanten). Freie Kanten können entweder gerade Linien oder Krümmungen sein. Letzteres ist eine Kombination aus zwei geraden Linien, die sich in einem Winkel von 90° treffen. Dabei hat jedes Rechteck die größtmögliche Fläche. Der Expansionsprozess wird fortgesetzt, bis das Ziel von einem Rechteck umschlossen wird. Eine Baumdatenstruktur speichert die Rechtecke nach den vier Himmelsrichtungen ("Nord", "Süd", "Ost", "West") bezogen auf die Wurzel der Baumstruktur. Die Wurzel des Suchbaums ist das Rechteck mit dem Quellpunkt. Weitere Rechtecke, die aus dem Wurzelrechteck entstehen, werden als untergeordnete Elemente im Suchbaum für das Backtracking gespeichert. [119]

Bild 49 zeigt einen exemplarischen Wegfindungsprozess für die Erweiterung von Rechtecken. Zunächst wird S zu dem Rechteck R_0 erweitert, das zwei erweiterbare Liniensegmente (1) aufweist. Von hier aus wird R_0 zu R_1 und R'_0 erweitert. R'_0 kann nicht weiter erweitert werden, da sein Umfang die Grenze des Hindernisses und des Arbeitsbereichs überlappt. R_1 kann jedoch bis R_2 usw. erweitert werden, bis R_5 erreicht ist, dass das Ziel enthält. Der endgültige Pfad (2) wird durch Auswahl der nächstgelegenen Punkte an den freien Kanten des jeweiligen übergeordneten Rechtecks, ausgehend vom Zielpunkt, erzeugt (Rückwärtssuche).

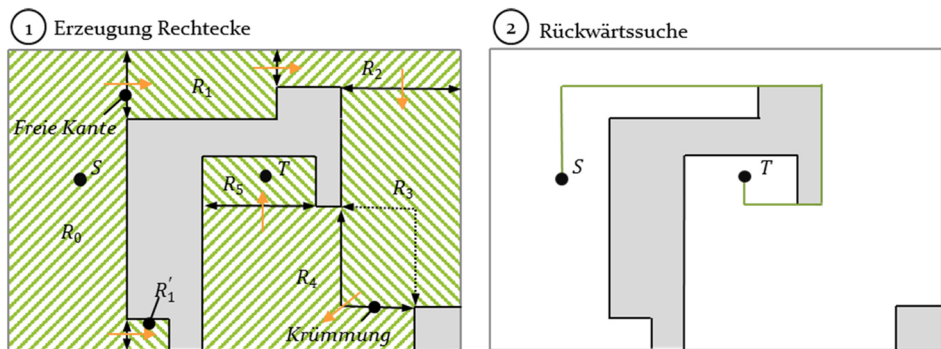


Bild 49: Beispiel für eine Rechteck-Expansion

Ein weiterer noch effizienterer rasterloser Ansatz wurde von OHTSUKI [120] eingeführt. Rechtecke entstehen durch das Aufweiten von Liniensegmenten von nicht konkaven Begrenzungen polygonaler Hindernisse. Die Ausdehnung erfolgt in horizontaler und vertikaler Richtung, bis ein Hindernis oder die Grenze des Arbeitsraumes erreicht ist.

In Bild 50 ist die Linienenerweiterung durch ein Beispiel veranschaulicht. Die Erweiterungszeilen l_{01} und l_{02} der ersten Ebene werden aus dem Quellknoten erstellt und in einem Suchbaum (1) gespeichert. Beide Linien werden mit anderen Erweiterungslinien geschnitten. Die Linie l_{01} kreuzt die Linie l_{11} und die Linie l_{02} kreuzt die Linie l_{12} und l_{13} . Die Erweiterungslinien zweiter Ebene sind im Suchbaum als Kinder von l_{01} bzw. l_{02} gespeichert. Die Suche nach dem Zielpunkt wird fortgesetzt, und die horizontalen und vertikalen Linien entsprechend im Suchbaum gespeichert. Die Suche endet, wenn eine Linie überschritten wird, die sich auf einem niedrigeren oder gleichen Niveau wie die aktuelle Linie befindet oder das Ziel gefunden wurde.

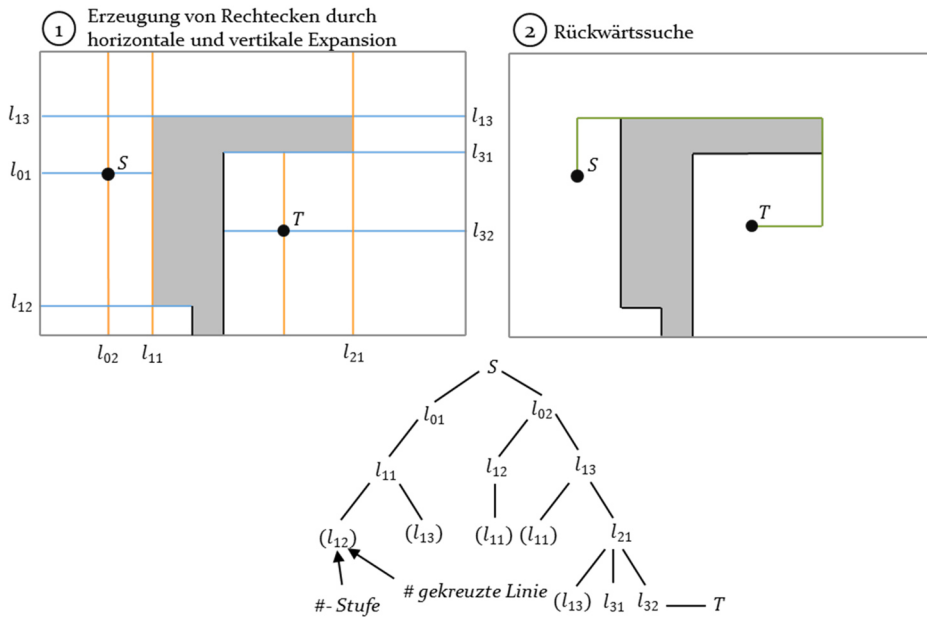


Bild 50: Beispiel für die Linien-Expansion und den daraus abgeleiteten Suchbaum

Der durch die folgende Rückwärtssuche erhaltene Weg weist nicht die minimale Weglänge, sondern eine minimale Anzahl von Linien auf. Zum Finden des kürzesten Pfads müssen alle möglichen Wege ausgewertet werden. Beim Backtrace (der Rückwärtssuche) werden die vertikalen und horizontalen Linien an ihren jeweiligen Schnittpunkten so geschnitten, dass der endgültige Weg aus Segmenten von vertikalen und horizontalen Erweiterungslinien (2) besteht. Beide vorgestellten rasterlosen Algorithmen ermöglichen ein beliebiges Winkelrouting. [121]

7.4 Topologische Verfahren

Das topologische Routing wurde auf der Grundlage der Einschränkungen von Rasterverfahren und rasterlosen Techniken entwickelt. Immer kleiner werdende Abstände von Bauteilen und Leiterelementen schließen traditionelle einheitliche rasterbasierte Verfahren für das Design von hochintegrierten Schaltungen aus. Feine Netze erfordern eine große Menge an Speicher und Rechenleistung, um automatisierte Lösungen innerhalb einer angemessenen Zeitspanne zu berechnen. Rasterlose Techniken reduzieren den Rechenaufwand auf ein akzeptables Maß, können aber nicht mit nicht-rechteckigen Hindernissen wie Rundungen oder Bauteilen in Schräglage umgehen. Darüber hinaus überwinden die meisten Rastertechniken nicht das Problem, dass Leiterbahnen nur horizontal und vertikal geführt werden können [122].

Topologische Routing-Algorithmen lösen sich vollständig von der geometrisch begrenzten Raumaufteilung (siehe Bild 51). Stattdessen wird der Routingbereich topologisch erfasst, indem der Raum zwischen benachbarten Hindernissen trianguliert wird. Diese Technik ermöglicht variable Dicken der (Wellen-)Leiter, beliebige Winkelverläufe und von der Form des Schaltungsträger unabhängiges Routing. Ein gängiger Algorithmus zur Erzeugung eines triangulierten Layouts aus einer Reihe von diskreten Punkten ist die Constrained Delaunay-Triangulation (CDT) [123, 124]. Das CDT maximiert alle Winkel der Dreiecke und hält gleichzeitig die durch Hindernisse bedingten Kanten ein. Die Umsetzung dieses Ansatzes ist unabhängig von der Form der Komponenten und des Arbeitsbereichs. Nach der CDT bearbeitet ein Algorithmus alle Dreiecke, um einen möglichen nicht-orthogonalen Weg zwischen zwei Punkten zu ermitteln.

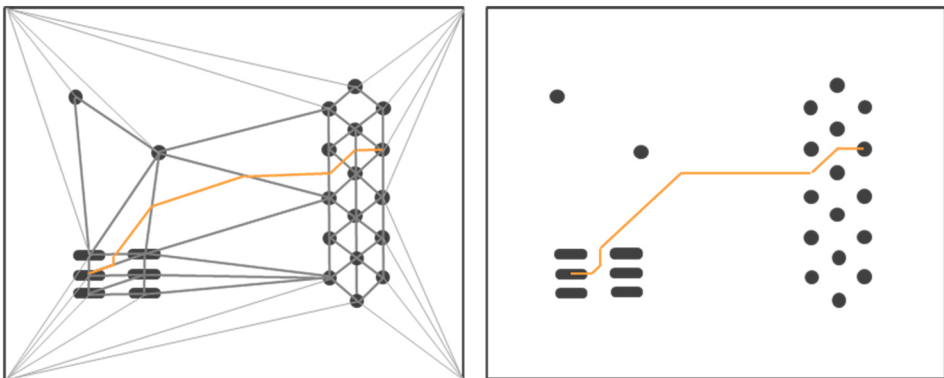


Bild 51: Beispiel für topologisches Routing mittels Delaunay-Triangulation mit möglichem (l.) und endgültigem (r.) Routingpfad [122, 124]

Dies kann als Suche über einen Graphen, der durch die Triangulation gegeben ist, mittels des A*-Algorithmus oder des Funnel-Algorithmus [125] implementiert werden. In einem letzten Schritt werden die groben Pfade unter Beibehaltung der topologischen und geometrischen Randbedingungen [92, 122] in geeignete Routingpfade (z.B. geradlinig oder octilinear) umgewandelt. Das topologische Routing wurde erstmals als Lösung für das Routing von hochdichten und mehrschichtigen MCMs (Multi Chip Module) eingeführt. [73, 126]

7.5 3D-Routing

Der Begriff 3D-Routing bezieht sich zumeist auf das mehrschichtige Routing von Leiterplatten oder Hochleistungs-MCMs (Multi-Chip-Module). Die Verkleinerung der Größe von MCMs bietet eine Möglichkeit, ihre Leistung und Zuverlässigkeit zu maximieren. Das Gleiche gilt für Leiterplatten, jedoch ist hier die Leiterplattengröße, nicht die Leistung der wichtigste Faktor. Heutzutage bestehen die meisten Leiterplatten aus mehr als einer Schicht. Durch den Wechsel zwischen den Layern mittels VIAs (Vertical Interconnect Access) werden komplexe Layouts auf engstem Raum möglich. Deshalb wird 3D-Routing meist eher mit 2,5D-Routing gleichgesetzt, da es aufgrund technologischer Einschränkungen und Signalverzögerungen immer noch die x- und y-Richtung gegenüber der z-Richtung bevorzugt. Einen komplexeren Fall stellen räumliche Schaltungsträger in Form von MID oder 3D-Opto-MIDs dar. Um die Erstellung von mehrschichtigen Layouts zu ermöglichen, sind neue geeignete Algorithmen erforderlich, die eine Verbindung zwischen den Layern ermöglichen. Das von Zeitler et al. [P5, P6] beschriebene B-Rep-Routing wird hingegen auf komplex geformte Schaltungsträger mit mehreren verschiedenen geometrischen Oberflächentypen angewendet, die mit einem Volumenkörper verbunden sind. Von besonderer Bedeutung ist zudem die Platzierung der verwendeten Komponenten im dreidimensionalen. Dies lässt sich unter anderem dadurch erklären, dass bei räumlichen Schaltungsträgern nicht jede Oberfläche zur Platzierung schaltungsrelevanter Komponenten geeignet ist. So können einerseits Flächen aufgrund ihrer geometrischen Ausprägung ungeeignet sein (z.B. durch starke Krümmungen) oder aber aufgrund anderer Verwendungszwecke, beispielsweise aufgrund einer späteren Montage, nicht für das Layout der Schaltung verwendet werden. Der Designer muss in solchen Fällen diese Gegebenheiten berücksichtigen und perspektivisch die Platzierung der Bauelemente planen.

7.5.1 Kombiniertes B-Rep-Planarisierungsrouting

Innerhalb von 3D-CAD-Systemen werden räumliche Strukturen (was z.B. die Schaltungsträger von 3D-Opto-MID betrifft) durch eine B-Rep-Datenstruktur dargestellt (siehe Kapitel 3.3). Für konventionelle 2D-Routing-Probleme werden zumeist Ebenen angenommen, die als Sonderfall des B-Rep-Planarisierungs routings betrachtet werden können. Beim Planarisierungsverfahren muss eine Vielzahl unterschiedlicher geometrischer Oberflächentypen sowie die topologischen Beziehungen zwischen den Oberflächen berücksichtigt werden. Sowohl die Beziehungen als auch Oberflächentypen können den Wegfindungsprozess erheblich erschweren. Zusammenfassend lässt sich die Aussage treffen, dass das Routing auf einem B-Rep-Modell dem Problem sowohl eine geometrische als auch eine topologische Komplexität verleiht. Darüber hinaus müssen in der Praxis andere Konstruktionsrichtlinien berücksichtigt und in geometrische Randbedingungen umgesetzt werden. So gibt es z.B. Bereiche in denen mechanische Spannungen und Dehnungen einen bestimmten Schwellwert überschreiten oder Bereiche, die aus fertigungstechnischen Gründen nicht erreichbar sind (z.B. Hinterschnitte). Ein Ansatz, um mit diesen komplexen Routingproblem umzugehen, ist die Planarisierung von Oberflächen.

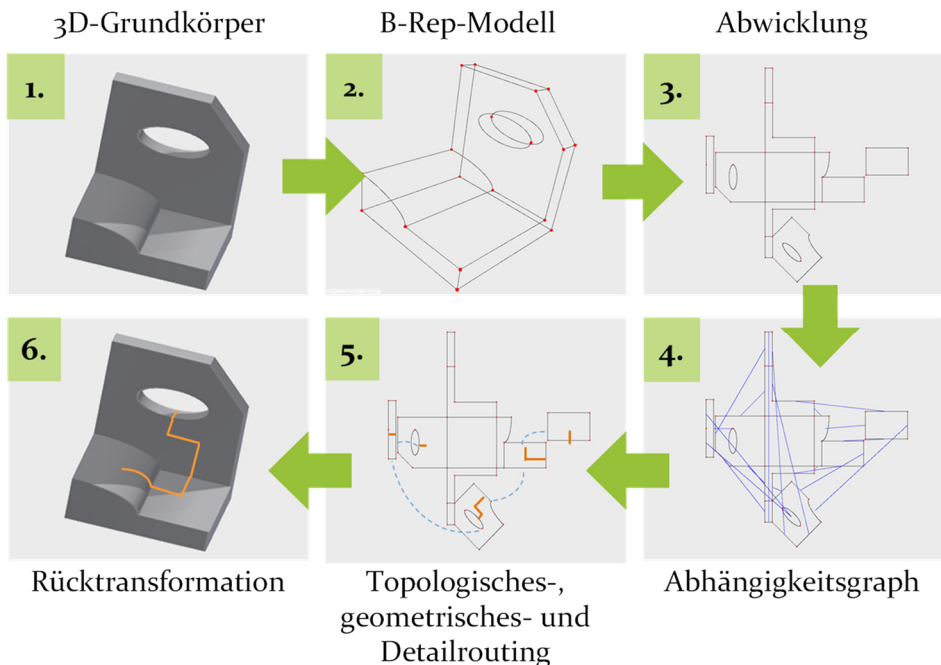


Bild 52: Kombiniertes B-Rep Planarisierungs routing - Planarisierung, Abhängigkeitsgraph, Routing und Rücktransformation [P6]

Auf den ersten Blick ist es ein naheliegender Ansatz, das B-Rep-Modell in seine einzelnen Oberflächen zu zerlegen, mittels topologischer Zusammenhänge zu beschreiben und diese anschließend zu entfalten (= Transformation vom 3D-Raum in eine 2D-Ebene), sodass herkömmliche 2D-Routing-Algorithmen angewendet werden können. Auf diese Weise wird ein 3D- auf ein 2D-Problem reduziert. Dabei spielt es eine untergeordnete Rolle welcher Planarisierungsansatz verwendet wird. Von Bedeutung ist lediglich die entsprechenden Flächenbeziehungen zu erhalten. Nach dem Anwenden eines zweistufigen Routingverfahrens (Globalrouting und Detailrouting) werden die Planflächen wieder in ihre 3D-Darstellung rücktransformiert (siehe auch Bild 52). Die Hauptaufgabe ist hierbei der Abwicklungsprozess von 3D-Oberflächentypen.

Dieser Prozess kann jedoch sehr aufwändig werden, wenn z.B. Oberflächentypen verwendet werden, die nicht abwickelbar sind (z.B. Sphären oder Freiformflächen). Eine Oberfläche ist abwickelbar, wenn sich alle Abstände zwischen beliebigen Punktpaaren auf der Oberfläche nach der Abbildung auf ihre 2D-Darstellung nicht ändern, was z.B. für Ebenen, (elliptische) Zylinder und Kreiskegel gilt. Im Gegensatz dazu sind die meisten Oberflächen, wie z.B. sphärische Oberflächen oder Freiformflächen, nicht abwickelbar. Der Abwicklungsvorgang ist dabei wie folgend beschrieben aufgebaut:

Gemäß einer B-Rep-Datenstruktur teilen sich zwei Oberflächen eine gemeinsame Kante, die bei einem Zerlegen des 3D-Körpers dupliziert wird. Durch ein Abhängigkeitsdiagramm werden die Beziehungen der Oberflächen untereinander beschrieben. Die Transformation in die Ebene wird durch starre Transformationsmatrizen berechnet, die für jeden Oberflächentyp individuell abgeleitet werden müssen. Dieser Prozess ist kompliziert und wurde bisher nur für bestimmte Oberflächen implementiert wie unter anderem in [P11, P5, P6] beschrieben. Dabei stellen auf B-Spline basierende Oberflächen, auch als NURBS (Non-Uniform Rational B-Spline) bezeichnet, eine besondere Herausforderung dar. Im Allgemeinen treten NURBS oft in der 3D-CAD-Konstruktion auf, wenn Approximationsflächen benötigt werden (siehe Kapitel 4.4.1). Zwar existieren Ansätze, um Splines durch Oberflächentypen, die abwicklungsfähig sind, zu approximieren (z.B. durch Constrained Delaunay Triangulation – siehe Kapitel 7.4), jedoch ist es nach wie vor nicht möglich, Verzerrungen durch Entfalten solcher Oberflächen zu vermeiden. Dies ist beispielsweise problematisch, wenn

nach dem Re-Mapping einer planarisierten Oberfläche in 3D ein Mindestabstand eingehalten werden soll oder eine genaue Beschreibung des Leiters für Validierungszwecke vonnöten ist [P6]. Eine weitere Herausforderung ist es, den Abwicklungsprozess interaktiv zu gestalten, damit die Benutzer das 2D-Mapping-Ergebnis ggf. anpassen können. Ein geeigneter Algorithmus kann helfen, die Anordnung der abgewickelten Oberflächen anzupassen.

Der Routingprozess in diesem Verfahren selbst ist mehrstufig und wird in folgender Reihenfolge durchgeführt:

1. *Erste Stufe des globalen Routings*: Topologisches Routing der planarisierten Flächen (z.B. Dijkstra)
2. *Zweite Stufe des globalen Routings*: Topologisches Routing der Kanten der planarisierten Flächen (z.B. Dijkstra)
3. *Detail-Routing*: Geometrische Pfadfindung auf den planarisierten Flächen (z.B. mittels LEE)

Der Aufwand, der sich aus der Abwicklung ergibt, kann vielfältige Ausprägungen haben. So ist bereits der 2D-Abwicklungsprozess als komplex einzustufen und viele Oberflächen sind schwer oder überhaupt nicht zu glätten. Darüber hinaus ist der Routingprozess von eingeschränkten Heuristiken abhängig und kann Hindernisse nur unter hohem Aufwand umgehen.

7.5.2 Algorithmus für manuelles 3D-Routing und Oberflächenschnitte

Manuelles 3D-Routing beruht darauf, dass der Benutzer beliebige Wegpunkte auf Oberflächen verschiedensten Typs festlegt und ein interner Algorithmus den Pfad zwischen ihnen berechnet. Die größte Herausforderung dabei besteht darin, den Kurvenverlauf über unterschiedliche und teils unebene Oberflächen zu berechnen. Um diese Aufgabe zu lösen, ist ein Verfahren notwendig, das über die Grenzen definierter Oberflächentypen hinweg als auch deren geometrische Ausprägungen einen sinnvollen Pfad berechnet. Inhärente Funktionalitäten von CAD-Programmen bieten zwar Möglichkeiten approximative Projektionen auf 3D-Flächen (auch über mehrere hinweg) abzubilden, diese können jedoch nur ungenau die geplanten Pfade darstellen. Das lässt sich vor allem durch Projektionsfehler begründen, da solche Projektionen nicht mit den exakten Beschreibungen

der zu bearbeitenden Oberfläche (z.B. Splines, Ellipsen, Kreissegmente) arbeiten. Ein Verfahren um diese Problematik zu umgehen, wird in Bild 53 dargestellt. [P12]

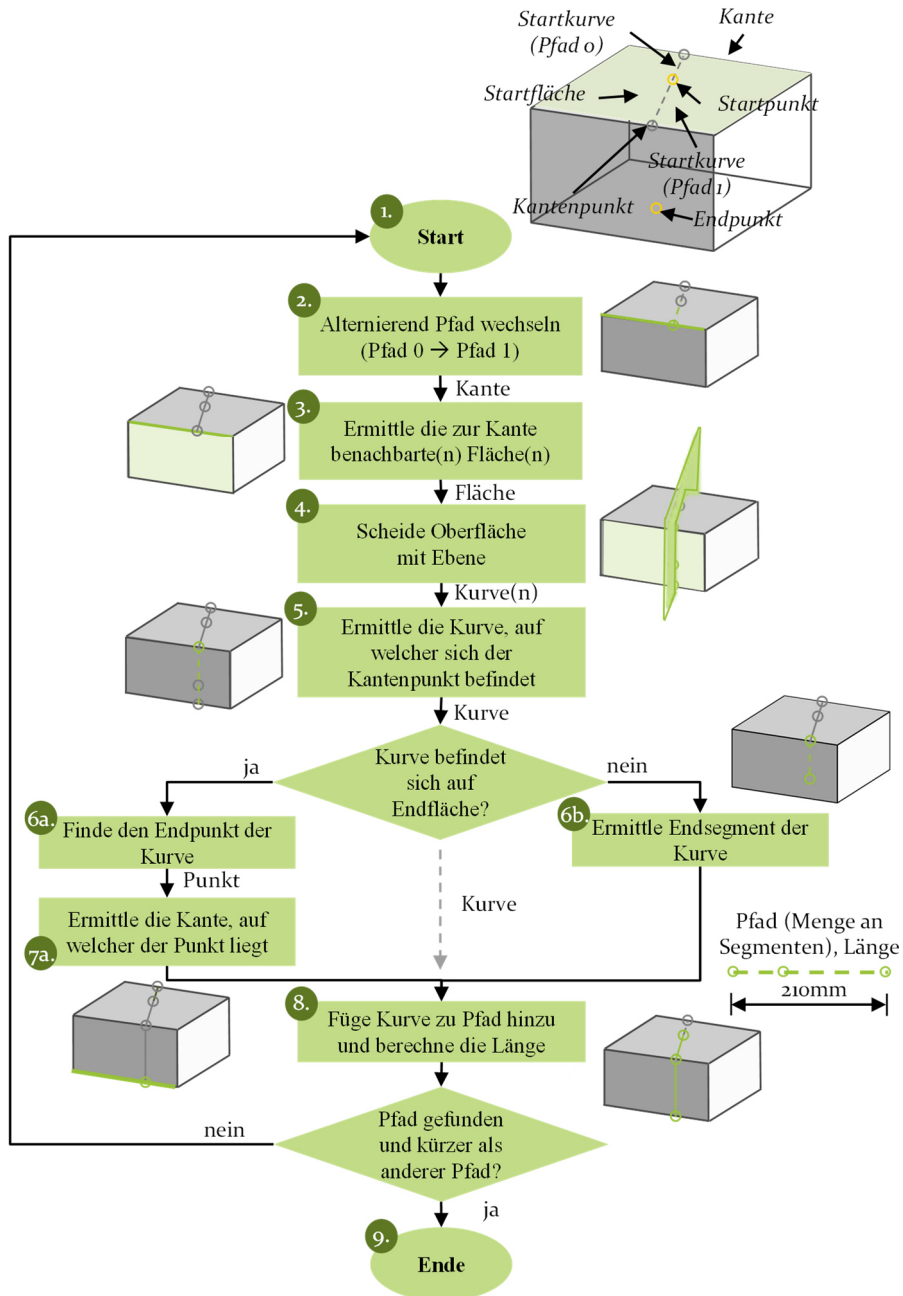


Bild 53: Algorithmus für manuelles 3D-Routing und Oberflächenschnitte

Soll ein Pfad zwischen einem Start- und Zielpunkt berechnet werden, so müssen diese Punkte zunächst auf den jeweiligen Oberflächen definiert werden (1). Der nächste Schritt ist die Ermittlung der Pfade zu benachbarten Kanten der Flächen die an Start- und Endpunkt anliegen (alternierend) (2)(3). Im vierten Schritt (4) wird zwischen Start- und Zielpunkt eine Schnittebene erzeugt. Der Normalenvektor der Schnittebene entspricht dem Kreuzprodukt aus der durchschnittlichen Normalen der Punkte an der gewählten Position auf der Fläche und dem Abstandsvektor zwischen diesen Punkten. Der Ursprung der Ebene kann einer der beiden Punkte sein. Die Ebene schneidet die Startfläche und die Kurve mit dem Startpunkt befindet sich zwischen den Schnittkurven.

Dies ist notwendig, da das Überschneiden einer Fläche je nach Geometrie der Fläche zu mehreren Kurven führen kann. Wenn sich Start- und Endpunkt auf der gleichen Kurve (und damit auf der gleichen Fläche) befinden, werden sie direkt verbunden. Wenn nicht, berechnet der Algorithmus die Startkurve für die beiden möglichen Bahnen und schneidet nacheinander benachbarte Flächen, bis der Endpunkt auf der Schnittkurve liegt (5-7). Da es immer zwei mögliche Wege gibt, wechselt die Hauptschleife nach jeder bearbeiteten Fläche abwechselnd zwischen ihnen. Dieser Ansatz stellt sicher, dass keine Rechenzeit für einen letztlich verworfenen, weil längeren, Weg verschwendet wird. Die Schleife wird beendet, sobald ein gültiger Pfad gefunden wurde, der ebenfalls kürzer ist als der alternative Pfad (8)(9). Ein Pfad wird ungültig, wenn eine Kante nur eine benachbarte Fläche (statt zwei) aufweist, was bei nicht fest definierten Objekten (z.B einer geometrischen Begrenzung eines optischen Substrats) der Fall ist. In diesem Fall wird die Suche nach dem alternativen Weg fortgesetzt. Wenn beide Pfade ungültig sind oder die maximal zulässige Anzahl von Iterationen überschritten wird, wird die Schleife verlassen und es wird kein Kurvensegment und kein Kontrollpunkt erzeugt.

7.6 Zusammenfassung und Bewertung

Jedes der vorgestellten Verfahren hat seine Vor- und Nachteile. Die nachfolgende Tabelle 7 fasst die beschriebenen Verfahren zusammen und gibt eine Übersicht über die speziellen Eigenschaften der Verfahren. Das im konkreten Fall verwendete Verfahren hängt dabei immer von den Routingparametern bzw. dem Anwendungsfall (2D, 2,5D, 3D) ab. Da allein die Eigenschaften nur begrenzte Aussagekraft besitzen, sind zusätzlich die Vor- und Nachteile der einzelnen Verfahren in Tabelle 8 dargestellt.

Tabelle 7: Klassifizierung und Bewertung der untersuchten Routingverfahren

Bezeichnung	Klassifizierung	Eigenschaften
-------------	-----------------	---------------

Klassische 2D-Verfahren

	Topologisch	Rasterlos/ Konturbasiert	Linienbasiert	Rasterbasiert	Kürzeste Pfade	Hindernisse	Geschwindigkeit	Speicherbedarf
Lee				X	+	+	-	-
Soukup				X	O	O	+	-
Hadlock				X	+	+	+	-
Hightower			X		O	+	O	-
Mikami-Tabuchi			X		O	+	O	-
Rechteck-/ Linienexpansion		X			O	+	+	+
CDT + A*	X				+	+	O	-
Dijkstra	X				+	+	+	-
A*	X			X	+	+	+	O

3D-Verfahren

B-Rep-Planarisierung		X		X	(+)	(+)	-	-
Manuelles 3D-Routing		X			(+)	(+)	-	+

Tabelle 8: Vor- und Nachteile der untersuchten Routingverfahren

Bezeichnung	Vorteile	Nachteile
Lee	<ul style="list-style-type: none"> • Findet immer den kürzesten Pfad 	<ul style="list-style-type: none"> • zeit- und speicherintensiv • Umsetzung variabler Leiterdicken umständlich
Soukup	<ul style="list-style-type: none"> • reduziert im Allgemeinen die verwendeten Knoten (BFS+DFS) • Findet garantiert eine Lösung 	<ul style="list-style-type: none"> • Findet nicht immer kürzesten Pfad
Hadlock	<ul style="list-style-type: none"> • Findet immer kürzesten Pfad • Schneller als Lee (Suche mit A* Heuristik) 	<ul style="list-style-type: none"> • Hoher Speicher- und Zeitverbrauch
Hightower	<ul style="list-style-type: none"> • Reduzierte Speichernutzung • Variable Leiterbreiten 	<ul style="list-style-type: none"> • Findet nicht immer einen (kürzesten) Pfad
Mikami-Tabuchi	<ul style="list-style-type: none"> • Findet garantiert einen Pfad • Variable Pfadbreiten möglich 	<ul style="list-style-type: none"> • Ineffektiv mit einer zunehmenden Anzahl an Hindernissen
Rechteck-/Linienexpansion	<ul style="list-style-type: none"> • Findet garantiert einen Pfad • Reduziert die Speichernutzung 	<ul style="list-style-type: none"> • Im Allgemeinen nur horizontale/vertikale Expansion möglich. • Nur lagenweise Streckenführung möglich
CDT + A*	<ul style="list-style-type: none"> • Routing in alle Richtungen möglich • Unterschiedliche Leiterdicken 	<ul style="list-style-type: none"> • Erfordert Triangulieren der Oberfläche
Dijkstra	<ul style="list-style-type: none"> • Findet immer einen kürzesten Pfad 	<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Speicheranforderungen, um die Graphen zu speichern
A*	<ul style="list-style-type: none"> • Findet immer einen kürzesten Pfad 	<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Speicheranforderungen, um die Graphen zu speichern
B-Rep-Planarisierung	<ul style="list-style-type: none"> • Direktes Routing auf 3D-Flächen 	<ul style="list-style-type: none"> • Nicht praktikabel, da bisher nicht alle Routingprobleme gelöst werden können
Manuelles 3D-Routing	<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Planungsfreiheit 	<ul style="list-style-type: none"> • Jeder Pfad muss separat geplant werden

Im Allgemeinen sind hohe Automatisierungsgrade sinnvoll, jedoch müssen auch Algorithmen in der Lage sein, mit der Vielzahl der unterschiedlichen Eingangsparameter der Routingprobleme umzugehen. Wie bereits erwähnt, können oft keine optimalen Lösungen gefunden werden, da das Designproblem in Teilprobleme unterteilt ist, die weder global noch gleichzeitig gelöst werden können. Obwohl viele Schaltungsentwickler den Prozess der manuellen Erstellung von gerouteten Layouts bevorzugen, kann es Stunden oder Tage dauern, bis große Layouts fertig gestellt sind. Dies hängt damit zusammen, da die Designzeit mit der Anzahl der Komponenten und Netze deutlich steigt.

Das Design von Baugruppen erfordert spezielle Kenntnisse, um alle geometrischen, elektrischen, optischen bzw. physikalischen Einschränkungen des Designs zu berücksichtigen. Erfahrene Designer können diese Einschränkungen in Konstruktionsregeln umsetzen, um saubere und übersichtliche Layouts zu erstellen. Um die Produktivität zu steigern und Konstruktionsfehler zu vermeiden, kann das (teil-)automatisierte Routing dazu beitragen, den Konstruktionsprozess zu beschleunigen und zu verbessern. Auch wenn das vollautomatische Routing zunächst vielversprechend erscheint, gibt es derzeit mehrere Nachteile, die im Folgenden aufgeführt sind [47]:

- Das Festlegen aller Input-Parameter (Regeln, Einschränkungen, etc.) für den automatisierten Router kann ein sehr zeitaufwendiger Prozess sein.
- Viele Algorithmen laufen auf großen Layouts langsam und benötigen Stunden oder Tage, um auch auf schnellen Computern fertig zu werden; in der Zwischenzeit können Designer nicht am Layout arbeiten.
- Die Routing-Ergebnisse sind fragwürdig: Einerseits können sie die Anforderungen an die Fertigung und Signalintegrität erfüllen, andererseits sieht das endgültige Layout möglicherweise nicht sehr sauber aus oder beinhaltet unnötig lange Pfade, was die Herstellungskosten erhöht.
- Deshalb muss genügend Zeit für die Nachbearbeitung vorgesehen werden.
- Die Routing-Ergebnisse hängen stark von der Platzierung der Komponenten ab, die oft von einem Designer durchgeführt wird, der bereits ein bestimmtes Routing-Ergebnis perspektivisch plant.

Aus den oben genannten Gründen können die heutigen Designsysteme weder eine vollständige Auto-Routing-Funktionalität bieten noch das „perfekte“ Routing-Ergebnis liefern. Selbst der anspruchsvollste Auto-Router, der verfügbar ist, ist deshalb nicht in der Lage, die Qualität der Arbeit eines erfahrenen Designers zu erreichen. Dennoch gibt es viele automatisierte Ansätze, die den manuellen Designprozess beschleunigen, indem sie entweder Designregelprüfungen integrieren oder Routing-Aufgaben innerhalb einer gut eingeschränkten Domäne erleichtern. Aus diesem Grund wird im weiteren Verlauf der Arbeit ein manueller und ein teilautomatisierter Ansatz verfolgt, die auf dem vorgestellten Verfahren aus 7.5.2 basieren und die rasterbasierten sowie graphenbasierten Algorithmen aus 7.1 bzw. 7.2 verwenden.

8 Prototypische Integration optomechatronischer Funktionen in ein 3D-Opto-MID Designsystem

Im Folgenden werden anhand eines prototypischen Beispiels die Funktionsweisen einer optomechatronisch integrierten CAD Lösung dargestellt. Schaltungsträger- bzw. Substratmodellierung, Wellenleitermodellierung, Einbindung von Komponenten sowie die automatisierte Design- und Fertigungsrichtlinienprüfung werden dabei gemäß dem Ablauf aus Kapitel 6.3.2 erläutert. Abschließend werden auch implementierte Validierungsfunktionen für die optische Prüfung erklärt. Für den im Rahmen dieser Arbeit entstandene Softwaredemonstrator wurde als Grundlage das CAx System Siemens NX gewählt. Wie bereits in Kapitel 3.3 erläutert, dient die rechnerunterstützte Konstruktion, auch CAD (Computer-Aided Design) genannt, der Erfassung und Verarbeitung von geometrischen Elementen zur Erstellung eines dreidimensionalen Modells [78]. Sie ist für die Konstruktion von räumlichen Baugruppen mit elektrooptischen Elementen von besonderer Bedeutung, da die Eigenschaften von optischen Komponenten direkt von der räumlichen Gestaltung des Schaltungsträgers abhängen. Für die Konstruktion eines 3D-Opto-MIDs ist die Betrachtung der Bauteilgeometrie somit unabdingbar, um die domänenspezifischen Funktionen von Mechanik, Elektronik und Optik vereint gestalten zu können. [P3]

8.1 Allgemeines Anwendungsdesign und Aufbau

Die verwendete Basissoftware Siemens NX ist ein PLM-System (Product Lifecycle Management System) mit weiteren integrierten CAx-Funktionalitäten, dass den Anwender während des gesamten Entwicklungs- und Fertigungsprozesses eines Produktes unterstützt. Neben der Funktion der computerunterstützten Konstruktion beinhaltet NX verschiedene Softwaremodule zur Fertigungsunterstützung, Simulation, Entwicklung von mechatronischen Konzepten und elektrischen Systemen, zum Schiffs- und Fahrzeugbau sowie zur wissensbasierten Konstruktion und Visualisierung. [78]

Diese sind in der Abkürzung CAx durch das „x“ repräsentiert, welches als Platzhalter für die verschiedenen Systeme unterschiedlicher Einsatzbereiche steht [79]. Für Unternehmen, die im Konstruktionsprozess eines Produktes eine Vielzahl von repetitiven Abläufen vornehmen müssen, kann

die Automatisierbarkeit von Konstruktionsschritten von großer Bedeutung sein. Diese Routinen – z.B. die Platzierung von sich im Modell wiederholender Geometrien – können durch die Erstellung von maßgeschneiderten Programmerweiterungen durchgeführt werden. [127]

In diesem Kapitel wird die generelle Implementierung der notwendigen Funktionen für ein 3D-Opto-MID-Modelliersystem beschrieben. Diese folgt dem im Kapitel 6 beschriebenen Konzept der Erstellung einer Plug-In-Anwendung in NX. Dabei sind detaillierte Kenntnisse der NX-APIs und ihrer Programmierwerkzeuge notwendig. Die NX-API setzt sich aus verschiedenen Bausteinen zusammen, die miteinander agieren können und eine gemeinsame Funktionsstruktur besitzen. Für komplexere Programme wird vor allem die „Common API for X“ sowie die „Open for X-API“ verwendet, wobei das X für die jeweilige Programmiersprache steht, über die auf die programminternen Funktionen zugegriffen werden kann. Zusätzlich dazu existieren noch weitere Schnittstellen, die für einfache skriptbasierte Anwendungen vorgesehen sind, sowie eine Schnittstelle zur Erstellung von grafischen Oberflächen. All diese Schnittstellen greifen gemeinsam auf den Modellierkern (im Falle von Siemens NX → Parasolid) des Systems zu, um so nutzerspezifische Funktionen zu realisieren. Die prototypische Applikation ist in der Programmiersprache C++ geschrieben, die 1998 von der International Organization for Standardization (ISO) standardisiert wurde. Der Anwendungscode wurde von einem VS C++ Compiler in Dynamic Link Libraries (DLLs) kompiliert, die beim Start über das Hauptprogramm NX oder über die Benutzerschnittstelle ausgeführt werden.

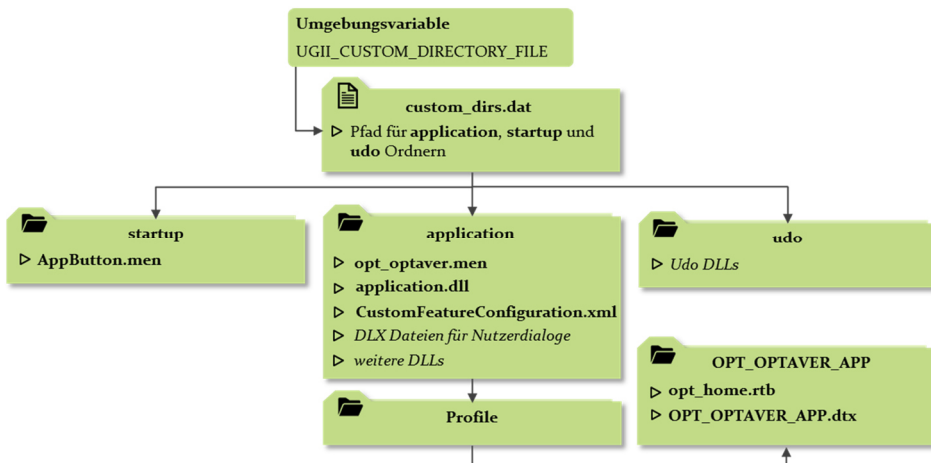


Bild 54: Abhängigkeiten und Ordnerhierarchien der OMECAD Applikation

Bild 54 zeigt die Abhängigkeiten und Ordnerhierarchien von anwendungsbezogenen DLLs und Menüdateien, die für die Applikation notwendig sind und eigens dafür erstellt wurden.

Betrachtet man die Strukturen der Anwendung aus programmtechnischer Sicht, so lässt sich diese in ein dreistufiges Modell untergliedern. Die drei Hauptelemente Benutzeroberfläche, Programmlogik und Datentypen (siehe Bild 55) stehen jeweils in Abhängigkeit zueinander. Die Benutzeroberfläche bildet dabei die Schnittstelle zum Bediener (über Menüs, Dialoge bzw. direkte Kommandos). In der Programmlogik sind sowohl das Datenhandling als auch die Algorithmen implementiert, die wiederum entsprechende Datentypen erzeugen. Die Programmlogik bildet damit den Kern der Applikation und ist nach dem beschriebenen Konzept aus Kapitel 6.3 weitgehend abgekapselt von der Benutzerschnittstelle implementiert.

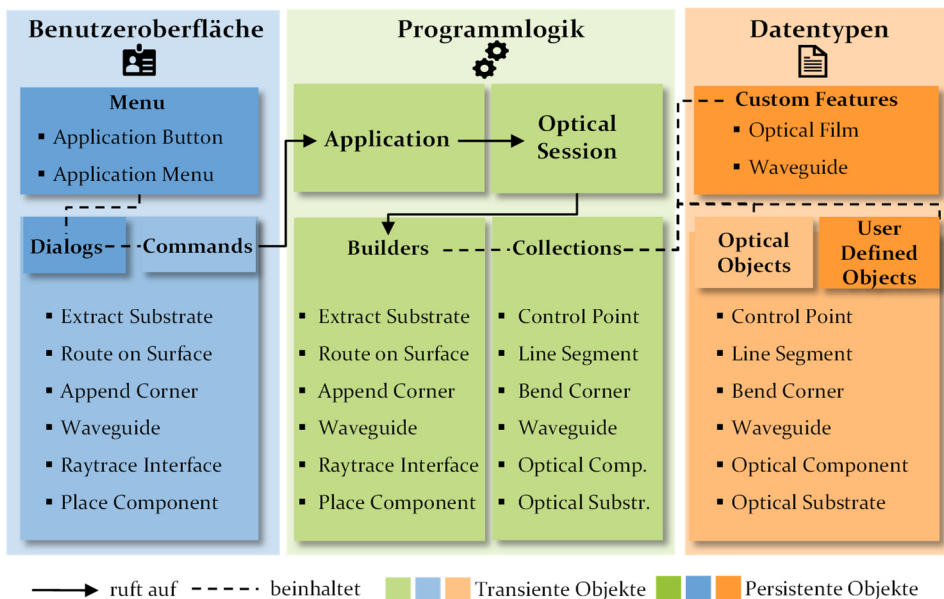


Bild 55: dreistufiges Modell der Software (Benutzeroberfläche, Programmlogik und Datentypen)

Die Benutzeroberfläche (Aufbau in Bild 56) besteht aus einem Funktionsmenü mit Schaltflächen für die einzelnen Funktionen. Die Dialogfenster für die verschiedenen Befehle werden bei der Initialisierung der Anwendung geladen und dynamisch aufgerufen. Die Anwendung für das Konstruieren optomechatronischer Elemente ist als separates Modul implementiert. Die in Bild 55 aufgeführten Commands entsprechen funktionspezifischen Benutzereingaben und können durch jeweilige *Builder*-Funktio-

nalitäten Änderungen an der aktuellen 3D-Opto-MID-Baugruppe vornehmen.

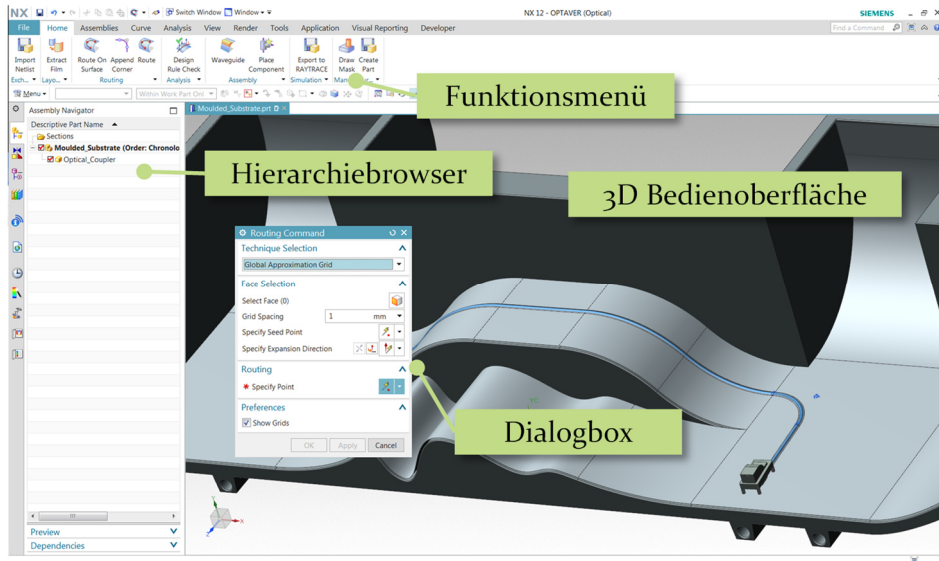


Bild 56: Benutzeroberfläche der 3D-Opto-MID-Applikation

Das Menü und seine Dialoge sind unabhängig von der Implementierung, und werden in separaten Dateien gespeichert, bzw. beim Start oder während der Programmaufzeit geladen. Das Anwendungsdesign trennt die Benutzeroberfläche strikt von der Programmlogik. NX besitzt seine eigene grafische Oberfläche (UI) welche durch die NX-eigene Skriptsprache MENUSCRIPT voll modifizierbar ist (siehe Beispiel in Bild 57).

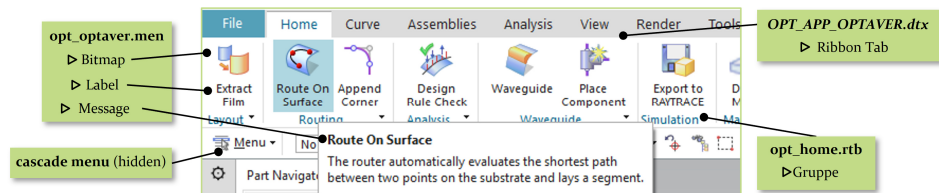


Bild 57: Benutzerdefinierte Menü-Definition der 3D-Opto-MID-Applikation

Über Verlinkungen jedes einzelnen Funktionsbuttons im Funktionsmenü werden die entsprechenden Programmbausteine aktiviert, welche den eigentlichen Programmcode sowie die Struktur der Oberfläche beinhalten. Nutzerdialoge, die zuvor mittels des NX-inhärenten Plug-In „UI Styler“ modelliert wurden, werden durch den entsprechenden Programmcode innerhalb der jeweiligen DLL aufgerufen. Die Interaktion mit der 3D-Oberfläche erfolgt dabei jeweils über individuell erstellte Dialogfenster, welche die

Builder (Bild 55) für die spezifischen Funktionen aktiviert. Folgend werden die Funktionalitäten der Applikation beschrieben.

8.2 Schaltungsträger- und Substratmodellierung

Ein entscheidender Aspekt bei der Modellierung gedruckter optischer Lichtwellenleiter ist die Auswahl der Materialien, die den eigentlichen Wellenleiter umschließen. Eine Besonderheit von gedruckten Wellenleitern im Vergleich zu POFs besteht darin, dass die umschließenden Materialien aufgrund der Fertigung und der speziellen geometrischen Charakteristik aus unterschiedlichen Materialien bestehen (siehe auch Kapitel 2.3). Der gedruckte Wellenleiter selbst befindet sich auf einem Substratmaterial, das beispielsweise durch Thermoformen an die räumliche geometrische Ausprägung der Schaltungsträger angepasst ist. In einem weiteren Schritt werden die optischen Leiter für 3D-Opto-MIDs auf diese optischen Schichten aufgedruckt. Ohne das Foliensubstrat kann kein Wellenleiter erstellt oder Bauteile platziert werden, da das Substrat als unterer optischer Mantel des Wellenleiters fungiert. Somit ist es auch zwingend notwendig physikalische Eigenschaften und Materialeigenschaften im entsprechenden Element zu hinterlegen.

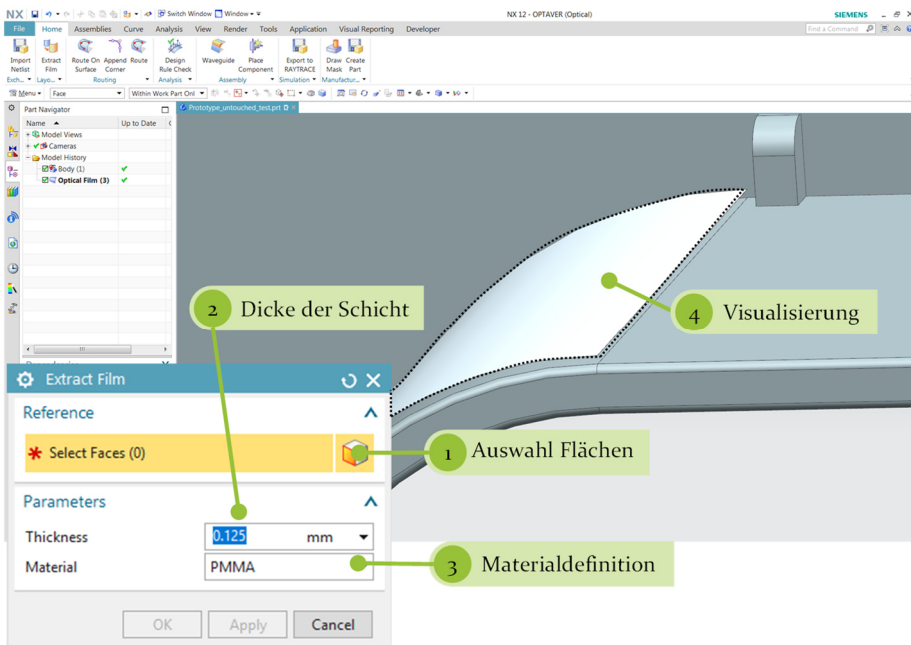


Bild 58: Beispiel für Definition von Foliensubstraten

Dies erfolgt durch eine Kombination aus einem Nutzerdialog und der Selektion von entsprechenden Oberflächen direkt im 3D Modell. Die Dicke und das Material der Foliensubstrate kann über ein Dropdownmenü oder eine direkte Eingabe definiert werden (siehe Bild 58). Die Funktion basiert auf der inhärenten Offset-Oberflächen-Builder-Funktion von NX und erzeugt Oberflächen, indem vorhandene Flächen mit einem bestimmten Versatz in Richtung ihres Normalenvektors kopiert werden. Nach Bestätigung der Eingaben durch den Nutzer erstellt das Oberflächen-Feature einen Offset (entsprechend der definierten Dicke des Foliensubstrats), passt die Farbe der Flächen an und konvertiert es schließlich in ein benutzerdefiniertes Folienfeature, das im Bauteilnavigator aufgeführt ist. Dadurch wird automatisch eine optische Schicht generiert, die das Feature mit einem nativen NX-Objekt verbindet, um sein Verhalten zu steuern. Nur zusammenhängende Flächen (Flächen, die mindestens eine Kante mit einer der anderen ausgewählten Flächen teilen) können zur Erstellung einer optischen Schicht verwendet werden. Separate Flächen werden durch einen Filter automatisch verworfen (auch untersucht in [S7]).

8.3 Schaltungssynthese

Eine weitere wesentliche Aufgabe zur Erfüllung der in Kapitel 5 definierten Aufgaben ist die sogenannte Schaltungssynthese. So müssen, um die optische Schaltung fertigzustellen, Komponenten platziert werden. Für das Design bedeutet das, dass Komponenten entweder auf definierte Anschlussstellen oder an beliebigen Positionen auf dem Schaltungsträger platziert werden.

Dem gehen zunächst jedoch einige Schritte voraus. Entsprechende Komponenten müssen in das Modellierungssystem integriert werden und für das Design 3D-optomechatronischer Bauteile sind Co-Designaspekte zu berücksichtigen (3D-Visualisierung, Netzlisten in 3D-Umgebung). Die Implementierung einer Schnittstelle zwischen den unterschiedlichen Entwurfssystemen ist ein integraler Bestandteil, um die Phase des (opto-)elektronischen Schaltungsentwurfs mit der Phase des mechanischen und physikalischen Designs zu verbinden (siehe Bild 36 und Bild 38 in den Kapiteln 6.1 bzw. 6.3.1). Es wird daher zunächst die Frage behandelt, wie im Rahmen eines OMCAD-Systems Schnittstellen zwischen den Systemen realisiert werden können. Um diese Frage zu beantworten wurde das EDA-Designsystem AUTODESK EAGLE angekoppelt, welches Schaltpläne (Netzlisten) im *.sch* Format abgespeichert, die in die 3D-Opto-MID-Anwendung übertragen werden. Im Allgemeinen werden unabhängig von der

Wahl des ODA/EDA-Systems solche Netzlisten erstellt, die in verschiedenen herstellerspezifischen Formaten abgespeichert sind. Zwar unterscheiden sich diese je nach verwendetem System in der Syntax, sind aber jedoch im Wesentlichen ähnlich aufgebaut (untersucht in [S3, S4]).

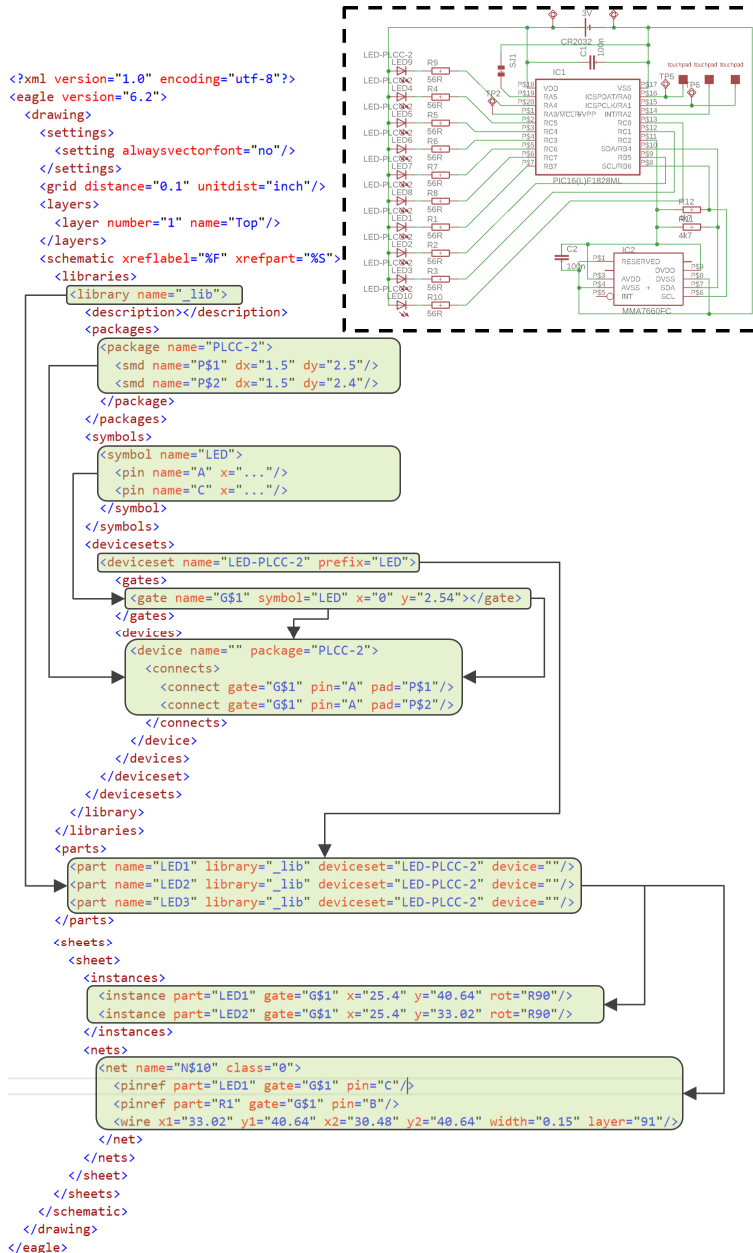


Bild 59: Schema einer Netzliste laut .sch-Datenformat

Jede Schaltplandatei enthält eine Struktur, die sich hierarchisch nach den verwendeten Elementen untergliedern lässt. Am Beispiel des *.sch* Formats soll ein solcher Aufbau nun erklärt werden.

Das *.sch*-Format enthält, wie in Bild 59 dargestellt, neben dem Bibliothekselement (*library*) vornehmlich drei entscheidende Hauptelemente, die verschiedene Objektgruppen darstellen: *package*, *symbol* und *devicesets*. Das Gehäuseelement (*package*) definiert die geometrische Form der Grundfläche sowie die Konturen des Bauteils und die Anzahl der Kontakte. So sind für elektronische oder optische Bauteile Footprints entweder als THDs oder SMDs definiert. Für SMDs wird die Größe der Footprints in x- und y-Richtung gespeichert (dargestellt durch das *SMD*-Element für jeden Kontakt), während für THDs die Bohrtiefe abgelegt wird (dargestellt durch das *Pad*-Element für jeden Kontakt). Die Symbolelemente (*symbol*) enthalten die schematische Darstellung des Bauteils, d.h. im Wesentlichen die im Schaltplaneditor dargestellten Umrisse/Abgrenzungen. Weiterhin sind auch die *Pin*-Elemente enthalten, die durch ihren Namen eindeutig definiert sind. Die *deviceset*-Elemente werden verwendet, um mehrere Bauteile innerhalb eines Bausteins zu definieren (ein Symbol kann mehrere *packages* repräsentieren). Das *device*-Element beschreibt solch einen Zusammenhang. Das *Part*-Element repräsentiert eine spezifische *symbol-package* Kombination, welche im Grunde genommen ein *device* in einem *deviceset* darstellt.

Das Klasselement (*class*) legt die Breite der Leiter, den Sicherheitsabstand und den Durchmesser für Durchkontaktierungen fest. Abschließend sind noch über das *net*-Element die Zusammenhänge zwischen *part instances*-Elementen im *sheet*-Element beschrieben. *Instance* referenziert auf ein *part*, welches in der *part list* definiert ist. Jedes *net* Element beschreibt zwei verbundene Bauteile (*part*), die verbundenen Anschlüsse und die geometrischen Segmente welche diese verbinden.

Das *.sch*-Dateiformat von EAGLE enthält zwar alle wichtigen Informationen über die Komponenten und Netze der Baugruppe. Jedoch verfügen Komponenten nicht standardmäßig über 3D-Modelle, da das EDA System EAGLE keine Anzeige von 3D-Layouts unterstützt. In einem integrierten CAD-System für 3D-Opto-MIDs ist jedoch die Existenz des 3D-Modells aus mehreren Gründen zwingend erforderlich:

1. Wegen der räumlichen Ausprägung von 3D-Opto-MIDs und der sich daraus ergebenden Form der Substrate ist eine räumliche Kollisionsanalyse mit bestückten Bauteilen von wesentlicher Bedeutung

2. Um Fertigungs- und Montageprozesse mittels CAM nachbilden zu können, muss ein 3D-Layout vorliegen
3. Genaue mechanische und thermische Analysen sind nur mit exakt definierten Bauteilgrößen und Materialien möglich

Es stellt sich also die Frage nach der Integration von 3D-Modellen sowie deren funktionsrelevanten Informationen in Form von Bauteilbibliotheken. Die Aufgabe einer speziellen 3D-Opto-MID-Bauteilbibliothek ist es, Netzlistenkomponenten für die Layoutphase einschließlich derer 3D-Modelle bereitzustellen. Generell können 3D-Bauteile auf verschiedene Art und Weise generiert werden:

1. Manuelle Erstellung von Volumenmodellen aus den Datenblättern der Komponenten mit einem Bauteilgenerierungswerkzeug oder grundlegenden geometrischen Modellierungswerkzeugen
2. Automatisierte Erstellung von Volumenmodellen durch einen Formgenerator aus den während des Importvorgangs erhaltenen Bauteilinformationen (erlaubt nur Erstellung nur standardisierter Packages)
3. Automatisierter Abgleich mit offenen Online-Bibliotheken, um das 3D-Modell herunterzuladen und mit dem importierten Paket zu verbinden

Die erste Option bedeutet, Datenblätter der Hersteller manuell zu analysieren und geometrische Daten manuell in ein Modell zu überführen. Dies kann von Vorteil sein, sofern sich das Gehäuse von den standardisierten Modellen/Typen abweicht oder nicht in vorhandenen Bibliotheken enthalten ist. Das fertiggestellte Modell wird dann in einer internen Bibliothek gespeichert und beim Import der Netzliste abgeglichen. Die zweite Möglichkeit beinhaltet die Erstellung einer Komponentenbibliothek, die auf dem Ablauf in Bild 60 basiert. Dabei werden beim Import einer Netzliste die Bauteile mit einer 3D-Bibliothek der Bauteile abgeglichen und automatisch aus einem parametrischen Modell generiert. Anschlüsse oder Pad-Geometrien werden zu dem 3D-Modell hinzugefügt. Eine Funktionsbibliothek ergänzt die Komponenten um semantische Informationen (z.B. aus Datenblättern). Schließlich werden die Komponenten mit den importierten Teilen abgeglichen und der Baugruppe hinzugefügt. Ein Nachteil hierbei ist, dass Pakete, die nicht den JEDEC-Normen [128] entsprechen, nicht aus der Formbibliothek generiert werden können. Diese Ausnahmen müssen manuell angelegt und hinzugefügt werden. Bild 60 beschreibt hierbei den semantischen Aufbau einer solchen Bibliothek, die aus drei wesentli-

chen Komponenten besteht. Die Gehäuseformbibliothek stellt Standardbauteile zur Verfügung, die geometrische Ausprägungen beinhalten. In der Funktionsbibliothek werden z.B. Leistungsdaten aus den Datenblättern hinterlegt, die den einzelnen Bauteilen zugeordnet werden können. Der parametrische Gehäusegenerator kommt zum Einsatz, wenn keine Standardbauteile vorhanden sind und erst erstellt werden müssen. Aus diesen drei Elementen setzt sich die 3D-Komponentenbibliothek zusammen, die sowohl funktionale Eigenschaften als auch geometrische Daten der Bauteile beinhaltet und miteinander abgleicht.

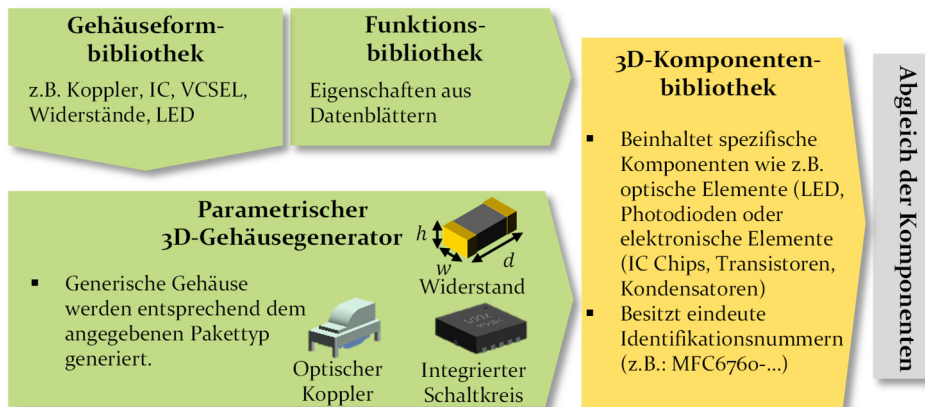


Bild 60: Struktur einer Bauteilbibliothek

Ein dritter und letzter Ansatz beinhaltet einen Abgleich der importierten Komponenten mit einer Online-Bibliothek. So kann beispielsweise OCTOPART [129] eingebunden werden, eine Common Parts Library, die über eine API angesteuert werden kann, um 3D-Modelle aus einer Datenbank abzufragen und herunterzuladen (untersucht in [S8]).

Eine Komponentenbibliothek allein reicht jedoch nicht aus, um eine Schaltungssynthese durchzuführen. Auch die Informationen, die zur Vernetzung der einzelnen Komponenten dienen, sind von maßgeblicher Bedeutung. Aus diesem Grund ist ein Import der in Bild 59 gezeigten Schaltplandatei in Kombination mit den Bibliothekselementen notwendig, um ein vollständiges Layout abzubilden.

In einer früheren Implementierung wurden Logik und Bauteile aus Board (.brd)-Dateien anstelle von Schaltplandateien (.sch) geparkt und importiert, so dass entscheidende Informationen über Position, Form und Größe der Anschlüsse sowie die einzelnen Footprints verloren gingen. Jedoch enthalten nur Schaltplandateien detaillierte Informationen über die An-

schlüsse und Footprints der einzelnen Komponenten. Aufgrund der höheren Menge an Information die dieser Dateityp enthält, ist der Import jedoch komplizierter und dauert länger. Der Hauptvorteil dieses Co-Design-Prozesses besteht darin, dass kein 2D-Board-Design erforderlich ist, bevor die Netzliste in die 3D-Opto-MID-Anwendung importiert wird, in dem das Layout ohnehin überarbeitet worden wäre. Darüber hinaus enthalten Board-Dateien unnötige Informationen über die physische Entwurfsphase, die nach dem Import nicht mehr benötigt werden. Der gesamte Importprozess (siehe Bild 61) ist so optimiert, dass er in das zuvor beschriebene Muster passt.

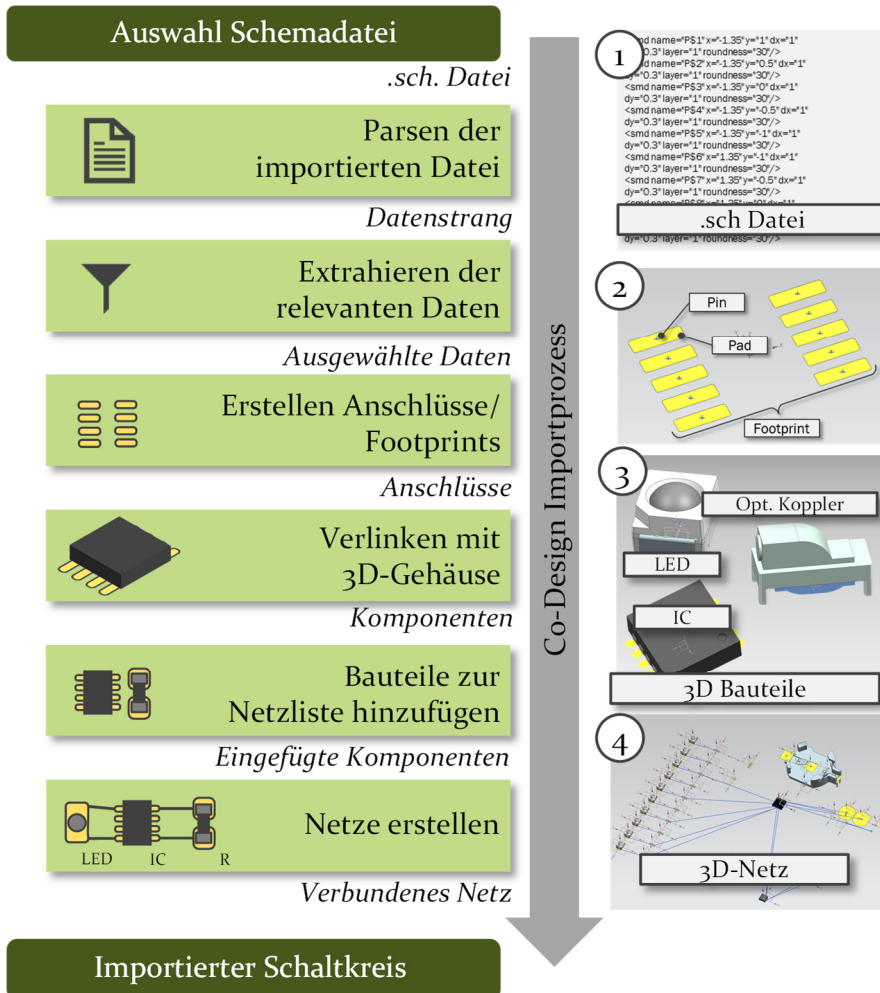


Bild 61: Algorithmus für den Netzlistenimport

Über eine definierte Funktion *ImportNetlistCommand* können Benutzer-eingaben im 3D-Opto-MID-System verarbeitet und um den Import anderer Dateiformate aus anderen Systemen erweitert werden. Die Dateiauswahl erfolgt über ein Dialogfeld Netzlistenimport gemäß Bild 62.

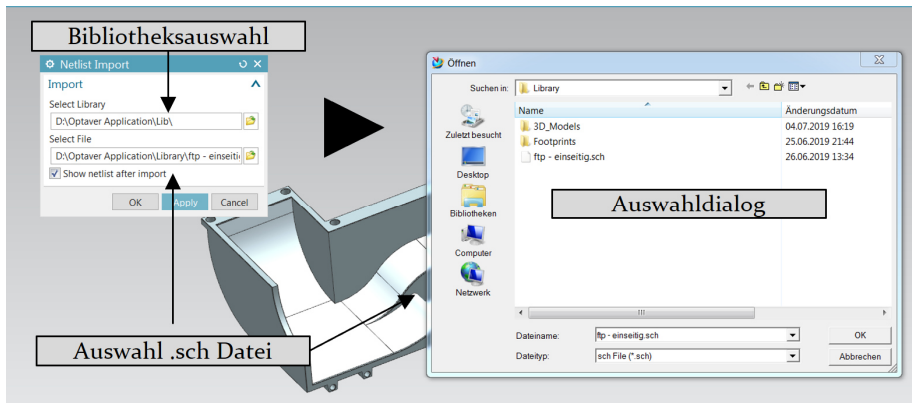


Bild 62: Dialogfeld Netzlistenimport

Die Verknüpfungen zwischen den Elementen (siehe Bild 59) werden durch eine Klassen- und Referenzstruktur modelliert, die eine iterative Suche durch bereits vorhandene Elemente erfordert. Da nur ein Bruchteil der Informationen der Datei verwendet wird, werden nicht alle Attribute analysiert. Nachdem die Schaltplandatei analysiert wurde, werden die relevanten Daten für den Aufbau der Anschlüsse und Netze aus dem importierten Dateistrang extrahiert. Detailinformationen zu den Schaltplansymbolen wirken sich vor allem auf den Schaltungsentwurf aus und können ignoriert werden. NX verbietet zudem die Verwendung bestimmter Zeichensätze in Dateinamen, die erkannt und ersetzt werden müssen. Nachdem die Schaltplandatei analysiert wurde, werden die relevanten Daten für den Aufbau der Footprints und Netze aus dem importierten Dateistrang extrahiert. Zusätzlich müssen einige Zeichenwerte in numerische Typen umgewandelt werden, wie z.B. Rundheitsfaktoren oder Winkel im Allgemeinen.

In einem zweiten Schritt werden Anschlüsse der importierten Teile automatisch generiert, wenn diese nicht bereits in einem physischen Unterordner vorhanden sind. So wird im Falle elektronischer Bauteile jedes Pad unter Verwendung der Forminformationen gezeichnet, platziert und entsprechend der vorgegebenen Ausrichtung gedreht. Die Umrisse der Padformen werden mit Linien und Bögen in NX erstellt, zunächst um die z-Achse gedreht und dann in die angegebene x-y-Position verschoben. Gerade Linien müssen gekürzt werden, um Verrundungen mit dem angegebenen Rundheitsfaktor zu erzeugen. Der geschlossene Regelkreis einer einzelnen Pad-

Kontur kann dann ausgefüllt werden, was zu einer ebenen Fläche führt. Pads werden nicht als Volumenmodelle dargestellt, sondern als reines Flächenmodell, da diese weniger rechenintensiv sind. Die Anschlüsse-/Pad-geometrien werden mit den Bauteilgehäusen abgeglichen und so ein komplettes 3D-Modell erstellt. Abschließend werden die Bauteile einer Netzliste hinzugefügt und miteinander über dynamisch erstellte Verbindungen (Rubberlines – siehe auch Bild 63) in der Benutzeroberfläche dargestellt.

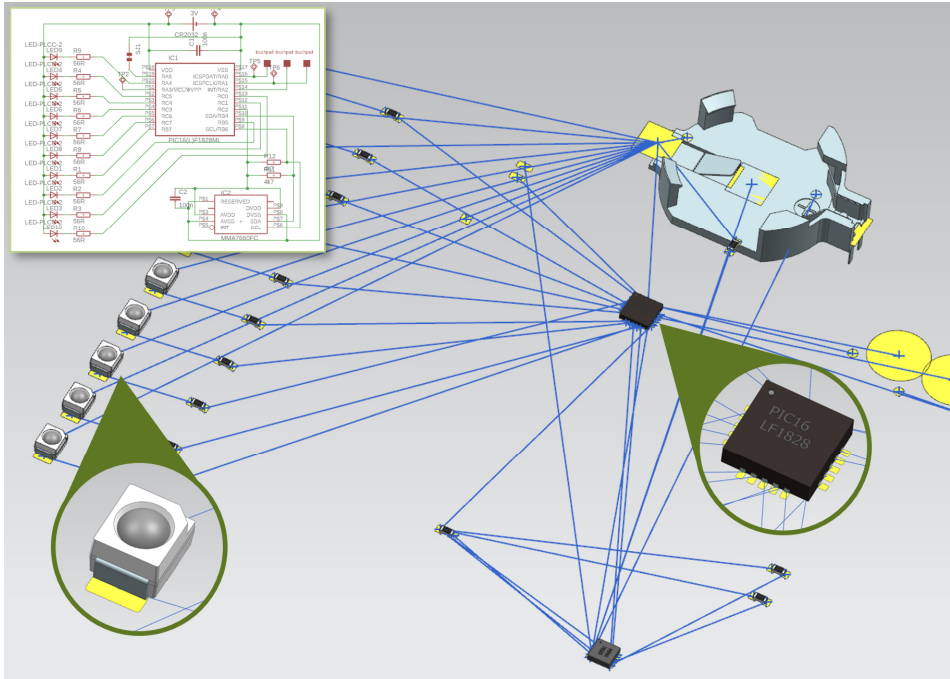


Bild 63: Beispiel für eine importierte 3D-Netzliste (die blauen Linien spiegeln die logischen Verknüpfungen zwischen den Bauteilen wider)

Als abschließenden Schritt in der Schaltungssynthese und als Übergang zur Planung optischer und elektrischer Pfade ist eine Platzierung der Komponenten auf dem Schaltungsträger erforderlich. Komponenten können entweder auf Kontrollpunkte aufgebracht oder an beliebigen Positionen auf dem Foliensubstrat platziert werden. Im letzteren Fall wird ein neuer Kontrollpunkt an der Bauteilposition als zukünftiger Verbindungspunkt zum Leiter (elektrisch oder optisch) angelegt. Der Dialog zur Platzierung der Komponenten ist in Bild 64 dargestellt.

Zur Platzierung der Komponenten wird dabei ein Algorithmus abgearbeitet der aus aktiven sowie internen Kommandostrukturen besteht (siehe Bild 65). Durch die Bestätigung durch den Benutzer werden transiente Befehle

und Objekte (Vorschauobjekte) in persistente Objekte umgewandelt und können so auch abgespeichert werden.



Bild 64: Dialog zur Platzierung der Komponenten

Die Bauelemente können nach erfolgter Platzierung interaktiv verschoben werden. Die Orientierung des Bauteils passt sich dabei stets an die jeweiligen Normalen der Oberflächen des Bauteils an. Informationen über die logische Verdrahtung bleiben stets erhalten, da die zugehörigen Rubberlines mitgeführt werden. Um die Platzierung von Komponenten, z.B. auf ge-

krümmten Flächen oder an Kanten, zu vermeiden wird dem Benutzer visuell Rückmeldung gegeben. Dies erfolgt durch Einfärben der jeweiligen Komponente (siehe auch Bild 66).

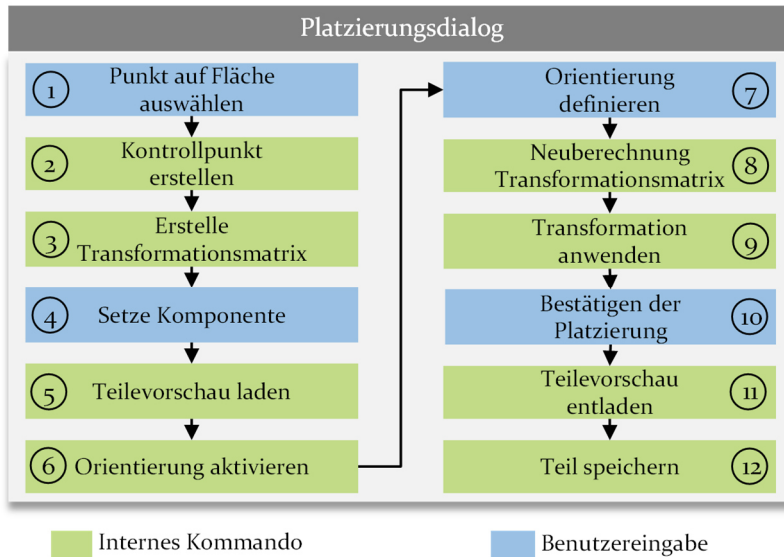


Bild 65: Algorithmus für den Platzierungsdialog

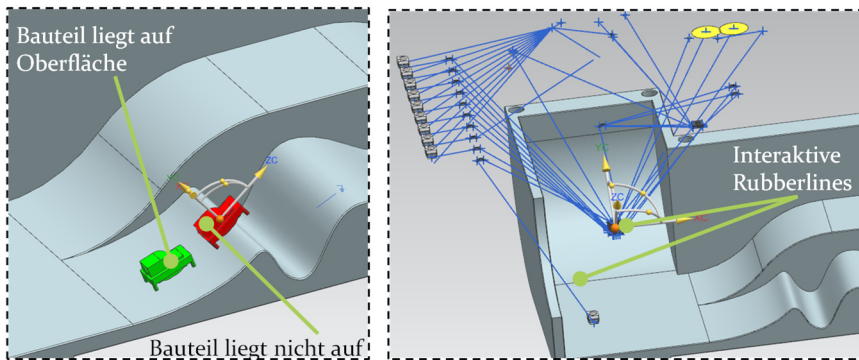


Bild 66: Interaktive Platzierung der Bauteile mit integrierter DRC-Prüfung (links) und Erhalt der Schaltungsinformationen durch Rubberlines (rechts)

8.4 Wellenleitermodellierung, Entflechtung und Verdrahtung

Wie bereits in Kapitel 1 angedeutet ist das Routing der Wellenleiter ein komplexer Prozess und es existieren verschiedene Lösungen für das Routing-auf B-Rep-Oberflächen. Die Tatsache, dass numerische Algorithmen

auf den Polyedern eines B-Rep Modells ausgeführt werden können, ist entscheidend für den Ablauf des 3D-Routings. Die Anzahl der einzuhaltenden allgemeinen Routingparameter nimmt dabei deutlich zu. Diese werden durch die Design-, Fertigungs- und Modellierungsbeschränkungen (siehe Kapitel 8.5) sowie die gewählte Routingstrategie bzw. den Algorithmus bestimmt. Bedeutend ist hier die Typisierung der verwendeten Flächen. Insbesondere deshalb, da diese unterschiedliche interne Darstellungen besitzen. So unterscheidet das CAD-System NX zwischen zwölf Volumenflächentypen, wie unter anderem z.B. planare-, zylindrische-, konische-, kugelförmige- und parametrische Flächen. Von besonderem Interesse sind Oberflächen, die Begrenzungskanten aufweisen, die als B-Spline-Kurven beschrieben sind. Die geometrischen Eigenschaften solcher Oberflächen können sich jedoch stark unterscheiden.

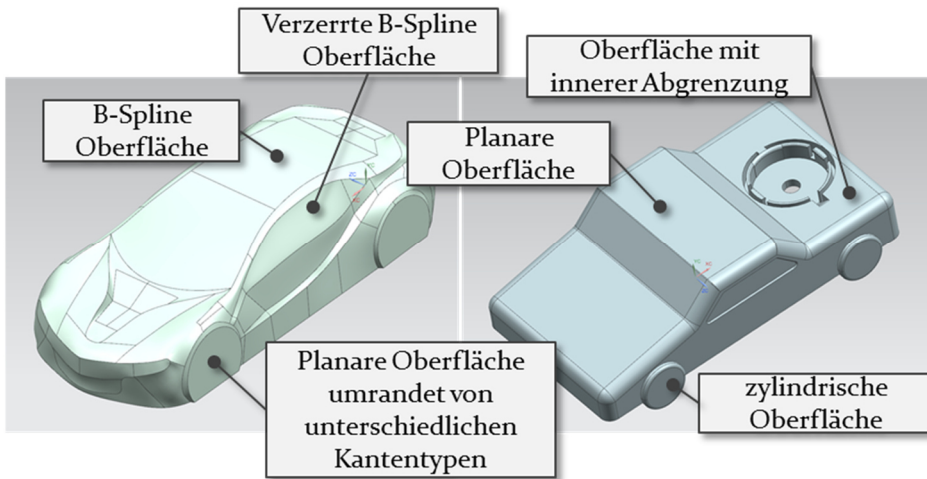


Bild 67: Beispiele für verschiedene Oberflächentypen anhand zweier prototypischer Demonstratoren

Dies hat besondere Bedeutung für die Pfadplanung der Leiter. So haben, wie in Kapitel 1 gezeigt, einzelne Routing-Algorithmen unterschiedliche Stärken und Schwächen und lösen ein Routing-Problem oft nur teilweise oder in einem bestimmten Kontext. Im Unterschied zu herkömmlichen Leiterplatten sind die meisten Oberflächen von 3D-MIDs nicht rechtwinklig geformt und dürfen bei 3D-Opto-MID aufgrund der Übertragungsfähigkeit der optischen Signale keine scharfen Kanten besitzen. Daher können die meisten Algorithmen nicht direkt auf eine B-Rep-Oberfläche angewendet werden und müssen an die jeweiligen Oberflächenkonturen angepasst werden.

Eine von mehreren verschiedenen Kantentypen umschlossene Oberfläche sowie schräge B-Spline-Oberflächen (Oberflächen mit nicht-orthogonalen U-V-Koordinaten) erschweren die Einhaltung der geometrischen Randbedingungen. Außerdem haben viele Oberflächen nicht nur Abgrenzungen an der Außenseite, sondern auch eine oder mehrere innere Abgrenzungen. Dadurch können Lücken und Löcher entstehen. Bild 67 zeigt die genannten Oberflächentypen am Beispiel von MID-Design-Prototypen.

Bevor jedoch ein Algorithmus für einen solchen Zweck angewendet werden kann, muss das 3D-Routingproblem für 3D-Opto-MIDs aufgrund der Vielzahl der Eingangsparameter vollständig beschrieben werden. Fragen, die diesem Rahmen auftauchen können, sind:

1. Inwieweit ist automatisiertes Routing implementierbar?
2. Sind Hindernisse vorhanden und wie sind diese definiert (z.B. Typ, Form, etc.)?
3. Welche Routing-Richtungen sind möglich?
4. Sind Rip-Up-, Rerouting- und shove-aside-Techniken erforderlich?
5. Werden Einschränkungen durch den Herstellungsprozess berücksichtigt (Herstellbarkeit)?

Die Beantwortung dieser Fragen ist stark von der Komplexität der geplanten Layouts abhängig. Die Fragen 2, 4 und 5 treffen im Allgemeinen auf manuelles sowie automatisiertes Routing zu. Diese können durch manuelles Routing vergleichsweise leicht bearbeitet werden. Bei höherer Dichte des Layouts kann jedoch der Einsatz eines (teil-) automatisierten Verfahrens sinnvoll sein, weshalb die grundsätzliche Frage nach einem automatisierten Routingverfahren sowie möglicher Routingrichtungen beantwortet werden muss.

Um diese Fragestellungen abzudecken, wurden im Rahmen der Arbeit manuelle sowie teilautomatisierte Ansätze verfolgt. Zum Einsatz kommt für die teilautomatische Pfadfindung eine Version des Hadlock-Algorithmus der eine A* Heuristik nutzt, der durch ein spezielles Rasterungsverfahren für 3D-Oberflächen angepasst wurde. Für manuelles Routing soll der eigens entwickelte Algorithmus für manuelle Pfadplanung aus Kapitel 7.5.2 verwendet werden. Zunächst wird die Umsetzung im 3D-Opto-MID-System mittels manueller Pfadfindung erläutert.

Manuelles Routing

Die Planung eines manuell erstellten Pfads wird über das Dialogfenster Route on Surface (siehe Bild 68) gestartet. Dieses besteht aus einem Ob-

jektauswahlblock, über dem die notwendigen Designoperationen durchgeführt werden können.

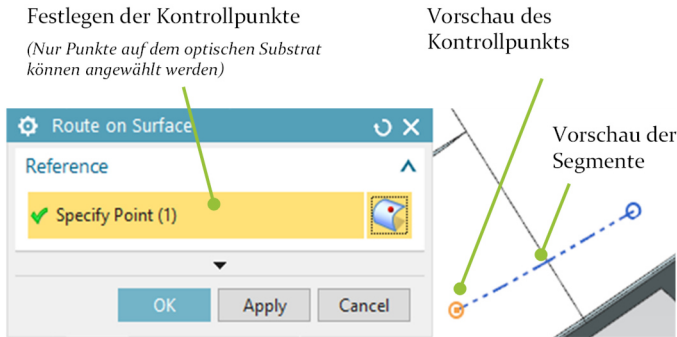


Bild 68: Dialogfenster Route on Surface

Ein interner Auswahlfiler schränkt die Auswahl auf die optisch definierten Oberflächen (optische Substrate) aus Abschnitt 8.2 ein. Die ausgewählte Fläche wird zusammen mit dem ausgewählten Punkt an eine Route on Surface-Funktion übergeben, welche eine Vorschau auf das Segment zwischen dem aktuellen und dem vorherigen Kontrollpunkt berechnet. Wenn der Benutzer eine Fläche auswählt (und keinen vorhandenen Kontrollpunkt), wird die Auswahl durch den aktuellen Vorschaukontrollpunkt überschrieben. Zusätzlich wird an der ausgewählten Position ein temporärer Marker (in Bild 68 der orange Punkt) angezeigt, der den aktuellen Endpunkt des Segmentpfades markiert.

Zusätzlich zur Pfadplanung spielen für optische Wellenleiter Biegungen eine besondere Rolle. Diese sind notwendig, damit im optischen Leiter das Licht sinnvoll geführt werden kann. Scharfe Kanten stellen ein Problem dar, da es hier das optische Signal nicht sinnvoll umgeleitet werden kann. Um einen sinnvollen und unterbrechungsfreien Ablauf zu gewährleisten, ist deshalb eine entsprechende Funktion implementiert. In der Implementierung selbst sieht der Ablauf wie folgt aus: Zunächst wird der Kontrollpunkt P mit der scharfen Kante ausgewählt. Für diesen wird eine Biegung (Krümmungsradius wird durch Eingabe über ein Dialogfenster festgelegt) ein Bogensegment und die Position von zwei neuen Kontrollpunkten P_1 and P_2 berechnet (siehe Bild 69).

Um Stetigkeit zu gewährleisten, ist das Bogensegment tangential zu den benachbarten Segmenten des Eingangskontrollpunkts P .

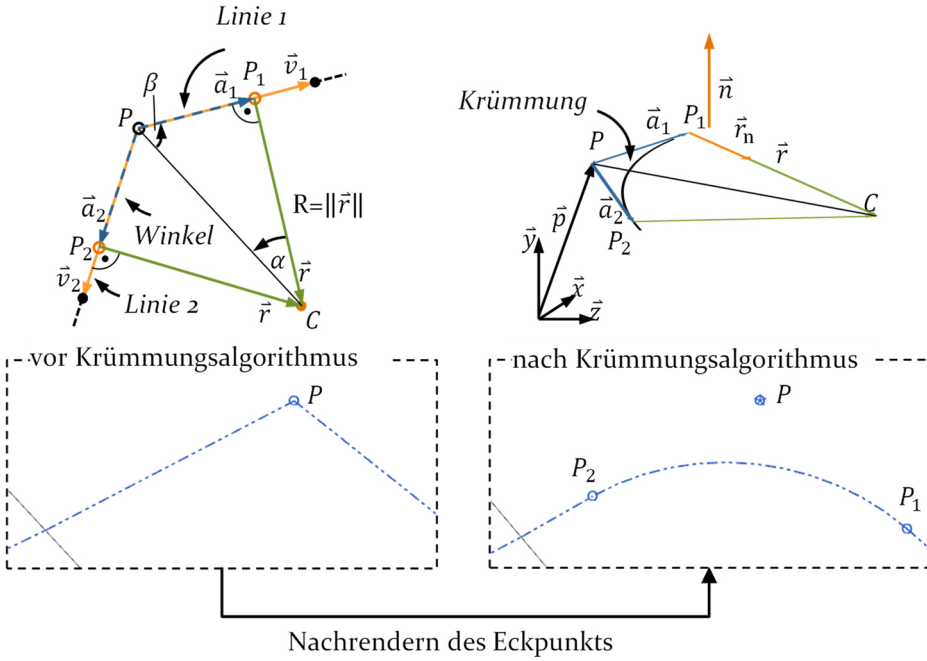


Bild 69: Erstellung von Krümmungsradien im Layout

Dadurch können der Ursprung des Bogens (Bögen werden in Polarkoordinaten beschrieben) und die Positionen der neuen Kontrollpunkte berechnet werden. Dank der Assoziativität des Segments zu seinen enthaltenen Kurven (der Startpunkt des Segments ist auch der Startpunkt der darunter liegenden Linie) werden die Vektoren \vec{v}_1 und \vec{v}_2 (orange) erstellt. Unter Anwendung mehrerer Regeln der Vektoralgebra sind die Vektoren \vec{a}_1 und \vec{a}_2 (blau) im euklidischen Raum gegeben durch

$$\vec{a}_1 = \tan(\alpha) R \frac{1}{\|\vec{v}_1\|} \vec{v}_1, \quad (32)$$

und

$$\vec{a}_2 = \tan(\alpha) R \frac{1}{\|\vec{v}_2\|} \vec{v}_2, \quad (33)$$

wobei

$$\alpha = \frac{\pi}{2} - \frac{1}{2} \cos^{-1} \left(\frac{1}{2} \left\langle \frac{\vec{v}_1}{\|\vec{v}_1\|}, \frac{\vec{v}_2}{\|\vec{v}_2\|} \right\rangle \right). \quad (34)$$

eine beliebige Richtung fortgesetzt werden, indem ein weiterer Punkt ausgewählt wird.

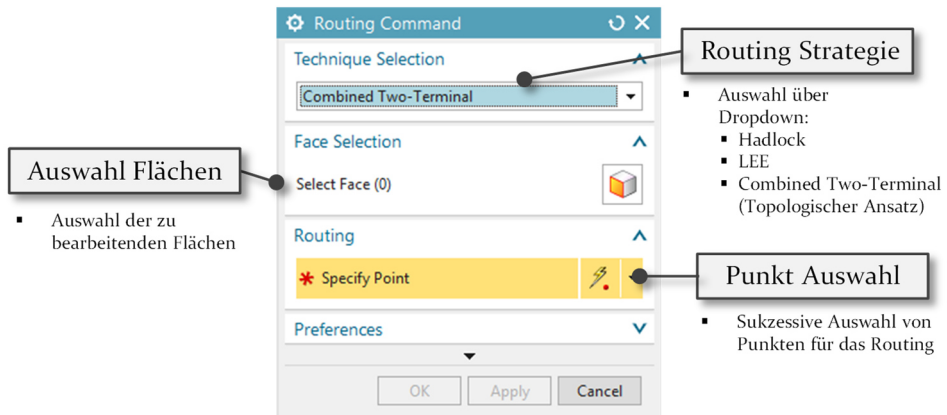


Bild 71: Routing-Dialog in NX

Für die Umsetzung wurde ein Dialogfeld für Routingbefehle erstellt, dass die Auswahl der gewünschten Routingtechnik ermöglicht. In Bild 71 wird der Dialog für die 3D-Routing-Technik dargestellt. Dabei müssen Flächen ausgewählt werden, die für das Routing vorgesehen sind.

Der erste Ansatz ist eine sogenannte Raster-Routingtechnik. Die Grundidee hinter der vorgestellten Raster-Routingtechnik ist es, das 3D-Problem auf ein 2D-Problem zu reduzieren. Jedoch geschieht dies nicht über Abwicklungen, wie in dem Kapitel 7.5.1 vorgestellten Verfahren, sondern über die Generierung eines Rasters über die 3D-Oberfläche. Dies ist ein unkomplizierter Ansatz, der den Vorteil hat, dass nach dem Aufbringen eines Rasters auf der Oberfläche herkömmliche Routingalgorithmen zur Suche nach Pfaden verwendet werden können. Das Raster wird dynamisch erzeugt und passt sich verschiedenen Oberflächentypen an. Es wird aus lokalen Oberflächeneigenschaften abgeleitet und expandiert sowohl in x- als auch in y-Richtung. Die Position der etwa gleich großen Rasterpunkte wird während des Expansion des Netzes angenähert. Dabei gilt: Je feiner die Rastergröße, desto besser ist die Annäherung der Oberfläche und desto höher ist die Qualität des Routingpfades.

Die Technik zielt nicht darauf ab, auf alle Oberflächen eines B-rep-Modells anwendbar zu sein. Es beinhaltet die meisten gängigen Probleme, wie z.B. eine Reihe von verbundenen, durchgehenden Flächen bzw. komplexe Oberflächenstrukturen wie NURBS. Eine Vielzahl von rasterbasierten Algorithmen kann verwendet werden, um einen Pfad auf dem erzeugten Raster zu finden. Zur Erzeugung des Rasters können verschiedene Methoden

herangezogen werden wie z.B. die Randelementmethode (engl.: boundary element method -BEM) oder die Finite-Elemente-Methode (FEM). Im Folgenden wird jedoch ein eigens entwickelter Ansatz dargestellt, der auf der vorhandenen B-Rep Struktur des 3D-Modells basiert und dessen Vorteile nutzt indem er auf die Normalenvektoren der definierten Oberflächen zurückgreift. Hierdurch kann die ursprüngliche Struktur des 3D-Modells erhalten werden und es sind keine Konvertierungen notwendig.

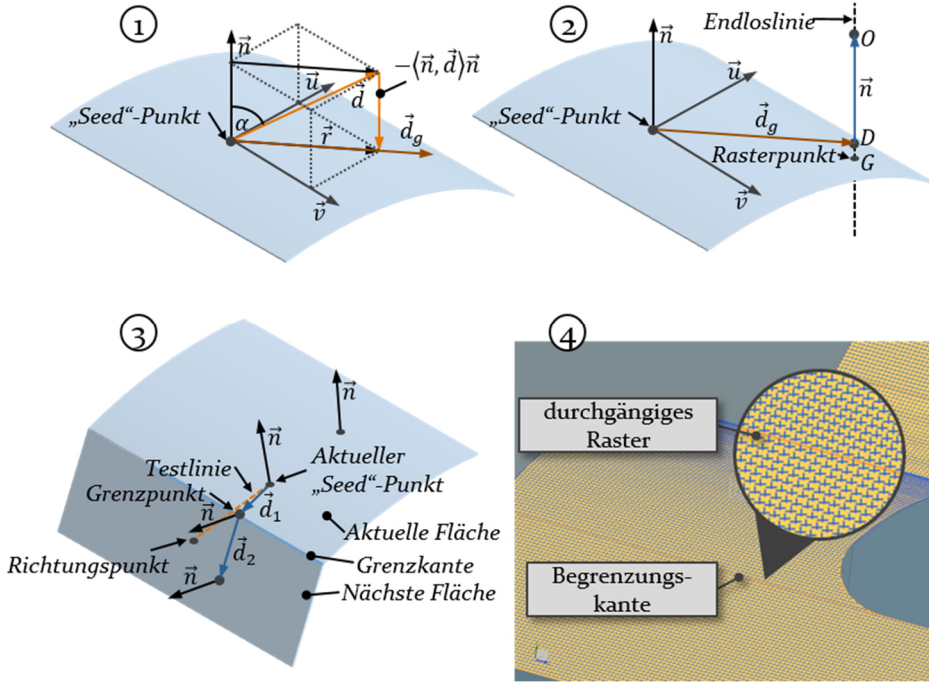


Bild 72: Funktionsweise des Rasterexpansionsalgorithmus

Die folgenden Beschreibungen beziehen sich auf die in Bild 72 dargestellten Abläufe. Im ersten Schritt wird ein „Seedpunkt“ und eine Expansionsrichtung durch den Benutzer definiert (1). Der Seedpunkt stellt den Ausgangspunkt zur Erstellung des Rasters. Um den nächsten Punkt im Raster, den Gitterpunkt G , zu finden, wird der Richtungsvektor \vec{d} in die Ebene projiziert, die von den lokalen $u-v$ -Koordinaten an dem angegebenen Seedpunkt gespannt wird. Der Anteil des Richtungsvektors \vec{r} , der in dieser Ebene liegt, wird berechnet durch

$$\vec{r} = \vec{d} - \cos(\alpha)\vec{n} = \vec{d} - \langle \vec{n}, \vec{d} \rangle \vec{n} \quad (38)$$

wobei \vec{n} der Normalenvektor der Fläche und \vec{d} der von \vec{n} und \vec{d} eingeschlossene Vektor ist. Der Vektor wird folgend normalisiert und mit der vom Benutzer festgelegten Rastergröße multipliziert. Dadurch wird ein Vektor \vec{d}_g bereitgestellt, welcher zum Seedpunkt addiert wird um den Richtungspunkt D zu berechnen (2). Danach wird eine Gerade durch den Punkt D und den Versatzpunkt O erzeugt. Die Gerade wird verwendet, um die Fläche zu schneiden, was zu einem Gitterpunkt G führt, der gleichzeitig der Startpunkt für die nächste Expansion ist. Dieses Verfahren wird so lange wiederholt, bis die Kantengrenze der äußersten Oberfläche erreicht ist oder der Algorithmus wieder seinen Ursprungspunkt erreicht.

Um die Grenzkannte zwischen den Flächen zu erkennen, wird eine orientierte Testlinie zwischen dem aktuellen „Seedpunkt“ und dem ausgewerteten Richtungspunkt erzeugt (3). Der Abstand zwischen dieser Linie und allen Kanten der aktuellen Fläche wird ausgewertet. Die Begrenzungs-kante ist diejenige, die dieser Linie am nächsten ist. Die Entfernungsauswertung liefert auch den nächstgelegenen Punkt am Rand, der der nächste „Seedpunkt“ ist, der jedoch keinen Rasterpunkt darstellt, da er nicht auf dem regulären Raster liegt. Der Teilabstand $|\vec{d}_1|$ wird berechnet und in der nächsten Iteration wird dieser Wert von der Rastergröße abgezogen, um den Teilabstand $|\vec{d}_2|$ zu erhalten. Auf diese Weise bleibt das Raster bei kontinuierlichen Flächenübergängen gleichmäßig verteilt. Wenn der Übergang zwischen zwei Flächen nicht kontinuierlich ist, muss der Richtungsvektor in Bezug auf die lokalen Flächeneigenschaften angepasst werden. Der Richtungsvektor wird um die Achse gedreht, die durch das Vektorprodukt der lokalen Normalvektoren der benachbarten Flächen am Kantenpunkt gegeben ist. Die Drehung eines Vektors um eine beliebige Achse wird in Kapitel 4.4.2 erläutert. Das Ergebnis dieses Verfahrens ist in (4) dargestellt

Für das Verfahren gilt: Je kleiner die Rastergröße, desto niedriger ist die Wahrscheinlichkeit für lokale Fehler. Dieses Verfahren eignet sich zwar aufgrund der hohen Exaktheit insbesondere für plane Oberflächen, kann aber auch für 3D-Flächen verwendet werden. Die Erzeugung der Raster erfolgt dynamisch: Nach einer Expansion in Hauptrichtung wird die Expansionsfunktion rekursiv aufgerufen, um auch das Gitterdiagramm entgegengesetzt zur Hauptrichtung zu erweitern. Während des Expansionsprozesses wird der Speicher dynamisch so zugewiesen, dass jede unregelmäßige Flächenform in ein rechteckiges Raster passt.

Durch die Verwendung des Rasteralgorithmus wird das 3D-Problem auf ein 2D-Problem reduziert und Maze-Routing-Algorithmen, wie in Kapitel 1

vorgestellt, können zur Pfadsuche verwendet werden. Im Beispiel wurde Hadlock implementiert. Im Vergleich mit anderen Maze-Routing-Algorithmen verwendet der Algorithmus eine A* Heuristik, um die Zeitkomplexität zu reduzieren und ist besonders effizient, wenn eine geringe Dichte an Hindernissen vorherrscht. Durch eine Markierung der erstellten Rasterzellen mit der jeweiligen Detour-Nummer kann durch Rückwärtssuche ein kürzester Weg gefunden werden [120].

Der optimale Weg hängt vom gewünschten Layout ab und ist nicht zwingenderweise der kürzeste Weg. Dies lässt sich dadurch erklären, dass der implementierte Backtrace-Algorithmus versucht, Richtungsänderungen zu minimieren. Bild 73 stellt ein Ergebnis des Algorithmus dar.

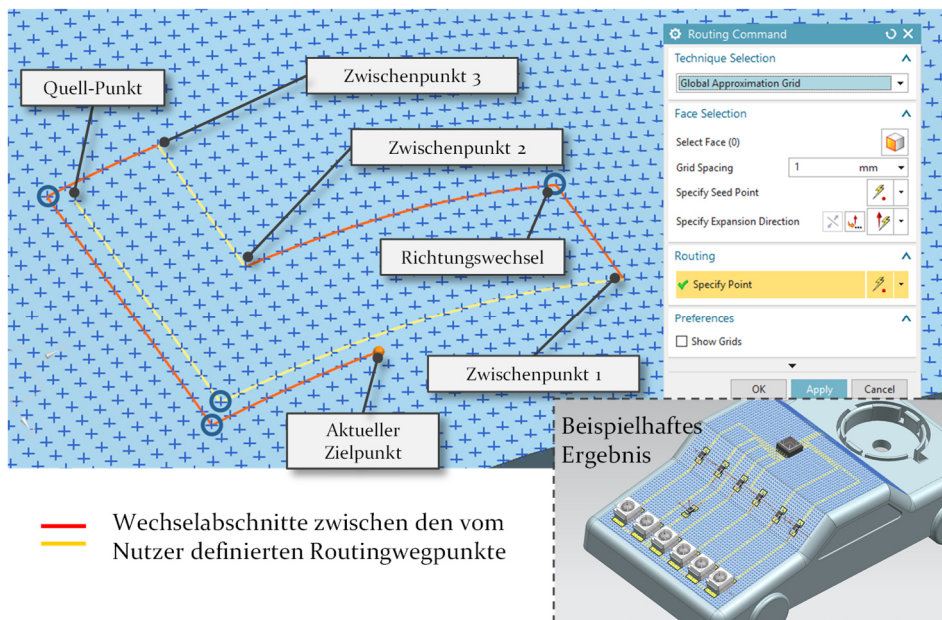


Bild 73: Beispiel für Auto-Interaktives Routing

Das Routing folgt dabei einem auto-interaktiven Ansatz. Der Wechsel zwischen roten und gelben Linien stellt dabei jeweils den berechneten Streckenabschnitt zwischen den gewählten Routingpunkten dar.

In der prototypischen Implementierung werden neue Pfade durch einfaches Auswählen von Rasterpunkten erzeugt. Zwischen den letzten beiden ausgewählten Punkten wird so ein automatisch erzeugter Pfad gefunden. Kann kein Pfad gefunden werden, wird dem Nutzer eine Warnung über ein Dialogfenster ausgegeben.

Volumenerstellung

Wie in Kapitel 2.3 beschrieben, haben Wellenleiter, welche in einem oder aber auch mehreren Durchgängen gedruckt werden, im Regelfall einen parabolischen oder kreisförmigen Segmentquerschnitt. Diese Gegebenheiten können abgebildet werden, indem der Benutzer der 3D-Opto-MID-Applikation zwischen diesen Formgebungen der Profilquerschnitte wählen kann.

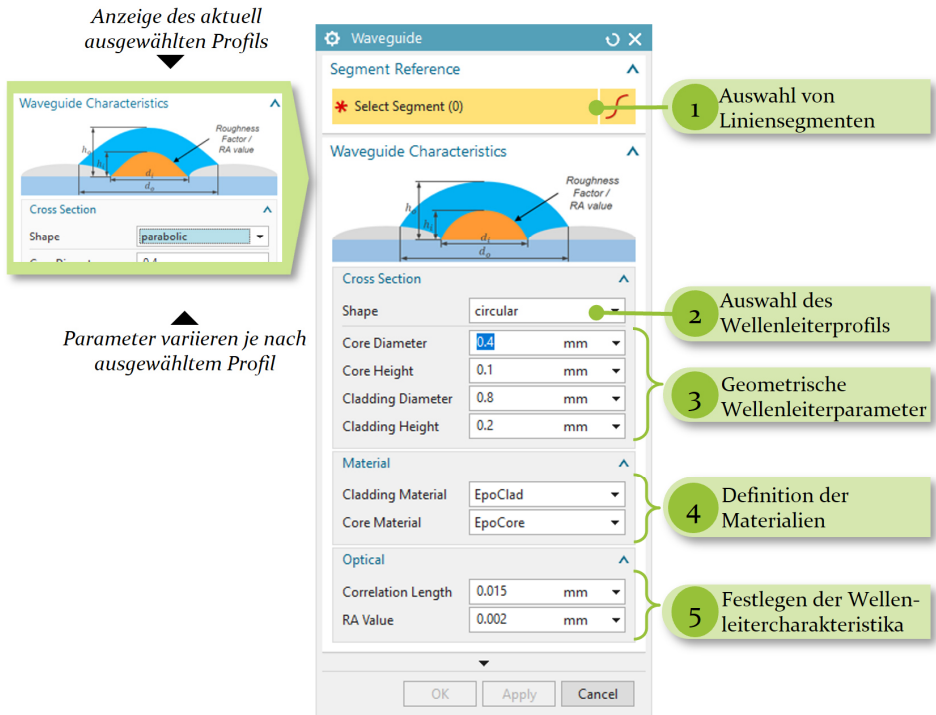


Bild 74: Dialog zur Definition der Wellenleiterparameter

Darüber hinaus können auch individuelle Querschnitte definiert werden, die aber im Folgenden nicht behandelt werden. Die zugehörigen Konditionierungslinien ergeben sich aus der vorgegebenen Geometrie des Wellenleiters.

Die Erstellung entsprechender 3D-Geometrien der benutzerdefinierten Wellenleiterfunktion umfasst vier Schritte, die in Bild 75 dargestellt sind. Dabei wird im ersten Schritt zunächst eine Transformationsmatrix berechnet, die die am Ursprung des Weltkoordinatensystems (WCS) erzeugten Schnittkurven in das jeweilige Segmentkoordinatensystem transformiert.

Das orthonormierte Segmentkoordinatensystem (SCS) wird von drei Vektoren senkrecht zueinander gespannt. Der erste Vektor ist die Flächennormale an dem gegebenen Kontrollpunkt, der zweite ist der Richtungsvektor des Segments an seinem Anfangskontrollpunkt und der dritte ergibt sich aus dem normierten Kreuzprodukt der ersten beiden Vektoren. Die Richtung einer Kurve ist ein Vektor, der tangential zur Kurve an einem bestimmten Punkt verläuft.

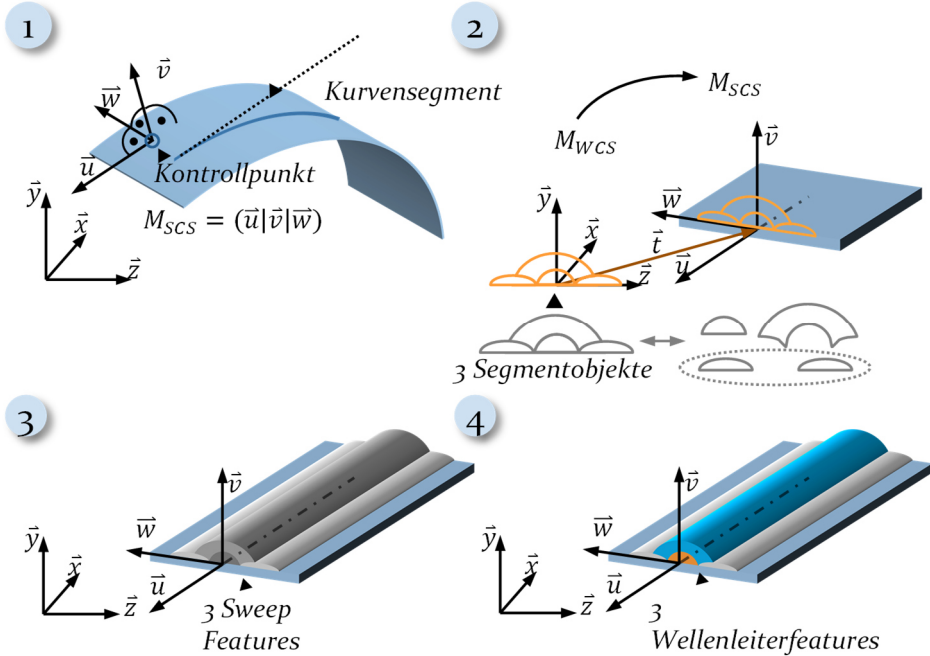


Bild 75: Erstellung einer Volumengeometrie für Wellenleiter

Im zweiten Schritt werden vier unabhängig voneinander geschlossene Profilabschnitte erstellt, die jeweils einen anderen Bestandteil des Wellenleiters darstellen: den Kern, die Ummantelung und die Konditionierung. Der jeweilige Querschnitt hängt vom gewählten Wellenleitertyp ab: kreisrundes- oder parabolisches Segment. Ersteres besteht aus einem kreisförmigen, letzteres aus einem parabolischen Kern- sowie Mantelabschnitten. In beiden Fällen werden zwei elliptische Konditionierungsabschnitte verwendet. Durch eine Sweep-Funktion werden die Profilabschnitte extrudiert. Schließlich werden die Sweep-Features (Extrusion) in benutzerdefinierte Wellenleiter-Features umgewandelt. Die benutzerdefinierten Wellenlei-

terparameter (Kern, Mantel, Konditionierung) werden nun im Bauteilnavigator als separate Elemente aufgelistet und in der 3D-Ansicht dargestellt (auch untersucht in [S9] [S1]).

Ein Beispiel für ein Layout mit den entsprechend platzierten Komponenten ist in Bild 76 dargestellt.

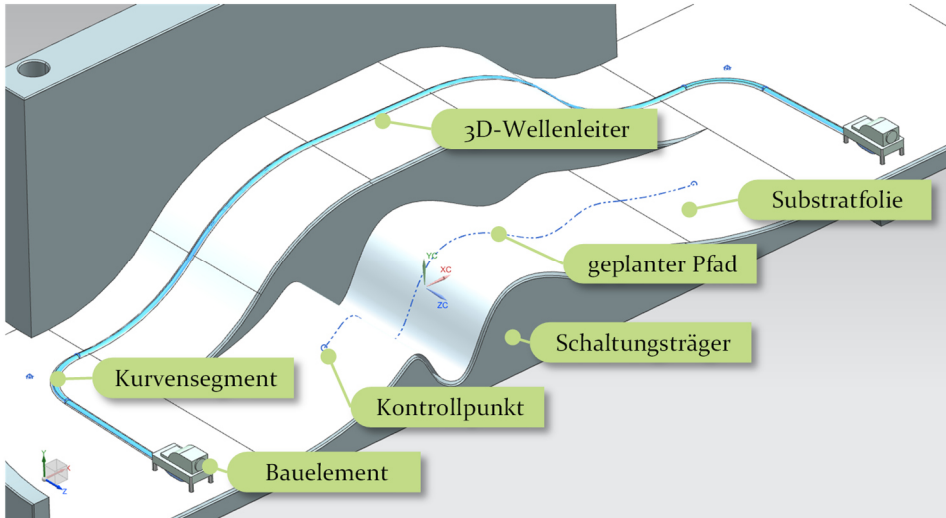


Bild 76: Beispiel für ein Layout mit platzierten Komponenten, Foliensubstrat und optischen Leitern im 3D-Opto-MID Tool

8.5 Design- und Fertigungsrichtlinien

Untrennbar mit den Schritten der Platzierung und Verlegung optischer Komponenten sind sogenannte Design und Manufacturing Rule-Checks (DRC bzw. MRC) verbunden. Diese dienen dazu Fehler im Layout schnellstmöglich zu entdecken und auszubessern, um somit die Funktionsfähigkeit zu gewährleisten. Dabei bilden die verlegten entflechteten elektrischen/optischen Leiter die Basis dieser Prüfungen. So können, sobald das initiale Layout abgeschlossen wurde, mit geometrischen Prüfungen Aussagen über die einzelnen Elemente getroffen werden. Auf Basis dieser Informationen wird im Anschluss auch die Validierung des optischen Layouts durchgeführt. Mithilfe der hierbei identifizierten Resultate wird die Funktionalität der optischen Elemente geprüft. Ist diese nicht ausreichend gegeben, ist das räumliche Layout anzupassen. Die optische Analyse muss dann wiederholt durchgeführt werden. Die im folgenden Kapitel zugehörigen Schritte, insbesondere der optischen Simulation mit anschließender, detailgenauer Ergebnisdarstellung und -ableitung, stellen einen

komplexen und aufwändigen Arbeitsschritt dar. Aus diesem Grund ist es wichtig, Designregelprüfungen als essentiellen Schritt im Vorlauf durchzuführen, um in letzterer den Aufwand zu reduzieren und unnötige Iterationen zu vermeiden.

Tabelle 9: Physikalische und fertigungstechnische Einflüsse auf die Güte der Wellenleiter

Kategorie	Faktor	Abhängig von Parameter
physikalisch	Leistungsverlust: Lichtausbruch abhängig vom Winkel der Totalreflexion	<ul style="list-style-type: none"> • Materialkombination Mantel und Kern • Krümmung - Microbends • <i>Krümmung - Kurvenradius</i> • Durchgängigkeit (G_0 Stetigkeit) • Knicke (G_1 Stetigkeit)
	Leistungsverlust: Dämpfung	<ul style="list-style-type: none"> • Absorption • Streuung
fertigungstechnisch	Prozessbedingt	<ul style="list-style-type: none"> • Materialkombination Mantel / Kern (Druck) • <i>Krümmung – Kurvenradius (mechanisch)</i>
	Räumliche Anforderungen	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Distanz zwischen Komponenten</i> • <i>Raum auf Bauteilfläche</i>

Das frühzeitige Auffinden von Designfehlern in der CAD-Umgebung ermöglicht eine direkte Fehlerbehebung. Es kann somit anhand geometrischer Parameter in der Layoutgestaltung festgestellt werden, ob eine optische Simulation sinnvoll ist oder ob zunächst Anpassungen vorgenommen werden müssen. Aus den Grundlagen der optischen Signalübertragung (Kapitel 2.1) sowie des Prozesses der Fertigung polymerer Lichtwellenleiter (in Kapitel 2.3) lässt sich eine Vielzahl von Faktoren ableiten, welche die Funktionalität eines 3D-Opto-MIDs beeinflussen. In der nachfolgenden Übersicht (Tabelle 9) werden einige relevante Faktoren genannt, welche besondere Relevanz für Lichtwellenleiter haben.

Durch ihre Überprüfung lassen sich Rückschlüsse ziehen, ob ein optisches System prinzipiell funktionieren kann. Zunächst wird jedoch beschrieben, wie die Integration einer ersten Validierung des Layouts bereits während des räumlichen Designprozesses umgesetzt werden kann. Da im Anwendungsfall optischer Wellenleiter bisher in keinem CAD System entsprechende Informationen zur Prüfung optischer Strukturen vorhanden sind, verbleiben die in Tabelle 9 kursiv hervorgehobenen Parameter als direkt geometrisch prüfbare Features (auch untersucht in [S2, S10, 130, S11]).

Diese Parameter lassen sich aus rein geometrischen Eigenschaften und somit auch im Produktmodell ohne Hintergrundinformationen zu Materialbeschaffenheit und Herstellungsprozess ermitteln. Sowohl physikalische als auch fertigungstechnische Einflüsse lassen sich zu einem großen Teil auf geometrische Parameter zurückführen. Sie bilden somit die Basis für folgende Design Rule-Checks:

- Stetigkeitsprüfung
- Radiusüberprüfung
- Abstandsüberprüfung

Im CAD-Produktmodell definierte Kurven verschiedenster Art, wie z.B. Linien, Splines oder Bögen, beschreiben den Verlauf verlegter Lichtwellenleiter. Um die Grundlagen der Signalübertragung zu erfüllen, müssen diese Kurven auf eine bestimmte Art miteinander verbunden sein. Entstehen ungewollte Lücken zwischen Leitersegmenten, sind die Achsen beider Segmente nicht konzentrisch zueinander oder sind Knicke vorhanden, können Leistungsreduzierungen bis hin zum Totalverlust entstehen. Um diese Fehler im Layout zu beseitigen ist eine *Stetigkeitsprüfung* der Leiter notwendig.

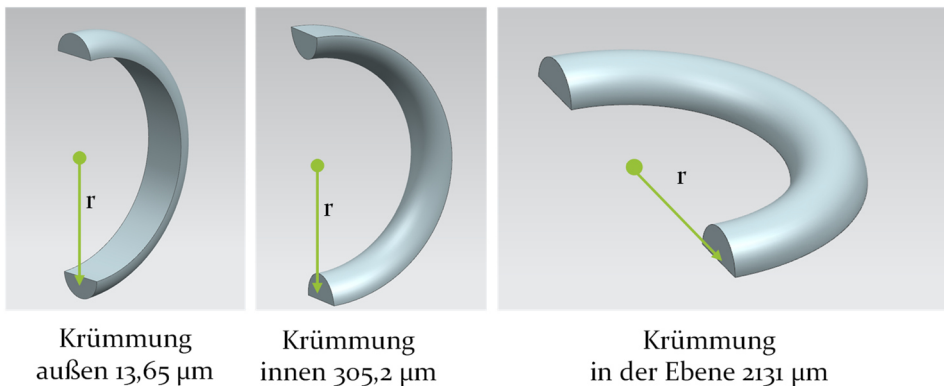


Bild 77: Ergebnisse für zulässige Krümmungsradien nach [131, P13]

Weiter zählt der Kurvenradius zu den Faktoren, die optisch für die Funktionalität eines LWL von fundamentaler Bedeutung sind. Das Auftreten der Totalreflexion kann nur sichergestellt werden, wenn ein bestimmter Radius nicht unterschritten wird, was für die Reduzierung des Leistungsverlustes entlang des Lichtwellenleiters von hoher Bedeutung ist. Dieser Wert kann sich je nach Anordnung der Geometrie unterscheiden. So wurden für einen idealisierten gedruckten Wellenleiter nach [131, P13] für einige unterschiedliche Konfigurationen Werte ermittelt (siehe Bild 77).

Eine Abstandsprüfung ist notwendig da die Maschinenkinematik beim Aerosoljetdruck der Wellenleiter auf komplexen räumlichen Strukturen eine entscheidende Rolle spielt und z.B. bei Hinterschnitten keine Fertigbarkeit gegeben ist.

Beispiel zur Durchführung von Design Rule Checks

Um verlegte Lichtwellenleiterpfade (siehe Kapitel 8.4) beschriebenen geometrischen Überprüfungen zu unterziehen, wurde ein Werkzeug zur Designregelprüfung in die Benutzeroberfläche implementiert, mit dem gezielt Wellenleiterstrukturen geprüft werden können (Bild 78).

Der Benutzer kann in der Oberfläche eine individuelle Auswahl treffen, um Prüfungen durchzuführen. Im ersten Block Selection lassen sich die im Modell verlegten optischen Liniensegmente eines Wellenleiters auswählen. Sind mehrere Wellenleiter gleichzeitig zu überprüfen, können auch mehrere Segmente parallel ausgewählt werden. Die folgenden drei Blocks *Continuity Check*, *Distance Check* und *Radius Check* dienen der Einstellung der durchzuführenden Geometrieüberprüfungen (untersucht in [S12]).

Der Layouter kann in der ersten Einstellung eines jeden Blockes festlegen, ob der entsprechende Test durchzuführen ist. Bei der Stetigkeitsanalyse im Block *Continuity Check* kann zusätzlich gewählt werden, welcher Stetigkeitsgrad betrachtet werden soll. Im Block *Distance Check* ist die Breite des Lichtwellenleiters zu definieren, sodass der vom Leiter eingenommene Platz betrachtet werden kann. Bei der Radiusüberprüfung (Block *Radius Check*) sind zwei Radiuswerte anzugeben: Einen kritischen Radiuswert, dessen Unterschreitung die Funktionalität eines Wellenleiters bedingt einschränkt und einen minimal zulässigen Krümmungsradius, deren Unterschreitung einen Totalausfall der Funktionsfähigkeit des Leiters repräsentiert. Zusätzlich wird die Wahl der Option *Analyze Subsegments* angeboten. Ist sie nicht gewählt, wird die gesamte Kurve eines Leitersegmentes bei der Unterschreitung des definierten Krümmungsradius als unzureichend

markiert. Im gegenteiligen Fall wird der Verlauf einer jeden Kurve untersucht und nur die Subsegmente hervorgehoben. Im Folgenden werden die jeweiligen Ergebnisse in der Bedienoberfläche erläutert.

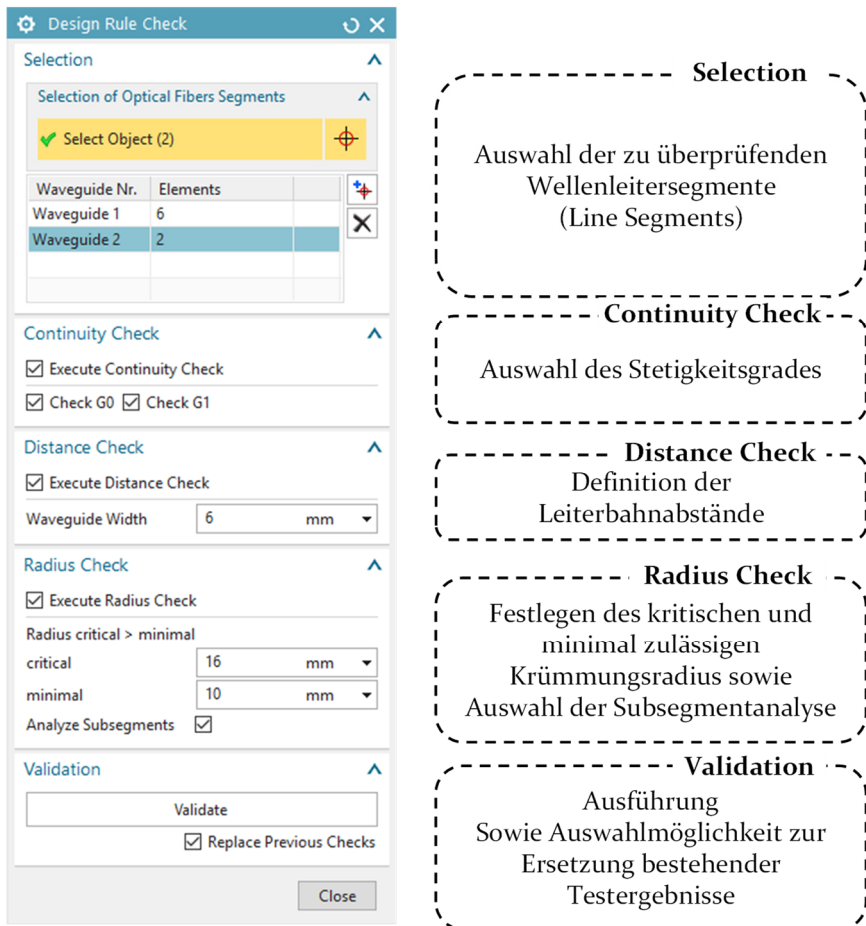


Bild 78: Bedienoberfläche zur Durchführung der Design Rule Checks

Die Ergebnisausgabe des *Continuity Check* in der NX-Arbeitsumgebung wird in Bild 79 dargestellt. Die Trägerfolie wurde zur besseren Erkennung bei der transparenten Drahtgitteransicht rötlich eingefärbt. Im ersten Beispiel ist zu erkennen, dass sich am Endsegment eines Wellenleiterpfades kein weiteres Segment findet, welches einen gemeinsamen Start- bzw. Endpunkt mit dem Endsegment besitzt (1). Im Überprüfungsalgorithmus unterscheidet sich dieser Fall nicht von dem eines lückenbehafteten Lichtwellenleiterpfades (2), bei dem beide Pfadenden keinen gemeinsamen Punkt

besitzen. In beiden Fällen fällt der Test auf G^0 -Stetigkeit negativ aus. Existiert ein gemeinsamer Punkt, wird die Tangentenstetigkeit (G^1 -Stetigkeit) überprüft. Diese fällt negativ aus, wenn nicht definierte Rundungen zwischen verlegten Pfadsegmenten auf einer Fläche auftreten (3). Außerdem tritt dies bei Leiterpfaden auf, die über G^1 unstetige Flächengrenzen verlegt sind (4). G^1 stetige Übergänge entstehen an G^1 stetigen Flächengrenzen (5) oder durch das Setzen von Rundungen zwischen Segmentübergängen (6).

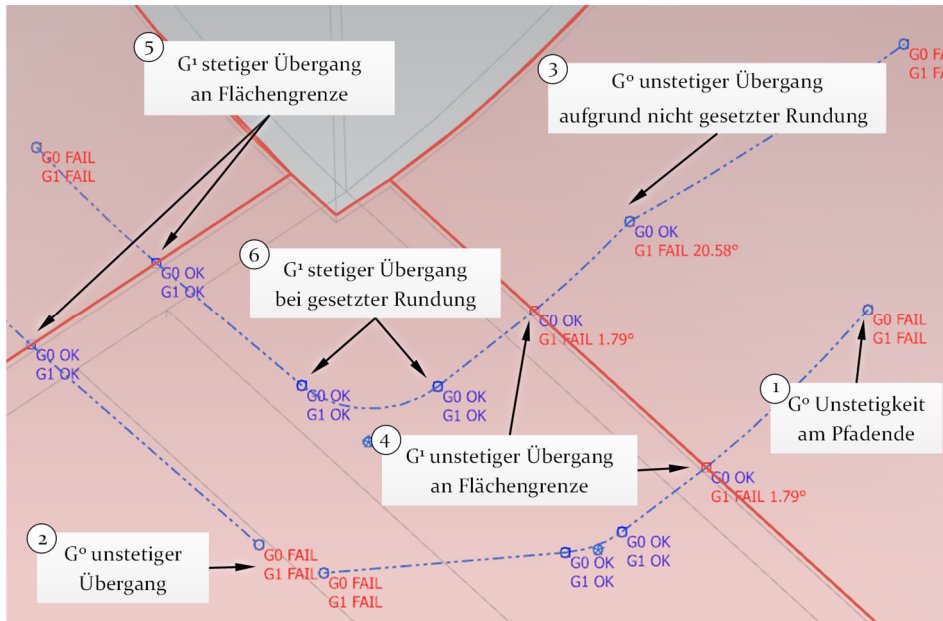


Bild 79: Ergebnis der Stetigkeitsanalyse

Die Durchführung der Raum- bzw. Abstandsanalyse zwischen verlegten Leiterbahnen (*Distance Check*) wird durch ein separates Modul durchgeführt, bei dem zunächst die Breite des Lichtwellenleiters definiert wird. Mit verfügbaren Referenzfunktionen erfolgt ein Versetzen der gewählten Kurve parallel zur Ausgangskurve. Dies dient zur Erstellung eines Randbereichs um einen definierten Abstand versetzt zur ursprünglichen Kurve und auf derselben Oberfläche zur erstellen. Die versetzte Kurve wird auf beiden Seiten des optischen Pfades erstellt. Bild 80 zeigt verschiedenartige Kurven, welche – wie oben beschrieben – erstellt werden. In einem anschließenden Schritt wird ermittelt, ob Offsetkurven existieren, welche sich berühren. Ist dies der Fall, wird der entsprechende Bereich rot eingefärbt. Werden entsprechende Bereiche manuell angepasst, sind Segmente

anderer Leiterpfade, welche bisher im Konflikt gestanden waren, gelb markiert. Somit wird dem Designer bei einer Anpassung der Pfade gezeigt, in welchem Bereich der alte Pfad zu nah an einem benachbarten Leiterpfad gelegen war und der neu zu verlegende Pfad einen vergrößerten Abstand benötigt.

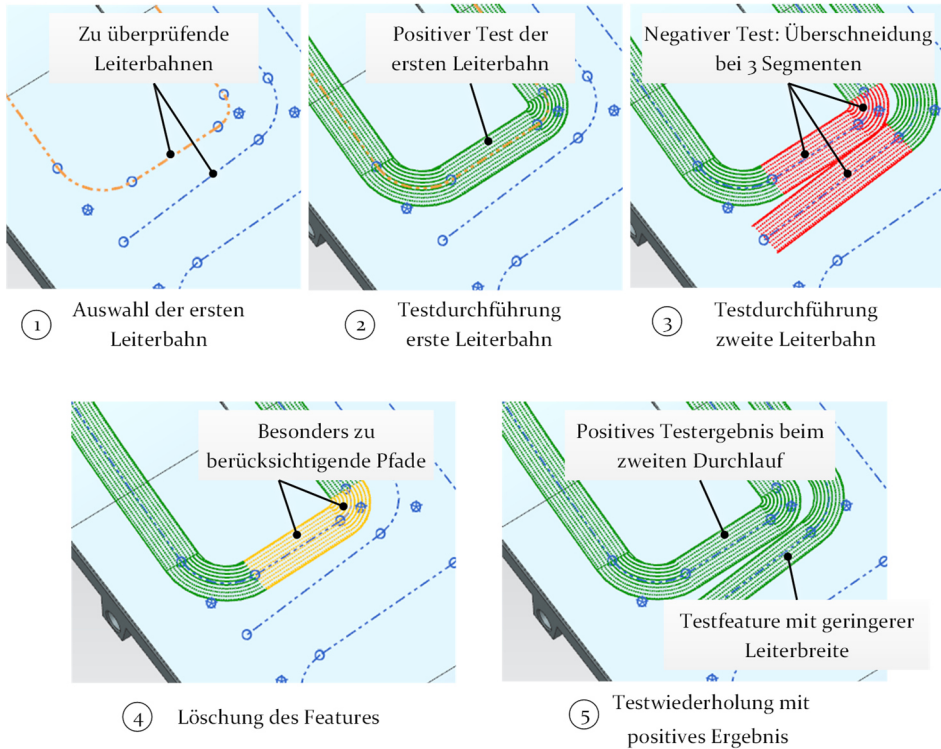


Bild 80: Durchführung des Distance Checks

Über die Funktion des *Radius Check* werden Verläufe der Radien entlang des Lichtwellenleiterpfades geprüft. Dies geschieht, indem funktionsrelevante Wertunterschreitungen durch farbiges Kennzeichnen der Pfadsegmente dargestellt werden. Dabei werden zwei Werte festgelegt: kritische Radien, bei denen eine Funktionsbeeinträchtigung bei Unterschreitung auftritt, sowie minimal zulässige Radien, die ein Versagen der Funktion bei Unterschreitung zur Folge haben. Die entsprechende Visualisierung ist in Bild 81 dargestellt. Wird einer der Werte über- bzw. unterschritten wird der entsprechende Teilabschnitt des verlegten Wellenleiterpfades entweder in roter Farbe (bei Unterschreitung des minimal zulässigen Radius)

oder in gelber Farbe (bei Unterschreitung des kritischen Radius). Alle anderen Segmente verbleiben in der ursprünglichen Markierung (grün).

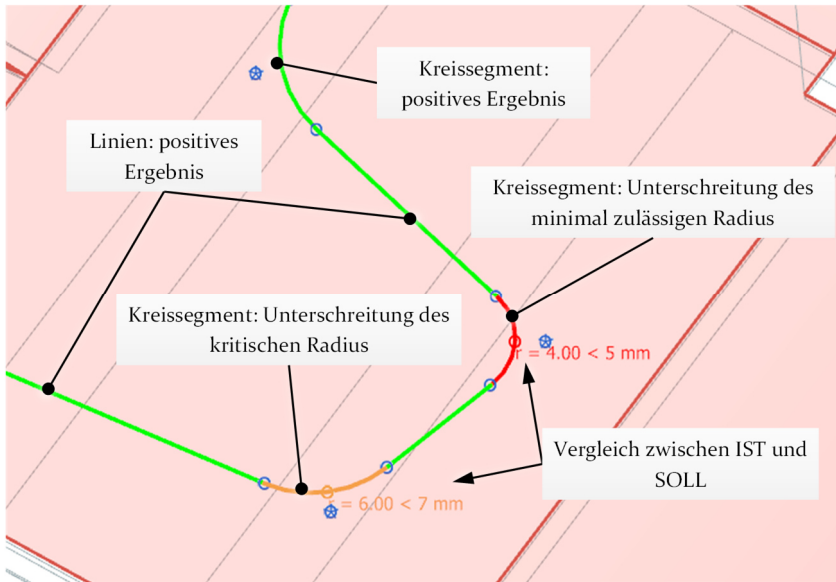


Bild 81: Übersicht der möglichen Ergebnisse zum Radius Check Werkzeug (ausschließliche Berücksichtigung von Minima bei Krümmungen)

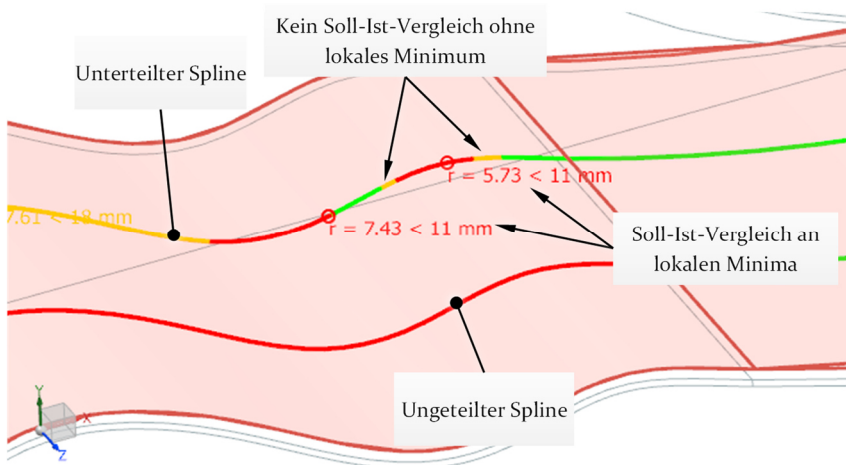


Bild 82: Radius-Check-Werkzeug (Analyse von Radien bei sich ändernden Kurvenverläufen)

Weiter wird definiert, ob die Analyse bei Kurven mit veränderlichem Radiusverlauf (Splines, Kegelschnitte) lediglich den Radiusminimalwert der Kurve berücksichtigt oder der gesamte Verlauf analysiert wird. Dies kann z.B. notwendig sein, wenn nur einzelne Kurvenabschnitte geprüft werden müssen. Ist die Analyse bei einer Kurve mit veränderlichem Radius durchzuführen, können die verschiedenen Radien der Kurve ermittelt werden und der gesamte Verlauf der Kurve dem Ergebnis entsprechend gefärbt werden (siehe Bild 82).

8.6 Absicherung des Designs mittels optischer Simulationsverfahren

Für die Konstruktion von 3D-Opto-MID sind nicht nur fertigungsrelevante Beschreibungen, sondern auch funktionsrelevante Eigenschaften von Bedeutung. Um diese abzusichern bieten sich, in Ergänzung zu den Designregelprüfungen, optische Simulationsverfahren an.

8.6.1 Methode zur Simulation optischer Systeme

Wie in Kapitel 2 aufgezeigt, hängt der Strahlengang des Lichts in Wellenleitern stark von seiner Geometrie (z.B. Querschnitt, Durchmesser, Länge) und dem Wellencharakter des Lichts ab. Verschiedene Simulationsmethoden, die auf analytischen oder numerischen Modellen basieren, berücksichtigen die genannten Einflüsse. Im Allgemeinen wird zwischen strahlungsoptischer und wellenoptischer Simulation von optischen Systemen unterschieden. Erstere umfassen Matrix- und Raytracing-Verfahren, letztere diverse Finite-Elemente-Verfahren wie die Beam Propagation Method (BPM). Wellenoptische Simulationen führen oft zu besseren Ergebnissen, aber zu hohen rechenintensiven Aufwendungen, was sie vor allem für mikrooptische Systeme, z.B. die Kopplung zwischen zwei Fasern, geeignet macht. Im Rahmen dieser Dissertationsschrift wird die Raytracing Methode fokussiert, da diese aufgrund der notwendigen Rechenkapazität für die Prüfung der Wellenleiterpfade besser geeignet ist.

8.6.2 Raytracing-Methode

Die Lichtausbreitung in (Makro-)Linsensystemen kann oft mit Methoden der geometrischen Optik (Licht als Strahlen) ausreichend berechnet werden, wobei die physikalischen Eigenschaften des Lichts (z.B. Beugung und Interferenz) weitgehend entfallen. Während einfache abbildende Systeme

noch über die paraxiale Matrixtheorie unter der Annahme eines rotationsinvarianten Systems berechnet werden können, entfallen geneigte oder seitlich versetzte Elemente sowie Beugungsgitter. Anstatt ein optisches System auf ein ein- oder zweidimensionales Problem zu vereinfachen, betrachtet das Raytracing Strahlen als Vektoren im dreidimensionalen Raum und ändert ihre Richtung an mittleren Grenzen. Der Rechenaufwand ist jedoch relativ hoch, da viele einzelne Strahlen auf ihrem Weg verfolgt werden.

Wie in den Grundlagen der Optik (Kapitel 2.1) ausgeführt, ist eine parametrisierte Linie im euklidischen Raum gegeben durch (vgl. Gleichung (10)):

$$\vec{r} = \vec{p} + s\vec{a}, \quad (39)$$

wobei \vec{p} der Startpunkt des Strahls, s ein Skalierungsfaktor (Länge) und \vec{a} ein konstanter Einheitenvektor ist, der in Strahlrichtung zeigt. Jedesmal wenn ein Strahl die Oberfläche trifft, ist der Schnittpunkt als neuer Startpunkt gesetzt. Um den Schnitt zu berechnen, wird die Oberfläche vorzugsweise als implizite Vektorfunktion in algebraischer Form beschrieben:

$$F(r) = 0 \Rightarrow F(\vec{p} + s\vec{a}) = 0. \quad (40)$$

wenn beispielsweise eine kugelförmige Oberfläche geschnitten wird (siehe Bild 83 $F(\vec{r}) = \|\vec{r} - \vec{c}\|^2 - R^2 = 0$), entstehen zwei Schnittpunkte.

Die Faktoren $s_{1/2}$ sind

$$s_{1/2} = (\vec{c} - \vec{p})\vec{a} \pm \sqrt{[(\vec{c} - \vec{p})\vec{a}]^2 - \|\vec{r} - \vec{c}\|^2 + R^2}. \quad (41)$$

Im Allgemeinen ist der kürzeste positive Abstand s die endgültige Lösung. Um den Richtungsvektor des gebrochenen (oder reflektierten) Strahls zu berechnen, genügt es, die lokale Normale am Einfallspunkt auf der Oberfläche zu berechnen und dann das Gesetz der Reflexion anzuwenden.

Die Gesamtweglänge des Strahls ist die Summe aller Faktoren s entlang eines Weges. Es gibt drei Haupttechniken der Strahlverfolgung: Sequentielle, nicht-sequentielle und Polarisationsstrahlverfolgung. Das sequentielle Raytracing erfordert, dass der Benutzer die Reihenfolge der Oberflächen, die die Strahlen schneiden, vordefiniert. Ein nicht-sequentieller Raytracer findet automatisch die nächste Oberfläche, die von einem Strahl

getroffen wird. Zuerst werden die Schnittpunkte mit allen Flächen berechnet und dann der kürzeste positive Abstand vom Startpunkt aus den Ergebnissen ausgewählt.

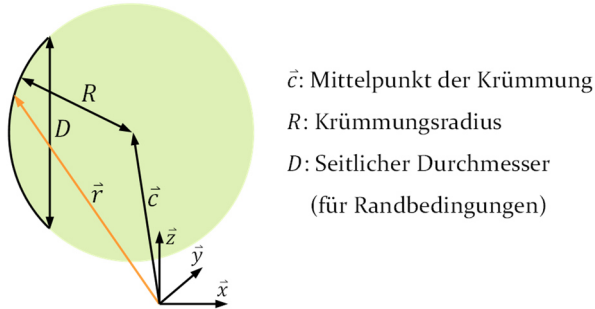


Bild 83: Schnittpunkt einer kugelförmigen Oberfläche mit einem Strahl

Die Polarisationsstrahlverfolgungstechnik berücksichtigt einen zusätzlichen Polarisationsvektor, der bei jedem Auftreffen auf eine Oberfläche mit Hilfe der Fresnel-Gleichungen neu berechnet wird. Nicht-sequentielles Raytracing kann zur Simulation von Wellenleitern verwendet werden, aber es muss eine ausreichende Anzahl von Strahlen verfolgt werden, um ein realistisches Fernfeld mit einer kontinuierlichen Verteilung der Intensitäten (Modi) zu simulieren. [23, 132]

8.6.3 Optische Simulation mittels des Systems RAYTRACE

Im Rahmen der Arbeit wurde das vom Lehrstuhl Optik in der Arbeitsgruppe ODEM unter Leitung von Prof Lindlein entwickelte optische Simulationssystem RAYTRACE [P14] verwendet. Dieses wurde zunächst mit dem Ziel entwickelt, Linsensysteme zu simulieren. Im weitesten Sinne ist ein Wellenleiter ein Linsensystem mit reflektierenden Oberflächeneigenschaften. Die verschiedenen geometrischen Oberflächen, die einen Wellenleiter repräsentieren, können innerhalb des Programms definiert werden. Dazu stellt RAYTRACE sogenannte Einzelflächenelemente zur Verfügung, die die Grenze zwischen zwei verschiedenen Medien bestimmen. Man kann die optischen Eigenschaften der Oberfläche (Brechung, Absorption, Streuung) definieren und unterschiedliche Materialien festlegen. Dabei wird jede Fläche zwischen einer *linken* und einer *rechten* Seite (bzw. *oben* und *unten*) unterschieden, wobei auf jeder der beiden Seite unterschiedliche Materialien definiert werden können. Der Normalenvektor einer Oberfläche zeigt immer auf die rechte Seite der Oberfläche.

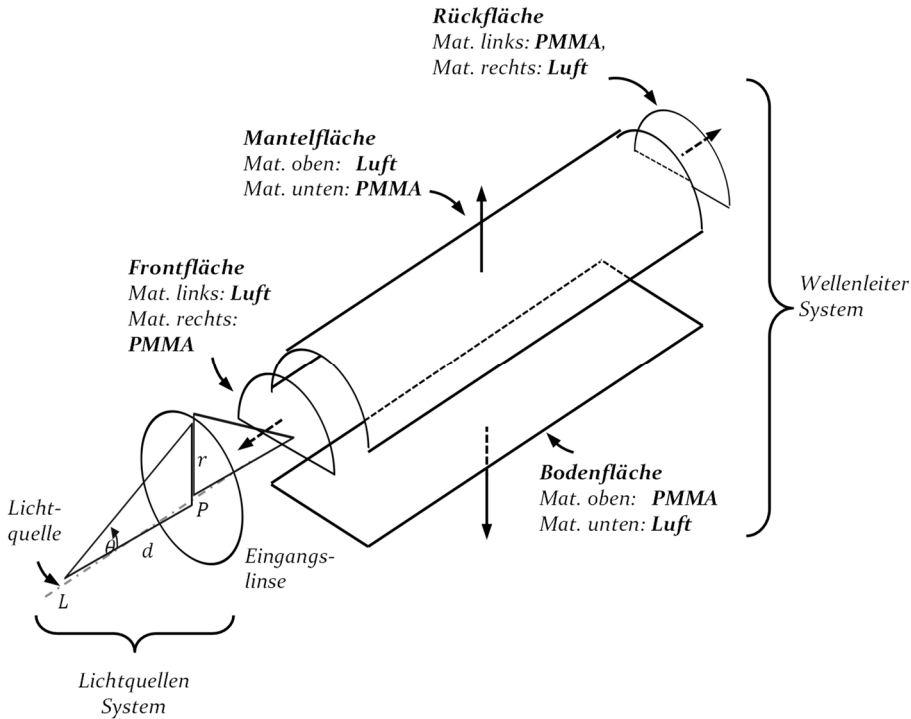


Bild 84: Aufbau eines Wellenleitersegments nach RAYTRACE-Topologie

Ein von diesen Elementen umschlossenes Volumen wird als Wellenleiter ausgelegt. Ein Beispiel für ein gerades Wellenleitersegment mit definierten Oberflächen ist in Bild 84 dargestellt. Die ebenen (nicht gekrümmten) Vorder-, Rück- und Unterseiten sind einfach zu definieren, während die gekrümmte Oberseite durch eine explizite Funktion erzeugt werden muss. Die Flächen sind drehbar, so dass sie geometrisch zueinander ausgerichtet sind. Durch die beliebigen Oberflächenfunktionen sind auch komplexere Formen wie z.B. gebogene, elliptische oder Spline-Wellenleiter möglich. Um die Dämpfung und Dispersion am Ende des Wellenleiters zu berechnen, wird die Rückseite absorbierend eingestellt. Die obere und untere Fläche haben die Streueigenschaft eingestellt, um die Streuung an der Kern-Mantel-Schnittstelle zu simulieren.

Zusätzlich zur Definition der Wellenleiter, muss eine Lichtquelle mit einer Eingangslinse festgelegt werden unter der Voraussetzung, dass das sich ausbreitende Licht innerhalb eines Akzeptanzwinkels bleibt. Die numerische Apertur der Eingangslinse (Reichweite der Winkel über die das System Licht emittiert) wird wie folgt definiert:

$$NA = n_{air} \cdot \sin\theta \approx \tan\theta = \frac{r}{d} \quad (42)$$

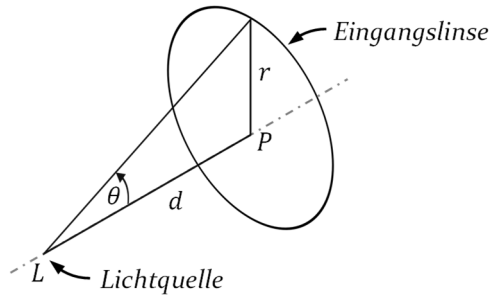


Bild 85: Numerische Apertur der Eingangslinse

Dabei kann die Berechnung vereinfacht werden indem die Eingangslinse und Frontfläche des Wellenleiters lotrecht zueinander ausgerichtet sind. Um Dämpfung und Dispersion innerhalb des Wellenleiters zu simulieren muss die Lichtquelle direkt auf oder vor der Frontfläche platziert werden (dies verhindert Refraktion die durch Kopplung in den Wellenleiter entstehen könnte). Die ideale Lichtquelle emittiert monochromatisches Licht mit einer homogenen Intensitätsverteilung auf der Ebene der Eingangslinse.

8.6.4 Aufbereitung von CAD-Daten für die nicht-sequentielle strahlenoptische Simulation

Aus den vorhergehenden Beschreibungen und den technischen Grundlagen der Computergrafik aus Kapitel 3.3 lässt sich erkennen, dass unterschiedliche Darstellungsansätze für die Repräsentation der Geometrie im CAD-System sowie im Programm RAYTRACE angewendet werden. Um die CAD Daten verarbeiten zu können, müssen diese in ein für RAYTRACE lesbares Format umgewandelt werden. Während CAD-Systeme mit Volumenmodellen arbeiten, verwendet RAYTRACE ein flächenbasiertes Darstellungs- und Berechnungsmodell (siehe Bild 84 und Bild 86), um die Zusammenhänge zwischen verschiedenen Objekten herzustellen. Zusätzlich besteht die Anforderung Kennzahlen wie Rauheiten, Materialien mit optischen Eigenschaften oder Reflektionseigenschaften der CAD-Repräsentation zuzuweisen um ein ganzheitliches optisch simulierbares Modell zu erhalten.

Das System RAYTRACE verwendet hierbei ein ASCII basiertes programm-spezifisches Format (.ATF) um Repräsentationen der Wellenleiter und Materialien zu speichern. Um die oben genannten Kennzahlen und Geometriedaten zu überführen, ist eine Schnittstelle erforderlich, um aus der B-Rep-Struktur des CAD Modells einzelne Oberflächenfunktionen abzuleiten.

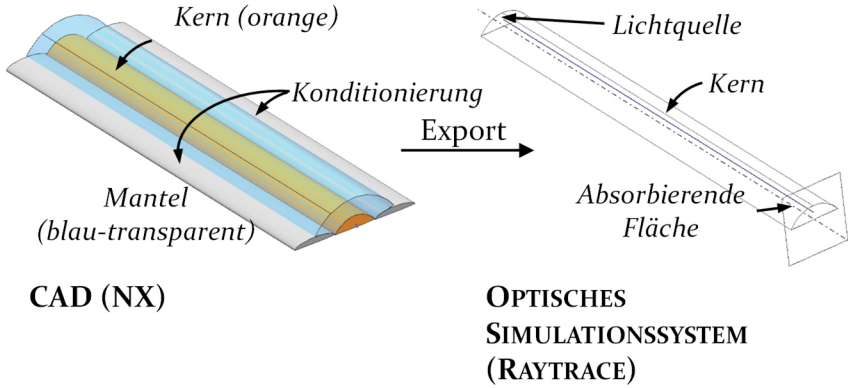


Bild 86: Vergleich der Darstellungsformen von CAD (links) und optischen Simulationssystem (rechts)

In Abhängigkeit vom Querschnitt und der Pfadplanung können dies verschiedene Funktionen zur analytischen Darstellung des Wellenleiters sein. Dabei kommen nicht nur geradlinige, sondern auch elliptische und Spline-Segmente vor, die in RAYTRACE implementiert wurden. Die Oberseite eines Segments mit kreisförmigen (Segment-)Querschnitten (Radius v_o , laut Schema von RAYTRACE) kann mit der Funktion

$$f(x, y) = \sqrt{v_o^2 - x^2}, \quad f(x, y) \in R, \quad (43)$$

beschrieben werden. Weiterhin wird ein Kurvensegment (Radius v_o) mit einem halbkreisförmigen Querschnitt berechnet (Radius v_1):

$$f(x, y) = \sqrt{2v_o^2\sqrt{(x^2 + y^2)} - x^2 - y^2 - v_o^2 + v_1^2}, \quad f(x, y) \in R, \quad (44)$$

Daraus ergibt sich eine kreisförmige Oberfläche. Da die Baugruppe keine vordefinierten Lichtquellen beinhaltet, wird diese über eine Dialogbox (Bild 87) vom Benutzer definiert (1). Dabei wird die Wellenlänge, die zu berechnenden Strahlen, die Form der Eingangslinse und das Umgebungsmedium definiert. Die Auswahl der zu simulierenden Wellenleitersegmente wird über eine Auswahl der 3D-Ansicht festgelegt (2). Abschließend

wird ein Ausgabepfad zur Erstellung des ATF-Files für die spätere Simulation definiert.

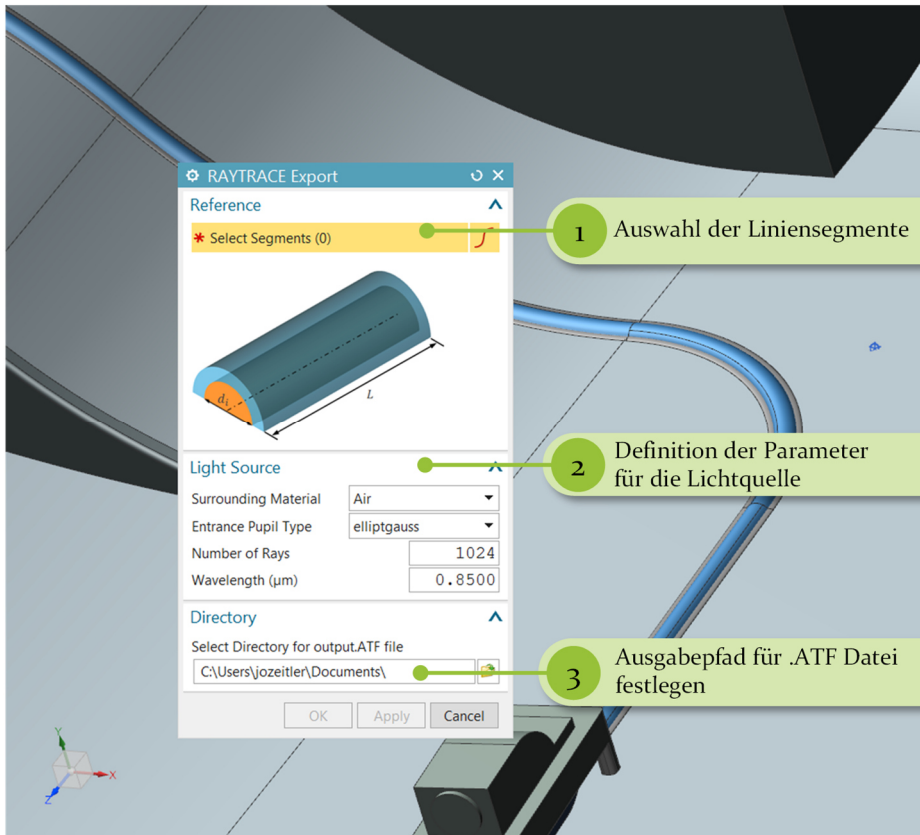


Bild 87: RAYTRACE-Export-Dialog

Zur Evaluierung wurden für die nicht-sequentielle Ray Tracing Simulation Segmente mit parabolisch und kreisrundem Querschnitt exportiert (siehe Tabelle 10 und Bild 88 – vorgenommene Spezifikationen). Dabei wird in diesem Beispiel EPOCORE und EPOCLAD from Microresist Technologies als Kern und Mantelmaterial benutzt. Diese haben einen Brechungsindex von $n=1,58$ (Kern) bzw. $n=1,57$ (Mantel). Die Lichtquelle befindet sich auf halber Höhe vor dem Wellenleiter und die Lichtstrahlen werden durch die Eintrittslinse verteilt. Die Numerische Apertur ist so gewählt, dass alle Strahlen im Wellenleiter nach innen reflektiert werden. Für aussagekräftigere Ergebnisse zur Dispersion sollte die Simulation mit mehr als 1.000.000 Strahlen durchgeführt werden.

Tabelle 10: Spezifikation der exportierten Segmente

Querschnitt	Kreissegment	Parabolisch
Kerndurchmesser	0.4mm	0.4mm
Kernhöhe	0.1mm	0.1mm
Länge des Wellenleiters	46.8mm	46.8mm
Kernmaterial	EPOCORE ($n = 1.58$)	EPOCORE
Mantelmaterial	EPOCLAD ($n = 1.57$)	EPOCLAD
Korrelationslänge	18 μ m	18 μ m
Rauheitswert (RA)	0.2 μ m	0.2 μ m
Foliensubstratmaterial	PMMA	PMMA
Eingangslinse	elliptisch	elliptisch
Wellenlänge	850 μ m	850 μ m

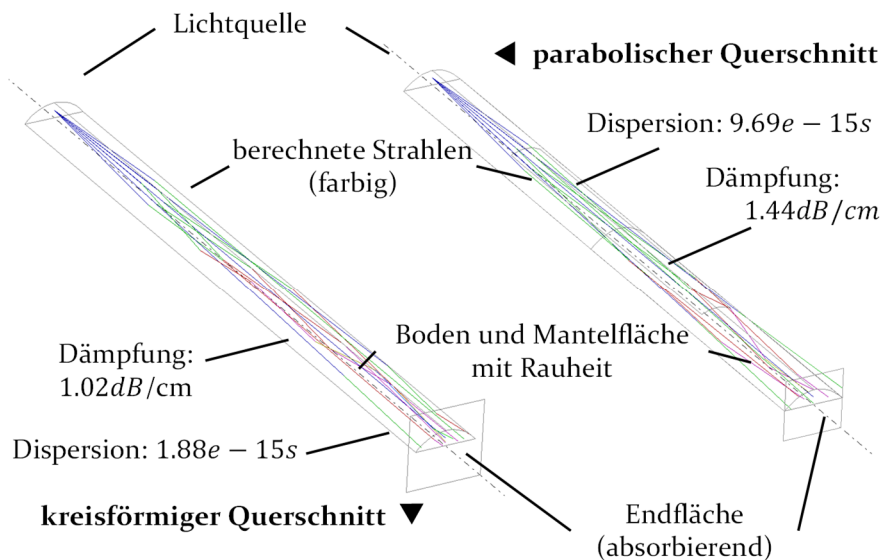


Bild 88: Simulation von unterschiedlichen Wellenleitertypen in RAYTRACE

8.7 Generierung von Fertigungsdaten

Wurde das entsprechende Design validiert, können aus den Daten die bei der Wellenleitermodellierung, als auch den platzierten Komponenten entstanden sind, die entsprechenden Pfade für den Druck der Wellenleiter verwendet werden. Die dabei entstehenden Daten unterteilen sich dabei im Wesentlichen in:

- Druckpfade für die optischen/elektrischen Leiter
- Positionen für Bauelemente
- Layouts für den Flexodruck der Konditionierungsbahnen (resultierend aus den Pfaden der Lichtwellenleiter)

Die Daten können entweder direkt inhärent mittels des CAM-Moduls im Basissystem NX verarbeitet werden oder durch Export (z.B. in einem dateineutralen Format wie .step) in ein separates CAD-CAM System wie beispielsweise das im Rahmen der Arbeit verwendete Motion3D [133].

Dabei können Druckpfade und Positionen der Bauelemente direkt übernommen werden, während das Layout für den Flexodruck der Konditionierung separat als 2D-Zeichnung ausgeleitet werden muss.

8.8 Bewertung der Arbeiten

Wie bereits zu Beginn erklärt, besteht die Herausforderung in der Entwicklung eines Tools für 3D-Opto-MIDs darin, ein umfassendes und leistungsfähiges Softwaretool bereitzustellen, da der Funktionsumfang im Vergleich zu reinen MCAD- oder ECAD-Systemen deutlich höher ist. Die Hauptherausforderung ist, einen neuen Ansatz für eine Anwendung von 3D-Opto-MID zu finden. Grundlegend kann mit diesem Ansatz die Machbarkeit des Ansatzes eines integrierten optomechatronischen Ansatzes nachgewiesen werden. Basisfunktionalitäten wie die Schaltungssynthese, einen Baukasten für Design- und Fertigungsregeln und der exakten Planung der Wellenleiterstrukturen konnten bereitgestellt werden.

Folgend findet sich in Tabelle 11 eine Gegenüberstellung mitsamt Bewertung des Erfüllungsgrads der in Kapitel 5 definierten Anforderungen. Auf Basis der Bewertung lässt sich der Schluss ziehen, dass dieser Ansatz auch grundlegend auf andere Plattformen und Softwaresysteme übertragbar ist. Dabei müssen jedoch noch auch weitere Geometrien und Leiterelemente (z.B. Splitter, Koppler) für räumliche Wellenleiterpfade implementiert werden, um sinnvolle optische Netzwerke darstellen zu können.

Tabelle 11: Gegenüberstellung von Anforderungen und Erfüllungsgrad

Bewer- tung	Anforderung	Bearbeitung
A-CAD-1 	Grafische Benutzerschnittstelle und Visualisierung	Grafische Nutzerschnittstelle ist direkt in dem CAD-System realisiert.
A-CAD-2 	Möglichkeit zum Entwurf eines Schaltungsträgers und dessen Validierung mittels CAE-Software hinsichtlich der mechanischen und thermischen Eigenschaften	Inhärente Funktionen des CAD-Systems erlauben die durchführung üblicher Simulationsverfahren, die im CAx-System vorhanden sind.
A-CAD-3 	Schnittstellen zum logischen Entwurf und Simulation von elektronischen und photonischen Schaltungen	Wurde realisiert durch die Bereitstellung von Importschnittstellen zu Schaltungsdesignwerkzeugen. Möglichkeit der Erweiterung auf weitere Herstellerspezifische Formate vorhanden.
A-CAD-4 	Layout-Funktionalität für die Platzierung von Komponenten und das Routing von Leitern	Komponentenplatzierung ist vollumfänglich realisiert, das Routing von Leiterstrukturen folgt einem manuellen und einem teilautomatisierten Ansatz.
A-CAD-5 	Analyse passiver Komponenten (z.B. Wellenleiter) des endgültigen Schaltungslayouts	Durch die Integration eines nicht-sequentiellen strahlenoptischen Simulationswerkzeugs.
A-CAD-6 bzw. A-CAD-7 	Fähigkeit zur Durchführung von Design Rule-Checks Berücksichtigung von fertigungstechnischen Aspekten im frühen Entwurfsprozess	Durch die Einführung von Designregelprüfungen auf Krümmungen, Stetigkeit sowie Abständen.
A-CAD-8 	Ausleitung von Fertigungszeichnungen und NC-Daten für verschiedene Fertigungsprozesse	Inhärente Zeichnungswerkzeuge erlauben eine Generierung von z.B. Fertigungszeichnungen. NC-Daten können aus der 3D-Struktur der Schaltungsträger abgeleitet werden.

Die Erweiterung des prototypischen Systems ist jedoch möglich und kann generell auch auf andere Technologien (wie z.B. Inlaytechnologien, Fasersysteme oder MID-Technik) optischer/elektrischer Signalleitungen ausgeweitet werden.

9 Zusammenfassung und Ausblick

Es ist absehbar, dass die Nutzung neuer Technologien zur Übertragung digitaler Daten wird in den nächsten Jahrzehnten eine zentrale Rolle einnehmen wird. Dabei wird auch in der Forschungslandschaft die Erforschung neuer Techniken zur Übertragung von Signalen zunehmend an Bedeutung gewinnen. Bereits heute ist es beinahe undenkbar Arbeiten ohne Netzwerkverbindungen zu verrichten. Sei es durch die einfache Suchabfrage am Arbeitsplatz oder IoT-Technologien in der Fertigung. Nahezu jeder Lebensbereich, im privaten und geschäftlichen Umfeld ist von dieser Entwicklung betroffen. Damit gewinnen zugehörige Technologien essentielle Bedeutung und werden bald in alle relevanten Lebens- und Arbeitsbereiche vorgedrungen sein. Unüberbrückbar ist dabei die Notwendigkeit Grundlagen für diese neuen Technologien zu schaffen. Der Bereich der Optik bzw. der Optomechatronik ist aufgrund seiner Vorteile in der Datenübertragung und physikalischen Gegebenheiten ein Fokus aktueller Forschung. Die neue Klasse von Produkten, die diese Technologie beinhalten, sogenannte 3D-Opto-MID, sind eine Synthese aus klassischen mechatronisch integrierten Bauteilen und optischen Technologien. Um diese Bauteile zu fertigen, sind neben neuen Fertigungsverfahren auch neuartige Produktentwicklungsansätze notwendig. Dies gilt insbesondere, da sie die Voraussetzung zur Erstellung für solch hochkomplexe Systeme bereitstellen. Insbesondere die Unterstützung mittels rechnerbasierter Verfahren ist dabei unabdingbar. Diese Arbeit nimmt sich dieser Herausforderung an und trägt einen Beitrag zur Erfüllung dieser Aufgabe bei.

Die Integration der verschiedenen Ingenieursdisziplinen in einem integrierten Entwicklungsvorgehen ist der Kern dieser Arbeit. Dazu mussten die physikalischen und technologischen Grundlagen zu optischen Technologien betrachtet werden. Der Fokus liegt hierbei auf der optischen Übertragungstechnik. Dämpfung, die Ausbreitung optischer Signale, der Aufbau gedruckter optischer Wellenleiter sowie deren Fertigungsverfahren spielen dafür eine besondere Rolle. Ebenso sind Produktentwicklungsmethoden technischer Systeme ein zugehöriges Feld, da bisher, insbesondere für 3D-Opto-MID, keine adäquate Vorgehensmethodik existiert. Analogien zu mechatronischen Systemen und deren Teilprozesse existieren zwar, jedoch müssen diese hinsichtlich der neuen optomechatronischen Bauteile bewertet und erweitert werden. Dabei ist ein gesondertes Vorgehen, das sich von herkömmlichen Entwicklungsmethoden unterscheidet, ebenso

wichtig, wie die Herausforderungen die an Modellersysteme, den Designer und die Fertigung der 3D-Opto-MID gestellt werden müssen.

Aus diesen definierten Anforderungen konnte ein Konzept für eine 3D-Opto-Mechatronik-CAD-Software (OMCAD) abgeleitet werden, welche die wesentlichen Schritte zum Erstellen dieser Produkte beinhaltet. Insbesondere stellt dabei die Schaltungssynthese und der Layoutprozess der physischen Entwicklungsschritte vom Import der logischen Schaltung bis hin zur Verlegung der Leiterstrukturen die größte Herausforderung dar. Dies gilt insbesondere deshalb, da 3D-Opto-MIDs von Natur aus auf komplexen Oberflächenstrukturen appliziert werden.

Aus diesem Grund wurden verschiedene Strategien der Pfadplanung betrachtet, die für 3D-Opto-MID Bauteile angewendet werden können. Einerseits können durch teilautomatisierte 2D-Routingalgorithmen, durch die Anwendung von Abwicklungsverfahren, auf 3D-Bauteile angewendet werden, zum anderen spielen 3D-Pfadplanungsverfahren, die bereits in weiteren Veröffentlichungen vorgestellt und diskutiert wurden, eine bedeutende Rolle, was auch im Rahmen dieser Arbeit bewiesen werden konnte.

In der vorgestellten prototypischen Implementierung wird gezeigt, wie ein Softwarewerkzeug zur Erfüllung der wichtigsten Funktionalitäten, in Verbindung mit notwendigen Validierungsfunktionen, aussehen kann. So sind nicht nur, wie im Stand der Technik, manuelle Layouts elektrisch geprägter Bauteile modellierbar, sondern auch räumlich komplexe optomechatronische Schaltungen. Dabei kommt neben der Pfadplanung auch die Synthese von logischen Schaltplänen mit der 3D-Konstruktion, wie auch die Platzierung von Komponenten auf räumlich geformten Substraten große Bedeutung zu. Eine wesentliche Erweiterung dieser Funktionalität stellen Validierungsoptionen, die es einerseits ermöglichen fertigungsrelevante Designregeln zu beachten, aber auch die Funktionsfähigkeit der optischen Leiter sicherstellen. Möglich wurde dies durch eine eigens konzipierte Schnittstelle zu einem strahlenoptischen Simulationssystem, welche die zuvor geplanten Layouts der optischen Leiter überprüft.

Die im Rahmen dieser Arbeit vorgestellte rechnergestützte 3D-Opto-MID-Entwicklungsmethodik bietet das Potential in vielen Bereichen noch umfassend erweitert zu werden. Dies beinhaltet vor allem die Integration weiterer Möglichkeiten zur Absicherung von Design- und Fertigungsregeln, die im Laufe weiterer Forschungsarbeiten im Bereich der Fertigungstechnik aber zunächst ergründet werden müssen. Mittelfristig sollte auch die In-

tegration der optischen Simulationsverfahren direkt in der 3D-Modellierungsumgebung erfolgen. Hierdurch könnte die Anzahl von Schnittstellen reduziert und unnötige Iterationsschleifen vermieden werden. Die bereits vorgestellten Schnittstellen zu Schaltungsdesign- und Simulationssystemen liefert dabei einen wichtigen Baustein für anspruchsvollere optische Schaltungen. So wird die entworfene Schaltung in einem separaten Programm auf strahlenoptische Funktionsfähigkeit validiert und wieder in das vorgestellte System zurückgeführt. Zukünftig sollten neben den Konstruktionsfunktionen aber auch Fragen der Übertragungsfähigkeit verschiedener optischer Leiterkonfigurationen bereits in der Produktentwicklung beantwortet werden. Hierfür spielt die Materialauswahl beim Druck additiv gefertigter Lichtwellenleiter neben der reinen Geometrie eine entscheidende Rolle. In weiterführenden Arbeiten sollte deshalb dieser Umstand berücksichtigt und diese Eigenschaften digital abgebildet werden. Um komplexe Schaltungen zu realisieren, ist zudem der Zusammenhang von elektrischen und optischen Komponenten unerlässlich. Dabei müssen physikalische Effekte in den jeweiligen Disziplinen, wie z.B. Kriechstrecken in elektrischen Leitern oder aber eine wellenoptische Betrachtung der optischen Komponenten (z.B. relevant bei Koppelstrukturen) weiter erforscht werden. Dies ist insbesondere von Bedeutung, da die optomechatronischen Baugruppen eine komplexe räumliche Struktur besitzen. Automatisierte Platzierungsverfahren für 3D-Baugruppen stellen hierbei eine große Herausforderung dar. So reduziert automatisiertes Routing zwar die Komplexität für den Entwickler, jedoch ist dieses lediglich ein begrenztes Optimierungsverfahren für ursächliche Probleme im Design. Um diese Herausforderung zu umgehen, sollten in Zukunft auch Schritte vor der Layouterstellung der elektrooptischen Schaltungen weitestgehend durch optimierte Verfahren übernommen werden. Ansätze aus der künstlichen Intelligenz, wie z.B. Generative Design, stellen für den Schritt der Planung und Konstruktion domänenübergreifender Systeme ein vielversprechendes Forschungsfeld dar. Derzeit existieren zwar Lösungen für domänenspezifische Probleme in der Mechanik in Form von Topologieoptimierern, jedoch wurde bisher in keiner bekannten Forschungsarbeit Lösungsansätze für übergreifende Probleme gefunden.

Das vorgestellte OMCAD-System bietet hierfür eine Grundlage, um auf Basis der bereits erforschten Modellierfunktionen, Erweiterungen für weiterführende Fragestellungen bereitzustellen.

10 Summary and outlook

It is predictable that the use of new technologies to transfer digital data will take a central role in the upcoming decades. The research of new technologies for the transmission of signals will become increasingly important in the research landscape. Even today it is almost unthinkable to work without network connections. Be it through simple search queries at the workplace or IoT technologies in the production. Any area of life, private or business, is affected by this phenomenon. Associated technologies are thus gaining essential importance and will soon have reached all relevant areas of life and work. The need to create the fundamentals for these new technologies is impassable. Due to its advantages in data transmission and physical conditions, the field of optics and optomechatronics is a focus of current research. The new class of products containing this technology, so-called 3D-Opto-MID, is a synthesis of classic mechatronically integrated components and optical technologies. In order to fabricate these components, research into new product development approaches is necessary in addition to new manufacturing processes. This is necessary because they represent a precondition for such highly complex systems. Especially the support by computer-based processes is imperative. This work takes up this challenge and contributes to its fulfilment.

The integration of the different engineering disciplines in an integrated design process is the core of this work. The physical and technological fundamentals of optical technologies have to be considered, with the focus on optical transmission technology. Attenuation, the propagation of optical signals, the design of printed optical waveguides and their manufacturing processes play a major role. In addition, product development methods of technical systems are an accompanying field, since there is no adequate methodology yet, especially for 3D-Opto-MID. Although analogies to mechatronic systems and their sub-processes exist, these must be evaluated and extended with regard to the new optomechatronic components. A separate approach that differs from conventional development methods is just as important as the challenges that have to be met by modelling systems, the designer and the production of the 3D-Opto-MID.

From these defined requirements a concept for a 3D-Opto-MID modeling software could be derived, which contains the essential steps for the production of these products. In particular, the circuit synthesis and the layout process of the physical development steps from the import of the logical

circuit to the relocation of the wiring structures represent the greatest challenge. This is in particular the case because 3D-Opto-MIDs are applied to complex surface structures by their nature.

For this reason, different path planning strategies that can be used for 3D-Opto-MID components were considered. On the one hand, classical automated routing algorithms can be used as an approach, on the other hand, 3D path planning methods which have already been presented and discussed in various publications play an important role.

The prototype implementation presented shows what a software tool must look like to fulfill the most important functionalities in connection with necessary validation functionalities. Thus, not only manual layouts of electrically characterized devices can be modelled, but also optically enriched circuits. A significant extension of this functionality is provided by validation options, which on the one hand enable production-related design rules to be considered, but on the other hand also ensure the functionality of the optical components. This was made possible by a newly designed interface to a ray based optical simulation system, which validates the layouts of the optical conductors.

The computer-aided 3D-Opto-MID design approach presented in this thesis offers the potential to be extended in many areas. In particular, this includes the integration of further possibilities for the validation of design and manufacturing rules, which have to be investigated in the context of further research in the field of manufacturing technology. In the medium term, the integration of optical simulation methods should also be carried out directly in the 3D modeling environment. This might reduce the number of interfaces and avoid unnecessary iteration loops. The presented interfaces to circuit design and simulation systems provide an important component for more sophisticated optical circuits. Thus, the designed circuit is being validated in a separate program for optical functionality and then returned to the presented system. In future, apart from the design functions, questions of the transferability of different optical conductor configurations should be answered right from the product development stage. For this purpose, the choice of material for the printing of additively manufactured optical waveguides will play a decisive role in addition to the pure geometry. In further work this circumstance should therefore be taken into account and these properties should be modelled digitally. In order to realize complex circuits, the connection of electrical and optical components is essential. Physical effects in the respective disciplines, e.g. creepage distances in electrical conductors or a wave-optical consideration of the optical components (e.g. relevant for coupling structures) must be studied

further. This is of particular importance since the optomechatronic assemblies have a complex spatial structure. Automated placement procedures for 3D assemblies are a great challenge. Although automated routing reduces the complexity for the designer, it is only a limited optimization procedure for causal problems in the design. In order to avoid this challenge, steps prior to the layout of electro-optical circuits should be taken over by optimized procedures as far as possible in the future. Artificial intelligence approaches, such as generative design, represent a promising field of research for the planning and design of cross-domain systems. Currently, solutions for domain-specific problems in mechanics exist in terms of topology optimizers, but so far no known research work has found solutions for cross-domain problems.

The presented OMCAD system offers a basis for the investigation of extensions for further questions based on the already researched modelling functions.

Literaturverzeichnis

- [1] GONTERMANN, A. *ZVEI-Welt-Elektromarkt - Ausblick bis 2021* [online]. 07/2019 [Zugriff am: 17. September 2019]. Verfügbar unter: https://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Presse_und_Medien/Pressebereich/2020-065_ZVEI-Umfrage_Unternehmen-sehen-leichten-Aufwaertstrend/ZVEI_Welt-Elektromarkt_Ausblick_bis_2021.pdf.
- [2] TORSTEN HERRMANN. *Automotive Ethernet@IAV. Der Fahrzeug-Bus gibt Gas*. 10/2013.
- [3] WOLFGANG KEMPKENS. *BORDCOMPUTER ERSETZT STEUERGERÄTE* [online]. *Siemens entwickelt neuartige Kfz-Elektronik als Basis für Elektroautos*. 01.2015 [Zugriff am: 1. November 2020]. Verfügbar unter: <https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/elektronik/siemens-entwickelt-neuartige-kfz-elektronik-basis-fuer-elektroautos/>.
- [4] IAV GMBH - INGENIEURGESELLSCHAFT AUTO UND VERKEHR, Hg. *Datenhighway fürs Auto. IAV untersucht in einem BMBF - Projekt den Einsatz von Ethernet im Fahrzeug*. 2015.
- [5] CISCO. *Cisco Visual Networking Index. Forecast and Methodology, 2016-2021*, 2017.
- [6] IDC. *Data Age 2025. The Evolution of Data to Life-Critical*. 2017.
- [7] BESTE, D. *Datenflut in der Industrie 4.0* [online]. 6 November 2017 [Zugriff am: 13. September 2019]. Verfügbar unter: <https://www.springerprofessional.de/industrie-4-0/betriebstechnik---instandhaltung/datenflut-in-der-industrie-4-0/15193470>.
- [8] MONTROSE, M.I. *EMC and the printed circuit board. Design, theory, and layout made simple*. New York: IEEE Press; John Wiley & Sons, Inc, 1999. IEEE Press series on electronics technology. ISBN 078034703X.
- [9] FRANKE, J., Hg. *Räumliche elektronische Baugruppen (3D-MID). Werkstoffe, Herstellung, Montage und Anwendungen für spritzgossene Schaltungsträger*. München: Hanser, 2013. ISBN 978-3-446-43441-7.

- [10] GAUSEMEIER, J. und T. BIGL. *Integrative Entwicklung räumlicher elektronischer Baugruppen*. München: Hanser, 2006. ISBN 9783446404670.
- [11] MEIER, R. *Strategien für einen produktorientierten Einsatz räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID)*. Bamberg: Meisenbach, 2002. Fertigungstechnik - Erlangen. 135. ISBN 9783875251784.
- [12] PÖHLAU, F. *Entscheidungsgrundlagen zur Einführung räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID)*. Bamberg: Meisenbach, 1999. Fertigungstechnik - Erlangen. 86. ISBN 9783875251142.
- [13] FRANKE, J. *Integrierte Entwicklung neuer Produkt- und Produktionstechnologien für räumliche spritzgegossene Schaltungsträger (3-D MID)*. 2020.
- [14] BMBF. *Agenda Photonik 2020* [online]. 2016.
- [15] KURT HERRMANN. *Lichtwellenleiter in der Industrieautomatisierung* [online]. *SPS-MAGAZIN*, 2006, (7). Verfügbar unter: <http://www.sps-magazin.de/>.
- [16] JAHNS, J. *Photonik: Grundlagen, Komponenten und Systeme*. Oldenbourg, 2001. ISBN 9783486254259.
- [17] ELMAR GRIESE, Hg. *Elektrisch-optische Leiterplatte: Grundlagen - Technologie - Anwendungen*. September 2006.
- [18] CHO, H., Hg. *Opto-mechatronic systems handbook. Techniques and applications*. [Online-ausg.]. Boca Raton, Fla. [u.a.]: CRC Press, 2003. ISBN 9780849311628.
- [19] NAUMANN, H., G. SCHRÖDER und M. LÖFFLER-MANG. *Handbuch Bauelemente der Optik. Grundlagen, Werkstoffe, Geräte, Messtechnik*. 7. vollständig überarbeitete und erweiterte Aufl. München: Hanser, 2014. ISBN 3446426256.
- [20] MESCHÉDE, D. *Optik, Licht und Laser*. 3. durchges. Aufl. Wiesbaden: Teubner, 2008. Studium. ISBN 9783835101432.
- [21] DONNEVERT, J. *Die Maxwell'schen Gleichungen. Vom Strömungsfeld des Gleichstroms zum Strahlungsfeld des Hertz'schen Dipols*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015. ISBN 9783658099558.

- [22] LITFIN, G. *Technische Optik in der Praxis*. 3., aktualisierte und erw. Aufl. Berlin: Springer, 2005. ISBN 9786610622658.
- [23] LINDLEIN, N. *Vorlesungsskript: Simulationsmethoden in der Optik*. 2016.
- [24] MITSCHKE, F. *Fiber Optics. Physics and Technology*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010. ISBN 3642037038.
- [25] LÜHE, F. *Optische Signalübertragung mit Lichtwellenleitern. Einführung in die physikalischen Grundlagen*. Wiesbaden: Springer Vieweg. in Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 1993. ISBN 9783322840288
- [26] SCHRÖDER, G. und H. TREIBER. *Technische Optik. Grundlagen und Anwendungen*. 10. erw. Aufl. Würzburg: Vogel, 2007. Kamprath-Reihe. ISBN 3834330868.
- [27] EBERLEIN, D. *Lichtwellenleiter-Technik. Mit 59 Tabellen*. 9. neu überarb. Aufl. Renningen: expert-Verl., 2013. Kontakt & Studium. 596. ISBN 978-3-8169-3212-3.
- [28] STROBEL, O. und T. EBACH. *Lichtwellenleiter-Übertragungs- und Sensortechnik*. 3. aktualisierte und erw. Aufl. Berlin: VDE-Verl., 2014. ISBN 978-3-8007-3266-1.
- [29] ZIEMANN, O., W. DAUM, J. KRAUSER und P.E. ZAMZOW. *POF Handbook. Optical Short Range Transmission Systems*. Second edition. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008. ISBN 3540766294.
- [30] GRAF, J. *Entwicklung und Untersuchungen zur Herstellung verlustarmer passiver Wellenleiter und verstärkender Wellenleiter*. Universität des Saarlandes, 1999.
- [31] LEONI AG. *Fiber Optics. Licht schalten, Licht transportieren, Licht verteilen*. 4. aktualisierte Auflage, 2013. ISBN 978-3-00-029036-7.
- [32] *Glasfaser-Grundlagen* [online] [Zugriff am: 08. Dezember 2019]. Verfügbar unter: <https://www.corning.com/optical-communications/emea/de/home/products/fiber/optical-fiber-basics.html>.
- [33] VDE: 2017, *DIN EN 60793-1-1 Lichtwellenleiter "Messmethoden und Prüfverfahren - Allgemeines und Leitfaden"*. VDE Verlag GmbH.

- [34] ZIEMANN, O., J. KRAUSER, P.E. ZAMZOW und W. DAUM. *POF-Handbuch. Optische Kurzstrecken-Übertragungssysteme (German Edition)*. Dordrecht: Springer, 2007. ISBN 978-3-540-49093-7.
- [35] CRAIOVAN, D. *Prozesse und Systemlösungen für die SMT-Montage optischer Bauelemente auf Substrate mit integrierten Lichtwellenleitern*. Bamberg: Meisenbach, 2012. Fertigungstechnik Erlangen. 223. ISBN 3875253248.
- [36] DANGEL, R., J. HOFRICHTER, F. HORST, D. JUBIN, A. LA PORTA, N. MEIER, I.M. SOGANCI, J. WEISS und B.J. OFFREIN. Polymer waveguides for electro-optical integration in data centers and high-performance computers [online]. *Optics express*, 2015, **23**(4), S. 4736-4750. ISSN 1094-4087. Verfügbar unter: doi:10.1364/OE.23.004736.
- [37] LIN, X., A. HOSSEINI, X. DOU, H. SUBBARAMAN und R.T. CHEN. Low-cost board-to-board optical interconnects using molded polymer waveguide with 45 degree mirrors and inkjet-printed micro-lenses as proximity vertical coupler [online]. *Optics express*, 2013, **21**(1), S. 60-69. ISSN 1094-4087. Verfügbar unter: doi:10.1364/OE.21.000060.
- [38] SCHRÖDER, H., N. ARNDT-STAUFEINBIEL, J. KOSTELNIK, A. BEIER, R. MÖDINGER, S. INTEMAN, E. GRIESE und T. KÜHLER. Elektro-optische Leiterplatten auf Basis von Dünnglaslaminationen mit integrierten optischen Wellenleitern. In: *Elektronische Baugruppen und Leiterplatten - EBL 2008*, 2008.
- [39] M. SIESICKI, K. NIEWEGLOWSKI, K. WOLTER und S. PATELA. Development of sol-gel integrated optical waveguide for Electro-Optical PCB. In: *2008 31st International Spring Seminar on Electronics Technology*, 2008, S. 222-227. ISBN 2161-2064.
- [40] WOLFER, T., P. BOLLGRUEN, D. MAGER, L. OVERMEYER und J.G. KORVINK. Flexographic and Inkjet Printing of Polymer Optical Waveguides for Fully Integrated Sensor Systems [online]. *Procedia Technology*, 2014, **15**, S. 521-529. ISSN 22120173. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.protcy.2014.09.012.
- [41] REITBERGER, T., J. FRANKE, G.-A. HOFFMANN, L. OVERMEYER, L. LORENZ und K.-J. WOLTER. Integration of polymer optical waveguides by using flexographic and aerosol jet printing. In: J. FRANKE, Hg. *2016 12th International Congress*

- Molded Interconnect Devices (MID). Scientific proceedings : September 28th-29th, 2016, Würzburg, Germany.* Nuremberg: Research Association Molded Interconnect Devices 3-D MID e.V, 2016, S. 1-6. ISBN 978-1-5090-5426-8.
- [42] REITBERGER, T., J. HÖRBER, R. SCHRAMM, S. SENNEFELDER und J. FRANKE. Aerosol Jet® Printing of Optical Waveguides. In: IEEE, Hg. *Proceedings of the 38th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE)*, 2015, S. 24-25.
- [43] REITBERGER, T., G.-A. HOFFMANN, T. WOLFER, L. OVERMEYER und J. FRANKE. Printing polymer optical waveguides on conditioned transparent flexible foils by using the aerosol jet technology. In: E.J.W. LIST-KRATOCHVIL, Hg. *SPIE Organic Photonics + Electronics*: SPIE, 2016, 99450G.
- [44] MICRO RESIST TECHNOLOGY GMBH. *EpoCore & EpoClad. Negative Tone Photoresist Series - Produktdatenblätter.*
- [45] REITBERGER, T., F. LOOSEN, A. SCHRAUF, N. LINDLEIN und J. FRANKE. Important parameters of printed polymer optical waveguides (POWs) in simulation and fabrication. In: B. WITZIGMANN, M. OSIŃSKI und Y. ARAKAWA, Hg.: SPIE, 2017, 100981B
- [46] HOFFMANN, G.-A., T. REITBERGER, J. FRANKE und L. OVERMEYER. Conditioning of Surface Energy and Spray Application of Optical Waveguides for Integrated Intelligent Systems [online]. *Procedia Technology*, 2016, **26**, S. 169-176. ISSN 22120173. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.protcy.2016.08.023.
- [47] REITBERGER, T., J. ZEITLER, C. BACKHAUS, G.-A. HOFFMANN, A. WIENKE, L. LORENZ, K. BOCK, K.-J. WOLTER, O. SUTTMANN, L. OVERMEYER, N. LINDLEIN und J. FRANKE. Modeling, Simulation and Manufacturing of Polymer Optical Waveguides by Using the OPTAVER Process. In: *Applied Industrial Optics 2019*. Washington, D.C.: OSA, T2A.1. ISBN 978-1-943580-65-1.
- [48] LORENZ, L., K. NIEWEGLOWSKI, Z. AL-HUSSEINI, N. NEUMANN, D. PLETTEMEIER, T. REITBERGER, J. FRANKE und K. BOCK. Aerosol Jet Printed Optical Waveguides for Short Range Communication [online]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, **38**(13), S. 3478-3484. ISSN 0733-8724. Verfügbar unter: doi:10.1109/JLT.2020.2983792.

- [49] OPTOMECH. *Aerosol jet technology for 3D printed electronics* [online] [Zugriff am: 22. November 2020]. Verfügbar unter: <https://optomech.com/printed-electronics/aerosol-jet-technology/>
- [50] GOTH, C., S. PUTZO und J. FRANKE. Aerosol Jet printing on rapid prototyping materials for fine pitch electronic applications. In: *Sixty First Electronic Components & Technology Conference. May 31 - June 3, 2011*. Piscataway, N.J.: IEEE, 2011, S. 1211-1216. ISBN 978-1-61284-497-8.
- [51] RODDECK, W. *Einführung in die Mechatronik*. 4., überarb. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2012. Springer Vieweg Studium. Grundlagen Maschinenbau. ISBN 3834886262.
- [52] AUSLANDER, D.M. What is mechatronics? [online]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 1996, 1(1), S. 5-9. ISSN 10834435. Verfügbar unter: doi:10.1109/3516.491404.
- [53] FELDHOUSEN, J. und K.-H. GROTE. *Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung*. 8., vollst. überarb. Aufl. 2013. Berlin, Heidelberg: Imprint: Springer Vieweg, 2013. SpringerLink : Bücher. ISBN 364229569X.
- [54] VDI: 1993, *VDI-Richtlinie 2221 "Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme"*.
- [55] LINDEMANN, U., Hg. *Methodische Entwicklung technischer Produkte. Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009. VDI-Buch. ISBN 978-3-642-01422-2.
- [56] X, S.D.f. *Design for X. Beiträge zum 28. DfX-Symposium, Oktober 2017*. Hamburg: Tutech Verlag, TuTech Innovation GmbH, Oktober 2017. ISBN 3946094201.
- [57] HARTLEY, J. *Concurrent engineering. Shortening lead times, raising quality, and lowering costs*. Portland, Or.: Productivity Press, 1998, 1992. ISBN 9781563271892.
- [58] VDI: 2004, *VDI-Richtlinie 2206 "Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme"*.
- [59] HOFFMANN, C.-A. Methodik zur Steuerung eines modularen Baukastens in der Produktentwicklung. In: C.-A. HOFFMANN,

- Hg. *Methodik zur Steuerung modularer Produktbaukästen*. Wiesbaden: Springer, 2018, S. 89-107. ISBN 978-3-658-20561-4.
- [60] EIGNER, M., D. ROUBANOV und R. ZAFIROV. *Modellbasierte virtuelle Produktentwicklung*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014. ISBN 978-3-662-43815-2.
- [61] GAJSKI und KUHN. Guest Editors' Introduction: New VLSI Tools [online]. *Computer*, 1983, **16**(12), S. 11-14. ISSN 0018-9162. Verfügbar unter: doi:10.1109/MC.1983.1654264.
- [62] BOEHM, B.W. Software Engineering Economics. In: M. BRODY und E. DENERT, Hg. *Pioneers and Their Contributions to Software Engineering. Sd & m Conference on Software Pioneers, Bonn, June 28/29, 2001, Original Historic Contributions*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2001, S. 99-150. ISBN 978-3-540-42290-7.
- [63] EIGNER, M. und R. STELZER. *Product Lifecycle Management. Ein Leitfaden für Product Development und Life Cycle Management*. 2., neu bearb. Aufl. Dordrecht: Springer, 2013. VDI. ISBN 9783642325755.
- [64] N.N. Technical Operations - International Council on Systems Engineering. *SYSTEMS ENGINEERING VISION 2020*, 2007.
- [65] EIGNER, M., T. GILZ und R. ZAFIROV. Proposal for functional product description as part of a PLM solution in interdisciplinary product development. Proceedings of the 12th International Design Conference, 2012. ISBN 9789537738174.
- [66] BOGAERTS, W. und L. CHROSTOWSKI. Silicon Photonics Circuit Design: Methods, Tools and Challenges [online]. *Laser & Photonics Reviews*, 2018, **12**(4), S. 1700237. ISSN 18638880. Verfügbar unter: doi:10.1002/lpor.201700237.
- [67] JANSEN, D. *The Electronic Design Automation Handbook*. Boston, MA: Springer US, 2003. ISBN 978-1-4419-5369-8.
- [68] GEREZ, S.H. *Algorithms for VSLI design automation*. Updated with corr. Chichester: Wiley, 2005. ISBN 9780471984894.
- [69] ALPERT, C.J., Hg. *Handbook of algorithms for physical design automation*. Boca Raton, Fla.: CRC Press, 2009. ISBN 0849372429.
- [70] CADENCE. Allegro PCB Designer [Software]. [Zugriff am: 23. November 2020]. Verfügbar unter: www.cadence.com.

- [71] N.N. *Xpedition Enterprise* [online]. *The technology leader for today's most complex PCB systems designs*, 2019 [Zugriff am: 3. September 2019]. Verfügbar unter: http://s3.mentor.com/public_documents/datasheet/pcb/xpedition-brochure.pdf.
- [72] N.N. *Board Layout - CADSTAR PCB Layout* [online]. 2019 [Zugriff am: 3. September 2019]. Verfügbar unter: <https://digital.zuken.com/rs/707-ZQM-176/images/DS-CADSTAR-PCB-Layout-EN.pdf>.
- [73] SHERWANI, N.A. *Algorithms for VLSI physical design automation*. 3rd ed. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2005], 1999. ISBN 9780306475092.
- [74] OPTIWAVE. *Optical SPICE, Screenshot aus Produktvideo* [online]. [Zugriff am: 9. November 2015]. Verfügbar unter: <http://optiwave.com/>.
- [75] KRULL, F. The Origin of Computer Graphics Within General Motors. In: IEEE, Hg. *Annals of the History of Computing*, 1994, S. 40-56.
- [76] MÄNTYLÄ, M. *An introduction to solid modeling*. Rockville, Md.: Computer Science Press, 1988. Principles of computer science series. 13. ISBN 978-0716780151.
- [77] NISCHWITZ, A. *Computergrafik und Bildverarbeitung*. 3. neu bearb. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2012. Studium. ISBN 978-3-8348-1304-6.
- [78] VAJNA, S., C. WEBER, H. BLEY, K. ZEMAN und HEHENBERGER P. *CAX für Ingenieure*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009. ISBN 978-3-540-36038-4.
- [79] WÜNSCH, A. *NX 11 für Einsteiger - kurz und bündig*. 2. Aufl. 2017. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2017. ISBN 3658172894.
- [80] TRZESNIOWSKI, M. *CAD mit CATIA V5. Handbuch mit praktischen Konstruktionsbeispielen aus dem Bereich Fahrzeugtechnik*. Braunschweig: Vieweg, 2002. ISBN 9783528058135.
- [81] KLONINGER, P. *Pro-MECHANICA verstehen lernen. Für Pro/ENGINEER Wildfire 4.0 und Creo Elements/Pro 5.0 (Wildfire 5.0)*. 2. Aufl. Berlin: Springer, 2012. Springer Vieweg. ISBN 3642248411.

- [82] SCHLIEDER, C. *Autodesk Inventor 2013. Grundlagen in Theorie und Praxis*. 4. vollst. überarb. Aufl. Norderstedt: Books on Demand GmbH, 2012. ISBN 3848207761.
- [83] CONRAD, K.-J. *Grundlagen der Konstruktionslehre. Methoden und Beispiele für den Maschinenbau und die Gerontik(C)*. München: Hanser, Carl, 2013. ISBN 3446436677.
- [84] EHRENSPIEL, K. und H. MEERKAMM. *Integrierte Produktentwicklung. Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit*. 5. überarb. und erw. Aufl. München: Hanser, 2013. ISBN 9783446435483.
- [85] BÄRWOLFF, G. *Numerik für Ingenieure, Physiker und Informatiker*. 2. Aufl. 2016. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016. ISBN 3662480158.
- [86] JOSEF HOSCHEK. *Freeform tools in cad systems. A comparison*. Vieweg+Teubner Verlag Stuttgart, 2012. ISBN 9783322867742.
- [87] FARIN, G.E. *Curves and surfaces for computer aided geometric design. A practical guide*. 2. ed., 2. print. Boston u.a.: Academic Press, 1992. Computer science and scientific computing. ISBN 9780122490514.
- [88] HOUSE, D. und J.C. KEYSER. *Foundations of physically based modeling and animation*. Boca Raton: CRC Press, 2017. ISBN 1482234610.
- [89] MODENOV, P.S., A.S. PARKHOMENKO, H. BOOKER, D.A. BROMLEY und N. DECLARIS. *Euclidean and Affine Transformations: Geometric Transformations*. Elsevier Science, 2014. Academic paperbacks. ISBN 9781483261485.
- [90] BUSS, S.R. *3D Computer Graphics: A Mathematical Introduction with OpenGL*. New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2003. ISBN 0521821037.
- [91] HARTLEY, R. und A. ZISSERMAN. *Multiple View Geometry in Computer Vision*. Cambridge University Press, 2004. ISBN 9781139449144.
- [92] ZHUO, Y. *Entwurf eines rechnergestützten integrierten Systems für Konstruktion und Fertigungsplanung räumlicher spritzgegos-*

- sener Schaltungsträger (3D-MID). Univ., Diss.-Erlangen-Nürnberg, 2007. Bamberg: Meisenbach, 2007. Fertigungstechnik - Erlangen. 180. ISBN 9783875252538.
- [93] THOMAS KREBS. *NEXTRA* [online] [Zugriff am: 18. Februar 2018]. Verfügbar unter: <http://www.mecadtron.com/>.
- [94] BRÜDERLIN, B. und D. ROLLER. *Geometric Constraint Solving and Applications*. Springer Berlin Heidelberg, 2012. ISBN 9783642588983.
- [95] ANDERL, R., Hg. *STEP. Standard for the exchange of product model data; eine Einführung in die Entwicklung, Implementierung und industrielle Nutzung der Normenreihe ISO 10303 (STEP)*. Stuttgart: Teubner, 2000. ISBN 351906197X.
- [96] American National Standards Institute. AS 3643.1-1989: 1988, *Computer graphics - Initial graphics exchange specification (IGES) for digital exchange of product definition data - General*: ANSI.
- [97] BIERHOFF, T. und J. SCHRAGE. *Rechnergestützter Entwurf und Simulation von optischen Verbindungen in Leiterplatten*. 2008.
- [98] KREBS, T. *Integration elektromechanischer CA-Anwendungssysteme über einem STEP-Produktmodell*. Bamberg: Meisenbach Verlag, 1996.
- [99] KREBS, T. und J. FRANKE. Konstruktionswerkzeuge für elektronisch/mechanisch integrierte Produkte. ECAD- und MCAD-Funktionen in einem dreidimensionalen Entwicklungssystem integriert. *Elektronik*, 2005, 2005(18), S. 60-66.
- [100] N.N. *EAGLE* [online]. *Leiterplatten - Layouts leicht gemacht*, 2019 [Zugriff am: 3. September 2019]. Verfügbar unter: <https://www.autodesk.de/products/eagle/overview>.
- [101] ZHUO, Y. *Entwurf eines rechnergestützten integrierten Systems für Konstruktion und Fertigungsplanung räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3D-MID)*. Bamberg: Meisenbach, 2007. Fertigungstechnik Erlangen. Bd. 180. ISBN 3875252535.
- [102] FRANKE, J. und K. FELDMANN. *Integrierte Entwicklung neuer Produkt- und Produktionstechnologien für räumliche spritzgegossene Schaltungsträger (3-D MID)*. Zugl.: Erlangen, Nürnberg, Univ., Diss., 1995. München: Hanser, 1995. Fertigungstechnik - Erlangen. 50. ISBN 3446184481.

- [103] CULLEN, F.H., J.J. JARVIS und H.D. RATLIFF. Set partitioning based heuristics for interactive routing [online]. *Networks*, 1981, **11**(2), S. 125-143. ISSN 00283045. Verfügbar unter: doi:10.1002/net.3230110206.
- [104] KAHNG, A.B., J. LIENIG, I.L. MARKOV und J. HU. *VLSI Physical Design. From Graph Partitioning to Timing Closure*. Dordrecht: Springer Science+Business Media B.V, 2011. ISBN 9048195918.
- [105] LIENIG, J. *Layoutsynthese elektronischer Schaltungen -- Grundlegende Algorithmen für die Entwurfsautomatisierung*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006. ISBN 9783540296270.
- [106] JAN, G.E., K.-Y. CHANG, S. GAO und I. PARBERRY. A 4-geometry maze router and its application on multiterminal nets [online]. *ACM Transactions on Design Automation of Electronic Systems*, 2005, **10**(1), S. 116-135. ISSN 10844309. Verfügbar unter: doi:10.1145/1044111.1044118.
- [107] PAUL E. BLACK. *greedy algorithm* [online]. 2 Februar 2005 [Zugriff am: 14. Juni 2019]. Verfügbar unter: <https://www.nist.gov/dads/HTML/greedyalgo.html>.
- [108] DIJKSTRA, E.W. A note on two problems in connexion with graphs [online]. *Numerische Mathematik*, 1959, **1**(1), S. 269-271. ISSN 0029-599X. Verfügbar unter: doi:10.1007/BF01386390.
- [109] PECHT, M.G. und Y.T. WONG. *Advanced routing of electronic modules*. Boca Raton: CRC Press, 1996. Electronic packages, interconnects, and product series. ISBN 9780849396229.
- [110] LEE, C.Y. An Algorithm for Path Connections and Its Applications [online]. *IEEE Transactions on Electronic Computers*, 1961, **EC-10**(3), S. 346-365. ISSN 0367-7508. Verfügbar unter: doi:10.1109/TEC.1961.5219222.
- [111] SAIT, S.M. und H. YOUSSEF. *VLSI physical design automation. Theory and practice*. Repr. Singapore: World Scientific, 2001. Lecture notes series on computing. 6. ISBN 9789810238834.
- [112] SOUKUP, J. Fast Maze Router. In: *Proceedings of the 15th Design Automation Conference*. Piscataway, NJ, USA: IEEE Press, 1978, S. 100-102.

- [113] HADLOCK, F.O. A shortest path algorithm for grid graphs [online]. *Networks*, 1977, 7(4), S. 323-334. ISSN 00283045. Verfügbar unter: doi:10.1002/net.3230070404.
- [114] HART, P., N. NILSSON und B. RAPHAEL. A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths [online]. *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics*, 1968, 4(2), S. 100-107. ISSN 0536-1567. Verfügbar unter: doi:10.1109/TSSC.1968.300136.
- [115] HIGHTOWER, D.W. A solution to line-routing problems on the continuous plane. In: N. GARAFFA, H. FREITAG, G.J. HERSKOWITZ und H.N. LERMAN, Hg. *Proceedings of the 6th annual conference on Design Automation - DAC '69*. New York, New York, USA: ACM Press, 1969, S. 1-24.
- [116] MIKAMI, K. und K. TABUCHI. A computer program for optimal routing of printed circuit conductors. In: *IFIP Congress*, 1968.
- [117] BENTLEY, J.L. Multidimensional binary search trees used for associative searching [online]. *Communications of the ACM*, 1975, 18(9), S. 509-517. ISSN 00010782. Verfügbar unter: doi:10.1145/361002.361007.
- [118] LAUTHER, U. A data structure for gridless routing. In: E.B. HASSLER, R.J. SMITH, P. PISTILLI, L. ABEL, J.S. CRABBE, L.C. BENING, D.W. SHAKLEE und C.E. RADKE, Hg. *Design Automation, 1982. 19th Conference on*. New York, New York, USA: ACM Press, 1982, S. 603-609. ISBN 0897910206.
- [119] FINCH, A.C., K.J. MACKENZIE, G.J. BALSDON und G. SYMONDS. A Method for Gridless Routing of Printed Circuit Boards. In: *23rd ACM/IEEE Design Automation Conference. June 29-July 2, 1986, Caesars Palace, Las Vegas, Nevada : proceedings 1986*. [Silver Spring, Md.]: IEEE Computer Society Press, 1986, S. 509-515. ISBN 0-8186-0635-5.
- [120] PECHT, M. *Placement and routing of electronic modules*. New York: Dekker, 1993. Electrical engineering and electronics. 82. ISBN 9780824789169.
- [121] SCHIELE, W.L., T. KRUGER, K.M. JUST und F.H. KIRSCH. A gridless router for industrial design rules. In: *Proceedings: ACM*. New York: IEEE; ACM, 1990, S. 626-631. ISBN 0-89791-363-9.

- [122] JASON HOWIE. *Topological Autorouting* [online], 2019 [Zugriff am: 3. Juni 2019]. Verfügbar unter: <https://www.altium.com>.
- [123] CHEN, J., D. ZHAO, Z. HUANG, Y. ZHENG und S. GAO. Three-dimensional Constrained Boundary Recovery with an Enhanced Steiner Point Suppression Procedure [online]. *Comput. Struct.*, 2011, **89**(5-6), S. 455-466. ISSN 0045-7949. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.compstruc.2010.11.016.
- [124] COHEN-STEINER, D., É.C. de VERDIÈRE und M. YVINEC. Conforming Delaunay Triangulations in 3D. In: *Proceedings of the Eighteenth Annual Symposium on Computational Geometry*. New York, NY, USA: ACM, 2002, S. 199-208. ISBN 1-58113-504-1.
- [125] KALLMANN, M. Path Planning in Triangulations Marcelo Kallmann. 2005.
- [126] PINTER, R.Y. River Routing: Methodology and Analysis. In: R. BRYANT, Hg. *Third Caltech Conference on Very Large Scale Integration*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1983, S. 141-163. ISBN 978-3-642-95432-0.
- [127] ZAWARE, A.B. und M.M. MIRZA. Customization of UG NX software for 3D modelling of Fins. In: *National Conference for Engineering Post Graduates RIT*, S. 67-72.
- [128] JEDEC. *Global Standards for the Microelectronics Industry* [online], 2019 [Zugriff am: 15. Juli 2019]. Verfügbar unter: <https://www.jedec.org/standards-documents>.
- [129] OCTOPART.COM. *Octopart API* [online], 2019 [Zugriff am: 15. Juli 2019].
- [130] SPONSEL, P. *Recherche zur integrativen Entwicklung räumlicher optomechatronischer Baugruppen*. Bachelorarbeit. Erlangen, 30. September 2015.
- [131] CARSTEN BACKHAUS, FLORIAN DÖTZER, GERD-ALBERT HOFFMANN, LUKAS LORENZ, LUDGER OVERMEYER, KARL-HEINZ BOCK, AND NORBERT LINDLEIN. New concept of a polymer optical ray splitter simulated by Raytracing with a new Bisection-Algorithm. In: OPTICAL SOCIETY OF AMERICA, 2019, Hg. *Frontiers in Optics 2019*. Washington, DC United States, 2019. ISBN 978-1-943580-67-5.

- [132] VINOGRADOV, J., R. KRUGLOV, R. ENGELBRECHT, O. ZIE-MANN, J.-K. SHEU, K.-L. CHI, J.-M. WUN und J.-W. SHI. GaN-Based Cyan Light-Emitting Diode with up to 1-GHz Bandwidth for High-Speed Transmission Over SI-POF [online]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(3), S. 1-7. ISSN 1943-0655. Verfügbar unter: doi:10.1109/JPHOT.2017.2693207.
- [133] ANKENBRAND, M., Y. EICHE und J. FRANKE. Programming and Evaluation of a Multi-Axis/Multi-Process Manufacturing System for Mechatronic Integrated Devices. In: *2019 International Conference on Electronics Packaging*. 17-20 April 2019, Niigata, Japan. Piscataway, New Jersey: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2019, S. 273-278. ISBN 978-4-9902-1887-4.

Promotionsbezogene eigene Publikationen

- [P1] ZEITLER, J., A. REICHLE, J. FRANKE, F. LOOSEN, C. BACKHAUS und LINDLEIN NORBERT. Computer-Aided Design and Simulation of Spatial Opto-Mechatronic Interconnect Devices. In: *26th CIRP Design Conference*, 2016, S. 727-732.
- [P2] FRANKE, J., J. ZEITLER und T. REITBERGER. A novel engineering process for spatial opto-mechatronic applications [online]. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 2016, **65**(1), S. 153-156. Verfügbar unter: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2016.04.091>.
- [P3] LOOSEN, F., BACKHAUS CARSTEN, J. ZEITLER, G.-A. HOFFMANN, T. REITBERGER, L. LORENZ, N. LINDLEIN, J. FRANKE, L. OVERMEYER, O. SUTTMANN, K.-J. WOLTER, K. BOCK und C. BACKHAUS. Approach for the production chain of printed polymer optical waveguides-an overview [online]. *Applied Optics*, 2017, **2017** // **56**(Vol. 56 // 31), S. 8607-8617. Verfügbar unter: [doi:10.1364/AO.56.008607](https://doi.org/10.1364/AO.56.008607).
- [P4] HOFFMANN, G.-A., T. WOLFER, J. ZEITLER, J. FRANKE, O. SUTTMANN und L. OVERMEYER. Manufacturing of polymer optical waveguides using self-assembly effect on pre-conditioned 3D-thermoformed flexible substrates. In: G. von FREYMAN, W.V. SCHOENFELD und R.C. RUMPF, Hg. *Advanced Fabrication Technologies for Micro/Nano Optics and Photonics X*: SPIE, 2017, S. 1011503.
- [P5] ZEITLER, J., C. FISCHER, B. GOETZE, S.H. MOGHADAS und J. FRANKE. Integration of Semi-Automated Routing Algorithms for Spatial Circuit Carriers into Computer-Aided Design Tools. In: VDE, Hg. *Proceedings of the 13th Electronic Circuits World Convention*. Berlin: VDE Verlag GmbH, 2014. ISBN 978-3-8007-3606-5.
- [P6] ZEITLER, J., B. GOETZE, C. FISCHER und J. FRANKE. Novel Approach for Implementation of 3D-MID Compatible Functionalities into Computer-Aided Design Tools. In: J. FRANKE, T. KUHN, A. BIRKICHT und A. POJTINGER, Hg. *11th International Congress Molded Interconnect Devices. Scientific Proceedings*. Pfaffikon: Trans Tech Publications Ltd, 2014. ISBN 9789038352525.

- [P7] ZEITLER, J., N. URBAN, C. KÜHN und J. FRANKE. Engineering von mechatronischen Baugruppen für die additive Fertigung. *Konstruktion*, 2017, (11-12), S. 67-82.
- [P8] LOOSEN, F., C. BACKHAUS, N. LINDLEIN, J. ZEITLER und J. FRANKE. Design and simulation rules for printed optical waveguides with implemented scattering methods in CAD and ray-tracing software. In: DGAO, Hg. *117th DGaO Proceedings*, 2016.
- [P9] LOOSEN, F., C. BACKHAUS, N. LINDLEIN, J. ZEITLER und J. FRANKE. Implementation of a Scattering Method for Rough Surfaces in a Raytracing Software linked with a CAD (Computer-Aided Design) Toolbox. In: OPTICAL SOCIETY OF AMERICA, Hg. *Frontiers in Optics 2016*, 2016. ISBN ISBN: 978-1-943580-19-4.
- [P10] ZEITLER, J., C. FISCHER und J. FRANKE. Ansatz zur integrativen Entwicklung räumlicher optomechatronischer Baugruppen. In: HEINZ NIXDORF INSTITUT und UNIVERSITÄT PADERBORN, Hg. *Wissenschafts- und Industrieforum Intelligente Technische Systeme. 10. Workshop Entwurf mechatronischer Systeme*, 2015, S. 239-250.
- [P11] ZEITLER, J. *Teilautomatisiertes 3D-Routing für mechatronische MID-Bauteile mit integrierten Design-Rule-Checks. MID-Layout*, 23. Juni 2016.
- [P12] ZEITLER, J. REITBERGER, T. REICHLE, A. BACKHAUS , C. LINDLEIN, N. FRANKE, J. Technical Modelling Approach for Spatial Integrated Optomechatronic Products. In: *29th CIRP Design Conference 2019*: Elsevier, S. 713-718.
- [P13] BACKHAUS, C., N. LINDLEIN, J.T. ZEITLER und J. FRANKE. Beeinflussung der optischen Eigenschaften von Polymer Optischen Wellenleitern durch das Druckpfad-Design. In: DGAO, Hg. *DGaO Proceedings. ISBN 1614-8436*.
- [P14] LOOSEN, F., C. BACKHAUS, N. LINDLEIN, J. ZEITLER und J. FRANKE. Concepts for the design and optimization process of printed polymer-based optical waveguides (scattering processes). In: ABBE SCHOOL OF PHOTONICS, Hg. *DoKDoK 2015 Proceedings*, 2015.

Promotionsbezogene und betreute studentische Arbeiten

- [S1] REICHLE, A. *Development of a knowledge-based method for computer-aided integrated product design of 3D-Opto-MID*. Projektarbeit. Erlangen, 12. Dezember 2017.
- [S2] PETER, D. *Konzeptentwicklung zum integrativen CAD-Entwurf optomechatronischer Baugruppen*. Bachelorarbeit. Erlangen, 11. November 2015.
- [S3] REICHLE, A. *Development of Novel 3D Layout Design Tools for the Integrated and Continuous Design of 3D-(Opto-)MID*. Masterarbeit. Erlangen, 6. Januar 2019.
- [S4] OSCHMANN, R. *Entwicklung eines Plug-Ins zum teilautomatisierten 3D-Routing für räumlich spritzgegossene mechatronische Bauteile mit integrierter Designregelprüfung auf Basis eines plattformunabhängigen Austauschformats*. Masterarbeit. Erlangen, 15. Mai 2014.
- [S5] REICHLE, A. *Entwicklung eines integrierten CAx-Werkzeugs zur Konstruktion und Fertigung von räumlich spritzgegossenen Schalungsträgern*. Bachelorarbeit. Erlangen, 10. September 2014.
- [S6] HAGER, F. *Erstellung eines Modells zu optischen Eigenschaften in polymeren Wellenleitern*. Projektarbeit. Erlangen, 9. Mai 2017.
- [S7] NICKL, K. *Entwicklung einer Vorgehensweise zur Generierung von Druckvorlagen für Lichtwellenleiter im 3D-CAD*. Bachelorarbeit. Erlangen, 2. Juni 2017.
- [S8] XIA, B. *Conception of a Prototype Implementation for the Intelligent Integration of Optoelectronic Components and Circuit Diagrams*. Bachelorarbeit. Erlangen, 1. März 2020.
- [S9] SCHIEßL, F. *Einbindung von Konstruktionsfunktionen zum Erstellen von optischen Wellenleitern im CAD*. Erlangen, 4. September 2016.
- [S10] HAGER, F. *Studie zur Absicherung gedruckter polymerer Wellenleiter mittels digitaler Modelle*. Masterarbeit. Erlangen, 1. August 2018.
- [S11] MAYER, T. *Analyse und Bewertung optischer Design- und Simulationmethoden mit dem Ziel einer Ableitung neuer Modellierungstechniken für 3D-Opto-MID*. Projektarbeit. Erlangen, 3. April 2018.

- [S12] SIVERS, S. von. *Konzeption und Entwicklung eines Softwarede-
monstrators zur Integration optischer Konstruktionsrichtlinien
für die rechnergestützte Modellierung*. Masterarbeit. Erlangen, 15.
Dezember 2017.

Reihenübersicht

Koordination der Reihe (Stand 2021):

Geschäftsstelle Maschinenbau, Dr.-Ing. Oliver Kreis, www.mb.fau.de/diss/

Im Rahmen der Reihe sind bisher die nachfolgenden Bände erschienen.

Band 1 – 52

Fertigungstechnik – Erlangen

ISSN 1431-6226

Carl Hanser Verlag, München

Band 53 – 307

Fertigungstechnik – Erlangen

ISSN 1431-6226

Meisenbach Verlag, Bamberg

ab Band 308

FAU Studien aus dem Maschinenbau

ISSN 2625-9974

FAU University Press, Erlangen

Die Zugehörigkeit zu den jeweiligen Lehrstühlen ist wie folgt gekennzeichnet:

Lehrstühle:

FAPS	Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik
FMT	Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik
KTmfk	Lehrstuhl für Konstruktionstechnik
LFT	Lehrstuhl für Fertigungstechnologie
LPT	Lehrstuhl für Photonische Technologien
REP	Lehrstuhl für Ressourcen- und Energieeffiziente Produktionsmaschinen

Band 1: Andreas Hemberger
Innovationspotentiale in der
rechnerintegrierten Produktion durch
wissensbasierte Systeme
FAPS, 208 Seiten, 107 Bilder. 1988.
ISBN 3-446-15234-2.

Band 2: Detlef Classe
Beitrag zur Steigerung der Flexibilität
automatisierter Montagesysteme
durch Sensorintegration und erweiterte
Steuerungskonzepte
FAPS, 194 Seiten, 70 Bilder. 1988.
ISBN 3-446-15529-5.

Band 3: Friedrich-Wilhelm Nolting
Projektierung von Montagesystemen
FAPS, 201 Seiten, 107 Bilder, 1 Tab. 1989.
ISBN 3-446-15541-4.

Band 4: Karsten Schlüter
Nutzungsgradsteigerung von
Montagesystemen durch den Einsatz
der Simulationstechnik
FAPS, 177 Seiten, 97 Bilder. 1989.
ISBN 3-446-15542-2.

Band 5: Shir-Kuan Lin
Aufbau von Modellen zur Lageregelung
von Industrierobotern
FAPS, 168 Seiten, 46 Bilder. 1989.
ISBN 3-446-15546-5.

Band 6: Rudolf Nuss
Untersuchungen zur Bearbeitungsquali-
tät im Fertigungssystem Laserstrahl-
schneiden
LFT, 206 Seiten, 115 Bilder, 6 Tab. 1989.
ISBN 3-446-15783-2.

Band 7: Wolfgang Scholz
Modell zur datenbankgestützten Planung
automatisierter Montageanlagen
FAPS, 194 Seiten, 89 Bilder. 1989.
ISBN 3-446-15825-1.

Band 8: Hans-Jürgen Wißmeier
Beitrag zur Beurteilung des Bruchverhal-
tens von Hartmetall-Fließpreßmatrizen
LFT, 179 Seiten, 99 Bilder, 9 Tab. 1989.
ISBN 3-446-15921-5.

Band 9: Rainer Eisele
Konzeption und Wirtschaftlichkeit von
Planungssystemen in der Produktion
FAPS, 183 Seiten, 86 Bilder. 1990.
ISBN 3-446-16107-4.

Band 10: Rolf Pfeiffer
Technologisch orientierte
Montageplanung am Beispiel der
Schraubtechnik
FAPS, 216 Seiten, 102 Bilder, 16 Tab. 1990.
ISBN 3-446-16161-9.

Band 11: Herbert Fischer
Verteilte Planungssysteme zur
Flexibilitätssteigerung der
rechnerintegrierten Teilefertigung
FAPS, 201 Seiten, 82 Bilder. 1990.
ISBN 3-446-16105-8.

Band 12: Gerhard Kleineidam
CAD/CAP: Rechnergestützte Montage-
feinplanung
FAPS, 203 Seiten, 107 Bilder. 1990.
ISBN 3-446-16112-0.

Band 13: Frank Vollertsen
Pulvermetallurgische Verarbeitung eines
übereutektoiden verschleißfesten Stahls
LFT, XIII u. 217 Seiten, 67 Bilder, 34 Tab.
1990. ISBN 3-446-16133-3.

Band 14: Stephan Biermann
Untersuchungen zur Anlagen- und
Prozeßdiagnostik für das Schneiden
mit CO₂-Hochleistungslasern
LFT, VIII u. 170 Seiten, 93 Bilder, 4 Tab.
1991. ISBN 3-446-16269-0.

Band 15: Uwe Geißler
Material- und Datenfluß in einer flexib-
len Blechbearbeitungszelle
LFT, 124 Seiten, 41 Bilder, 7 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16358-1.

Band 16: Frank Oswald Hake
Entwicklung eines rechnergestützten
Diagnosesystems für automatisierte
Montagezellen
FAPS, XIV u. 166 Seiten, 77 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16428-6.

Band 17: Herbert Reichel
Optimierung der Werkzeugbereitstellung
durch rechnergestützte
Arbeitsfolgenbestimmung
FAPS, 198 Seiten, 73 Bilder, 2 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16453-7.

Band 18: Josef Scheller
Modellierung und Einsatz von
Softwaresystemen für rechnergeführte
Montagezellen
FAPS, 198 Seiten, 65 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16454-5.

Band 19: Arnold vom Ende
Untersuchungen zum Biegeumforme mit
elastischer Matrize
LFT, 166 Seiten, 55 Bilder, 13 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16493-6.

Band 20: Joachim Schmid
Beitrag zum automatisierten Bearbeiten
von Keramikguß mit Industrierobotern
FAPS, XIV u. 176 Seiten, 111 Bilder, 6 Tab.
1991. ISBN 3-446-16560-6.

Band 21: Egon Sommer
Multiprozessorsteuerung für
kooperierende Industrieroboter in
Montagezellen
FAPS, 188 Seiten, 102 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-17062-6.

Band 22: Georg Geyer
Entwicklung problemspezifischer
Verfahrensketten in der Montage
FAPS, 192 Seiten, 112 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16552-5.

Band 23: Rainer Flohr
Beitrag zur optimalen
Verbindungstechnik in der
Oberflächenmontage (SMT)
FAPS, 186 Seiten, 79 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16568-1.

Band 24: Alfons Rief
Untersuchungen zur Verfahrensfolge
Laserstrahlschneiden und -schweißen
in der Rohkarosseriefertigung
LFT, VI u. 145 Seiten, 58 Bilder, 5 Tab.
1991. ISBN 3-446-16593-2.

Band 25: Christoph Thim
Rechnerunterstützte Optimierung
von Materialflußstrukturen in der
Elektronikmontage durch Simulation
FAPS, 188 Seiten, 74 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17118-5.

Band 26: Roland Müller
CO₂-Laserstrahlschneiden von
kurzglasverstärkten Verbundwerkstoffen
LFT, 141 Seiten, 107 Bilder, 4 Tab. 1992.
ISBN 3-446-17104-5.

Band 27: Günther Schäfer
Integrierte Informationsverarbeitung
bei der Montageplanung
FAPS, 195 Seiten, 76 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17117-7.

Band 28: Martin Hoffmann
Entwicklung einer
CAD/CAM-Prozeßkette für die
Herstellung von Blechbiegeteilen
LFT, 149 Seiten, 89 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17154-1.

Band 29: Peter Hoffmann
Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden
und -schweißen: Prozeßführung und
Systemtechnik in der 3D-Laserstrahlbear-
beitung von Blechformteilen
LFT, 186 Seiten, 92 Bilder, 10 Tab. 1992.
ISBN 3-446-17153-3.

Band 30: Olaf Schrödel
Flexible Werkstattsteuerung mit
objektorientierten Softwarestrukturen
FAPS, 180 Seiten, 84 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17242-4.

Band 31: Hubert Reinisch
Planungs- und Steuerungswerkzeuge zur
impliziten Geräteprogrammierung
in Roboterzellen
FAPS, XI u. 212 Seiten, 112 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17380-3.

Band 32: Brigitte Bärnreuther
Ein Beitrag zur Bewertung des Kommuni-
kationsverhaltens von Automatisierungs-
geräten in flexiblen Produktionszellen
FAPS, XI u. 179 Seiten, 71 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17451-6.

Band 33: Joachim Hutfless
Laserstrahlregelung und Optikdiagnostik
in der Strahlführung einer
CO₂-Hochleistungslaseranlage
LFT, 175 Seiten, 70 Bilder, 17 Tab. 1993.
ISBN 3-446-17532-6.

Band 34: Uwe Günzel
Entwicklung und Einsatz eines Simula-
tionsverfahrens für operative und
strategische Probleme der
Produktionsplanung und -steuerung
FAPS, XIV u. 170 Seiten, 66 Bilder, 5 Tab.
1993. ISBN 3-446-17604-7.

Band 35: Bertram Ehmann
Operatives Fertigungscontrolling durch
Optimierung auftragsbezogener Bearbei-
tungsabläufe in der Elektronikfertigung
FAPS, XV u. 167 Seiten, 114 Bilder. 1993.
ISBN 3-446-17658-6.

Band 36: Harald Kolléra
Entwicklung eines benutzerorientierten
Werkstattprogrammiersystems für das
Laserstrahlschneiden
LFT, 129 Seiten, 66 Bilder, 1 Tab. 1993.
ISBN 3-446-17719-1.

Band 37: Stephanie Abels
Modellierung und Optimierung von
Montageanlagen in einem integrierten
Simulationssystem
FAPS, 188 Seiten, 88 Bilder. 1993.
ISBN 3-446-17731-0.

Band 38: Robert Schmidt-Hebbel
Laserstrahlbohren durchflußbestimmen-
der Durchgangslöcher
LFT, 145 Seiten, 63 Bilder, 11 Tab. 1993.
ISBN 3-446-17778-7.

Band 39: Norbert Lutz
Oberflächenfeinbearbeitung
keramischer Werkstoffe mit
XeCl-Excimerlaserstrahlung
LFT, 187 Seiten, 98 Bilder, 29 Tab. 1994.
ISBN 3-446-17970-4.

Band 40: Konrad Grampp
Rechnerunterstützung bei Test und
Schulung an Steuerungssoftware von
SMD-Bestücklinien
FAPS, 178 Seiten, 88 Bilder. 1995.
ISBN 3-446-18173-3.

Band 41: Martin Koch
Wissensbasierte Unterstützung der
Angebotsbearbeitung in der
Investitionsgüterindustrie
FAPS, 169 Seiten, 68 Bilder. 1995.
ISBN 3-446-18174-1.

Band 42: Armin Gropp
Anlagen- und Prozeßdiagnostik beim
Schneiden mit einem gepulsten
Nd:YAG-Laser
LFT, 160 Seiten, 88 Bilder, 7 Tab. 1995.
ISBN 3-446-18241-1.

Band 43: Werner Heckel
Optische 3D-Konturerfassung und
on-line Biegewinkelmessung mit
dem Lichtschnittverfahren
LFT, 149 Seiten, 43 Bilder, 11 Tab. 1995.
ISBN 3-446-18243-8.

Band 44: Armin Rothhaupt
Modulares Planungssystem zur
Optimierung der Elektronikfertigung
FAPS, 180 Seiten, 101 Bilder. 1995.
ISBN 3-446-18307-8.

Band 45: Bernd Zöllner
Adaptive Diagnose in der
Elektronikproduktion
FAPS, 195 Seiten, 74 Bilder, 3 Tab. 1995.
ISBN 3-446-18308-6.

Band 46: Bodo Vormann
Beitrag zur automatisierten
Handhabungsplanung komplexer
Blechbiegeteile
LFT, 126 Seiten, 89 Bilder, 3 Tab. 1995.
ISBN 3-446-18345-0.

Band 47: Peter Schnepf
Zielkostenorientierte Montageplanung
FAPS, 144 Seiten, 75 Bilder. 1995.
ISBN 3-446-18397-3.

Band 48: Rainer Klotzbücher
Konzept zur rechnerintegrierten
Materialversorgung in flexiblen
Fertigungssystemen
FAPS, 156 Seiten, 62 Bilder. 1995.
ISBN 3-446-18412-0.

Band 49: Wolfgang Greska
Wissensbasierte Analyse und
Klassifizierung von Blechteilen
LFT, 144 Seiten, 96 Bilder. 1995.
ISBN 3-446-18462-7.

Band 50: Jörg Franke
Integrierte Entwicklung neuer
Produkt- und Produktionstechnologien
für räumliche spritzgegossene
Schaltungsträger (3-D MID)
FAPS, 196 Seiten, 86 Bilder, 4 Tab. 1995.
ISBN 3-446-18448-1.

Band 51: Franz-Josef Zeller
Sensorplanung und schnelle
Sensorregelung für Industrieroboter
FAPS, 190 Seiten, 102 Bilder, 9 Tab. 1995.
ISBN 3-446-18601-8.

Band 52: Michael Solvie
Zeitbehandlung und
Multimedia-Unterstützung in
Feldkommunikationssystemen
FAPS, 200 Seiten, 87 Bilder, 35 Tab. 1996.
ISBN 3-446-18607-7.

Band 53: Robert Hopperdietzel
Reengineering in der Elektro- und
Elektronikindustrie
FAPS, 180 Seiten, 109 Bilder, 1 Tab. 1996.
ISBN 3-87525-070-2.

Band 54: Thomas Rebhahn
Beitrag zur Mikromaterialbearbeitung
mit Excimerlasern - Systemkomponenten
und Verfahrensoptimierungen
LFT, 148 Seiten, 61 Bilder, 10 Tab. 1996.
ISBN 3-87525-075-3.

Band 55: Henning Hanebuth
Laserstrahlhartlöten mit
Zweistrahlschweißtechnik
LFT, 157 Seiten, 58 Bilder, 11 Tab. 1996.
ISBN 3-87525-074-5.

Band 56: Uwe Schönherr
Steuerung und Sensordatenintegration
für flexible Fertigungszellen mit
kooperierenden Robotern
FAPS, 188 Seiten, 116 Bilder, 3 Tab. 1996.
ISBN 3-87525-076-1.

Band 57: Stefan Holzer
Berührungslose Formgebung mit
Laserstrahlung
LFT, 162 Seiten, 69 Bilder, 11 Tab. 1996.
ISBN 3-87525-079-6.

Band 58: Markus Schultz
Fertigungsqualität beim
3D-Laserstrahlschweißen von
Blechformteilen
LFT, 165 Seiten, 88 Bilder, 9 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-080-X.

Band 59: Thomas Krebs
Integration elektromechanischer
CA-Anwendungen über einem
STEP-Produktmodell
FAPS, 198 Seiten, 58 Bilder, 8 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-081-8.

Band 60: Jürgen Sturm
Prozeßintegrierte Qualitätssicherung
in der Elektronikproduktion
FAPS, 167 Seiten, 112 Bilder, 5 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-082-6.

Band 61: Andreas Brand
Prozesse und Systeme zur Bestückung
räumlicher elektronischer Baugruppen
(3D-MID)
FAPS, 182 Seiten, 100 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-087-7.

Band 62: Michael Kauf
Regelung der Laserstrahlleistung und
der Fokusparameter einer
CO₂-Hochleistungslaseranlage
LFT, 140 Seiten, 70 Bilder, 5 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-083-4.

Band 63: Peter Steinwasser
Modulares Informationsmanagement
in der integrierten Produkt- und
Prozeßplanung
FAPS, 190 Seiten, 87 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-084-2.

Band 64: Georg Liedl
Integriertes Automatisierungskonzept
für den flexiblen Materialfluß in der
Elektronikproduktion
FAPS, 196 Seiten, 96 Bilder, 3 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-086-9.

Band 65: Andreas Otto
Transiente Prozesse beim
Laserstrahlschweißen
LFT, 132 Seiten, 62 Bilder, 1 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-089-3.

Band 66: Wolfgang Blöchl
Erweiterte Informationsbereitstellung
an offenen CNC-Steuerungen zur
Prozeß- und Programmoptimierung
FAPS, 168 Seiten, 96 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-091-5.

Band 67: Klaus-Uwe Wolf
Verbesserte Prozeßführung und
Prozeßplanung zur Leistungs- und
Qualitätssteigerung beim
Spulenwickeln
FAPS, 186 Seiten, 125 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-092-3.

Band 68: Frank Backes
Technologieorientierte Bahnplanung
für die 3D-Laserstrahlbearbeitung
LFT, 138 Seiten, 71 Bilder, 2 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-093-1.

Band 69: Jürgen Kraus
Laserstrahlumformen von Profilen
LFT, 137 Seiten, 72 Bilder, 8 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-094-X.

Band 70: Norbert Neubauer
Adaptive Strahlführungen für
CO₂-Laseranlagen
LFT, 120 Seiten, 50 Bilder, 3 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-095-8.

Band 71: Michael Steber
Prozeßoptimierter Betrieb flexibler
Schraubstationen in der
automatisierten Montage
FAPS, 168 Seiten, 78 Bilder, 3 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-096-6.

Band 72: Markus Pfestorf
Funktionale 3D-Oberflächenkenngrößen
in der Umformtechnik
LFT, 162 Seiten, 84 Bilder, 15 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-097-4.

Band 73: Volker Franke

Integrierte Planung und Konstruktion von Werkzeugen für die Biegebearbeitung

LFT, 143 Seiten, 81 Bilder. 1998.

ISBN 3-87525-098-2.

Band 74: Herbert Scheller

Automatisierte Demontagesysteme und recyclinggerechte Produktgestaltung elektronischer Baugruppen

FAPS, 184 Seiten, 104 Bilder, 17 Tab. 1998.

ISBN 3-87525-099-0.

Band 75: Arthur Meßner

Kaltmassivumformung metallischer Kleinstteile – Werkstoffverhalten, Wirkflächenreibung, Prozeßauslegung

LFT, 164 Seiten, 92 Bilder, 14 Tab. 1998.

ISBN 3-87525-100-8.

Band 76: Mathias Glasmacher

Prozeß- und Systemtechnik zum Laserstrahl-Mikroschweißen

LFT, 184 Seiten, 104 Bilder, 12 Tab. 1998.

ISBN 3-87525-101-6.

Band 77: Michael Schwind

Zerstörungsfreie Ermittlung mechanischer Eigenschaften von Feinblechen mit dem Wirbelstromverfahren

LFT, 124 Seiten, 68 Bilder, 8 Tab. 1998.

ISBN 3-87525-102-4.

Band 78: Manfred Gerhard

Qualitätssteigerung in der Elektronikproduktion durch Optimierung der Prozeßführung beim Löten komplexer Baugruppen

FAPS, 179 Seiten, 113 Bilder, 7 Tab. 1998.

ISBN 3-87525-103-2.

Band 79: Elke Rauh

Methodische Einbindung der Simulation in die betrieblichen Planungs- und Entscheidungsabläufe

FAPS, 192 Seiten, 114 Bilder, 4 Tab. 1998.

ISBN 3-87525-104-0.

Band 80: Sorin Niederkorn

Meßeinrichtung zur Untersuchung der Wirkflächenreibung bei umformtechnischen Prozessen

LFT, 99 Seiten, 46 Bilder, 6 Tab. 1998.

ISBN 3-87525-105-9.

Band 81: Stefan Schuberth

Regelung der Fokusslage beim Schweißen mit CO₂-Hochleistungslasern unter Einsatz von adaptiven Optiken

LFT, 140 Seiten, 64 Bilder, 3 Tab. 1998.

ISBN 3-87525-106-7.

Band 82: Armando Walter Colombo

Development and Implementation of Hierarchical Control Structures of Flexible Production Systems Using High Level Petri Nets

FAPS, 216 Seiten, 86 Bilder. 1998.

ISBN 3-87525-109-1.

Band 83: Otto Meedt

Effizienzsteigerung bei Demontage und Recycling durch flexible Demontagetechnologien und optimierte Produktgestaltung

FAPS, 186 Seiten, 103 Bilder. 1998.

ISBN 3-87525-108-3.

Band 84: Knuth Götz

Modelle und effiziente Modellbildung zur Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion

FAPS, 212 Seiten, 129 Bilder, 24 Tab. 1998.

ISBN 3-87525-112-1.

Band 85: Ralf Luchs
Einsatzmöglichkeiten leitender Klebstoffe zur zuverlässigen Kontaktierung elektronischer Bauelemente in der SMT
FAPS, 176 Seiten, 126 Bilder, 30 Tab. 1998.
ISBN 3-87525-113-7.

Band 86: Frank Pöhlau
Entscheidungsgrundlagen zur Einführung räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID)
FAPS, 144 Seiten, 99 Bilder. 1999.
ISBN 3-87525-114-8.

Band 87: Roland T. A. Kals
Fundamentals on the miniaturization of sheet metal working processes
LFT, 128 Seiten, 58 Bilder, 11 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-115-6.

Band 88: Gerhard Luhn
Implizites Wissen und technisches Handeln am Beispiel der Elektronikproduktion
FAPS, 252 Seiten, 61 Bilder, 1 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-116-4.

Band 89: Axel Sprenger
Adaptives Streckbiegen von Aluminium-Strangpreßprofilen
LFT, 114 Seiten, 63 Bilder, 4 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-117-2.

Band 90: Hans-Jörg Pucher
Untersuchungen zur Prozeßfolge Umformen, Bestücken und Laserstrahllöten von Mikrokontakten
LFT, 158 Seiten, 69 Bilder, 9 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-119-9.

Band 91: Horst Arnet
Profilbiegen mit kinematischer Gestalterzeugung
LFT, 128 Seiten, 67 Bilder, 7 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-120-2.

Band 92: Doris Schubart
Prozeßmodellierung und Technologieentwicklung beim Abtragen mit CO₂-Laserstrahlung
LFT, 133 Seiten, 57 Bilder, 13 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-122-9.

Band 93: Adrianus L. P. Coremans
Laserstrahlsintern von Metallpulver - Prozeßmodellierung, Systemtechnik, Eigenschaften laserstrahlgesinterter Metallkörper
LFT, 184 Seiten, 108 Bilder, 12 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-124-5.

Band 94: Hans-Martin Biehler
Optimierungskonzepte für Qualitätsdatenverarbeitung und Informationsbereitstellung in der Elektronikfertigung
FAPS, 194 Seiten, 105 Bilder. 1999.
ISBN 3-87525-126-1.

Band 95: Wolfgang Becker
Oberflächenausbildung und tribologische Eigenschaften excimerlaserstrahlbearbeiteter Hochleistungskeramiken
LFT, 175 Seiten, 71 Bilder, 3 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-127-X.

Band 96: Philipp Hein
Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren: Modellierung, Prozeßauslegung und Prozeßführung
LFT, 129 Seiten, 57 Bilder, 7 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-128-8.

Band 97: Gunter Beitinger
Herstellungs- und Prüfverfahren für
thermoplastische Schaltungsträger
FAPS, 169 Seiten, 92 Bilder, 20 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-129-6.

Band 98: Jürgen Knobloch
Beitrag zur rechnerunterstützten
verursachungsgerechten
Angebotskalkulation von Blechteilen
mit Hilfe wissenschaftlicher Methoden
LFT, 155 Seiten, 53 Bilder, 26 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-130-X.

Band 99: Frank Breitenbach
Bildverarbeitungssystem zur Erfassung
der Anschlußgeometrie elektronischer
SMT-Bauelemente
LFT, 147 Seiten, 92 Bilder, 12 Tab. 2000.
ISBN 3-87525-131-8.

Band 100: Bernd Falk
Simulationsbasierte
Lebensdauervorhersage für Werkzeuge
der Kaltmassivumformung
LFT, 134 Seiten, 44 Bilder, 15 Tab. 2000.
ISBN 3-87525-136-9.

Band 101: Wolfgang Schlögl
Integriertes Simulationsdaten-Management für Maschinenentwicklung und
Anlagenplanung
FAPS, 169 Seiten, 101 Bilder, 20 Tab. 2000.
ISBN 3-87525-137-7.

Band 102: Christian Hinsel
Ermüdungsbruchversagen
hartstoffbeschichteter Werkzeugstähle
in der Kaltmassivumformung
LFT, 130 Seiten, 80 Bilder, 14 Tab. 2000.
ISBN 3-87525-138-5.

Band 103: Stefan Bobbert
Simulationsgestützte Prozessausslegung
für das Innenhochdruck-Umformen
von Blechpaaren
LFT, 123 Seiten, 77 Bilder. 2000.
ISBN 3-87525-145-8.

Band 104: Harald Rottbauer
Modulares Planungswerkzeug zum
Produktionsmanagement in der
Elektronikproduktion
FAPS, 166 Seiten, 106 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-139-3.

Band 105: Thomas Hennige
Flexible Formgebung von Blechen
durch Laserstrahlumformen
LFT, 119 Seiten, 50 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-140-7.

Band 106: Thomas Menzel
Wissenschaftsbasierte Methoden für die
rechnergestützte Charakterisierung
und Bewertung innovativer
Fertigungsprozesse
LFT, 152 Seiten, 71 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-142-3.

Band 107: Thomas Stöckel
Kommunikationstechnische Integration
der Prozeßebene in Produktionssysteme
durch Middleware-Frameworks
FAPS, 147 Seiten, 65 Bilder, 5 Tab. 2001.
ISBN 3-87525-143-1.

Band 108: Frank Pitter
Verfügbarkeitssteigerung von
Werkzeugmaschinen durch Einsatz
mechatronischer Sensorlösungen
FAPS, 158 Seiten, 131 Bilder, 8 Tab. 2001.
ISBN 3-87525-144-X.

Band 109: Markus Korneli
Integration lokaler CAP-Systeme in
einen globalen Fertigungsdatenverbund
FAPS, 121 Seiten, 53 Bilder, 11 Tab. 2001.
ISBN 3-87525-146-6.

Band 110: Burkhard Müller
Laserstrahljustieren mit Excimer-Lasern -
Prozeßparameter und Modelle zur
Aktorkonstruktion
LFT, 128 Seiten, 36 Bilder, 9 Tab. 2001.
ISBN 3-87525-159-8.

Band 111: Jürgen Göhringer
Integrierte Telediagnose via Internet
zum effizienten Service von
Produktionssystemen
FAPS, 178 Seiten, 98 Bilder, 5 Tab. 2001.
ISBN 3-87525-147-4.

Band 112: Robert Feuerstein
Qualitäts- und kosteneffiziente Integra-
tion neuer Bauelementetechnologien in
die Flachbaugruppenfertigung
FAPS, 161 Seiten, 99 Bilder, 10 Tab. 2001.
ISBN 3-87525-151-2.

Band 113: Marcus Reichenberger
Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten
alternativer Elektroniklote in der
Oberflächenmontage (SMT)
FAPS, 165 Seiten, 97 Bilder, 18 Tab. 2001.
ISBN 3-87525-152-0.

Band 114: Alexander Huber
Justieren vormontierter Systeme mit dem
Nd:YAG-Laser unter Einsatz von Aktoren
LFT, 122 Seiten, 58 Bilder, 5 Tab. 2001.
ISBN 3-87525-153-9.

Band 115: Sami Krimi
Analyse und Optimierung von Montage-
systemen in der Elektronikproduktion
FAPS, 155 Seiten, 88 Bilder, 3 Tab. 2001.
ISBN 3-87525-157-1.

Band 116: Marion Merklein
Laserstrahlumformen von
Aluminiumwerkstoffen - Beeinflussung
der Mikrostruktur und der mechanischen
Eigenschaften
LFT, 122 Seiten, 65 Bilder, 15 Tab. 2001.
ISBN 3-87525-156-3.

Band 117: Thomas Collisi
Ein informationslogistisches
Architekturkonzept zur Akquisition
simulationsrelevanter Daten
FAPS, 181 Seiten, 105 Bilder, 7 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-164-4.

Band 118: Markus Koch
Rationalisierung und ergonomische
Optimierung im Innenausbau durch
den Einsatz moderner
Automatisierungstechnik
FAPS, 176 Seiten, 98 Bilder, 9 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-165-2.

Band 119: Michael Schmidt
Prozeßregelung für das Laserstrahl-
Punktschweißen in der Elektronikpro-
duktion
LFT, 152 Seiten, 71 Bilder, 3 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-166-0.

Band 120: Nicolas Tiesler
Grundlegende Untersuchungen zum
Fließpressen metallischer Kleinstteile
LFT, 126 Seiten, 78 Bilder, 12 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-175-X.

Band 121: Lars Pursche
Methoden zur technologieorientierten
Programmierung für die
3D-Lasermikrobearbeitung
LFT, 111 Seiten, 39 Bilder, 0 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-183-0.

Band 122: Jan-Oliver Brassel
Prozeßkontrolle beim
Laserstrahl-Mikroschweißen
LFT, 148 Seiten, 72 Bilder, 12 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-181-4.

Band 123: Mark Geisel
Prozeßkontrolle und -steuerung beim
Laserstrahlschweißen mit den Methoden
der nichtlinearen Dynamik
LFT, 135 Seiten, 46 Bilder, 2 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-180-6.

Band 124: Gerd Eßer
Laserstrahlunterstützte Erzeugung
metallischer Leiterstrukturen auf
Thermoplastsubstraten für die
MID-Technik
LFT, 148 Seiten, 60 Bilder, 6 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-171-7.

Band 125: Marc Fleckenstein
Qualität laserstrahl-gefügter
Mikroverbindungen elektronischer
Kontakte
LFT, 159 Seiten, 77 Bilder, 7 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-170-9.

Band 126: Stefan Kaufmann
Grundlegende Untersuchungen zum
Nd:YAG- Laserstrahlfügen von Silizium
für Komponenten der Optoelektronik
LFT, 159 Seiten, 100 Bilder, 6 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-172-5.

Band 127: Thomas Fröhlich
Simultanes Löten von Anschlußkontak-
ten elektronischer Bauelemente mit
Diodenlaserstrahlung
LFT, 143 Seiten, 75 Bilder, 6 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-186-5.

Band 128: Achim Hofmann
Erweiterung der Formgebungsgrenzen
beim Umformen von
Aluminiumwerkstoffen durch den Ein-
satz prozessangepasster Platinen
LFT, 113 Seiten, 58 Bilder, 4 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-182-2.

Band 129: Ingo Kriebitzsch
3 - D MID Technologie in der
Automobilelektronik
FAPS, 129 Seiten, 102 Bilder, 10 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-169-5.

Band 130: Thomas Pohl
Fertigungsqualität und Umformbarkeit
laserstrahlgeschweißter Formplatinen
aus Aluminiumlegierungen
LFT, 133 Seiten, 93 Bilder, 12 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-173-3.

Band 131: Matthias Wenk
Entwicklung eines konfigurierbaren
Steuerungssystems für die flexible
Sensorführung von Industrierobotern
FAPS, 167 Seiten, 85 Bilder, 1 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-174-1.

Band 132: Matthias Negendanck
Neue Sensorik und Aktorik für
Bearbeitungsköpfe zum
Laserstrahlschweißen
LFT, 116 Seiten, 60 Bilder, 14 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-184-9.

Band 133: Oliver Kreis
Integrierte Fertigung - Verfahrensin-
tegration durch Innenhochdruck-Umfor-
men, Trennen und Laserstrahlschweißen
in einem Werkzeug sowie ihre tele- und
multimediale Präsentation
LFT, 167 Seiten, 90 Bilder, 43 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-176-8.

Band 134: Stefan Trautner
Technische Umsetzung produktbezoge-
ner Instrumente der Umweltpolitik bei
Elektro- und Elektronikgeräten
FAPS, 179 Seiten, 92 Bilder, 11 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-177-6.

Band 135: Roland Meier
Strategien für einen produktorientierten
Einsatz räumlicher spritzgegossener
Schaltungsträger (3-D MID)
FAPS, 155 Seiten, 88 Bilder, 14 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-178-4.

Band 136: Jürgen Wunderlich
Kostensimulation - Simulationsbasierte
Wirtschaftlichkeitsregelung komplexer
Produktionssysteme
FAPS, 202 Seiten, 119 Bilder, 17 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-179-2.

Band 137: Stefan Novotny
Innenhochdruck-Umformen von Blechen
aus Aluminium- und Magnesiumlegie-
rungen bei erhöhter Temperatur
LFT, 132 Seiten, 82 Bilder, 6 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-185-7.

Band 138: Andreas Licha
Flexible Montageautomatisierung zur
Komplettmontage flächenhafter Produkt-
strukturen durch kooperierende
Industrieroboter
FAPS, 158 Seiten, 87 Bilder, 8 Tab. 2003.
ISBN 3-87525-189-X.

Band 139: Michael Eisenbarth
Beitrag zur Optimierung der Aufbau- und
Verbindungstechnik für mechatronische
Baugruppen
FAPS, 207 Seiten, 141 Bilder, 9 Tab. 2003.
ISBN 3-87525-190-3.

Band 140: Frank Christoph
Durchgängige simulationsgestützte
Planung von Fertigungseinrichtungen der
Elektronikproduktion
FAPS, 187 Seiten, 107 Bilder, 9 Tab. 2003.
ISBN 3-87525-191-1.

Band 141: Hinnerk Hagenah
Simulationsbasierte Bestimmung der
zu erwartenden Maßhaltigkeit für das
Blechbiegen
LFT, 131 Seiten, 36 Bilder, 26 Tab. 2003.
ISBN 3-87525-192-X.

Band 142: Ralf Eckstein
Scherschneiden und Biegen metallischer
Kleinstteile - Materialeinfluss und
Materialverhalten
LFT, 148 Seiten, 71 Bilder, 19 Tab. 2003.
ISBN 3-87525-193-8.

Band 143: Frank H. Meyer-Pittroff
Excimerlaserstrahlbiegen dünner
metallischer Folien mit homogener
Lichtlinie
LFT, 138 Seiten, 60 Bilder, 16 Tab. 2003.
ISBN 3-87525-196-2.

Band 144: Andreas Kach
Rechnergestützte Anpassung von
Laserstrahlschneidbahnen
an Bauteilabweichungen
LFT, 139 Seiten, 69 Bilder, 11 Tab. 2004.
ISBN 3-87525-197-0.

Band 145: Stefan Hierl
System- und Prozeßtechnik für das
simultane Löten mit Diodenlaserstrah-
lung von elektronischen Bauelementen
LFT, 124 Seiten, 66 Bilder, 4 Tab. 2004.
ISBN 3-87525-198-9.

Band 146: Thomas Neudecker
Tribologische Eigenschaften keramischer
Blechumformwerkzeuge- Einfluss einer
Oberflächenendbearbeitung mittels
Excimerlaserstrahlung
LFT, 166 Seiten, 75 Bilder, 26 Tab. 2004.
ISBN 3-87525-200-4.

Band 147: Ulrich Wenger
Prozessoptimierung in der Wickeltechnik
durch innovative maschinenbauliche und
regelungstechnische Ansätze
FAPS, 132 Seiten, 88 Bilder, 0 Tab. 2004.
ISBN 3-87525-203-9.

Band 148: Stefan Slama
Effizienzsteigerung in der Montage durch
marktorientierte Montagestrukturen und
erweiterte Mitarbeiterkompetenz
FAPS, 188 Seiten, 125 Bilder, 0 Tab. 2004.
ISBN 3-87525-204-7.

Band 149: Thomas Wurm
Laserstrahljustieren mittels Aktoren-Ent-
wicklung von Konzepten und Methoden
für die rechnerunterstützte Modellierung
und Optimierung von komplexen
Aktorsystemen in der Mikrotechnik
LFT, 122 Seiten, 51 Bilder, 9 Tab. 2004.
ISBN 3-87525-206-3.

Band 150: Martino Celeghini
Wirkmedienbasierte Blechumformung:
Grundlagenuntersuchungen zum Einfluss
von Werkstoff und Bauteilgeometrie
LFT, 146 Seiten, 77 Bilder, 6 Tab. 2004.
ISBN 3-87525-207-1.

Band 151: Ralph Hohenstein
Entwurf hochdynamischer Sensor- und
Regelsysteme für die adaptive
Laserbearbeitung
LFT, 282 Seiten, 63 Bilder, 16 Tab. 2004.
ISBN 3-87525-210-1.

Band 152: Angelika Hutterer
Entwicklung prozessüberwachender
Regelkreise für flexible
Formgebungsprozesse
LFT, 149 Seiten, 57 Bilder, 2 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-212-8.

Band 153: Emil Egerer
Massivumformen metallischer Kleinst-
teile bei erhöhter Prozesstemperatur
LFT, 158 Seiten, 87 Bilder, 10 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-213-6.

Band 154: Rüdiger Holzmann
Strategien zur nachhaltigen Optimierung
von Qualität und Zuverlässigkeit in
der Fertigung hochintegrierter
Flachbaugruppen
FAPS, 186 Seiten, 99 Bilder, 19 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-217-9.

Band 155: Marco Nock
Biegeumformen mit
Elastomerwerkzeugen Modellierung,
Prozessauslegung und Abgrenzung des
Verfahrens am Beispiel des Rohrbiegens
LFT, 164 Seiten, 85 Bilder, 13 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-218-7.

Band 156: Frank Niebling
Qualifizierung einer Prozesskette zum
Laserstrahlsintern metallischer Bauteile
LFT, 148 Seiten, 89 Bilder, 3 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-219-5.

Band 157: Markus Meiler
Großserientauglichkeit trockenschmier-
stoffbeschichteter Aluminiumbleche im
Presswerk Grundlegende Untersuchun-
gen zur Tribologie, zum Umformverhal-
ten und Bauteilversuche
LFT, 104 Seiten, 57 Bilder, 21 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-221-7.

Band 158: Agus Sutanto
Solution Approaches for Planning of
Assembly Systems in Three-Dimensional
Virtual Environments
FAPS, 169 Seiten, 98 Bilder, 3 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-220-9.

Band 159: Matthias Boiger
Hochleistungssysteme für die Fertigung
elektronischer Baugruppen auf der Basis
flexibler Schaltungsträger
FAPS, 175 Seiten, 111 Bilder, 8 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-222-5.

Band 160: Matthias Pitz
Laserunterstütztes Biegen höchstfester
Mehrphasenstähle
LFT, 120 Seiten, 73 Bilder, 11 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-223-3.

Band 161: Meik Vahl
Beitrag zur gezielten Beeinflussung des
Werkstoffflusses beim Innenhochdruck-
Umformen von Blechen
LFT, 165 Seiten, 94 Bilder, 15 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-224-1.

Band 162: Peter K. Kraus
Plattformstrategien - Realisierung
einer varianz- und kostenoptimierten
Wertschöpfung
FAPS, 181 Seiten, 95 Bilder, 0 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-226-8.

Band 163: Adrienn Cser
Laserstrahlschmelzabtrag - Prozessana-
lyse und -modellierung
LFT, 146 Seiten, 79 Bilder, 3 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-227-6.

Band 164: Markus C. Hahn
Grundlegende Untersuchungen zur
Herstellung von Leichtbauverbundstruk-
turen mit Aluminiumschaumkern
LFT, 143 Seiten, 60 Bilder, 16 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-228-4.

Band 165: Gordana Michos
Mechatronische Ansätze zur Optimie-
rung von Vorschubachsen
FAPS, 146 Seiten, 87 Bilder, 17 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-230-6.

Band 166: Markus Stark
Auslegung und Fertigung hochpräziser
Faser-Kollimator-Arrays
LFT, 158 Seiten, 115 Bilder, 11 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-231-4.

Band 167: Yurong Zhou
Kollaboratives Engineering Management
in der integrierten virtuellen Entwicklung
der Anlagen für die Elektronikproduktion
FAPS, 156 Seiten, 84 Bilder, 6 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-232-2.

Band 168: Werner Enser
Neue Formen permanenter und lösbarer elektrischer Kontaktierungen für mechatronische Baugruppen
FAPS, 190 Seiten, 112 Bilder, 5 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-233-0.

Band 169: Katrin Melzer
Integrierte Produktpolitik bei elektrischen und elektronischen Geräten zur Optimierung des Product-Life-Cycle
FAPS, 155 Seiten, 91 Bilder, 17 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-234-9.

Band 170: Alexander Putz
Grundlegende Untersuchungen zur Erfassung der realen Vorspannung von armierten Kaltfließpresswerkzeugen mittels Ultraschall
LFT, 137 Seiten, 71 Bilder, 15 Tab. 2006.
ISBN 3-87525-237-3.

Band 171: Martin Prechtel
Automatisiertes Schichtverfahren für metallische Folien - System- und Prozesstechnik
LFT, 154 Seiten, 45 Bilder, 7 Tab. 2006.
ISBN 3-87525-238-1.

Band 172: Markus Meidert
Beitrag zur deterministischen Lebensdauerabschätzung von Werkzeugen der Kaltmassivumformung
LFT, 131 Seiten, 78 Bilder, 9 Tab. 2006.
ISBN 3-87525-239-X.

Band 173: Bernd Müller
Robuste, automatisierte Montagesysteme durch adaptive Prozessführung und montageübergreifende Fehlerprävention am Beispiel flächiger Leichtbauteile
FAPS, 147 Seiten, 77 Bilder, 0 Tab. 2006.
ISBN 3-87525-240-3.

Band 174: Alexander Hofmann
Hybrides Laserdurchstrahlsschweißen von Kunststoffen
LFT, 136 Seiten, 72 Bilder, 4 Tab. 2006.
ISBN 978-3-87525-243-9.

Band 175: Peter Wölflick
Innovative Substrate und Prozesse mit feinsten Strukturen für bleifreie Mechatronik-Anwendungen
FAPS, 177 Seiten, 148 Bilder, 24 Tab. 2006.
ISBN 978-3-87525-246-0.

Band 176: Attila Komlodi
Detection and Prevention of Hot Cracks during Laser Welding of Aluminium Alloys Using Advanced Simulation Methods
LFT, 155 Seiten, 89 Bilder, 14 Tab. 2006.
ISBN 978-3-87525-248-4.

Band 177: Uwe Popp
Grundlegende Untersuchungen zum Laserstrahlstrukturieren von Kaltmassivumformwerkzeugen
LFT, 140 Seiten, 67 Bilder, 16 Tab. 2006.
ISBN 978-3-87525-249-1.

Band 178: Veit Rückel
Rechnergestützte Ablaufplanung und Bahngenerierung Für kooperierende Industrieroboter
FAPS, 148 Seiten, 75 Bilder, 7 Tab. 2006.
ISBN 978-3-87525-250-7.

Band 179: Manfred Dirscherl
Nicht-thermische Mikrojustiertechnik mittels ultrakurzer Laserpulse
LFT, 154 Seiten, 69 Bilder, 10 Tab. 2007.
ISBN 978-3-87525-251-4.

Band 180: Yong Zhuo
Entwurf eines rechnergestützten integrierten Systems für Konstruktion und Fertigungsplanung räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3D-MID)
FAPS, 181 Seiten, 95 Bilder, 5 Tab. 2007.
ISBN 978-3-87525-253-8.

Band 181: Stefan Lang
Durchgängige Mitarbeiterinformation zur Steigerung von Effizienz und Prozesssicherheit in der Produktion
FAPS, 172 Seiten, 93 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-257-6.

Band 182: Hans-Joachim Krauß
Laserstrahlinduzierte Pyrolyse präkeramischer Polymere
LFT, 171 Seiten, 100 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-258-3.

Band 183: Stefan Junker
Technologien und Systemlösungen für die flexibel automatisierte Bestückung permanent erregter Läufer mit oberflächenmontierten Dauermagneten
FAPS, 173 Seiten, 75 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-259-0.

Band 184: Rainer Kohlbauer
Wissensbasierte Methoden für die simulationsgestützte Auslegung wirkmedienbasierter Blechumformprozesse
LFT, 135 Seiten, 50 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-260-6.

Band 185: Klaus Lamprecht
Wirkmedienbasierte Umformung tiefgezogener Vorformen unter besonderer Berücksichtigung maßgeschneiderter Halbzeuge
LFT, 137 Seiten, 81 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-265-1.

Band 186: Bernd Zolleiß
Optimierte Prozesse und Systeme für die Bestückung mechatronischer Baugruppen
FAPS, 180 Seiten, 117 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-266-8.

Band 187: Michael Kerausch
Simulationsgestützte Prozessauslegung für das Umformen lokal wärmebehandelter Aluminiumplatten
LFT, 146 Seiten, 76 Bilder, 7 Tab. 2007.
ISBN 978-3-87525-267-5.

Band 188: Matthias Weber
Unterstützung der Wandlungsfähigkeit von Produktionsanlagen durch innovative Softwaresysteme
FAPS, 183 Seiten, 122 Bilder, 3 Tab. 2007.
ISBN 978-3-87525-269-9.

Band 189: Thomas Frick
Untersuchung der prozessbestimmenden Strahl-Stoff-Wechselwirkungen beim Laserstrahlschweißen von Kunststoffen
LFT, 104 Seiten, 62 Bilder, 8 Tab. 2007.
ISBN 978-3-87525-268-2.

Band 190: Joachim Hecht
Werkstoffcharakterisierung und
Prozessauslegung für die wirkmedienba-
sierte Doppelblech-Umformung von
Magnesiumlegierungen
LFT, 107 Seiten, 91 Bilder, 2 Tab. 2007.
ISBN 978-3-87525-270-5.

Band 191: Ralf Völkl
Stochastische Simulation zur Werkzeug-
lebensdaueroptimierung und Präzisions-
fertigung in der Kaltmassivumformung
LFT, 178 Seiten, 75 Bilder, 12 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-272-9.

Band 192: Massimo Tolazzi
Innenhochdruck-Umformen verstärkter
Blech-Rahmenstrukturen
LFT, 164 Seiten, 85 Bilder, 7 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-273-6.

Band 193: Cornelia Hoff
Untersuchung der Prozesseinflussgrößen
beim Presshärten des höchstfesten
Vergütungsstahls 22MnB5
LFT, 133 Seiten, 92 Bilder, 5 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-275-0.

Band 194: Christian Alvarez
Simulationsgestützte Methoden zur
effizienten Gestaltung von Lötprozessen
in der Elektronikproduktion
FAPS, 149 Seiten, 86 Bilder, 8 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-277-4.

Band 195: Andreas Kunze
Automatisierte Montage von makrome-
chatronischen Modulen zur flexiblen
Integration in hybride
Pkw-Bordnetzsysteme
FAPS, 160 Seiten, 90 Bilder, 14 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-278-1.

Band 196: Wolfgang Hußnätter
Grundlegende Untersuchungen zur
experimentellen Ermittlung und zur
Modellierung von Fließortkurven bei
erhöhten Temperaturen
LFT, 152 Seiten, 73 Bilder, 21 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-279-8.

Band 197: Thomas Bigl
Entwicklung, angepasste Herstellungs-
verfahren und erweiterte Qualitätssiche-
rung von einsatzgerechten elektroni-
schen Baugruppen
FAPS, 175 Seiten, 107 Bilder, 14 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-280-4.

Band 198: Stephan Roth
Grundlegende Untersuchungen zum
Excimerlaserstrahl-Abtragen unter
Flüssigkeitsfilmen
LFT, 113 Seiten, 47 Bilder, 14 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-281-1.

Band 199: Artur Giera
Prozesstechnische Untersuchungen
zum Rührreibschweißen metallischer
Werkstoffe
LFT, 179 Seiten, 104 Bilder, 36 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-282-8.

Band 200: Jürgen Lechler
Beschreibung und Modellierung
des Werkstoffverhaltens von
presshärtbaren Bor-Manganstählen
LFT, 154 Seiten, 75 Bilder, 12 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-286-6.

Band 201: Andreas Blankl
Untersuchungen zur Erhöhung der
Prozessrobustheit bei der Innenhoch-
druck-Umformung von flächigen Halb-
zeugen mit vor- bzw. nachgeschalteten
Laserstrahlfügeoperationen
LFT, 120 Seiten, 68 Bilder, 9 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-287-3.

Band 202: Andreas Schaller
Modellierung eines nachfrageorientierten
Produktionskonzeptes für mobile
Telekommunikationsgeräte
FAPS, 120 Seiten, 79 Bilder, 0 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-289-7.

Band 203: Claudius Schimpf
Optimierung von Zuverlässigkeitsunter-
suchungen, Prüfabläufen und Nachar-
beitsprozessen in der Elektronikproduk-
tion
FAPS, 162 Seiten, 90 Bilder, 14 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-290-3.

Band 204: Simon Dietrich
Sensoriken zur Schwerpunktslagebestim-
mung der optischen Prozessemissionen
beim Laserstrahl-tiefschweißen
LFT, 138 Seiten, 70 Bilder, 5 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-292-7.

Band 205: Wolfgang Wolf
Entwicklung eines agentenbasierten
Steuerungssystems zur
Materialflussorganisation im
wandelbaren Produktionsumfeld
FAPS, 167 Seiten, 98 Bilder. 2009.
ISBN 978-3-87525-293-4.

Band 206: Steffen Polster
Laserdurchstrahl-schweißen
transparenter Polymerbauteile
LFT, 160 Seiten, 92 Bilder, 13 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-294-1.

Band 207: Stephan Manuel Dörfler
Rührreibschweißen von walzplattiertem
Halbzeug und Aluminiumblech zur
Herstellung flächiger Aluminiumschaum-
Sandwich-Verbundstrukturen
LFT, 190 Seiten, 98 Bilder, 5 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-295-8.

Band 208: Uwe Vogt
Seriennahe Auslegung von Aluminium
Tailored Heat Treated Blanks
LFT, 151 Seiten, 68 Bilder, 26 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-296-5.

Band 209: Till Laumann
Qualitative und quantitative Bewertung
der Crashtauglichkeit von höchstfesten
Stählen
LFT, 117 Seiten, 69 Bilder, 7 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-299-6.

Band 210: Alexander Diehl
Größeneffekte bei Biegeprozessen-
Entwicklung einer Methodik zur
Identifikation und Quantifizierung
LFT, 180 Seiten, 92 Bilder, 12 Tab. 2010.
ISBN 978-3-87525-302-3.

Band 211: Detlev Staud
Effiziente Prozesskettenauslegung für das
Umformen lokal wärmebehandelter und
geschweißter Aluminiumbleche
LFT, 164 Seiten, 72 Bilder, 12 Tab. 2010.
ISBN 978-3-87525-303-0.

Band 212: Jens Ackermann
Prozesssicherung beim Laserdurchstrahl-
schweißen thermoplastischer Kunststoffe
LPT, 129 Seiten, 74 Bilder, 13 Tab. 2010.
ISBN 978-3-87525-305-4.

Band 213: Stephan Weidel
Grundlegende Untersuchungen zum
Kontaktzustand zwischen Werkstück
und Werkzeug bei umformtechnischen
Prozessen unter tribologischen
Gesichtspunkten
LFT, 144 Seiten, 67 Bilder, 11 Tab. 2010.
ISBN 978-3-87525-307-8.

Band 214: Stefan Geißdörfer
Entwicklung eines mesoskopischen Modells zur Abbildung von Größeneffekten in der Kaltmassivumformung mit Methoden der FE-Simulation
LFT, 133 Seiten, 83 Bilder, 11 Tab. 2010.
ISBN 978-3-87525-308-5.

Band 215: Christian Matzner
Konzeption produktspezifischer Lösungen zur Robustheitssteigerung elektronischer Systeme gegen die Einwirkung von Betauung im Automobil
FAPS, 165 Seiten, 93 Bilder, 14 Tab. 2010.
ISBN 978-3-87525-309-2.

Band 216: Florian Schüssler
Verbindungs- und Systemtechnik für thermisch hochbeanspruchte und miniaturisierte elektronische Baugruppen
FAPS, 184 Seiten, 93 Bilder, 18 Tab. 2010.
ISBN 978-3-87525-310-8.

Band 217: Massimo Cojutti
Strategien zur Erweiterung der Prozessgrenzen bei der Innhochdruck-Umformung von Rohren und Blechpaaren
LFT, 125 Seiten, 56 Bilder, 9 Tab. 2010.
ISBN 978-3-87525-312-2.

Band 218: Raoul Plettke
Mehrkriterielle Optimierung komplexer Aktorsysteme für das Laserstrahljustieren
LFT, 152 Seiten, 25 Bilder, 3 Tab. 2010.
ISBN 978-3-87525-315-3.

Band 219: Andreas Dobroschke
Flexible Automatisierungslösungen für die Fertigung wickeltechnischer Produkte
FAPS, 184 Seiten, 109 Bilder, 18 Tab. 2011.
ISBN 978-3-87525-317-7.

Band 220: Azhar Zam
Optical Tissue Differentiation for Sensor-Controlled Tissue-Specific Laser Surgery
LPT, 99 Seiten, 45 Bilder, 8 Tab. 2011.
ISBN 978-3-87525-318-4.

Band 221: Michael Rösch
Potenziale und Strategien zur Optimierung des Schablonendruckprozesses in der Elektronikproduktion
FAPS, 192 Seiten, 127 Bilder, 19 Tab. 2011.
ISBN 978-3-87525-319-1.

Band 222: Thomas Rechtenwald
Quasi-isothermes Laserstrahlsintern von Hochtemperatur-Thermoplasten - Eine Betrachtung werkstoff-prozessspezifischer Aspekte am Beispiel PEEK
LPT, 150 Seiten, 62 Bilder, 8 Tab. 2011.
ISBN 978-3-87525-320-7.

Band 223: Daniel Craiovan
Prozesse und Systemlösungen für die SMT-Montage optischer Bauelemente auf Substrate mit integrierten Lichtwellenleitern
FAPS, 165 Seiten, 85 Bilder, 8 Tab. 2011.
ISBN 978-3-87525-324-5.

Band 224: Kay Wagner
Beanspruchungsangepasste
Kaltmassivumformwerkzeuge durch
lokal optimierte Werkzeugoberflächen
LFT, 147 Seiten, 103 Bilder, 17 Tab. 2011.
ISBN 978-3-87525-325-2.

Band 225: Martin Brandhuber
Verbesserung der Prognosegüte des Ver-
sagens von Punktschweißverbindungen
bei höchstfesten Stahlgüten
LFT, 155 Seiten, 91 Bilder, 19 Tab. 2011.
ISBN 978-3-87525-327-6.

Band 226: Peter Sebastian Feuser
Ein Ansatz zur Herstellung von
pressgehärteten Karosseriekomponenten
mit maßgeschneiderten mechanischen
Eigenschaften: Temperierte Umform-
werkzeuge. Prozessfenster, Prozess-
simulation und funktionale Untersuchung
LFT, 195 Seiten, 97 Bilder, 60 Tab. 2012.
ISBN 978-3-87525-328-3.

Band 227: Murat Arbak
Material Adapted Design of Cold Forging
Tools Exemplified by Powder
Metallurgical Tool Steels and Ceramics
LFT, 109 Seiten, 56 Bilder, 8 Tab. 2012.
ISBN 978-3-87525-330-6.

Band 228: Indra Pitz
Beschleunigte Simulation des
Laserstrahlumformens von
Aluminiumblechen
LPT, 137 Seiten, 45 Bilder, 27 Tab. 2012.
ISBN 978-3-87525-333-7.

Band 229: Alexander Grimm
Prozessanalyse und -überwachung des
Laserstrahlhartlötens mittels optischer
Sensorik
LPT, 125 Seiten, 61 Bilder, 5 Tab. 2012.
ISBN 978-3-87525-334-4.

Band 230: Markus Kaupper
Biegen von höhenfesten Stahlblechwerk-
stoffen - Umformverhalten und Grenzen
der Biegebarkeit
LFT, 160 Seiten, 57 Bilder, 10 Tab. 2012.
ISBN 978-3-87525-339-9.

Band 231: Thomas Kroiß
Modellbasierte Prozessauslegung für
die Kaltmassivumformung unter
Brücksichtigung der Werkzeug- und
Pressenauffederung
LFT, 169 Seiten, 50 Bilder, 19 Tab. 2012.
ISBN 978-3-87525-341-2.

Band 232: Christian Goth
Analyse und Optimierung der Entwick-
lung und Zuverlässigkeit räumlicher
Schaltungsträger (3D-MID)
FAPS, 176 Seiten, 102 Bilder, 22 Tab. 2012.
ISBN 978-3-87525-340-5.

Band 233: Christian Ziegler
Ganzheitliche Automatisierung
mechatronischer Systeme in der Medizin
am Beispiel Strahlentherapie
FAPS, 170 Seiten, 71 Bilder, 19 Tab. 2012.
ISBN 978-3-87525-342-9.

Band 234: Florian Albert
Automatisiertes Laserstrahllöten
und -reparaturlöten elektronischer
Baugruppen
LPT, 127 Seiten, 78 Bilder, 11 Tab. 2012.
ISBN 978-3-87525-344-3.

Band 235: Thomas Stöhr
Analyse und Beschreibung des
mechanischen Werkstoffverhaltens
von presshärtbaren Bor-Manganstählen
LFT, 118 Seiten, 74 Bilder, 18 Tab. 2013.
ISBN 978-3-87525-346-7.

Band 236: Christian Kägeler
Prozessdynamik beim
Laserstrahlschweißen verzinkter
Stahlbleche im Überlappstoß
LPT, 145 Seiten, 80 Bilder, 3 Tab. 2013.
ISBN 978-3-87525-347-4.

Band 237: Andreas Sulzberger
Seriennahe Auslegung der Prozesskette
zur wärmeunterstützten Umformung
von Aluminiumblechwerkstoffen
LFT, 153 Seiten, 87 Bilder, 17 Tab. 2013.
ISBN 978-3-87525-349-8.

Band 238: Simon Opel
Herstellung prozessangepasster
Halbzeuge mit variabler Blechdicke
durch die Anwendung von Verfahren
der Blechmassivumformung
LFT, 165 Seiten, 108 Bilder, 27 Tab. 2013.
ISBN 978-3-87525-350-4.

Band 239: Rajesh Kanawade
In-vivo Monitoring of Epithelium
Vessel and Capillary Density for the
Application of Detection of Clinical
Shock and Early Signs of Cancer Develop-
ment
LPT, 124 Seiten, 58 Bilder, 15 Tab. 2013.
ISBN 978-3-87525-351-1.

Band 240: Stephan Busse
Entwicklung und Qualifizierung eines
Schneidclinchverfahrens
LFT, 119 Seiten, 86 Bilder, 20 Tab. 2013.
ISBN 978-3-87525-352-8.

Band 241: Karl-Heinz Leitz
Mikro- und Nanostrukturierung mit kurz
und ultrakurz gepulster Laserstrahlung
LPT, 154 Seiten, 71 Bilder, 9 Tab. 2013.
ISBN 978-3-87525-355-9.

Band 242: Markus Michl
Webbasierte Ansätze zur ganzheitlichen
technischen Diagnose
FAPS, 182 Seiten, 62 Bilder, 20 Tab. 2013.
ISBN 978-3-87525-356-6.

Band 243: Vera Sturm
Einfluss von Chargenschwankungen
auf die Verarbeitungsgrenzen von
Stahlwerkstoffen
LFT, 113 Seiten, 58 Bilder, 9 Tab. 2013.
ISBN 978-3-87525-357-3.

Band 244: Christian Neudel
Mikrostrukturelle und mechanisch-
technologische Eigenschaften
widerstandspunktgeschweißter
Aluminium-Stahl-Verbindungen für
den Fahrzeugbau
LFT, 178 Seiten, 171 Bilder, 31 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-358-0.

Band 245: Anja Neumann
Konzept zur Beherrschung der
Prozessschwankungen im Presswerk
LFT, 162 Seiten, 68 Bilder, 15 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-360-3.

Band 246: Ulf-Hermann Quentin
Laserbasierte Nanostrukturierung mit
optisch positionierten Mikrolinsen
LPT, 137 Seiten, 89 Bilder, 6 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-361-0.

Band 247: Erik Lamprecht
Der Einfluss der Fertigungsverfahren
auf die Wirbelstromverluste von
Stator-Einzelzahnblechpaketen für
den Einsatz in Hybrid- und Elektrofahr-
zeugen
FAPS, 148 Seiten, 138 Bilder, 4 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-362-7.

Band 248: Sebastian Rösel
Wirkmedienbasierte Umformung von
Blechhalbzeugen unter Anwendung
magnetorheologischer Flüssigkeiten als
kombiniertes Wirk- und Dichtmedium
LFT, 148 Seiten, 61 Bilder, 12 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-363-4.

Band 249: Paul Hippchen
Simulative Prognose der Geometrie
indirekt pressgehärteter Karosseriebau-
teile für die industrielle Anwendung
LFT, 163 Seiten, 89 Bilder, 12 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-364-1.

Band 250: Martin Zubeil
Versagensprognose bei der Prozess
simulation von Biegeumform- und Falz-
verfahren
LFT, 171 Seiten, 90 Bilder, 5 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-365-8.

Band 251: Alexander Kühl
Flexible Automatisierung der
Statorenmontage mit Hilfe einer
universellen ambidexteren Kinematik
FAPS, 142 Seiten, 60 Bilder, 26 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-367-2.

Band 252: Thomas Albrecht
Optimierte Fertigungstechnologien
für Rotoren getriebeintegrierter
PM-Synchronmotoren von
Hybridfahrzeugen
FAPS, 198 Seiten, 130 Bilder, 38 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-368-9.

Band 253: Florian Risch
Planning and Production Concepts for
Contactless Power Transfer Systems for
Electric Vehicles
FAPS, 185 Seiten, 125 Bilder, 13 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-369-6.

Band 254: Markus Weigl
Laserstrahlschweißen von Mischverbindungen aus austenitischen und ferritischen korrosionsbeständigen Stahlwerkstoffen
LPT, 184 Seiten, 110 Bilder, 6 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-370-2.

Band 255: Johannes Noneder
Beanspruchungserfassung für die Validierung von FE-Modellen zur Auslegung von Massivumformwerkzeugen
LFT, 161 Seiten, 65 Bilder, 14 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-371-9.

Band 256: Andreas Reinhardt
Ressourceneffiziente Prozess- und Produktionstechnologie für flexible Schaltungsträger
FAPS, 123 Seiten, 69 Bilder, 19 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-373-3.

Band 257: Tobias Schmuck
Ein Beitrag zur effizienten Gestaltung globaler Produktions- und Logistiknetzwerke mittels Simulation
FAPS, 151 Seiten, 74 Bilder. 2014.
ISBN 978-3-87525-374-0.

Band 258: Bernd Eichenhüller
Untersuchungen der Effekte und Wechselwirkungen charakteristischer Einflussgrößen auf das Umformverhalten bei Mikroumformprozessen
LFT, 127 Seiten, 29 Bilder, 9 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-375-7.

Band 259: Felix Lütteke
Vielseitiges autonomes Transportsystem basierend auf Weltmodellerstellung mittels Datenfusion von Deckenkameras und Fahrzeugsensoren
FAPS, 152 Seiten, 54 Bilder, 20 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-376-4.

Band 260: Martin Grüner
Hochdruck-Blechumformung mit formlos festen Stoffen als Wirkmedium
LFT, 144 Seiten, 66 Bilder, 29 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-379-5.

Band 261: Christian Brock
Analyse und Regelung des Laserstrahl-tiefschweißprozesses durch Detektion der Metaldampffackelposition
LPT, 126 Seiten, 65 Bilder, 3 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-380-1.

Band 262: Peter Vatter
Sensitivitätsanalyse des 3-Rollen-Schubbiegens auf Basis der Finite Elemente Methode
LFT, 145 Seiten, 57 Bilder, 26 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-381-8.

Band 263: Florian Klämpfl
Planung von Laserbestrahlungen durch simulationsbasierte Optimierung
LPT, 169 Seiten, 78 Bilder, 32 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-384-9.

Band 264: Matthias Domke
Transiente physikalische Mechanismen
bei der Laserablation von dünnen
Metallschichten
LPT, 133 Seiten, 43 Bilder, 3 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-385-6.

Band 265: Johannes Götz
Community-basierte Optimierung des
Anlagenengineerings
FAPS, 177 Seiten, 80 Bilder, 30 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-386-3.

Band 266: Hung Nguyen
Qualifizierung des Potentials von
Verfestigungseffekten zur Erweiterung
des Umformvermögens aushärtbarer
Aluminiumlegierungen
LFT, 137 Seiten, 57 Bilder, 16 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-387-0.

Band 267: Andreas Kuppert
Erweiterung und Verbesserung von Ver-
suchs- und Auswertetechniken für die
Bestimmung von Grenzformänderungs-
kurven
LFT, 138 Seiten, 82 Bilder, 2 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-388-7.

Band 268: Kathleen Klaus
Erstellung eines Werkstofforientierten
Fertigungsprozessfensters zur Steigerung
des Formgebungsvermögens von Alumi-
niumlegierungen unter Anwendung einer
zwischengeschalteten Wärmebehandlung
LFT, 154 Seiten, 70 Bilder, 8 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-391-7.

Band 269: Thomas Svec
Untersuchungen zur Herstellung von
funktionsoptimierten Bauteilen im
partiellen Presshärtprozess mittels lokal
unterschiedlich temperierter Werkzeuge
LFT, 166 Seiten, 87 Bilder, 15 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-392-4.

Band 270: Tobias Schrader
Grundlegende Untersuchungen zur
Verschleißcharakterisierung beschichte-
ter Kaltmassivumformwerkzeuge
LFT, 164 Seiten, 55 Bilder, 11 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-393-1.

Band 271: Matthäus Brela
Untersuchung von Magnetfeld-Messme-
thoden zur ganzheitlichen Wertschöp-
fungsoptimierung und Fehlerdetektion
an magnetischen Aktoren
FAPS, 170 Seiten, 97 Bilder, 4 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-394-8.

Band 272: Michael Wieland
Entwicklung einer Methode zur Prognose
adhäsiven Verschleißes an Werkzeugen
für das direkte Presshärten
LFT, 156 Seiten, 84 Bilder, 9 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-395-5.

Band 273: René Schramm
Strukturierte additive Metallisierung
durch kaltaktives
Atmosphärendruckplasma
FAPS, 136 Seiten, 62 Bilder, 15 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-396-2.

Band 274: Michael Lechner
Herstellung beanspruchungsangepasster
Aluminiumblechhalbzeuge durch
eine maßgeschneiderte Variation der
Abkühlgeschwindigkeit nach
Lösungsglühen
LFT, 136 Seiten, 62 Bilder, 15 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-397-9.

Band 275: Kolja Andreas
Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit
auf das Werkzeugeinsatzverhalten beim
Kaltfließpressen
LFT, 169 Seiten, 76 Bilder, 4 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-398-6.

Band 276: Marcus Baum
Laser Consolidation of ITO Nanoparticles
for the Generation of Thin Conductive
Layers on Transparent Substrates
LPT, 158 Seiten, 75 Bilder, 3 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-399-3.

Band 277: Thomas Schneider
Umformtechnische Herstellung
dünnwandiger Funktionsbauteile
aus Feinblech durch Verfahren der
Blechmassivumformung
LFT, 188 Seiten, 95 Bilder, 7 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-401-3.

Band 278: Jochen Merhof
Sematische Modellierung automatisierter
Produktionssysteme zur Verbesserung
der IT-Integration zwischen Anlagen-
Engineering und Steuerungsebene
FAPS, 157 Seiten, 88 Bilder, 8 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-402-0.

Band 279: Fabian Zöller
Erarbeitung von Grundlagen zur
Abbildung des tribologischen Systems
in der Umformsimulation
LFT, 126 Seiten, 51 Bilder, 3 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-403-7.

Band 280: Christian Hezler
Einsatz technologischer Versuche zur
Erweiterung der Versagensvorhersage
bei Karosseriebauteilen aus höchstfesten
Stählen
LFT, 147 Seiten, 63 Bilder, 44 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-404-4.

Band 281: Jochen Böning
Integration des Systemverhaltens von
Automobil-Hochvoltleitungen in die
virtuelle Absicherung durch
strukturmechanische Simulation
FAPS, 177 Seiten, 107 Bilder, 17 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-405-1.

Band 282: Johannes Kohl
Automatisierte Datenerfassung für
diskret ereignisorientierte Simulationen
in der energieflexiblen Fabrik
FAPS, 160 Seiten, 80 Bilder, 27 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-406-8.

Band 283: Peter Bechtold
Mikroschockwellenumformung mittels
ultrakurzer Laserpulse
LPT, 155 Seiten, 59 Bilder, 10 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-407-5.

Band 284: Stefan Berger
Laserstrahlschweißen thermoplastischer
Kohlenstofffaserverbundwerkstoffe mit
spezifischem Zusatzdraht
LPT, 118 Seiten, 68 Bilder, 9 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-408-2.

Band 285: Martin Bornschlegl
Methods-Energy Measurement - Eine
Methode zur Energieplanung für
Fügeverfahren im Karosseriebau
FAPS, 136 Seiten, 72 Bilder, 46 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-409-9.

Band 286: Tobias Rackow
Erweiterung des Unternehmenscontrol-
lings um die Dimension Energie
FAPS, 164 Seiten, 82 Bilder, 29 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-410-5.

Band 287: Johannes Koch
Grundlegende Untersuchungen zur
Herstellung zyklisch-symmetrischer
Bauteile mit Nebenformelementen durch
Blechmassivumformung
LFT, 125 Seiten, 49 Bilder, 17 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-411-2.

Band 288: Hans Ulrich Vierzigmann
Beitrag zur Untersuchung der
tribologischen Bedingungen in der
Blechmassivumformung - Bereitstellung
von tribologischen Modellversuchen und
Realisierung von Tailored Surfaces
LFT, 174 Seiten, 102 Bilder, 34 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-412-9.

Band 289: Thomas Senner
Methodik zur virtuellen Absicherung
der formgebenden Operation des
Nasspressprozesses von
Gelege-Mehrschichtverbunden
LFT, 156 Seiten, 96 Bilder, 21 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-414-3.

Band 290: Sven Kreitlein
Der grundoperationsspezifische
Mindestenergiebedarf als Referenzwert
zur Bewertung der Energieeffizienz in
der Produktion
FAPS, 185 Seiten, 64 Bilder, 30 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-415-0.

Band 291: Christian Roos
Remote-Laserstrahlschweißen verzinkter
Stahlbleche in Kehlnahtgeometrie
LPT, 123 Seiten, 52 Bilder, 0 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-416-7.

Band 292: Alexander Kahrmanidis
Thermisch unterstützte Umformung von
Aluminiumblechen
LFT, 165 Seiten, 103 Bilder, 18 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-417-4.

Band 293: Jan Tremel
Flexible Systems for Permanent
Magnet Assembly and Magnetic Rotor
Measurement / Flexible Systeme zur
Montage von Permanentmagneten und
zur Messung magnetischer Rotoren
FAPS, 152 Seiten, 91 Bilder, 12 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-419-8.

Band 294: Ioannis Tsoupis
Schädigungs- und Versagensverhalten
hochfester Leichtbauwerkstoffe unter
Biegebeanspruchung
LFT, 176 Seiten, 51 Bilder, 6 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-420-4.

Band 295: Sven Hildering
Grundlegende Untersuchungen zum
Prozessverhalten von Silizium als
Werkzeugwerkstoff für das
Mikroscherschneiden metallischer Folien
LFT, 177 Seiten, 74 Bilder, 17 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-422-8.

Band 296: Sasia Mareike Hertweck
Zeitliche Pulsformung in der
Lasermikromaterialbearbeitung –
Grundlegende Untersuchungen und
Anwendungen
LPT, 146 Seiten, 67 Bilder, 5 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-423-5.

Band 297: Paryanto
Mechatronic Simulation Approach for
the Process Planning of Energy-Efficient
Handling Systems
FAPS, 162 Seiten, 86 Bilder, 13 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-424-2.

Band 298: Peer Stenzel
Großorientaugliche Nadelwickeltechnik
für verteilte Wicklungen im
Anwendungsfall der E-Traktionsantriebe
FAPS, 239 Seiten, 147 Bilder, 20 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-425-9.

Band 299: Mario Lušić
Ein Vorgehensmodell zur Erstellung
montageführender Werkerinformations-
systeme simultan zum
Produktentstehungsprozess
FAPS, 174 Seiten, 79 Bilder, 22 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-426-6.

Band 300: Arnd Buschhaus
Hochpräzise adaptive Steuerung und
Regelung robotergeführter Prozesse
FAPS, 202 Seiten, 96 Bilder, 4 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-427-3.

Band 301: Tobias Laumer
Erzeugung von thermoplastischen
Werkstoffverbunden mittels simultanem,
intensitätsselektivem
Laserstrahlschmelzen
LPT, 140 Seiten, 82 Bilder, 0 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-428-0.

Band 302: Nora Unger
Untersuchung einer thermisch unter-
stützten Fertigungskette zur Herstellung
umgeformter Bauteile aus der höherfes-
ten Aluminiumlegierung EN AW-7020
LFT, 142 Seiten, 53 Bilder, 8 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-429-7.

Band 303: Tommaso Stellin
Design of Manufacturing Processes for
the Cold Bulk Forming of Small Metal
Components from Metal Strip
LFT, 146 Seiten, 67 Bilder, 7 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-430-3.

Band 304: Bassim Bachy
Experimental Investigation, Modeling,
Simulation and Optimization of Molded
Interconnect Devices (MID) Based on
Laser Direct Structuring (LDS) / Experi-
mentelle Untersuchung, Modellierung,
Simulation und Optimierung von Molded
Interconnect Devices (MID) basierend
auf Laser Direktstrukturierung (LDS)
FAPS, 168 Seiten, 120 Bilder, 26 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-431-0.

Band 305: Michael Spahr
Automatisierte Kontaktierungsverfahren
für flachleiterbasierte
Pkw-Bordnetzsysteme
FAPS, 197 Seiten, 98 Bilder, 17 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-432-7.

Band 306: Sebastian Suttner
Charakterisierung und Modellierung
des spannungszustandsabhängigen
Werkstoffverhaltens der Magnesium-
legierung AZ31B für die numerische
Prozessauslegung
LFT, 150 Seiten, 84 Bilder, 19 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-433-4.

Band 307: Bhargav Potdar
A reliable methodology to deduce
thermo-mechanical flow behaviour of
hot stamping steels
LFT, 203 Seiten, 98 Bilder, 27 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-436-5.

Band 308: Maria Löffler
Steuerung von Blechmassivumformpro-
zessen durch maßgeschneiderte
tribologische Systeme
LFT, viii u. 166 Seiten, 90 Bilder, 5 Tab.
2018. ISBN 978-3-96147-133-1.

Band 309: Martin Müller
Untersuchung des kombinierten Trenn-
und Umformprozesses beim Fügen art-
ungleicher Werkstoffe mittels
Schneidclinchverfahren
LFT, xi u. 149 Seiten, 89 Bilder, 6 Tab.
2018. ISBN: 978-3-96147-135-5.

Band 310: Christopher Kästle
Qualifizierung der Kupfer-Drahtbond-
technologie für integrierte Leistungs-
module in harschen Umgebungs-
bedingungen
FAPS, xii u. 167 Seiten, 70 Bilder, 18 Tab.
2018. ISBN 978-3-96147-145-4.

Band 311: Daniel Vipavc
Eine Simulationsmethode für das
3-Rollen-Schubbiegen
LFT, xiii u. 121 Seiten, 56 Bilder, 17 Tab.
2018. ISBN 978-3-96147-147-8.

Band 312: Christina Ramer
Arbeitsraumüberwachung und autonome
Bahnplanung für ein sicheres und
flexibles Roboter-Assistenzsystem
in der Fertigung
FAPS, xiv u. 188 Seiten, 57 Bilder, 9 Tab.
2018. ISBN 978-3-96147-153-9.

Band 313: Miriam Rauer
Der Einfluss von Poren auf die
Zuverlässigkeit der Lötverbindungen
von Hochleistungs-Leuchtdioden
FAPS, xii u. 209 Seiten, 108 Bilder, 21 Tab.
2018. ISBN 978-3-96147-157-7.

Band 314: Felix Tenner

Kamerabasierte Untersuchungen der Schmelze und Gasströmungen beim Laserstrahlschweißen verzinkter Stahlbleche

LPT, xxiii u. 184 Seiten, 94 Bilder, 7 Tab.
2018. ISBN 978-3-96147-160-7.

Band 315: Aarief Syed-Khaja

Diffusion Soldering for High-temperature Packaging of Power Electronics

FAPS, x u. 202 Seiten, 144 Bilder, 32 Tab.
2018. ISBN 978-3-87525-162-1.

Band 316: Adam Schaub

Grundlagenwissenschaftliche Untersuchung der kombinierten Prozesskette aus Umformen und Additive Fertigung

LFT, xi u. 192 Seiten, 72 Bilder, 27 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-166-9.

Band 317: Daniel Gröbel

Herstellung von Nebenformelementen unterschiedlicher Geometrie an Blechen mittels Fließpressverfahren der Blechmassivumformung

LFT, x u. 165 Seiten, 96 Bilder, 13 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-168-3.

Band 318: Philipp Hildenbrand

Entwicklung einer Methodik zur Herstellung von Tailored Blanks mit definierten Halbzeugeigenschaften durch einen Tausalprozess

LFT, ix u. 153 Seiten, 77 Bilder, 4 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-174-4.

Band 319: Tobias Konrad

Simulative Auslegung der Spann- und Fixierkonzepte im Karosserierohrbau: Bewertung der Baugruppenmaßhaltigkeit unter Berücksichtigung schwankender Einflussgrößen

LFT, x u. 203 Seiten, 134 Bilder, 32 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-176-8.

Band 320: David Meinel

Architektur applikationsspezifischer Multi-Physics-Simulationskonfiguratoren am Beispiel modularer Triebzüge

FAPS, xii u. 166 Seiten, 82 Bilder, 25 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-184-3.

Band 321: Andrea Zimmermann

Grundlegende Untersuchungen zum Einfluss fertigungsbedingter Eigenschaften auf die Ermüdungsfestigkeit kaltmassivumgeformter Bauteile

LFT, ix u. 160 Seiten, 66 Bilder, 5 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-190-4.

Band 322: Christoph Amann

Simulative Prognose der Geometrie nassgepresster Karosseriebauteile aus Gelege-Mehrschichtverbunden

LFT, xvi u. 169 Seiten, 80 Bilder, 13 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-194-2.

Band 323: Jennifer Tenner

Realisierung schmierstofffreier Tiefziehprozesse durch maßgeschneiderte Werkzeugoberflächen

LFT, x u. 187 Seiten, 68 Bilder, 13 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-196-6.

Band 324: Susan Zöller

Mapping Individual Subjective Values to Product Design

KTmfk, xi u. 223 Seiten, 81 Bilder, 25 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-202-4.

Band 325: Stefan Lutz
Erarbeitung einer Methodik zur
semiempirischen Ermittlung der
Umwandlungskinetik durchhärtender
Wälzlagerstähle für die Wärme-
behandlungssimulation
LFT, xiv u. 189 Seiten, 75 Bilder, 32 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-209-3.

Band 326: Tobias Gnibl
Modellbasierte Prozesskettenabbildung
rührreibgeschweißter Aluminium-
halbzeuge zur umformtechnischen
Herstellung höchstfester Leichtbau-
strukturteile
LFT, xii u. 167 Seiten, 68 Bilder, 17 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-217-8.

Band 327: Johannes Bürner
Technisch-wirtschaftliche Optionen zur
Lastflexibilisierung durch intelligente
elektrische Wärmespeicher
FAPS, xiv u. 233 Seiten, 89 Bilder, 27 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-219-2.

Band 328: Wolfgang Böhm
Verbesserung des Umformverhaltens von
mehrlagigen Aluminiumblechwerk-
stoffen mit ultrafeinkörnigem Gefüge
LFT, ix u. 160 Seiten, 88 Bilder, 14 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-227-7.

Band 329: Stefan Landkammer
Grundsatzuntersuchungen, mathemati-
sche Modellierung und Ableitung einer
Auslegungsmethodik für Gelenkantriebe
nach dem Spinnenbeinprinzip
LFT, xii u. 200 Seiten, 83 Bilder, 13 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-229-1.

Band 330: Stephan Rapp
Pump-Probe-Ellipsometrie zur Messung
transienter optischer Materialeigen-
schaften bei der Ultrakurzpuls-Laser-
materialbearbeitung
LPT, xi u. 143 Seiten, 49 Bilder, 2 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-235-2.

Band 331: Michael Scholz
Intralogs Execution System mit
integrierten autonomen, servicebasierten
Transportentitäten
FAPS, xi u. 195 Seiten, 55 Bilder, 11 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-237-6.

Band 332: Eva Bogner
Strategien der Produktindividualisierung
in der produzierenden Industrie im Kon-
text der Digitalisierung
FAPS, ix u. 201 Seiten, 55 Bilder, 28 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-246-8.

Band 333: Daniel Benjamin Krüger
Ein Ansatz zur CAD-integrierten
muskuloskelettalen Analyse der Mensch-
Maschine-Interaktion
KTmfk, x u. 217 Seiten, 102 Bilder, 7 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-250-5.

Band 334: Thomas Kuhn
Qualität und Zuverlässigkeit laserdirekt-
strukturierter mechatronisch integrierter
Baugruppen (LDS-MID)
FAPS, ix u. 152 Seiten, 69 Bilder, 12 Tab.
2019. ISBN: 978-3-96147-252-9.

Band 335: Hans Fleischmann
Modellbasierte Zustands- und Prozess-
überwachung auf Basis sozio-cyber-phy-
sischer Systeme
FAPS, xi u. 214 Seiten, 111 Bilder, 18 Tab.
2019. ISBN: 978-3-96147-256-7.

Band 336: Markus Michalski
Grundlegende Untersuchungen zum
Prozess- und Werkstoffverhalten bei
schwingungsüberlagerter Umformung
LFT, xii u. 197 Seiten, 93 Bilder, 11 Tab.
2019. ISBN: 978-3-96147-270-3.

Band 337: Markus Brandmeier
Ganzheitliches ontologiebasiertes
Wissensmanagement im Umfeld der
industriellen Produktion
FAPS, xi u. 255 Seiten, 77 Bilder, 33 Tab.
2020. ISBN: 978-3-96147-275-8.

Band 338: Stephan Purr
Datenerfassung für die Anwendung
lernender Algorithmen bei der Herstel-
lung von Blechformteilen
LFT, ix u. 165 Seiten, 48 Bilder, 4 Tab.
2020. ISBN: 978-3-96147-281-9.

Band 339: Christoph Kiener
Kaltfließpressen von gerad- und schräg-
verzahnten Zahnrädern
LFT, viii u. 151 Seiten, 81 Bilder, 3 Tab.
2020. ISBN 978-3-96147-287-1.

Band 340: Simon Spreng
Numerische, analytische und empirische
Modellierung des Heißscrimpprozesses
FAPS, xix u. 204 Seiten, 91 Bilder, 27 Tab.
2020. ISBN 978-3-96147-293-2.

Band 341: Patrik Schwingenschlögl
Erarbeitung eines Prozessverständnisses
zur Verbesserung der tribologischen
Bedingungen beim Presshärten
LFT, x u. 177 Seiten, 81 Bilder, 8 Tab.
2020. ISBN 978-3-96147-297-0.

Band 342: Emanuela Affronti
Evaluation of failure behaviour
of sheet metals
LFT, ix u. 136 Seiten, 57 Bilder, 20 Tab.
2020. ISBN 978-3-96147-303-8.

Band 343: Julia Degner
Grundlegende Untersuchungen zur
Herstellung hochfester Aluminiumblech-
bauteile in einem kombinierten Umform-
und Abschreckprozess
LFT, x u. 172 Seiten, 61 Bilder, 9 Tab.
2020. ISBN 978-3-96147-307-6.

Band 344: Maximilian Wagner
Automatische Bahnplanung für die Auf-
teilung von Prozessbewegungen in syn-
chrone Werkstück- und Werkzeugbewe-
gungen mittels Multi-Roboter-Systemen
FAPS, xxi u. 181 Seiten, 111 Bilder, 15 Tab.
2020. ISBN 978-3-96147-309-0.

Band 345: Stefan Härter
Qualifizierung des Montageprozesses
hochminiaturisierter elektronischer Bau-
elemente
FAPS, ix u. 194 Seiten, 97 Bilder, 28 Tab.
2020. ISBN 978-3-96147-314-4.

Band 346: Toni Donhauser
Ressourcenorientierte Auftragsregelung
in einer hybriden Produktion mittels
betriebsbegleitender Simulation
FAPS, xix u. 242 Seiten, 97 Bilder, 17 Tab.
2020. ISBN 978-3-96147-316-8.

Band 347: Philipp Amend
Laserbasiertes Schmelzkleben von Thermoplasten mit Metallen
LPT, xv u. 154 Seiten, 67 Bilder.
2020. ISBN 978-3-96147-326-7.

Band 348: Matthias Ehlert
Simulationsunterstützte funktionale Grenzlagenabsicherung
KTmfk, xvi u. 300 Seiten, 101 Bilder, 73 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-328-1.

Band 349: Thomas Sander
Ein Beitrag zur Charakterisierung und Auslegung des Verbundes von Kunststoffsubstraten mit harten Dünnschichten
KTmfk, xiv u. 178 Seiten, 88 Bilder, 21 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-330-4.

Band 350: Florian Pilz
Fließpressen von Verzahnungselementen an Blechen
LFT, x u. 170 Seiten, 103 Bilder, 4 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-332-8.

Band 351: Sebastian Josef Katona
Evaluation und Aufbereitung von Produktsimulationen mittels abweichungsbehafteter Geometriemodelle
KTmfk, ix u. 147 Seiten, 73 Bilder, 11 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-336-6.

Band 352: Jürgen Herrmann
Kumulatives Walzplattieren. Bewertung der Umformeigenschaften mehrlagiger Blechwerkstoffe der ausscheidungshärtbaren Legierung AA6014
LFT, x u. 157 Seiten, 64 Bilder, 5 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-344-1.

Band 353: Christof Küstner
Assistenzsystem zur Unterstützung der datengetriebenen Produktentwicklung
KTmfk, xii u. 219 Seiten, 63 Bilder, 14 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-348-9.

Band 354: Tobias Gläsel
Prozessketten zum Laserstrahlschweißen von flachleiterbasierten Formspulenwicklungen für automobiler Traktionsantriebe
FAPS, xiv u. 206 Seiten, 89 Bilder, 11 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-356-4.

Band 355: Andreas Meinel
Experimentelle Untersuchung der Auswirkungen von Axialschwingungen auf Reibung und Verschleiß in Zylinderrollenlagern
KTmfk, xii u. 162 Seiten, 56 Bilder, 7 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-358-8.

Band 356: Hannah Riedle
Haptische, generische Modelle weicher anatomischer Strukturen für die chirurgische Simulation
FAPS, xxx u. 179 Seiten, 82 Bilder, 35 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-367-0.

Band 357: Maximilian Landgraf
Leistungselektronik für den Einsatz dielektrischer Elastomere in aktorischen, sensorischen und integrierten sensomotorischen Systemen
FAPS, xxiii u. 166 Seiten, 71 Bilder, 10 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-380-9.

Band 358: Alireza Esfandiyari
Multi-Objective Process Optimization for Overpressure Reflow Soldering in Electronics Production
FAPS, xviii u. 175 Seiten, 57 Bilder, 23 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-382-3.

Band 359: Christian Sand
Prozessübergreifende Analyse komplexer
Montageprozessketten mittels
Data Mining
FAPS, XV u. 168 Seiten, 61 Bilder, 12 Tab.
2021. ISBN 978-3-96147-398-4.

Band 360: Ralf Merkl
Closed-Loop Control of a Storage-Sup-
ported Hybrid Compensation System for
Improving the Power Quality in Medium
Voltage Networks
FAPS, xxvii u. 200 Seiten, 102 Bilder, 2
Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-402-8.

Band 361: Thomas Reitberger
Additive Fertigung polymerer optischer
Wellenleiter im Aerosol-Jet-Verfahren
FAPS, xix u. 141 Seiten, 65 Bilder, 11 Tab.
2021. ISBN 978-3-96147-400-4.

Band 362: Marius Christian Fechter
Modellierung von Vorentwürfen in der
virtuellen Realität mit natürlicher
Fingerinteraktion
KTmfk, x u. 188 Seiten, 67 Bilder, 19 Tab.
2021. ISBN 978-3-96147-404-2.

Band 363: Franziska Neubauer
Oberflächenmodifizierung und Entwick-
lung einer Auswertemethodik zur Ver-
schleißcharakterisierung im Presshär-
teprozess
LFT, ix u. 177 Seiten, 42 Bilder, 6 Tab.
2021. ISBN 978-3-96147-406-6.

Band 364: Eike Wolfram Schäffer
Web- und wissensbasierter Engineering-
Konfigurator für roboterzentrierte Auto-
matisierungslösungen
FAPS, xxiv u. 195 Seiten, 108 Bilder, 25
Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-410-3.

Band 365: Daniel Gross
Untersuchungen zur kohlenstoffdioxid-
basierten kryogenen Minimalmengen-
schmierung
REP, xii u. 184 Seiten, 56 Bilder, 18 Tab.
2021. ISBN 978-3-96147-412-7.

Band 366: Daniel Junker
Qualifizierung laser-additiv gefertigter
Komponenten für den Einsatz im Werk-
zeugbau der Massivumformung
LFT, vii u. 142 Seiten, 62 Bilder, 5 Tab.
2021. ISBN 978-3-96147-416-5.

Band 367: Tallal Javied
Totally Integrated Ecology Management
for Resource Efficient and Eco-Friendly
Production
FAPS, xv u. 160 Seiten, 60 Bilder, 13 Tab.
2021. ISBN 978-3-96147-418-9.

Band 368: David Marco Hochrein
Wälzlager im Beschleunigungsfeld – Eine
Analysestrategie zur Bestimmung des
Reibungs-, Axialschub- und Temperatur-
verhaltens von Nadelkränzen –
KTmfk, xiii u. 279 Seiten, 108 Bilder,
39 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-420-2.

Band 369: Daniel Gräf
Funktionalisierung technischer Oberflächen mittels prozessüberwachter aerosolbasierter Drucktechnologie
FAPS, xxii u. 175 Seiten, 97 Bilder, 6 Tab.
2021. ISBN 978-3-96147-433-2.

Band 370: Andreas Gröschl
Hochfrequent fokusabstandsmodulierte Konfokalsensoren für die Nanokoordinatenmesstechnik
FMT, x u. 144 Seiten, 98 Bilder, 6 Tab.
2021. ISBN 978-3-96147-435-6.

Band 371: Johann Tüchsen
Konzeption, Entwicklung und Einführung des Assistenzsystems D-DAS für die Produktentwicklung elektrischer Motoren
KTmfk, xii u. 178 Seiten, 92 Bilder, 12 Tab.
2021. ISBN 978-3-96147-437-0.

Band 372: Max Marian
Numerische Auslegung von Oberflächenmikrostrukturen für geschmierte tribologische Kontakte
KTmfk, xviii u. 276 Seiten, 85 Bilder, 45 Tab.
2021. ISBN 978-3-96147-439-4.

Band 373: Johannes Strauß
Die akustooptische Strahlformung in der Lasermaterialbearbeitung
LPT, xvi u. 113 Seiten, 48 Bilder.
2021. ISBN 978-3-96147-441-7.

Band 374: Martin Hohmann
Machine learning and hyper spectral imaging: Multi Spectral Endoscopy in the Gastro Intestinal Tract towards Hyper Spectral Endoscopy
LPT, x u. 137 Seiten, 62 Bilder, 29 Tab.
2021. ISBN 978-3-96147-445-5.

Band 375: Timo Kordaß
Lasergestütztes Verfahren zur selektiven Metallisierung von epoxidharzbasierten Duromeren zur Steigerung der Integrationsdichte für dreidimensionale mechanische Package-Baugruppen
FAPS, xviii u. 198 Seiten, 92 Bilder, 24 Tab.
2021. ISBN 978-3-96147-443-1.

Band 376: Philipp Kestel
Assistenzsystem für den wissensbasierten Aufbau konstruktionsbegleitender Finite-Elemente-Analysen
KTmfk, xviii u. 209 Seiten, 57 Bilder, 17 Tab.
2021. ISBN 978-3-96147-457-8.

Band 377: Martin Lerchen
Messverfahren für die pulverbettbasierte additive Fertigung zur Sicherstellung der Konformität mit geometrischen Produktspezifikationen
FMT, x u. 150 Seiten, 60 Bilder, 9 Tab.
2021. ISBN 978-3-96147-463-9.

Band 378: Michael Schneider
Inline-Prüfung der Permeabilität in weichmagnetischen Komponenten
FAPS, xxii u. 189 Seiten, 79 Bilder, 14 Tab.
2021. ISBN 978-3-96147-465-3.

Band 379: Tobias Sprügel

Sphärische Detektorflächen als Unterstützung der Produktentwicklung zur Datenanalyse im Rahmen des Digital Engineering

KTmfk, xiii u. 213 Seiten, 84 Bilder, 33 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-475-2.

Band 380: Tom Häfner

Multipulseffekte beim Mikro-Materialabtrag von Stahllegierungen mit Pikosekunden-Laserpulsen

LPT, xxviii u. 159 Seiten, 57 Bilder, 13 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-479-0.

Band 381: Björn Heling

Einsatz und Validierung virtueller Absicherungsmethoden für abweichungsbehaftete Mechanismen im Kontext des Robust Design

KTmfk, xi u. 169 Seiten, 63 Bilder, 27 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-487-5.

Band 382: Tobias Kolb

Laserstrahl-Schmelzen von Metallen mit einer Serienanlage – Prozesscharakterisierung und Erweiterung eines Überwachungssystems

LPT, xv u. 170 Seiten, 128 Bilder, 16 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-491-2.

Band 383: Mario Meinhardt

Widerstandselementschweißen mit gestauchten Hilfsfügeelementen - Umformtechnische Wirkzusammenhänge zur Beeinflussung der Verbindungsfestigkeit

LFT, xii u. 189 Seiten, 87 Bilder, 4 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-473-8.

Band 384: Felix Bauer

Ein Beitrag zur digitalen Auslegung von Fügeprozessen im Karosseriebau mit Fokus auf das Remote-Laserstrahlschweißen unter Einsatz flexibler Spanntechnik

LFT, xi u. 185 Seiten, 74 Bilder, 12 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-498-1

Band 385: Jochen Zeitler

Konzeption eines rechnergestützten Konstruktionssystems für optomechatronische Baugruppen

FAPS, xix u. 172 Seiten, 88 Bilder, 11 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-499-8.

Abstract

With light signals in optical waveguides, very large amounts of data can be transmitted quickly and largely without interference. In the industrial and infrastructural sectors, e.g. in the automotive and aviation industries, demand is therefore increasing to further exploit this potential. What must development processes look like in order to integrate systems that transmit data by means of light? This is a central question for current research. So far, there is no modelling approach for the design of optomechatronic assemblies. The integration of optoelectronic components is an enormous challenge, since optical functions must be modelled in addition to the differences in the design procedures for mechatronic assemblies.

This thesis deals with the conceptual design of a system for the computer-aided development of optomechatronic assemblies, so-called 3D opto-MIDs. The aim of the work is to represent the interaction of the domains mechanics, electronics and optics in a holistic product development process. For this purpose, tasks such as the integration of electrical circuits as well as functionalities for the design of optical networks must be covered. For this purpose, it is first necessary to identify relevant sub-aspects and components to be realised in such a system. From these findings, a concept is developed of how the procedural flow of a corresponding system can look. By means of a prototypical implementation, a procedure for the design of the optomechatronic construction system is finally derived and evaluated.

Mit Lichtsignalen in optischen Wellenleitern lassen sich schnell und weitgehend störungsfrei sehr große Datenmengen übertragen. Im industriellen und infrastrukturellen Bereich, z.B. in der Automobil- und Luftfahrtindustrie, steigt daher die Nachfrage, dieses Potential weiter auszuschöpfen. Wie müssen Entwicklungsprozesse aussehen, um Systeme, die Daten mittels Licht übertragen, zu integrieren? Dies ist eine zentrale Frage an die aktuelle Forschung. Bisher existiert kein Modellierungsansatz für die Konstruktion optomechatronischer Baugruppen. Die Integration optoelektronischer Komponenten stellt eine enorme Herausforderung dar, da neben den Unterschieden der Konstruktionsverfahren für mechatronische Baugruppen auch optische Funktionen modelliert werden müssen.

Diese Arbeit behandelt den konzeptionellen Entwurf eines Systems zur rechnergestützten Entwicklung optomechatronischer Baugruppen, sogenannten 3D-Opto-MIDs. Ziel der Arbeit ist es, das Zusammenwirken der Domänen Mechanik, Elektronik und Optik in einem ganzheitlichen Produktentwicklungsprozess darzustellen. Dazu müssen Aufgaben wie die Integration von elektrischen Schaltungen, als auch Funktionalitäten zum Entwurf optischer Netze abgedeckt werden. Hierfür ist es zunächst notwendig relevante Teilaspekte und zu realisierende Komponenten eines solchen Systems zu identifizieren. Aus diesen Erkenntnissen wird ein Konzept erarbeitet, wie der prozedurale Ablauf eines entsprechenden Systems aussehen kann. Durch eine prototypische Implementierung wird eine Vorgehensweise zum Aufbau des optomechatronischen Konstruktionssystems abschließend abgeleitet und bewertet.

