



HELMUT SCHMIDT
UNIVERSITÄT

Universität der Bundeswehr Hamburg

Martin Grundel

Skizzen-Port-Modell

Ein Modell zur Überbrückung der derzeitigen Lücke
in der modellbasierten Konzeption mechanischer
Systeme

Berichte aus dem Institut für
Konstruktions- und Fertigungstechnik

Skizzen-Port-Modell
Ein Modell zur Überbrückung der derzeitigen
Lücke in der modellbasierten Konzeption
mechanischer Systeme

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg
zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs
genehmigte

DISSERTATION
vorgelegt von

Martin Grundel

aus Georgsmarienhütte

Hamburg 2017

Referent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Frank Mantwill
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Jutta Abulawi

Tag der mündlichen Prüfung: 13. Oktober 2017

Berichte aus dem Institut für Konstruktions- und
Fertigungstechnik

Band 45

Martin Grundel

Skizzen-Port-Modell

Ein Modell zur Überbrückung der derzeitigen Lücke in der
modellbasierten Konzeption mechanischer Systeme

Shaker Verlag
Aachen 2017

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.

Zugl.: Hamburg, Helmut-Schmidt-Univ., Diss., 2017

Copyright Shaker Verlag 2017

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5599-3

ISSN 1861-5260

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen
Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

*“Probleme kann man nicht mit derselben Denkweise
lösen, durch die sie entstanden sind.”*

Albert Einstein

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Professur für Maschinenelemente und Rechnergestützte Produktentwicklung des Instituts für Konstruktions- und Fertigungstechnik im Fachbereich Maschinenbau an der Helmut-Schmidt-Universität, Universität der Bundeswehr Hamburg zwischen Oktober 2012 und Februar 2017.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Frank Mantwill, dem Lehrstuhlinhaber, für die wissenschaftliche Betreuung meiner Arbeit. Die vielen konstruktiven Gespräche, die kontinuierliche Unterstützung und das mir entgegengebrachte Vertrauen waren von maßgeblicher Bedeutung für das Gelingen dieser Arbeit.

Frau Prof. Dr.-Ing. Jutta Abulawi, Professorin für Systems Engineering und CAD im Department für Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau an der HAW Hamburg, gilt ebenso mein besonderer Dank, da Sie maßgeblich an der Initiierung des Forschungsprojektes beteiligt war. Die vielen intensiven Diskussionen und ihre Begeisterung für mein Forschungsthema ließen mich immer wieder neuen Mut schöpfen und bestärkten mich im Verfolgen neuer Ansätze. Es freut mich daher besonders, dass Frau Abulawi Korreferentin meiner Arbeit geworden ist.

Herrn Prof. Dr. rer. nat. habil. Markus Bause, Inhaber der Professur für Numerische Mathematik an der Helmut Schmidt Universität, danke ich für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Bei meinen Forschungskollegen im FAS4M-Projekt, namentlich Dr.-Ing. Sven Kleiner, Christoph Kramer, Stephan Kümpel, Georg Moeser, Stephan Roth, Axel Scheithauer und Tim Weilkiens, möchte ich mich für 30 Monate intensive und vertrauensvolle Forschungsarbeit herzlichst bedanken. Bei den regelmäßigen Treffen gab es immer einen regen, bereichernden und freundschaftlichen Ideenaustausch, den ich sehr genossen habe.

Meinen Kollegen am Lehrstuhl danke ich für die vielen thematischen Diskurse, die offenen Ohren und den Spaß bei der Arbeit. Dies ließ mich immer wieder gerne den langen Weg zur Uni aufnehmen. Namentlich möchte ich Herrn Florian Tichla, Frau Tanja Blöß und Herrn Stephan Scheele hervorheben. Über zwei Jahre hinweg unterstützte mich Herr Joscha Loewner als Studentische Hilfskraft mit großem Engagement, Selbstständigkeit und zeichnerischer Kunstfertigkeit, wofür ich mich gerne bedanken möchte.

Meinen Freunden und Bekannten danke ich herzlichst für ihr reges Interesse an meiner Arbeit und ihren unbeirrbaren Glauben an das Gelingen dieser Arbeit.

Zu guter Letzt möchte ich mich bei meinen Eltern Elisabeth und Aloys Grundel sowie bei meiner Frau Maren Rosensträter herzlichst bedanken. Ohne euren kontinuierlichen Rückhalt hätte es diese Dissertation nicht gegeben. Danke!

Buxtehude, im Oktober 2017

Martin Grundel

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	VIII
Abkürzungsverzeichnis	IX
1 Präliminarien	1
2 Einleitung.....	2
2.1 Hintergrund.....	2
2.2 Zielsetzung	3
2.3 Inhaltsübersicht	3
3 Herleitung der Problemstellung	4
3.1 Herausforderungen	4
3.1.1 Unternehmerische Herausforderungen	4
3.1.2 Herausforderungen in der Entwicklung	7
3.2 Zwischenfazit	8
4 Stand der Technik und Forschung	9
4.1 Systems Engineering	9
4.1.1 Technische Systeme.....	11
4.1.2 Systemisches Denken – Systems Thinking	16
4.1.3 Systems Engineering Inhalte und Vorteile	17
4.1.4 Modelle.....	24
4.1.5 Model Based Systems Engineering	33
4.1.6 OMG SysML™	35
4.1.7 Systems Engineering und Konstruktionsmethodik	41
4.2 Entwicklung mechanischer Systeme	41
4.2.1 Klassifizierung von Konstruktionen nach dem Neuheitsgrad.....	42
4.2.2 Konstruktionsaufgaben und -probleme.....	43
4.2.3 Konstruktionsmethodik.....	45
4.2.4 Methodische Vorgehensmodelle – Produktentstehungsprozess.....	48
4.2.5 Konzeptentwicklung	51
4.2.6 Anforderungen	54
4.2.7 Funktionen	56

4.2.8	Prinziplösungen.....	65
4.2.9	Morphologischer Kasten und Auswahl einer (optimalen) Gesamtlösung	66
4.2.10	Technische Skizzen	72
4.2.11	Rechnerunterstütztes Konstruieren – CAD.....	77
4.3	Zwischenfazit	93
5	Aktuelle Entwicklungen in der modellbasierten Konzeptentwicklung.....	95
5.1	Modellierungssprachen für den Logical-Layer – Hypothesenbildung	95
5.2	Ansätze zum Schließen der Modellierungssprachenlücke	99
5.2.1	CATIA V6	100
5.2.2	Das FAS4M-Projekt	101
5.2.3	Zwischenfazit und weitere Hypothesen	108
6	Erweiterung von Portkonzept und Skizziermethode.....	111
6.1	Festlegung der Arbeitsmethodik	111
6.1.1	Arbeitsmethodik für die Erweiterung	111
6.1.2	Arbeitsmethodik für die Überprüfung der Erweiterung.....	113
6.2	Erweiterung des Portkonzepts	113
6.2.1	Informationsports	116
6.2.2	Stoffports	116
6.2.3	Energieports.....	119
6.2.4	Multiports.....	120
6.2.5	Hierarchisierung von Ports.....	121
6.2.6	Flüsse zwischen Ports	122
6.2.7	Verknüpfen von Flüssen	127
6.2.8	Bewertung der Konsistenz von Gesamtlösungen	128
6.3	Erweiterung der Skizziermethode	129
6.3.1	Komponenten.....	130
6.3.2	Kinematik	131
6.3.3	Anforderungen	132
6.3.4	Funktionen	133
6.3.5	Geometrische Constraints und Attribute	134
6.3.6	Materialien.....	135
6.3.7	Verbindungstechnik.....	136
6.3.8	Kommentar.....	136
6.4	Zwischenfazit und weitere Hypothesen	137
7	Das Skizzen-Port-Modell.....	139
7.1	SkiPo Inhalte	139
7.1.1	Basisblock des SkiPo.....	140
7.1.2	Verschachtelung von Basisblöcken	141

7.1.3	Baustruktur aus dem SkiPo ableiten	143
7.1.4	Erstellen von CAD-Modellen auf Grundlage eines SkiPo-Modells	144
7.1.5	Modellwiederverwendung und Variantenuntersuchung	146
7.1.6	Flexible Systementwicklung mit dem SkiPo-Modell.....	147
7.1.7	Assistenz für die SkiPo-Modellerstellung.....	148
7.2	Zwischenfazit zum SkiPo-Ansatz	152
8	Auswertung der empirischen Untersuchungen	155
8.1	Ziel der empirischen Untersuchung	155
8.2	Durchführung der empirischen Untersuchung	155
8.2.1	Fragebogendesign	155
8.2.2	Portkonzept.....	157
8.2.3	Skizziermethode.....	161
8.3	Resümee der empirischen Untersuchung.....	165
9	Schlussbetrachtung	166
9.1	Zusammenfassung.....	166
9.2	Ausblick.....	167
10	Literaturverzeichnis.....	169
11	Anhang.....	190
11.1	Auswertung von studentischen SysML-Projekten	190
11.2	Umfrage zum Einsatz von Funktionsmodellen in der technischen Entwicklung und Konstruktion	192
11.3	Fragebögen Portkonzept.....	193
11.4	Fragenbogenergebnisse Portkonzept	197
11.5	Fragebögen Skizziermethode	200
11.6	Fragebogenergebnisse Skizziermethode	204
12	Lebenslauf.....	207

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Die technische Entwicklung ist ein zentraler Faktor im Spannungsfeld unternehmerischer Herausforderungen	6
Abbildung 2: Hierarchische Entwicklung, in Anlehnung an [Ehr07]	7
Abbildung 3: Prinzipielle Darstellung eines Systems mit Ein- und Ausgangsgrößen in Anlehnung an [FG13] und [HWF12].....	12
Abbildung 4: Ein- und Ausgänge eines Systems	13
Abbildung 5: Das top-down-Prinzip entspricht der Black-Box-White-Box-Betrachtung nach [HWF12] 16	
Abbildung 6: Vernetztes Denken – Ausschnitt aus dem Beispiel einer Lagerhaltung nach [HWF12] ..	17
Abbildung 7: Das V-Modell nach [VDI04b].....	22
Abbildung 8: Zusammenhang zwischen SE-Einsatz und Projekt Performance nach [EG12]	22
Abbildung 9: Zusammenhang zwischen SE-Aufwand und Projektkostenüberschreitung nach [BKC16]	23
Abbildung 10: Zusammenhang zwischen Methoden und Prozess	25
Abbildung 11: Schematische Darstellung einer Modellbildung, in Anlehnung an [Sta73]	27
Abbildung 12: Abstraktionslevel von Modellen nach [VDI96].....	29
Abbildung 13: Detailliertes Vorgehen und potentielle Fehlerquellen bei der Modellierung nach [KFG02]	32
Abbildung 14: RFLP im V-Modell nach [KK13].....	34
Abbildung 15: Beispiel für den RFLP-Ansatz	35
Abbildung 16: Taxonomie der SysML Diagramme frei nach [FMS12], [WRF15], [Wei08], [OMG15b].	36
Abbildung 17: SysML-Diagrammrahmen nach [OMG15b].....	37
Abbildung 18: bdd einer Automobilstruktur	38
Abbildung 19: ibd des Antriebs mit Darstellung des Energieflusses	39
Abbildung 20: Block mit Structure Compartment	39
Abbildung 21: Beispiel für die Verwendung von Ports nach [OMG15b].....	40
Abbildung 22: Problemschwierigkeit und deren Merkmale und Einflüsse nach [Ehr07]	44
Abbildung 23: Einteilung von Konstruktionsaufgaben und -problemen in einer Problematrix nach [Ehr07]	44
Abbildung 24: Produktentwicklung nach [VDI93]	50
Abbildung 25: Greybox-Darstellung der Konzeptphase	52
Abbildung 26: Kumulierte Lebenszykluskosten mit Lokalisierung des Frontloading nach [Eig10]	53

Abbildung 27: Projektaktivität mit und ohne Frontloading nach [Bee08].....	54
Abbildung 28: Anforderungsliste nach [FG13]	55
Abbildung 29: Lösungsneutrale Funktion mit Umsatz von Energie, Stoff und Information nach [FG13]	56
Abbildung 30: Aufgliederung von Funktionen nach [FG13].....	57
Abbildung 31: Elementaroperationen nach [PBF05].....	58
Abbildung 32: Darstellungsübersicht von Funktionsmodellen nach [Lin13].....	60
Abbildung 33: Tabellarische Funktionsliste am Beispiel Fahrersitz nach [Abu11].....	60
Abbildung 34: Hierarchisches Funktionsmodell am Beispiel einer Autotür nach [Lin13].....	61
Abbildung 35: Umsatzorientiertes Funktionsmodell nach [PL11].....	62
Abbildung 36: Relationsorientiertes Funktionsmodell für einen Einkaufswagen nach [Lin13].....	63
Abbildung 37: Nutzerorientierte Funktionsmodellierung nach [OMG15b].....	63
Abbildung 38: Strategie bei der Lösungssuche mit Morphologischem Kasten nach [Ehr07]	67
Abbildung 39: Prinzipieller Aufbau eines Morphologischen Kastens mit der Auswahl von zwei Gesamtlösungen nach [PBF05].....	68
Abbildung 40: Durch Hilfsfunktionen fächern sich weitere Morphologische Kästen auf	71
Abbildung 41: Skizze mit abgeleiteter Produktstruktur.....	77
Abbildung 42: Informationsgehalt eines integrierten Produktmodells nach [Abu12].....	78
Abbildung 43: Repräsentationsformen für 3D-Modelle nach [VWB09].....	81
Abbildung 44: 3D-Draht- und Flächenmodell desselben Bauteils nach [Abu12]	81
Abbildung 45: Volumenmodellarten in 3D-CAD-Systemen nach [Abu12]	83
Abbildung 46: Strukturbaum und Geometrieansicht eines in CATIA V5 modellierten Konturstücks [Abu12].....	86
Abbildung 47: Strukturbaum und Geometrieansicht einer in CATIA V5 modellierten Spannstelle [Abu12].....	87
Abbildung 48: Entwicklungsstufen der CAD-Technologie nach [Lie04].....	89
Abbildung 49: Verknüpfungskette eines assoziativen Modells nach [AM07]	90
Abbildung 50: Gegenüberstellung von Konstruktionsmethodik nach VDI 2221 und dem V-Modell im Systems Engineering	93
Abbildung 51: Darstellung der Lücke in den Modellierungssprachen nach [GAM14].....	96
Abbildung 52: Abstraktionslevel zwischen Funktions- und 3D-CAD-Modellen nach [VDI96]	98
Abbildung 53: Illustration der Modellierungssprachenlücke als Canyon.....	98
Abbildung 54: Logical-Layer in CATIA V6 am Beispiel des Tool Vendor Projects der GfSE (Bildquelle :em engineering methods AG).....	100
Abbildung 55: Hauptsprachelemente der Mechanics Modeling Language (MechML) nach [MKG15] 102	
Abbildung 56: Blockdefinitionsdiagramm mit verbundenen Ports für eine Überwachungsdrohne [MGW16].....	105

Abbildung 57: ibd mit farblicher Kennzeichnung der Verbindungskonsistenz	106
Abbildung 58: Für die Konsistenzbewertung zusätzlich notwendige Modellelemente.....	106
Abbildung 59: Freie Skizzen und Skizzenbereiche im MechML-Sprachprofil nach [MKG15].....	107
Abbildung 60: Konstruktiv wichtige Informationen in einer Skizze der Überwachungsdrohne [MGW16]	108
Abbildung 61: Unschärfewolke nach [VG15].....	112
Abbildung 62: Übersicht der Evaluationsmethodik nach [Oel15]	113
Abbildung 63: Überlagerungsmatrix für Stoff, Energie und Information an Schnittstellen	115
Abbildung 64: Beispiele für Informationsports.....	116
Abbildung 65: Beispiele für Stoffports	117
Abbildung 66: Darstellungsmöglichkeiten von Wertebereichen	118
Abbildung 67: Unterschiedliche Darstellungsformen von gleichen Stoffports.....	118
Abbildung 68: Darstellung von Stoffgemischen.....	118
Abbildung 69: Beispiele für Energieports	119
Abbildung 70: Unterschiedliche Darstellungsformen von gleichen Energieports.....	120
Abbildung 71: Energiegebundene Informationsübertragung modellieren	120
Abbildung 72: Beispiele für kombinierte Stoff-Energie-Ports	121
Abbildung 73: Beispiel einer Werkstoffzuordnung (Ausschnitt)	122
Abbildung 74: Validitätsbewertung kontinuierlicher Stoffflüsse	124
Abbildung 75: Validitätsbewertung kontinuierlicher Energieflüsse.....	125
Abbildung 76: Validitätsbewertung von kontinuierlichen Multiports	125
Abbildung 77: Beispiele diskontinuierlicher Flüsse zwischen Umwelt und System	126
Abbildung 78: Modellierung diskontinuierlicher Flüsse ohne Modellierung der Umwelt	126
Abbildung 79: Zusammenführen und Aufteilen von Flüssen.....	127
Abbildung 80: Direkte Verbindung mit der Systemumgebung	127
Abbildung 81: Komponenten der Druckluftherzeugung	130
Abbildung 82: Gekennzeichneter Luftfluss (Kinematik) durch die Druckluftherzeugung	132
Abbildung 83: Anforderungen an die entsprechenden Skizzenbereiche zugeordnet	132
Abbildung 84: Orte der Funktions-Gestalt-Synthese hervorheben	133
Abbildung 85: Beispiele für die Explizierung konstruktiv wichtiger Constraints und Attribute in einer Skizze	135
Abbildung 86: Materialien der Druckluftherzeugung	135
Abbildung 87: Beispiele für Verbindungstechnik in einer Skizze	136
Abbildung 88: Kommentare in Skizzen	137
Abbildung 89: Basisblock des SkiPo mit dem Beispiel einer Druckluftherzeugung	140
Abbildung 90: Dekomposition der Druckluftherzeugung	142

Abbildung 91: Baustuktur auf Grundlage des SkiPo erstellen	143
Abbildung 92: Baustuktur in eine CAD-Struktur (hier CATIA V5) mit Adapter überführt	145
Abbildung 93: Übernahme von konstruktiven Inhalten in ein CAD-Modell (CATIA V5).....	145
Abbildung 94: CAD-Modellerstellung mit Unterstützung der Skizzeninformationen	146
Abbildung 95: Hierarchie und Sichtbarkeit von Objekten in MS-PowerPoint für Windows	149
Abbildung 96: Zusätzliche Menüleiste für die SkiPo-Modellerstellung.....	150
Abbildung 97: Die Arbeitsweise der Funktion <i>Block als Bild</i>	151
Abbildung 98: SkiPo-Modell als Brücke zwischen Funktions- und CAD-Modellen	153
Abbildung 99: Darstellung eines durchgängigen, modellbasierten Konstruktionsprozesses mit SkiPo	154
Abbildung 100: Bewertungs-Kombinationsmöglichkeiten beim Kano-Fragebogen nach [Höl08], [HM09]	156

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Einige Prozesse, Methoden und Aktivitäten des SE nach [WRF15]	20
Tabelle 2: SE-Return on Investment (ROI) nach [Hon13].....	24
Tabelle 3: Liste der Unterscheidungskriterien und ihrer Ausprägungen	29
Tabelle 4: Kriterien für die Formulierung von Anforderungen nach [Abu11], [HW05], [HFP08]	55
Tabelle 5: Vor- und Nachteile eines historienfreien CAD-Systems [Abu12]	87
Tabelle 6: Vor- und Nachteile eines historienbasierten CAD-Systems [Abu12]	88
Tabelle 7: Vor- und Nachteile des RFLP-Ansatzes in CATIA V6 nach [KK13], [Kra16]	101
Tabelle 8: Auswertung der Befragung (Mehrfachnennungen möglich) nach [Mon12].....	191
Tabelle 9: Fehlerhäufigkeit der SysML-Diagramme in den Teamberichten nach [Mon12].....	191
Tabelle 10: Fragebogenergebnisse Portkonzept im Wintersemester 2015-16.....	197
Tabelle 11: Fragebogenergebnisse Portkonzept im Sommersemester 2016	198
Tabelle 12: Ergebnisse der Kano-Fragen zum Port-Modell im Sommersemester 2016	199
Tabelle 13: Fragebogenergebnisse Skizziermethode im Wintersemester 2015-16	204
Tabelle 14: Fragebogenergebnisse Skizziermethode im Sommersemester 2016	205
Tabelle 15: Ergebnisse der Kano-Fragen zur Skizziermethode im Wintersemester 2015-16	206
Tabelle 16: Ergebnisse der Kano-Fragen zur Skizziermethode im Sommersemester 2016	206

Abkürzungsverzeichnis

3D	Dreidimensional
bdd	Blockdefinitionsdiagramm
B-Rep	Boundary Representation
C&C ² -A	Contact and Channel Ansatz
CA	Computer Aided
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
COP	Carry Over Part
DMU	Digital Mock-Up
DSM	Design Structure Matrix
F&E	Forschung und Entwicklung
FAS4M	Functional Architecture of Systems for Mechanical Engineers (Arbeitstitel des ZIM-Forschungsprojekts)
GfSE	Gesellschaft für Systems Engineering (Deutscher Ortsverband von INCOSE)
ibd	Internes Blockdiagramm (der SysML)
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
INCOSE	International Council on Systems Engineering
KBE	Knowledge Based Engineering
KM	Konstruktionsmethodik
MBSE	Model Based Systems Engineering
MechML	Mechanics Modeling Language
MK	Morphologischer Kasten
MML	Multi-Model-Link
NC	Numerical Control
OEM	Original Equipment Manufacturer
QFD	Quality Function Deployment
PEP	Produktentstehungsprozess
PAKo	Parametrisch-assoziative Konstruktion

ReqIF	Requirements Interchange Format
ROI	Return on Investment
SE	Systems Engineering
SEBoK	Systems Engineering Body of Knowledge
SkiPo	Skizzen-Port-Modell
STEP	Standard for the Exchange of Product model data
SysML	Systems Modeling Language (der Object Management Group)
TVP	Tool Vendor Project
TZ	Technisches Zeichnen
UDF	User-Defined-Feature
UML	Unified Modeling Language (der Object Management Group)
VDA	Verband der Automobilindustrie
VR	Virtual Reality
VHDL	Very High Speed Integrated Circuit Hardware Description Language
ZIM	Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie