

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>IX</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>XXI</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>XXV</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>2 Forschungsziel und Lösungsweg</b> .....	<b>5</b>
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
<b>3 Musterbauwerk zur Erprobung und Optimierung des Baukonzeptes</b> .....	<b>9</b>
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
<b>4 Tesselierung und Faltung selbsttragender Strukturen</b> .....	<b>17</b>
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
<b>5 Analysekonzept für statisches und dynamisches Tragverhalten</b> .....	<b>47</b>
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
<b>6</b>	<b>Flexible Fertigungskette zur Herstellung individueller Fassadenelemente .....</b>	<b>79</b>
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
<b>7</b>	<b>Füge- und Montagekonzept .....</b>	<b>123</b>
7.1	Montagekonzept .....	124
7.2	Fügekonzepkt .....	126

7.3 Kritische Bewertung des Füge- und Montagekonzeptes .....	132
<b>8 Ertüchtigung des Baukonzeptes zur vollwertigen Gebäudehülle.....</b>	<b>133</b>
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
<b>9 Übertragbarkeit des entwickelten Baukonzeptes auf größere Dimensionen.....</b>	<b>147</b>
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
<b>10 Kostenabschätzung für die industrielle Realisierung.....</b>	<b>159</b>
<b>11 Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>167</b>
<b>12 Danksagung.....</b>	<b>169</b>
<b>13 Literaturverzeichnis .....</b>	<b>171</b>
<b>14 Anhang.....</b>	<b>175</b>

# Contents

<b>List of Figures</b> .....	<b>XV</b>
<b>List of Tables</b> .....	<b>XXIII</b>
<b>List of abbreviations</b> .....	<b>XXV</b>
<b>1 Introduction</b> .....	<b>1</b>
<b>2 Research Objective and Approach</b> .....	<b>5</b>
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
<b>3 Prototype Building for Testing and Optimization of the Construction Concept</b> .....	<b>9</b>
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
<b>4 Tessellation and Folding of Self-Supporting Structures</b> .....	<b>17</b>
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
<b>5 Concept for Analyzing the Static and Dynamic Load Bearing Characteristics</b> .....	<b>47</b>
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
<b>6</b>	<b>Flexible Manufacturing Chain for the Production of Individual Façade Elements .....</b>	<b>79</b>
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
<b>7</b>	<b>Concept for Joining and Assembly .....</b>	<b>123</b>
7.1	Assembly Concept.....	124
7.2	Joining Concept.....	126

7.3 Review of the Joining- and Assembly-Concept .....	132
<b>8 Extension of the Construction Concept towards a Fully-Fledged Building Envelope .....</b>	<b>133</b>
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
<b>9 Transferability of the Developed Construction Concept to Larger Dimensions .....</b>	<b>147</b>
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
<b>10 Cost Analysis for an Industrial Realization .....</b>	<b>159</b>
<b>11 Summary and Outlook .....</b>	<b>167</b>
<b>12 Acknowledgment .....</b>	<b>169</b>
<b>13 Literature .....</b>	<b>171</b>
<b>14 Annex .....</b>	<b>175</b>