

Steffen Reichert

**COMPUTATIONAL DESIGN METHODEN
FÜR DIE GESTALTUNG VON AUTOMOBILEN**

FORSCHUNGSBERICHTE

Institut für Computerbasiertes Entwerfen und Baufertigung

3

Steffen Reichert

**COMPUTATIONAL DESIGN METHODEN
FÜR DIE GESTALTUNG VON AUTOMOBILEN**

FORSCHUNGSBERICHTE
Institut für Computerbasiertes Entwerfen und Baufertigung

3

FORSCHUNGSBERICHTE

Institut für Computerbasiertes Entwerfen und Baufertigung

Herausgegeben von Prof. Achim Menges

Steffen Reichert

COMPUTATIONAL DESIGN METHODEN

FÜR DIE GESTALTUNG VON AUTOMOBILEN

© 2020 Institut für Computerbasiertes Entwerfen und Baufertigung

Universität Stuttgart

Keplerstrasse 11

70174 Stuttgart

Deutschland



Universität Stuttgart
Institut für Computerbasiertes
Entwerfen und Baufertigung

D 93

FORSCHUNGSBERICHTE

Institut für Computerbasiertes Entwerfen und Baufertigung

3

ISBN 978-3-9819457-3-7

Alle Rechte, insbesondere der Übersetzung, bleiben vorbehalten. Vervielfältigung jeder Art, auch auszugsweise, ist nicht gestattet. Der Herausgeber übernimmt keine Verantwortung für den Fortbestand oder die Richtigkeit von URLs, für externe Internet-Websites, auf die in diesem Buch verwiesen wird, und garantiert nicht, dass Inhalte auf solchen Websites korrekt oder angemessen sind oder bleiben werden.

Vorwort

Die Dissertation von Herr Steffen Reichert untersucht die Potentiale von Computational Design im Bereich des Automobildesigns. Im Mittelpunkt steht dabei die Erforschung von Gestaltungsstrategien jenseits der in diesem Bereich üblichen manuellen Ansätze mittels generative Designmethoden. Für die Gestaltung von Automobilen finden computerbasierte Ansätze bisher wenig Verbreitung. Durch die relative strikte Trennung zwischen der für die Gestaltung verantwortlichen Designern und der für die digitale Implementierung verantwortlichen Modelleure bleiben die Potentiale generativer, computerbasierter Methoden weitgehend unbeachtet und somit auch ungenutzt. Die Forschung von Steffen Reichert greift diese Situation auf und erarbeitet ein grundlegendes, konzeptionelles Rahmenwerk zur computerbasierten Gestaltgenerierung. Die Arbeit stellt Möglichkeiten für das Automobildesign vor, die die Grenzen herkömmlicher Ansätze weit hinter sich lassen und das Spektrum der Gestaltungsmöglichkeiten erheblich erweitern. Die Dissertation besticht durch eine seltene Kombination aus intellektueller Schärfe, technischer Kompetenz und gestalterischer Sensibilität, was im Ergebnis ein durchaus riskantes Forschungsvorhaben zu einem hervorragenden Resultat geführt hat.

Achim Menges

COMPUTATIONAL DESIGN METHODEN FÜR DIE GESTALTUNG VON AUTOMOBILEN

Von der Fakultät Architektur und Stadtplanung
der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von
Steffen Reichert
Frankfurt am Main

Hauptberichter:
Prof. Achim Menges

Mitberichter:
Prof. Lutz Fügener

Tag der mündlichen Prüfung
03.04.2019

Institut für Computerbasiertes Entwerfen und Baufertigung
Universität Stuttgart
2020

Danksagung

Ich möchte mich bei allen Personen bedanken, die mich bei der Erarbeitung meiner Dissertation fachlich und mental unterstützt haben.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Achim Menges für die Ermöglichung und Betreuung dieser Dissertation. Außerdem möchte ich mich an dieser Stelle in höchster Form für sein langjähriges Mentoring bedanken, das mich nachhaltig fachlich und menschlich geprägt hat.

Herrn Prof. Lutz Fügner danke ich für die Prüfung meiner Arbeit. Ein großer Dank gilt ebenfalls dem Mercedes-Benz Design Center in Sindelfingen. Nur durch die Unterstützung des Mercedes-Benz Design Teams war es möglich, dieser akademischen Arbeit die wichtige Nähe zur Praxis zu verleihen. Aus diesem Grund danke ich ausdrücklich dem Design Management und allen Mitarbeitern. Des Weiteren möchte ich mich bei allen Kollegen des Instituts für Computerbasiertes Entwerfen und Baufertigung für die fachliche und freundschaftliche Unterstützung bedanken.

Von Herzen danke ich meiner Frau Nicola, sowie meiner ganzen Familie für die mentale Unterstützung und das bedingungslose Verständnis.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	v
Danksagung	ix
Abkürzungsverzeichnis	xv
Abbildungsverzeichnis	xvii
Tabellenverzeichnis	xxi
Zusammenfassung	xxiii
Abstract	xv
1 Einleitung	1
1.1 Zielsetzung	1
1.2 Relevanz der Arbeit	3
1.3 Inhaltliche Abgrenzung	8
2 Historische Einordnung von Computational Design	13
2.1 Die Anfänge der Gestaltungsmethodologie	15
2.2 Methodische Gestaltung am Bauhaus	18
2.3 Der Einfluss von generativen Wissenschaften auf die Gestaltung	20
2.4 Design Methods Movement	21

3 Grundlagen und Grundbegriffe zu Computational Design	25
3.1 Ästhetik und Information	25
3.2 Gesetzmäßigkeiten und Prinzipien der Gestaltung	29
3.2.1 Gestaltungsprinzipien	29
3.2.2 Gestaltgesetze	33
3.3 Modell und System	37
3.4 Geometrische Modellierungsparadigmen	42
3.4.1 Explizite Modellierung	42
3.4.2 Assoziative Modellierung	44
3.4.3 Generative Modellierung	45
3.5 Grundlagen der Programmierung	47
3.6 Grundlagen von Daten und Datenstrukturen	51
3.7 Grundlagen zu Algorithmik	52
3.7.1 Suchalgorithmen	56
3.7.2 Sortieralgorithmen	57
4 Stand der Technik	59
4.1 Die Entwicklung des Automobils in den unterschiedlichen industriellen Revolutionen	60
4.2 Bestandteile automobiler Form und Gestalt	64
4.3 Designphasen im Transportation Design	71
4.3.1 Konzeptfindung	75
4.3.2 Gestaltfindung	77
4.4 Werkzeuge, Materialien und Methoden zur Modellierung von Fahrzeugen	80
5 Methoden und Hypothese	89
5.1 Methodologie	89
5.2 Metadesign	91
5.3 Bewertungsmechanismen	92
5.4 Dimensionale Zerlegung automobiler Form	97
5.4.1 Körperanalyse	101
5.4.2 Flächenanalyse	103
5.4.3 Kurvenanalyse	106
5.4.4 Details als hierarchische Gestaltungsebenen	107

6 Konzeptionelles Rahmenwerk von Gestaltgenerierung	109
6.1 Metamodell als variable Komposition	114
6.2 Ästhetischer Raum und theoretischer Morphospace	116
6.3 Formelemente	120
6.3.1 Harte Geometrieobjekte	121
6.3.2 Weiche Geometrieobjekte	124
6.4 Ordnungssysteme	128
6.4.1 Punktobjekte	129
6.4.2 Assoziative Konnektoren	131
6.4.3 Verteilungs- und Unterteilungssysteme	132
6.4.4 Dynamische Ordnungssysteme	134
6.5 Umformungen	136
6.5.1 Affine, formbewahrende Transformationen	137
6.5.2 Non-affine, formverändernde Transformationen	138
6.5.3 Progressionen, Verläufe und Bewegungen	139
6.6 Einflüsse	141
6.6.1 Randbedingungen	141
6.6.2 Äußere Kräfte	142
6.6.3 Steuerungsgrößen	143
7 Fallstudien	147
7.1 Fallstudie 1: Algorithmische Mustergenerierung	149
7.1.1 Kontext und Zielsetzung	149
7.1.2 Methoden	150
7.1.3 Ergebnisse	151
7.2 Fallstudie 2 - Algorithmische Generierung von Fahrzeugkörpern	177
7.2.1 Kontext und Zielsetzung	177
7.2.2 Methoden	179
7.2.3 Ergebnisse	179
7.3 Fallstudie 3 – Algorithmik zur Gestaltanalyse und Gestaltveränderung	187
7.3.1 Kontext	188
7.3.2 Methoden	195
7.3.3 Ergebnisse	196

7.4	Fallstudie 4 - Algorithmische Flächenartikulation	210
7.4.1	Kontext und Zielsetzung	210
7.4.2	Methoden	213
7.4.3	Ergebnisse	213
7.5	Fallstudie 5 - Algorithmische Varianzbildung	223
7.5.1	Kontext und Zielsetzung	223
7.5.2	Methoden	227
7.5.3	Ergebnisse	227
7.6	Fallstudie 6 - Computational Design für aktive/ wandelbare Fahrzeugdesigenelemente	236
7.6.1	Kontext und Zielsetzung	236
7.6.2	Methoden	242
7.6.3	Ergebnisse	243
8 Ergebnisse und Diskussion		263
8.1	Anwendungsgebiete von Algorithmik am Fahrzeug	267
8.2	Computational Design in der Konzeptphase	269
8.3	Potentiale gestalterzeugender Algorithmik	272
8.4	Potentiale analytischer Algorithmik	280
8.5	Potentiale generativer Variabilität und Varianz	285
8.6	Erarbeitung einer spezialisierten Entwicklungsumgebung	288
8.7	Einige Grenzen des Computational Designs	293
9 Schlussbetrachtung		299
9.1	Ausblick	303
9.2	Eine neue Art von Automobil designer?	306
10 Literaturverzeichnis		313

Abkürzungsverzeichnis

<i>API</i>	Application Programming Interface
<i>C0</i>	Positionale Kontinuität
<i>C1</i>	Tangentiale Kontinuität
<i>C2</i>	Krümmungsstetige Kontinuität
<i>CAD</i>	Computer Aided Design
<i>CNC</i>	Computer-Numerical Control
<i>DOGME</i>	Deformation of Geometric Models Editor
<i>EP</i>	Evolutionäre Programmierung
<i>ES</i>	Evolutionäre Strategien
<i>FEM</i>	Finite-Elemente-Methode
<i>FFD</i>	Freiform-Deformation
<i>G0</i>	Positionale Kontinuität
<i>G1</i>	Tangentiale Kontinuität
<i>G2</i>	Krümmungsstetige Kontinuität
<i>GA</i>	Genetische Algorithmen
<i>GUI</i>	Graphical User Interface
<i>HMI</i>	Human-Machine-Interface

<i>NURBS</i>	Non-Uniform Rational B-Spline
<i>O()</i>	Groß-Oh-Notation
<i>OOP</i>	Objektorientierte Programmierung
<i>R</i>	Euklidischer Raum
<i>Re</i>	Reynoldsche Zahl
<i>SOP</i>	Start of Production
<i>t</i>	Variable eines Parameterbereichs einer Kurve
<i>TPL</i>	Textual Programming Language
<i>u</i>	Variable eines Parameterbereichs entlang eine Fläche
<i>UX</i>	User-Experience
<i>v</i>	Variable eines Parameterbereichs entlang eine Fläche
<i>VPL</i>	Visual Programming Language
<i>w</i>	Variable eines Parameterbereichs normal zu Fläche (gelegentlich auch als <i>n</i> definiert)

Abbildungsverzeichnis

- Abb. 1: (A) Das Gesetz der Nähe visualisiert die kognitive Fähigkeit der Gruppenbildung durch Annäherung von Einzelelementen; (B) Das Gesetz der Ähnlichkeit zeigt die kognitive Gruppenbildung durch Zuordnung gleichartiger Elemente; (C) Das Gesetz der „guten“ Fortsetzung zeigt die kognitive Fähigkeit Elemente mit gleicher Richtung visuell zu verbinden.
- Abb. 2: Der Kommunikationsprozess einer Information (nach Seeger) zeigt den Informationsfluss von der Gestaltungsintension und -ausführung eines Designers bis zur Intensionserkennung und Bedienung durch den Benutzer des Objektes. In dieser Grafik werden dabei die Ebenen von Apobetik, Pragmatik, Semantik und Syntax in der Gestaltung und Nutzung visualisiert.
- Abb. 3: Beispielhafter Entwicklungsprozess eines Fahrzeugs (Macey/Wardle 2014)
- Abb. 4: Exemplarisches Volumenmodell zur Analyse körperhafter Proportioneigenschaften. Die xz-Ebene schneidet den Körper und legt die charaktervolle y0-Seitenkontur frei.
- Abb. 5: Zebra-Streifenanalyse zur Krümmungsuntersuchung einer Binnenfläche an einer exemplarischen Fahrzeugaußenhaut.
- Abb. 6: Durch die reduzierte Kurvendarstellung einer Fahrzeugform kann der Charakter einzelner Kurven sowie die Gesamtkomposition aller Kurven beurteilt werden.
- Abb. 7: Schematisches Diagramm eines Metamodells mit seinen inhärenten Bestandteilen: Formelemente, Ordnungssysteme und Umformungen sowie den angrenzenden Faktoren wie Randbedingungen, externe Kräfte und die durch den Nutzer kontrollierbaren Steuerungsgrößen.
- Abb. 8: Schematische Darstellung eines Möglichkeitsraum (ästhetischer Raum). Jede Achse definiert einen Parameterbereich. Jeder Punkt im Raum definiert ein Objekt. Die Anzahl der Parameterbereiche definiert die Dimensionen des Raumes.

- Abb. 9: (A) Low-Polygon-Repräsentation; (B) High-Polygon-Repräsentation.
- Abb. 10: Beispiele von Punktformen nach Wassily Kandinsky. Diese Punktformen zeigen, dass nulldimensionale Punktpositionen visuelle Repräsentationen benötigen um sichtbar zu werden. (ebd.)
- Abb. 11: Matrix von Ordnungselementen (Topologien) dargestellt als Übersicht von Verteilungsmustern. Die Verteilungspositionen werden durch Kreiselemente visuell repräsentiert.
- Abb. 12: Matrix klassischer, kartesischer Rechteckverteilungen, welche in vertikaler Achse durch unterschiedliche Formelemente visualisiert werden. In horizontaler Achse wird lediglich die Größe des Formelements variiert (Umformung). Die rechte Spalte zeigt, dass Verteilungslogiken ebenfalls zur Unterteilung einer Fläche eingesetzt werden können.
- Abb. 13: Verteilungsmuster mit homogenen Progressionen, umgesetzt durch eine lineare Skalierung. Auf diese Weise wird ein Verteilungssystem fließend zum Unterteilungssystem.
- Abb. 14: Matrix von Spiralverteilungen, welche in horizontaler Achse links durch Kreiselemente, mittig durch Voronoi-Zellen und rechts durch eine Delaunay-Triangulierung dargestellt werden. In vertikaler Richtung werden lediglich Generierungsparameter variiert. Diese Darstellung illustriert das gestalterische Potential innerhalb eines simplen Metamodells.
- Abb. 15: Attraktorbasierte Umformungsmethoden: (A) Progressive Skalierung mit Punktattraktor; (B) progressive Skalierung mit zwei Kurvenattraktoren; (C) Ausrichtungstransformation durch eine punktförmige und eine linienförmige Ladung.
- Abb. 16: Visuelle Programmierungskomponente des Topologiemoduls. Dieses Modul erlaubt den zügigen Wechsel zwischen Topologiearten und ihrer Parameter.
- Abb. 17: Visuelle Programmierungskomponente des Attraktormoduls.
- Abb. 18: Visuelle Programmierungskomponente des Flächenverbundmoduls. Dieses Modul erlaubt UV-Parameterinformationen sowie Tangenten- und Normaleninformation einer Verteilung über einen Flächenbund zu ermitteln.
- Abb. 19: Finales Ergebnis des topografischen Kurvenmusters und der progressiven Lautsprecherperforation. (Quelle: Mercedes-Benz)
- Abb. 20: Geometrische Daten der progressiven Lautsprecherperforation. (A-C) Variante 1; (D-F) Variante 2; (A+B) Fahrertür; (C+D) Fondtür; (E+F) Hutablage.
- Abb. 21: Visualisierung von Ladungsformen mithilfe von Äquipotentialflächen: (A) Kugelförmige Ladung; (B) rechteckige Ladungsform; (C) Kombination aus kugelförmigen und rechteckigen Ladungsformen.
- Abb. 22: Generierter Fahrzeugkörper mithilfe algorithmischer Ladungsfelder.

- Abb. 23: Generierter Fahrzeugkörper mit nachgeschalteter Transformation des Voxelraums.
- Abb. 24: Seitenansichten algorithmisch generierter Fahrzeugvolumen.
- Abb. 25: Partielle, ungleichmäßige Skalierung von Fahrzeugkonturen. Die ungleichmäßige Deformation wird durch die Kontrollpunkte des Graphen indirekt gesteuert. Eine automatisierte Veränderung der Kurve produziert automatisiert Formvariationen eines Fahrzeugs.
- Abb. 26: Fahrzeugvolumendeformation mithilfe eines Kontrollvolumens.
- Abb. 27: Landmarkreferenzpunkte zur Proportionsregistrierung.
- Abb. 28: Abbildung zweier übereinandergelegter Fahrzeugvolumen. Visualisierung der Unterschiedlichkeit durch Vektoren zwischen zugeordneten Landmarkpunkten zur Proportionserfassung.
- Abb. 29: Theoretische Landmarkpunkte außerhalb der Fläche, identifizierbar durch Konstruktionsrahmen (Liniengerüst).
- Abb. 30: Prozess der punktbasierten Proportionsanpassung durch manuelle Manipulation der Landmarkpunkte: (A) Zu deformierende Geometrie; (B) Registrierung von Ankerpunkten direkt auf der Geometrie oder frei in der Umgebung; (C) Konvertierung der Referenzpunkte in Manipulationspunkte oder alternativ Definition eines zusätzlichen Satz an Manipulationspunkten; (D) Veränderung aller oder einzelner Landmarkpunkte erzeugt sichtbare Deformation des Objekts.
- Abb. 31: Prozess der punktbasierten Proportionsanpassung mithilfe von Kurvengeometrie: (A) Zu deformierende Geometrie; (B) Erzeugung von Referenzgeometrie wie Kurven oder Flächen; (C) Automatische Konvertierung von Geometrien in Ankerpunkte mit einstellbarer Auflösung; (D) Veränderung der Referenzgeometrieobjekte erlaubt ungleichmäßige Deformation der anzupassenden Geometrie.
- Abb. 32: Lokale Transformation der Kofferraumpartie einer hochauflösenden, polygonalisierten Fahrzeuggestalt.
- Abb. 33: (oben) Vier Element-Grundtypen; (unten) Katalog gekniffter Metallstücke. Die vier Grundtypen werden nach der Anzahl der Kniffe und nach der globalen, regionalen und lokalen Behandlung der Kniffe eingeteilt.
- Abb. 34: Geometrische Repräsentation einer Metallkniffung.
- Abb. 35: Deformationsimulation von Metallkniffungen mithilfe digitaler Federsimulationen.
- Abb. 36: Drei Flächenartikulationsvarianten mit inhärenter Materialverformungslogik. Alle Artikulationen basieren auf einem Fahrzeugkörper und teilen sich somit volumetrische Proportionen.

- Abb. 37: Population generierter Fahrzeugkörper (Lösungsinstanzen).
- Abb. 38: Matrix generierter Lösungsinstanzen.
- Abb. 39: Mercedes-Benz Concept Intelligent Aerodynamic Automobile (Concept IAA) Showcar, (oben) Studioaufnahme; (unten) Windtunnelaufnahme. (Quelle: Mercedes-Benz)
- Abb. 40: Frontansicht des Showcars mit integraler Kühlermaske. (Quelle: Mercedes-Benz)
- Abb. 41: Generierte Instanzen des digitalen Kühlmaskenmodells mit verknüpften Steuerungsparametern.
- Abb. 42: Showcar Mercedes-Benz Concept IAA: (oben) Eingefahrenes Heck; (unten) Ausgefahrene, aerodynamische Heckverlängerung. (Quelle: Mercedes-Benz)
- Abb. 43: Heckmaske mit generiertem Reflektionsmuster im Rückscheinwerfer. (Quelle: Mercedes-Benz)
- Abb. 44: Aerodynamikfelgen mit passiver Kinematik: (oben) Zustand mit dynamischer Schlüsselung; (unten) Aerodynamischer Zustand mit Ähnlichkeiten eines Scheibenrades. (Quelle: Mercedes-Benz)
- Abb. 45: Nahaufnahme des algorithmisch generierten Perforationsmusters zur Belüftung der Bremsanlage. (Quelle: Mercedes-Benz)
- Abb. 46: Heckansicht des Showcars Mercedes-Benz Concept Intelligent Aerodynamic Automobile. (Quelle: Mercedes-Benz)

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Klassifizierungen von Algorithmen nach Geschwindigkeit bzw. Bearbeitungskomplexität.

Zusammenfassung

In dieser Dissertation wird die Anwendbarkeit von computerbasierten Gestaltungsmethoden jenseits klassischer CAD-Modellierung für das Gestaltungsfeld des Automobildesigns untersucht. Formgenerierende Algorithmen und dazugehörige Anwendungsstrategien werden systematisch im Hinblick auf ihre Anwendung im Automobildesign und ihre charakteristische Formensprache vergleichend betrachtet, praktisch erprobt und experimentell erforscht. Weitergehend wird untersucht, zu welchem Zeitpunkt algorithmische Methoden im Gestaltungsprozess einsetzbar sind.

Anfänglich wird die Arbeit in den historischen, methodologischen und theoretischen Kontext der Entwicklung von Computational Design gestellt. Einleitende Grundlagen sowie der Stand der Technik werden erörtert. Anschließend werden syntaktische Bestandteile virtueller Formerzeugung und Formveränderung auf prinzipieller Ebene diskutiert und in Form eines konzeptionellen Gerüsts zusammengefügt. Dieses generalisierte Gerüst soll als Rahmenwerk zur Einordnung der Fallstudien, sowie als generelle Beschreibung eines Gestaltungsystems dienen.

Eine Kollektion aus sechs Fallstudien bietet einen Überblick über Möglichkeiten von Computational Design und die Vielfalt ihrer

Anwendbarkeit im Automobildesign. Die Fallstudien umfassen (1) algorithmische Methoden zur Erzeugung von Mustern, (2) die Erforschung einer generativen Methode zur algorithmischen Erzeugung von dreidimensionalen Fahrzeugkörpern, (3) Umformungsmethoden von Gestaltungen, um geometrische Körper mit erhöhtem Freiheitsgrad deformieren zu können, (4) Methoden der algorithmischen, dreidimensionalen Modulation einer Körperoberfläche, (5) Methoden der algorithmischen Bildung von Entwurfsvarianten, sowie (6) eine empirische Studie zur Validität von Computational Design im praktischen Entwurfsprozess eines Konzeptfahrzeugs.

Aus den Fallstudien ergeben sich eine Reihe übergreifender Erkenntnisse über den Nutzen von Algorithmen und computerbasiertem Entwerfen im automobilen Gestaltungskontext. Es wird diskutiert, welche Arten von algorithmischen Methoden in welchen Gebieten und zu welchen Zeitpunkten Anwendung finden können. Dabei wird aufgezeigt, dass Computational Design mehr als nur die simple Anwendung von Algorithmen bzw. Programmierung im Designprozess bedeutet.

Abstract

This dissertation investigates the applicability of computational design methods beyond classical CAD modelling for the field of automotive design. Form generating algorithms and related application strategies are systematically compared, practically tested and experimentally explored with respect to their use in automotive design and their characteristic shape language. Further, it is investigated at which phase algorithmic methods can be applied in the design process.

Initially, the work is placed in the historical, methodological and theoretical context of the development of computational design. Introductory principles as well as the state of the art are discussed. Subsequently, syntactic components of virtual form generation and form modification are discussed on a principle level and put together in the form of a conceptual framework. This generalized framework will serve as a framework for the classification of the case studies and as a general description of a design system.

A collection of six case studies provides an overview of the possibilities of computational design and the variety of its applications in automotive design. The case studies include (1) algorithmic methods for the generation of patterns, (2) the investigation of a generative method for the algorithmic generation of three-

dimensional vehicle bodies, (3) methods of design transformation in order to be able to deform geometric bodies with an increased degree of freedom, (4) methods of algorithmic, three-dimensional modulation of a body surface, (5) methods of algorithmic creation of design variants, and (6) an empirical study on the validity of computational design in the practical design process of a concept car.

The case studies provide a number of overarching insights into the usefulness of algorithms and computational design in the automotive design context. It is discussed which types of algorithmic methods can be applied in which areas and in which phase of the process. It is shown that computational design means more than the simple application of algorithms or programming in the design process.

1

Einleitung

1.1 Zielsetzung

Das Ziel dieser Dissertation ist der Erkenntnisgewinn über die Anwendbarkeit von computerbasierten Gestaltungsmethoden jenseits klassischer CAD-Modellierung für das Gestaltungsfeld des Automobildesigns. Im Mittelpunkt steht eine systematische Untersuchung formgenerierender Algorithmen und dazugehöriger Anwendungsstrategien. Diese sollen im Hinblick auf ihre Anwendung im Automobildesign und ihre charakteristische Formensprache vergleichend betrachtet, praktisch erprobt und experimentell erforscht werden. Weitergehend wird untersucht, zu welchem Zeitpunkt algorithmische Methoden im Gestaltungsprozess einsetzbar sind.

Bei diesen Untersuchungen soll an keiner Stelle die Expertise eines Automobildesigners infrage gestellt werden. Vielmehr wird erforscht, ob und wie der Arbeitsprozess eines Auto-

mobildesigners durch algorithmische Methoden erweitert und bereichert werden kann. Hierzu werden durch die Unterstützung von Automobile Designern des *Mercedes-Benz Design Centers Sindelfingen* algorithmische Gestaltungsmethoden im Designalltag eingesetzt und in Form von gezielten Fallstudien realitätsnah auf ihre Nützlichkeit überprüft. Gleichzeitig dienen die Fallstudien zur Visualisierung von Eigenschaften und Evaluierung von Vorzügen und Nachteilen unterschiedlicher Arten algorithmischer Gestaltungsmethoden, die in einer systematischen Übersicht kategorisiert werden. Zudem soll die Kategorisierung gestaltungsrelevanter Algorithmen als systematisiertes Nachschlagewerk für die zielgerichtete Anwendung, sowie als vielschichtige Inspirationsquelle für praktizierende Automobile Designer dienen.

1.2 Relevanz der Arbeit

Automobile sind in der Disziplin der Gestaltung für ihr hohes Maß an gestalterischer sowie ingenieurtechnischer Qualität bekannt. Historisch betrachtet, hat die Automobilindustrie sowohl große Beiträge zu der technischen als auch gestalterischen Entwicklung unserer Zivilisation geleistet. Durch neue Technologien wie der E-Mobilität oder der autonomen Fahrzeugsteuerung werden neue Funktionselemente wie Radnabenmotoren, die Unterfluranordnung der Antriebstechnik oder Energiespeicherelemente eingeführt (Seeger 2014, 227) und bestehende Funktionselemente wie das Lenkrad überdacht werden. Die Änderung von Funktionselementen beeinflusst die Gestalt eines Fahrzeugs nachhaltig und eröffnet neue Räume für gestalterische Innovation.

Die Berufe des Produktgestalters, Industriedesigners sowie des Automobildesigners besitzen im Vergleich zum Architekten eine verhältnismäßig junge Tradition. Die Architektur hat in ihrer Historie zahlreiche Grundlagen erarbeitet, die aufgrund ihrer ähnlichen Gestaltungsprozesse ebenfalls für die jüngeren Disziplinen relevant sind und eine Übertragung von gestalterischen und ingenieurtechnischen Methoden und Prinzipien auf diese erlaubt.

Gleichzeitig bot die Entwicklung von Fahrzeugen schon sehr früh eine Inspirationsquelle für die Weiterentwicklung architektonischer Arbeiten. Insbesondere die technologischen Errungenschaften der Automobilbranche, wie deren moderne industrielle Fertigungsmethoden oder ingenieurtechnische Rechenmodelle inspirierten eine Vielzahl von Architekten zu dem Versuch, diese in Anwendungsfelder der Architektur zu

übertragen. Auch die charakteristische Formensprache und die syntaktische Gestaltfinesse von Fahrzeugen bot Inspirationsquelle für die Architektur. Frühe Modernisten wie Le Corbusier, Walter Gropius, Richard Buckminster Fuller und Jan Kaplický versuchten sich selbst daran, Automobile zu gestalten. (Margolius 2000) Umgekehrt besitzen auch viele Automobil-designer ein besonderes Interesse an den charakteristischen Qualitäten von Architektur, insbesondere deren Räumlichkeit und Tektonik. (Baudy et al. 2015) Im Kontext der aktuell rasch fortschreitenden Technikentwicklung bieten computerbasierte Methoden und innovative Fertigungstechniken neue Potentiale für den Designdiskurs und somit neue Überlappungsfelder für beide Gestaltungsdisziplinen.

“I consider three potentials of computers: (1) the computer as a designer, (2) the computer as a partner to the novice with a self-interest, and (3) the computer as a physical environment that knows me”

(Negroponte 1975)

Der Computer hat sich als ein wichtiges Gestaltungsmedium in nahezu allen Bereichen der Gestaltung etabliert und dient im Designprozess als Werkzeug zur Erzeugung und Visualisierung von Gestalt und zur Planung von deren Umsetzung und Nutzung. Im Gegensatz zur Kunst oder der digitalen Grafik sind diese Entwürfe nicht für den virtuellen Raum konzipiert, die virtuelle Entwicklungsumgebung wird im Automobil-design als ein flexibles Repräsentationsmittel für zu materialisierende Objekte verwendet. Während der Computer anfänglich lediglich als eine Art digitale Version eines Zeichenbretts eingesetzt worden ist, werden zunehmend seine prozeduralen und iterativen Leistungs-

fähigkeiten ausgenutzt. Gestaltung mit Hilfe von Computern eröffnet Möglichkeiten, die mit traditionellen manuellen Methoden nicht abzubilden sind. Diese Möglichkeiten gilt es in der vorliegenden Arbeit zu erkunden.

Für die Entwicklung gestaltungsrelevanter, algorithmischer Methoden bietet die Untersuchung existenter Konzepte eine Basis für die geistige Einordnung. Die Nützlichkeit von (mathematischen) Methoden für die Gestaltschaffung wurde in der Vergangenheit wissenschaftlich ausführlich untersucht, mehrfach widerlegt und unter Betrachtung der aktuellen technischen Möglichkeiten erneut aufgegriffen. (Kandinsky 1911, 1926; Birkhoff 1933; Alexander 1964; Bense 1965; Rittel/Webber 1973; Negroponte 1975; Stiny/Gips 1978; Alexander 1978; Bense 1982)

Wie in vielen Gestaltungsdisziplinen dominiert auch im Automobilesdesign ein Prozess der Gestaltdefinition, in der Gestalt spezifisch entwickelt und definiert wird. Jedes Design wird als individuelle Lösung behandelt und in eine Produktstrategie eingearbeitet. Dabei werden bewusst wiederkehrende Gestaltelemente übertragen, um Ähnlichkeiten und Wiedererkennung zu generieren. Im Gegensatz zu ingenieurtechnischen Konstruktionen werden im Gestaltungsprozess kaum konstruktive Elemente wiederverwendet, sondern meist neu interpretiert und daraufhin neu konstruiert. Dazu wird eine große Anzahl an traditionellen Werkzeugen wie die klassische zweidimensionale Zeichnung oder die manuelle Tonmodellierung eingesetzt. Die manuellen Entwicklungsphasen werden abwechselnd durch digitale Modellierungsphasen erweitert. Dieser Prozess dient der Präzisionssteigerung sowie der Aufbereitung für digitale Herstellungsmethoden. Trotz der Anwendung modernster Konstruktions- und Herstellungsmethoden ist das Potential eines

systematischen Gestaltungsansatzes im traditionellen Automobil-design noch nicht umfassend erschlossen. Vor diesem Hintergrund sollen in dieser Arbeit aktuelle technische Entwicklungen und Methoden zur Formerzeugung untersucht werden. Es wird dabei erforscht, ob die Verwendung solcher wissenschaftlichen Strategien zu einer Verschiebung der Gestaltungsauffassung führen kann; ein Wandel von der Entwicklung einer individuellen Objektgestalt, hin zu dem Entwurf von Gestaltungsprozessen, aus denen Formenresultate als Prozessinstanzen resultieren. Es gilt zu evaluieren, welche Formgenerierungsmethoden für die Entwicklung neuer Fahrzeugbestandteile eingesetzt werden können und in welcher Form diese sinnvoll in den Workflow der Automobilgestaltung integriert werden können. Dies geschieht nicht mit dem Ziel, die Expertise von Automobilesdesignern zu ersetzen, sondern vielmehr durch neue technische Möglichkeiten Neuartigkeit und Innovation zu erzeugen.

“Typically, the positions regarding the role of the computer in architectural design fall into two categories. For many designers, the computer is just an advanced tool running programs that enable them to produce sophisticated forms and to control better their realization. [The other group] think[s] that it has become unavoidable to enter into the black box of programming in order to make a truly creative use of the computer.”
(Picon 2006, vii)

Während computerbasierte Methoden und Programmierung seit den sechziger Jahren intensiv untersucht werden, hat deren produktive Nutzung im Alltag des Gestalters erst Jahrzehnte später stattgefunden. Erst seit einigen Jahren haben sich die

Kosten von Hardware und Software so stark reduziert, dass der Computer ein essentieller Bestandteil des Gestaltungsprozesses geworden ist. Auch die Bedienbarkeit von Software und die Verständlichkeit von Programmiersprachen haben sich stark verbessert. So wurden zahlreiche Bedien- und Programmieransätze entwickelt, die gerade für visuell geprägte Menschen wie Gestalter leichter zu erlernen und effizienter zu nutzen sind. Insbesondere die Kombination aus Verfügbarkeit und erleichterter Bedienbarkeit haben den Diskurs von computerbasierten Methoden wieder erstarben lassen. In vielen führenden Architekturbüros wie *Foster + Partners*, *Gehry Technologies*, *Zaha Hadid Architects* u.v.m. sind spezialisierte Gruppen entstanden, die sich auf die gestalterische Nutzung von Computational Design spezialisiert haben. In diesen Gruppen arbeiten sowohl technisch als auch gestalterisch versierte Designer mit fundiertem Wissen über digitale Werkzeuge und Programmierung. Mithilfe dieser technisch-gestalterischen Expertise können in der Architektur neuartige Freiformen erzeugt und die damit verbundene höhere Komplexität in Bezug auf Gestaltung, Fertigung und Logistik realisierbar gemacht werden. Diese spezialisierte Nische im Berufsfeld der Architektur hat sich inzwischen soweit etabliert, dass Programmierung verstärkt auch als fundamentales Grundwissen in den universitären Lehrplan von Architekten aufgenommen worden ist. Weiterführend haben sich an Universitäten spezialisierte Studiengänge entwickelt, die eine vertiefende Untersuchung dieses methodischen Ansatzes erlauben. Zum Zeitpunkt dieser Arbeit war ein solcher Trend in der Industrie und der Lehre von Automobilesdesign noch nicht zu erkennen. Aus diesem Grund werden in dieser Arbeit Potentiale von Computational Design für die Automobilgestaltung erarbeitet und praktisch erprobt.

1.3 Inhaltliche Abgrenzung

In diesem Abschnitt soll der inhaltliche Schwerpunkt der Arbeit sowie deren Struktur vorgestellt werden. Während im ersten Kapitel die Zielsetzung und Relevanz der Arbeit dargelegt wird, werden im zweiten Kapitel der historische Diskurs des algorithmischen bzw. wissenschaftlich, methodischen Gestaltens diskutiert, um die Arbeit in den geschichtlichen Kontext einzuordnen. Hierbei soll verdeutlicht werden, dass ein systemisch methodischer Ansatz zur Gestaltung eine lange Tradition besitzt. Gleichzeitig wird erläutert, wie sich durch neue Technologien und deren Zugänglichkeit neue Möglichkeiten für den Gestaltungsprozess eröffnen, die somit ebenfalls den Diskurs zu methodischer Gestaltung erweitern. Im dritten Kapitel werden einige Grundlagen von Computational Design besprochen. Sie umfassen Grundlagen und Prinzipien von Gestaltung, Theorien der Wahrnehmungspsychologie, Systemtheorie und Grundlagen der Programmierung und Informatik. Dieses Kapitel soll vor allem dazu dienen, diese Arbeit für Leser mit unterschiedlichem Wissensstand zu Gestaltung und Informatik verständlich zu machen. Im vierten Kapitel wird der Stand der Technik diskutiert und nach einer kurzen Beschreibung der Automobilentwicklung, der aktuelle automobiler Gestaltungsprozess mit seinen unterschiedlichen Designphasen, sowie den aktuell verwendeten Gestaltungsmethoden, Werkzeugen und Materialien erläutert. Darüber hinaus werden Bestandteile der Form und Gestalt eines Automobils diskutiert. Darauf folgend soll im fünften Kapitel die methodologische Strategie dieser Dissertation aufgezeigt werden. Es wird der Begriff des Metadesigns eingeführt und dessen Wichtigkeit dargelegt. Anschließend werden die Schwierig-

keiten der Verwendung von Bewertungsmechanismen für Gestaltungsaufgaben besprochen. Abschließend wird der Ansatz der Dekomposition automobiler Form in Unterbestandteile und die dimensionale Zerlegung in syntaktische Formbestandteile diskutiert. Im sechsten Kapitel wird ein konzeptionelles Rahmenwerk zur Gestaltgenerierung vorgestellt, welches zum einen dazu dienen soll, Gestaltung als eine systemische Komposition unterschiedlicher gestaltungsrelevanter Teilelemente und Prozesse zu verstehen. Zum anderen soll dieses Rahmenwerk ebenfalls einleitend zur Visualisierung und Kategorisierung unterschiedlicher Arten und Anwendungsfelder algorithmischer Bestandteile dienen. Im siebten Kapitel werden Computational Design Strategien an Hand von sechs Fallstudien erprobt. Jede Fallstudie besitzt einen spezifischen Schwerpunkt, der das vielfältige Anwendungsspektrum algorithmischer Methoden illustriert. In Fallstudie 1 werden die im Rahmenwerk definierte Kategorisierung unterschiedlicher Algorithmbausteine am Beispiel von Mustergenerierung überprüft. Fallstudie 2 ist auf die algorithmische Generierung von volumetrischen Fahrzeugkörpern für Proportionsstudien fokussiert. Darauf folgend soll in Fallstudie 3 neuartige Transformationsalgorithmik zur Deformation und Analyse automobiler Form untersucht werden. In Fallstudie 4 wird Flächenartikulation als isolierbarer Bestandteil von Fahrzeugproportionen behandelt und mithilfe algorithmischer Methoden erprobt, welche erlauben material-spezifische Eigenschaften von Beginn an in den Gestaltungsprozess zu integrieren und eine materialspezifische Ästhetik zu generieren. In Fallstudie 5 werden Methoden und Schwierigkeiten der Varianzgenerierung für die automobiler Gestaltung untersucht und anhand eines evolutionären Generierungsprozesses zur Fahrzeugvariantenerzeugung praktisch angewandt. Als letzte

Fallstudie werden Computational Design Strategien ganzheitlich für die Entwicklung eines Konzeptfahrzeugs eingesetzt und deren Nützlichkeit unter realitätsnahen Bedingungen erforscht. In Kapitel 8 werden Erkenntnisse der Fallstudien übergreifend in sieben Abschnitten zusammengefasst und diskutiert. Es werden sowohl örtliche Anwendungsgebiete von Algorithmik am Fahrzeug besprochen, insbesondere welche Bauteilgruppen von algorithmischen Methoden profitieren können, als auch Anwendungszeitpunkte innerhalb des Gestaltungsprozesses. So können Potentiale und Grenzen von Algorithmen in der frühen Konzeptphase, sowie die Möglichkeiten von Algorithmik zur Gestalterzeugung aufgezeigt werden. Dabei wird zwischen rein erzeugenden Methoden und Methoden mit analytischem Charakter unterschieden. Abschließend sollen die Vorteile von digitalen Entwicklungsumgebungen besprochen werden, die durch kontinuierliche Anpassungen für spezifische Aufgaben des individuellen Gestaltungsalltags optimiert werden können. Neben einer Zusammenfassung der wissenschaftlichen Beiträge dieser Arbeit, gibt die Schlussbetrachtung einen Ausblick auf zukünftige und in dieser Arbeit nicht berücksichtigte Technologien, die mit hoher Wahrscheinlichkeit von zunehmender Wichtigkeit für die Gestaltung werden. Abschließend wird eine Prognose über die Entwicklung des Berufsbildes und den Wandel bzw. die Erweiterung der Gestaltungsfähigkeiten von Automobil-designern getroffen.

2

Historische Einordnung von Computational Design

Der Ursprung von *Computational Design* liegt in der systemischen Formalisierung, Entwicklung und Nutzung von Methoden, Prinzipien und Regeln für den gestalterischen Kontext. Die Arbeit wird zunächst in den historischen, methodologischen und theoretischen Kontext der Entwicklung von *Computational Design* gestellt. Ein wissenschaftlicher Ansatz zur Gestaltung bedingt Wissen über Gestaltung festzuhalten und somit zu formalisieren. Algorithmische und mathematische Methoden können für die logische Definition und somit zur Formalisierung von Wissen eingesetzt werden. Eine Schwierigkeit der Formalisierung von gestalterischen Prozessen bildet das in der Gestaltung existente *implizite Wissen* (Polanyi 1962). Ein Großteil von Architekten, Designern und Formgestaltern ist nicht in der Lage ihr gestalterisches Können und Wissen verbal oder schriftlich zu beschreiben. Dies erschwert den klassischen Wissensgenerierungsprozess, welcher durch Schritte des *Extrahierens*, *Strukturierens*, *Formalisierens* und *Kodierens* das

Erzeugen von eindeutigem, *explizitem Wissen* erlaubt. (Kimble 2013)

Wie bereits angedeutet, besitzt die Architektur bzw. das Bauwesen im Gegensatz zu den neueren Gestaltungsdisziplinen wie Industriedesign und Automobil- bzw. Transportation-Design eine lange Historie im Definieren von Anforderungen, Zielen und Methoden zur Erzeugung von Gebäuden und somit auch zur Entwicklung von Methoden für den gestalterischen Entwurf. Angesichts dessen, werden für die Definitionen von Grundbegriffen und Prinzipien des Gestaltens diese benachbarten künstlerischen und wissenschaftlichen Disziplinen sowie die Philosophie zur Hilfe genommen. Historisch betrachtet ist die Entwicklung und Verwendung von Methoden, Modellen und Gesetzmäßigkeiten ein fundamentales Mittel zur Beschreibung, Kommunikation und Vorhersage von Phänomenen in unserer Umgebung und dient somit ebenfalls der Übermittlung von Wissen, um die Basis von Wissenschaft zu formen.

2.1 Die Anfänge der Gestaltungsmethodologie

Bereits in der römischen Antike (100 v. Chr.) wurde durch die vom römischen Architekten, Ingenieur, Künstler und Gestaltungstheoretiker *Marcus Vitruvius Pollio* (kurz *Vitruv*) formulierten zehn Bücher der Baukunst ein noch bis heute relevantes Grundlagenwerk für die Architektur geschaffen. (Vitruv 1991) Vitruv ist der Auffassung, dass sich die Profession des Architekten aus zwei charakteristischen Bestandteilen bildet: Zum einen aus „*fabrica (Hand-werk)*“ und zum anderen aus „*ratiocinatio (geistige Arbeit)*“. (ebd., 23) Demnach können Architekten die höchste Stufe der Baukunst nicht alleine durch das Studium der eigenen Disziplin erreichen, sie benötigen ebenfalls zusätzliches tiefgehendes Wissen in einer Reihe von anderen Disziplinen wie (1.) Schriftkunde, (2.) Zeichnen, (3.) Geometrie, (4.) Arithmetik, (5.) Geschichte, (6.) Philosophie, (7.) Musik, (8.) Medizin, (9.) Jura und (10.) Astronomie. (ebd.)

Zu den wichtigen Anforderungen eines vollkommenen Gebäudes vertritt Vitruv ebenfalls eine klar definierte Haltung. So müsse ein vollkommenes Gebäude drei wichtigen Anforderungen in gleichem Maße genügen:

1. *firmitas* (Festigkeit bzw. Haltbarkeit),
2. *utilitas* (Zweckmäßigkeit bzw. Nützlichkeit) und
3. *venustas* (Schönheit). (ebd.)

Dies sind drei charakteristische Grundanforderungen, die noch heute für architektonische Gebäude definiert werden und im Kontext dieser Arbeit ebenfalls für das Automobil zutreffend

sind. Des Weiteren definiert Vitruv im zweiten und dritten Kapitel seines ersten Buches sechs weitere Grundbegriffe für die Disziplin der Architektur, die ebenfalls auf andere Gestaltungsdisziplinen übertragbar und in direkter oder angepasster Form relevant sind:

1. *„Ordinatio ist die nach Maß berechnete angemessene Abmessung (der Größenverhältnisse) der Glieder eines Bauwerks im einzelnen und die Herausarbeitung der proportionalen Verhältnisse im ganzen zur Symmetrie“* (ebd., 37)
2. *„Dispositio ist die passende Zusammenstellung der Dinge und die durch die Zusammenstellung des Baues“*
(ebd., 37)
3. *„Eurythmia ist das anmutige Aussehn und der in der Zusammensetzung symmetrische Anblick“* (ebd., 39)
4. *„Symmetria ferner ist der sich aus den Gliedern des Bauwerks selbst ergebende Einklang und die auf einem berechneten Teil (modulus) beruhende Wechselbeziehung der einzelnen Teile für sich gesondert zur Gestalt des Bauwerks als Ganzem.“*
(ebd., 39)
5. *„Decor ist das fehlerfreie Aussehn eines Bauwerks, das aus anerkannten Teilen mit Geschmack geformt ist“* (ebd., 39)
6. *„Distributio aber ist die angemessene Verteilung der Materialien und des Baugeländes und eine mit Überlegung auf Einsparungen ausgerichtete, zweckmäßige Einteilung der Baukosten“* (ebd., 43)

So wurde in der Architektur schon sehr früh versucht, durch Begriffsdefinitionen und Erläuterungen ein Rahmenwerk zur abstrakten, doch gleichzeitig präzisen Beschreibung von Bestandteilen und Grundwerten zu schaffen, welches dabei hilft, gemeinsame Anforderungen und Ziele im architektonischen Diskurs zu formulieren. Einige der von Vitruv in seinem ersten Buch verfassten Grundprinzipien und Grundhaltungen zur Architekturdiziplin sind noch heute für die Gestaltung sowie zur Bewertung von Architektur aber auch anderen Gestaltungsdisziplinen von Interesse. (Bürdek 2010)

2.2 Methodische Gestaltung am Bauhaus

Ein ähnlicher Anspruch wurde im Bauhaus diskutiert und praktiziert. Im fundamentalen Gegensatz zu dem in den 20er Jahren vorherrschenden Surrealismus, bei dem in der Kunst und den Gestaltungsdisziplinen mit *„irrationalen und zufälligen Techniken“* (Jormakka 2008, 40) experimentiert wurde, *„verfolgten einige der am Bauhaus tätigen Künstler und Architekten einen genau entgegengesetzten Ansatz und versuchten rationale und objektiv richtige Entwurfsmethoden zu entwickeln“* (ebd., 40) um *„wissenschaftliche Erkenntnisse über Gestaltung zu erforschen und in die Designausbildung zu integrieren“* (Bürdek 2010). *„Zu den Grundgedanken des Bauhausprogramms, das auf die Schaffung einer Einheitskunstschule als Verschmelzung von Kunstakademie, Kunstgewerbeschule und Bauhochschule abzielte, gehörte die Fundierung der Kunst im Handwerk.“* (Höfler 2010, 1), denn der Bauhausgründer Walter Gropius zielte auf eine *„neue Einheit von Kunst und Technik“*. (ebd., 1) Des Weiteren postulierte Hannes Meyer (Direktor des Bauhauses von 1928-30), *„dass die Architektur nicht zu den Schönen Künsten zähle und dass ein Architekt nicht das Recht habe auf der Grundlage subjektiver Intuition oder kreativer Inspiration zu agieren.“* (Jormakka 2008, 40) Johannes Itten entwickelte am Bauhaus von 1919 bis 1923 unterschiedliche Methoden und Theorien zur *„taktilen und visuellen Erfahrung“* (Höfler 2010, 1) von Materialien und Farben. Am bekanntesten sind wohl das von ihm und seinen Studierenden entwickelte Modell des Farbkreises sowie die Definition der sieben Farbkontraste. Er befürwortete ein methodisches Studium alter

Meister („*Wissen um die Arbeitsweise alter Meister*“) (Itten 2003, 12), denn seiner Meinung nach verbessere es das „*Bewußtsein für Ordnung und Gliederung der Bildfläche und das Gefühl für Rhythmik und Texturen*“ (ebd., 12) „*Hindernd und schädlich kann dieses Studium nur dann sein, wenn man sich selbst nicht wachsam kontrolliert und in ein akademisch nachahmendes Arbeiten verfällt.*“ (ebd., 12) László Moholy-Nagy wiederum untersuchte „*Strukturen, Texturen und Faktionen im Hinblick auf ihre optischen und haptischen Qualitäten*“ (Höfler 2010, 1) und Josef Albers konzentrierte sich auf Materialeexperimente die auf „*stoffimmanenten Eigenschaften wie Stabilität, Festigkeit, Tragfähigkeit und Belastbarkeit*“ aufgebaut waren. „*Vor allem Albers' Experimente zum wechselseitigen Wirkverhältnis von Form, Kraft und Masse und sein dynamischer Materialbegriff finden Eingang in das Konzept der [später sich immer stärker etablierenden] verstofflichten Computerform*“ (ebd., 1).

2.3 Der Einfluß von Generativen Wissenschaften auf die Gestaltung

Die Hoffnung, durch klare Methoden das Wissen über Gestaltung besser verstehen zu können, wurde in den 40er, 50er und 60er Jahren durch Fortschritte in den Wissenschaften und insbesondere durch die Entwicklungen in der Computertechnik befeuert. So waren die Forschungsergebnisse in den Feldern der Kybernetik (Wiener 1968), der allgemeinen Systemtheorie (von Bertalanffy 1976, 2011) sowie den generativen Wissenschaften wie der Informationstheorie (Shannon/Weaver 1949), Spieltheorie (Von Neumann/Morgenstern 1944) und der linguistischen Erzeugungs- bzw. Transformationsgrammatik (Chomsky 1957; Lakoff 1971) auch für einige Architekten, Designer und Künstler von Interesse, welche versuchten diese Konzepte und Methoden in ihre Arbeiten einfließen zu lassen, um so auf neuartige Ergebnisse zu stoßen.

2.4 Design Methods Movement

Angefangen mit dem Bestreben des Bauhauses, Design und seine Prozesse und Qualitäten in Modellen zu beschreiben, bot dies die Basis für die in den 60er Jahren aufkommende sogenannte *design methods* Bewegung, welche zum einen an der HfG Ulm und zum anderen im angelsächsischen Raum durch Protagonisten wie Richard Buckminster Fuller, Russel Ackhoff, Bruce Archer oder Christopher Alexander vertreten war. (Bürdek 2015; Cross 2007; Simon 1996) Die in dieser Zeit definierten designmethodologischen Studien haben „maßgeblich zur Stabilisierung und Etablierung von Design – insbesondere bei Unternehmen – beigetragen“ (Bürdek 2010). Ebenfalls in den sechziger Jahren begann etwa zeitgleich die grafische Nutzung des Computers am Recheninstitut der Technischen Hochschule Stuttgart (heute Universität Stuttgart) und an den Bell Laboratories. (von Herrmann 2004) Die Pioniere der Computerkunst Frieder Nake, Georg Nees und Michael Noll, aber auch (zeitlich sogar noch etwas früher) William A. Fetter, fertigten die ersten Experimente zur künstlerischen Nutzung von Computern und Algorithmik an. (ebd.; Scriba/Schreiber 2010) Sie entwickelten nicht nur Algorithmik durch die Programmierung virtueller Kunstwerke, sondern nutzten bzw. weiterentwickelten Zeichenmaschinen zur Materialisierung ihrer Entwürfe. Während zu dieser Zeit radikale Technologen wie Richard Buckminster Fuller logische, wissenschaftliche Ansätze für Gestaltungsaufgaben zu etablieren versuchten, scheiterte dieser Ansatz in den siebziger Jahren durch die fehlende erfolgreiche Anwendbarkeit in der Praxis. (Alexander 1978, 1964; Cross 2007) Die Gründe hierzu suchten Vertreter wie (Rittel/Webber 1973) in dieser Zeit in der

komplexen Natur von Gestaltungsarbeiten und formulierten Entwurfsaufgaben als *wicked problems*, die nicht durch Techniken der Wissenschaft oder Ingenieurwesen gelöst werden können. Rittel definierte spezifische Eigenschaften die *wicked problems* auszeichnen: (ebd.)

1. Das Problem ist erst verstanden, wenn eine Lösung gefunden wurde. (ebd.)
2. *Wicked problems* haben kein definiertes Ende. (ebd.)
3. Es gibt keine richtigen oder falschen Lösungen für *wicked problems*, eher bessere, weniger gute oder unzureichende. (ebd.)
4. Jedes *wicked problem* ist einzigartig. (ebd.)
5. Jeder Lösungsversuch kann nur einmal durchgeführt werden. Danach hat sich das *wicked problem* verändert. (ebd.)
6. *Wicked problems* haben keine definierte, alternative Lösung. (ebd.)

Ebenso beschreibt Schön die stets reflektierende Praxis von Designern (Schön 1984) als nur schwer technisch und algorithmisch beschreibbar.

Seit Ende des 20. Jahrhunderts ist es der Computer, der mit seiner annähernd unbegrenzten Rechenkapazität und seiner Fähigkeiten zur Adaption unterschiedlichster Planungsinstrumente zum Meta-Werkzeug des Entwurfs avancierte.“

(Schmitz/Groninger 2012a, 11)

Erst in den 80er Jahren wurden Computer auch in der Architektur und im Design eingeführt und Methoden wie die *pattern language* von Christopher Alexander waren zu dieser Zeit nur schwer zugänglich. Diese Situation hat sich heute grundsätzlich geändert. Aktuell spielt der Computer im Gestaltungsprozess eines Architekten oder eines Designers eine elementare Rolle. Während der Computer anfänglich lediglich als eine digitalisierte Version des Zeichenbretts eingesetzt wurde, werden nun zunehmend die gesamten prozessualen, iterativen und integrativen Prozesse des Rechners im Computational Design, in der Architektur und anderen Gestaltungsdisziplinen genutzt. Dies hat einen erheblichen Einfluss auf den eigentlichen Gestaltungsprozess und auf dessen Ergebnis, sowohl in Bezug auf die Funktion als auch auf die Ästhetik. Eine kontinuierliche Kombination von Methoden und Prinzipien unterstützt den fortlaufenden Diskurs der Lehre und Praxis der Gestaltung.

*„Probleme heute sind zu komplex, um durch reine Intuition oder überkommenes Wissen gelöst zu werden“
(Jormakka 2008, 8)*

3

Grundlagen und Grundbegriffe zu Computational Design

3.1 Ästhetik und Information

Es existieren verschiedene Definitionen zu Ästhetik. So wird sie beispielsweise als die „*Wissenschaft des Schönen*“ (Dietrich/Dominik/Schubert 2013) oder „*als Logik der Sinne*“ (Baumgarten 1983) bezeichnet. Hegel beschreibt die Ästhetik als „*die Wissenschaft des Sinnes, des Empfindens*“ (Bense 1982, 16) Für Peter Weibel ist die Ästhetik lediglich „*der Versuch, eine Theorie zu formalisieren, die aus dem Umgang mit einer bestimmten Menge intuitiven künstlerischen Materials gewonnen worden ist. Es werden dabei nicht nur formale Mechanismen und Regeln der Beurteilung, sondern auch der Erzeugung explizit oder implizit eingeführt.*“ (Weibel 1991, 14) Stiny and Gips wiederum definieren, dass Ästhetik sich mit Fragen beschäftigt,

wie existierende künstlerische Werke beschrieben, interpretiert und bewertet werden können und darüber hinaus wie neue künstlerische Werke erzeugt werden können. (Stiny/Gips 1978, 3) In seinem Buch „*Aesthetica*“ beschreibt Max Bense, dass der Zeichencharakter von Kunstwerken in ästhetische Elemente zerlegt werden kann. (Bense 1982) Er behauptet weiter: „*Wenn jeder ästhetische Prozeß ein Zeichenprozeß ist, so ist das hergestellte Kunstwerk aus elementaren ästhetischen Zeichen aufgebaut. Darauf beruht der kompositionelle Charakter der Kunst überhaupt.*“ (ebd., 43) Der Prozess der Zerlegung in ästhetische Elemente, d.h. in Zeichen und Zeichenkomplexe, wird von Bense als ästhetische Analyse beschrieben. Weiterführend hebt er den Unterschied der ästhetischen Analyse zu anderen Analysearten hervor:

1. Ästhetische Analyse durch Herausstellung von Zeichen und Zeichenkomplexen (ebd., 46)
2. Optische/sensualistische Analysis durch Zerlegung in erkenntnistheoretische Sachverhalte (physikalische Realität der Farben, der Linien, der Lichter und Schatten - Erfassung von Signalen (ebd., 45)
3. Formale Analysis durch Zerlegung in Formen (ebd., 43)
4. Inhaltliche Analysis durch Zerlegung in Seinsthetik (ebd.)
5. Thematische Analysis bzw. kategoriale Analysis als ontische Zerlegung (ebd.)
6. Technologische Analysis durch die Zerlegung in Mittel (ebd.)

Benses Ansatz, komplexe Sachverhalte durch unterschiedliche analytische Verfahren zu beschreiben und in kleinere Bestandteile zu zerlegen, zeigt seine systemische Grundhaltung zur Ästhetik. Dass diese ästhetischen Bestandteile als kompositionelle Elemente zu Werken zusammengesetzt werden können, erweitert die analytische Methode hin zu einer generativen. Unter generativer Ästhetik versteht Bense in seinem Manifest (Bense 1965) *„die zusammenfassung aller operationen, regeln und theorem zu verstehen, durch deren anwendung auf eine menge materialer elemente, die als zeichen fungieren können, in diese ästhetische zustände (verteilungen bzw. gestaltungen) bewusst und methodisch erzeugbar sind. generative ästhetik ist also in dem sinne ein analogon zur generativen grammatik, als sie, wie diese, sätze eines grammatischen schemas, realisation einer ästhetischen struktur liefert.“* (ebd., 1) Somit bildet Bense eine Synthese aus einem analytischen Ansatz und einem generativen Ansatz zur Ästhetik.

In den folgenden Kapiteln soll untersucht werden, wie die Dekomposition von Bestandteilen als analytischer, erster Schritt im darauffolgenden zweiten Schritt generativ, d.h. formerzeugend eingesetzt werden kann. Dabei dienen bereits existente Werke als Material der Analyse, aus welchem abstrakt beschriebene ästhetische Informationen in eine *„menge materialer elemente“* (ebd.) umgesetzt werden. Die Zielsetzung dieses systemischen Ansatzes zur generativen Ästhetik oder generativen Gestalt beschreibt Bense abschließend wie folgt: *„das effektive ziel des systems generativer ästhetik besteht darin, die charakteristiken ästhetischer strukturen, die in einer menge materialer elemente realisierbar sind, numerisch und operationell so zu beschreiben, dass sie als abstrakte schemata eines prinzipts gestaltung, eines prinzipts verteilung und eines prinzipts menge gelten können und*

manipulierbar einer materialen, ungegliederten (verdampften) menge von elementen aufgedrückt werden können, um gemäss diesen prinzipien das hervorzurufen, was wir als ordnungen und komplexität makroästhetisch und als redundanzen und information mikroästhetisch am kunstwerk wahrnehmen.“
(Bense 1965, 2)

3.2 Gesetzmäßigkeiten und Prinzipien der Gestaltung

In diesem Kapitel werden für die Arbeit relevante Prinzipien und Gesetzmäßigkeiten der Gestaltung besprochen, die als Bestandteile generativer Strukturen eingesetzt werden können. Im ersten Schritt werden einige Gestaltungsprinzipien aufgezeigt, die größtenteils als syntaktische Richtlinien für gestalterisches Arbeiten Verwendung finden können. Diese Gestaltungsprinzipien sollen auf ihre Formalisierbarkeit und Anwendbarkeit als Algorithmen untersucht werden, um als Gestaltungsbausteine für generative Gestaltungsprojekte eingesetzt zu werden. Der Goldene Schnitt beispielsweise ist eine bekannte Regel, die zur harmonischen Unterteilung von Flächen eingesetzt wird. An dieser Stelle sei erneut erwähnt, dass nicht nach objektiven Regeln für Schönheit gesucht wird, sondern vielmehr nach einer Sammlung von Regeln und Gesetzmäßigkeiten als Basis für freie Gestaltungsprozesse. Weiterführend werden Gestaltgesetze diskutiert, die vor allem visuelle Wahrnehmungsphänomene erfassen, benennen und kategorisieren.

3.2.1 Gestaltungsprinzipien

*“Die Harmonisierung des Ganzen auf der Leinwand ist der Weg, welcher zum Kunstwerk führt”
(Kandinsky 1911)*

Gestaltungsprinzipien sind Regeln bzw. Muster, die sowohl zur Beschreibung als auch zum Erzeugen künstlerischer Objekte eingesetzt werden können. Sowohl in der Antike als auch der Renaissance wurde der Begriff der Symmetrie (lat. *symmetria*) als „*Harmonie der Teile zueinander und zum Ganzen*“ (Kambartel 2007) eingesetzt. Heutzutage beschreibt Symmetrie vielmehr geometrische Spiegel-, Axial- oder bilaterale Gleich- oder Ähnlichkeit. Um Harmonie in der Gestalt zu erreichen, können unterschiedliche kunsttheoretische Analyse- bzw. Gestaltungsprinzipien angewendet werden. Hierzu werden meist Verhältnisse, d.h. Vergleiche und Beziehungen zwischen Eigenschaften von Gestaltbestandteilen untersucht. Johannes Itten beschreibt diese vergleichenden Beziehungen als Kontraste. Die in einer allgemeinen Kontrastlehre zusammengefassten Erkenntnisse bilden die Grundlage seiner Gestaltungslehre. (Itten 2003, 12) Dabei können die vergleichenden Attribute eines Kontrasts nach Itten ganz unterschiedlicher Natur sein:

„Solche Kontraste sind: Groß-klein, lang-kurz, breit-schmal, dick-dünn, schwarz-weiß, viel-wenig, gerade-gebogen, spitz-stumpf, horizontal-vertikal, diagonal-zirkulär, hoch-niedrig, Fläche-Linie, Fläche-Körper, Linie-Körper, Punkt-Linie, glatt-rauh, hart-weich, ruhig-bewegt, leicht-schwer, durchsichtig-undurchsichtig, stetig-unterbrochen, flüssig-fest, süß-sauer, stark-schwach, laut-leise dazu kommen die sieben Farbkontraste.“

(ebd.)

Demnach sind Kontraste Gegenüberstellungen konträrer Attribute, aus denen sich kategorisierende Anordnungen

bilden lassen. Seeger überträgt dieses Prinzip der Kontraste auf die Wahrnehmbarkeit von Fahrzeugbestandteilen und zieht folgenden Schluss:

*„Der vorstehenden Gestaltdefinition entsprechend müssen für die wichtigsten Wahrnehmungen folgende Kontraste unterschieden werden: Der Aufbaukontrast[,] Der Formkontrast[,] Der Oberflächen- und Farbkontrast (Komplementär-Kontrast, Hell-Dunkel-Kontrast, Bunt-Unbunt-Kontrast, Qualitätskontrast), Der grafische Kontrast“
(Seeger 2014)*

Somit stellt er die bereits definierten Bestandteile des Fahrzeugs in den Bezug von Kontrasten und übernimmt viele der Itten'schen Kontraste. Während Farbkontraste, Komplementär-Kontraste, Hell-Dunkel-Kontraste, Bunt-Unbunt-Kontraste, etc. (siehe Seeger 2014, 32) weithin geläufig sind, haben Lewandowsky und Zweischegg weitere Kontrastarten aufbereitet und beschrieben. So definieren sie zusätzlich Formkontraste, die sich mit der Gegenüberstellung unterschiedlicher Formarten beschäftigen: (Lewandowsky/Zweischegg 2005)

1. *„Form-an-sich-Kontrast[:] Grundformen bilden den einfachsten und gleich stärksten Kontrast“ (Seeger 2014, 74);*
2. *„Qualitätskontrast[:] Gegensatz zwischen regelmäßigen und unregelmäßigen Formen [...] Gegensatz zwischen geschlossenen und geöffneten Formen“ (ebd.);*

3. „*Quantitätskontrast[:]* Gegensatz zwischen den Formdimensionen, zum Beispiel groß - klein [...] breit – schmal“ (ebd.);
4. „*Richtungskontrast[:]* Richtung – Gegenrichtung“ (ebd.).
5. Durch kontrasthafte Gegenüberstellungen von gegensätzlichen Elementen lassen sich Akzente setzen. Nach Itten entscheidet sich die Wirkung eines Werkes durch die „*richtige Verteilung der Akzenten in einer Komposition*“ (Itten 2003, 63) Dabei ergeben sich Akzentpunkte, „*die Kraftspannungen für ein Bild und die Blickführung für den Betrachter. Sein Blick gleitet von Akzent zu Akzent, er empfindet dadurch Abstände und erlebt simultane Linienverbindungen.*“ (ebd.)

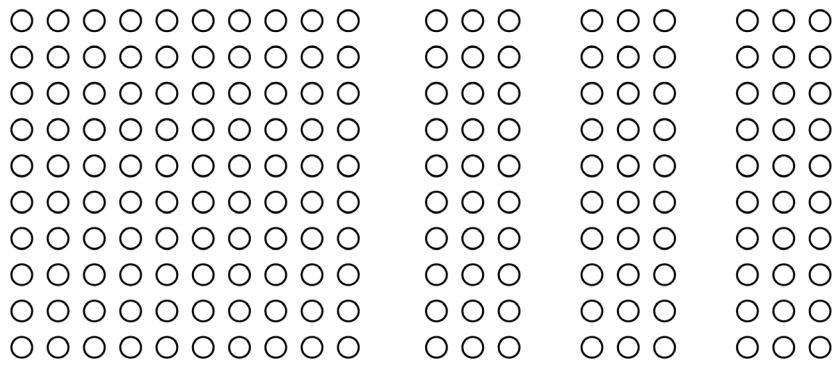
Die Wahrnehmung eines Designs ist nicht maßstabsunabhängig. In der Automobilentwicklung ist dies ein bekanntes Phänomen, Modelle im Maßstab 1:4 ändern ihre Wirkung nachdem sie in den Maßstab 1:1 hochskaliert worden sind. In welcher Art und Weise ein auf einen anderen Maßstab übertragendes Modell ästhetisch angepasst werden muss, kann nicht pauschal beantwortet werden, sondern muss individuell entschieden werden. Auch in der Wissenschaft ist diese Maßstabsabhängigkeit ein bekanntes Phänomen. So hat der Physiker Osborne Reynolds die nach ihm benannte Dimensionale Kennzahl (Reynoldssche Zahl mit dem Zeichen *Re*) eingeführt, um die Maßstabsabhängigkeit mathematisch in Gleichungen zu integrieren. (Herder 1955) Die Biologie, die als Wissenschaft unterschiedlichste Formen von Organismen untersucht, bezeichnet das Phänomen als allometrisches Wachstum oder Allometrie. Da Umgebungsgrößen

wie physikalische Kräfte oder chemische Reaktionen nicht auf gleiche Weise wie Körpergrößen skalierbar sind, haben Organismen organisierte Strukturen entwickelt, um unterschiedliches Größenwachstum auszugleichen. Die morphologischen Unterschiede sind durch den gesamten Wachstumsprozess zu beobachten. Die Körperteile eines Organismus wachsen nicht linear, sondern unterschiedlich schnell. Allometrie kann somit auch auf unterschiedlich dimensionierte Produkttypen wie Fahrzeugkategorien zutreffen und sollte berücksichtigt werden.

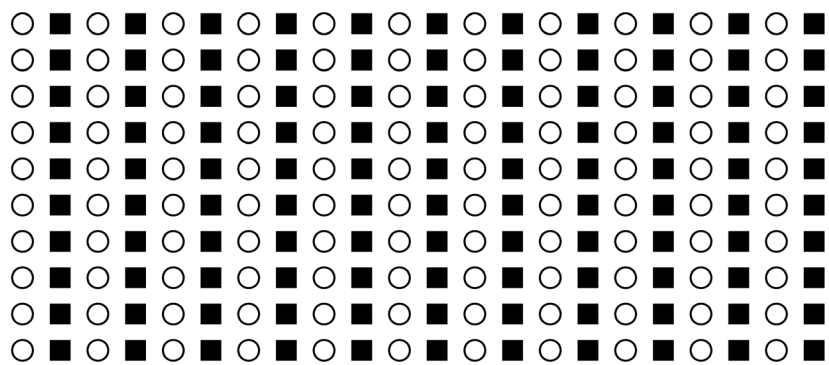
3.2.2 Gestaltgesetze

In der Gestalttheorie werden Gesetzmäßigkeiten der Wahrnehmung formuliert. Gestaltgesetze basieren auf dem Konzept, dass Gestalt definierbare Qualitäten (Ehrenfels 1937) besitzt, die die menschliche Wahrnehmung stimulieren, sodass in unserem Gehirn Verknüpfungen und Assoziationen entstehen. Max Wertheimer hat Gesetze der visuellen Wahrnehmung identifiziert, um charakteristische Eigenschaften bzw. Phänomene der Wahrnehmung von Gestalt und Gestaltmengen zu beschreiben bzw. zu kategorisieren. (Metzger 1953)

A Gesetz der Nähe



B Gesetz der Ähnlichkeit



C Gesetz der „guten“ Fortsetzung

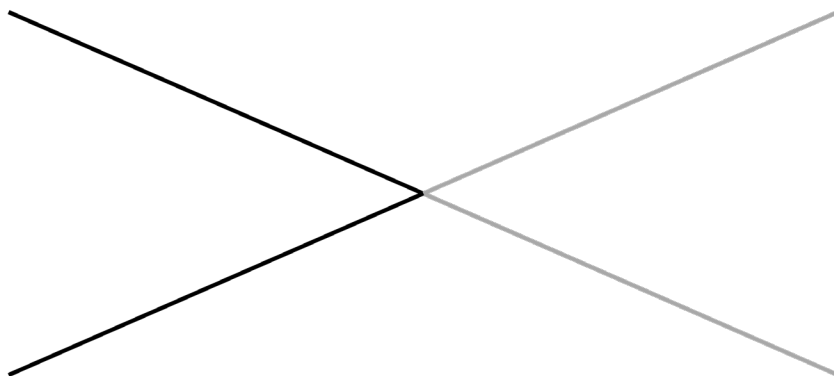


Abb. 1: (A) Das Gesetz der Nähe visualisiert die kognitive Fähigkeit der Gruppenbildung durch Annäherung von Einzelementen; (B) Das Gesetz der Ähnlichkeit zeigt die kognitive Gruppenbildung durch Zuordnung gleichartiger Elemente; (C) Das Gesetz der „guten“ Fortsetzung zeigt die kognitive Fähigkeit Elemente mit gleicher Richtung visuell zu verbinden.

1. Gesetz der Nähe: *„Nahe beieinander liegende gleiche Elemente werden als Einheit zusammengefasst. So werden zum Beispiel Textzeilen als Blöcke wahrgenommen, und die Zwischenräume, die Abstände übernehmen eine trennende Funktion. Ebenso trennt Wortabstand die Einheit Wort- nur so ist es möglich, einzelne Wörter als Ganzes aufzufassen“* (Lewandowsky/Zeischegg 2005, 92)
2. Gesetz der Geschlossenheit: *„Linien, die eine Fläche umschließen, werden eher als eine Einheit wahrgenommen, als wenn sie nichtzusammengeschlossen sind“.* (ebd.) Das menschliche Auge bzw. das Gehirn besitzt dabei die Fähigkeit *“Fehlendes zu einer bekannten Form“* (Gesetz der Erfahrung) zu ergänzen bzw. vervollständigen. (ebd.)
3. Gesetz der Gleichheit: *„Elemente gleicher Formen“ und „Größe“* werden zu einer Einheit zusammengefasst. (ebd.)
4. *„Gesetz der durchgehenden Linie“*: *„Bei Überschneidungen von Formen werden eher die Teile als Einheit wahrgenommen, die aufgrund von durchgehenden Linien gewohntere Formen bilden.“* (ebd.)
5. Neigung zur Räumlichkeit (ebd.)
6. Neigung zur Gleichsetzung *„Aus einer Fülle von Formen, die auf einem einheitlichen Bauplan basieren, werden nicht mehr einzelne Formen wahrgenommen, sondern [...] gruppenweise gleichgesetzt, auch wenn sie tatsächlich (mathematisch) unendlich viele Varianten aufweisen.“* (ebd.)

7. Aus Kombinationen der eben aufgeführten Gesetzmäßigkeiten mit einer Figur-Grund-Beziehung bzw. Figur-Hintergrund-Beziehung (ebd.) setzen sich weitere Gesetze zusammen.

Die Gestaltgesetze als wahrnehmungspsychologische Untersuchungen wurden in die Grundlehre der *Hochschule für Gestaltung Ulm* aufgenommen (Bürdek 2015, 43), um als nützliche Werkzeuge zur Beschreibung und gezielten Steuerung bestimmter Wahrnehmungseffekte, insbesondere bei der Erzeugung und Bewertung von Mustern und Strukturen, eingesetzt zu werden.

3.3 Modell und System

„Wir wollen aber erneut versuchen, das Anschauliche als eine gestaltete Darstellung zu verstehen, die uns im Wesentlichen durch Bestimmungen – analog zu einer Grammatik - erlaubt, von Daten zu Bildern und von Bildern zu Wissen zu kommen. Diese Dimension der Gestaltung ist fundamental.“

(Nadin 2003, 110)

In dieser Arbeit steht das Prinzip des Modells „(von lat. *modulus*, Maß, Takt, Vorbild; ital. *modello*, frz. *modèle*, engl. *model, pattern*)“ (Kaulbach 2007) als ein fundamentaler Bestandteil des Gestaltungsprozesses im Vordergrund. Dabei ist der Modellbegriff in dieser Arbeit mehrschichtig zu deuten. Modellierung beschreibt den Prozess der Modellerzeugung. Sie spielt nicht nur in gestalterischen Disziplinen wie Design und Architektur eine wichtige Rolle, sondern ist ebenfalls ein bedeutender Bestandteil in den Wissenschaften, denn es wird versucht, die Welt durch vereinfachte Systeme und Regeln zu beschreiben. Somit besitzt der Begriff des Modells historisch betrachtet zwei wichtige Bedeutungen:

1. Sowohl für die Gestaltung als auch für die Technik ist das Modell als (physisches) Repräsentationsmedium oder technisches Werk, bzw. als „*Raumgeben für künstlerisches Experimentieren*“ (ebd.) zu betrachten und dient daher sowohl als Basis zur Materialisierung von Gestaltungsentscheidungen als

auch als Präsentationsform von Ergebnissen bzw. hat die Funktion „*des Musters und Vorbilds für die endgültige Verwirklichung*“ (ebd.). Dabei bietet erst das Modell „*die Möglichkeit des freien, von den Bedingungen der Wirklichkeit unabhängigen Experimentierens, welches auf die Auffindung von Formen abzielt, die bei der endgültigen Verwirklichung des technischen Werkes maßgebend und vorbildlich sein sollen.*“ (ebd.)

2. Dem gegenüber erhält der Modellbegriff wissenschaftstheoretisch und methodologisch „*insbesondere in der nominalistischen Tradition der neuzeitlichen Naturwissenschaft*“ (ebd.) seine Wichtigkeit als Synonym für ein definiertes System, d.h. ein synthetisches Konstrukt bzw. „*ein strukturiertes Ganzes*“ (Jonas 2010, 170) zur Erzeugung und Definition logischer Entscheidungen bzw. Axiome einer Theorie. (Tarski 1983)

Während der erste Modellbegriff sich auf einen meist statischen, rein physischen Zustand eines Ergebnisses bezieht, beinhaltet das synthetische Konstrukt in der zweiten wissenschaftlichen Definition eine variable Komponente, in dem durch unterschiedliche Eingabe- oder Eingangsgrößen unterschiedliche Ergebnisse resultieren. Ein praktisches Beispiel hierzu sind Wettermodelle, die als synthetische Konstrukte aufgesetzt sind, um Vorhersagen über die komplexen meteorologischen Veränderungen treffen zu können. Egal ob physisch oder virtuell, ob zweidimensional als Bild oder Skizze oder plastisch, dreidimensional, ein Modell dient als Bildmedium stets zur Kommunikation.

Interessanterweise scheinen sich die Definitionen im virtuellen Modell einer Gestaltungsaufgabe zu vereinen und sind sowohl Repräsentationsmedium als auch strukturiertes Ganzes. In seinem Werk „*Ways of Worldmaking*“ (Goodman 1978) beschreibt Nelson Goodman fünf charakteristische Schritte zur Erzeugung von Modellen (*Worlds*):

1. *Dekomposition* und *Komposition*
(Zerlegung und Zusammenführung)
2. *Gewichtung*
3. *Ordnung*
4. *Streichung* und *Ergänzung*
5. *Deformation*

Diese Prinzipien können als fundamentale Regeln des wissenschaftlichen Arbeitens und der Gestaltung aufgefasst werden sowie als ein Verbindungsglied beider dienen. Insbesondere das Grundprinzip der *Dekomposition* erlaubt, die Komplexität einer Aufgabe in verständliche bzw. handhabbare Bausteine zu unterteilen. Diese Bausteine können im nächsten Schritt der *Komposition* wieder in ein komplexes Gebilde zusammengesetzt werden.

“Platon (427-347 v.Chr.) formulierte eine Dialektik, mit der durch Nachdenken der Zusammenhang zwischen verschiedenen Begriffen erforscht werden sollte. Ein Gattungsbegriff wurde in seine Arten zerlegt, bis man zu unteilbaren Begriffen gelangte. Diese Methode wird als Dihairesis (Ideenteilung) bezeichnet, sie ist das erste Beispiel für Definitionsregeln.”
(Bürdek 2015, 80)

Wissenschaftliche Experimente sind auf Erkenntnisgewinn über gezielte Eigenschaften oder Phänomene ausgelegt. Darum wird versucht, Einflussgrößen in einem Experiment zu minimieren, um möglichst exakte Ergebnisse von möglichst wenigen interagierenden Größen (*Parametern*) zu erhalten. Für den Prozess der Definition, des Aufbaus und der Bewertung der Ergebnisse werden, wenn auch unbewusst, stets Goodmans fünf charakteristische Schritte zur Modellerzeugung benötigt. In der Analysephase, werden die grundlegenden Elemente und ihre Beziehungen innerhalb des Systems durch Dekomposition definiert. Unterschiedliche Perspektiven auf das System erlauben die Identifikation relevanter Elemente und ihrer Beziehung. Diese werden dann in einem synthetischen System wieder zusammengeführt (*Komposition*). Dabei werden die Teilelemente und ihre Beziehungen gewichtet und in hierarchischer Abhängigkeit geordnet. Durch die Vernachlässigung (*Streichung*) und Ergänzung von Elementen und Beziehungen kann das System angepasst werden. Zum Schluss kann das System durch Manipulation von Parametern (*Deformation*) in unterschiedliche Kontexte oder Umgebungseinflüsse transferiert werden. (Reichert 2010)

Während der Gestalterzeugung werden relevante Gestalt- bzw. Gestaltungselemente identifiziert (*Dekomposition*) und in Form einer Komposition zusammengeführt. Dabei wird zu jedem Zeitpunkt des Designprozesses gewichtet, welche Aspekte des Designs relevant sind und dementsprechend in der Komposition geordnet. Es werden Elemente bewusst weggelassen (*Streichung*) oder andere neu hinzugefügt (*Ergänzung*). Die *Deformation* beschreibt die Veränderung von Gestaltungsordnungen wie Proportionen.

“Aristoteles meinte, das System sei mehr als die Summe seiner Teile. Das Verhalten des Ganzen ist aus der Reduktion auf seine Teile nicht herleitbar, wir haben es mit Emergenz zu tun.”

(Jonas 2010, 170)

Wichtig ist an dieser Stelle zu betonen, dass es hier um die Beschreibung und Definition möglicher Wege zu einem strukturierten Modell geht, zu keinem Zeitpunkt sollen limitierende Dogmen formuliert werden.

In der informatischen Methodik des *objektorientierten Programmierens (OOP)* versucht man stets logische Module (*Objekte bzw. Klassen*) zu erzeugen, um diese an anderer Stelle wiederzuverwenden. Durch diese Methodik wird versucht Programmcode zu strukturieren und redundante Programmierschritte zu vermeiden. Dabei ist das Ziel ein Archiv (*library*) von Funktion, Klassen bzw. Objekten zu erzeugen, das erlaubt, möglichst effizient unterschiedlichste Programme durch Zusammensetzen dieser Bausteine zu erzeugen. (Meyer 1988)

3.4 Geometrische Modellierungsparadigmen

In diesem Kapitel werden unterschiedliche Konzepte des virtuellen, geometrischen Modellierens vorgestellt und deren charakteristische Eigenschaften sowie Vor- und Nachteile bei der Erzeugung digitaler Geometriemodelle diskutiert. Diese Kategorien beziehen sich nicht auf den verwendeten Geometriety, sondern vielmehr auf das Level der praktisch verwendeten algorithmischen Logik.

3.4.1 Explizite Modellierung

Durch hochentwickelte graphische Benutzeroberflächen (*engl. Graphical User Interface - GUI*) in 3D-Gestaltungs- und Konstruktionssoftware wurden einfache und intuitive Formen der Bedienung etabliert. Zur Erzeugung und/oder Bearbeitung eines virtuellen Modells werden Befehle meist mit zeigerbasierten Eingabegeräten wie Computermäusen oder Grafikstiften durch vorgefertigte graphische Elemente (*buttons*) bzw. Tastenkombinationen Schritt für Schritt ausgewählt und angewandt. Die Befehle werden direkt auf das Modell angewandt, im Programm jedoch nicht bzw. maximal temporär gespeichert. Diese diskrete Abfolge von Befehlen, in der keine Historie von Befehlen und keine Beziehungen zwischen Objekten bestehen, erzeugt statische Geometrie, welche sich ausschließlich auf ein globales Koordinatensystem bezieht. Im Speicherformat des Modells wird somit lediglich die Definition der Geometrie und nicht

die Erzeugungsschritte hinterlegt. Diese leicht zu erlernende Kategorie von Modellierung wird als diskrete Modellierung oder explizite Modellierung bezeichnet und ist verbreitet bei der Erzeugung virtueller Objekte mit geringer bis mittlerer Komplexität. Das resultierende, statische Modellergebnis ist sehr robust, da keine Definitions-, Aufbau- oder Beziehungsfehler entstehen können. Für Änderungen und Variationen wird jedoch eine nahezu konstant bleibende, große Zeitspanne benötigt. Obwohl diese Art der Modellierung nicht zwingend ein theoretisches, logisches Konzept zur Konstruktion eines Modells verlangt, werden solche konzeptionellen Hilfskonstruktionen von erfahrenden Modelleuren in der Praxis besonders für wiederkehrende Aufgaben auch bei expliziter Modellierung verwendet.

3.4.2 Assoziative Modellierung

Parametrische Modellierung, parametrisches Design bzw. Parametrik bezeichnet in der direkten Übersetzung die Modellierung mit Parametern. Da in nahezu jedem Softwarepaket Parameter für beispielsweise die Positionierung von Objekten benötigt werden, ist dieser Begriff sehr weitreichend und wenig präzise. Interessanterweise werden diese Bezeichnungen selbst im Expertenkreis meist als Synonym für assoziative Modellierung verwendet. Assoziative Modellierung bzw. assoziative Geometrie bezeichnet die Modellierung mit hierarchisch organisierten Geometrieelementen, die durch logische, assoziative Beziehungen miteinander verknüpft sind. (Woodbury 2010) In diesen Modellen werden nicht nur die zu einem Zeitpunkt dargestellten Geometrieelemente abgespeichert, sondern ebenfalls das logische Konstrukt bzw. die Historie der Konstruktion. Das logische Konstrukt eines Modells wird häufig als geometrisches Theoriemodell, Konstruktionshistorie oder Metadesign bzw. Metamodell bezeichnet. (Burry 2003, 215)

Durch die Verwendung logischer Strukturen, bestehend aus geometrischen, hierarchischen Beziehungen zur Formerzeugung, ändert sich nicht nur die praktische Arbeitsweise, sondern ebenfalls die konzeptionelle Betrachtung eines solchen Modells. Ein Modell ist somit nicht nur dargestellte Geometrie, sondern besitzt zusätzlich eine logische Struktur der Formwerdung, welche in Form von Parametern aber auch topologischen Veränderungen von Beziehungen manipuliert werden kann. Nach Mark Burry (ebd.) gibt es drei Anwendungsfälle wann assoziative Modellierung in einem Projekt sinnvoll angewendet werden kann:

1. Designer sind verpflichtet in Gruppen zu arbeiten und benötigen einen flüssigen Austausch von Material. (ebd.)
2. Entwürfe können die Vorteile von assoziativer Geometrie durch den Prozess nutzen, sodass das iterative Gestaltungspotential ausgeschöpft werden kann. (ebd.)
3. Das Gestaltungsteam ist bereit, ausreichend Zeit zur Entwicklung des logischen Konstrukts der Gestaltung (*Metadesign*) zu investieren. (ebd.)

3.4.3 Generative Modellierung

Generative Modellierung, in der Informatik auch als *prozedurale Generierung* bekannt, könnte als eine Steigerungsform von *assoziativer Modellierung* bezeichnet werden. In generativen Methoden werden Modellinhalte nicht manuell konstruiert und in Beziehung gesetzt, sondern als Funktionen mithilfe von Algorithmen und Datenstrukturen erzeugt. Ein Objekt entsteht durch das Ausführen des algorithmischen Generierungsprozesses, welches durch eine Struktur (*pattern*) (Alexander 1978) aus Regeln und Daten erzeugt wird. Der größte Vorteil des algorithmischen Generierungsprozesses liegt in der automatisierten Generierung und Verwaltung großer und oftmals komplexer Datenmengen. Durch die Formalisierung von Gestalt als Regel und Information kann der Datenspeicherbedarf bei diesen Datenstrukturen auf ein Minimum reduziert werden. Die Ausführung des Algorithmus kann wiederum erhöhte Rechenleistung bedürfen. Als Formalisierungsmedium wird eine Art

von Programmierungssprache verwendet, die erlaubt Regeln der Formerzeugung zu definieren. Hierzu haben sich im letzten Jahrzehnt leicht zugängliche Entwicklungsumgebungen entwickelt. Zudem werden kommerzielle Konstruktionsprogramme verstärkt mit Programmierungsschnittstellen ausgestattet, um mit den programminternen Funktionen generative Generierungsprozesse abbilden zu können. Jedoch ist es nicht nur notwendig, die technischen Methoden generativer Modellierung zu beherrschen, um Computational Design erfolgreich praktizieren zu können, es bedarf auch einer entsprechenden Geisteshaltung und Gestaltungsauffassung (*Computational Design Thinking*) (Menges/Ahlquist 2011).

3.5 Grundlagen der Programmierung

„Programmierung legt also nicht nur den künstlerischen (projektierenden) Grund aller Wissenschaft frei, sondern bewirkt zugleich, daß die Künste selbst einen wissenschaftlichen (mathematischen) Charakter annehmen.“

(von Herrmann 2004, 158)

Algorithmische Programmierung bildet den Ursprung für das produktive Nutzen von Computern, obwohl das Konzept der Algorithmik oder vielmehr des algorithmischen Denkens nicht zwangsläufig auf die Nutzung von Computern angewiesen ist. Jedoch kann sich diese als sinnvoll herausstellen, denn Computer sind sehr effizient in der Berechnung bestimmter, definierter Prozesse.

In dieser Arbeit werden Möglichkeiten der Programmierung für die automobiler Gestaltung untersucht. Hierbei konzentriert sich die Programmierung auf die grafische Programmierung geometrischer Formen. In den meisten Fällen werden Programmierschnittstellen (*Application Programming Interface* - kurz *API*) oder integrierte Scripting-Schnittstellen von kommerziellen CAD-Softwarepaketen verwendet. Solche Schnittstellen innerhalb der vollwertigen CAD-Pakete erlauben den Zugriff auf die internen Funktionen und Methoden des Programms, sodass die geometrischen Elemente und Transformationsmethoden als Bauelemente eines Designs verwendet werden können. Für diesen Prozess sind bestimmte Programmierungskennnisse notwendig, um die Programmiersprache als grundlegende Kommunikationsbasis zwischen dem

Menschen und dem Computer zu nutzen.

Da die native binäre Codesprache des Computers, bestehend aus Nullen und Einsen, für uns Menschen nur sehr schwer zu lesen ist, wurden über die Jahrzehnte der Entwicklung in der Informatik nach und nach neue Schichten von Routinen, Funktionen, Algorithmen, Programmiersprachen etc. erarbeitet, die die Interaktion von Mensch und Rechenmaschine vereinfachen. So haben sich Programmiersprachen sukzessive von Binärcode zu höheren Programmiersprachen (*High-Level Programming Languages*) weiterentwickelt, die immer stärker der menschlichen Sprache ähneln und somit die Arbeit des Programmierens vereinfachen und beschleunigen. Neben höheren Programmiersprachen spielen Skriptsprachen eine zunehmend wichtige Rolle. (Ousterhout 1998) Skriptsprachen zeichnen sich durch vereinfachte Ansätze der Programmierung aus, die erlauben Programmcode schneller, kürzer und effizienter als klassische Programmiersprachen zusammensetzen. (ebd.)

Höhere Programmier- oder Skriptsprachen sind wie menschliche Sprachen textbasiert, d.h. Anweisungen in Form von Algorithmen oder Datenstrukturen werden durch das Schreiben von Textbefehlen erzeugt. Für den Vorgang des Programmierens, dem Erzeugen logischer Prozesse, ist man demnach auf das Wissen von bzw. die Suche nach Programmbausteinen angewiesen. Diese Bausteine werden in der Informatik als Syntax bezeichnet. Mit diesen Programmtexten können sehr übersichtliche Programmstrukturen mit integrierten, erläuternden Dokumentationskommentaren erzeugt werden, die vom Computer in berechenbare binäre Sequenzen umgewandelt werden können. Hierbei unterscheiden sich die meisten Skriptsprachen ebenfalls von den klassischen Programmiersprachen, bei denen bei der Ausführung das gesamte Programm durch einen Kompilierer

(engl. *Compiler*) in eine niedrigere Sprache umgewandelt (*kompiliert*) wird. (Myers 1990) Dieser Schritt benötigt anfangs Rechenzeit, anschließend kann das Programm jedoch effizient ausgeführt werden. Im Falle vieler Skriptsprachen nutzt man statt eines *Kompilierers* einen *Interpreter*, der nach dem Ausführen eines Programms Zeile für Zeile in ein modifiziertes Programm umwandelt (*interpretiert*). (ebd.) Skriptsprachen sind nicht dafür konzipiert, die effizienteste Ausführung eines Programmcodes zu erzeugen, sondern vielmehr die Effizienz der Erzeugung von Programmcode bzw. Programprototypen zu erhöhen. Skriptsprachen spielen bei der Programmierung von gestalterischen Prozessen eine verstärkte Rolle, da in diesen Gestaltungsaufgaben das Konzept des Programms noch nicht voll definiert ist und daher kontinuierlich angepasst wird.

Ein scheinbar gänzlich anderer Ansatz der Programmierung ist das Paradigma der *Visuellen Programmierung*. (ebd.; Hils 1992) Eine Übersicht über unterschiedliche Programmiersprachen sowie einen direkten Vergleich für die Anwendung in generativer Gestaltung wurde von Leitão, Santos und Lopes (Leitão/Santos/Lopes 2012) erarbeitet. Im Fokus ihrer Untersuchung stehen die Vor- und Nachteile von textbasierten (*Textual Programming Languages* - kurz *TPLs*) gegenüber visuellen Programmiersprachen (*Visual Programming Languages* - kurz *VPLs*), denn gerade im Gestaltungskontext ist ein steigendes Interesse an der Verwendung von *VPLs* festzustellen. Dies liegt vor allem daran, dass *VPLs* im direkten Vergleich zu *TPLs* leichter und schneller zu erlernen sind, obwohl ein Großteil der dahinterliegenden logischen Struktur identisch ist.

„[...] every operation is a self-contained black box (or node) of utility. The term black box is used to describe a situation in which you don't necessarily need to know exactly how something is happening inside the box so long as you understand what is happening to its inputs and outputs.”

(Cunningham 2006, 4)

Als Ergebnis dieser Studie führen Leitão, Santos und Lopes auf, dass das visuelle Paradigma von visuellen Programmiersprachen einem Skalierungsproblem durch steigende Komplexität ausgesetzt ist. Dies beruht auf der Limitierung an Abstraktions- und Kontrollmechanismen, die durch die Manipulation der visuellen Boxen und Verbindungskabel entsteht. (Leitão/Santos/Lopes 2012, 160) Einige Limitierungen der visuellen Programmiersprachen lassen sich jedoch durch integrierbare, modalularisierte Skriptkomponenten überwinden, die erlauben textbasierten Programmcode zu integrieren. Mit diesen Methoden können viele Vorteile von textbasierter Programmierung auf das visuelle Paradigma übertragen werden.

3.6 Grundlagen von Daten und Datenstrukturen

Daten sind gespeicherte bzw. speicherbare „*Information (Folgen von Zeichen, Worten etc.)*“ (Weibel 2000), dabei können Informationen von variierender Qualität und Quantität sein. Informationen können in unterschiedlichster Form angeordnet bzw. verknüpft sein und bilden somit eine Datenstruktur. Unterschiedliche Programmiersprachen bieten unterschiedliche vorgefertigte Typen von Datenstrukturen an. Die einfachsten Datenstrukturen bilden *Queues*, *Stacks*, *Listen* und *Sets*. Diese „*abstrakten Datentypen*“ (Häberlein 2012) sind Aneinanderreihungen von Informationselementen und unterscheiden sich durch die Art und Weise der Ordnung und des Zugriffs. Für umfassendere Programme bzw. für wiederkehrende Speicheraufgaben kann es von Vorteil sein, eigene angepasste Datenstrukturen (meist in Form von Klassen) zu erzeugen. Die Datenstrukturen sind entscheidend dafür, neben der eigentlichen Information auch topologische Informationen wie die Reihenfolge oder die Position von Nachbarschaftsverhältnissen zu speichern oder zumindest effizient berechenbar zu machen.

3.7 Grundlagen zu Algorithmik

Der Begriff des Algorithmus hat seinen Ursprung im Feld der Mathematik (Hermes 2007). Es gibt verschiedenste Versuche der Definition bzw. Präzisierung des Begriffs:

1. *„Ein Algorithmus kann zunächst grob gekennzeichnet werden als ein Rechenverfahren (eine Rechenmethode), welches schrittweise vorgeht.“* (ebd.)
2. *„Er ist grundlegend als Hilfsmittel für die Beschreibung und Beurteilung wesentlicher Züge der Mathematik (und der exakten Naturwissenschaften).“* (ebd.)
3. *„Theoretically, an algorithm is the abstraction of a process and serves as a sequential pattern that leads towards the accomplishment of a desired task.“* (Terzidis 2006, 65)
4. *„An algorithm is a computational procedure for addressing a problem in a finite number of steps. It involves deduction, induction, abstraction, generalization, and structured logic. It is the systematic extraction of logical principles and the development of a generic solution plan.“* (ebd.)

Häufig wird das Konzept eines Algorithmus jedoch durch Beispiele oder Metaphern erläutert (Hermes 2007):

“An algorithm may be compared to the steps in a recipe; the steps of gathering the ingredients, preparing them, combining them, cooking, and serving are algorithmic steps in the preparation of food. [...] Obviously, the number, size, and quality of ingredients, the sequence and timing of events, as well as the serving and presentation of the final product are key factors to a recipe.”
(Terzidis 2006, 65)

In der Informatik wird stets versucht, Algorithmen zu entwickeln, die möglichst effizient ein zufriedenstellendes Ergebnis berechnen. Dabei verändern Algorithmen Daten in Datenstrukturen. Datenstrukturen sind auf Speicherplatz angewiesen, während Algorithmen zur Berechnung Zeit und Rechenkapazität in Anspruch nehmen. Effiziente Algorithmen versuchen diese Ressourcen zu minimieren. Leider existiert in der Algorithmik das Phänomen, dass gerade die performantesten Algorithmen eine große Menge an Datenspeicher benötigen, während Algorithmen, die effizient Speicher managen, meist eine sehr lange Berechnungszeit aufweisen. (Vrajitoru/William 2014, 1) Dieses Phänomen wird in der Computerwissenschaft als „*Space-Time Trade-off Dilemma*“ bezeichnet. (ebd.)

Um Vorhersagen über die Laufzeit eines Algorithmus machen zu können, wurden daher unterschiedliche Methoden zur Analyse von Algorithmen entwickelt. Hierbei hat sich die Klassifizierungsmethode von algorithmischer Komplexität durch die Verwendung von „*Landau-Symbole[n]*, insbesondere die sog. „*Groß-Oh-Notation*“ (Häberlein 2012) als eine der weitverbreitetsten und nützlichsten Methoden bewiesen. Neben der Kategorisierung von Algorithmen in Komplexitätsklassen ist das

Ziel einer solchen Analyse, den Anwendern Vergleichsattribute zur Verfügung zu stellen, um den besten Algorithmus für eine Aufgabe auszuwählen. (Vrajitoru/William 2014)

Klassifizierung	Komplexität	Algorithmen
Konstant	$O(1)$	Hashing, ...
Logarithmisch	$O(\log n)$	Quicksort, Heap Sort, Merge Sort, ...
Linear	$O(n)$	
Quadratisch	$O(n^2)$	Bubble Sort, Selection Sort, ...
Polynomisch	$O(n^x)$	
Exponentiell	$O(x^n)$	

Tabelle 1: Klassifizierungen von Algorithmen nach Geschwindigkeit bzw. Bearbeitungskomplexität. (ebd.)

Aus der *Groß-Oh-Notation* lässt sich herauslesen, wie sich ein Algorithmus und die Laufzeit mit steigenden Datenmengen verhält. Hierbei ist die beste und schnellste Gruppe von Algorithmen, die mit den konstanten Laufzeiten - $O(1)$. Dies bedeutet, dass für welche Menge an Daten auch immer, die Berechnungszeit nicht erhöht wird. Dem gegenübergestellt gilt es Algorithmen mit exponentiell wachsender Komplexität - $O(x^n)$ - zu vermeiden, denn trotz immer schneller werdender Computertechnik können ineffiziente Algorithmen rasch eine Berechnungskomplexität erzeugen, die nicht zu bewältigen ist. In Anwendungsfeldern wie der Computergrafik und Computer-Aided-Design (CAD), und somit auch im Computational Design, müssen oftmals zur Darstellung von Inhalten große Mengen an Informationen berechnet werden. Für eine flüssige Bedienbarkeit dieser Programme ist eine schnelle Berechenbarkeit

notwendig, damit ein möglichst schnelles visuelles Feedback produziert werden kann. Denn durch zu lange Wartezeiten kann die Anwendbarkeit einer Methode gerade in Gestaltungsbereichen schnell obsolet werden. Aus diesem Grund ist diese Berücksichtigung auch bei der Entwicklung von gestalterischen, formerzeugenden Algorithmen relevant und sollte spätestens bei spürbar erhöhtem Zeit- und/oder Speicheraufwand in Betracht gezogen werden. Zusätzlich sollte die jeweilige Effizienz der verwendeten Funktionen und Methoden evaluiert werden, um die Gesamtgeschwindigkeit des formgenerierenden Programms zu verbessern.

Es existiert bereits Literatur (Press et al. 2007), in der generalisierte Algorithmen für unterschiedliche Aufgaben zusammengefasst, gesammelt und erörtert werden. Viele dieser wichtigen, standardisierten Algorithmen sind bereits in vielen Programmiersprachen bzw. –bibliotheken integriert und können direkt angewendet werden. Zwei fundamentale Algorithmusgruppen stellen hierbei *Suchalgorithmen* und *Sortieralgorithmen* dar, denn viele Informationsbearbeitungsprozesse gleichen in ihrer Aufgabe entweder dem Suchen eines Werts in einer Menge von Werten oder aber dem Sortieren einer Menge von Werten.

„Tatsächlich ist überhaupt einer der wichtigsten Einsatzzwecke eines Computers die Speicherung großer Datenmenge in sog. Datenbanken und das schnelle Wiederfinden (eng: Retrieval) von Informationen in dieser Datenmenge.“

(Häberlein 2012)

3.7.1 Suchalgorithmen

Viele Anwendungen nutzen als Fundament einen schnellen Suchalgorithmus. Das Ziel eines effizienten Suchalgorithmus ist dabei, die Zeit zum Auffinden eines Wertes innerhalb einer Wertemenge möglichst klein zu halten. Mit anderen Worten versuchen Suchalgorithmen „*das Einfügen, Suchen und Löschen von Elementen aus einer großen Menge von Elementen effizient zu realisieren*“. (ebd., 72) Im Folgenden werden beispielhaft drei fundamentale Suchalgorithmengruppen vorgestellt.

Die simpelste Form einer Suche ist die lineare Suche, auch als *Brute Force* bezeichnet. In dieser wird nacheinander, in linearer Form, jeder Wert aufgerufen und untersucht. Zum Durchsuchen einer Liste mit der Länge n werden demnach $O(n)$ Schritte benötigt. (ebd.) Diese Suchmethode ist sehr einfach durch eine einzelne Schleife zu programmieren, ist aber in den meisten Fällen wenig effizient. Besteht kein Vorwissen über die Eigenschaften einer Liste, bleibt oftmals keine andere Möglichkeit als eine lineare Durchsuchung durchzuführen. Gerade wenn große Datenmengen durchsucht werden müssen, kann sich diese Methode mit einer Effizienzklassifizierung von $O(n)$ jedoch schnell als nutzlos herausstellen. (ebd.)

Suchbäume sind Datenstrukturen, die Informationen in Form von Knoten und Verzweigungen organisieren. In dieser Form können Daten effizient abgelegt und wiedergefunden werden. Der einfachste und älteste Baum ist der binäre Suchbaum. Er wurde „*Ende der 50er Jahre parallel von mehreren Personen gleichzeitig entdeckt und verwendet*“ (ebd.). Er besitzt eine „*mittlere Suchlaufzeit*“ von $O(\log n)$. (ebd.) Dies gilt nur wenn der Baum

balanciert ist, d.h. die Anzahl an Verzweigungen gleichmäßig verteilt ist. Ist dem nicht so, kann die Geschwindigkeit erheblich langsamer sein. Um dies zu vermeiden, wurden binäre Suchbäume (*AVL-Bäume*, *Rot-Schwarz Bäume*) entwickelt, die im Worst-Case eine Suchlaufzeit von $O(\log n)$ besitzen. (ebd.)

Eine besonders effiziente Suchmethode stellt *Hashing* dar. Bei idealen Bedingungen benötigen Hashing-basierte Suchverfahren unabhängig von der Größe der Datenmenge eine konstant kurze Zeit. Durchgeführt wird diese Methode mit Hilfe einer Hash-Tabelle t , in der der zu speichernde Wert mit einem Schlüssel k verknüpft wird und mit Hilfe einer Funktion h aufgerufen werden kann.

3.7.2 Sortieralgorithmen

Sortieralgorithmen organisieren Daten innerhalb von Datenstrukturen. Daten werden sortiert um einen schnelleren Zugriff zu ermöglichen und Aussagen über eine Restmenge treffen zu können. Sortieralgorithmen bestehen aus jeweils einer Such- und Organisierkomponente. Die Suchkomponente bestimmt die Auswahl eines Informationspaares. Dieses Informationspaar wird verglichen und im nächsten Schritt reorganisiert. Je nach Datenmenge, Datenordnung und Vorwissen über die Organisation der Daten haben unterschiedliche Suchverfahren unterschiedliche Performanz. Zu den bekanntesten gehören: *Binary Tree Sort*, *Heapsort*, *Bubblesort*, *Quicksort*, *Selectionsort*, *Swap-Sort*, *Mergesort* und viele mehr.

4

Stand der Technik

In diesem Kapitel werden wissenschaftliche Grundlagen zur Beschreibung eines Gestaltungssystems für Automobile erörtert. Der strukturierte und systematische Ansatz soll helfen, die Anwendungsfelder sowie Anwendungsarten gestaltungsrelevanter Algorithmik für die Entwicklung von Fahrzeugen zu verstehen. Da die zeitgenössische Gestaltung von Fahrzeugenaußenhäuten und -interieurs zum größten Teil formalästhetischer Natur ist, wird sich in dieser Arbeit vor allem auf syntaktische und nur bedingt auf semantische Bestandteile automobiler Ästhetik fokussiert. Es sollen Potentiale der geometrischen Algorithmik aufgezeigt werden, mit dem Idealziel mögliche Grundlagen zur Gestalterzeugung zu extrahieren, die nicht zwangsläufig den „*Kapricen eines einzelnen Entwerfers*“ unterliegen und möglichst „*zeitloser als die sich ständig wandelnden Moden und allgemeiner als ortstypische Gewohnheiten*“ erscheinen können. (Jormakka 2008, 9)

4.1 Die Entwicklung des Automobils in den unterschiedlichen industriellen Revolutionen

*„Das Automobil ist ein Fahrzeug,
(1.) das durch Maschinenkraft bewegt wird,
(2.) die zu seiner Ortsveränderung dienende Energiequelle
in sich trägt,
(3.) gewöhnliche Strassenfahrdämme benutzt,
(4.) und die zu befördernden Personen oder Güter –
wenigstens zum Teil – selbst aufnimmt.“
(Löw von und zu Steinfurth 1909, 1)*

Das Automobil bildet als Transportationsmittel ein wichtiges Symbol für den Stand der technologischen Entwicklung der menschlichen Gesellschaft. Die ersten automobilen Formen entwickelten sich traditionell aus dem Kutschenbau. Aber auch der Schiffsbau spielte für die Konstruktion von Freiformflächen und später für die Strömungsoptimierung eine wichtige Rolle in der Fahrzeug- und Flugzeugentwicklung. (Seeger 2014, 223) Aus diesem Grund dominierte in den Anfängen der Automobilgeschichte die Verwendung von Holz sowohl als Tragstruktur als auch für die Oberflächenbeplankung.

Die im 18. Jahrhundert fortschreitende Mechanisierung führte zur ersten industriellen Revolution (*Industrie 1.0*). Erst als man „*zunderfreieres, doppelt dekapiertes Blech*“ (Kieselbach 1998) entwickelte, welches erst in den 1920er Jahren industriell in großer Menge produziert werden konnte, änderte sich nach und nach die Gestalt der Fahrzeuge. (ebd.) 1913 erfand der „*Ingenieur Joseph Ledwinka, Angestellter der Budd Manufacturing Co.*

in Philadelphia“ die Blechpreßtechnik (ebd.), welche erlaubt, Karosserieteile aus großen Blechstücken mechanisch zu pressen. (ebd.) Da jedoch die automobilen Formen zuvor aus sehr vielen geraden Fläche zusammensetzt worden waren, wurde das Blech (vor allem in Europa) anfänglich noch traditionell wie Holz behandelt und durch Stellmacher oder Wagner auf die Unterkonstruktion beplankt. In den USA wurden bereits sehr früh Fabriken wie die *Dodge Brothers Company* oder *Ford Motor Company* mit Pressmaschinen ausgerüstet.

Die Entstehung von Großfabriken mit Massenfertigung durch Fertigungsstraßen am Anfang des 20. Jahrhunderts wird als zweite industrielle Revolution (*Industrie 2.0*) bezeichnet. (Posada et al. 2015) So zählt heute das *Model T* von Ford (1912), als das erste Automobil, dass in Massenproduktion hergestellt worden ist. Es sollte das Automobil durch die Massenproduktion und den dadurch drastisch reduzierten Preis demokratisieren und für eine weitaus größere Kundschaft zugänglich machen. (Macey/Wardle 2014) Bis 1925 besaßen nur wenige Automobilfabriken eine eigene Karosseriefertigung. (Schrader 1985) So entwickelten sich parallel zu den großen Automobilfirmen in den USA wie auch in ganz Europa aus dem Handwerkstum der Wagner und Stellmacher der Beruf des Karosseriebauers, der im angelsächsischen Raum als „*Coachbuilder*“ bekannt ist. Es wurden Firmen gegründet, die entweder auf Basis eines Chassis von großen Automobilfirmen eigene Karosserieformen entwickelten oder spezielle Fahrzeugumbauten vornahmen. Dies war zu einer Zeit als ein Automobil noch aus „zwei grundlegenden Komponenten“ bestand, nämlich dem „*Fahrgestell mit dem Motor und Antriebsselementen*“ und dem „*Aufbau samt Ausstattung und Einrichtung für Fahrer und Passagiere oder zu transportierende Waren.*“ (ebd.) Noch längere Zeit existierten

Fahrgestelle aus Holz in Kombination mit einer Metallkarosserie, die erst nach und nach durch volle Metallkonstruktionen ersetzt wurden. Karosseriebauer waren bekannt für ihre handwerklichen Fähigkeiten, mit Hilfe spezialisierter Blechbearbeitungsmaschinen wie beispielsweise der Rollenstreckmaschine (Wirth 2007), im angelsächsischen *English Wheel* genannt, jegliche Automobilekarosserieformen erzeugen zu können. Die große Anzahl verschiedener Karosseriebauer führte zu einer Vielfalt unterschiedlichster Karosserie-Interpretationen basierend auf der gleichen Chassis-Plattform. Die Entwicklung eigener Karosserien war vor allem bis in die 1940er Jahre erfolgreich, bis die Karosserie selbsttragende Funktionen übernahm und Kunden höhere Sicherheitsanforderungen verlangten. Dies bedeutete das Aus vieler großer und kleiner Karosseriebaubetriebe. (Schrader 1985) Berühmte Vertreter wie *Bertone*, *Pininfarina* und *Ghia* aus Turin, *Baur* aus Stuttgart und *Karmann* aus Osnabrück, entfernten sich daraufhin von ihrem ursprünglichen Arbeitsfeld, um sich auf die Produktion von Großserien für bekannte Automobilhersteller zu konzentrieren. (ebd.)

Die dritte industrielle Revolution (*Industrie 3.0*) setzte in den 1970er Jahren durch die Einführung der Elektrifizierung und Informationstechnologie ein (Posada et al. 2015). Prozesse wurden digitalisiert und Produktionsschritte kontinuierlich automatisiert. Die Verwendung von Industrierobotern mit sechs Achsen bot einen größeren Bewegungsraum und so konnten nun auch schwierig zu automatisierende Prozesse durch Maschinen übernommen werden.

Aktuell wird die vierte industrielle Revolution (*Industrie 4.0*) diskutiert, die sich durch die Einführung eines Netzwerks von Objekten (*Internet der Dinge*) (ebd.) sowie neuartige Mensch-Maschine-Interaktionen auszeichnet. Mit

Fortschritten in der Sensorik in Kombination mit intelligenten Algorithmen entwickelt sich die Maschine fortschreitend von einem reinen Werkzeug hin zu einem Kooperationspartner des Menschen. Dies bietet das Potential aktuelle Paradigmen in der Produktion zu überdenken, um neuartige Innovationen zu schaffen. (Kagermann/Wahlster/Helbig 2013)

Vor diesem Hintergrund sollen in dieser Arbeit die Potentiale der Algorithmik für den Gestaltungsprozess untersucht werden. Zukunftsweisende Studentenarbeiten von Bastian Baudy (Baudy 2010), Anne Forschner (Forschner 2009) oder Gregory Epps (Epps 2013a) zeigen futuristische Prognosen für die Weiterentwicklung automobiler Form. Parallel bestätigen die zum Zeitpunkt der Anfertigung dieser Arbeit veröffentlichten Konzeptfahrzeuge vieler Marken, wie der *Renault Twin'Z*, einer Kollaboration zwischen *Renault* und *Ross Lovegrove Studio* (Renault/Lovegrove Studio 2013) und der *Peugeot Fractal* (Peugeot 2015), die Relevanz von Computational Design für die Zukunft des Automobilbereichs. Auch wenn die exakten Entstehungsprozesse und verwendeten Methoden dieser Projekte nicht veröffentlicht wurden, sind diese durch ihre geometrische Komplexität für die Methodenentwicklung algorithmischer Gestaltung bedeutsam.

4.2 Bestandteile automobiler Form und Gestalt

„Abgesehen von ihrem wissenschaftlichen Wert, der von einer genauen Prüfung der einzelnen Kunstelemente abhängt, ist die Analyse der Kunstelemente eine Brücke zum inneren Pulsieren des Werkes. Die bis heute herrschende Behauptung, es wäre verhängnisvoll, die Kunst zu „zerlegen“, da dieses Zerlegen unvermeidlich zum Tod der Kunst führen müßte, stammt aus der unwissenden Unterschätzung der bloßgelegten Elemente und ihrer primären Kräfte.“

(Kandinsky 1926)

Die *Dekomposition (Zerlegung)* ist ein Grundprinzip in der Wissenschaft um komplexe Sachverhalte zu strukturieren (Bürdek 2015, 80) und bildet die Basis für systemisches Denken. Das Prinzip der Dekomposition ist im griechischen Wort für System „*σύστημα*“ verwurzelt und besitzt die „*Bedeutung eines Ganzen, welches aus Teilen oder Gliedern besteht und Ergebnis einer ‘Zusammenstellung’ ist, sowie in der Bedeutung ‘Zusammensetzung, Zusammenstellung’ (synonym mit σύστασις)*“. (Hager 2007)

Die Arbeit von Designern ist charakterisiert durch das ständige Wechseln von Blickpunkten und Perspektiven, mit dem Versuch eine Gestalt aus unterschiedlichsten Blickwinkeln zu erfahren und aus der Summe der Eindrücke Bewertungen zu erzielen (Analyse von Gestaltungsaspekten). Im Gestaltungsprozess gibt es Methoden zur Fokusveränderung, dabei wird ein Gebilde aus verschiedenen Perspektiven betrachtet, vom Nahen und aus der

Ferne (*global, regional und lokal*). Es wird nach Proportionsverhältnissen, Lichtreflex- und Krümmungsverläufen, etc. geprüft. Einige Designer und Künstler rotieren bzw. spiegeln ihre Arbeiten, um die Stimmigkeit des Bildes aus unterschiedlicher Perspektive zu beurteilen oder kneifen ihre Augen zusammen, um Tonwerte d.h. Hell-Dunkelkontraste besser wahrnehmen und bewerten zu können.

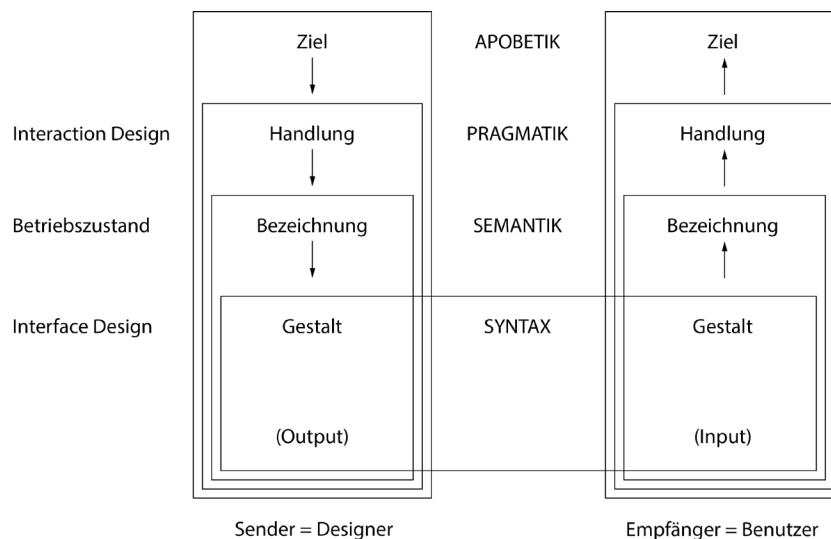


Abb. 2: Der Kommunikationsprozess einer Information (nach Seeger) zeigt den Informationsfluss von der Gestaltungsentwässerung und -ausführung eines Designers bis zur Intensionserkennung und Bedienung durch den Benutzer des Objektes. In dieser Grafik werden dabei die Ebenen von Apobetik, Pragmatik, Semantik und Syntax in der Gestaltung und Nutzung visualisiert. (Abbildung nach Seeger 2014)

Das Konzept des Perspektivenwechsels kann ebenfalls für einen Dekompositionsprozess nützlich sein. Aus unterschiedlichen Blickrichtungen lassen sich Aspekte, Teilgestalten und Gestaltungsordnungen unterschiedlich beschreiben. Somit kann die selektive Wahrnehmung des Menschen als Mittel zur Identifizierung,

Analyse und Bewertung isolierter Gestaltungsaspekte gezielt eingesetzt werden. Da die Gestaltwahrnehmung niemals eindeutig sondern stets mehrdeutig, gar meistdeutig (Seeger 2014) ist, kann die Wirkung von Form nicht umfassend beschrieben werden. Mit *Perspektiven* sollen in dieser Arbeit nicht nur die Ansichten des Betrachters auf das Objekt beschrieben werden, sondern ebenfalls die Isolierung von Gestaltungsaspekten. (Goodman 1978; Ho/Group 2001; Sarkar/Dong/Gero 2009)

Den Zusammenhang zwischen der Analyse bzw. Wahrnehmung seitens eines Empfängers (bzw. Benutzers) und der Erzeugung seitens eines Senders (bzw. Designers) stellt Seeger in einer hierarchischen Struktur aus *pragmatischer*, *semantischer* und *syntaktischer* Ebene dar. Das Medium dieser Struktur bildet die Gestalt eines Objektes. Nach Seeger besitzt der Designer als Sender eine Zielsetzung (*Apobetik*) für sein Werk. Er vollzieht Handlungen (*Pragmatik*) um Bezeichnungen (*Semantik*) und eine wahrnehmbare Gestalt (*Syntax*) zu erreichen. Diese Abfolge an Ebenen wird vom Empfänger in umgekehrter Reihenfolge dechiffriert.

Die Begriffe der Form und Gestalt werden im allgemeinen Sprachgebrauch oftmals als austauschbare Synonyme verwendet. Ihre Unterschiedlichkeit ist selbst in vielen wissenschaftlichen Publikationen oder gar Wörterbüchern nicht immer klar zu erkennen. Der Begriff der Form (*lat. forma*) taucht durch Aristoteles im *Hylemorphismus* zusammen mit dem Begriff der Materie (*lat. materia*) als differenziert beschreibbare, doch untrennbare Bestandteile eines physischen Objektes auf. (von Bormann et al. 2007) Form ist nach dieser Definition stets in einer Art und Weise materialisiert und Materie oder Material in einer Art und Weise geformt. Dabei beschreibt die Form die visuelle Komponente, das Erscheinungsprinzip eines Objektes, während

die Materie die stofflichen Komponenten eines Objektes abbildet. Im Gegensatz zu den englischsprachigen Begriffen *shape* (2D) und *form* (3D) kann der deutsche Begriff der Form sowohl für die Beschreibung von zwei- als auch dreidimensionalen Erscheinungen verwendet werden, für die „*rein abstrakte Abgrenzung eines Raumes, einer Fläche*“ (Kandinsky 1980). Eine Form oder Formen sind somit abstrakte, visuelle Konzepte, die sich am besten mit Hilfe von Geometrie beschreiben lassen. Formen besitzen zudem, sofern sie eine Bezeichnung besitzen, meist eine semantische, zeichenhafte Komponente. So können Objekte ihre vorgesehene, ursprüngliche Form verlieren, „*aus der Form geraten*“ oder wieder „*in [seiner] Form gebracht werden*“. (Duden 2016a)

Der Begriff [...] (der Gestalt) ist ein Grundbegriff der Ästhetik und als solcher (wie alle Grundbegriffe) nicht definierbar, d.h. nicht gleichsetzbar mit einer Kombination von Begriffen, die bekannter sind als er selber. Tatsächlich ist die Geschichte des Begriffs <G.> keine Geschichte von Definitionen, sondern eine Geschichte von Spezifizierungen.“
(Strube 2007)

Der Begriff der Gestalt und seine Entwicklung wurden in der Philosophie und den (Sprach-)Wissenschaften zu einem breit behandelten Arbeitsfeld. (Simonis 2001)

„Der Deutsche hat für den Komplex des Daseins eines wirklichen Wesens das Wort Gestalt. Er abstrahiert bei diesem Ausdruck von dem Beweglichen, er nimmt an, daß ein Zusammengehöriges festgestellt, abgeschlossen und in seinem Charakter fixiert sei. Betrachten wir aber alle Gestalten, besonders die organischen, so finden wir, daß nirgend ein Bestehendes, nirgend ein Ruhendes, ein Abgeschlossenes vorkommt, sondern daß vielmehr alles in einer steten Bewegung schwanke.“

(von Goethe 1817, 15)

Goethe beschreibt im obigen Zitat, dass mit dem Begriff der Gestalt die ganzheitliche Wahrnehmung von real existenten Objekt- oder Wesensindividuen angesprochen wird. Er beschreibt ebenfalls, dass dieser Begriff sich auf einen feststehenden, festgehaltenen Zustand bezieht. Diese Gestaltauffassung lässt sich durch Redewendung wie *„einer Sache Gestalt geben/verliehen (etwas deutlich, wirklich werden lassen)“* oder *„Gestalt annehmen/gewinnen (sich mit der Zeit deutlicher gestalten und Wirklichkeit werden: der Plan nimmt allmählich Gestalt an)“* unterstreichen. (Duden 2016b) Die komplexe Natur der Ganzheitlichkeit einer wahrnehmbaren Gestalt eines Fahrzeugs versucht Seeger (Seeger 2014) weiterführend in Teilbestandteile aufzuteilen:

„Eine Gestalt ist die Ganzheit oder Vereinigung der Teilgestalten Grafik, Farbe, Form und Aufbau. [...] Eine Gestalt bzw. eine Teilgestalt ist des Weiteren die Ganzheit oder Vereinigung von Gestaltelelementen und Gestaltordnungen“.

(ebd., 35)

Er definiert weiterführend, dass alle diese Bestandteile der Gestalt „*Bedeutungs- und Informationsträger*“ (ebd., 217) sind und eine klare hierarchische Abhängigkeiten dieser Teilgestalten besteht. „*Die Leitteilgestalt ist der Aufbau [...], bei Fahrzeugen auch Gestalttyp genannt, dergestalt, dass die Form den Aufbau voraussetzt, dass die Farbe Aufbau und Form voraussetzt, dass die Grafik Aufbau, Form und Farbe voraussetzt.*“ (ebd., 35)

Um die Anwendungsfelder von Computational Design strukturell zu definieren, ist es notwendig die einzelnen Anwendungsfelder zu beschreiben und zu definieren. Die Zerlegung eines Fahrzeugs in unterschiedliche Aufgaben- bzw. Gestaltungsbereiche ist bereits in der Unternehmensstruktur größerer automobiler Gestaltungsabteilungen etabliert. So bestehen die Gestaltungsabteilungen eines Automobilbauers häufig aus separaten Abteilungen wie beispielsweise *Exterieur-, Interieur-, Color & Trim-, Lights and Parts-* oder auch *User-Experience-Design*. Es wird in diesem Sinne bereits eine Dekomposition in Teilgestalten bzw. Formelemente eines Fahrzeugs vorgenommen.

Die *Exterieur-* und *Interieur-*Abteilung(en) beschäftigen sich primär mit der Gestaltung und Entwicklung der äußeren bzw. inneren Erscheinung eines Fahrzeugs, d.h. insbesondere mit der Flächengestaltung der Außenhaut und dem Innenkleid. Aufwendig zu entwickelnde Anbauteile im Exterieur wie zum Beispiel Scheinwerfer und Lüftungsgrells werden oftmals von spezialisierten Abteilungen wie beispielsweise *Lights-and-Parts* übernommen. Die *Interieur-*Abteilung übernimmt ähnliche Aufgaben wie das *Exterieur*, d.h. dreidimensionale Flächengestaltung, jedoch für das Innere des Fahrzeugs. Die Abteilung *Color-&Trim* ist zuständig für die Gestaltung der Oberflächenqualitäten wie Farben und Materialien, sowie im Interieur als auch im Exterieur. Ein Gestaltungsfeld von zunehmender Wichtigkeit

ist das der *User-Experience (UX)*. Während das Gestaltungsfeld von digitalen Inhalten und der *Mensch-Maschine-Interaktion (Human-Machine-Interface - HMI)* früher meist an die *Interieur-Abteilung* angegliedert war, ist dieser Bereich in den meisten Automobilkonzernen zu eigenen großen Abteilungen angewachsen.

Es zeigt sich, dass eine Ausdifferenzierung der Aufgabenfelder bereits stark verwurzelt ist. Nun überlappen sich viele dieser Gestaltungsabteilungen und einige, wie das Interieur und das Exterieur sind sich in der Art und Weise der Gestaltung, d.h. der Verwendung von Gestaltungswerkzeugen sehr ähnlich. Die Aufgabenfelder der unterschiedlichen Bereiche überlappen sich auch insofern, da die unterschiedlichen Gestaltelelemente reziproke Beziehungen besitzen. Die Exterieurgestaltung eines Fahrzeugs wird je nach Oberflächenbeschaffenheit und Oberflächenqualität (Farbe, Glanzgrad) unterschiedlich wahrgenommen. Ebenso bilden Scheinwerfer und Lufteinlässe wichtige Gestaltungselemente, die die Gestaltung eines Fahrzeugexterieurs beeinflussen. Ähnliche Zusammenhänge und überlappende Gestaltungsaufgaben ergeben sich zwischen allen anderen Gestaltungsbereichen.

4.3 Designphasen im Transportation Design

In der Geschichte der Gestaltung existieren zahlreiche Modelle, Diagramme und Systemkonzepte, die zeitliche Phasen und die Bestandteile eines Designprozesses beschreiben sollen. Eine Auflistung der unterschiedlichen Konzepte und Diagramme wurde von Dubberly (Dubberly 2004) übersichtlich zusammengefasst, aufbereitet und visualisiert. Diagramme zu Designprozessen sind nützlich in der Dokumentation spezifischer Projektentwicklungen und der Analyse von Gestaltungsprozessen. Zudem dient die Systematisierung der strategischen Prozessplanung und der Definition von Meilensteinen. Viele Designer behalten sich jedoch eine gewisse Flexibilität im Prozess vor, sodass sie beweglich auf unvorhersehbare Einflüsse und Ideen reagieren können und sich mit ihren Entscheidungen nicht a priori definierten Richtlinien unterwerfen.

Da eine Gestaltung und der verbundene Gestaltungsprozess durch zeitliches und personenbezogenes Wissen beeinflusst wird, bleibt der Entstehungsprozess eines Designs für jedes Projekt individuell und entwickelt sich in jedem Projekt anders. Wie Dubberly aufgezeigt (ebd.), gibt es vielseitige Ansichten über die Bestandteile und zeitliche Abfolge von Gestaltungsschritten. Alle Designprozesse dieser Übersicht besitzen in ihrem speziellen Kontext und im vielfältigen Umfeld von Gestaltung einen Grad an Richtigkeit. So ist es generell schwierig Designprozesse bzw. Designphasen generalisiert zusammenzufassen. Zwar sind Designprozesse in großen Unternehmen wie Automobilkonzernen in klare Arbeitsschritte und Strukturen zusammen-

gefasst, doch unterscheiden sich diese wiederum genauso von Konzern zu Konzern sowie im Detail von Projekt zu Projekt.

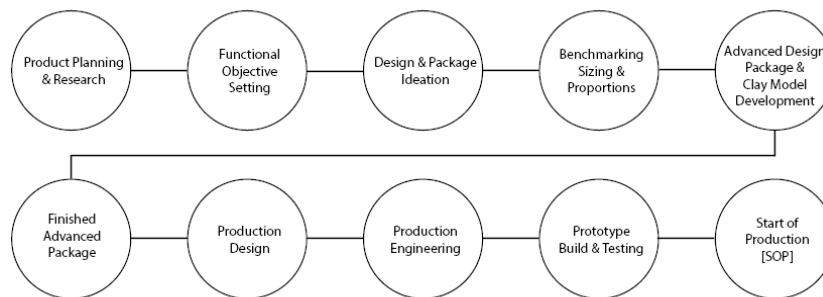


Abb. 3: Beispielhafter Entwicklungsprozess eines Fahrzeugs.
(Abbildung nach Macey/Wardle 2014)

Ein beispielhafter Fahrzeugentwicklungsprozess wurde von Macey und Wardle (ebd.) in Form von zehn Phasen beschrieben und soll hier exemplarisch als Referenz dienen:

1. „*Product Planning & Research*“: In dieser Phase wird Marktforschung betrieben und mögliche potentielle Kunden sowie Konkurrenzprodukte studiert.
2. „*Functional Objective Setting*“: An dieser Stelle werden sowohl aus Sicht des Herstellers als auch des zukünftigen Nutzers des Produkts dessen bzw. deren primäre Ziele definiert.
3. „*Design & Package Ideation*“: In der dritte Phase werden Ideen sowohl für das Design als auch den konstruktiven Aufbau erzeugt und gesammelt. Diese Phase hat das Ziel ein grobes Layout über die

wichtigsten Bestandteile sowie jegliche funktionale und ästhetische Innovationen in abstrakter Form sichtbar zu machen.

4. „*Benchmarking Sizing & Proportions*“: Grobe Ideenskizzen aus der dritten Phase werden an dieser Stelle mit existierenden Produkten verglichen, die ähnliche Eigenschaften und Ausrichtungen aufweisen. Durch diesen Prozess soll die eigene Gestaltungsrichtung validiert werden und nach ergonomischen Tests die Basisproportionen festgesetzt werden.
5. „*Advanced Design Package & Clay Model Development*“: Nachdem nun einige Basisdimensionen und wichtige Referenzpunkte definiert sind, werden Modelle konstruiert, um sowohl das Design als auch das Package in gegenseitiger Abhängigkeit weiterzuentwickeln. An dieser Stelle entsteht die formale Gestalt des Fahrzeugs.
6. „*Finished Advanced Package*“: Diese Phase beschreibt den Festlegungsprozess auf eine finale Gestalt. Ab diesem Zeitpunkt wird die Gestaltung meist von einem Advanced Design Team auf ein Production Design Team übertragen.
7. „*Production Design*“: Das Production Design Team entwickelt die finalen Exterieur- und Interieur Flächen in Hinblick auf Fertigungstechniken und Produktionskosten. Dies kann zu leichten Gestaltungsänderungen führen, jedoch mit dem Versuch den Charakter des Fahrzeugs zu bewahren.

8. „*Production Engineering*“: In dieser Phase werden die Gestaltungsflächen an die Ingenieurabteilungen weitergeben um die Produktionsprozesse zu planen und zu entwickeln.
9. „*Prototype Building and Testing*“: Der Bau eines Prototyps ist in den meisten Fällen notwendig, um mögliche Fehlerquellen und Gestaltungsschwächen vor Produktionsbeginn zu erkennen und beseitigen zu können.
10. „*Start of Production (SOP)*“: Die letzte Phase beschreibt den Produktionsbeginn des Fahrzeugs.

In dieser Arbeit sollen zwei charakteristische, übergeordnete Bestandteile des Gestaltungsprozesses herausgestellt werden, die einige der zehn spezialisierten Phasen zusammenfassen: (1.) die *Konzeptfindung*, (2.) die *Gestaltfindung*. Ein Großteil der inhaltlichen und konzeptionellen (*semantischen*) Qualität eines Projekts wird in der Konzeptfindung definiert, während sich ein Großteil der formalästhetischen, *syntaktischen* Qualität in der Gestaltfindung etabliert. Innerhalb dieser übergeordneten Gestaltungsphasen sind einige Binnenprozesse vereint und je nach Gestaltungsaufgabe und -situation können diese in Reihenfolge und Abhängigkeit unterschiedlich geordnet sein. Beide Phasen sind inhaltlich und formal miteinander verknüpft. Zwar ist in den meisten Fällen eine Konzeptphase der Gestaltfindungsphase vorgeschaltet, jedoch entsteht diese Phase der Einrahmung einer Fragestellung und Ideenentwicklung selten als eine am Anfang des Prozesses vordefinierte Vorgehensweise. (Schön 1984; Cross 2007) Ist die beschriebene Reihenfolge von vorgeschalteter Konzept- und nachgeschalteter Gestaltfindung jedoch vertauscht, entstehen konzeptionelle Inhalte basierend auf formalen Gestaltmerkmalen. (ebd.)

4.3.1 Konzeptfindung

*“design as a co-evolution of solution and problem spaces”
(Cross 2007)*

In diesem Abschnitt soll die Gestaltungsphase der Konzeptfindung näher beschrieben werden. Sie ist durch die inhaltliche Erarbeitung einer Gestaltung charakterisiert. Es werden Fragestellungen erarbeitet, die dazu führen Gestaltungsziele bzw. Gestaltungsthemen zu definieren. Dies wird nach Nigel Cross auch als „*Problem Framing*“ (Cross 2007) bezeichnet. Es handelt sich hierbei um die abstrakte Beschreibung eines offenen Problems, welches zwar eine Richtung aufweist, in den konkreten Lösungswegen aber undefiniert bleibt.

*“Since ‘the problem’ cannot be fully understood in isolation from consideration of ‘the solution’, it is natural that solution conjectures should be used as a means of helping to explore and understand the problem formulation”
(*ebd.*, 102)*

Neben inhaltlichen Methoden und Werkzeugen wie *mind mapping* oder *mood boards* zur Ideengenerierung, dominiert in der Phase der Konzeptfindung vor allem die Zeichnung als primäres, visuelles Kommunikationsmittel. Mit Hilfe von Zeichnungen werden Ideen generiert (*Ideation*), kommuniziert und dokumentiert. Sie begrenzen den Lösungsraum und bilden Ansätze für Lösungswege. Dabei können die Ideen semantischer aber auch syntaktisch, formaler Natur sein.

*„Although this ideation phase requires a broad focus,
do not totally overlook small details;
they may be part of the big idea.“
(Macey/Wardle 2014, 84)*

Im Prozess der Ideenentwicklung ist oftmals ein *Bottom-Up-Prozess* zu identifizieren, bei dem sich ein Konzept durch die Ausarbeitung von Gestalteigenschaften herausbildet. Detailentscheidungen begrenzen den Möglichkeitsraum bis ein Gestaltungskonzept definiert ist. Skizzen, d.h. Zeichnungen mit höherem Abstraktionsgrad, spielen durch ihr großes Interpretationsspektrum eine wichtige Rolle in diesem Prozess. Die Abstraktion einer Skizze erlaubt das Wesen oder die Gestaltung zu erfassen und zwar ohne die Ausarbeitung von Details oder lediglich durch partielle, exemplarische Darstellungen von Details zu repräsentieren. (ebd., 81) Zwischenergebnisse und Charaktereigenschaften können visuell festgehalten und kommuniziert werden. Hierbei ist der Abstraktionsgrad der Zeichnung hilfreich und problematisch zugleich, denn Mehrdeutigkeit kann zu Missverständnissen führen. In der Skizze bestehen im Prozess des Zeichnens keine zwingenden Abhängigkeiten zwischen einzelnen Strichen und Punkten. Somit bleibt die Skizze eine geometrisch, topologisch uneingeschränkte Repräsentationsform. Jeder Strich kann freigesetzt werden und erhält erst nachträglich seine syntaktische und semantische Bedeutung. Die Skizze bekommt ihre Geschwindigkeit aus der Einfachheit der Werkzeuge. Mit wenigen Strichen kann eine Menge bedeutungsvoller Information generiert werden. Die Überzeichnung charakterbildender Merkmale einer Gestaltung wird von Designern eingesetzt, um wichtige Aspekte eines Konzepts herauszuheben. Das Level der Überzeichnung sinkt mit dem Level der Ausarbeitung eines Projekts.

4.3.2 Gestaltfindung

*„Traditionsgemäß sind alle gestaltenden Disziplinen primär an der optischen – besser: visuellen – Wahrnehmung orientiert. Die Wahrnehmung erfolgt aber über mehrere Sinneskanäle und wird deshalb als multisensorisch, modern als multimodal bezeichnet.“
(Seeger 2014, 43)*

Die Gestaltfindungsphase beschreibt den syntaktischen Lösungsweg hin zur finalen Gestalt des Fahrzeugs. Es handelt sich in diesem Fall um den Prozess der Lösungsgenerierung, den Cross als „*Solution Generation*“ (Cross 2007) benennt. In dieser Phase dominiert ein Top-Down-Prozess, in welchem sowohl die Form als auch die anderen Gestalteigenschaften eines Fahrzeugs kontinuierlich ausdefiniert werden. Für die Gestaltfindung dominieren im Automobildesign digitale wie auch analoge dreidimensionale Modellierungsmethoden. Sie kann sowohl mit digitalen als auch analogen Werkzeugen erfolgen. Die Gestaltfindungsphase startet meist mit der Bearbeitung der digitalen Erzeugung des Fahrzeugvolumens, welche nach Seeger den Fahrzeugtypus und die allgemeinen Proportionen eines Fahrzeugs bestimmen. (ebd., 36) Nachdem konzeptionelle Skizzen dieses Fahrzeugs erzeugt worden sind (meist Seitenansichten), wird dann oftmals direkt ein digitales Volumenmodell erzeugt, das entweder als Flächen- oder Polygonmodell ausgeführt werden kann. Dieses Modell dient zum einen zur ersten virtuellen, dreidimensionalen Visualisierung und Bewertung der volumetrischen Bestandteile der Fahrzeuggestalt, zum anderen können diese digitalen Daten zur Herstellung erster physikalischer Modelle verwendet werden. Häufig werden in dieser Phase Modelle im

Maßstab 1:4, aber auch in Realitätsgröße 1:1, aus Modellierten (*Plastilin*) gefräst, die im nächsten Schritt weiterausdefiniert werden können.

Ab diesem Zeitpunkt beginnt eine Entwicklung aus physischer und digitaler Modellierung. Die Gestalt wird gleichzeitig im Digitalen wie im Analogen weiterentwickelt. Dabei werden neue digitale Informationen durch Fräsen oder 3D-Druck ins Physische übertragen, entgegengesetzt werden analog modellierte Flächen 3D-gescannt und somit ins Virtuelle transferiert. Die Scandaten dienen leider aber meist nur als digitale Referenz, denn das hochauflösende, polygonalisierte Abtastungsmodell besitzt keinerlei Konstruktionshistorie oder -topologie und muss deswegen interpretiert und nachkonstruiert werden, um konstruktive Genauigkeit zu erreichen. Während vor Jahren noch die Modellierung mit Flächen im Automobilbereich dominiert hat, gewinnt Polygonmodellierung vor allem in der frühen Gestaltungsfindung an Bedeutung. Polygonmodelle besitzen durch die homogene Verteilung von Kontrollpunkten ein hohes Maß an Flexibilität, um zügig organische Flächen definieren zu können. Mit fortgeschrittener Entwurfsentwicklung entsteht ein höherer Detaillierungsgrad und die Notwendigkeit der technischen Präzision. Ab diesem Zeitpunkt sind Flächenmodelle im Vorteil, da diese ein höheres Maß an mathematischer Genauigkeit, somit gestalterischer Kontrolle und demzufolge visueller Qualität erlauben. Im Analogen dominiert in der Anfangsphase die Modellierung mit *Plastilin*. Erfahrene Modelleure können effizient Material abtragen und wieder hinzufügen, um die Gestalt des Fahrzeugs anzupassen und zu verbessern. Diese analoge Modellierungsmethode wird sowohl im skalierten, meist 1:4 Maßstab, als auch in Realitätsgröße angewandt. Das Modellieren mit *Plastilin* war anfänglich vor allem im angelsächsischen Raum

verbreitet, während in der Gegend um Italien die Modellierung mit Polyurethan-basiertem Hartschaum gebräuchlicher war. Hartschaummodellierung erlaubt je nach Härtegrad des Materials die Erzeugung hoher Genauigkeit. Hartschaummodelle haben jedoch den Nachteil, dass Änderungen einen höheren Zeitaufwand benötigen.

4.4 Werkzeuge, Materialien und Methoden zur Modellierung von Fahrzeugen

„Ein Werkzeug [...] ist in der Regel ein Mittel zum Zweck [...] Das Werkzeug ist für eine bestimmte Anwendung programmiert, es verliert seinen Sinn, wenn der Zweck erledigt ist.“

(Schmitz/Groninger 2012b, 19)

Die Auswahl des Darstellungsmediums spielt im Gestaltungsprozess eine beachtenswerte Rolle und ihr Einfluss auf eine entstehende Gestaltung wird noch immer häufig unterschätzt. Modelle dienen als Referenz bzw. Repräsentation, um das Erscheinungsbild eines Objektes darzustellen und bewerten zu können. Werden geschaffene Objektrepräsentationen *„im Sinne Vilém Flussers als Erlebnismodelle“* bezeichnet, *„dann wird es offensichtlich, dass sich der Werkzeuggebrauch im kreativen Kontext gleichermaßen auf die Entwerfer und auf die Entwürfe auswirken muss.“* (ebd., 11) Über die Jahrhunderte der Kunst- und Architekturgeschichte bis in die Jahrzehnte der Design-Profession, haben sich die Wahl und die Spezialisierung von Materialien, Werkzeugen und der Anwendungsmethoden parallel zu den Ergebnissen verändert. Neue Werkzeugentwicklungen haben dabei die Darstellung oder Herstellung neugeformter Modelle möglich gemacht und nachhaltig zu neuartiger Ästhetik beigetragen. Gleichzeitig begrenzen Werkzeuge und Material die Möglichkeiten der Darstellung und Bearbeitung von Form stark. Die Auswahl des richtigen Werkzeugs und Materials für die Aufgabe ist zweifelsohne eine relevante Gestaltungsent-

scheidung, der oftmals zu wenig Bedeutung beigemessen wird.

*„CAD ist ein wesentlicher Part auf dem verkürzten Weg
zur neuen Form.“*

(Rezzonico 2015)

Wie in den meisten Gestaltungsbereichen hat auch in der Automobilentwicklung der Computer eine wichtige Rolle eingenommen. Automobilkonzerne haben bereits von Beginn an in den Digitalisierungsprozess investiert. Neben hochmodernen Konstruktions-, Fertigungs- und Visualisierungsmethoden werden in der Gestaltungsabteilung weiterhin sehr traditionelle Werkzeuge und Methoden eingesetzt. Obwohl jeder Arbeitsplatz mit einem Computer mit hoher Rechenleistung und entsprechender Software ausgestattet ist, werden im Automobilesdesign die Vorteile traditioneller Gestaltungsmethoden wie der klassischen Zeichnung oder der Tonmodellierung nach wie vor geschätzt und die Handwerkskunst dieser Werkzeuge und Methoden gepflegt. Es bestehen die Bestrebungen das Automobil inklusive der traditionell ausgeprägten Gestaltungsprozesse in seiner Gesamtheit zu „*mathematisieren*“ (Seer 1998, 160) , die „*Grenzen zwischen realer und virtueller Repräsentation eines Modells*“ aufzulösen (ebd.) und „*die Vorteile beider Methoden*“ zu kombinieren. (ebd.) Dabei kann allgemein zwischen zweidimensionalen Bild- und räumlichen Modellerzeugungsmethoden und -werkzeugen unterschieden werden.

Als zweidimensionale Methoden zur Erzeugung von Bildern werden heute im Automobilesdesign, neben der klassischen Zeichnung mit Stift und Papier, verstärkt digitale Skizzierungsmethoden eingesetzt. Mit Hilfe spezieller Zeichenhardware (digitale Bildschirme mit sensitiver Oberfläche und

entsprechendem Eingabestift) werden die Vorteile der klassischen Zeichnung in der virtuellen Welt simuliert. Der Eingabestift ist in seiner Anmutung und Bedienung, von einigen Zusatzpunkten wie programmierbaren Bedienknöpfen abgesehen, in den Grundzügen unverändert geblieben. Die Papierbeschaffenheit und der Stiftauftrag wurden jedoch durch eine virtuelle Darstellungsform ersetzt. Durch den Verzicht auf physisches Material wie Papier können der Gestaltungsmethode zusätzliche Funktionen hinzugefügt werden. So können im virtuellen Raum „beliebig viele Variationen durchgespielt werden, ohne das Ausgangsmodell aufzugeben.“ (Seer 1998, 162) Zusatzfunktionen zur Präzisionssteigerung, wie das Zeichnen gerader Linien können ebenfalls hinzugefügt werden. Durch die Ähnlichkeit zur traditionellen Zeichnung kann ein Abstraktionsgrad beibehalten werden, der die Skizzenhaftigkeit von unfertigen Lösungen unterstreicht. Digitale Zeichnungen bleiben oftmals maßstabslos, können jedoch in Originalgröße ausgedruckt werden, um ein dimensionales Verständnis des Ergebnisses zu erhalten. Einfache 1:1 *“tape drawings”* auch *“initial templates”* (Macey/Wardle 2014) genannt, sind traditionelle Methoden, um Proportionen mit verhältnismäßig wenig Aufwand realitätsgrößer abzubilden. Hierbei nutzen Designer dünnes spezialisiertes Klebeband (*tape*), um die Konturen eines Fahrzeugs auf eine Wand zu übertragen. In diesem Prozess wird durch Spannung gezielt die limitierte Dehnbarkeit des Tapes genutzt, um harmonische (kontinuierliche) Krümmungen zu erzeugen. Für Krümmungen mit größerem Radius wird dickeres bzw. breiteres Band eingesetzt, da hier der minimale Radius eingeschränkter ist, während für stärkere Krümmungen ein flexibleres, schmaleres Band nötig ist.

Um die Wirkung einer Fahrzeuggestalt gesamtheitlich beurteilen zu können, wird bis zum heutigen Zeitpunkt eine Fahrzeuggestalt als physisches Modell materialisiert. Auf diese Weise kann ein realistischer Eindruck des Ergebnisses gewonnen werden, da ein breiteres Spektrum der Sinneswahrnehmung angesprochen wird. Gerade im Prozess des Modellierens spielt der haptische Tastsinn eine besondere Rolle. Ein erfahrener Modelleur und Designer kann minimalste Unebenheiten erfühlen, die für das Auge kaum sichtbar sind.

Die Modellierung wird zum Zeitpunkt dieser Arbeit überwiegend durch spezialisierte Modelleure bzw. Formgestalter durchgeführt. Als Material für die physische Modellierung werden, wie bereits erwähnt, in den meisten Fällen Modellbauton oder Hartschäume eingesetzt. Der Beruf des Modelleurs bedarf eines großen Maßes an (kunst-) handwerklichen Fähigkeiten und ist in solch ausgeprägter Form in der Industrie sehr selten. Die meisten Modelleure haben ihre Fähigkeiten im Unternehmen gelernt.

„Es existiert in Form einer eigenen Ausbildungs-Schiene, einer Art in-house-Schule. Durchgeführt wird es mit Keramik-Modelleuren aus der Porzellanstadt Selb, und das Praktikum dort wird angerechnet.“

(Kieselbach 1998, 153)

Ähnlich wie bei der Zeichnung helfen spezialisierte Werkzeuge und Lehren wie Lineale bei der Erzeugung von Präzision und der Wiederholbarkeit von Formbestandteilen. Als exemplarisches Werkzeug für automobilen Modellbau gilt die Straklatte (*engl. spline*). Es handelt sich hierbei um Leisten, die eingesetzt werden um die Krümmung von dreidimensionalen Formen zu erzeugen oder lediglich zu kontrollieren. Sie existieren in unter-

schiedlichen dimensionalen Ausführungen und Materialien (Holz, Kohlefaserverbund, etc.). Durch Biegen der Leisten entstehen kontinuierliche Krümmungen, die als Lehre oder Schabwerkzeug eingesetzt werden können. Straklatten mit variierender Materialstärke erlauben beschleunigte Kurven, d.h. Kurven mit progressiv steigender Krümmung, zu abzubilden.

Die Werkzeuge und Arbeitsschritte zur Erzeugung analoger und digitaler Freiformflächen ähneln sich stark und besitzen jeweils Charakteristiken aus dem traditionellen Schiffsbau, indem mithilfe von Spanden Rumpfkörper aus doppelgekrümmten Flächen erzeugt werden. Die Automobilindustrie hat große Beiträge zum Fortschritt der Methoden zur Konstruktion, Visualisierung und Simulation von virtuellen Modellen geleistet. (De Casteljau 1963; Bézier 1986) Anfänglich besaßen die führenden Automobilkonzerne eigene Abteilungen, die konzernspezifische Softwarepakete entwickelten und diese an die Anforderungen der Anwender anpassten. Durch den Funktionsumfang, die Implementierungsqualität sowie kostengünstige Verfügbarkeit und Wartung von standardisierten kommerziellen Softwaresystemen wurde in den meisten Fällen die Entwicklung eigener Softwarepakete zur Formerzeugung eingestellt und ausgelagert. Durch standardisierte, kommerziell erwerbbar Softwareysteme werden Verbesserungen in Form von Updates von einer breiten Nutzergruppe an die Entwickler weitergegeben. Dadurch kann sich ein Produkt schneller entwickeln. Gleichzeitig bringt die Auslagerung von Expertise in der Entwicklung von Softwarelösungen Nachteile, denn es muss erst auf Verbesserungen und neue Funktionen in Form von Updates gewartet werden. Die Entwicklung individueller Lösungsstrategien für bestimmte projektspezifische Aufgaben ist dadurch ebenfalls nur erschwert möglich.

Für die digitale Modellierung von Fahrzeugen werden unterschiedliche Softwarepakete eingesetzt. Während anfänglich nahezu ausschließlich kurven- und flächenbasierte (*Non-Uniform Rational B-Splines - NURBS*) Modellierungsmethoden eingesetzt wurden, wird für die Konzeptmodellierung auch verstärkt Polyedergeometrie mit entsprechenden Modellierungsmethoden eingesetzt. Dabei ähneln polyederbasierte Modelle in vielen Eigenschaften und ihrer Handhabung weichen, physischen Modellen aus Plastilin, während flächenbasierte Modelle wiederum harten Modellen aus Hartschaum ähnlich sind. Die meisten Softwarepakete für Gestaltungsaufgaben bieten Programmier- oder Skriptschnittstellen, die im Computational Design eingesetzt werden, um logische Prozesse und Regeln zur Formgenerierung aufzusetzen. Für effektives Arbeiten müssen diese jedoch einige Anforderungen erfüllen:

1. Programmierschnittstellen müssen gut zugänglich und dokumentiert sein, um mögliche technische Probleme zu reduzieren. Somit kann mehr Zeit in die Ausarbeitung der Ergebnisse investiert werden.
2. Eine Sammlung mit wichtigen mathematischen Operationen sollte beinhaltet sein, damit möglichst wenig Zeit mit der Entwicklung der eigenen Entwicklungsumgebung verwendet wird.

Modellierung benötigt, wie anfänglich erwähnt, handwerkliche Expertise und Erfahrung. Dies trifft nicht nur auf physische, sondern auch auf digitale Modellierung zu. (Kilian 2006) Die Werkzeuge, Materialien und deren Anwendungsmöglichkeiten müssen bekannt sein, um eine gewünschte Form umsetzen zu

können. Darüber hinaus entsteht durch die wiederholte Nutzung von Werkzeugen implizites Wissen. Aus diesem Grund besteht im Automobildesign eine bewusste Trennung zwischen Designern und Modelleuren. So wird ein höheres Maß an Spezialisierung und ein möglichst breites Feld von Expertise abgedeckt, um auf allen Bereichen der Produktentwicklung die höchste Qualität zu erreichen. Auch im Computational Design ist diese Trennung oft zu erkennen. Designer arbeiten mit Programmierern zusammen, um beide Spezialisierungen in einem Projekt auszunutzen. Der Besitz von Grundkenntnissen der jeweils anderen Profession vereinfacht die Kommunikation der Ziele und Lösungswege.

5

Methoden und Hypothese

5.1 Methodologie

In diesem Abschnitt soll die Strategie und die Methodik zur Bearbeitung der Aufgabenstellung dieser Dissertation beschrieben werden. Das Ziel der Arbeit liegt darin, Erkenntnisgewinn über computerbasierte Gestaltungsstrategien jenseits der klassischen CAD-Modellierung für Anwendungen im Automobildesign zu erlangen. Dies wird in Form einer systematischen Untersuchung formgenerierender Algorithmen und dazugehöriger computerbasierter Gestaltungsstrategien angestrebt und im Hinblick auf die Anwendbarkeit vergleichend betrachtet, praktisch erprobt und experimentell erforscht. Hierbei ist wichtig zu sagen, dass die Vielfalt an möglicherweise relevanten algorithmischen Formgenerierungsmethoden für die Gestaltung bei weitem den Umfang einer Dissertation überschreitet. Aus diesem Grund kann eine vollständige Über-

sicht nicht das Ziel dieser Arbeit darstellen. Vielmehr wird eine Strategie zur Kategorisierung und Auswahl von repräsentativen Algorithmen entwickelt, um ein breites Anwendungsspektrum, sowie mögliche daraus resultierende Ästhetiken aufzuzeigen. Hierzu soll einleitend ein Rahmenwerk eingeführt werden, in welchem unterschiedliche Methoden in systemische Gestaltungsbausteine kategorisiert werden. Anhand spezifisch ausgewählter Fallstudien sollen unterschiedliche Anwendungsformen und Computational Design Strategien exemplarisch analysiert und praktisch erprobt werden. Der Erkenntnisgewinn dieser Arbeit soll durch praktisch implementierte Fallstudien erreicht werden. Das im Rahmenwerk aufgezeigte, abstrakte Baukastensystem kann weiterführend eingesetzt werden, um ein konzeptionelles Gerüst für systematisch strukturierte, digitale Modelle zu erzeugen. Im Prozess der Kategorisierung werden nicht Klassen und Kategorien aus der Mathematik oder Informatik übertragen, sondern gezielt gestaltungsrelevante Kategorien entwickelt und Algorithmik in solche eingeteilt. Diese pragmatische Kategorisierung soll die praktische Anwendbarkeit von Algorithmik im Gestaltungsprozess vereinfachen. Weiterführend sollen Anwendungswege untersucht werden, wie Algorithmik, als wissenschaftlich strukturiertes Verfahren, in den non-linearen, stark künstlerisch geprägten Gestaltungsprozess von Automobil-designern übertragen werden kann.

5.2 Metadesign

Der Begriff *Metadesign* soll eine zwischengeschaltete Gestaltungsphase zwischen der konzeptionellen Ideen- und der eigentlichen Gestaltentwicklung beschreiben, in der Gestaltungselemente in logischen Zusammenhang gesetzt werden. In dieser Zwischenphase ist die Aufgabenstellung und Zielsetzung zum größten Teil bereits definiert. Anstatt jedoch direkt ein Gestaltungsobjekt zu erzeugen, beschreibt ein Metadesign die Entwicklung einer systemtheoretischen Gestaltungsstrategie: *“designing the design”* (Burry 2003, 213) Das resultierende variable Modell eines Metadesigns erlaubt sowohl Bottom-Up als auch Top-Down-Strategien zur Finalisierung eines Entwurfs durchzuführen und gar gewichtet in einem Projekt zu vereinen.

Es soll in den folgenden Kapiteln untersucht werden, wann ein solch zwischengeschalteter, logisch strukturierter Prozess der Definition und Ordnung von Gestaltungselementen vorteilhaft ist. Es wird prognostiziert, dass dieser Prozess vor allem für Gestaltungsentwicklungen mit höherer Komplexität relevant sein wird – insbesondere in Gestaltungen, die mit traditionellen physischen oder traditionellen digitalen Modellierungsmethoden nicht abbildbar sind. Weiterführend soll untersucht werden, wie die Entwicklung eines solchen Gestaltungssystems die Erzeugung von Variation ermöglichen kann bzw. zur Entwicklung von Produktreihen bzw. -familien eingesetzt werden kann.

5.3 Bewertungsmechanismen

Der wohl schwierigste Teil des wissenschaftlichen, gestalterischen Arbeitens betrifft die Bewertung der Ergebnisse. Ein gestaltetes Objekt kann nach unterschiedlichsten Kriterien analysiert werden. Einige Bewertungskriterien wie die funktionale Leistungsfähigkeit oder der ökonomische Erfolg eines Objekts lassen sich quantitativ erfassen oder gar simulieren, sodass sich aus den Ergebnissen eine numerische Auswertung und somit auch eine Bewertung erzeugen lässt. Eine Bewertung von ästhetischer Qualität, unabhängig von funktionalen und ökonomischen Faktoren, stellt sich wiederum durchaus schwieriger dar. Die Bewertung von Ästhetik ist unmittelbar mit der ästhetischen Empfindung, des ästhetischen Erlebens, verbunden und enthält somit die subjektive Komponente des Betrachters mit seiner persönlichen, soziokulturellen Erfahrung und Wissen. (Bourdieu 1972, 18) *„Urteile und Wertungen haben im ästhetischen Erleben eine eigentümliche Bedeutung. Sie sind gleichermaßen unerlässlich wie problematisch. Unerlässlich, weil in jedes ästhetische Erleben immer schon Wertungsgesichtspunkte eingehen, weil ästhetisches Erleben nicht ohne eine evaluative Dimension zu denken ist. Problematisch insofern als solche Urteile und Wertungen, so persönlich und privat sie uns auch scheinen mögen, immer auch soziale Hierarchien und gesellschaftliche Machtverhältnisse eingehen.“* (Dietrich/Dominik/Schubert 2013, 85) Neben diesen subjektiven Faktoren muss zudem der zeitliche sowie örtliche Kontext miteinbezogen werden, denn eine unterschiedliche Umgebung oder Zeitgeist beeinflusst die Wahrnehmung eines Objekts. Die Komplexität der zu betrachtenden Rahmenbedingungen dieser Unter-

suchung erschwert eine objektive Bewertung der Ästhetik von Gestaltungselementen oder gestaltungrelevanten Methoden. Immanuel Kant kommt dabei zu folgendem Ergebnis:

*„Es kann keine objektive Geschmacksregel,
welche durch Begriffe bestimmte, was schön sei, geben“
(Kant 1968, 149)*

Gleichzeitig sind Urteile über die Ästhetik von Objekten in all ihrer Individualität und Subjektivität auf Verallgemeinerung und Übereinstimmung mit Anderen ausgelegt (Dietrich/Dominik/Schubert 2013, 87) und erhalten somit ein gewisses Maß an Nachvollziehbarkeit.

*„Das Geschmacksurteil selber postuliert nicht
jedermanns Einstimmung (denn das kann nur ein logisch
allgemeines, weil es Gründe aufführen kann, tun); es
sinnet nur jedermann diese Einstimmung an.“
(Kant 1968, 149)*

Für die Kategorisierung und Bewertung gestaltungsrelevanter, algorithmischer Methoden sind Bewertungen ästhetischer Natur stets ein fundamentaler Bestandteil der gestalterischen Entscheidungskette. Ihre Nachvollziehbarkeit und somit Gültigkeit der eigenen Kategorisierung von algorithmischen Methoden dieser Arbeit unterliegt dabei reziprok verknüpften, fundamentalen Problematiken:

1. *Dilemma der mehrfachen, mehrdeutigen Umsetzung:*
Ein Algorithmus kann als datenverarbeitender Prozess in unterschiedlichster Form visuell aufbereitet werden. Aus diesem Grund kann nur die jeweilige Anwendungsform und keineswegs das gesamtgesellschaftliche Potential eines Algorithmus betrachtet werden. Die Anwendbarkeit einer Methode für die Gestaltung ist somit nicht zwangsläufig von Gestalter zu Gestalter übertragbar. Das gestalterische Potenzial ist zu einem großen Teil durch die gestalterische Kompetenz des Verfassers und Anwenders definiert.
2. *Dilemma der Anwendbarkeit:* Ein wichtiger Teilbestandteil des gestalterischen Arbeitens ist das Finden von Neuartigem. Hierzu werden ähnlich der Kunst gerne etablierte Konventionen hinterfragt und Methoden für unterschiedlichste Zwecke fremdgenutzt. Dieses unvorhersehbare Nutzungsverhalten in der Gestaltung erschwert die Definition von aussagekräftigen Kategorien und Anwendungsfeldern.
3. *Dilemma des Zeitgeists:* Gestaltung lebt vom Wechsel und vom Andersartigen, von der Suche nach gänzlich Neuem. Neues oder Neuartiges zeichnet sich durch noch nicht wahrgenommene und kategorisierte Wahrnehmungsinformation aus. Um Neuartiges zu erzeugen, muss die wahrnehmbare Gestalt verändert werden.
4. *Dilemma der Sprachlichkeit und Formalisierung von Bildern:* Ein Bild kann durch Sprache nur bedingt präzise beschrieben werden, Details und exakte

räumliche Beschreibungen sind nur umständlich zu kommunizieren.

5. *Dilemma der unterschiedlichen Gestaltungsziele:*
Gestaltungsziele werden meist durch vielseitige Zielsetzungen in Kombination mit einer eigenen Gestaltungshaltung definiert. Eine Gestaltungshaltung setzt sich wiederum aus persönlichen Werten des Gestalters zusammen. So gewichten Gestalterpersönlichkeiten Attribute wie visuelle Kohärenz bzw. Heterogenität, symbolischer Wert, formalästhetischer Stil, ökologische, ökonomische und funktionale Performanz unterschiedlich.

Aufgrund dieser Dilemmata werden in der folgenden Arbeit weniger detaillierte und subjektive, zeitlich gebundene Aussagen über ästhetische Potentiale getroffen, sondern vielmehr angestrebt sie durch Visualisierungen und praktische Fallstudien zu verdeutlichen.

Als ein transdisziplinäres Forschungsthema werden für diese Arbeit fundierte Kenntnisse sowohl innerhalb der Disziplin des Computational Designs als auch des Transportation Designs benötigt. Ohne entsprechende Expertise besteht sonst die Gefahr Ergebnisse zu erzeugen, die im jeweiligen Diskurs der Disziplin wenig Relevanz aufweisen. Gerade im Feld des Transportation Designs, d.h. in den Forschungsabteilungen von Automobilfirmen, sind viele Prozesse und Methoden (noch) nicht öffentlich publiziert, da dies den Verlust eines Wettbewerbsvorteils bedeutet und direkte wirtschaftliche Konsequenzen mit sich ziehen kann. Wiederum sind Aussagen über die Anwendbarkeit von Algorithmik in der Gestaltung von Automobilen nur bedingt im rein akademischen Kontext einer Promotion zu treffen, aus

diesem Grund wurde in dieser Arbeit eine Kooperation mit dem *Mercedes-Benz Design Center Sindelfingen* angestrebt, um vor Ort im praktischen Kontext aussagekräftige Erkenntnisse über die praktische Relevanz zu sammeln.

5.4 Dimensionale Zerlegung automobiler Form

„Every aspect of form, whether piecelike or patternlike, can be understood as a structure of components. Every object is a hierarchy of components, the large ones specifying the pattern of distribution of the small ones, the small ones themselves, though at first sight more clearly piecelike, in fact again patterns specifying the arrangement and distribution of still smaller components.“

(Alexander 1964, 130)

Die Analyse in der Gestaltung kann als eine Reflektion über eine bereits entstandene Form aufgefasst werden und bildet einen inhärenten Teil des menschlichen, gestalterischen Arbeitens. (Goodman 1978; Schön 1984; Stiny 2008; Stiny/Gips 1978) Der Moment der Reflektion passiert in jedem Stadium des Gestaltungsprozesses und ähnelt kybernetischen Rückkopplungsprozessen. (Wiener 1968) Diese Analyse, meist allein durch den Prozess des Betrachtens durchgeführt, ist ein wichtiger Bestandteil, um den Prozess des Entwerfens besser zu verstehen. Dabei kann ein Objekt, Objektbestandteile oder lediglich der Kontext eines Objekts untersucht werden. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse bzw. Informationen der Reflektion beeinflussen die nächsten Schritte der Arbeit eines Gestalters.

„Die formale Qualität einer Gestalt betrifft sowohl deren Elemente wie die Relationen dieser Elemente, d.h. deren Ordnungen.“
(Seeger 2014, 241)

Für die Qualität einer wahrnehmbaren Gestalt wird sowohl die globale Stimmigkeit des Gesamteindrucks sowie die Stimmigkeit aller lokalen Teilformen, Attribute und Ordnungen in Betracht gezogen. Aus der Stimmigkeit von Teilformen und Ordnungen wird die Stimmigkeit der Gesamtform angestrebt. Die intensive Auseinandersetzung mit einer Gestalt bedeutet stets eine isolierte Betrachtung von Teilelementen. Diese Reduktion, Zusammenfassung oder Konzentration auf definierbare Aspekte, Eigenschaften oder Bestandteile wurde ausführlich in Max Benses Buch „*Aesthetica*“ durch unterschiedliche Analyseformen beschrieben. Sie erlauben Teilaspekte einer Gestalt aus unterschiedlichen Perspektiven zu analysieren. (Bense 1982) Die klare Definition der Analyseperspektive erlaubt die Nachvollziehbarkeit der Aussagen und Entscheidungen zu erhöhen. Im Fall dieser Arbeit kann dies aber auch zur Identifikation und Kategorisierung von algorithmischen Anwendungsgebieten dienen. Die Abstraktion innerhalb des Dekompositionsprozesses, d.h. die Differenzierung und Selektierung der zu berücksichtigenden und vernachlässigbaren Bestandteile ist von entscheidender Relevanz und kann bis zu diesem Zeitpunkt nicht automatisiert werden. Die Reduktion der geometrischen Komplexität einer Form durch Isolierung von Teilaspekten bzw. Teilformen ist ein anschauliches Beispiel für die Teilanalyse einer Gestalt. Es entsteht eine Informationsverringerng einer Form. Eine algorithmische Methode zur Vereinfachung von Form ist beispielsweise die Berechnung einer *bounding box* (Rourke 1985; Chan/Tan 2001;

Barequet/Har-Peled 2001) oder konvexen Hülle (Klein 2005). Eine *bounding box* dient der automatisierten Extraktion globaler Dimensionsgrößen wie der absoluten Länge, Breite und Höhe eines Fahrzeuges, während eine konvexe Hülle ein konvexes vereinfachtes Volumen erzeugt, das beispielsweise für Näherungswerte von Rauminhalt- oder Oberflächenberechnungen eingesetzt werden kann.

Durch die Erzeugung eines digitalen, virtuellen Modells wird Information über eine Gestalt quantifizierbar. Digitale Modelle werden in Form von textbasierten Dateiformaten digital gespeichert und archiviert. Durch die Digitalisierung von Gestalt lassen sich Analysemethoden anwenden, um auf diese Art Erkenntnisse über die zu untersuchende Form zu generieren. Es können dabei unterschiedliche Arten von Informationen über einen Entwurf gesammelt werden. Die Art der Information bestimmt daher die Art der Analyse. Daher soll an dieser Stelle zwischen zwei unterschiedlichen Arten von Gestaltungsanalysen unterschieden werden:

1. Die *Formanalyse* beschreibt den logischen Zusammenhang und konzentriert sich auf die Relationen von Formen und Formbestandteilen.
2. Die *Gestaltanalyse* untersucht messbar syntaktische, meist metrische Information einer Gestalt.

Neben der Zerlegung einer automobilen Gestalt in die Teilgestalten Aufbau, Form, Farbe und Grafik (Seeger 2014), soll an dieser Stelle die Zerlegung von automobiler Form in dimensionale Formbestandteile eingeführt werden:

1. *Körper*: Behandlung von dreidimensionalen, geschlossenen Formen
2. *Flächen*: Behandlung von zweidimensionalen bzw. zweieinhalbdimensionalen Formen
3. *Kurven*: Behandlung von Kurven und Linien

Durch diese Zerlegung soll die Aufmerksamkeit des Betrachters auf unterschiedliche syntaktische Elemente wie geometrische Objekte und deren Eigenschaften fokussiert werden. Isoliert betrachtete Körper, Flächen und Kurven können auf ihre Beschaffenheit und Anmutung untersucht und in Bezug auf die intendierte Formensprache bewertet werden. Diese Zerlegungsmethode soll ebenfalls als Kategorisierungsmethode für die Auswahl und Einordnung von algorithmischen Methoden dienen, denn für die Verwendung geometrischer Objekte wie Flächen oder Kurven benötigt man sowohl spezifische Parameter, als auch algorithmische Funktionen und Klassen. Nachfolgend wird untersucht, welche geometrischen Mittel, algorithmischen Methoden und Regelzusammenhänge bestehen und in welcher Form diese anwendbar sind. Dabei haben unterschiedliche Geometrien unterschiedliche formale und technische Einschränkungen und reduzieren dementsprechend das Spektrum der Lösungsmöglichkeiten. Abschließend sei erwähnt, dass in dieser Arbeit zu keinem Zeitpunkt die ästhetische Qualität (Birkhoff 1933) gemessen wird, sondern vielmehr syntaktische Daten der Form bzw. Gestalt des Entwurfs, welche nach oder während der Entstehung eines Designs gesammelt werden können.

5.4.1 Körperanalyse

Zu Beginn soll die dreidimensionale, volumetrische Formanalyse bzw. Körperbehandlung beschrieben werden. Das Körpervolumen beschreibt die abstrakte Form eines Fahrzeugs ohne die Berücksichtigung dezidierter Flächen- und Kantendetails. Die ausgewogene Verteilung der volumetrischen Masse eines Fahrzeuges ist von größter Wichtigkeit. Es werden die Verhältnisse zwischen Fahrerkabine, Länge, Höhe und Breite sowie Größe und Form der Fahrerkabine bemessen, die auch als Fahrzeugproportion beschrieben wird. Die Art und Weise der Behandlung der Fahrerkabine bestimmt zu einem großen Teil den Typ und Charakter eines Fahrzeugs.

Während technische Analysemethoden von Körpern meist numerische Werte wie Oberflächeninhalt oder Volumengröße berechnen, sind exakte Parameter in der Gestaltung von untergeordnetem Interesse. Vielmehr geht es um die visuelle Verteilung von Materialmasse. Obwohl ein automobiler Körper meist ganzheitlich wahrgenommen wird, dienen Konturen (Schnitte des Volumens) dazu, die Komplexität des Volumens zu reduzieren und mit Konturen anderer Fahrzeuge zu vergleichen. Hierbei spielt die Längskontur, auch $y\theta$ -Schnitt genannt, eine besondere Rolle. Durch Umverteilungen der Masse eines geometrischen Volumens kann der formale Ausdruck des Fahrzeugs verändert und angepasst werden. Es werden dabei Prinzipien und Maßnahmen der Gewichtung, Aufteilung, Anordnung und der Übergänge in Betracht gezogen.

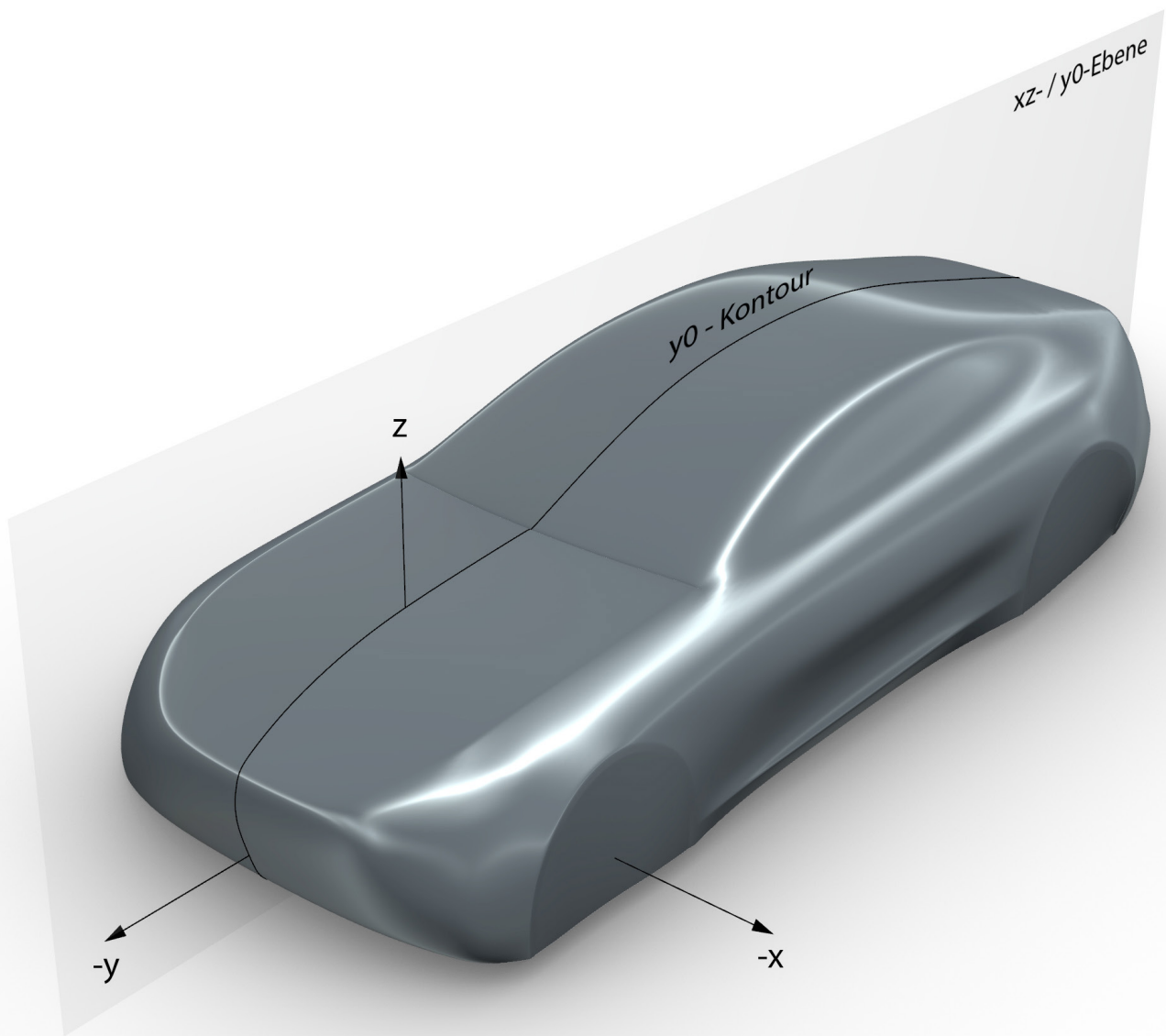


Abb. 4: Exemplarisches Volumenmodell zur Analyse körperhafter Proportionseigenschaften. Die xz- bzw. y0-Ebene schneidet den Körper und legt die charaktervolle y0-Seitenkontur frei.

5.4.2 Flächenanalyse

Die zweidimensionale Analyse bzw. Gestaltungsebene der Flächenbehandlung beschreibt die Untersuchung der Charaktereigenschaften von Flächen – insbesondere der Krümmung einer Fläche. Flächenkrümmungen lassen sich klassisch in drei übergeordnete Kategorien einteilen: (1) *planar*, (2) *einfach-* bzw. (3) *zweifachgekrümmt*. Sobald eine Krümmung besteht, kann diese sowohl positiv (*konvex*) als auch negativ (*konkav*) sein. Im Fall einer Krümmung in verschiedene Richtungen, können diese *synklastisch* (Krümmungsradien auf der gleichen Seite der Fläche) oder *antiklastisch* (Krümmungsradien auf gegenüberliegenden Flächen) angeordnet sein. Die Komplexität von Flächen steigt nachdrücklich sobald Krümmungsradien nicht konstant bleiben. (Wirth 2007) Radien können neben Richtungswechseln auch kontinuierlich ihre Größe verändern – es wird von einer Krümmungsbeschleunigung gesprochen. Krümmungsstetigkeit ist ein wichtiges Kriterium für die Qualitätsaussage von Flächen und gerade für hochqualitative Exterieur- aber auch Interieur-Oberflächen von Fahrzeugen von großer Wichtigkeit. Für die Visualisierung von Krümmungen existieren in den gängigen Softwarepaketen für digitale 3D-Modellierung umfangreiche Analysewerkzeuge wie beispielsweise das gaußsche Krümmungsmaß, die mittlere Krümmungsanalyse oder die Zebra-Streifenanalyse.

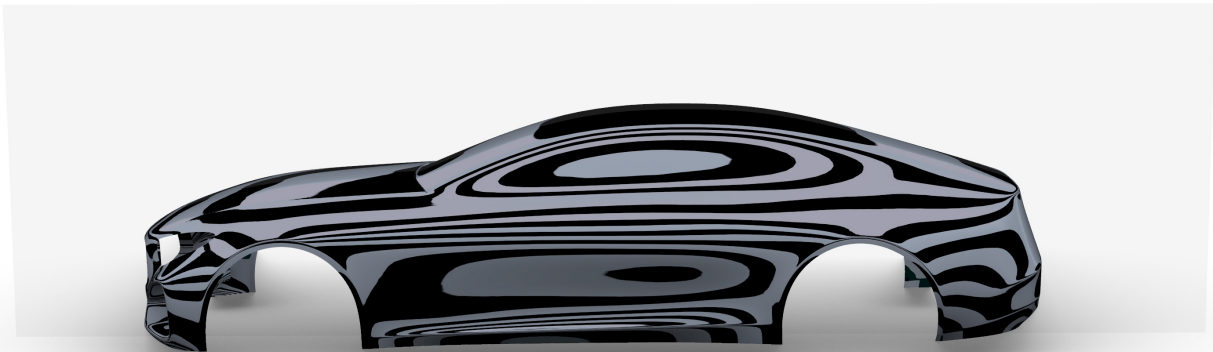


Abb. 5: Zebra-Streifenanalyse zur Krümmungsuntersuchung einer Binnenfläche an einer exemplarischen Fahrzeugaußenhaut

Neben den Attributen einer einzelnen Fläche sind Flächenverbünde und deren Eigenschaften von gestalterischem Interesse. Insbesondere Flächenübergänge haben einen bestimmenden Einfluss auf die Wirkung einer Form. Flächenübergänge lassen sich durch ihre Kontinuität beschreiben und in drei wichtigen Kategorien einteilen: (1) *positionale*, (2) *tangentiale* und (3) *krümmungsstetige* Kontinuität. Hierbei können nach Holland (Holland 2009) diese unterschiedlichen (syntaktischen) Flächenübergänge unterschiedliche (semantische) Bedeutungen hervorrufen, die instrumentell zur Erzeugung unterschiedlicher Formensprachen eingesetzt werden können:

1. *Positionale Kontinuität (C0 oder G0)*: Bezeichnet die Verschneidung von zwei Flächen. Die resultierenden scharfkantigen Formen werden oftmals eingesetzt, um formale Präzision und Genauigkeit zu erzielen.
2. *Tangentiale Kontinuität (C1 oder G1)*: Tangentiale Kontinuitäten werden meist durch die Applikation von definierten, konstanten Radienverblendungen erzeugt, die vor allem in technischen Konstruktionen und Produkten gängig sind. Somit erzeugen Flächen-

übergänge dieser Art eine technische Anmutung, die vor allem Nützlichkeit, Funktion, Praktikabilität etc. suggeriert. (ebd.)

3. *Krümmungsstetige Kontinuität (C2 oder G2)*: Formen mit hohem Maß an krümmungsstetiger Kontinuität werden häufig als organische Flächen bezeichnet. Bei krümmungsstetigen Flächenverbänden ist keine visuell wahrnehmbare Trennung zwischen zwei oder mehreren Flächen auszumachen. Diesen Flächenübergängen werden (natürlich in Zusammenspiel mit anderen gestalterischen Eigenschaften wie beispielsweise der Proportion einer Form) ein besonders hohes Maß an Eleganz und Attraktivität zugesagt. (ebd.)

Neben der Krümmung besitzen gestaltete Flächen weitere Attribute, die das Erscheinungsbild einer Gestalt beeinflussen. So beeinflussen beispielsweise Farbe, Tonwert, oder Glanzgrad die wahrgenommene Größe und Erscheinungsqualität. Darüber hinaus beschreiben Oberflächenstrukturen Formelemente, die entlang einer Fläche angeordnet sind und somit auf die jeweilige Trägerfläche eingehen müssen.

5.4.3 Kurvenanalyse

Des Weiteren soll die Einteilung in Kurvenelemente beschrieben werden, die entweder als applizierte Gestaltelemente auftauchen oder häufig aus Verschneidungen von Flächen (siehe *Positionale Kontinuität*) resultieren. Wie bereits im vorherigen Abschnitt der Flächenanalyse erwähnt, sind Kurven und Flächen untrennbar miteinander verbunden. Kurven bilden oder begrenzen den Rand von Flächen bzw. Binnenelemente in Flächen und werden eingesetzt, um die Krümmung einer Fläche (meist innerhalb einer Ebene) zu beschreiben. Die Krümmung um die Hochachse eines Fahrzeugs wird beispielsweise als *Zug* bezeichnet, während die Krümmung um die Längsachse *Fallung* genannt wird. (Wirth 2007) Auch Kurvenkrümmungen und die Übergänge zwischen Kurven beschreiben ähnlich wie bei Flächen den resultierenden Charakter einer Form. Bei einer Kurve spielt im Automobilbereich vor allem die Beschleunigung eine Rolle, die Progression, in der die Krümmung zunimmt. Hierbei wird der Bereich vor einem Wendepunkt einer Kurve als *Anlauf* und der Bereich danach als *Auslauf* bezeichnet.

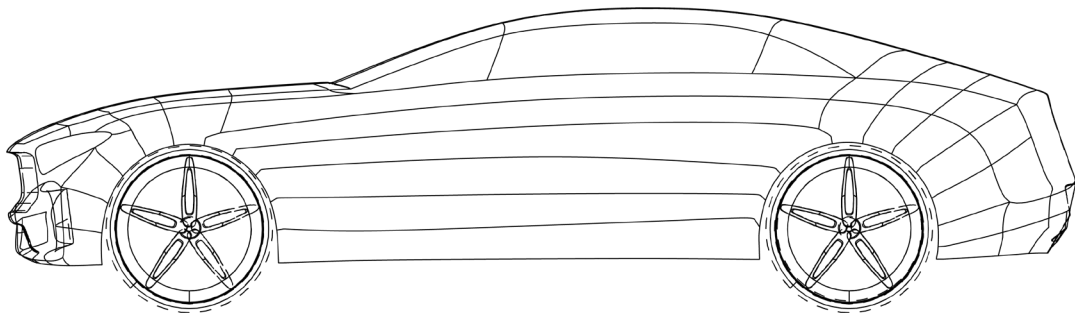


Abb. 6: Durch die reduzierte Kurvendarstellung einer Fahrzeugform kann der Charakter einzelner Kurven sowie die Gesamtkomposition aller Kurven beurteilt werden.

5.4.3 Details als hierarchische Gestaltungsebenen

In der automobilen Fachsprache wird zudem von Details als weiterem Gestaltungsbestandteil gesprochen. Mit Details wird die Menge kleinteiliger Formelemente bezeichnet, die sich in ihrer Größe von der Objektform unterscheiden. In dieser maßstäblich orientierten Unterteilung einer Gestalt in Elemente sollen Details als hierarchische Ebenen eines Designs eingeordnet werden. Sie beschreiben somit Formelemente innerhalb einer anderen Maßstabsebene und können in lokaler bzw. regionaler Ebene gleichen Gestaltungsprinzipien wie der globalen Ebene des Gesamtfahrzeugs unterliegen oder bewusst mit dieser brechen. Details unterliegen keiner geometrischen Limitierung und können daher sowohl als Körper, Flächen oder Kurven repräsentiert sein.

6

Konzeptionelles Rahmenwerk von Gestaltgenerierung

„das effektive ziel des systems generativer ästhetik besteht darin, die charakteristiken ästhetischer strukturen, die in einer menge materialer elemente realisierbar sind, numerisch und operationell so zu beschreiben, dass sie als abstraktes schemata eines ‚prinzips gestaltung‘, eines prinzip verteilung‘ und eines prinzips menge‘ gelten können und manipulierbar einer materialen, ungegliederten (,verdampften‘) menge von elementen ausgedrückt werden können, um gemäß diesen ‚prinzipien‘ das hervorzurufen, was wir als ‚ordnungen‘ und ‚komplexität‘ makroästhetisch und als ‚redundanzen‘ und ‚informationen‘ mikroästhetisch am kunstwerk wahrnehmen.“

(Bense 2004)

Während die folgenden Fallstudien einige praktische Anwendungen von Algorithmik und assoziativer Geometrie aufzeigen, sollen an dieser Stelle einleitend unterschiedliche syntaktische Bestandteile virtueller Formerzeugung und Formveränderung auf prinzipieller Ebene diskutiert und in Form eines konzeptionellen Gerüsts zusammengefügt werden. Dieses Gerüst soll als Rahmenwerk zur Einordnung der Fallstudien sowie als generelle Beschreibung eines Gestaltungsystems dienen.

“Physikalische wie Designobjekte fallen unter den Oberbegriff der Strukturen, sie bilden Anordnungen von Elementen, zwischen denen Beziehungen bestehen.”
(Küster 2010, 175)

Die Zerlegung virtueller Modelle in grundsätzliche Bestandteile soll zur Visualisierung und Strukturierung der Komplexität einer Gestaltung dienen. Eine automobiler Gestalt wird zwar in den meisten Fällen hauptsächlich als Einheit wahrgenommen, kann jedoch sowohl im Entstehungsprozess als auch in der intensiveren Auseinandersetzung in unterschiedliche Form-, Gestaltelemente und -entscheidungen eingeteilt werden. Dies bezieht sich nicht ausschließlich auf die Gestaltung unterschiedlicher Anbauteile wie Felgen, Lufteinlässe oder Scheinwerfer, sondern kann selbst auf skulpturale Formelemente wie die Fahrzeugaußenhaut angewendet werden, welche als visuelle Einheit wahrgenommen werden.

“The trick is to segment shapes into lowest-level constituents - these are the symbols or units that are necessary for syntax - and to combine these constituents using rules in the same way that angle brackets are combined to define strings.”

(Stiny 2008, 21)

Hinter diesem Konzept soll ein systemtheoretischer Ansatz zur Gestaltung stehen, der eine komplexe Gestalt aus Bestandteilen geringerer Komplexität sukzessiv erarbeitet. Voraussetzung hierzu ist, dass die Elemente in Form von Daten, d.h. Information, beschrieben werden. Diese informationsbasierten Elemente können im nächsten Schritt reorganisiert und manipuliert werden, sodass eine Gestaltung mit definierter Variabilität entsteht.

Somit soll hier in Bezug auf Transportationdesign ein Gestaltungsansatz verfolgt werden, in dem ein Fahrzeugdesign nicht als reines Individuum gestaltet wird, sondern vielmehr als ein System, eine Struktur oder Komposition, welches bzw. welche aus unterschiedlichen Bestandteilen zusammengesetzt sind. Hierzu soll in diesem Kapitel ein Rahmenwerk skizziert werden, das darauf zielt Bestandteile von Computational Design zu identifizieren und zu kategorisieren. Die Basis des Rahmenwerks bildet ein algorithmisches bzw. assoziatives Metamodell. Dieses Modell kann ebenfalls gestalterisch als Komposition betrachtet werden und setzt sich wiederum aus drei internen Bestandteilgruppen zusammen: (1) *Ordnungssysteme*, (2) *Formelemente* und (3) *Umformungen*.

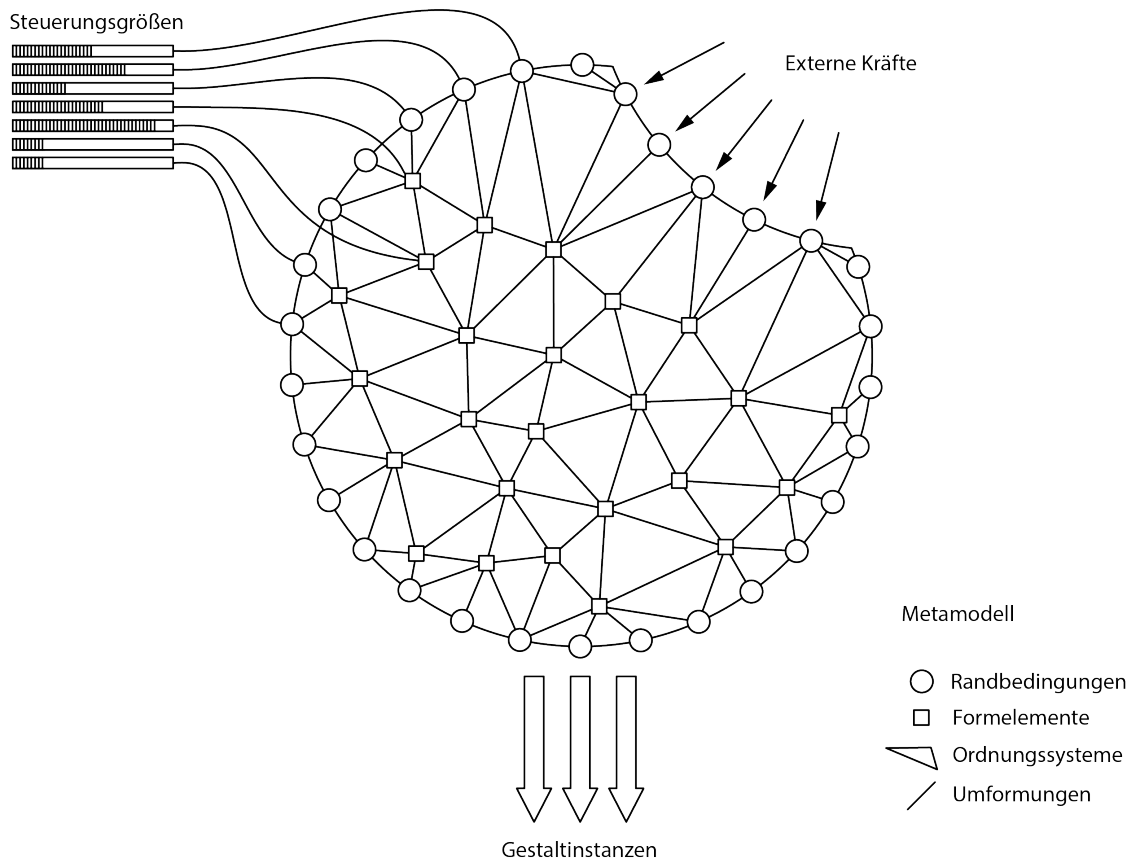


Abb. 7: Schematisches Diagramm eines Metamodells mit seinen inhärenten Bestandteilen: Formelemente, Ordnungssysteme und Umformungen sowie den angrenzenden Faktoren wie Randbedingungen, externe Kräfte und die durch den Nutzer kontrollierbaren Steuerungsgrößen.

Ein Metamodell steht außerdem in den meisten Fällen in Interaktion mit externen Größen und Bedingungen. Externe Einflüsse können dabei in weitere Gruppen zusammengefasst werden: (4) *Randbedingungen* einer Gestaltung und (5) wirkende *äußere Kräfte*. Als externe Einflüsse sollen zudem ebenfalls (6) *Kontroll- und Steuermechanismen* durch den Gestalter oder

Benutzer gelten. Durch die Definition aller Parameter eines Meta-modells entsteht ein gestaltetes Objekt als Instanz des Systems. Die gezeigten methodischen Kategorien sind an dieser Stelle als Werkzeugbausteine zu verstehen, welche kombiniert, strukturiert und ergebnisoffen angewandt werden können und sollten. In den folgenden Kapiteln werden Algorithmen im obigen Rahmenwerk eingeordnet, um ihre Potentiale aufzuzeigen. Eine exakte Einordnung ist in vielen Fällen von der Anwendung des Algorithmus abhängig. Einige Algorithmen lassen sich daher in unterschiedlichen Kategorien einordnen. Es handelt es sich hier folglich nicht um eine strikt mathematische, sondern vielmehr um eine anwendungsorientierte Kategorisierung.

6.1 Metamodell als variable Komposition

Das Fundament des Rahmenwerks bildet das *Metamodell*. Im Metamodell werden Formbestandteile wie Geometrieelemente, Ordnungselemente und Transformationselemente zu einem Ganzen zusammengefügt, sowie Regeln über den Einfluss von externen Einflüssen und Steuerungsmethoden festgelegt. Im Metamodell werden Entscheidungen darüber getroffen, wie sich eine Gestalt in systemischer Weise zusammensetzt und in welcher Art und in welchem Umfang dieses Gestaltssystem Variabilität aufweist. Das Metamodell ist durch seine definierbare Variabilität in seiner Form wandelbar und daher als solches nicht sichtbar, sondern kann lediglich durch einzelne resultierende Ergebnisinstanzen (Ergebnisgestalten) dargestellt werden. Während die einzelnen Bausteine des Metamodells jeweils frei von gestalterischen Intensionen sind, können im Metamodell gestalterische Inhalte und Absichten durch Prinzipien und Gesetzmäßigkeiten verwirklicht werden. Es handelt sich hier um eine höhere (Meta-) Ebene der Gestaltung, in der neben der Zusammensetzung syntaktischer Formbausteine auch funktionale und semantische Aspekte, gleichzeitig Inhalte und Voraussetzungen definiert, hierarchisch strukturiert und gewichtet angewandt werden. Somit ist ein Metamodell Kandinskys Definition einer Komposition sehr ähnlich; unterscheidet sich jedoch durch seine systeminhärente Variabilität:

*„Die Komposition ist
die innerlich-zweckmäßige Unterordnung
1. der Einzelemente und
2. des Aufbaues (Konstruktion)
unter das konkrete malerische Ziel.“
(Kandinsky 1926, 31)*

Metamodelle können weiterführend modulare und rekursive Eigenschaften besitzen und daher eingesetzt werden, um Objekte bzw. Objektelemente in Form lokaler Details bis hin zu holistischen, globalen Gestaltsystemen zu erzeugen. Somit können erzeugte Metamodelle als neuartige Geometrie-, Ordnungs- oder Transformationselemente definiert und als zukünftige Bauelemente weiterverwendet werden. Sogar Rekursivität ist in Metamodellen einsetzbar, in dem sich ein Modell selbst referenziert. Auf diese Weise lassen sich Prinzipien der Selbstähnlichkeit, zum Beispiel fraktale Strukturen, erzeugen. Dabei muss sich die Komplexität eines Metamodells nicht zwingend in der visuellen Erscheinung des finalen Resultats widerspiegeln, es kann in seiner Variabilität und Adaptivität implementiert sein.

6.2 Ästhetischer Raum und theoretischer Morphospace

Ein gestalterischer Prozess wird meist als non-linearer Prozess des Erzeugens, Veränderens und des Abwägens von Alternativen und Varianten beschrieben. Varianten und Alternativen können als (1) Momentaufnahme oder Version eines sich verändernden Objekts angesehen werden, aber auch als (2) Ergebnis eines gänzlich neuen Entstehungsprozesses resultieren und in ihrer Ausarbeitung von abstrakten gedanklichen bis hin zu detaillierten materialisierten Modellalternativen reichen. Oftmals wird der Begriff der Variante für lediglich leicht modifizierte, aber in entscheidenden Charakteristiken identische Objekte verwendet, während der Begriff einer Alternative vorwiegend Objekte mit grundlegenden Unterschieden bezeichnet. Eine Alternative suggeriert zudem einen Entscheidungsprozess zwischen den Alternativen, während Varianten zusammen eine Serie oder Kollektion bilden können.

*„Malt ein Künstler z. B. eine Serie von Bildern,
die zu einer Klasse gehören,
so sagt das Verhältnis der Anzahl
der realisierten zu der der möglichen Bilder
etwas darüber aus,
zu welchem Grade der Künstler
den gewählten ästhetischen Raum erforscht hat“
(Nake 1974, 104)*

In dem vorherigen Zitat beschreibt Frieder Nake auf anschauliche Weise eine Serie als definierte Varianten innerhalb einer Klasse von zu erzeugenden Objekten. Den theoretisch existenten Möglichkeitsraum all dieser Varianten bezeichnet Nake hier als „*ästhetischen Raum*“. (ebd.)

Ein ähnliches Konzept wird in der Biologie zur geometrischen Beschreibung und Systematisierung phänotypischer Organismen verwendet. Zur Analyse der Vielfalt von Morphologien werden phänotypische Individuen nach ähnlichen Charakteristiken geordnet und in einem mehrdimensionalen Koordinatensystem abgebildet. (Raup 1962; Eble 1999; Mitteroecker/Huttegger 2009) Als Ergebnis entsteht das Konzept eines *theoretischen, morphologischen Raums* (engl. „*theoretical morphospace*“) (McGhee 2006), in dem nicht nur alle Individuen systematisch organisiert sind, sondern sich ebenfalls weitere theoretische, (noch) nicht existente Organismen in den Zwischenräumen dieses Raumes beschreiben lassen.

Diese analytische Methode besitzt generative Eigenschaften, welche ebenfalls Potential für gestaltschaffende Professionen wie Design, Architektur oder das Ingenieurwesen hat. Sie bietet eine Methode zur Berechnung und visuellen Darstellung möglicher Varianten innerhalb definierter Eigenschaften. Dies ist vor allem dann interessant, wenn beispielsweise durch technische Vorgaben und Einschränkung wie etwa maschinenspezifische Herstellungsparameter (Menges 2012) nur ein eingeschränkter Bereich des theoretisch möglichen Raums realisierbar ist. Allgemeiner formuliert, kann dieses theoretische Gedankengerüst den Zusammenhang zwischen Individuum und System innerhalb einer Gestaltung verdeutlichen. Das Konzept des Möglichkeitsraumes hilft den Prozess der Gestaltfindung zu beschreiben: Angenommen in einem theoretisch n-dimensionalen

Raum können alle notwendigen gestalterzeugenden Parameter jeglicher Gestalt abgebildet werden. Durch das Treffen von Entscheidungen im Gestaltungsprozess werden Gestaltmöglichkeiten ausgeschlossen und somit das dimensionale Spektrum eines theoretischen Möglichkeitsraums kontinuierlich reduziert. Um eine Gestalt in Form einer Skizze oder eines Modells erzeugen zu können, müssen zumindest temporär alle Parameter definiert werden. Das bedeutet, eine resultierende, volldefinierte Gestalt kann als ein Punkt im theoretischen Möglichkeitsraum beschrieben werden. Die Suche nach möglichen Varianten oder Alternativen bedeutet die Änderung von Parametern in diesem Konstrukt. Der Prozess des Gestaltens, d.h. des Erzeugens und Änderns kann auf diese Weise als eine Bewegung, Suche oder Navigation im Raum der Möglichkeit beschrieben werden.

“Designers select features of the problem space to which they choose to attend (naming) and identify areas of the solution space in which they choose to explore (framing). Schön [...] suggests that: ‘In order to formulate a design problem to be solved, the designer must frame a problematic design situation: set its boundaries, select particular things and relations for attention, and impose on the situation a coherence that guides subsequent moves.’”

(Cross 2007, 102)

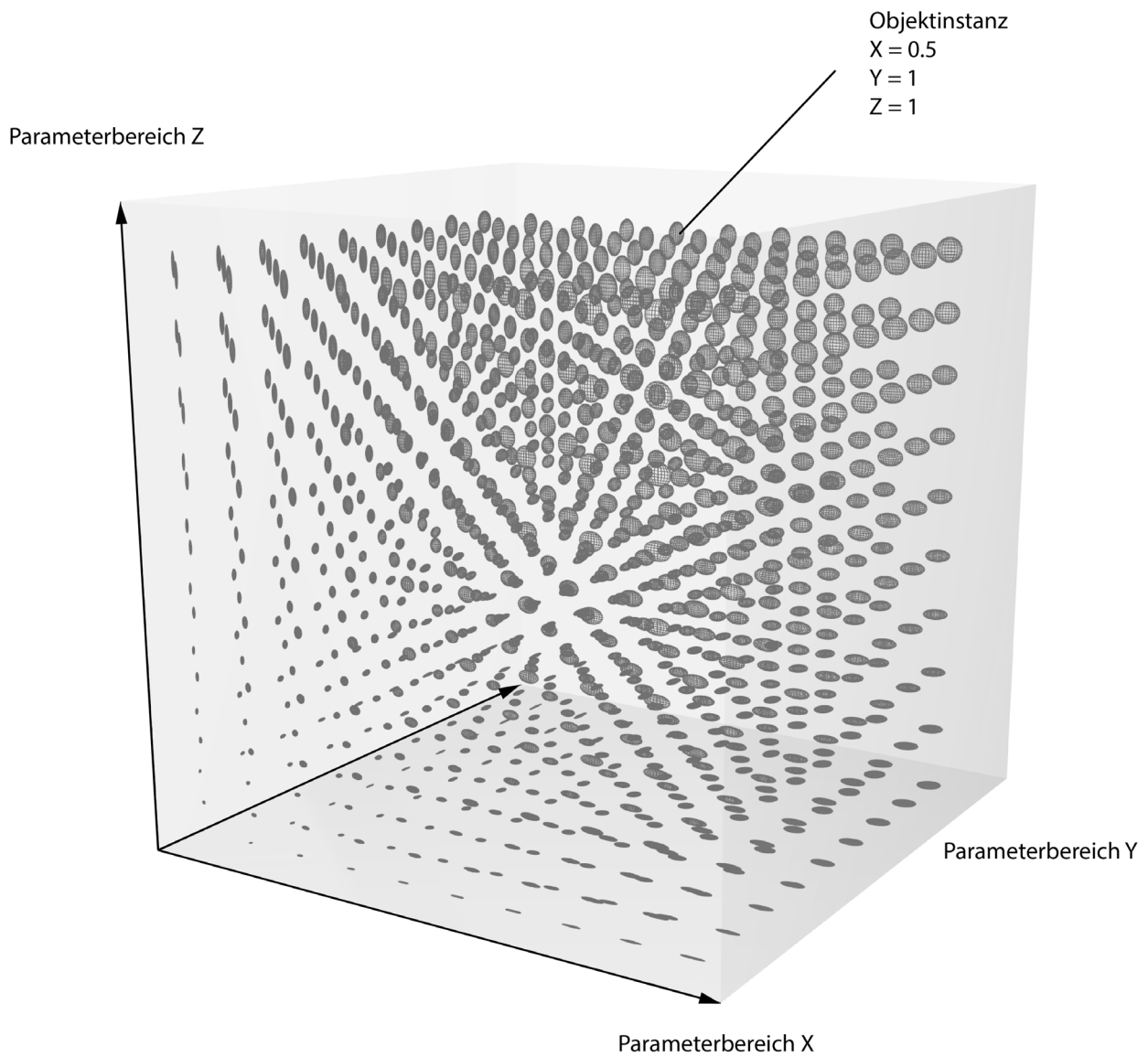


Abb. 8: Schematische Darstellung eines Möglichkeitsraum (ästhetischer Raum). Jede Achse definiert einen Parameterbereich. Jeder Punkt im Raum definiert ein Objekt. Die Anzahl der Parameterbereiche definiert die Dimensionen des Raumes.

6.3 Formelemente

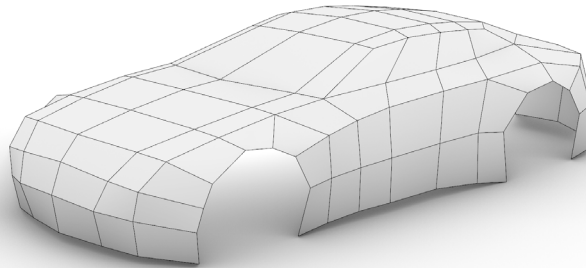
Formelemente definieren in diesem konstruktiven Rahmenmerk die Kategorie von geometrischen Objekten und deren Methoden mit visueller Sichtbarkeit. Sie bilden die visuellen Bestandteile eines Modells oder einer visuellen Sprache. (Wong 1993, 42) Geometrie, griechisch für Erdmessung, wird durch Scriba und Schreiber „als Beschäftigung mit regelmäßigen Mustern, Figuren und Körpern neben dem Zählen eine der ersten Begegnungen von Menschen mit dem Aufbruch der Wissenschaft Mathematik“ beschrieben. (Scriba/Schreiber 2010, v) Alle geometrischen Elemente wie Flächen, Polygone, Kurven oder Linien basieren auf Positionspunkten und somit auf Parametern. Positionsparameter sind algorithmisch manipulierbare Information und verdeutlichen die Wichtigkeit von Punkten bei der Erzeugung von Geometrie. Unterschiedliche Geometriearten besitzen zugehörige visuelle Qualitäten und bedingen spezielle Erzeugungsmethoden sowie geometrische Abhängigkeiten. Das Arbeiten mit Flächen- und Kurvenobjekten bedarf daher anderer Logik und Methoden als ein Arbeiten mit Polygonobjekten. Virtuelle, geometrische Objekte bestehen aus Datenstrukturen und benötigen Algorithmen zur Berechnung, Erzeugung und Darstellung. Sie können sowohl generalisierter als auch hochspezialisierte Natur sein. So stellen Geometrielemente beispielsweise auf niedriger Ebene einfache mathematische Grundelemente dar, die mit wenigen Parametern definiert werden und als Teilbestandteile von komplexeren, spezialisierten Geometrie- bzw. Formelementen verwendet werden können. Es lassen sich aber ebenfalls Geometrielemente mit höherer Gestaltungsebene konstruieren, die ein höheres Level an Gestaltungsentscheidungen mit sich führen. In den folgenden

Unterkapiteln sollen Formelemente in Anlehnung an physische Modellierung in harte und weiche Geometrieobjekte unterteilt werden. Genau wie in der physischen Modellierung kann durch die Verwendung harter Geometrieobjekte ein Höchstmaß an Präzision erreicht werden. Der Weg zu ersten Ergebnissen benötigt jedoch stets mehr Arbeitsschritte, höheres handwerkliches Wissen und somit einen erhöhten Zeitaufwand. Dagegen ermöglichen weiche Geometrieobjekte einen schnelleren, intuitiveren Weg zu ersten zufriedenstellenden Ergebnissen; ein hohes Maß an Präzision ist allerdings erheblich schwieriger zu erreichen.

6.3.1 Harte Geometrieobjekte

Harte Geometrieobjekte unterliegen strikten mathematisch geometrischen Definitionen und versprechen für die Modellierung höchste Genauigkeit in der Beschreibung und Manipulation von Formen. Zu harten Geometrieobjekten gehören mathematische Körper, Flächen sowie Kurven. Die Konstruktion mit harten Geometrieelementen unterliegt definierten Regeln und benötigt in vielen Fällen Hilfskonstruktionen. Aus diesem Grund ist für ihre Bearbeitung (handwerkliches) Wissen über Bearbeitungsmethoden notwendig. Harte, körperhafte Geometrieelemente (*solids*) bestehen aus zusammengefügtene Flächenelementen, welche im Zusammenschluss einen geschlossenen Körper bilden. Körperobjekte teilen aus diesem Grund sehr viele Eigenschaften mit Flächenobjekten, besitzen jedoch als geschlossenes Volumen zusätzliche Eigenschaften und Funktionen. Ihre Bearbeitung ist vorwiegend auf Beschneidungen (*Bool'sche Operationen*)

A



B

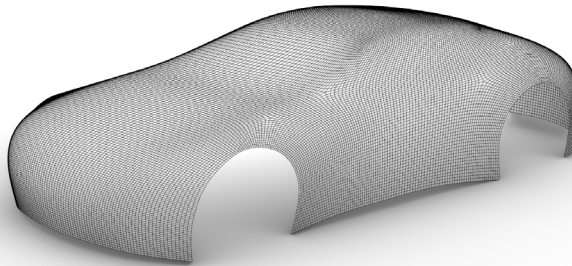


Abb. 9: (A) Low-Polygon-Repräsentation;
(B) High-Polygon-Repräsentation.

und Extrusionsverfahren ausgelegt. Als Körper sind zudem körperspezifische Attributberechnungen, beispielsweise zum Rauminhalt, möglich. Auch Flächen und Kurven sind sich in ihrem Wesen, ihrer Bedienung und mathematischen Definition sehr ähnlich. Für die Beschreibung und Darstellung von Flächen benötigt der Computer algorithmische Berechnungsmethoden. Dabei wird sowohl eine Methode zur Berechnung als auch zur Darstellung von Kurven benötigt. Parametrische Flächen werden mit Hilfe von zwei Parametern (u , v) und drei Gleichungen definiert, d.h. jeweils eine Gleichung für die X-, Y-, Z-Koordinaten eines Punktes auf der Fläche. (Blinn 1982)

$$x(u, v) = F(u, v)$$

$$y(u, v) = F(u, v)$$

$$z(u, v) = F(u, v)$$

Definiert werden diese geometrischen Elemente durch die Positionierung von Punkten. So lassen sich durch eine Kollektion von Punkten Formelemente wie Flächen definieren. Ist eine Fläche definiert, kann jeder Punkt durch Parameter angesteuert werden. Flächengleichungen besitzen im Vergleich zu Kurvengleichungen eine weitere Variable, um die weitere Dimension einer Fläche zu definieren. Im Fall parametrischer Kurven ist dies ein Parameter t und im Falle von Flächen sind es die Parameter u und v . Aber auch ein weiterer Parameter, meist w oder n genannt, kann zur Berechnung einer orthogonalen Verschiebung des Punktes zur Fläche berechnet werden. Diese Eigenschaften zeigen, dass solche parametrischen Flächen mathematisch exakt sowie in skalierbarer Genauigkeit und Qualität beschreibbar sind. Zur Darstellung der Flächen wird meist ein zusätzliches Polygonmodell berechnet, da dieses eine schnelle Darstellung von Geometrie, insbesondere zur Berechnung von Schattierungen, ermöglicht. Der Prozess der Modellierung mit Flächen benötigt eine hohe Anzahl an spezialisierten Manipulationsmethoden. Für diese Vielfalt notwendiger Werkzeuge, sowie das zum Erzeugen von hochqualitativen Ergebnissen notwendige systematische und topologisch limitierende Vorgehen, benötigt ein Modelleur fundierte und praktische Erfahrung, um effizient arbeiten zu können. Ein großer Vorteil von Flächengeometrie im direkten Vergleich zu polygonbasierter Geometrie ist wiederum die Möglichkeiten mathematisch exakte Beschneidungen von Flächen zu realisieren. Auf diese Weise können additive Details passgenau in Objekte eingefügt werden, ohne dass sich die

Ursprungsgeometrie ändert. Technische Anforderungen, wie beispielsweise definierte Radien und Entformungsschrägen, lassen sich präzise mithilfe von harten Geometrieelementen erzeugen bzw. herauslesen. Die Modellierung automobiler Körper mit Hilfe von Flächengeometrie ist bis heute in der Industrie aufgrund der Qualität der resultierenden Ergebnisse weit verbreitet. So kann mittels Flächenmodellierung die Geometrie eines Fahrzeugs besonders exakt manipuliert werden. Die Qualität der automobilen Flächen kann durch präzise verlaufende Glanzlichter wahrgenommen und überprüft werden. Für Computational Design bietet zusammenfassend die Verwendung harter Geometrieobjekte Vorteile, wenn das zu erzielende Ergebnis eine hohe Präzision besitzen muss oder zur Konstruktion spezifische mathematische Operationen wie Verschneidungen vorausgesetzt sind.

6.3.2 Weiche Geometrieobjekte

Weiche Geometrieobjekte besitzen wie physikalisch weiche Materialien die Eigenschaft leicht verformbar zu sein. Zu weichen Geometrieobjekten gehören beispielsweise jegliche Arten von Polyedernetzmodellen. Mit ihnen lassen sich bevorzugt organische Formen erzeugen und darstellen. Technische Präzision ist jedoch nur äußerst schwer zu erzielen. Technische Details wie klar definierte Kanten, Radien oder Entformungsschrägen lassen sich nicht mathematisch exakt, sondern lediglich durch Annäherungen indirekt definieren. In der klassischen Polygonmodellierung werden polygonale Hüllen aus mehreckigen Polygonen erzeugt. Der Prozess der klassischen Polygonmodellierung

besteht stets aus zwei Repräsentationsmodellen. Modelliert, d.h. die Erzeugung geometrischer Veränderungen, wird dabei in einer Repräsentation mit niedriger Anzahl an Leitpolygonen (*Low-Polygon-Modell*), während das finale Ergebnis durch weitere Glättungsalgorithmen meist in einer hochauflösenden Form (*High-Polygon-Modell*) verwendet wird.

Die niedrigauflösende Konstruktionsdarstellung dieses Verfahrens ist darauf ausgelegt ein Modell durch möglichst wenige Polygone zu beschreiben, um auf der einen Seite die Kontrolle des Modells einfach zu halten und auf der anderen Seite Genauigkeitsfehler zu vermeiden. Diese facettierte Objektrepräsentation wird anschließend durch applizierte Glättungsalgorithmen abgerundet und in hochauflösende Modelle mit höherer Polygonanzahl transformiert. Modellierung auf der Ebene von hochauflösenden Polygonen bedeutet eine sehr große Menge an Polygonen zu bearbeiten. Dies ist in der Praxis außerordentlich aufwendig und daher impraktikabel. Insbesondere durch die Einführung der Low-Polygon-Modellierungsebene erzeugen erfahrene Polygon-Modelleure automobile Körper in beeindruckend kurzer Zeit. Im direkten Vergleich zur Flächenmodellierung werden in der Polygonmodellierung lediglich sehr wenige digitale Werkzeuge bzw. Funktionen eingesetzt, um effektiv arbeiten zu können. Es werden primär Eckpunkte von Polygonen verschoben oder Polygonelemente hinzugefügt, entfernt oder geteilt. Auf die Verwendung von komplexen Transformationsmethoden kann in den meisten Fällen verzichtet werden. Auf Grund der Glättungsalgorithmen von Polygonmodellen bietet sich dieses Verfahren besonders zur Erzeugung von organischen Formen an. Denn sie versprechen ein weitestgehend harmonisches, weiches Gesamtergebnis. Gleichzeitig erschweren sie jedoch die Einarbeitung präziser, technischer

Anforderungen wie Entformungsschrägen oder exakte Radien in ein Modell. In Computational Design Prozessen sind Polygonmodelle sehr beliebt, da sie ein effizientes Visualisierungsmittel für Formen darstellen. Einige Präzisionsmängel von Polygonmodellen lassen sich durch regelbasierte Generierungsprozesse und geometrische Hilfskonstruktionen überwinden. Durch solch algorithmische Regeln können auch hochauflösende Polygonmodelle bearbeitet werden. Für eine schattierte Darstellung von Polyedergeometrie muss nicht zwingend ein weiteres Darstellungsmodell erzeugt werden, es kann direkt das berechnete Low-Polygon- bzw. High-Polygon-Modell verwendet werden. Aus diesem Grund ist die Darstellung und somit auch die Bearbeitung von Polygonmodellen gegenüber Flächenmodellen erheblich performanter. Hoch komplexe Formen können flüssig dargestellt und manipuliert werden. Eine im Automobilbereich bis zu diesem Zeitpunkt weitgehend unberücksichtigte Methode zur Formerzeugung bilden implizite Geometrieobjekte. Durch mathematische Formeln lassen sich virtuelle Felder erzeugen, die gezielt für Gestaltungsaufgaben angepasst werden können. Die wohl bekannteste Methode zur Erzeugung von impliziten Flächen stellt der *Metaball*-Algorithmus dar, der ursprünglich von Blinn zur Visualisierung komplexer Molekülkonfigurationen entwickelt worden ist. Implizite Flächen beschreiben den Bereich eines Raums, an welchem alle Punkte eine Gleichung erfüllen.

$$F(x,y,z) = 0$$

Während zur Generierung von parametrischen Flächen direkt Punkte auf einer Fläche berechnet werden können, kann bei implizit definierten Flächen lediglich Auskunft darüber gegeben werden, ob sich ein Punkt innerhalb, außerhalb oder

exakt auf dieser Fläche befindet. Eine bekannte und weitverbreitete Methode zur Visualisierung von impliziten Flächen ist der *Marching Cubes*-Algorithmus, der erstmalig 1987 von Lorensen und Cline (Lorensen/Cline 1987) publiziert worden ist. Für die Verwendung eines *Marching Cubes*-Algorithmus wird ein kartesisches Koordinatensystem in dreidimensionale, raumfüllende Würfel (*Cubes*) aufgeteilt. Diese *Cubes* fungieren wie dreidimensionale, volumetrische Pixel (*Voxel*). Für jeden *Voxel*-Eckpunkt wird durch die implizite Flächengleichung ein Positionszustand berechnet, d.h. es wird ermittelt, ob dieser Punkt innerhalb, außerhalb oder exakt auf der Fläche liegt. So entsteht ein Feld das einen dreidimensionalen Körper abbilden kann. Um die Randsituation dieses Körpers durch Polygone möglichst effizient darstellen zu können, nutzt der *Marching Cubes*-Algorithmus einen sogenannten *Look-Up Table*. In diesem *Look-Up Table* sind alle möglichen 256 Randsituationen, d.h. *Voxel* mit zusätzlicher Polygoninformation, deren Eckpunkte entweder mindestens einen Punkt innerhalb und außerhalb des Körpers haben, abgespeichert. Der *Marching Cubes*-Algorithmus marschiert durch alle *Cubes* bzw. *Voxels* und fügt über den *Look-up Table* jeweils an den Randsituationen Polygoninformationen ein, sodass ein geschlossener Körper entstehen kann. Alternativ zur *Marching Cubes*-Methode kann ebenfalls eine partikelbasierte Visualisierungsmethode verwendet werden. (Witkin/Heckbert 1994)

6.4 Ordnungssysteme

Für gestalterisches Arbeiten mit einer Vielzahl von Objekten ist die Steuerung ihrer Eigenschaften und Beziehungen durch ein Ordnungssystem vorteilhaft. Ordnungssysteme beschreiben die topologische Logik von der Organisation und den Verhältnissen zwischen Objekten und Objektelementen. „*Topologie (von griech. τόπος Ort, Lage, Stelle und λόγος Lehre; engl. topology; frz. topologie) heißt heute eine Grunddisziplin der Mathematik, die räumliche Verhältnisse und verallgemeinerte Räume unabhängig von metrischen Eigenschaften wie z. B. Winkel- und Streckenmessungen untersucht.*“ (Mainzer 2007) Diese Beziehungselemente (Wong 1993, 43) beschreiben zudem Platzierungs- und Wechselbeziehungen von Formen. Ordnungssysteme bilden die Basis für Muster oder Strukturen, die aus einer Menge von angeordneten Formelementen bestehen. Topologien sind logische Konstrukte, die selbst nicht sichtbar sind, sondern erst durch geometrische Elemente wie Pixelpunkte oder Linien visualisiert werden müssen. Darüber hinaus sind viele Ordnungssysteme in ihrer Logik starre bzw. harte Strukturen, die klar vordefinierte Datenstrukturen benötigen. Max Bense beschreibt diese als „*gebundene (im Voraus festgelegte, deduzierte) ästhetische Strukturen*“ und unterscheidet diese grundsätzlich von „*freien (stochastischen, intuitiven) ästhetischen Strukturen*“. (Bense 2004) Dynamische bzw. applizierte Ordnungssysteme („*Soft Grids*“) (Kardasis 2011) können sich an wechselnde Anzahl, Positionierung und Nachbarschaftsverhältnisse anpassen. Eine topologische Ordnung einer Verteilung von Objekten kann meist durch ein geschultes Auge identifiziert und extrahiert werden. In einigen Fällen jedoch können Ordnungssysteme durch die

Verwendung bestimmter Parameter ähnliche bis gleiche Ergebnisse andersartiger Ordnungssysteme erzeugen. Eine Struktur kann daher aus einer anderen Erzeugungslogik entstanden sein, als sie visuell erahnen lässt. Dieses Phänomen kann durch die bereits besprochenen wahrnehmungspsychologischen Gestaltgesetze, insbesondere durch die Gesetze der Nähe und das Gesetz der Gleichheit des Typs, beschrieben werden (siehe 3.2.2 Gestaltgesetze), denn durch Nähe und Gleichheit in Form und/oder Farbe von Objekten kann die Zugehörigkeit von Objekten wahrgenommen und somit ihre Erzeugungslogik erahnt werden.

6.4.1 Punktobjekte

An dieser Stelle soll die Rolle von Punkten als Basis topologischer oder geometrischer Elemente aufgezeigt werden und nachfolgend unterschiedliche Kategorien von Ordnungssystemen benannt werden. Der Punkt ist der kleinste und daher wichtigste Baustein visueller, geometrischer Algorithmen. Mathematisch ist ein Punkt lediglich als eine Liste oder ein Container für drei Positionswerte in X-, Y- und Z-Richtung definiert. Anhand von Punkten lassen sich die dimensional Eigenschaften von Objekten und Objektstrukturen veranschaulichen. In Zeichen- oder Grafikentwicklungsumgebungen, die ausschließlich in der Ebene arbeiten, d.h. im zweidimensionalen Raum, werden lediglich zwei Koordinaten X und Y benötigt, während dreidimensionale Geometrie der zusätzlichen Dimension Z bedarf. Kandinsky definiert den Punkt als die „*kleinste Elementarform*“ und das „*Urelement der Malerei und speziell der Graphik*“. (Kandinsky 1926, 26)

Er erkennt, dass der Punkt keine Dimensionen besitzt und daher als null-dimensionales Objekt beschrieben werden kann. (ebd., 19)

Als null-dimensionales Objekt kann einem Punkt keine visuell erkennbare Gestalt zugeordnet werden, er wird von Kandinsky daher als „*ein unsichtbares Wesen*“ beschrieben. (ebd.) Ein Punkt ist kein visuelles Formelement. Als reines Positionsobjekt benötigt er andere geometrische Objekte höherer Dimensionen um dargestellt zu werden. Diese Darstellungsform kann, wie in Abbildung 10 bereits durch Kandinsky aufgezeigt, in unterschiedlichster geometrischer Gestalt repräsentiert werden.

„Der materialisierte unsichtbare geometrische Punkt muß eine gewisse Größe bekommen, die eine gewisse Fläche der Grundfläche in Anspruch nimmt. Außerdem muß er gewisse Grenzen — Umrisse — haben, die ihn von der Umgebung abtrennen.“

(Kandinsky 1926, 22)



Abb. 10: Beispiele von Punktformen nach Wassily Kandinsky.
Diese Punktformen zeigen, dass nulldimensionale Punktpositionen visuelle Repräsentationen benötigen um sichtbar zu werden. (Kandinsky 1926)

Es kann zusammenfassend abgeleitet werden, dass die Positionsinformation untrennbar mit geometrischen Repräsentationselementen wie Kurven, Flächen oder Polygonnetzen verbunden ist. Zur Visualisierung von Punkten werden geometrische Elemente benötigt, während Punkte das Fundament zur Erzeugung von geometrischen Elementen und Ordnungssystemen bilden. Punkte stellen daher die niedrigste Ebene des algorithmisch geometrischen Arbeitens dar, mit welchen sich hohe gestalterische Flexibilität und Geschwindigkeit erreichen lässt.

6.4.2 Assoziative Konnektoren

Einen wichtigen Bestandteil in der Kategorie der Ordnungselemente bilden assoziative *Konnektoren*, auch *Konnektive* oder *Junktoren* genannt. Sie fungieren als Basis zur Erzeugung assoziativer Modelle, denn sie erlauben durch assoziative Beziehungen Geometrie bzw. Information hierarchisch zu verbinden und somit zu strukturieren. Auf diese Weise können geometrische Größen als Relationen zu anderen inhärenten Größen definiert werden. Dies erlaubt die Reduktion von Eingabeinformationen sowie automatisierte Anpassungen. Mit einer Hierarchisierung formaler Beziehungen können unterschiedliche Modellierungsebenen erzeugt werden, um gestalterische Entscheidungen nach Wichtigkeit und Abhängigkeit zu strukturieren und eine präzise Steuerung des Modells zu ermöglichen. Die Kunst des assoziativen Modellierens liegt darin, folgerichtige Beziehungen zu erkennen und zu definieren, sodass durch Parameterveränderungen existente

Beziehungsvorraussetzungen erhalten bleiben. Um fehlerhafte assoziative Konnektoren in einem Metamodell zu vermeiden, müssen daher gelegentlich Ausnahmeregelungen definiert werden. Assoziative Konnektoren stellen deshalb die niedrigste Form von topologischer Strukturierung und somit die niedrigsten Ordnungselemente dar.

6.4.3 Verteilungs- und Unterteilungssysteme

Eine Kategorie höherer Topologien beschreibt die Verteilung von Objektmengen in Form von Verteilungssystemen und die Unterteilung von Objekten in Objektbestandteile.

Verteilungsmuster sind Regelsysteme zur Definition von Abständen bzw. Nachbarschaftsverhältnissen von Positionspunkten. Sie beinhalten eine Menge von assoziativen Beziehungen und können auf diese Weise sukzessiv konstruiert werden. Verteilungstopologien dienen ebenfalls als Basis für weitere geometrische Objekte höherer Ebene, denn sie bilden die Logik um eine Menge von Punktinformationen zu organisieren. Je nach Verwendung von unterschiedlichen geometrischen Formelementen werden hierzu Datenstrukturen für das Management der Elementeverteilung benötigt.

Unterteilungsmethoden sind den Verteilungsmethoden in ihrem Resultat sehr ähnlich, jedoch in der Logik des Entstehungsprozesses unterschiedlich. Die Ähnlichkeit beider Kategorien lässt sich anschaulich anhand von Rastersystemen aufzeigen. Beispielsweise kann ein Raster entweder als Unterteilung einer Fläche, als divisional oder durch eine strukturierte Aneinander-

reihung von Elementen, als additiv beschrieben bzw. erzeugt werden. Auf diese Weise können identische Ergebnisse durch unterschiedliche Methoden produziert werden. Meist werden Unterteilungslogiken entweder durch Linien bzw. kurvenbasierte Formelemente oder durch flächige Elemente (Kacheln) visualisiert, während zur Visualisierung von Verteilungslogiken meist Punkt-Visualisierungsobjekte verwendet werden.

*„Wenn eine Fläche formal geteilt werden soll,
bestehen dafür unbegrenzt viele Möglichkeiten.“
(Itten 2003, 63)*

In vielen Anwendungsfällen müssen Flächen ohne Reststücke aufgeteilt werden. „[...] Formen, die eine Fläche restlos teilen können, sind das Rechteck, der Rhombus, das Dreieck und das regelmäßige Sechseck.“ (ebd.) Hier beschreibt Itten vier wichtige unterschiedliche Rastersysteme, die als Ergebnis Unterteilungsformen entweder eines Rechtecks (Quadrat), eines Rhombus, eines Dreiecks oder eines Sechsecks erlauben. Rastersysteme ermöglichen Elemente in regelmäßigem Abstand in einer Fläche oder einem Volumen anzuordnen oder zu unterteilen und bilden daher die wohl am häufigsten eingesetzte und bekannteste topologische Logikstruktur zur Verteilung bzw. Unterteilung von Elementen. Ähnelt die Topologie eines Rastersystems der zu bestückenden Fläche oder des zu bestückenden Volumens, so lassen sich durch die geometrische Verwandtschaft besonders gleichmäßige Ergebnisse erzeugen und ungleichmäßige Abstände oder Elementbeschneidungen an Eck- oder Randsituationen vermeiden. Als anschauliches Beispiel: Durch rechteckige Raster lassen sich rechteckige Flächen oder Volumina restlos ausfüllen, während sich Dreieckraster eignen um dreieckige globale Elemente lückenlos mit Elementen zu bestücken.

Eine weitere Art der Verteilung von Objekten stellen stochastische Verfahren dar. Stochastische Verfahren sind im Gegensatz zu Rastersystemen nicht an eine Rasterstruktur gebunden und somit nicht auf mathematisch exakte harmonische Verteilung ausgelegt, sondern nutzen Wahrscheinlichkeitsregeln um Punkte zu positionieren oder aus anderen Topologien zu entfernen. Es entstehen gezielte Unregelmäßigkeiten, die gestalterisch eingesetzt werden können.

Baumartige Unterteilungen und rekursive Teilungssysteme stellen zwei weitere Unterteilungsformen dar. Baumartige Systeme besitzen mindestens ein Zentrum, von dem ausgehend sie eine Fläche durch Astverzweigungen unterteilen oder Positionen von Elementen definieren. Rekursive Systeme nutzen Prinzipien der Selbstähnlichkeit und werden für die Generierung von fraktalen Elementen wie *Mandelbrot-* oder *L-Systemen* eingesetzt. Sie können durch rekursive Algorithmen erzeugt werden. Rekursion beschreibt das algorithmische Prinzip, dass Algorithmen sich selbst aufrufen und selbst zur Bearbeitung von Informationsmengen genutzt werden können. Die resultierenden fraktalen Elemente zeichnen sich durch eine unendlich berechenbare Unterteilungs- und somit Detailtiefe aus.

6.4.4 Dynamische Ordnungssysteme

Während Verteilungs- oder Unterteilungsfiler durch ihre Logik überwiegend statische d.h. a priori festgelegte Positionen der Verteilungs- oder Unterteilungselemente vorgeben, verfolgen dynamische Ordnungssysteme die Strategie, die finalen Positionen der Elemente durch einen bestimmbareren Berechnungs-

zeitraum kontinuierlich anzupassen. Diese Methoden mit kontinuierlich iterativen Anpassungen gehören zu der Kategorie der Formfindung. Bekannte Beispiele für dynamische Ordnungssysteme sind partikel-, agenten- und federbasierte Systeme. Ebenso können *Finite-Elemente-Methoden (FEM)*, klassisch zur ingenieurtechnischen Deformationssimulation von Festkörpern eingesetzt, als dynamische Ordnungssysteme bezeichnet werden. Dynamische Systeme sind in ihrer Programmierung und Steuerung meist gänzlich unterschiedlich zu statischen Systemen. Als Beispiel sind Agentensimulationen so programmiert, dass jede Agenteneinheit eigene Entscheidungsregeln besitzt und nach diesen innerhalb einer definierten Umgebung eigene Entscheidungen treffen kann. Dies ist insbesondere dann von Interesse, wenn eine Menge von Agenten mit sich selbst interagiert und auf seine Nachbarn eingeht. Agentensysteme kommen bei Aufgabenstellungen zum Einsatz, in denen aufgrund einer Menge von in Konflikt stehenden Zieleigenschaften Lösungen schwierig zu definieren sind. Es werden daher unterschiedliche Agenten mit definierten Zielen erzeugt. Durch deren Interaktion entsteht als Ergebnis ein Kompromiss aus ihren Einzelentscheidungen. Neben der Definition von Entscheidungsregeln spielt zudem der initiale Startpunkt eine wichtige Rolle, denn dieser kann die Richtung aller Folgeentscheidungen nachhaltig beeinflussen.

6.5 Umformungen

Im Gestaltungsprozess bilden Umformungsmethoden die Werkzeuge zur Manipulation von Gestaltungsobjekten und Daten, d.h. sowohl von Geometrien als auch Topologien. Geometrische Umformungen sind für den Gestaltungsprozess von großer Wichtigkeit, da diese die fundamentalen Mittel der Veränderung von digitaler Form und Anordnung abbilden. Eine Transformation (lat. *transformare* für umformen) bezeichnet den Vorgang der Änderung von Elementattributen und somit den Übergang von Elementen in einen anderen Zustand. Transformationen können daher auch als Umformungsmethoden bezeichnet werden. Algorithmen können demzufolge als datenverarbeitende Maßnahmen und stets als algorithmische Transformationen verstanden werden. Dieses Rahmenwerk konzentriert sich primär auf geometrische Transformationsmethoden. Die folgenden Kategorien bilden wichtige Bausteine zur Entwicklung von Computational Design Strategien, die auf die Veränderung von Objektgeometrie fokussiert sind. Aus den folgenden scheinbar trivialen Transformationsmethoden lassen sich durch Kombination individuelle Deformationen komplexer Art und Weise erzeugen.

6.5.1 Affine, formbewahrende Transformationen

Affine Transformationen sind in der Mathematik dadurch charakterisiert, dass trotz der Transformation die entstehenden Abbildungen in ihrer Form und in ihren Teilverhältnissen unverändert (*homöomorph*) bleiben. (Klette/Rosenfeld 2004, 209) Die Veränderungen von affinen Transformationen werden gleichmäßig auf gesamte Objekte angewendet. Der umgebende Raum bzw. das referenzierte Koordinatensystem und der topologische Aufbau des Objekts bleiben unverändert, sodass sowohl das Objekt als auch das Referenzsystem in ihrer Parallelität und ihren Einteilungsverhältnissen gleichbleibt.

Zu affinen Transformationen gehören klassische Transformationen wie *Translationen*, *Rotationen*, *Skalierung* und *Spiegelungen* sowie die *Scherung*. Aus diesen bekannten Transformationsbausteinen lassen sich sehr komplexe geometrische Transformationen zusammensetzen. In der Translation wird lediglich die Position eines Objekts verändert, was visuell zu einer Verschiebung führt. In der Rotation ändert sich maßgeblich die Orientierung des Objekts. Je nach Drehpunkt der Rotation kann sich aber auch die Position des Objekts verändern. Eine Skalierung beschreibt die Größenveränderung eines Objekts und wird meist lediglich durch eine numerische Variable definiert. Eine Skalierung ist harmonisch, wenn sie gleichmäßig an alle Richtungen ausgeführt wird. In diesem Prozess bleibt die Form im relativen Sinne erhalten.

Für eine Spiegelung wird stets ein Spiegelobjekt benötigt. Im zweidimensionalen Raum (\mathbb{R}^2) ist dies meist eine Linie oder Achse, es können aber ebenfalls Punkte (Punktspiegelung), Kreise (Inversion) oder gar Freiformkurven sein. Im drei-

dimensionalen Raum (\mathbb{R}^3) ist die Verwendung von Spiegelebenen am häufigsten verbreitet, Punktspiegelungen und Spiegelungen durch andere räumliche Objekte wie einer Kugel (3D-Inversion) sind aber ebenfalls möglich. Gerne werden Transformationen kombiniert, so zum Beispiel bei der Gleitspiegelung. Diese ist in \mathbb{R}^2 eine Kombination aus einer Achsenspiegelung und einer Translation.

Die Scherung gehört mathematisch betrachtet zu den affinen Transformationen. Zwar entsteht durch die entgegengesetzte Verschiebung eine sichtbare Verzerrung, da die Seitenverhältnisse jedoch bestehen bleiben, ist diese Methode dennoch eine affine Transformation.

6.5.2 Non-affine, formverändernde Transformationen

Transformationen, bei denen die Form und die Proportionen verändert werden, können als non-affine Transformationen oder auch als Deformationen bezeichnet werden. Non-affine Transformationen sind in ihrer Beschreibung und Umsetzung aufwendiger und besitzen aus diesem Grund besonderes Potential für algorithmisches Gestalten. Für die höhere Komplexität dieser Transformationsarten können individualisierte Transformationsmethoden oder Transformationskombinationen eingesetzt werden. Es ist möglich non-affine Transformation global auf eine Gesamtform oder lediglich lokal auf Bestandteile einer Form anzuwenden. Eine lokale Veränderung der Transformationsstärke oder -art führt bereits zu einer ungleichmäßigen und somit non-affinen Deformation. Sie werden daher insbesondere eingesetzt um Teilbereiche von Formen zu modifizieren.

So gehören Projektionen zu den non-affinen Transformationen. Bei einer Projektion wird beispielsweise eine geometrische Form auf ein anderes Objekt transformiert. Somit können Formen auf Oberflächen anderer Formelemente abgebildet werden. Projektionen stellen einen fundamentalen Bestandteil der grafischen Darstellung von räumlichen Körpern auf zweidimensionalen Darstellungsmedien wie Computerbildschirmen dar. Non-affine Transformationen können durch ungleichmäßig eingesetzte affine Operatoren erzeugt werden.

Eine weitere non-affine Transformationsmethode sind globale Deformationen, auch Free-Form-Deformationen (FFD) genannt. Mithilfe eines applizierten Referenzkoordinatensystems können so Verzerrungen eines Objektes erzeugt werden.

6.5.3 Progressionen, Verläufe und Bewegungen

Differenzierung ist eines der Phänomene, die in der Biologie verbreitet wahrzunehmen ist, jedoch bis heute nur mit erhöhtem technischen Aufwand zu erzeugen ist. (Knippers/Speck 2012) Differenzierung beschreibt die lokale Unterschiedlichkeit von Elementen. Zu diesen gehören Verläufe bzw. Progression (lat. *progressio* für Fortschritt oder Entwicklung), welche stufige oder fließende Übergänge von Objekteigenschaften beschreiben. Verläufe oder Progressionen können als räumliche und/oder zeitliche Abfolge von Transformation bzw. Bewegungen, Morphings oder Blends bezeichnet werden. Solche Übergänge können mithilfe unterschiedlicher Steuerungsmethoden definiert und kontrolliert werden. Für unidirektionale

Übergänge werden häufig mathematische Graphen oder Kurven (*Law-Curves*) eingesetzt. Für komplexere Übergangstrukturen bietet sich die Anwendung von Attraktoren an. Attraktoren sind räumlich platzierte geometrische Objekte, die eine Beziehung zwischen Objekt und Attraktor erlauben. Somit können Objekteigenschaften wie Größe, Ausrichtung oder Position über einen Attraktor als externen Kontrollmechanismus kontrolliert werden. Es wird mithilfe einer mathematischen Gleichung ein Transformationswert berechnet, welcher die Distanz zwischen Objekt und Attraktionsgeometrie berücksichtigt. Häufig werden Punktobjekte als Attraktoren angewandt; es sind jedoch ebenfalls jegliche, andere geometrische Objekte wie Kurven oder Flächen einsetzbar. Insbesondere bei der Nutzung von Attraktorflächen ist es möglich, zusätzlich zu der Distanz ebenso den UV-Parameterraum der Fläche einzubeziehen. Auf diese Weise kann ein progressiver Verlauf geometrisch durch die Attraktorfläche definiert und gesteuert werden. Für andere Attraktorgeometrien bietet sich die Steuerung der Verlaufsart durch die Distanzfunktion an.

Pixelbilder bilden eine weitere Steuerungsmöglichkeit zur Beschreibung von Verläufen. In diesem Fall werden Pixelattribute von Bildern (beispielsweise Helligkeitswerte) geometrischen Parametern von zu transformierenden Objekten zugeordnet. Sie werden meist für zweidimensionale Progressionen eingesetzt, können aber als ein Stapel von Bildern auch einen dreidimensionalen Raum entsprechend ihrer Auflösung präzise beschreiben. Jegliche Eigenschaften von Objekten können durch Progressionen variiert werden. Die bekanntesten Beispiele sind die schrittweise geometrische Eigenschaftenveränderungen Größe (Skalierung) und Ausrichtung. Auf diese Weise kann eine lokal definierte, doch zugleich global steuerbare Differenzierung erzeugt werden, die zu homogenen visuellen Ergebnissen führt.

6.6 Einflüsse

Neben internen Bestandteilen eines Systems existieren sowohl in wissenschaftlichen als auch gestalterischen Modellen externe Einflussgrößen, die auf das Modell und deren Ergebnisse einwirken können. In diesem Rahmenwerk soll zwischen drei externen Arten von Einflussformen, (1) Randbedingungen, (2) äußeren Kräften und (3) Steuerungsmethoden, unterschieden werden.

6.6.1 Randbedingungen

Eine Vielzahl von Gestaltungsaufgaben werden durch Randbedingungen bestimmt. Randbedingungen umfassen alle konstanten und nicht veränderbaren Einflussgrößen einer Gestaltungsaufgabe. Sie sind daher nicht auf geometrisch, syntaktische Bedingungen beschränkt.

Ein Beispiel für eine geometrische Randbedingung kann wiederum ein Objekt sein, das innerhalb eines definierten Raumes oder innerhalb einer Fläche positioniert und somit begrenzt wird. Randbedingungen definieren das Umfeld eines Objekts bzw. einer Objektmenge und sind notwendig um ein Objekt in seiner finalen Wirkung zu präsentieren. Die Komplexität einer Umgebung kann stark variieren und von einer einfachen Konturform bis hin zu einer komplexen Kombination unterschiedlichster Randbedingungen reichen, die eine detaillierte Simulation des Ergebnisses erlaubt. Nicht selten stehen Eigenschaften von Randbedingungen im Konflikt

mit anderen geometrischen oder topologischen Strategien oder gestalterischen Entscheidungen eines Modells. Das kann in Einzelfällen spezielle Sondersituationen hervorrufen. Diese erfordern daher die Integration von Regeln oder definierten Spezialfällen als Bestandteile des Gesamtsystems.

6.6.2 Äußere Kräfte

Kräfte, die auf ein Modell einwirken, spielen in einem Metamodell eine wichtige Rolle und können als interne als auch externe Einflüsse wirken. Zum Zeitpunkt dieser Arbeit ist zu beobachten, dass das Feld der algorithmischen Simulation physikalischer Kräfte zunehmend an Popularität für Gestaltungsaufgaben gewinnt. In solchen Simulationen werden Kräfte mithilfe physikalischer Gleichungen erzeugt, die auf die Form eines Objektes einwirken können, um dieses zu manipulieren oder gar zu erzeugen. Solche Kräfte sind beispielsweise externe Gravitationskräfte oder aber interne Materialeigenschaften wie Biegesteifigkeit oder Dehnungskräfte.

6.6.3 Steuerungsgrößen

“What becomes apparent is that we are not designing the geometry of the artefact, but rather we are constructing a ‘control rig’, some geometry that will never be built or seen, but which indirectly controls what will be constructed and experienced. It is the development of this sense of ‘indirection’ or ‘control through geometric dependency’ which is emerging as a key design skill.”
(Aish 2005, 11)

Steuerungsmethoden bilden das Medium zur Interaktion zwischen Mensch und Modell und dienen der direkten und indirekten Steuerung eines Metamodells. Sie beinhalten die Einstellmöglichkeiten, mit welchen der Designer oder Modelleur seinen Entwurf ändern und anpassen kann. Bei Steuerungsmethoden kann es sich um einfache Variablen- oder Reglerdefinitionen, Graphen, Attraktorgeometrien, aber auch um komplexe Geometriegerüste oder Algorithmen handeln.

In einem hierarchisch assoziativen Modell kann dessen Steuerung auf unterschiedlichen Hierarchieebenen implementiert und verteilt werden. Der Modelleur des Modells besitzt vollen Zugriff auf die Programmstruktur des Modells. Bei der Implementierung von Steuerungsmethoden muss er prognostizieren, welche Informationen veränderbar definiert werden sollen und zu welchem Zeitpunkt im Gestaltungsprozess eine Manipulation stattfinden kann. Es obliegt dem Modelleur die entsprechenden Steuerungsmethoden und somit das Spektrum an Kontrolle eines Modells selbst auszuwählen. Hierbei ist zu beachten, dass je niedriger, d.h. früher im Gestaltungsprozess Variablen definiert werden, desto größer deren Einfluss auf das Gesamtmodell sein

kann. Verspätet definierte Variablen werden in den meisten Fällen lediglich als Detailinformation eingeordnet.

In der Gestaltung ist Zeit stets eine wichtige Ressource, daher wird angestrebt, möglichst effiziente Steuerungsstrukturen zu erzeugen und dabei Qualität und Implementierungszeit auszubalancieren. Die Kunst der Steuerungsarchitektur liegt daran, im System möglichst hohe Flexibilität in Form von Einstellmöglichkeiten zu bewahren und gleichzeitig die Bedienungskomplexität gering zu halten. Um dies zu erreichen, ist es ratsam Methoden zu verwenden, mit denen möglichst viele Informationen mit wenigen Einstellmöglichkeiten manipuliert werden können, sowie Einstellmöglichkeiten auf unterschiedlichen Hierarchieebenen zu verteilen.

7

Fallstudien

Anhand von sechs Fallstudien sollen nun unterschiedliche Anwendungsfelder von algorithmischen Modellierungen für die automobiler Gestaltung unter der Nutzung unterschiedlicher algorithmischer Methoden erprobt werden. Die entstehende Kollektion von Fallstudien soll einen Überblick über die Möglichkeiten von Computational Design und die Vielfalt ihrer Anwendbarkeit im Automobil-Design aufzeigen.

In Fallstudie 1 werden einleitend unterschiedliche algorithmische Methoden zur Erzeugung von Mustern aufgezeigt. Hier soll das Potential von Computational Design für die Entwicklung neuartiger Muster und Oberflächenstrukturen genutzt werden, die durch ihre geometrische Komplexität mit traditionellen Modellierungsmethoden nur besonders aufwendig zu erzeugen sind. Gleichzeitig bilden diese Methoden die Grundlage für weitergehende dreidimensionale Generierungsarten, die eine andersartige Gestaltungsmethodik aufzeigen. Fallstudie 2 ist auf die Erforschung einer generativen Methode zur algorithmischen

Erzeugung von dreidimensionalen Fahrzeugkörpern fokussiert. Im Gegensatz zur klassischen geometrischen Modellierung, in der ein Objekt durch das direkte Erzeugen und Verändern von Geometrie erzeugt wird, soll in dieser Fallstudie untersucht werden, wie abstrakte Automobilkörper mit Hilfe mathematischer, dreidimensionaler Feldgleichungen generiert werden können. In Fallstudie 3 werden Umformungsmethoden von Gestaltungen untersucht, um geometrische Körper mit erhöhtem Freiheitsgrad deformieren zu können. Die entwickelte, punktbasierte Transformationsmethode verspricht topologische, d.h. von einem Raster unabhängige, globale Deformationen von geometrischen Körpern zu produzieren. Aus der Extraktion von Gestaltinformation ergeben sich neue Erkenntnisse, die für unterschiedliche Formanalysestrategien eingesetzt werden können. In Fallstudie 4 werden Methoden der algorithmischen, dreidimensionalen Modulation einer Körperoberfläche analysiert. Gestaltungsmöglichkeiten von Fahrzeugflächen sollen als entkoppelter Bestandteil einer Fahrzeuggestalt, d.h. isoliert von einem Proportionsvolumen, erforscht werden. Diese Strategie hat das Ziel eine Basis für ein Verfahren zur Differenzierung der Fahrzeugaußenhaut zu bilden. Fallstudie 5 prüft Methoden der algorithmischen Bildung von Entwurfsvarianten. In dieser Fallstudie sollen Potential und Problematiken der evolutionären Generierung neuer Gestaltungsvarianten dargestellt werden und der Ansatz einer morphogenetischen Entwurfsstrategie zur automobilen Formentwicklung illustriert werden. In Fallstudie 6 soll die Validität von Computational Design im praktischen Entwurfsprozess eines Konzeptfahrzeugs erforscht werden. In diesem Abschnitt werden die eingesetzte Methodik und Entwurfsstrategien bei der Entwicklung des *Mercedes-Benz Concept Intelligent Aerodynamic Automobile* vorgestellt.

7.1 Fallstudie 1: Algorithmische Mustergenerierung

7.1.1 Kontext und Zielsetzung

In dieser Fallstudie werden unterschiedliche Methoden zur Erzeugung, Anpassung und Steuerung von Mustern implementiert und strukturiert. Der daraus resultierende Katalog unterschiedlicher Methoden soll zum einen als praktische Erprobung des zuvor aufgezeigten konzeptionellen Rahmenwerks zur Gestalterzeugung und zum anderen als spezialisierte Entwicklungsumgebung für unterschiedlichste Muster- und Strukturformen dienen. Der Begriff des Musters, der Struktur oder des Patterns wird sprachlich mehrdeutig verwendet. In diesem Abschnitt beziehen sich diese Begriffe überwiegend direkt auf grafisch geometrische Muster, indirekt zeigen sie jedoch ebenfalls den Begriff der logischen Struktur eines Gestaltungsaufbaus.

Muster werden in der Gestaltung von Automobilen in vielfältiger Art und Weise eingesetzt. Einige direkte Anwendungsformen sind Lochmuster, Gitterelemente, Stoffmuster oder Perforationen. Solche Muster bestehen aus einer Menge von Formelementen, welche nach einer Ordnungslogik strukturiert sind. Je nach Art der Formelemente oder Ordnungslogik können Muster erhebliche geometrische Komplexität aufweisen. Die Erzeugung geometrisch komplexer Muster gelingt mit traditionellen manuellen, analogen Gestaltungswerkzeugen nur mit erheblichem Aufwand, im schlimmsten Fall muss jedes Musterelement einzeln erzeugt werden. Die Gestalt und Gestaltung dieser Elemente ist neben ästhetischen und funktionalen Kriterien

ebenfalls durch Fertigungsmethoden und die verwendeten Materialien bestimmt. Neue computergesteuerte Prototypenbau- und Fertigungsmethoden versprechen ein erhöhtes Maß an geometrischer und somit formal-ästhetischer und funktionaler Gestaltungsfreiheit.

Die praktische Erprobung konzentriert sich strategisch vorerst ausschließlich auf die Umsetzung zweidimensionaler Muster, um auf diese Weise grundlegende Kategorien zu extrahieren und die Anzahl beeinflussender Parameter möglichst niedrig zu halten. In der fortgeschrittenen Entwicklung der Fallstudie werden jedoch ebenfalls Methoden zur Übertragung dieser Musterprinzipien in die dritte Dimension aufgezeigt. Tiefgreifende Beschreibungen und mathematische Definitionen unterschiedlichster Mustertypen werden im Standardwerk „*Patterns and Tilings*“ von (Grünbaum/Shephard 1987) umfassend beschrieben und dienen als wichtige Ressource für die Erarbeitung der Umsetzung algorithmischer Ordnungssysteme.

7.1.2 Methoden

Die praktische Implementierung der Fallstudie wird überwiegend in der visuellen Programmierungsumgebung *Grasshopper* der CAD-Software *Rhinoceros*® von Robert McNeel & Associates realisiert. Innerhalb dieser visuellen Programmiersprache wird mit Hilfe der textbasierten Programmiersprache Python 2.7.0 (*IronPython*) auf die internen Skriptfunktionen zugegriffen und somit die visuellen Programmierfähigkeiten durch textbasierte Programmierfunktionen erweitert. Während die allgemeine algorithmische Struktur mit Hilfe der visuellen

Programmiersprache realisiert wird, werden komplexere Algorithmen in textbasierten Strukturen (*Python*) generiert. Auf diese Weise wird die Komplexität eines Metamodells mithilfe einer global visuellen Programmstruktur innerhalb von Grasshopper reduziert und die Geschwindigkeit der textbasierten Programmprozesse, unter anderem durch die Implementierung einer von *Microsoft* bereitgestellter Parallelisierungsbibliothek beschleunigt. Die implementierten Programmfunktionen und -klassen werden in einer externen Bibliothek abgespeichert, um die Funktionalität effizient zu referenzieren und in zukünftigen Projekten wiederverwenden zu können. Auf diese Weise konnten einige der implementierten, algorithmischen Funktion und Klassen universell in anderen Modellierungs- und Animationsumgebungen mit Python-Entwicklungsumgebungen wie *Side Effects Houdini*, *Autodesk Maya* oder *MAXON Cinema4D* eingesetzt werden. Dies führt zu einer Reduzierung wiederkehrender Arbeitsschritte.

7.1.3 Ergebnisse

Das erste Teilergebnis dieser ersten Fallstudie ergibt sich aus der systematischen Implementierung fundamentaler algorithmischer Methodenbausteine, die in Form einer Matrix visuell aufbereitet werden. Die entstandenen Methodenbausteine sind nach den zuvor definierten Kategorien (Geometrielemente, Ordnungselemente und Transformationsmethoden) gegliedert und dienen als allgemeine, praktische Überprüfung des vorgeschlagenen Rahmenwerks zur algorithmischen, regelbasierten Generierung von automatischer Gestaltungen. Gleichzeitig bilden die

entwickelten Methoden algorithmisches Arbeitsmaterial für weitere gestalterische Generierungsprozesse.

Eine vollständige Auflistung aller möglichen Kombinationen aus allen denkbaren Geometrie-, Ordnungs- und Transformationsmethoden sprengt den Umfang dieser Arbeit um ein Vielfaches. Aus diesem Grund werden an dieser Stelle exemplarisch unterschiedliche Kombinationen der drei wichtigsten Grundelemente aufgezeigt. Bereits mit den präsentierten algorithmischen Bauteilen ergibt sich ein modular kombinierbares Metamodellsystem, welches die Gestaltung einer großen Anzahl an unterscheidbaren Strukturen ermöglicht. Die Veränderung nur eines Parameters einer Teilkomponente des Systems kann drastische Gestaltänderung bedeuten. Aus diesem Grund wird die Variabilität der Ergebnisse der Teilkomponenten durch unterschiedliche Parametereingaben aufgezeigt. Die Komponenten werden als verschiedene Matrizen dargestellt, da einzelne Teilkomponenten nicht isoliert, sondern lediglich durch die Kombination mit anderen, visualisiert werden können. Zudem erlaubt diese Form der räumlichen Anordnung vergleichende Darstellungen von Veränderungen in Algorithmen und/oder Parametern. Durch bewegte Bilder wie Computeranimationen können die Änderungen ebenfalls anschaulich in zeitlicher Abfolge abgebildet werden. Eine Sammlung von implementierten Methoden, insbesondere Methoden niedriger Ordnung (*low-level*), bieten hohe Manipulationsmöglichkeiten und somit maximale gestalterische Freiheit. So kann neben den wichtigen Eingabevariablen ebenfalls der Programmcode der jeweiligen Methoden direkt verändert oder angepasst werden. In einer Programmbibliothek zusammengefasst, bilden diese algorithmischen Methoden ein effizientes und kontinuierlich erweiterbares Rahmenwerk zur Erzeugung von Musterstrukturen, das als standardisiertes Grundmaterial zur Gestaltung für Computational Designer eingesetzt werden kann.

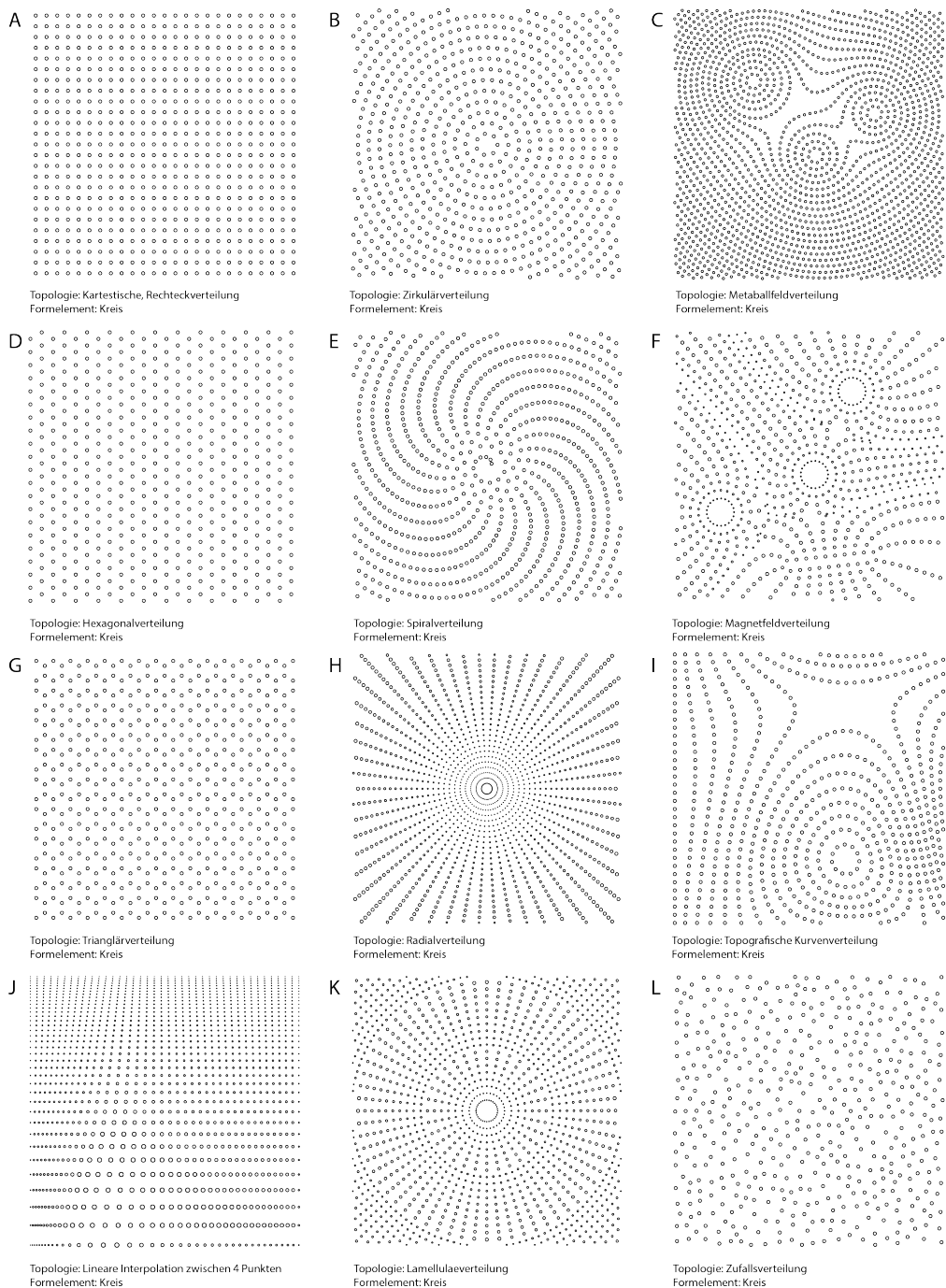


Abb. 11: Matrix von Ordnungselementen (Topologien) dargestellt als Übersicht von Verteilungsmustern. Die Verteilungspositionen werden durch Kreiselemente visuell repräsentiert.

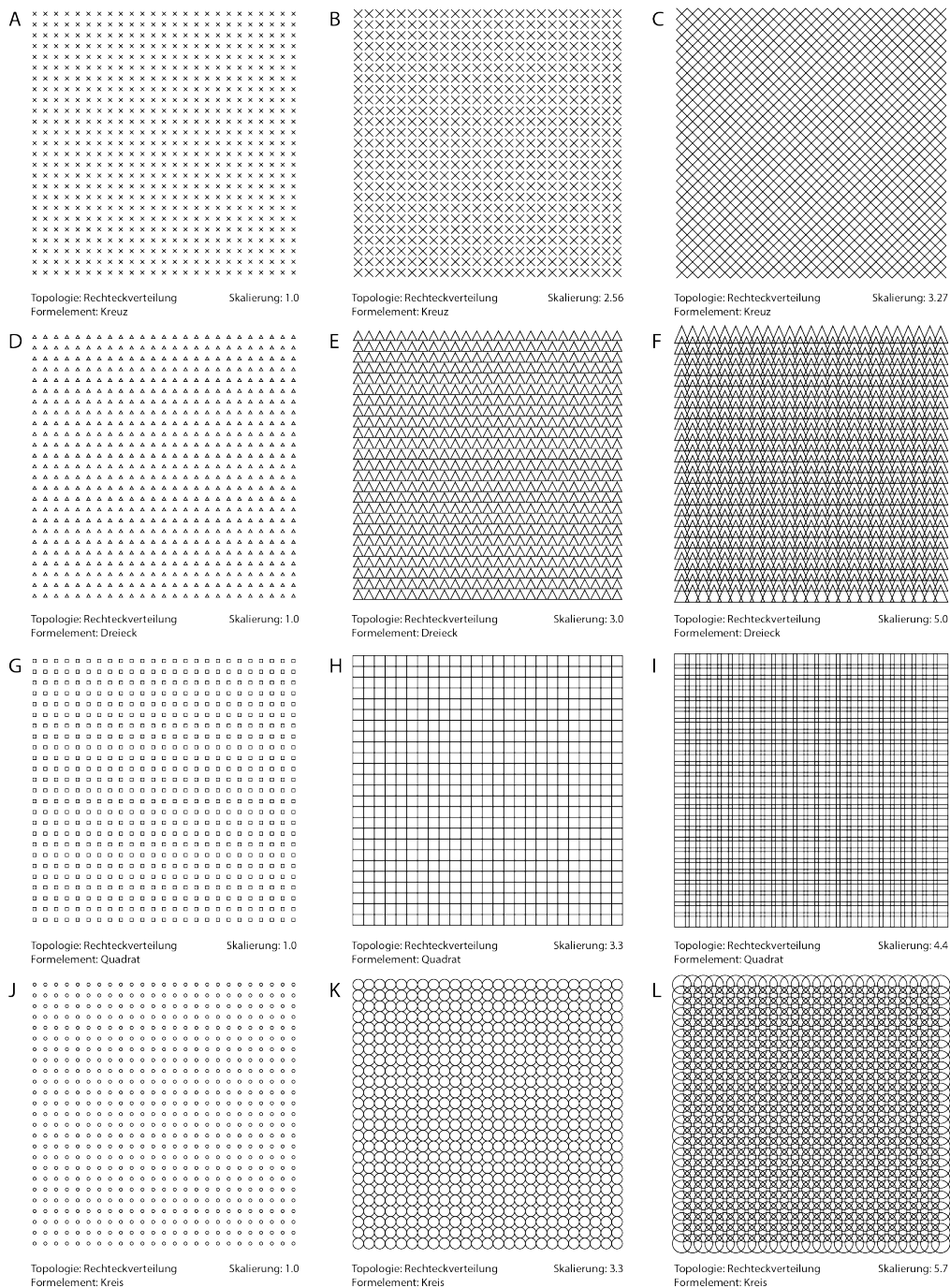


Abb. 12: Matrix klassischer, kartesischer Rechteckverteilungen, welche in vertikaler Achse durch unterschiedliche Formelemente visualisiert werden. In horizontaler Achse wird lediglich die Größe des Formelements variiert (Umformung). Die rechte Spalte zeigt, dass Verteilungslogiken ebenfalls zur Unterteilung einer Fläche eingesetzt werden können.

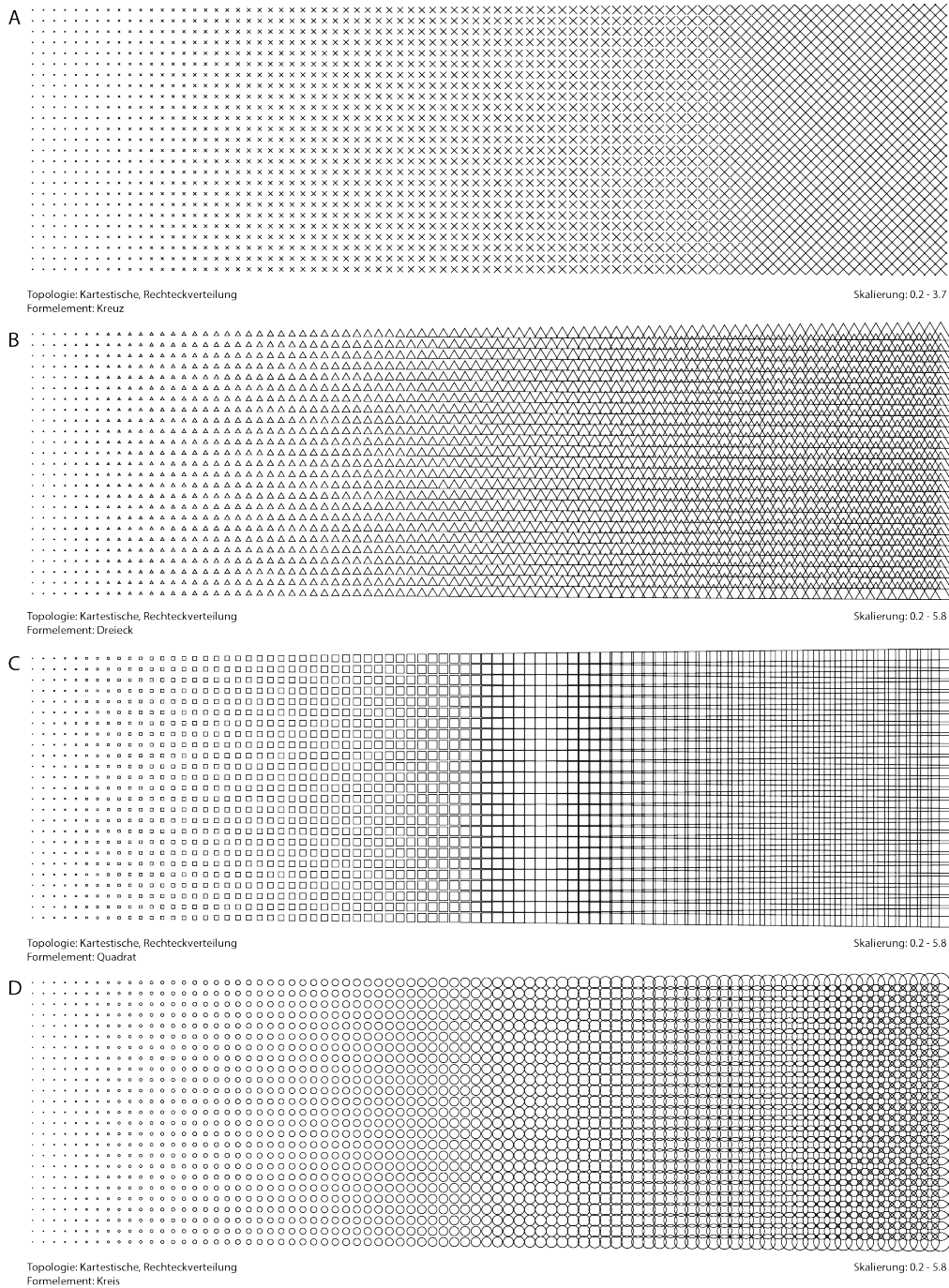


Abb. 13: Verteilungsmuster mit homogenen Progressionen, umgesetzt durch eine lineare Skalierung. Auf diese Weise wird ein Verteilungssystem fließend zum Unterteilungssystem.

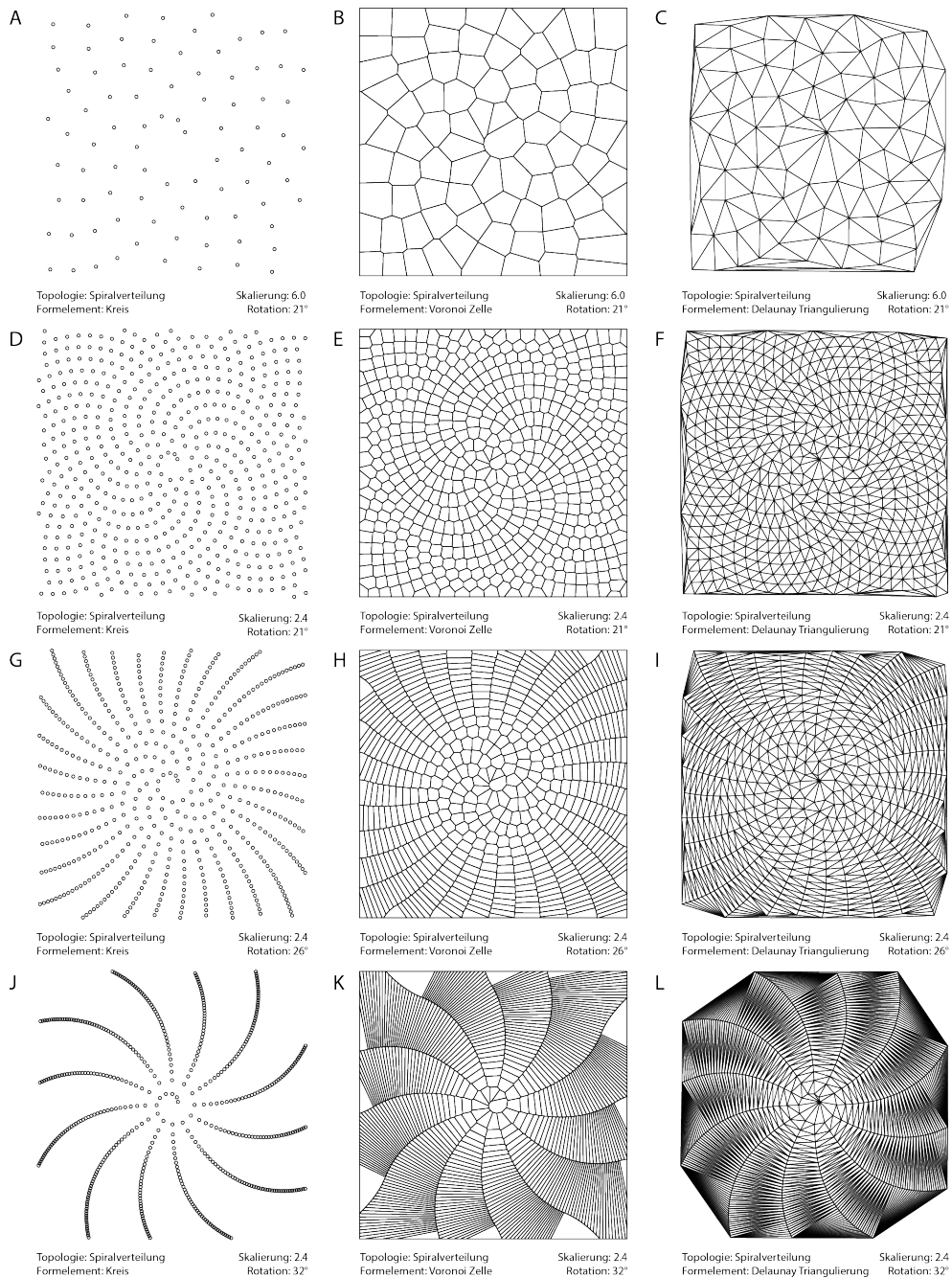


Abb. 14: Matrix von Spiralverteilungen, welche in horizontaler Achse links durch Kreiselemente, mittig durch Voronoi-Zellen und rechts durch eine Delaunay-Triangulierung dargestellt werden. In vertikaler Richtung werden lediglich Generierungsparameter variiert. Diese Darstellung illustriert das gestalterische Potential innerhalb eines simplen Metamodells.

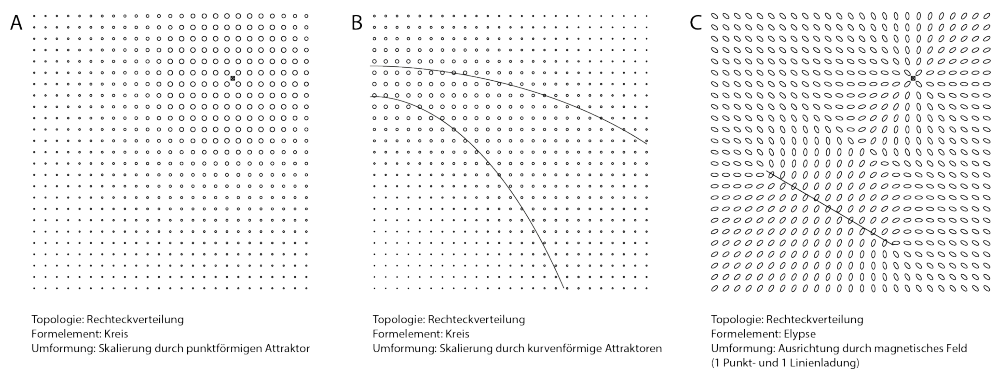


Abb. 15: Attraktorbasierte Umformungsmethoden:
 (A) Progressive Skalierung mit Punktattraktor;
 (B) progressive Skalierung mit zwei Kurvenattraktoren; (C) Ausrichtungs-
 transformation durch eine punktförmige
 und eine linienförmige Ladung.

Umformungen erlauben Mengen von Geometrieelementen in ihrer (1) *Position*, (2) *Größe*, (3) *Ausrichtung* und (4) *Form* zu verändern. Für Transformationen dieser Art bietet sich an mathematische Felder einzusetzen, die durch Ladungselemente (*Attraktoren*) generiert werden können. Auf diese Weise wird in einem Feld (oder Raum) mit Hilfe einer Gleichung für jede Position ein Feldwert berechnet. Die Gleichung berücksichtigt hierbei die Distanz zwischen der zu berechnenden Position des Feldes und eines bzw. mehrerer Attraktoren. Zur Berechnung der Distanzen zwischen zwei Geometrien höherer Ordnung, wie z. B. Kurven oder Flächen, werden Berechnungsmethoden zur Ermittlung von dichtesten Punktpaaren oder der Berechnung von Geometrieschwerpunkten eingesetzt. Des Weiteren ist die Stetigkeit des Verlaufs durch Anpassungen der Gleichung beeinflussbar und zwischen stufig, fließend, linear oder progressiv einstellbar.

Ein alternativer Ansatz zur Definition von Parameterfeldern nutzt Bilddateien um flächige Transformationswerte zu definieren. Hier werden keine Attraktoren und somit keine mathematischen Distanzberechnungen benutzt, da in diesen Fällen Bildinformationswerte wie Helligkeits- oder Farbwerte einzelner Pixel eines Bildes herausgelesen werden, um ortsgebundene Transformationen zu erzeugen. Ein Bild kann unterschiedlichste Informationskomplexität speichern und somit jegliche Arten von Verläufen oder gar geometrische Formen abbilden. Im Kontext kollaborativer Gestaltung ist die Nutzung von Bilddaten ein effizientes Medium für die Zusammenarbeit mit traditionell visuell orientierten Gestaltern ohne algorithmisch, mathematische Kenntnisse. Durch die Veränderung der Bilddaten in bekannten Grafikprogrammen können durch bildbasierte Methoden intuitiv komplexeste Transformationen gestaltet werden.

Um Modelleuren und Designern mit wenig oder gar keiner Programmiererfahrung algorithmische Methoden zur Mustererzeugung zugänglich zu machen, wurden im zweiten Teil der ersten Fallstudie einige Methoden gleichen Grundtyps in vordefinierte visuelle Programmiermodule zusammengefasst. Sie stellen den Versuch dar, niedrige algorithmische Logik in verständliche und nutzbare, höhere Bedienelemente umzuwandeln. Die Nutzung dieser algorithmischen Module erlaubt eine flexible und intuitive Nutzung von Algorithmen ohne fundamentale Programmierkenntnisse, da lediglich durch Parameteränderung auf unterschiedliche Algorithmen zugegriffen werden kann. Die Nutzer müssen nicht notwendigerweise die Entstehungslogik der unterschiedlichen Systeme kennen und verstehen, sondern können durch empirisches Erforschen zufriedenstellende Ergebnisse erzeugen. Auch können Entscheidungsträger durch die Parametereingabe bzw. die Steuerung der Schieberegler in (nahezu) Echtzeit den Möglich-

keitsraum der Varianten erkunden. Für erfahrene Nutzer bietet eine solche Zusammenfassung von Algorithmen ebenfalls Vorteile. Im praktischen Umfeld der Entwicklung von generierter Form, bieten Containermodule dieser Art die Möglichkeit Arbeitsschritte zu reduzieren. Es kann effizient zwischen Algorithmen ähnlicher Art geschaltet werden, um deren visuelles Ergebnis vergleichend zu ermitteln. Modulsysteme sind dabei keineswegs darauf ausgelegt allumfassend zu sein. Sie dienen lediglich der effizienten Nutzung wiederkehrender Algorithmen. Mithilfe einiger wichtiger Basismethoden kann bereits ein erstaunlich großes Spektrum möglicher Gestaltungslösungen umgesetzt werden.

Im Folgenden wird eine Auswahl von realisierten, erprobten und bewährten Modulen im Detail erläutert, die sich vor allem im automobilen Kontext als nützlich erwiesen haben. Integriert in ein assoziatives Modell können mit diesen Modulen unterschiedliche Gestaltungsvarianten durch wenige Schieberegler effizient verändert werden, um diese anschließend vergleichend gestalterisch bewerten zu können. Diese schnelle Anpassbarkeit ist insbesondere bei Präsentationen mit Entscheidungsträgern von Vorteil, da je nach Komplexität des Modells und der zur Verfügung stehenden Rechengeschwindigkeit in Echtzeit zwischen unterschiedlichen Varianten hin und her geschaltet werden kann, bis die präferierten Parameter für die finale Gestalt gefunden sind.

Im Topologiemodul sind unterschiedliche topologische Systeme zur Anordnung von Elementen zusammengefasst, die durch einen Eingabeparameter ausgewählt und variiert werden können. Weitere Eingabeparameter sind bereits optional vordefiniert, sodass keine weiteren Eingaben oder Verknüpfungen nötig sind um ein Ergebnis erzeugen zu können. Hierdurch ergeben sich bereits direkte visuelle Resultate. Das Topologiemodul erhöht in der gestalterischen Praxis die Geschwindigkeit für die Erzeugung

und Veränderung von Verteilungstopologien.

Um die Kompatibilität der wechselnden Ergebnisse in einem Metamodell sicherzustellen, basiert die Implementierung des Moduls auf dem Grundprinzip der Verwendung kleinster gemeinsamer Bauelemente. Bei topologischen Ordnungen bildet der Punkt, als nulldimensionales Positionselement, das kleinste gemeinsame Element. Als Ausgabe des Topologiemoduls werden daher stets eine Menge an Positionen sowie einige optionale Attribute wie topologische Reihenfolge oder Nachbarschaftsverhältnisse ausgegeben. Eine Menge an Punkten bietet eine freie gestalterische Basis, auf welchen aufbauend Geometrieobjekte verteilt werden können. Sie können jedoch auch eingesetzt werden, um Geometrien höherer Ordnung zu konstruieren, zum Beispiel zur Definition von Kontrollpunkten von Flächen, Kurven oder Zellen.

Dieses Modul ist mit dem Ziel entstanden, topologische Variationen im Gestaltungsprozess in kürzester Zeit zu erzeugen. Eine Zusammenfassung von Methoden zum schnellen Wechsel zwischen unterschiedlichen topologischen Grundordnungen hat sich im praktischen Umfeld der Entwicklung von automobiler Gestaltung als nützlich herausgestellt. Durch das Topologiemodul können diese Wechsel über einen einzelnen Schieberegler variiert werden, was die Realisierungszeit von Änderungen und Anpassungen auf ein Minimum reduziert. Dieses Modul ist zwar zu diesem Zeitpunkt auf die Verteilung von flächigen Rastersystemen limitiert, die Integration fokussierter Verteilungslogiken, wie beispielsweise zirkuläre oder radiale Raster, sind jedoch ebenfalls möglich. Über die Eingabe eines Ursprungspunktes wird der Fokuspunkt eines solchen fokussierten Systems definiert. Ist kein Ursprungspunkt, sondern eine Eingabegeometrie definiert, wird der geometrische Schwerpunkt der referenzierten Eingangsgeometrie verwendet.

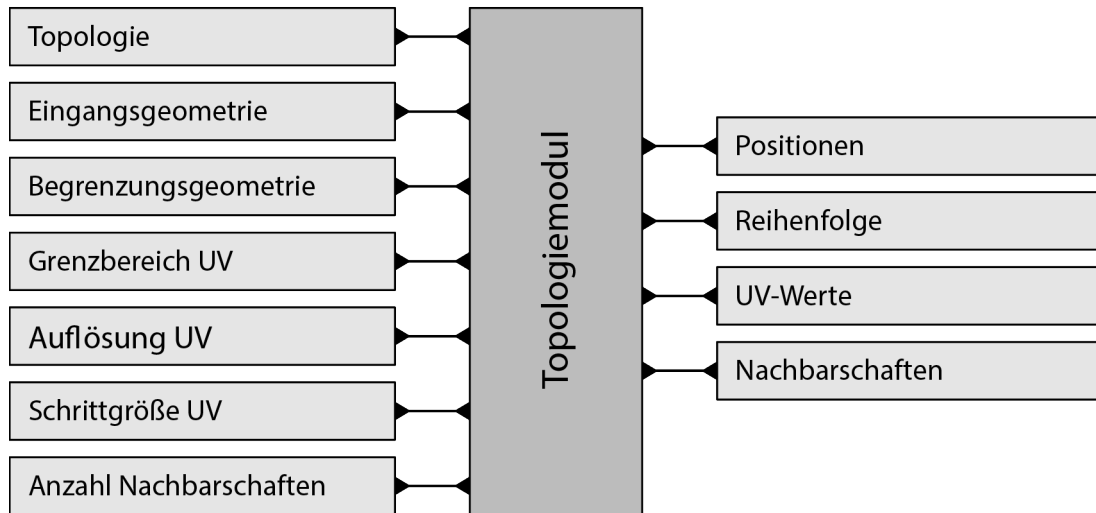


Abb. 16: Visuelle Programmierungskomponente des Topologiemoduls. Dieses Modul erlaubt den zügigen Wechsel zwischen Topologiearten und ihrer Parameter.

Eingabeparameter des Topologiemoduls:

1. *Topologie*: (Standardwert: 0) Eingabe des Parameters steuert die Auswahl der Topologielogik.
 - Typ #0* = Rechteckverteilung
 - Typ #1* = Hexagonverteilung
 - Typ #2* = Triangulärverteilung
 - Typ #3* = Zirkulärverteilung
 - Typ #4* = Radialverteilung
2. *Eingangsgeometrie*: Eingabe einer Flächengeometrie zur UV-Verteilung.
3. *Begrenzungsgeometrie*: (optional) Eingabegeometrie zur Definition einer geometrischen Begrenzung der Verteilung.

4. *Ursprungsebene*: (Standardwert: XY Ebene)
Eingabe der Ursprungsebene. Ein Ursprung dient der Definition von Topologien mit einem fokussierten Startpunkt.
5. *Grenzbereich U & Grenzbereich V*:
(Standardwerte: 0, 1) Definition eines Grenzbereichs, welche zur Definition UV-Bereichs einer Parametrisierung von Flächen, aber auch auf einen Koordinatenbereich angewendet werden kann.
6. *Auflösung U & Auflösung V*:
(Standardwerte: 10, 10) Definition der Anzahl an Elementen in zwei Richtung U und V.
7. *Schrittgröße U & Schrittgröße V*: (optional)
Definition der Distanzeinheit zwischen Elementen in zwei Richtung U und V.
8. *Anzahl Nachbarschaften*: (Standardwert: 0) Definition der Anzahl an zu berechnenden Nachbarschaften.

Ausgabeparameter des Topologiemoduls:

1. *Liste an Positionen*: Ausgabe einer linearen Liste mit resultierenden Punktpositionen .
2. *Reihenfolge*: Ausgabe einer verschachtelten Liste der topologischen, mehrdimensionalen Index-Information.
3. *UV-Werte*: Falls zutreffend, Ausgabe einer linearen Liste mit allen UV-Informationen
4. *Nachbarschaften*: Ausgabe einer linearen Liste mit allen Positionen.

Das Attraktormodul beschreibt die Integration unterschiedlicher Attraktor-basierter Transformationsmethoden, um intuitiv ungleichmäßige Umformungen auf Objektmengen durchführen zu können. Um auch mit diesem Modul die Modelliergeschwindigkeit erhöhen zu können, wurden ebenfalls vielverwendete Methoden in ein einfach zu bedienendes Modul zusammengefasst. Zur Steuerung von Übergängen sind keine mathematischen Kenntnisse zwingend notwendig, das Wertefeld für Transformationen kann durch unterschiedliche Referenzobjekte gesteuert werden. Mit diesem digitalen Werkzeug können einzelnen Geometrieobjekten individuelle, lokal definierte Transformationswerte zugeordnet werden. Die resultierenden Werte können frei je nach notwendiger Anwendung für die Änderung von Objekteigenschaften wie Größe, Ausrichtung, Farbe u. v. m. angewendet werden. Insbesondere bei der Erzeugung fließender Größenveränderung von Objektmengen, wie Verläufen oder Progressionen, hat sich dieses Modul bewährt.

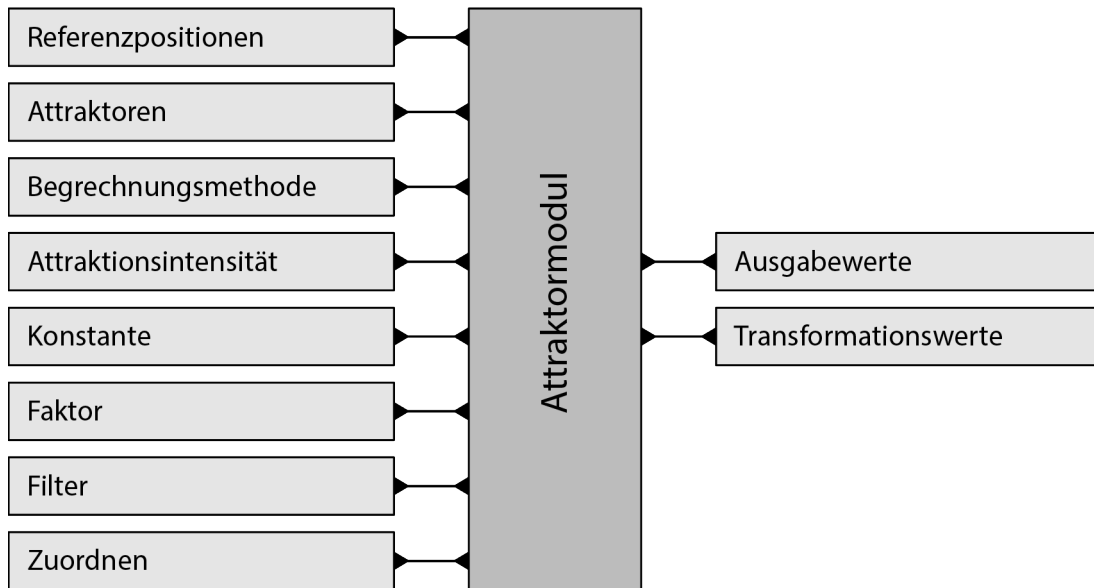


Abb. 17: Visuelle Programmierungskomponente des Attraktormoduls.

Eingabeparameter des Attraktormoduls:

1. *Referenzpositionen:*
Eingabe einer Liste von Referenzpositionen zur Ermittlung der Anzahl und Distanzrelation zu den Attraktorelementen
2. *Attraktoren:*
Eingabe einer Liste von Attraktorelementen.
Attraktorelemente sind Punkte, Kurven, Flächen, Flächenverbunde oder Volumen.
3. *Berechnungsmethode:* (optional) (Standardwert: 1)
Zur Berechnung der lokalen Transformationswerte kann aktuell zwischen fünf unterschiedlichen mathematischen Methoden ausgewählt werden. Diese können durch einen Integer-Wert zwischen 0 und 4 selektiert werden.

Methode #0 = Metaballberechnung mit runden
Metaballladungen;

Methode #1 = Lineare Distanzberechnung mit zwei
Manipulationsvariablen: Konstante und Faktor

$$f(x) = (\text{Distanz} + \text{Konstante}) * \text{Faktor}$$

Methode #2 = Quadratische Distanzberechnung mit
zwei Manipulationsvariablen: Konstante und Faktor

$$f(x) = (\text{Distanz} * \text{Distanz} + \text{Konstante}) * \text{Faktor}$$

Methode #3 = Quadratische Distanzberechnung mit
zwei Manipulationsvariablen: Konstante und Faktor

$$f(x) = \text{Faktor} / (\text{Distanz} + \text{Konstante})$$

Methode #4 = Quadratische Distanzberechnung mit
zwei Manipulationsvariablen: Konstante und Faktor

$$f(x) = \text{Faktor} / (\text{Distanz} * \text{Distanz} + \text{Konstante})$$

4. *Attraktionsintensität*: (optional) (Standardwert: 1) Bei der Verwendung von Berechnungsmethode #0 können zusätzlich Intensitätswerte für jedes Attraktorelement definiert werden. Auf diese Weise lassen sich Attraktoren untereinander gewichten.
5. *Konstante*: (optional) (Standardwert: 0) Die Variable mit dem Namen *Konstante* wird eingesetzt um die Ergebnisse der Distanzberechnung zu beeinflussen.
6. *Faktor*: (optional) (Standardwert: 0) Die Variable mit dem Namen *Faktor* wird eingesetzt um die Ergebnisse der Distanzberechnung zu beeinflussen.
7. *Filter*: (optional) Zusätzlich integrierte mathematische Methoden wie eine Filter- bzw. Remappingfunktion erlauben die Manipulation der Ergebniswerte. Mit einem aktivierten Hochpass- bzw. Tiefpassfilter kann das Attraktor-Modul gezielt Maximal- bzw. Minimalwerte identifizieren und

gegebenenfalls mit einem definierbaren Wert überschreiben. Auf diese Weise kann etwa ein fließender Übergang zwischen zwei homogenen Feldern erzeugt und angepasst werden.

8. *Zuordnen*: (optional) (Standardwerte: [min = 0, max = 1]) Des Weiteren wird eine mathematische Zuordnungsmethode integriert, diese erlaubt den gesamten Wertebereich im gleichen Verhältnis in einen anders definierten Wertebereich zu übertragen. So können die Minimal- sowie die Maximalwerte von Verläufen nach Notwendigkeit angepasst werden, ohne die Logik des Verlaufs zu ändern, welcher aus der Position, Stärke bzw. dem Einflussbereich der Attraktoren resultiert.

Ausgabeparameter des Attraktormoduls:

1. *Transformationswerte*: Eine Liste an berechneten Ergebniswerten für folgende Transformationen.
2. *Zugeordnete Transformationswerte*: Eine Liste an berechneten Ergebniswerten mit proportionaler Zuordnung zwischen den definierten Grenzwerten.

Das hier vorgestellte Flächenverbundmodul erlaubt das vereinfachte Erzeugen von Strukturen und Mustern über Flächenverbünde. Für die Erstellung von Oberflächenstrukturen, insbesondere von dreidimensionalen Strukturen, werden bevorzugt uv -basierte Verteilungsmethoden eingesetzt. Diese Methoden nutzen die uv -Parametereigenschaften von regulären bzw. differenzierbaren Flächen, um jeden Punkt einer Fläche durch zwei Parameter (u und v) ansteuern zu können. Hierdurch ist es möglich Verteilungslogiken in den Parameterraum einer Fläche zu transformieren. Die Logik der Verteilung ist somit mit einer Fläche verknüpft, bleibt jedoch unabhängig von der absoluten Erscheinung der Fläche. Auf diese Weise lassen sich Positionsinformation berechnen, die zur Konstruktion von Mustern eingesetzt werden können. Zusätzlich können weitere Attribute wie lokale Tangentialität oder orthogonale Normalenrichtungen der Referenzfläche herauslesen werden, mithilfe welcher nicht nur Objekte positioniert, sondern ebenfalls geometrisch ausgerichtet werden können.

Fahrzeugbauteile, die zwar mit differenzierbarer Flächengeometrie wie *NURBS* erzeugt werden, sind jedoch oftmals als Flächenverbund konstruiert. Diese recht heterogene Konstruktionslogik entsteht beispielsweise durch die Verwendung von Abrundungen und Verblendungen. Flächenverbünde erschweren die Verwendung uv -basierter Verteilungsmethoden, da jede Fläche des Verbunds ihren eigenen Parameterraum besitzt. Ein Lösungsansatz für diese Problematik kann der Neuaufbau des Bauteils als einzelne Fläche sein. Auf diese Weise werden multiple Parameterräume auf einen Parameterraum reduziert. Diese Strategie kann jedoch zu geometrischen Änderungen des Bauteils und somit zu einem Genauigkeitsverlust im Endergebnis führen.

Das Flächenverbundmodul vereinfacht topologische Verteilungen bzw. Unterteilungen auf Flächenverbänden. Der integrierte Algorithmus referenziert topologische Positionsinformation des Flächenverbands mit den Parameterräumen der zugeordneten Flächen. Als Ausgangspunkt wird eine Menge an Positionen auf der Oberfläche des Flächenverbands benötigt. Dies kann durch eine separat im zweidimensionalen Raum konstruierte Verteilungstopologie erzeugt werden. Die Positionsinformationen der Verteilungstopologie werden anschließend mit einer Projektionsmethode auf den Flächenverbund transformiert. Befinden sich die Positionselemente nun auf dem Flächenverbund kann das hier vorgestellte Modul eingesetzt werden um im ersten Schritt die relevante Teilfläche des Verbands zu identifizieren und in den folgenden Schritten bedeutsame Attribute der Fläche zu berechnen. Als praktisches Beispiel können nun diese Ausgabeparameter des Moduls eingesetzt werden um dreidimensionale Objektmengen auf dem als Referenzgeometrie definierten Flächenverbund auszurichten.

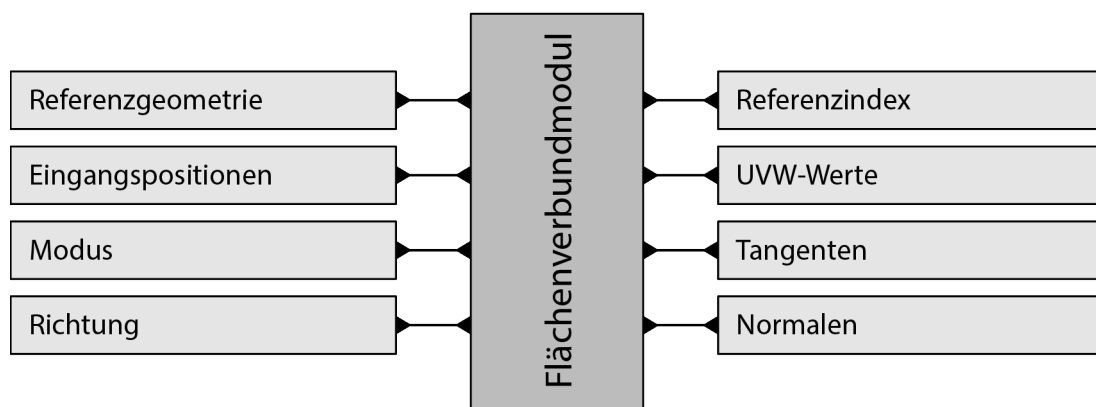


Abb. 18: Visuelle Programmierungskomponente des Flächenverbundmoduls. Dieses Modul erlaubt uv -Parameterinformationen sowie Tangenten- und Normaleninformation einer Verteilung über einen Flächenbund zu ermitteln.

Eingabeparameter des Flächenverbundmoduls:

1. *Referenzgeometrie*: Eingabe einer einzelnen Fläche, einer Liste von Flächen oder eines Flächenverbunds
2. *Eingangspositionen*: Eingabe einer Liste von Eingangspositionen von Punkten auf einer bzw. nahe einer Fläche
3. *Modus*: (optional) (Standardwert: 0) Durch den Parameter des Modus wird die Berechnungsmethode der Ausgabeparameter ausgewählt. Die unterschiedlichen Optionen an Berechnungsmethoden sind insbesondere dann nötig, wenn ein Positionselement mehreren Flächen der Referenzgeometrie zugeordnet werden kann.
 - Modus 0*: Strategie des ersten Treffers
 - Modus 1*: Strategie des Mittelwerts
 - Modus 2*: Strategie der Lösungsauflistung
4. *Richtung*: (optional) Eingabe eines Richtungsvektors für optionale Projektionsberechnungen

Ausgabeparameter des Flächenverbundmoduls:

1. *Referenzindex*: Für jedes Element in der Liste der Eingangspositionen wird eine zugehörige Referenzfläche zugeordnet und in Form eines Index ausgegeben.
 - Modus 0*: Ausgabe eines Index der ersten zutreffenden Fläche
 - Modus 1*: Ausgabe einer Indexliste der zutreffenden Fläche
 - Modus 2*: Ausgabe einer Indexliste der zutreffenden Fläche

2. *UVW-Werte*: Für jedes Element in der Liste der Eingangspositionen werden zugehörige UVW-Werte ausgegeben. UV-Werte beschreiben die Position auf der zugehörigen Fläche. Wenn zutreffend, gibt der W-Wert die Distanz in Normalenrichtung an.
 - Modus 0*: Ausgabe eines U-, V- und W-Wertes in einer Liste
 - Modus 1*: Ausgabe einer verschachtelten Liste mit jeweils U-, V- und W-Werten pro zutreffende Fläche
 - Modus 2*: Ausgabe einer verschachtelten Liste mit jeweils U-, V- und W-Werten pro zutreffende Fläche
3. *Tangenten*: Für jedes Element in der Liste der Eingangspositionen werden zugehörige Tangenten in jeweils U und V Richtung ausgegeben.
 - Modus 0*: Ausgabe einer Liste mit zwei Vektoren
 - Modus 1*: Ausgabe einer verschachtelten Liste mit zwei Vektoren pro zutreffende Fläche
 - Modus 2*: Ausgabe einer verschachtelten List mit jeweils U, V und W Werten pro zutreffende Fläche
4. *Normalen*: Für jedes Element in der Liste der Eingangspositionen werden zugehörige Vektoren in orthogonaler Richtung ausgegeben.
 - Modus 0*: Ausgabe eines Normalenvektors
 - Modus 1*: Ausgabe eines Mittelwerts aller zutreffenden Normalenvektoren
 - Modus 2*: Ausgabe einer Liste mit jeweils einem Normalenvektor pro zutreffende Fläche

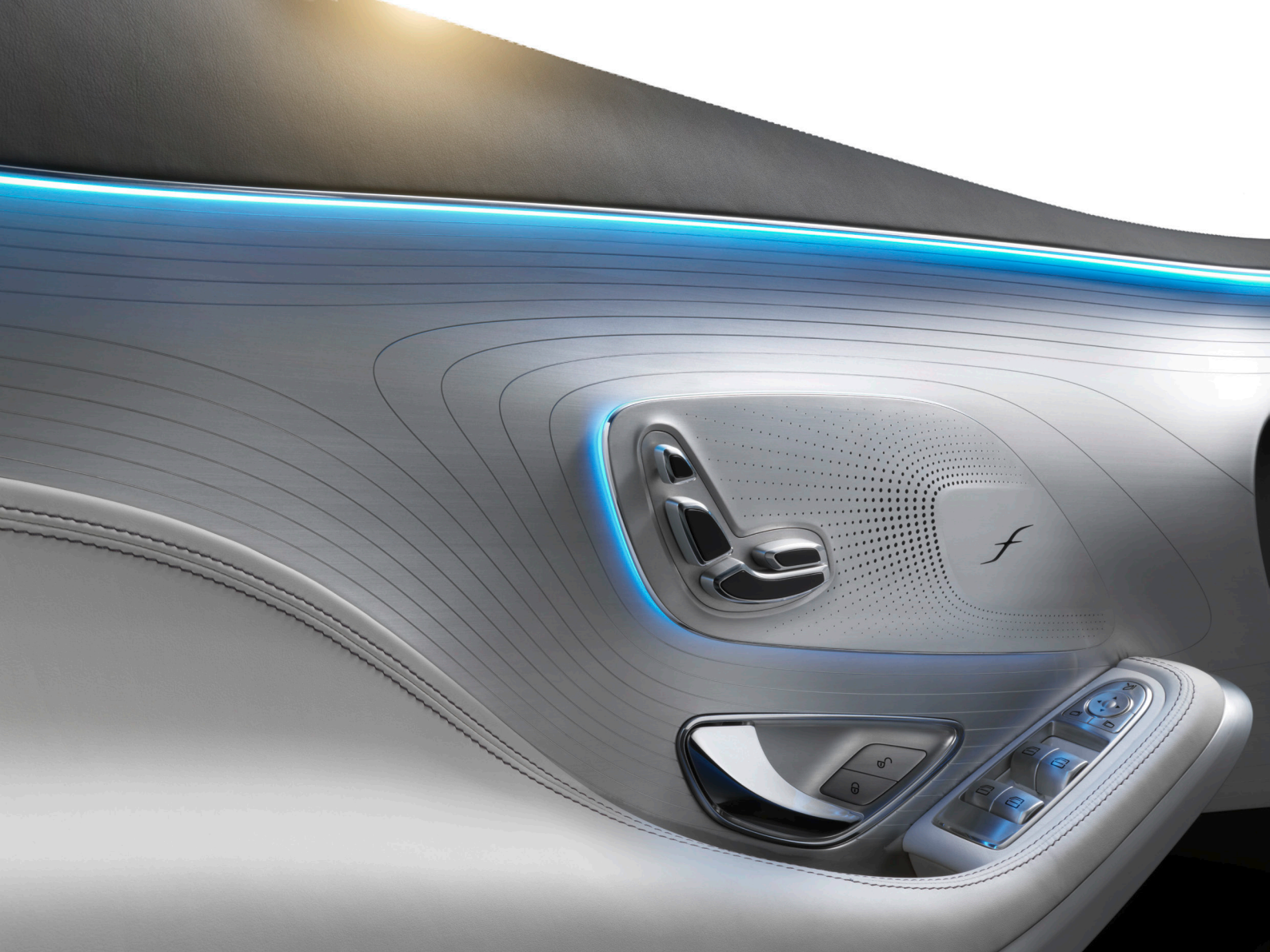


Abb. 19: Finales Ergebnis des topografischen Kurvenmusters
und der progressiven Lautsprecherperforation
(Quelle: Mercedes-Benz)

Die praktische Erprobung algorithmischer Mustergenerierung im Anwendungskontext wurde in Zusammenarbeit mit dem *Mercedes-Benz Design Center Sindelfingen* in Form der Entwicklung von formfolgenden Kurvengrafiken für Zier- teile im Fahrzeuginterieur des *Mercedes-Benz S-Class Coupé Concept* untersucht und im September 2013 auf der *Frankfurter Internationalen Automobil Ausstellung 2013* der Öffentlichkeit präsentiert. Als formale Zielsetzung galt die Erzeugung von formfolgenden Liniengrafiken auf dreidimensionalen Bauteilen sowie die Erzeugung von formalästhetisch neuartigen Laut-

sprecherperforationen mit progressiven Lochgrößenverteilungen. Für formfolgende Kurven wurde in diesem Konzept das Grundprinzip topografischer Kurven (Höhenlinien) ausgewählt, welches aus Höhenprofilen von Landkarten bekannt ist. Es wird eingesetzt um mittels der topografischen Kurven dreidimensionale Körper zu segmentieren und auf diese Weise die Dreidimensionalität des Körpers zweidimensional zu kommunizieren.

Zur gestalterischen Generierung von topografischen Kurven wird ein assoziatives Modell aufgesetzt, welches erlaubt flexibel körperhafte 3D-Geometrien zu segmentieren und somit unterschiedliche Konfigurationen von topografischen Kurven zu generieren und diese formal zu bewerten. Für die topografische Segmentierung der Fläche wird anfänglich die direkte Bauteilgeometrie des Fahrzeugzierteils eingesetzt und diese mit planen Ebenen in gleichmäßigem Abstand verschnitten. Um jedoch eine größere Gestaltungsfreiheit zu erzeugen, wird die topografische Bauteilfläche durch eine frei deformierbare Referenzfläche ausgetauscht, sowie die planen, topografischen Verschneidungsebenen durch frei deformierbare Flächen mit variablen progressiven Abständen ausgetauscht. Durch Anpassungen der Flächengeometrie sowie der Verschneidungselemente entstehen zusätzliche gestalterische Freiheitsgrade, welche eine größere Varianz und die Feinjustierung der Ergebnisse ermöglichen. Die variablen Abstände der Kurven werden mithilfe geometrischer Graphen gesteuert, durch welche sich die Progression der Topografie abbilden lässt. Die nun separat auf einer Referenzfläche erzeugten topografischen Verschneidungskurven werden im finalen Schritt mithilfe einer klassischen linearen Projektion auf die Bauteilgeometrie der Zier- teile transformiert. Es wurde zusammenfassend eine klassische Methode zur Erzeugung von topografischen Kurven kontinuierlich erweitert um höchste ästhetische Anforderungen zu erfüllen.

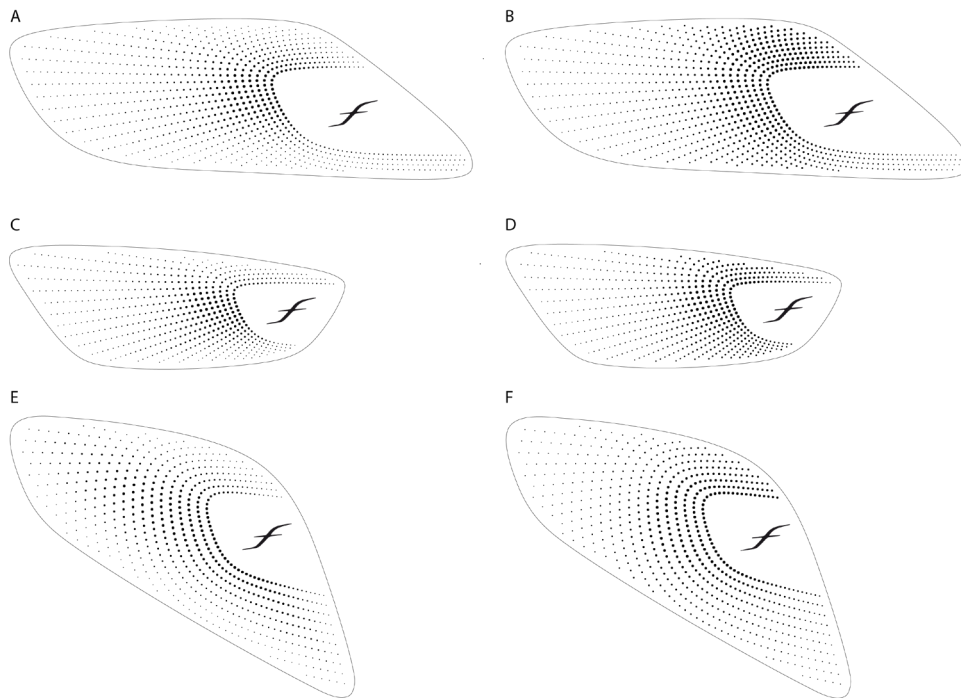


Abb. 20: Geometrische Daten
 der progressiven Lautsprecherperforation.
 (A-C) Variante 1; (D-F) Variante 2; (A+B) Fahrertür;
 (C+D) Fondtür; (E+F) Hutablage

Die Erzeugung des Lautsprechermusters basiert wiederum auf einer andersartigen Methodik. Hier wird eine klassische uv -basierte Rasterverteilung als topologisches Ordnungssystem und Kreiselemente als geometrische Objekte verwendet. Der Durchmesser jedes Kreiselementes kann mithilfe einer attraktorbasierten Transformationsmethode progressiv eingestellt werden, welche zu späterem Zeitpunkt dieser Arbeit in einem Attraktor-Modul archiviert worden ist. Um die Herstellbarkeit der Gitter zu gewährleisten, durften die Lochgrößen einen minimalen Wert nicht unterschreiten. Durch die Programmierung einer analytischen Korrekturfunktion, konnten zu kleine Lochgrößen identifiziert und korrigiert werden.

Die Anpassung der topologischen Punkteverteilung an die Umrisskurven der Bauteilgeometrie sind durch Deformation der Verteilungsfläche realisiert worden. Hierbei wird die Fläche größer als die Bauteilkontur konstruiert. Durch Inklusions- sowie Exklusionsalgorithmik konnten die für das Bauteil relevanten Positionsdaten herausgefiltert werden, damit das variable Modell ein möglichst finales Erscheinungsbild darstellen kann. Bei der Verteilung des Lochmusters konnten die Wahrnehmungsgesetze von Wertheimer beobachtet und gestalterisch eingesetzt werden, denn eine Streckung der Fläche erhöhte den Abstand der Punkte in einer Richtung und es entstanden visuell identifizierbare Lochstrahlengruppen. Je nach verwendeter Auflösung, d.h. dem Verhältnis zwischen Anzahl, Größe und Distanz der Strukturelemente in Bezug zum Objekt, ändert sich die Wahrnehmung und formale Wichtigkeit der Strukturelemente. Eine Struktur kann mit kleinen Elementen und hoher Auflösung stofflich wirken und die Beschaffenheit eines physischen Materials simulieren. Je größer die Elemente und geringer die Auflösung desto auffälliger und gestalterisch wichtiger wird die formale Geometrie der Einzelemente. Der Übergang dieser Phänomene ist fließend und zusätzlich abhängig vom Betrachtungsabstand. Die erzeugten Computational Design Strategien, welche zu der Zierteilgestaltung eingesetzt wurden, haben primär in der Entwurfsphase stattgefunden. Die entwickelten Methoden sind daher auf eine flexible Gestaltung der Musterstrukturen ausgelegt und nicht für die Erzeugung von automobilen Class-A-Geometriedaten optimiert. Aus diesem Grund wurden die finalen Gestaltungsdaten von dem Mercedes-Benz Modellierungsteam geometrisch aufbereitet. Jedoch konnten die generierten Daten der Lautsprecherperforation direkt für die Bauteilfertigung eingesetzt werden.

Zusammenfassend visualisiert Fallstudie 1, dass computerbasierte Entwurfsstrategien insbesondere für die Generierung von Mustern und Strukturen im automobilen Kontext produktiv eingesetzt werden können. Sie lassen sich in etablierte Prozesse der Entwurf- und Datenerzeugung integrieren und können den aktuellen Gestaltungsprozess von Automobilen unterstützen. Insbesondere abstrahierte und generalisierte Methoden niedriger (*low-level*) Ordnung können vielfältig eingesetzt und wiederverwendet werden. Eine kompakte, visuelle Übersichtsmatrix erlaubt die Erläuterung der unterschiedlichen Algorithmik als Bausteine für die Mustergenerierung. Durch Kombinatorik kann auf diese Weise die Vielfalt der Anwendungsmöglichkeiten aufgezeigt werden. Zur vereinfachten Bedienung werden Methoden in übergeordnete (*high-level*) Bedienmodule übertragen bzw. zusammengefasst. Die definierten Eingaben (*inputs*) und Ausgaben (*outputs*) vereinfachen das Verständnis des praktischen Nutzens und der potenziellen Variabilität. Die Nützlichkeit der implementierten Methoden für die Gestaltung von Interieur-Bauteilen eines Konzeptfahrzeugs ist praktisch erprobt und bestätigt worden. Dabei erlaubt die Nutzung von algorithmischen Methoden nicht nur eine Vereinfachung des Arbeitsprozesses, sondern ebenfalls das Erzeugen von mit klassischen Gestaltungsansätzen nicht möglichen Entwürfen. Im Gestaltungsprozess ist eine Dialektik zwischen Erzeugung und Wahrnehmung zu erkennen. Die menschliche Wahrnehmung erlaubt die Identifikation von semantischen Zeichen (Semantik) innerhalb einer syntaktischen Elementkonfiguration, welche einen Erzeugungsprozess oder die Erzeugungslogik (Pragmatik) suggerieren. Während diese Arbeit sich weitestgehend auf die syntaktische Ebene von Gestaltung konzentriert, zeigt diese Dialektik jedoch, dass stets Elemente von Semantik

und Pragmatik präsent sind. Erkennbar wird die Dialektik anhand der in den Wertheimerschen Galtsgesetzen formulierten Wahrnehmungsphänomenen. Sie illustrieren, dass unsere Wahrnehmung Gruppierungen und Vervollständigungen von Objekten vornimmt. Diese Gruppierungen, die als emergente Strukturen oder Topologien höherer Ordnung beschrieben werden können, können jedoch mit einer anderen Entstehungslogik erzeugt worden sein als sich visuell vermuten lässt. Insbesondere bei der Generierung von Mustern und Strukturen ist zu erkennen, dass je gröber die Auflösung eines Musters, d.h. die Anzahl von Elementen pro Fläche, desto dominanter werden die einzelnen Musterelemente wahrgenommen. Je feiner jedoch die Auflösung einer Struktur, desto unwichtiger wird das Einzelement und die Struktur wird als Ganzes wahrgenommen. Im Fall von topologisch inkompatiblen Randbedingungen wird festgestellt, dass Muster mit größeren Formelementen sich formal besser anschneiden lassen, während sich die topologische Ausrichtung von feinaufgelösten Strukturen einfacher nachvollziehen lässt. Zudem hat es sich bewährt bei der Erzeugung die deduktiv topologische Information in Form entsprechender Datenstrukturen abzuspeichern, da diese bei zukünftigen Anpassungen eingesetzt werden können, um Gestaltelemente erneut zu transformieren.

7.2 Fallstudie 2 - Algorithmische Generierung von Fahrzeugkörpern

Fallstudie 2 beinhaltet Ergebnisse und Erkenntnisse, die im Rahmen des Forschungsprojekts *Computational Car Design* in Kollaboration zwischen dem *Institut für Computerbasiertes Entwerfen und Baufertigung (ICD) der Universität Stuttgart* und *Mercedes-Benz Design der Daimler AG* entstanden sind. Die wissenschaftliche Entwicklung wurde in Zusammenarbeit mit Sean Ahlquist, Marc Andernach und Nicola Burggraf durchgeführt und durch Prof. Achim Menges betreut. Das Projekt wurde von Bastian Baudy, Karim Habib und Steffen Köhl (*Mercedes-Benz Design*) begleitet. Teile dieser Arbeit wurden in Absprache der *Universität Stuttgart* und der *Daimler AG* bereits 2015 im *Architectural Design Journal* (Baudy et al. 2015) vorveröffentlicht.

7.2.1 Kontext und Zielsetzung

In dieser Fallstudie soll die Anwendbarkeit von Algorithmik zur Erzeugung von Fahrzeugvolumen bzw. dreidimensionaler Fahrzeugproportionen untersucht werden. Ein Fahrzeugvolumen bzw. eine Fahrzeugproportion beschreibt einen abstrakten Körper, welcher nach Hartmut Seeger (Seeger 2014) den Aufbau bzw. den Typus eines Fahrzeugs auszeichnet. Das Fahrzeugvolumen ist für Fahrzeugdesigner ein bestimmendes Element in der ästhetischen Gestaltung eines Automobils. Aus dem Volumen bildet sich die charakterbildende Silhouette und somit der Grundcharakter eines Fahrzeugs.

Das Ziel der Fallstudie ist das Potential einer mathematischen bzw. algorithmischen Methode zur generativen Erzeugung von automobilen Formen zu untersuchen. Für die Generierung von automobiler Proportion werden in dieser Methode mathematische, dreidimensionale Felder, sogenannte *Raumfunktionen* (Wyvill/McPheeters/Wyvill 1986), eingesetzt. Diese morphogenetische Entwurfsstrategie beschreibt einen gänzlich anderen Ansatz zu Entwurf und Modellierung im Automobildesign, denn Geometrie wird hier nicht direkt modelliert, sondern durch Umgebungseinflüsse mathematisch und algorithmisch berechnet, visualisiert und manipuliert. Es handelt sich hierbei um eine Methode, die in der Computergrafik für die Modellierung weicher, natürlicher Phänomene, sogenannter *soft objects* wie Stoffe, Luftpolster, lebende Objekte, Schlamm oder Wasser, bereits angewandt wird. (ebd.) Die Untersuchung von *soft object*-Algorithmen verspricht die computergestützte Erzeugung insbesondere weicher, organischer Fahrzeugvolumen. Der erste Schritt dieser Forschungsstudie beschreibt die Identifikation und Implementierung der relevanten Algorithmen zur Generierung eines abstrakten Fahrzeugkörpers als *soft object*, um mit möglichst wenig vordefinierter Gestaltinformation fahrzeugähnliche Volumen erzeugen zu können. Im zweiten Schritt wird die morphologische Plastizität des generativen Algorithmus erkundet, in dem unterschiedliche inhärente Methodenbestandteile und Variablen auf ihren geometrischen und somit visuellen Einfluss untersucht und angepasst werden. Dies wird anfänglich durch Kombinatorik einfacher Ladungen realisiert und sukzessive in Richtung von automobilen Körpern weiterentwickelt. Im Vordergrund dieser Fallstudie steht sowohl die Erkundung der gestalterischen Potentiale als auch der methodischen Einschränkungen von Computational Design, das im Spannungsfeld zwischen Information, Formation und Performanz operiert.

7.2.2 Methoden

Für die Implementierung der Algorithmik, die Erzeugung des dreidimensionalen Feldes und für die Generierung der polygonalisierten Äquipotentialfläche, wird sowohl die interne, auf *VisualBasic Script* basierende Skriptsprache (*RhinoScript*) der CAD-Software *Rhinoceros*® von Robert McNeel & Associates als auch die auf JAVA-basierende Visualisierungs-umgebung *processing*, initialisiert von Ben Fry und Casey Reas, verwendet. Die Visualisierung der erzeugten Felder wird durch Äquipotentialflächen mit Hilfe eigens implementierter *Marching-Cubes Algorithmen* (Lorenson/Cline 1987; Lewiner/Lopes/Vieira 2003; Newman/Yi 2006) umgesetzt.

7.2.3 Ergebnisse

Traditionell erfolgt der Modellierungsprozess von Fahrzeugkörpern durch eine grobe, unscharfe Erfassung des Volumens, welches durch einen intensiven Detailierungs- und Feinjustierungsprozess seine finale Gestalt erreicht. Auch in dieser Fallstudie wird mithilfe generativer Werkzeuge zuerst ein grobes Volumen erzeugt und dieses anschließend durch Hinzufügen von Ladungen kontinuierlich artikuliert. Auf diese Weise ergibt sich ein fortlaufend ansteigendes Detaillevel des Modells, welches zu unterschiedlichen Zeitpunkten evaluiert werden kann.

Die verwendete, generative Methode zur Modellierung des Körpers erzeugt mithilfe von Ladungspunkten ein virtuelles, dreidimensionales Feld, welches die eigentliche Gestalt beschreibt und durch Änderung der Parameter verschiedener Ladungs-

punkte in seiner Form angepasst wird. Zur Berechnung der dreidimensionalen Felder aus Ladungspunkten wird ein individuell angepasster *Metaball*-Algorithmus eingesetzt, welcher auf der ursprünglich 1982 von James F. Blinn entwickelten Methode zur Generalisierung von algebraischen Flächenzeichnungen (Blinn 1982) basiert. Die anfängliche Investition in eine eigene Implementierung ergibt eine größere gestalterische Flexibilität, denn Funktionen und Parameter des Algorithmus können nach eigenen Ansprüchen im Quellcode individualisiert werden. Die *Metaball*-Methode wird verfolgt, da sie erlaubt Körper ohne geometrische Topologien zu erzeugen. Außerdem erzeugen die mathematischen Gleichungen weiche und harmonische Übergänge zwischen Ladungselementen. Daher bildet diese Methode eine vielversprechende Alternative zur Modellierung von Objekten mit organischer, integrativer Formensprache. Während der *Metaball*-Algorithmus traditionell durch die Verwendung von überwiegend kugelförmigen Ladungsgleichungen dezidiert weiche, rundliche Formen (eng. *blob shapes*) und eine somit limitierte Gestaltbandbreite hervorgebracht hat, ist in dieser Implementierung durch zusätzliche, andersartige Ladungsgleichungen und Ladungsattribute der Möglichkeitsraum für Formen erweitert worden. Es lassen sich mit dieser Implementierung weitere platonische Körper, hier *Metashapes* genannt, in sowohl hexaedrischer als auch oktaedrischer Form einsetzen und diese in ihren Dimensionen richtungsabhängig skalieren. Diese eckigen Ladungsformen ermöglichen die Erzeugung von Kanten und sind ein Mittel um geometrische Artikulation in ein Ladungsvolumen hinzufügen. Zeitgenössische Fahrzeugformen zeichnen sich durch überwölbte, doppelgekrümmte Flächen mit gezielten Kanten aus.

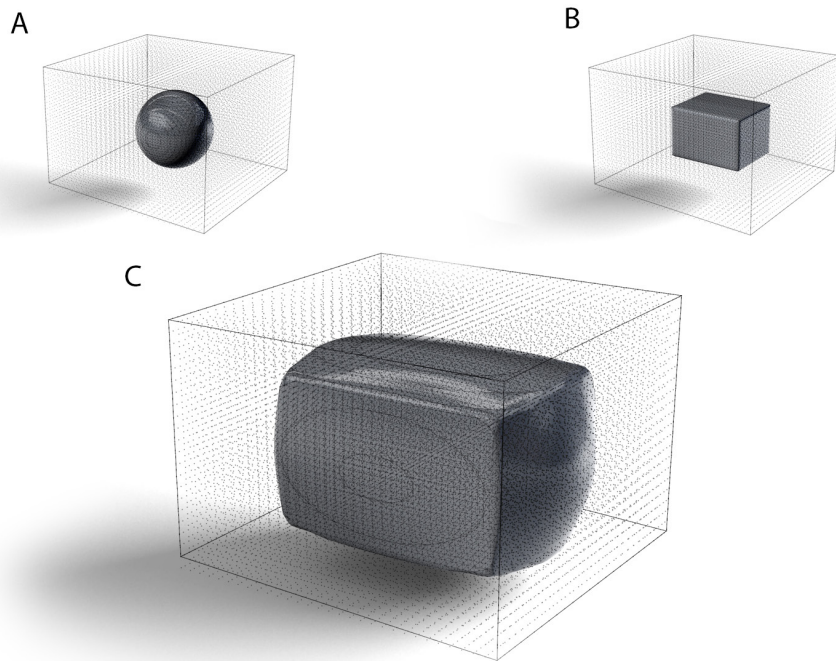


Abb. 21: Visualisierung von Ladungsformen mithilfe von Äquipotentialflächen: (A) Kugelförmige Ladung; (B) rechteckige Ladungsform; (C) Kombination aus kugelförmigen und rechteckigen Ladungsformen.

Die Kombination von eckigen und runden Ladungsformen ermöglicht die Generierung von Objektgeometrien mit einer solchen automobilen Formensprache, welche neben organischen Überwölbungen ebenfalls präzisionssteigende Kanten beinhalten. Bereits durch die Kombination aus jeweils einer kugelförmigen und einer rechteckigen Positivladung kann eine überspannte Würfelform generiert werden, die anschaulich das Grundprinzip von automobiler Formensprache illustriert. Hierbei kann die Stärke der charakteristischen Überspannung (positiv Doppelkrümmung) durch die Intensität der rechteckigen (hexaedrischen) Ladung eingestellt werden.

Es ergeben sich somit für den Gestalter die folgenden Parameter zur Kalibrierung der Ladungselemente:

1. *Ladungstyp*: Durch die Verwendung unterschiedlicher, impliziter Gleichungen können sphärische, hexaedrische und auch oktaedrische Ladungsformen selektiert werden.
2. *Richtungsabhängige Ladungsstärke*: Die Ladungsstärke dient in erster Linie der Gewichtung von Ladungen untereinander und kann separat in X, Y, und Z definiert werden. Somit lassen sich Ladungsformen strecken und stauchen. Kugelförmige Ladungen werden auf diese Weise Ellipsoid-förmig, quadratische Ladungen bekommen eine rechteckige Form.
3. *Polung der Ladung*: Durch Vorzeichenänderungen wird die Polarität von Ladungen definiert. Positive, additive Ladungen werden in negative, subtraktive Ladungen umgewandelt. Mit negativen Ladungen können Felder eingegrenzt werden. Werden bei der Generierung ausschließlich positive Ladungen verwendet, entstehen rein konvexe Feldformen. Konkavität wird durch die Addition von negativen Ladungen erreicht.

Weitere Artikulationsmöglichkeiten ergeben sich aus einer Kombination mehrerer Ladungsfelder, welche separat gestaltet und anschließend strategisch addiert oder subtrahiert werden. Durch die Gestaltung separater Felder kann gezielt auf die Wechselwirkungen zwischen Ladungspunkten und somit auf ihre fließend harmonischen Übergänge verzichtet werden. Mehrere mathematische Felder lassen sich durch Addition oder Subtraktionsverfahren zu einem einzelnen Feld zusammenfügen. Auf diese Weise können boolesche Operationen simuliert werden.

Neben klassischen Additions- und Subtraktionsverfahren von Feldern sollten zusätzlich auch individualisierte, differenzierte Verschmelzungsmethoden berücksichtigt werden, um beispielsweise fließend von einem Feld zum anderen überzugehen. Verlaufsfiler bieten die Möglichkeit den Einflussgrad eines Feldes kontinuierlich auslaufen zu lassen. Auch ist es sinnvoll konstante Details wie Radhäuser oder Grillöffnungen durch absolut definierte Kenngrößen zu fixieren, sodass sie durch die Kombination mit anderen Ladungsfeldern unverändert bleiben.

Die Visualisierung der Felder wird in dieser Fallstudie durch einen *Marching-Cubes* Algorithmus umgesetzt. Dieser Algorithmus analysiert einen definierten Ladungswert und produziert an diesen Grenzstellen Polygoneometrie. Durch dieses Verfahren entstehen stets geschlossene Polyedervolumina, wenn die Grenzfläche des Feldes vollständig innerhalb definierten Berechnungsraums (*Voxelraum*) abgebildet wird. Ein Anschneiden der Grenzfläche des Voxelraums kann eingesetzt werden um bewusst Öffnungen in ein Objekt zu integrieren. Dieser Prozess bietet sich an, um Ausschnitte von Radkästen eines automobilen Volumens zu integrieren. Eine weitere Kontrolleebene zur Manipulation der Felderscheinung ist die globale Deformation des Voxelraums. Auf diese Weise kann ein Volumen nachgeschaltet angepasst werden. Sie bietet sich an um Formen spezifischer Richtungen anzunehmen und/oder gezielt Krümmungsbeschleunigungen anzupassen. Diese nachgeschaltete Transformationsmethode ermöglicht es einem Ladungsfeld eine keilförmige Gewichtung zu geben.

Ist eine generierte Gestalt als Fahrzeugkörper validiert, können die Erzeugungsparameter als genetische Information fungieren und somit als Referenzdaten dienen, um den Gestaltungsraum von automobilen Körpern gezielt einzugrenzen und lediglich Formen inner-

MS-CLS_v4-3_f4455

VOXEL FIELD

x 78
y 18
z 22
resolution 0.5
x equation m/(float)intFieldResolution
y equation k/(float)intFieldResolution
z equation j/(float)intFieldResolution

TRANSFORMATIONS

FC	NG	AF	TBB	RE	MG	DI	GHR	BG	FG	BD
0	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1

ISOSURFACE

threshold 1.1

ATTRACTORS

count 6

ID	X	Y	Z	Xt	Yt	Zt	rad	shp
0	13	-4	0	0.22	0.01	0.09	0.7	0 sphere
1	48	-8	9	0.11	0.22	0.9	3.9	0 sphere
2	64	-1	0	0.02	0.01	0.12	0.6	0 sphere
3	39	3	4	0.22	0.6	1.3	4	2 square
4	46	17	13	0.25	2.81	0.04	-1.4	0 sphere
5	46	0	6	0.04	0.71	10	3	0 sphere

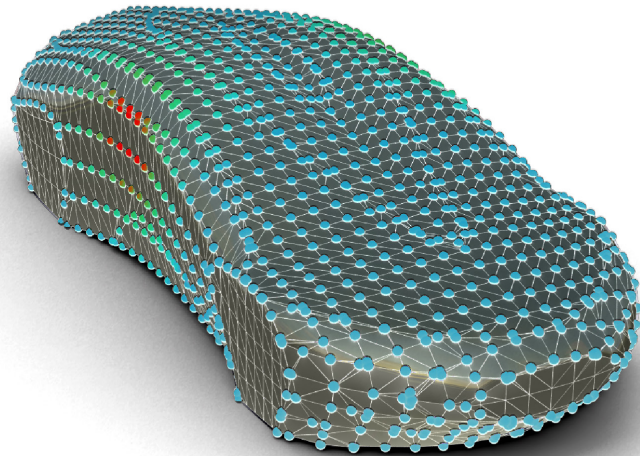
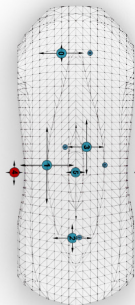


Abb. 22: Generierter Fahrzeugkörper mithilfe algorithmischer Ladungsfelder.

halb dieser begrenzten Parameterbandbreite zu erzeugen. Innerhalb dieser eingegrenzten Parameterbandbreite steigt die Wahrscheinlichkeit, dass erkennbare Fahrzeugvolumen generiert werden. Denn bereits kleine Parameteränderungen erzeugen auffällige visuelle Effekte, die Einfluss auf die Anmutung eines Volumens haben. Um Formen außerhalb dieses Möglichkeitsraums zu berechnen – etwa um gezielt andersartige Automobilformen zu erzeugen – können entweder weitere Parameterbereiche hinzugefügt werden und somit die Bandbreite erweitert werden oder manuell gezielt bestimmte Parameterbandbreiten verändert werden. Eine stark vordefinierte Parametereingrenzung bleibt jedoch stets notwendig, damit als

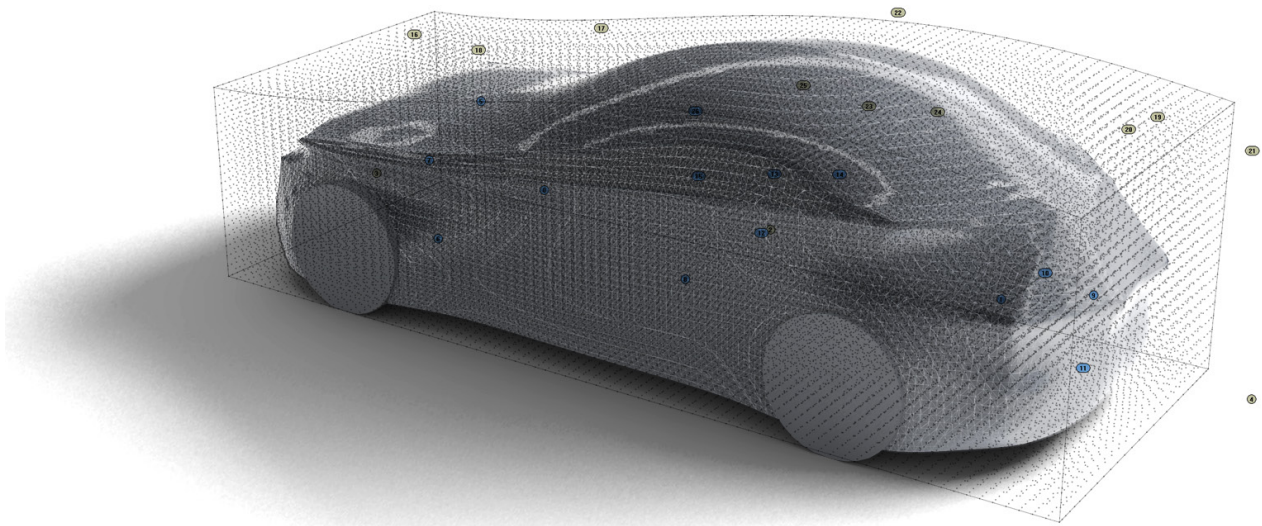


Abb. 23: Generierter Fahrzeugkörper mit nachgeschalteter Transformation des Voxelraums.

Fahrzeug erkennbare Körperformen entstehen.

Die Ergebnisse der Fallstudie zeigen, dass die präsentierte feldbasierte Volumengenerierungsmethode eine rein algorithmische Generierung von Fahrzeugvolumen möglich macht und als Basisbaustein für einen weiterführenden Generierungsprozess eingesetzt werden kann. Denn zur Beschreibung der Fläche wird lediglich geringe (mathematische) Information mit wenigen Parametern benötigt. Die resultierenden Konstrukte sind frei von Limitierungen durch geometrische Topologien und bieten daher flexible, variable Grundkörper. Durch die Verwendung von Äquipotentialflächen ergeben sich zwangsläufig geschlossene Geometrien, die direkt via 3D-Druckverfahren materialisiert werden können.

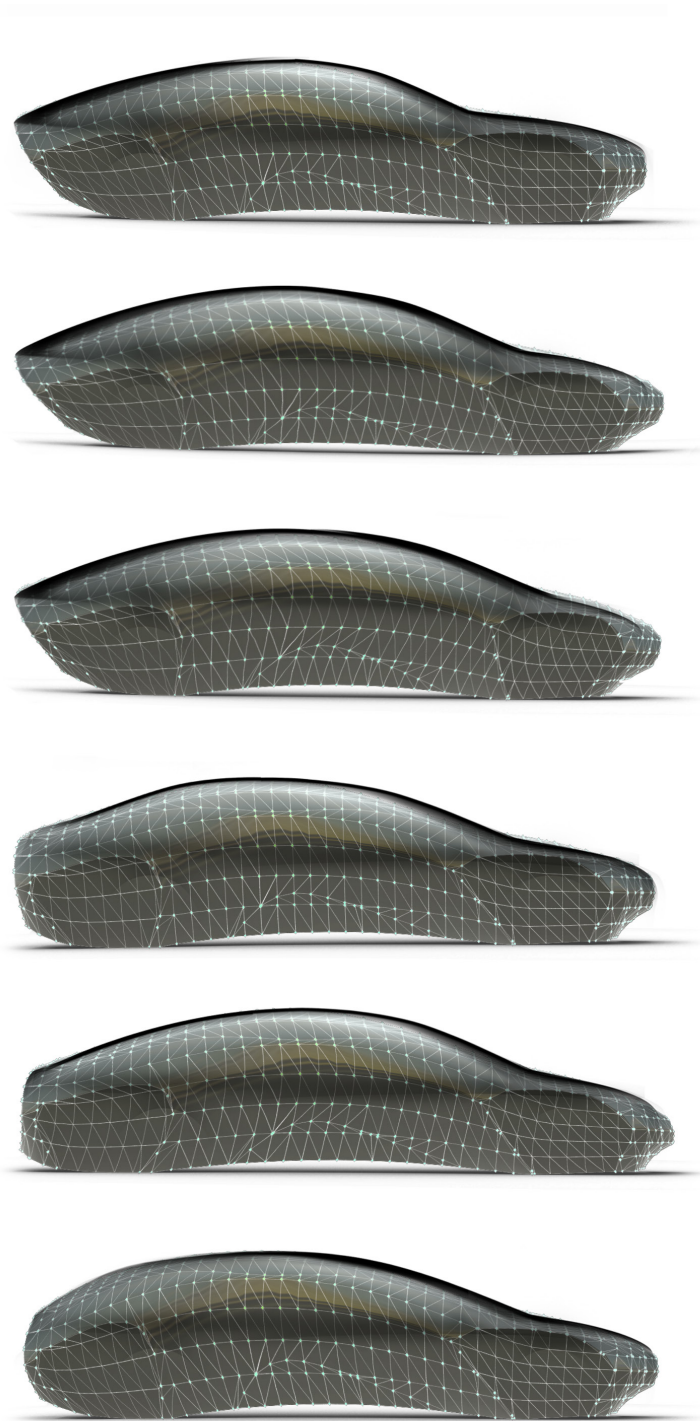


Abb. 24: Seitenansichten algorithmisch generierter Fahrzeugvolumen

7.3 Fallstudie 3 – Algorithmik zur Gestaltanalyse und Gestaltveränderung

In der dritten Fallstudie werden Methoden zur Gestaltanalyse von Fahrzeugformen sowie algorithmische Verfahren zur Deformation von Fahrzeuggeometrie untersucht bzw. neuentwickelt. Die Grundlage der Gestaltanalyse und -veränderung ist in beiden Fällen geometrische Information. Diese setzt eine Quantifizierung von Form voraus. Bei der Analyse von Form wird sich in dieser Studie ausschließlich auf geometrische Information beschränkt. Semantische Information wird bewusst nicht berücksichtigt.

Der erste Teil der Studie befasst sich mit der Analyse von geometrischer Gestalt. Es wird eine in der Biologie bekannte Methode der *Geometrischen Morphometrik* untersucht und für die Anwendung im industriellen Kontext zur Analyse von organischen Fahrzeugformen eingesetzt. Grundlage dieser Methode bildete die Identifikation und Registrierung von Landmarkpunkten, mithilfe welcher eine Reihe an geometrischen Unterschiedlichkeiten identifiziert und visualisiert werden können.

Während die Methoden der *Geometrischen Morphometrik* in der Biologie lediglich analytisch eingesetzt werden, wird im zweiten Teil der Studie das generative Potential der Methoden zur aktiven Deformation von dreidimensionalen Objekten untersucht. Hierzu wurde in Zusammenarbeit mit Long Nguyen eine eigene punkt-basierte Transformationsmethode entwickelt, die eine neuartige, intuitive Herangehensweise zur Verzerrung geometrischer Daten bietet.

7.3.1 Kontext

Bei der Entwicklung von automobiler Gestalt wird zu jedem Zeitpunkt des Gestaltungsprozesses die Qualität des Ergebnisstands untersucht. Physische Modelle werden mithilfe von Flüssigkeiten oder Folien in Verbindung mit strategisch positionierten Lichtquellen begutachtet, um anhand der Reflektionen die Oberflächenqualitäten einer Form zu beurteilen. In digitalen Modellen werden hierzu ähnliche Methoden entwickelt um insbesondere die Krümmung von Flächen zu analysieren. Die Krümmungstetigkeit ist ein wichtiges Kriterium für die Qualitätsaussage von Flächen und ist gerade für hochqualitative Exterieur- aber auch Interieur-Oberflächen von Fahrzeugen von Interesse. Eine Krümmungsanalyse kann auf verschiedene Weise durchgeführt und sowohl auf Flächenmodelle (Seidenberg et al. 1992; Elber 1992), Polygonkörper (Surazhsky et al. 2003; Rusinkiewicz 2004; Becker 2013) als auch Punktwolken (Yang/Qian 2007) angewendet werden. Die Berechnung der Krümmungen kann dabei sowohl numerisch als auch farbig ausgegeben werden (Seidenberg et al. 1992) um exakte (*quantitative*) Auswertungen in tabellarischer Form aber auch relative (*qualitative*) Visualisierungen und Bewertungen wie Graphen und Einfärbungen zu erlauben. Kommerzielle Softwarepakete bieten bereits Funktionen zur Erfassung und Visualisierung von geometrischen Forminformationen digitaler Objekte.

Eine Transformation beschreibt den Übergang von Informationszuständen. Bei Gestaltänderungen wird der Zustand einer Form aktiv transformiert. Bei einer Gestaltanalyse wird neben der Extraktion reiner Forminformation eines Objektes ebenfalls die Analyse von Unterschiedlichkeiten mehrerer Gestalten untersucht. Neben klassischen Analysemethoden für Gestaltungs- und

Ingenieurkonstruktionen haben sich benachbarte Wissenschaften ebenfalls mit der Problematik der Analyse, Beschreibung, Interpretation sowie Veränderung von komplexen Formen befasst. So werden in der Chemie beispielsweise Prinzipien von räumlichen Ordnungen eingesetzt um Funktion und Wirkung von Molekülformationen zu beschreiben bzw. zu verstehen. In der funktionalen Biologie wiederum spielt verstärkt Formbeschreibung und Formanalyse von organischen Körpern eine Rolle, denn die Form eines Lebewesens bzw. die Form eines Organs besitzt durch ihre Gestalt stets biomechanische Funktionen.

Da zeitgenössische Automobile überwiegend aus organischen Formelementen bestehen, scheinen Methoden zur Erzeugung von automobiler Gestalt synergetische Zielsetzungen mit biologischen Analysemethoden zu besitzen. Mit dem Verfahren der *Geometrischen Morphometrik* bzw. *Morphometrischen Analyse* wird angestrebt Teile der organischen Gestalt von Lebewesen zu quantifizieren und individuelle Differenzierung zu extrahieren. Wichtigste Pioniere des Felds der Formanalyse sind D'Arcy Wentworth Thompson, David G. Kendall und Fred. L. Bookstein. (Thompson 1918; Kendall 1977; Bookstein 1989, 2002) Thompson beschreibt in seiner *Theorie der Transformationen* aus seinem Werk „*Über Wachstum und Form*“ (Thompson 1918) geometrische Ähnlichkeiten zwischen Organismen durch mathematische Transformationen, im Speziellen durch Verzerrungen des kartesischen Raums, um Erkenntnisse über die Entwicklung und Morphologie von Lebewesen zu gewinnen. (Arthur 2006) Sein Werk war in seiner Zeit sowohl neuartig als auch revolutionär. Für Jahrzehnte diente es der biologischen Forschung als Inspiration; aber auch andere Disziplinen wie die Architektur untersuchten seinen Ansatz um gestalterische Formwerdungsprozesse zu verstehen. (Hensel 2006; Menges 2006; Weinstock 2006) Kendall wiederum stellt

eine Theorie über Form und Formunterschiedlichkeit auf, welche aussagt, dass die Essenz von geometrischer Form durch all die geometrische Information definiert werden kann, die erhalten bleibt, wenn *Störeffekte* von Position, Skalierung und Rotation aus der Form herausgefiltert sind. (Kendall 1977) Demnach kann eine solche Formanalyse Erkenntnisse über Wachstums- und Formwerdungsprozesse, funktionale Rollen und Auswirkungen zu externen Einschlüssen ergeben. (Zelditch/Swidorski/Sheets 2004) Sie beinhaltet die Erfassung von Information über ein Individuum, interessante Aussagen ergeben sich jedoch erst durch den Vergleich dieser Größen im Verhältnis zu anderen Individuen. Die Analyse biologischer Formen birgt einige Schwierigkeiten. Da biologische Gebilde meist komplexe, organische Formen haben, können selbst einfache Messungen problematisch sein, wenn Messpunkte nicht klar definiert werden können. (Reichert 2010) Ohne einen klaren Bauplan der Form- bzw. Gestaltentstehung kann das Verständnis, die Beschreibung und die Interpretation geometrischer Merkmale schwierig sein. (ebd.)

Um die geometrische Information von Form zu extrahieren, werden Landmarkpunkte an gezielten Positionen einer organischen Gestalt verteilt. Aus solchen formbezogenen Positionsdaten (*registration information*) können anschließend durch mathematische Verfahren (*generalized procrustes analysis*) charakteristische Größen und Verhältnisse berechnet und zwischen unterschiedlichen Spezimen verglichen werden. (Dryden/Mardia 1993) Dabei ist die Genauigkeit der Ergebnisse in direkter Weise abhängig von der Positionierungsgenauigkeit der Landmarkpunkte. Um die Genauigkeit der Landmarkpunkte zu klassifizieren, wurden daher drei unterschiedliche Typen eingeführt: (Bookstein 1989)

1. *Type 1*: Landmarkpunkte des ersten Typus sind klar identifizierbare Punkte. (Zelditch/Swidorski/Sheets 2004) Sie besitzen nur eine minimalste Wahrscheinlichkeit für Fehler und keinerlei Abhängigkeiten zu anderen Punkten. (ebd.) Eckpunkte von Formen können solch leicht identifizierbare Landmarkpunkte des ersten Typus darstellen.
2. *Type 2*: Landmarkpunkte des zweiten Typus sind erheblich schwieriger zu identifizieren. Sie besitzen eine größere Wahrscheinlichkeit auf Fehler und dürfen allenfalls als relative Bezugspunkte zu anderen Punkten definiert werden. (ebd.)
3. *Type 3*: Landmarkpunkte des dritten Typus sind besonders ungenaue Positionsinformationen und sollten daher nur mit äußerster Vorsicht verwendet werden, denn sie können Datenmaterial verfälschen. (ebd.) Nichtsdestotrotz können diese Punkte in einigen Fällen von Relevanz sein.

Im ersten Schritt gilt nun zu untersuchen, ob diese Methode zur Registrierung und Berechnung von Forminformation ebenfalls bedeutsame Information über automobiler Form liefern kann und sowohl intrinsische Gestaltinformation also auch vergleichende Information zwischen unterschiedlichen Fahrzeugformen bietet. Im zweiten Teil der Fallstudie werden formverändernde Eigenschaften von morphometrischen Methoden untersucht, die zur Gestaltungsoptimierung eingesetzt werden können. Gestaltungs- oder Designoptimierung bezeichnet wichtige Vorgänge innerhalb des Gestaltungsprozesses und somit auch in der Entwicklung automobiler Gestalt. (Sieger/Menzel/Botsch 2016) Das Ziel der Designoptimierung liegt in der Entdeckung von alter-

nativen Gestaltausprägungen mit verbesserten mechanischen, physischen, räumlichen oder ästhetischen Eigenschaften. Typischerweise beginnt der Entwicklungsprozess eines Produkts mit der Generierung eines initialen Prototyps, welcher zum aktuellen Zeitpunkt meist mithilfe digitaler Werkzeuge, Computer-Aided-Design (CAD) Software, realisiert wird. Die Daten werden anschließend für digitale Simulationsprozesse in polygonale Oberflächen- oder Volumendaten umgewandelt und analysiert. Im Automobil sind insbesondere aerodynamische oder strukturelle Eigenschaften von Interesse. Aus diesem Grund ist die Generierung von Varianten eines erzeugten Modells sinnvoll um die mechanische bzw. physische Leistungsfähigkeit zu analysieren.

Im Fall von digitaler Geometrie bilden digitale Transformationsmethoden in einem Metamodell die Werkzeuge um Daten, d.h. vorwiegend Geometrie- und Ordnungselemente, zu manipulieren. Diese Methoden zur Veränderung von Form sind im Prozess der Automobilgestaltung grundlegend, die formalästhetische Feinjustierung von Entwürfen ist ein außerordentlich wichtiger Bestandteil des Automobilentwurfs. In jeder Teilgestaltungsaufgabe, ob Fahrzeugexterieur, -interieur oder User-Experience, wird stets großer zeitlicher und finanzieller Aufwand betrieben um Volumen und Flächen zu perfektionieren, stets mit dem Ziel ein Ergebnis mit maximaler Qualität zu erzeugen. Transformation von Geometrie kann durch eine direkte, manuelle Manipulation der Geometrielemente einer digitalen Gestalt vollzogen werden. Dieser Prozess wird durch eine direkte Veränderung der formerzeugenden Parameter erreicht. Als Beispiel kann hier die Veränderung von Kontrollpunkten einer digitalen Flächengeometrie genannt werden. Muss jedoch eine große Menge an geometrischen Elementen wie beispielsweise ein hochauf-

gelöstes Polyedernetz verändert werden, kann eine präzise Formveränderung nicht nur aufwendig, sondern gar unmöglich sein. Aus diesem Grund ist es für Modelleure wichtig, eine Vielzahl von Werkzeugen für die Transformation geometrischer Datenmengen zur direkten Verfügung zu haben.

Eine wichtige Gruppe von Transformationsmethoden bilden die globalen Deformationsmethoden, sie erlauben die algorithmische Steuerung von Geometrieänderungen auf gesamte Geometrieobjekte. Populäre Verfahren für Anpassungen von bestehenden geometrischen Modellen sind *Freiform-Deformationsmethoden*, kurz *FFD-Methoden*. Die Algorithmen der *FFD-Methoden* deformieren mithilfe von mathematischen Funktionen den umgebenden Raum eines Objekts und somit auch das eigentliche Objekt. Diese räumlichen Deformationen wurden erstmals durch Barr (1984) sowie Sederberg und Parry (1986) veröffentlicht. (Barr 1984; Sederberg/Parry 1986) *FFD-Methoden* lassen sich in zwei Hauptkategorien einteilen, (1) rasterbasierte (*lattice-based*) Verfahren und (2) bedingungs-basierte (*constraint-based*) Verfahren. (Bechmann/Gerber 2003) Gain und Bechmann haben eine übersichtliche Auflistung unterschiedlicher *FFD-Methoden* verfasst und kategorisieren diese nach geometrischen Manipulatoren, die die Deformation des geometrischen Raum veranlassen: (Gain/Bechmann 2008)

1. *Volumenbasierte Deformationen* nutzen ein volumetrisches Raster von Kontrollpunkten zum Objekt. (ebd.) In den meisten Fällen handelt sich dabei um quaderartige Kontrollpunktraster. (Sederberg/Parry 1986) Aber auch nicht-quaderartige, volumenbasierte *FFD-Deformationen* sind möglich. (Coquillart 1990)

2. *Flächenbasierte Deformationen* nutzen parametrische Flächen, flächige Polyedernetze oder Vektorfelder um eine Form zu manipulieren. (Gain/Bechmann 2008)
3. *Kurvenbasierte Deformationen* nutzen axiale oder parametrische Kurven zur Deformation von Körpern. Sie bieten sich an, um Biegungen, Verdrehungen und Formschrägen umzusetzen. Diese Methode eignet sich aber auch zur Erzeugung von lokalen Tälern oder Erhebungen sowie Deformationen um ein Kurvenskelett. (ebd.)
4. *Punktbasierte Deformationen* nutzen frei positionierbare Punkte um Objekte zu deformieren. Ein früh vorgestelltes Verfahren punktbasierter Deformation bildet das *DOGME*-Verfahren (*Deformation of Geometric Models Editor*). (Borrel/Bechmann 1991; Bechmann/Gerber 2003) Eine weitere punktbasierte Alternative ist das *Direct-Manipulated-FFD*-Verfahren. (Hsu/Hughes/Kaufman 1992)

Während rasterbasierte *FFD*-Methoden als digitale Transformationsmodule in CAD-Programmen bereits große Anwendung finden, kommen bedingungs-basierte Methoden bisher weniger zum Einsatz. Mit Ausnahme von ausgewählten, punktbasierte Deformationsmethoden sind alle *FFD*-Verfahren topologisch limitiert. Das Anpassen eines Rastersystems an die Form eines Produkts ist in vielen Fällen kompliziert und gar für komplexere Objekte geometrisch sowie topologisch nicht möglich.

7.3.2 Methoden

Die praktische Erprobung und Untersuchung von Transformations- und Formanalysestrategien wurde innerhalb des CAD-Programms *Rhinoceros*® von *Robert McNeel & Associates* und dem Plug-In *Grasshopper* vorgenommen. Hierzu wurde ein Großteil der algorithmischen Logik in den Programmiersprachen *C#* und *Python* für das *Grasshopper* Plug-in realisiert. Die Implementierung von Algorithmen in textbasierte Programmiersprachen verspricht zusätzliche algorithmische Funktionalität und verkürzt Berechnungszeiten von geometrischen Generierungsprozessen. Eine allgemeine visuelle Programmstruktur mithilfe der visuellen Programmiermodule in *Grasshopper* unterstützt die Übersichtlichkeit der Programmstruktur.

7.3.3 Ergebnisse

Die erste untersuchte Methode erlaubt ein Fahrzeug progressiv, non-linear zu skalieren. Auf diese Weise können gezielt Teilbereiche einer Form deformiert werden, während andere Teile ihre Ausgangsform wenig bis gar nicht verändern. Zur Steuerung der Deformation werden in dieser eigenen Implementierung zwei Deformationsobjekte benötigt. Je nach intendierter Deformationsstrategie können unterschiedliche Geometrietypen verwendet werden.

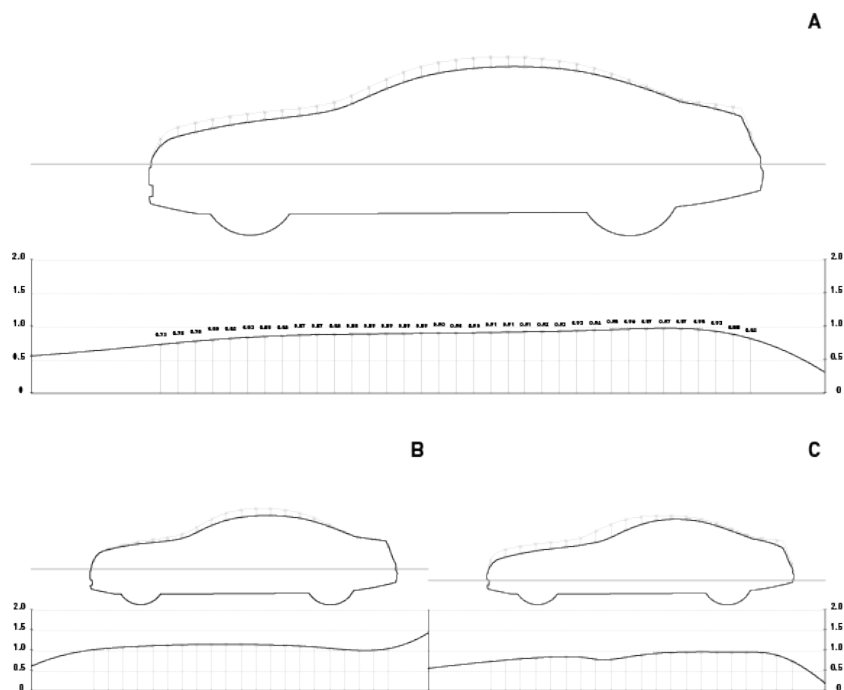


Abb. 25: Partielle, ungleichmäßige Skalierung von Fahrzeugkonturen. Die ungleichmäßige Deformation wird durch die Kontrollpunkte des Graphen indirekt gesteuert. Eine automatisierte Veränderung der Kurve produziert automatisch Formvariationen eines Fahrzeugs.

Im ersten Anwendungsbeispiel wird die Deformation einer kurvenförmigen Fahrzeugsilhouette (*Y0-Schnitt*) transformiert. Hierbei ist insbesondere die Hauben- und Dachform von gestalterischem Interesse. Eine Nullebene beschreibt die Grenze der Deformation, sodass lediglich Geometrieelemente oberhalb der Nullebene von den Transformationen beeinflusst werden. In diesem Beispiel dient als Steuerungsgeometrie eine Kontrollkurve (*law-curve*) um die ungleichmäßige Skalierung zu definieren. Jedem Kontrollpunkt der Fahrzeuggeometrie wird daraufhin, durch die Ermittlung seiner X-Koordinate, ein Transformationswert auf der Kontrollkurve zugeordnet und entsprechend transformiert. Die Position der Kontrollkurve ist hierbei frei bestimmbar, solange Start-, Endpunkt und Null-Ebene referenziert sind. Dies erlaubt eine komfortable Bedienung der Transformation.

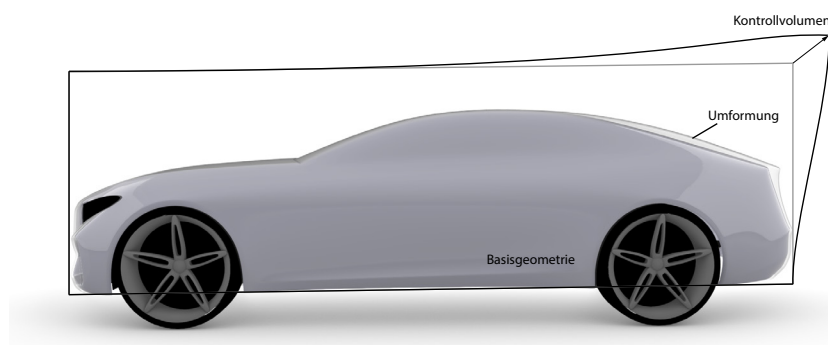


Abb. 26: Fahrzeugvolumendefinition mithilfe eines Kontrollvolumens.

Für dreidimensionale geometrische Körper bietet sich die Nutzung einer Kontrollfläche (*law-surface*) oder eines Kontrollvolumens (*law-volume*) an, auf diese Weise kann die Geometrie in unterschiedlichen Achsdimensionen gesteuert werden. Auch in diesem Fall wird die Position der einzelnen Kontrollpunkte der Objektgeometrie einem Punkt der Fläche zugeordnet. Die Auflösung und Charakteristik der Kontrollkurven bzw. -flächen kann hierbei frei gewählt werden, um maximale Gestaltungsfreiheit zu bewahren.

Non-lineare Transformationsmethoden bilden frei adaptierbare Alternativen zu klassischen Freiformdeformationen (FFDs), um digitale Modelle in ihrer geometrischen Form anzupassen. Sie können durch die Transformation von Eckpunkten (*vertices*) für die Deformation von dreidimensionalen Polygonmodellen oder durch Transformation von Kontrollpunkten auf Kurven-, Flächen- oder Körpermodellen angewandt werden. Durch die Nutzung externer Steuerungsgeometrie lassen sich Veränderungen isoliert visualisieren sowie archivieren. Archivierte Transformationsdaten können wiederum eingesetzt werden um algorithmisch Varianten zu generieren. Diese Methode bietet darüber hinaus Potential zur generativen Nutzung. Denn durch eine beispielsweise stochastische Veränderung der Kontrollkurve kann rein algorithmisch die charakterbildende Fahrzeugsilhouette verändert werden.

Landmarkbasierte Formanalysen sind für die Gestaltung von Fahrzeugen als vielversprechende Methoden zur Erfassung, Archivierung sowie Auswertung von Forminformationen identifiziert worden. Sie können sowohl Anwendung am Gesamtfahrzeug aber auch lokal für die Analyse von Bauteilen oder Bauteilbestandteilen eingesetzt werden. Alternativ zur klassischen Erfassung von Fahrzeugkenngrößen durch Positions-, Distanz-

oder Winkelmessungen, kann durch die Registrierung eines Landmarkdatensatzes eine Vielzahl von relevanten Kenngrößen algorithmisch berechnet werden, aus welchen sich eine weitläufige Quantifizierung charakteristischer, syntaktischer Formeigenschaften ergeben. Die Registrierung der Landmarkpunkte zu einem Positionsdatensatz liegt jeglicher Berechnung zugrunde. Sind mehrere Datensätze mit vergleichbarer Landmarkregistrierung verfügbar, kann neben Einzelauswertungen zusätzlich Vergleichsinformation generiert werden. So dient diese Methode ebenfalls zur Identifikation und Visualisierung von Formunterschiedlichkeit.

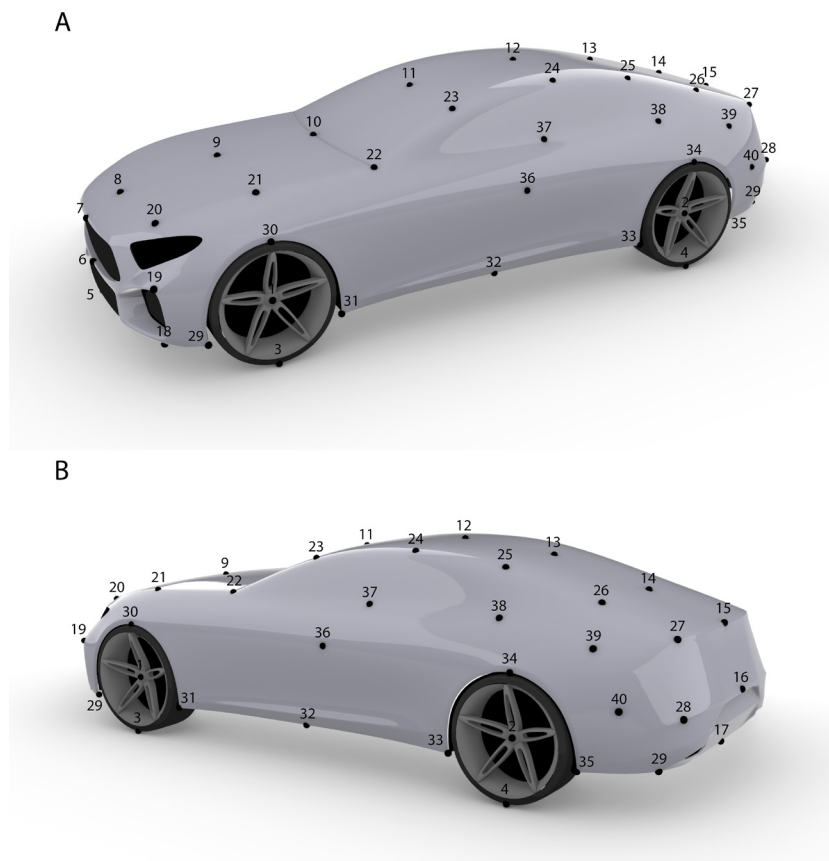


Abb. 27: Landmarkreferenzpunkte zur Proportionsregistrierung

Basierend auf der bereits einleitend beschriebenen, in der Biologie etablierten, morphometrischen Methode zur Quantifizierung und zum Vergleich biologischer Organismen bietet landmarkbasierte Formanalyse eine Basis für umfangreiche Formquantifizierung und den quantifizierten Vergleich gestalteter Formen. Durch nachgeschaltete, statistische Berechnungsmethoden, welche in der geometrischen Morphometrik verwendet werden, können Erkenntnisse über die formalen Eigenschaften einer Gestalt extrahiert werden. Die *Procrustes-Superimposition*-Strategie beispielsweise gleicht Größenverhältnisse und Fehler von Position und Rotation aus, um syntaktische Unterschiedlichkeit (*gestalterische Allometrie*) zu berechnen. (Kendall 1977; Bookstein 1989) Ebenfalls wie in der biologischen Untersuchung von Organismen, sollten registrierte Landmarkpunkte in der Formanalyse von Produktformen in drei Genauigkeitstypen eingeordnet werden, um den Genauigkeitsgrad der Positionsinformation zu klassifizieren. Gerade auf organischen, abgerundeten Formen einer Fahrzeugaußenhaut ist wie bei lebendigen Organismen eine präzise Positionierung an vielen Stellen problematisch.

Eine Klassifizierung der Landmarkpunkte dient dazu optionale Gewichtungen der Punkte zu etablieren, sodass Punkte mit einer höheren Genauigkeitsstufe eine höhere Wichtigkeit und somit größeren Einfluss erhalten. Während in der biologischen Anwendung die Registrierung insbesondere manuell durchgeführt wird, sind in dieser Fallstudie sowohl halbautonome als auch autonome Registrierungsmethoden erprobt worden. Mithilfe einer autonomen Registrierung werden Landmarkpunkte auf einem Objektkörper algorithmisch identifiziert. Zum Zeitpunkt dieser Studie werden jedoch lediglich mathematisch klar berechenbare Punkte so registriert. Zu solch mathematisch

definierbaren Punkten zählen beispielsweise geometrische Hoch-, Wende- sowie Krümmungspunkte. Durch algorithmische Krümmungsanalysen lassen sich eine Vielzahl von Landmarkpositionen automatisch positionieren. Auch Maximalpunkte lassen sich durch *Minimum-Bounding-Box*-Funktionen algorithmisch ermitteln und geben Auskunft über die Gesamthöhe, -länge und -breite des Gesamtfahrzeugs oder lokal angewendet über die jeweiligen Bauteile bzw. Bauteilgruppen.

Der halbautonome Registrierungsverfahren berechnet basierend auf Nutzereingaben relevante Landmarkpunkte. Zur halbautonomen Identifizierung zählen ebenso Landmarkpunkte, die auf Basis anderer (manuell gesetzter) Landmarkpunkte definiert werden. Mithilfe von Attraktorelementen können durch *Nearest-Neighbor*- bzw. *Closest-Point-To-Object*-Berechnung relevante Landmarkpunkte identifiziert werden. Hierzu werden lediglich Attraktorpunkte in Regionen von Interesse positioniert, der Algorithmus berechnet dann den nächsten Punkt bzw. die kürzeste Strecke zum geometrischen Objekt. Bei spiegelsymmetrischen Modellen müssen lediglich einseitig Registrierungen vorgenommen werden, automatische Spiegelungen werden algorithmisch vorgenommen. Bereits aus diesen definierten Registrierungen können Kenngrößen wie Radstand, Fahrzeuggesamtlänge, Fahrzeuggesamtbreite, Fahrzeuggesamthöhe, Fallungsanalysen an variablen Stellen, Analyse des Radlaufs, Silhouette in $\gamma\theta$ und 3D-Silhouette oder Felgenschnitt berechnet werden.

Weitere Positionen mit Relevanz sind halbautonom ermittelbare Binnenpunkte, die zur Beschreibung von Krümmungs- oder Wendepunkten von Flächen und Kurven dienen. Sie zeigen in gekrümmten Kurven und Flächen die Ausrichtung und den Charakter der Kurve bzw. Fläche. Darüber hinaus sind in vielen

Situationen Landmarkpunkte interessant, die nicht unmittelbar auf dem Objekt, sondern in seiner Nähe positioniert sind. Diese theoretischen Landmarkpunkte (*theory landmarks*) können verwendet werden um einen virtuellen Konstruktionsrahmen zu beschreiben. So können Proportionen oder Teilgeometrien eines Objektes simplifiziert und identifizierbare Verrundungen an einem Objekt minimiert werden.

Die vorgestellte punktbaasierte Formanalysemethode zeigt einen Schritt hin zur automatisierten Erfassung der für die Gestaltung von Fahrzeugen relevanten Forminformationen. Insbesondere in wechselnd digital-analogen Gestaltungsprozessen oder in der Rekonstruktion von Bauteilen (*reverse engineering*) kann eine punktbaasierte Formanalyse vergleichbare numerische Daten eines Modells erfassen, sowie Unterschiedlichkeiten zu anderen Modellen identifizieren und visualisieren.

Methoden zur Freiformdeformation von digitalen Modellen erlauben die Gestalt eines Objektes global oder lediglich lokal zu verändern. Aktuelle Methoden kommerzieller CAD-Systeme nutzen limitierende Strukturen zur Steuerung der gewünschten Deformation. Um komplexe, organische Form gezielt zu verändern, sind diese Strukturen in der Handhabung meist kompliziert und wenig intuitiv. Zwar können lineare Modifikationen der Objektgeometrie hiermit effizient durchgeführt werden, non-lineare Veränderungen sind jedoch wegen der geometrischen und topologischen Limitierungen der Steuerungsgeometrie oftmals problematisch. Die überwiegend käfigartigen, externen Steuerungselemente besitzen keine geometrische Relation zum Objekt. Deformationen von Objekten können daher lediglich indirekt gesteuert werden, was die exakte, intuitive Kontrolle über die Deformation eines Objekts einschränkt.

An dieser Stelle wird eine für die technische Gestaltung vielfältige Freiformdeformationsmethode präsentiert, welche zum einen eine besonders einfache und intuitive Bedienung zum anderen durch ihr punktbasiertes Fundament vielfältige individualisierbare Steuerungsmöglichkeiten mit geometrischen Elementen höherer Ordnung verspricht. Die Methode verfolgt den Ansatz ein Modell direkt an seiner Oberfläche zu manipulieren.

Diese universelle Transformationsmethode findet nicht nur im automobilen Industriesektor, sondern ebenfalls in der Luft- und Raumfahrt, Medizintechnik, allgemeinen Produktgestaltung oder zur Verbesserung von mechanischen oder physischen Eigenschaften von Modellen im Ingenieurwesen oder Wissenschaften Einsatz. Der Deformationsalgorithmus nutzt die zuvor präsentierte Landmarkregistrierung um harmonische Transformationen zu berechnen. (ebd.; Bookstein 1997) Dabei verwendet er eine adaptierte *Thin-Plane-Warp*-Methode, die die Wölbung von dünnen Plattenmaterialien durch Verschiebung von Haltepunkten simuliert. (Bookstein 2002; Zelditch/Swidorski/Sheets 2004; Elewa 2010) Während diese Methode überwiegend für zweidimensionale Deformationen eingesetzt wird, soll hier eine dreidimensionale Implementierung vorgestellt werden, um dreidimensionale Objektgeometrien wie Kurven, Flächen oder polygonale Gitternetze durch dreidimensionales Verschieben von Haltepunkten zu realisieren. Landmark-Ankerpunkte dienen hier nicht nur zur Verzerrung von Objektregionen, sondern besitzen ebenfalls die Aufgabe definierte Regionen zu fixieren und den Einfluss von Deformationen lokal zu reduzieren. Der Transformationsprozess kann vom Nutzer entweder manuell durch Reposition einzelner Landmark-Ankerpunkte oder durch eine automatische Übertragung eines Landmark-Datensatzes auf einen anderen durchgeführt werden.

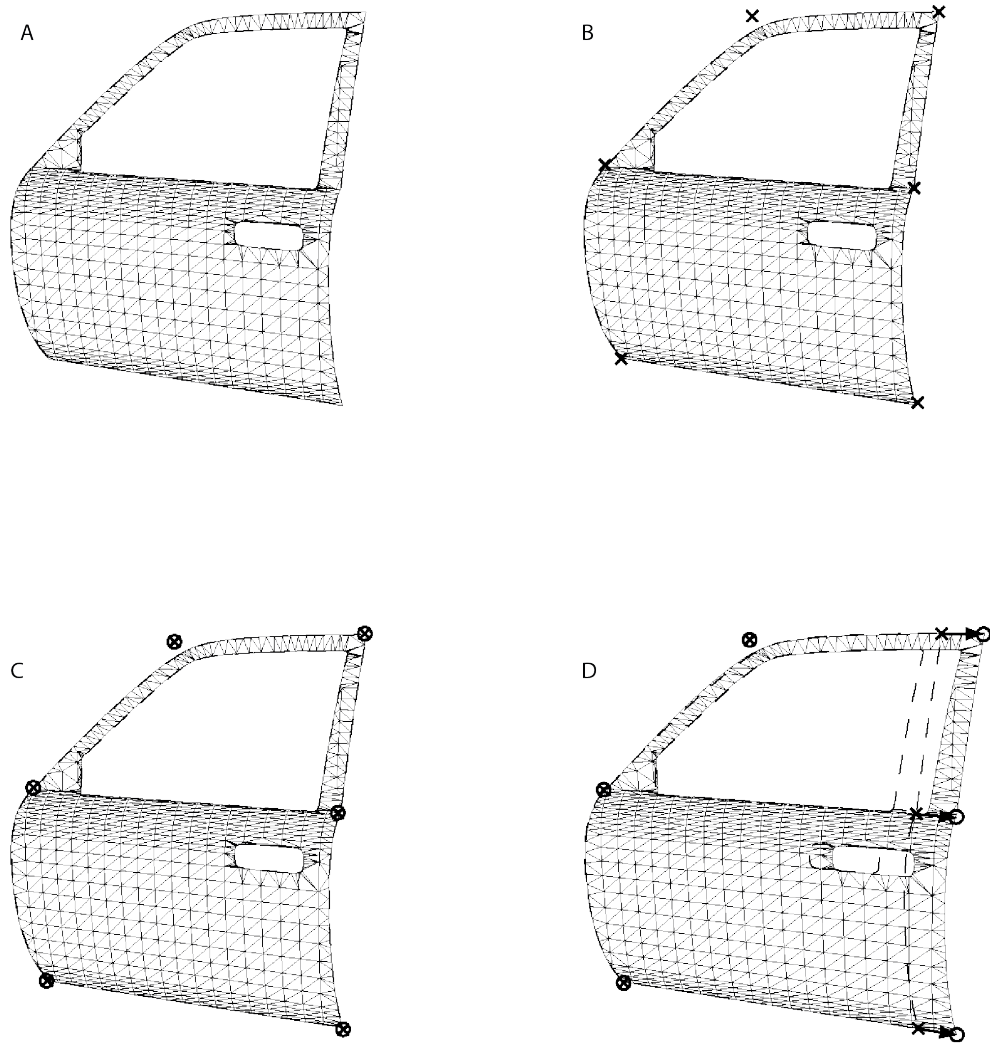


Abb. 28: Prozess der punktbasierten Proportionsanpassung durch manuelle Manipulation der Landmarkpunkte: (A) Zu deformierende Geometrie; (B) Registrierung von Ankerpunkten direkt auf der Geometrie oder frei in der Umgebung; (C) Konvertierung der Referenzpunkte in Manipulationspunkte; oder alternativ Definition eines zusätzlichen Satzes an Manipulationspunkten; (D) Veränderung aller oder einzelner Landmarkpunkte erzeugt sichtbare Deformation des Objekts.

Der manuelle Prozess der Proportionsanpassung beginnt mit der Definition freipositionierbarer Landmarkpunkte. Ist der Landmarkdatensatz finalisiert, werden die Landmarkpunkte mit dem Modell verankert und zur Transformation freigegeben. Ab diesem Zeitpunkt erzeugt eine Veränderung der Ankerpositionen eine entsprechende Deformationsberechnung. Diese Methode erlaubt topologische Transformation von hochauflösender Geometrie mit nur wenigen Verformungssteuerelementen und kann somit als ein effizienter Arbeitsschritt in die wechselnden analog-digitalen Übertragungsprozesse von unterschiedlichen Produktentwicklungen, wie Scandatenmanipulation, Fräs- oder 3D-Druckprozesse in den Feldern der Automobilindustrie, der Luft und Raumfahrttechnik oder der Medizintechnik integriert werden. Im direkten Vergleich zu anderen globalen Deformationsmethoden erlaubt sie non-lineare Transformationen ohne topologische oder geometrische Einschränkungen eines Rasters. Die Ankerpunkte können frei im Raum gesetzt werden und sind nicht in Abhängigkeit zu einem bestehenden zwei- oder dreidimensionalen Raster. Durch die Erhöhung der Landmarkdichte an einem Teil des zu deformierenden Objekts kann an dieser Stelle lokal die Auflösungsgenauigkeit erhöht werden. Die Methode ist nicht auf zweidimensionale bzw. dreidimensionale Räume beschränkt, sondern kann auf theoretische Modelle mit n -Dimensionen erweitert werden

Der zweite Prozess der Proportionsübertragung basiert auf der Registrierung eines Quelldatensatzes und mindestens eines weiteren Zieldatensatzes. Alle Datensätze müssen die gleiche Anzahl und topologischen Zuordnung besitzen. Sind diese Voraussetzungen erfüllt und referenziert, kann das geometrische Modell des Quelldatensatzes auf die Proportion des Zieldatensatzes algorithmisch übertragen werden.

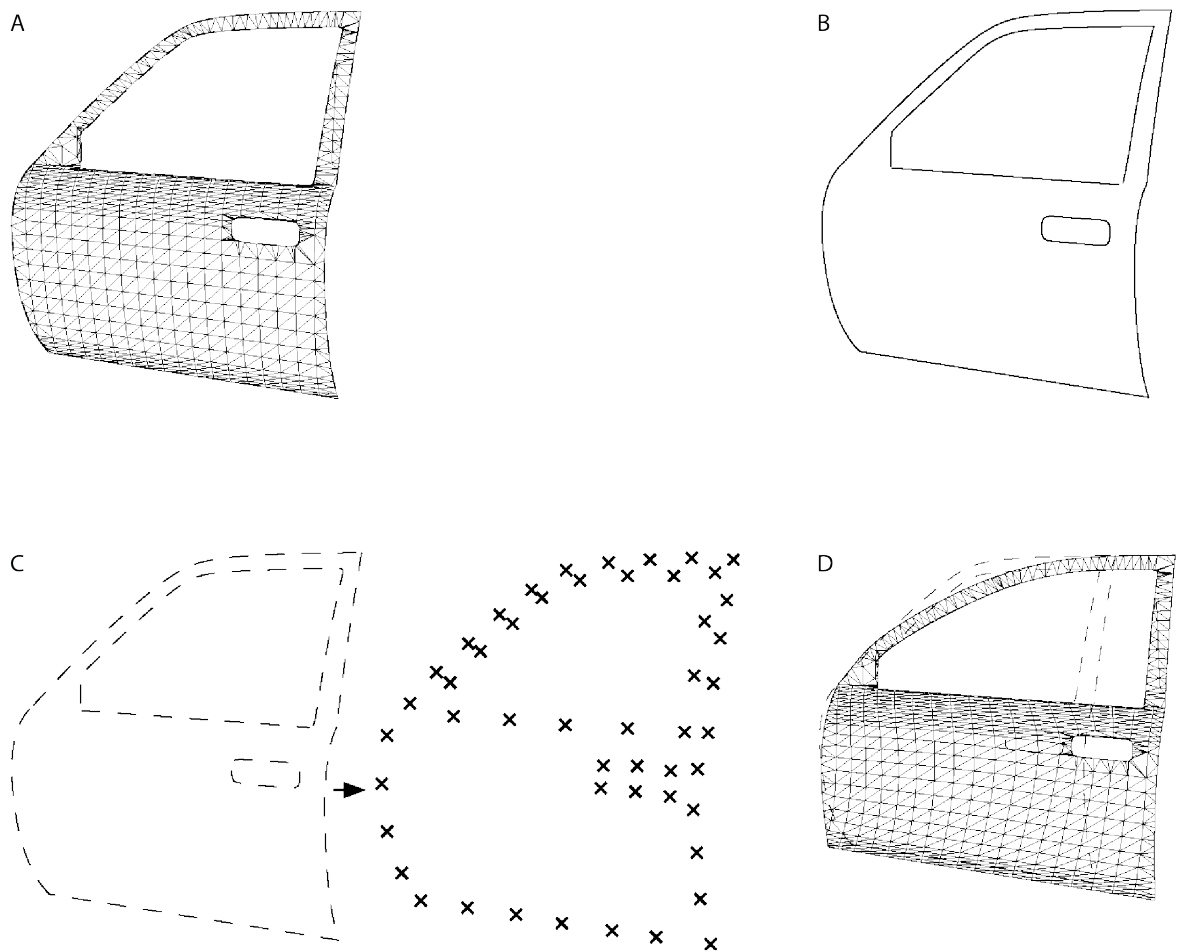
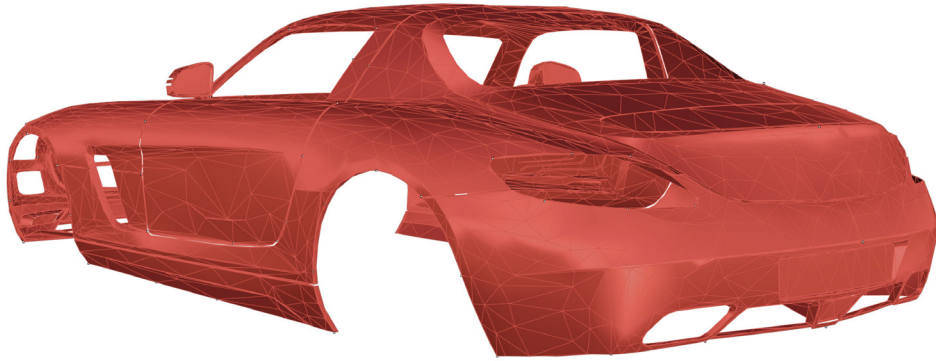


Abb. 29: Prozess der punktbasierten Proportionsanpassung mithilfe von Kurvengeometrie: (A) Zu deformierende Geometrie; (B) Erzeugung von Referenzgeometrie wie Kurven oder Flächen; (C) Automatische Konvertierung von Geometrien in Ankerpunkte mit einstellbarer Auflösung; (D) Veränderung der Referenzgeometrieobjekte erlaubt ungleichmäßige Deformation der anzupassenden Geometrie

Wird ein Landmark-Datensatz auf einen anderen übertragen, kann nicht nur das finale Ergebnis berechnet werden, sondern auch prozentuale Wandlungsschritte zwischen Ursprung und Ergebnis. Durch die Landmark-Registrierung können wichtige charakteristische Informationen einer Gestalt, beispielsweise die Proportion, quantifiziert werden. Diese Forminformationen können in einer Datenbank archiviert werden und neben dem Erkenntnisgewinn über die Form ebenfalls zur Automatisierung von Formerzeugungsprozessen verwendet werden. Auf diese Weise ist es möglich Designalternativen algorithmisch zu generieren und effizient sowohl in unterschiedlichen Phasen der Formfindung als auch im Prototypenbau einzusetzen. Im automobilen Kontext zeigt sich durch diese Methode eine fundamentale Trennung von volumetrischer Proportion und Flächengestaltung. Die Flächenartikulation mit ihren charakteristischen formensprachlichen Eigenschaften eines Fahrzeugs oder gar einer Fahrzeugfamilie ist somit unabhängig von volumetrischer Proportion. Durch die Übertragung einer Gestaltung auf eine andere Volumenproportion wird eine neue Fahrzeuggestalt mit den Genen des vorherigen Modells erzeugt. Diese Methode kann somit als automatisierte Methode zur initialen Analyse von neuen Fahrzeughybridformen oder Nachfolgemodellen dienen. Es ist möglich eine Gestalt vollautomatisch auf die in der Datenbank archivierten Proportionen zu transformieren. Somit lässt sich eine Fahrzeugaußenhautgestaltung auf die Proportionen einer gesamten Fahrzeugflotte automatisiert transferieren. Durch gespeicherte zusätzliche Zustandsaufnahmen lassen sich Prognosen über Entwicklungen von Formen errechnen, was neben Analysen und Prognosen von möglichen Produktentwicklungen aber auch zur Berechnung von Alterungsprozessen verwendet werden kann.

Die punktbasierte Deformationsmethode bietet sich besonders an in der Konzeptionsphase zur Proportionsfindung sowie zur Anpassung in der Gestaltfindung von Produktformen wie Fahrzeugaußenhüllen. Hier sollte sie in die Entwicklungskette zwischen digitalem und analogem Prototypenbau integriert werden, um Proportionsanpassungen flexibler und schneller durchführen zu können. Als Beispiel kann der Algorithmus zur Fräs- oder 3D-Druckdatenerstellung basierend auf hochauflösenden Scandaten von Fahrzeugmodellen verwendet werden, um die Ergebnisse zu modifizieren. Neuartig an der Entwicklung sind sowohl die Konzeption und Entwicklung des Algorithmus, der die Transformation basierend auf einer freien Anzahl frei positionierbarer Landmarkpunkte berechnet, als auch die Methodik der Algorithmussteuerung durch unterschiedliche Geometrieobjekte, Punkte sowie Geometrien höherer Ordnung wie Kurven oder Flächen. Zusätzlich kann eine Gewichtungseinstellung den Einflussgrad der Steuerungsgeometrie lokal anpassen. Somit sind Punkte strategisch, bezüglich der zu deformierenden Form zu positionieren. Durch das Verschieben der Punkte wird die darunterliegende Geometrie durch den Algorithmus gleichmäßig transformiert. Das freie Setzen und Verschieben von Punkten erlaubt Designern und Modelleuren ansonsten schwierig zu bearbeitende Scandaten nach ihren Vorstellungen intuitiv global zu manipulieren. Diese Deformationsmethode bildet ebenfalls eine algorithmische Basis zur generativen Varianzgenerierung. Basierend auf einer Datenbank an Proportionsinformationen können algorithmisch neue Entwürfe generiert werden.

A



B

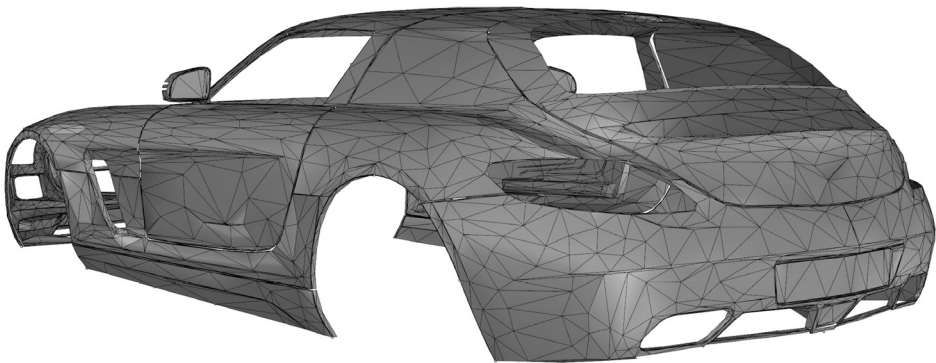


Abb. 30: Lokale Transformation der Kofferraumpartie einer hochauflösenden, polygonalisierten Fahrzeuggestalt. (A) Ursprungsgeometrie, (B) Geometrie nach Transformation

7.4 Fallstudie 4

Algorithmische Flächenartikulation

Fallstudie 4 beinhaltet Ergebnisse und Erkenntnisse, die im Rahmen des Forschungsprojekts *Computational Car Design* in Kollaboration zwischen dem *Institut für Computerbasiertes Entwerfen und Baufertigung (ICD) der Universität Stuttgart* und *Mercedes-Benz Design der Daimler AG* entstanden sind. Die wissenschaftliche Entwicklung wurde in Zusammenarbeit mit Sean Ahlquist, Marc Andernach und Nicola Burggraf durchgeführt und durch Prof. Achim Menges betreut. Das Projekt wurde von Bastian Baudy, Karim Habib und Steffen Köhl (*Mercedes-Benz Design*) begleitet. Teile dieser Arbeit wurden in Absprache der *Universität Stuttgart* und der *Daimler AG* bereits 2015 im *Architectural Design Journal* (Baudy et al. 2015) vorveröffentlicht.

7.4.1 Kontext und Zielsetzung

In der folgenden Fallstudie werden algorithmische Methoden zur generativen Erzeugung von Flächenartikulationen von Fahrzeugenaußenhüllen untersucht. Bereits in Fallstudie 3 wurde identifiziert, dass die Flächenartikulation als eine von der Proportion isolierte Gestalteigenschaft formuliert werden kann. Als Artikulation einer Fläche soll hier die Logik der Beschaffenheit einer Oberfläche beschrieben werden.

Ein populäres Verfahren zur Veränderung von Oberflächenbeschaffenheit ist *Displacement Mapping*. Bei diesem

Verfahren wird mithilfe von Texturen, meist Graustufenbildern, die Oberfläche eines polygonalen Geometrikörpers mit Detailinformation angereichert. Jeder Pixel des Bildes wird einer Position auf dem Körper zugeordnet, welcher in Abhängigkeit vom Helligkeitswert des Pixels in Normalrichtung transformiert wird. *Displacement Mapping* besitzt den Vorteil, dass komplexe und besonders detailreiche Oberflächenstrukturen in einer Transformationstextur abgebildet werden können. Die Qualität der Transformation ist jedoch über die Auflösung der Textur begrenzt.

In dieser Fallstudie werden Transformationen untersucht, welche aus geometrischen Objekten bestehen und somit keine Auflösungseinschränkungen besitzen. Als Basisvolumen für die Methodenentwicklung zur Flächenartikulation von Fahrzeugen dienen generierte, volumetrische Körper (siehe Fallstudie 2) von Fahrzeugen. Des Weiteren sollen als zusätzliche Herausforderung die physischen Materialeigenschaften eines Fahrzeugkörpers in die Oberflächenartikulation eingearbeitet werden. Als physisches Material wird metallisches Blech ausgewählt, welches punktuell verformt werden kann. Es soll untersucht werden, welche charakteristische Formensprache sich aus verformten Metallfaltungen für die Entwicklung von Fahrzeugformen ergibt. Inspiration für diese Materialisierungsart bilden veröffentlichte Arbeiten über das Falten von Blechen (Huffmann 1976; Demaine/O'Rourke 2007; Koschitz/Demaine 2008; Kilian et al. 2008; Tachi 2009; Tachi/Epps 2011; Demaine et al. 2015). Die Kombination von Metallfaltung mit robotischer Fertigung (Epps 2013b) besitzt drei zukunftssträchtige Vorteile für die Produktion von Fahrzeugbauteilen:

1. Für diese Verformungsmethode werden keine ökonomisch und ökologisch aufwendigen Pressformen benötigt, Metallbleche können mit bereits etablierten Industrierobotern geschnitten und frei verformt werden.
2. Sowohl das Verformungswerkzeug als auch die Maschine selbst sind nicht bauteilspezifisch. Bauteile können vor Ort angefertigt werden, was logistischen Aufwand reduziert.
3. Durch die Generalisierung der Herstellungsmaschinen und deren Werkzeuge kann ein höheres Maß an Bauteilindividualisierung erreicht werden.

In der ersten Phase dieser Fallstudie wird das Verhalten von Metallblech mithilfe von physischem Modellbau erkundet. Durch diese manuelle Experimentierphase wird nicht nur empirisches, implizites Wissen über das Deformationsverhalten des Materials gesammelt, es soll ebenfalls in Form eines dokumentierten Katalogs eine Vielzahl an Gestaltungselementen entwickelt werden. Der Katalog bildet die Basis eines gestalterischen Materialsystems und dient gleichwertig der Inspiration und Bewertung des formalästhetischen Potentials dieses Ansatzes.

Im zweiten Schritt der Fallstudie sollen Formteile des gestalterischen Katalogs als generalisierte digitale Formelemente (*design schemas*) (Frazer 2002) formalisiert werden. Um diesen Schritt zu verwirklichen muss eine geeignete Repräsentationsmethodik identifiziert werden, die erlaubt das Verhalten von Metallblech und das syntaktische Ergebnis geometrisch abzubilden. Es werden hierbei sowohl algorithmische Simulationen als auch geometrische Regelwerke untersucht und auf die Repräsentationsqualität und gestalterische Nützlichkeit im

Entwicklungsprozess bewertet.

Als Ergebnis dieser Studie soll eine Methode identifiziert werden, die Objekte erzeugt, deren Form, Material und Formungsmethode in Einklang gebracht wird und die Erforschung durch Metallblech formbarer Ergebnisse ermöglicht. Gleichzeitig soll das ästhetische Potential gekniffter Formelemente als Fahrzeugartikulation untersucht werden.

7.4.2 Methoden

Für die Implementierung der Algorithmik wird sowohl die interne, auf *VisualBasic Script* basierende Skript-Sprache (*RhinoScript*) der CAD-Software *Rhinoceros*® von *Robert McNeel & Associates* als auch die auf *JAVA*-basierende Visualisierungsumgebung *processing* verwendet.

7.4.3 Ergebnisse

Die erste Bearbeitungsphase dieser Fallstudie beinhaltet die Erkundung und Kategorisierung des Verhaltens und des formalen Potentials gefalteter bzw. gekniffter Metallbleche. Als Ergebnis dieser umfangreichen empirischen Explorationsstudie ist ein Katalog an generalisierten Formelementen (*design schemas*) entstanden, welcher eine Übersicht über mögliche Elemente für die Oberflächenartikulation im Bereich der Fahrzeugaußenhaut bildet. Durch die gezielte Schwächung des Materials entlang einer Linie oder Kurve und gezielt angesetzten Druck an gegen-

überliegenden Stellen entstehen gefaltete Teststücke aus Metallblech, von denen Erkenntnisse über das Verformungsverhalten des Materials abgeleitet werden. Die resultierende Krümmung kann über Reflektions- und Glanzeffekte visuell erfahren und bewertet werden. Durch die Deformation verändert sich die Ausrichtung der Bauteilenden.

Acht wichtige Einflussgrößen für das Deformationsverhalten wurden identifiziert:

1. Materialtyp
2. Materialstärke
3. Anzahl der Kniffe
4. Position und Ausrichtung der Kniffe
5. Krümmung der Kniffe
6. Breite und Tiefe der Materialschwächung
7. Ansetzpunkt für die Deformation
8. Deformationsintensität

Der Katalog visualisiert das ästhetische Potential gekniffter Metallformen. Sind Kniffe wie in Typ A durchgängig von Materialkante zu Materialkante gesetzt, entstehen maximal einfachgekrümmte Oberflächen. Es handelt sich hierbei um konische Regelflächen. Sind einige Kniffe gekrümmt, entstehen an der konvexen Seite konvex, positiv überwölbte und gegenüberliegend an der konkaven Seite, negativ überwölbte Flächen. Diese Formen sind ebenfalls bei Verformungen von anderen wenig elastischen Materialien wie beispielsweise Papier zu erkennen. Einfach gekrümmte Flächen erzeugen harte, klar definierte Glanzeffekte und produzieren daher technisch anmutende Oberflächen. Laufen jedoch Kniffe an einer Seite

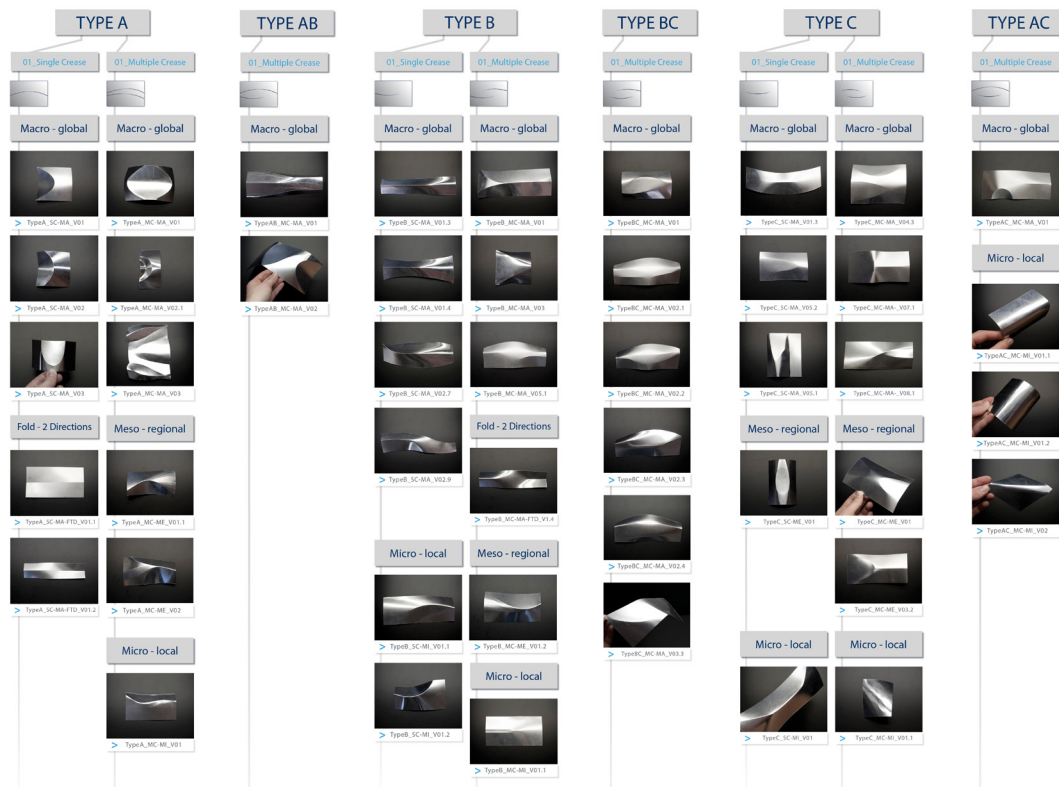
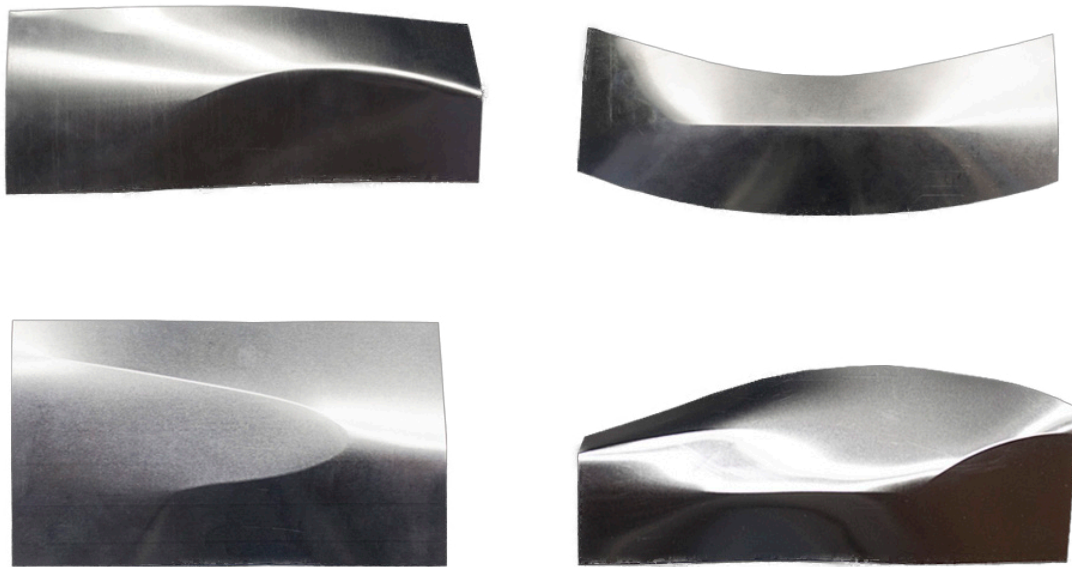


Abb. 31: (oben) Vier Element-Grundtypen; (unten) Katalog gekniffener Metallstücke. Die vier Grundtypen werden nach der Anzahl der Kniffe und nach der globalen, regionalen und lokalen Behandlung der Kniffe eingeteilt.

(Typ B) oder an beiden Seiten (Typ C) aus, entstehen lokal, an diesen Stellen plastische, doppelgekrümmte Verformungen, die nicht durch Papier simuliert werden können. Auch formal-ästhetisch bieten diese Typen einen grundlegend anderen Charakter, denn sie bilden harte Glanzlichter an den Kniffen, die an den Enden kontinuierlich auslaufen. Formelemente des Typs B und C wurden daher für die Erzeugung von automobiler Formensprache als besonders vielversprechend identifiziert.

Die fotografischen Aufnahmen des Katalogs können Designern weiterführend als Gestaltungsmaterial für digitale Zeichnungen (*Renderings*) bzw. Collagen dienen, da anhand der physischen Modelle und Fotografien die Licht- und Schattensituationen des Materials studiert werden kann. Designer können auf diese Weise mit ihren Werkzeugen parallel zur technischen Systementwicklung an topologischen Konstellationen zur Positionierung der einzelnen Spezimina auf einem Fahrzeugkörper arbeiten.

Für die Digitalisierung der Formmodule wurden die physischen Spezimen eingangs digital dreidimensional gescannt. Die somit digitalisierten Punktinformationen dienen als Basis zur Evaluation der Repräsentationsmethoden. Es wird dabei nicht angestrebt möglichst exakte Simulationsmechanismen zu entwickeln, sondern vielmehr eine intuitive und schnelle Repräsentationslogik zu identifizieren, die es erlaubt, das ästhetische Potential von gekniffen Metallblechen digital zu erforschen. Präzise ingenieurtechnische Materialsimulationen (wie *Finite-Elemente-Berechnungen*) können nachgeschaltet werden, um die gestalteten Ergebnisse auf ihre finale Machbarkeit und Steifigkeit hin zu untersuchen.

Die erste Strategie zur Erzeugung digitaler Repräsentationen verfolgt die Nutzung geometrischer Regelsysteme, um die digitale Repräsentationsgeometrie von Metallblech zu erzeugen. Basierend

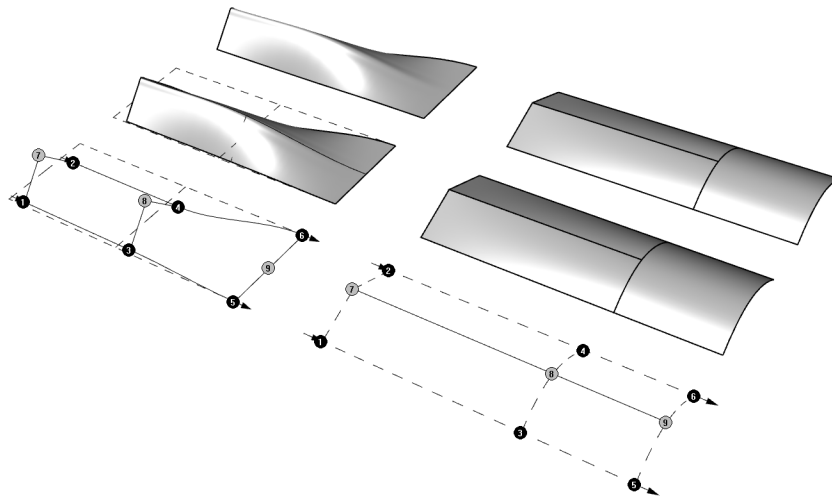


Abb. 32: Geometrische Repräsentation einer Metallkniffung

auf den digitalen Scandaten von physischen Materialien konnten empirisch geometrische Regelmäßigkeiten (Kilian et al. 2008) identifiziert, verifiziert und algorithmisch implementiert werden. Sie erlauben geometrisch ähnliche 3D-Flächenmodelle zu generieren. Mit dieser Strategie wird nicht der Biegevorgang simuliert, sondern der gewünschte Endzustand des Biegevorgangs konstruiert. Über die geometrischen Verhältnisse des Formelements lassen sich nachgeschaltet Annäherungen dieser Formen als flaches, zweidimensionales Schnittmuster erzeugen. In der zweiten Strategie wird eine digitale Simulation des Deformationsprozesses produziert. In diesem Ansatz werden im ersten Schritt Formen zweidimensional konstruiert und durch eine Simulation physischer Kräfte in dreidimensionale Form gebracht. Um das physische Deformationsverhalten digital abbilden zu können, wird das Formelement als zweidimensionale Schnittmusterkontur definiert und im nächsten Schritt mit Linientopologie versehen, die als Fundament für die Simulation der

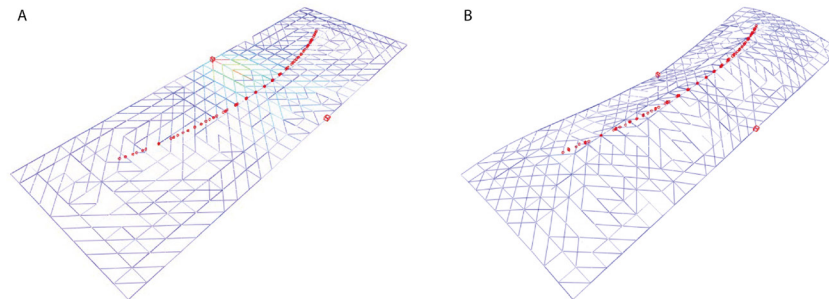


Abb. 33: Deformationsimulation von Metallkniffungen mithilfe digitaler Federsimulationen

materialinhärenten Biegesteifigkeit dient. Durch eine digitale, physikalische Berechnungsmethode (*physics engine*), in diesem Fall *Kangaroo* (Piker 2013), wird diese Linienverteilung als digitale Federn definiert. Bevor der Biegeprozess simuliert wird, werden die Kniffe digital fixiert und anschließend Kräfte auf die Ansatzpunkte der Deformation appliziert. Die *physics engine* berechnet nun durch Homogenisierung der digitalen Feder-spannung (Relaxationsverfahren) iterativ die dreidimensional deformierte Gestalt des Bauteils.

Nach der Testphase beider Strategien wurde überwiegend die erste Strategie der geometrischen Repräsentationsregeln weiterverfolgt. Zwar bietet sie nicht das gleiche Level an Exaktheit wie physikalische Simulationsmethoden, sie hat aber gestalterische Vorteile. Sie erlaubt die Erzeugung dreidimensionaler Form ohne eine Simulationsphase direkt formalästhetisch bewerten zu können, was gerade im Kontext des begrenzten Entwicklungszeitraums einen erheblichen Zeitgewinn darstellt. Nachdem isolierte digitale Formelemente mit inhärenter Materialformungslogik erzeugt werden können, wird sich in der Applizierungsphase auf die Positionierung der Formelemente auf automobile Volumenkörper konzentriert. Hierzu werden sowohl alle

digitalisierten Formelemente als auch alle Volumenkörper mit Landmarkpunkten versehen. Landmarkpunktstrategien bieten nicht nur die Grundlage zur Formanalyse und Formveränderung, sondern können ebenfalls zur topologischen Positionierung von geometrischen Karosserieteilen eingesetzt werden. Für die Verteilung von Landmarkpunkten auf der Oberfläche der Fahrzeugkörper werden die klassischen formbeschreibenden Landmarkpunkte und zusätzlich variierende Binnenpunkte eingesetzt. Letztere freie Punkte erlauben spätere phänotypische Variation. Alle Mechanismen werden auf eine Fahrzeughälfte angewendet und automatisch über die xz -Ebene ($y0$) gespiegelt, um den typisch symmetrischen Charakter von Fahrzeugen zu erhalten. Für die Suche nach der geeigneten Applizierungsmethode werden parallel zwei Ansätze verfolgt.

1. *Halbautomatische Applikationsstrategie*: Die erste halbautomatische Strategie setzt auf das manuelle Setzen von Landmarktopologien, die übereinstimmend mit den Objektlandmarkpunkten einzelner Formelemente sind. Auf diese Weise positioniert ein Anwender ein Formelement halbautomatisch auf einen digitalen Körper. Durch Verschieben der Punkte können Ergebnisse nach eigener Vorstellung angepasst werden. Die Landmarktopologie kann entweder durch das direkte Setzen von Landmarkpunkten auf der Objektoberfläche, aber auch indirekter zu Landmarkattraktoren erfolgen. Letzteres definiert vielmehr einen Positionsbereich. Die exakte Position wird durch einen weiteren Berechnungsschritt definiert.

2. *Vollautomatische Applikationsstrategie*: Die zweite Strategie beschreibt einen vollautomatisierten Ansatz zur Formelementpositionierung auf dem Körper. Hierzu werden durch einen Algorithmus zusätzlich zu den standardisierten Landmarkpunkten gleichmäßig weitere Binnenpunkte gesetzt. Ein weiterer Applizierungsalgorithmus findet Punktgruppen, vergleicht diese mit der Topologie der Bauteile und positioniert bei Übereinstimmung das entsprechende Formelement auf den durch Landmarkpunkten definierten Körper. Über die Verhältnisse der applizierten Punktgruppen lassen sich Krümmungen berechnen, die als Anhaltspunkt für die generelle Ausrichtung möglicher Kniffekanten dienen.

Die Fallstudie verdeutlicht, wie eine Implementierung algorithmischer Methoden zur Simulation von Materialeigenschaften den Gestaltungsprozess mit inhärenten Materialeigenschaften informieren kann. Erfahrungen und Gestaltungsprinzipien wurden sowohl empirisch physisch als auch digital virtuell gesammelt. Anfänglich implizite Gestaltungsprinzipien sind explizit algorithmisch formalisiert worden. Die Erkenntnisse aus physischen Modellen sind in ein digitales Simulationsmodell übertragen worden und bilden somit die Möglichkeit zur Integration physikalischer Eigenschaften in den Designprozess. Dies führt zu einem informierten Designprozess, in dem das Modell kontinuierlich mit Informationen angereichert wird und den ästhetischen Raum kontinuierlich spezifiziert und dadurch reduziert. Limitierungen durch Materialeigenschaften und Herstellungsmethoden lassen sich von Anfang

an in den Gestaltungsprozess integrieren und mit diesen anschließend informiert gestalten. Auf diese Weise können multiple Gestaltungskriterien gleichzeitig behandelt und deren Interaktion kontrolliert werden. Durch die Verwendung dieser spezialisierten Gestaltungsprinzipien entstehen charakteristische Formen, die eine eigene Formensprache oder Ästhetik bilden. Durch die Simulationsmethoden wird eine gestalterische Verbindung zwischen der physikalischen Welt und der virtuellen Repräsentation geschaffen. Das Prinzip der Gestaltung mit digitalisierten Materialprinzipien kann weiter gesteigert werden, indem Materialien in ihren Eigenschaften speziell geformt werden. In dieser Fallstudie wurde speziell mit dem limitierenden Verhalten von Metallblech gearbeitet und der Katalog an Formelementen durch diese Limitierungen entworfen. Neue robotische oder computergesteuerte, additive Materialisierungsprozesse wie beispielsweise 3D-Druckverfahren erlauben es, die erhöhte syntaktisch geometrische Komplexität zu materialisieren. Auf diese Weise wird nicht nur die Gestalt, sondern ebenso die Materialbeschaffenheit und die daraus folgenden funktionalen und strukturellen Fähigkeiten eines Objekts gestaltet.

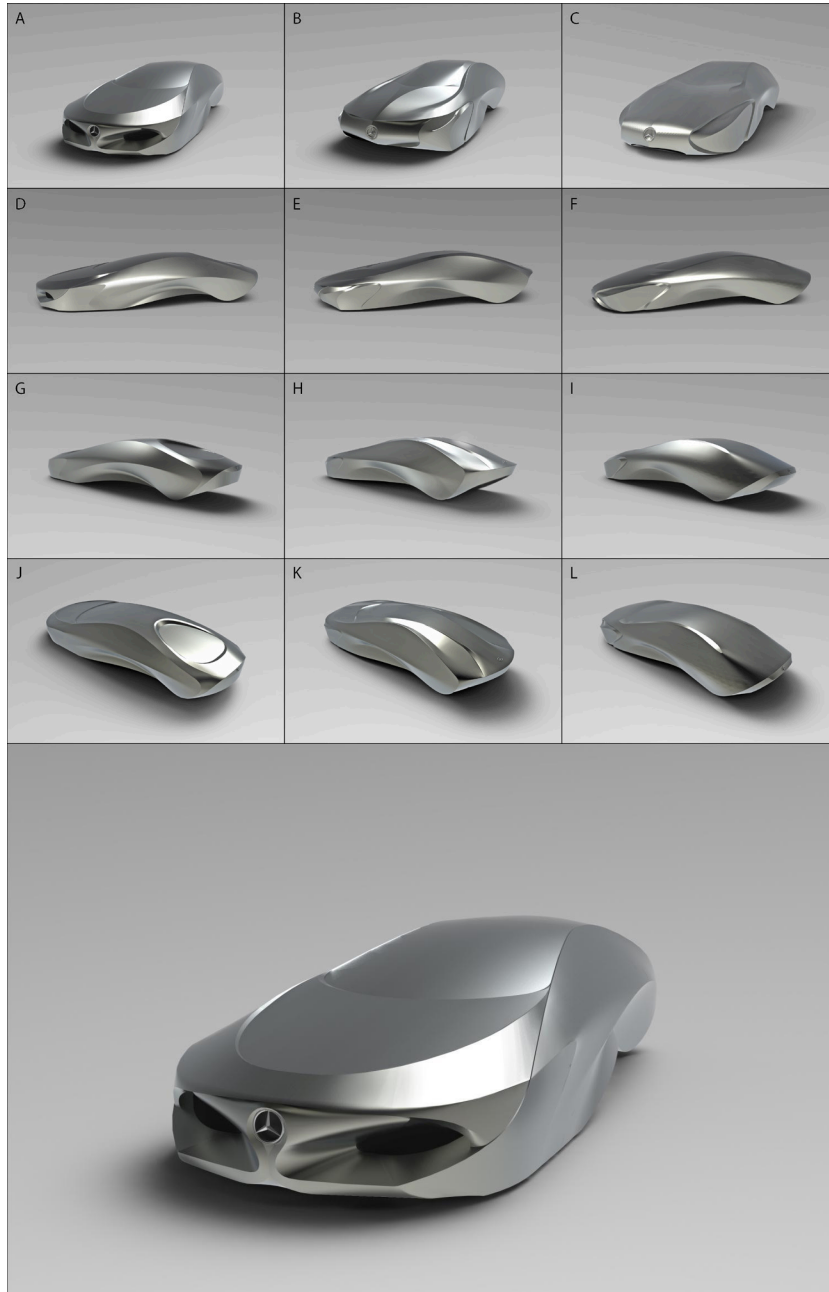


Abb. 34: Drei Flächenartikulationsvarianten mit inhärenter Materialverformungslogik. Alle Artikulationen basieren auf einem Fahrzeugkörper und teilen sich somit volumetrische Proportionen.

7.5 Fallstudie 5

Algorithmische Varianzbildung

Fallstudie 5 beinhaltet Ergebnisse und Erkenntnisse, die im Rahmen des Forschungsprojekts *Computational Car Design* in Kollaboration zwischen dem *Institut für Computerbasiertes Entwerfen und Baufertigung (ICD) der Universität Stuttgart* und *Mercedes-Benz Design der Daimler AG* entstanden sind. Die wissenschaftliche Entwicklung wurde in Zusammenarbeit mit Sean Ahlquist, Marc Andernach und Nicola Burggraf durchgeführt und durch Prof. Achim Menges betreut. Das Projekt wurde von Bastian Baudy, Karim Habib und Steffen Köhl (*Mercedes-Benz Design*) begleitet. Teile dieser Arbeit wurden in Absprache der *Universität Stuttgart und der Daimler AG* bereits 2015 im *Architectural Design Journal* (Baudy et al. 2015) vorveröffentlicht.

7.5.1 Kontext und Zielsetzung

„Der Erweiterung des Denkens dienen [...] Übungen der Variation und Kombination.“

(Itten 2003, 62)

In der Fallstudie wird das Potential von varianzbildenden Computational Design Strategien untersucht und praktisch erprobt. Das Ziel dieser Studie ist die Hinterfragung und Erweiterung etablierter Gestaltungsprozesse zur Erzeugung automobiler Formvarianz. Hierbei sollen insbesondere algorithmische Such-

methoden zur Erkundung formaler Varianz erforscht werden. Die Basis der Studie bildet ein Metamodell, welches aus unterschiedlichen, generalisierten Bestandteilen (*design schemas*) (Frazer 2002) besteht, die durch Parameter gesteuert werden können. Durch das kontinuierliche Festlegen von Werten entsteht ein definiertes berechenbares Ergebnis als visualisierbares Geometrie-modell. Durch die Definition eines Parameterwerts als Variable kann ein Spektrum an Ergebnissen ausgegeben werden. Die Vielfalt an Formunterschiedlichkeit kann anhand eines Möglichkeitsraums beschrieben werden, welcher akademisch auch als *morphospace* (Eble 1999; Mitteroecker/Huttegger 2009; McGhee 2006; Menges 2012) oder *fitness landscape* (Frazer 2002) bezeichnet wird. Zwei Variablen ergeben ein zweidimensionales Feld an möglichen Ergebnissen, während bereits drei Variablen einen dreidimensionalen Raum an Möglichkeiten ergeben. Jede weitere Variable erhöht den Möglichkeitsraum um eine weitere Dimension. Dies kann schnell zu einer nicht berechenbaren Anzahl an Möglichkeiten führen. Aus diesem Grund kann eine umfassende Exhaustionsmethode (*Brute-Force-Methode*), welche schlicht alle möglichen Ergebnisse berechnet, nur angewandt werden, wenn lediglich ein stark begrenzter Lösungsraum untersucht wird.

“Dennoch sei erwähnt, dass wir im Prinzip einen simplen Algorithmus aufstellen können, der alle Objekte einer Klasse erzeugt, indem er alle möglichen Kombinationen durchspielt. So einfach ein solcher Algorithmus wäre, so unbrauchbar wäre er andererseits. Denn er würde ja angesichts des riesigen Umfangs dieser Klassen Jahrtausende benötigen, bevor ein erstes ‚interessantes‘ Objekt erzeugt wäre“
(Nake 1974, 104)

Rittel/Webber (Rittel/Webber 1973) und Simon (Simon 1996) haben erkannt, dass Gestaltungsprobleme nahezu unmöglich vorzudefinieren sind. Die Schwierigkeit freier Gestaltungsaufgaben liegt darin, dass lediglich abstrakte Zielsetzungskriterien existieren. Ein hermeneutischer Prozess (vgl. hermeneutischer Zirkel) (Ast 1808; Heidegger 1926) beinhaltet eine Vermutung oder unbestätigtes Wissen. Basierend auf dieser Vermutung wird das Feld bearbeitet. Die Vermutung wird während der Bearbeitung entweder bestätigt oder angepasst, bietet jedoch die Basis für einen Prozess der kontinuierlich die Erarbeitung eines Wissensgebiets erlaubt. In der Informatik werden Algorithmen, die Ergebnisse für unvollständig definierte Probleme suchen, als *Metaheuristik* bezeichnet und eingesetzt, sobald klassische Optimierungsberechnungen nicht mehr anwendbar sind. So sollen in dieser Fallstudie unterschiedliche heuristische Methoden untersucht werden, um mithilfe des Metamodells Variationen zu generieren, diese zu visualisieren und nach verschiedenen Kriterien zu analysieren. Auf der Suche nach dem ‚*Interessanten*‘ und ‚*Neuen*‘ sind die charakteristischen Eigenschaften des neu Entstehenden noch nicht bekannt und daher nicht vordefinierbar. In Gestaltungsprozessen entwickelt sich die gestalterische Fragestellung *ko-evolutionär* (Dorst/Cross 2001) zu möglichen Lösungen.

Unter dem Übergriff *evolutionärer Algorithmen* sind Optimierungsmethoden zusammenfasst, die Prinzipien natürlicher Evolution nutzen. Es wird im Allgemeinen zwischen *Evolutionärer Programmierung* (EP) (Fogel/Owens/Walsh 1966), *Genetischen Algorithmen* (GAs) (Holland 1992) und *Evolutionären Strategien* (ESs) (Rechenberg 1973; Schwefel 1977) unterschieden. Diese Algorithmen nutzen einen Prozess, der mit anfänglich zufällig gesetzten Suchpunkten, anschließend

durch Prinzipien der *Selektion*, *Mutation* und (in vielen Fällen) *Rekombination* neue Individuen erzeugen. Eine Fitnessfunktion beschreibt die Bewertungskriterien und die Zielsetzung der Optimierungsbemühung. (Bäck/Rudolph/Schwefel 1993) Evolutionäre Algorithmik wird bereits im technischen Kontext für die Entwicklung von Fahrzeugteilen oder Einstellungen erfolgreich eingesetzt. So beschreibt beispielsweise (Deb/Saxena 1997) die Nutzung genetischer Algorithmen zur Optimierung der Fahrwerkseinstellung von Fahrzeugen, sowie zur Optimierung von Ventilsteuerung (Kazancioglu et al. 2003), Tragwerksoptimierung (Leiva et al. 2001), Crashverhalten (Duddeck 2007), Aerodynamik (Bentley/Wakefield 1997) und Fluidodynamik (Frazer 2002). Die beiden letzteren Studien beinhalten zudem ein Beispiel einer simplen Methode zur Fahrzeugvolumengenerierung. Insbesondere für den Motorsport sind solche Optimierungsmethoden interessant, da das Fahrzeug so auf unterschiedliche Fahrbedingungen eingestellt werden kann. (Wloch/Bentley 2004) Auch im architektonischen Kontext werden evolutionäre Algorithmen verwendet, um den Raum von Gestaltungsmöglichkeiten zu erkunden (Menges 2012).

Im Folgenden sollen ähnliche Strategien auf konzeptionelle Fahrzeuggestaltung angewandt werden und deren Potentiale und Schwierigkeiten für Gestaltungsaufgaben erforscht werden. Es wurden sowohl biologisch inspirierte, evolutionär konvergente Methoden (Bentley/Corne 2001) aber auch einige stochastisch, kombinatorisch divergente Strategien untersucht und praktisch erprobt. Zudem sollen als Ergebnis dieses Prozesses drei Modellvarianten präsentiert werden, die die phänotypische Plastizität des algorithmischen Metamodells und den resultierenden Möglichkeitsraum repräsentieren.

7.5.2 Methoden

Die algorithmische Erzeugung von Gestaltungsvarianten wurde sowohl in der internen Skriptsprache (*Rhinoscript*) der CAD-Software *Rhinoceros* von *Robert McNeel & Associates* als auch in der Programmiersprache *JAVA* in Kombination mit der Visualisierungsumgebung *processing* umgesetzt.

7.5.3 Ergebnisse

Als Ergebnis dieser Untersuchung ist ein morphogenetischer Generierungsprozess entwickelt worden, der automobilähnliche Körper erzeugen kann. Als Basis für das digitale Generierungssystem dient das in Fallstudie 2 entwickelte System zur Generierung von Fahrzeugkörpern (*metashapes*) sowie das in Fallstudie 4 entwickelte System zur Flächenartikulation. Diese Modellbestandteile bieten die Grundlage für die Variabilität in Proportion und Artikulation. Das Fahrzeugvolumen kann durch Position, Ladungsstärke und Landungsform der Ladungsobjekte angepasst werden. Die Körperoberfläche (*Äquipotentialfläche*) kann durch einen Grenzwert verschoben werden. Die Artikulation der Fläche wird durch die Auswahl des Formelementtyps und/oder die Attribute der Landmarkpunkte in Position, Größe und Ausrichtung und Kniffe variiert. Der strukturelle Aufbau des Metamodells bildet das genetische Fundament für den biologisch inspirierten Generierungsprozess. In Kombination mit den vordeklarierten Variablenbereichen des Metamodells entsteht ein Möglichkeitsraum, der eine Generierung von fahrzeugähnlichen Ergebnissen und gleichzeitig ein hohes Maß an unerwarteten Lösungen zulässt.

In den vorherig diskutierten Fallstudien wurden isolierte Methoden zur Generierung von Fahrzeugteilgestalten wie Fahrzeugvolumengenerierung, Transformation von Geometrikörpern sowie die Flächenartikulation isoliert angewendet. Kombiniert lassen sich algorithmisch erkennbare Fahrzeuggestalten generieren. In dieser Fallstudie sind die Parameterbereiche von Modellbestandteilen gleichwertig eingesetzt worden. Je nach Erkundungsziel können diese jedoch in Hinblick auf Proportion oder Artikulationsunterschiedlichkeit gewichtet werden.

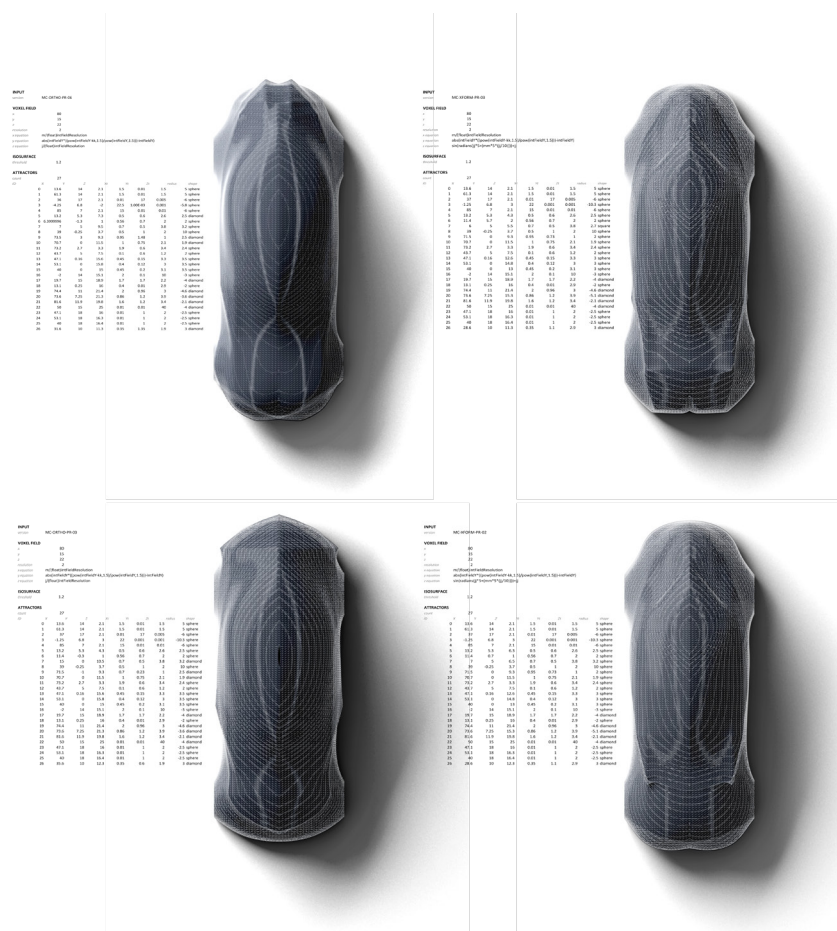


Abb. 35: Population generierter Fahrzeugkörper (Lösungsinstanzen).

Der erste Schritt zur Umsetzung dieser Variationsgenerierungsmethode sah vor, eine Reihe an Lösungsinstanzen mit zufälliger Parameterauswahl zu generieren. Diese Maßnahme ist mit der evolutionären Mutation zu vergleichen. Algorithmische Mutation wird erreicht, indem für jede Variable ein zufälliger Wert innerhalb des definierten Variablenraums zugeordnet wird. Sind alle Variablen definiert, kann ein Ergebnis dargestellt werden. Diese randomisierten Ergebnisse helfen einen initialen Eindruck über die Parameterbereiche und phänotypische Plastizität des Systems zu erhalten. Sie bilden die Basis für weitere Berechnungsmöglichkeiten, da auf Grundlage dieser Ergebnisse die Startparameterbereiche evaluiert werden können. Der stochastische Ergebnisgenerierungsschritt funktioniert vollständig automatisiert und kann ohne weitere Nutzereingriffe kontinuierlich Resultate generieren.

Der zweite Schritt beinhaltet die Selektion. Sowohl in der biologischen Evolution als auch in diesem algorithmischen Prozess beschreibt die Selektion die Bewertung und Auslese der resultierenden Individuen. Integrierte Formanalyse ermöglicht aus den digital generierten Ergebnissen absolute Kenngrößen wie beispielsweise Fahrzeuglänge, -breite, -höhe oder das Fahrzeugvolumen zu errechnen. Diese Faktoren bilden numerische Grundlagen für eine informierte Bewertung generierter Ergebnisse. Zu diesem Zeitpunkt lassen sich aus berechenbaren Kenngrößen nur sehr limitierend Information über die globale Anmutung des Fahrzeugs herauslesen. Der entwickelte Algorithmus besitzt deshalb keinerlei Anzeige über die formalästhetische und semantische Qualität des Ergebnisses. Es wurde bewusst kein Regelwerk für ein ästhetisches Maß (Birkhoff 1933) aufgesetzt. Formalästhetische Bewertungen werden durch den Anwender getroffen und an den Algorithmus weitergegeben. Dies spiegelt sich in

der Praxis durch die kontinuierliche Reduktion der Variablen-spektren wieder, was zu einer fortlaufenden Eingrenzung des Möglichkeitsraums führt. Zur Bewertung der Individuen werden somit sowohl einige berechenbare morphologische Kenngrößen in Betracht gezogen als auch ein durch die Gestalter projiziertes formalästhetisches Potential des Ergebnisses. Hierbei wird die Stimmigkeit des globalen Gesamterscheinungsbilds als lokaler und regionaler Teilbereich analysiert und sowohl die Individuen mit dem vielversprechendsten Gesamtergebnis, also auch die Individuen mit geringster Qualität identifiziert. Würde sich die Bewertung der Ergebnisse wie beispielsweise bei (Bentley/Wakefield 1997) auf eine finite Anzahl an definierbaren Parametern reduzieren, würden sich unterschiedliche klassische Optimierungsalgorithmen anwenden lassen, sodass auch der zweite Schritte der Selektion vollständig automatisiert ablaufen könnte.

Sind sowohl vielversprechende Resultate als auch solche mit geringem Potential ausgewählt, werden im dritten Schritt, in der Rekombination, aus dem genetischen Potential dieser Ergebnisse neue Individuen erzeugt. Hierzu werden zwei Strategien verfolgt:

1. *Reduktion des Möglichkeitsraums:* In dem konvergenten Schritt der Parameterreduktion werden genetische Parameterbereiche mit negativer Wertung aus dem Generierungsbereich des Metamodells entfernt. Durch diese Maßnahme verkleinert sich der Möglichkeitsraum, sodass Objekte dieser Art nicht mehr erzeugt werden können. Durch iteratives Durchlaufen dieses evolutionären Formwerdungsprozesses wird der Ergebnisraum kontinuierlich eingegrenzt, bis lediglich zufriedenstellende Resultate erzeugt werden.

2. *Parameterrekombination*: Die zweite divergente Strategie beschreibt die Verschmelzung der genetischen Information vielversprechender Ergebnisse. Auf diese Weise können Hybridlösungen (Nachkommen) dieser Ergebnisse erzeugt werden. Durch zusätzliche Zufallsfunktionen kann auch in diesem Schritt unerwartete Mutationsvarianz erreicht werden.

Diese Fallstudie zeigt, dass Algorithmik zielführend zur Erkundung von Varianz und Alternativen in der Gestaltung eingesetzt werden kann. Mit Hilfe eines digitalen Modells wird eine virtuelle Repräsentation des zu gestaltenden Objekts geschaffen, die visuell, numerisch und technisch analysiert und bewertet werden kann. Dabei bietet der virtuelle Raum Möglichkeiten der Varianzerzeugung, die durch physische Modelle nicht zu erreichen sind. Die Fallstudie bestätigt, dass ein Großteil des Prozesses der Varianzgenerierung automatisiert werden kann. Somit lassen sich in kürzester Zeit eine große Anzahl an Varianten bilden. Innerhalb des Möglichkeitsraums des Metamodells kann diese Strategie effizient eingesetzt werden, um die Unterschiedlichkeit der abbildbaren Ergebnisse zu erforschen. Durch gezielte Rekombination der Ergebnisse können diese sowohl als Inspirationswerkzeug als auch zur Ergebnisdokumentation nützlich sein. Diese Herangehensweise an die Gestaltung von Objekten unterstreicht eine systemische Auffassung von Computational Design Strategien. Eine Produktentwicklung wird hier vielmehr als die Entwicklung einer genotypischen Spezies betrachtet, aus der phänotypische Produktindividuen resultieren (vgl. Mayr 1997). Die Unterschiedlichkeit zwischen den Individuen beschreibt die phänotypische Plastizität des Systems, welches sich aus den unterschiedlichen Systembestandteilen zusammensetzt.



Abb. 36: Matrix generierter Lösungsinstanzen.

Eine Herausforderung bei der Nutzung von Varianzgenerierungsstrategien ist die Definition der Systemgrenzen des Modells. Ist ein Modell als besonders offenes System definiert, steigt die Wahrscheinlichkeit auf unzufriedenstellende Lösungen. Ist wiederum ein Modell zu enggefasst, ist das Varianzspektrum dementsprechend eingeschränkt. In diesem Fall sind Ergebnisse zu einem großen Teil vorhersehbar und die Wahrscheinlichkeit, dass sie als Inspiration für einen Designer dienen, stark begrenzt. In der Definition des Modells und seiner Varianzparameter liegen die potenziellen Chancen aber auch Schwierigkeiten dieser Methoden. Aktuell ist eine formale Beschreibung automobiler Gestalt und somit ihre automatisierte Bewertung noch unzureichend, denn die Problematik der Entwicklung einer Methode zur automatisierten Identifizierung funktional und gestalterisch funktionierender Ergebnisse ist noch nicht gelöst. Eine Implementierung von Bewertungsregeln der Resultate ist für gestalterische Aufgaben daher nicht sinnvoll, ein Eingreifen des Nutzers, hier des Designers, für Bewertungsschritte ist notwendig.

*„This is why it is misleading to talk of design as a problem-solving activity-it is better defined as a problem-finding activity. This has been very frustrating for those trying to assist the design process with computer-based, problem-solving techniques. By the time the problem has been defined, it has been solved. Indeed the solution is often the very definition of the problem.“
(Frazer 2002, 253)*

Es gilt zu bedenken, dass im Automobildesign die Qualität des Ergebnisses im unmittelbaren Vordergrund steht. Der Entstehungsprozess ist von untergeordneter Wichtigkeit. Aus diesem Grund sollte das primäre Ziel nicht sein, die Entwicklung eines Gestaltungsprozesses als Ganzes zu automatisieren, sondern viel mehr Teilschritte zu formalisieren und den Gestaltungsprozess an den entscheidenden Stellen durch Algorithmik zu bereichern. Auf diese Weise entwickelt sich der Computer zur Partnertechnologie des Designers. Die Fallstudie zeigt weiterführend, dass die Qualität der Ergebnisse primär von der Ausarbeitungsqualität des Metamodells abhängig ist. Um möglichst gute Ergebnisse zu erzeugen, kann ein verhältnismäßig großer Aufwand für die Erzeugung des funktionierenden Modells notwendig sein. Ist ein hohes Maß an Flexibilität im System vorgesehen, beschreibt das Modell in den meisten Fällen lediglich die wichtigen Gestaltungselemente. Das Resultat sind abstraktere Ergebnisse. Ausdefinierende Details und Verblendungen sind in den meisten Fällen phänotypischer Natur und können nur bis zu einem sehr geringen Maß in die genotypische Logik eingearbeitet werden. Durch die erhöhte Abstraktion und Positionierbarkeit von Formelementen eines offenen Systems sinkt zudem die Wahrscheinlichkeit, dass vollkommen zufriedenstellende Ergebnisse resultieren. Es muss an dieser Stelle, wie aber auch an anderen Stellen des Gestaltungsprozesses ein Kompromiss aus Darstellungsgeschwindigkeit und Darstellungsqualität (*speed vs. quality*) getroffen werden. Es bleibt zu bedenken, dass in den meisten Fällen die generierten Ergebnisse eine (manuellen) Überarbeitungsphase erfordern, um die finale Gestaltungsqualität zu erreichen.

Für die effiziente Nutzung varianzgenerierender Algorithmik muss daher zu Beginn die Frage gestellt werden, ob sich die

initiale Investition in die algorithmische Generierung auszahlen wird oder ob nicht andere Prinzipien der Erkundung des Möglichkeitsraums durch alternative Steuerungen des Modells schnellere, zufriedenstellende Lösungen hervorbringen. Denn es besteht die Gefahr, dass ein erwünschtes Zielergebnis außerhalb des abbildbaren Variantenspektrums liegt und die anfängliche Investition in ein aufwendiges System sich nicht auszahlt.

7.6 Fallstudie 6

Computational Design für aktive/wandelbare Fahrzeugdesignelemente

Diese Fallstudie wurde in enger Zusammenarbeit zwischen dem Institut für Computerbasiertes Entwerfen und Baufertigung (ICD) der Universität Stuttgart und Mercedes-Benz Design der Daimler AG bearbeitet. Der Entwicklungsprozess des gezeigten Konzeptfahrzeuges wurde durch von der Universität Stuttgart entwickelte Algorithmik und Computermodelle unterstützt. Gleichzeitig wurden die entwickelten Methoden im praktischen Kontext einer Konzeptfahrzeugentwicklung erprobt. Das Konzeptfahrzeug wurde in einem Zeitraum von elf Monaten entworfen und gefertigt. Die Fahrzeugstudie „*Concept Intelligent Aerodynamic Automobile*“, kurz *Concept IAA*, wurde auf der *Internationalen Automobil Ausstellung (IAA) 2015* in Frankfurt erstmals vorgestellt. Fotografisches Bildmaterial wurde mit freundlicher Genehmigung von Mercedes-Benz Design bereitgestellt.

7.6.1 Kontext und Zielsetzung

In dieser Fallstudie sollen algorithmische Gestaltungsmethoden in etablierte automobiler Entwurfsprozesse integriert und anhand der Entwicklung eines Konzeptfahrzeugs *Mercedes-Benz Concept Intelligent Aerodynamic Automobile (Concept IAA)* praktisch erprobt werden. Dabei sollen Erkenntnisse gewonnen

werden, ob und wie sich Computational Design Strategien unter hohem Zeit- und Ergebnisdruck in der Praxis von Automobildesign einsetzen lassen. Die Fallstudie untersucht empirisch, welche mathematischen und algorithmischen Methoden sich in frühe Projektphasen bestehender Gestaltungsprozesse integrieren lassen. Des Weiteren wurden Erkenntnisse über den kontinuierlichen, digitalen Datenaustausch zwischen virtuell digitalen und physisch analogen Darstellungsmedien und -modellen gesammelt.

Konzeptfahrzeuge, auch Forschungsfahrzeuge oder Showcars genannt, sind für die Fahrzeugentwicklung und insbesondere den Diskurs von Automobildesign von großer Wichtigkeit, denn sie zeigen in meist überzeichneter Form Wege für die Fortentwicklung des Automobils. Mithilfe von Konzeptfahrzeugen loten Automobilhersteller die Möglichkeiten neuartiger Technologien, Funktionen und/oder Formensprache in Gestalt abstrakt realisierter Entwürfe aus. Gleichzeitig bieten sie eine Möglichkeit Kunden auf zukünftige Entwicklungen vorzubereiten und deren Reaktion zu analysieren.

Um Form und Funktion in diesem Projekt in harmonischen Einklang zu bringen und eine hohe technische und ästhetische Performanz aus der Kombination beider zu erhalten, sind im ersten Schritt Zieleigenschaften von beiden Kategorien definiert worden: Als Formensprache für die Gestalt des Fahrzeugs dient die Mercedes-Benz Design-Philosophie „*Sensual Purity*“ (Mercedes-Benz 2016), die sich durch emotionale aber gleichzeitig klare und reduzierte Formen auszeichnet, während auf der funktionalen Ebene ein aerodynamischer cw-Wert von 0.19 als Ziel gesetzt worden ist. Es werden daher einerseits gestalterische und andererseits funktional aerodynamische Verbesserungsstrategien benötigt. Um den besten Kompromiss

aus Gestaltung und funktionaler Effizienz zu erzeugen, ist ein Gestaltungsprozess entwickelt worden, der beide Aspekte simultan weiterentwickelt und kontinuierlich in Einheit bringt. Funktionale, aerodynamische und gestalterische Ziele stehen jedoch in Konflikt, aus welchem Grund eine enge Zusammenarbeit zwischen den Experten aus Aerodynamik, Umsetzungsingenieuren und Designern unumgänglich ist. So verläuft die Gestaltentwicklung stets in interdisziplinärer Kommunikation mit Experten der Umsetzung und der Aerodynamik, um direkt funktionale Eigenschaften der Gesamtform zu identifizieren und anzupassen.

Klassische Maßnahmen zu Verbesserung der Aerodynamik einer Fahrzeugform sind beispielsweise ein schmales, tropfenförmig auslaufendes Heck sowie abgedeckte hintere Kotflügel (Seeger 2014). Diese Gestaltmerkmale finden sich bei vielen aerodynamisch optimierten Fahrzeugformen. Aus diesem Grund ähneln sich viele aerodynamisch optimierte Fahrzeuge in ihrer Erscheinung. In diesem Projekt wurde aerodynamische Optimierung gewünscht, ohne jedoch die Gestaltungsfreiheit des Fahrzeugs einzuschränken. Anstatt einen gemäßigten Kompromiss aus beiden Unvereinbarkeiten von Form und Funktion zu entwickeln, wurde mit diesem Fahrzeug die Strategie verfolgt, die Ziele beider Seiten in vollem Umfang zu erfüllen. Aus diesen Voraussetzungen entwickelte sich das Konzept der Transformation des Fahrzeugs von einem ästhetisch optimierten Zustand in einen funktional optimierten Zustand, denn aerodynamische Effizienz ist vor allem bei höheren Geschwindigkeiten relevant.

Der Projektverlauf lässt sich rückblickend in zwei wichtige Phasen aufteilen. Die erste Entwurfsphase gilt der Entwicklung und Analyse möglichst unterschiedlicher Ideen und Konzepte.

Dieser non-lineare Entwicklungsprozess zeichnet sich durch eine Koevolution aus Fragestellung (Konzept) und Lösung (Konzept-idee) aus. Große gestalterische Freiheiten im Entwicklungsprozess eines Forschungsfahrzeugs bergen ein gewisses Risiko für die gestalterische Anwendung wissenschaftlicher Methoden, denn schnelle gestalterische Richtungsänderungen können Methodenentwicklungen behindern und gar obsolet machen. Gleichzeitig bieten solche freien Projekte jedoch die Chance neuartige Ansätze und somit Innovation zu verfolgen.

Gestalterisch konzentrieren sich die Designer zunächst auf die Entwicklung der Gesamtkörperform. Der Gestaltungsprozess beginnt mit Ideenskizzen, um ein elegantes Volumen für das Coupé sowie charakterbildende Formelemente und Grafiken zu entwickeln. Hierbei dienen, neben der Berücksichtigung der Design-Philosophie von Mercedes-Benz, firmeneigene Rekordfahrzeuge und moderne Hochgeschwindigkeitsboote als Inspiration. Es wird dabei versucht durch ästhetische Dekomposition Formelemente dieser Inspirationsquellen zu identifizieren, zu isolieren und in eigene Entwürfe für die Form und Formelemente des Fahrzeugs einfließen zu lassen. Basierend auf den Skizzen ist ein digitales volumetrisches Polygonmodell (mit *Autodesk Maya*) erzeugt worden. Diese virtuellen Volumenmodelle dient zur schnellen und flexiblen, dreidimensionalen Gestalterzeugung. Gerade im frühen Stadium des Entwurfsprozesses zeichnet sich die Stärke von Polygonmodellen ab, denn es werden nur verhältnismäßig wenige Geometrie- und Steuerungsinformation benötigt, um ein abstraktes Fahrzeugesamtvolumen zu beschreiben. Änderungen am Volumen sind in diesem nicht-detaillierten Zustand sehr schnell durchführbar.

„Jede Fahrzeuggestalt besteht grundsätzlich aus Funktionselementen. Alle diese Funktionselemente sind gleichzeitig oder ‚mitreal‘ (M. Bense) auch Designelemente!“
(Seeger 2014, 217)

Um auf der funktional, gestalterischen Entwicklungsseite Anwendungsarten und -orte für transformierende, aerodynamische Formelemente zu identifizieren, sind die unterschiedlichen Bestandteile einer Fahrzeuggestalt mit jeweiligen Perspektiven untersucht worden, wie beispielsweise die Kühlermaske, das Fahrzeugheck, der Radkasten und Radbestandteile. Insbesondere bei der Entwicklung der aerodynamischen Transformationsmaßnahmen sollen Anwendungsmöglichkeiten für algorithmische Methoden untersucht werden. Denn schon zu einem frühen Zeitpunkt im Designprozess können zweidimensionale, digitale Modellskizzen produziert werden, aus denen durch die Verwendung unterschiedlicher Parameter direkt verschiedene Variationen eines Fahrzeugbauteils erzeugt werden können. Durch sich ändernde Anforderungen und Lösungsansätze muss sich ein Modell in dieser frühen Gestaltungsphase flexibel ändern können. Aus diesem Grund muss das Modell so konstruiert sein, das schnell visuell zufriedenstellende Ergebnisse entstehen. Die Wiederverwendbarkeit bestehender Algorithmenbausteine hilft, das Aufsetzen eines Gestaltungssystems zu beschleunigen. Gleichzeitig erzeugen solch wiederkehrende Form- und Verteilungselemente gestalterische Homogenität. Nachdem die Entscheidung über das Gesamtkonzept, d.h. die grobe Gesamtform sowie einzelne gestaltdefinierende Formelemente, getroffen worden sind, geht die Fahrzeugentwicklung in die zweite Phase der Detailierung und Ausarbeitung. Diese

Phase ist dadurch charakterisiert, dass sich weniger grundlegende Gestaltentscheidungen des Fahrzeugs ändern, sondern vielmehr bestehende Elemente konkretisiert werden. Die gestalterische Konzentration liegt auf den Attributen von Formenelementen, d.h. Größenverhältnisse (Proportionen), Krümmungen, Linienführungen u.v.m.

Ein dreidimensionales Datenmodell aus Polygonen des ausgewählten Konzepts dient der weiteren Ausarbeitung als Basis für CNC-gefräste physische Plastilin-Modelle. Der Plastilin-Rohling kann anschließend manuell durch Designer und Modelleure traditionell physisch ausgeformt werden. Durch 3D-Scanverfahren werden die analog durchgeführten Änderungen erneut digitalisiert. Somit bildet sich eine gestalterische Spirale, bei der Änderungen abwechselnd jeweils vom digital virtuellen Raum ins analog physische und vice versa vorgenommen werden. Nach einigen Digital-Analog-Schleifen in Modellmaßstabgröße 1:4 wird die weitgehend ausdetaillierte Gesamtform auf den 1:1 Maßstab übertragen. Auch in Originalgröße wird das digital-analog-Feedback fortgeführt. Sobald die gesamte Gestaltung des Fahrzeugs abgeschlossen ist, werden die dreidimensionalen Formdaten an das zuständige Ingenieurteam für die physische Umsetzung weitergegeben. Algorithmische und assoziative Modelle sollen in der zweiten Prozessphase unterstützend für die Gestaltung von Anbauteilen und der aerodynamischen Maßnahmen eingesetzt werden.

7.6.2 Methoden

Die praktische Implementierung der Fallstudie ist überwiegend in der visuellen Programmierungsumgebung *Grasshopper* der CAD-Software *Rhinoceros*® von *Robert McNeel & Associates* realisiert worden. Innerhalb dieser visuellen Programmiersprache wird mit Hilfe der textbasierten Programmiersprache Python (*IronPython*) auf die internen Skriptfunktionen zugegriffen und somit die visuellen Programmierfähigkeiten durch textbasierte Programmierfunktionen erweitert. Während die allgemeine algorithmische Struktur mit Hilfe der visuellen Programmiersprache umgesetzt worden ist, werden komplexere Algorithmen in textbasierten Strukturen generiert. Auf diese Weise wird die Komplexität eines Metamodells mithilfe einer global visuellen Programmstruktur innerhalb von *Grasshopper* reduziert und die Geschwindigkeit der textbasierten Programmprozesse, unter anderem durch die Implementierung der Microsoft Parallelisierungsbibliothek beschleunigt.

7.6.3 Ergebnisse

„Die Designer bedienen sich neuester algorithmischer Entwurfsmethoden, um die komplexe geometrische Gestaltung zu bewältigen. Die individuell angepasste Software erlaubt es, dynamisch im dreidimensionalen Raum zu gestalten. Diese dynamische Modellierung macht es möglich, verschiedene Zustände simultan anzuzeigen und zu gestalten. Die so entstandenen hochkomplexen Geometrien wurden mit Hilfe neuartiger Fertigungstechniken (Rapid Prototyping) in die Realität umgesetzt.“

(Mercedes-Benz 2015)

Als Ergebnis dieser Fallstudien werden Computational Design Strategien vorgestellt, die bei der Entwicklung von Bauteilen für das Konzeptfahrzeug Mercedes-Benz *Concept Intelligent Aerodynamic Automobile* eingesetzt worden sind. Als Startpunkt für die Konzeptentwicklung dieses Gestaltungsprojektes dienen Vorgaben über das Package des intendierten Fahrzeuges. Als *Package* werden die groben Abmessungen des Fahrzeuges sowie die Bauräume technischer Bauteile verstanden. Als Fahrzeugtyp wiederum ist ein sportliches, viertüriges Coupé definiert worden. Das zentrale Thema des Fahrzeugkonzepts ist Transformation. Ab einer Geschwindigkeit von 80 km/h wechselt das Fahrzeug automatisch seine Gestalt, von einem eleganten, urbanen Design in einen auf Langstrecke optimierten Aerodynamik-Modus. In letzterem erreicht das viertürige Coupé einen aerodynamischen Weltrekord mit einem cw-Wert von 0,19. (ebd.) Dieser Wert wird durch aktive, strömungsoptimierende Maßnahmen erreicht, welche nicht nur die Leistungsfähigkeit des Fahrzeuges bessern, sondern

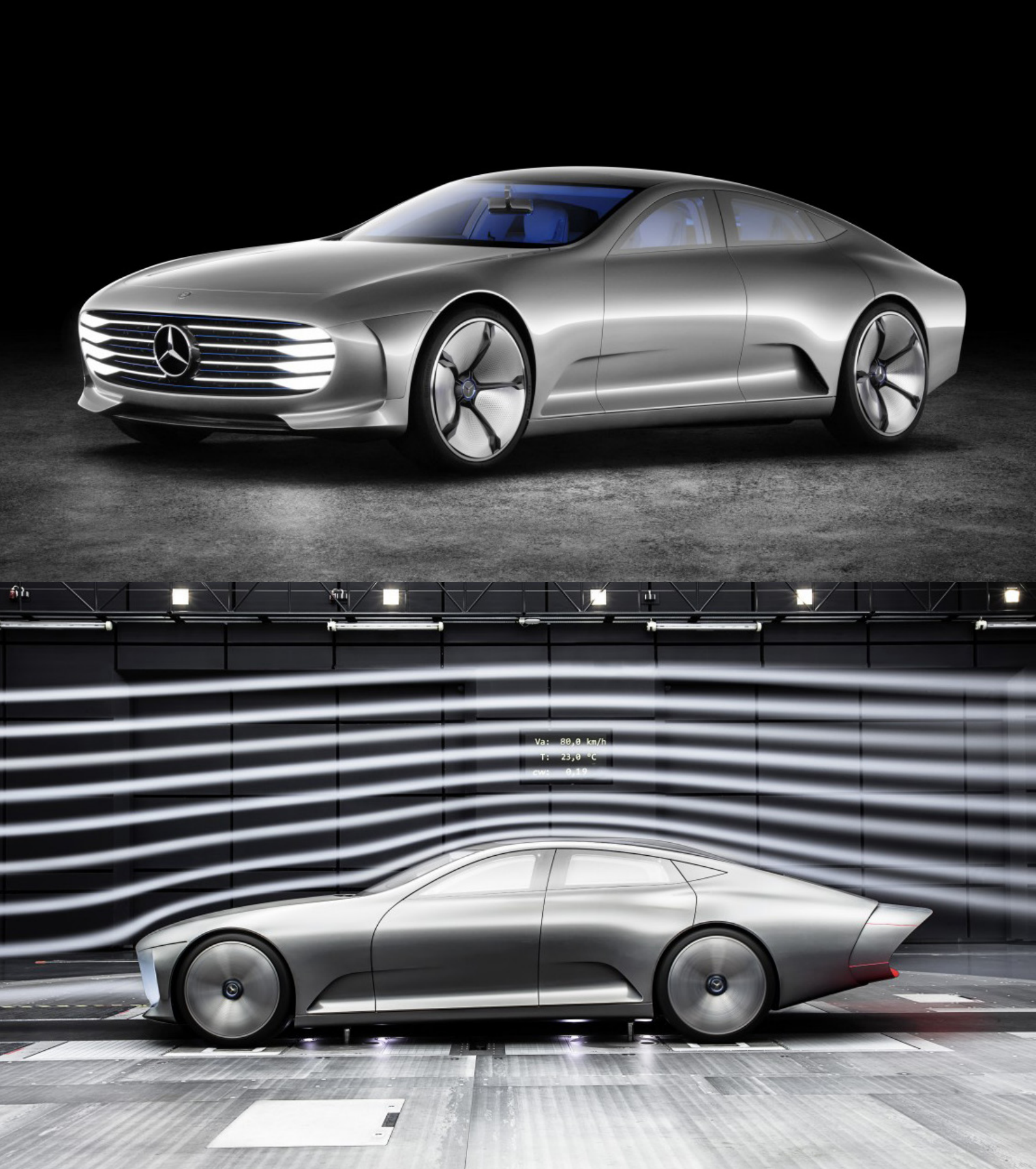


Abb. 37: Mercedes-Benz Concept Intelligent Aerodynamic Automobile
(Concept IAA) Showcar, (oben) Studioaufnahme;
(unten) Windtunnelaufnahme.
(Quelle: Mercedes-Benz)

ebenfalls die Anmutung des wandelbaren Fahrzeugs verändern. Zu den Aerodynamikmaßnahmen zählen:

1. Ein adaptiver Kühlergrill ist in der Lage sich lokal zu öffnen und zu schließen, um dem Fahrzeug kontinuierlich den besten Kompromiss aus einströmender, kühlender Luft für den Motor und aerodynamisch optimierter Umfließung der Luft zu garantieren (ebd.) Bei besonders hohen Geschwindigkeiten können alle Klappen geschlossen werden, um den aerodynamisch günstigsten Zustand für das Fahrzeug zu erreichen. Das Fahrzeuginnere erhält ab höherer Geschwindigkeit weiterhin genügend Luft durch die permanente Öffnung innerhalb des Mercedes-Benz Stern Markenlogos.
2. Ein unterhalb des Grills befindlicher Frontspoiler leitet durch eine Positionsänderung anströmende Luft unter das Auto. (ebd.)
3. Zwei seitliche, ausfahrbare Frontspoiler verbessern die Umströmung des Bugs unter den vorderen Radhäusern. (ebd.)
4. Adaptive Felgen verändern bei höheren Geschwindigkeiten durch ansteigende Zentrifugalkräfte ihre Form von einer sportlichen 5-Speichenfelge zu einem aerodynamisch vorbildlichen Scheibenrad, welches zusätzliche Turbulenzen durch die rotierenden Räder vermeidet. (ebd.)
5. Am Heck fahren acht Segmente aus, die im komplett ausgefahrenen Zustand das Fahrzeug um 390 Millimeter verlängern und den aerodynamischen Unterdruckbereich sowie die resultierende Wirbelschleppe des Fahrzeugs drastisch reduzieren. (ebd.)

In dieser Fallstudie werden ausschließlich Entwicklungen von dreidimensionalen Formelementen für das Fahrzeugexterieur präsentiert. Entwicklungen für das Fahrzeuginterieur wie Algorithmen zur progressiven Positionierung und Anordnung verschieden großer Langlochelemente für Sitz- und Zierteil-perforationsmuster werden nicht detailliert beschrieben. Es werden beispielhaft die Entwicklungsprozesse dreier Fahrzeugbauteile diskutiert: (1) Licht-Kühlermaske, (2) Heckelement und (3) kinematische Felge. In allen drei Anwendungsorten im Exterieur sind durch kontinuierliche Erweiterungen aus anfänglich abstrakten, zweidimensionalen Modellrepräsentationen detailreiche und dynamische 3D-Modelle entstanden. Diese dynamisch variablen Modelle dienen zum einen zur gestalterischen Exploration einer Vielfalt von Gestaltvarianten, zum anderen erlaubt die Variabilität des hierarchisch assoziativen Modells sich adaptiv auf Änderungen von Rahmenbedingungen im Gestaltungsprozess anzupassen ohne eine zwingende Neukonstruktion der geometrischen Daten zu verlangen.

„Kühler sind typische Beispiele für Funktionselemente, die im Laufe ihrer Entwicklung ihre technische Funktion verloren haben, aber als Informationsträger weiterhin ihre Existenzberechtigung haben.“

(Seeger 2014, 223)

Während in den Anfängen des Automobils Kühlermasken primär als reine Funktionselemente erdacht worden sind, haben sie sich im Laufe der Automobilgeschichte zu semantischen Erkennungsmerkmalen für Fahrzeugtypen und Fahrzeugmarken entwickelt. Insbesondere Traditionsmarken wie Mercedes-Benz, Rolls-Royce, oder Alfa-Romeo sind für ihre markanten Kühlermasken bekannt.



Abb. 38: Frontansicht des Showcars
mit integraler Kühlermaske.
(Quelle: Mercedes-Benz)

Sie bilden wichtige Alleinstellungsmerkmale einer Fahrzeugerscheinung. Aus rein geometrischer Sicht bestehen Grillelemente aus verschiedenen Teilelementen (Teilgestalten), die in strukturierter Form, meist rasterartig angeordnet sind. Wegen ihrer hohen Detailtiefe ist die Verwendung algorithmisch assoziativer Methoden zur Gestaltung dieser Anbauteile prädestiniert. Ein digitales, variables Modell erlaubt zu jedem Zeitpunkt im Gestaltungsprozess Anpassungen der Kühlergrillgestaltung vorzunehmen und somit die Erscheinung des Fahrzeugs nachhaltig zu beeinflussen. Für den Entwurf der Kühlermaske des Konzeptfahrzeugs sind anfäng-

lich eine Reihe unterschiedlicher Gestaltungsrichtungen parallel verfolgt worden. Dabei dienen analoge sowie digitale Linienskizzen als abstrakte Repräsentation der Entwicklungsrichtung. Während in der Fahrzeugfront Scheinwerfer traditionell stets als separate Gestaltungselemente angeordnet worden sind, wird hier ein Ansatz einer multifunktionalen Kühlermaske verfolgt, in der Lichtelemente zusammen mit aktiv-adaptiv schließbaren Luftöffnungen integral vereint werden. Das hochauflösende Luftklappenraster lässt sich adaptiv verschließen um die Umströmung sowie Einströmung von Kühlluft differenziert anpassen zu können. Eine Reihe von geometrischen Steuerungselementen bilden das Grundgerüst des digitalen Metamodells. Diese sind zweidimensional auf der YZ-Ebene positioniert und dienen der geometrischen Justage:

1. Eine Außenkontur dient zur Steuerung der Bauteilbegrenzung und ist durch eine frei manipulierbare Kurve definiert. Geometrische Variabilität ist für dieses Steuerungselement entscheidend, um auf Änderungen der Fahrzeugglobalform reagieren zu können. Auf diese Weise kann die Entwicklung der Kühlermaske parallel zur Gestaltung der globalen Außenhaut vorgenommen werden und ist nicht mehr traditionell nachgeschaltet.
2. Vier Lamellenkurven ermöglichen die Definition und Steuerung der Position, Dicke und Krümmung der obersten und untersten Lichtlamellenelemente. Alle weiteren Lamellenelemente werden durch einen Algorithmus progressiv generiert.
3. Zwei Regelkurven (*law-curves*) dienen der Definition der seitlichen Hauptscheinwerfer. Die Dicke und der Winkel der Hauptscheinwerfer sind durch numerische Parameter einstellbar.

Aus diesen geometrischen Steuerelementen wird das geometrische, zweidimensionale Grundgerüst des Modells definiert. Auf zweidimensionaler Bildebene kann somit ohne erhöhten Aufwand ein erster Eindruck über die Erscheinung des Bauteils gewonnen und die Struktur des Modells auf dieser grundlegenden Ebene angepasst werden. Mit Hilfe zweier Projektionsflächen können die entstandenen planen Kurvenelemente ihre Räumlichkeit erhalten. Durch algorithmisch referenzierte Projektion wird über diese dreidimensionalen Flächen die Überwölbung der Bauteilelemente definiert, während der logische Aufbau des Integralkühlers auf simplifizierter, zweidimensionaler Ebene justiert wird. Diese bewusste Trennung der Steuerungsebenen führt zu einer Reduktion der Gestaltungskomplexität und verbessert die Bedienbarkeit des Modells. Basierend auf projizierten, nun räumlichen Referenzkurven werden in den folgenden Schritten Flächen und Volumen konstruiert, sodass ein vollständiges dreidimensionales Geometriemodell der Kühlermaske entsteht. Die Bewegungssteuerung der adaptiven Luftklappen ist auf ähnliche Weise aufgebaut wie die Gesamtform der Kühlermaske. Zwei zweidimensionale Kurvenelemente dienen der Steuerung des Klappenrasters. Eine progressiv einstellbare Interpolation erlaubt die horizontale Unterteilung des Rasters, damit die vertikale Unterteilung aus den Lamellenelementen resultiert. Über lokale Rotationsbewegungen können die Klappenelemente harmonisch differenziert bewegt werden. Durch Graphen- und Bewegungsregler kann nicht nur die finale Öffnungs- und Schließposition, sondern ebenso die Bewegung des Öffnungsprozesses gestaltet werden.

A
 Lights_Amount: 4
 Lights_Thickness: -8.00
 Lights_AngleTop: -5.00
 Lights_AngleBot: 17.00
 Lights_FilletSize: 18.00
 Lights_Depth: 33.00
 Lights_Offset: 12.00



B
 Lights_Amount: 5
 Lights_Thickness: -8.00
 Lights_AngleTop: -5.00
 Lights_AngleBot: 17.00
 Lights_FilletSize: 18.00
 Lights_Depth: 33.00
 Lights_Offset: 12.00



C
 Lights_Amount: 6
 Lights_Thickness: -4.00
 Lights_AngleTop: -12.00
 Lights_AngleBot: 12.00
 Lights_FilletSize: 25.00
 Lights_Depth: 33.00
 Lights_Offset: 12.00



D
 Lights_Amount: 4
 Lights_Thickness: -12.00
 Lights_AngleTop: 5.00
 Lights_AngleBot: 30.00
 Lights_FilletSize: 40.00
 Lights_Depth: 33.00
 Lights_Offset: 15.00



E
 Lights_Amount: 5
 Lights_Thickness: -15.00
 Lights_AngleTop: 0.00
 Lights_AngleBot: 42.51
 Lights_FilletSize: 23.7
 Lights_Depth: 20.00
 Lights_Offset: 5.00



Abb. 39: Generierte Instanzen des digitalen Kühlmaskenmodells mit verknüpften Steuerungsparametern.

Eine zusätzliche, wirksame Maßnahme zur Reduzierung des Luftwiderstands dieses Konzeptfahrzeugs stellt die herausfahrbare Heckverlängerung dar. Die am Heck ausfahrenden Segmente verlängern das Fahrzeug wie erwähnt um 390 Millimeter. Dabei fügen sich acht Teilsegmente zu einer geschlossenen Verlängerung zusammen. Durch diese Gestaltveränderung wird erstens der umströmende Luftstrom des Fahrzeugs länger geführt und zweitens verkleinert sich durch die Verlängerung das Volumen der Unterdruckzone hinter dem Fahrzeug. Beide Phänomene reduzieren Verwirbelungen drastisch und sorgen somit für einen geringeren Luftwiderstand des Fahrzeugs. Ein variables Modell erlaubt die initiale Simulation des Bewegungsprozesses und hilft bei der Entscheidungsfindung für die Unterteilung der Segmente. Die Maßnahme der Heckverlängerung wird durch ein visuell abgeschnittenes Heck mit scharfer Abrisskante unterstützt. Das Innere des Hecks bedarf eines eigenen Bauteils, das ähnliche formale Komplexität wie die Kühlermaske an der Fahrzeugfront beinhalten kann. Es wird hierzu die Strategie verfolgt, ähnliche formalästhetische und algorithmische Bestandteile der bereits gestalteten Frontmaske aufzunehmen. Diese Wiederholung von Formelementen trägt zu einer harmonischen Gesamtwirkung des Fahrzeugs bei. Gleichzeitig beschleunigt es die Konstruktion des Modells, da die Grundstruktur, fundamentale Algorithmenbausteine und Steuerungselemente übertragen werden können und lediglich einiger Anpassungen bedürfen. Um diesem Bauteil eine eigenständige Anmutung zu verleihen, werden einige geometrische Objekte verändert.

Die markanten Lichtlamellen der Frontkühlermaske tauchen invertiert im Heck als Hohlräume wieder auf. Dies bedeutet, dass der Mittelteil des Heckelements geschlossen wird und die seitlichen Hauptrückscheinwerfer nicht als Bauteilkomponente,

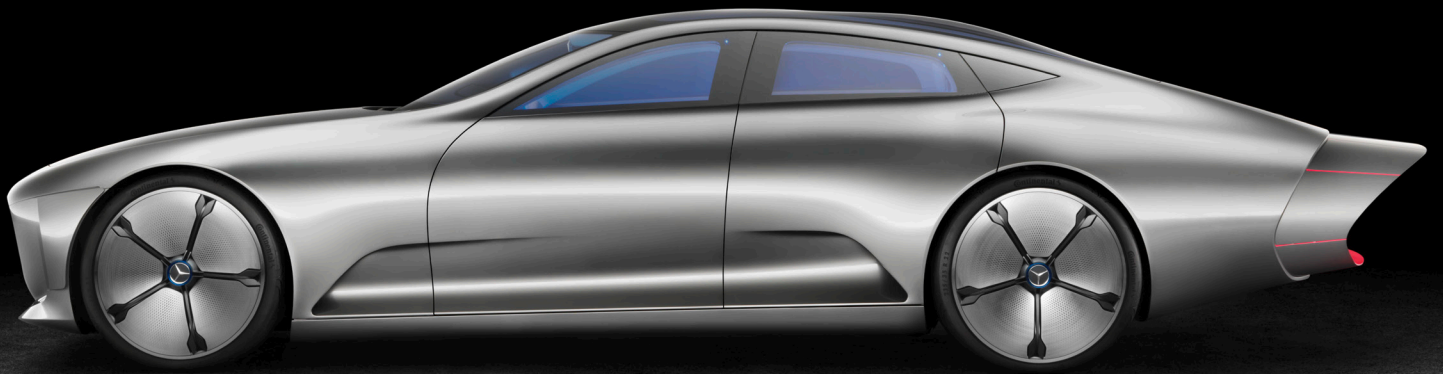
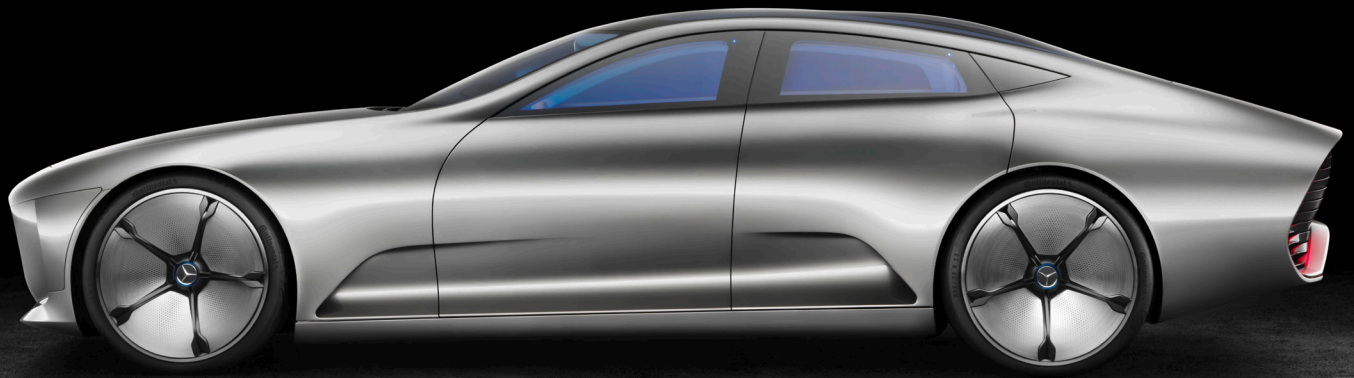


Abb. 40: Showcar Mercedes-Benz Concept IAA:
(oben) Eingefahrenes Heck; (unten) Ausgefahrene, aerodynamische Heckverlängerung. (Quelle: Mercedes-Benz)

sondern als geometrisch negative Aussparungen umgesetzt werden. Dies wird technisch durch Rückprojektion umgesetzt. Dabei strahlen LED-Leuchtmittel auf eine reflektierende Oberflächenkehle und lassen diese wie ein nach hinten versetztes, leuchtendes Objekt wirken. Die Projektionshohlkehle ist mit einer nicht in diesem Projekt entwickelten, jedoch algorithmisch verbesserten, Oberflächenstruktur bedeckt. So werden für die Oberfläche stochastische Zufallsmethoden eingesetzt, um kleine reflektierende Geometrielemente zu verteilen, die eine glitzernde Oberflächenwirkung erzeugen. Der Rückhauptscheinwerfer ist ein Beispiel für ein Bauteil, das nur durch algorithmische Methoden gestaltet und mithilfe von modernen computergestützten Herstellungsverfahren produziert ist. Die algorithmischen Methoden zur Oberflächenerzeugung konnten direkt auf die in diesem Modell geometrisch unterschiedlichen Bauteilformen angewendet und durch programmiertechnische Anpassungen in der Anmutung verändert werden.

Die Gestaltung der Räder bildet einen weiteren wichtigen Bestandteil der aerodynamischen Verbesserung des Fahrzeuges, gleichzeitig repräsentieren sie ein interessantes funktionales Gestaltungselement mit hoher ästhetischer Bedeutung. Insbesondere bei der Konfiguration von Neufahrzeugen kann die Wahl des Felgenmodells das Erscheinungsbild eines Fahrzeuges essenziell verändern. Bei der Auswahl und Gestaltung von Felgen besteht ein konstanter Konflikt zwischen Ästhetik und Funktion. Für einen Großteil der Designer besteht das Bestreben, möglichst große Räder zu verwenden. Dies liegt daran, dass Räder ein Maßstabelement zur Bewertung der Fahrzeugproportion darstellen. Große Räder lassen einen Fahrzeugkörper kompakter und dadurch sportlicher wirken. Durch eine erhöhte Reifen- und Spurbreite bekommt ein Fahrzeug



Abb. 41: Heckmaske mit generiertem Reflektionsmuster
im Rückscheinwerfer.
(Quelle: Mercedes-Benz)

einen stabileren Stand, der sich auch in vielen Fällen positiv auf das Fahrverhalten aber maßgeblich auf die Ästhetik des Fahrzeugs auswirkt. Offene Felgen mit viel Sicht auf die darunterliegende Bremsanlage vermitteln Leichtigkeit. Durch eine große Einpresstiefe erhält eine Felge eine negative Schüsselung, die wiederum eine dynamische Dreidimensionalität erzeugt. Technische Anforderungen an Felgen sind Stabilität, Gewicht, Aerodynamik und Kühlfähigkeit der Bremsanlage:

1. *Aerodynamik*: Unter aerodynamischen Gesichtspunkten sind Scheibenräder meist das Optimum. Scheibenräder verwenden Felgen, deren Außenkante flach und geschlossen ist. Dadurch werden Luftströme vom Fahrzeug gerade an den Felgen vorbeigeleitet, ohne sich in Felgenstrukturen zu fangen und zusätzliche Verwirbelungen zu erzeugen. Felgen werden daher aerodynamisch optimiert, sodass die Umströmung des Fahrzeugs möglichst wenig durch die Rotationsbewegung der Räder beeinträchtigt wird.
2. *Kühlung*: Durch die Reibung der Bremsbacken an der Bremsscheibe kann in der Bremsanlage eines Fahrzeugs starke Hitze entstehen. Bei zu hoher Hitze kann die Bremswirkung nachlassen. Aus diesem Grund ist es wichtig genügend kühlende Luft zum Bremsystem zu leiten. Die Luftzufuhr kann entweder von der Außen- oder Innenseite der Felge geleitet werden. Dadurch können verhältnismäßig große Öffnungen an der Felge notwendig werden.
3. *Gewicht*: Auch ein reduziertes Radgewicht wirkt sich positiv auf ein Fahrzeug aus. Zum einen wird durch ein niedriges Gewicht der Kraftaufwand für die

Beschleunigung des Rades verringert, zum anderen verbessert sich durch eine geringere ungefederte Masse das Ansprechverhalten der Feder- und Dämpfungselemente des Fahrwerks. Beides beeinflusst das Fahrverhalten des Fahrzeugs positiv.

Auch für die Gestaltung der Räder wird das zentrale Thema der Transformation festgelegt. Im Design-Modus sollen die Felgen zur imposanten Erscheinung des Fahrzeugs und im Aerodynamik-Modus zur Optimierung des Strömungswiderstands beitragen. Aus diesem Grund werden unterschiedliche Methoden zur Wandelbarkeit von Felgen untersucht. Die Gestaltfindung der Felgen startet sowohl mit gezeichneten Design- als auch digitalen Wandelbarkeitsskizzen. Sofort wird die Schwierigkeit deutlich, zwei parallele Zustände, den Aerodynamik- und den Design-Zustand, zu gestalten. Die Gestaltung der Felge in beiden Modi wird durch die Verwendung eines digitalen Konstruktionsmodells vereinfacht, denn durch Transformationsmethoden können gleichzeitig beide Zustände berechnet und visualisiert werden. Das Modell des Felgenkörpers besitzt eine radial-symmetrische Speichenkonstruktion. Mithilfe einer Konturkurve wird durch eine Rotationsextrusion ein geschlossener Felgenkörper mit großer Einpresstiefe erzeugt. Die Anzahl der Felgenspeichen wird als offene Variable definiert. Die Speichen resultieren aus dem Herausschneiden von Öffnungen, sowie durch die besonders variable Schnittkontur, welche sich mit ändernder Anzahl der Speichen anpasst. Weitere Bauteile der Felge, beispielsweise die Felgennabe oder der Zentralverschluss, sind nach ähnlicher Methodik aufgebaut. Um eine stark geschüsselte Felge in ein Scheibenrad zu verwandeln, werden unterschiedliche Transformationsmechanismen untersucht. Da



Abb. 42: Aerodynamikfelgen mit passiver Kinematik:
(oben) Zustand mit dynamischer Schüsselung; (unten) Aerodynamischer
Zustand mit Ähnlichkeiten eines Scheibenrades.
(Quelle: Mercedes-Benz)

es gilt, Windkräften zu widerstehen, wird eine Strategie mit festen Klappen verfolgt. Mithilfe des digitalen Modells können durch einen Wechsel der Transformationsmethode Bewegungsstudien durchgeführt werden. Für den Antrieb der Klappen wird ein passiver, mechanischer Apparat entwickelt, welcher mithilfe von kleinen Gewichten im Inneren der Felge Zentrifugalkräfte des rotierenden Rades einsetzt, um die Klappen zu bewegen. Bei höheren Geschwindigkeiten bewegen sich die Klappen dadurch autonom, d.h. ohne zentrale Steuerungseinheit und ohne die Notwendigkeit von Motoren, in die aerodynamisch optimierte Position. Die Zentrifugalkräfte sind ausreichend, um möglichen, entgegengesetzten Windkräften zu widerstehen. Die Gestaltung der geometrischen Klappenform birgt einige Herausforderungen, denn sie muss in beiden Zuständen formfolgende Glanzlichter und Reflektionen erzeugen. Auch für diese Aufgabe bieten sich digitale Modelle mit integrierten Bewegungsmethoden an, mit denen die Form gleichzeitig in beiden Zuständen bewertet werden kann. Um eine verbesserte Durchlüftung der Bremsen zu gewährleisten, werden die Transformationsklappen mit einem differenzierten Langlochmuster perforiert. Aus aerodynamischen Gründen ist der Porositätsgrad zur vorderen Reifenaufsitzkante hinzunehmend reduziert, während die Öffnungen nahe der Radnabe vergrößert sind. Auch für die Entwicklung des Perforationsmusters sind Algorithmen aus dem in Fallstudie 1 entwickelten Algorithmenkatalog zum Einsatz gekommen. Aus gestalterischer Sicht erhöht das Langlochmuster die Gestaltungstiefe und verbessert dadurch die Erscheinung der Felge.

In dieser Fallstudie ist im Rahmen der Entwicklung des Konzeptfahrzeugs *Mercedes-Benz Concept IAA* die Anwendbarkeit von Computational Design Methoden praktisch erprobt worden. Anhand dreier exemplarischer Modellbeschreibungen



Abb. 43: Nahaufnahme des algorithmisch generierten Perforationsmusters zur Belüftung der Bremsanlage.
(Quelle: Mercedes-Benz)

ist die Art und der Umfang der algorithmischen, assoziativen Methoden erläutert worden. Es wird deutlich, dass variable digitale Modelle Entwürfe mit hoher Formkomplexität erlauben. Die Variabilität des Modells führt zu erhöhter gestalterischer Flexibilität, denn getroffene Gestaltungsentscheidungen können bewusst als variabel deklariert werden. Somit können einige Einstellungen zu einem fortgeschrittenen Gestaltungszeitpunkt und in einem detaillierteren Kontext vorgenommen werden. Durch die Variabilität in diesem Prozess kann eine größere Bandbreite an Gestaltinstanzen visualisiert und bewertet werden. In dieser Studie werden keine automatisierten Varianz-generierungsmethoden benötigt, sondern über intuitiv steuerbare Parameterfelder, Bedienregler und Graphen die Gestaltung der Bauteile in Echtzeit angepasst. Diese direkte Strategie zur Suche nach Möglichkeiten hat sich in dieser Fallstudie bewährt. Ein gezieltes Einsetzen und Anpassen von Transformationsmethoden kann genutzt werden, um Bewegungsmechanismen zu untersuchen und die resultierenden Gestaltveränderungen zu gestalten. Des Weiteren wird in dieser Fallstudie demonstriert, dass Computational Design nicht exklusiv und autark im wissenschaftlichem Kontext entwickelt werden muss, algorithmische Methoden können auch effizient in bestehende Entwicklungsprozesse eingegliedert werden und diese nachhaltig bereichern.

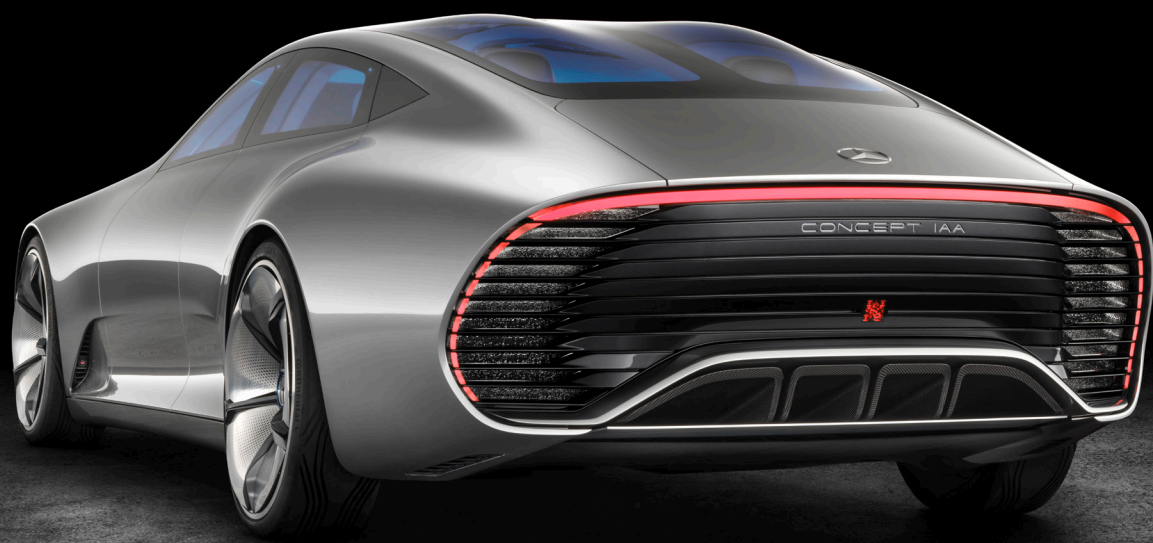


Abb. 44: Heckansicht des Showcars
Mercedes-Benz Concept Intelligent Aerodynamic Automobile.
(Quelle: Mercedes-Benz)

8

Ergebnisse und Diskussion

Aus den Fallstudien ergeben sich eine Reihe übergreifender Erkenntnisse über den Nutzen von Algorithmen und computerbasiertem Entwerfen im automobilen Gestaltungskontext. Eine allgemeine Quantifizierung der Nützlichkeit und Anwendbarkeit lässt sich nur im Einzelfall vollziehen, denn wie nach (Rittel/ Webber 1973) ist jedes Entwurfsprojekt in seiner Problemstellung und somit Lösung unterschiedlich. Vielmehr sollen die bei der Erstellung dieser Arbeit gewonnenen projektspezifischen Erkenntnisse und Erfahrungen festgehalten und geteilt werden. Nichtsdestotrotz lassen sich aus den Untersuchungen Potentiale aber auch Grenzen der Anwendung von Computational Design herausbilden. In diesem Kapitel sollen die Vor- und Nachteile dieser Art des methodischen Arbeitens vorgestellt und anhand von unterschiedlichen Anwendungsmöglichkeiten dargestellt werden. Dabei wird versucht einen Einstieg in eine praktische Einteilung nützlicher Algorithmik zu vollziehen, sodass Designer diese neuartigen Entwurfsmethoden gezielter in ihren alltäg-

lichen Entwurfsprozess einbauen und effizient nach adäquaten und unterschiedlichen Methoden suchen können.

In den Fallstudien wird bestätigt, dass das präsentierte Rahmenwerk für die Gestaltung mit Hilfe von Algorithmen als nützliche Stütze zur gedanklichen und pragmatischen Strukturierung algorithmischer Elemente dient. Ein algorithmisches Metamodell bekommt im Computational Design eine besondere Bedeutung, da es neben den darstellbaren visuellen Qualitäten des Modells den kompletten logischen Aufbau dieses Systems beinhaltet. Im Vergleich zu bisherigen Entwurfsmethoden (der klassischen, analogen oder digitalen Zeichnung und ihrer Übersetzung in 3D), verschiebt sich der Gestaltungsprozess stärker von einer deduktiv definierenden Gestaltung in eine verstärkt induktive Gestalt-suche. Nichtsdestotrotz sind traditionelle Werkzeuge weiterhin unabdingbar, denn sie bleiben weiterhin die schnellste und effizienteste Methode zur Kommunikation visueller Information. Aus den präsentierten Fallstudien bildeten sich zwei über-greifende Potentiale von Algorithmen für den Entwurfsprozess heraus:

1. Die Entwicklung avantgardistischer, zukunfts-orientierter Entwürfe durch die durch Computational Design erzeugbare neuartige Ästhetik.
2. Die Erweiterung und Verbesserung etablierter digitaler Methoden, sowie die Effizienzsteigerung durch Spezialisierung, Automatisierung und Archi-vierung von Entwurfsschritten im Entwurfsalltag. Dies gilt sowohl für den Prototypenbau als auch für die Serienentwicklung von Fahrzeugbauteilen.

Bei den Fallstudien fällt auf, dass ein algorithmisches Entwerfen ohne eine systematische Haltung zu Design nur sehr schwer möglich ist, denn ein algorithmisches Modell besitzt interne Bestandteile und externe Einflüsse. Wie anfangs im Kapitel der historischen Einordnung von Computational Design aufgezeigt, hat eine systemische Denkweise über Design eine lange Tradition, die aber bis heute in vielen Gestaltungsdisziplinen und so auch im Transportation Design aus den bereits vorgestellten Gründen nicht weit verbreitet ist. Computational Design vermag den Diskurs des Automobilesdesigns durch fundamentale, nachhaltige Verbesserungen voranzubringen. Algorithmische Entwicklungen sind sehr stark mit der Grundlagenforschung verbunden, die in der Wissenschaft anfänglich meist auf einer stark theoretischen und anwendungsfernen Ebene entsteht, jedoch zu grundlegend revolutionären Ergebnissen führen kann. Gleichzeitig birgt Grundlagenforschung stets die Gefahr für längere Zeit keine bzw. nur gering anwendbare Ergebnisse zu erzeugen, denn in der Freiheit dieser Forschungsthemen spielen Anwendungsszenarien anfänglich eine untergeordnete Rolle, bzw. es müssen zuerst die Grundlagen für spätere Anwendungsszenarien geschaffen werden. Es handelt sich hierbei um sogenannte *High-Risk + High-Reward*-Projekte, denen zwar ein größeres Risiko auf Misserfolg innewohnt, die aber gleichzeitig wegweisende Technologien und Ästhetik hervorbringen können, die im anwendungs- und realitätsnahen Arbeiten kaum zu erzeugen sind.

Zur Etablierung von Computational Design Strategien benötigt es zusätzliches Budget und Zeitkontingente außerhalb der täglichen Aufgaben eines Designers sowie die Zusammenarbeit mit Experten mit Informatikkenntnissen, die den technischen Hintergrund und die technische Umsetzung abdecken können.

Zwar ist algorithmisches Entwerfen in Form systemischer

Logik und regeldefinierendem Entwerfen nicht zwingend an den Gebrauch von Computern und Programmierung gebunden, doch gerade durch die Nutzung der Berechenbarkeit und der Visualisierungsmöglichkeiten des Computers ergibt sich die Leistungsfähigkeit dieser Entwurfsstrategie. Im Folgenden wird besprochen, welche Bauteilentwicklungen am Fahrzeug von algorithmischer Gestaltung profitieren können. Des Weiteren wird die praktische Anwendbarkeit von Algorithmik im Gestaltungsprozess präsentiert: Potentiale und Grenzen von Computational Design in der frühen Konzeptfindungsphase, sowie Vor- und Nachteile im späten Gestaltfindungsprozess werden erläutert. Innerhalb dieser beiden Abschnitte werden weitere Anwendungsunterkategorien von Computational Design eingeführt, die aus übergreifenden Erkenntnissen der Fallstudien resultieren. Zusammenfassend werden formalästhetische Potentiale von Computational Design für eine neue Ästhetik und Formensprache für Fahrzeuge und Fahrzeugbauteile besprochen.

8.1 Anwendungsgebiete von Algorithmik am Fahrzeug

Wie in den Fallstudien demonstriert, sind algorithmische Methoden an unterschiedlichen Stellen an einem Fahrzeug produktiv anwendbar. Die Fallstudien zeigen eine klare Tendenz, dass algorithmische Entwurfsstrategien für Anwendungsorte mit einer hohen geometrischen Informationsdichte direkte Vorteile bieten. Solche Anwendungsorte zeichnen sich durch hochdetaillierte, d.h. aus vielen Teilelementen bestehende Objekte aus. Im Exterieur sind dies meist Anbauteile wie Kühlermasken, Scheinwerfer, Felgen, Luftein- und Luftauslässe, im Interieur sind es vor allem Strukturen und Muster wie Dekoroberflächen, Klimatisierungselemente oder Lautsprecherabdeckungen. Durch die variablen Steuerungsmöglichkeiten von Objekten mit hoher geometrischer Komplexität, werden die algorithmischen Vorteile des Computers, schnell große Datenmengen zu verarbeiten, besonders deutlich.

Computerbasierte Gestaltungssysteme zeichnen sich nicht nur bei komplexen Geometriebeispielen aus. Auch in der Formgestaltung von Exterieur und Interieur werden virtuelle (Daten-) Modelle in immer größerem Maße eingesetzt. Speziell zugeschnittene digitale Werkzeuge erlauben den Modelleuren wiederholende Prozesse zu automatisieren und durch Vorlagen (*templates*) an einem bereits informierten, fortgeschrittenen Punkt des Modellierungsprozesses einzusetzen. Zusätzlich bieten neuartige Transformationswerkzeuge die Möglichkeit, bestehende Formen und Strukturen in ihrer Form zu definieren und zu deformieren – und sogar auf unterschiedliche Proportionen zu transferieren.

Ein weiteres wichtiges Anwendungsfeld, das in dieser Arbeit noch nicht berücksichtigt werden konnte, ist der Bereich der User-Experience im Innenraum. Mit zunehmender Digitalisierung unserer Umgebung, sowie der autonomen Steuerung von Fahrzeugen wird die Wichtigkeit und Quantität digitaler Inhalte weiter steigen. Wie im User-Interface des *Mercedes-Benz Concept IAA* demonstriert, wird die Echtzeitdarstellung dreidimensionaler Inhalte im Fahrzeug weiter gesteigert werden. Diese Inhalte können in Echtzeit mit externen Umgebungsparametern kommunizieren und sich an die aktuelle Situation und Position des Fahrzeugs anpassen. Hierfür wird in Zukunft spezialisierte Algorithmik zur Datenverarbeitung und Datenvisualisierung entwickelt werden müssen.

Zusammenfassend lässt sich die Aussage treffen, dass es kaum Einschränkungen von Computational Design Strategien in Bezug auf Anwendungsorte und Fahrzeugbauteilentwicklungen gibt. Einschränkungen sind immer im Einzelnen auf spezielle Methoden und die Art und Weise der Anwendung zurückzuführen und nicht auf das computerbasierte Entwerfen im Allgemeinen.

8.2 Computational Design in der Konzeptphase

Die Konzeptphase ist vor allem durch inhaltliche Arbeit geprägt und demnach nicht primär auf Formerzeugung, sondern auf Ideenentwicklung fokussiert. Das algorithmische Potential in der Konzeptfindung ist nach den Erkenntnissen dieser Arbeit im aktuellen Entwurfsprozess von Fahrzeugen eher limitiert, jedoch können durch ein strukturiertes, systematisches Arbeiten auf Basis von Computational Design Strategien schlüssige Konzepte mit hohem Innovationspotential erarbeitet werden.

*„Wenn man zurückschaut, so haben sich durch den Computer und das CAD (Computer-Aided Design) zwar wesentliche Abläufe verändert, doch noch heute kommt die Idee der Form aus dem Kopf, und die gestalterische Umsetzung bleibt weiterhin das Handwerk des Formgestalters.“
(Rezzonico 2015)*

Die algorithmische Generierung von Inhalten oder Ideen ist eine hoch komplexe Aufgabe, bei der es auf kontextspezifisches Wissen ankommt. Demnach ist das Definieren von Konzepten (bisher) ausschließlich menschlicher Intelligenz vorbehalten, denn aktuell entscheiden Designer bzw. Manager darüber, welche Gestaltungen als wertig und kommerziell vielversprechend gelten. Für die Suche nach einem neuen Konzept lassen sich ergebnisfindende Suchalgorithmen oder Optimierungsprozesse nur schwer einsetzen, denn in den meisten Fällen sind die Such- bzw. Optimierungsparameter nicht definierbar.

Aus diesem Grund bleibt die Skizze ein wichtiges Mittel für schnelles, visuelles Denken. Der Abstraktionsgrad einer Skizze erlaubt es, die grundlegende Richtung eines Projekts zu definieren, ohne aufwendige Details berücksichtigen zu müssen. Selbst in einem überwiegend induktiven Designprozess, ist es sinnvoll eine grobe Vorstellung des Ziels zu definieren. Klassische, analoge Zeichnungen (mit Stift und Papier) sind unabhängig von implementierten Funktionen oder topologischen Bindungen. Die gezeichnete Skizze bleibt weiterhin ein besonders ungebundenes und effizientes Kommunikationsmittel um Lösungswege oder Formen schnell zu beschreiben. CAD und Computational Design erhält seine Vorzüge durch das Arbeiten mit dem Modell. Dadurch begrenzt sich algorithmisches Arbeiten in der Konzeptphase vor allem auf strategische Planungen, um die Modellierungsphase zu strukturieren. Hierbei sind folgende Fragen zu berücksichtigen:

1. Welche Ziele sollen die Algorithmen erzielen?
2. Ist ein traditioneller Ansatz vielversprechender?
3. Wie würde sich ein angestrebtes Ziel algorithmisch formalisieren?
4. Welche algorithmischen Methoden wurden für diese Aufgabe bereits entwickelt?
5. Sind diese Algorithmen zugänglich? Wenn ja, was sind die Nutzungsbedingungen für diese algorithmischen Methoden?
6. Wie groß ist der Aufwand für die Entwicklung einer eigenen algorithmischen Lösung?
7. Ist ein schneller Prototyp ausreichend oder lohnt es sich ein robustes nachhaltiges Softwarepaket zu entwickeln?

Spezielle Algorithmen für den konzeptionellen Entwurf sind zu diesem Zeitpunkt kaum verbreitet. Ein Teil der Fallstudie 5 beinhaltet die Untersuchung des Potentials von algorithmischen Methoden als Inspirationsquelle. In diesem spezifischen Fall wurde untersucht, wie kombinatorische Varianzgenerierung zur Generierung innovativer Gestaltungslösungen eingesetzt werden kann. Die Höhe des Innovationsgrades solcher Ansätze bleibt jedoch durch die Umsetzung der Methode beschränkt, denn es werden lediglich Lösungen innerhalb eines klar begrenzten Lösungsraums (*morphospace*) abgebildet. Die Fallstudie hat inspirierende Ergebnisse hervorgebracht, jedoch musste hierzu ein verhältnismäßig großer Entwicklungsaufwand betrieben werden. Zusätzlich mussten die generierten Ergebnisse anschließend eine intensive Überarbeitungsschleife durchlaufen, um die etablierte, visuelle Qualität zu erhalten.

Der direkte Vorteil von Computational Design in der Konzeptphase liegt demnach keineswegs in der Automatisierung und einem folglich zeitlichen Ersparnispotential, sondern vielmehr in der Suche von konzeptioneller Informationen und ihrer Integration in den Gestaltungsprozess.

8.3 Potentiale gestalterzeugender Algorithmik

Computational Design verspricht die Integration mathematischer Logik und algorithmischer Schrittfolgen in den Gestaltungsprozess. Wie bereits besprochen, findet die Entwicklung meist innerhalb eines CAD-Systems statt, mit Hilfe der vielen bereitgestellten geometrischen Objekte und der Transformation- und Darstellungsmethoden möglichst effizient gearbeitet werden kann. Das Hauptanliegen dieser Arbeit ist die Erforschung der Möglichkeiten und des Nutzens von Algorithmik für die erzeugende Formgebung, sowie bestehende Prozesse im Automobile design zu überdenken und durch neue Methoden zu erweitern. Das Metamodell spielt dabei eine fundamentale Rolle, denn konzeptionelle wie formale Entscheidungen werden als Komposition abgelegt. Zwar ist die Investition in ein elaboriertes Metamodell mit zeitlichem Aufwand verbunden, dieser kann sich jedoch schon nach kürzester Zeit durch die Variabilität des Modells bezahlt machen. Das Leistungsvermögen algorithmischer Methoden im Automobile design liegt in der durch Algorithmen erzeugbaren und handhabbaren erhöhten Komplexität. Während Designer bisher überwiegend auf Formen beschränkt waren, die zeichnerisch und klassisch modellierend darstellbar waren, lösen sich mit Computational Design Strategien die Grenzen der darstellbaren geometrischen Komplexität kontinuierlich auf. Zudem können unterschiedliche gestalterische Expertise, sowie wissenschaftliche Methoden in einem Modell integriert werden, sodass ein ganzheitlicher Designansatz entsteht. Auf rein formal-ästhetischer Ebene kann sich dies durch wiederverwendete Gestaltungselemente und -prinzipien ausdrücken. Werden dann

Methoden und Ziele anderer Disziplinen mit integriert, kann dieser ganzheitliche Ansatz nahezu grenzenlos erweitert werden. In der Architektur hat sich die Verwendung von Computational Design bereits fest etabliert, um die steigende Komplexität des Gestaltungsprozesses von zeitgenössischen Gebäuden bewältigen zu können. Die Gestaltungskomplexität eines Fahrzeugs ist in den vergangenen Jahren ebenfalls kontinuierlich gestiegen und es ist davon auszugehen, dass sich Gestaltungsaufgaben im Fahrzeugbereich in Zukunft in ähnlichem Maße weiterentwickeln. Demnach sind neue Methoden zur Komplexitätsbewältigung und zum Komplexitätsmanagement unumgänglich. Durch generative Modelle sind Gestaltungen zu keinem Zeitpunkt der Gestaltung als statische Entitäten aufzufassen, sondern vielmehr als dynamische Systeme. Das bedeutet, dass die Form einer Gestalt auf dynamische Art und Weise implementiert werden kann.

Ein Vorteil von Computational Design liegt in der Möglichkeit neue digitale Werkzeuge und Methoden entwickeln zu können, die dazu genutzt werden, sich wiederholende Aufgaben durch Automatisierung zu beschleunigen. Da die verwendeten digitalen Werkzeuge stets einen Einfluss auf das Ergebnis haben, bietet ihre Nutzung das Potential, innovative Resultate mit umsetzbarer neuartiger Ästhetik hervorzubringen. Gerade Methoden, die in Gestaltungsaufgaben bisher keine Anwendung fanden, können als Inspirations- und im Idealfall als Innovationquelle dienen. Aber nicht nur gänzlich neuartige Algorithmen versprechen Innovation. Wie im Rahmenwerk beschrieben, können durch die Kombination algorithmischer Bausteine Gestaltungsstrukturen mit hohem Innovationsgrad und hoher geometrischer Komplexität erzeugt werden. Diese formale Komplexität wäre mit traditionellen Verfahren wie der Zeichnung oder der klassischen Modellierung (analog oder digital) nicht wirtschaft-

lich abbildbar. Es konnten Strukturen erzeugt werden, die zwar einen homogenen, gleichmäßigen Eindruck ergeben, jedoch geometrisch sehr komplex sind, da sie aus vielen unterschiedlichen Geometrieelementen mit individuellen Eigenschaften bestehen. Die Möglichkeit solch differenzierte Geometrie durch ein algorithmisches Metamodell strukturiert zu erzeugen und zu verwalten, ermöglicht ein neues Level gestalterischer Freiheit. Während in der Konzeptfindung ein grober Möglichkeitsraum abgesteckt wird, sind in der gestalterischen Umsetzungsphase viele Entscheidungen bereits getroffen. Somit sinkt die Wahrscheinlichkeit, dass grundlegende Änderungen an der Entwurfsausrichtung vorgenommen werden müssen. Die Stärke des Metamodells liegt in seiner gezielt angelegten Variabilität. Ein Metamodell sollte darauf ausgelegt sein, möglichst flexibel auf gezielte Anpassungen im Gestaltungsprozess reagieren zu können. Ist ein Modell auf maximale Flexibilität ausgelegt, bietet es in den meisten Fällen reduzierte formalästhetische Qualität, denn einige Details wie Formverrundungen bleiben unberücksichtigt. Während das Metamodell im Idealfall die finalen Produktionsdaten liefert, kann die Modellierungsflexibilität und damit verbundene Simplifizierung einen Schritt der weiteren Ausarbeitung bedürfen. Diese kann auf Basis der Metamodellgeometrie erfolgen oder in wenigen Fällen eine Neukonstruktion des Modells erfordern. Eine Neukonstruktion kann (sofern es der Projektzeitplan zulässt) dann sinnvoll sein, wenn durch Anpassungen und Änderungen in der Formfindungsphase mit einer bestehenden Metamodellstruktur nicht die maximale Modellqualität erreicht werden kann. Das Aufsetzen eines neuen Metamodells, etwa mit der Verwendung anderer Topologieelemente oder anderen hierarchisch assoziativen Beziehungen, ist gelegentlich nötig, um maximale formalästhetische Qualität zu erzeugen.

Die Nachvollziehbarkeit aller Entwurfsschritte in einem Metamodell vereinfacht die Begründbarkeit formaler Gestaltungsentscheidungen. Tatsächlich dient die Archivierung der Entwurfsentscheidungen in Kombination mit Formanalysewerkzeugen dazu, das eigene Vorgehen zu überblicken, zu verstehen und zu kommunizieren. Gleichzeitig ergeben sich aber durch die Nachvollziehbarkeit der Entwurfsentscheidungen keine Entwurfsinhalte. Die Aufgabe, syntaktische Elemente mit semantischen Gestaltungsintentionen zu verknüpfen, wird (noch eine ganze Weile) das wohl wichtigste Arbeitsfeld von Designern bleiben. Hier hilft ein Metamodell mit seiner integrierten Logik, das Maß der formalen Begründbarkeit zu erhöhen, falls eine begründbare Formensprache von Interesse des bzw. der Designer ist.

„da nun ästhetische strukturen nur insofern ‚ästhetische information‘ enthalten, als sie innovationen aufweisen und diese natürlich stets nur eine wahrscheinliche, keine definitive wirklichkeit darstellen, kann man sagen, dass die künstliche erzeugung von einer norm abweichender wahrscheinlichkeiten durch theoreme und programme das zentrale motiv der generativen ästhetik und ihrer projekte ist.“

(Bense 2004)

Bense beschreibt anschaulich, dass attraktives bzw. erfolgreiches Design ein gewisses Maß an Innovation aufweisen muss um neuartig zu sein. Innovation bedeutet hier, dass unbekannte aber sinnvolle Lösungen zu einem Problem gefunden werden müssen. Dabei müssen diese nicht nur gefunden, sondern ebenfalls als solche identifiziert werden. Momentan sind diese Möglichkeiten lediglich von professionellen Gestalterpersönlichkeiten zu bewältigen.

Es sind einige syntaktisch, formalästhetische Potentiale von Computational Design Strategien identifiziert worden, die als neue Beschäftigungsfelder für Computational Designer im automobilen Kontext dienen und auf diese Weise zu neuartiger Ästhetik und Formensprache führen können.

1. Neue Ästhetik durch *mathematische Präzision*
2. Neue Ästhetik durch *generierte Komplexität*
3. Neue Ästhetik durch *Materialgestaltung*
4. Neue Ästhetik durch *computergestützte Produktion*

Der erste Aspekt bezieht sich auf Benses gebundene Systeme. Die Verwendung strikter mathematisch, topologischer Regeln führt zu Lösungen mit höchster Präzision und Exaktheit. Die Verwendung mathematischer Mittel wie Gleichungen sind im Gestaltungsprozess bislang (noch) wenig verbreitet, bieten jedoch in einigen Anwendungsfällen besonders homogene und exakte Ergebnisse, die ihre Eleganz aus der mathematischen Präzision generieren. Ein Beispiel hierzu ist die Verwendung mathematisch definierter, parametrischer Flächen. Parametrische Flächen besitzen eine durch die Gleichung definierte Homogenität in der Flächenkrümmung, die nur sehr schwer durch manuelle Modellierung erzeugt werden kann. Ein anderes Beispiel ist die Nutzung mathematisch definierter Gradienten und Übergänge. Je höher die Anzahl an Elementen oder Übergangsschritten, desto aufwendiger sind diese manuell in maximaler Präzision zu produzieren.

Der zweite Aspekt ist das Potential neuartiger formaler Ästhetik, das sich aus der Möglichkeit ein hohes Maß an geometrischer Komplexität darstellen zu können, herausbildet. In den Fallstudien hat sich gezeigt, dass die Nutzung des Computers als

Metawerkzeug, die Erzeugung neuartiger Formen und Strukturen möglich macht, die mit klassischen, traditionellen Gestaltungswerkzeugen ökonomisch nicht abbildbar sind. Ein durch logische Prozesse gesteuertes Metamodell simuliert und erzeugt eine Vielfalt von Ästhetiken und eine formale Komplexität, die sich durch eine hohe Dichte geometrischer Information auszeichnet. Topologische Verfahren helfen bei der Verteilung oder Unterteilung, um die erhöhte Menge an Formelementen zu generieren und zu kontrollieren. Insbesondere durch die Verwendung stochastischer Verfahren, d.h. in den meisten Fällen eine präzise gesteuerte Zufallsfunktion, kann gewollte Unregelmäßigkeit und Heterogenität gezielt erzeugt und gesteuert werden. Die kontrollierbare größere Menge an Gestaltinformation ermöglicht eine höhere Gestaltungstiefe, d.h. Formen mit höherem Detailierungsgrad.

Drittens, ergibt sich ästhetisches Potential aus der Gestaltung von physikalischem Material und Materialeigenschaften, ein Forschungsfeld, welches sich zunehmend zum Gestaltungsfeld von Designern entwickelt. Es war stets ein Ziel von Design, Material und seine Eigenschaften in Funktion und Ästhetik in Einheit zu bringen. Algorithmische Methoden können eingesetzt werden, um Material gezielt zu gestalten. Somit kann nicht nur die Funktion lokal angepasst werden, es ergeben sich ebenfalls Gestaltungsmöglichkeiten, durch die lokale Differenzierung von Materialeigenschaften bzw. Materialattributen. Als Beispiel ist hier auch die Gestaltung mit Textilien und Fasermaterialien zu nennen, die ihre strukturellen Leistungsfähigkeiten aus der Verteilung der Fasern ziehen. Durch die erzeugbaren anisotropen Eigenschaften von Faserkompositen oder Textilien kann die Steifigkeit eines Bauteils erhöht werden, während sich gleichzeitig sein Gewicht reduziert. In vielen Produkten, die aus Kompositmaterialien hergestellt sind, werden die Faserverläufe

nicht gezeigt, da dies eine besonders hohe Verarbeitungsqualität voraussetzen würde. Eine bewusste Materialgestaltung mit kontrolliert hoher Verarbeitungsqualität kann jedoch zu formal neuartigen Erscheinungen führen. Nicht nur die Verteilung der Fasern innerhalb eines Bauteils können mit Hilfe von Computational Design gestaltet werden, durch die Integration der Simulationen von Materialverhalten kann beispielsweise das Spanverhalten eines Textils und die darauf erzeugbaren Formen simuliert werden. Somit ergibt sich Gestaltungsfreiheit sowohl auf intrinsischer Materialgestaltungsebene als auch in der globalen Materialverhaltensebene. Computergestützte Herstellungstechniken wie computergestützte (*Computer-Numerical-Control - CNC*), robotische Fertigungsmethoden sowie additive 3D-Druck-Technologien ermöglichen zudem die konstruier- und visualisierbaren Formen mit erhöhter geometrischer Komplexität auch zu materialisieren. Mit diesen Herstellungstechnologien ist Differenzierung und Individualisierung von Formen industriell machbar geworden.

Da die Form eines Objektes untrennbar mit deren Eigenschaften und Leistungsfähigkeit verknüpft ist, können funktionale biologische Prinzipien immer mit neuartiger Ästhetik verknüpft werden. Hierbei werden biologische Form- bzw. Gestaltwerdungsprozesse digital simuliert und zielgerichtet für die Gestaltentwicklung eingesetzt. Auf diese Weise können in der Natur erkennbare Prinzipien, wie die durch (Knippers/Speck 2012) vorgestellten Grundprinzipien der Differenzierung, Heterogenität, Anisotropie, Hierarchie und zusätzlich auch die der Funktionsintegration zu gänzlich anderen Gestaltformen von Produkten führen, die durch biologische Prinzipien auf ein anderes Level an Integration von Material, Herstellung, Funktion und Formalästhetik gehoben werden. Ein Indiz, dass vielleicht

in Zukunft ein Wechsel von einem technisch geprägten hin zu einem biologisch inspirierten Gestaltungsparadigma stattfinden könnte. Dieser Ansatz kann eine wahrhaftig neuartige Denkweise über die Art und Weise wie Produkte inkl. Fahrzeuge produziert werden, anstoßen. Diese unterschiedlichen Produktionsweisen beeinflussen selbstverständlich wie Fahrzeuge gestaltet sind.

8.4 Potentiale analytischer Algorithmik

Während es im vorherigen Abschnitt um Gestalterzeugung ging, d.h. der Komposition aus Formelementen und Formordnungen, konzentriert sich dieser auf die Informationsgenerierung durch die Dekomposition von Objekten in kleinere Einheiten, bzw. die Extraktion von Informationen aus Bildern/Modellen. Durch das Erzeugen eines digitalen Modells sind Eigenschaften eines Modells quantifizierbar. Diese Quantifizierbarkeit syntaktischer Information kann innerhalb des Gestaltungsprozesses bedeutsam werden. Analysen reichen von einfachen, traditionellen Messungen bis hin zu komplexen, algorithmischen Analysen wie beispielsweise der Geometrischen Morphometrik, automatisierten Schnitten und Analysen von Zug und Fallung eines Teilelements oder im Typus der Information, beispielsweise Abstände oder Größenverhältnisse in Form von Kenngrößen (Parameter). Hierzu gehören klassische, globale Größen wie Länge, Breite, Höhe, Radstand oder Raddurchmesser. Diese numerischen Werte geben absolute Kenngrößen oder im Vergleich mit anderen zu untersuchenden Objekten relative Vergleichsverhältnisse.

Da Automobile sich in ihrem allgemeinen topologischen Aufbau, d.h. in der Position von Rädern, Passagieren sowie den groben Ausmaßen ähneln, bietet es sich an, spezifizierte Kenngrößen zu analysieren, um diese mit anderen Fahrzeugen wie Vorgänger- oder Konkurrenzmodellen zu vergleichen. Eine nicht-triviale und detailreiche Gestalt besteht stets aus einer Sammlung aus verschiedenen Gestaltelementen und Gestaltordnungen. Diese Kompositionen bieten das Fundament für eine informations-

theoretische Auffassung von Gestalt und demzufolge einer systemischen Art der Gestaltungsmethodologie, die sich informationstheoretische Daten zu Nutze macht.

Das vorgestellte konzeptionelle Rahmenwerk zur Erzeugung digitaler, algorithmischer Modelle kann aus diesem Grund nicht nur als formgenerierendes Rahmenwerk zur Komposition von Gestalt angesehen werden, sondern in inverser Perspektive ebenfalls als Gerüst zur Analyse bzw. Dekomposition von Gestalt angewendet werden. Durch die Methodik der geometrischen Dekomposition können unterschiedliche Gestaltelemente wie beispielsweise eine Kühlermaske in einzelne Formbestandteile, zum Beispiel Umrisskurven und Binnenelemente, zerlegt werden, die wiederum in nächstkleinere Elemente aufgespaltet werden können. Über die Typen, Häufigkeit ähnlicher Elemente und Position bzw. Ausrichtung der verwendeten Elemente lassen sich (zwar limitierte aber dennoch nachvollziehbare) Rückschlüsse über den Aufbau und die Wirkung eines Elements und somit seiner Ästhetik schließen. Dieser systemische Ansatz kann zum Vergleich und zur Systematisierung und Kategorisierung von Formelementen eingesetzt werden und demnach Erkenntnisse über die zu untersuchenden Formelemente liefern.

Je nach Aufgabenbereich und Zielinteresse sind Analysen spezifisch ausgerichtet. Bei der Analyse von komplexen, d.h. mehrdeutig wahrnehmbaren und beschreibbaren Gestalten gibt es unbegrenzte Möglichkeiten zur spezialisierten Formanalyse. Es muss entschieden werden, ob (1) *intrinsische Forminformation* oder (2) *Informationen aus Formvergleichen* zwischen mehreren Formen von Interesse sind. Demnach muss in einer Formanalyse ergebnisorientiert vordefiniert werden, welche Arten von Informationen gesucht werden und was bestimmt oder verglichen werden soll. Eine Analyseperspektive muss definiert

werden. In wissenschaftlichem, systemtheoretischem Sinne wird quasi ein Analyseexperiment aufgesetzt, bei welchem (1.) die zu untersuchenden und vernachlässigbaren Information sowie Informationstypen mit ihren jeweiligen Randbedingungen, (2.) die Analysemethode und (3.) die Modalität der Auswertung oder Visualisierung der Ergebnisse definiert werden. Sind diese Untersuchungsbedingungen bestimmt, können die Informationen gesammelt und ausgewertet werden.

Viele Größen oder geometrische Reduzierungen wie Schnitte sind erst durch den Vergleich und die Gegenüberstellung zu anderen Größen aussagekräftig. Die Erkenntnis steckt daher in der Differenzierung von Elementen. So ist eine Gestalt einer anderen erst dann ähnlich, wenn sich bestimmte Bestandteile, d.h. Formelemente, Formordnungen oder Größenverhältnisse gleichen.

Wie in der Architektur sind im automobilen Kontext Schnitte wesentlich für die Analyse von Formen, da sie aus definierten Perspektiven dreidimensionale Formen auf die zweidimensionale Ebene reduzieren und eine reduzierte Forminformation abbilden. Während viele Softwarepakete die Möglichkeit besitzen, Schnitte zu generieren, erlauben angepasste algorithmische Werkzeuge spezialisierte und somit schnellere Lösungen. Gerade bei der Analyse des Fahrzeuginnenraums, können schnell definierte Schnitte automatisch generiert und dargestellt werden.

Die Verwendung digitaler Gestaltdaten ermöglicht den automatisierten Austausch von Daten mit Ingenieurprogrammen, was eine engere Zusammenarbeit mit Ingenieurteams ermöglicht. In einigen Fällen kann Software sogar (halb-) automatisch Modellinformation austauschen, sodass eine nahezu automatische Rückkopplung zwischen Entwurfsmodell und funktionaler Analyse aus spezialisierten Softwarepaketen entsteht. Dies

verspricht funktionale, ingenieurtechnisch geprüfte Information über die Leistungsfähigkeit bestimmter Formen, die somit zu performanten Leistungsformen angepasst werden können.

Hierbei sind natürlich in unterschiedlichen Phasen einer Automobilentwicklung unterschiedliche Informationen von Bedeutung. In der frühen Phase der Entwicklung sind Vergleichsverhältnisse interessant, um die richtige Positionierung eines Produkts in der eigenen Produktfamilie zu gewährleisten bzw. sich von Konkurrenzprodukten abzuheben. Bei der Konzeptionsphase sind absolute Werte sowie exakte Proportionen noch von untergeordneter Rolle. Dies ändert sich jedoch im weiteren Verlauf eines Entwurfsprojekts. Es lässt sich vorsichtig verallgemeinern, dass je finaler eine Gestaltentwicklung fortgeschritten ist, desto wichtiger werden absolute Kenngrößen von Formelementen und die Methoden diese Information zu extrahieren und zu visualisieren. Formanalysen durch Quantifizierung von Form dienen zusammengefasst vor allem folgender Zwecke:

1. Zur Wissensgenerierung durch Vergleich, Differenzierung, Kategorisierung und Archivierung von Gestaltinformationen
2. Zur Qualitätssteigerung durch Sichtbarmachung von Fehlern oder Ungenauigkeiten
3. Zur Informationsdarstellung (in Echtzeit) während des Gestaltungsprozess

Zwar haben sich Softwarepakete über die Jahre stark weiterentwickelt, es haben sich jedoch noch nicht alle Methoden durchgesetzt. Dies hat möglicherweise die folgenden Gründe:

1. Für den Entstehungsprozess ist Quantifizierung von Form zwar nützlich, aber nicht zwingend notwendig und hat gerade in Projekten mit limitiertem Zeitbudget geringe Priorität.
2. Echtzeitdarstellung der Informationen kann ablenkend auf den Gestaltungsprozess wirken und somit den Entwurfsprozess verlangsamen oder gar negativ beeinflussen.
3. Einige Methoden sind noch nicht in Softwarepakete eingebaut, da sie für zu spezielle Anwendungsgebiete vorgesehen sind.
4. Durch vergleichendes Betrachten können entscheidende Erkenntnisse alleine durch unsere Wahrnehmung extrahiert werden, sodass ein wissenschaftlicher und quantifizierbarer Beweis für Gestaltung nicht mehr als wichtig angesehen wird.

Das parallele Sammeln von Informationen über einen Entwurf ermöglicht den Schritt hin zu einem informierten Designprozess (*Augmented Design Process*) in dem der Computer Datenmaterial über das Modell sammelt und diese dem Designer in Echtzeit in unterschiedlichster Form anzeigen kann. Somit erhält der Gestalter Informationen, die seine rein menschliche Wahrnehmung übersteigen. In diesem Fall muss die Geschwindigkeit der Berechnung berücksichtigt werden, denn erst durch schnell und möglichst in Echtzeit berechnete Darstellungen ergibt sich für den Formgestalter ein effektiver Nutzen.

8.5 Potentiale generativer Variabilität und Varianz

“Design ist jedoch eine Disziplin, die in besonderem Maße von Entscheidungskompetenz lebt und nur bedingt vom Wissen. Design besteht vor allem darin, zunächst Varietät zu erzeugen - also gestalterische Alternativen zu generieren -, um hernach diese Varietät wieder “in Richtung 1” (also die eine zu realisierende Lösung) zu reduzieren und unter Alternativen diejenige auswählen zu können, die am ehesten dem angestrebten Ziel entspricht. Entwerfen ist also immer auch zu einem Gutteil: Verwerfen.”
(Götz 2010, 59)

Auf der Suche nach einer guten Entwurfslösung ist die Erzeugung von Varianz unerlässlich. Da ein Objekt wie ein Fahrzeug in seiner Gesamtheit kognitiv nicht komplett zu erfassen ist, werden Zwischen- und Teilergebnisse benötigt, um höchste Qualität und insbesondere Kommunikationsmittel zu schaffen. Durch ein Metamodell mit definierten Variablen kann eine gezielte Variabilität abgebildet werden, die Varianz in Ergebnissen erlaubt. Varianten und Alternativen produzieren und archivieren zu können, stellt eines der größten Vorteile digitaler Arbeitsmethoden dar. Modelle mit wenigen Parametern erlauben bereits ein Spektrum an Möglichkeiten zu erzeugen. Durch Parameterdefinitionen lassen sich daher ganze Objektfamilien produzieren. Um möglichst effizient Varianten entwickeln zu können, hat es sich als ratsam erweisen direkt zu Beginn des Vorhabens mögliche Entwicklungsrichtungen eines aufzusetzenden Systems

zu identifizieren. Hierbei sollte berücksichtigt werden, welche Parameter konstant und welche variabel bzw. abhängig von anderen Systemelementen definiert werden. In dieser Arbeit haben sich zusammenfassend drei fundamentale Kategorien von varianzerzeugenden Methoden herausgebildet:

1. *Methoden der stochastischen Varianzgenerierung:*
Diese Kategorie setzt gezielt Zufallszahlen zur Definition von Parametern ein, um innerhalb eines klar definierten Parameterspektrums automatisiert Varianten generieren zu können. Auf diese Weise werden punktuell Lösungen in einem abgegrenzten Möglichkeitsraum, dem Morphospace, erzeugt. Es sind keine algorithmischen Bewertungsmechanismen notwendig, da der Nutzer über die Wertigkeit der Ergebnisse entscheidet. Diese Methoden können einen inspirierenden Nutzen haben und helfen einen Startpunkt für eine zielgerichtete Suche zu finden.
2. *Methoden zur zielgerichteten Suche:* Die zweite Kategorie beinhaltet Methoden, die durch definierte Bewertungsmechanismen die generierten Ergebnisse beurteilen und sie gegebenenfalls abändern können, um eine Lösung mit besserer Bewertung zu erhalten. In diese Kategorie fallen alle Such- und Optimierungsalgorithmen. Während diese Methoden für definierbare technische Vorgaben wie Topologieoptimierungen bereits praktischen Nutzen bieten, ist ihre Anwendung für ästhetische Aufgabenstellungen problematisch. Bis zu diesem Zeitpunkt sind globale Bewertungsmethoden von Objekten nicht ausreichend. Es bedarf erheblicher individueller

Analysemethoden, um ein formalästhetisches Bewertungsprogramm zu entwickeln.

3. *Intuitive, systematische Suche*: Die letzte Kategorie vereint Mechanismen der systematischen, jedoch nicht-automatisierten Varianzgenerierung bzw. Gestaltsuche. Durch das gezielte Setzen von adäquaten Steuerungselementen in Form von Geometrien, Parameterfeldern, Parameterschieberegeln und Bedingungsbeziehungen zwischen Elementen, lässt sich ein variables System generieren, welches erlaubt den Möglichkeitsraum durch das Steuern von gesetzten Regeln zu erkunden.

Zusammenfassend lässt sich formulieren, dass egal welcher Ansatz zur Varianzbildung verfolgt wird, für die Visualisierung eines Ergebnisses alle Parameter zumindest temporär definiert sein müssen. Denn erst nachdem ein funktionierendes Modell besteht, lassen sich aus diesem Varianten erzeugen und Anpassungen vornehmen, die in traditionellen Verfahren eine Neukonstruktion erfordert hätte.

8.6 Erarbeitung einer spezialisierten Entwicklungsumgebung

In diesem Kapitel werden die Erkenntnisse und Vorteile der Wiederverwendbarkeit von algorithmischem Material erörtert. Wie bereits mehrfach angesprochen, besitzt das Arbeiten im virtuellen Raum den Vorteil, dass Arbeitsschritte rückstandslos und ohne großen Zeitverlust rückgängig gemacht werden können. Zudem können mehrere Versionen oder Zwischenstände abgespeichert und parallel bewertet werden. In diesem Fall wird nicht nur die entstehende Gestaltinformation, d.h. dreidimensionale Geometriedaten, abgespeichert, es können ebenfalls alle logischen Schritte des Entstehungsprozesses hin zu dieser Gestalt archiviert werden. Dies gibt ein Indiz auf die potentielle Wiederwendbarkeit durch die Verwendung digitaler Erzeugungslogik. Die Fallstudien zeigen, dass das präsentierte Rahmenwerk ein abstraktes Grundgerüst für die Zerlegung syntaktischer Gestaltinformation in unterschiedliche Bestandteile darstellen kann. Implementierte Algorithmikmodule werden dabei projektübergreifend eingesetzt. Auf diese Weise macht sich eine anfängliche Entwicklungsinvestition bezahlt. Insbesondere die Fallbeispiele der Mustergenerierung zeigen praktische Beispiele zur Verwendung zweidimensionaler Strukturen, aber auch den Aufbau praktischer Zusatzmodule für im Automobildesign wiederkehrende Modellierungsproblematiken. Diese Bestandteile geometrischer, ordnungsbildender oder transformierender Natur können als universelle Bausteine für neue Projekte angesehen werden, die alleine durch die Addition weiterer Transformationen wie Projektionsmethoden aus dem zweidimensionalen Raum in die dritte Dimension transferiert werden können.

Durch den algorithmischen Formalisierungsprozess einer Gestalt entsteht somit die Chance Bestandteile für weitere Entwicklungsprozesse zu erzeugen. Durch die Archivierung und Übertragung von bereits erzeugter Logik erlaubt Computational Design nicht nur die Generierung neuartiger Gestalt, sondern ebenfalls eine kontinuierliche Evolution der eigenen Entwicklungsumgebung – einer individuellen digitalen Werkzeugpalette.

Die Weiterentwicklung der Entwicklungsumgebung eines Computational Designers unterscheidet sich hierbei in einigen Punkten von der eines traditionellen Modelleuers oder Designers. Die Evolution der Entwicklungsumgebung von Computational Design fokussiert sich auf die Wiederverwendbarkeit generalisierter Algorithmen, Programmfunktionen oder Programmierklassen bzw. -objekte. Dies erlaubt erfahrenen Computational Designern eine programmiertechnische Modularität innerhalb der eigenen Entwicklungsumgebung zu erreichen. Ein erhöhtes Maß an Generalisierung verfolgt das Ziel, so wenig algorithmische Probleme wie möglich mehrfach lösen zu müssen. Diese Strategie führt somit zu einer gesteigerten, gestalterischen Flexibilität, da die algorithmische Logik so wenig wie möglich an vorherige Gestaltungsformen gebunden ist. Es gehört zu den informatischen Grundprinzipien, dass Entwickler geschriebene Algorithmik in Form nachvollziehbar dokumentierter Programmbibliotheken abspeichern, damit Programme und vor allem ihre Bestandteile schnell und effizient wiederverwendet werden können. Hierbei geht es nicht um die Archivierung von Entwürfen, sondern vielmehr um die Archivierung von Entwurfselementen (algorithmischen Bausteinen), die wiederholende Modellierungsschritte beschleunigen, sodass mehr Zeit für den eigentlichen Entwurf verbleibt.

Die Wiederverwendung von Algorithmen in unterschiedlichen Programmierumgebungen wurde ebenfalls erprobt, benötigt jedoch ebenfalls strategische Planung. Übergreifende Programmierlogik muss in diesem Fall in einer Sprache programmiert werden, die von unterschiedlichen Programmen eingelesen werden kann. Für Programmelemente, die einer schnellen Berechnungsgeschwindigkeit bedürfen, werden dabei meist die Programmiersprachen der niedrigsten, gemeinsamen Ebene (*low-level* Sprachen) bevorzugt.

Die weitere Form der Wiederverwendbarkeit beschreibt die Zusammenfassung und Integration von entwickelten, algorithmischen Prozessen in *Module*, *Assets*, *Plug-Ins* oder *Templates*. In diesen Containerformen werden Algorithmen in das Bedienkonzept einer Software integriert und ermöglichen ein Arbeiten innerhalb der bestehenden Entwurfsumgebung. Auf diese Weise wird entwickelte algorithmische Logik auch für Modelleure und Designer ohne Programmierkenntnisse bereitgestellt. Dies erweitert das Anwendungspotential von Computational Design in einem Unternehmen erheblich. Für Modelleure und Designer handelt es sich hierbei um eine Art *Black-Box*, deren interne Mechanismen ausgeblendet und unberücksichtigt bleiben, die jedoch von Experten verwaltet werden können. So können diese Module im Laufe der Zeit an die sich ändernden Aufgaben der Formgestalter angepasst werden, um ihre Arbeit kontinuierlich zu vereinfachen bzw. zu beschleunigen. Die Geschwindigkeit des Erzeugungsprozesses lässt sich durch die Implementierung algorithmischer Logik in einfach bedienbare Module nachhaltig steigern. Für die Modulimplementierung besteht jedoch stets das Dilemma des Funktionsumfangs. Werden Module mit wenig Funktionalität definiert, so werden für komplexere Aufgabenstellungen eine Menge dieser Module

benötigt. Dies erfordert Kenntnisse über die Menge der Module und ihrer kombinatorischen Möglichkeiten. Sind Module umfangreich umgesetzt, kann zwar eine einfachere Bedienbarkeit realisiert werden. Gleichzeitig benötigen umfangreiche Module jedoch einen vergleichsweise höheren Entwicklungsaufwand und können durch ihre Spezialisierung insgesamt ein kleineres Lösungsspektrum abdecken als durch die Kombination vieler kleiner Module. Beide Formen besitzen zusammenfassend im speziellen Kontext ihre Nützlichkeit und Berechtigung. Für Experten bieten kleine *Low-Level-Module* (*smallest building blocks*) die größte Form an Flexibilität, während integrierte *High-Level-Module* den Anwender schnell zu verwertbaren Ergebnissen führen können.

In die Kategorie der *High-Level-Module* gehören ebenfalls Vorlagenmodule (*templates*). Templates beschreiben generalisierte, algorithmische Modelle, die als Basis zur Weiterverarbeitung und Ausdefinierung verwendet werden können. Sie besitzen algorithmische Variabilität zur numerischen Anpassung für wiederkehrende, topologisch ähnliche Projektentwicklungen. Somit lassen sich vor allem zu Beginn eines Projekts wiederholende Prozesse beschleunigen und ein Projekt an einem bereits fortgeschrittenen Status beginnen. Entscheidend für die Nützlichkeit von Templates ist deren Abstraktions- und Anpassungsgrad, sodass sie den Lösungsraum von möglichen Ergebnissen durch vordefinierte Entscheidungen nicht unnötig einschränken. Es sind Module mit einem hohen Maß an Spezialisierung und können daher meist nur für spezifische Anwendungsfälle eingesetzt werden.

Durch die in Fallstudie 3 diskutierte Informationsextraktion von Proportionsdaten unterschiedlicher Fahrzeugmodelle in Datenbanken, kann die Extraktion und Archivierung von Gestalt-

information eine noch fundamental wichtigere Rolle erhalten. Denn neu entstehende Formen können mit einer Modellhistorie algorithmisch verglichen werden und ähnliche Informationen innerhalb von Modellgruppen können als charakteristische Merkmale visualisiert werden.

Es lässt sich zusammenfassen, dass Prozesse der Softwareentwicklung Potential für die Integration der Formentwicklung besitzen, um die Erzeugung von Form zu verbessern und zu beschleunigen. Zu diesen informatischen Grundprinzipien gehören Modularisierung und Erweiterbarkeit. Wiederholende, vorhersehbare Prozesse sollten stets automatisiert werden, damit Zeit für das Arbeiten an Problemen höherer Ebene bewahrt wird. Zudem führt dies zu einer informierten Entwicklungsumgebung (*Augmented Design*), die ein Arbeiten mit komplexeren Formelementen, digitalen Halbzeugen, und neuartigen Werkzeugen zu lässt. Computational Designer sollten sich in ihrem eigenen Interesse für kontinuierliches Zeitinvestment in die Weiterentwicklung ihrer Werkzeuge einsetzen. Durch eine Evolution der Werkzeuge kann eine nachhaltige Entwicklung fortwährender Innovationen erreicht werden. Das Potential von Computational Design ist durch Programmierung neue digitale Werkzeuge zu produzieren und somit kontinuierlich die eigenen Möglichkeiten zu erweitern.

8.7 Einige Grenzen des Computational Designs

Während in den vorherigen Kapiteln überwiegend Vorteile von Computational Design für den gestalterischen Entwurf aufgezählt wurden, sollen an dieser Stelle kritisch einige Nachteile diskutiert werden. In der Bearbeitung der Fallstudien haben sich Erkenntnisse ergeben, die zur produktiven Nutzung von Algorithmik im Gestaltungskontext unter Betracht gezogen werden sollten. So sollten stets von Anfang an die Ziele eines Projekts und die Vorzüge von Computational Design in diesem Projekt evaluiert und berücksichtigt werden. Denn ein Metamodell kann in vielen Fällen im direkten Vergleich zu klassischen Modellen mit höherem Aufwand verbunden sein. Aus wissenschaftlichen Gründen sind potenzielle Erkenntnisse durch formalisierte Gestaltungsprozesse und ihre klaren Definitionen stets relevant, in der gestalterischen Praxis gilt jedoch ein möglichst gutes Ergebnis in möglichst kurzer Zeit zu entwickeln. Der Entstehungsweg ist von nachgeschalteter Wichtigkeit. Wird ein Lösungsweg jedoch in Zukunft häufiger benötigt, kann sich jeglicher Implementierungsaufwand auszahlen.

Die allgemeine Herausforderung von Gestaltungsprozessen ist, dass aus zeitlichen Gründen Entscheidungen schnell und intuitiv getroffen werden müssen um ein Ergebnis visualisieren zu können. Durch eine Definition des Ziels ergeben sich meist gute Lösungen und in einigen Fällen können diese direkt umgesetzt werden ohne die Flexibilität oder Komplexität eines Metamodells zu benötigen. Eine produktive Anwendungsmöglichkeit von Computational Design ist in der frühen Konzeptphase und Ideenfindung (noch) limitiert. Eine schnelle Skizze kann als

schnelles Kommunikationsmittel einem aufwendigeren Metamodell überlegen sein. Denn zu diesem Zeitpunkt sind abstrakte Darstellungen bevorzugt, da sie mehr Interpretationsspielraum lassen und keine Vollständigkeit suggerieren.

In großen Unternehmen wie Automobilkonzernen existieren Strategien für die Vermarktung von Produkten, die sich parallel zur eigentlichen Produktentwicklung weiterentwickeln. Parallele Entwicklung dieser Art beeinflussen den Prozess einer laufenden Produktentwicklung. Da viele Entscheidungen durch das Management oder in anderen Abteilungen getroffen werden, ist es für den ausführenden Designer unmöglich alle möglichen Eventualitäten vorzubereiten. Solche Einflüsse verlangen Flexibilität im Entwurfssystem, sodass neuste Informationen und Entscheidungen direkt angepasst bzw. eingearbeitet werden können. Während gerade die Variabilität eines digitalen Metamodells besondere Flexibilität im Gestaltungsprozess ermöglichen kann, sind es grundlegende Änderungen, die ein gesamtes Metamodell obsolet machen können. Dies ist der Fall, wenn das erwünschte Ziel außerhalb des Möglichkeitsraums liegt. Für algorithmische Systeme kann dies fatal sein, wenn erheblicher Aufwand in eine Systementwicklung gesteckt worden ist. In diesem Fall könnten traditionelle Modellierungsmechanismen zu schnelleren und auch ausdefinierten Ergebnissen führen, denn sie verfügen über keine inhärente Konstruktionslogik (*Metadesign*) und sind daher in ihrer direkten Modellierung schneller.

Automobile Formensprache unterliegt zum Zeitpunkt dieser Arbeit geometrischer, topologischer Einschränkungen. Jede Fahrzeuggestaltung besitzt eine individuelle Konfiguration von Flächen oder Polygonen, die zu ihrer individuellen Gestalt führt. Diese geometrischen, topologischen Einschränkungen reduzieren den durch Parameter definierten Möglichkeitsraum einer Ober-

flächengestaltung. Topologisch unterschiedliche Ergebnisse, welche sich nicht im Möglichkeitsraum befinden, benötigen eigene Modelle und erfordern daher einen oftmals nicht investierbaren, zeitlichen Aufwand. Diese Eigenschaft lässt parametrisch unterschiedliche, jedoch topologisch identische Resultate vorhersehbar werden. Jedoch kann die Anmutung durch bereits geringe Parameteränderungen sichtbar beeinflusst werden.

*„An algorithm must be seen to be believed, and the best way to learn what an algorithm is all about is to try it.“
(Knuth 1981)*

Erst durch die Umsetzung zeigt sich die Qualität der verwendeten Methode. Die Richtung und der Grad der Flexibilität des Ergebnismodells kann unter Umständen schwierig prognostiziert werden. Somit können in unterschiedlichen Arbeitskonfigurationen unterschiedliche Probleme entstehen.

*„Nehmen wir an, dass alle diese Definitionen operativ eingesetzt werden können. Nehmen wir weiter an, dass die Computation zur Verarbeitung von Daten gemäß der Definitionen (also Muster-Identifikation, Entdeckung von Neuartigkeit, der Nützlichkeit etc.) möglich ist. Können wir uns tatsächlich erhoffen, von allen möglichen Bildern, die es gibt – computer-generiert oder nicht – die interessantesten zu finden?“
(Nadin 2003, 120)*

Zuletzt soll nochmals die Problematik einer automatisierten, algorithmischen Bewertung angesprochen werden. Gerade der Prozess der Entscheidungsfindung und insbesondere der

Bewertung von Gestaltungsfragen ist hochgradig kontextspezifisch und setzt umfassendes Wissen bzw. Erfahrungen voraus, um relevante Ergebnisse zu produzieren. Wir sind daher von einem vollautomatisierten Gestaltungsprozess noch weit entfernt, denn selbst die Implementierung einfachster visueller Identifikations- und Bewertungsmethoden bedeutet zum Zeitpunkt dieser Arbeit erheblichen Entwicklungsaufwand.

9

Schlussbetrachtung

Diese Arbeit lässt erkennen, dass Computational Design mehr als nur die simple Anwendung von Algorithmen bzw. Programmierung im Designprozess bedeutet. Es handelt sich vielmehr um eine Gestaltungshaltung, die versucht Regeln und Logik in Dingen zu identifizieren und diese für den Gestaltungsprozess produktiv nutzbar zu machen.

Zu Beginn der Arbeit wird der historische Kontext von Gestaltungsmethodologie und algorithmischer Gestaltung erarbeitet. Im dritten Teil der Arbeit werden Grundlagen und Grundbegriffe zu Computational Design etabliert. Der vierte Teil dieser Arbeit beschreibt den Stand der Technik automobiler Formentwicklung. Darauffolgend wird die Bearbeitungsstrategie in Form von Hypothesen und den zu verwendenden Methoden besprochen. Im sechsten Kapitel wird ein konzeptionelles Rahmenwerk zur Gestaltgenerierung präsentiert, welches als Basis für die folgenden Fallstudien eingesetzt wird. Nachfolgend werden sechs Fallstudien präsentiert, die das breite Spektrum an

Potentialen von Computational Design Strategien untersuchen und visualisieren. In der ersten Fallstudie wird die Struktur des konzeptionellen Rahmenwerks für gestalterische Muster-generierung praktisch erprobt. Die entwickelten Methoden sind bei der Gestaltung von Zierteilen im Fahrzeuginterieur eingesetzt worden und haben ihren praktischen Nutzen offenlegen können. In der zweiten Studie wird eine andersartige Methode zur Generierung volumetrischer Fahrzeugkörper entwickelt. Durch den Einsatz von Landungsfeldalgorithmen in Kombination mit Äquipotentialflächen können mit minimaler Dateninformation fahrzeugähnliche Formen algorithmisch generiert werden. In der dritten Fallstudie werden Methoden zur Transformation und Formanalyse präsentiert. Die entwickelten neuartigen Deformationsmethoden bieten Gestaltern ein neues Flexibilitätslevel zur Steuerung digitaler Form. Gleichzeitig bietet eine Strategie zur Verteilung von Landmarkpunkten die Basis für gezielte Informationsextraktion von Freiformen und kann eingesetzt werden um charakteristische Formmerkmale zu analysieren und zu archivieren. In der vierten Fallstudie wird ein algorithmischer Prozess zur gestalterischen Artikulation von Fahrzeugkörpern untersucht. Materialprinzipien gekniffter Bleche werden in Methoden zur Simulation und Regeln zur geometrischen Repräsentation übersetzt und praktisch angewandt. Durch einen algorithmischen Prozess können diese Materiallogiken auf Fahrzeugkörpern appliziert werden. Auch in dieser Anwendung wird die Strategie der Registrierung von Landmarkpunkten zur Positionierung der Formelemente verwendet. In der folgenden Fallstudie 5 werden die Potentiale von algorithmischer Varianzbildung analysiert und praktisch erprobt. Dabei sind die entwickelten Methoden der Fahrzeugkörper-generierung und Oberflächenartikulation eingesetzt worden um

eine Serie von Fahrzeuggestalten zu generieren. Die resultierende morphogenetische Generierungsstrategie bietet Potential zur Inspiration von neuartigen Fahrzeugtypen. In der letzten Fallstudie werden Computational Design Strategien unterstützend in der Entwicklung eines vollständigen Konzeptfahrzeugs eingesetzt. Auf diese Weise können entwickelte Methoden unter realistischen, praktischen Umgebungsbedingungen analysiert werden und Vorteile und Nachteile von Computational Design Strategien identifiziert werden. Die Erkenntnisse der Fallstudien sind im achten Kapitel übergreifend zusammengefasst und kategorisiert.

In dieser Arbeit wurde empirisch bestätigt, dass algorithmische Designmethoden im Entwurfskontext zur Entwicklung automobiler Gestaltung einsetzbar sind und zu neuartigen Lösungen führen können. Die präsentierten Fallstudien stellen Beispiele angewandter algorithmischer Methodik dar und visualisieren nachhaltig das Potential von Computational Design für den Entwurf von Fahrzeugen. Es wurde aufgezeigt, dass Ergebnisse mit hoher Qualität in reduzierter Entwicklungszeit zu produzieren sind. Abgesehen von rein messbaren Verbesserungen bietet Computational Design qualitatives Potential neue Wege in der automobilen Gestaltung zu beschreiten. Die kontinuierliche Formalisierung von Designelementen und Prinzipien erlaubt das Bilden komplexer Metamodelle, die zur Erzeugung neuartiger Gestalt eingesetzt werden können. Sein ästhetisches Potential erhält das System aus Faktoren wie der mathematischen Exaktheit bestimmter Formen, der Erzeugbarkeit unerreichter Formkomplexität oder der Kombination von Varianzgenerierungsmethoden, um möglichst gute Gestaltungsergebnisse zu finden. Weiterführend fördert die algorithmische Definition von Arbeitsschritten das bessere Verständnis der eigenen Arbeit, da es

sich zum algorithmischen Erfassen eines Themas oder einer Problematik als sinnvoll herausstellt eben dieses in einzelne Teilprobleme zu zerlegen, um die Komplexität der Aufgabe in Form handhabbarer Teilaufgaben zu bearbeiten. Aus den Lösungen der Teilprobleme lässt sich im darauffolgenden Schritt ein System zur Lösung der Gestaltungsaufgabe definieren. Auf diesem Weg steigert ein algorithmisches Arbeiten eine systemische Grundhaltung und Arbeitsweise.

„Das sogenannte ‚Einmaleins des Designs‘ wird es nicht geben – eher die ‚Mathematik des Designs‘, also eine Vielfalt unterschiedlicher Designformeln.“

(Leschke 1998, 146)

9.1 Ausblick

Computational Design Strategien werden mit hoher Wahrscheinlichkeit einen wichtigen Teil der Gestaltung beeinflussen. Entwicklungen neuer Methoden werden neue Möglichkeiten des Formerzeugens und des Arbeitens eröffnen. Neue Darstellungstechnologien wie *Virtual Reality* oder *Augmented Reality* (Azuma et al. 2001) werden Einzug in den Prozess der Gestaltung finden und diesen bereichern. (Engelbart 1962)

„Intuitive, gestenbasierte Interaktionsformen werden die Gestaltung unterstützen. Oberflächen werden sich ähnlich wie im Plastilin verändern lassen. Sogar die Simulationen handwerklicher Bearbeitungsverfahren wie Sägen und Feilen sollen dem Design verfügbargemacht werden. Mittels Datenhandschuh, Flying Joystick oder auch videobasierter Gestenerkennungssysteme lassen sich diese virtuellen Werkzeuge kontrollieren. Visualisiert werden kann die aktuelle Geometrie durch stereoskopische Sichtgeräte oder Rückprojektionswände in Verbindung mit Stereobrillen.“

(Seer 1998, 163)

Weiterführend besteht erkennbares Potential in der Verknüpfung unterschiedlicher, spezialisierter Softwaresysteme und unterschiedlicher Design- und Ingenieurdisziplinen. Um funktionale Bewertungsgrundlagen von Gestaltungslösungen zu berechnen, können direkte Schnittstellen zu Analysesoftwarepaketen von unterschiedlichen Ingenieursoftwarepaketen hergestellt werden. Auf diese Weise können Aerodynamik, Gewichtsverteilung,

Steifigkeit und u.v.m. voll- oder teilautomatisch analysiert werden und Indizien auf die finale Performanz einer Gestaltung geben. Obwohl uns der Prozess der Digitalisierung bereits als weit fortgeschritten erscheinen mag, existieren im Gestaltungsalltag weiterhin viele Prozesse, die nicht zu formalisieren oder gar automatisieren sind.

*„Wir wissen sehr wenig über Bilder, obwohl die Kultur der Gegenwart eine Kultur des Anschaulichen ist.“
(Nadin 2003, 110)*

Insbesondere der Prozess des Schaffens von Objekten mit hohem Level an Ästhetik und Nützlichkeit ist zum Zeitpunkt dieser Arbeit noch weit von einer vollständigen Automatisierung entfernt. (Schön 1984) hat den Prozess des Gestaltens durch konstante „*Reflection in Action*“ charakterisiert, (Itten 2003, 9) beschreibt ihn als Prinzip von „*Erleben-Erkennen-Können*“.

Insbesondere der Prozess der Bewertung kann (bislang) nur von einer Recheneinheit wie dem Computer nicht übernommen werden. Einer Maschine fehlen Kontext und Grundlagen zu Prozessen (Erfahrungswissen). Diese Vielfalt an Erfahrungen, die Marvin Minsky als „*common sense*“ (Minsky 1986) beschreibt, sind algorithmisch keineswegs trivial und (noch) eine Herausforderung in der Forschung künstlicher Intelligenz.

Es gilt Entwicklungen in Computer Vision (Papazian 1991) und *Automatic Reversive Engineering* zu beobachten, da diese Methoden das Potential haben, sowohl Bausteine für die maschinelle Identifikation formalästhetischer Bestandteile und selektierter Gestaltqualitäten zu sein, als auch topologischen Aufbau zu ermöglichen. Wie erfahrene CAD-Modelleure wissen, gibt es zu den meisten geometrischen Aufgabenstellungen

unterschiedliche Lösungsansätze. Die automatisierte Zerlegung einer komplexen Geometrie in eine Topologie geometrischer Bausteine/Bestandteile erlaubt die vereinfachte Suche nach einer guten Komposition.

Sobald diese Technologien entwickelt worden sind, lohnt es sich über einzelne, detaillierte Bewertungsautomaten nachzudenken. Kleine parallel funktionierende Algorithmen, die auf unterschiedlichen Ebenen und mit unterschiedlichen Gewichtungen und Blickweisen Teilaspekte einer Gestalt bewerten. Diese Bewertungen könnten auf der einen Seite parallel zum Entwurfsprozess als Assistenzsysteme den Designer auf mögliche Unsauberkeiten hinweisen oder gar autonom aus einer gewichteten Summe von Teilbewertungen eine Gesamtbewertung über eine Gestaltung abgeben. Diese Assistenzsysteme werden nicht pauschal ein gutes Design erkennen können, sondern lediglich innerhalb ihrer Bewertungskriterien ein Urteil fällen. Ihr Potential läge darin viele unterschiedliche Kriterien in kürzester Zeit bewerten zu können und parallel eigene Vorschläge zu produzieren, um diese dem Designer als Alternativen anzubieten. Erst wenn dies gegeben ist, würde ich persönlich den Computer als Gestaltungspartner (Terzidis 2006) ansehen, bisher ist er lediglich ein Werkzeug. (Samim 2015) Ein Vormarsch der Algorithmen ist auch in der Bewältigung großer Datenmengen zu beobachten. Selbstlernende Großrechner mit Methoden des *Deep Learnings* oder *Neurale Netzwerke* können in Zukunft gänzlich neuartige Strategien der Formanalyse und Formentwicklung ermöglichen.

9.2 Eine neue Art von Automobildesigner?

Von automobilen Formgestaltern wird erwartet in kürzester Zeit eine große Anzahl von Entwürfen mit hoher Gestaltungsqualität zu liefern. Dies erreichen sie aktuell nur durch Erfahrung und die dadurch entstandene effiziente Nutzung ihrer Gestaltungswerkzeuge. Für die erwähnte Erfahrung muss eine entsprechende Zeit mit den jeweiligen Werkzeugen verbracht werden. Je mehr Zeit in die jeweilige Nutzung eines Gestaltungswerkzeugs investiert wird, desto größer werden die handwerklichen Fähigkeiten, das Wissen über ihre Handhabung und somit ihr effektiver Umgang. Die Zeichnung ist und bleibt wohl das wichtigste Werkzeug gerade für die sehr frühen Entwurfsphasen, denn es ist das bis heute effizienteste Medium zur Kommunikation visueller Information. Egal ob digital oder analog, die Handzeichnung ist auf regelmäßiges Praktizieren angewiesen, denn es handelt sich nicht nur um eine rein geistige Arbeit, sondern gleichwohl um die physiologische Koordination zwischen Auge bzw. Gehirn und Hand. Gerade der physiologische Aspekt der Handzeichnung bedarf – ähnlich einer Sportart – des regelmäßigen Praktizierens. Wird längere Zeit nicht *trainiert*, sinkt das Leistungsniveau. Diese menschliche Eigenschaft führt in großen Unternehmen zu Spezialistentum. Denn die Spezialisierung eines einzelnen Mitarbeiters auf definierte Aufgabenfelder ist eine Strategie um Arbeitsergebnisse mit höchstmöglicher Qualität und Quantität zu erlangen. Dies funktioniert, wenn ein Unternehmen die Größe erreicht, dass für spezialisierte Aufgaben Experten eingesetzt werden können. In kleineren Gestaltungsfirmen wie Architekturbüros müssen Mitarbeiter ein weiteres Aufgabenspektrum

abdecken, was dazu führt, dass nur selten vergleichbare Expertise wie bei rein spezialisierten Mitarbeiterstellen erreicht werden kann. Um die Komplexität eines modernen Gebäudes mit der bestehenden Mitarbeiterschaft bewältigen zu können, werden in der Architektur neuste Entwurfsmethoden erforscht und bereits in der Praxis eingesetzt. Dadurch verschwimmt in der Architektur die klassische Teilung zwischen Modelleur und Designer. Im direkten Vergleich zwischen der Architektur und dem Transportation Design ist im angewandten Transportation Design Spezialisierung weit verbreitet. Spezialisten wie Exterieur-Designer, Interieur-Designer, Advanced-Designer, Color and Trim Designer, UX-Designer, Clay-Modelleur, Digital-Modelleur etc. sind darauf ausgelegt in ihrem definierten Teilbereich die entsprechenden Teilelemente (Teilgestalten) des Gesamtprodukts (Automobil) mit der höchsten Detailqualität zu produzieren.

Dieser Zusammenhang zwischen Praxiserfahrung und Erzeugungseffizienz führt dazu, dass Gestalter im Alltag meist auf bekannte Werkzeuge und Methoden zurückzugreifen, mit welchen sie bereits Erfahrungen sammeln konnten und sicher und effizient Ergebnisse erzeugen können. Somit haben es neue Werkzeuge anfangs schwer mit etablierten Prozessen mitzuhalten, denn die Arbeitsabläufe sind noch nicht in gleichem Maße erprobt. Dem gegenüber steht das Potential mit neuen Werkzeugen neuartige Ergebnisse erzeugen zu können.

Die Trennung zwischen Modelleur und Designer besitzt offensichtliche Vor- wie Nachteile. Für die Trennung spricht, dass Verantwortlichkeiten klar getrennt sind. Der Modelleur ist rein auf die Umsetzung in möglichst hoher handwerklicher Qualität konzentriert, während der Designer für das Gesamtkonzept und die ästhetischen Entscheidungen verantwortlich ist. Gerade in komplexen Umsetzungsprozessen kann die Trennung von Vorteil

sein, denn die Anforderungen der Umsetzung benötigt die volle Aufmerksamkeit des Modelleurs. Ein dezidierter Designer kann nun als Kontrollinstanz für die ästhetische Qualität fungieren. Gegen eine solche Spezialisierung spricht Innovationspotential von generalistischem, verknüpfendem Wissen. Somit haben beide Vorgehensweisen, das Generalistentum als auch das Spezialistentum, ihre definierten Vorzüge. Übertragen auf Computational Designer sind beide Formen denkbar:

1. *Computational Design Spezialisten*, die sich ausschließlich auf die Methodenentwicklung und/oder die modellierende Ausführung konzentrieren; oder
2. *Computational Design Generalisten*, die unterschiedliche Methoden auf ihr gestalterisches Potential untersuchen, Methoden und Technologien in den Kontext der Gestaltung übertragen und eigenständig Entwurfsvorschläge entwickeln.

Ähnlich des Handzeichnens, benötigt auch die effiziente und flexible Nutzung algorithmischer Methoden Erfahrung und Expertise. Für die Anwendung von Computational Design Strategien im Transportation Design ist zusätzlich zum gestalterischen Sachverstand informatisches Wissen unumgänglich, um algorithmische Anpassung und Entwicklung neuer Entwurfswerkzeuge durchführen zu können. Zum Zeitpunkt der Arbeit sind solche Fachkenntnisse (noch) nicht Teil der Ausbildung von Transportation-Designern. Im direkten Vergleich zur Architektur, aber auch zunehmend in anderen Gestaltungsbereichen wie der Grafik oder Animation, werden wiederum Programmierungs-

kurse und Einführungskurse in die Informatik häufig Teil der Grundausbildung. Die Fähigkeiten einzelner Designer und Architekten ist schon zu Beginn ihrer Laufbahn stark heterogen. Jede Gestalterpersönlichkeit trägt eigenes angeeignetes Wissen und gestalterische Fähigkeiten bei. Bis Computational Design flächendeckend Teil der Ausbildung im Transportation Design wird, wird seine Etablierung daher von der speziellen Expertise einzelner Computational Designer abhängig sein. Daher wird es gerade in der Anfangsphase der Etablierung von Computational Design voraussichtlich verschiedene Hybridlösungen für die Anwendung geben. Diese unterschiedlichen Abstufungen werden von einzelnen Experten aus Computational Design und Informatik bis hin zu reinen Anwendern der Algorithmik reichen. Ein Großteil der Gestalter wird nicht die entsprechende Zeit aufwenden können, um algorithmische Systeme zu entwickeln. Sie werden daher reine Nutzer von vorgefertigten, simplifizierten digitalen Entwicklungsumgebungen sein. Während die reine Nutzung von algorithmischen Methoden durch visuelle Programmierungssprachen bei weniger komplexen Aufgaben verhältnismäßig effizient Ergebnisse hervorbringt, benötigt die detaillierte Anpassung oder gar Neuentwicklung von Algorithmen intensivere Kenntnisse. Ist ein solches System jedoch elegant konstruiert, lassen sich durch Auswahl, Kombination und Organisation unterschiedlicher Methodenbausteine einfache und elegante Lösungen konstruieren.

“When several computer algorithms are available for solving problems of a particular type, you will almost always find that the more efficient algorithms will be more difficult to understand and to code than the simpler, more intuitive algorithms.”

(Vrajitoru/William 2014, 2)

Dass sich die Designprofession von den noch sehr traditionellen, analog physischen Modellierungsmethoden auf absehbare Zeit trennen wird, ist nicht zu erwarten. Zwar können digitale Methoden in verkürzter Zeit komplexe digitale Gestalt erzeugen, doch bleibt die Materialisierung für die ästhetische Bewertung der Gestalt unumgänglich. Solange virtuelle Darstellungstechniken für die Wahrnehmung von Form analogen Tonmodellen unterlegen sind und solange die Flexibilität und Geschwindigkeit des Veränderns von physischer Form (Hinzufügen und Abtragen von Material) nicht mit dem klassischen, analogen Modellbau mithalten kann, werden digitale Gestaltungs- wie auch Fertigungsmethoden den Designprozess ausschließlich erweitern und nicht ersetzen.

10

Literaturverzeichnis

Aish, Robert (2005): From Intuition to Precision. In: Duarte, José/Ducla-Soares, Gonçalo/Sampaio, Zita (Hg.): Digital Design: the Quest for New Paradigms: 23rd eCAADe Conference Proceedings. Lisbon. S. 10–14. Online unter: http://cumincad.scix.net/cgi-bin/works/Show?2005_010.

Alexander, Christopher (1964): Notes on the Synthesis of Form. Harvard University Press.

Alexander, Christopher (1978): A Pattern Language: Towns, Buildings, Construction. Oxford: Oxford University Press.

Arthur, Wallace (2006): D'Arcy Thompson and the theory of transformations. In: Nature Reviews Genetics 7, S. 401–406.

Ast, Friedrich (1808): Grundlinien der Grammatik, Hermeneutik und Kritik. Landshut.

Azuma, Ronald et al. (2001): Recent advances in augmented reality. In: IEEE Computer Graphics and Applications 21, S. 34–47.

Bäck, T/Rudolph, G/Schwefel, H.-P. (1993): Evolutionary Programming and Evolution Strategies: Similarities and Differences. In: Proceedings of the Second Annual International Conference on Evolutionary Programming. S. 11–22. Online unter: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.42.3637>.

Barequet, Gill/Har-Peled, Sarel (2001): Efficiently Approximating the Minimum-Volume Bounding Box of a Point Set in Three Dimensions. In: Journal of Algorithms 38, S. 91–109.

- Barlow, J./Ozaki, R. (2005): Building mass customised housing through innovation in the production system: lessons from Japan. In: *Environment and Planning A* 37, S. 9–20.
- Barr, Alan H. (1984): Global and local deformations of solid primitives. In: *ACM SIGGRAPH Computer Graphics* 18, S. 21–30.
- Baudy, Bastian (2010): *in the outside*. Hochschule Pforzheim.
- Baudy, Bastian et al. (2015): Computational Design and Automotive Gestalt. In: *Architectural Design* 85, S. 114–121.
- Baumgarten, Alexander G. (1983): *Aesthetica [1750-1758]*. Hamburg: Deutsche Teilübersetzung: Theoretische Ästhetik.
- Bechmann, Dominique/Gerber, Dominique (2003): Arbitrary shaped deformations with DOGME. In: *The Visual Computer*, S. 175–186.
- Becker, Micro (2013): Mesh Curvature Analysis for Rhino Grasshopper. Online unter: <http://www.informance-design.com/?p=690>.
- Bense, Max (1965): *projekte generativer ästhetik*. In: Nees, G/Bense, Max (Hg.): *computer-grafik*. Stuttgart: Walther.
- Bense, Max (1982): *Aesthetica - Einführung in die neue Aesthetik*. 2. Aufl. Agis-Verlag.
- Bense, Max (2004): *Projekte generativer Ästhetik [1965]*. In: Büscher, Barbara/von Herrmann, Hans-Christian/Hoffmann, Christoph (Hg.): *Kaleidoskopien: Ästhetik als Programm*. Berlin: Vice Versa. S. 197–199.
- Bentley, Peter J./Wakefield, J.P. (1997): *Generic Evolutionary Design*. In: Chawdhry, P.K./Roy, R./Pant, R.K. (Hg.): *Soft Computing in Engineering Design and Manufacturing*. London: Springer Verlag. S. 289–298.
- Bézier, Pierre (1986): *The Mathematical Basis of the UNIURF CAD System*. Butterworth & Co Ltd.
- Birkhoff, G D (1933): *Aesthetic Measure*. Cambridge (USA): Harvard University Press.
- Blinn, James F. (1982): A Generalization of Algebraic Surface Drawing. In: *ACM Transactions on Graphics* 1, S. 235–256.
- Bookstein, F.L. (1989): „Size and shape“: a comment on semantics. In: *Systematic Zoology* 38, S. 173–180.
- Bookstein, Fred L. (1997): *Morphometric Tools for Landmark Data: Geometry and Biology*. illustrier. Cambridge: Cambridge University Press.
- Bookstein, F.L. (2002): Principal warps: Thin-plate splines and the decomposition of deformations. In: *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on* 11, S. 567–585.

- Borrel, P./Bechmann, D. (1991): Deformation of n-Dimensional Objects. In: J. Computat. Geom. Appl. 1, S. 427–453.
- Bourdieu, Pierre (1972): Die feinen Unterschiede. Kritik an der Urteilskraft. 24. Suhrkamp Verlag.
- Bürdek, Bernhard E. (2010): Design Theorie. In: Romero-Tejedor, Felicidad/Jonas, Wolfgang (Hg.): Positionen zur Designwissenschaft. Kassel: Kassel University Press. S. 26–31.
- Bürdek, Bernhard E. (2015): Design - Geschichte, Theorie und Praxis der Produktgestaltung. 4. Aufl. Basel: Birkhäuser Verlag GmbH.
- Burry, Mark (2003): Between Intuition and Process: Parametric Design and Rapid Prototyping. In: Kolarevic, Branko (Hg.): Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing. New York, London: Spon Press. S. 210–229.
- Chan, C. K./Tan, S. T. (2001): Determination of the Minimum Bounding Box of an Arbitrary Solid: An Iterative Approach. In: Computers and Structures 79, S. 1433–1449.
- Chen, Yaofei et al. (2005): An Empirical Study of Programming Language Trends. In: IEEE Software 22, S. 72–79.
- Chomsky, Noam (1957): Syntactic Structures. Second Edi. Berlin: Walter de Gruyter GmbH & Co. KG.
- Coquillart, Sabine (1990): Extended Free-Form Deformation: A Sculpturing Tool for 3D Geometric Modeling. In: ACM SIGGRAPH Computer Graphics 24, S. 187–196.
- Cross, Nigel (2007): Designerly Ways of Knowing. Basel, Boston, Berlin: Birkhäuser Verlag.
- Cunningham, Will (2006): The Magic of Houdini. Boston: Thomson Course Technology PTR.
- De Casteljaeu, Paul (1963): Courbes et surfaces à pôles. Paris.
- Deb, Kalyanmoy/Saxena, Vikas (1997): Car Suspension Design for Comfort using Genetic Algorithms. In: Thomas Back (Hg.): Proceedings of the Seventh International Conference on Genetic Algorithms. S. 553–560.
- Demaine, Erik D. et al. (2015): A review on curved creases in art, design and mathematics. In: Symmetry: Culture and Science 26, S. 145–161.
- Demaine, Eric D./O'Rourke, Joseph (2007): Geometric Folding Algorithms: Linkages, Origami, Polyhedra. Cambridge: Cambridge University Press.
- Dietrich, Cornelia/Dominik, Krinninger/Schubert, Volker (2013): Einführung in die Ästhetische Bildung. 2. Weinheim und Basel: Beltz Juventa.

- Dorst, Kees/Cross, Nigel (2001): Creativity in the design process: co-evolution of problem–solution. In: *Design Studies* 22, S. 425–437.
- Dryden, IL/Mardia, KV (1993): Multivariate shape analysis. In: *Sankhyà: The Indian Journal of Statistics, Series A* 55, S. 460–480.
- Dubberly, Hugh (2004): *How do you design? A Compendium of Models*. Dubberly Design Office.
- Duddeck, Fabian (2007): Multidisciplinary Optimization of Car Bodies. In: *Structural and Multidisciplinary Optimization* 35, S. 375–389.
- Duden (2016a): Form. In: Duden Online. Online unter: <http://www.duden.de/rechtschreibung/Form>.
- Duden (2016b): Gestalt. In: Duden Online. Online unter: <http://www.duden.de/rechtschreibung/Gestalt>.
- Eble, G.J. (1999): Developmental and non-developmental morphospaces in evolutionary biology. In: *Morphospace Concepts and Applications*.
- Ehrenfels, Christian Freiherr v. (1937): Über Gestaltqualitäten. In: *Philosophia* 2, S. 139–141.
- Elber, Gershon (1992): Free Form Surface Analysis Using a Hybrid of Symbolic and. University of Utah. Online unter: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.77.3535&rep=rep1&type=pdf>.
- Elewa, Ahsraf M. T. (2010): *Morphometrics for Nonmorphometricans*. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag.
- Epps, Gregory (2013a): Bentley and Kyungeun KO. Online unter: <http://www.robofold.com/make/consultancy/projects/bentley-and-kyungeun-ko>.
- Epps, Gregory (2013b): RoboFold. Online unter: <http://www.robofold.com/>.
- Fogel, Lawrence J/Owens, A. J./Walsh, M. J. (1966): *Artificial Intelligence through Simulated Evolution*. New York: John Wiley.
- Forschner, Anne (2009): 01. BMW Lovos Concept. Online unter: <https://www.anneforschner.de/>.
- Frazer, John (2002): Creative Design and the Generative Evolutionary Paradigm. In: Bentley, Peter J./Corne, David W. (Hg.): *Creative Evolutionary Systems*. San Diego: Morgan Kaufmann Publishers. S. 253–274.
- Gain, James/Bechmann, Dominique (2008): A survey of spatial deformation from a user-centered perspective. In: *ACM Transactions on Graphics (TOG)* 27, S. 107–121.
- Goodman, Nelson (1978): *Ways of Worldmaking*. Indianapolis: Hackett Publishing Cp, Inc.

- Götz, Matthias (2010): Gut gedacht - gut Gemacht? In: Romero-Tejedor, Felicidad/ Jonas, Wolfgang (Hg.): Positionen zur Designwissenschaft. Kassel: Kassel University Press. S. 58–62.
- Grünbaum, Branko/Shephard, G.C. (1987): Tilings and Patterns. New York: W. H. Freeman and Company.
- Häberlein, Tobias (2012): Praktische Algorithmik mit Python. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH.
- Hager, F.-P. (2007): System. In: Historisches Wörterbuch der Philosophie, Band 10. Schwabe Verlag. S. 824–825.
- Heidegger, Martin (1926): Sein und Zeit. 17. Auflag. Tübingen.
- Herder (1955): Reynoldssche Zahl. In: Der Grosse Herder. Verlag Herder Freiburg. S. 1083.
- Hermes, H. (2007): Algorithmus. In: Historisches Wörterbuch der Philosophie. Schwabe Verlag. S. 652.
- Hils, Daniel D. (1992): Visual Languages and Computing Survey: Data Flow Visual Programming Languages. In: Journal of Visual Languages & Computing 3, S. 69–101.
- Höfler, Carolin (2010): Seeing by doing - Josph Albers und die Materialisierung des Digitalen. In: kunsttexte, Journal für Kunst- und Bildgeschichte, Themenheft 1, Kunst und Design. hrsg. v. Gora Jain. S. 1–12. Online unter: <http://edoc.hu-berlin.de/kunsttexte/2010-1/hoefler-carolin-2/PDF/hoefler.pdf>.
- Holland, John H. (1992): Adaptation in Natural and Artificial Systems. Cambridge (USA): MIT Press.
- Holland, Gray (2009): A Periodic Table of Form: The secret language of surface and meaning in product design. Online unter: <http://www.core77.com/posts/12752/a-periodic-table-of-form-the-secret-language-of-surface-and-meaning-in-product-design-by-gray-holland-12752>.
- Hsu, William M./Hughes, John F./Kaufman, Henry (1992): Direct manipulation of free-form deformations. In: Proceedings of the 19th annual conference on Computer graphics and interactive techniques - SIGGRAPH '92, S. 177–184.
- Huffmann, David A (1976): Curvature and creases: A primer on paper. In: IEEE Transactions on Computers 25, S. 1010–1019.
- Itten, Johannes (2003): Gestaltungs- und Formenlehre. Stuttgart: Urania Verlag.
- Jonas, Wolfgang (2010): Design - Systemwissenschaften. In: Romero-Tejedor, Felicidad/Jonas, Wolfgang (Hg.): Positionen zur Designwissenschaft. Kassel: Kassel University Press. S. 170–173.

- Jormakka, Kari (2008): Basics: Methoden der Formfindung. Basel, Boston, Berlin: Birkhäuser Verlag.
- Kagermann, Henning/Wahlster, Wolfgang/Helbig, Johannes (2013): Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0. In: Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0. Frankfurt a.M.
- Kambartel, W. (2007): Symmetrie. In: Historisches Wörterbuch der Philosophie, Band 10. Schwabe Verlag. S. 745–749.
- Kandinsky, Wassily (1911): Über das Geistige in der Kunst. Insbesondere in der Malerei. Revidierte. Bern: Benteli Verlag.
- Kandinsky, Wassily (1926): Punkt und Linie zur Fläche. München: Alber Langen Verlag.
- Kandinsky, Wassily (1980): Über das Geistige in der Kunst. Bern: Benteli Verlag.
- Kangari, R/Halpin, D. W. (1989): Potential robotics utilization in construction. In: Journal of Construction Engineering and Management 115, S. 126–143.
- Kant, Immanuel (1968): Kritik der Urteils kraft. In: Werksausgabe X.
- Kardasis, Ari (2011): The Soft Grid. Massachusetts Institute of Technology.
- Kaulbach, F. (2007): Modell. In: Historisches Wörterbuch der Philosophie, Band 6. Schwabe Verlag. S. 45–47.
- Kazancioglu, Emre et al. (2003): Robust Optimization Of An Automobile Valvetrain Using A Multiobjective Genetic Algorithm. In: Proceedings of DETC'03 ASME 2003 Design Engineering Technical Conferences. Chicago.
- Kendall, D.G. (1977): The Diffusion of Shape. In: Advances in Applied Probability 9, S. 428–430.
- Kieselbach, Ralf J. F. (1998): Im Gespräch mit Peter Schreyer, Leiter AUDI Design. In: Kieselbach, Ralf, J. F. (Hg.): The Drive to Design - Geschichte, Ausbildung und Perspektiven im Autodesign. Stuttgart: avedition GmbH. S. 148–155.
- Kilian, Martin et al. (2008): Curved folding. In: ACM Transactions on Graphics 27, S. 1.
- Kimble, Chris (2013): Knowledge management, codification and tacit knowledge. In: Information Research 18.
- Klein, Rolf (2005): Algorithmische Geometrie: Grundlagen, Methoden, Anwendungen. 2. vollst. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag.
- Klette, Reinhard/Rosenfeld, Azriel (2004): Digital Geometry: Geometric Methods for Digital Picture Analysis. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers.

- Knippers, Jan/Speck, Thomas (2012): Design and Construction Principles in Nature and Architecture. In: Bioinspiration & Biomimetics 7.
- Knuth, Donald (1981): The Art of Computer Programming. Third Edit. Reading, Massachusetts: Addison Wesley.
- Koschitz, D/Demaine, ED (2008): Curved crease origami. In: Advances in Architectural Geometry (AAG, S. 2–5.
- Küster, Rolf L. A. (2010): Statement zur Physik. In: Romero-Tejedor, Felicidad/Jonas, Wolfgang (Hg.): Positionen zur Designwissenschaft. Kassel: Kassel University Press. S. 174–177.
- Lakoff, George (1971): Linguistik und natürliche Logik. Frankfurt a.M.: Athenäum.
- Leitão, António/Santos, Luís/Lopes, José (2012): Programming Languages For Generative Design: A Comparative Study. In: International Journal of Architectural Computing 10, S. 139–162.
- Leiva, J.P. et al. (2001): Automobile Design Using the GENESIS Structural Optimization Program. In: Nafems Seminar: Advances in Optimization Technologies for Product Design. Chicago.
- Leschke, Harald (1998): Daimler-Benz-Design - Advanced Design, Visionen in die Zukunft. In: Kieselbach, Ralf J. F. (Hg.): The Drive to Design - Geschichte, Ausbildung und Perspektiven im Autodesign. Stuttgart: avedition GmbH. S. 136–147.
- Lewandowsky, Pina/Zeischegg, Francis (2005): Visuelles Gestalten mit dem Computer. 3. Auflage. Reinbek: Rowohlt Taschenbuch Verlag.
- Lewiner, Thomas/Lopes, H/Vieira, AW (2003): Efficient implementation of marching cubes; cases with topological guarantees. In: Journal of Graphics Tools, S. 1–11.
- Lorenson, William E./Cline, Harvey E. (1987): Marching Cubes: A High Resolution 3D Surface Construction Algorithm. In: Computer Graphics 21, S. 163–169.
- Löw von und zu Steinfurth, Ludwig (1909): Das Automobil - sein Bau und sein Betrieb. Berlin/Wiesbaden: C.W. Kreidels Verlag.
- Macey, Stuart/Wardle, Geoff (2014): H-Point: The Fundamentals of Car Design & Packaging. 2. Pasadena & Culver City: Art Center College of Design & Design Studio Press.
- Mainzer, K. (2007): Topologie. In: Historisches Wörterbuch der Philosophie, Band 10. Schwabe Verlag. S. 1289–1290.
- Mayr, Ernst (1997): Typological versus Population Thinking. In: Evolution and the Diversity of Life. 5th: Harvard University Press. S. 26–29.
- McGhee, George R. (2006): The concept of the theoretical morphospace. In: Geometry of Evolution. Cambridge: Cambridge University Press. S. 57–70.

Menges, Achim (2012): Morphospaces of Robotic Fabrication, From theoretical morphology to design computation and digital fabrication in architecture. In: Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design: Proceedings of the Robots in Architecture Conference 2012. Wien New York: Springer. S. 28–47.

Menges, Achim/Ahlquist, Sean (2011): Computational Design Thinking: Computation Design Thinking. 1. Auflage. John Wiley & Sons.

Mercedes-Benz (2015): Concept IAA - Presstext. Sindelfingen. Online unter: <https://www.mercedes-benz.com/de/mercedes-benz/design/mercedes-benz-design/konzeptfahrzeuge/concept-iaa-intelligent-aerodynamic-automobile/>.

Mercedes-Benz (2016): Sensual purity: the Mercedes-Benz design philosophy. Online unter: <https://www.mercedes-benz.com/en/mercedes-benz/design/mercedes-benz-design/philosophy/sensual-purity-the-mercedes-benz-design-philosophy/>.

Metzger, Wolfgang (1953): Gesetze des Sehens. Frankfurt a.M.: Verlag von Waldemar Kramer.

Meyer, Bertrand (1988): Objektorientierte Softwareentwicklung. aus dem Am. Hemel Hempstead: Cak Hanser und Prentice-Hall International.

Minsky, Marvin (1986): The Society of Mind. New York: Simon & Schuster Paperbacks.

Mitteroecker, Philipp/Huttegger, Simon M. (2009): The Concept of Morphospaces in Evolutionary and Developmental Biology: Mathematics and Metaphors. In: Biological Theory 4, S. 54–67.

Myers, Brad (1990): Taxonomies of Visual Programming and Program Visualization. In: Visual Languages and Computing 1, S. 97–123.

Nadin, Mihai (2003): Das Interessante als computationale Zielsetzung - Ein Ausflug im ästhetischen Raum. In: Rödiger, Karl-Heinz (Hg.): Algorithmik - Kunst - Semiotik: Hommage für Frieder Nake. Heidelberg: Synchon Publishers. S. 99–134.

Nake, Frieder (1974): Ästhetik als Informationsverarbeitung. Grundlagen und Anwendung der Informatik im Bereich ästhetischer Produktion und Kritik. Wien, New York: Springer.

Negroponte, Nicholas (1975): Soft Architecture Machines. Cambridge: MIT Press.

Newman, T/Yi, H (2006): A survey of the marching cubes algorithm. In: Computers & Graphics 30, S. 854–879.

Ousterhout, J.K. (1998): Scripting: higher level programming for the 21st Century. In: Computer 31, S. 23–30.

Peugeot (2015): Peugeot Fractal. Online unter: <http://www.peugeot.de/concept-cars-showroom/fractal/concept-car/>.

Picon, Antoine (2006): Algorithmic Architecture or the Computer as a Double? In:

- Terzidis, Kostas (Hg.): *Algorithmic Architecture*. Abingdon: Routledge - Taylor & Francis Group. S. vii–x.
- Piker, Daniel (2013): Kangaroo: Form finding with computational physics. In: *Architectural Design* 83, S. 136–137.
- Polanyi, Michael (1962): *Personal Knowledge*. corrected. London: Routledge.
- Posada, Jorge et al. (2015): Visual Computing as Key Enabling Technology for. S. 1–11.
- Press, William H. et al. (2007): *Numerical Recipes 3rd Edition: The Art of Scientific Computing*. 3. Edition. Cambridge: Cambridge University Press.
- Rechenberg, Ingo (1973): *Evolutionsstrategie: Optimierung technischer Systeme nach Prinzipien der biologischen Evolution*. Stuttgart: Fromman Holzboog Verlag.
- Reichert, Steffen (2010): *Reverse Engineering Nature: Design Principles for Flexible Protection inspired by Ancient Fish Armor of Polypteridae*. Massachusetts Institute of Technology.
- Renault/Lovegrove Studio, Ross (2013): Concept Car Twin'Z. Online unter: <http://www.renault.de/renault-welt/produkt/studien/renault-twinz/>.
- Rezzonico, Luca (2015): *Automobildesigner - noch ohne Computer*. In: *Fahrzeugdesign: Eine Geschichte zwischen Technik und Mode*. Bielefeld: Delius, Klasing & Co. KG. S. 14–19.
- Rittel, Horst W. J./Webber, Melvin M. (1973): Dilemmas in a General Theory of Planning. In: *Policy Sciences* 4, S. 155–169.
- Rourke, Joseph O (1985): Finding Minimal Enclosing Box.pdf. In: *International Journal of Computer & Information Sciences* 14, S. 183–199.
- Rusinkiewicz, Szymon (2004): Estimating Curvature and Their Derivatives on Triangle Meshes. In: *Symposium on 3D Data Processing, Visualization, and Transmission*. S. 486–493. Online unter: http://gfx.cs.princeton.edu/pubs/_2004_ECA/curvpaper.pdf.
- Schmitz, Thomas H./Groninger, Hannah (2012): Einleitung. In: Schmitz, Thomas H./Groninger, Hannah (Hg.): *Werkzeug / Denkzeug*. Bielefeld: transcript Verlag.
- Schön, Donald A. (1984): *The Reflective Practitioner: How Professionals Think in Action*. Reprint. Perseus Books.
- Schrader, Halwart (1985): Zu diesem Buch. In: Schrader, Halwart et al. (Hg.): *Automobil-Spezialkarosserien: Sonderausführungen deutscher Personenwagen 1906-1986*. München: BLV Verlagsgesellschaft. S. 5.
- Schwefel, Hans-Paul (1977): *Numerische Optimierung von Computer-Modellen mittels der Evolutionsstrategie : mit einer vergleichenden Einführung in die Hill-Climbing- und Zufallsstrategie*. Basel und Stuttgart: Birkhäuser Verlag.

- Scriba, Christoph J./Schreiber, Peter (2010): 5000 Jahre Geometrie. 3. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag.
- Sederberg, Thomas W./Parry, Scott R. (1986): Free-form deformation of solid geometric models. In: ACM SIGGRAPH Computer Graphics 20, S. 151–160.
- Seeger, Hartmut (2014): Basiswissen Transportation-Design. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Seer, Hans (1998): Wachsende digitale Umwelt. In: Kieselbach, Ralf J. F. (Hg.): The Drive to Design - Geschichte, Ausbildung und Perspektiven im Autodesign. Stuttgart: avedition GmbH. S. 157–165.
- Seidenberg, Lee R et al. (1992): Surface Curvature Analysis Using Color Body and Chassis Engineering Ford Motor Company. In: Proceedings of IEEE Conference on Visualization, 1992. Boston, MA: IEEE. S. 260–269.
- Shannon, Claude E./Weaver, Warren (1949): Mathematical Theory of Communication. First Pape. Champaign: University of Illinois Press.
- Sieger, Daniel/Menzel, Stefan/Botsch, Mario (2016): Constrained space deformation techniques for design optimization. In: Computer-Aided Design 72, S. 40–51.
- Simon, Herbert A. (1996): Sciences of the Artificial. 3. Aufl. The Mit Press.
- Simonis, Anette (2001): Gestalttheorie von Goethe bis Benjamin. Köln, Weimar, Wien: Böhlau Verlag.
- Stiny, George (2008): Shape: Talking about Seeing and Doing. Mit Press.
- Stiny, George/Gips, James (1978): Algorithmic Aesthetics: Computer Models for Criticism and Design in Arts. Berkeley: University of California Press.
- Strube, W. (2007): Gestalt. In: Historisches Wörterbuch der Philosophie, Band 3. Schwabe Verlag. S. 540–547.
- Surazhsky, T. et al. (2003): A Comparison of Gaussian and Mean Curvatures Estimation Methods on Triangular Meshes. In: 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.03CH37422) 1, S. 1021–1026.
- Tachi, Tomohiro (2009): Origamizing polyhedral surfaces. In: IEEE transactions on visualization and computer graphics 16, S. 298–311.
- Tachi, Tomohiro/Epps, Gregory (2011): Designing One-DOF Mechanisms for Architecture by Rationalizing Curved Folding. In: Proceedings of the International Symposium on Algorithmic Design for Architecture and Urban Design.
- Tarski, A. (1983): Logic, Semantics and Metamathematics: Papers from 1923-38. 2. Rev. Ed. Hackett Publishing Cp, Inc.
- Terzidis, Kostas (2006): Algorithmic Architecture. Abingdon: Roulledge - Taylor & Francis Group.

Thompson, D'Arcy Wentworth (1918): On Growth and Form. Deutsch: Ü. Frankfurt am Main: Suhrkamp.

Vitruv (1991): Zehn Bücher über Architektur. 5. Auflage. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft.

von Bertalanffy, Ludwig (1976): General System Theory: Foundations, Development, Applications. REV. George Braziller Inc.

von Bertalanffy, Ludwig (2011): The Meaning of General System Theory. In: Menges, Achim/Ahlquist, Sean (Hg.): Computational Design Thinking. Chichester: John Wiley & Sons. S. 50–57.

von Bormann, C. et al. (2007): Form und Materie. In: Historisches Wörterbuch der Philosophie, Band 2. Schwabe Verlag. S. 977–1030.

von Goethe, Johann Wolfgang (1817): Schriften zur Morphologie II. In: Gesamtausgabe der Werke und Schriften in zweiundzwanzig Bänden. Stuttgart: J.G. Cotta'sche Buchhandlung. S. S.15ff.

von Herrmann, Hans-Christian (2004): Programmierung des Schönen. In: Büscher, Barbara/von Herrmann, Hans-Christian/Hoffmann, Christoph (Hg.): Kaleidoskopien: Ästhetik als Programm. Berlin: Vice Versa. S. 154–163.

Von Neumann, John/Morgenstern, Oskar (1944): Theory of Games and Economic Behavior. 16th Anniv. Princeton: Princeton University Press.

Vrajitoru, Dana/William, Knight (2014): Practical Analysis of Algorithms. Cham: Springer.

Weibel, Peter (1991): Transformationen der Techno-Ästhetik. In: Rötzer, Florian (Hg.): Digitaler Schein. Ästhetik der elektronischen Medien. 4. Aufl. Frankfurt a.M.: Suhrkamp Verlag. S. 205–245.

Weibel, Peter (2000): Was kann ein Automat? In: Hyperorganismen. Essays, Fotos, Sounds der Ausstellung „Wissen“. Hannover: Olaf Arndt, Stefanie Peter und Dagmar Wünnenberg (Hg.). S. 451. Online unter: http://www06.zkm.de/zkmarchive/www02_pewe/html/images/stories/pdf/2000/0658_WAS_KANN_EIN_AUTOMAT.pdf.

Wiener, Norbert (1968): Kybernetik: Regelung und Nachrichtenübertragung in Lebewesen und Maschine. 2. Auflage. Düsseldorf und Wien: Econ-Verlag GmbH.

Wirth, Thomas (2007): Gut in Form. In: Auto-Motor-und-Sport. Online unter: <http://www.auto-motor-und-sport.de/news/gut-in-form-1105755.html>.

Witkin, Andrew P./Heckbert, Paul S. (1994): Using particles to sample and control more complex implicit surfaces. In: Computer Graphics, Proc. SIGGRAPH' 94. ACM. S. 1–9.

- Wloch, Krzysztof/Bentley, Peter J (2004): Optimising the Performance of a Formula One Car using a Genetic Algorithm. In: Parallel Problem Solving from Nature - PPSN VIII, 8th International Conference, Birmingham, UK, September 18-22, 2004. Proceedings. Berlin und Heidelberg: Springer Verlag. S. 702–711.
- Wong, Wucius (1993): Principles of Form and Design. New York: John Wiley & Sons.
- Woodbury, Robert (2010): Elements of Parametric Design. New York: Routledge.
- Wyvill, Geoff/McPheeters, Craig/Wyvill, Brian (1986): Data structure for soft objects. In: The Visual Computer 2, S. 227–234.
- Yang, Pinghai/Qian, Xiaoping (2007): Direct Computing of Surface Curvatures for Point-Set Surfaces. In: Botsch, M./Pajarola, R. (Hg.): Eurographics Symposium on Point-Based Graphics. Prague: The Eurographics Association.
- Yoshida, T (2006): A short history of construction robots research & development in a Japanese company. In: International Symposium on Automation and Robotics in Construction. Tokyo: International Association for Automation and Robotics in Construction. S. 188–193. Online unter: http://www.iaarc.org/publications/fulltext/isarc2006-00037_200605311353.pdf.
- Zelditch, Miriam Leah/Swidorski, Donald L./Sheets, H. David (2004): Geometric Morphometrics for Biologists: A Primer. London, Waltham, San Diego: Academic Press.

Zusammenfassung

In dieser Dissertation wird die Anwendbarkeit von computerbasierten Gestaltungsmethoden jenseits klassischer CAD-Modellierung für das Gestaltungsfeld des Automobildesigns untersucht. Formgenerierende Algorithmen und dazugehörige Anwendungsstrategien werden systematisch im Hinblick auf ihre Anwendung im Automobildesign und ihre charakteristische Formensprache vergleichend betrachtet, praktisch erprobt und experimentell erforscht. Weitergehend wird untersucht, zu welchem Zeitpunkt algorithmische Methoden im Gestaltungsprozess einsetzbar sind. Anfänglich wird die Arbeit in den historischen, methodologischen und theoretischen Kontext der Entwicklung von Computational Design gestellt. Einleitende Grundlagen sowie der Stand der Technik werden erörtert. Anschließend werden syntaktische Bestandteile virtueller Formerzeugung und Formveränderung auf prinzipieller Ebene diskutiert und in Form eines konzeptionellen Gerüsts zusammengefügt. Dieses generalisierte Gerüst soll als Rahmenwerk zur Einordnung der Fallstudien, sowie als generelle Beschreibung eines Gestaltungssystems dienen. Eine Kollektion aus sechs Fallstudien bietet einen Überblick über Möglichkeiten von Computational Design und die Vielfalt ihrer Anwendbarkeit im Automobildesign. Die Fallstudien umfassen (1) algorithmische Methoden zur Erzeugung von Mustern, (2) die Erforschung einer generativen Methode zur algorithmischen Erzeugung von dreidimensionalen Fahrzeugkörpern, (3) Umformungsmethoden von Gestaltungen, um geometrische Körper mit erhöhtem Freiheitsgrad deformieren zu können, (4) Methoden der algorithmischen, dreidimensionalen Modulation einer Körperoberfläche, (5) Methoden der algorithmischen Bildung von Entwurfsvarianten, sowie (6) eine empirische Studie zur Validität von Computational Design im praktischen Entwurfsprozess eines Konzeptfahrzeugs. Aus den Fallstudien ergeben sich eine Reihe übergreifender Erkenntnisse über den Nutzen von Algorithmen und computerbasiertem Entwerfen im automobilen Gestaltungskontext. Es wird diskutiert, welche Arten von algorithmischen Methoden in welchen Gebieten und zu welchen Zeitpunkten Anwendung finden können. Dabei wird aufgezeigt, dass Computational Design mehr als nur die simple Anwendung von Algorithmen bzw. Programmierung im Designprozess bedeutet.

Vorgelegt der



Universität Stuttgart
Institut für Computerbasiertes
Entwerfen und Baufertigung

ISBN 978-3-9819457-3-7