

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	IX
Tabellenverzeichnis	XXI
Abkürzungsverzeichnis	XXV
1 Einleitung	1
2 Forschungsziel und Lösungsweg	5
2.1 Forschungsziel	6
2.2 Lösungsweg zur Erreichung des Forschungsziels	6
2.2.1 Mit Tesselierung und Faltung zur selbsttragenden Struktur	7
2.2.2 Herstellung der individuellen Einzelteile mit der inkrementellen Blechumformung	8
3 Musterbauwerk zur Erprobung und Optimierung des Baukonzeptes	9
3.1 Design des Musterbauwerks	10
3.2 Lastenheft und Risikobewertung	13
3.2.1 Anforderungen an Tragwerkskonzept und –konstruktion	14
3.2.2 Anforderungen an die Fertigungstechnik	16
3.2.3 Anforderungen an die Fügetechnik	16
4 Tesselierung und Faltung selbsttragender Strukturen	17
4.1 Optimierung des Tesselierungs- und Faltungsverfahrens	19
4.1.1 Auffaltung der Geometrie auf Grundlage der Tesselierung	21
4.1.2 Homogenisierung der Tesselierung	23
4.2 Implementierung des Tesselierungs- und Faltungsverfahrens in einem Softwaretool	24
4.3 Erweiterung des Softwaretools zu einem lückenlosen Planungswerkzeug für die Entwurfs- und Ausarbeitungsphase	29
4.3.1 Datenstruktur der Faltung	29
4.3.2 Ausarbeitung der Bauteildetails im Hinblick auf Fertigung und Montage	33
4.3.2.1 Einmodellierung der Patrizengeometrie	33
4.3.2.2 Fügelaschen / Erweiterung der Pyramide zur Herstellung mit der IBU	34
4.3.2.3 Sterndetail / Dreiecke	35
4.3.3 Bereitstellung von Daten für die Analyse des Tragverhaltens	36
4.3.4 Bereitstellung von Planungsunterlagen für Fertigung und Montage	38
4.3.5 Berücksichtigung von Fertigungsrandbedingungen	41
4.3.5.1 Ausrichten der Bauteile	42
4.3.5.2 Geometrische Simulation des Abkantprozesses	43
4.3.6 Weiterverarbeitung der Ausgangsdaten vom Softwaretool in einer CAD/CAM-Software	44
4.4 Kritische Bewertung des Tesselierungsverfahrens und des Softwaretools	46
5 Analysekonzept für statisches und dynamisches Tragverhalten	47
5.1 Vorstudie zum Tragverhalten von plattenartigen Tragelementen mit ein- und mehrlagigen Faltungen	48

5.1.1	Biegebeanspruchte Blechfaltungen	48
5.1.1.1	Longitudinalfaltungen	49
5.1.1.2	Punktfaltungen	50
5.1.2	Tragfähigkeitsanalyse von Fallleichtbauplatten mittels nicht-linearer Finite- Element Methode	51
5.1.2.1	Geometrische und materielle Annahmen und Randbedingungen	51
5.1.2.2	Geometrierzeugung und Berechnungsablauf	51
5.1.2.3	Lasten	52
5.1.2.4	Auflager- und Zwischenlagerbedingungen	53
5.1.3	Ergebnisse	54
5.1.3.1	Longitudinalfaltungen	55
5.1.3.2	Punktfaltungen, sechseckiges Raster	58
5.1.4	Zusammenfassung	61
5.2	Überschlägige Vorstatik durch Approximation als Stabwerksmodell	62
5.3	Ausführliche Analyse des Tragverhaltens durch FE-Simulation	63
5.3.1	Allgemeine Angaben	63
5.3.2	Abmessungen	64
5.3.3	Lastannahmen	65
5.3.4	Von Mises Vergleichsspannung	66
5.3.5	Verformungen	67
5.3.5.1	Verschiebung in Z-Richtung	67
5.3.5.2	Gesamtverschiebung	68
5.3.5.3	Modale Eigenformen	69
5.3.6	Anschlüsse	70
5.4	Validierung der FEM Rechnung durch Bauteilversuche	73
5.5	Auslegung einer mobilen Fundamentstruktur	74
5.5.1	Statische Berechnung	77
5.6	Kritische Bewertung des statischen und dynamischen Analysekonzeptes	78
6	Flexible Fertigungskette zur Herstellung individueller Fassadenelemente	79
6.1	Fertigungsfolge und Auswahl der Fertigungstechnologien	80
6.2	Funktionsweise der inkrementellen Blechumformung (IBU)	86
6.3	Entwicklung eines flexiblen Werkzeugkonzeptes	90
6.4	Optimierung der Fertigungskette für Fassadenelemente	93
6.4.1	Vorversuche zur Prozessauslegung bei der IBU	93
6.4.2	Vorversuche zur Minimierung der Bearbeitungszeit	101
6.4.3	Messung der Bauteilgenauigkeit und der Blechdickenverteilung entlang der Fertigungskette	106
6.4.4	Anpassung der Fertigungsstrategie für ungünstige Ausprägungen der Bauteilgeometrie	112
6.4.5	Prozessübergreifende Optimierung der gesamten Fertigungskette	117
6.5	Kritische Bewertung der entwickelten Fertigungskette	119
7	Füge- und Montagekonzept	123
7.1	Montagekonzept	124
7.2	Fügekonzepkt	126

7.3 Kritische Bewertung des Füge- und Montagekonzeptes	132
8 Ertüchtigung des Baukonzeptes zur vollwertigen Gebäudehülle.....	133
8.1 Abdichtungs- und Entwässerungskonzept	134
8.1.1 Fugen.....	134
8.1.2 Pyramidenkopf.....	135
8.2 Randausbildung der Fallstruktur	136
8.3 Konzepte zur Wärmedämmung des Leichtbausystems	137
8.3.1 Dämmung als zusätzliche Lage auf der Außenseite	138
8.3.2 Dämmung als zusätzliche Lage auf der Innenseite.....	139
8.4 Ansätze zur Integration von Lichtdurchlässigkeit und Transparenz	141
8.5 Kritische Bewertung der bauphysikalischen Eigenschaften	145
9 Übertragbarkeit des entwickelten Baukonzeptes auf größere Dimensionen.....	147
9.1 Übertragung des entwickelten Baukonzeptes auf existierende Großbauwerke	148
9.1.1 Fallbeispiel St. Anthony Hütte, Oberhausen	149
9.1.2 Fallbeispiel Louvre, Cour Visconti, Paris.....	153
9.2 Kritische Bewertung der Übertragbarkeit auf größere Dimensionen	156
10 Kostenabschätzung für die industrielle Realisierung.....	159
11 Zusammenfassung und Ausblick	167
12 Danksagung.....	169
13 Literaturverzeichnis	171
14 Anhang.....	175

Contents

List of Figures	XV
List of Tables	XXIII
List of abbreviations	XXV
1 Introduction	1
2 Research Objective and Approach	5
2.1 Research Objective	6
2.2 Approach for Achieving the Research Objective	6
2.2.1 Creating a Self-Supporting Structure by Tessellation and Folding	7
2.2.2 Manufacturing of Individual Parts with Incremental Sheet Forming	8
3 Prototype Building for Testing and Optimization of the Construction Concept.....	9
3.1 Design of the Prototype Building	10
3.2 Specification Book and Risk Assessment	13
3.2.1 Requirements Concerning the Bearing Structure Concept	14
3.2.2 Requirements Concerning the Manufacturing Technology	16
3.2.3 Requirements Concerning the Joining Technology.....	16
4 Tessellation and Folding of Self-Supporting Structures	17
4.1 Optimization of the Tessellation and Folding Method.....	19
4.1.1 Folding of the Geometry based on the Tessellation.....	21
4.1.2 Homogenization of the Tessellation.....	23
4.2 Implementation of the Tessellation- and Folding-Method in a Software-Tool.....	24
4.3 Enhancement of the Software Tool Towards a Holistic Planning Tool for the Design and Detailing Phase.....	29
4.3.1 Data Structure of the Folding.....	29
4.3.2 Elaboration of Component Details Regarding Production and Assembly	33
4.3.2.1 Integration of the Die Geometry	33
4.3.2.2 Joining Details / Extension of the Pyramid for the ISF-Process.....	34
4.3.2.3 Star-shaped Joining Detail / Triangles.....	35
4.3.3 Supplying Data for the Analysis of the Load Bearing Capacity	36
4.3.4 Supplying Planning Data for Manufacturing and Assembly.....	38
4.3.5 Consideration of the Boundary Conditions for Manufacturing	41
4.3.5.1 Alignment of Components.....	42
4.3.5.2 Geometrical Simulation of Bending Process	43
4.3.6 Processing the Output Data of the Software-Tool in a CAD/CAM Software	44
4.4 Review of the Tessellation Method and the Software-Tool	46
5 Concept for Analyzing the Static and Dynamic Load Bearing Characteristics	47
5.1 Preliminary Survey About the Load Bearing Characteristics of Plate Elements with Single- and Multilayered Foldings	48
5.1.1 Sheet Foldings Under Bending Load	48

5.1.1.1	Longitudinal Foldings.....	49
5.1.1.2	Point Foldings.....	50
5.1.2	Analysis of Load Bearing Capacity of Lightweight Foldings with Non-Linear Finite Element Method	51
5.1.2.1	Geometrical and Physical Assumptions and Boundary Conditions	51
5.1.2.2	Generation of Geometries and Method of Calculation	51
5.1.2.3	Loads	52
5.1.2.4	Bearing and Junction Conditions	53
5.1.3	Results.....	54
5.1.3.1	Longitudinal Foldings.....	55
5.1.3.2	Point Foldings, Hexagonal Grid	58
5.1.4	Summary	61
5.2	Preliminary Structural Calculations Using an Approximation as Framework Model.....	62
5.3	Detailed Analysis of the Load Bearing Properties Using FE-Simulation	63
5.3.1	General specifications.....	63
5.3.2	Dimensions	64
5.3.3	Load Assumptions	65
5.3.4	Von Mises Equivalent Stress.....	66
5.3.5	Deformations	67
5.3.5.1	Displacement in Z-Direction.....	67
5.3.5.2	Total Displacement.....	68
5.3.5.3	Modal Eigenmode.....	69
5.3.6	Joints	70
5.4	Validation of the FEM Calculation with Trials on Real Components.....	73
5.5	Construction of a Movable Fundament Structure	74
5.5.1	Structural Calculation	77
5.6	Review of the Concept for Static and Dynamic Structural Analysis	78
6	Flexible Manufacturing Chain for the Production of Individual Façade Elements	79
6.1	Production Chain and Selection of Manufacturing Technologies	80
6.2	Principle of the Incremental Sheet Forming (ISF).....	86
6.3	Development of a Flexible Tool Concept.....	90
6.4	Optimization of the Production Chain for Façade Elements	93
6.4.1	Preliminary Tests for the Setup of the ISF Process	93
6.4.2	Preliminary Tests to Minimize the Process Time	101
6.4.3	Measurement of Component Accuracy and Sheet Thickness Distribution Along the Manufacturing Chain	106
6.4.4	Modification of the Production Strategy for Cases of Unfavorable Component Geometry.....	112
6.4.5	Comprehensive Process Optimization for the Entire Manufacturing Chain.....	117
6.5	Review of the Developed Manufacturing Chain.....	119
7	Concept for Joining and Assembly	123
7.1	Assembly Concept.....	124
7.2	Joining Concept.....	126

7.3 Review of the Joining- and Assembly-Concept	132
8 Extension of the Construction Concept towards a Fully-Fledged Building Envelope	133
8.1 Concept for Water Sealing and Drainage	134
8.1.1 Sealing Joints	134
8.1.2 Pyramid Top	135
8.2 Completion of the Outer Edges of the Structure	136
8.3 Concepts for Heat Insulation of the Lightweight System	137
8.3.1 Insulation as an Additional Layer at the Exterior	138
8.3.2 Insulation as an Additional Layer at the Interior	139
8.4 Basic Approaches for the Integration of Translucency and Transparency	141
8.5 Review of the Physical Properties of the Building	145
9 Transferability of the Developed Construction Concept to Larger Dimensions	147
9.1 Transferring the Developed Construction Concept to Existing Large Buildings	148
9.1.1 Case Study St. Anthony Hütte, Oberhausen	149
9.1.2 Case Study Louvre, Cour Visconti, Paris	153
9.2 Review of the Transferability to Larger Dimensions	156
10 Cost Analysis for an Industrial Realization	159
11 Summary and Outlook	167
12 Acknowledgment	169
13 Literature	171
14 Annex	175